



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ-ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

Δ.Π.Μ.Σ. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ

**Συμμετέχουσες Σχολές: Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών
Πολιτικών Μηχανικών**

«Το Πρεσσιόμετρο Ménard και εφαρμογές σε Θεσσαλονίκη και Αθήνα»

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

Αναστασία Καραπατή

**Επιβλέπων: Αλέξανδρος Σοφιανός
Καθηγητής Ε.Μ.Π.**

ΑΘΗΝΑ ΙΟΥΛΙΟΣ 2012



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ-ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

Δ.Π.Μ.Σ. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ

Συμμετέχουσες Σχολές: Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών
Πολιτικών Μηχανικών

«Το Πρεσσιόμετρο Ménard και εφαρμογές σε Θεσσαλονίκη και Αθήνα»

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

Αναστασία Καραπατή

Επιβλέπων: Αλέξανδρος Σοφιανός
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ ΙΟΥΛΙΟΣ 2012



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ-ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

Δ.Π.Μ.Σ. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ

**Συμμετέχουσες Σχολές: Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών
Πολιτικών Μηχανικών**

«Το Πρεσσιόμετρο Ménard και εφαρμογές σε Θεσσαλονίκη και Αθήνα»

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

Αναστασία Καραπατή

**Επιβλέπων: Αλέξανδρος Σοφιανός
Καθηγητής Ε.Μ.Π.**

**Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις 06/07/2012
Α. Σοφιανός, Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Β. Παπαδόπουλος, Επίκ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Κ. Λουπασάκης, Λέκτορας Ε.Μ.Π.**

ΑΘΗΝΑ ΙΟΥΛΙΟΣ 2012

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά στην Δοκιμή Πρεσσιομέτρου. Μελετήθηκαν οι θεωρίες που αφορούν σε αυτή την εδαφική δοκιμή και τα παράγωγα μεγέθη αυτής, ενώ παράλληλα αναλύθηκαν οι μετρήσεις που έχουν ήδη πραγματοποιηθεί σε εδάφη της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, βάσει των Ευρωπαϊκών και Ελληνικών Προδιαγραφών. Οι μετρήσεις αυτές στηρίχθηκαν στις ακριβείς οδηγίες εφαρμογής της Πρεσσιομετρικής δοκιμής, τόσο κατά την εκτέλεση αυτής όσο και κατά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Σκοπός αυτών ήταν η σύγκριση των αποτελεσμάτων και η επακόλουθη εξαγωγή συμπερασμάτων για την Πρεσσιομετρική δοκιμή, τόσο σε θεωρητικό, όσο και σε πρακτικό επίπεδο.

Η αιτία που αποφάσισα να μελετήσω τη συγκεκριμένη δοκιμή, υπήρξε το γεγονός ότι στα χρόνια των σπουδών μου χρησιμοποιούσα κυρίως ποιοτικές μεθόδους για τον προσδιορισμό των εδαφικών ιδιοτήτων, κάτι το οποίο με έφερε πολλές φορές στη θέση να αναζητήσω κάτι πιο συγκεκριμένο. Επιπλέον, οι εργαστηριακές δοκιμές, δεν αποφέρουν τα ακριβή αποτελέσματα, λόγω του πολύ μικρότερου μεγέθους του δείγματος, της διατάραξης αυτού κατά τη μεταφορά, αλλά και λόγω της σημαντικής διαφοράς που παρουσιάζουν οι εργαστηριακές συνθήκες από τις πραγματικές συνθήκες του εδάφους. Για τους λόγους αυτούς θέλησα να μελετήσω μία επιτόπου εδαφική δοκιμή, με τις επιτόπου συνθήκες πίεσης, υδροφόρου ορίζοντα, και τα πραγματικά μεγέθη. Οι περιορισμένες γνώεις μου για τα Πρεσσιόμετρα στάθηκαν μία καλή αφορμή για να μάθω περισσότερα για αυτά, μέσω μίας διπλωματικής εργασίας, καθώς θεωρώ πολύ σημαντικές, πιο συγκεκριμένες και πιο ασφαλείς τις ποσοτικές μεθόδους προσδιορισμού των εδαφικών ιδιοτήτων.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω πολλούς ανθρώπους, χωρίς τη συμβολή των οποίων αυτή η διπλωματική εργασία δε θα μπορούσε να γραφεί.

Πρώτα απ' όλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της εργασίας μου κ. Α. Σοφιανό, Καθηγητή Ε.Μ.Π. για την καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής εργασίας και για όλα όσα έμαθα εργαζόμενη υπό την επίβλεψή του.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω την εταιρεία ΕΔΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗ Α.Τ.Ε. για την ευγενή φιλοξενία στις εγκαταστάσεις της και την παροχή όλων των στοιχείων που απαιτούνταν για την παρούσα μελέτη. Όλοι οι εργαζόμενοι της εταιρείας με τους οποίους συνεργάστηκα παρείχαν αφιλοκεδώς το χρόνο και τις συμβουλές τους. Ευχαριστώ ιδιαίτερα τον κ. Απόστολο Ρίτσο για τις συμβουλές, τη βοήθεια, την ενθάρρυνση και την υπομονή του.

Ακόμα, ευχαριστώ τους φίλους μου για τη συμπαράστασή τους και ιδιαίτερα τους Αναστασία Ιλιάδη, Μαρίνα Παπαδήμα, Δημήτρη Λιακάκο και τον αδελφό μου Θέμο, για τη βοήθειά τους σε συγκεκριμένα κομμάτια της εργασίας μου.

Τέλος, οι θερμότερες ευχαριστίες μου ανήκουν στους γονείς μου για την αμέριστη συμπαράστασή τους όλα αυτά τα χρόνια.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η συγκεκριμένη εργασία έχει ως σκοπό τη μελέτη της δοκιμής, του πρεσσιομέτρου Ménard, το εύρος χρήσης και επεξεργασίας των αποτελεσμάτων της δοκιμής, και την πρακτική εφαρμογή σε εδάφη Αθήνας και Θεσσαλονίκης.

Στην παρούσα εργασία γίνεται, αρχικά, μία ιστορική αναδρομή του Πρεσσιομέτρου, ενώ αναλύονται εκτενώς οι θεωρίες πάνω στις οποίες βασίζεται η πρεσσιομετρική δοκιμή. Από τη δοκιμή αυτή μπορεί κανείς να υπολογίσει αρχικά τις κατά Mohr – Coulomb εδαφικές παραμέτρους, δηλαδή τη συνοχή c και τη γωνία εσωτερικής τριβής φ . Έτσι μπορούν στη συνέχεια να υπολογιστούν τα παράγωγα από τη δοκιμή μεγέθη, όπως η φέρουσα ικανότητα και οι καθιζήσεις των θεμελιώσεων, αλλά και οι παραμορφωτικές ιδιότητες, όπως το μέτρο παραμόρφωσης E , ο συντελεστής της μεταβολής του όγκου m_v και ο συντελεστής στερεοποίησης c_v . Ακόμα, δίνεται βάση στον υπολογισμό του συντελεστή ωθήσεων γαιών, σε κατάσταση ηρεμίας, K_0 . Αναφέρονται, στη συνέχεια, οι Ευρωπαϊκές και Ελληνικές Προδιαγραφές πάνω στις οποίες βασίστηκαν οι δοκιμές που έγιναν και οι οποίες στηρίχθηκαν στις ακριβείς οδηγίες εφαρμογής της Πρεσσιομετρικής δοκιμής, τόσο κατά την εκτέλεση αυτής όσο και κατά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Τέλος, παρουσιάζονται και συναξιολογούνται τα αποτελέσματα πρεσσιομετρικών δοκιμών που έλαβαν χώρα στις περιοχές της Θεσσαλονίκης και της Αθήνας, στα πλαίσια διερεύνησης των γεωτεχνικών συνθηκών που επικρατούν στο υπέδαφος αυτών για την κατασκευή σημαντικών έργων. Παράλληλα λαμβάνονται υπόψη στοιχεία από κοντινές δειγματοληπτικές γεωτρήσεις, καθώς και από επί τόπου και εργαστηριακές δοκιμές, όπως και η γεωλογία της περιοχής, ενώ στη βάση δεδομένων που δημιουργείται, συναξιολογούνται οι βασικές πρεσσιομετρικές καμπύλες και τα παράγωγα από αυτές μεγέθη.

ABSTRACT

This paper aims to explore the test of the pressuremeter Ménard, the range of use and processing of the results of the test and its application to soils in Athens and in Thessaloniki.

The present study initially presents a review of the background of the pressuremeter and examines extensively the theories on which the test of the pressuremeter is based upon. This test offers the possibility of calculating the soil parameters according to Mohr – Coulomb, which are the cohesion (c) and the friction angle (φ) of the soils. Therefore, other associated figures can be estimated, like the bearing capacity and settlements of foundation, the deformation properties, the modulus of deformation, the coefficient of volume changes and the coefficient of consolidation. Furthermore, there is an emphasis upon the estimate of the coefficient of earth pressure at rest (K_0). The European and Greek Specifications that apply to such kind of tests like the ones carried out for the purposes of this study are introduced as well. The tests that were conducted were based on the exact instructions of application of the pressuremeter test both during their implementation and during their results. Moreover, the presentation and evaluation of the results provided by the executed tests in Athens and Thessaloniki follow with regard to the examination of the geotechnical conditions of the ground at these areas. Such information is useful as it offers a guideline concerning the construction of infrastructure projects at these areas. Further to all these, evidence from nearby sample boreholes were taken into account, as well as data derived from situ and laboratory tests, like for example the geology of the area. The database that was created provides an assessment of the basic pressuremetric curves and other figures correlated.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	7
1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ.....	7
1.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΕΣΣΙΟΜΕΤΡΟΥ ΜΕΝΑΡD.....	13
1.2.1 Εισαγωγή.....	13
1.2.2 Πρεσσιομετρική δοκιμή.....	14
1.2.3.1 Πρεσσιομετρική βολίδα.....	17
1.2.3.2 Μονάδα ελέγχου.....	18
1.2.3.3 Σύστημα σωλήνων.....	19
2 ΘΕΩΡΙΕΣ ΠΟΥ ΑΦΟΡΟΥΝ ΣΤΗΝ ΠΡΕΣΣΙΟΜΕΤΡΙΚΗ ΔΟΚΙΜΗ.....	20
2.1 Εισαγωγή.....	20
2.2 Βασικές έννοιες.....	21
2.2.1 Παραμόρφωση και Μετατόπιση.....	21
2.2.2 Συνθήκες καταπόνησης σε κατάσταση ισορροπίας.....	26
2.2.3 Ρεολογικές (καταστατικές) εξισώσεις.....	28
2.2.4 Απλοποιώντας το πρόβλημα – Κοιλότητα μηδενικής αρχικής ακτίνας.....	29
2.3 Το ελαστο-πλαστικό μοντέλο.....	32
2.3.1 Ρεολογικές συνθήκες του γραμμικού ελαστικού εδάφους – Περιγραφή του προβλήματος.....	32
2.3.2 Επίλυση του γραμμικού ελαστικού προβλήματος.....	34
2.3.3 Τάσεις και τροπές σε ελαστικό έδαφος.....	35
2.3.4 Πόσο ρεαλιστικό είναι το Ελαστικό έδαφος;.....	38
2.3.5 Ρεολογικές παράμετροι Ελαστο-Πλαστικού εδάφους – Η αρχή της Πλαστικής κατάστασης.....	39
2.3.6 Πεδίο τάσεων – Οριακή Πίεση.....	41
2.3.7 Η θεωρητική Πρεσσιομετρική καμπύλη για ασυμπιεστο έδαφος – Διαδρομή τάσεων.....	44
2.3.8 Οι περιορισμοί στην Ελαστο-πλαστική συμπεριφορά.....	48
2.4 Συνεκτικά εδάφη σε αστράγγιστες συνθήκες.....	49
2.4.1 Η σχέση μεταξύ Διατμητικής και Πρεσσιομετρικής καμπύλης.....	50
2.4.2 Η επιρροή της εδαφικής ευαισθησίας στην πρεσσιομετρική συμπεριφορά.....	53
2.5 Γενικές σχέσεις για την κυλινδρική διαστολή της κοιλότητας σε κάθε έδαφος.....	65
2.5.1 Οι διαφορικές σχέσεις που καθορίζουν την κατανομή της τροπής.....	66
2.5.2 Εξισώσεις που συσχετίζουν τάσεις και τροπές.....	67
2.6 Η επιρροή της ευαισθησίας και της συμπιεστότητας σε κοκκώδες έδαφος.....	71
2.6.1 Η επιρροή της ευαισθησίας σε κοκκώδες έδαφος.....	71
2.6.2 Η επιρροή της συμπιεστότητας σε κοκκώδες έδαφος.....	73
2.7 Η επιρροή της διαστολικότητας σε κοκκώδες έδαφος.....	78
2.7.1 Γραμμικά διαστολικά υλικά.....	78
2.7.2 Η επιρροή της διαστολικότητας στην οριακή πίεση.....	86
2.8 Προσδιορισμός των παραμέτρων αντοχής από τα αποτελέσματα της πρεσσιομετρικής δοκιμής.....	90
2.9 Σύνοψη.....	95
3 ΠΑΡΑΓΩΓΑ ΜΕΓΕΘΗ ΠΡΕΣΣΙΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ.....	99
3.1 Συντελεστής ωθήσεων γαιών σε κατάσταση ηρεμίας, K_0	99
3.2 Παράμετροι διατμητικής αντοχής, c και φ	100
3.2.1 Αστράγγιστη διατμητική αντοχή.....	100
3.2.2 Στραγγισμένη διατμητική αντοχή.....	108
3.3 Μέτρο παραμόρφωσης, E	112

3.4 Φέρουσα Ικανότητα.....	119
4 ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΠΡΕΣΣΙΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	121
4.1 ΕΥΡΩΠΑΙΚΕΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ.....	121
4.1.1 Γενικά.....	121
4.1.2 Ορισμοί.....	122
4.1.3 Εξοπλισμός.....	124
4.1.3.1 Γενικά.....	124
4.1.3.2 Πρεσσιομετρική βολίδα (Pressuremeter probe).....	126
4.1.3.2.1 Πρεσσιομετρική βολίδα με εύκαμπτο κάλυμα (flexible cover).....	128
4.1.3.2.2 Πρεσσιομετρική βολίδα με σχισμές παράλληλες προς τον άξονά του σωλήνα της (slotted tube).....	129
4.1.3.3 Μονάδα ελέγχου (Pressure and volume control unit) (CU).....	130
4.1.3.4 Σύστημα σωλήνων (Connecting lines).....	130
4.1.4 Μετρήσεις και έλεγχος δοκιμής.....	131
4.1.5 Διαδικασία της δοκιμής.....	131
4.1.6 Απαιτήσεις ασφαλείας.....	135
4.1.7 Πρεσσιομετρική καμπύλη.....	135
4.1.8 Αποτελέσματα πρεσσιομετρικής δοκιμής.....	136
4.2 ΕΛΛΗΝΙΚΕΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ.....	137
4.2.1 Γενικά.....	137
4.2.2 Εδάφη.....	137
4.2.2.1 Διάρθρωση οπής.....	138
4.2.2.2 Εκτέλεση πρεσσιομετρικής δοκιμής.....	140
4.2.2.3 Βαθμονόμηση πρεσσιομέτρου.....	140
4.2.2.4 Διόρθωση όγκου.....	141
4.2.2.5 Διόρθωση πιέσεων.....	141
4.2.2.6 Παρουσίαση αποτελεσμάτων – Πρεσσιομετρική καμπύλη	143
4.2.3 Βράχοι	146
4.2.3.1 Εκτέλεση της δοκιμής.....	146
5 ΟΔΗΓΙΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΠΡΕΣΣΙΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ- ΕΠΙΛΥΣΗ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΟΣ	148
5.1 Απώλειες όγκου.....	148
5.2 Απώλειες πιέσεων.....	153
5.3 Ανάλυση Δοκιμής.....	157
5.4 Ερμηνεία αποτελεσμάτων.....	160
5.3.1 Οριακή πίεση.....	164
5.3.2 Πίεση ερπυσμού.....	165
5.3.3 Όγκος Vf.....	165
5.3.4 Οριζόντια ολική πίεση ηρεμίας, p_0 (και p_{0M}).....	166
5.3.5 Καθαρή οριακή πίεση p^*1	167
5.3.6 Πρεσσιομετρικό μέτρο παραμόρφωσης EM.....	167
6. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.....	170
6.1 ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΠΡΕΣΣΙΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ	170
6.1.1 Γεωλογία της περιοχής.....	170
6.1.2 Διεξαγωγή των πρεσσιομετρικών δοκιμών.....	171
6.1.3 Αξιολόγηση πρεσσιομετρικών δοκιμών.....	175
6.2 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΠΡΕΣΣΙΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ	

ΛΕΚΑΝΟΠΕΔΙΟΥ ΤΗΣ ΑΘΗΝΑΣ.....	179
6.2.1 Γεωλογία της περιοχής.....	180
6.2.2 Διεξαγωγή των πρεσσιομετρικών δοκιμών.....	180
6.2.3 Αξιολόγηση πρεσσιομετρικών δοκιμών.....	181
7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	188
8 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	191

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα1. 1: Το πρώτο πρεσσιόμετρο Ménard.....	8
Σχήμα1. 2: Ιστορία πρεσσιομετρικού εξοπλισμού.....	11
Σχήμα1. 3: Ιστορία αναλύσεων πρεσσιομετρικών δοκιμών.....	12
Σχήμα1. 4: Βασικές αρχές πρεσσιομέτρου.....	16
Σχήμα1. 5: Τμήμα Πρεσσιομετρικής βολίδας τύπου GC.....	17
Σχήμα1. 6: Μονάδα ελέγχου πρεσσιομέτρου τύπου GC.....	18
Σχήμα2. 1: Επέκταση της κυλινδρικής κοιλότητας: αρχικές και πραγματικές συντεταγμένες.....	22
Σχήμα2. 2: Παραμόρφωση του αρχικού τετράγωνου στοιχείου	23
Σχήμα2. 3: Καταπόνηση σε παραμορφωμένο στοιχείο.....	27
Σχήμα2. 4: Σύγκριση τεσσάρων κοιλοτήτων.....	31
Σχήμα2. 5: Τάσεις σε ελαστικό έδαφος.....	35
Σχήμα2. 6: Κύκλοι τάσεων Mohr σε ελαστικά εδάφη.....	36
Σχήμα2. 7: Τάσεις σε ελαστικό έδαφος: a) Κύκλος Mohr, b) Παραμορφώσεις σε ελαστικό έδαφος.....	37
Σχήμα2. 8: Το αρχικό μέρος της πρεσσιομετρικής καμπύλης $p - \epsilon_0$	38
Σχήμα2. 9: Διορθωμένη πρεσσιομετρική καμπύλη.....	39
Σχήμα2. 10: Αστοχία στα συνεκτικά εδάφη.....	40
Σχήμα2. 11: Αστοχία σε συνεκτικά και με γωνία τριβής εδάφη.....	41
Σχήμα2. 12: Τάσεις στα ελαστο-πλαστικά εδάφη.....	42
Σχήμα2. 13: Η πρεσσιομετρική καμπύλη ($p, \Delta V$) της ελαστο-πλαστικής φάσης, σε συνεκτικό έδαφος, η διαδρομή των τάσεων (stress path).....	46
Σχήμα2. 14: Πρεσσιομετρική καμπύλη ($p, \Delta V$) ελαστο-πλαστικού εδάφους με συνοχή και φωνία τριβής και η διαδρομή των τάσεων (stress path).....	48
Σχήμα2. 15: Σχέση μεταξύ διατμητικής και πρεσσιομετρικής καμπύλης σε συνεκτικό έδαφος για αστράγγιστη συμπεριφορά.....	52
Σχήμα2. 16: Σύγκριση ευαίσθητου και ελαστο-πλαστικού εδάφους a) διατμητικές καμπύλες, b) πρεσσιομετρικές καμπύλες, c) – Διαδρομή τάσεων (Stress paths).....	54
Σχήμα2. 17: Σύγκριση πρεσσιομετρικών αποτελεσμάτων.....	56
Σχήμα2. 18: Διάγραμμα για καθαρά συνεκτικά εδάφη.....	58
Σχήμα2. 19: Επιρροή της παραμορφωμένης κοιλότητας.....	60
Σχήμα2. 20: Τυπικές τιμές του I_p	62
Σχήμα2. 21: Διατμητικές καμπύλες που προέρχονται από πρεσσιομετρικές καμπύλες άθικτου και διαταραγμένου εδάφους.....	64
Σχήμα2. 22: Διαδρομή που ακολουθείται στο διάστημα (Γ, σ_m) t_m κατά την πρεσσιομετρική δοκιμή.....	69
Σχήμα2. 23: Τάσεις σε ελαστικά και διασταλτικά εδάφη.....	82
Σχήμα2. 24: Κύκλοι Mohr για τάσεις ελαστικών και διασταλτικών εδαφών.....	83
Σχήμα2. 25: Αρχικό ελαστικό κομμάτι των πρεσσιομετρικών καμπύλων (p, ϵ_0) για ελαστικά και διαστολικά εδάφη.....	84
Σχήμα2. 26: Κύκλοι τάσεων Mohr σε ελαστικό διασταλτικό έδαφος.....	85
Σχήμα2. 27: Καμπύλη διαστολικότητας.....	87
Σχήμα2. 28: Πιθανό εύρος σφάλματος στην υπολογιζόμενη γωνία τριβής για κοκκώδη εδάφη με αόριστες ή ορισμένες πρεσσιομετρικές παραμέτρους.....	92
Σχήμα2. 29: Σφάλμα στην γωνία τριβής για κοκκώδες έδαφος που υπολογίζεται από την p_F και την p_L χρησιμοποιώντας ένα ασυμπίεστο, ελαστο-πλαστικό μοντέλο για το υλικό.....	94
Σχήμα3. 1: Διατμητική καμπύλη που προκύπτει από πρεσσιομετρικές δοκιμές.....	101
Σχήμα3. 2: Διάγραμμα $c_u - p^* I$	103
Σχήμα3. 3: Πρεσσιομετρική c_u και εργαστηριακή c_u (Meigh ans Greenland, 1965).....	105

Σχήμα3. 4: Σύγκριση αστράγγιστης διατμητικής αντοχής (Roy et al. 1975).....	108
Σχήμα3. 5: Διάγραμμα Ménard για τον καθορισμό του ϕ' από την οριακή πίεση.....	109
Σχήμα3. 6: Διάγραμμα Calhoon για τον καθορισμό της ϕ' από την οριακή πίεση και το μέτρο παραμόρφωσης.....	110
Σχήμα3. 7: Σύγκριση γωνίας τριβής για άμμο (Laiet, 1973)	111
Σχήμα3. 8: Σύγκριση μέτρου παραμόρφωσης για ευαίσθητη άργιλο (Shields, Bauer, 1975).....	112
Σχήμα3. 9: Σύγκριση plate bearing και πρεσσιομετρικού μέτρου παραμόρφωσης.....	113
Σχήμα3. 10: Σύγκριση διαδρομών τάσεων.....	114
Σχήμα3. 11: Πίνακας τιμών του α	115
Σχήμα3. 12: Επιρροή μεθόδου διάτρησης στο μέτρο παραμόρφωσης (Roy et al. 1975).....	117
Σχήμα3. 13: Επιρροή μεθόδου διάτρησης στο μέτρο παραμόρφωσης (Shields and Bauer, 1975)..	118
Σχήμα4. 1: Κατάλληλες διάμετροι βολίδας σε σχέση με τη διάμετρο της γεώτρησης.....	121
Σχήμα4. 2: Αρχή πρεσσιομετρικής δοκιμής Ménard.....	123
Σχήμα4. 3: Διάγραμμα Πρεσσιομέτρου Ménard.....	125
Σχήμα4. 4: Πρεσσιομετρική βολίδα.....	127
Σχήμα4. 5: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά πρεσσιομετρικής βολίδας.....	128
Σχήμα4. 6: Εγκάρσια τομή πρεσσιομετρικής βολίδας με σχισμές παράλληλες προς τον άξονά του σωλήνα της (slotted tube).....	130
Σχήμα4. 7: (Εύρος μετρήσεων για τις συσκευές που χρησιμοποιούνται στην Πρεσσιομετρική δοκιμή Ménard).....	131
Σχήμα4. 8: Διάγραμμα πίεσης-χρόνου για πρεσσιομετρική δοκιμή Menard.....	134
Σχήμα4. 9: Πρεσσιομετρικές καμπύλες.....	136
Σχήμα4. 10: Κατάλληλες διάμετροι βολίδας σχετικά με τη διάμετρο της γεώτρησης.....	140
Σχήμα4. 11: Σχηματική απεικόνιση πρεσσιομέτρου, εντός υδροφόρου ορίζοντα.....	142
Σχήμα4. 12: Πρεσσιομετρική καμπύλη.....	145
Σχήμα4. 13: Εпруστική καμπύλη	145
Σχήμα5. 1: Βαθμονόμηση όγκου πρεσσιομέτρου GC	149
Σχήμα5. 2: Παράδειγμα πραγματικών καμπύλες βαθμονόμησης όγκου για πρεσσιόμετρα τύπου GC και E.....	151
Σχήμα5. 3: Βαθμονόμηση απωλειών όγκου για πρεσσιόμετρο τύπου GC.....	152
Σχήμα5. 4: Βαθμονόμηση βολίδας τύπου GC με χαλύβδινο κάλυμα	155
Σχήμα5. 5: Πίνακες καταγραφής και καμπύλη αντίστασης της μεμβράνης	156
Σχήμα5. 6: Παραδείγματα αντίστασης μεμβράνης για βολίδες τύπου E και GC. (BRU, 1974).....	157
Σχήμα5. 7: Πίνακες καταγραφής μετρήσεων της πρεσσιομετρικής δοκιμής.....	159
Σχήμα5. 8: Πίνακας καταγραφής αποτελεσμάτων και πρώτη πρεσσιομετρική καμπύλη.....	160
Σχήμα5. 9: Υπολογισμοί διορθωμένων όγκων και πιέσεων για την πρεσσιομετρική δοκιμή.....	162
Σχήμα5. 10: Διορθωμένη πρεσσιομετρική καμπύλη.....	163
Σχήμα5. 11: Διορθωμένη πρότυπη καμπύλη δοκιμών σε γρανιτικό έδαφος.....	164
Σχήμα5. 12: Διάγραμμα εпруσμού	165
Σχήμα6. 1: Βολίδες Ménard τύπου G.....	172
Σχήμα6. 2: Ρεολογικός συντελεστής α	174
Σχήμα6. 3: Βιβλιογραφικά εύρη τιμών.....	174
Σχήμα6. 4: Συγκριτική θεώρηση πρεσσιομετρικών παραμέτρων.....	175
Σχήμα6. 5: Κατανομή λεπτόκοκκων υλικών.....	176
Σχήμα6. 6: Κατανομή αδρόκοκκων υλικών.....	176
Σχήμα6. 7: Συνολική κατανομή.....	177
Σχήμα6. 8: Διάγραμμα $c_u - p^*L$ για αργίλους.....	178
Σχήμα6. 9: Συγκριτική θεώρηση πρεσσιομετρικών παραμέτρων για Τεταρτογενείς Σχηματισμούς	

.....	182
Σχήμα6. 10: Συγκριτική θεώρηση πρεσσιομετρικών παραμέτρων για Νεογενείς Σχηματισμούς...	182
Σχήμα6. 11: Συγκριτική θεώρηση πρεσσιομετρικών παραμέτρων για Αλπικούς Σχηματισμούς...	183
Σχήμα6. 12: Κατανομή λεπτόκοκκων υλικών.....	184
Σχήμα6. 13: Κατανομή αδρόκοκκων υλικών.....	184
Σχήμα6. 14: Συνολική κατανομή Τεταρτογενών Σχηματισμών.....	185
Σχήμα6. 15: Συνολική κατανομή Νεογενών Σχηματισμών.....	186
Σχήμα6. 16: Συνολική κατανομή Αλπικών Σχηματισμών.....	186
Σχήμα6. 17: Διάγραμμα cu - p*L για Ερυθροπηλίτες.....	187

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Στις 19 Ιανουαρίου 1955, στον Louis François Auguste Ménard , μαθητής ακόμα στην École Nationale des Ponts et Chaussées, δόθηκε από έναν παλαιότερο μαθητή της σχολής του, τον Pierre Regimbeau, ένα δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για μια συσκευή που αναφερόταν ως πρεσσιόμετρο. Το όνομα «πρεσσιόμετρο» χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά τότε, αλλά σαν συσκευή είχε αναπτυχθεί το 1933 από τον Kögler.

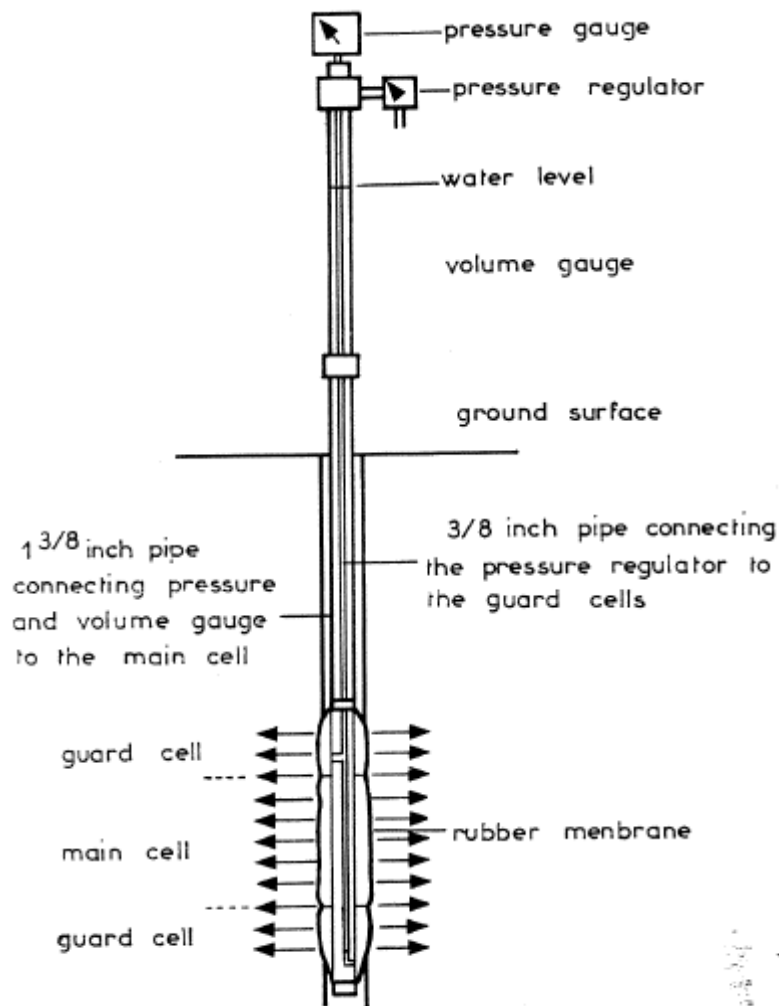
Η ιδέα του «πρεσσιόμετρου» από τον Louis Ménard ήλθε κατά τη διάρκεια της καλοκαιρινής πρακτικής άσκησης του σε κάποιο εργοτάξιο και η θεωρία του πρεσσιόμετρου ήταν το θέμα της τελικής διπλωματικής εργασίας του στην ENPC, υπό την επίβλεψη του καθηγητή Kérisel. Έτσι, ο Ménard κατασκεύασε ένα πρωτότυπο πρεσσιόμετρο που δοκιμάστηκε, στη συνέχεια, κατά τη διάρκεια των δύο ετών που πέρασε στο Talbot Laboratoty του University of Illinois με καθηγητή τον R. Peck. Ο Ménard κατά τη διάρκεια της συγκεκριμένης έρευνας συνειδητοποίησε ότι ήταν υψίστης σημασίας να υπολογίσει έναν συντελεστή παραμόρφωσης του εδάφους χρησιμοποιώντας τη θεωρία του Lamé, αν και αμφέβαλλε για το κατά πόσο τα αποτελέσματα ήταν ισοδύναμα με το μέτρο ελαστικότητας του Young, όπως συνεπάγεται η θεωρία του Lamé. Ανακάλυψε, επίσης, μια γραφική διαδικασία η οποία θα μπορούσε να εφαρμοστεί σε μια καμπύλη δοκιμή και να απλοποιήσει σημαντικά τους απαιτούμενους για τη νέα θεωρία του υπολογισμούς.

Οι πρώτες εξισώσεις σχεδιασμού και τα πρώτα διαγράμματα που αφορούν στα αποτελέσματα των πρεσσιομετρικών δοκιμών σχετικά με τη θεμελίωση εμφανίστηκαν στο Sols-Soils το 1963. Από τότε σηματοδοτείται μια σειρά προσανατολισμένων άρθρων και δημοσιεύσεων που συνεχίζονται μέχρι σήμερα. Από το 1967 περίπου κατέστη δυνατός ο πρακτικός σχεδιασμός οποιασδήποτε θεμελίωσης σε κάθε τύπο εδάφους, βάσει των αποτελεσμάτων των δοκιμών με πρεσσιόμετρα Ménard.

Η πρακτική εμπειρία της δεκαετίας του '60, οδήγησε στην ανάπτυξη ενός διατρητικού πρεσσιόμετρου (Self-boring pressuremeter - SBP), στην προσπάθεια να προσδιοριστεί τι θα συνέβαινε αν η βολίδα μπορούσε να εισαχθεί στο έδαφος χωρίς να προηγηθεί γεώτρηση. Πάνω σε αυτό δούλεψαν πολλοί, με το εργαστήριο Saint Brieuc του Ponts et Chaussées να έχει την πρώτη λειτουργία αυτού το 1967. Σήμερα το διατρητικό

πρεσσιόμετρο χρησιμοποιείται σε μαλακές ως πολύ σφιχτές αργίλους και σε πτωχές ως πυκνές άμμους.

Αργότερα, το 1969, πρωτοεισήχθει το πρεσσιόμετρο Ménard, (Σχήμα 1.1) στην περιοχή του Σικάγο, με τους εμπειρικούς κανόνες του ίδιου για τη χρήση και την ερμηνεία των δεδομένων που λαμβάνονται από τη δοκιμή. Ήταν φανερό η χρησιμότητά του για την ανάπτυξη πιο αποδοτικού και καινοτόμου σχεδιασμού θεμελίωσης.



Σχήμα1. 1: Το πρώτο πρεσσιόμετρο Ménard

Μία πρώιμη έρευνα από τους Lukas, Debussy και άλλους το 1976 ανέφερε ότι η πίεση ερπυσμού όπως προσδιορίζεται κατά την εκτέλεση των επί τόπου πρεσσιομετρικών δοκιμών, μπορεί να συγκριθεί ικανοποιητικά με την πίεση προ στεροποίησης,

καθορισμένη από δοκιμές στεροποίησης. Μια δυσκολία καθορισμού της πίεσης προ στεροποίησης από τις δοκιμές στεροποίησης είναι η δυσκολία λήψης αδιατάραχτου δείγματος και αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δυσκολία ερμηνείας των αποτελεσμάτων.

Όσον αφορά στην ερμηνεία και τη χρήση των αποτελεσμάτων των πρεσσιομετρικών δοκιμών, οι δύο πιο κοινές προσεγγίσεις περιγράφονται από τον Ménard το 1975 και από τον Briaud το 1992. Πρόκειται για κάποιες ημι-εμπειρικές θεωρίες, αλλά και για τη θεωρία ελαστικότητας, κατά την οποία τα αποτελέσματα της πρεσσιομέτρησης χρησιμοποιούνται για να καθοριστεί ένα ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας του Young. Δεδομένου ότι το μέτρο ελαστικότητας του Young ποικίλλει ανάλογα με το έδαφος, μια σωστή θεωρητική προσέγγιση θα ήταν να γίνουν κάποιες ειδικές δοκιμές τάσης - τροπής.

Ο Louis Ménard εργάστηκε σε αυτό για σχεδόν 20 χρόνια μέχρι τον πρόωρο θάνατό του στις 15 Ιανουαρίου 1978. Πράγματι, το έργο του για τη βελτίωση του εδάφους που, όπως αναφέρθηκε, αρχίζει από τα τέλη της δεκαετίας του '60 δεν θα είχε αυτή την πρόοδο χωρίς αυτό το εργαλείο, το οποίο του παρείχε τη δυνατότητα σύγκρισης της ικανότητας παραμόρφωσης του εδάφους πριν και μετά τη βελτίωση αυτού.

Μετά το θάνατό του, οι μελέτες και οι απόψεις για τα πρεσσιόμετρα συνεχίστηκαν και διοργανώθηκαν μια σειρά από διεθνή συνέδρια, αρχικά για τη χρήση του πρεσσιομέτρου στη θάλασσα:

- στις 19 και 20 Απριλίου 1982, στο Παρίσι (Συνέδριο για την Πρεσσιομετρία και τις εφαρμογές της στη θάλασσα / Symposium sur la pressiometrie et ses application en mer, Institut Francais de Petrole et Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Editors Technip et LCPC, en anglais to 1982, en français to 1984),
- στις 2 και 3 Μαΐου 1986, στο Πανεπιστήμιο A&M του Τέξας (Το πρεσσιόμετρο και οι εφαρμογές του στη θάλασσα / The pressuremeter and its Marine Applications, J.L. Briaud & J.M. Audibert editors, ASTM Special Publication N°950, Philadelphia, 1986),

και στη συνέχεια, γενικότερα για τα πρεσσιομετρα, όπως για την τεχνολογία αυτών, την ανάλυση και την ερμηνεία των αποτελεσμάτων των δοκιμών ή και το σχεδιασμό γεωτεχνικών έργων.

- στις 2 έως 6 Απριλίου 1990, στο Πανεπιστήμιο του Όξφορντ (Πρεσσιόμετρα / Pressuremeters , ISP3, Thomas Telford, London, 1990), σε ένα συνέδριο που διοργανώθηκε για τη βρετανική Γεωτεχνική Κοινότητα από τους καθηγητές C.P.

Wroth, R. Driscoll G.T. και Houlsby, και

- στις 17 έως 19 Μαΐου 1995, στο Πανεπιστήμιο Sherbrooke (Το πρεσσιόμετρο και νέοι δρόμοι / Le pressiometre et ses nouvelles orientations, G. Ballivy editor/redacteur, A.A. Balkema, Rotterdam, 1995).

Στο 4^ο αυτό συνέδριο δόθηκε η πρώτη Διάλεξη Ménard, από τον Branko Ladanyi, επίτιμο καθηγητή του École de Polytechnique de Montreal, ο οποίος ήταν και από τους πρώτους που ανέπτυξε τη διατριβή του για την επέκταση της κυλινδρικής ελαστικής μεμβράνης στην άμμο, με επιβλέποντα καθηγητή τον De Beer.

Το 2005, ο Clyde Baker, αντιπρόεδρος της STS Consultants στις ΗΠΑ, μίλησε για τη χρήση μεθόδων σχεδιασμού οι οποίες χρησιμοποιούν άμεσα τις παραμέτρους του εδάφους που εκτιμούνται από τις πρεσσιομετρικές δοκιμές.

Αυτό το διεθνές συνέδριο, ανήκε στα δίγλωσσα συνέδρια, με ταυτόχρονη μετάφραση, οργανωμένα από το Laboratoire Central des Ponts et Chaussées και το École Nationale des Ponts et Chaussées από το 2002: PARAM 2002, FONDSUP 2003, ASEP-GI 2004. Είχε ως αποτέλεσμα την ανταλλαγή εμπειριών και απόψεων στον τομέα των δοκιμών, την ερμηνεία των αποτελεσμάτων και την εφαρμογή των παραμέτρων έτσι ώστε να λαμβάνονται αποφάσεις για τον σχεδιασμό ή τον έλεγχο βελτίωσης του εδάφους. Αντικείμενο ιδιαίτερης προσοχής ήταν η χρήση των πρεσσιομετρικών δοκιμών κυρίως σε εδάφη, αλλά και οι συσχετίσεις μεταξύ των παραμέτρων. Στο συνέδριο αυτό, δόθηκε, επίσης, η ευκαιρία εξέλιξης της τεχνολογίας, με τη χρήση εξοπλισμού που βασίζεται στην επέκταση της κυλινδρικής ελαστικής μεμβράνης στα εδάφη και στα πετρώματα σε όλο τον κόσμο, ενώ παράλληλα εξετάστηκαν οι πιο πρόσφατες και αναγκαίες έρευνες. Ακόμη, στο συνέδριο προτάθηκε και συζητήθηκε ειδικότερα η ερμηνεία των καμπύλων Ménard και η χρήση των παραμέτρων που λαμβάνονται για τον υπολογισμό του σχεδιασμού της θεμελίωσης. Τέλος, στον δεύτερο τόμο αυτού, υπάρχουν δημοσιεύσεις σχετικά με τη χρήση του πρεσσιομέτρου, τις διαλέξεις και λοιπά επιπλέον έγγραφα.

Κλείνοντας, αξίζει να αναφερθεί το γεγονός ότι οι παρατηρήσεις πολλών μηχανικών και ερευνητών ανά τον κόσμο, έχουν ως κοινό σημείο ότι χωρίς το πρεσσιόμετρο Ménard, αλλά και τους εμπειρικούς κανόνες αυτού οι δυσκολίες ως προς τον προσδιορισμό της παραμόρφωσης του εδάφους ή ακόμα και του μαλακού βράχου θα ήταν μέχρι και σήμερα πολύ μεγαλύτερες.

Στο Σχήμα 1.2 δίνεται επιγραμματικά η ιστορία του πρεσσιομετρικού εξοπλισμού,

ενώ στο Σχήμα 1.3 φαίνεται ιστορικά η ανάπτυξη της ανάλυσης των πρεσσιομετρικών δοκιμών.

PDP types

- 1933 Kögler's borehole side tester
- 1955 Menard's patent: a 3 cell pressuremeter
- 1957 Menard incorporates his company
- 1957 MPM D type: 1 MPa, 12 m depth
- 1959 MPM slotted tube (Fig. 3b) and coaxial tubing patented
- 1960's MPM G types: 5-10 MPa, no depth limit (Fig. 3a)
- 1971 LCPC standard for MPM testing
- 1971 Oyo Elastmeter 100: 10 MPa, LVDT (Fig. 3c)
- 1980's High pressure dilatometers
 - Oyo Elastmeter 200: 20 MPa, 6 rods with CB
 - Cambridge Insitu HPD: 20 MPa, 3 diameter strain gauged springs (Fig. 3d)

SBP types

- 1968 LCPC PAF self-boring pressuremeter for weak soils (Fig. 3e)
- 1973 Cambridge self-boring pressuremeter for the same (Fig. 3f)
- 1976 LCPC PAFSOR (with downhole motor) for weak rock
- 1980 IFP PAM for offshore jobs
- 1987 PM Insitu weak rock SBP (Fig. 3h)
- 1989 IFP WSLBP for offshore jobs

Others

- 1975 Menard mini-pressuremeter (to be driven into the soil)
- 1977 BRE Stressprobe PIP for offshore jobs
- 1978 LCPC-Menard cone pressuremeter for offshore jobs

Σχήμα1. 2: Ιστορία πρεσσιομετρικού εξοπλισμού

- 1852 Expansion of a cylindrical cavity in an elastic medium
(Lamé)
- 1945 Expansion of a cylindrical cavity in an elasto-plastic medium
(Bishop, Hill and Mott)
- 1955 Menard work at Ecole Nationale des Ponts et Chaussées
- 1956 Menard Master of Science thesis at the University of Illinois,
Champaign, USA
- 1961 Ladanyi work on slow tests in clays and tests in sand
- 1961 Gibson and Anderson work for undrained clays and for sands
- 1962 Menard settlement estimate approach
- 1963 Menard bearing capacity approach
- 1964 Menard retaining structure design approach
- 1966 Salençon work assuming volume change
- 1968 Jézéquel et al on the influence of installation procedure
- 1972 Separate works of Baguelin et al., and Palmer, assuming no
volume change, and Vesic (with volume change)
- 1977 Windle and Wroth work on stiff clay with SBP
- 1977 Hughes, Wroth and Windle work on sands with SBP using
Rowe's stress dilatancy theory
- 1985 Hughes and Robertson work on full displacement PMT in
sand
- 1988 Houlsby and Withers work on cone pressuremeter test in clay

Σχήμα1. 3: Ιστορία αναλύσεων πρεσσιομετρικών δοκιμών

1.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΕΣΣΙΟΜΕΤΡΟΥ ΜΕΝΑΡΔ

1.2.1 Εισαγωγή

Η πρεσσιομετρική δοκιμή είναι μία δοκιμή μέτρησης εδαφικών ιδιοτήτων, οι οποίες έχουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα:

Πλεονεκτήματα δοκιμών μέτρησης πεδίου

- Δίνεται η δυνατότητα μέτρησης των ιδιοτήτων του εδάφους σε επιτόπου συνθήκες πίεσης,
- δεν υπάρχουν διαταραχές λόγω μεταφορά του δείγματος κατά τη διάρκεια της δοκιμής, και
- υπάρχει η δυνατότητα έρευνας μεγάλων όγκων εδάφους συγκριτικά με άλλες μεθόδους μέτρησης των εδαφικών ιδιοτήτων, όπως για παράδειγμα οι εργαστηριακές δοκιμές.

Μειονεκτήματα δοκιμών μέτρησης πεδίου

- Οι συνθήκες που είναι αναγκαίες για τις δοκιμές δεν μπορούν να εφαρμοστούν εύκολα στο έδαφος,
- δεν είναι εύκολο να ελέγχονται οι υδρολογικές συνθήκες της περιοχής, και
- για τις περισσότερες δοκιμές οι ιδιότητες του εδάφους δεν μετρούνται, αλλά προκύπτουν θεωρητικά ή εμπειρικά.

Δοκιμές χαμηλής τροπής

Μία σειρά δοκιμών μέτρησης του εδάφους χαμηλής τροπής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση των δυναμικών ιδιοτήτων του εδάφους και την ταχύτητα της διάδοσης κυμάτων αυτού. Υπάρχουν οι δοκιμές που καθορίζουν τις ιδιότητες του εδάφους από τις επιφανειακές μετρήσεις, συμπεριλαμβανομένων των σεισμικών μετρήσεων – συνήθως χρησιμοποιείται για τη μέτρηση του V_p , αλλά και του συνεχούς επιφανειακού κύματος (continuous surface wave - CSW) ή για τη φασματική ανάλυση των επιφανειακών κυμάτων (spectral analysis of surface waves - SASW). Έτσι μετράται το V_R από το οποίο υπολογίζεται το V_s . Ακόμα, υπάρχουν και οι δοκιμές χαμηλής τροπής που προσδιορίζουν τις εδαφικές παραμέτρους σε γεωτρήσεις, συμπεριλαμβανομένων των σεισμικών μεταξύ

γεωτρήσεων και εντός γεωτρήσεων δοκιμών – οι οποίες χρησιμοποιούνται για να υπολογιστούν τα V_p και V_s , αλλά και αντίστοιχες δοκιμές παραμέτρων απόσβεσης.

Δοκιμές υψηλής τροπής

Για την πλειοψηφία των δοκιμών υψηλής τροπής, η δυσκαμψία του εδάφους λαμβάνεται από εμπειρικές συσχετίσεις με άλλες, μη συνδεδεμένες με τις δοκιμές, παράμετρους. Αυτές οι δοκιμές περιλαμβάνουν επιτόπου δοκιμές SPT, CPT και DMT. Η πρεσσιομετρική δοκιμή Ménard είναι η εξαίρεση: με τη βοήθεια της δοκιμής Ménard υπολογίζεται άμεσα η δυσκαμψία του εδάφους, μέσω της σχέσης “τάσης-τροπής” του.

1.2.2 Πρεσσιομετρική δοκιμή

Ο σκοπός της δοκιμής του πρεσσιομέτρου είναι η μέτρηση της επί τόπου παραμόρφωσης του εδάφους ή ακόμα και του μαλακού βράχου από τη διαστολή κυλινδρικής ελαστικής μεμβράνης υπό πίεση. Καταγράφονται σχέσεις τάσης – παραμόρφωσης με παραδοχή επίπεδης έντασης και προσδιορίζεται η οριακή αντοχή του εδάφους (Αναγνωστόπουλος, 2006).

Κατά τη δοκιμή, εισάγεται βολίδα (probe) που αποτελείται από κυλινδρική ελαστική μεμβράνη, μέσα στο έδαφος, μέσω γεώτρησης. Σε αυτή διοχετεύεται υγρό μέσω αγωγών και στο προκαθορισμένο βάθος η μεμβράνη διαστέλλεται υπό πίεση. Από τη μεταβολή του όγκου της κυλινδρικής μεμβράνης μετράται η διαστολή και καταγράφονται οι μετρήσεις της πίεσης και της διαστολής.

Έτσι, η δοκιμή πρεσσιομέτρησης παρέχει σημαντικές πληροφορίες για το μέτρο ελαστικότητας και την παραμορφωσιμότητα, καθώς και τη φέρουσα ικανότητα των σχηματισμών, ενώ έμμεσα δίνει στοιχεία και για τις διατμητικές αντοχές των υλικών που εξετάζονται.

Γενικά υπάρχουν τέσσερις τύποι πρεσσιομέτρου, ανάλογα με τον τρόπο εισαγωγής της βολίδας στο έδαφος και αυτοί είναι:

- Πρεσσιόμετρο σε προϋπάρχουσα γεώτρηση - Pre-bored pressuremeter (PBP)
- Πρεσσιόμετρο Ménard - Ménard pressuremeter (MPM)
- Διατρητικό Πρεσσιόμετρο - Self-boring pressuremeter (SBP)
- Πρεσσιόμετρο πλήρους μετατόπισης - Full displacement pressuremeter (FDP)

Οι δοκιμές (PBP) και (MPM) εκτελούνται σε ανοιγμένη για το συγκεκριμένο σκοπό γεώτρηση. Η δοκιμή (SBP) δημιουργεί την οπή για την εισαγωγή βολίδας μέσω κοπτικής κεφαλής που διαθέτει και, τέλος, η δοκιμή (FDP) εκτελείται με διείσδυση κώνου στο έδαφος.

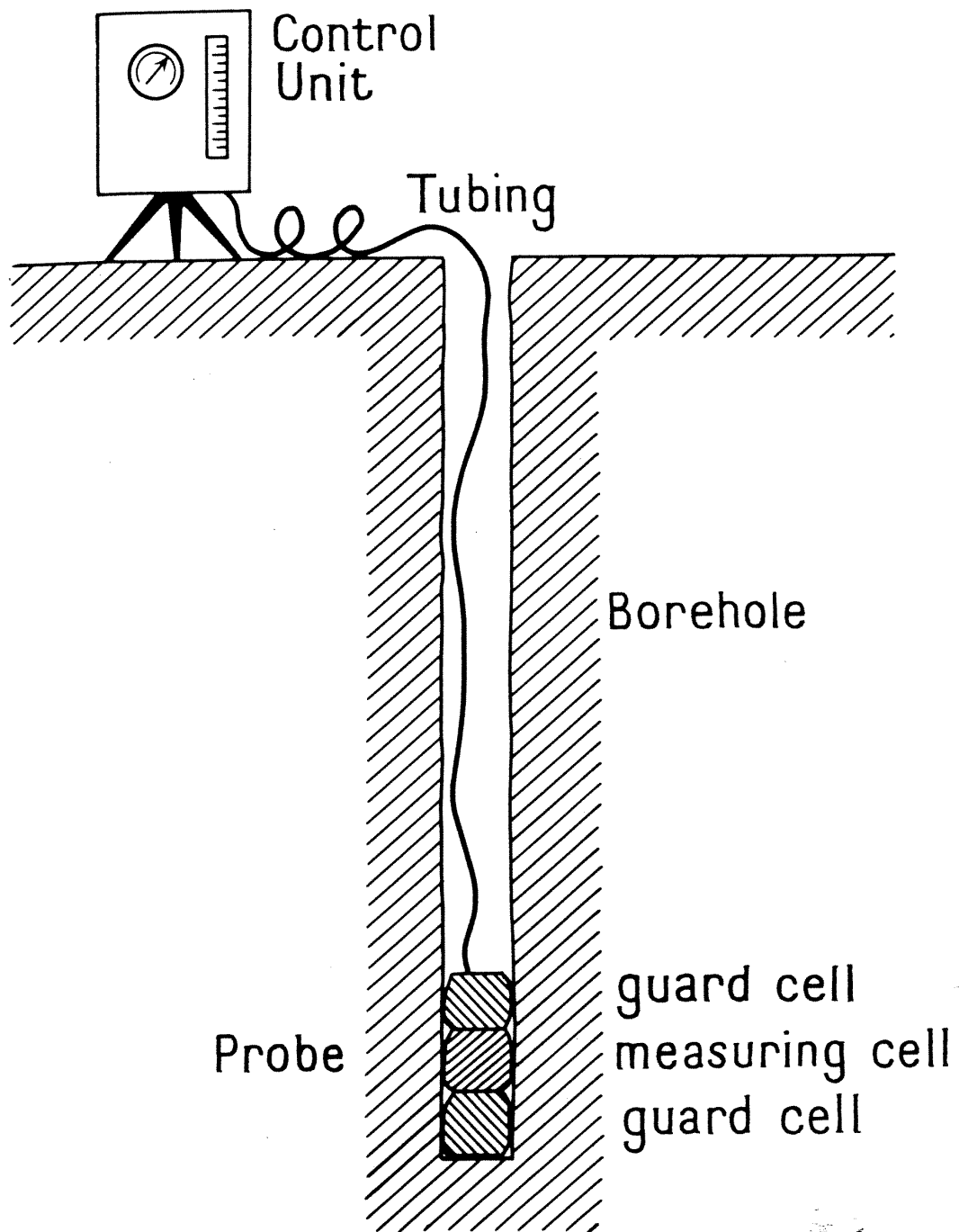
Στη συγκεκριμένη εργασία, αναπτύσσεται και χρησιμοποιείται το Πρεσσιόμετρο Ménard (MPM), καθώς αυτό χρησιμοποιείται κυρίως στην Ελλάδα.

1.2.3 Πρεσσιόμετρα Ménard

Το πρεσσιόμετρο Ménard (Σχήμα 1.4) αποτελείται από τρία κύρια τμήματα :

1. Ένα ακτινικά διογκώσιμο κυλινδρικό όργανο (τορπίλη ή βολίδα) (probe),
2. τη μονάδα ελέγχου (control unit) και
3. ένα σύστημα σωλήνων το οποίο τροφοδοτεί την βολίδα με νερό και πεπιεσμένο αέρα από την επιφάνεια (tubing).

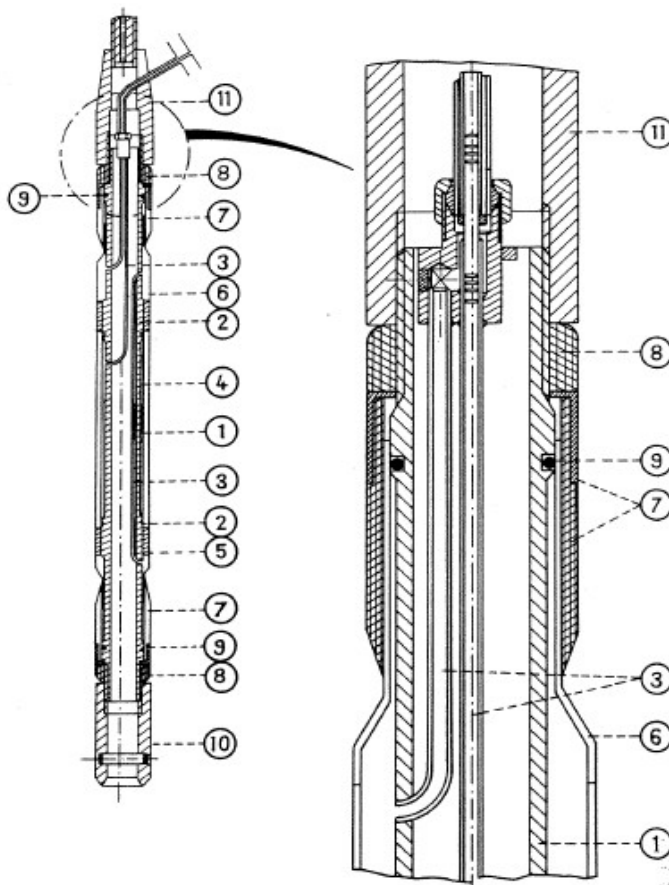
Όλο το σύστημα των εξαρτημάτων του πρεσσιόμετρου (τροφοδοτικοί σωλήνες, βολίδα, κιβώτιο / πίνακας παρακολούθησης) παράγεται σε διάφορες εκδόσεις ανάλογα με το είδος του εδάφους και την απαιτούμενη πίεση. Έτσι υπάρχουν εκδόσεις για μικρές πιέσεις (μαλακά εδάφη), μέσες πιέσεις (στιφρά εδάφη / πολύ μαλακοί βράχοι) και υψηλές πιέσεις (βράχοι).



Σχήμα1. 4: Βασικές αρχές πρεσσιομέτρου

1.2.3.1 Πρεσσιομετρική βολίδα

Η βολίδα ή τορπίλη (probe) βυθίζεται στη γεώτρηση και σταματώντας στο επιθυμητό βάθος διαστέλλεται ασκώντας πιέσεις στην βραχώμαζα. Μετά από κάθε δοκιμή συστέλλεται και μετατοπίζεται σε άλλη θέση στη γεώτρηση. Παράγεται σε διαμέτρους από 32mm έως 80mm για να χρησιμοποιείται σε διάφορες γεωτρήσεις. Στα εδάφη εφαρμόζεται μεγαλύτερη διάμετρος τορπίλης (60~80mm), ενώ στα βραχώδη μικρότερη (π.χ. 44mm).



Σχήμα1. 5: Τμήμα Πρεσσιομετρικής βολίδας τύπου GC

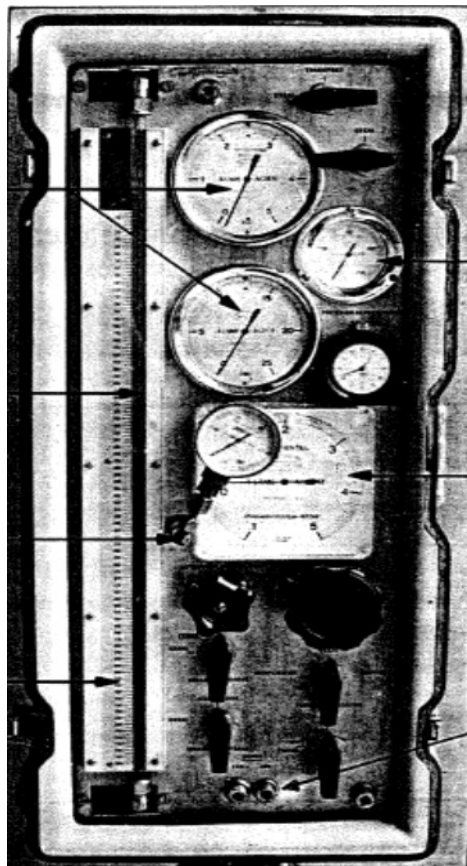
Η βολίδα αποτελείται από έναν χαλύβδινο σωληνωτό σκελετό που εμπεριέχει τις αναγκαίες σωληνώσεις, συνδέσμους και σύστημα ανάρτησης. Αυτός περιβάλλεται από ανθεκτικό ελαστικό σωλήνα ο οποίος λειτουργεί ως διαστελλόμενη μεμβράνη η οποία είναι σταθερώς και στεγανώς συνδεδεμένη στα ακραία τμήματα και έχει τη δυνατότητα να διαστέλλεται πιέζοντας την περιβάλλουσα μάζα. Το πιο φθαρτό μέρος του οργάνου είναι αυτός ο ελαστικός σωλήνας ο οποίος μπορεί να χάσει την ελαστικότητά του, να πληγωθεί, ή ακόμα και να καταστραφεί τόσο από τις διαδοχικές διαστολές, όσο και κατά τη

μετακίνηση της βολίδας μέσα στη γεώτρηση. Έτσι, η ελαστική μεμβράνη αντικαθίσταται κατά κανόνα ανά λίγες δοκιμές.

Σε περιπτώσεις πρεσσιομετρήσεων σε αμμοχαλικώδη ή αμμώδη εδάφη, η τοποθέτηση της βολίδας γίνεται σε συνδυασμό με προστατευτική σωλήνωση της γεώτρησης, η οποία γίνεται από πριν ή ακόμη και με έμπηξη μέσα σε προστατευτικό κλωβό, ενώ η ελαστική μεμβράνη χρειάζεται πρόσθετη προστασία με σύστημα λεπτών μεταλλικών ελασματικών λωρίδων που περιβάλλουν τον ελαστικό σωλήνα και τον αφήνουν να διασταλεί με μικρή παρεμπόδιση.

1.2.3.2 Μονάδα ελέγχου

Η μονάδα ελέγχου ή, αλλιώς, κιβώτιο παρακολούθησης (control unit) βρίσκεται στην επιφάνεια του εδάφους και περιλαμβάνει όλες τις βαλβίδες και τους μετρητές πίεσης που χρειάζονται για την παρακολούθηση της διεξαγωγής της δοκιμής. Περιλαμβάνει καταγραφικό σύστημα το οποίο εμπεριέχει μηχανισμό μέσω του οποίου διοχετεύεται πίεση στη βολίδα σε ίσες ποσότητες.



Σχήμα1. 6: Μονάδα ελέγχου πρεσσιομέτρου τύπου GC

1.2.3.3 Σύστημα σωλήνων

Η βολίδα συνδέεται μέσω ελαστικών ομοαξονικών σωλήνων (tubing) με το κιβώτιο παρακολούθησης. Το σύστημα των σωλήνων τροφοδοτεί την τορπίλη από την επιφάνεια με νερό και πεπιεσμένο αέρα. Αναλυτικότερα, η πρεσσιομετρική βολίδα διαστέλλεται με νερό το οποίο πιέζεται με πεπιεσμένο αέριο. Το πεπιεσμένο αέριο, το οποίο συνήθως είναι άζωτο, θέτει το νερό υπό πίεση και το εισπνέζει στην βολίδα. Το ίδιο αέριο, με την πίεση του, αλλά παροχετευμένο σε άλλες διαδρομές, αποσυμπιέζει και συστέλλει τη μεμβράνη ώστε να μπορεί η βολίδα να μετακινηθεί σε άλλη στάθμη ή να ανασυρθεί από τη γεώτρηση. Οι ομοαξονικοί πλαστικοί σωλήνες (ο εσωτερικός διοχετεύοντας νερό, ο εξωτερικός διοχετεύοντας αέριο) είναι κάθε φορά συναρμολογημένοι σε ενιαίο μήκος, το οποίο είναι τόσο όσο απαιτείται για τη βαθύτερη θέση δοκιμής στην εκάστοτε γεώτρηση. Έτσι αποφεύγονται οι ενδιάμεσες συνδέσεις ή αποσυνδέσεις στο υδραυλικό σύστημα, κάτι το οποίο θα δημιουργούσε περιπλοκές και ανωμαλίες στη διεξαγωγή διαδοχικών δοκιμών στην ίδια γεώτρηση. Οι σωλήνες κατασκευάζονται από ανθεκτικό αλλά ευλύγιστο πλαστικό ώστε να τυλίγονται. Η διαστολή των σωλήνων υπό τις πιέσεις, κάνει τον μετρούμενο όγκο του διοχετευόμενου νερού να είναι μεγαλύτερος από την αντίστοιχη αύξηση του όγκου της τορπίλης και, έτσι, χρειάζεται να γίνει διόρθωση κατά την επεξεργασία των μετρήσεων.

Τα παραπάνω δίνονται αναλυτικά σε επόμενο κεφάλαιο, όπου αναφέρονται οι κανονισμοί και οι Προδιαγραφές των πρεσσιομετρικών δοκιμών.

2 ΘΕΩΡΙΕΣ ΠΟΥ ΑΦΟΡΟΥΝ ΣΤΗΝ ΠΡΕΣΣΙΟΜΕΤΡΙΚΗ ΔΟΚΙΜΗ

2.1 Εισαγωγή

Η πρεσσιομετρική δοκιμή είναι ουσιαστικά η διαστολή ενός απείρως μακρύ κυλίνδρου. Όντως, υπάρχουν επιδράσεις των άκρων, που οφείλονται στο γεγονός ότι η βολίδα είναι πεπερασμένου μήκους και η μεμβράνη συγκρατείται σε κάθε άκρο. Η μελέτη αυτών έχει γίνει μόνο μερικώς, στο αρχικό στάδιο της δοκιμής (Tranter, 1946, Laier, Schmetmann and Schaub, 1975, Waschowski, 1976). Πράγματι, υπάρχει διαφορά ανάμεσα στην πραγματική παραμόρφωση και σε αυτή που θεωρείται ότι γίνεται, η οποία φαίνεται να είναι αρκετά μικρή, ώστε μία απλή διόρθωσή της να είναι επαρκής. Από πρακτικής άποψης, χρησιμοποιείται μία αρκετά μακριά βολίδα και οι εκατέρωθεν θάλαμοι αυτής υπάρχουν ώστε να κάνουν την επίδραση αυτά όσο το δυνατόν μικρότερη. Στο κεφάλαιο αυτό, θεωρείται η ιδανική κυλινδρική διαστολή.

Η διαστολή της κυλινδρικής κοιλότητας αναλύεται με τις υπάρχουσες θεωρίες, οι οποίες μπορούν να επεκταθούν για τις διάφορες εδαφολογικές παραμέτρους. Το γεγονός αυτό δικαιολογεί την έμφαση που δίνεται, καθότι αφήνοντας στην άκρη κάποια υποτυπώδη προβλήματα εφαρμοσμένης μηχανικής, όπως η τριαξονική δοκιμή, οι περισσότερες ενέργειες που λαμβάνουν χώρα στην μηχανική του εδάφους, είτε είναι τα αποτελέσματα των δοκιμών του εδάφους, είτε της πραγματικής κατασκευής δεν μπορούν να αναλυθούν αυστηρά και ολοκληρωμένα. Γενικά, μπορεί να διακριθεί η αρχική φάση, από την τελική συμπεριφορά ή κατάσταση. Υπάρχουν δύο όρια τα οποία μπορούν να αναλυθούν, απλοποιώντας δραστηρίως τη συμπεριφορά του εδάφους (για παράδειγμα, με την παραδοχή ότι είναι απολύτως τέλεια ελαστική ή πλαστική), αλλά και το μηχανισμό που εμπλέκεται (όπως, για παράδειγμα, υποθέτοντας μια κυκλική επιφάνεια αστοχίας τόξου). Ακόμα, είναι πολύ σημαντικό το να γνωρίζει κανείς ότι οι περισσότερες τεχνικές ανάλυσης της συμπεριφοράς του εδάφους γίνονται σε πολύ απλοϊκή βάση.

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύεται η θεωρία της πρεσσιομετρικής δοκιμής. Συγκεκριμένα, οι θεωρίες πάνω στις οποίες βασίζεται η πρεσσιομετρική δοκιμή επιτρέπουν όχι μόνο την καλύτερη κατανόηση αυτής, αλλά καταδεικνύουν και το γεγονός ότι ακόμη και ένα απλό φαινόμενο, όπως είναι η διαστολή μιας κοιλότητας, δεν μπορεί να αναπαραχθεί σε όλες τις πτυχές του με απλουστευμένες έννοιες όπως αυτές που χρησιμοποιούνται συνήθως στην εδαφομηχανική. Ξεκινώντας, ακολουθούν κάποιες βασικές έννοιες οι οποίες θα

χρησιμοποιηθούν παρακάτω.

2.2 Βασικές έννοιες

2.2.1 Παραμόρφωση και Μετατόπιση

Εξετάζεται μια κυλινδρική κοιλότητα άπειρου μήκους σε μια ανεξάντλητη μάζα, το έδαφος, το οποίο είναι αβαρές, ισότροπο και ομοιογενές. Ο άξονας της κοιλότητας είναι κατακόρυφος και δείχνει την κατεύθυνση Oz. Αρχικά, στην κοιλότητα υπάρχει μία πίεση p_0 ενώ σε όλη τη μάζα υπάρχει μια ενιαία οριζόντια τάσης ίση προς το p_0 και μία ενιαία κατακόρυφη τάση, σ_{v0} . (Σχήμα 2.1a)

Μια αύξηση της πίεσης, Δp , σε υψηλότερη πίεση, $p = p_0 + \Delta p$, προκαλεί την διαστολή της κοιλότητας και μόνο την ακτινική κίνηση της μάζας, όπως ένα σωματίδιο που βρίσκεται αρχικά σε μια ακτινική απόσταση r και θα βρεθεί στην παραμορφωμένη κατάσταση σε μια απόσταση ρ , έτσι ώστε:

$$\rho = r + u$$

(2.01),

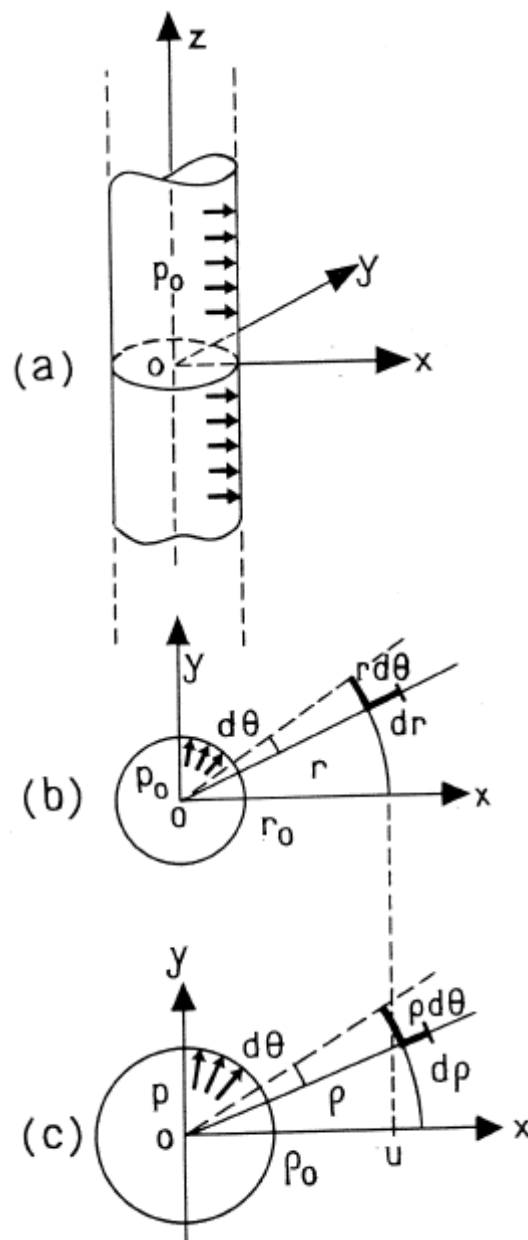
όπου u = η απόσταση που μετακινήθηκε το σωματίδιο.

Λόγω του ότι όλες οι κινήσεις πραγματοποιούνται στο οριζόντιο επίπεδο, μόνο αυτό λαμβάνεται υπόψη στην παρακάτω ανάλυση (Σχήμα 2.1.b και 2.1.c). Ένα μικρό γραμμικό στοιχείο του μήκους dr , το οποίο βρίσκεται σε ακτινική κατεύθυνση θα υποστεί συρρίκνωση χωρίς περιστροφή, και το γραμμικό στοιχείο του μήκους, $r d\theta$, θα επιμηκυνθεί και θα παραμένει κάθετο προς το dr .

Οι ακτινικές και οι περιφερειακές κατευθύνσεις είναι, λοιπόν, οι κατευθύνσεις των κύριων παραμορφώσεων και των κύριων τάσεων. Οι αντίστοιχες τροπές στην ακτινική κατεύθυνση, ε_r , και στην περιφερειακή κατεύθυνση, ε_θ , καθορίζονται από το πεδίο μετατόπισης.

$$\varepsilon_\theta = \frac{(r + u) d\theta - r d\theta}{r d\theta} = \frac{u}{r}$$
$$\varepsilon_r = \frac{du}{dr}$$

(2.02 και 2.03 αντίστοιχα).



Σχήμα2. 1: Επέκταση της κυλινδρικής κοιλότητας: αρχικές και πραγματικές συντεταγμένες

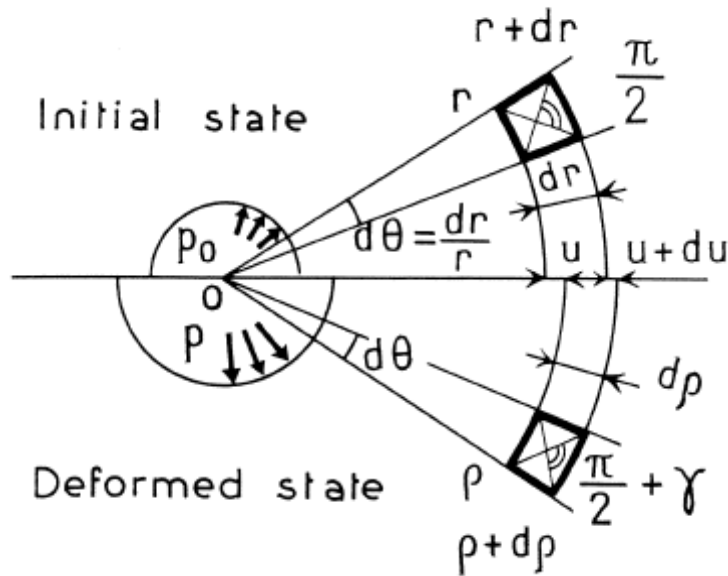
Στα ακόλουθα, η περιφερειακή κατεύθυνση, ϵ_θ , συμβολίζεται απλά ϵ , ενώ η τιμή του ϵ στα τοιχώματα της κοιλότητας, ϵ_0 , γίνεται:

$$\epsilon_0 = \frac{u_0}{r_0}$$

(2.04)

και αυτό εκφράζει τη διαστολή της κοιλότητας.

Έστω, τώρα, ένα μικρό στοιχείο που είναι αρχικά τετράγωνο σε κάτοψη, με πλευρές dr και $r d\theta$ (έτσι ώστε $d\theta = dr/r$) (Σχήμα 2.2).



Σχήμα2. 2: Παραμόρφωση του αρχικού τετράγωνου στοιχείου

Αυτό το στοιχείο χρησιμοποιείται για να καθορίσει τη στρέβλωση Γ , και την αντίστοιχη αλλαγή του όγκου μ . Πρόκειται για ένα ορθογώνιο σε παραμορφωμένη κατάσταση με τις εξής πλευρές:

$$d\rho = (1 + \epsilon_r) dr$$

$$\rho \cdot d\theta = [r(1 + \epsilon)] dr/r = (1 + \epsilon) dr$$

(2.05 και 2.06).

Η στρέβλωση, Γ , ορίζεται από την αλλαγή στη γωνία γ , μεταξύ των διαγωνίων, που αρχικά είχε κλίση 45° για τις κύριες παραμορφώσεις και δίνεται από τη σχέση:

$$1 + \Gamma = \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\gamma}{2}\right) = \frac{1 + \epsilon}{1 + \epsilon_r} = \frac{\rho}{r} \cdot \frac{dr}{d\rho}$$

(2.07).

Ο αρχικός όγκος του στοιχείου, dv_0 , δίνεται από τη σχέση:

$$dv_0 = r \cdot dr \cdot d\theta \cdot dz$$

(2.08α),

ενώ ο όγκος μετά την παραμόρφωση, dv , από τη σχέση:

$$dv = \rho \cdot d\rho \cdot d\theta \cdot dz$$

(2.08β).

Επειδή υποτίθεται ότι ισχύουν οι συνθήκες επίπεδης τροπής, το dz δεν αλλάζει από τη μία κατάσταση στην άλλη.

Ακόμα, η αναλογία μεταξύ των δύο όγκων ονομάζεται m_v και σχετίζεται με την αλλαγή του όγκου μ :

$$m_v = \frac{dv}{dv_0} = 1 + \mu$$

(2.09α),

όπου αντικαθιστώντας το dv_0 και το dv προκύπτει:

$$m_v = \frac{\rho \cdot d\rho}{r \cdot dr} = (1 + \varepsilon)(1 + \varepsilon_r)$$

(2.09β).

Οι παραπάνω εκφράσεις παράγονται με τη χρήση των ε_r και ε_θ , ονομάζονται παραμορφώσεις Cauchy, και βασίζονται στην ακόλουθη έκφραση:

$$\varepsilon = \frac{dl - dl_0}{dl_0}$$

(2.10),

όπου dl_0 είναι το αρχικό μήκος του μικρού γραμμικού στοιχείου και dl το μήκος του στοιχείου αυτού μετά την παραμόρφωση.

Σε όλα τα παραπάνω δεν επιβλήθηκε περιορισμός στο μέγεθος των μεταβλητών. Ωστόσο, τανυστές των παραμορφώσεων δεν μπορούν να διαμορφωθούν βάσει του συστήματος αυτού, εκτός από την περίπτωση των μικρών παραμορφώσεων, εάν δηλαδή ο δεύτερος ή υψηλότερος όρος, όπως το ε^2 , μπορεί να αγνοηθεί. Οι μεταβλητές Cauchy μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο για περιπτώσεις μικρών παραμορφώσεων. Έτσι, αντί για τις παραπάνω σχέσεις, χρησιμοποιούνται οι απλούστερες που ακολουθούν:

$$\Gamma = \gamma = \varepsilon - \varepsilon_r$$

(2.11)

και

$$\mu = m_v - 1 = \varepsilon + \varepsilon_r \quad (2.12).$$

Στην περίπτωση που οι παραμορφώσεις δεν είναι μικρές, χρησιμοποιείται άλλος τρόπος για τον σχηματισμό τανυστών παραμόρφωσης, αλλά και για να εκφραστούν οι ρεολογικές ιδιότητες του υλικού. Ειδικότερα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι τροπές GREEN, g ή οι τροπές ALMANSI, α . Αυτές ορίζονται:

$$g = \frac{1}{2} \frac{dl^2 - dl_0^2}{dl^2}$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \frac{dl^2 - dl_0^2}{dl^2}$$

(2.13 και 2.14 αντίστοιχα)

και σχετίζονται με τις Cauchy ε ως εξής:

$$(1 + \varepsilon)^2 = 1 + 2g = \frac{1}{1 - 2\alpha} \quad (2.15).$$

Σημειώνονται:

$$g_{\theta} = \frac{1}{2} \frac{\varrho^2 - r^2}{r^2}$$

$$\alpha_{\theta} = \frac{1}{2} \frac{\varrho^2 - r^2}{\varrho^2}$$

(2.16α και 2.16β αντίστοιχα).

Όσον αφορά στις καταπονήσεις ALMANSI, είναι προτιμότερο να χρησιμοποιείται ο ακόλουθος ορισμός για την ογκομετρική τροπή, μ' :

$$m_v = \frac{dv}{dv_0} = \frac{1}{1 - \mu'} \quad (2.17).$$

Οι τανυστές Green - Lagrange και Almansi - Euler μπορούν να οριστούν με τη βοήθεια των καταπονήσεων Green και Almansi αντίστοιχα. Οι τανυστές σχηματίζονται από τη μετατόπιση που προκύπτει είτε σε σχέση με την τις αρχικές (μεταβλητές Lagrange), είτε, πραγματικά σε σχέση με τις παραμορφωμένες συντεταγμένες (μεταβλητές Euler).

Λόγω του ότι οι εξισώσεις ισορροπίας χρησιμοποιούν τις μεταβλητές Euler, μπορεί

να προβλεφθεί ότι οι καταπονήσεις Almansi θα δώσουν, σε γενικές γραμμές, αποτελέσματα για μία απλούστερη μορφή. Σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως για παράδειγμα όταν υπάρχει αναπροσαρμοσμένη ζώνη γύρω από τη βολίδα, συμβαίνει το αντίθετο. Τότε, το όριο μεταξύ της ανέπαφης και της αναπροσαρμοσμένης ζώνης έχει σταθερές τις συντεταγμένες Lagrange, ενώ οι συντεταγμένες Euler ποικίλουν σε όλη τη διαδικασία της φόρτωσης.

Οι τιμές g_0 και α_0 των περιμετρικών παραμορφώσεων στα τοιχώματα της κοιλότητας σχετίζονται με τον όγκο του κεντρικού θαλάμου μέτρησης της βολίδας, που έχει μήκος j_0 . Αν ο αρχικός όγκος είναι V_0 , τότε V είναι ο όγκος στην κατάσταση παραμόρφωσης και ΔV η διαφορά όγκου, οπότε προκύπτει:

$$g_0 = \frac{1}{2} \frac{V - V_0}{V_0} = \frac{1}{2} \frac{\Delta V}{V_0}$$

$$\alpha_0 = \frac{1}{2} \frac{V - V_0}{V} = \frac{1}{2} \frac{\Delta V}{V}$$

(2.18α και 2.18β αντίστοιχα).

Αξίζει να σημειωθεί ότι το g_0 είναι ανάλογο με τη μεταβολή του όγκου. Αυτός, άλλωστε, είναι και ο λόγος που χρησιμοποιούνται πιο συχνά οι τροπές Green, ενώ όταν κρίνεται απαραίτητο, τα τελικά αποτελέσματα δίνονται τόσο από τις τροπές Green όσο και από τις Almansi.

2.2.2 Συνθήκες καταπόνησης σε κατάσταση ισορροπίας

Στη συνέχεια, όσον αφορά στις συνθήκες καταπόνησης του εδάφους γύρω από την πρεσσιομετρική βολίδα, η ακτινική και η περιμετρική καταπόνηση οφείλονται κυρίως στη συμμετρία. Η θλιπτική καταπόνηση λαμβάνεται ως θετική στους υπολογισμούς της μηχανικής του εδάφους. Στο οριζόντιο επίπεδο υπάρχει μόνο μία εξίσωση ισορροπίας λόγω συμμετρίας (Σχήμα 2.3) και αυτή εκφράζει την ισορροπία στην ακτινική κατεύθυνση ως εξής:

$$\frac{d\sigma_r}{d\rho} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{\rho} = 0$$

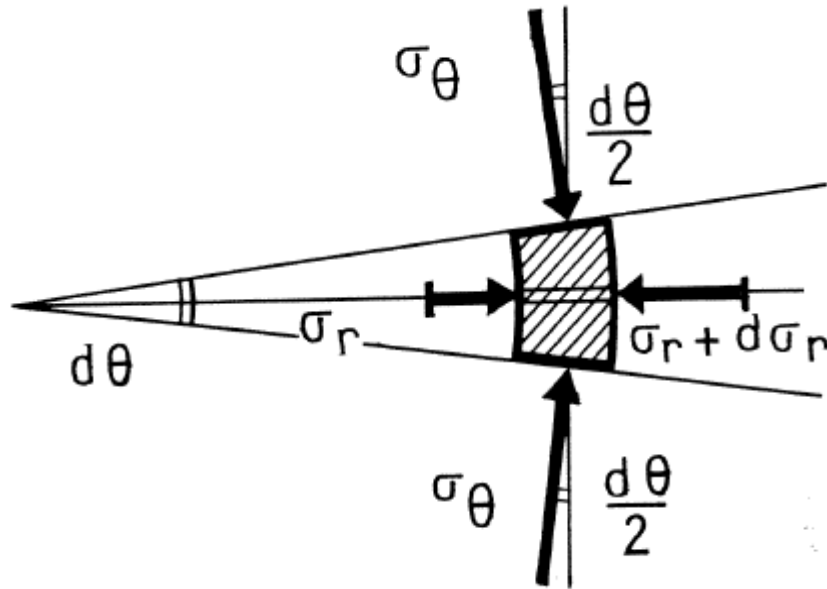
(2.19).

Στις περιπτώσεις μικρών παραμορφώσεων, όμως, δεν υπάρχουν απώλειες στην ακρίβεια εφόσον ένα σημείο αναμένεται να παραμείνει στη θέση του κατά τη διάρκεια της

παραμόρφωσης της μάζας. Έτσι, η εξίσωση ισορροπίας απλοποιείται:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0$$

(2.20).



Σχήμα2. 3: Καταπόνηση σε παραμορφωμένο στοιχείο

Η διαφορά ανάμεσα στις δύο κύριες τάσεις, $\sigma_r - \sigma_\theta$, ονομάζεται διεκτροπική τάση, ενώ η μέγιστη διατμητική τάση σε ένα σημείο, τ_m , είναι:

$$\tau_m = \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{2}$$

(2.21)

και εμφανίζεται σε επίπεδα με κλίση 45° προς την κύρια τάση, όπως, για παράδειγμα, 45° στην ακτινική και περιμετρική κατεύθυνση, όπως αυτές εμφανίζονται στον κύκλο του Mohr.

Το πρόβλημα, στη συνέχεια, είναι να καθοριστούν, για μία συγκεκριμένη τιμή είτε της πίεσης στην κοιλότητα, είτε της διαστολής αυτής, $\epsilon_0 = u_0/r_0$, οι τρεις συναρτήσεις της r , που εμπεριέχονται στην παραπάνω σχέση που εκφράζει την ισορροπία στην ακτινική κατεύθυνση:

$$\frac{d\sigma_r}{d\rho} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{\rho} = 0$$

Δηλαδή λέγοντας:

$$\sigma_r(r), \sigma_\theta(r), \rho(r)$$

είναι η ίδια έκφραση με το:

$$\sigma_r(r), \sigma_\theta(r), u(r)$$

και έτσι, στην παραπάνω σχέση, λαμβάνονται υπόψη οι παρακάτω οριακές συνθήκες ισχύει:

- στα τοιχώματα της κοιλότητας, $\sigma_{r0} = p$ και $u_0 = \varepsilon_0 r_0$
- σε άπειρη απόσταση, $\sigma_r = \sigma_\theta = p_0$ και $u_\infty = 0$.

Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγονται οι μετατοπίσεις στο έδαφος γύρω από τη πρεσσιομετρική βολίδα.

2.2.3 Ρεολογικές (καταστατικές) εξισώσεις

Προκειμένου να λυθεί το πρόβλημα, οι δύο επιπλέον γενικές εξισώσεις που απαιτούνται παρέχονται μόνο από την περιγραφή των ρεολογικών ιδιοτήτων της μάζας του εδάφους. Αυτές αφορούν στη συμπεριφορά τάσης – τροπής του εδάφους, είναι οι ακόλουθες:

$$R_1(\sigma_r, \sigma_\theta, \varepsilon_r, \varepsilon_\theta) = 0$$

$$R_2(\sigma_r, \sigma_\theta, \varepsilon_r, \varepsilon_\theta) = 0$$

(2.22α και 2.22β αντίστοιχα)

και εφόσον οι παραμορφώσεις του εδάφους καθορίζονται από τις μετακινήσεις, τότε οι δύο παραπάνω εξισώσεις μπορούν να γραφτούν:

$$R'_1\left(\sigma_r, \sigma_\theta, \frac{u}{r_0}\right) = 0$$

$$R'_2\left(\sigma_r, \sigma_\theta, \frac{u}{r_0}\right) = 0$$

(2.23α και 2.23β αντίστοιχα).

Οι ρεολογικές συναρτήσεις R_1 και R_2 μεταβάλλονται προκειμένου να προσαρμόζονται στις χαρακτηριστικές ιδιότητες της μάζας του εδάφους.

Ακολουθούν οι ρεολογικές ιδιότητες που έχουν εξεταστεί μέχρι σήμερα.

- Γραμμική ελαστική ιδιότητα (Lamé, 1852)
- Γραμμική ελαστο-πλαστική ιδιότητα χωρίς μεταβολή του όγκου

1. καθαρά συνεκτικά εδάφη (Bishop, Hill and Mott, 1945),
 2. εδάφη με γωνία τριβής και συνοχή (Ménard, 1957, Cassan, 1960)
- Γραμμική ελαστο-πλαστική ιδιότητα με μεταβολή όγκου (Hill, 1950, Salencon, 1966, Vesic, 1972)
 - Συνεκτικά εδάφη χωρίς μεταβολή όγκου (Baguelin, Jézéquel, Lemée, Le Méhauté, 1972, Ladanyi, 1972, Palmer, 1972)
 - Γραμμική διαστολικότητα (Frank, 1974)
 - Η γενική περίπτωση, επιτρέποντας τη μεταβολή του όγκου (Ladanyi, 1961, Wroth and Windle, 1975)
 - Συνεκτικά εδάφη με διαταραχές δακτυλίου (Baguelin, Lézéquel, Lemée, Le Méhauté, 1972, Baguelin, Frank, Lézéquel, 1975)

Η παραπάνω λίστα περιορίζεται σε συμπεριφορές ανεξαρτήτως του χρόνου.

Επιπλέον, στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, αναφέρονται κι άλλες ρεολογικές ιδιότητες, όπως είναι η ευαισθησία και η διαστολικότητα κοκκώδων εδαφών.

Πριν από αυτά όμως, το πρόβλημα μπορεί να απλοποιηθεί συγκρίνοντας την περίπτωση της μηδενικής αρχικής ακτίνας. Άλλωστε, όλες αυτές οι συμπεριφορές του εδάφους είναι ανεξάρτητες του χρόνου, όπως και προαναφέρθηκε.

2.2.4 Απλοποιώντας το πρόβλημα – Κοιλότητα μηδενικής αρχικής ακτίνας

Πριν από τη χρήση των ρεολογικών μοντέλων για τη λύση των προβλημάτων της πρεσσιομετρικής δοκιμής, καταδεικνύεται το πλεονέκτημα της σύγκρισης μιας ιδεατής κυλινδρικής κοιλότητας με μηδενική αρχική ακτίνα. Η τεχνική αυτή πρωτοχρησιμοποιήθηκε από τους Bishop, Hill και Mott το 1945 αν και ο Ladanyi το 1961 είναι ο πραγματικά υπεύθυνος για την ανάπτυξη της δυναμικής της.

Ξεκινώντας, αναφέρονται οι εξής αδιάστατες μεταβλητές:

$$\chi = r/r_0, \xi = \rho/r_0, \delta = u/r_0 = \xi - \chi, \text{ και έτσι:}$$

$$\varepsilon = u/r = \delta/\chi, \varepsilon_r = du/dr = d\delta/d\chi.$$

Έτσι, οι προηγούμενες ρεολογικές εξισώσεις, μπορούν να γραφτούν ως εξής:

$$\frac{d\sigma_r}{d\xi} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{\xi} = 0$$

$$R_1 \left(\sigma_r, \sigma_\theta, \frac{d\delta}{dx}, \frac{\delta}{x} \right) = 0$$

$$R_2 \left(\sigma_r, \sigma_\theta, \frac{d\delta}{dx}, \frac{\delta}{x} \right) = 0$$

(2.24, 2.25α και 2.25β αντίστοιχα).

Οι συναρτήσεις που αφορούν στις τάσεις σ_r , σ_θ και δ , είναι οι συναρτήσεις της σχετικής απόστασης $\chi = r/r_0$. Θεωρούνται, στη συνέχεια, δύο κοιλότητες a και b, με διαφορετικές αρχικές ακτίνες r_0 και r_0' , οι οποίες βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση μεταξύ τους με την ίδια άπειρη μάζα. Οι αρχικές κατακόρυφες και οριζόντιες τάσεις είναι παντού σ_{v0} και p_0 αντίστοιχα (p_0 είναι η αρχική πίεση σε κάθε κοιλότητα), όπως φαίνεται στο κάτω μισό του Σχήματος 2.4.a και 2.4.b. Για κάθε δεδομένη πίεση p ή δεδομένη παραμόρφωση $\varepsilon_0 = u_0/r_0$ σε κάθε μία από τις δύο κοιλότητες, θα υπάρχουν η ίδια τάση και η ίδια τροπή σε δύο σημεία M και M' που βρίσκονται στην ίδια σχετική απόσταση χ , όπως φαίνεται στο πάνω μέρος του σχήματος 2.4.a και 2.4.b. Αυτό προκύπτει άμεσα από τις παραπάνω εξισώσεις, οι οποίες δείχνουν ότι υπάρχει μία ομοιότητα ανάμεσα στις δύο κοιλότητες.

Ας θεωρήσουμε, στη συνέχεια, μία τρίτη κοιλότητα c, ομοίως με αρχική ακτίνα r_0 για πίεση p_0 , η οποία τοποθετείται σε μεγάλη απόσταση από τις δύο προηγούμενες. Η κοιλότητα c παραμορφώνεται από μία πίεση p_1 , μεγαλύτερη της p (Σχήμα 2.4.c), έτσι ώστε ο κύκλος που σχηματίζεται από τα σημεία που βρίσκονται στη μάζα του σε απόσταση r_0' να υπόκειται στην ίδια περιφερειακή τροπή ε ως πίεση στον τοίχο της κοιλότητας b (δηλαδή $\varepsilon = \varepsilon_0$). Η πίεση που ενεργεί στα σημεία αυτά σε μία ακτινωτή κατεύθυνση, σ_r , θα είναι ίση με την πίεση p της κοιλότητας b, δεδομένου ότι οι συνθήκες στο έδαφος έξω από τα σημεία αυτά και έξω από τα τοιχώματα της κοιλότητας b είναι πανομοιότυπα. Ακόμα, η παραμόρφωση της κοιλότητας c είναι ίση με ε_{01} , υπό πίεση p_1 ($\varepsilon_{01} > \varepsilon_0$). Αν η πίεση p στην κοιλότητα και η παραμόρφωση ε_0 στα τοιχώματα της κοιλότητας συνδέονται κατά τη διάρκεια της δοκιμής με τη σχέση:

$$p = F(\varepsilon_0)$$

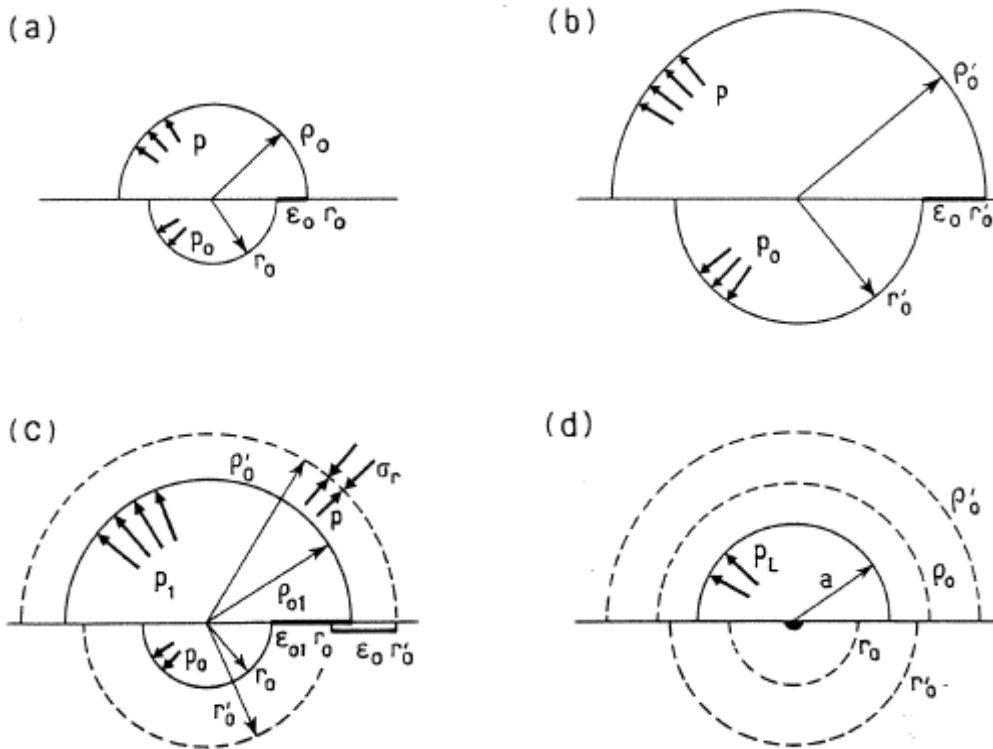
(2.26),

τότε η τάση σ_r και η παραμόρφωση ε σε κάθε σημείο του Σχήματος 2.4.c θα συνδέονται με τη σχέση:

$$\sigma_r = F(\varepsilon)$$

(2.27).

Αυτό σημαίνει ότι δεν είναι απαραίτητο να μελετηθούν οι διαδοχικές αυξήσεις της πίεσης p_1, p_2, p_3 , ή οι τροπές $\varepsilon_0, \varepsilon_{01}, \varepsilon_{02}$ κ.ό.κ., για να γίνει αντιληπτό το τι συμβαίνει στο έδαφος γύρω από την κοιλότητα που επεκτείνεται. Αντίθετα, χρειάζεται να μελετηθεί μία συγκεκριμένη πίεση ή παραμόρφωση που θα περιλάβει όλες τις υπόλοιπες. Για παράδειγμα, οι συνθήκες που φαίνονται στο Σχήμα 2.4.c επιτρέπουν όλες τις παραμορφώσεις στο εύρος $0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{01}$, που πρέπει να διερευνηθεί. Ωστόσο, η συγκεκριμένη σειρά παραμορφώσεων περιορίζεται, ομολογουμένως, στην προκειμένη ε_{01} , και είναι αναγκαίος ένας τρόπος ώστε να αυξηθεί η ε_{01} και να μελετηθούν όλες οι πιθανές περιπτώσεις.



Σχήμα2. 4: Σύγκριση τεσσάρων κοιλοτήτων

Για να καλυφθούν όλες οι πιθανές παραμορφώσεις από το μηδέν ως το άπειρο, χρειάζεται να εξεταστεί η κοιλότητα με αρχική μηδενική ακτίνα (Σχήμα 2.4.d). Η παραμικρή αύξηση της διαμέτρου της κοιλότητας, σημαίνει ότι $\varepsilon_0 = (p_0 - r_0)/r_0 = \infty$ στα τοιχώματα της κοιλότητας εφόσον $r_0 = 0$ και το p_0 έχει κάποια περιορισμένη τιμή, a . Έτσι, το Σχήμα 2.4.d επιτρέπει να εξεταστούν όλες τις τιμές παραμόρφωσης από 0 ως ∞ με τις αντίστοιχες

πιέσεις.

Η πρώτη παρατήρηση που γίνεται είναι ότι η πίεση στην κοιλότητα d εξαρτάται από το μέγεθός της: $p = F(\infty)$. Θα φανεί στη συνέχεια ότι η $F(\infty)$ έχει μία τελική τιμή. Όταν η κοιλότητα d μεγαλώνει με μία μεγαλύτερη ακτίνα b , οι συνθήκες παντού είναι περίπου οι ίδιες όπως όταν $\rho_0 = \alpha$, δηλαδή $\varepsilon_0 = \infty$ και $\sigma_r = \rho_0$ για $r = \infty$. Έτσι, το p δεν αλλάζει και ονομάζεται οριακή πίεση p_L δεδομένου ότι συμβαίνει σε άπειρη καταπόνηση. Η ίδια τιμή της p_L μπορεί αν επιτευχθεί με την επέκταση της κοιλότητας της αρχικής πεπερασμένης ακτίνας στο άπειρο. Σημειώνεται, επίσης, ότι ο δείκτης L χρησιμοποιείται για να δηλώσει τη θεωρητική οριακή πίεση προκειμένου αυτή να διακρίνεται από την πρακτική οριακή πίεση p_i , η οποία επιτυγχάνεται όταν ο αρχικός όγκος της κοιλότητας διπλασιάζεται.

2.3 Το ελαστο-πλαστικό μοντέλο

Ο πιο εύκολος τρόπος να μελετηθεί η πρεσσιομετρική δοκιμή είναι να υποθέσουμε ότι το έδαφος έχει γραμμική ελαστική συμπεριφορά, κάτι που μελετήθηκε το 1852 από τον Lamé.

2.3.1 Ρεολογικές συνθήκες του γραμμικού ελαστικού εδάφους – Περιγραφή του προβλήματος

Το έδαφος εκπροσωπείται από μία γραμμική, ελαστική, ισότροπη και ομογενή μάζα, η οποία χαρακτηρίζεται από το Μέτρο Ελαστικότητας Young, E και από το λόγο του Poisson, ν .

Οι παραμορφώσεις υποτίθεται ότι είναι μικρές καθ' όλη την ανάλυση. Από τη θεωρία της ελαστικότητας, για τις μεταβολές των κυρίων τάσεων $\Delta\sigma_r$, $\Delta\sigma_\theta$ και $\Delta\sigma_z$ και των κυρίων τροπών ε_r , ε_θ και ε_z , ισχύουν τα εξής:

$$\begin{aligned} -E \cdot \varepsilon_r &= \Delta\sigma_r - \nu (\Delta\sigma_\theta + \Delta\sigma_z) \\ -E \cdot \varepsilon_\theta &= \Delta\sigma_\theta - \nu (\Delta\sigma_z + \Delta\sigma_r) \\ -E \cdot \varepsilon_z &= \Delta\sigma_z - \nu (\Delta\sigma_r + \Delta\sigma_\theta) \end{aligned}$$

(2.28α, 2.28β και 2.28γ αντίστοιχα).

Για την περίπτωση της επίπεδης παραμόρφωσης, $\varepsilon_z = 0$ (2.29), οπότε:

$$\Delta\sigma_z = \nu (\Delta\sigma_r + \Delta\sigma_\theta)$$

(2.30).

Αντικαθιστώντας αυτή την τιμή στις παραπάνω εξισώσεις, έχουμε:

$$\begin{aligned} -E_2 \cdot \varepsilon_r &= \Delta\sigma_r - \nu_2 \cdot \Delta\sigma_\theta \\ -E_2 \cdot \varepsilon_\theta &= \Delta\sigma_\theta - \nu_2 \cdot \Delta\sigma_r \end{aligned}$$

(2.31α και 2.31β αντίστοιχα),

όπου:

$$\begin{aligned} E_2 &= \frac{E}{1-\nu^2} \\ \nu_2 &= \frac{\nu}{1-\nu} \end{aligned}$$

(2.32α και 2.32β αντίστοιχα).

Τα E_2 και ν_2 είναι ελαστικές παράμετροι της επίπεδης παραμόρφωσης.

Στη συνέχεια, είναι αρκετά χρήσιμο να βρεθούν τα ισοδύναμα των εξισώσεων

$$\begin{aligned} R'_1\left(\sigma_r, \sigma_\theta, \frac{u}{r_0}\right) &= 0 \\ R'_2\left(\sigma_r, \sigma_\theta, \frac{u}{r_0}\right) &= 0 \end{aligned}$$

(2.23α και 2.23β αντίστοιχα),

εφόσον αυτές επιτρέπουν να χρησιμοποιείται η μετατόπιση u , αντί των ε_r και ε_θ .

Λαμβάνοντας υπόψη και τις εξισώσεις 2.02 και 2.03, έχουμε:

$$\begin{aligned} -E_2 \cdot \frac{du}{dr} &= \Delta\sigma_r - \nu_2 \cdot \Delta\sigma_\theta \\ -E_2 \cdot \frac{u}{r} &= \Delta\sigma_\theta - \nu_2 \cdot \Delta\sigma_r \end{aligned}$$

(2.33α και 2.33β αντίστοιχα).

Αυτές οι ρεολογικές εξισώσεις μπορούν να συνδιαστούν με την εξίσωση 2.20, με την προϋπόθεση ότι διατηρούνται οι μικρές παραμορφώσεις. Έτσι, οι εκφράσεις των σ_r και σ_θ , όσον αφορά στο u και στο du/dr μπορούν πλέον, εξαγόμενες από τα παραπάνω να είναι:

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_r &= -\frac{E_2}{1-\nu_2^2} \left[\frac{du}{dr} + \nu_2 \frac{u}{r} \right] \\ \Delta\sigma_\theta &= -\frac{E_2}{1-\nu_2^2} \left[\frac{u}{r} + \nu_2 \frac{du}{dr} \right] \end{aligned}$$

(2.34α και 2.34β αντίστοιχα).

Αντικαθιστώντας, στη συνέχεια, στην εξίσωση ισορροπίας 2.20, έχουμε την παρακάτω διαφορική εξίσωση:

$$r^2 \cdot \frac{d^2u}{dr^2} + r \cdot \frac{du}{dr} - u = 0$$

(2.35),

η οποία μπορεί πλέον να επιλυθεί για την περίπτωση της κυλινδρικής κοιλότητας με αρχική ακτίνα, r_0 , διαφορετική του μηδενός.

2.3.2 Επίλυση του γραμμικού ελαστικού προβλήματος

Οι γενικές επιλύσεις της παραπάνω εξίσωσης είναι της μορφής

$$u = r^n \tag{2.36},$$

όπου ο εκθέτης n πρέπει να ικανοποιεί την εξίσωση

$$(n + 1)(n - 1) = 0 \tag{2.37}$$

και έχει ρίζες $n = \pm 1$.

Επομένως, η παραμόρφωση u έχει τη μορφή

$$u = Ar + \frac{B}{r} \tag{2.38}.$$

Υπενθυμίζοντας ότι σε μία άπειρη απόσταση από την κοιλότητα ($r = \infty$) $u_\infty = 0$, τότε $A = 0$.
Ακόμα, στα τοιχώματα της κοιλότητας $u_0 = \varepsilon_0 r_0$, οπότε $B = u_0 r_0 = \varepsilon_0 r_0^2$. Επομένως:

$$u = \frac{u_0 r_0}{r} = \frac{\varepsilon_0 r_0^2}{r} \tag{2.39}.$$

Βάσει και των παραπάνω, προκύπτουν:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{\varepsilon_0 r_0^2}{r^2} \\ \varepsilon_r &= -\frac{\varepsilon_0 r_0^2}{r^2} \\ \sigma_r &= p_0 + \Delta\sigma_r = p_0 + \frac{E_2}{1 + \nu_2} \cdot \frac{\varepsilon_0 r_0^2}{r^2} \\ \sigma_\theta &= p_0 + \Delta\sigma_\theta = p_0 - \frac{E_2}{1 + \nu_2} \cdot \frac{\varepsilon_0 r_0^2}{r^2} \end{aligned}$$

(2.40α, 2.40β, 2.41α και 2.41β αντίστοιχα).

Ακόμα, όταν G είναι το μέτρο διάτμησης, ισχύει:

$$\frac{E_2}{1 + \nu_2} = \frac{E}{1 + \nu} = 2G$$

και έτσι οι προηγούμενες εξισώσεις 2.41 γράφονται:

$$\sigma_r = p_0 + 2G \frac{\varepsilon_0 r_0^3}{r^2}$$

$$\sigma_\theta = p_0 - 2G \frac{\varepsilon_0 r_0^3}{r^2}$$

(2.42α και 2.42β),

ενώ στα τοιχώματα της κοιλότητας ισχύει:

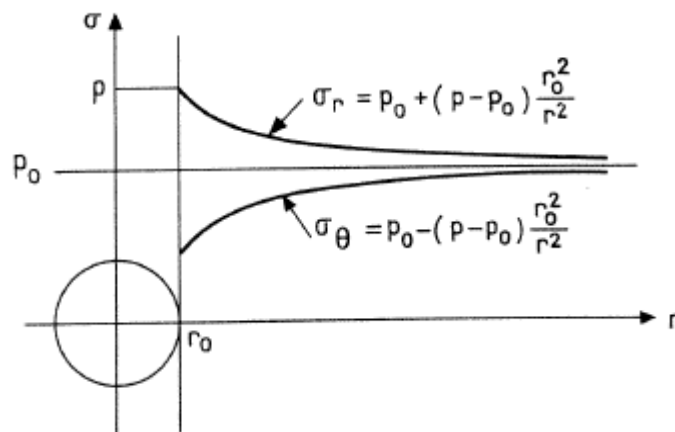
$$p = p_0 + 2G \varepsilon_0 = p_0 + 2G \cdot \frac{u_0}{r_0}$$

(2.43).

2.3.3 Τάσεις και τροπές σε ελαστικό έδαφος

Από τα παραπάνω φαίνεται ότι οι τάσεις αυξάνονται και οι τροπές μειώνονται με το τετράγωνο της απόστασης από την κοιλότητα. Οι καμπύλες των τάσεων, σ_r και σ_θ με την ακτίνα r (Σχήμα 2.5) είναι συμμετρικές ως προς μία ευθεία η οποία αντιπροσωπεύει την αρχική πίεση p_0 , γιατί

$$\Delta\sigma_r = -\Delta\sigma_\theta = 2G \frac{\varepsilon_0 r_0^2}{r^2}$$



Σχήμα2. 5: Τάσεις σε ελαστικό έδαφος

Οι μεταβολές των τάσεων σε κάθε στοιχείο του εδάφους παρουσιάζονται και στο διάγραμμα Mohr από έναν κύκλο με το κέντρο του στην αρχή των αξόνων: οι τάσεις αυτές καθεαυτές από έναν κύκλο με την ίδια διάμετρο, με κέντρο το p_0 στον άξονα της ορθής τάσης O_σ (Σχήμα 2.6).

Οπότε,

$$\Delta\sigma_m = \frac{\Delta\sigma_r + \Delta\sigma_\theta}{2} = 0 \quad (2.44)$$

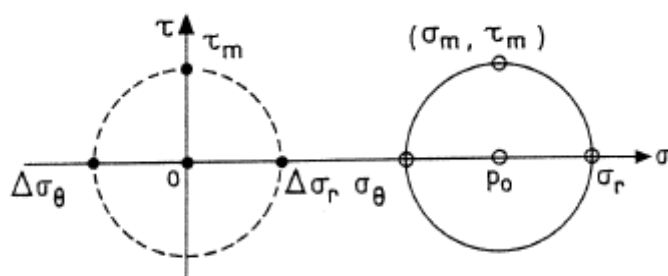
και λαμβάνοντας υπόψη το ότι

$$\Delta\sigma_z = \nu (\Delta\sigma_r + \Delta\sigma_\theta)$$

προκύπτει:

$$\Delta\sigma_{oct} = \frac{\Delta\sigma_r + \Delta\sigma_\theta + \Delta\sigma_z}{3} = 0 \quad (2.45).$$

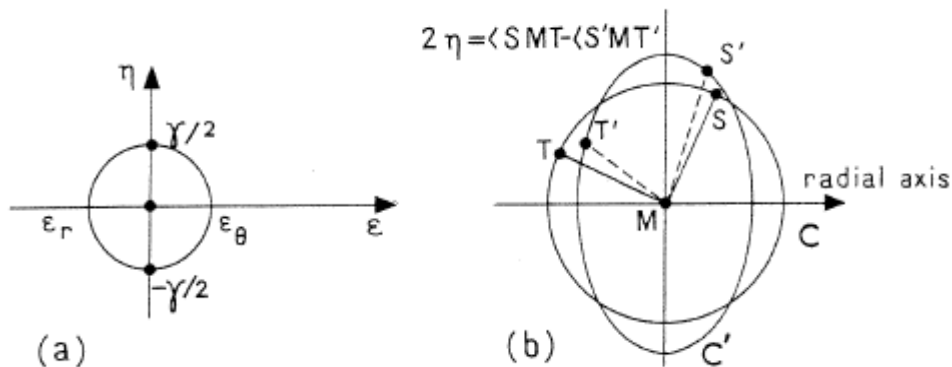
Οι τελευταίες δύο εξισώσεις δείχνουν ότι η διαστολή της βολίδας σε ελαστικό έδαφος δεν μεταβάλλει ούτε τη μέση ορθή τάση σε οριζόντιο επίπεδο, σ_m , ούτε την οκταεδρική τάση σ_{oct} , η οποία είναι ο μέσος όρος όλων των τάσεων σε κάθε σημείο της μάζας. Μόνο η διεκτροπική τάση, $\sigma_r - \sigma_\theta$, μεταβάλλεται.



Σχήμα2. 6: Κύκλοι τάσεων Mohr σε ελαστικά εδάφη

Επεδή οι παραμορφώσεις θεωρούνται μικρές, μπορούν να προβληθούν σε ένα διάγραμμα $\epsilon - \eta$ του Mohr (Σχήμα 2.7.a) όπου το ϵ παριστά τη σχετική μύκηση ενός γραμμικού ελαστικού στοιχείου MS που παραμορφώνεται σε MS', ενώ το η τη μισή μεταβολή της γωνίας μεταξύ MS και του γραμμικού στοιχείου MT η οποία είναι αρχικά ορθή (Σχήμα 2.7.b). Σημειώνεται, επίσης, ότι ένας μικρός κύκλος (C) γύρω από το στοιχείο M μετασχηματίζεται σε έκλειψη (C').

Ο κύκλος Mohr παρουσιάζει την πρεσσιομετρική περίπτωση (Σχήμα 2.7.a) όπου παραμένει κεντραρισμένος στην αρχή των αξόνων, εφόσον $\epsilon_r + \epsilon_\theta = 0$, η οποία υποδεικνύει ότι το στοιχείο του εδάφους δεν υπόκειται σε μεταβολή του όγκου.



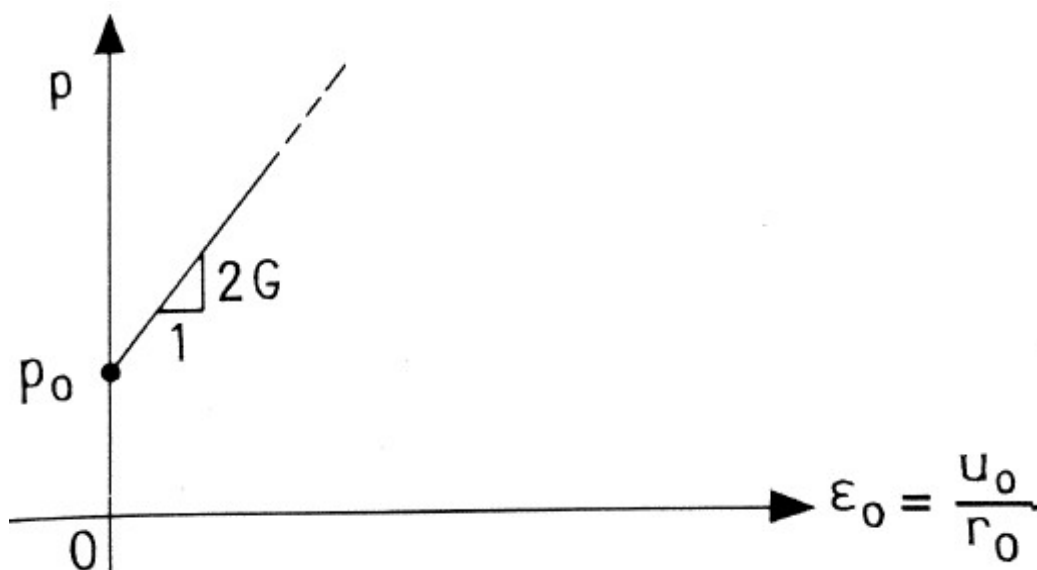
Σχήμα2. 7: Τάσεις σε ελαστικό έδαφος: α) Κύκλος Mohr, β) Παραμορφώσεις σε ελαστικό έδαφος

Πρέπει, ακόμα, να σημειωθεί ότι η ακτίνα του κύκλου Mohr ισούται με $\gamma/2$, όπως έχει προαναφερθεί. Έτσι, η στρέβλωση Γ σχετίζεται με τη διεκτροπική τάση, $\sigma_r - \sigma_\theta$ ως εξής:

$$\Gamma = \gamma = \frac{\Delta\sigma_r - \Delta\sigma_\theta}{2G} = \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{2G} \quad (2.46).$$

Η σχέση μεταξύ της πίεσης της κοιλότητας, p , και της επέκτασης αυτής, ϵ_0 , είναι της μορφής $p = F(\epsilon_0)$. Η μοναδική ρεολογική παράμετρος που απαιτείται είναι το μέτρο διάτμησης G , κάτι το οποίο είναι απολύτως λογικό, λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι στη μάζα παρατηρούνται μόνο στρέψεις και όχι απώλεια όγκου. Η καθολική απάντηση της μάζας του εδάφους στη συνεχή αύξηση της πίεσης δίνεται επίσης και από τη σχέση $p = F(\epsilon_0)$ και παριστάνεται από μία ευθεία γραμμή με κλίση $2G$ σε ένα διάγραμμα $p - \epsilon_0$ (Σχήμα 2.8). Ακόμα, για τη σταθερή τιμή p , η μεταβολή της ακτινικής τάσης σ_r , γράφεται ως εξής:

$$\sigma_r = p_0 + 2G \cdot \epsilon = F(\epsilon) \quad (2.47).$$

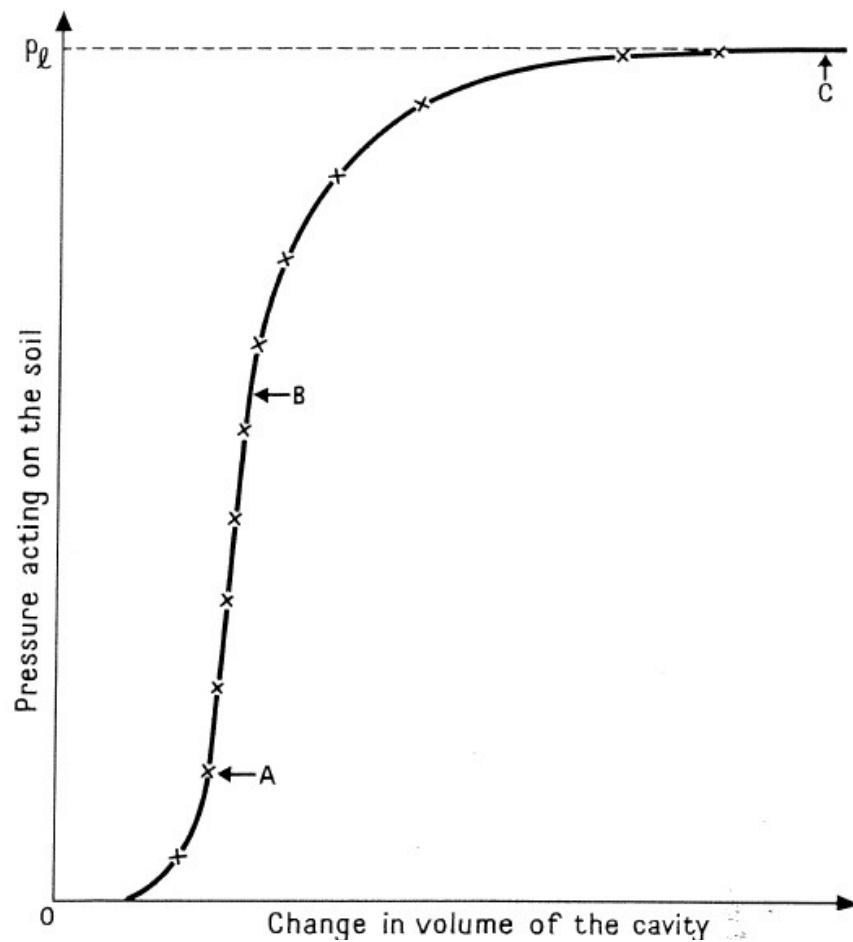


Σχήμα2. 8: Το αρχικό μέρος της πρεσσιομετρικής καμπύλης $\rho - \epsilon_0$

2.3.4 Πόσο ρεαλιστικό είναι το Ελαστικό έδαφος;

Η ελαστική θεωρία που παρουσιάστηκε παραπάνω περιορίζεται για τις μικρές παραμορφώσεις και ως εκ τούτου δεν παριστάνει εξ ολοκλήρου την πρεσσιομετρική δοκιμή. Εξάλλου, έχει γίνει η υπόθεση ότι το έδαφος ξεκινά από μία αρχική κατάσταση ηρεμίας, μία κατάσταση που στην πραγματική δοκιμή αντικαθίσταται από την πίεση ρ_{0M} . Έτσι, το γραμμικό ελαστικό μοντέλο αντιστοιχεί στην ευθεία γραμμή του αρχικού μέρους της δοκιμής, παρότι έχει γίνει μία υπεραπλούστευση για αυτά τα εδάφη, τα οποία υφίστανται μεταβολή όγκου κατά τη διάτμηση. Αυτή είναι η ιδιαίτερη περίπτωση των εδαφών με διαστολικότητα, όπως είναι η πυκνή άμμος.

Προφανώς, το γραμμικό ελαστικό μοντέλο δεν μπορεί να παριστά τη συμπεριφορά του εδάφους στην πραγματική δοκιμή, αφού επιτευχθεί η ρ_f (Σχήμα 2.9, σημείο Β). Η καμπυλότητα από την ρ_f και μετά οφείλεται σε κάποιου είδους διαρροή του εδάφους, ένα φαινόμενο το οποίο αναλύεται παρακάτω.



Σχήμα2. 9: Διορθωμένη πρεσσιομετρική καμπύλη

2.3.5 Ρεολογικές παράμετροι Ελαστο-Πλαστικού εδάφους – Η αρχή της Πλαστικής κατάστασης

Υποθέτουμε ότι το ελαστικό έδαφος, αποκτά πλαστική συμπεριφορά όταν η διεκτροπική τάση φτάνει σε κάποιο συγκεκριμένο όριο, το οποίο επιτυγχάνεται μόνο μετά από μικρές παραμορφώσεις. Υπάρχουν δύο περιπτώσεις:

1. Καθαρά συνεκτικό έδαφος με συμπεριφορά που ακολουθεί το Κριτήριο Αστοχίας Tresca (Σχήμα 2.10):

$$\sigma_r - \sigma_\theta = 2c_u \quad (2.48).$$

Λαμβάνοντας υπόψη ότι $\Delta\sigma_r = -\Delta\sigma_\theta$ στην ελαστική φάση, το έδαφος αστοχεί όταν η σ_r φτάνει μία συγκεκριμένη τιμή, που συμβολίζεται p_F , και δίνεται από τη σχέση:

$$p_F = p_0 + c_u \quad (2.49).$$

Η κατάσταση αυτή μπορεί να επιτευχθεί αρχικά στα τοιχώματα της κοιλότητας όταν $p = p_F$ και διαδίδεται στη μάζα όσο η κοιλότητα διαστέλλεται. Το F χρησιμοποιείται για να διαχωρίσει τη θεωρητική πίεση από την πίεση ερπυσμού, p_f που παρατηρείται στις πραγματικές καμπύλες της δοκιμής.

2. Έδαφος με συνοχή και γωνία τριβής που υπακούει στο Κριτήριο Αστοχίας Mohr – Coulomb (Σχήμα 2.11):

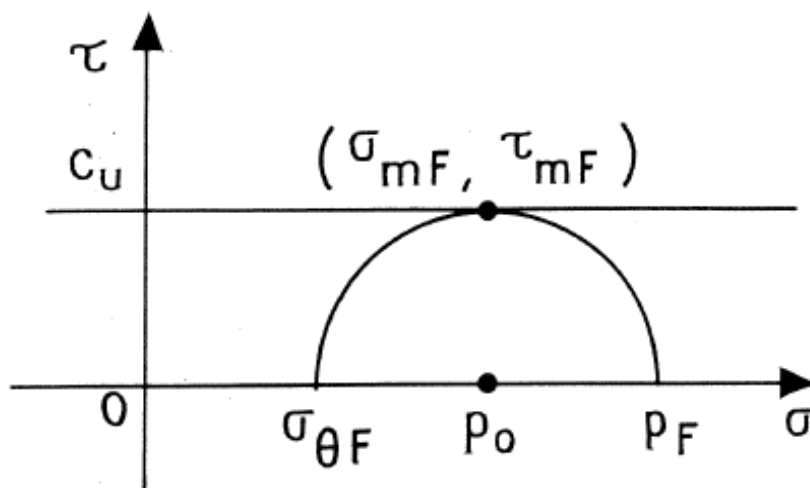
$$\sigma_\theta + c \cdot \cot \Phi = K_a (\sigma_r + c \cdot \cot \Phi) \quad (2.50),$$

όπου

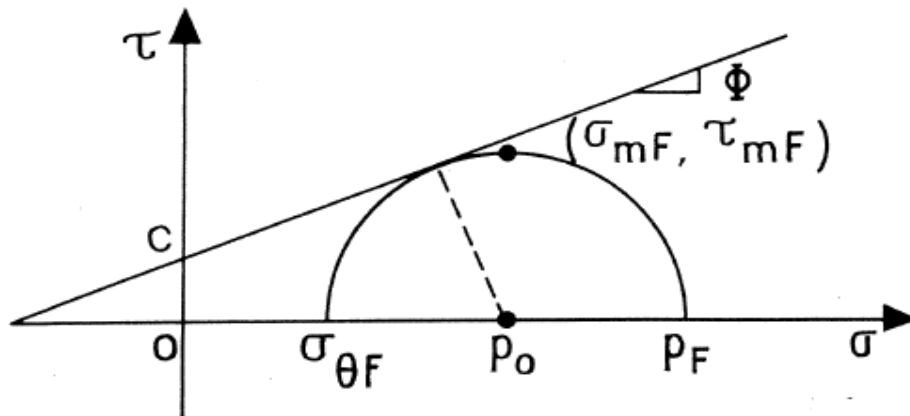
$$K_a = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\Phi}{2} \right) \quad (2.51).$$

Στην περίπτωση αυτή το έδαφος μπαίνει στην πλαστική φάση στο σημείο όπου $\sigma_r = p_F$, κάτι το οποίο εμφανίζεται πρώτα στα τοιχώματα της κοιλότητας και:

$$p_F = p_0 + (p_0 + c \cdot \cot \Phi) \cdot \sin \Phi = p_0 (1 + \sin \Phi) + c \cdot \cos \Phi \quad (2.52).$$



Σχήμα2. 10: Αστοχία στα συνεκτικά εδάφη



Σχήμα2. 11: Αστοχία σε συνεκτικά και με γωνία τριβής εδάφη

2.3.6 Πεδίο τάσεων – Οριακή Πίεση

Στην πλαστική ζώνη, η εξίσωση ισορροπίας

$$\frac{d\sigma_r}{d\rho} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{\rho} = 0$$

σε συνδυασμό με τις παραπάνω εξισώσεις 2.48 και 2.50, μπορεί να περιγράψει τη μεταβολή της σ_r , και της σ_θ . Στα καθαρά συνεκτικά εδάφη ισχύουν:

$$\sigma_r = p_F + c_u \cdot \ln \frac{\rho_F^2}{\rho^2}$$

$$\sigma_\theta = \sigma_r - 2c_u = p_F - 2c_u + c_u \cdot \ln \frac{\rho_F^2}{\rho^2}$$

(2.53 και 2.54),

ενώ όταν το έδαφος είναι συνεκτικό και έχει γωνία τριβής:

$$\sigma_r + c \cdot \cot \Phi = (p_F + c \cdot \cot \Phi) \left(\frac{\rho_F^2}{\rho^2} \right)^{\frac{1-K_a}{2}}$$

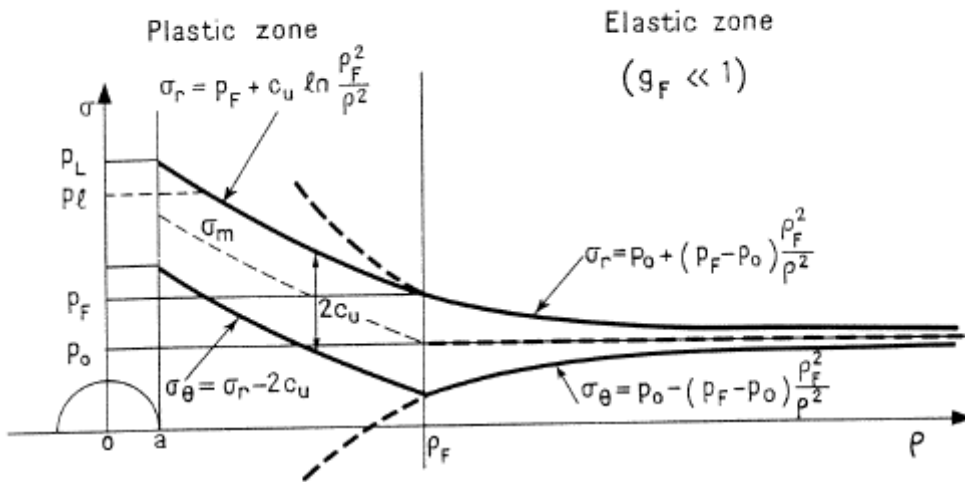
$$\sigma_\theta + c \cdot \cot \Phi = K_a (\sigma_r + c \cdot \cot \Phi) = K_a (p_F + c \cdot \cot \Phi) \left(\frac{\rho_F^2}{\rho^2} \right)^{\frac{1-K_a}{2}}$$

(2.55 και 2.56).

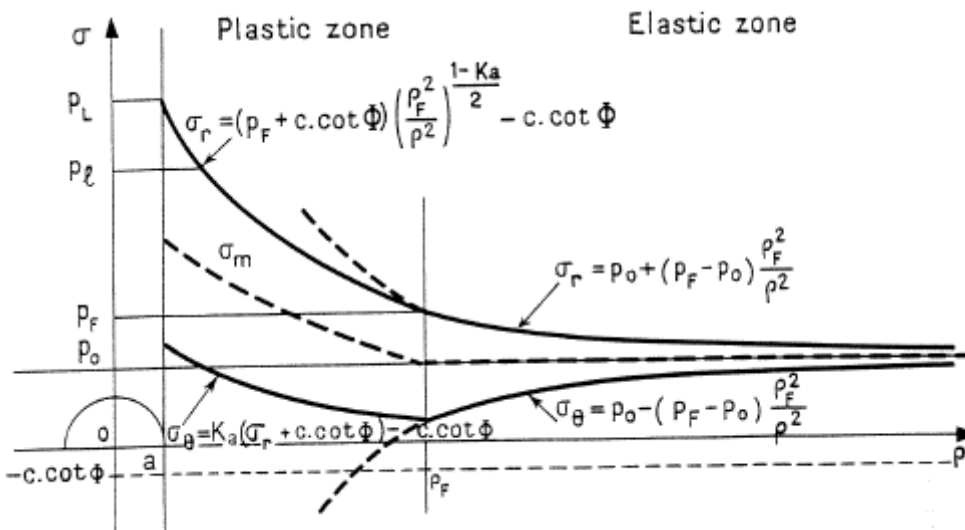
Τα Σχήματα 2.12.a και 2.12.b αντιπροσωπεύουν το πεδίο τάσεων, $\sigma_r(\rho)$ και $\sigma_\theta(\rho)$, τόσο για ελαστικά όσο και για πλαστικά εδάφη, υποθέτοντας ότι η κοιλότητα μηδενικής αρχικής

ακτίνας έχει επεκταθεί σε ακτίνα $\rho_0 = a$.

(a) Purely cohesive soil



(b) Soil with friction and cohesion



Σχήμα2. 12: Τάσεις στα ελαστο-πλαστικά εδάφη

Στην ελαστική ζώνη ($\rho > \rho_F$), οι συντεταγμένες r και ρ είναι εναλλάξιμες, ενώ οι τιμές των σ_r και σ_θ υπολογίζονται από τα γνωστά μεγέθη τους στο ρ_F , το οποίο και γίνεται το σημείο αναφοράς. Οι μεταβολές τάσεων $\Delta\sigma_r$ και $\Delta\sigma_\theta$ μεταβάλλονται κατά $1/\rho^2$. Στην πλαστική ζώνη των καθαρά συνεκτικών εδαφών (Σχήμα 2.12.a) οι δύο καμπύλες, σ_r και σ_θ είναι παράλληλες (η διεκτροπική τάση παραμένει σταθερή). Στα εδάφη με συνεκτική συμπεριφορά και γωνία τριβής, ο λόγος των τεταγμένων τους σε σχέση με έναν

φανταστικό άξονα, $p = -c \cot\Phi$, είναι σταθερή. (Σχήμα 2.12.b). Στην περίπτωση αυτή η διαφορά σ_r και σ_θ , δηλαδή η διεκτροπική τάση, αυξάνεται από το σημείο αναφοράς στο σύνορο ελαστικής και πλαστικής φάσης. Το ποσοστό διακύμανσης είναι μικρότερο από ότι στην ελαστική ζώνη:

$$\sigma_r - \sigma_\theta \sim \left(\frac{1}{\rho}\right)^{1-K_a} \text{ instead of } \left(\frac{1}{\rho}\right)^2$$

Η τιμή της σ_r στα τοιχώματα της κοιλότητας εκπροσωπεί την οριακή πίεση p_L . Προκειμένου να υπολογιστεί η p_L , πρέπει να είναι γνωστή η τιμή της a σε σχέση με την ρ_F . Έτσι, απαιτείται μία δεύτερη ρεολογική λειτουργία η οποία να περιγράφει τη συμπίεστικότητα του εδάφους κατά τη διάρκεια της πλαστικής φάσης. Η πιο απλή υπόθεση είναι αυτή της μη αύξησης του όγκου, η οποία οδηγεί στους επόμενους υπολογισμούς, αφού έχει αποδειχθεί ότι δεν υπάρχουν μεταβολές του όγκου ούτε στην ελαστική φάση (Σχήμα 2.7.a). Οπότε:

$$\rho_F^2 - r_F^2 = a^2 \quad (2.57).$$

Έτσι εκφράζεται το γεγονός ότι ο δακτύλιος του εδάφους ανάμεσα στην κοιλότητα και στο ελαστο-πλαστικό όριο δεν έχει υποστεί μεταβολή του όγκου από τη αρχή της δοκιμής ($r_0=0$). Έστω, ακόμα, ότι ε_F είναι η τροπή κατά την οποία υπάρχει αστοχία. Εφόσον η περίπτωση των μικρών παραμορφώσεων εξετάζεται στην ελαστική φάση, το ε_F ισούται με την παραμόρφωση Almansi α_F (ή την παραμόρφωση Green g_F). Οπότε:

$$\frac{a^2}{\rho_F^2} = \frac{\rho_F^2 - r_F^2}{\rho_F^2} = 2\alpha_F \quad (= 2\varepsilon_F) \quad (2.58).$$

Ακόμα,

$$2\alpha_F = \frac{p_F - p_0}{G} = \frac{(p_0 + c \cdot \cot\Phi) \sin\Phi}{G} \quad \text{or} \quad \frac{c_u}{G} \quad (2.59).$$

Η αναλογία των a^2 και ρ_F^2 που δίνεται από την πάνω εξίσωση, μπορεί να εισαχθεί στις εξισώσεις για τα καθαρά συνεκτικά εδάφη και έτσι μπορεί να υπολογιστεί η p_L .

$$p_L = p_F + c_u \cdot \ln\left(\frac{1}{2\alpha_F}\right) = p_0 + c_u \left[1 + \ln\left(\frac{1}{2\alpha_F}\right)\right] \quad (2.60)$$

για καθαρά συνεκτικά εδάφη, ενώ

$$p_L = (p_F + c \cdot \cot \Phi) \left(\frac{1}{2 a_F} \right)^{\frac{1-K_s}{2}} - c \cdot \cot \Phi$$

$$p_L = (p_0 + c \cdot \cot \Phi) (1 + \sin \Phi) \left(\frac{1}{2 a_F} \right)^{\frac{1-K_s}{2}} - c \cdot \cot \Phi$$

(2.61α και 2.61β)

για εδάφη με συνοχή και φωνία τριβής.

Τέλος, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι για ασυμπίεστα εδάφη, η οριακή πίεση p_L εξαρτάται όχι μόνο από τις ιδιότητες συνοχής και γωνίας τριβής, αλλά και από τις παραμορφώσεις αστοχίας ϵ_F ή a_F .

2.3.7 Η θεωρητική Πρεσσιομετρική καμπύλη για ασυμπίεστο έδαφος – Διαδρομή τάσεων

Ένας τρόπος για να κατασκευαστεί η πρεσσιομετρική καμπύλη στην πλαστική φάση είναι να βρεθεί μία έκφραση για την σ_r σε συνάρτηση με την περιμετρική τροπή a ή g , και στη συνέχεια, να αντικατασταθεί η σ_r με p , και τα a ή g , με a_0 ή g_0 .

Οι εξισώσεις 2.53 και 2.55 περιλαμβάνουν την σ_r ως συνάρτηση του (ρ^2/ρ_F^2) . Επειδή το έδαφος είναι ασυμπίεστο, αυτός ο λόγος σχετίζεται με την περιμετρική παραμόρφωση a ή g . Για παράδειγμα, η εξίσωση 2.16β, γράφεται:

$$\rho^2 - r^2 = 2 a \rho^2 = \rho_F^2 - r_F^2 = 2 a_F \rho_F^2$$

$$\frac{\rho_F^2}{\rho^2} = \frac{a}{a_F}$$

(2.62 και 2.63 αντίστοιχα).

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις 2.63 και 2.53, 2.55 προκύπτουν οι:

$$\sigma_r = p_F + c_u \cdot \ln \frac{a}{a_F}$$

$$\sigma_r + c \cdot \cot \Phi = (p_F + c \cdot \cot \Phi) \left(\frac{a}{a_F} \right)^{\frac{1-K_s}{2}}$$

(2.64 και 2.65 αντίστοιχα).

Οι τελευταίες εξισώσεις είναι ανάλογες της 2.27. Τα ισοδύναμα της εξίσωσης 2.26, (λαμβάνοντας υπόψη την 2.18β), είναι:

$$p = p_F + c_u \cdot \ln \frac{\alpha_o}{\alpha_F} = p_F + c_u \cdot \ln \left(\frac{1}{2 \alpha_F} \cdot \frac{\Delta V}{V} \right)$$

$$p = (p_F + c \cdot \cot \Phi) \left(\frac{\alpha_o}{\alpha_F} \right)^{\frac{1-K_s}{2}} - c \cdot \cot \Phi$$

$$p = (p_F + c \cdot \cot \Phi) \left(\frac{1}{2 \alpha_F} \cdot \frac{\Delta V}{V} \right)^{\frac{1-K_s}{2}} - c \cdot \cot \Phi$$

(2.66, 2.67α και 2.67β αντίστοιχα).

Με την παραμόρφωση g , τα αποτελέσματα αντίστοιχα είναι:

$$p = p_F + c_u \left[\ln \left(1 + \frac{1}{2 g_F} \right) - \ln \left(1 + \frac{1}{2 g_o} \right) \right]$$

$$p = (p_F + c \cdot \cot \Phi) \left[\left(1 + \frac{1}{2 g_F} \right) / \left(1 + \frac{1}{2 g_o} \right) \right]^{\frac{1-K_s}{2}} - c \cdot \cot \Phi$$

(2.68 και 2.69 αντίστοιχα).

Όλες αυτές οι εξισώσεις ισχύουν για $\Delta V \geq \Delta V_F$ ($= 2 g_F V_o$) και επιτρέπουν στην πρεσσιομετρική καμπύλη να σχεδιαστεί πέρα από το p_F και στο τέλος της ευθείας γραμμής της ελαστικής περιοχής, όπως φαίνεται στα Σχήματα 2.13 και 2.14. Η διαδρομή των τάσεων που ακολουθείται κατά τη διάρκεια της δοκιμής, φαίνεται πάνω από κάθε πρεσσιομετρική καμπύλη, είναι δηλαδή το κορυφαίο σημείο του κύκλου του Mohr (σ_m, τ_m). Αυτή είναι η σκούρα γραμμή που ξεκινά από το p_o και κινείται κάθετα στο σημείο F, και στη συνέχεια οριζόντια ή διαγώνια μέχρι το σημείο L. Αυτό το τελευταίο σημείο αντιστοιχεί στη θεωρητική οριακή πίεση p_L και λαμβάνεται για $\Delta V/V_o = \infty$, δηλαδή $\alpha_L = 1/2$ ή $g_L = \infty$. Το σημείο I αντιστοιχεί στην πραγματική οριακή πίεση, p_I που λαμβάνεται για $\Delta V/V_o = 1$, δηλαδή $\alpha_I = 1/4$ ή $g_I = 1/2$:

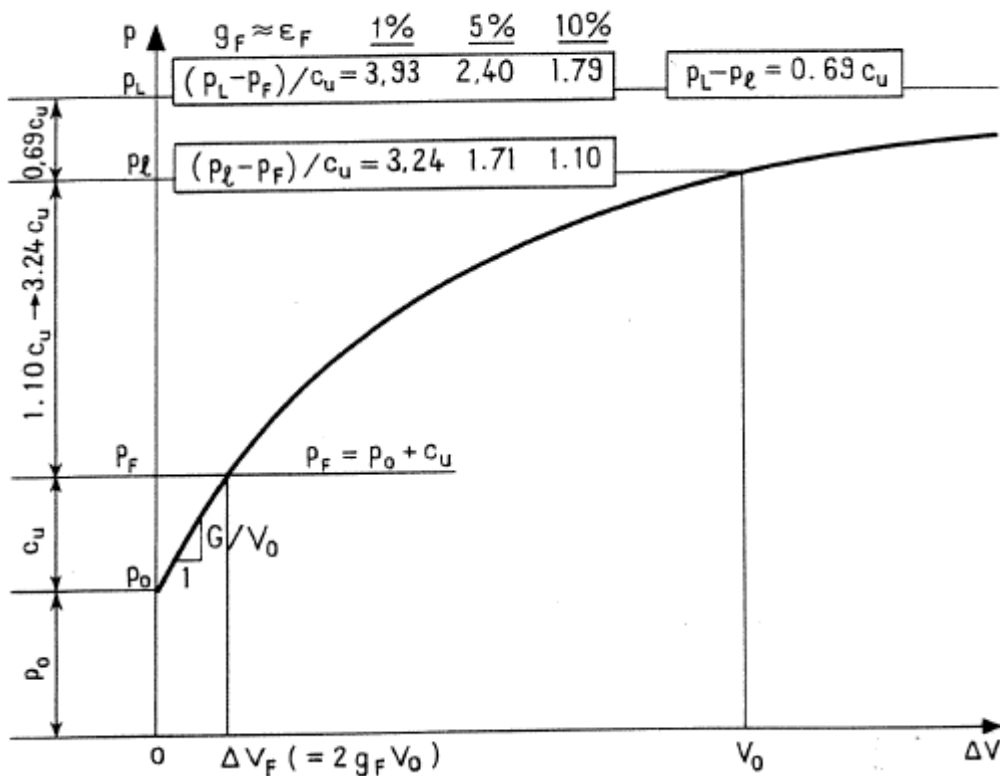
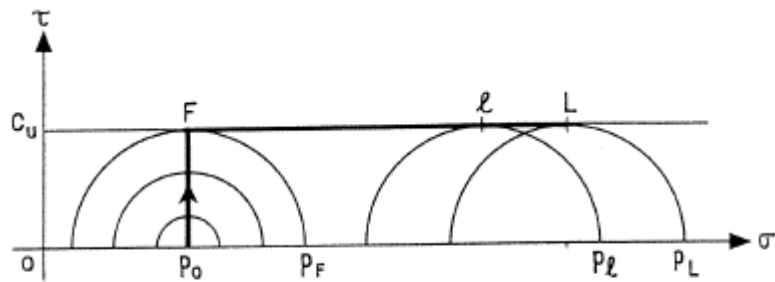
$$p_I = p_F + c_u \cdot \ln \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{4 g_F} \right) = p_F + c_u \cdot \ln \left(\frac{1}{4 \alpha_F} \right)$$

$$= p_L - 0.69 c_u$$

$$p_I = (p_F + c \cdot \cot \Phi) \left(\frac{1}{4 \alpha_F} \right)^{\frac{1-K_s}{2}} - c \cdot \cot \Phi$$

$$= (p_F + c \cdot \cot \Phi) \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{4 g_F} \right)^{\frac{1-K_s}{2}} - c \cdot \cot \Phi$$

(2.70, 2.71 και 2.72 αντίστοιχα).



Σχήμα2. 13: Η πρεσσιομετρική καμπύλη (p, ΔV) της ελαστο-πλαστικής φάσης, σε συνεκτικό έδαφος, η διαδρομή των τάσεων (stress path)

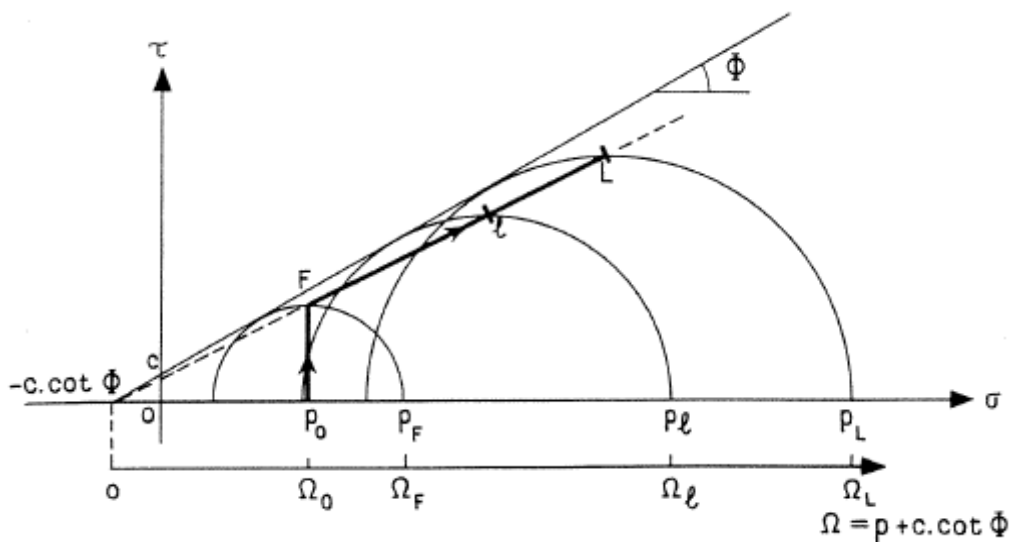
Έστω $\Omega = p + c \cot\phi$ (2.72). Τότε η εξίσωση 2.71 γίνεται:

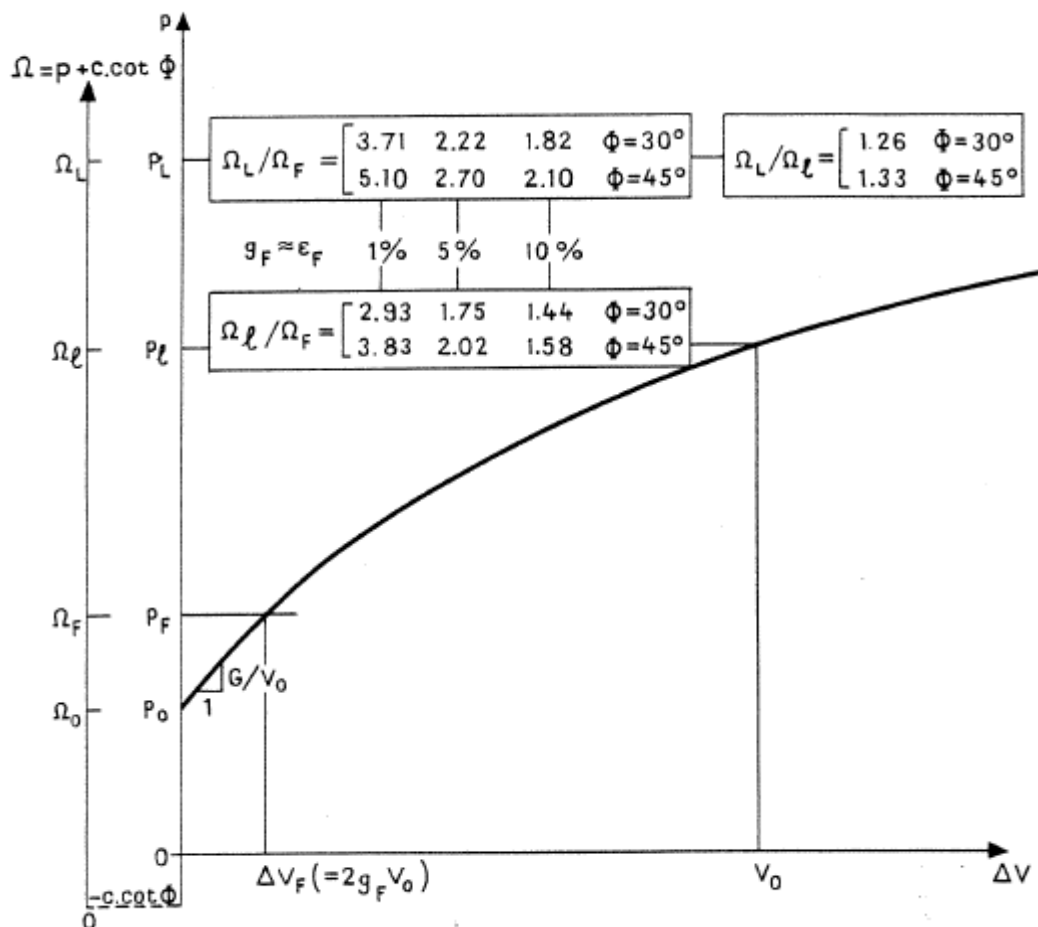
$$\Omega_1 = \Omega_F \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{4g_F} \right)^{\frac{1-K_s}{2}} = \Omega_F \left(\frac{1}{4a_F} \right)^{\frac{1-K_s}{2}} = \Omega_L \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{1-K_s}{2}}$$

(2.73).

Για τα καθαρά συνεκτικά εδάφη, στο Σχήμα 2.13, η διαφορά μεταξύ p_l και p_L είναι ίση με $0,69 c_u$, ανεξάρτητα από την τροπή αστοχίας α_F ή g_F . Από την άλλη πλευρά, τα $(p_L - p_F)$ ή $(p_l - p_F)$ εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το g_F όπως απεικονίζεται. Αν το g_F αυξάνεται από

1% σε 5%, τότε το $(p_i - p_0)$ μειώνεται από 4.24 σε 2.71. Μπορεί ακόμα να φτάσει και το 2.1 αν το g_F αγγίξει το 10%, αλλά στην περίπτωση αυτή, η υπόθεση των μικρών τροπών, που δίνουν $p_F = c_u$ χωρίς μεταβολές του όγκου, δεν μπορεί να ισχύει για τόσο μεγάλες παραμορφώσεις. Σε κάθε περίπτωση, το βασικό είναι ότι λόγω του g_F και μόνο, μπορεί να υπάρχει διπλή μεταβολή στο $(p_i - p_0) / c$. Για εδάφη συνεκτικά και με γωνία τριβής, στο σχήμα 2.14, η αναλογία Ω_i / Ω_F , επίσης μεταβάλλεται διπλά με το g_F . Η αντίστοιχη μεταβολή του $(p_i - p_0) / (p_F - p_0)$ είναι ακόμα μεγαλύτερη. Ακόμα, η πίεση που ξεκινά την αστοχία, p_F ή Ω_F , εξαρτάται από την τιμή της αρχικής οριζόντιας πίεσης p_0 . Ωστόσο, ο λόγος Ω_i / Ω_F είναι πρακτικά ανεξάρτητος της γωνίας ϕ , τουλάχιστον όσον αφορά στο σύνηθες εύρος των $30^\circ - 45^\circ$, και εξαρτάται πρωτίστως από το g_F .





Σχήμα2. 14: Πρεσσιομετρική καμπύλη (p , ΔV) ελαστο-πλαστικού εδάφους με συνοχή και φωνία τριβής και η διαδρομή των τάσεων (stress path)

Τα παραπάνω επισημαίνουν το γεγονός ότι η τάση αστοχίας, g_F , είναι τουλάχιστον τόσο σημαντική όσο και η γωνία τριβής, ϕ , στον καθορισμό της οριακής πίεσης.

2.3.8 Οι περιορισμοί στην Ελαστο-πλαστική συμπεριφορά

Το απλοποιημένο ελαστο-πλαστικό μοντέλο χρησιμοποιείται για να ορίσει την επιτρεπτή χαρακτηριστική μορφή της πρεσσιομετρικής καμπύλης, αλλά και να την περιγράψει θεωρητικά. Το γραμμικό τμήμα της καμπύλης προφανώς υπάρχει, όταν το έδαφος υποβάλλεται σε παραμορφώσεις, ενώ η καμπυλότητα ξεκινά όταν ξεκινά η αστοχία, και γίνεται όλο και πιο έντονη καθώς η κανονική τάση αυξάνεται και η αστοχία εξελίσσεται. Έτσι, τελικά εμφανίζεται η οριακή πίεση.

Ακόμα, η οριακή πίεση είναι τόσο συνάρτηση του g_F ή α_F , όσο και συνάρτηση της συνοχής και της εσωτερικής γωνίας τριβής του εδάφους.

Αυτός ο τύπος της ανάλυσης περιέχει αυστηρούς περιορισμούς στη συμπεριφορά του εδάφους, οι σημαντικότεροι των οποίων είναι:

1. Μόνο θλιπτικές ογκομετρικές τροπές μπορούν να μελετηθούν βάση της γραμμικής ελαστικότητας, ενώ οι μεταβολές του όγκου οφείλονται στις αυξήσεις του μέσου όρου της πίεσης.
2. Το έδαφος μελετάται ασυμπίεστο κατά τη διάρκεια της πλαστικής φάσης.
3. Τα χαρακτηριστικά της διατμητικής αντοχής, c_u ή c και ϕ , θεωρούνται σταθερά από την αρχή της δοκιμής ως την αστοχία σε άπειρη διατμητική τάση, δηλαδή το έδαφος θεωρείται ανέπταφο.

Το ελαστο-πλαστικό μοντέλο δεν έχει τη δυνατότητα να μελετήσει ογκομετρικές τροπές λόγω διάτμησης, αλλά ούτε και τις μειώσεις της διατμητικής δύναμης. Με άλλα λόγια, η διαστολικότητα και η ευαισθησία του εδάφους αγνοούνται.

Είναι, ακόμα, άξιο αναφοράς το γεγονός ότι κάθε κλασσικό μοντέλο που χρησιμοποιείται στην εδαφομηχανική για τέτοιου είδους φαινόμενα, υποβάλλεται στους ίδιους περιορισμούς.

Όμως, υπάρχει τρόπος να συμπεριληφθούν η διαστολικότητα και η ευαισθησία των εδαφών στην ανάλυση της πρεσσιομετρικής δοκιμής, εφόσον είναι δύο πολύ βασικά χαρακτηριστικά των πραγματικών εδαφών. Αυτό ακολουθεί παρακάτω, ξεκινώντας από τα αστράγγιστα εδάφη, και συνεχίζοντας με τα στραγγισμένα. Λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών της πρεσσιομετρικής δοκιμής, μόνο τα κοκκώδη εδάφη συμπεριφέρονται ως πλήρως αποστράγγιστα κατά τη διάρκεια αυτής. Για το λόγο αυτό, αυτή η συμπεριφορά αποδίδεται στα κοκκώδη εδάφη, παρόλο που μία αργή πρεσσιομετρική δοκιμή σε άργιλο μπορεί να δώσει την ίδια ακριβώς συμπεριφορά.

2.4 Συνεκτικά εδάφη σε αστράγγιστες συνθήκες

Η ιδανική πρεσσιομετρική δοκιμή σε κορεσμένη άργιλο είναι μία ειδική περίπτωση όπου η θεωρητική ερμηνεία των αποτελεσμάτων δεν περιορίζεται από την αδυναμία του μηχανικού να βρεί το τέλειο ρεολογικό μοντέλο για κάποιο έδαφος.

Όταν το κορεσμένο και συνεκτικό έδαφος έχει αστράγγιστη συμπεριφορά, δεν υποβάλλεται σε μεταβολές του όγκου. Ακόμα, κατά τη διάρκεια της δοκιμής, υποβάλλεται εξ' ολοκλήρου στον ίδιο τύπο φόρτισης, και υπάρχει μία μοναδική διατμητική καμπύλη που περιγράφει αυτή τη συμπεριφορά της μάζας του (όσο, βέβαια, το έδαφος είναι ομογενές).

Αυτές οι ιδιαίτερες συνθήκες δείχνουν ότι κοιτώντας το πρεσσιομετρικό πρόβλημα θεωρητικά, είναι δυνατό να δοθεί βαρύτητα σε μία διατμητική καμπύλη κάθε μορφής. Δεν είναι απαραίτητο να καταφύγει κανείς σε απλούστευση των προϋποθέσεων του ελαστοπλαστικού μοντέλου για να επιλύσει, για παράδειγμα, ένα πρόβλημα. Ακόμη, θεωρητικά είναι δυνατό να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα από μία αντίθετη μέθοδο της συνηθισμένης: η διατμητική καμπύλη μπορεί να συναχθεί από τη γνώση της μορφής της πρεσσιομετρικής καμπύλης.

Η πρακτική εφαρμογή αυτής της θεωρίας συναντά ένα μεγάλο εμπόδιο: την παρουσία ενός δακτυλίου αναμοχλευμένου ή διαταραγμένου εδάφους γύρω από το πρεσσιόμετρο λόγω της διάνοιξης της γεώτρησης, και της επακόλουθης αποφόρτισης των τοιχωμάτων της γεώτρησης. Οι επιπτώσεις της διαταραγμένης αυτής ζώνης έχουν αναλυθεί από τους Baguelin, Frank and Lezequel (1975), και η ανάλυσή τους παρατίθεται παρακάτω.

2.4.1 Η σχέση μεταξύ Διατμητικής και Πρεσσιομετρικής καμπύλης

Η πρώτη ρεολογική ιδιότητα του εδάφους είναι η ασυμπτωσιότητα: $m_v = 1$, στην εξίσωση 2.09α. Άμεση συνέπεια αυτού είναι το γεγονός ότι το σύνολο των παραμορφώσεων σε κάποιο σημείο του εδάφους είναι γνωστό από μία μόνο μεταβλητή, για παράδειγμα το g . Από τις εξισώσεις 2.07 και 2.09, σε συνδιασμό με την εξίσωση 2.15, οι μεταβλητές g_r και Γ δίνονται από:

$$(1 + 2g_r)(1 + 2g) = 1$$

$$\Gamma = 2g$$

(2.74 και 2.75 αντίστοιχα).

Ακόμα, η εξίσωση 2.09β μπορεί να γραφτεί:

$$q^2 - r^2 = a^2$$

(2.76),

ενώ από τις εξισώσεις 2.01 και 2.16α:

$$2ur + u^2 = 2u_0r_0 + u_0^2 = a^2$$

$$r^2g = r_0^2g_0 = a^2/2$$

(2.77 και 2.78 αντίστοιχα).

Η έννοια των δύο αυτών εξισώσεων είναι ότι το πεδίο των παραμορφώσεων

προσδιορίζεται μόνο από μία μέτρηση, την παραμόρφωση u_0 των τοιχωμάτων της γεώτρησης με μηδενική αρχική ακτίνα.

Ακόμα, από τις εξισώσεις 2.76 και 2.16α:

$$\varrho^2 \left(1 + \frac{1}{2g}\right)^{-1} = \varrho_0^2 \left(1 + \frac{1}{2g_0}\right)^{-1} = a^2 \quad (2.79).$$

Χρησιμοποιώντας τις τροπές Almansi αντί για τις τροπές Green, η τελευταία εξίσωση είναι πιο απλή:

$$\begin{aligned} r^2 \left(\frac{1}{2\alpha} - 1\right)^{-1} &= r_0^2 \left(\frac{1}{2\alpha_0} - 1\right)^{-1} = a^2 \\ \varrho^2 \alpha &= \varrho_0^2 \alpha_0 = a^2/2 \end{aligned} \quad (2.80 \text{ και } 2.81 \text{ αντίστοιχα}).$$

Η δεύτερη ρεολογική ιδιότητα δίνεται από μία μοναδική διατμητική καμπύλη $\tau_m(\Gamma)$ για το υλικό, που εκφράζεται ως: $\tau_m = f(g)$ (2.82).

Διαφοροποιώντας την εξίσωση 2.78, και συνδυάζοντάς τη με την εξίσωση 2.19 προκύπτει:

$$d\sigma_r = -2\tau_m \frac{d\varrho}{\varrho} = f(g) \frac{dg}{g(1+2g)} \quad (2.83).$$

Αυτή η σχέση μπορεί να εκφράσει την κοιλότητα με αρχική ακτίνα r_0 , αντικαθιστώντας το σ_r με p , και το g με g_0 , έτσι ώστε:

$$f(g_0) = \frac{dp}{dg_0} g_0 (1 + 2g_0) \quad (2.84)$$

ή

$$p = p_0 + \int_0^{g_0} \frac{f(g) dg}{g(1+2g)} \quad (2.85).$$

Λαμβάνοντας υπόψη ότι $\Delta V = 2g_0 V_0$, ισχύει:

$$\tau_m = \frac{dp}{d(\Delta V)} \Delta V \left(1 + \frac{\Delta V}{V_0}\right) \quad (2.86)$$

(Cassan, 1960).

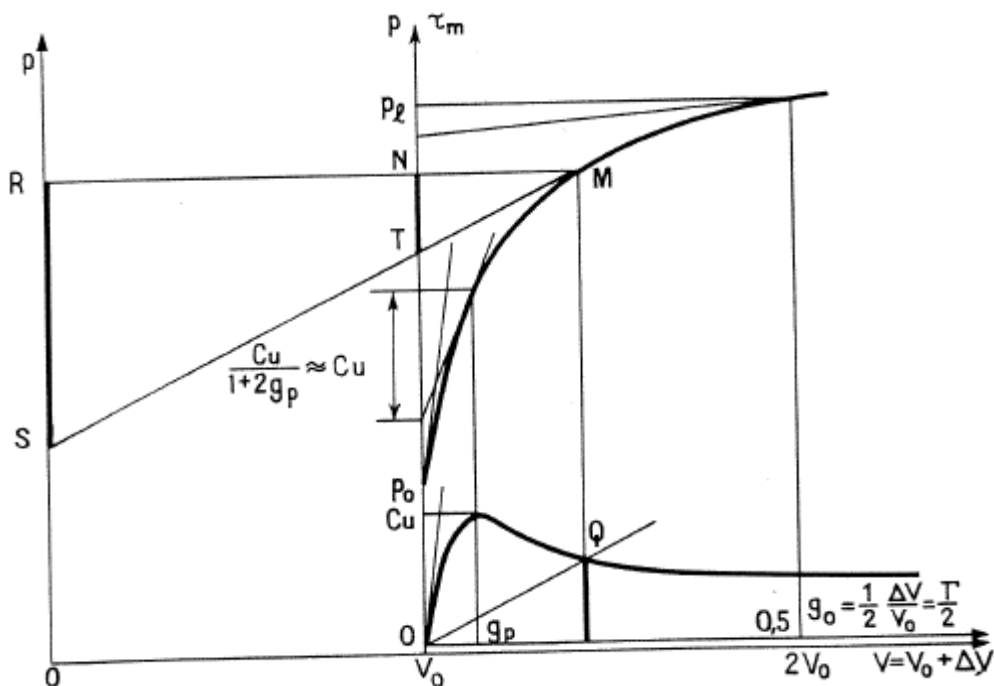
Αυτές, λοιπόν, οι εξισώσεις δείχνουν ότι η διατμητική καμπύλη, $\tau_m = f(g)$, και η

πρεσσιομετρική καμπύλη, $p = F(g_0)$ ή $p = F(\Delta V)$, προέρχονται η μία από την άλλη. Η εξίσωση A.84 μπορεί να τεθεί σε δύο διαφορετικές μορφές που οδηγούν σε δύο γραφικές ερμηνείες:

$$g_0 \frac{dp}{dg_0} = \frac{f(g_0)}{1 + 2g_0}$$

$$\left(g_0 + \frac{1}{2}\right) \frac{dp_0}{dg_0} = \frac{f(g_0)}{2g_0} = \frac{\tau_m}{\Gamma}$$

(2.87 και 2.88 αντίστοιχα).



Σχήμα2. 15: Σχέση μεταξύ διατμητικής και πρεσσιομετρικής καμπύλης σε συνεκτικό έδαφος για αστράγγιστη συμπεριφορά.

Στην πρώτη περίπτωση (εξίσωση 2.87), ο αριστερός όρος είναι ίσος με την συνεφαπτομένη NT της πρεσσιομετρικής καμπύλης (p, g_0) ή ($p, \Delta V$), στον άξονα της πίεσης p (Σχήμα 2.15). Όταν οι παραμορφώσεις είναι μικρές, τότε $1 + 2g_0 \sim 1$, η NT παριστά τη διάτμηση τ_m και την ακτίνα του αντίστοιχου κύκλου του Mohr για την τάση.

Στη δεύτερη περίπτωση (εξίσωση 2.88), ο αριστερός όρος είναι ίσος με την εφαπτομένη RS της πρεσσιομετρικής καμπύλης ($p, g_0 + 1/2$) ή ($p, \Delta V$) στον άξονα της πίεσης, ενώ ο δεξιάς όρος παριστά τη μισή κλίση της τέμνουσας OQ και ισούται με το μέτρο διάτμησης, το οποίο δίνεται από την τέμνουσα $G(\Gamma) = \tau_m / \Gamma$ στη διατμητική καμπύλη (τ_m, Γ). Ακόμα, οι καμπύλες (p, g_0) και (τ_m, g_0) έχουν κλίση ίση με $2 G_0$.

Οι ισοδύναμες εκφράσεις των εξισώσεων 2.84 και 2.85 με τροπή α_0 είναι απλές:

$$\tau_m = \alpha_0 \cdot \frac{dp}{d\alpha_0}$$

$$p = p_0 + \int_0^{\alpha_0} \tau_m(\alpha) \cdot \frac{d\alpha}{\alpha}$$

(2.89 και 2.90 αντίστοιχα).

Η εξίσωση 2.89 δείχνει ότι η διατμητική τάση είναι ίση με την εφαπτομένη της καμπύλης (p, α_0) στον άξονα της πίεσης, ακόμα και για μεγάλες παραμορφώσεις.

Αφού:

$$d\alpha_0/\alpha_0 = d(\ln \alpha_0) = d \ln(\Delta V/V)$$

(2.91),

η εξίσωση 2.89 γράφεται και:

$$\tau_m = \frac{dp}{d \ln(\Delta V/V)}$$

(2.92).

Αυτή η έκφραση δόθηκε από τον Palmer το 1972, ο οποίος έδειξε ότι η τ_m παρίσταται από την κλίση της καμπύλης [$p, \ln(\Delta V/V)$].

Μία ακόμα έκφραση της εξίσωσης 2.90 είναι η εξής:

$$p = p_0 + \int_{-\infty}^{\ln \alpha_0} \tau_m \cdot d(\ln \alpha)$$

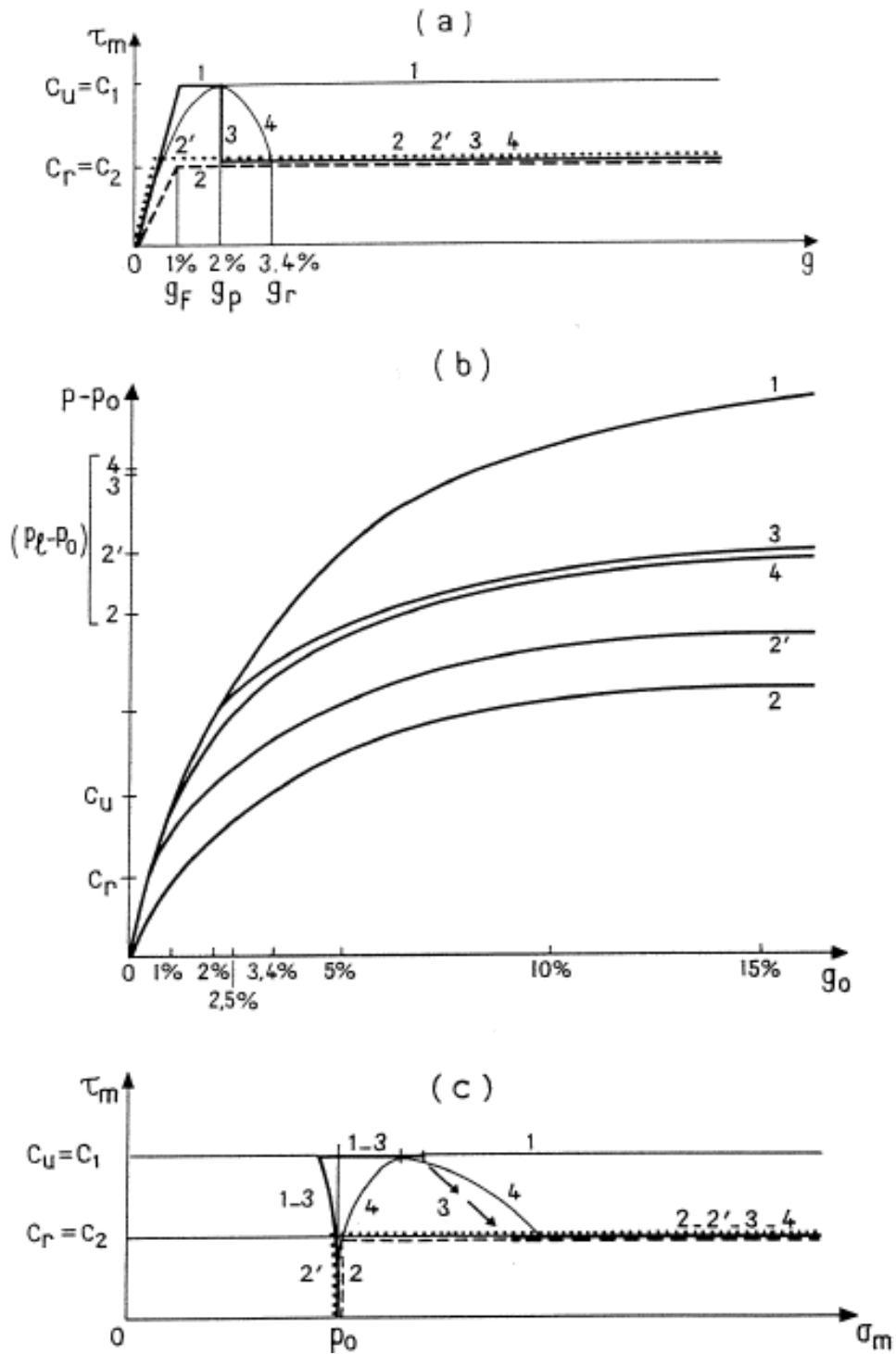
(2.93).

2.4.2 Η επιρροή της εδαφικής ευαισθησίας στην πρεσσιομετρική συμπεριφορά

Με στόχο τη μελέτη της επιρροής του διατμητικού νόμου κάθε μορφής αποτελεσμάτων της πρεσσιομετρικής δοκιμής, είναι χρήσιμο να συγκριθούν σχηματικά οι διατμητικές καμπύλες του Σχήματος 2.16.α. Οι καμπύλες 1, 2 και 2' του σχήματος έχουν ιδανική ελαστο-πλαστική συμπεριφορά με γραμμικό αρχικό τμήμα, κατά τη διάρκεια του οποίου η διατμητική τάση αυξάνεται μέχρι μία τιμή και μετά παραμένει σταθερή. Δεν είναι απαραίτητο να θεωρείται ότι οι παραμορφώσεις μέχρι τη ρήξη, g_F , είναι μικρές, ούτε να χρησιμοποιείται η προσέγγιση των μικρών παραμορφώσεων για το αρχικό τμήμα της καμπύλης. Έτσι, η διατμητική καμπύλη 1 δίνεται από:

$$\begin{aligned} \tau_m &= 2G_1 \cdot g & \text{for } 0 \leq g \leq g_F \\ \tau_m &= c_1 & \text{for } g \geq g_F \end{aligned}$$

(2.94 και 2.95 αντίστοιχα).



Σχήμα2. 16: Σύγκριση ευαίσθητου και ελαστο-πλαστικού εδάφους α) διατμητικές καμπύλες, β) πρεσσιομετρικές καμπύλες, γ) – Διαδρομή τάσεων (Stress paths)

Η ακριβής πρεσσιομετρική καμπύλη που αντιστοιχεί σε αυτή τη διατμητική καμπύλη μπορεί να βρεθεί με τη χρήση των εξισώσεων 2.85, έτσι ώστε:

$$p = p_0 + G_1 \cdot \ln(1 + 2g_0) \quad \text{for } 0 \leq g_0 \leq g_F$$

$$p = p_F + c_1 \cdot \left[\ln\left(1 + \frac{1}{2g_F}\right) - \ln\left(1 + \frac{1}{2g}\right) \right] \quad \text{for } g_0 \geq g_F$$

(2.96 και 2.97 αντίστοιχα).

Οι ανάλογες εξισώσεις για την καμπύλη 2 (με παραμέτρους G_2 και c_2 με τιμές μισές των G_1 και c_1) και για την καμπύλη 2' (με παραμέτρους G_1 και c_2) είναι πανομοιότυπες. Οι συγκεκριμένες καμπύλες απεικονίζονται στο Σχήμα 2.16.b.

Η καμπύλη 3 του Σχήματος 2.16.a, παριστά ένα ευαίσθητο έδαφος στο οποίο η διατμητική δύναμη μειώνεται μετά από την επίτευξη της μέγιστης τιμής της. Στην περίπτωση αυτή συμβαίνει απότομη πτώση της δύναμης, σε τάση ίση με g_p , ενώ $c_u = c_1$ και $c_r = c_2$. Εφόσον η ευαισθησία ορίζεται από το λόγο c_u/c_r , η ευαισθησία του εδάφους της καμπύλης 3 ισούται με 2. Η αντίστοιχη πρεσσιομετρική καμπύλη (Σχήμα 2.16.b) είναι ένας συνδιασμός των καμπυλών 1 και 2: στο διάστημα 0 – 2% η τροπή ταυτίζεται με την καμπύλη 1, ενώ στο διάστημα από 2% ως το άπειρο, με την καμπύλη 2.

Η διατμητική καμπύλη που αριθμείται στο σχήμα 2.16.a είναι μία πιο ήπια αναπαράσταση του ίδιου φαινομένου της καμπύλης 3: από τροπή 0 ως 3,41%, όπου έχουμε μία παραβολή της μορφής:

$$\tau_m = 100 c_1 \cdot g \cdot (1 - 25g) \quad 0 \leq g \leq 3.41\%$$

(2.98).

Η μέγιστη αντίσταση c_u η οποία ισούται με την c_1 , λαμβάνεται από την τροπή g_p , ίση με 2%. Η καμπύλη 4 του Σχήματος 2.16.b είναι αρκετά παρόμοια με την καμπύλη 3 και απεικονίζει πώς η πρεσσιομετρική καμπύλη τείνει να “εξομαλύνει” τα εδαφικά χαρακτηριστικά, λόγω της προόδου του πεδίου των τάσεων στη μάζα. Οι πρεσσιομετρικές καμπύλες 2, 2', 3 και 4 είναι παράλληλες με $g = 3.41\%$.

Ο ακόλουθος πίνακας 2.17 συνοψίζει τα χαρακτηριστικά των διαφορετικών πρεσσιομετρικών καμπυλών που συζητήθηκαν παραπάνω και προκύπτουν από τις διατμητικές καμπύλες του σχήματος 2.16.a.

Ratio $\frac{p - p_0}{c_r}$ at different strains					
Strain, g_0	1	2	Curve 2'	3	4
0.5%	0,995	0,497	0,995	0,995	0,93
1.0%	1,98	0,99	1,68	1,98	1,73
2 %	3,33	1,67	2,35	3,33	2,95
3.41%	4,34	2,17	2,86	3,84	3,82
50% (p_1)	8,46	4,23	4,91	5,89	5,87
∞ (p_L)	9,84	4,92	5,61	6,59	6,57

Σχήμα2. 17: Σύγκριση πρεσσιομετρικών αποτελεσμάτων

Η πρεσσιομετρική καμπύλη ενός ευαίσθητου εδάφους τύπου (4) (με αρχικό μέτρο G_0 , και αστράγγιστη συνοχή c_u στη βολίδα και c_r όπου έχει αναμοχλευθεί έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

1. Το αρχικό τμήμα είναι ημιγραμμικό με κλίση $2G_0$, μέχρι να επιτευχθεί η πίεση p_F , η οποία είναι περίπου ίση με $p_0 + c_u$. Η αντίστοιχη τροπή g_F που είναι ίση με $c_u / 2 G_0$ είναι μικρότερη από την τροπή g_p , στο μέγιστο της διατμητικής αντοχής.
2. Το σχήμα του τελικού τμήματος, όπου $g_0 > g_r$, εξαρτάται μόνο από το μέγεθος c_r .
3. Το ενδιάμεσο τμήμα της καμπύλης, έχει σχήμα και μορφή που είναι λίγο ή πολύ μεταβλητό.

Αν η μείωση της αντοχής είναι πρόωρη και απότομη, μπορεί να πει κανείς ότι είναι η c_r και όχι η c_u που ορίζει τις οριακές πιέσεις p_1 και p_L .

Το Σχήμα 2.16.c δίνει τη διαδρομή των τάσεων (σ_m , τ_m) που αντιστοιχεί στις διαφορετικές διατμητικές καμπύλες του Σχήματος 2.16.a. Στην αρχή όλες οι διαδρομές ξεκινούν κάθετα. Η διαδρομή της καμπύλης 3 έχει μία ασυνέχεια εκεί όπου η αντοχή πέφτει λίγο απότομα μετά από την επίτευξη της μέγιστης τιμής της.

Η επιρροή της ευαισθησίας στην οριακή πίεση μπορεί να αναλυθεί αρκετά εύκολα χρησιμοποιώντας το διάγραμμα του Σχήματος 2.18, όπου απεικονίζεται η διατμητική καμπύλη του εδάφους $\tau_m(g)$ ή $\tau_m(\alpha)$. Ο άξονας τροπής διαβαθμίζεται σύμφωνα με:

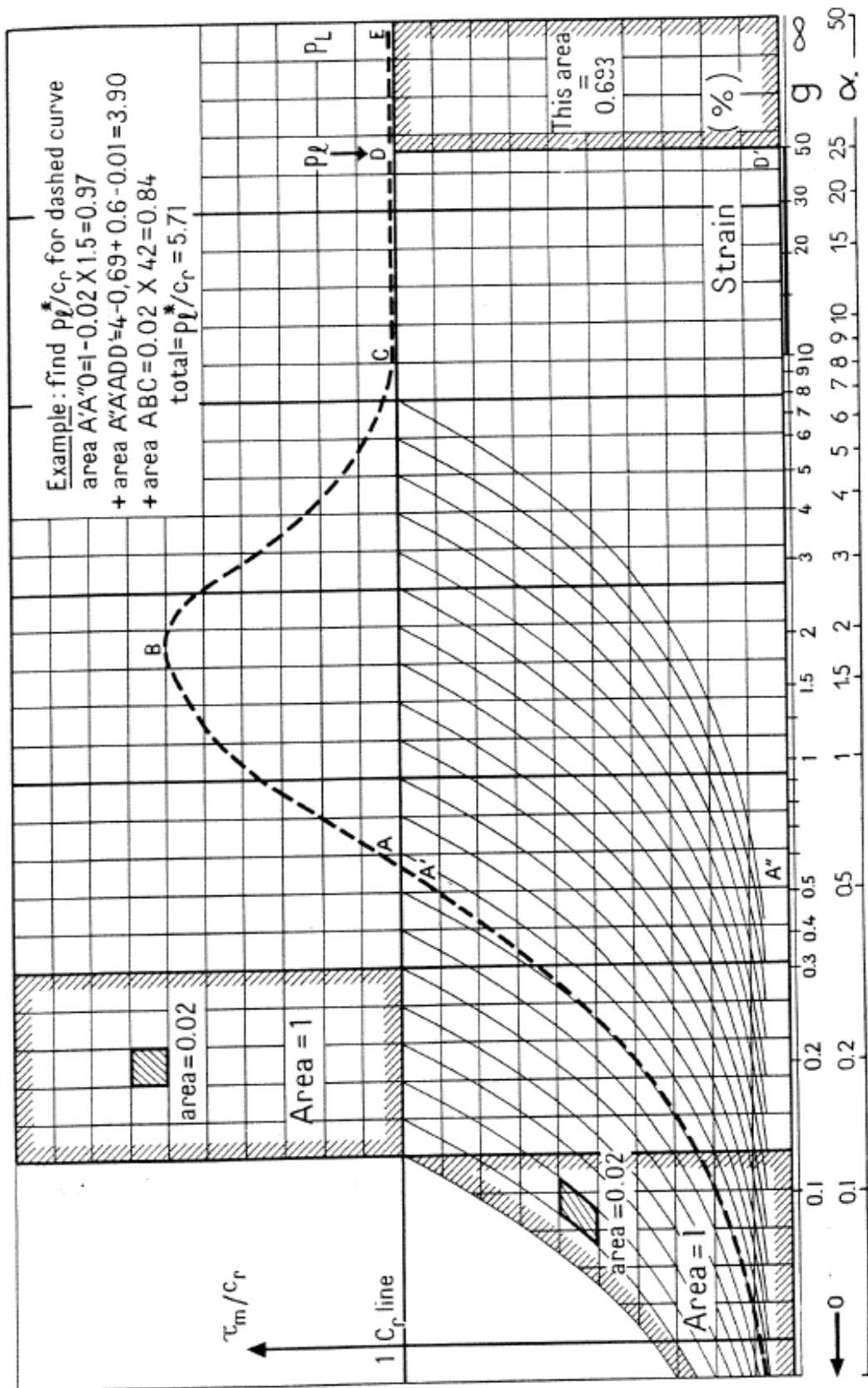
$-\ln(1+1/2g)$ ή $\ln\alpha$, ενώ ο άλλος άξονας δίνει τιμές τ_m/c_r . Η περιοχή που οριοθετείται στη βάση του άξονα των τροπών, στην κορυφή της διατμητικής καμπύλης, και στα δεξιά από την καταφόρυφη γραμμή της τετμημένης g , είναι ίση με την αναλογία $p^*(g)/c_r$ ή $p^*(\alpha)/c_r$ (εξισώσεις 2.85 και 2.93).

Αυτή η περιοχή μπορεί να υπολογιστεί γραφικά με τον υπολογισμό των

τετραγώνων, είτε τα μεγάλα με τιμή 1, είτε τα μικρά με τιμή 0,02. Είναι πιο εύκολο για την περιοχή κάτω από τη γραμμή του c_r , η οποία είναι κοντά στην καμπύλη τ_m , να υπολογιστούν τα παραλληλόγραμμα μεταξύ των εκθετικών καμπυλών πάνω από το διάγραμμα: κάθε μικρό παραλληλόγραμμο έχει την τιμή 0.02. Ακόμα, η περιοχή που οριοθετείται από μία εκθετική καμπύλη, τον άξονα των g ή α και την κάθετη γραμμή που τέμνει την γραμμή του c_r στο ίδιο σημείο με την εκθετική καμπύλη, έχει την τιμή 1.

Το αρχικό τμήμα της διατμητικής καμπύλης είναι παράλληλο με την εκθετική, όταν η διατμητική καμπύλη $\tau_m(\alpha)$ είναι γραμμική ($\tau_m = 2G\alpha$). Στο σχήμα 2.18 η διατμητική καμπύλη τυχαίνει να βρίσκεται στην κορυφή της εκθετικής.

Ένα παράδειγμα αυτής της διαδικασίας δίνεται στην πάνω δεξιά γωνία του Σχήματος 2.18 όπου $\rho_i/c_r = 5.71$, βρέθηκε από τα $g = 50\%$ και $\alpha = 25\%$.



Σχήμα 2. 18: Διάγραμμα για καθαρά συνεκτικά εδάφη

2.4.3 Η επιρροή του αναμοχλευμένου δακτυλίου εδάφους

Συγκρίνοντας, στη συνέχεια, την περίπτωση όπου υπάρχει παραμορφωμένο έδαφος μεταξύ του συνεκτικού, άθικτου εδάφους και της βολίδας (Σχήμα 2.19.a), παρατηρείται ότι η διατμητική καμπύλη του παραμορφωμένου εδάφους, $\tau_m = f_1(g)$, παρουσιάζει αυτό το έδαφος πιο ασθενές από το άθικτο, $\tau_m = f(g)$. Αυτό μπορεί να συμβεί, όταν για παράδειγμα, τοποθετείται η βολίδα σε πολύ μαλακό έδαφος.

Εξάλλου, η αρχική οριζόντια πίεση είναι ομοιόμορφη σε όλη τη μάζα και ίση με p_0 , κάτι το οποίο είναι πολύ κοντά στην πραγματικότητα εφόσον η βολίδα διογκώνεται σε αυτή την πίεση.

Η μετατόπιση και το πεδίο τροπών καθορίζονται κάθε φορά από την τροπή στην κοιλότητα g_0 και τις εξισώσεις 2.77 και 2.78. Η τροπή g_1 στο όριο μεταξύ του άθικτου και του παραμορφωμένου εδάφους σχετίζεται σταθερά με το g_0 . Από την εξίσωση 2.78 προκύπτει:

$$\frac{g_1}{g_0} = \frac{r_0^2}{r_1^2} = \frac{1}{b}$$

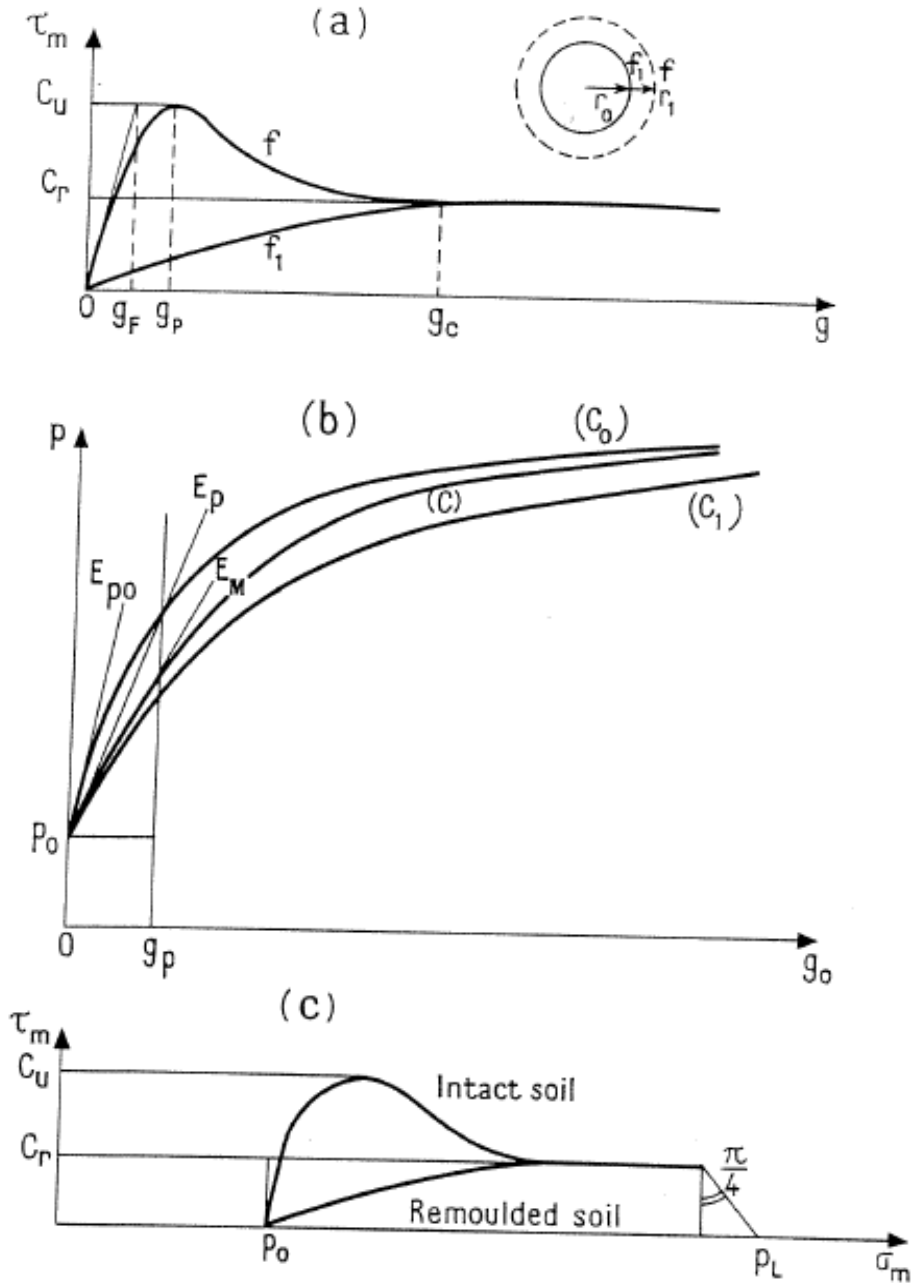
(2.99).

Για να υπολογιστεί η πίεση p στην κοιλότητα χρησιμοποιώντας την εξίσωση 2.85, είναι αναγκαίο να αντικατασταθεί η συνάρτηση f_1 από την συνάρτηση f για τιμές του g μεταξύ g_0 και g_1 :

$$p = p_0 + \int_0^{g_1} \frac{f(g) \cdot dg}{g(1+2g)} + \int_{g_1}^{g_0} \frac{f_1(g) \cdot dg}{g(1+2g)}$$

(2.100).

Τα πρώτα δύο μέλη της εξίσωσης αντιστοιχούν στην ακτινική τάση $\sigma_r = p_i$, η οποία εκφράζεται στο όριο, p_1 . Μία παρόμοια σχέση υπάρχει μεταξύ των p_i και g_1 στο όριο p_0 και g_0 στην κοιλότητα για έδαφος τελείως άθικτο. Η συμπεριφορά αυτή παρίσταται στην καμπύλη C_0 του Σχήματος 2.19.b. Η καμπύλη C_1 παριστά τη σχέση μεταξύ p_i και g_1 , και προέρχεται από την καμπύλη C_0 με την επέκταση των καταπονήσεων με $b = (r_1^2 / r_0^2)$, σύμφωνα με την εξίσωση 2.99. Η καμπύλη C , η πρεσσιομετρική καμπύλη για παραμορφωμένο έδαφος, πρέπει να βρίσκεται ανάμεσα στις C_0 και C_1 , γιατί η συνάρτηση $f_1(g)$ πρέπει να είναι όσο το δυνατόν ίδη με την $f(g)$.



Σχήμα2. 19: Επιρροή της παραμορφωμένης κοιλότητας

Οι καμπύλες C_0 και C_1 είναι ασύμπτωτες στον ίδιο οριζόντιο άξονα, κάτι το οποίο σημαίνει ότι η καμπύλη C μπορεί να παρουσιάσει επίσης αυτά τα χαρακτηριστικά. Αυτό οδήγησε στο συμπέρασμα ότι η παρουσία του αναμοχλευμένου δακτυλίου δεν τροποποιεί τη θεωρητική οριακή πίεση p_L . Αν η παραμορφωμένη ζώνη παραμένει μέτρια σε μέγεθος, η πρακτική οριακή πίεση p_i , θα αλλοιωθεί ελαφρώς. Στην πραγματικότητα, είναι πιθανό για μεγάλες τροπές, που είναι μεγαλύτερες από την οριακή τιμή g_c , αλλά παρόλα αυτά

μικρότερες από 50%, οι καμπύλες που δίνονται από τις συναρτήσεις f και f_1 να είναι παρόμοιες για κάθε πρακτικό σκοπό. Αν το g_1 είναι μεγαλύτερο από το g_c , όταν το g_0 φτάνει το 50%, η συνάρτηση f_1 του δεύτερου ολοκληρώματος της εξίσωσης 2.100, μπορεί να αντικατασταθεί από τη συνάρτηση f για άθικτο έδαφος, ενώ η r_1 παραμένει η ίδια.

Έστω, για παράδειγμα, ότι $g_c = 20\%$. Η διατάραξη δε θα έχει καμία επιρροή στην r_1 , υπό την προϋπόθεση ότι η r_1 είναι μικρότερη από τη μέγιστη τιμή r_c , έτσι ώστε:

$$\frac{r_c^2}{r_0^2} = \frac{50\%}{g_c} \quad (2.101).$$

Σε αυτή την περίπτωση, $r_c \sim 1.6 r_0$, που σημαίνει ότι ο αναμοχλευμένος δακτύλιος μπορεί να έχει πάχος μέχρι 60% της αρχικής ακτίνας της κοιλότητας πριν επηρεάσει την r_1 .

Οι διαταραγμένες ζώνες αυτού του πάχους φαίνεται να έχουν πολύ μεγάλη σχέση με εκείνες που προκαλούνται από τις γεωτρήσεις και τις πρεσσιομετρικές δοκιμές όταν διενεργούνται με προσοχή. Μοιάζει λογικό να συμπεράνει κανείς ότι είναι δυνατό να αποφευχθεί η διαταραχή του εδάφους στο βαθμό που επηρεάζεται η r_1 . Αυτό, βέβαια, δεν ισχύει για το πρεσσιομετρικό μέτρο E_M , όπως φαίνεται παρακάτω.

Για να δει κανείς πώς η διατάραξη του εδάφους επηρεάζει το αρχικό τμήμα της πρεσσιομετρικής καμπύλης, είναι δυνατό να αναλυθεί η αλλαγή της αρχικής κλίσης E_{p0} . Άλλωστε, το πρεσσιομετρικό μέτρο E_M είναι το τέμνον μέτρο ανάμεσα στην r_0 και την r_1 , έτσι ώστε τα αποτελέσματα της ανάλυσης να δώσουν μεγαλύτερες αλλαγές στο E_{p0} από ότι στην περίπτωση του E_M .

Συγκρίνοντας το μέτρο διάτμησης του άθικτου εδάφους G_0 , με εκείνο του διαταραγμένου εδάφους G_1 , μέσω της εξίσωσης: $G_1 = \beta (A.102)$, και εφαρμόζοντας την εξίσωση 2.100 στις τιμές των τροπών στην αρχή της δοκιμής, το φαινομενικό αρχικό μέτρο διάτμησης, G_{ap} , της καμπύλης C αξιολογείται ως εξής:

$$G_{ap} = G_0 \left[1 - (1 - \beta) \left(1 - \frac{r_0^2}{r_1^2} \right) \right] \quad (2.103).$$

Η σχετική μείωση του μέτρου I_ρ δίνεται από:

$$I_\rho = (1 - \beta) \left(1 - \frac{r_0^2}{r_1^2} \right) \quad (2.104),$$

όπου το I_p ονομάζεται “Δείκτης Διαταραχής” (Baguelin, Jezequel, Lemee, Le Mehaute, 1972). Στον παρακάτω πίνακα του σχήματος 2.20 δίνονται αντιπροσωπευτικές τιμές του I_p , για τυπικές τιμές του b και της αναλογίας r_1 / r_0 .

		I_p				
		0	0.10	0.30	0.80	β
		1	0.90	0.70	0.20	$1-\beta$
1.10	0.165	16,5%	15%	11,5%	3%	
1.20	0.30	30%	27%	21%	6%	
1.60	0.61	61%	55%	43%	12%	
2	0.75	75%	68%	52%	15%	
r_1/r_0	$1 - (r_0^3/r_1^3)$					

Σχήμα2. 20: Τυπικές τιμές του I_p

Όπου τα αποτελέσματα της διατάραξης είναι μικρά (για παράδειγμα, $1-\beta=0.20$), η μείωση του αρχικού μέτρου E_{p0} είναι επίσης μικρή, ακόμα και αν η διαταραγμένη ζώνη επεκτείνεται μακριά από την κοιλότητα. Αυτό συμβαίνει σε εδάφη όχι ιδιαίτερα ευαίσθητα, δύσκαμπτα και συνεκτικά.

Από την άλλη μεριά, όταν η διαφορά $(1-\beta)$ είναι μεγάλη, πρόκειται για ευαίσθητο έδαφος, ενώ η πτώση της τιμής του μέτρου E_{p0} εξαρτάται κατά πολύ από το πάχος της διαταραγμένης ζώνης. Όταν ο δακτύλιος είναι λεπτός, τότε η πτώση αυτή είναι μέτρια, ενώ όταν πρόκειται για παχύτερο δακτύλιο, με ακτίνα μεγαλύτερη από το ήμισυ της αρχικής ακτίνας της κοιλότητας ($r_1 > 1.5 r_0$), η πτώση της τιμής του E_{p0} αυξάνεται αξιόλογα.

Στη συνέχεια, η πτώση του E_M συγκρίσιμα μικρότερη από εκείνη της E_{p0} . Για παράδειγμα, για τις συνθήκες που θεωρούνται στο Σχήμα 2.19, ($r_1 / r_0 = 1.41$, $\beta = 0.10$, $g_p = 2g_F$), η πτώση της E_{p0} είναι 55% ενώ της E_M μόλις 25%. Το πρακτικό συμπέρασμα είναι ότι το υπολογισμένο πρεσσιομετρικό μέτρο E_M μπορεί να είναι πολύ χαμηλό όταν πρόκειται για μεγάλη διατάραξη του εδάφους.

Η διαδρομή των τάσεων που ακολουθείται από ένα στοιχείο της διαταραγμένης ζώνης είναι πολύ διαφορετικό από το σύνηθες σε άθικτο έδαφος (Σχήμα 2.19.c): στην αρχή δεν είναι κατακόρυφο, αλλά έχει έντονη κλίση προς τα δεξιά. Αυτό απεικονίζεται από τις παρακάτω εξισώσεις που ισχύουν για τις αρχικές εφαπτομένες:

$$\sigma_m = p_0 + (2G - 2G_1) \cdot g_1$$

$$\tau_m = (2G_1) \cdot g_0 = (2G_1) g_1 \cdot \frac{r_1^2}{r_0^2}$$

(2.105α και 2.105β αντίστοιχα).

Η εξίσωση 2.105α δείχνει ότι η μέση τάση, σ_m , αυξάνεται από την αρχή της διαταραγμένης ζώνης. Ο λόγος είναι η μείωση της διατμητικής δύναμης λόγω της διατάραξης: στη χειρότερη περίπτωση, η ρευστοποιημένη ζώνη γύρω από τη βολίδα ($f_1=0$) θα οδηγούσε σε μία ισοτροπική πίεση που θα ήταν ίση με την ασκούμενη πίεση p και η διαδρομή των τάσεων θα ήταν οριζόντια.

Μέχρι αυτό το σημείο, η εξέταση έχει γίνει από την επιρροή που μπορεί ένας διαταραγμένος δακτύλιος να έχει στα πρεσσιομετρικά χαρακτηριστικά. Είναι ενδιαφέρον να συγκριθεί ένα ακόμα πρόβλημα: δίνοντας τα αποτελέσματα της πρεσσιομετρικής δοκιμής και εφαρμόζοντας την εξίσωση 2.84 σε αυτά, τι συμβαίνει όταν η δοκιμή διενεργείται σε διαταραγμένο έδαφος; Η διατμητική δύναμη που υποδεικνύεται από τα αποτελέσματα αυτά μπορεί να ονομαστεί φαινομενική δύναμη τ_{ap} , ώστε:

$$\tau_{ap} = \frac{dp}{dg_0} \cdot g_0 (1 + 2g_0)$$

(2.106),

και να υπολογιστεί από την εξίσωση 2.100, λαμβάνοντας υπόψη την εξίσωση 2.99:

$$\tau_{ap} = \frac{1 + 2g_0}{1 + 2g_1} f(g_1) + \left[f_1(g_0) - \frac{1 + 2g_0}{1 + 2g_1} \cdot f_1(g_1) \right]$$

(2.107).

Για μικρές παραμορφώσεις:

$$\tau_{ap} \approx f(g_1) + [f_1(g_0) - f_1(g_1)]$$

(2.108).

Η τελευταία αυτή σχέση μπορεί να παραστεί γραφικά (Σχήμα 2.21) με τη βοήθεια των καμπύλων $f(g_0)$ και $f_1(g_0)$, και $f(g_0/b)$ και $f_1(g_0/b)$. Η διαφορά μεταξύ των δύο αυτών συνόλων των καμπύλων είναι ότι οι τροπές έχουν μεταβληθεί με τον παράγοντα b . Οπότε:

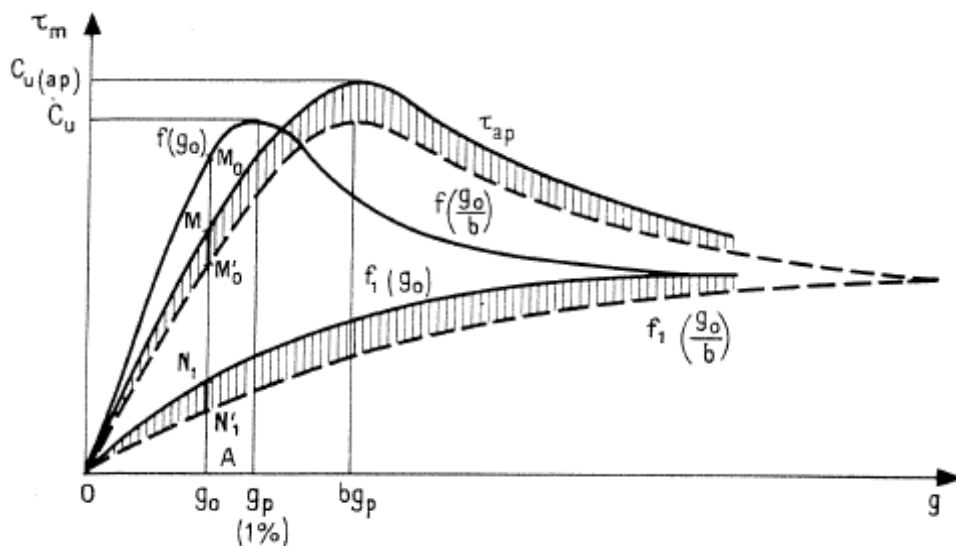
$$\tau_{ap} = \overline{AM} = \overline{AM}'_0 + \overline{N'_1N_1}$$

(2.109).

Ακόμα, θεωρείται ότι η φαινομενική συνοχή c_{ap} , είναι μεγαλύτερη από την πραγματική

συνοχή του άθικτου εδάφους, c_u , κάτι το οποίο είναι παράδοξο. Το σφάλμα, $\Delta c_u = c_{ap} - c_u$, είναι μικρότερο όταν η διαταραγμένη ζώνη είναι μικρότερη. Ωστόσο, αν το πλάτος προσεγγίζει το $r_0/2$, η φαινομενική συνοχή θα είναι περίπου διπλάσια από την πραγματική δύναμη, βάσει των καμπύλων του Σχήματος 2.21 για τις $f(g_0)$ και $f_1(g_0)$. Αξίζει, ακόμα, να σημειωθεί ότι η αρχική κλίση των καμπύλων τ_{ap} και $f(g_0)$ σχετίζονται με τις εξισώσεις 2.103 και 2.104, καθότι είναι ίσες με τις πρεσσιομετρικές καμπύλες C και C_0 του σχήματος 2.19.

Κλείνοντας, η παρατήρηση που μπορεί να γίνει είναι ότι η παρουσία της διαταραγμένης ζώνης γύρω από την πρεσσιομετρική βολίδα τείνει να μειώνει τις τιμές του E_M και της ρ_i . Στην περίπτωση της ρ_i , η μείωση είναι μικρή, εκτός εάν η διαταραγμένη ζώνη είναι πολύ μεγάλη, μία κατάσταση που μπορεί να προκύψει μόνο από πολύ πτωχό εξοπλισμό και πεδίο τεχνικών που εφαρμόζονται. Το πρόβλημα είναι ότι το E_M είναι αρκετά ευαίσθητο στη διατάραξη του εδάφους, ώστε οι τεχνικές που εφαρμόζονται πρέπει να είναι ιδιαίτερα προσαρμοσμένες στον τύπο του εδάφους και στις συνθήκες του νερού της περιοχής, έτσι ώστε να προκύπτει εύλογη παραμόρφωση στις τιμές του μέτρου. Από τη διατμητική καμπύλη και τα αποτελέσματα της πρεσσιομετρικής δοκιμής, οδηγούμαστε σε μία υπερεκτίμηση της c_u , δηλαδή $c_{ap} > c_u$. Λόγω της εμπειρίας, βασισμένης σε δοκιμές, που τείνει να υποτιμήσει την αντοχή του εδάφους, συνίσταται η χρήση παραδοσιακών σχεδιαστικών μεθόδων με τη c_{ap} , που υπερεκτιμά την πραγματική αντοχή.



Σχήμα2. 21: Διατμητικές καμπύλες που προέρχονται από πρεσσιομετρικές καμπύλες άθικτου και διαταραγμένου εδάφους.

2.5 Γενικές σχέσεις για την κυλινδρική διαστολή της κοιλότητας σε κάθε έδαφος

Στη συνέχεια, αναλύεται η πιο γενική περίπτωση εδάφους που δεν μπορεί να διατηρεί σταθερό όγκο κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Όπως έχει ειπωθεί και νωρίτερα, είναι πολύ σύνηθες να συγκρίνεται η μεταβολή του όγκου που συμβαίνει σε ελεύθερη αποστράγγιση κοκκώδους εδάφους, αλλά πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι κάθε έδαφος μπορεί να έχει αυτή τη συμπεριφορά εάν η δοκιμή εκτελείται αρκετά αργά.

Το πρόβλημα της διαστολής του κυλίνδρου σε κάθε έδαφος τέθηκε στην πιο γενική του μορφή από τον Ladanyi (1961 και 1963), ο οποίος εκτός του να αναφέρει έναν ορισμένο αριθμό θεμελιώδων αρχών, όπως είναι η ομοιότητα και η γενικότητα της περίπτωσης κοιλότητας με μηδενική αρχική ακτίνα, πρότεινε μία αριθμητική μέθοδο για την επίλυση της πολύπλοκης περίπτωσης του κοκκώδους εδάφους. Η μέθοδος του βασίστηκε σε πειραματικά αποτελέσματα: για την ειδική αυτή περίπτωση του εδάφους, διηγήρησε δοκιμές διάτμησης και συνοχής. Έτσι, κατά την ανάλυση της πρεσσιομετρικής δοκιμής, λαμβάνονταν υπόψη τόσο οι διατμητικές παραμορφώσεις, όσο και οι μεταβολές του όγκου. Αποδεικνύεται, ωστόσο, ότι οι βασικές θεωρητικές σχέσεις δεν είναι όλες σωστές. Ο Ladanyi έδωσε την ακόλουθη προσεγγιστική σχέση:

$$\varepsilon = \frac{u}{r} = \frac{1}{\sqrt{1-\gamma}} - 1 \quad (2.110),$$

η οποία παριστά ουσιαστικά την ακριβή σχέση:

$$\tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\gamma}{2}\right) = (1 + \varepsilon)^2 \quad (2.111).$$

Στην πραγματικότητα, και οι δύο σχέσεις, 2.110 και 2.111, είναι λάθος, καθώς δείχνουν ότι η περιμετρική τροπή ε , και η γωνία στρέψης γ σχετίζονται, ενώ είναι ξεκάθαρο από τις εξισώσεις 2.07 και 2.09 ότι παρεμβαίνει και η ογκομετρική τροπή μ :

$$\tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\gamma}{2}\right) = \frac{(1 + \varepsilon)^2}{1 + \mu} \quad (2.112).$$

Με μία μελέτη που πλησιάζει τη γενική αυτή περίπτωση, λαμβάνοντας υπόψη κάθε μεταβολή του όγκου, οι Wroth και Windle (1975) καθιέρωσαν μία σχέση μεταξύ τάσεων και

τροπών για το έδαφος κοντά τη βολίδα. Οι σχέσεις αυτές που αναφέρονται ακολούθως, εκφράζονται με όρους τροπών Green and Almansi. Οι εξισώσεις μεταβολής όγκου 2.09 και 2.17, σε συνδυασμό με την εξίσωση 2.15, με όρους g ή a , εξασφαλίζουν τη διαφορική εξίσωση που ελέγχει την κατανομή της καταπόνησης στη μάζα. Ακόμα, η εξίσωση 2.19 και η αρχή της ομοιογένειας χρησιμοποιούνται για να εξασφαλίσουν τις θεμελιώδεις σχέσεις τάσεων - τροπών.

2.5.1 Οι διαφορικές σχέσεις που καθορίζουν την κατανομή της τροπής

Αρχικά, ισχύει ότι $\rho^2 = \psi$ (2.113) και $r^2 = \chi$ (2.114).

Οι εξισώσεις 2.09α και 2.17 μπορούν να γραφτούν ως ακολούθως, λαμβάνοντας υπόψη τη σχέση 2.09β:

$$m_v = \frac{dy}{dx} = 1 + \mu = \frac{1}{1 - \mu'} \quad (2.115),$$

ενώ η εξίσωση 2.15 γίνεται:

$$\frac{y}{x} = 1 + 2g = \frac{1}{1 - 2a} \quad (2.116).$$

Μία από τις μεταβλητές χ ή ψ , εξαλείφεται για να προκύψουν οι ζητούμενες διαφορικές εξισώσεις. Αυτό γίνεται με τη χρήση των μεταβλητών Almansi (a , μ') ή Green (g , μ').

- Μεταβλητές Almansi (a , μ')

Για την εξάλειψη του χ , η εξίσωση 2.116 γίνεται

$$\begin{aligned} dx &= dy \cdot (1 - 2a) - 2 da \cdot y \\ \frac{dx}{dy} &= 1 - 2a - 2y \cdot \frac{da}{dy} \end{aligned}$$

(2.117 και 2.118 αντίστοιχα),

σε συνδυασμό με την εξίσωση 2.115:

$$1 - \mu' = 1 - 2a - 2y \cdot \frac{da}{dy} \quad (2.119),$$

και τέλος με την εξίσωση 2.113, προκύπτει:

$$\frac{d(\varrho^2)}{\varrho^2} = -\frac{2 da}{2\alpha - \mu'} \quad (2.120),$$

με την οποία εξίσωση και καθορίζεται η κατανομή των τροπών όπου υπάρχει παραμόρφωση (ρ).

Η εξάλειψη του ψ , δίνει την εξίσωση των τροπών για την άθικτη περιοχή (r).

Από την εξίσωση 2.116 προκύπτει ακόμα:

$$\frac{dx}{x} = \frac{dy}{y} - \frac{2 da}{1-2\alpha} = -\frac{2 da}{2\alpha - \mu'} - \frac{2 da}{1-2\alpha} \quad (2.121)$$

ή

$$\frac{d(r^2)}{r^2} = -\frac{2(1-\mu') da}{(2\alpha - \mu')(1-2\alpha)} \quad (2.122).$$

Αυτή η εξίσωση είναι πιο πολύπλοκη από την 2.120. Επομένως, οι μεταβλητές Almansi δίνουν ευκολότερα αποτελέσματα για την παραμορφωμένη περιοχή, παρά για την άθικτη.

- Μεταβλητές Green (g, μ')

Όμοια, από την εξίσωση 2.116:

$$\frac{d(\varrho^2)}{\varrho^2} = -\frac{2(1+\mu) dg}{(2g - \mu)(1+2g)}$$

$$\frac{d(r^2)}{r^2} = -\frac{2 dg}{2g - \mu}$$

(2.123 και 2.124 αντίστοιχα),

οι οποίες εξισώσεις είναι πιο απλές για την άθικτη περιοχή.

2.5.2 Εξισώσεις που συσχετίζουν τάσεις και τροπές

Αρχικά, υπάρχει η εξίσωση 2.19, ως εξίσωση ισορροπίας με τη μορφή:

$$\frac{d\sigma_r}{\tau_m} + \frac{d(\varrho^2)}{\varrho^2} = 0 \quad (2.125)$$

και, μέσω της εξίσωσης 2.120:

$$\tau_m = \frac{d\sigma_r}{d\alpha} \cdot \left(\alpha - \frac{\mu'}{2} \right) \quad (2.126)$$

ή μέσω της εξίσωσης 2.123:

$$\tau_m = \frac{d\sigma_r}{dg} \cdot \frac{(2g - \mu)(1 + 2g)}{2(1 + \mu)} \quad (2.127).$$

Αυτές οι σχέσεις, μπορούν να εφαρμοστούν και με τις αρχές της ομοιότητας, για τα τοιχώματα της κοιλότητας:

$$\tau_m = \frac{dp}{da_0} \cdot \left(a_0 - \frac{\mu_0'}{2} \right)$$

$$\tau_m = \frac{dp}{dg_0} \cdot \frac{(2g_0 - \mu_0)(1 + 2g_0)}{2(1 + \mu_0)} \quad (2.128 \text{ και } 2.129 \text{ αντίστοιχα}).$$

Χρησιμοποιώντας τη μεταβλητή ε_0 για την τροπή και με $\mu=1 \cdot \varepsilon$, δίνεται η έκφραση των Wroth και Windle (1975):

$$\tau_m = \frac{dp}{d\varepsilon_0} \cdot \frac{\varepsilon_0(1 + \varepsilon_0)(2 + \varepsilon_0 - 1)}{2(1 + 1 \cdot \varepsilon_0)} \quad (2.130).$$

Οι παραπάνω εξισώσεις αποτελούν τη γενίκευση των εξισώσεων 2.84 και 2.89, οι οποίες αντιμετωπίζουν την περίπτωση του ασυμπίεστου συνεκτικού εδάφους. Οι εξισώσεις 2.128, 2.129 και 2.130 δείχνουν ότι στη γενική περίπτωση, οι τιμές της διατμητικής αντοχής που υπάρχει στα τοιχώματα της κοιλότητας δεν μπορούν να βρεθούν μόνο από την πρεσσιομετρική καμπύλη. Αυτό ισχύει ακόμα και αν η καμπύλη πιέσεων – παραμορφώσεων σχηματιστεί με τους όρους: $p(a_0)$, $p(g_0)$ ή $p(\varepsilon_0)$. Όμως, χρειάζονται επιπλέον πληροφορίες, όπως για παράδειγμα οι μεταβολές του όγκου στο έδαφος όταν έρχεται σε επαφή με τη βολίδα. Αυτός είναι και ο λόγος που οι Wroth και Windle ανέπτυξαν την εξίσωση 2.130 σε συνδυασμό με την εργασία τους πάνω στις μετρήσεις της μεταβολής του όγκου (Wroth και Windle, 1975).

Ένας μετασχηματισμός της εξίσωσης 2.128 (ή 2.129) λαμβάνεται από την απαλειφή της μεταβλητής μ' (ή μ) και την αντικατάστασή της με Γ (εξίσωση 2.07). Η ένωση των

εξισώσεων 2.07, 2.09β, 2.15 και 2.17, δίνουν για το μ' επί παραδείγματι:

$$1 - \mu' = (1 + \Gamma) (1 - 2\alpha) \quad (2.131),$$

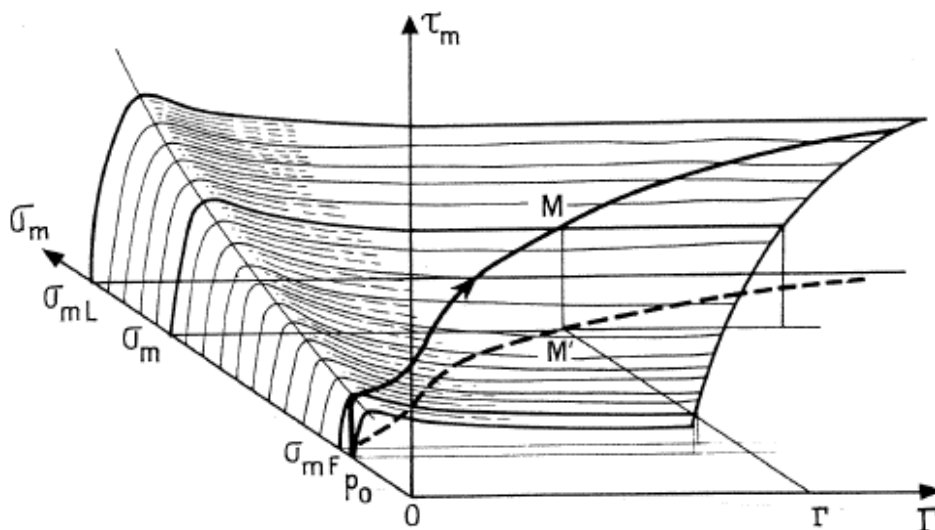
ενώ εισάγοντας την έκφραση αυτή στην εξίσωση 2.128, έχουμε:

$$2 \frac{\tau_m}{\Gamma} = (1 - 2\alpha_0) \frac{dp}{d\alpha_0} = (1 + 2g_0) \frac{dp}{dg_0} = 2 \frac{dp}{dV} \cdot V \quad (2.132).$$

Αυτή η εξίσωση είναι ίδια με την εξίσωση 2.88 που μπορεί να εφαρμοστεί σε περιπτώσεις ασυμπίεστου, συνεκτικού εδάφους.

Ακολουθούν κάποια χρήσιμα συμπεράσματα:

1. Η συνεφαπτομένη RS (Σχήμα 2.15) της καμπύλης $p, (g_0 + 1/2)$ (ή p, V) είναι ίση με το τρέχον μέτρο G , όπου $G(\Gamma) = \tau_m / \Gamma$.
2. Ωστόσο, η γενική περίπτωση του εδάφους δεν χαρακτηρίζεται από μία μοναδική διατμητική καμπύλη, αλλά από ένα σύνολο διατμητικών καμπύλων (τ_m, Γ) , οι οποίες είναι συναρτήσεις της κύριας τάσης σ_m . Κατά τη διάρκεια της πρεσσιομετρικής δοκιμής, ακολουθείται μία παρόμοια διαδικασία πάνω από την επιφάνεια, $\tau_m = f(\Gamma, \sigma_m)$, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.22. Λαμβάνοντας υπόψη το επίπεδο (Γ, σ_m) παρατηρεί κανείς ότι πρόκειται για ένα παρόμοιο σχήμα με αυτό της πρεσσιομετρικής καμπύλης.



Σχήμα2. 22: Διαδρομή που ακολουθείται στο διάστημα (Γ, σ_m) κατά την πρεσσιομετρική δοκιμή.

Ακόμα ένα σημαντικό συμπέρασμα που προκύπτει από τα παραπάνω είναι ότι η κλίση της αρχικής πρεσσιομετρικής καμπύλης (p, g_0) είναι ίση με το διπλάσιο της αρχικής εφαπτομένης του μέτρου διάτμησης. Έτσι, ο κανόνας που ανακαλύφθηκε για τα γραμμικά διαστολικά υλικά (Frank, 1974) είναι γενικός.

Αυτές οι γενικές σχέσεις δείχνουν τις συνθήκες παραμόρφωσης και ισορροπίας της πρεσσιομετρικής δοκιμής. Για την επίλυση του προβλήματος είναι αναγκαία η γνώση των ρεολογικών χαρακτηριστικών του εδάφους, για παράδειγμα, της μορφής $\tau_m = f(\Gamma, \sigma_m)$ (2.133) και $\mu' = h(\sigma_m, \tau_m)$ (2.134). Εφόσον $\sigma_r = \sigma_m + \tau_m$, η εξίσωση 2.126 γράφεται:

$$\frac{d\sigma_m}{da} + \frac{d\tau_m}{da} = \tau_m / \left[a - \frac{h(\sigma_m, \tau_m)}{2} \right] \quad (2.135).$$

Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας την εξίσωση 2.131, το Γ μπορεί να απαλειφθεί από την εξίσωση 2.133:

$$\tau_m = f \left[\frac{1 - h(\sigma_m, \tau_m)}{1 - 2a} - 1, \sigma_m \right] = F(a, \sigma_m, \tau_m) \quad (2.136),$$

και άρα:

$$\frac{\partial F}{\partial \sigma_m} \cdot \frac{d\sigma_m}{da} + \left(\frac{\partial F}{\partial \tau_m} - 1 \right) \cdot \frac{d\tau_m}{da} = - \frac{\partial F}{\partial a} \quad (2.137).$$

Οι εξισώσεις 2.135 και 2.137 είναι οι πρώτες δύο διαφορικές εξισώσεις με αγνώστους τα σ_m και τ_m . Στη γενική περίπτωση μπορούν αν επιλυθούν μόνο με αριθμητικές μεθόδους όπως είναι η πεπερασμένη διαφορική μέθοδος.

Ωστόσο, ο στόχος είναι απλώς να γίνει κατανοητό το πώς η πρεσσιομετρική δοκιμή αντιδρά με τα διάφορα χαρακτηριστικά της συμπεριφοράς του εδάφους, ειδικά με χαρακτηριστικά όπως η ευαισθησία, η συμπιεστότητα και η διαστολικότητα των κοκκώδων εδαφών. Χρειάζεται, απλώς, να μετατραπούν οι νόμοι του ελαστο-πλαστικού μοντέλου σε αντίστοιχες πρόσθετες ιδιότητες του εδάφους. Αυτό έχει δύο πλεονεκτήματα.

Αρχικά, η λύση μπορεί να βρεθεί πολύ πιο εύκολα με τη χρήση των γενικών εξισώσεων, όπως είναι οι 2.120 και 2.126, απ' ότι με τη χρήση των εξισώσεων 2.135 και 2.137. Ακόμα, η επίδραση της ευαισθησίας, της συμπιεστότητας και της διαστολικότητας του εδάφους μπορεί να εκτιμηθεί κατευθείαν συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με αυτά του

ελαστο-πλαστικού μοντέλου.

2.6 Η επιρροή της ευαισθησίας και της συμπιεστότητας σε κοκκώδες έδαφος

2.6.1 Η επιρροή της ευαισθησίας σε κοκκώδες έδαφος

Τα αποτελέσματα της ευαισθησίας του εδάφους μπορούν να μελετηθούν για κοκκώδες, ελαστο-πλαστικό έδαφος με έναν απλοποιημένο τρόπο που είναι ανάλογος με εκείνον του συνεκτικού εδάφους No.3 στο σχήμα 2.16. Υπάρχει μία απότομη πτώση της αντοχής αμέσως μετά τη μέγιστη τιμή της.

Θεωρούνται οι ακόλουθες ιδιότητες:

- Η αρχική συμπεριφορά είναι ελαστική (συμβολίζεται με E ή G και ν).
- Η αστοχία χαρακτηρίζεται από μία μέγιστη δύναμη με παραμέτρους c και ϕ και συνεχίζει μέχρι να επιτευχθεί η τροπή α_r .
- Στην τροπή α_r εμφανίζεται μία πτώση της αντίστασης και μία νέα δύναμη με χαρακτηριστικά c_r και ϕ_r .
- Το έδαφος είναι ασυμπίεστο κατά τη διάρκεια των δύο πλαστικών φάσεων c , ϕ και c_r , ϕ_r .

Είναι εμφανές ότι μέχρι να επιτευχθεί η α_r , η πρεσσιομετρική καμπύλη έχει την ίδια μορφή και τις ίδιες ιδιότητες με το χωρίς ευαισθησία, ελαστο-πλαστικό, κοκκώδες έδαφος. Η πίεση αστοχίας, p_F δίνεται από την εξίσωση 2.52 όπως προηγουμένως.

Συγκρίνοντας το πεδίο των τάσεων $\sigma_r(\rho)$ για την κοιλότητα με μηδενική αρχική ακτίνα, όπως στο Σχήμα 2.12b, το πεδίο των τάσεων για ευαίσθητο έδαφος είναι ακριβώς το ίδιο με εκείνο για έδαφος χωρίς ευαισθησία, με την προϋπόθεση ότι: $\alpha \leq \alpha_r$, δηλαδή $\rho^2 \geq \rho_r^2 (= \alpha^2 / 2\alpha_r)$. Οι τάσεις σ_r και σ_θ δίνονται από τις εξισώσεις 2.55 και 2.56, με $\alpha = \alpha_r$ και $\sigma_r = p_r$ και:

$$p_r + c \cdot \cot \Phi = (p_F + c \cdot \cot \Phi) \cdot \left(\frac{\rho_F^2}{\rho_r^2} \right)^{\frac{1-K_s}{2}} \quad (2.138).$$

Αν το έδαφος θεωρηθεί ασυμπίεστο, τότε:

$$2 \alpha_r \cdot \varrho_r^2 = \varrho_r^2 - r_r^2 = \varrho_F^2 - r_F^2 = 2 \alpha_F \cdot \varrho_F^2$$

$$p_r + c \cdot \cot \Phi = (p_F + c \cdot \cot \Phi) \left(\frac{\alpha_r}{\alpha_F} \right)^{\frac{1 - K_a}{2}}$$

(2.139 και 2.140 αντίστοιχα).

Πέρα από το α_r , η τάση σ_r υπακούει σε μία εξίσωση ανάλογη της 2.55 αλλά με c_r και φ_r . Η εξίσωση αυτή πηγάζει από το συνδυασμό της εξίσωσης ισορροπίας 2.19, και της εξίσωσης αστοχίας 2.50, με c_r και φ_r :

$$\sigma_r + c_r \cdot \cot \Phi_r = (p_r + c_r \cdot \cot \Phi_r) \cdot \left(\frac{\varrho_r^2}{\varrho^2} \right)^{\frac{1 - K_{ar}}{2}}$$

(2.141).

Η οριακή πίεση p_L λαμβάνεται, επομένως, από $p^2 = a^2$ με την ασυμπίεστότητα να δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{a^2}{\varrho_r^2} = \frac{\varrho_r^2 - r_r^2}{\varrho_r^2} = 2 \alpha_r$$

(2.142),

από όπου:

$$p_L + c_r \cdot \cot \Phi_r = (p_r + c_r \cdot \cot \Phi_r) \cdot \left(\frac{1}{2 \alpha_r} \right)^{\frac{1 - K_{ar}}{2}}$$

$$p_L = \left[(p_F + c \cdot \cot \Phi) \cdot \left(\frac{\alpha_r}{\alpha_F} \right)^{\frac{1 - K_{ar}}{2}} - c \cdot \cot \Phi + c_r \cdot \cot \Phi_r \right] \times$$

$$\times \left(\frac{1}{2 \alpha_r} \right)^{\frac{1 - K_{ar}}{2}} - c_r \cdot \cot \Phi_r$$

(2.143 και 2.144 αντίστοιχα).

Για παράδειγμα, ένα χωρίς ευαισθησία, ελαστο-πλαστικό έδαφος με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά: $\alpha_F = 1\%$, $p_0 = 100 \text{ KPa}$, $c = 10 \text{ KPa}$ και $\varphi = 45^\circ$, έχει πίεση αστοχίας p_F και οριακή πίεση p_L (από τις εξισώσεις 2.52 και 2.61):

$$p_F = 100 \times 1.707 + 10 \times 0.707 = 178 \text{ KPa}$$

$$p_L = (178 + 10) (50^{0.414}) - 10 = 940 \text{ KPa}.$$

Αν για ευαίσθητο έδαφος, ισχύουν τα ίδια χαρακτηριστικά στο μέγιστο σημείο μέχρι την τιμή $\alpha_r = 5\%$ και μετά συμβαίνει πτώση της αντοχής ως $c_r=0$ και $\varphi = 35^\circ$, τότε:

$$p_F = 178 \text{ KPa}$$

$$p_L = [(178 + 10) (50^{0.414}) - 10] (10^{0.365}) = 824 \text{ KPa},$$

η οποία μείωση είναι σημαντική.

2.6.2 Η επιρροή της συμπιεστότητας σε κοκκώδες έδαφος

Στο ελαστο-πλαστικό μοντέλο, η συμπιεστότητα εμφανίζεται μόνο κατά τη διάρκεια της ελαστικής φάσης, υπό την προϋπόθεση ότι ο λόγος Poisson είναι διάφορος του 0,5. Το έδαφος θεωρείται ασυμπιέστο καθ' όλη τη διάρκεια της πλαστικής φάσης, μία υπόθεση που δεν είναι απαραίτητα ρεαλιστική για κοκκώδες έδαφος με συνοχή και γωνία τριβής. Ένα έδαφος τέτοιου τύπου συνήθως συμπιέζεται όταν η κύρια τάση σ_m αυξάνεται. Το συγκεκριμένο κεφάλαιο αναφέρεται στο "συμπιεζόμενο" έδαφος: θεωρείται ότι οι ελαστικές παράμετροι E και ν , καθώς και η συνοχή c και η γωνία τριβής ϕ , είναι ίδιες με εκείνες του ελαστο-πλαστικού μοντέλου που αναφέρεται προηγουμένως, ως "ασυμπιέστο" έδαφος.

Είναι σαφές ότι τα δύο εδάφη είναι πανομοιότυπα στο ελαστικό κομμάτι της πρεσσιομετρικής δοκιμής, και η πίεση αστοχίας p_F (εξίσωση 2.52) είναι η ίδια. Ακόμα, τα πεδία τάσεων $\sigma_r(\rho)$ και $\sigma_\theta(\rho)$ δίνονται από τις εξισώσεις 2.55 και 2.56 για το συμπιεζόμενο έδαφος. Στη θεωρία της συμπιεστότητας που αναφέρεται προηγουμένως είναι απαραίτητος ο υπολογισμός της ακτίνας a της παραμορφωμένης κοιλότητας με μηδενική αρχική ακτίνα (εξίσωση 2.51) και αυτό κάνει εφικτό τον υπολογισμό της οριακής πίεσης. Για μία δεδομένη τιμή του p_F στο Σχήμα 2.12b, η ακτίνα a της κοιλότητας θα αυξάνεται και η οριακή πίεση θα μειώνεται.

Αυτό το φαινόμενο αναλύεται λεπτομερώς για την περίπτωση του εδάφους μόνο με γωνία τριβής, μία περίπτωση που επιλέγεται χάριν απλότητας. Η πιο πολύπλοκη περίπτωση του εδάφους με συνοχή και γωνία τριβής μπορεί να επιλυθεί αν το $c \cdot \cot \phi$ εισαχθεί στις κανονικές συνθήκες τάσης σ και p σε ό,τι ακολουθεί. Επιλέγονται οι μεταβλητές Almansi, a και μ' .

Οι μεταβλητές για τον όγκο μπορούν να εκφραστούν με τη βοήθεια των εξισώσεων 2.09β και 2.17 από τη σχέση:

$$(1 - \mu') d(\rho^2) = d(r^2)$$

(2.145).

Η μεταβολή του όγκου μ' μπορεί να συσχετισθεί με την κύρια τάση σ_m , που είναι

συνάρτηση του ρ^2 . Ενσωματώνοντας την εξίσωση 2.145 στην πλαστική φάση του Σχήματος 2.12b:

$$\int \frac{\rho_F^2}{\rho^2} (1 - \mu') d(\rho^2) = r_F^2 \quad (2.146).$$

Στη συνέχεια, οι εξισώσεις 2.55 και 2.56 επιτρέπουν στη σ_m να υπολογίζεται ως συνάρτηση του ρ^2 :

$$\sigma_m = \frac{\sigma_r + \sigma_\theta}{2} = \frac{1 + K_a}{2} p_F \left(\frac{\rho_F^2}{\rho^2} \right)^{\frac{1 - K_a}{2}} \quad (2.147).$$

Ακόμα, επειδή η θραύση εμφανίζεται σε μικρή παραμόρφωση, $\varepsilon_F = \alpha_F$:

$$\sigma_{mF} = \frac{1 + K_a}{2} p_F \approx p_0 \quad (2.148),$$

και έτσι:

$$\sigma_m = p_0 \left(\frac{\rho_F^2}{\rho^2} \right)^{\frac{1 - K_a}{2}} \quad (2.149).$$

Η μεταβολή του όγκου μ' , μπορεί να συσχετισθεί με τη διαφορά της κύριας τάσης, σ_m , με το μέτρο συμπίεστικότητας K_2 , το οποίο διαφέρει ελαφρώς από το ιστροπικό μέτρο συμπίεστικότητας, K , αφού το K_2 είναι για επίπεδη παραμόρφωση.

$$\mu' = - \frac{\Delta \sigma_m}{K_2} = - \frac{\sigma_m}{K_2} + \frac{p_0}{K_2} \quad (2.150).$$

Το K_2 δεν είναι απαραίτητα σταθερό για το μεγάλο εύρος τάσεων που προβλέπονται. Υποθέτουμε, ωστόσο, ότι το εύρος του K_2 μπορεί να προσεγγιστεί από μία δυναμική συνάρτηση της μορφής:

$$K_2 = C \left(\frac{\sigma_m}{p_0} \right)^\delta \quad 0 \leq \delta \leq 1 \quad (2.151),$$

από όπου:

$$\mu' = -\frac{p_0}{C} \left[\left(\frac{\rho_F^2}{a^2} \right)^n - \left(\frac{\rho_F^2}{a^2} \right)^{-n'} \right] \quad (2.152),$$

όπου:

$$n = \frac{1 - K_a}{2} \cdot (1 - \delta)$$

$$n' = \frac{1 - K_a}{2} \cdot \delta$$

(2.153 και 2.154 αντίστοιχα).

Εισάγοντας, στη συνέχεια, την εξίσωση 2.152 στην εξίσωση 2.146, προκύπτει:

$$r_F^2 = \rho_F^2 - a^2 + \int_{a^2}^{\rho_F^2} -(\mu') d(\rho^2) = \rho_F^2 - a^2 + I \quad (2.155).$$

Με το ολοκλήρωμα Ι ίσο με:

$$I = \frac{p_0}{C} \rho_F^2 \frac{1}{1-n} \left[\left(\frac{\rho_F^2}{a^2} \right)^{1-n} - \left(\frac{a^2}{\rho_F^2} \right)^{1-n} \right] -$$

$$- \frac{p_0}{C} \rho_F^2 \frac{1}{1+n'} \left[\left(\frac{\rho_F^2}{a^2} \right)^{1+n'} - \left(\frac{a^2}{\rho_F^2} \right)^{1+n'} \right]$$

$$I = \frac{p_0}{C} \rho_F^2 \left\{ \frac{1}{1-n} \left[1 - \left(\frac{a^2}{\rho_F^2} \right)^{1-n} \right] - \frac{1}{1+n'} \left[1 - \left(\frac{a^2}{\rho_F^2} \right)^{1+n'} \right] \right\}$$

(2.156 και 2.157 αντίστοιχα),

και αφού $a^2 \ll \rho_F^2$, αμελώντας τον δεύτερο όρο εντός των μικρών παρενθέσεων, έχουμε:

$$r_F^2 = \rho_F^2 - a^2 + \rho_F^2 \cdot \frac{p_0}{C} \left[\frac{1}{1-n} - \frac{1}{1+n'} \right] \quad (2.158).$$

Στη συνέχεια, ορίζοντας το a_0 ως την ακτίνα της κοιλότητας σε ασυμπίεστο έδαφος, οι εξισώσεις 2.57 και 2.58 ισχύουν για το a_0 και η εξίσωση 2.158 γίνεται:

$$o = a_0^2 - a^2 + \frac{a_0^2}{2\alpha_F} \cdot \frac{p_0}{C} \left[\frac{1}{1-n} - \frac{1}{1+n'} \right]$$

$$\frac{a^2}{a_0^2} = 1 + \frac{p_0}{C} \cdot \frac{1}{2\alpha_F} \left[\frac{1}{1-n} - \frac{1}{1+n'} \right]$$

(2.159 και 2.160 αντίστοιχα).

Η επιρροή της συμπιεστότητας στην οριακή πίεση κατά τη διάρκεια της πλαστικής φάσης φαίνεται από την τελευταία εξίσωση, συγκρίνοντας την οριακή πίεση ασυμπίεστου εδάφους p_{L0} με εκείνη για συμπιεσμένο έδαφος p_L . Σύμφωνα, λοιπόν, με την εξίσωση 2.55, για $c=0$:

$$\frac{p_{L0}}{p_L} = \left(\frac{a^3}{a_0^2} \right)^{\frac{1-K_\alpha}{2}}$$

(2.161).

Για παράδειγμα, έστω ότι για ασυμπίεστο έδαφος $p_0=100\text{KPa}$. Τότε από τις εξισώσεις 2.52 και 2.61, προκύπτει:

- για $\varphi=30^\circ$ και $c=0$, $p_F = p_0(1+\sin\varphi) = 150\text{KPa}$
 και για $\alpha_F (\approx \varepsilon_F) = 1\%$, $p_{L0}/p_F = 3.68$ και $p_{L0} = 553\text{KPa}$
 για $\alpha_F (\approx \varepsilon_F) = 5\%$, $p_{L0}/p_F = 2.15$ και $p_{L0} = 323\text{KPa}$
 για $\alpha_F (\approx \varepsilon_F) = 10\%$, $p_{L0}/p_F = 1.71$ και $p_{L0} = 265\text{KPa}$
- για $\varphi=45^\circ$ και $c=0$, $p_F = p_0(1+\sin\varphi) = 171\text{KPa}$
 και για $\alpha_F (\approx \varepsilon_F) = 1\%$, $p_{L0}/p_F = 5.06$ και $p_{L0} = 863\text{KPa}$
 για $\alpha_F (\approx \varepsilon_F) = 5\%$, $p_{L0}/p_F = 2.60$ και $p_{L0} = 443\text{KPa}$
 για $\alpha_F (\approx \varepsilon_F) = 10\%$, $p_{L0}/p_F = 1.95$ και $p_{L0} = 332\text{KPa}$.

Στη συνέχεια, συγκρίνονται δύο περιπτώσεις συμπιεστότητας κατά τη διάρκεια της πλαστικής φάσης, πάλι με $p_0 = 100\text{KPa}$.

- μικρή συμπιεστότητα, $C = 30000\text{KPa}$, $p_0/C = 1/300$, $\delta = 0.25$
- μεγάλη συμπιεστότητα, $C = 3000\text{KPa}$, $p_0/C = 1/30$, $\delta = 0.25$.

Από τις εξισώσεις 2.153, 2.154, 2.160 και 2.161, υπολογίζονται τα ακόλουθα:

- για $\varphi = 30^\circ$, $c=0$, $C=30000\text{KPa}$, $p_F=150\text{KPa}$
 $(1-K_\alpha)/2 = 1/3$, $n = (1/3)0.75 = 0.25$ και $n' = (1/3)0.25 = 0.083$
 άρα $1/(1-n) - 1/(1-n') = 0.41$ και
 για $\alpha_F = 1\%$, $\alpha^2/\alpha_0^2 = 1.07$, $p_{L0}/p_L = 1.02$ και $p_L = 541\text{KPa}$
 για $\alpha_F = 5\%$, $\alpha^2/\alpha_0^2 = 1.014$, $p_{L0}/p_L = 1.005$ και $p_L = 322\text{KPa}$
 για $\alpha_F = 10\%$, $\alpha^2/\alpha_0^2 = 1.007$, $p_{L0}/p_L = 1.002$ και $p_L = 255\text{KPa}$.

Για πρακτικούς λόγους, η οριακή πίεση p_L , δεν είναι διαφορετική από την ισοδύναμη τιμή της p_{L0} ($\varphi=30^\circ$) εάν το έδαφος είναι ελαφρώς συμπιεσμένο.

- για $\varphi = 30^\circ$, $c=0$, $C=3000\text{KPa}$, $p_F=150\text{KPa}$

$$(1 - K_\alpha)/2 = 1/3, n = 0.25 \text{ και } n' = 0.083$$

$$\text{Άρα } 1/(1-n) - 1/(1-n') = 0.41 \text{ και}$$

$$\text{για } \alpha_F = 1\%, \alpha^2/\alpha_0^2 = 1.70, \rho_{L0}/\rho_L = 1.19 \text{ και } \rho_L = 465\text{KPa}$$

$$\text{για } \alpha_F = 5\%, \alpha^2/\alpha_0^2 = 1.14, \rho_{L0}/\rho_L = 1.04 \text{ και } \rho_L = 309\text{KPa}$$

$$\text{για } \alpha_F = 10\%, \alpha^2/\alpha_0^2 = 1.07, \rho_{L0}/\rho_L = 1.02 \text{ και } \rho_L = 250\text{KPa}.$$

Η επιρροή της συμπίεστικότητας είναι ξεκάθαρη: υπάρχει μείωση της τάξεως του 20% για ασυμπίεστο ψαθυρό έδαφος ($g_F=1\%$).

- για $\phi = 45^\circ, c=0, C=30000\text{KPa}, p_F=171\text{KPa}$

$$K_\alpha=0.17, (1-K_\alpha)/2 = (\sqrt{2} - 1) = 0.414, n = 0.31 \text{ και } n' = 0.10,$$

$$1/(1-n) - 1/(1+n') = 0.544 \text{ και}$$

$$\text{για } \alpha_F = 1\%, \alpha^2/\alpha_0^2 = 1.091, \rho_{L0}/\rho_L = 1.04 \text{ και } \rho_L = 832\text{KPa}$$

$$\text{για } \alpha_F = 5\%, \alpha^2/\alpha_0^2 = 1.02, \rho_{L0}/\rho_L = 1.006 \text{ και } \rho_L = 440\text{KPa}$$

$$\text{για } \alpha_F = 10\%, \alpha^2/\alpha_0^2 = 1.01, \rho_{L0}/\rho_L = 1.004 \text{ και } \rho_L = 331\text{KPa}.$$

Η οριακή πίεση ρ_L έχει αλλάξει κατά πολύ.

- για $\phi = 45^\circ, c=0, C=3000\text{KPa}, p_F=171\text{KPa}$

$$n = 0.31 \text{ και } n' = 0.10, 1/(1-n) - 1/(1+n') = 0.544 \text{ και}$$

$$\text{για } \alpha_F = 1\%, \alpha^2/\alpha_0^2 = 1.91, \rho_{L0}/\rho_L = 1.31 \text{ και } \rho_L = 660\text{KPa}$$

$$\text{για } \alpha_F = 5\%, \alpha^2/\alpha_0^2 = 1.18, \rho_{L0}/\rho_L = 1.07 \text{ και } \rho_L = 413\text{KPa}$$

$$\text{για } \alpha_F = 10\%, \alpha^2/\alpha_0^2 = 1.09, \rho_{L0}/\rho_L = 1.037 \text{ και } \rho_L = 320\text{KPa}.$$

Ακόμα, όταν το έδαφος έχει μεγάλη συμπίεστικότητα, τα αποτελέσματα στην ρ_L είναι εμφανή. Φτάνουν το 31% όταν η ρ_L συγκρίνεται με την ρ_{L0} για ψαθυρό έδαφος ($\alpha_F = 1\%$).

Στη συνέχεια, είναι ενδιαφέρον να υπολογιστεί η πραγματική τιμή της μεταβολής του όγκου η οποία αδήγησε στην εκτίμηση της μείωσης της ρ_L στην δεύτερη και την τέταρτη από τις παραπάνω περιπτώσεις για ψαθυρό έδαφος. Η οριακή κύρια τάση σ_{mL} , που επιτυγχάνεται στη δεύτερη περίπτωση, με συνδυασμό των εξισώσεων 2.55 και 2.149 και για $c=0$:

$$\sigma_{mL} = \rho_L(\rho_0 / p_F) = 465 (100/150) = 310\text{KPa},$$

που, με τη χρήση των εξισώσεων 2.150 και 2.151:

$$\mu_L' = - (310-100) \times (1/3000) (100/310)^{0.25} = -0.053 = -5.3\%.$$

Η κύρια τιμή της μ' στην πλαστική ζώνη, μ_m' είναι περίπου ίση με το $1/\rho_F^2$ ή:

$$\mu_m' = - (p_0 / C) [1/(1-n) - 1/(1+n')] = -(1/30) 0.41 = -0.014 = -1.4\%$$

Όμοια για την τέταρτη από τις παραπάνω περιπτώσεις, με $\alpha=1\%$:

$$\sigma_{mL} = 387\text{KPa}, \mu_L' = -0.068 = -6.8\% \text{ και } \mu_m' = -0.018 = -1.8\%.$$

Με βάση αυτά τα στοιχεία, φαίνεται ότι οι τιμές που θεωρούνται για τη συμπίεστικότητα είναι εύλογες. Το πιο σημαντικό είναι το γεγονός ότι η ογκομετρική συμπίεση από 5% ως 10% στις οριακές συνθήκες, που αντιστοιχεί σε έναν μέσο όρο της συμπίεσης μόνο του 1% -2%, έχει επίδραση στη θεωρητική οριακή πίεση, που δεν είναι καθόλου αμελητέα.

Τέλος, για εδάφη με συνοχή, η μείωση της r_L θα είναι επίσης μεγάλη. Και όσο το έδαφος έχει μεγαλύτερη συμπίεστικότητα από αυτή που θεωρήθηκε προηγουμένως, τόσο πιο έντονο θα είναι αυτό το φαινόμενο.

2.7 Η επιρροή της διαστολικότητας σε κοκκώδες έδαφος

Η γραμμική ελαστική θεωρία χρησιμοποιείται από την εδαφομηχανική για να μελετήσει την αρχική συμπεριφορά μικρής τροπής του εδάφους. Είναι γνωστό, ωστόσο, ότι η συμπεριφορά του στραγγισμένου εδάφους δεν δίνει από μόνη της αυτή τη μορφή, λόγω του φαινομένου της διαστολικότητας. Αυτό το φαινόμενο απεικονίστηκε πρώτα από δοκιμές σε άμμο (Reynolds, 1885, Taylor, 1948, Bishop, 1950 και Rowe, 1962), και έχειδειχθεί ότι έχει σαφή επιρροή στη συμπεριφορά συμπαγούς, πυκνού, κοκκώδους υλικού. Η διαστολικότητα είναι η αύξηση του όγκου που λαμβάνει χώρα όταν ένα δείγμα διατέμνεται. Αυτό οφείλεται στους κόκκους που ουσιαστικά μεταφέρονται ο ένας πάνω στον άλλο. Αυτό εμφανίζεται σχεδόν από την αρχή της διάτμησης και συνεχίζεται και πέρα από το σημείο που επιτυγχάνεται η μέγιστη διατμητική δύναμη.

Ακολούθως παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διαστολικότητας στην αρχική συμπεριφορά της πρεσσιομετρικής δοκιμής, στην περιοχή που η θεωρία της γραμμικής διαστολικότητας είναι ευσταθής και που διατηρείται η προσέγγιση των μικρών κατασπνήσεων.

2.7.1 Γραμμικά διαστολικά υλικά

Χρησιμοποιούνται οι μεταβλητές (ϵ , μ), λόγω του ότι εξετάζεται η περίπτωση των μικρών παραμορφώσεων. Για ένα ελαστικό υλικό, η μεταβλητή του όγκου, μ , εξαρτάται μόνο από τις διαφορές της κύριας τάσης, $\Delta\sigma_{\text{oct}}$:

$$\mu = -\frac{\Delta\sigma_{\text{oct}}}{K} = -\frac{\Delta\sigma_r + \Delta\sigma_\theta + \Delta\sigma_z}{3K} \quad (2.162).$$

Το μέτρο συμπίεστικότητας, K , σχετικά με τις μεταβολές του όγκου λαμβάνεται από το άθροισμα της εξίσωσης 2.28:

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (2.163).$$

Με την επίπεδη παραμόρφωση, η μ μπορεί να ληφθεί από την κύρια επίπεδη παραμόρφωση $\Delta\sigma_m$ από ένα μέτρο συμπίεστικότητας K_2 :

$$\mu = -\frac{\Delta\sigma_m}{K_2} = -\frac{\Delta\sigma_r + \Delta\sigma_\theta}{2K_2}$$

$$K_2 = \frac{3K}{2(1+\nu)} = \frac{E}{2(1+\nu)(1-2\nu)} = \frac{G}{1-2\nu} \quad (2.164 \text{ και } 2.165 \text{ αντίστοιχα}).$$

Ακόμα, το $\nu=0.5$ αντιστοιχεί σε ένα ασυμπίεστο, ελαστικό υλικό και $K = K_2 = \infty$.

Με ένα γραμμικό διαστολικό υλικό είναι απαραίτητο να εξεταστούν ταυτόχρονα οι μεταβολές του όγκου, μ_c , λόγω των μεταβολών της σ_m , και οι μεταβολές του όγκου, μ_D , λόγω της διαστολικότητας κατά τη διάρκεια της διάτμησης. Ο όρος μ_c μπορεί να εκφραστεί με την παρακάτω μορφή που είναι ανάλογη της εξίσωσης 2.164:

$$\mu_c = -\frac{\Delta\sigma_m}{K_2} \quad (2.166),$$

ενώ ο όρος μ_D από την διεκτροπική τάση, $\Delta\sigma_r - \Delta\sigma_\theta = 2\tau_m$ ως εξής:

$$\mu_D = \frac{\Delta\sigma_r - \Delta\sigma_\theta}{2D} = \frac{\tau_m}{D} \quad (2.167),$$

όπου D είναι ένα μέτρο της μεταβολής του όγκου που ονομάζεται μέτρο διαστολικότητας και είναι θετικό όταν ο όγκος αυξάνεται. Έτσι:

$$\mu = \mu_c + \mu_D = -\frac{\Delta\sigma_m}{K_2} + \frac{\tau_m}{D} \quad (2.168)$$

και, λαμβάνοντας υπόψη τις εξισώσεις 2.12, 2.02 και 2.03:

$$\frac{u}{r} + \frac{du}{dr} = -\frac{\Delta\sigma_r + \Delta\sigma_\theta}{2K_2} + \frac{\Delta\sigma_r - \Delta\sigma_\theta}{2D} \quad (2.169).$$

Η εξίσωση της διάτμησης μπορεί ακόμα να γραφτεί με παρόμοιο τρόπο:

$$\gamma = \frac{\tau_m}{G}$$

$$\frac{u}{r} - \frac{du}{dr} = \frac{\Delta\sigma_r - \Delta\sigma_\theta}{2G}$$

(2.170 και 2.171 αντίστοιχα).

Ακόμα, οι εξισώσεις 2.169 και 2.171 επιτρέπουν στα $\Delta\sigma_r$ και $\Delta\sigma_r - \Delta\sigma_\theta$ να εκφράζονται ως συναρτήσεις των u/r και du/dr :

$$\Delta\sigma_r - \Delta\sigma_\theta = 2G \left(\frac{u}{r} - \frac{du}{dr} \right)$$

$$\Delta\sigma_r = \left(G - K_2 + \frac{GK_2}{D} \right) \frac{u}{r} - \left(G + K_2 + \frac{GK_2}{D} \right) \frac{du}{dr}$$

(2.172 και 2.173 αντίστοιχα),

ενώ συνδιάζοντας και την εξίσωση 2.20:

$$r^2 \frac{d^2u}{dr^2} + (1-d) \left(r \frac{du}{dr} - u \right) = 0$$

(2.174),

όπου:

$$1-d = \frac{1-\lambda}{1+\lambda}$$

$$\lambda = \frac{GK_2}{D(G+K_2)}$$

(2.175 και 2.176 αντίστοιχα).

Η εξίσωση 2.174 είναι μία εξίσωση του Euler που δίνει λύσεις της μορφής r^n , όπου n :

$$n(n-1) + (1-d)(n-1) = 0 \quad (2.177).$$

Οι ρίζες του n είναι $n = \pm 1$ και $n = -(1-d)$, έτσι ώστε προκύπτει η γενική μορφή:

$$u = Ar + Br^{-(1-d)} \quad (2.178).$$

Προκειμένου, στη συνέχεια, το u να είναι μηδέν στο άπειρο, $A = 0$ και $(1-d) \geq 0$. Αυτό μπορεί να γραφτεί και:

$$\begin{aligned} -1 < \lambda \leq +1 \\ -1 < \frac{GK_2}{D(G+K_2)} \leq +1 \end{aligned}$$

(2.179 και 2.180 αντίστοιχα),

ή αν τα G και K είναι υποχρεωτικά θετικά, τότε:

$$-\left(\frac{1}{G} + \frac{1}{K_2}\right) < \frac{1}{D} \leq \frac{1}{G} + \frac{1}{K_2}$$

(2.181),

οπότε τελικά:

$$u = u_0 \left(\frac{r_0}{r}\right)^{1-d}$$

(2.182).

Από τις εξισώσεις 2.172 και 2.173, οι τιμές των $\Delta\sigma_r$, $\Delta\sigma_r - \Delta\sigma_\theta$ και $\Delta\sigma_m$ είναι:

$$\Delta\sigma_r = \frac{u}{r} \left[G - K_2 + \frac{GK_2}{D} + \frac{1-\lambda}{1+\lambda} \left(G + K_2 + \frac{GK_2}{D} \right) \right]$$

(2.183)

ή

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_r &= 2G \cdot \frac{u}{r} = 2G \cdot \varepsilon \\ \Delta\sigma_r - \Delta\sigma_\theta &= 2\tau_m = 2G \cdot \varepsilon \cdot (2-d) = (2-d) \cdot \Delta\sigma_r \\ \Delta\sigma_\theta &= -2G \varepsilon \cdot (1-d) = -(1-d) \cdot \Delta\sigma_r \\ \Delta\sigma_m &= \frac{\Delta\sigma_r + \Delta\sigma_\theta}{2} = G \cdot \varepsilon \cdot d = \frac{d}{2} \cdot \Delta\sigma_r \end{aligned}$$

(2.184, 2.185, 2.186 και 2.187 αντίστοιχα),

ενώ

$$\left(\frac{r_0}{r}\right)^{2-d} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{\Delta\sigma_r}{\Delta p} = \frac{\Delta\sigma_\theta}{\Delta\sigma_{\theta 0}} = \frac{\tau_m}{\tau_{m0}} = \frac{\Delta\sigma_m}{\Delta\sigma_{m0}}$$

(2.188)

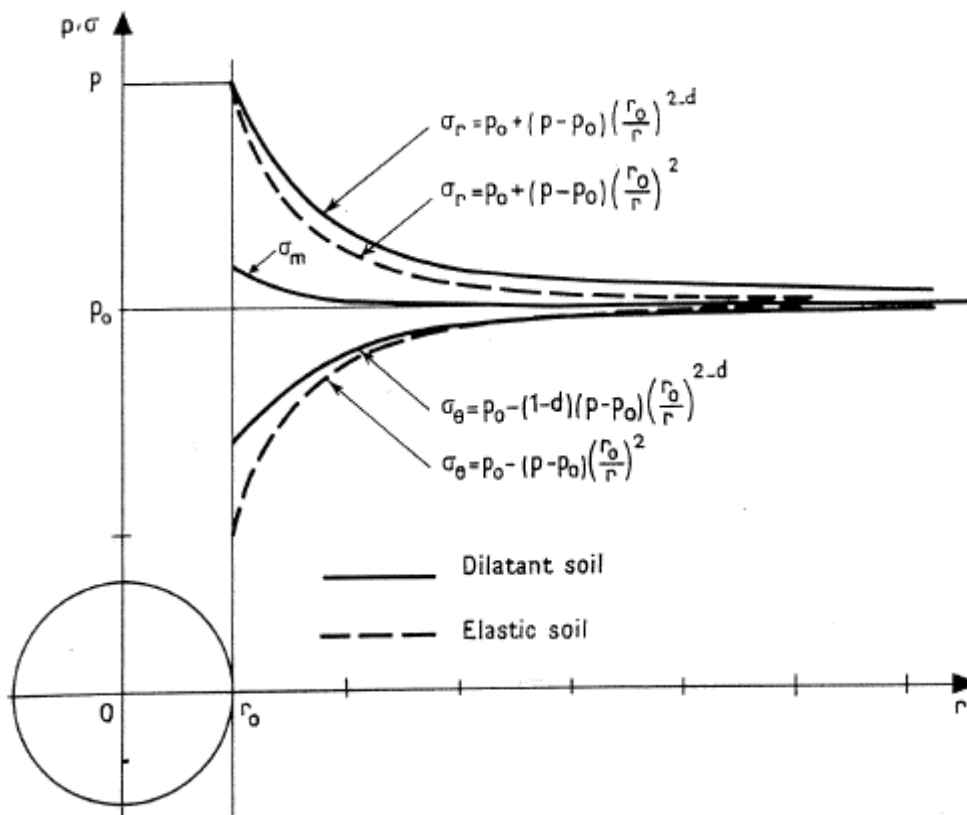
και, τέλος, στα τοιχώματα της κοιλότητας, η εξίσωση A.184 γίνεται:

$$p = p_0 + 2G \cdot \varepsilon_0$$

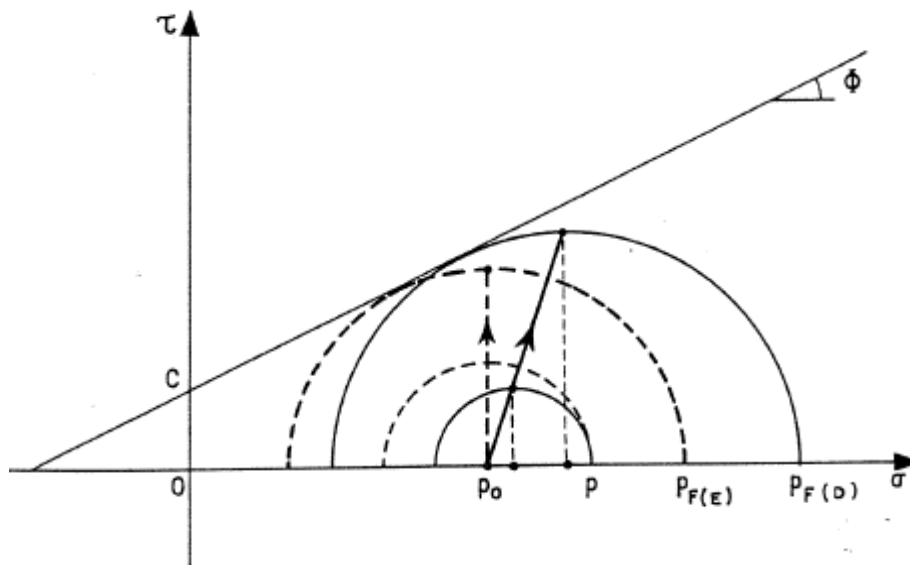
(2.189).

Συγκρίνοντας αυτό το αποτέλεσμα με την ελαστική περίπτωση, όπου $D=\infty$ $d=0$, φαίνεται αρχικά ότι η πρεσσιομετρική καμπύλη έχει την ίδια κλίση, ίση με $2G$. Αυτό σημαίνει ότι η πρεσσιομετρική δοκιμή εξαρτάται από τη διαστολικότητα. Η πολύ σημαντική αυτή ανακάλυψη έγινε από τον Frank το 1972.

Συνεχίζοντας με τη σύγκριση, φαίνεται ότι σε διαστολικά υλικά ($D>0$, $0<d\leq 1$), που έχουν τεθεί σε δοκιμές υπό την ίδια πίεση p , και έτσι έχουν την ίδια διαστολή ε_0 ως ελαστικά υλικά, η δευτερεύουσα τάση στα τοιχώματα της κοιλότητας θα είναι μικρότερη από την ακτίνα $(1-d/2):1$, ενώ η μείωση της περιμετρικής τάσης των τοιχωμάτων θα είναι επίσης μικρότερη από την ακτίνα $(1-d):1$. Από την άλλη, οι μειώσεις της αύξησεις των τάσεων με την απόσταση r είναι πιο αργές όσο ο όρος $1/r$ της εξίσωσης 2.187 είναι $(2-d)$ αντί για 2 (ελαστική περίπτωση). Με άλλα λόγια, η διαστολικότητα επηρεάζει (συγκεκριμένα, μειώνει) τη διατμητική δύναμη κοντά στην κοιλότητα, αλλά όχι τόσο όσο απομακρυνόμαστε από αυτή την περιοχή (Σχήμα 2.23).



Σχήμα2. 23: Τάσεις σε ελαστικά και διασταλτικά εδάφη



Σχήμα2. 24: Κύκλοι Mohr για τάσεις ελαστικών και διασταλτικών εδαφών

Οι μικρότερες διατμητικές τάσεις των τοιχωμάτων της κοιλότητας, για μία δεδομένη πίεση p , παρίστανται από μικρότερους κύκλους Mohr, ενώ παρατηρείται μία κλίση της διαδρομής των τάσεων προς τα δεξιά. Αυτό σημαίνει ότι για δεδομένα χαρακτηριστικά του εδάφους, c και ϕ , η πίεση αστοχίας p_F θα είναι μεγαλύτερη αν το έδαφος είναι διαστολικό. Με $\Omega = p + c \cot \phi$,

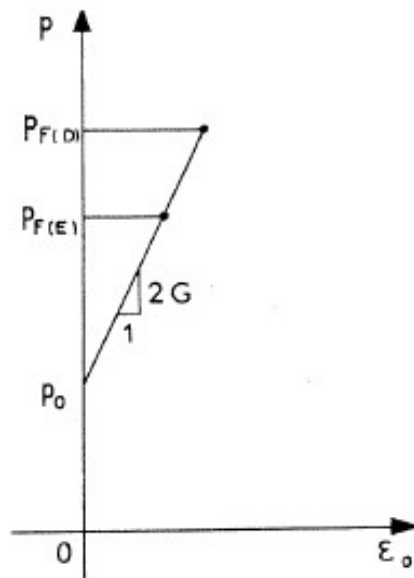
$$\Omega_F = \Omega_0 \times \frac{2-d}{1+K_a-d} \quad (2.190).$$

Συγκρίνοντας το διαστολικό έδαφος (D) με ελαστικό μέσο (E), προκύπτει:

$$F_1 = \Omega_{F(D)}/\Omega_{F(E)} = \frac{2-d}{2} \times \frac{1+K_a}{1+K_a-d} \quad (2.191).$$

Για παράδειγμα, για $d = 0.4$, ο λόγος $\Omega_{F(D)}/\Omega_{F(E)}$ είναι 1.14 και 1.21 για $\phi=30^\circ$ και $\phi=45^\circ$ αντίστοιχα.

Το ευθύγραμμο τμήμα της πρεσσιομετρικής καμπύλης (Σχήμα 2.25) έχει την ίδια κλίση αλλά συνεχίζεται περαιτέρω. Έτσι, η διαστολικότητα δεν σημαίνει ότι το έδαφος τείνει να γίνει πιο άκαμπτο. Αντίθετα, φαίνεται να είναι ισχυρότερο.



Σχήμα 2. 25: Αρχικό ελαστικό κομμάτι των πρεσσιομετρικών καμπύλων (p, ϵ_v) για ελαστικά και διαστολικά εδάφη

Ακόμα, είναι ενδιαφέρον να δει κανείς τα αντίστοιχα διαγράμματα τάσεων του Mohr (Σχήμα 2.26). Πάλι, επιτρέποντας στην ϵ_θ να παριστά την διαστολή στην περιφέρεια, με το ϵ να παριστά τη σχετική διαστολή σε κάθε κατεύθυνση, το n την τάση ολίσθησης, η διάμετρος γ του κύκλου Mohr, από τις εξισώσεις 2.170 και 2.185, γίνεται:

$$\gamma = \epsilon_\theta \cdot (2 - d)$$

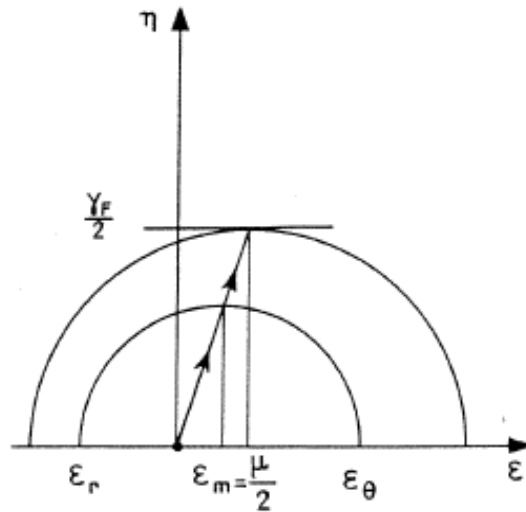
(2.192),

από όπου:

$$\epsilon_r = \epsilon_\theta - \gamma = -(1 - d) \cdot \epsilon_\theta$$

$$\mu = 2 \epsilon_m = \epsilon_r + \epsilon_\theta = d \cdot \epsilon_\theta$$

(2.193 και 2.194 αντίστοιχα).



Σχήμα2. 26: Κύκλοι τάσεων Mohr σε ελαστικό διασταλτικό έδαφος

Οι κύκλοι Mohr δεν είναι κεντραρισμένοι στην αρχή των αξόνων, όπως συνέβαινε για την ελαστική περίπτωση, αλλά το κέντρο τους είναι μετατοπισμένο, με μία τετμημένη ϵ_m , στην κατεύθυνση που δείχνει μεταβολές του όγκου, και αυτό είναι η διαστολικότητα. Η διαδρομή που ακολουθείται από το σημείο $(\epsilon_m, \eta_m = \gamma_F/2)$, είναι ένα τμήμα μίας ευθείας γραμμής με κλίση $(2-d)/d$, ενώ το τμήμα αυτό τελειώνει όταν $\eta_m = \gamma_F/2$.

Η μεταβολή του όγκου λόγω συμπίεστούτητας, μ_c , μετά τις εξισώσεις 2.166, 2.187 και 2.184, γίνεται:

$$\mu_c = - \frac{\Delta \sigma_m}{K_2} = - \frac{d}{2} \cdot \frac{\Delta \sigma_r}{K_2} = - (d \cdot \epsilon_\theta) \cdot \frac{G}{K_2}$$

$$\mu_c = - \mu \frac{G}{K_2}$$

(2. 195 και 2.196 αντίστοιχα),

ενώ η μεταβολή του όγκου λόγω διαστολικότητας, μ_D , γίνεται:

$$\mu_D = \mu \left[1 + \frac{G}{K_2} \right]$$

(2.197).

Ο λόγος G/K_2 ποικίλλει αρκετά ανάλογα με τον τύπο εδάφους και είναι, γενικά, πολύ μικρότερος από ένα, κυρίως όταν το έδαφος έχει μεγάλη διαστολικότητα (για ελαστικά εδάφη κυμαίνεται μεταξύ 0 και 0.33, όταν ο λόγος Poisson ν μεταξύ 1/3 και 1/4). Είναι εμφανές ότι το μεγαλύτερο μέρος της μεταβολής του όγκου οφείλεται στην διαστολικότητα.

Κλείνοντας, είναι πιθανό η διαστολικότητα να έχει πολύ μεγάλη επιρροή στην αρχική

γραμμική φάση της πρεσσιομετρικής δοκιμής, αυξάνοντας σημαντικά την ερπυστική πίεση p_F . Ακόμα, η οριακή πίεση p_L μπορεί επίσης να αυξάνεται από ένα ίσο ποσό αν η διαστολικότητα σταματήσει στην τιμή p_F . Για το λόγο αυτό μελετάται τι συμβαίνει για μεγάλες παραμορφώσεις.

2.7.2 Η επιρροή της διαστολικότητας στην οριακή πίεση

Για να αναλυθεί τι συμβαίνει αφού επιτευχθεί η πίεση αστοχίας, είναι προτιμότερο να χρησιμοποιείται η μεταβλητή Almansi α , η οποία δίνει γενικές εξισώσεις απλής μορφής (εξισώσεις 2.120 και 2.126). Στην αρχική γραμμική φάση της δοκιμής, όπου οι παραμορφώσεις θεωρούνται μικρές, χρησιμοποιούνται οι μεταβλητές ϵ ή α .

Στη συνέχεια, ωστόσο, είναι αναγκαίο να καθοριστεί η συμπεριφορά του εδάφους μετά την αστοχία. Θεωρούνται οι ακόλουθες ιδιότητες:

- Το έδαφος είναι εντελώς πλαστικό: οι δυναμικές παράμετροι είναι οι c και ϕ .
- Η ογκομετρική τροπή λόγω συμπίεσότητας (εξίσωση 2.166) είναι αμελητέα, δηλαδή $\mu'_c = 0$. Αυτό είναι το ίδιο με το να είναι το μέτρο συμπίεσότητας K πολύ μεγάλο. Έτσι, $\mu' = \mu'_D$.
- Η διαστολικότητα συνεχίζει να εκδηλώνεται αρκετά μετά την αστοχία, α_F , μέχρι την παραμόρφωση α_s . Θεωρείται ότι οι μεταβλητές α και μ'_D συνδέονται με μία σχέση παρόμοια με αυτή που δίνεται στην εξίσωση 2.194:

$$\mu' = \mu'_D = d \cdot \alpha \quad 0 \leq \alpha \leq \alpha_s \quad (2.198).$$

Αυτό είναι ισοδύναμο με το να πει κάποιος ότι η διαστολικότητα μ'_D σχετίζεται με τη διατμητική καταπόνηση Γ εφόσον ισχύει η παρακάτω εξίσωση:

$$1 + \Gamma = \frac{1 - \mu'}{1 - 2\alpha} \quad (2.199).$$

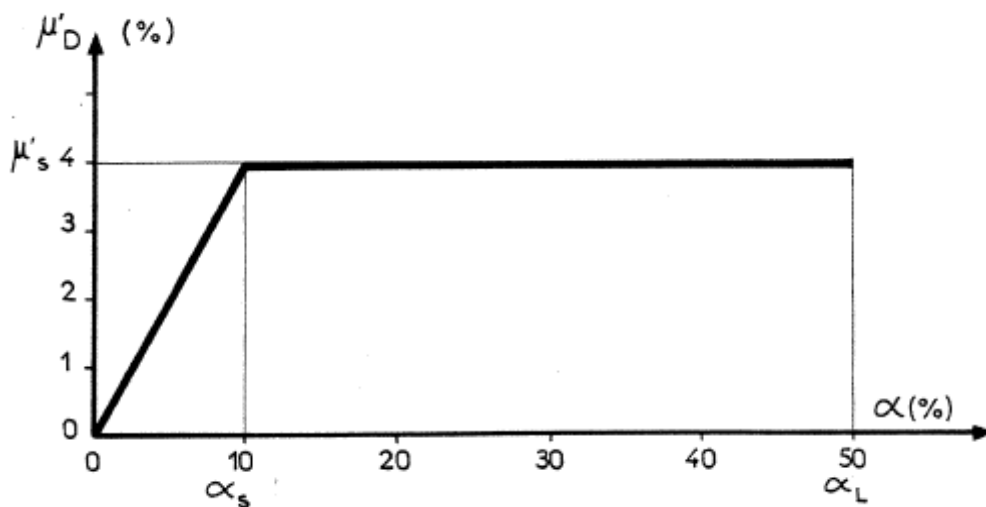
Η σχέση μεταξύ μ'_D και Γ είναι σχεδόν γραμμική:

$$\mu'_D = \frac{d \cdot \Gamma}{2 - d + 2\Gamma} \quad (2.200).$$

- Ο όγκος θεωρείται ότι παραμένει σταθερός μετά την α_s :

$$\mu' = \mu'_s \quad a \geq a_s \quad (2.201).$$

Η καμπύλη της διαστολικότητας αντιστοιχεί στις προϋποθέσεις που δίνονται στο Σχήμα 2.27, για τις εξής αριθμητικές τιμές: $d = 0.4$, $\alpha_s = 10\%$ και $\mu'_s = 4\%$. Η οριακή πίεση p_L αντιστοιχεί σε τιμή καταπόνησης $\alpha_L = 1/2$ ($\alpha_0 = 1/2 (\Delta V/V)$). Η επιρροή της διαστολικότητας μπορεί να γίνει κατανοητή συγκρίνοντας το ασυμπιέστο έδαφος με το έδαφος με ελαστοπλαστική συμπεριφορά που αναλύθηκε προηγουμένως, με τις ίδιες παραμέτρους G , c και ϕ .



Σχήμα2. 27: Καμπύλη διαστολικότητας

Μετά την αστοχία, $a > a_F$, τα πεδία τάσεων σ_r και σ_θ στην περιοχή παραμόρφωσης, ρ , της κοιλότητας με αρχική μηδενική ακτίνα, ελέγχονται από τις ίδιες εξισώσεις (2.55 και 2.56). Ο δείκτης l χρησιμοποιείται για να καθορίσει μία συγκεκριμένη τιμή.

$$(\sigma_r + c \cdot \cot \Phi) \cdot (\rho^2)^{\frac{1-K_2}{2}} = (\sigma_{r1} + c \cdot \cot \Phi) \cdot (\rho_1^2)^{\frac{1-K_2}{2}} \quad (2.202).$$

Όταν η διαστολικότητα ($\alpha_F \leq a \leq \alpha_s$), η εξίσωση 2.120 μπορεί να εφαρμόζεται λαμβάνοντας υπόψη την εξίσωση 2.198:

$$\frac{d(\rho^2)}{\rho^2} = - \frac{1}{1 - (d/2)} \cdot \frac{da}{a} \quad (2.203),$$

η οποία γίνεται:

$$\alpha \cdot (\rho^2)^{1-\frac{d}{2}} = \alpha_1 \cdot (\rho_1^2)^{1-\frac{d}{2}} \quad (2.204).$$

Απαλείφοντας, στη συνέχεια, το ρ^2 στις εξισώσεις 2.202 και 2.204, προκύπτει:

$$\frac{\sigma_r + c \cdot \cot \Phi}{\sigma_{r1} + c \cdot \cot \Phi} = \left(\frac{\alpha}{\alpha_1} \right)^{\frac{1-K_a}{2-d}} \quad (2.205),$$

και χρησιμοποιώντας το $\Omega = p + c \cot \Phi$:

$$\frac{\Omega_s}{\Omega_F} = \frac{\sigma_{rs} + c \cdot \cot \Phi}{p_F + c \cdot \cot \Phi} = \left[\frac{\alpha_s}{\alpha_F} \right]^{\frac{1-K_a}{2-d}} \quad (2.206).$$

Όταν δεν υπάρχουν πια μεταβολές του όγκου ($\alpha_s \leq \alpha \leq \alpha_L$), η εξίσωση 2.120 πρέπει να χρησιμοποιείται λαμβάνοντας υπόψη την εξίσωση 2.201. Ενσωματώνοντας τες μεταξύ των ορίων αυτής της φάσης και εφόσον $\alpha_L = 1/2$ και $\mu'_s = d\alpha_s$:

$$\frac{\rho_s^2}{\alpha^2} = \frac{2\alpha_L - \mu'_s}{2\alpha_s - \mu'_s} = \frac{1-d \cdot \alpha_s}{\alpha_s(2-d)} \quad (2.207),$$

και από την εξίσωση 2.202:

$$\frac{\Omega_L}{\Omega_s} = \frac{p_L + c \cdot \cot \Phi}{\sigma_{rs} + c \cdot \cot \Phi} = \left[\frac{1-d \cdot \alpha_s}{\alpha_s(2-d)} \right]^{\frac{1-K_a}{2}} \quad (2.208).$$

Συνδυάζοντας, στη συνέχεια, τις εξισώσεις 2.206 και 2.208 προκύπτει ο λόγος Ω_L / Ω_F , ο οποίος με τη σειρά του συνδυάζεται με την εξίσωση 2.190 για να προκύψει ο λόγος Ω_L / Ω_0 :

$$\frac{\Omega_L}{\Omega_0} = \frac{2-d}{1+K_a-d} \cdot \left(\frac{\alpha_s}{\alpha_F} \right)^{\frac{1-K_a}{2-d}} \cdot \left[\frac{1-d \cdot \alpha_s}{\alpha_s(2-d)} \right]^{\frac{1-K_a}{2}} \quad (2.209).$$

Ο λόγος των τιμών του Ω_L ανάμεσα σε διαστολικό έδαφος, $\Omega_{L(D)}$, και σε μη διαστολικό έδαφος, $\Omega_{L(E)}$, μπορεί να υπολογιστεί θεωρώντας ότι $\Omega_0 = p_0 + c \cot \Phi$ και ότι τα α_F είναι το ίδιο και στις δύο περιπτώσεις:

$$\frac{\Omega_{L(D)}}{\Omega_{L(E)}} = F_1 \cdot F_2 \cdot F_3$$

(2.210),

με:

$$F_1 = \frac{2-d}{2} \times \frac{1+K_b}{1+K_b-d}$$

$$F_2 = \left(\frac{\alpha_s}{\alpha_F}\right)^{\frac{1-K_a}{2}} \cdot \frac{d}{2-d}$$

$$F_3 = \left[\frac{2(1-d \cdot \alpha_s)}{2-d}\right]^{\frac{1-K_a}{2}} \approx \left[\frac{2}{2-d}\right]^{\frac{1-K_a}{2}}$$

(2.211, 2.212 και 2.213 αντίστοιχα).

Για $d = 0.4$, προκύπτουν οι ακόλουθες τιμές για τα F_1 , F_3 και $F_1 F_3$:

- για $\varphi=30^\circ$, $F_1 = 1.14$, $F_3 = 1.08$ και $F_1 F_3 = 1.23$
- για $\varphi=45^\circ$, $F_1 = 1.21$, $F_3 = 1.10$ και $F_1 F_3 = 1.33$

Με τις ίδιες εδαφικές παραμέτρους, αλλά για τιμές του λόγου α_s/α_F ίσες με 5, 10 και 20, τα αποτελέσματα για τα F_2 και $F_1 F_2 F_3$ είναι αντίστοιχα:

- για $\varphi=30^\circ$, $F_2 = 1.14, 1.21, 1.28$ και $F_1 F_2 F_3 = 1.40, 1.49, 1.57$
- για $\varphi=45^\circ$, $F_2 = 1.18, 1.27, 1.36$ και $F_1 F_2 F_3 = 1.57, 1.69, 1.81$

Όσον αφορά στο διαστολικό έδαφος, αν $d = 0.4$, τότε το $\Omega_{L(D)}$ αυξάνεται παντού από 40% ως 80% πάνω από το $\Omega_{L(E)}$.

Ο λόγος των τελικών οριακών πιέσεων, $p_{L(D)}^*/p_{L(E)}^*$, είναι ακόμα μεγαλύτερος από το λόγο $\Omega_{L(D)}/\Omega_{L(E)}$, αφού η διαφορά ανάμεσα στο p_L^* και στο Ω_L είναι ο ίδιος σε κάθε περίπτωση και ίσος με $p_0 + c \cot \varphi$.

Έτσι, η διαστολικότητα μπορεί να υπερδιπλασιάσει τις τελικές οριακές πιέσεις. Με άλλα λόγια, μπορεί να επηρεάσει πολύ σημαντικά τη μέγιστη πίεση που επιτυγχάνεται στην πρεσσιομετρική δοκιμή.

Ακόμα, είναι δυνατόν να γίνουν αντίστοιχες συγκρίσεις ανάμεσα στα κοκκώδη εδάφη με διατολικότητα ή μη, για πιο πολύπλοκες περιπτώσεις, όπως για παράδειγμα λαμβάνοντας υπόψη την ευαισθησία του εδάφους (ίσως, μία απότομη μείωση στα c και φ αφού δωθεί μία συγκεκριμένη τιμή στην καταπόνηση), ή την συμπίεστικότητα. Τα αποτελέσματα μπορεί να είναι παρόμοια. Στην πραγματικότητα, το F_1 μπορεί να μείνει το ίδιο: η αύξηση της δύναμης που παριστά είναι λόγω της ελάττωσης στην διεκτροπική τάση

για μία συγκεκριμένη τιμή της σ_r . Όσον αφορά στα F_2 και F_3 , ουσιαστικά υπάρχει μία υποχώρηση των ορίων που αντιστοιχούν στις παραμορφώσεις α_s και α_L . Αυτή η υποχώρηση οφείλεται στην αύξηση του όγκου λόγω της διαστολικότητας. Σε κάθε περίπτωση, η διαστολικότητα εμφανίζεται πολύ σημαντική για το πώς επηρεάζει το έδαφος το πρεσσιόμετρο.

2.8 Προσδιορισμός των παραμέτρων αντοχής από τα αποτελέσματα της πρεσσιομετρικής δοκιμής

Μέχρι τώρα εξετάστηκαν οι συμπεριφορές του εδάφους ανεξάρτητα από το χρόνο, ενώ οι πρεσσιομετρικές παράμετροι προσδιορίστηκαν από τα χαρακτηριστικά της στοιχειώδους διάτμησης και των μεταβολών του όγκου. Ακόμα, η έννοια του πρεσσιομετρικού μέτρου, G_M , είναι πολύ απλή εφόσον ληφθεί υπόψη μόνο μία ιδιότητα του εδάφους, το μέτρο διάτμησης, ενώ είναι σαφές ότι έχουν παρθεί προληπτικά μέτρα κατά τη διάρκεια των ερευνητικών εργασιών, ειδικότερα κατά τη διάνοιξη της γεώτρησης και την εισαγωγή της βολίδας. Από την άλλη πλευρά, είναι ξεκάθαρο ότι η πίεση αστοχίας p_F και η οριακή πίεση p_L (ή p_i) είναι πολύπλοκες παράμετροι εφόσον εξαρτώνται σχεδόν από όλα τα χαρακτηριστικά του εδάφους. Επομένως, είναι φανερό ότι το να προσδιοριστούν τα πρεσσιομετρικά αποτελέσματα των p_F και p_i , χρησιμοποιώντας τις απλοποιημένες θεωρίες όπως η ελαστο-πλαστική θεωρία, θα ήταν παραπλανητικό.

Πρέπει να επαναληφθεί ότι αυτή η διαδρομή επιλέχθηκε όταν πρωτοχρησιμοποιήθηκε η πρεσσιομετρική δοκιμή, αλλά ο Ménard σύντομα συνειδητοποίησε ότι ήταν προτιμότερο να οδηγηθεί κατ' ευθείαν από την πρεσσιομετρική δοκιμή στη φέρουσα ικανότητα θεμελίωσης χρησιμοποιώντας ημι-εμπειρικές μεθόδους. Αυτή η δεύτερη διαδρομή είναι ακόμα πιο σύντομη από εκείνη που οδηγούσε πρώτα στις παραμέτρους c και ϕ , και μετά στη φέρουσα ικανότητα. Αυτό συμβαίνει λόγω του ότι η διαδρομή μέσω των παραμέτρων c και ϕ , έχει μειονεκτήματα και σφάλματα τα οποία συσσωρεύονται.

Ο στόχος εδώ είναι να δωθεί μία ιδέα του μεγέθους των σφαλμάτων που επηρεάζουν τις δυναμικές παραμέτρους που προσδιορίζονται από τα πρεσσιομετρικά αποτελέσματα. Τα σφάλματα λόγω έλλειψης ακρίβειας στις μετρήσεις των p_F και p_i εξετάζονται πρώτα, ενώ ακολουθούν εκείνα που οφείλονται στο απλό ελαστο-πλαστικό μοντέλο.

Εξετάζονται μόνο τα κοκκώδη εδάφη, με συνοχή και γωνία τριβής, αφού για τα συνεκτικά εδάφη με αστράγγιστη συμπεριφορά, αν τα αποτελέσματα της προχώρησης είναι αμελητέα, υπάρχει μία ακριβής θεωρία για την ερμηνεία της πρεσσιομετρικής δοκιμής για παρθένο έδαφος, και ότι τα σφάλματα είναι κυρίως λόγω αναγόμωσης στα τοιχώματα της γεώτρησης. Ο πίνακας 2.28 επεξηγεί τα σφάλματα στη γωνία εσωτερικής τριβής ϕ λόγω έλλειψης ακρίβειας στις μετρήσεις των p_F και p_i , ή στον προσδιορισμό άλλων παραμέτρων όπως είναι τα p_0 και c . Το έδαφος θεωρείται ελαστο-πλαστικό με στοιχειώδη διάτμηση και χαρακτηριστικά όγκου που φαίνονται στη στήλη (1), μαζί με τις πρεσσιομετρικές ιδιότητες p_F και p_i . Αυτά, στη στήλη (2) ερμηνεύονται με τη χρήση των σχέσεων του ελαστο-πλαστικού εδάφους της στήλης (3). Έτσι, δεν υπάρχει διαφορά ανάμεσα στο πραγματικό έδαφος και στο μοντέλο που χρησιμοποιείται για την ερμηνεία, αλλά οι ανακρίβειες θεωρείται ότι επηρεάζουν τουλάχιστον ένα από τα p_F , p_0 ή c , όπως φαίνεται στη στήλη (4). Για παράδειγμα, το $\Delta p_F = +20$ KPa σημαίνει ότι οι εσφαλμένη τιμή των 180KPa, αντί της πραγματικής των 160KPa, έχει εισαχθεί στην εξίσωση A.52 προκειμένου να υπολογιστεί το ϕ . Στην περίπτωση αυτή δεν θεωρείται λάθος για τις άλλες παραμέτρους p_0 και c .

Τα σφάλματα που προκύπτουν στα ϕ και $\Delta\phi$ υπολογίζονται με τη χρήση των προσεγγιστικών σχέσεων της στήλης (5), οι οποίες προκύπτουν από τις εξισώσεις της στήλης (3). Η στήλη (6) δίνει ένα $\Delta\phi$, λόγω κάθε πηγής ανακρίβειας Δp_F , Δp_0 και Δc . Για παράδειγμα, όταν $\Delta p_F = +20$ KPa, τότε το ϕ έχει υπερεκτιμηθεί περίπου 14° .

Προκειμένου να μελετηθεί η επιρροή ενός σφάλματος στη μέτρηση της πίεσης p_i , η γωνία ϕ υπολογίζεται από την εξίσωση της στήλης (3) και η διαφορά ανάμεσα στην υπολογισμένη και την πραγματική γωνία ϕ , $\Delta\phi$, δίνεται στη στήλη (6).

Τα σφάλματα που θεωρούνται για τα p_F , p_0 , p_i και c βρίσκονται σαφώς εντός των ορίων σφάλματος που είναι δυνατό σε κάθε περίπτωση. Ακόμα κι έτσι, όμως, το προκύπτον σφάλμα της γωνίας ϕ είναι αξιόλογο, καθώς δεν είναι ποτέ μικρότερο από 3° . Όταν διαπιστώνεται ότι μπορούν να συμβούν σφάλματα και στις τέσσερις αυτές περιπτώσεις παράλληλα, και όχι μόνο μεμονωμένα, η τιμή της ϕ πρέπει πράγματι να ληφθεί υπόψη. Αξίζει, ακόμα, να σημειωθεί ότι ο προσδιορισμός των παραμέτρων c και ϕ από τα p_i και p_F είναι θεωρητικά πιθανός με τη χρήση των εξισώσεων 2.52 και 2.71, εφόσον είναι γνωστά τα p_0 και a_F . Ωστόσο, είναι ξεκάθαρο ότι ο προσδιορισμός αυτός είναι αδύνατος στην πράξη.

Characteristics of the elastic-plastic soil	from	Calculation	by	on	Uncertainty effect	Error in Φ , $\Delta\Phi$
(1)	(2)	(3)	(3)	(4)	(5)	(6)
Elementary characteristics $\phi = 30^\circ$ $c = 11.5 \text{ kPa}$ $(c \cdot \cot \phi = 20 \text{ kPa})$ $\alpha_F = 1\%$ $p_0 = 100 \text{ kPa}$ - incompressible - insensitive	p_F	$p_F = p_0 + (p_0 + c \cdot \cot \phi) \sin \alpha_F$ $= p_0 (1 + \sin \phi) + c \cdot \cos \phi$ (Equation 4-52)		$\Delta p_F = \pm 20 \text{ kPa}$	$\Delta\Phi \approx \frac{\Delta p_F}{p_0 \cdot \cos \phi - c \cdot \sin \phi}$	$\Delta\Phi = \pm 14^\circ$
				$\Delta p_0 = \pm 20 \text{ kPa}$	$\Delta\Phi \approx \frac{-\Delta p_0 (1 + \sin \phi)}{p_0 \cdot \cos \phi - c \cdot \sin \phi}$	$\Delta\Phi = \pm 21^\circ$
				$\Delta c = \pm 10 \text{ kPa}$	$\Delta\Phi \approx \frac{-\Delta c}{p_0 - c \cdot \tan \phi}$	$\Delta\Phi = \pm 7^\circ$
Pressuremeter characteristics $p_F = 160 \text{ kPa}$ $p_1 = 506 \text{ kPa}$ $(p_1 = 643 \text{ kPa})$	p_1	$\ln \frac{p_1 + c \cdot \cot \phi}{p_F + c \cdot \cot \phi} = \frac{1 - K_a}{2} \ln \frac{1}{4}$ (Equation 4-71)		$\Delta p_1 = \pm 40 \text{ kPa}$	Compute Φ by Equation 4-71	$\Delta\Phi = \pm 3.5^\circ$
				$\Delta p_F = \pm 20 \text{ kPa}$		$\Delta\Phi = \pm 4.5^\circ$
				$\Delta \alpha_F = \pm 0.2\%$		$\Delta\Phi = \pm 3^\circ$
				$\Delta(c \cdot \cot \phi) = \pm 20 \text{ kPa}$		$\Delta\Phi = \pm 3^\circ$

Σχήμα 2. 28: Πιθανό εύρος σφάλματος στην υπολογιζόμενη γωνία τριβής για κοκκώδη εδάφη με αόριστες ή ορισμένες πρεσσιομετρικές παραμέτρους.

Έτσι, οι αβεβαιότητες στις παραμέτρους που μεσολαβούν μέχρι τον υπολογισμό της γωνίας φ από τα πρεσσιομετρικά χαρακτηριστικά, μπορεί να δώσει σημαντικά λάθη στη φ , ακόμα και αν το μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί στην ερμηνεία τους αντιστοιχεί σε πραγματικές συνθήκες εδάφους. Ακόμα, είναι ενδιαφέρον να εξεταστεί η πιθανή σειρά πρόσθετων σφαλμάτων που εμφανίζονται όταν το μοντέλο που χρησιμοποιείται για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων δεν ταιριάζει σε πραγματικό έδαφος.

Αυτό απεικονίζεται στο Σχήμα 2.29. Η στοιχειώδης διάτμηση και οι ιδιότητες του όγκου του εδάφους φαίνονται στη στήλη (1). Η συμπιεστότητα, η ευαισθησία και η διαστολικότητα εξετάζονται διαδοχικά. Χάριν απλότητας, η θεωρητική οριακή πίεση p_L , έχει επιλεγεί, αν και η p_i έχει μετρηθεί στην πράξη. Η στήλη (3), στη συνέχεια, υποδεικνύει την παράμετρο που ερμηνεύεται από το ελαστο-πλαστικό μοντέλο, τη χρήση δηλαδή της εξίσωσης 2.52 για την p_F και μόνο, ή της 2.61 για τις p_F και p_i , όπως δίνεται στη στήλη (4). Θεωρείται ότι δεν υπάρχει σφάλμα στις παραμέτρους που απαιτούνται για τον υπολογισμό, δηλαδή τα $c^* \cot \varphi$, α_F ή ρ_0 , όπως φαίνεται στη στήλη (5). Η τιμή της φ που προκύπτει δίνεται στη στήλη (6), ενώ η διαφορά της από την πραγματική τιμή, $\Delta\varphi$, στη στήλη (7).

Η συμπιεστότητα και η ευαισθησία του εδάφους δίνουν υποτιμημένες τιμές για τη φωνία τριβής φ . Έτσι, είναι πολύ πιθανά σφάλματα της τάξης των 6° ή 7° για εδάφη που παρουσιάζουν ένα από αυτά τα χαρακτηριστικά σε αξιόλογο, αλλά όχι εξαιρετικά μεγάλο βαθμό.

Η μείωση του όγκου, μ_L από την αρχική πίεση $p_0 = 100\text{KPa}$ στη μέση οριακή πίεση, $\sigma_{mL} = 310\text{KPa}$, είναι -5.3% για το συμπιεσμένο έδαφος του Σχήματος 2.29. Έτσι, το παράδειγμα μπορεί κάλλιστα να αντιστοιχεί σε αρκετά χαλαρή, χωρίς συνοχή άμμο. Για πολύ χαλαρή άμμο χωρίς συνοχή, τα σφάλματα είναι σίγουρα μεγαλύτερα.

Χαλαρές, κάπως συγκολλημένες άμμοι μπορεί να είναι ευαίσθητες, όσο και συμπιεσμένες. Και τα δύο από αυτά τα μηχανικά χαρακτηριστικά όταν συνυπάρχουν μπορούν να έχουν μεγάλη επιρροή στα αποτελέσματα της πρεσσιομετρικής δοκιμής. Αν, με τη σειρά τους, τα αποτελέσματα αυτά ερμηνεύονται χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η συμπιεστότητα ή η ευαισθησία του εδάφους, η τιμή της φ που υπολογίζεται μπορεί να έχει σφάλμα 10° ή παραπάνω.

Η διαστολικότητα οδηγεί σε υπερεκτιμημένες τιμές της γωνίας φ όταν τα αποτελέσματα ερμηνεύονται με την απλή ελαστο-πλαστική θεωρία. Σφάλματα 12° και 15° ,

Characteristics of the soil		Interpretation for ϕ				
Type of soil Elementary properties	Pressuremeter characteristics	Parameter interpreted	Equation	Value obtained for ϕ	Error $\Delta\phi$	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Compressible granular soil (see Section F) $\phi = 30^\circ$ $c = 0$ $\alpha_F = 1\%$ $p_0 = 100 \text{ kPa}$ $C = 3000 \text{ kPa}$ ($\phi_r = \phi$ $c_r = c$)	$p_F = 150 \text{ kPa}$ $p_L = 465 \text{ kPa}$	$\frac{p_L}{p_F} = 3.10$	$\frac{1 - \kappa_a}{2} = \frac{\ln(p_L/p_F)}{\ln(1/2\alpha_F)}$ (Equation 4-61)	$c = 0$ $\alpha_F = 1\%$	$\phi = 24^\circ$	$\Delta\phi = -6^\circ$
Sensitive granular soil (see Section F) $\phi = 45^\circ$ $c = 10 \text{ kPa}$ $\alpha_F = 1\%$ $p_0 = 100 \text{ kPa}$ $\phi_r = 35^\circ$ $c_r = 0$ $\alpha_r = 5\%$	$p_F = 178 \text{ kPa}$ $p_L = 824 \text{ kPa}$	$\frac{p_L + c \cdot \cot \phi}{p_F + c \cdot \cot \phi} = 4.44$	$\frac{1 - \kappa_a}{2} = \frac{\ln(\Omega_L/\Omega_F)}{\ln(1/2\alpha_F)}$ (Equation 4-61)	$c \cdot \cot \phi = 10 \text{ kPa}$ $\alpha_F = 1\%$	$\phi = 38^\circ$	$\Delta\phi = -7^\circ$
Dilatant granular soil (see Section G) $\phi = 30^\circ$ $c = 11.5 \text{ kPa}$ ($c \cdot \cot \phi = 20 \text{ kPa}$) $p_0 = 100 \text{ kPa}$ $d = 0.4$ $\alpha_F = 1\%$ $\alpha_s/\alpha_F = 10$ ($\phi_r = \phi$ $c_r = c$)	$p_F = 185 \text{ kPa}$ $p_L = 968 \text{ kPa}$	$p_F = 185 \text{ kPa}$ $\frac{p_L + c \cdot \cot \phi}{p_F + c \cdot \cot \phi} = 4.82$	$\sin \phi = \frac{p_F - p_0}{p_0 + c \cdot \cot \phi}$ (Equation 4-52)	$c \cdot \cot \phi = 20 \text{ kPa}$ $\alpha_F = 1\%$ $p_0 = 100 \text{ kPa}$	$\phi = 45^\circ$	$\Delta\phi = +15^\circ$
			$\frac{1 - \kappa_a}{2} = \frac{\ln(\Omega_L/\Omega_F)}{\ln(1/2\alpha_F)}$ (Equation 4-61)	$c \cdot \cot \phi = 20 \text{ kPa}$ $\alpha_F = 1\%$	$\phi = 42^\circ$	$\Delta\phi = +12^\circ$

Σχήμα2. 29: Σφάλμα στην γωνία τριβής για κοκκώδες έδαφος που υπολογίζεται από την p_F και την p_L χρησιμοποιώντας ένα ασυμπιεστο, ελαστο-πλαστικό μοντέλο για το υλικό

που φαίνονται στο σχήμα 2.29 είναι συγκρίσιμα με τις τιμές που έχουν παρατηρηθεί από διάφορους συγγραφείς: διαφορές τόσο μεγάλες, όπως 15° και 20° έχουν βρεθεί ανάμεσα στο φ που έχει βρεθεί από πρεσσιομετρικές δοκιμές με τη χρήση του ελαστο-πλαστικού μοντέλου, και στο φ που μετράται σε τριαξονικές δοκιμές. Αυτό επιβεβαιώνει ότι η οριακή πίεση p_L εξαρτάται από παραπάνω παράγοντες από μία απλή γωνία τριβής φ του εδάφους.

Είναι προφανές ότι ο προσδιορισμός της γωνίας εσωτερικής τριβής, φ , από τις πρεσσιομετρικές δοκιμές είναι ένα επικίνδυνο εγχείρημα. Οι αβεβαιότητες στις μετρήσεις μπορεί να οδηγήσουν σε αξιόλογα σφάλματα, και η χρήση ενός θεωρητικού μοντέλου, όπως το ελαστο-πλαστικό, να αποφέρει ανούσιες τιμές.

2.9 Σύνοψη

Στην αρχή αυτού του κεφαλαίου σημειώθηκε ότι η πρεσσιομετρική δοκιμή έγκειται να αναλυθεί πλήρως και αυστηρά λαμβάνοντας υπόψη τις σύνθετες ιδιότητες του εδάφους. Εκτός από τη συνήθη παραμόρφωση και τις δυναμικές ιδιότητες, είναι πιθανό να εισαχθούν σημαντικά χαρακτηριστικά της συμπεριφοράς του πραγματικού εδάφους, τα οποία πολύ συχνά αγνοούνται στην εδαφομηχανική ανάλυση. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι η συμπιεστότητα, η ευαισθησία και η διαστολικότητα του εδάφους. Μία πλήρης κατανόηση της πρεσσιομετρικής δοκιμής είχε ως αποτέλεσμα τα παρακάτω.

Το γενικό σχήμα της πραγματικής πρεσσιομετρικής καμπύλης μπορεί να περιγραφεί από το απλουστευμένο ελαστο-πλαστικό μοντέλο, καθώς και με την παραδοχή πιο εξελιγμένων καταστατικών ιδιοτήτων του εδάφους.

Ξεκινώντας από τις φυσικές καταστάσεις τάσεων, μία γραμμική ή ημι-γραμμική καμπύλη εκτείνεται από την οριζόντια πίεση p_0 μέχρι την πίεση ερπυσμού p_F . Κατά τη διάρκεια της φάσης αυτής, κυριαρχούν οι διεκτροπικές τάσεις και οι τροπές. Αυτό αποδεικνύεται από το γεγονός ότι η κλίση της πρεσσιομετρικής καμπύλης, απεικονίζεται σε όρους p και το $g_0 = 1/2 (\Delta V/V_0)$ είναι διπλάσιο του διαμητρικού μέτρου του εδάφους. Αυτή η σημαντική παρατήρηση, που αρχικά είχε γίνει για μία περίπτωση του εδάφους, είναι αρκετά γενική και ισχύει για κάθε τύπο εδάφους.

Η αστοχία ξεκινά στα τοιχώματα της κοιλότητας όταν η εφαρμοζόμενη πίεση φτάνει στην πίεση ερπυσμού ή αστοχίας, p_F . Η τιμή της p_F εξαρτάται από τη αντοχή του εδάφους: στα κοκκώδη εδάφη η p_F αυξάνεται σημαντικά λόγω διαστολικότητας.

Η αστοχία αναπτύσσεται σε όλη τη μάζα του εδάφους, ενώ η ζώνη αστοχίας πάντα περιορίζεται από μία ζώνη που βρίσκεται σε ελαστική ή ψευτο-ελαστική κατάσταση. Η πίεση στην κοιλότητα φτάνει τελικά σε μία οριακή τιμή, την οριακή πίεση p_l . Αυτή η τιμή είναι και η πίεση που απαιτείται για την επέκταση της κυλινδρικής κοιλότητας με μηδενική αρχική ακτίνα. Στην πράξη, είναι κατά προσέγγιση η οριακή πίεση p_l , η οποία ορίζεται συμβατικά για μία διττή αύξηση του όγκου αντί για άπειρη επέκταση της κοιλότητας.

Η καθαρή οριακή πίεση p_l^* εξαρτάται όχι μόνο από τις κλασσικές δυναμικές παραμέτρους c_u , ή c και ϕ και την παραμόρφωση που απαιτείται για να επιτευχθεί η αστοχία, αλλά και από όλες τις υπόλοιπες ιδιότητες του εδάφους. Για συνεκτικό έδαφος σε αστράγγιστες συνθήκες, η ευαισθησία του εδάφους μπορεί να μειώσει δραματικά την οριακή πίεση. Αυτό μπορεί να συμβεί σε κοκκώδες έδαφος αλλά και σε κάθε έδαφος που δοκιμάζεται σε συνθήκες στράγγισης. Στην περίπτωση αυτή, εκτός από την ευαισθησία του εδάφους, πρέπει να εξεταστούν και οι μεταβολές του όγκου. Ακόμα, η συμπιεστότητα από μόνη της μειώνει την οριακή πίεση. Από την άλλη, η διαστολικότητα αυξάνει την p_l σημαντικά. Στην πραγματικότητα, η διαστολικότητα πρέπει να εξετάζεται ως η πιο σημαντική παράμετρος για κοκκώδες έδαφος σε κάθε πρόβλημα που η επέκταση αντιστέκεται περιορίζοντας το αποτέλεσμα ολόκληρης της μάζας του εδάφους.

Στη συνέχεια, το φαινόμενο της αναμόχλευσης του εδάφους, λόγω της διατάραξης που συμβαίνει κατά τη διάνοιξη της γεώτρησης, έχει αναλυθεί για συνεκτικό έδαφος, αλλά τα συμπεράσματα μπορούν σίγουρα να επεκταθούν και σε πιο γενικές περιπτώσεις. Ένας αναμοχλευμένος δακτύλιος γύρω από τη βολίδα μπορεί να αποφέρει μείωση στο πρεσσιομετρικό μέτρο E_M και στην οριακή πίεση p_l . Για να κρατηθούν αυτές οι αλλαγές σε λογικά επίπεδα και έτσι να μπορούν να μετρηθούν λογικές εδαφικές παράμετροι, είναι απαραίτητο οι εργασίες που γίνονται να είναι πολύ καλής ποιότητας.

Η αναμόχλευση, η οποία αναγκαστικά παρουσιάζεται στην πρεσσιομετρική δοκιμή, είναι ένα πολύ σημαντικό εμπόδιο για τη χρήση της γενικής θεωρίας για συνεκτικό έδαφος σε αστράγγιστες συνθήκες. Θεωρητικά, είναι πιθανό να παραχθεί το σύνολο των διατμητικών καμπύλων από την πρεσσιομετρική καμπύλη, αλλά η αναμόχλευση οδηγεί σε μία υπερεκτίμηση της πραγματικής συνοχής. Εφόσον η συνοχή είναι συνήθως υποτιμημένη από άλλες κλασσικές δοκιμές, η διαφορά μεταξύ της συνοχής που προκύπτει από την πρεσσιομετρική δοκιμή και εκείνης που προκύπτει από κάποια άλλη κλασσική δοκιμή, είναι σημαντική.

Για την πιο γενική περίπτωση κοκκώδους εδάφους, η θεωρητική ερμηνεία που έχει αναπτυχθεί δείχνει ότι απαιτείται μία επιπλέον μέτρηση, έτσι ώστε να καταστεί δυνατή η θεωρητική ανάλυση της πρεσσιομετρικής καμπύλης. Μία τέτοια μέτρηση μπορεί να είναι η μεταβολή του όγκου που συμβαίνει καθ' όλη τη δοκιμή στο γύρω έδαφος. Η μέτρηση αυτή, που είναι συνήθως δύσκολο να εισαχθεί σε μία δοκιμή ρουτίνας, επηρεάζεται από τη διατάραξη που συμβαίνει κατά τη διάνοιξη της γεώτρησης.

Έτσι, η ολοκληρωμένη επεξεργασία της πρεσσιομετρικής καμπύλης, που οδηγεί σε μία συνεχή στοιχειώδη καμπύλη τάσεων - τροπών, είναι θεωρητικά πιθανή, αλλά από ότι φαίνεται όχι πρακτική.

Άλλος ένας τρόπος να μετατραπούν τα αποτελέσματα της πρεσσιομετρικής δοκιμής σε θεμελιώδεις εδαφικές ιδιότητες, είναι να εκφραστεί το ελαστο-πλαστικό μοντέλο στα p_F και p_L προκειμένου να βρεθεί η γωνία τριβής ϕ κοκκώδους εδάφους. Αυτή η προσέγγιση συναντά σημαντικά εμπόδια. Αρχικά τα αποτελέσματα είναι πολύ επιρρεπή σε ανακρίβειες όσον αφορά στις μετρήσεις των p_F και p_L . Ακόμα, το ελαστο-πλαστικό μοντέλο δεν μπορεί να αποφέρει τιμές για τον πραγματικό, πολύπλοκο τρόπο που συμπεριφέρεται το έδαφος, καθώς η ευαισθησία, η συμπιεστότητα και η διαστολικότητα αυτού είναι σημαντικές και πρέπει να λαμβάνονται υπόψη. Έτσι, οι τιμές της ϕ που λαμβάνονται με αυτόν τον τρόπο δεν έχουν σχέση με τις πραγματικές τιμές.

Οι ελλείψεις των δραστικών απλοποιήσεων, όπως οι υποθέσεις του ελαστο-πλαστικού μοντέλου, είναι απόλυτα φανερές στην περίπτωση της πρεσσιομετρικής δοκιμής. Είναι δυνατό να αναλυθεί η δοκιμή αυτή με πιο πολύπλοκες και ρεαλιστικές υποθέσεις που αφορούν στην αντίδραση του εδάφους.

Σε άλλες περιπτώσεις, όπου δεν είναι δυνατές πιο εξελιγμένες μέθοδοι, η συνάφεια των απλοϊκών θεωριών μπορεί σίγουρα να αμφισβητηθεί. Οι βασικές θεωρίες για την τελική φέρουσα ικανότητα, εξετάζουν μόνο τις δυναμικές παραμέτρους c και ϕ , οπότε και τα αποτελέσματά τους δίνουν τιμές μόνο για αυτές. Η ευαισθησία, η συμπιεστότητα και η διαστολικότητα του εδάφους είναι τελείως αγνοημένες. Είναι όμως γνωστό ότι η δράση της διάτρησης μίας θεμελίωσης δεν μπορεί να είναι πολύ διαφορετική από την επέκταση μίας κοιλότητας από ένα πρεσσιόμετρο. Ο λόγος είναι, λοιπόν, ότι αυτές οι εδαφικές παράμετροι πρέπει να είναι τόσο σημαντικές για τις θεμελιώσεις, όσο και για την πρεσσιομετρική δοκιμή.

Δεδομένων των περιορισμών αυτών στις υπάρχουσες θεωρίες για τη φέρουσα

ικανότητα, η ημι-εμπειρική προσέγγιση που συσχετίζει την τελική φέρουσα ικανότητα των θεμελιώσεων με την ικανότητα του εδάφους να αντιστέκεται στην διαστολή του, μοιάζει να είναι πολύ πιο βάσιμη. Αυτή είναι η αρχή της πρεσσιομετρικής μεθόδου του σχεδιασμού θεμελιώσεων: να εξισώσει το q_i της θεμελίωσης με το p_i της πρεσσιομετρικής δοκιμής.

3 ΠΑΡΑΓΩΓΑ ΜΕΓΕΘΗ ΠΡΕΣΣΙΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό αναφέρεται η δυνατότητα χρήσης της πρεσσιομετρικής δοκιμής απλά ως μία επιτόπου δοκιμή υπολογισμού των εδαφικών ιδιοτήτων, με σκοπό τη χρήση τους σε πιο παραδοσιακούς υπολογισμούς σχεδιασμού φέρουσας ικανότητας και καθιζήσεων.

Εδαφικές ιδιότητες

Για να υπολογιστούν η φέρουσα ικανότητα και οι καθιζήσεις των θεμελιώσεων, ακολουθώντας την παραδοσιακή πρακτική, θα πρέπει να είναι γνωστές οι κατά Mohr – Coulomb εδαφικές παράμετροι, δηλαδή η συνοχή c και η γωνία εσωτερικής τριβής ϕ , όπως και οι ιδιότητες παραμόρφωσης, όπως το μέτρο παραμόρφωσης E , ο συντελεστής της μεταβολής του όγκου m_v και ο συντελεστής στεροποίησης c_v . Ακόμα, δίνεται βάση στον υπολογισμό του συντελεστή ωθήσεων γαιών, σε κατάσταση ηρεμίας, K_0 .

3.1 Συντελεστής ωθήσεων γαιών σε κατάσταση ηρεμίας, K_0

Αρχικά, θεωρούνταν ότι ο συντελεστής K_0 προέρχεται από την p_{0M} στο αρχικό ευθύγραμμο τμήμα της καμπύλης δοκιμής, εφόσον οριοθετεί τη στιγμή που τα τοιχώματα της γεώτρησης ωθούνται πίσω στην αρχική τους θέση. Η πίεση της βολίδας στο p_{0M} θεωρούνταν ίση με την οριζόντια ολική πίεση στο έδαφος σε κατάσταση ηρεμίας πριν από τη διάνοιξη της γεώτρησης. Έτσι, ήταν απλό να υπολογιστεί η τιμή του K_0 , που βασίζεται σε ενεργές τάσεις. Γνωρίζοντας τη στάθμη του υδροφότου ορίζοντα και τα μοναδιαία βάρη των εδαφών, υπολογίζονται οι κατακόρυφες τάσεις και οι πιέσεις πόρων στο έδαφος σε συγκεκριμένα βάθη.

Σήμερα, η μέθοδος αυτή έχει εγκαταληφθεί, καθώς βρέθηκε ότι η τιμή της p_{0M} είναι συνάρτηση του πώς διανοίχθηκε η γεώτρηση και κυρίως, του πόσο τα τοιχώματα αυτής έχουν υποστεί επανασυμπίεση. Ο Hartman το 1974, με τη βοήθεια των πεπερασμένων στοιχείων έδειξε ότι το p_{0M} είναι μία σχετικά αυθαίρετη απάντηση για την εκφόρτιση της γεώτρησης.

Οι Jézéquel, Lemasson και Touze το 1965 επισημαίνουν δύο σημαντικά προβλήματα που προέκυψαν κατά τον υπολογισμό της p_{0M} . Αρχικά, υπάρχουν ακόμα δύο

διαθέσιμα σημεία στην αρχή της δοκιμής, έτσι ώστε να είναι δυνατή η ακριβής σχεδίαση της καμπύλης και άρα η p_{OM} να καθορίζεται με ακρίβεια. Ακόμα, αν η διάμετρος της γεώτρησης είναι πολύ μεγαλύτερη από την διάμετρο της βολίδας, τότε η αντίσταση της μεμβράνης μπορεί αν είναι αισθητή όταν συγκριθεί με τη μικρή πίεση που απαιτείται για την επίτευξη της p_{OM} . Και τότε δημιουργούνται σημαντικά λάθη.

Αποδεικνύεται ότι το Διατρητικό Πρεσσιόμετρο (self-boring pressuremeter) φαίνεται να είναι καταλληλότερο για τη μέτρηση του K_0 από ό,τι είναι το συμβατικό πρεσσιόμετρο. Πρέπει, επίσης, να σημειωθεί ότι όταν απαιτείται η p_{OM} , για να καθοριστεί, για παράδειγμα, η φέρουσα ικανότητα, συνιστάται να υπολογίζεται υποθέτοντας μια τιμή του K_0 , παρά χρησιμοποιώντας μία τιμή της p_{OM} από την καμπύλη της δοκιμής.

3.2 Παράμετροι διατμητικής αντοχής, c και ϕ

Σε μία δοκιμή συμπίεσης που διενεργείται σε συνεκτικό έδαφος με τέτοιο τρόπο ώστε να μην αλλάζει η περιεκτικότητα σε νερό, το μισό της αντοχής συμπίεσης, λέγεται αστράγγιστη διατμητική αντοχή, c_u , για έδαφος σε όρους ολικών τάσεων, ακόμα και αν είναι μερικώς κορεσμένο. Αυτό ισχύει μόνο αν το έδαφος είναι κορεσμένο και άρα $\phi=0$. Αντίθετα, σε κοκκώδη εδάφη, όπως η άμμος, οι δοκιμές αντοχής θεωρούνται στραγγισμένες, καθώς το έδαφος είναι τόσο διαπερατό, ή οι δοκιμές εκτελούνται σε στραγγισμένες συνθήκες επίτηδες. Έτσι, οι τάσεις είναι ενεργές και εφόσον η c' λαμβάνεται συνήθως ως μηδενική, μπορεί να υπολογιστεί η φωνία τριβής ϕ' . Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν και τα ελεύθερα αποστραγγισμένα κοκκώδη εδάφη. Ακόμα, για να εξασφαλιστεί η αποστράγγιση των πόρων στο γειτονικό με τη βολίδα έδαφος, οι δοκιμές γίνονται πολύ αργά και έτσι μετρούνται οι ενεργές παράμετροι c' και ϕ' για λεπτόκοκκα εδάφη ή εδάφη με χαμηλή διαπερατότητα, όπως η άργιλος. Στην περίπτωση αυτή η μεταβολή του όγκου θα πρέπει να μετρηθεί.

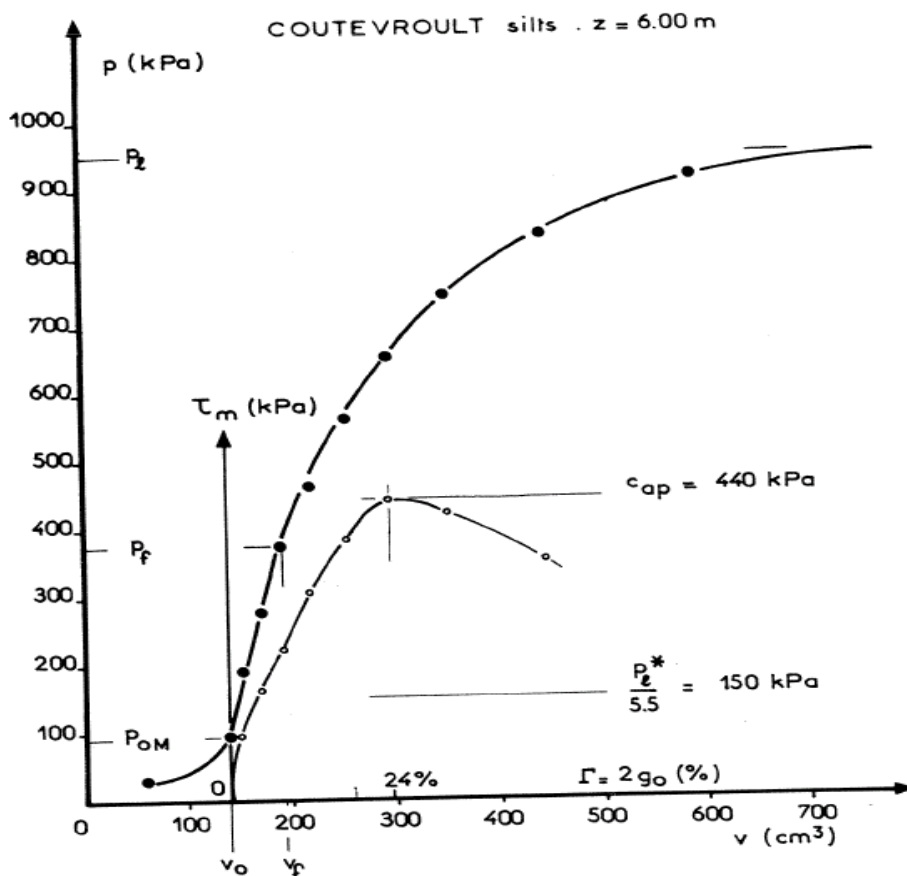
3.2.1 Αστράγγιστη διατμητική αντοχή

Η θεωρία δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής c_u με δύο τρόπους. Ο πρώτος βασίζεται στον σχεδιασμό της πρεσσιομετρικής καμπύλης με τη γνωστή μέθοδο που αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Στη μέθοδο αυτή δεν υπάρχουν ρεολογικοί περιορισμοί, εκτός από τη θεώρηση ότι δεν υπάρχουν μεταβολές του

όγκου, η οποία είναι ανάλογη με την αστράγγιστη συμπεριφορά κορεσμένου εδάφους. Ο δεύτερος τρόπος χρησιμοποιεί την οριακή πίεση p_l , και τη θεωρία του ιδανικού ελαστοπλαστικού μοντέλου.

Δυστυχώς, όμως, καμία από τις δύο παραπάνω μεθόδους δεν δίνει αποδεκτές τιμές για την c_u . Το σχήμα 3.1 απεικονίζει μία απόπειρα να μετατραπεί η τυπική πρεσσιομετρική καμπύλη σε διατμητική καμπύλη χρησιμοποιώντας την πρώτη μέθοδο.

Παρόλο που οι δύο αυτές μέθοδοι θα δούλευαν αρκετά καλά για τα self-boring πρεσσιομετρικά αποτελέσματα, η εκφόρτιση της γεώτρησης, η διατάραξη του εδάφους και η φυσική ασάφεια της καμπύλης δοκιμής η οποία βασίζεται μόνο σε κάποια σημεία, σημαίνει ότι είναι σχεδόν αδύνατο να βρεθεί η c_u από συμβατικές πρεσσιομετρικές δοκιμές. Στην πραγματικότητα, η μέθοδος αυτή εγκαταλήφθηκε στην πράξη, καθώς η μέγιστη διατμητική αντοχή είναι πολύ μεγάλη και εμφανίζεται σε πολύ μεγάλη καταπόνηση. Στο παράδειγμα του σχήματος σχήμα 3.1, το μέγιστο σημείο της διατμητικής καμπύλης είναι στα 440KPa, όπου μία καλή εκτίμηση της c_u είναι γύρω στα 150KPa.



Σχήμα3. 1: Διατμητική καμπύλη που προκύπτει από πρεσσιομετρικές δοκιμές

Η μέθοδος που χρησιμοποιεί την οριακή πίεση p_i , για να υπολογιστεί η c_u έχει λάβει μεγαλύτερη προσοχή. Βασιζόμενη στις θεωρίες του ιδανικού ελαστο-πλαστικού μοντέλου, αλλά με διαφορετικές ιδιότητες μεταβολής του όγκου, προτάθηκαν οι ακόλουθες σχέσεις:

$$p_i^* = c_u \left[1 + \ln \frac{E}{2 c_u (1 + \nu)} \right] \quad \text{BISHOP, HILL and MOTT, 1945}$$

$$p_i^* = c_u \left[1 + \ln \frac{E}{c_u (5 - 4\nu)} \right] \quad \text{HILL, 1950}$$

$$p_i^* = c_u \left[1 + \ln \frac{E}{4 c_u (1 - \nu^2)} \right] \quad \text{SALENÇON, 1966}$$

(3.01, 3.02 και 3.03 αντίστοιχα).

Αν ο λόγος του Poisson για αστράγγιστο έδαφος είναι 0,5, τότε οι παραπάνω σχέσεις μπορούν και οι τρεις να γραφούν:

$$p_i^* = c_u \left[1 + \ln \frac{E}{3 c_u} \right] \quad (3.04)$$

ή με τη μορφή:

$$\beta = 1 + \ln \frac{E}{3 c_u} \quad (3.05),$$

όπου $\beta = 1 + \ln (E/3c_u)$.

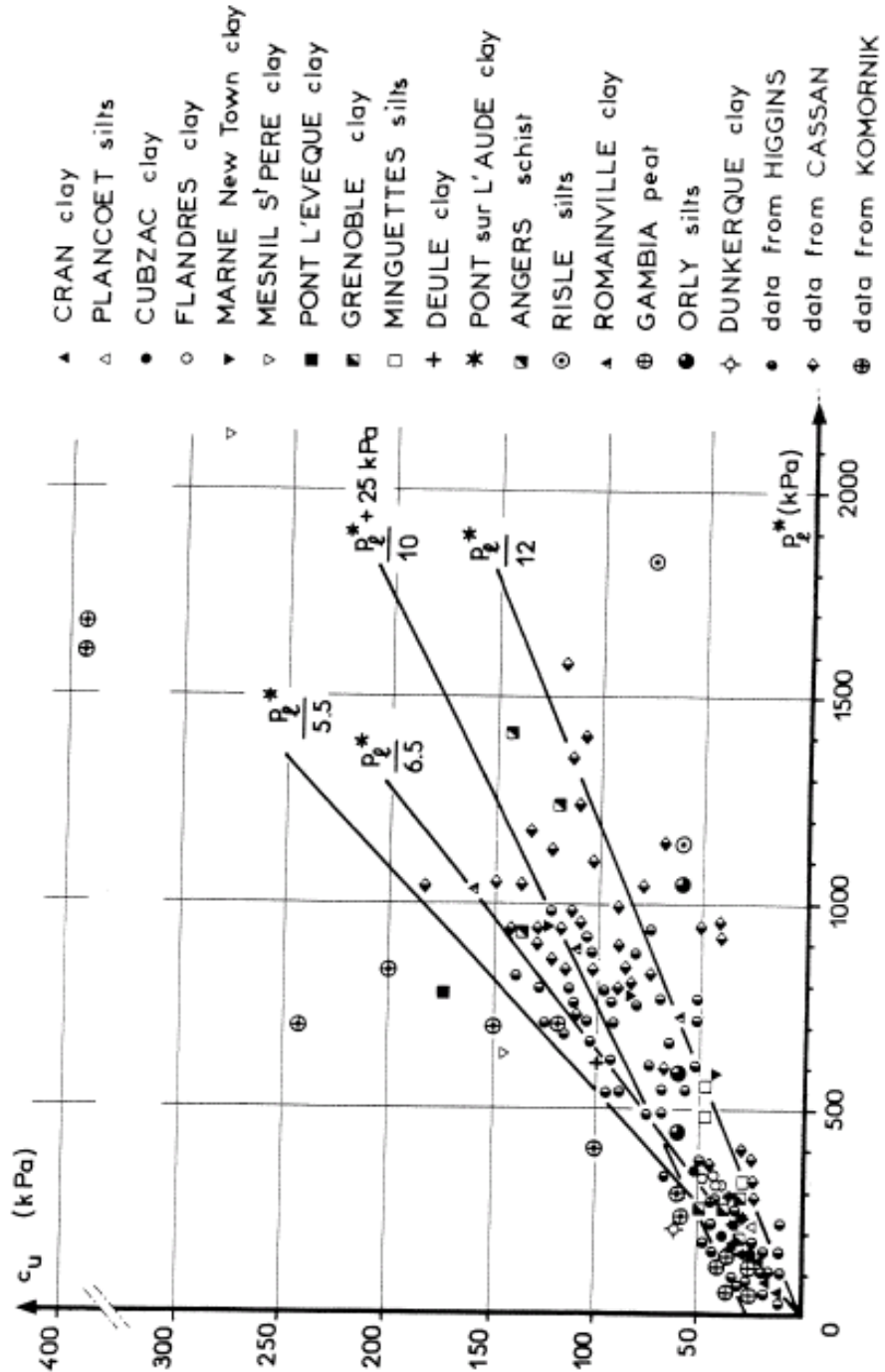
Οι τυπικές τιμές το λόγου E/c_u για άργιλο, κυμαίνονται μεταξύ 200-2000, και δίνουν τιμές για το $\beta = 5,2$ έως $7,5$.

Το Σχήμα 3.2 δείχνει την πίεση p_i^* σε σχέση με την c_u , από διάφορες πηγές. Όπως φαίνεται η διασπορά είναι αρκετά μεγάλη, αλλά αν αμεληθούν κάποια χαρακτηριστικά, τότε τα εναπομείναντα δίνουν τιμές για το $\beta=6,5$ και $\beta=12$ για μεγάλες έως πολύ μεγάλες αντοχές, με μέσο όρο το $\beta=9$.

Στη συνέχεια, με την πρώτη ματιά, μοιάζει λογικό να θεωρείται ότι οι θεωρητικές τιμές του β είναι αρκετά χαμηλές ($5,2 - 7,5$) για αργίλους μεσαίας ως υψηλής αντοχής. Ωστόσο, και οι τιμές της c_u που μετρήθηκαν εργαστηριακά και με τις δοκιμές πτερυγίου, είναι πολύ χαμηλές. Για παράδειγμα, όταν οι Meigh και Greenland το 1965, αντιμετώπισαν ένα διάγραμμα παρόμοιο με αυτό του σχήματος 3.2 (Σχήμα 3.3), κατέληξαν στο εξής συμπέρασμα: Υπάρχει εύλογη συμφωνία της διατμητικής αντοχής κάτω από το 1,5 ως 2

tons/sq.ft, αλλά πέρα από αυτό, οι τιμές των εργαστηριακών μετρήσεων είναι σε μεγάλο βαθμό μικρότερες από εκείνες των πρεσσιομετρών δοκιμών, αποδεικνύοντας τις επιπτώσεις της διαταραχής του εδάφους.

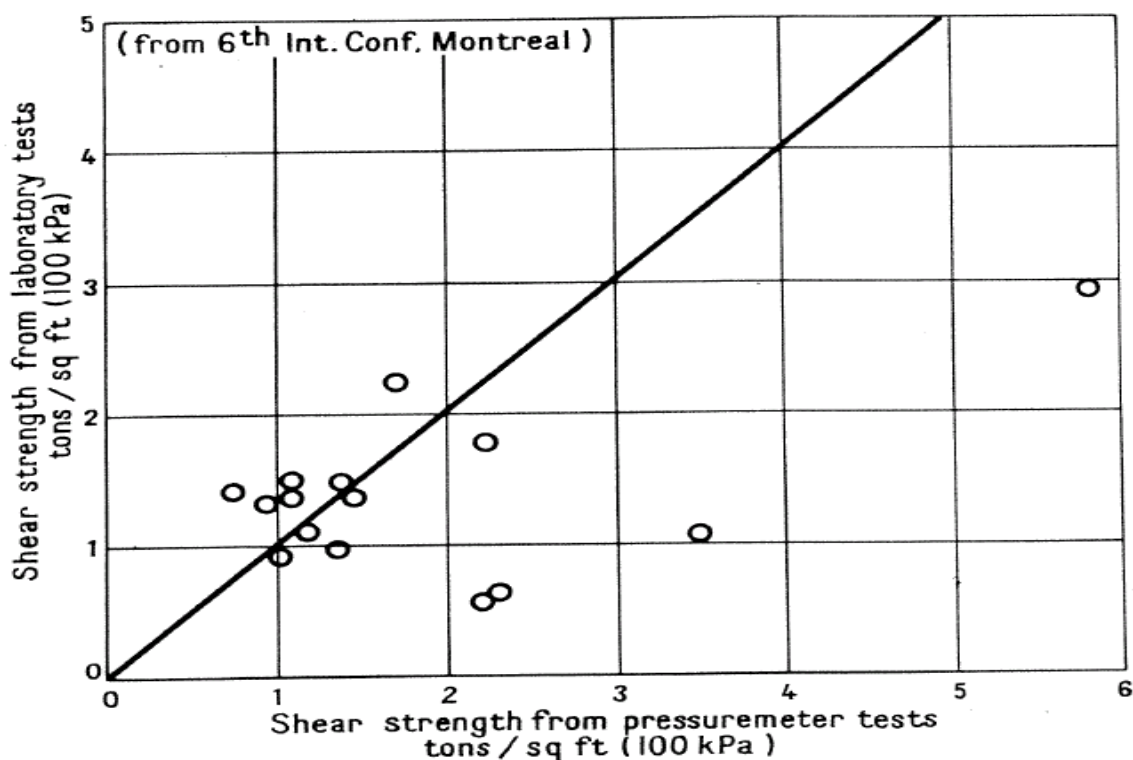
Στη συγκεκριμένη εργασία έχουν χρησιμοποιηθεί οι τιμές $\beta = 5,5, 6,5$ και 12 .



Σχήμα3. 2: Διάγραμμα $c_u - p^*$

Άλλη μία πιθανότητα είναι οι υπολογισμοί της p^* να είναι λάθος. Τότε εξετάζονται τα ακόλουθα:

1. Η τιμή της p_0 , η οποία μπορεί να μετρηθεί ή να υπολογιστεί με ακρίβεια. Αν η p_0 είναι αρκετά υποτιμημένη, τότε η p^* είναι πολύ μεγάλη. Μία μεγαλύτερη τιμή της p_0 θα μπορούσε να μετακινήσει πολλά σημεία του σχήματος 3.2 πιο κοντά στις θεωρητικές τιμές.
2. Ανομοιογένεια. Η μακριά πρεσσιομετρική βολίδα μπορεί να γεφυρωθεί πάνω από λεπτές ή τοπικά αδύναμες ζώνες στο έδαφος και έτσι η δοκιμή γίνεται σε μεγαλύτερης αντοχής έδαφος. Από την άλλη, η δοκιμή εκτελείται μέσω του πτερυγίου, μόνο σε λεπτά εδάφη. Γι' αυτό ο Higgins το 1969 εξήγησε την μη αρμονία ανάμεσα στις τιμές της c_u της πρεσσιομετρικής δοκιμής και της c_u της δοκιμής πτερυγίου.
3. Ευαισθησία. Ακριβώς δίπλα από τη βολίδα η άργιλος μπορεί να είναι διαταραγμένη, ενώ λίγη απόσταση πιο μακριά αδιατάραχτη, με τη μέγιστη αντοχή της. Η τιμή της p_1 επηρεάζεται σε ένα βαθμό από τη διαταραχή και το πάχος της διαταραγμένης ζώνης.
4. Σχήμα βολίδας. Κατά τους Laier, Schmertmann και Schaub (1975), ο λόγος μήκος προς διάμετρο της πρεσσιομετρικής βολίδας μπορεί να έχει μεγάλη επιρροή στην οριακή πίεση. Στο σχήμα 3.2 θα μπορούσε, δηλαδή, να πει κανείς ότι οι βολίδες που χρησιμοποιήθηκαν για τις πρεσσιομετρικές δοκιμές δεν είχαν το βέλτιστο σχήμα.
5. Ανισοτροπία. Η διετμημένη επιφάνεια της πρεσσιομετρικής δοκιμής μπορεί να διαφορετικού σχήματος και κλίσης από εκείνη του εργαστηρίου ή της δοκιμής πτερυγίου. Αυτή η διατμητική ανισοτροπία μπορεί να οδηγήσει σε αποδεκτές διαφορές μεταξύ της διατμητικής αντοχής που μετράται σε διάφορες δοκιμές.
6. Γεώτρηση. Η διατάραξη του εδάφους στην περιοχή της γεώτρησης και η εκφόρτιση μπορούν να επηρεάσουν τα πρεσσιομετρικά αποτελέσματα και αυτό δεν λαμβάνεται υπόψη σε όλες τις θεωρίες. Παρόλο που οι ενδείξεις ότι η οριακή πίεση σπάνια επηρεάζεται από τη διατάραξη της γεώτρησης υπάρχουν, αυτό δεν είναι πάντα αληθές (Marchal, 1973).



Σχήμα3. 3: Πρεσσιομετρική c_u και εργαστηριακή c_u (Meigh and Greenland, 1965)

Υπάρχουν πολλοί λόγοι για τους οποίους η τιμές της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής, c_u μπορεί να είναι λάθος. Η διατάραξη κατά τη δειγματοληψία και τον χειρισμό, συχνά μειώνουν την τιμή της c_u στα δείγματα. Πρόσφατες μελέτες με διατρητικά μέσα, έδειξαν ότι οι παραδοσιακοί τρόποι υπολογισμού της c_u , όπως είναι η δοκιμή πτερυγίου ή οι εργαστηριακές μετρήσεις, υποτιμούν σε μεγάλο ποσοστό την πραγματικότητα της *in situ* αντοχής του αργιλικού εδάφους. Αν η c_u υποτιμηθεί για σκληρές ή πολύ σκληρές αργίλους του σχήματος 3.2, αυτό εξηγεί την “κακή θέση” των σημείων, λόγω των θεωρητικών τιμών του β .

Έτσι, οι θεωρητικές τιμές του β θα πρέπει να εξεταστούν υπό το πρίσμα της πρεσσιομετρικής δοκιμής. Για παράδειγμα, αν η πρεσσιομετρική βολίδα είναι πολύ κοντή και μία σφαιρική κοιλότητα εκτείνεται στο έδαφος, αντί για μία κυλινδρική, τότε οι τιμές του β θα αυξάνονται κατά ένα τρίτο (Bishop, Hill and Mott, 1945). Ακόμα, οι τιμές του β εξαρτώνται από το μέτρο E . Άλλωστε, η κλασική πρεσσιομετρική δοκιμή δίνει τιμές για το E_p , το οποίο δεν είναι μια ακριβής μέτρηση του E που απαιτείται θεωρητικά. Οι τιμές του E που μετρούνται από το self-boring πρεσσιόμετρο, για παράδειγμα, είναι πολύ μεγαλύτερες

από εκείνες του E_p από συμβατικές πρεσσιομετρικές δοκιμές. Όπως είναι λογικό, οι υψηλότερες τιμές του E δίνουν και υψηλότερες τιμές για το β .

Το συμπέρασμα που προκύπτει από τα παραπάνω, είναι ότι καμία από τις παραμέτρους p_i^* , c_u ή β που αποτελούν τη σχέση B.15 δεν μπορούν να υπολογιστούν με ακρίβεια. Ωστόσο, προκειμένου να εκτιμηθεί η c_u από τις πρεσσιομετρικές δοκιμές, προτείνεται μία τιμή για το β ίση με 5,5 από τον Cassan (1972) για τις “χαμηλές τιμές” του p_i , και από τους Amar και Jézéquel (1972) για “ $p_i < 300\text{KPa}$ ”. Ακόμα, ο Cassan προτίνει την τιμή 8 για το β , για μεσαίες τιμές της οριακής πίεσης και την τιμή 15 για τις υψηλές, ενώ οι Amar και Jézéquel αντ’ αυτού, μία εξίσωση της μορφής:

$$c_u = \frac{p_i^*}{10} + 25 \text{ kPa} \quad (3.06)$$

ή

$$c_u = \frac{p_i^*}{10} + 3.7 \text{ psi} \quad (3.07),$$

με τα p_i^* και c_u να είναι σε Kpa στην εξίσωση 3.06 και σε psi στην 3.07. Η εξίσωση 3.06 απεικονίζεται στο σχήμα 3.2.

Στη συνέχεια, οι Lucas και LeClerc De Bussy (1976) αναφέρουν μία σύγκριση ανάμεσα στην p_i^* και στην ανεμπόδιση θλίψη ($2c_u$) για σκληρές αργίλους στην περιοχή του Chicago. Συμπεραίνουν ότι η τιμή 5,1 για το β ταιριάζει απόλυτα στα αποτελέσματά τους, ωστόσο η έκταση των τιμών του β είναι από 3,8 ως 6,4.

Για μαλακή άργιλο είναι επίσης λογική η χρήση της θεωρητικής σχέσης για τη c_u . Ωστόσο, αν στη θέση του E χρησιμοποιείται το πρεσσιομετρικό μέτρο E_m , το Centre d' Etudes Ménard (1967) προτείνει τη σχέση:

$$c_u = \frac{p_i^*}{1 + \ln \frac{E_m/\alpha}{3 c_u}} \quad (3.08),$$

όπου α ο ρεολογικός συντελεστής, της τάξεως του 1/3.

Έτσι, το 1970 το Centre d' Etudes Ménard προτίνει την τιμή $\beta=5,5$, για να

υπολογίσει την τελική ή παραμένουσα αντοχή για την άργιλο, με τη σχέση:

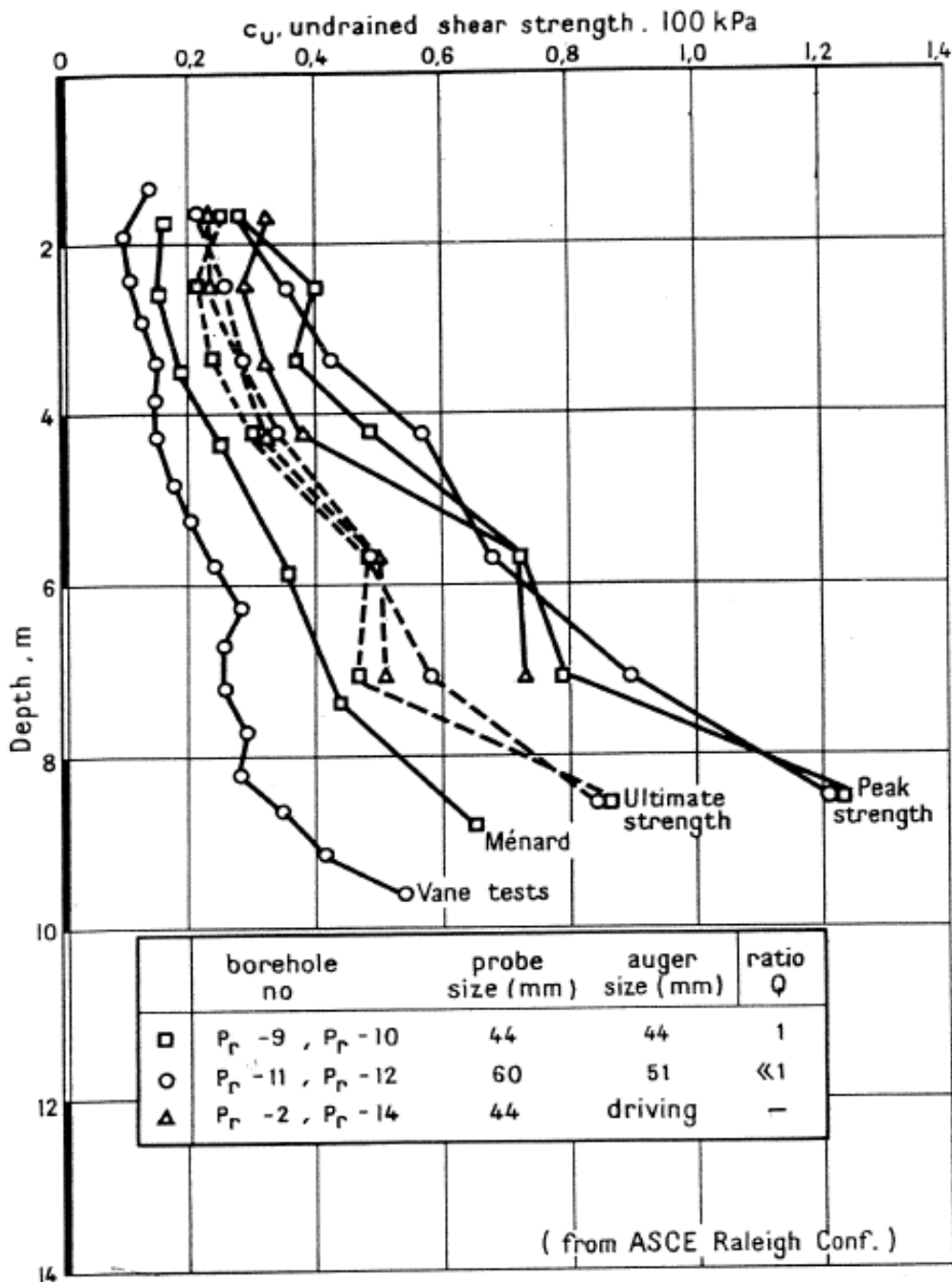
$$c_{\infty} = \frac{p_1^*}{5.5}$$

(3.09),

όπου c_{∞} η αντίσταση της αντοχής του εδάφους σε άπειρη καταπόνηση, δηλαδή η τελική αστράγγιστη διατμητική αντοχή.

Η σχέση 3.09 είναι φυσικά, η ίδια με την 3.04, με $\beta=5,5$, αλλά τώρα δίνεται η παραμένουσα διατμητική αντοχή, αντί για τη μέγιστη. Μία ενδιαφέρουσα σύγκριση των δύο σχέσεων έγινε από τους Roy et al. το 1975, σε πρεσσιομετρικές δοκιμές σε ευαίσθητη άργιλο. Έφτιαξαν διατμητικές καμπύλες από τα αποτελέσματα των δοκιμών και σύγκριναν κατ' ευθείαν τις δύο μεθόδους πρόβλεψης της c_u . Το σχήμα 3.4 δίνει τη μέγιστη και την τελική αντοχή που λαμβάνεται από τις διατμητικές καμπύλες και εκείνη που προκύπτει από τη σχέση 3.08.

Σε αυτό το σημείο αξίζει να δοθεί βάση σε δύο σημεία. Αρχικά, όλες οι τιμές της διατμητικής αντοχής που προκύπτουν από πρεσσιομετρικές δοκιμές, είναι σημαντικά υψηλότερες από εκείνες από τις δοκιμές πτερυγίου. Συγκεκριμένα, η μέγιστη και η τελική αντοχή είναι περίπου διπλάσια ή τριπλάσια αντίστοιχα. Ωστόσο, παρατηρήθηκε ότι “οι δοκιμές τριαξονικής συμπίεσης σε πολύ καλής ποιότητας δείγματα μαλακής αργίλου αποδίδουν τιμές αστράγγιστης αντοχής διπλάσιες από εκείνες τις vane strength , και που αντιστοιχούν στις τελικές αντοχές που υπολογίζονται από τις πρεσσιομετρικές δοκιμές”. Ακόμα, οι τιμές της c_u που βασίζονται στην οριακή πίεση είναι υψηλότερες από εκείνες που προκύπτουν από τις δοκιμές πτερυγίου, αλλά χαμηλότερες από την τελική αντοχή που προκύπτει από την διατμητική καμπύλη.



Σχήμα3. 4: Σύγκριση αστράγγιστης διατμητικής αντοχής (Roy et al. 1975)

3.2.2 Στραγγισμένη διατμητική αντοχή

Θεωρητικά, δεν υπάρχει τρόπος μετατροπής των αποτελεσμάτων της πρεσσιομετρικής δοκιμής σε ενεργές δυναμικές παραμέτρους c' και ϕ' για ελεύθερο στραγγισμένο έδαφος. Αυτό συμβαίνει κυρίως λόγω των επιπτώσεων από την εκφόρτιση της βολίδας, τη διατάραξη, την παραμόρφωση και τις μεταβολές του όγκου. Έτσι, για τον

συσχετισμό των p_1^* και ϕ' για τις άμμους υπάρχουν πολλές εμπειρικές σχέσεις, οι πιο διαδεδομένες από τις οποίες είναι οι εξής:

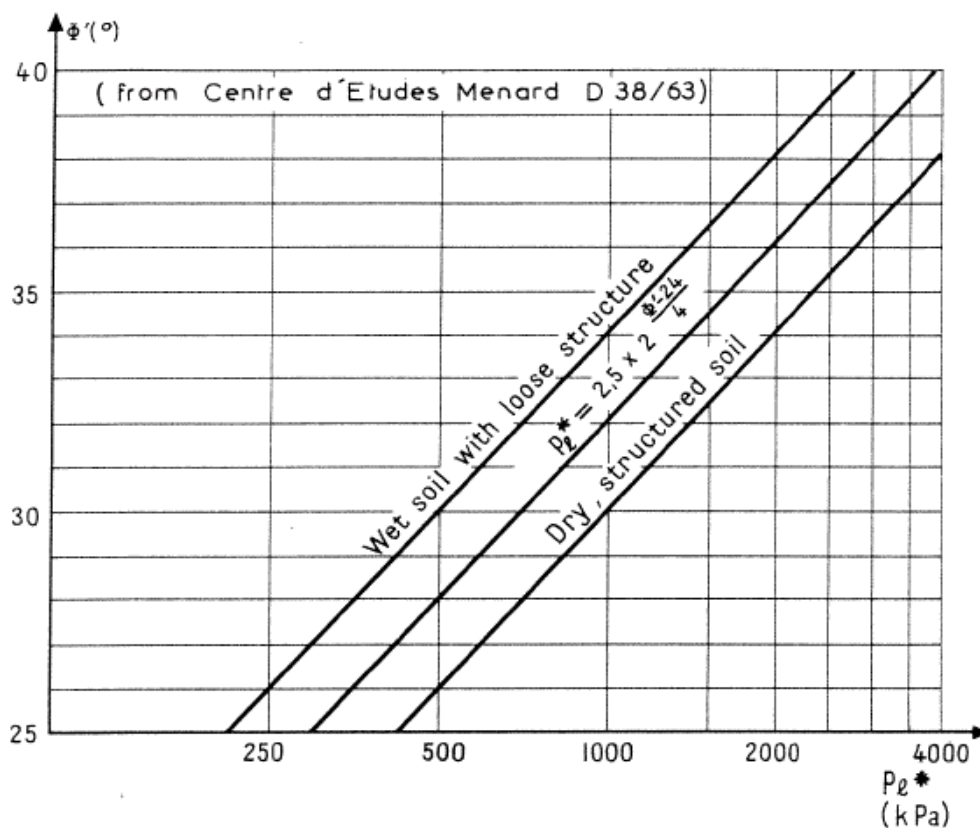
1. Το Centre d' Etudes Ménard πρότινε το 1970 τη σχέση:

$$p_1^* = 2.5 \times 2^{\frac{\phi' - 24}{4}} \quad (3.10),$$

και δημοσίευσε το σχήμα 3.5 , το οποίο βασίζεται σε αυτή. Η ίδια σχέση δίνεται την ίδια χρονιά και από τον Muller, λίγο παραποιημένη:

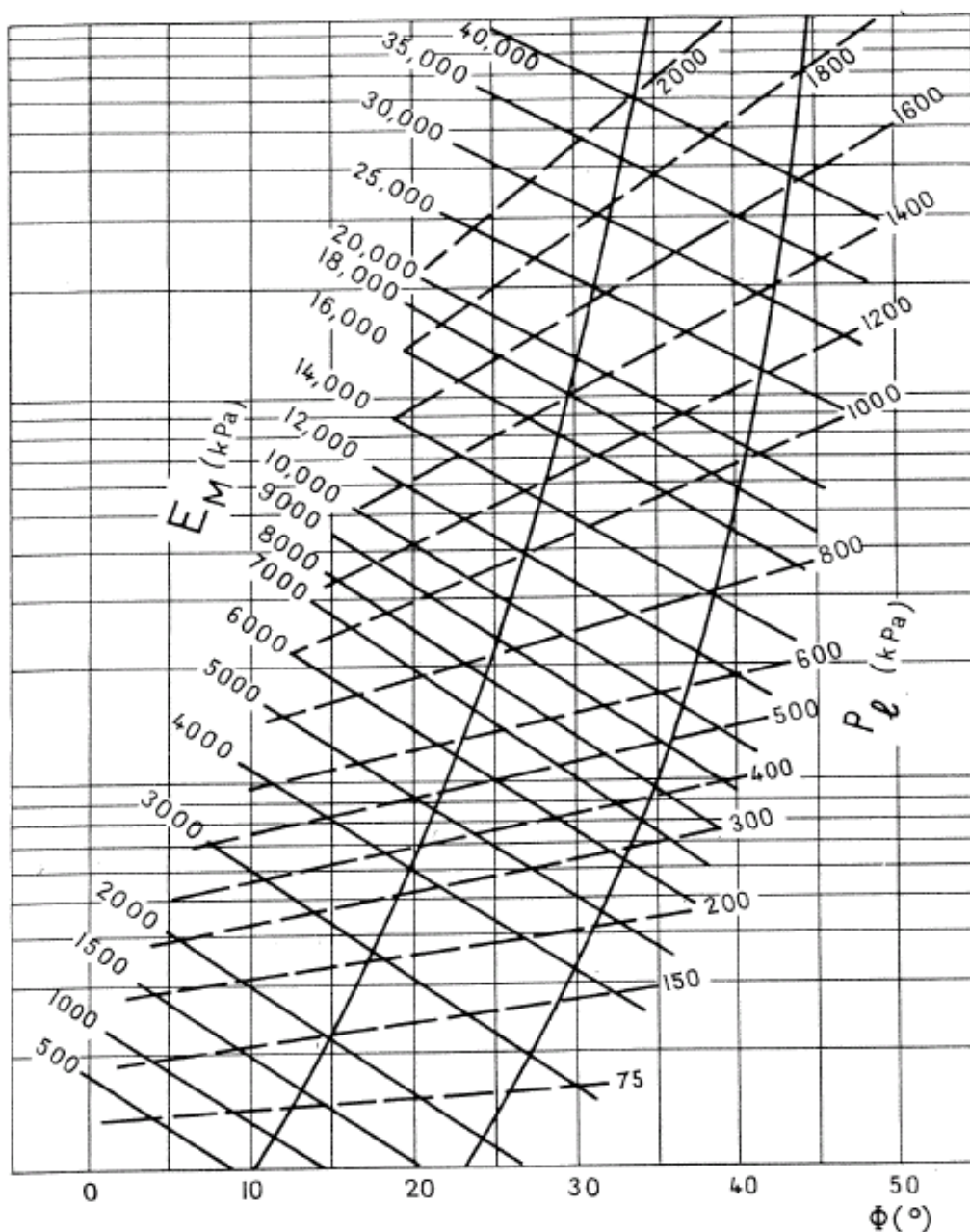
$$p_1^* = b \times 2^{\frac{\phi' - 24}{4}} \quad (3.11),$$

όπου $b = 1,8$ για ομοιογενές υγρό έδαφος, $3,5$ για ξηρό ετερογενές και $2,5$ κατά μέσο όρο. Η μέση τιμή $2,5$ για το b , χρησιμοποιήθηκε από το Centre d' Etudes Ménard, ενώ οι δύο άλλες τιμές εξηγούν τα όρια του εδάφους που δίνονται στο διάγραμμα του σχήματος 3.5.



Σχήμα3. 5: Διάγραμμα Ménard για τον καθορισμό του ϕ' από την οριακή πίεση

2. Ο Calhoon το 1970 πρότεινε μία εμπειρική μέθοδο για να προκύψει το ϕ' από την πρεσσιομετρική δοκιμή σε άμμο. Αρχικά, χρησιμοποιεί το διάγραμμα 3.6 των Rochette και Broise, χωρίς όμως να δίνει περαιτέρω πληροφορίες για το πώς σχεδιάστηκε.



Σχήμα 3. 6: Διάγραμμα Calhoon για τον καθορισμό της ϕ' από την οριακή πίεση και το μέτρο παραμόρφωσης

Στην συνέχεια, το 1973 συνέκρινε τα αποτελέσματα έξι πρεσσιομετρικών δοκιμών σε άμμο με τη γωνία ϕ' να μετράται σε ενοποιημένη τριαξονική δοκιμή για το ίδιο υλικό. Τα αποτελέσματά του φαίνονται στον παρακάτω πίνακα του Σχήματος 3.7.

Η διαφορά κατά μέσο όρο ανάμεσα στο Calhoon και τις τριαξονικές δοκιμές είναι 4° , σημαντικά βελτιωμένη από του Ménard που έφτανε τις 16° .

Test	MÉNARD*	Triaxial	CALHOON
1	46°	35°	30°
2	50	35	31.5
3	77	35	35
7	44	35	30
8	47	42	35
9	53	42	39

* actually MULLER's equation was used

Σχήμα3. 7: Σύγκριση γωνίας τριβής για άμμο (Laiet, 1973)

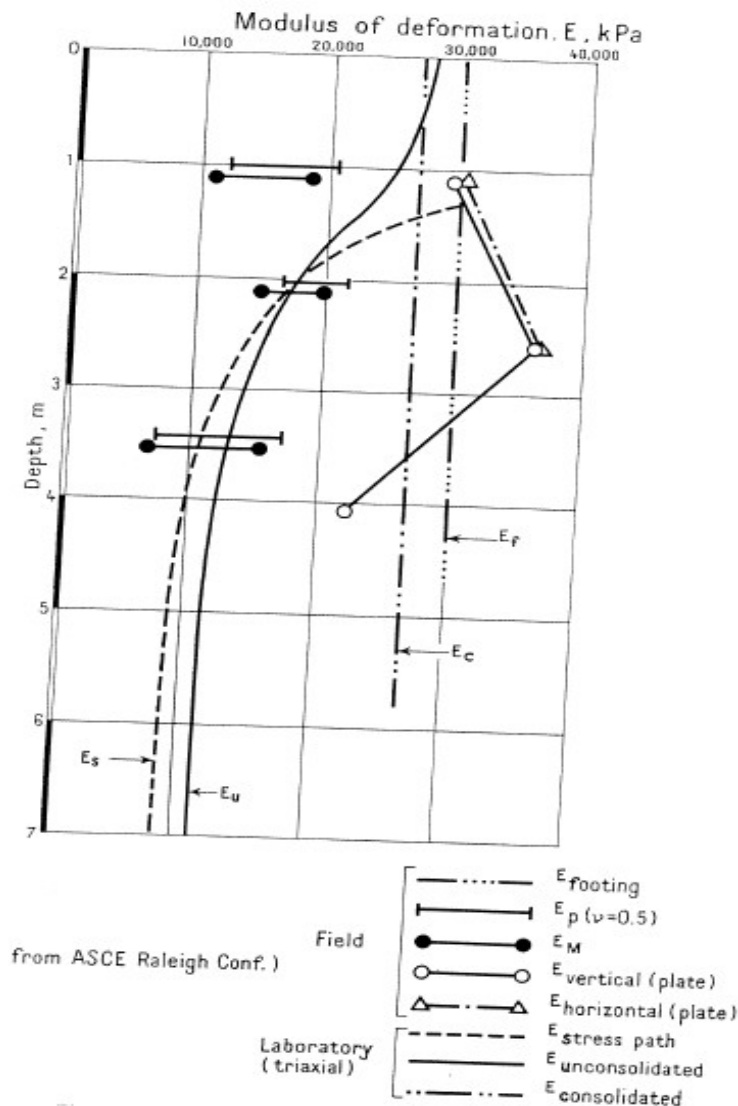
Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα 13 πρεσσιομετρικών δοκιμών σε ελεύθερης στράγγισης κοκκώδες έδαφος, από του Winter και Rodriguez (1975), οι οποίοι σύγκριναν το ϕ' υπολογισμένο σύμφωνα με τον Vesic (1972), με το ϕ' μετρημένο στο εργαστήριο ή από ανεξάρτητες εκτιμήσεις. Τα αποτελέσματα αυτά φαίνονται στον πίνακα 6.89, ενώ οι τα πρεσσιομετρικά αποτελέσματα έχουν μειώσει τις τιμές του ϕ' , με την χρήση των διαγραμμάτων του Calhoon και του Centre d' Etudes Ménard.

Κατά μέσο όρο ο Calhoon υπολόγισε τη ϕ' κατά 7° μεγαλύτερη από ότι μετρήθηκε στις ανεξάρτητες μετρήσεις που καταγράφηκαν. Ο Ménard ήταν αρκετά πιο κοντά στον μέσο όρο κατά την εκτίμηση της γωνίας τριβής, αλλά παρουσίασε ένα αποτέλεσμα με διαφορά 10° και άλλα τρία με $4-5^\circ$.

Αργότερα, η κατάσταση συνοψήθηκε, όσον αφορά στον καθορισμό της ϕ' , με τη χρήση εμπειρικών κανόνων στα αποτελέσματα των πρεσσιομετρικών δοκιμών: “Το πρόβλημα με τους περισσότερους μελετητές, αν όχι με όλους, από τις εμπειρικές μεθόδους, ήταν ότι ένας έμπειρος μηχανικός θα μπορούσε να προβλέψει την τιμή της ϕ' και πιθανότατα με μεγάλη ακρίβεια”.

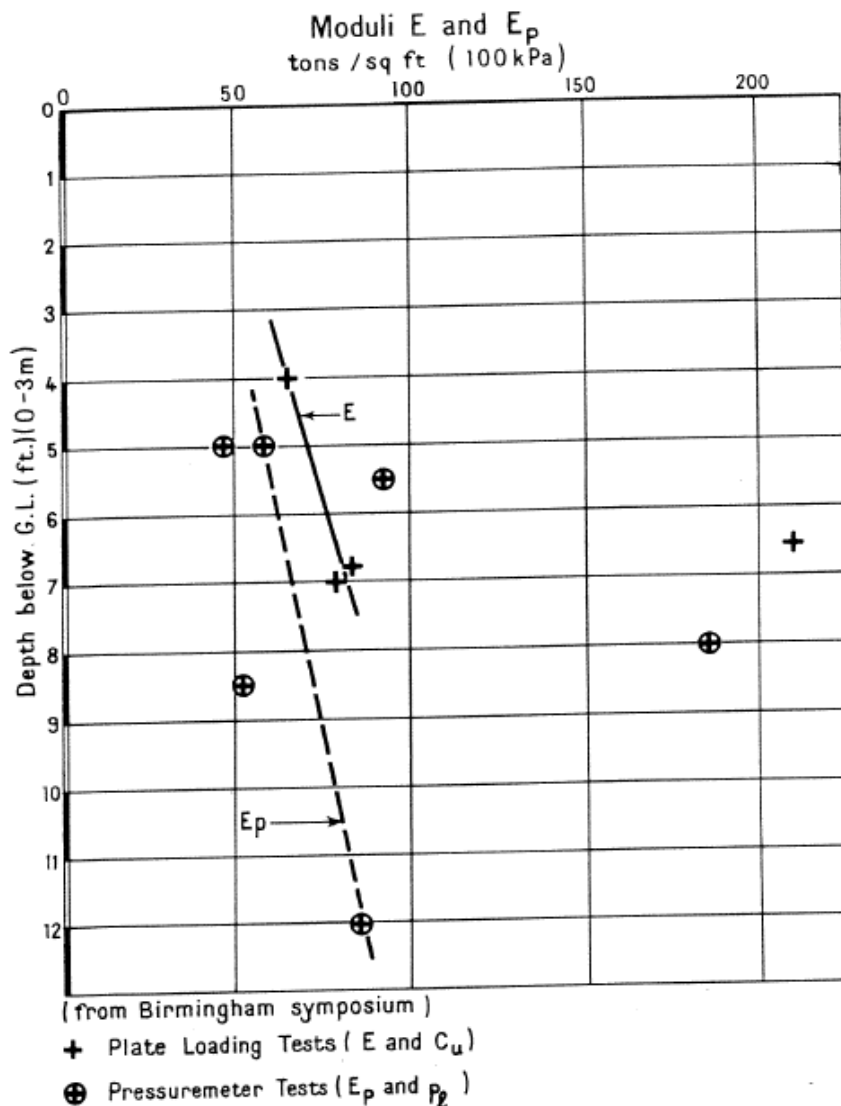
3.3 Μέτρο παραμόρφωσης, E

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το πώς το πρεσσιομετρικό μέτρο συγκρίνεται με το μέτρο που υπολογίζεται με άλλες πιο παραδοσιακές μεθόδους. Ο Shields και ο Bauer το 1975 σύγκριναν το πρεσσιομετρικό μέτρο παραμόρφωσης E_M με το μέτρο παραμόρφωσης που προέρχεται από εργαστηριακές δοκιμές και από τις δοκιμές φόρτισης πλάκας και πλήρους κλίμακας πεδίου. Τα αποτελέσματα αυτού φαίνονται στο Σχήμα 3.8 στο οποίο έχει προστεθεί το μέτρο E_p που βασίζεται στο λόγο Poisson $\nu=0,5$ για κορεσμένο έδαφος. Με την παραδοχή ότι οι δοκιμές φόρτισης πλάκας και πλήρους κλίμακας πεδίου δίνουν περίπου την πραγματική τιμή του μέτρου του εδάφους, ενώ οι τιμές των E_M και E_p είναι αρκετά χαμηλές.



Σχήμα3. 8: Σύγκριση μέτρου παραμόρφωσης για ευαίσθητη άργιλο (Shields, Bauer, 1975)

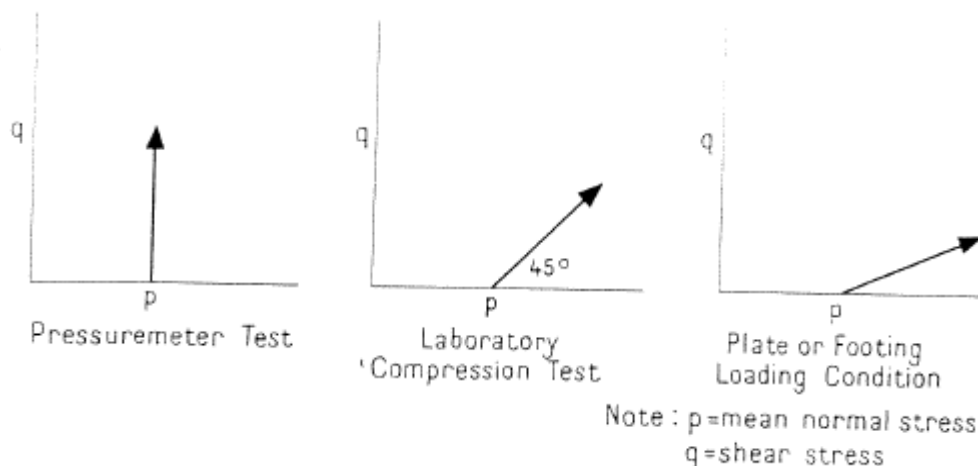
Οι Tavenas at al. το 1974 βρήκαν ακόμα πιο χαμηλές τιμές στα E_M και E_c που μετρήθηκαν σε επανανοποιημένα τριαξονικά δείγματα κοινής αργίλου. Για παράδειγμα, σε βάθος 2m το E_M ήταν 5.900KPa και το E_c 59.000KPa, ενώ στο βάθος των 8m οι τιμές ήταν 15.000KPa και 120.000KPa αντίστοιχα. Αυτοί οι συντελεστές ήταν της τάξης του 10 και του 8 αντίστοιχα για τα E_M και E_c , συγκριτικά με τον συντελεστή των Shield και Beuer που ήταν της τάξης του 2. Λόγω του ότι οι τιμές του E_c , σύμφωνα με τις δοκιμές των Shield και Beuer ήταν πολύ κοντά στις πραγματικές τιμές του E , από τις δοκιμές φόρτισης πλάκας και πλήρους κλίμακας πεδίου, είναι λογικό να υποθέσει κανείς ότι το E_c υπολογιζόμενο από τους Tavenas at al. ήταν σχεδόν σωστό.



Σχήμα3. 9: Σύγκριση plate bearing και πρεσσιομετρικού μέτρου παραμόρφωσης

Μία πιο κοντινή σχέση μεταξύ του πρεσσιομετρικού μέτρου E_M και του μέτρου που υπολογίστηκε από τις δοκιμές φόρτισης πλάκας, αναφέρεται από τον Greenland το 1964, για σκληρές στρωσιγενείς αργίλους και τα αποτελέσματά του απεικονίζονται στο σχήμα 3.9. Οι Burgess και Eisenstein, το 1975, από την άλλη μεριά, βρήκαν ότι το E_M ήταν περίπου διπλάσιο από το E_c των αστράγγιστων τριαξονικών δοκιμών για σκληρή ιλυώδη άργιλο.

Ο Ménard το 1961 υποστήριξε ότι το πρεσσιομετρικό μέτρο δεν μπορεί να συγκριθεί ακριβώς με ένα μέτρο συμπίεσης, όπως είναι το μέτρο Young. Αρχικά, η διαδρομή τάσεων που ακολουθείται στο έδαφος γύρω από την πρεσσιομετρική βολίδα είναι διαφορετική από αυτή που ακολουθείται στις δοκιμές συμπίεσης ή τις δοκιμές κάτω από την πλάκα θεμελίωσης (Σχήμα 3.10), και είναι γνωστό ότι η διαδρομή τάσεων παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στη συμπεριφορά του εδάφους. Ακόμα, η απλή ελαστική θεωρία υποδεικνύει ότι η αύξηση της θλιπτικής τάσης σε μία ακτινική κατεύθυνση ισούται με την αύξηση της εφελκυστικής τάσης σε μία εφαπτομενική κατεύθυνση, κατά τη διάρκεια της ελαστικής φάσης της πρεσσιομετρικής δοκιμής. Ο Ménard υποστηρίζει, ακόμα, ότι εφόσον το μέτρο συμπίεσης E^+ είναι διαφορετικό από το εφελκυστικό μέτρο E^- τότε το πρεσσιομετρικό μέτρο κυμαίνεται κάπου μεταξύ των δύο. Έλεγε, επίσης, ότι το E^- είναι μικρότερο από το E^+ το οποίο εξηγεί, εν μέρει τουλάχιστον, γιατί το E_M έπρεπε να είναι μικρότερο του E^+ . Ακόμα, ο Ménard δηλώνει ότι η διαφορά για τις αργίλους θα είναι μικρή, αλλά το E^- θα είναι μικρότερο από το $E^+/3$, σε έδαφος με ασθενή δομή.



Σχήμα3. 10: Σύγκριση διαδρομών τάσεων

Ο Ménard, επίσης, διατύπωσε την άποψη ότι το πρεσσιομετρικό μέτρο παραμόρφωσης δεν είναι ένα μέγεθος όπως αυτό που ο ίδιος αποκαλεί μέτρο “μικρο-

παραμορφώσεων”, E_m , το οποίο ορίζεται ως το μέτρο παραμόρφωσης του εδάφους όταν αυτό υποβάλλεται σε πολύ μικρές τροπές. Ακόμα, το E_m είναι συνήθως της τάξεως του $3E_m$, αλλά μπορεί να φτάσει και τα $20E_m$ για κορεσμένη ιλύ με εύθραυστη δομή. Εύλογα, λοιπόν, το E που μετράται στις εργαστηριακές δοκιμές συμπίεσης ή στις δοκιμές φόρτισης πλάκας και πλήρους κλίμακας πεδίου, είναι ένα ακόμα μέτρο “μικρο-παραμορφώσεων”, κατά τον Ménard.

Στη συνέχεια, συνδυάζοντας τις επιπτώσεις του ότι το E^+ δεν είναι ίσο με το E^- , την επιρροή της διαδρομής τάσεων και το πρόβλημα των μικρο-παραμορφώσεων, το Centre d' Etudes Ménard, το 1975, πρότεινε τον ακόλουθο Πίνακα του σχήματος 3.11 για τις τιμές του α , από τις οποίες μπορεί να υπολογιστεί η τιμή του μέτρου Young του εδάφους.

Για τις αργίλους το α μπορεί να κυμανθεί από το 1/2 μέχρι το 1, και εξαρτάται από το βαθμό υπερστερεοποίησης και διατάραξης του εδάφους, αλλά και από τις καιρικές συνθήκες.

Type of Soil	Peat		Clay		Silt		Sand		Sand and Gravel	
	E_M/p_1	α	E_M/p_1	α	E_M/p_1	α	E_M/p_1	α	E_M/p_1	α
Over-consolidated			> 16	1	> 14	$2/3$	> 12	$1/2$	> 10	$1/3$
Normally consolidated		1	9-16	$2/3$	8-14	$1/2$	7-12	$1/3$	6-10	$1/4$
Weathered and remoulded			7-9	$1/2$		$1/2$		$1/3$		$1/4$

Σχήμα3. 11: Πίνακας τιμών του α

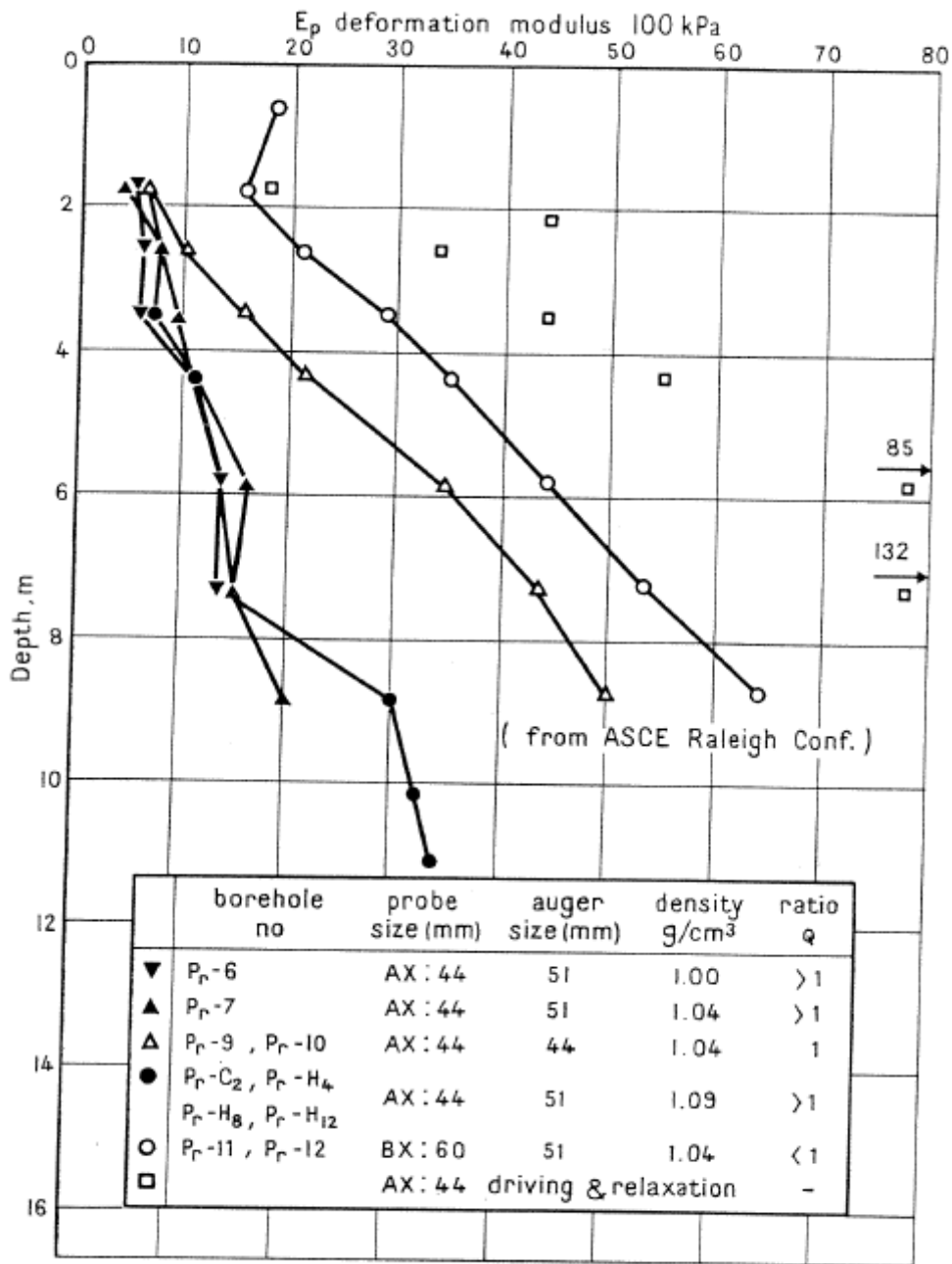
Δοκιμές που αναφέρονται από τους Baguelin, Jézéquel και Le Méhauté (1973), αφήνουν να εννοηθεί ότι τα E^+ και E^- δεν είναι πολύ διαφορετικά, τουλάχιστον για τις μαλακές αργίλους. Οι δοκιμές αυτές έγιναν με τη χρήση self-boring πρεσσιομέτρων εξοπλισμένων με συσκευή μέτρησης υδροστατικής πίεσης. Οι Baguelin et al. βρήκαν ότι δεν υπάρχει αύξηση της υδροστατικής πίεσης κατά τη διάρκεια της αρχικής, προφανώς ελαστικής, φάσης των δοκιμών τους, επομένως επαληθεύεται το γεγονός ότι ακολουθείται η κατακόρυφη διαδρομή τάσεων που φαίνεται στο σχήμα 3.10, η οποία μπορεί να είναι

κατακόρυφη μόνο για $E^+ = E^-$. Αυτές, και άλλες δοκιμές που έγιναν από την ίδια ομάδα έδειξαν ότι κάτι υπάρχει στην ιδέα του Ménard για τις μικρο-παραμορφώσεις. Το αρχικό εφαπτομενικό μέτρο για τις μαλακές αργίλους βρέθηκε περίπου 9.200KPa, με τη χρήση self-boring βολίδας, ενώ το E_M ήταν μόνο 1.200KPa, με τη χρήση κλασσικής βολίδας. Ομολογουμένως, το E_M είναι ένα τέμνον μέτρο το οποίο θα μπορούσε να εξηγήσει ένα μέρος της διαφοράς, αλλά η αποφόρτωση της γεώτρησης και η διατάραξη του εδάφους ασκούν συγκρίσιμη επιρροή. Η επιρροή που έχει η γεώτρηση στο μέτρο παραμόρφωσης επαληθεύεται και από άλλες έρευνες, ενώ φαίνεται ξεκάθαρα στα σχήματα 3.12 και 3.13.

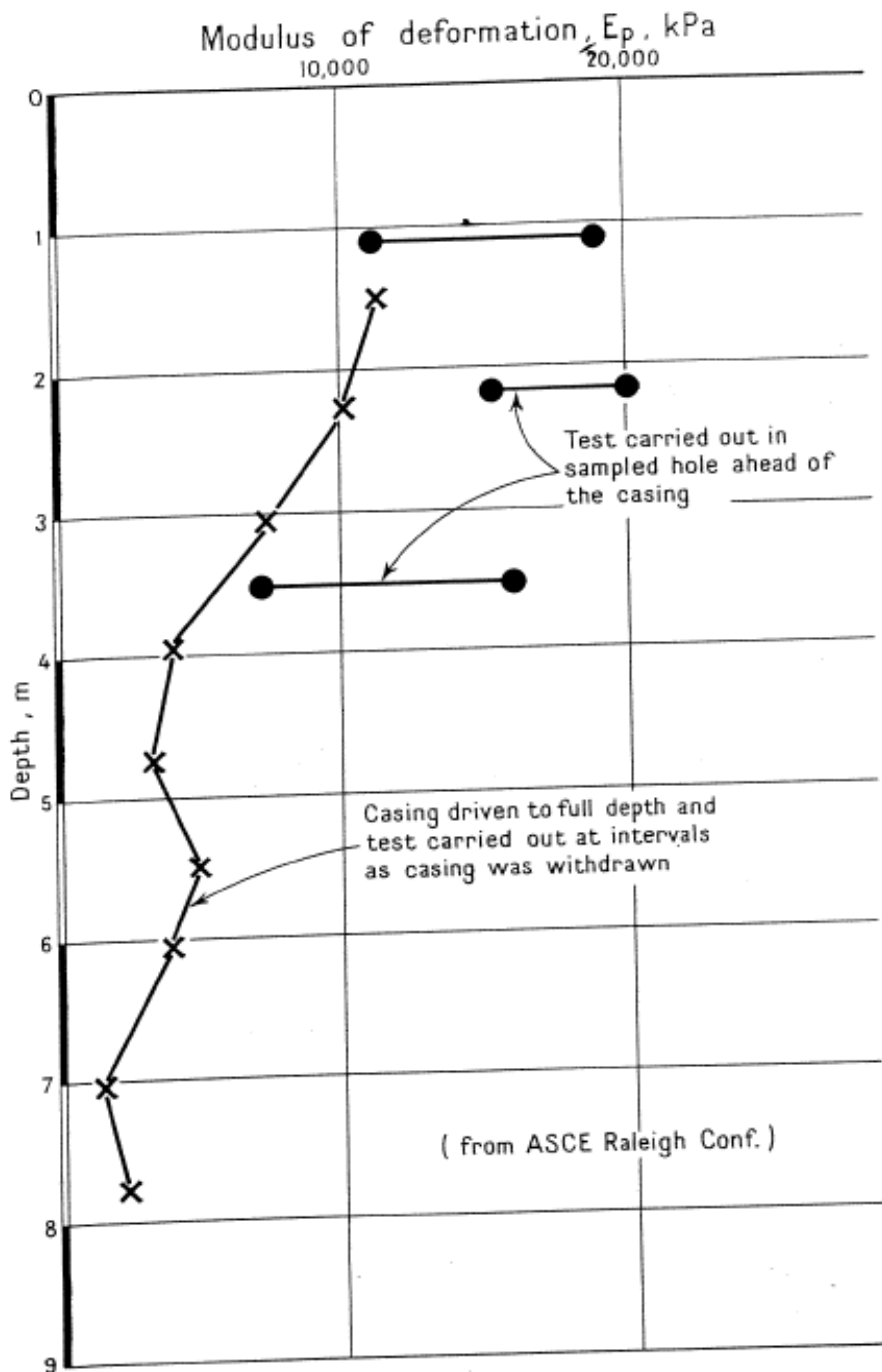
Προκειμένου να εξηγηθούν τα αποτελέσματα των Tavenas et al. που αναφέρονται προηγουμένως, το α θα πρέπει να κυμαίνεται από 1/8 ως 1/10 για φυσιολογικές ευαίσθητες αργίλους. Από την άλλη μεριά, οι Amar, Baguelin, Jézéquel και Le Méhauté το 1975 αναφέρουν δοκιμές σε πυκνή άμμο όπου το τέμνον μέτρο ήταν 28.000KPa και το E_M 22.000KPa, κάτι που υποδηλώνει ότι το α ίσως τείνει περισσότερο στο 1 για υπεσυμπυκνωμένη άμμο.

Ακόμα, αν γίνει μία σύγκριση μεταξύ του μέτρου επαναφόρτισης από τις κυκλικές πρεσσιομετρικές δοκιμές Ménard, E_M^+ και E_M , θα προκύψει η ίδια τάξη μεγέθους των τιμών του α . Σύμφωνα με το Centre d' Etudes Ménard, ο λόγος E_M^+/E_M , είναι κατά μέσο όρο 1/3. Σε τσιμεντωμένη άμμο οι Ménard και Lambert (1966) αναφέρουν ότι ο λόγος αυτός κυμαίνεται μεταξύ 1/2 και 1.4. Ο Calhoon (1970) θεωρεί ότι το α βρίσκεται με αυτόν τον τρόπο, αλλά χρησιμοποιεί ένα μέτρο αποφόρτισης E_M^- αντί για E_M^+ , και προτείνει ότι $\alpha = \sqrt{(E_M^+/E_M)}$.

Αξίζει, ακόμα, να αναφερθεί ότι απλά υπολογίζοντας το E_p με τη χρήση του λόγου Poisson $\nu=0,5$ για κορεσμένο έδαφος, αντί για 0,33 όπως γίνεται για το E_M , καταλήγει κανείς στην τιμή $\alpha=0,9$.



Σχήμα3. 12: Επιρροή μεθόδου διάτρησης στο μέτρο παραμόρφωσης (Roy et al. 1975)



Σχήμα3. 13: Επιρροή μεθόδου διάτρησης στο μέτρο παραμόρφωσης (Shields and Bauer, 1975).

Συνεχίζοντας, άλλη μία σαφής επιρροή που έχει μελετηθεί είναι η ανισοτροπία της τιμής του μέτρου παραμόρφωσης. Οι Hartman και Schmertmann, το 1975, χρησιμοποιώντας τελικά στοιχεία, κατέληξαν στο ότι η πρεσσιομετρική δοκιμή υπολογίζει το οριζόντιο μέτρο E_H σε ανισότροπο έδαφος και όχι το κατακόρυφο μέτρο E_V ή κάποιο

συνδυασμό αυτών. Αυτό, είχε χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν για να υποστηρίξει ότι το μέτρο E_M πρέπει να διαιρεθεί με έναν διορθωτικό συντελεστή α για να δώσει τιμές του E που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό των καθιζήσεων θεμελίωσης. Σε αυτό το επιχείρημα είναι πολύ βασική η παραδοχή ότι το E_V είναι η πιο σχετική παράμετρος στους υπολογισμούς καθιζήσεων, παρόλο που αυτό είναι κάτι που δεν είναι βέβαιο. Ακόμα, θεωρείται ότι το E_V έχει αισθητά διαφορετική τιμή από το E_H για πολλά εδάφη.

Από όσα έχουν αποδειχθεί μέχρι σήμερα, το E_V είναι περίπου ίσο με το E_H για ένα πολύ μεγάλο αριθμό εδαφών.

Κλείνοντας, το E_M θα πρέπει να πολλαπλασιαστεί με κάποιον συντελεστή προκειμένου να βρεθούν λογικές τιμές για το μέτρο Young του εδάφους. Η μέθοδος που προτείνει το Centre d' Etudes Ménard, είναι πιθανότατα η καταλληλότερη μέχρι σήμερα.

3.4 Φέρουσα Ικανότητα

Η χρήση των κλασσικών εξισώσεων της φέρουσας ικανότητας, όπως αυτές του Terzaghi ή του Meyerhof, προϋποθέτει ότι οι δυναμικές παράμετροι Mohr-Coulomb, c και ϕ είναι γνωστές για το έδαφος και μπορούν να εκτιμηθούν με ικανοποιητική ακρίβεια. Η πρεσσιομετρική δοκιμή δεν προσφέρει από μόνη της μία τέτοια αξιολόγηση των c και ϕ , εκτός, ίσως, από έναν ευρή εμπειρικό τρόπο.

Η ερώτηση που προκύπτει, λοιπόν, είναι γιατί οι μηχανικοί να θέλουν να χρησιμοποιούν τις κλασσικές εξισώσεις της φέρουσας ικανότητας, οι οποίες απαιτούν τον μετασχηματισμό των πρεσσιομετρικών αποτελεσμάτων σε c και ϕ , όταν μπορεί να αποδειχθεί ότι οι πρεσσιομετρικές εξισώσεις για τη φέρουσα ικανότητα είναι όμοιες με τις κλασσικές.

Για παράδειγμα, για άργιλο με $\phi=0$, η πρεσσιομετρική εξίσωση είναι:

$$q = q_0 + k(p_1^*) \quad (3.12),$$

όπου $p_1^* = \beta c_u$, και

$$\begin{aligned} q_0 &= \gamma D \\ q &= \gamma D + \beta \cdot k \cdot c_u \end{aligned} \quad (3.13).$$

Έστω $\beta k = N$, συντελεστής φέρουσας ικανότητας. Τότε:

$$q = \gamma D + c_u \cdot N \quad (3.14).$$

Η κλασσική σχέση για τη φέρουσα ικανότητα είναι της μορφής:

$$q = \gamma D + c_u \cdot N_c \quad (3.15)$$

όπου N_c είναι ο συντελεστής της φέρουσας ικανότητας για αργίλους (Skempton, 1951). Αν συγκριθεί η περίπτωση του τετράγωνου πεδίου σε βάθος $3/4B$, συγκεκριμένα σε μαλακές αργίλους, τότε για $\beta=5,5$, $k=1,5$ και $N=8,2$. Για τις ίδιες συνθήκες, $N_c=7$, δηλαδή δεν υπάρχει μεγάλη διαφορά μεταξύ των δύο μεθόδων.

Στην άμμο, μία τέτοια σύγκριση είναι δύσκολο να γίνει. Αναφορικά με τη σχετική φέρουσα ικανότητα, η εξίσωση είναι:

$$q = q_0 + k \cdot p_1^* \quad (3.16)$$

για το πρεσσιόμετρο και συγκρίνεται με την:

$$\begin{aligned} q &= \gamma D N_q + \frac{\gamma B N \gamma}{2} \\ &= \gamma D + \gamma D (N_q - 1) + \gamma B \left(\frac{N \gamma}{2} \right) \end{aligned} \quad (3.17)$$

από τον Terzaghi, το οποίο οδηγεί στο ότι:

$$k \cdot p_1^* \approx \gamma \left[D (N_q - 1) + B \frac{N \gamma}{2} \right] \quad (3.18).$$

Είναι γνωστό ότι η μορφή της εξίσωσης Terzaghi δεν ισχύει κάτω από ένα ορισμένο βάθος, το οποίο αναφέρεται ως κρίσιμο βάθος. Η εξίσωση του Ménard, από την άλλη, μπορεί να εφαρμοστεί σε κάθε βάθος. Επιπλέον, είναι ολοφάνερο πια ότι τόσο η p_1 , όσο και η φέρουσα ικανότητα εξαρτώνται από τις ιδιότητες της παραμόρφωσης της άμμου, κάτι το οποίο ο Terzaghi δεν συγκρίνει στη θεωρία του.

4 ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΠΡΕΣΣΙΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ

4.1 ΕΥΡΩΠΑΙΚΕΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ

(Πηγή: Ευρωπαϊκές προδιαγραφές, prEN ISO 22476, Part 4)

4.1.1 Γενικά

Σύμφωνα με τις Ευρωπαϊκές προδιαγραφές ISO 22476, και την παράγραφο 4, η οποία αφορά στις Πρεσσιομετρικές δοκιμές με πρεσσιόμετρα Ménard, ακολουθούν πληροφορίες για τον εξοπλισμό, τη διαδικασία της πρεσσιομετρικής δοκιμής σε φυσικά εδάφη και βράχους και για την έκθεση των αποτελεσμάτων, βάση των EN 1997-1 και EN 1997-2.

Η πρεσσιομετρική δοκιμή Ménard εκτελείται με τη βοήθεια μιας κυλινδρικής βολίδας με δυνατότητα ακτινικής διόγκωσης, η οποία αποτελείται από τρεις θαλάμους και εισάγεται στο έδαφος. Κατά τη διάρκεια της έγχυσης υγρού όγκου στη βολίδα, το εξωτερικό μέρος αυτής έρχεται, αρχικά, σε επαφή με τα τοιχώματα της γεώτρησης, στην οποία πραγματοποιείται η δοκιμή και ασκεί πίεση με αποτέλεσμα τη μετατόπιση του εδάφους. Η πίεση η οποία ασκείται, καθώς και η σχετική αύξηση του όγκου της βολίδας καταγράφονται, με σκοπό τις σχέσεις τάσης – παραμόρφωσης του εδάφους.

Η πρεσσιομετρική βολίδα ιστορικά αναφέρεται ως η βολίδα 60mm τύπος G. Βάσει των Ευρωπαϊκών προδιαγραφών, αυτή περιορίζεται σε διάμετρο 50mm και μέγιστη επιβαλλόμενη πίεση στα 5MPa. Οι κατάλληλες διαμέτροι της βολίδας σχετικά με τη διάμετρο της γεώτρησης φαίνονται στον παρακάτω πίνακα του σχήματος 4.1 και ισχύουν για συνήθεις πρεσσιομετρικές βολίδες.

Κώδικας DCDMA	Διάμετρος βολίδας	Διάμετρος της γεώτρησης (mm)	
		Ελάχιστη	Μέγιστη
AX	44	46	52
BX	58	60	66
NX	70/74	74	80

Σχήμα4. 1: Κατάλληλες διαμέτροι βολίδας σε σχέση με τη διάμετρο της γεώτρησης

Υπάρχουν δύο εναλλακτικοί τρόποι μέτρησης. Με τον πρώτο (Διαδικασία Α) τα δεδομένα καταγράφονται χειροκίνητα, ενώ με τον δεύτερο (Διαδικασία Β) αυτόματα.

4.1.2 Ορισμοί

Πρεσσιόμετρο (Pressuremeter): Το σύνολο του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται για να πραγματοποιήσει την πρεσσιομετρική δοκιμή Ménard, εκτός από τα μέσα που απαιτούνται για τη θέση της πρεσσιομετρικής βολίδας στο έδαφος. Αποτελείται από την πρεσσιομετρική βολίδα, τη μονάδα ελέγχου που μετράει την πίεση και τον όγκο (control unit, CU), ένα σύστημα σωλήνων που ενώνει τη βολίδα με τη μονάδα ελέγχου, και έναν καταγραφέα των δεδομένων που είτε είναι ενσωματωμένος στη μονάδα ελέγχου, είτε συνδέεται με αυτή.

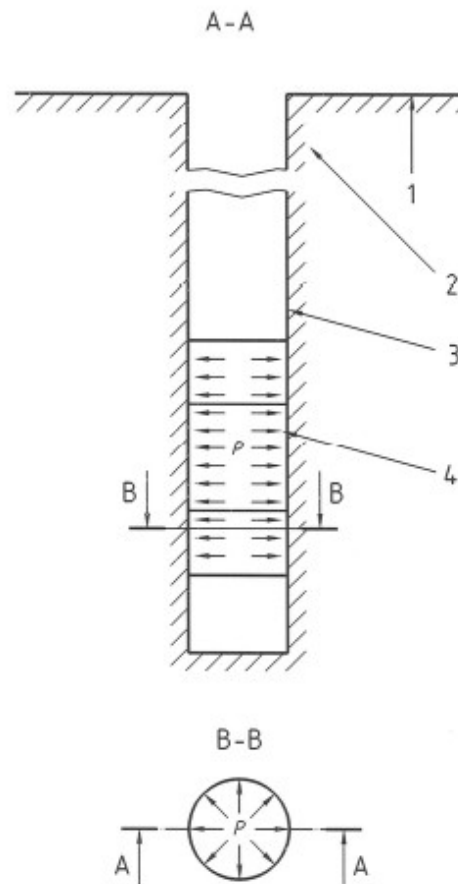
Πρεσσιομετρική γεώτρηση (Pressuremeter borehole): η γεώτρηση στη οποία δημιουργούνται οι οπές (rockets) με κυκλική διατομή στο έδαφος και όπου πρόκειται να τοποθετηθεί η πρεσσιομετρική βολίδα.

Πρεσσιομετρική δοκιμή (Pressuremeter test): η διαδικασία κατά την οποία η πρεσσιομετρική βολίδα διογκώνεται και αποκαθίσταται η πλήρης επαφή με τα τοιχώματα της οπής. Οι μεταβολές του όγκου συναρτήσει του χρόνου και της μεταβολής της πίεσης μετρούνται και σημειώνονται.

Πρεσσιομετρική πίεση ανάγνωσης p_r (Pressuremeter pressure reading): η πίεση, όπως διαβάζεται στη μονάδα ελέγχου, στο θαλάμου μετρήσεως της βολίδας (τον μεσαίο).

Απώλεια πίεσης (pressure loss): η διαφορά της πίεσης μέσα στην πρεσσιομετρική βολίδα και της πίεσης που ασκείται στα τοιχώματα της οπής της γεώτρησης.

Απώλεια όγκου (volume loss): η διαφορά του όγκου που πραγματικά υπάρχει στη βολίδα και αυτού που διαβάζεται στη μονάδα ελέγχου.



Key

1 Ground surface

2 Ground

3 Pocket

4 Expanding pressuremeter probe

p applied pressure

A - A axial section

B - B cross section

Σχήμα4. 2: Αρχή πρεσσιομετρικής δοκιμής Ménard

Πρώτη πρεσσιομετρική καμπύλη (raw pressuremeter curve): είναι η γραφική παράσταση του όγκου που καταγράφεται κατά τη χρονική στιγμή 60sec, V_{60} , και της αντίστοιχης πίεσης p .

Διορθωμένη πρεσσιομετρική καμπύλη (corrected pressuremeter curve): η γραφική παράσταση του διορθωμένου όγκου V και της διορθωμένης πίεσης p .

Ερπυσμός Ménard (Ménard creep): η διαφορά σε όγκο που καταγράφεται σε κάθε φόρτιση που επιβάλλεται στα 60sec και στα 30sec: $V_{60} - V_{30} = V_{60/30}$.

Διορθωμένη καμπύλη ερπυσμού Ménard (corrected Ménard creep curve): η γραφική παράσταση του διορθωμένου ερπυσμού Ménard και της διορθωμένης πίεσης σε κάθε επιβαλλόμενη φόρτιση.

Πρεσσιομετρική καταγραφή (pressuremeter log): μια γραφική έκθεση των αποτελεσμάτων της πρεσσιομετρικής δοκιμής που εκτελέστηκε σε διαδοχικά βάθη της ίδιας πρεσσιομετρικής γεώτρησης, μαζί με όλες τις πληροφορίες που συγκεντρώθηκαν κατά τη διάρκεια της δοκιμής.

Πρεσσιομετρικό μέτρο παραμόρφωσης (E_M) (Ménard pressuremeter modulus): λαμβάνεται στο διάστημα ανάμεσα στα ζεύγη τιμών (p_1, V_1) και (p_2, V_2) από την πρεσσιομετρική καμπύλη.

Πρεσσιομετρική οριακή πίεση (p_{LM}) (Pressuremeter limit pressure): η πίεση στη οποία ο όγκος της δοκιμαστικής σπής του κεντρικού θαλάμου μέτρησης της βολίδας στο βάθος της μέτρησης της δοκιμής έχει διπλασιαστεί από τον αρχικό.

Πρεσσιομετρική πίεση ερπυσμού (p_f) (Pressuremeter creep pressure): λαμβάνεται από την καμπύλη ερπυσμού.

4.1.3 Εξοπλισμός

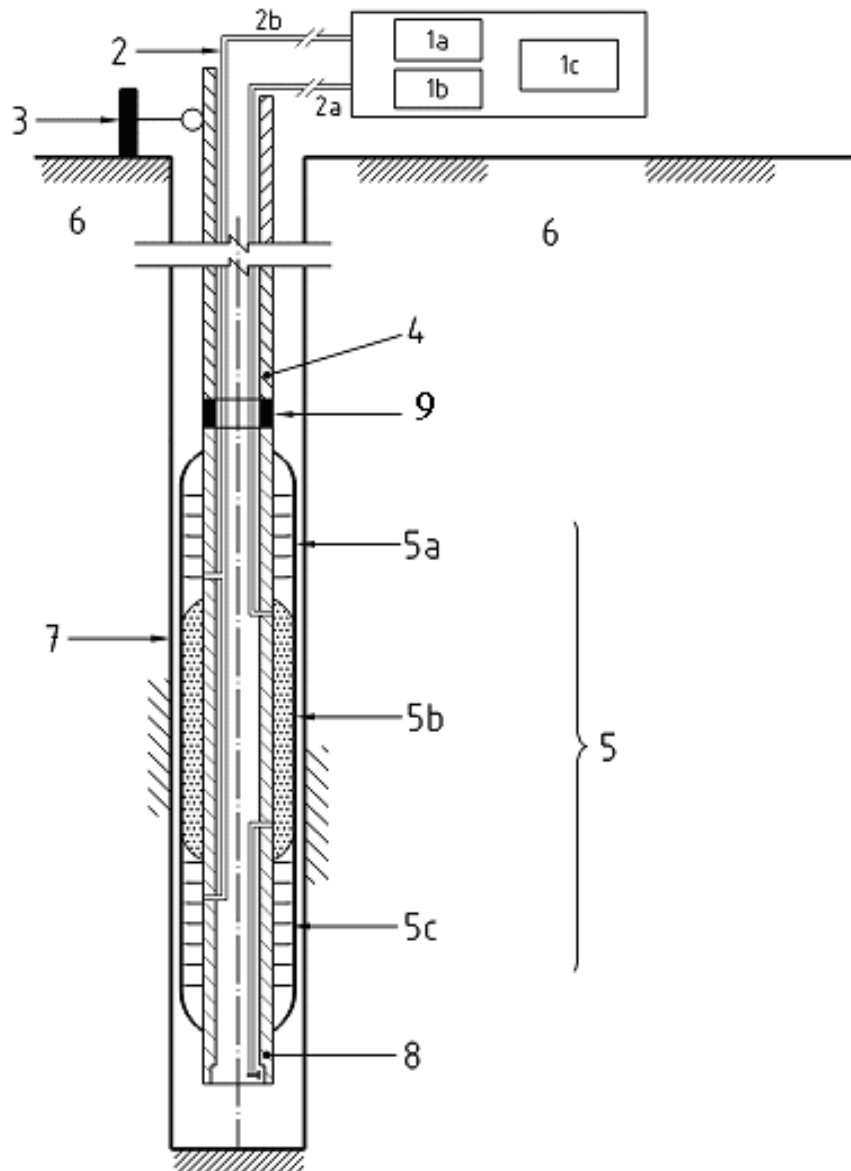
4.1.3.1 Γενικά

Το πρεσσιόμετρο που απεικονίζεται σχηματικά στην παρακάτω Σχήμα 4.3 περιλαμβάνει:

- βολίδα αποτελούμενη από τρεις θαλάμους,
- σειρά από ράβδους για τον χειρισμό της βολίδας,
- μονάδα ελέγχου και
- σύστημα σωλήνων που ενώνουν τη βολίδα με τη μονάδα ελέγχου.

Πιο συγκεκριμένα, η μονάδα ελέγχου περιλαμβάνει:

- εξοπλισμό για να ασκείται η πίεση, με αποτέλεσμα την διόγκωση της βολίδας κρατώντας την πίεση σταθερή, όπως απαιτείται για την πρεσσιομετρική δοκιμή,



Σχήμα4. 3: Διάγραμμα Πρεσσιόμετρου Ménard

Key

- 1 Control unit (CU) : 1a Pressurization, differential pressurization and injection devices
- 1b Pressure and volume measuring devices
- 1c Acquisition, storage and printing out of the data (required for procedure B)
- 2 Connecting lines :
 - 2a Line for liquid injection
 - 2b Line for gas injection
- 3 Depth measurement system
- 4 Rods
- 5 Pressuremeter probe
 - 5a Upper guard cell
 - 5b Central measuring cell
 - 5c Lower guard cell
- 9 Probe rod coupling
- 6 Ground
- 7 Pressuremeter test pocket
- 8 Probe body, hollow

- εξοπλισμό για να διατηρείται η κατάλληλη διαφορά πίεσης ανάμεσα στον κεντρικό (μεσαίο) θάλαμο και τους δύο ακριανούς και
- συσκευή που επιτρέπει την άμεση ανάγνωση και την αυτόματη καταγραφή των παραμέτρων που πρέπει να μετρηθούν (δηλαδή ο χρόνος, η πίεση και ο όγκος).

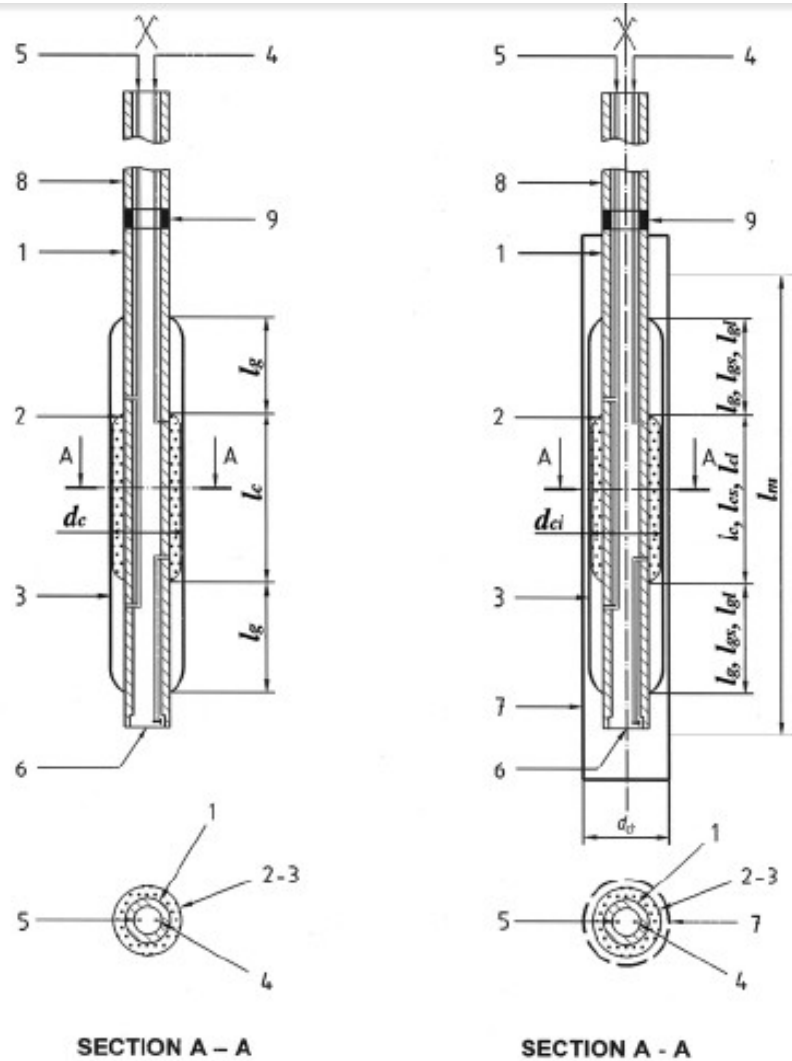
Τα όργανα μέτρησης της πίεσης για το υγρό στον μεσαίο θάλαμο και για το αέριο στους ακριανούς, είναι τοποθετημένα είτε στην επιφάνεια του εδάφους, είτε σε απόσταση μικρότερη από 1m πάνω από το κέντρο του μεσαίου θαλάμου, μέσα στη βολίδα. Στην πρώτη περίπτωση, η μονάδα ελέγχου είναι εφοδιασμένη με κατάλληλα μέσα, ώστε να ελέγχεται η σταθεροποιημένη τιμή της πίεσης. Τέλος, για κάθε πρεσσιομετρική δοκιμή, παρέχονται και τα κατάλληλα μέσα για την ακριβή μέτρηση του βάθους της δοκιμής. (Σχήμα 4.3)

4.1.3.2 Πρεσσιομετρική βολίδα (Pressuremeter probe)

Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της βραχομάζας και τις επικρατούσες συνθήκες, υπάρχουν δύο είδη πρεσσιομετρικής βολίδας. Αυτή με εύκαμπτο κάλυμα (flexible cover) και αυτή με επιπλέον ένα πιο άκαμπτο προστατευτικό κάλυμα ή με χαλύβδινο σωλήνα με σχισμές παράλληλες προς τον άξονά του (slotted tube).

Παρακάτω δίνονται σχηματικά οι δύο προαναφερθέντες τύποι πρεσσιομετρικής βολίδας (Σχήμα 4.4) και στον πίνακα του Σχήματος 4.5 τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά αυτών, ενώ ακολουθεί περιγραφή του κάθε τύπου πρεσσιομετρικής βολίδας.

Σημειώνεται, ακόμα, ότι η βολίδα έχει τη δυνατότητα αύξησης του όγκου της, τουλάχιστον 700cm³ (550 cm³ για τη βολίδα με μικρό κεντρικό θάλαμο μέτρησης και χαλύβδινο σωλήνα με σχισμές).



"dimensions given in Annex A"

Key

- | | | | |
|---|------------------------------------|---|-----------------------------|
| 1 | Hollow probe body | 5 | Gas inlet to the guard |
| 2 | Measuring cell membrane | 6 | Measuring cell drain outlet |
| 3 | External sleeve or flexible cover | 7 | Slotted tube |
| 4 | Liquid inlet to the measuring cell | 8 | Rods |
| | | 9 | Probe-rod coupling |
- 3a) pressuremeter probe with flexible cover 3b) pressuremeter probe with slotted tube

Σχήμα 4. 4: Πρεσσιομετρική βολίδα

		Symbols	Unit	Value	Tolerance	
Probe with flexible cover	Central measuring Cell Length	l_c	mm	210	+ 5 0	
	Guard cell Length	l_g	mm	120	± 15	
	Outside diameter	d_c	mm	58	± 2	
Probe with slotted tube (see Figures 3b and A.1)	Inner part: short central measuring cell	Central measuring cell Length	l_{sc}	mm	210	+ 2 0
		Guard cell Length	l_{gs}	mm	200	± 5
		Central measuring cell outside diameter	d_{cl}	mm	44	± 2
	Inner part: long central measuring cell	Central measuring cell Length	l_{cl}	mm	370	± 5
		Guard cell Length	l_{gl}	mm	110	± 5
		Central measuring cell outside diameter	d_{cl}	mm	44	± 2
	Slotted tube	Outside diameter	d_c	mm	58	± 5
		Slot length (along tube axis)	l_w	mm	≥ 800	-

NOTE It may occur that the inner part of the slotted tube described above is used as a 44 mm outside diameter probe with flexible cover in smaller diameter borehole. Conversely, 76 mm diameter probes can be used. They consist either of a 74 mm flexible cover probe or of a 58 mm flexible cover probe used as inner part of a slotted tube probe.

Σχήμα 4. 5: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά πρεσσιομετρικής βολίδας

4.1.3.2.1 Πρεσσιομετρική βολίδα με εύκαμπτο κάλυμα (flexible cover)

Η πρεσσιομετρική βολίδα με εύκαμπτο κάλυμα (Σχήμα 4.4) αποτελείται από τρεις κυλινδρικούς θαλάμους κυκλικής διατομής κατά μήκος του ίδιου άξονα. Κατά την εκτέλεση της δοκιμής οι τρεις θάλαμοι διογκώνονται ταυτόχρονα μέχρι τα τοιχώματα της οπής της γεώτρησης.

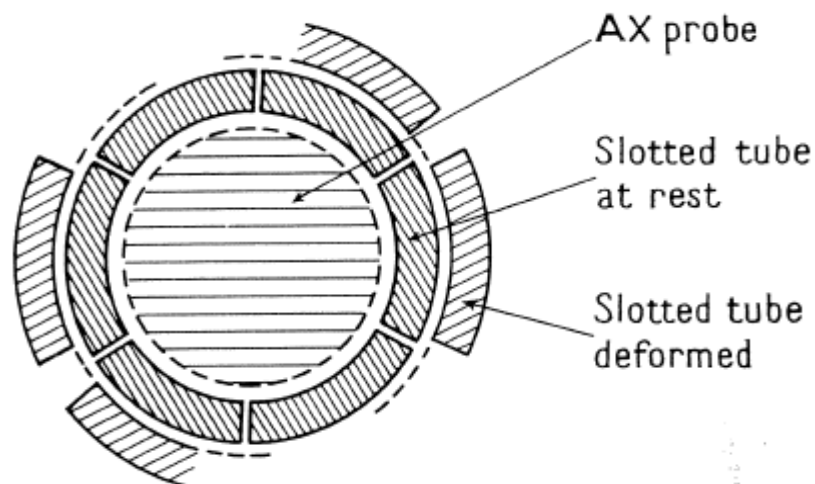
Η κάθε βολίδα αποτελείται από έναν κεντρικό θάλαμο μέτρησης και δύο εκατέρωθεν αυτού. Ο κεντρικός θάλαμος έχει εξωτερική διάμετρο d_c και μήκος l_c (l_{cl} για “μακριές βολίδες” ή l_{cs} για “κοντές”) (Πίνακας Σχήματος 4.5), και διογκώνεται ακτινικά μέσα στη γεώτρηση ασκώντας πίεση στα τοιχώματα αυτής. Η διόγκωση αυτή του θαλάμου γίνεται με την ενίσχυση αυτού με θεωρητικά ασυμπίεστο υγρό. Οι δύο ακριανοί θάλαμοι έχουν εξωτερική διάμετρο d_g και μήκος l_g (l_{gl} ή l_{gs} , αντίστοιχα με προηγουμένως). Είναι σχεδιασμένοι έτσι ώστε να ασκούν πίεση στα τοιχώματα της οπής της γεώτρησης, σχεδόν ίση, αλλά ποτέ μεγαλύτερη, από αυτή που ασκεί ο κεντρικός θάλαμος και διοχετεύονται με υγρό ή αέριο υπό πίεση.

Στόχος της βολίδας είναι η σωστή κατονομή του υγρού με αποτέλεσμα τη διόγκωση των θαλάμων. Ο κεντρικός θάλαμος μέτρησης είναι εφοδιασμένος με μία μεμβράνη και προστατεύεται από ελαστικό μανδύα. Ο πυρήνας του χάλυβα, με εξωτερική κυρτή επιφάνεια, φέρει ένα δίκτυο αυλακώσεων, οι οποίες διανέμουν σωστά και ομοιόμορφα το υγρό στον κεντρικό θάλαμο μέτρησης κάτω από τη μεμβράνη. Στον πυρήνα αυτό παγιώνεται η μεμβράνη και το εύκαμπτο κάλυμα, ενώ το πάνω μέρος του είναι σπειρωμένο και σε συνδυασμό με τη σειρά των ράβδων χειρισμού της βολίδας από το επίπεδο του εδάφους. Ο ρόλος της μεμβράνης του κεντρικού θαλάμου μέτρησης είναι ότι απομονώνει το ρευστό του κεντρικού θαλάμου από το αέριο των πλευρικών, ενώ το εύκαμπτο κάλυμα που προηγείται, είναι φτιαγμένο από λεπτές λωρίδες χάλυβα, συνήθως 17mm. Ένα σύστημα σωλήνων που μεταφέρει το υγρό συνδέει τη βολίδα με τη μονάδα ελέγχου πίεσης και όγκου, ενώ η στρόφιγγα του θαλάμου μετρήσεων προεξέχει από το κάτω μέρος του χαλύβδινου πυρήνα.

4.1.3.2.2 Πρεσσιομετρική βολίδα με σχισμές παράλληλες προς τον άξονά του σωλήνα της (slotted tube)

Η συγκεκριμένη πρεσσιομετρική βολίδα αποτελείται από δύο μέρη (Σχήμα 4.6). Ένα εσωτερικό τμήμα το οποίο αποτελείται από τρεις κυλινδρικούς σωλήνες κυκλικής διατομής κατά μήκος του ίδιου άξονα και από ένα εξωτερικό που αποτελείται από έναν χαλύβδινο σωλήνα με σχισμές.

Όσον αφορά στο εσωτερικό μέρος της βολίδας, ισχύει ό,τι και για την βολίδα με εύκαμπτο κάλυμα, που αναφέρεται παραπάνω. Σε αυτή την περίπτωση, όμως, κατά την εκτέλεση της δοκιμής, οι τρεις θάλαμοι ενεργούν ταυτόχρονα στο εσωτερικό τμήμα του χαλύβδινου σωλήνα με τις σχισμές, ο οποίος μεταφέρει τις πιέσεις στα τοιχώματα της οπής της γεώτρησης. Το εξωτερικό τμήμα του σωλήνα μεταφέρει τουλάχιστον έξι αξονικές ή ελικοειδείς αυλακώσεις, οι οποίες διανέμονται γύρω από την περιφέρειά του. Το μήκος του χαλύβδινου σωλήνα μετράται γύρω από την περιφέρειά του και πρέπει να είναι τουλάχιστον $1,3 (l_c + 2 l_g)$ ή 800mm. Πριν και μετά την διαστολή, το άνοιγμα κάθε υποδοχής του σωλήνα πρέπει να είναι μικρότερο ή ίσο με 0,4mm, ενώ μετά τη διαστολή είναι εις θέση να ανακτήσει το αρχικό σχήμα και το μέγεθός του.



Σχήμα4. 6: Εγκάρσια τομή πρεσσιομετρικής βολίδας με σχισμές παράλληλες προς τον άξονά του σωλήνα της (slotted tube)

4.1.3.3 Μονάδα ελέγχου (Pressure and volume control unit) (CU)

Η μονάδα ελέγχου του πρεσσιομέτρου είναι τοποθετημένη γύρω από ένα κυλινδρικό σύστημα συσκευών μέτρησης. Ο ρόλος της είναι να ελέγχει τη διόγκωση των θαλάμων της βολίδας και ταυτόχρονα να διαβάζει τις μεταβολές των πιέσεων του υγρού και του αερίου, ταυτόχρονα με τη μεταβολή του όγκου, συναρτήσει του χρόνου.

Η συσκευή συμπίεσης που διαθέτει επιτρέπει:

- οριακή πρεσσιομετρική πίεση p_r τουλάχιστον ίση με 5MPa,
- σταθερή πίεση φόρτωσης των θαλάμων κατά τη διάρκεια της δοκιμής,
- αύξηση πίεσης κατά 0,5MPa σε λιγότερο από 20sec και
- έγχυση ενός όγκος του υγρού στον κεντρικό θάλαμο μέτρησης μεγαλύτερο από 700cm³.

Τέλος, μία βαλβίδα ανάμεσα στη συσκευή μέτρησης του όγκου (ογκόμετρο) και το μανόμετρο, επιτρέπει τη διακοπή έγχυσης του υγρού.

4.1.3.4 Σύστημα σωλήνων (Connecting lines)

Οι εύκαμπτοι σωλήνες ενώνουν τη μονάδα ελέγχου όγκου και πίεσης με τη βολίδα. Μεταφέρουν το υγρό στον κεντρικό θάλαμο μέτρησης της βολίδας και το αέριο στους ακριανούς. Η διάταξή του είναι είτε παράλληλη, είτε ομοαξονική. Στη δεύτερη περίπτωση ο κεντρικός σωλήνας μεταφέρει το υγρό και ο εξωτερικός το αέριο. Σημειώνεται ότι το υγρό

που χρησιμοποιείται είναι είτε νερό, είτε υγρό με παρεμφερές ιξώδες, το οποίο δεν παγώνει κάτω από τις συνθήκες που γίνεται η πρεσσιομετρική δοκιμή.

4.1.4 Μετρήσεις και έλεγχος δοκιμής

Στον παρακάτω Πίνακα του Σχήματος 4.7 φαίνονται οι τιμές που πρέπει να δίνονται στα μηχανήματα μέτρησης του χρόνου, της πίεσης και του όγκου, βάσει των Ευρωπαϊκών Προδιαγραφών.

Measuring device for	Units	Minimum measuring range	Allowable minimum resolutions Procedure A	Allowable minimum resolutions Procedure B
Depth	m	-	0,2	0,2
Time	s	-	1	0,5
Pressure	kPa	0-5000	1% or 25*	1% or 15*
Volume	cm ³	0-700	2	1

Σχήμα4. 7: (Εύρος μετρήσεων για τις συσκευές που χρησιμοποιούνται στην Πρεσσιομετρική δοκιμή Ménard)

Η μονάδα ελέγχου, πρέπει να δίνει την ταυτόχρονη και στιγμιαία απεικόνιση του χρόνου, της πίεσης του υγρού που εγχύεται στον κεντρικό θάλαμο μέτρησης της βολίδας, αλλά και του όγκου του υγρού και της πίεσης του αερίου στους ακριανούς θαλάμους αυτής.

Κύλινδρος βαθμονόμησης

Ο κύλινδρος βαθμονόμησης έχει εσωτερική διάμετρο μέτρησης, d_i , το πολύ 66mm, πάχος τοιχώματος όχι λιγότερο από 8mm και μήκος l_p (ή l_m) μεγαλύτερο από 1m.

4.1.5 Διαδικασία της δοκιμής

Για να ξεκινήσει η πρεσσιομετρική δοκιμή, αρχικά, γίνεται η συναρμολόγηση των εξαρτημάτων. Ο τύπος του καλύματος, η μεμβράνη και, ενδεχομένως, ο χαλύβδινος σωλήνας με σχισμές, επιλέγονται ανάλογα με τις παραμέτρους του εδάφους όπου θα γίνει η δοκιμή και άρα θα τοποθετηθεί η πρεσσιομετρική βολίδα. Σε κάθε περίπτωση πρέπει να πληρούνται οι προδιαγραφές που ζητούνται. Για το σκοπό αυτό, λαμβάνεται υπόψη το γεγονός ότι η απώλεια πίεσης της βολίδας, είτε πρόκειται για βολίδα με εύκαμπτο κάλυμα, είτε για βολίδα με σχισμές παράλληλες προς τον άξονά του σωλήνα της, πρέπει αν είναι όσο το δυνατόν μικρότερη συγκριτικά με την αναμενόμενη τιμή της οριακής πίεσης στο

βάθος της δοκιμής. Βασικά χαρακτηριστικά για την επιλογή των χαρακτηριστικών της βολίδας είναι τα εξής:

1. Για τη μεμβράνη του κεντρικού κελιού μέτρησης η πίεση να είναι μικρότερη ή ίση των 80KPa και
2. Για το σύνολο της βολίδας,
όταν $p_{LM} \leq 900\text{KPa}$, τότε $p_{ei} \leq p_i/4 + 25 \text{ KPa}$, ενώ
όταν $p_{LM} \geq 900\text{KPa}$, τότε $p_{ei} \geq \min\{[p_i/18 + 200\text{KPa}]; 350\text{KPa}\}$

Στη συνέχεια, συνδέεται η βολίδα με τη μονάδα ελέγχου μέσω του συστήματος σωλήνων.

Στη συνέχεια εκτελούνται η βαθμονόμηση και οι διορθώσεις που απαιτούνται, και τα αποτελέσματα πρέπει να είναι διαθέσιμα στο χώρο διεξαγωγής της δοκιμής.

Μετά, γίνεται η διάνοιξη της οπής και η τοποθέτηση της βολίδας. Είναι υψίστης σημασίας για την πρεσσιομετρική δοκιμή η επίτευξη υψηλής ποιότητας γεώτρησης.

Για μία επιτυχή δοκιμή είναι απαραίτητο να ικανοποιούνται τρεις βασικές συνθήκες:

- ο εξοπλισμός και η μέθοδος που χρησιμοποιείται για την διάνοιξη της πρεσσιομετρικής γεώτρησης πρέπει να φέρουν την ελάχιστη δυνατή διατάραξη του εδάφους,
- η διάμετρος του εργαλείου κοπής πρέπει να πληρεί της ειδικές ανοχές,
- η πρεσσιομετρική δοκιμή πρέπει να διενεργείται ακριβώς μετά τη διάνοιξη της γεώτρησης.

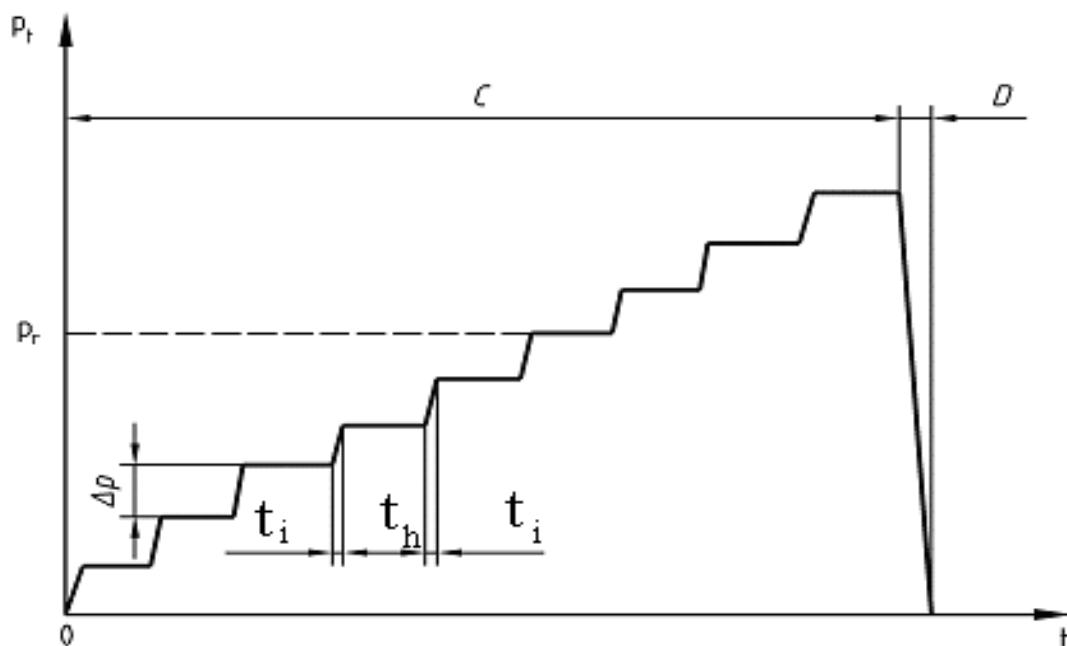
Πολύ σημαντικό είναι να προστατεύονται από την άμεση ηλιακή ακτινοβολία η μονάδα ελέγχου πίεσης και όγκου (CU) και ο καταγραφέας δεδομένων. Η θέση του πρεσσιομέτρου αναγράφεται, και όταν πρόκειται για κεκλιμένο επίπεδο, η κλίση και η διεύθυνση αυτού είναι πραγματική.

Στη συνέχεια, όταν πρόκειται για τη Διαδικασία Β, αρχικοποιείται ο καταγραφέας δεδομένων και οι αρχικές ενδείξεις του κάθε μορφοτροπέα (Διαδικασίες Α και Β) ελέγχονται και καταγράφονται. Οι παράμετροι προσδιορισμού της δοκιμής καταγράφονται είτε στην κάρτα μνήμης, είτε στο δελτίο δεδομένων και είναι:

- δοκιμασία ταυτοποίησης χειριστή,

- αριθμός φακέλου,
- αριθμός φόρτισης,
- τύπος αισθητήρα,
- τεχνική διάνοιξης της οπής της γεώτρησης,
- αναγνώριση και περιγραφή του εδάφους, βάσει του προτύπου ISO 14688-1 και ISO 14689-1,
- μέθοδος τοποθέτησης της βολίδας,
- βαθμονομήσεις των δοκιμών,
- υψόμετρο του μετατροπέα πίεσης,
- υψόμετρο της θέσης της δοκιμής ή του βάθους της βολίδας και
- ρύθμιση διαφορικής πίεσης.

Η φόρτωση του προγράμματος της πρεσσιομετρικής δοκιμής είναι η σχέση μεταξύ χρόνου και πίεσης που εφαρμόζεται από τη βολίδα στο έδαφος. (Σχήμα 4.8) . Σε κάθε φόρτιση, η πίεση στον κεντρικό θάλαμο μέτρησης, αλλά και στους δύο ακριανούς διατηρείται σταθερή για χρόνο $t_h = 60\text{sec}$. Στη Διαδικασία Α, αν μία παραλλαγή της πρεσσιομετρικής πίεσης αναγνώρισης, p_r , κατά τη διάρκεια μίας φόρτισης υπερβαίνει τη μέγιστη τιμή των 25MPa ή το 0,5% αυτής, τότε η τελική τιμή της πίεσης καταγράφεται. Η αρχική αύξηση της πίεσης Δp_i που θα χρησιμοποιηθεί, αποφασίζεται από τον διαχειριστή της δοκιμής, μετά την παρακολούθηση των παραμέτρων της γεώτρησης και την εξέταση του πυρήνα αυτής. Όταν καταγράφονται οι αρχικές ενδείξεις, ο διαχειριστής παρατηρεί τις παραμέτρους ερπυσμού $V_{60/30}$ και τις διαφορές αυτών στις διαδοχικές αναγνώσεις ανά 60sec, και έτσι μπορεί να αλλάξει την αύξηση της πίεσης εάν χρειάζεται, με σκοπό να λαμβάνει περίπου 10 σημεία κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Ακόμα, ο χρόνος t_1 που χρειάζεται για την αύξηση της πίεσης κατά Δp είναι πάντα μικρότερος από 20sec, όταν το μήκος είναι μικρότερο από 50m, ενώ σε άλλη περίπτωση γίνεται κατάλληλη προσαρμογή. Τέλος, όταν ολοκληρωθεί η δοκιμή, η εκφόρτιση γίνεται σταθερά και συνεχόμενα.



Σχήμα4. 8: Διάγραμμα πίεσης-χρόνου για πρεσσιομετρική δοκιμή Menard

p_t Target pressures

Δp Pressure increment

p_r Pressure hold during

C Loading phase

t Time

t_i Pressure increment time

t_h Duration of a pressure hold

D Unloading phase

Η πίεση του αερίου στους ακριανούς θαλάμους πρέπει να είναι μικρότερη από αυτήν στον κεντρικό θάλαμο μέτρησης κατά τουλάχιστον δύο φορές. Κατά την ανύψωση της μονάδας ελέγχου, η διαφορά πίεσης που χρειάζεται για να κρατηθεί η συγκεκριμένη ισορροπία λέγεται **διαφορική πίεση**, καθορίζεται πριν την έναρξη της δοκιμής και ελέγχεται μετά από κάθε φόρτιση. Στη συνέχεια, εφαρμόζεται ενιαία πίεση στα τοιχώματα της γεώτρησης μέσω της πρεσσιομετρικής βολίδας και καταγράφονται οι μετρήσεις στον κεντρικό θάλαμο αυτής με το χρόνο, συναρτήσε της πίεσης στην οποία υποβάλλεται αυτό.

Σε κάθε φόρτιση παίρνονται οι ακόλουθες μετρήσεις:

- Στη Διαδικασία Α, καταγράφεται μία φορά η πίεση του υγρού που απαιτείται από το πρόγραμμα και η αύξηση όγκου της βολίδας κάθε φορά που έχει επιτευχθεί στα 15sec, στα 30sec και στα 60sec. Καταγράφονται, επίσης, οι πιέσεις του υγρού στον κεντρικό θάλαμο μέτρησης της βολίδας και του αερίου στους ακριανούς, καθώς και

η διαφορική πίεση, αφού αναμένεται αισθητή τροποποίηση.

- Στη Διαδικασία Β, η εφαρμοζόμενη πίεση του υγρού και η αύξηση όγκου της βολίδας καταγράφονται τουλάχιστον στα 1sec, 15sec, 30 sec και 60sec.

Έτσι, η δοκιμή σταματά όταν έχουν αποκτηθεί επαρκή στοιχεία για το σκοπό αυτής, χρησιμοποιώντας όλες τις δυνατότες του εξοπλισμού. Αυτό σημαίνει ότι η πίεση p_r , θα πρέπει να έχει φτάσει τουλάχιστον τα 5MPa και ο όγκος του υγρού που εγχύεται στον κεντρικό θάλαμο μέτρησης να υπερβαίνει τα 600 cm³ (450 cm³ για βολίδα με χαλύβδινο σωλήνα με σχισμές).

4.1.6 Απαιτήσεις ασφαλείας

Οι κανονισμοί ασφαλείας αφορούν στα μέσα ατομικής προστασίας, στον καθαρό αέρα στην περίπτωση εργασιών σε κλειστούς χώρους, στη διασφάλιση της ασφάλειας του προσωπικού και του εξοπλισμού, καθώς τα γεωτρήματα που χρησιμοποιούνται είναι σύμφωνα με το πρότυπο EN ISO 22475-1.

4.1.7 Πρεσσιομετρική καμπύλη

Η πρώτη πρεσσιομετρική καμπύλη λαμβάνεται από τα αποτελέσματα που δίνει η μονάδα ελέγχου, V_r συναρτήσει p_r σε κάθε 60sec. Κατά τη Διαδικασία Β, η πρώτη πρεσσιομετρική καμπύλη παρέχεται από τον εκτυπωτή του καταγραφέα δεδομένων.

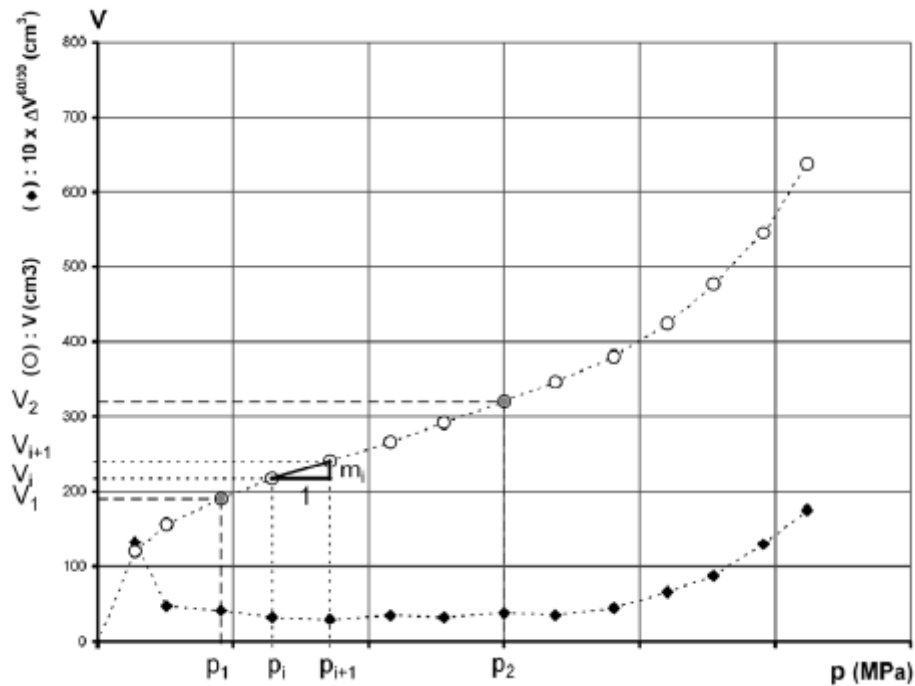
Η διορθωμένη πρεσσιομετρική καμπύλη (Σχήμα 4.9) δίνει τον όγκο του κεντρικού θαλάμου μέτρησης της πρεσσιομετρικής βολίδας, V , συναρτήσει της πίεσης p που ασκείται στα τοιχώματα της γεώτρησης: $V = f(p)$, όπου:

p : η πίεση στα 60sec που εφαρμόζεται από το εξωτερικό κάλυμα της βολίδας στα τοιχώματα της γεώτρησης, μετά τη διόρθωση πίεσης και

V : ο αντίστοιχος όγκος του υγρού που εγχύεται στη βολίδα, μετά τη διόρθωση του όγκου.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.9 παραπάνω, η διορθωμένη πρεσσιομετρική καμπύλη ορίζεται από την αρχή των συντεταγμένων (p , V). Κατά την έναρξη της πρεσσιομετρικής δοκιμής, η σπή της γεώτρησης φορτίζεται από τη βολίδα μέχρι να επιστρέψει στην αρχική της κατάσταση. Η κλίση της πρεσσιομετρικής καμπύλης από αυτό το σημείο και μετά είναι αισθητά σταθερή. Μετά το στάδιο αυτό η διαστολή της βολίδας αποκτά ακτινικό ρυθμό και αυξάνεται ραγδαία με την αύξηση της πίεσης.

Στο κάτω μέρος του Σχήματος 4.9 εμφανίζεται και η καμπύλη ερπυσμού.



Key

- Corrected pressuremeter curve
- ◆ Corrected creep curve

Σχήμα4. 9: Πρεσσιομετρικές καμπύλες

4.1.8 Αποτελέσματα πρεσσιομετρικής δοκιμής

Οι παράμετροι της πρεσσιομετρικής δοκιμής λαμβάνονται από τις πληροφορίες που καταγράφονται στο δελτίο δεδομένων, όσον αφορά στη Διαδικασία Α, ή στην εκτύπωση, όσον αφορά στη Διαδικασία Β. Τα συγκεκριμένα στοιχεία εξετάζονται για να εκτιμηθεί αν και πόσο μέρος της πρεσσιομετρικής καμπύλης μπορεί να αναλυθεί. Στη συνέχεια, με τη χρήση κατάλληλων μεθόδων, που αναλύονται ακολούθως, προσδιορίζονται η πρεσσιομετρική πίεση ερπυσμού p_i , η οριακή πρεσσιομετρική πίεση p_{LM} , καθώς και το πρεσσιομετρικό μέτρο παραμόρφωσης E_M .

4.2 ΕΛΛΗΝΙΚΕΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ

(Πηγή: Ε106-86 παράγραφος 11 και Ε102-84 παράγραφος 4)

4.2.1 Γενικά

Όπως προαναφέρθηκε, η πρεσσιομετρική δοκιμή είναι μία δοκιμή στατικής φόρτισης του εδάφους επιτόπου, που πραγματοποιείται με τη βοήθεια μιας κυλινδρικής βολίδας με δυνατότητα ακτινικής διόγκωσης. Με αυτή τη δοκιμή λαμβάνεται μία σχέση τάσης – παραμόρφωσης του εδάφους, με παραδοχή επιπέδου εντάσεως, αλλά και η οριακή αντοχή αυτού.

Με την κατάλληλη προσαρμογή η πρεσσιομετρική δοκιμή μπορεί να εφαρμοστεί σε κάθε είδος εδάφους. Όσον αφορά στα βραχώδη εδάφη, είναι δυνατό να υπολογιστεί ενδεικτικά το πρεσσιομετρικό μέτρο παραμόρφωσης, αλλά γενικά δεν είναι εφικτή η μέτρηση της οριακής πρεσσιομετρικής πίεσης. Αυτό θα αναλυθεί παρακάτω, βάση της προδιαγραφής Ε102-84.

4.2.2 Εδάφη

Βάσει της Προδιαγραφής Ε106-86, για τα εδάφη, η δοκιμή αρχικά εκτελείται μέσα σε ήδη διατρημένη γεώτρηση σε διάφορες στάθμες. Σε ειδικές περιπτώσεις εδαφών, όπως για παράδειγμα τα αμμοχάλικα, η δοκιμή εκτελείται μέσα σε σωλήνα με σχισμές παράλληλες προς τον άξονά του, ο οποίος εμπήγεται στο έδαφος με κρούσεις ή άλλες διαδικασίες που αναφέρονται στη συνέχεια.

Μέσα στη γεώτρηση (ή στο σωλήνα με τις σχισμές) εισάγεται η πρεσσιομετρική βολίδα, η διάμετρος της οποίας είναι λίγο μικρότερη από αυτή της γεώτρησης και τοποθετείται στην κατάλληλη στάθμη. Η βολίδα συνδέεται με το σύστημα σωλήνων με δοχείο υγρού που βρίσκεται στην επιφάνεια του εδάφους και από το οποίο διοχετεύεται στη βολίδα υγρό με πίεση. Έτσι μετράται η διαστολή της για τις διάφορες επιβαλλόμενες πιέσεις.

Βάσει των ελληνικών προδιαγραφών, η **πρεσσιομετρική βολίδα** είναι κυλινδρική με δυνατότητα ακτινικής διόγκωσης και εισάγεται στη γεώτρηση στην επιθυμητή στάθμη δοκιμής. Αποτελείται από τρεις ανεξάρτητους θαλάμους, ένα μεσαίο όπου διοχετεύεται

υγρό με πίεση και χρησιμεύει για τις μετρήσεις και δύο ακριανούς εκατέρωθεν αυτού, ίδιας διαμέτρου, οι οποίοι είναι βοηθητικοί, εξασφαλίζουν, δηλαδή, στον μεσαίο θαλάμο ομοιόμορφες συνθήκες ακτινικής παραμόρφωσης και διοχετεύονται με υγρό ή αέριο υπό πίεση. Η πρεσσιομετρική βολίδα έχει διάμετρο 40-80mm και μήκος 40-80cm. Το μήκος του θαλάμου μετρήσεως (του μεσαίου) είναι τουλάχιστον ίσο με το τριπλάσιο της ονομαστικής του διαμέτρου και μικρότερο από 50cm. Το μήκος του κάθε βοηθητικού θαλάμου είναι τουλάχιστον ίσο με το 1,5 φορά την ονομαστική διάμετρο της βολίδας. Ακόμα, η βολίδα προστατεύεται από ελαστικό μανδύα ή και από εύκαμπτες μεταλλικές λωρίδες και έχει την ικανότητα να αντέχει πίεση τουλάχιστον 25atm.

Η **μονάδα ελέγχου** περιλαμβάνει ένα δοχείο με υγρό περιεκτικότητας τουλάχιστον 1000cm³, μία φιάλη αερίου υπό πίεση, έναν ογκομετρικό κανόνα (βαθμολογημένος διαφανής πλαστικός σωλήνας) με ικανότητα μέτρησης μεταβολών όγκου 0,01cm³, και μανόμετρα μέτρησης πίεσης αερίου και υγρού ικανότητας τουλάχιστον 25atm.

Για την εκτέλεση της δοκιμής απαιτούνται εξειδικευμένοι σε τέτοιου είδους δοκιμές χειριστής και εργοδηγός, καθώς και το υπόλοιπο προσωπικό που διατίθεται από την εταιρεία που διαθέτει το γεωτρύπανο.

4.2.2.1 Διάτρηση οπής

Η διάτρηση της πρεσσιομετρικής οπής και η διατήρησή της για τη διεξαγωγή της πρεσσιομέτρησης είναι ο κυριότερος παράγοντας επίτευξης αξιόπιστων πορισμάτων. Γίνεται με μέσα που εξασφαλίζουν την ελάχιστη δυνατή διατάραξη του εδάφους στα τοιχώματα αυτής. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι συνηθισμένες καροταρίες που χρησιμοποιούνται για τις δειγματοληπτικές γεωτρήσεις δεν είναι πάντα κατάλληλες και για τις πρεσσιομετρικές. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι προκαλούν διατάραξη στα τοιχώματα, λόγω της μικρής ταχύτητας προχώρησης, της κυκλοφορίας του νερού με πίεση μεταξύ των τοιχωμάτων καροταρίας και οπής και των κραδασμών των στελεχών. Έτσι, συνηθίζεται η διάνοιξη ιδιαίτερων γεωτρήσεων με σκοπό μόνο την εκτέλεση πρεσσιομετρικών δοκιμών.

Στα **λεπτόκοκκα εδάφη**, όπως είναι οι ιλύες και οι άργιλοι, η διάνοιξη της οπής γίνεται με μηχανοκίνητη ή χειρονακτική έλικα (auger), περιστρεφόμενο τρίπτερο ή γριναζωτό κοπτικό, εν ξηρώ ή με κυκλοφορία μπετονιτικού αιωρήματος υπό χαμηλή πίεση, μέχρι 5atm. Ιδιαίτερα σε πολύ στιφρές αργίλους και μάργες συχνά χρησιμοποιείται κρουστικό περιστροφικό μηχάνημα με πεπιεσμένο αέρα ή με κυκλοφορία μπετονιτικού

αιωρήματος υπό χαμηλή πίεση, ενώ η διάτρηση με κυκλοφορία νερού είναι απαγορευτική.

Στα **χονδροκόκκα εδάφη**, όπως είναι οι άμμοι και τα αμμοχάλικα χρησιμοποιούνται τα ίδια διατρητικά μέσα με αιώρημα μπετονίτη. Αν όμως προκύψουν καταπτώσεις των παρειών επιτρέπεται και η έμπηξη βολίδας με κρούσεις, πίεση ή ελαφρά δόνηση, μέχρι το επιθυμητό βάθος. Τότε, η βολίδα προστατεύεται από ένα σωλήνα που φέρει στο τοίχωμά του παράλληλες προς τον άξονά του σχισμές (slotted tube), ώστε να επιτρέπεται η ακτινωτή διεύρυνση, όπως προαναφέρθηκε. Στην περίπτωση αυτή οι σχισμές είναι τουλάχιστον έξι κατά την περιφέρεια του σωλήνα και εκτείνονται σε μήκος τουλάχιστον διπλάσιο του μήκους της βολίδας.

Σε **πολύ πυκνά κοκκώδη εδάφη**, όπου είναι αδύνατη η έμπηξη σωλήνα με σχισμές, γίνεται προδιάτρηση, σύμφωνα με έναν από τους ακόλουθους τρόπους:

- Γίνεται γεώτρηση μεγάλης διαμέτρου με προσωρινή σωλήνωση μέχρι μία στάθμη λίγο ψηλότερη από τη στάθμη της δοκιμής. Στη συνέχεια, από τον πυθμένα της γεώτρησης, δημιουργείται καθοδηγητική οπή με καροταρία εξωτερικής διαμέτρου, στο μέγεθος περίπου και της διαμέτρου της βολίδας και σε βάθος ενός μηκούς βολίδας κάτω από τη στάθμη της δοκιμής. Μετά, εμπεγνύεται ο σωλήνας με τις σχισμές στην καθοδηγητική οπή που έχει δημιουργηθεί με κρούσεις και οι δοκιμές εκτελούνται μέσα από το σωλήνα καθώς προχωρά η γεώτρηση.
- Ο σωλήνας με τις σχισμές και με το κάτω άκρο του ανοιχτό, προσαρμόζεται σε μία στήλη σωλήνων της ίδιας διαμέτρου. Στη συνέχεια, προωθείται στο έδαφος με κρούσεις, ακολουθώντας μία καθοδηγητική οπή, η οποία διανοίγεται με καροταρία διαμέτρου μικρότερης από του σωλήνα και προηγείται ελαφρώς. Τέλος, ανασύρεται η στήλη των σωλήνων και εκτελούνται οι δοκιμές.

Η διάμετρος της οπής ή του σωλήνα με τις σχισμές είναι πάντα μεγαλύτερη της διαμέτρου της βολίδας κατά 2-6mm. Εάν η διάμετρος των γεωτρήσεων είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή της βολίδας, τότε η διάτρηση γίνεται στην εκάστοτε στάθμη μέτρησης με διατρητικό μηχάνημα κατάλληλης διαμέτρου και λίγο μικρότερου μήκους από εκείνο της βολίδας. Οι κατάλληλες διαμέτροι της βολίδας σχετικά με τη διάμετρο της γεώτρησης φαίνονται στον παρακάτω πίνακα του Σχήματος 4.10 και ισχύουν για συνήθεις πρεσσιομετρικές βολίδες.

Κώδικας DCDMA	Διάμετρος βολίδας	Διάμετρος της γεώτρησης (mm)	
		Ελάχιστη	Μέγιστη
EX	32	34	38
AX	44	46	52
BX	58	60	66
NX	70/74	74	80

Σχήμα4. 10: Κατάλληλες διαμέτροι βολίδας σχετικά με τη διάμετρο της γεώτρησης

4.2.2.2 Εκτέλεση πρεσσιομετρικής δοκιμής

Η πρεσσιομετρική δοκιμή εκτελείται μέσα σε διάστημα 24 ωρών το πολύ από το χρόνο διάτρησης της οπής, με εξαίρεση την περίπτωση κινδύνου αλλοίωσης του εδάφους λόγω απορρόφησης νερού. Αυτό μπορεί να συμβεί αν, για παράδειγμα, διατηρηθεί η οπή με χειροκίνητη έλικα ή με χρήση αέρος πάνω από τη στάθμη του υπόγειου νερού. Τότε, κάποια καθυστέρηση της τάξεως των λίγων ωρών είναι ανεκτή. Ακόμα, πριν την έναρξη των δοκιμών γίνεται πλήρωση του ογκομετρικού συστήματος, δηλαδή των αγωγών και του θαλάμου μέτρησης της βολίδας, με υγρό (συνήθως νερό με ή χωρίς χρωστική και με αντιψυκτικό σε περιόδους παγετού) και εξαέρωση και στη συνέχεια, πραγματοποιείται από τον χειριστή η βαθμονόμηση του πρεσσιομέτρου, η διαδικασία της οποίας ακολουθεί.

4.2.2.3 Βαθμονόμηση πρεσσιομέτρου

Οι ρυθμίσεις βαθμονόμησης γίνονται για την αποφυγή λανθασμένων μετρήσεων, οι οποίες ενδέχεται να οφείλονται σε:

- απώλεια όγκου ως συνάρτηση της εφαρμοσμένης πίεσης, εφόσον το μανόμετρο, το ογκόμετρο και ακόμα και ο κύλινδρος της βολίδας υπόγεια αλλάζουν σε όγκο κατά τη διάρκεια της δοκιμής,
- απώλειες πίεσης ως αποτέλεσμα της ακαμψίας των τοιχωμάτων και της μεμβράνης της βολίδας, είτε σε
- απώλεια πίεσης ως συνάρτηση της διόγκωσης της βολίδας (αρχικά είναι απαραίτητη κάποια πίεση για να διογκωθεί η μεμβράνη και το κάλυμα των κυψελών).

4.2.2.4 Διόρθωση όγκου

Έτσι, για τον έλεγχο διαρροών ή και παρασιτικών μεταβολών του όγκου, γίνεται βαθμονόμηση της πρεσσιομετρικής δοκιμής μέσα σε ένα χώρο γνωστών διαστάσεων και ελαστικής συμπεριφοράς, όπως είναι, για παράδειγμα, ένας χαλύβδινος σωλήνας με χοντρά τοιχώματα. Για τις πιέσεις που εφαρμόζονται στα εδάφη, μέχρι δηλαδή τις 25atm, η παραμόρφωση αυτού θεωρείται αμελητέα. Η βαθμονόμηση γίνεται μετά από κάθε αλλαγή που τυχόν συμβαίνει στο σύστημα. Αυτή η αλλαγή μπορεί να είναι στο μήκος των αγωγών, στα όργανα ή στο υγρό που χρησιμοποιείται, αλλά και στις αλλαγές της θερμοκρασίας. Έτσι, σχεδιάζεται η καμπύλη μεταβολής του όγκου συναρτήσει των πιέσεων και λαμβάνεται υπόψη στη διόρθωση της πρεσσιομετρικής καμπύλης.

4.2.2.5 Διόρθωση πιέσεων

Η βαθμονόμηση του πρεσσιομέτρου για τις απώλειες πιέσεων γίνεται στην εκτέλεση μιας πλήρους πρεσσιομετρικής δοκιμής έξω από το έδαφος. Τοποθετείται η βολίδα κατακόρυφα, δίπλα από τη μονάδα ελέγχου και μετρήσεων. Κατόπιν, αυξάνονται οι πιέσεις με 10 βαθμίδες της τάξεως των 10KPa και μετράται η αντίστοιχη μεταβολή του όγκου. Η διόρθωση αυτή συμβαίνει κάθε φορά που αλλάζει η μεμβράνη της βολίδας ή τουλάχιστον μία φορά κάθε 10 δοκιμές.

Ακολουθως, αφού τοποθετείται μηδενική ογκομετρική ανάγνωση, και χωρίς να επιτρέπεται η εισροή νερού στη βολίδα, προκειμένου να αποφευχθεί η διόγκωση του κεντρικού θαλάμου λόγω υδροστατικής πίεσης, εισάγεται η τελευταία στη γεώτρηση και κατεβάζεται στο επιθυμητό βάθος με τη βοήθεια λεπτών στελεχών ή συρματόσχοινου και γεωτρυπάνου. Όταν η βολίδα βρεθεί στο προσχεδιασμένο βάθος απελευθερώνεται η πίεση του υγρού. Με αυτήν την πίεση διαστέλλεται η βολίδα και αποκαθίσταται πλήρης επαφή με τα τοιχώματα της οπής. Η αντίστοιχη μεταβολή όγκου σημειώνεται.

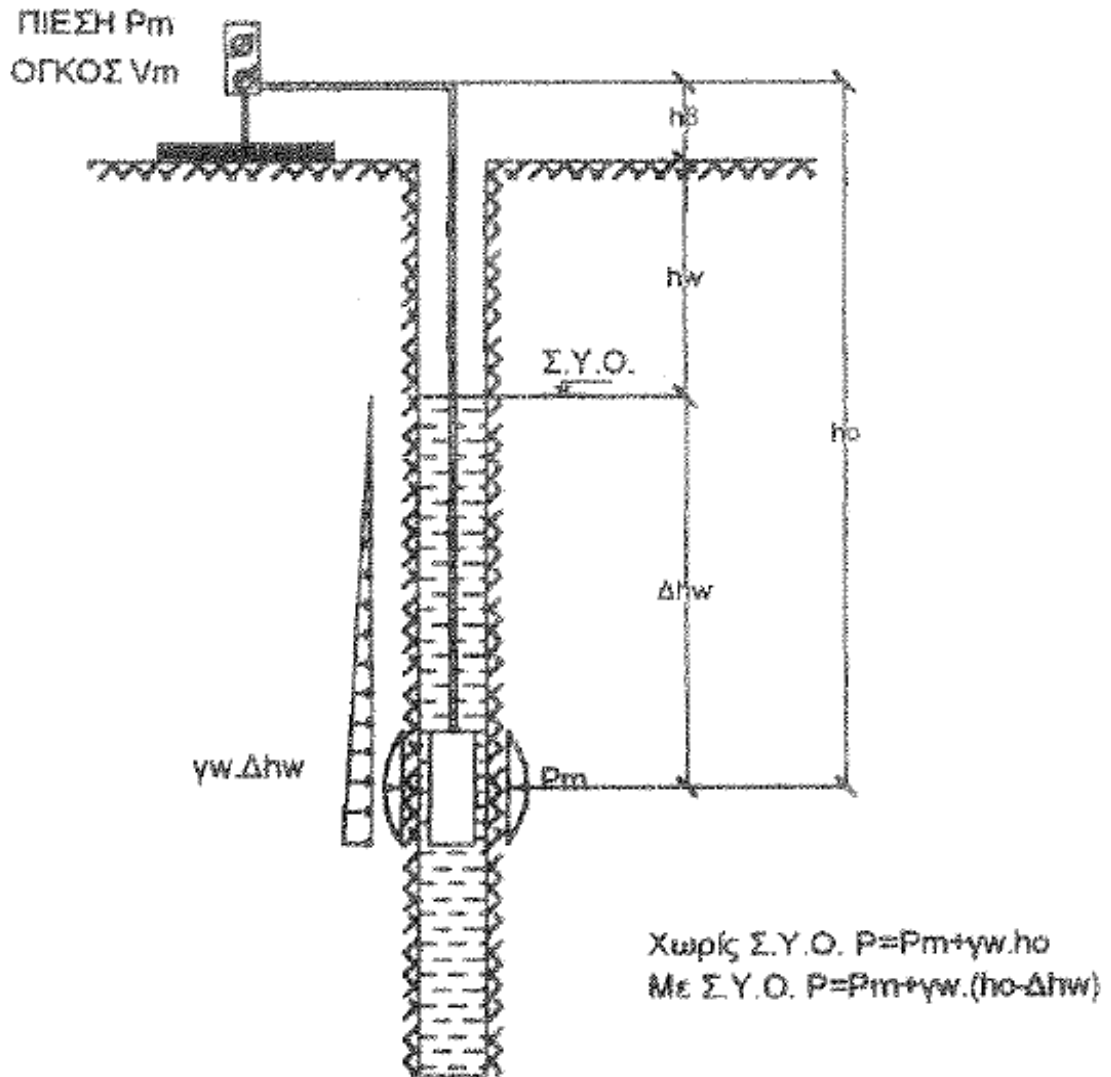
Στο συγκεκριμένο σημείο πρέπει να αναφερθεί ότι το μέγεθος της υδροστατικής πίεσης (p_w) που αναπτύσσεται στη βολίδα από τη στήλη ύδατος καθορίζεται ως εξής: Μετράται το βάθος της δοκιμής (h_0) και η στάθμη του υπόγειου φρεάτιου ορίζοντα (h_w). Ως βάθος δοκιμής, h_0 , λαμβάνεται η απόσταση από το ύψος του μανομέτρου ως το μέσον της βολίδας, ενώ το μανόμετρο βρίσκεται σε ύψος h_w από την επιφάνεια του φυσικού εδάφους. Η υπολογιζόμενη υδροστατική πίεση που ασκείται στο περίβλημα δεν καταγράφεται από το μανόμετρο και στις μετρήσεις λαμβάνεται υπόψη η συνολική πίεση ως εξής:

$P = \rho_M + \gamma_w * h_0$ χωρίς παρουσία υδροφόρου ορίζοντα

$P = \rho_M + \gamma_w * (h_0 - \Delta h_w)$ παρουσία υδροφόρου ορίζοντα,

όπου γ_w το μοναδιαίο βάρος του νερού.

Η σχηματική απεικόνιση δίνεται στο παρακάτω σχήμα 4.11.



Σχήμα4. 11: Σχηματική απεικόνιση πρεσσιομέτρου, εντός υδροφόρου ορίζοντα

Στη συνέχεια της δοκιμής, επιβάλλεται φόρτιση κατά στάδια. Αυξάνεται σταδιακά η πίεση σε δέκα ίσες βαθμίδες (6 ως 14 βαθμίδες είναι τα ανεκτά όρια), μέχρι το σημείο θραύσεως. Κάθε βαθμίδα πίεσεως διατηρείται για 1min και λαμβάνονται οι ογκομετρικές παραμόρφώσεις στα 15sec, 30sec και 60sec. Η πίεση παρακολουθείται διαρκώς κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας και γίνονται διορθώσεις όταν χρειάζεται, προκειμένου να διατηρείται σταθερή τιμή. Σημειώνεται ότι το μέγεθος των βαθμίδων πίεσης εξαρτάται από

το έδαφος και συνήθως λαμβάνεται το 1/10 της οριακής πρεσσιομετρικής πίεσης.

Οι παραμορφώσεις του εδάφους μετρούνται από τη μεταβολή του όγκου του υγρού στη βολίδα, μέσω των αναγνώσεων στην ογκομετρική κλίμακα της συσκευής.

Οι πιέσεις από τη βολίδα προς το έδαφος μετρούνται από την πίεση του υγρού στο δοχείο μέσω των μανομέτρων και συνυπολογίζεται η πρόσθετη πίεση από τη στήλη του υγρού μέσα στους αγωγούς, από τη στάθμη του μανομέτρου μέχρι τη στάθμη της βολίδας, ενώ αφαιρείται η υδροστατική πίεση του υπόγειου νερού, εάν υπάρχει. ($P = p_M + p_0 - W$)

Όταν ο όγκος της κοιλότητας του εδάφους που αντιστοιχεί στο θάλαμο μετρήσεως της βολίδας διπλασιαστεί ή όταν η πίεση φτάσει στις 20-25atm (για μικρές παραμορφώσεις), η δοκιμή σταματά. Βέβαια, σε περίπτωση που είναι επιθυμητό, μπορεί να γίνει αποφόρτιση και επαναφόρτιση σε ένα ή περισσότερους κύκλους. Αυτό γίνεται μόνο στην ψευδοελαστική φάση (Σχήμα 4.12), όπου οι μεταβολές του όγκου είναι αισθητά γραμμικές αλλά σε κάθε περίπτωση πριν από την απότομη αύξηση του ρυθμού των παραμορφώσεων.

Τέλος, η συχνότητα δοκιμών πρεσσιομέτρου μέσα στην ίδια γεώτρηση δεν είναι μικρότερη από 1 δοκιμή ανά 1,5m. Ιδανικά είναι 1 δοκιμή ανά 1m.

4.2.2.6 Παρουσίαση αποτελεσμάτων – Πρεσσιομετρική καμπύλη

Αμέσως μετά το τέλος της δοκιμής συντάσσεται δελτίο όπου αναφέρονται:

- η ημερομηνία και η ώρα διεξαγωγής της δοκιμής,
- ο αριθμός και η θέση της γεώτρησης αλλά και της δοκιμής μέσα στη γεώτρηση,
- οι εργαζόμενοι,
- οι ενδείξεις των μανομέτρων και της ογκομετρικής κλίμακας,
- τα στοιχεία βαθμονόμησης του κυκλώματος των μανομέτρων και της επιρροής της ελαστικής μεμβράνης της βολίδας, καθώς και
- στοιχεία τυχόν συμβάντων κατά τη διάρκεια της δοκιμής που μπορεί να επηρεάζουν την ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

Τέλος, στη σχετική έκθεση της δοκιμής περιλαμβάνονται επίσης

- ένα σχέδιο με τις θέσεις των γεωτρήσεων, αλλά και των πρεσσιομέτρων μέσα σε αυτές,
- η περιγραφή του γεωλογικού σχηματισμού στην περιοχή των δοκιμών,

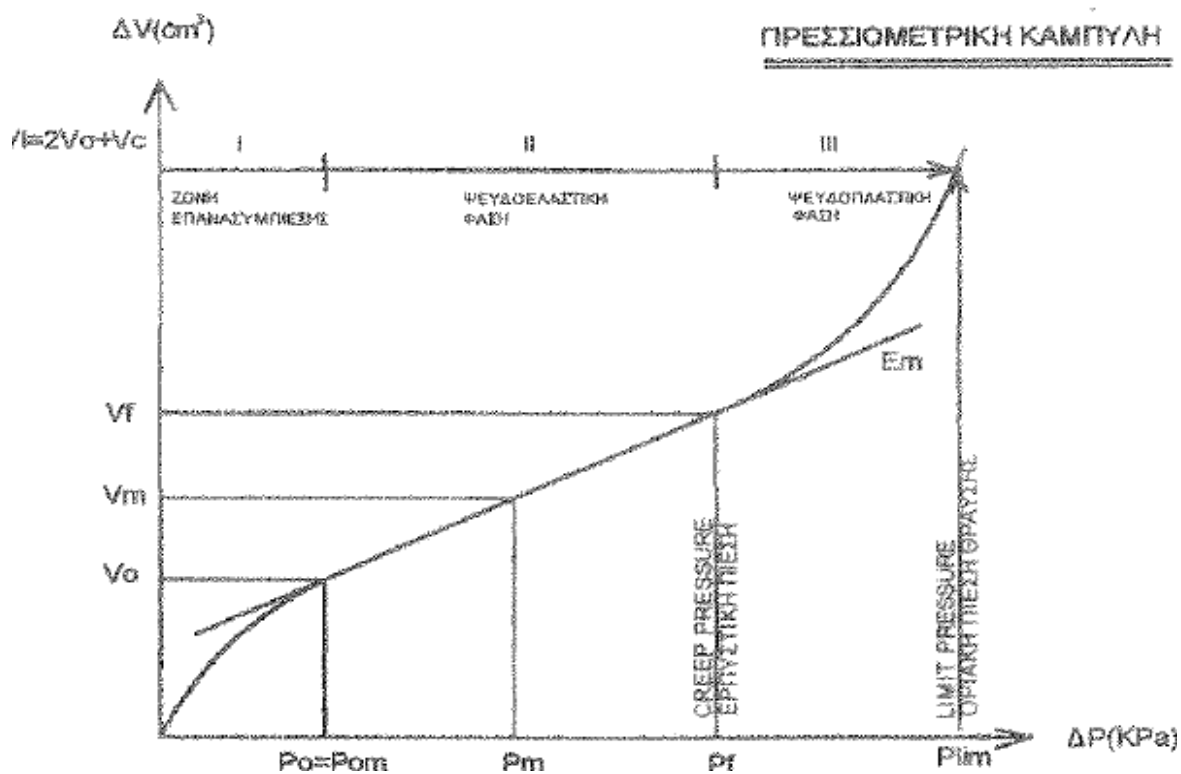
- τα αποτελέσματα των αναγνώσεων πιέσεων και ογκομετρικών μεταβολών,
- τα διαγράμματα μεταβολής όγκου και πίεσης συναρτήσει του χρόνου, μεταβολής όγκου συναρτήσει της πίεσης και ερπυστικών παραμορφώσεων συναρτήσει της πίεσης, καθώς και
- ένας ενδεικτικός υπολογισμός του πρεσσιομετρικού μέτρου παραμόρφωσης (E_M) σε ορισμένη περιοχή πιέσεων στην ψευδοελαστική φάση, υπολογισμένο από την σχέση: $E_M = K * \Delta\rho/\Delta V$,
όπου: $K = 2(1+\nu)*(V_0+V_m)$
 V_0 = αρχικός όγκος θαλάμου μετρήσεως
 V_m = μέσος πρόσθετος όγκος
 ν = λόγος Poisson (συνήθως λαμβάνεται $\nu=0,333$)

Είναι γεγονός, άρα, ότι με τις πρεσσιομετρικές δοκιμές προκύπτουν τα στοιχεία αντοχής του εδάφους, στις διάφορες στάθμες που εκτελούνται οι δοκιμές, στο πραγματικό γεωστατικό πεδίο τάσεων. Το πρεσσιόμετρο Ménard, παρέχει το μέτρο παραμόρφωσης και την πίεση διαρροής σε εγκάρσιο επίπεδο, κάθετο προς τον άξονα της γεώτρησης όπου έχει γίνει η δοκιμή, δηλαδή σε οριζόντιο επίπεδο. Είναι αυτονόητο ότι η πίεση διαρροής προσδιορίζεται αμέσως, εφόσον η δοκιμή έχει φτάσει τα όρια διαρροής του υλικού. Σε άλλη περίπτωση προσδιορίζεται έμμεσα από ενδείξεις προδρομών παρατηρήσεων.

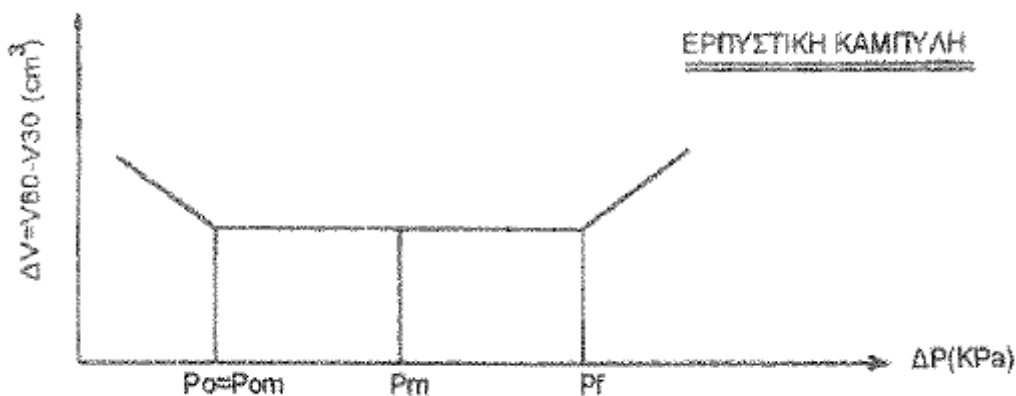
Το αποτέλεσμα της δοκιμής είναι μία καμπύλη πιέσεων – παραμορφώσεων. Η καμπύλη αυτή ονομάζεται “πρεσσιομετρική καμπύλη” και χωρίζεται σε 3 τμήματα (Χ. Μαραγκός, 1993) (Σχήμα 4.12):

- Στη φάση I επανασυμπίεσης των τοιχωμάτων, όπου αντιστοιχεί σε καμπύλη γραμμή κατά την αποκατάσταση της ισορροπίας που διαταράχτηκε από τη διάτρηση της οπής. Η πίεση στο τέλος αυτής της αρχικής φάσης (p_{0M}) είναι περίπου ίση με την πίεση ηρεμίας ($p_0 = p_{0M} = \sigma_{HM}$).
- Στην ψευδοελαστική φάση II. Η προοδευτική αύξηση της πίεσης ($p > p_0$) προκαλεί παραμορφώσεις στην ελαστική κατάσταση του εδάφους. Η πρεσσιομετρική καμπύλη είναι σχεδόν γραμμική και σε αυτό το τμήμα προσδιορίζεται το πρεσσιομετρικό μέτρο παραμόρφωσης (Standard Pressuremeter modulus E_M), όπως αναφέρεται παραπάνω.
- Στην ψευδοπλαστική φάση III. Η προοδευτική αύξηση της πίεσης ($p > p_i$) πέραν της

πίεσης διαρροής p_f δημιουργεί πλαστικές παραμορφώσεις στο υπέδαφος μέσα σε ένα κυλινδρικό πεδίο που περιβάλλει τη γεώτρηση. Πέραν του κυλινδρικού αυτού πεδίου, το έδαφος παρουσιάζει ψευδοελαστική συμπεριφορά. Μεγαλύτερες αυξήσεις στην πίεση έχουν ως αποτέλεσμα σημαντικές πλαστικές παραμορφώσεις του υπεδάφους. Η πρεσσιομετρική καμπύλη στη φάση αυτή αντιστοιχεί σε ασύμπτωτη καμπύλη γραμμή στην οριακή τιμή θραύσης p_{lim} .



Σχήμα 4. 12: Πρεσσιομετρική καμπύλη



Σχήμα 4. 13: Ερωστική καμπύλη

4.2.3 Βράχοι

Επιστρέφοντας στις Ελληνικές Προδιαγραφές, βάσει της Προδιαγραφής Ε102-84, για τους βράχους, η πρεσσιομετρική δοκιμή εκτελείται πάλι μέσα στη γεώτρηση. Στις περιπτώσεις βράχων με μικρή σχετικά αντοχή, καταβάλλεται προσπάθεια να αυξηθεί η πρεσσιομετρική πίεση μέχρι επιτεύξεως τοπικής διαρροής, προκειμένου να εκτιμηθεί η οριακή αντοχή της φορτιζόμενης μάζας.

Η διαδικασία της δοκιμής ξεκινά με τον καθαρισμό της οπής από τα προϊόντα διάτρησης στο βάθος που έχει επιλεγεί, ώστε να συναντάται στις παρειές το φυσικό πέτρωμα σε αυτή τη θέση. Σε περίπτωση που υπάρχουν στη θέση αυτή κατακρημνίσεις των τοιχωμάτων, τοποθετείται χαλύβδινη επένδυση με διαμήκεις σχισμές, όσο το δυνατόν πιο κοντά στα τοιχώματα της διάτρησης, έτσι ώστε να μειωθεί στο ελάχιστο η δυσκαμψία ενός μη διατρητού σωλήνα. Τότε, εισάγεται η πρεσσιομετρική βολίδα και συνδέεται μέσω αγωγού με αποθήκη υγρού που βρίσκεται στην επιφάνεια του εδάφους. Από αυτή την αποθήκη υγρού διοχετεύεται το υγρό υπό πίεση μέσα στη βολίδα και μετράται η διαστολή της ύστερα από την επιβολή διάφορων πιέσεων, όπως εξηγήθηκε και για τα εδάφη.

4.2.3.1 Εκτέλεση της δοκιμής

Η διάτρηση της οπής γίνεται με μία από τις συνηθισμένες μεθόδους διάτρησης, με τέτοιο όμως τρόπο, που να επέρχεται η ελάχιστη δυνατή διαταραχή του γύρω εδάφους. Χρησιμοποιείται περιστροφική ή κρουστική διάτρηση, με τη χρήση νερού ή αέρος σε μικρή ποσότητα. Η περιοχή που θα γίνει η διάτρηση και θα εκτελεστεί η πρεσσιομετρική δοκιμή καθορίζεται από τα προϊόντα της διάτρησης, σε μήκος περίπου διπλάσιο του μήκους της πρεσσιομετρικής βολίδας.

Η σωλήνωση της οπής, όταν χρειάζεται, τοποθετείται είτε κατά τη φάση της διάτρησης, είτε μετά την πρώτη διάτρηση και στη συνέχεια γίνεται διεύρυνση της οπής με αυτή την ίδια σωλήνωση. Ακόμα, τοποθετείται σιδηροσωλήνας με σχισμές κατά μήκος του άξονά του. Αυτές οι σχισμές είναι έξι, όπως και στην περίπτωση εδαφών όταν χρειάζεται, και έχουν τουλάχιστον διπλάσιο μήκος από την πρεσσιομετρική βολίδα.

Στη συνέχεια, η βολίδα κατεβαίνει προσεκτικά (μέσω στελεχών ή μέσω συρματόσχοινου, με τη βοήθεια γεωτρύπανου) στη διάτρηση και παρακολουθείται η πίεση των ρευστών για την αποφυγή υπερβολικής διαστολής της, η οποία μπορεί να προκαλέσει την σφήνωση ή την διάρρηξη της βολίδας πριν την τοποθέτησή της στο επιθυμητό βάθος,

δηλαδή στη θέση μέτρησης. Τότε, ελευθερώνεται η πίεση του υγρού μέχρι τη διαστολή της βολίδας και την αποκατάσταση πλήρους επαφής με τα τοιχώματα της οπής, κατά τα γνωστά.

Όμοια με την περίπτωση των εδαφών, η σύνδεση της βολίδας με τις επιφανειακές συσκευές γίνεται με κατάλληλους αγωγούς από υλικά με επαρκή αντοχή και ο πίνακας ελέγχου του πρεσσιόμετρου που βρίσκεται στην επιφάνεια του εδάφους περιέχει το υγρό που διοχετεύεται στη βολίδα και συνδέεται πιθανόν με οβίδια πεπιεσμένου αέρα. Το πρεσσιόμετρο είναι, σαφώς, εφοδιασμένο με μανόμετρα υψηλής και χαμηλής κλίμακας σε διάφορες φάσεις του κυκλώματος υγρού – αερίου και με μετρητή της μεταβολής του όγκου της βολίδας. Με τη μεταβολή του όγκου του ρευστού, η μεταβολή του όγκου της βολίδας πρέπει να προσδιορίζεται με ακρίβεια τουλάχιστον 2% του όγκου της.

Επίσης, οι παραμορφώσεις του εδάφους υπολογίζονται από τη μεταβολή του όγκου του νερού μέσα στη βολίδα μέσω των αναγνώσεων επί της ογκομετρικής κλίμακας. Τέλος, οι πιέσεις από τη βολίδα προς το έδαφος μετρούνται από την πίεση του υγρού μέσα στη μονάδα ελέγχου, μέσω των μανομέτρων και συνυπολογίζεται η πρόσθετη πίεση από τη στήλη του υγρού στους αγωγούς που μεσολαβούν.

Η πρεσσιομετρική βολίδα έχει διάμετρο 60 – 82mm, μήκος 450 – 800mm και έχει την ικανότητα να αντέχει πιέσεις μέχρι 8MPa. Οι αγωγοί που συνδέουν τη βολίδα με τη μονάδα ελέγχου έχουν αντοχή 10MPa. Η μονάδα ελέγχου έχει μανόμετρο υψηλής πίεσης ως 15MPa και χαμηλής 0 – 2,5MPa, ενώ ο ογκομετρικός κανόνας έχει υποδιαιρέσεις 0,5 cm³ ή μικρότερων, για τη μέτρηση μεταβολής του όγκου του νερού.

Τέλος, όσον αφορά στη διαδικασία των μετρήσεων και της τελικής έκθεσης της δοκιμής, συμβαίνει ότι και για τα εδάφη.

5 ΟΔΗΓΙΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΠΡΕΣΣΙΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ-ΕΠΙΛΥΣΗ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΟΣ

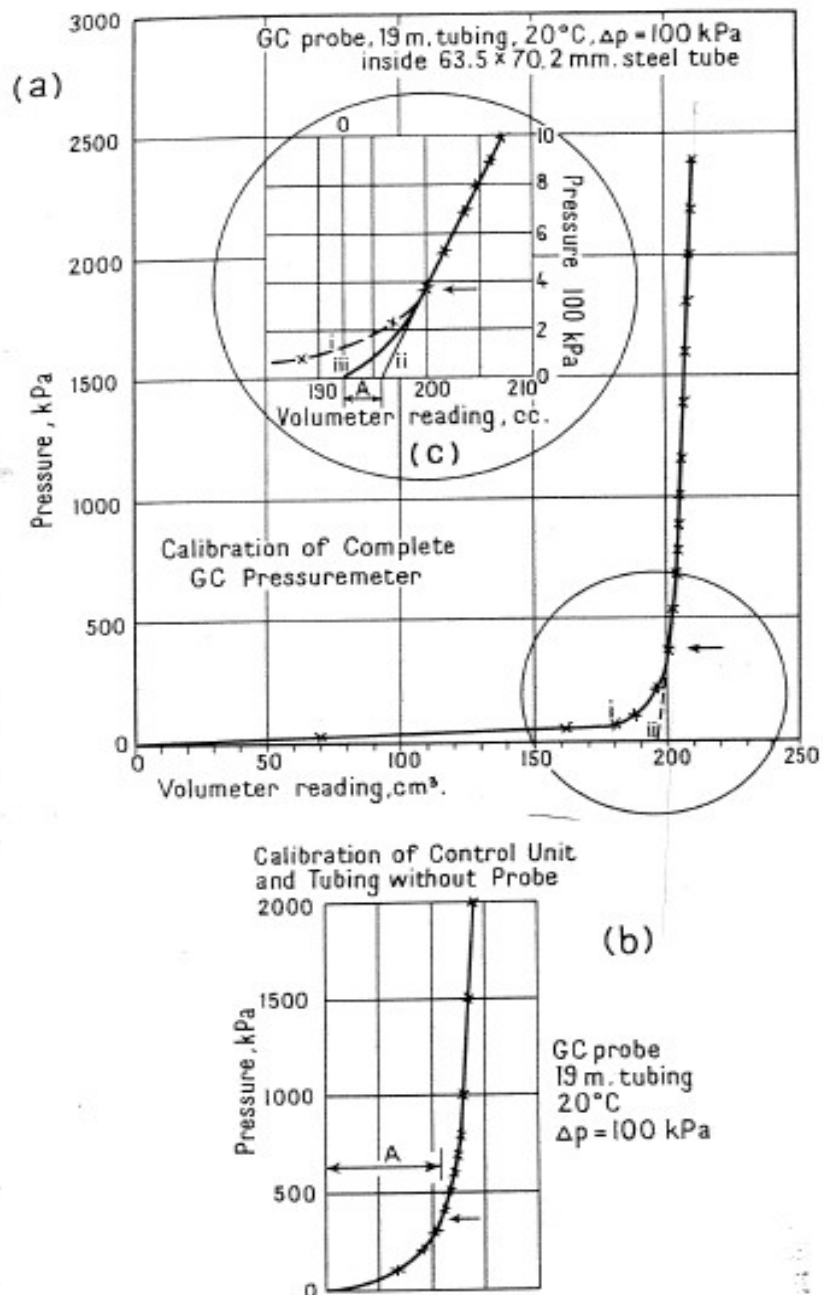
Για να υπολογιστεί η πραγματική πίεση-παραμόρφωση του εδάφους, είναι απαραίτητες οι διορθώσεις όγκου και πιέσεων. Στα παρακάτω χρησιμοποιείται το παράδειγμα του βιβλίου “The Pressuremeter and foundation engineering” (Baguelin, J. F. Jezequel, D.H. Shields, 1978) και ακολούθως η επίλυση αυτού, η οποία πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του excel.

5.1 Απώλειες όγκου

Οι απώλειες όγκου μετριοούνται κατά τη διάρκεια της βαθμονόμησης του πρεσσιομέτρου. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος σημειώνεται, καθότι η βαθμονόμηση είναι ευαίσθητη στη θερμοκρασία. Αυτό σημαίνει πως πρέπει να αποφεύγονται οι μεταβολές θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια των μετρήσεων (για παράδειγμα, οι σωλήνες και η μονάδα ελέγχου φυλάσσονται μακριά από τον ήλιο), και η βολίδα του πρεσσιομέτρου και ο χαλύβδινος σωλήνας πρέπει να παραμένουν στην κανονική θερμοκρασία λειτουργίας τους. Για να εξασφαλιστεί αυτό, χρειάζεται συχνά η βολίδα και ο χαλύβδινος σωλήνας να τοποθετούνται σε νερό ίδιας θερμοκρασίας με αυτή των υπόγειων υδάτων.

Η βαθμονόμηση για τις απώλειες όγκου, γίνεται με τη βολίδα στα παχιά τοιχώματα του κυλινδρικού σωλήνα. Η πίεση αυξάνεται με σειρά διαβαθμίσεων – συνήθως με σχετικά μικρές προσαυξήσεις στην αρχή (της τάξεως των 100KPa) μέχρι η μεμβράνη να έρθει σε πλήρη επαφή με τα τοιχώματα της γεώτρησης, και στη συνέχεια με μεγαλύτερες (της τάξεως των 300 ή 400KPa), μέχρι να επιτευχθεί η μέγιστη πίεση λειτουργίας. Κάθε βαθμίδα αύξησης της πίεσης πραγματοποιείται για ένα λεπτό και καταγράφονται οι ενδείξεις πίεσης και όγκου. Βάσει αυτών σχεδιάζεται η πρώτη πρεσσιομετρική καμπύλη. Στο Σχήμα 5.1 φαίνονται τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης ενός πρεσσιομέτρου τύπου GC.

Λόγω του κενού που υπάρχει ανάμεσα στην πρεσσιομετρική βολίδα και στον χαλύβδινο σωλήνα, αλλά και λόγω της αντίστασης της μεμβράνης, χρειάζεται κάποιος όγκος και πίεση μέχρι τη στιγμή που η βολίδα θα έρθει σε πλήρη επαφή με το σωλήνα.



Σχήμα5. 1: Βαθμονόμηση όγκου πρεσσιομέτρου GC

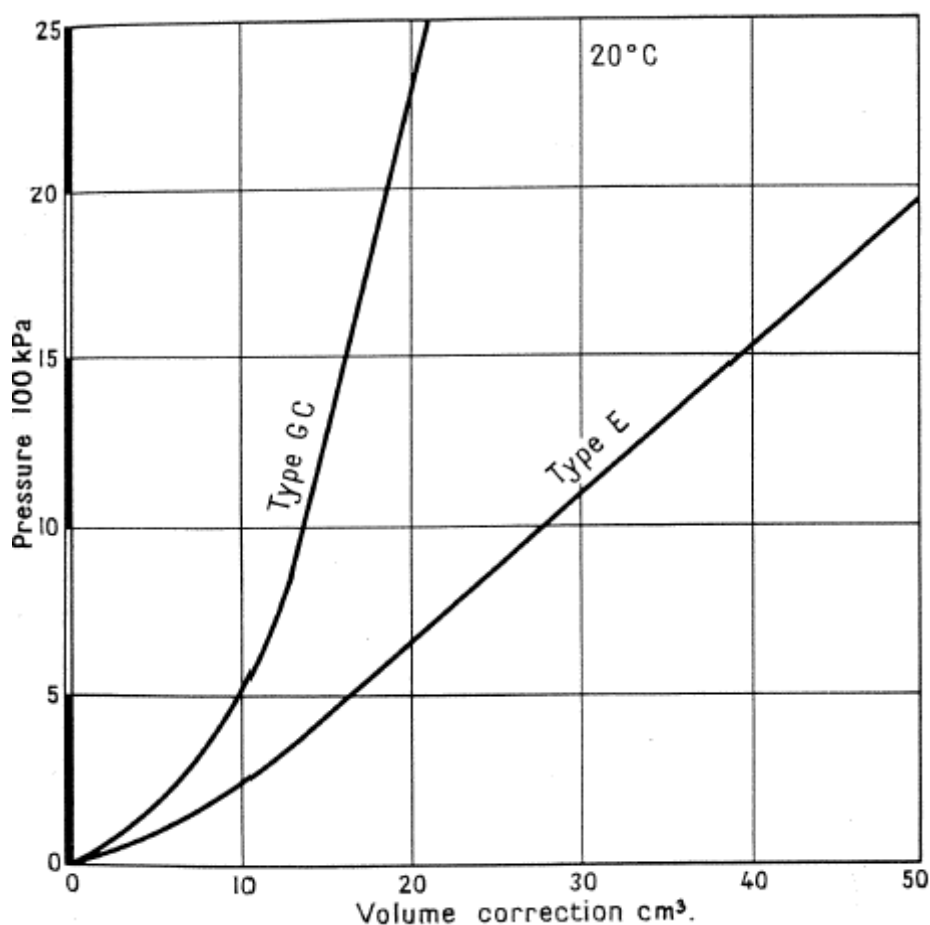
Για παράδειγμα, στο διάγραμμα του σχήματος 5.1.a θεωρείται ότι η συγκεκριμένη επαφή γίνεται στο σημείο που δείχνει το βέλος, δηλαδή στα 360KPa. Για μεγαλύτερες πιέσεις από αυτήν, οι πραγματικές απώλειες όγκου στη βολίδα, τη μονάδα ελέγχου και το χαλύβδινο σωλήνα είναι μετρούμενες. Το βασικό πρόβλημα είναι η εκτίμηση της διόρθωσης του όγκου ανάμεσα στη μηδενική (ατμοσφαιρική) πίεση και στο σημείο επαφής, δηλαδή στο διάστημα 0 – 360KPa στο συγκεκριμένο παράδειγμα. Ένας τρόπος για τη

λύση αυτού είναι να επεκτείνεται η εφαπτομένη πίσω στο μηδέν, όπως δείχνει η γραμμή ii στο διάγραμμα. Αυτή, βέβαια, είναι μία μέθοδος που υποτιμά τις διορθώσεις σε αυτό το χαμηλό εύρος πιέσεων. Αυτό φαίνεται, βαθμονομώντας τη μονάδα ελέγχου και το χαλύβδινο σωλήνα, χωρίς την πρεσσιομετρική βολίδα, όπως φαίνεται στο διάγραμμα του σχήματος 5.1.b. . Προκειμένου να γίνει αυτό, είναι απαραίτητο να κλείσει η άκρη του σωλήνα με μία ειδική βαλβίδα, σχεδιασμένη για αυτό το σκοπό και να απαερώνεται η μονάδα ελέγχου και ο σωλήνας. Στο παράδειγμα, φαίνεται ότι στις τιμές πίεσης 0 – 360KPa έχουν χαθεί περίπου 4cm^3 , λόγω του προαναφερθέντος, αλλά επίσης οι απώλειες μέχρι τα 360KPa είναι σχεδόν αμελητέες. Η απώλεια 4cm^3 σημειώνεται ως “A”.

Η καμπύλη iii στο διάγραμμα του σχήματος 5.1.c χρησιμοποιεί το A για να βρει το σημείο εκκίνησης στο μηδέν της πίεσης, όπως απεικονίζεται. (Η καμπύλη i δείχνει τα πραγματικά αποτελέσματα, όπως μετρήθηκαν από τη δοκιμή με τη βολίδα να βρίσκεται μέσα στον χαλύβδινο σωλήνα). Η διαφορά ανάμεσα στις καμπύλες ii και iii είναι ότι στο διάγραμμα του σχήματος 5.1.b η καμπύλη σταδιακά τείνει στο μηδέν στα 360KPa ακολουθώντας την εξέλιξη της καμπύλης. Το σημείο εκκίνησης για την καμπύλη iii είναι το σημείο του μηδενός για την διόρθωση όγκου σε μηδενική πίεση και είναι το σημείο αναφοράς για τη βαθμονόμηση όγκου. Στο διάγραμμα του σχήματος 5.1.c το “νέο μηδέν” είναι στο $V_m = 192\text{cm}^3$. Έτσι, η διόρθωση όγκου στα 900KPa, για παράδειγμα, είναι 14cm^3 ($206 - 192$) και στα 2000KPa είναι 18cm^3 ($210 - 192$). Η διορθωμένη καμπύλη στο διάγραμμα του σχήματος 5.2) είναι σχεδιασμένη βάσει των παραπάνω.

Ωστόσο, σε περίπτωση που οι απώλειες στη μονάδα ελέγχου και το σωλήνα δεν είναι αμελητέες, αφού έχει γίνει η επαφή βολίδας και σωλήνα, που πρόκειται για την περίπτωση πρεσσιομέτρου E, πρέπει και αυτές να ληφθούν υπόψη για το σχεδιασμό της καμπύλης ii στο διάγραμμα σχήματος 5.1. Δηλαδή, η διόρθωση “A” πραγματοποιείται με εφαπτομένη στην καμπύλη που αντιπροσωπεύει μόνο τις απώλειες της βολίδας, πάνω από την πίεση επαφής.

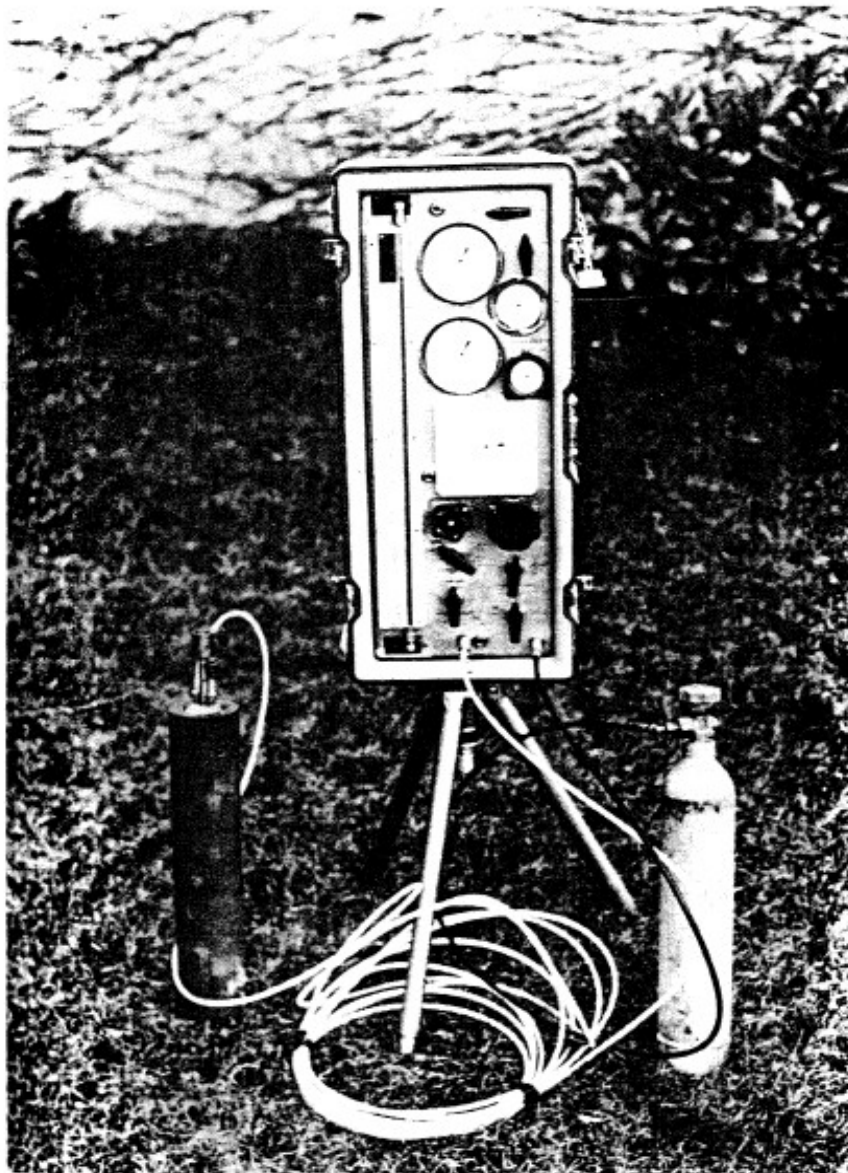
Σαν γενικός κανόνας, η βαθμονόμηση όγκου πρέπει να γίνεται κάθε φορά που συμβαίνει κάτι σημαντικό στο πρεσσιόμετρο. Όταν, για παράδειγμα, ανανεώνεται ο σωλήνας, αντικαθίσταται το αντιψυκτικό για το νερό ή αλλάζει η θερμοκρασία στην οποία πραγματοποιείται η δοκιμή. Σε σκληρά εδάφη και βράχους ακόμα και μία πιο μικρή διόρθωση παίζει σημαντικό ρόλο στην τιμή του πρεσσιομετρικού μέτρου παραμόρφωσης E_m , και άρα χρειάζεται μεγαλύτερη προσοχή.



Σχήμα5. 2: Παράδειγμα πραγματικών καμπύλες βαθμονόμησης όγκου για πρεσσιόμετρα τύπου GC και E

Στο μηχάνημα καταγραφής του όγκου καταγράφεται μόνο το ποσό του νερού που εγχύεται στη βολίδα, αλλά δεν φαίνεται άμεσα το μέγεθος του κεντρικού θαλάμου μέτρησης, ούτε το μέγεθος της κοιλότητας του εδάφους. Όμως, για να υπολογιστούν τα E_M και ρ_l τα μεγέθη αυτά είναι αναγκαία. Έτσι, ο αρχικός όγκος του κεντρικού θαλάμου μέτρησης της βολίδας V_c , μετράται με το μηχάνημα καταγραφής του όγκου στο μηδέν. Ο πραγματικός όγκος του κεντρικού θαλάμου μέτρησης, με ατμοσφαιρική πίεση στη μονάδα ελέγχου, εξαρτάται από το πάχος και την αντίσταση της μεμβράνης και του σωλήνα, καθώς και από την υδροστατική πίεση στον κεντρικό θάλαμο μέτρησης, λόγω της διαφοράς ύψους ανάμεσα στη μονάδα ελέγχου και στη βολίδα. Ο αρχικός όγκος του κεντρικού θαλάμου μέτρησης της βολίδας V_c , πρέπει να είναι ο ίδιος και για τη βαθμονόμηση της πίεσης, καθώς η διόρθωση της μεμβράνης μπορεί να βασίζεται μόνο σε μετρήσεις όγκου. Ένας τρόπος να εξασφαλιζεται αυτό, είναι να ορίζεται ο όγκος V_c ως ένα σταθερό

αριθμητικό ποσό, όπως 535 cm^3 για βολίδες Ménard μεγέθους AX και BX, σύμφωνα με το Centre d' Etudes Ménard. Ένας τρόπος να γίνεται αυτό ενώ η βολίδα είναι μέσα στα παχιά τοιχώματα του χαλύβδινου σωλήνα είναι η ακόλουθη διαδικασία.



Σχήμα5. 3: Βαθμονόμηση απωλειών όγκου για πρεσσιόμετρο τύπου GC.

Αρχικά, η βολίδα διογκώνεται σε πίεση 500 KPa , με προσοχή να εφαρμόζεται η απαιτούμενη διαφορική πίεση ανάμεσα στον κεντρικό θάλαμο μέτρησης της βολίδας και στους δύο ακριανούς θαλάμους. Σε αυτήν την πίεση η μεμβράνη πρέπει να έρχεται σε πλήρη επαφή με τα τοιχώματα του σωλήνα. Από το γνωστό μήκος του κεντρικού θαλάμου μέτρησης και την εσωτερική διάμετρο του χαλύβδινου σωλήνα, υπολογίζεται ο όγκος του

κεντρικού θαλάμου μέτρησης. Για παράδειγμα, για GC βολίδα μεγέθους ΒΧ, με μήκος κεντρικού θαλάμου μέτρησης 210mm και διάμετρο χαλύβδινου σωλήνα 63.5mm, ο όγκος του κεντρικού θαλάμου μέτρησης υπολογίζεται: $V = \pi d^2/4 = 665\text{cm}^3$. Στη συνέχεια υπολογίζεται ο ζητούμενος όγκος, λαμβάνοντας υπόψη την κατάλληλη διόρθωση όγκου, ώστε όταν η πίεση είναι μικρότερη της ατμοσφαιρικής, μία μέτρηση όγκου στο μηδέν θα αντιστοιχεί στην τιμή που έχει επιλεχθεί νωρίτερα (V_c). Αν, λοιπόν, $V_c = 535\text{cm}^3$ και η διόρθωση όγκου $V_d = 10\text{cm}^3$ στα 500KPa ($V_d = V_{500} = 202 - 192 = 10\text{cm}^3$) (διάγραμμα του Σχήματος 5.2), τότε ο ζητούμενος όγκος είναι $V_m = V + V_d - V_c = 665 + 10 - 535 = 140\text{cm}^3$. Γενικότερα, η ακριβής μέτρηση του όγκου θα είναι διαφορετική από την τιμή που υπολογίζεται, οπότε γίνεται αναγκαία η προσθήκη ή η αφαίρεση νερού, ώστε να ισχύει πάντα $V_m = 140\text{cm}^3$.

Όταν η πίεση είναι η ατμοσφαιρική, τότε ο αρχικός όγκος του κεντρικού θαλάμου μέτρησης της βολίδας V_c θα είναι ο σωστός. Η πραγματική μέτρηση στην ατμοσφαιρική πίεση μπορεί να είναι διάφορη του μηδενός (εξαρτάται από την αντίσταση της μεμβράνης και από τη στάθμη της βολίδας σε σχέση με τη μονάδα ελέγχου). Αυτό, όμως, δεν παίζει ρόλο στην τιμή του V_c για μετέπειτα χρήση στους υπολογισμούς. Δηλαδή, ο όγκος V_c είναι ένα προεπιλεγμένο αριθμητικό ποσό. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα είναι 535cm^3 , όπως συνίσταται από το Centre d' Etudés Ménard.

Ακόμα, η τιμή του όγκου V_c , ο αρχικός όγκος του κεντρικού θαλάμου μέτρησης μπορεί να υπολογιστεί. Αυτό μπορεί να γίνει με τη χρήση παχυμετρικού διαβήτη για να υπολογιστεί η εξωτερική διάμετρος του κεντρικού θαλάμου μέτρησης της βολίδας, σε έναν επαρκή αριθμό σημείων και από τον μέσο όρο αυτών υπολογίζεται ο όγκος V_c . Εναλλακτικά, με τη χρήση του χαλύβδινου σωλήνα υπολογίζεται η διόρθωση όγκου V_d και από εκεί υπολογίζεται ο όγκος V_c . Με τους δύο τελευταίους τρόπους, οι μετρήσεις και οι υπολογισμοί θα πρέπει να γίνονται κάθε φορά, ενώ με την επιβολή μίας τιμής για το V_d αρκεί να γίνουν μία φορά, εφόσον χρησιμοποιείται το ίδιο κομμάτι του χαλύβδινου σωλήνα και το μήκος του κεντρικού θαλάμου μέτρησης, καθώς και το V_d διατηρούνται σταθερά. Ακόμα, είναι απαραίτητο να μην προστίθεται, ούτε να αφαιρείται νερό για να έχει ισχύ η δοσμένη τιμή στο V_c .

5.2 Απώλειες πιέσεων

Κατά τη διόγκωση της βολίδας, είναι απαραίτητη κάποια συγκεκριμένη πίεση, ώστε

ξεπεραστεί η αντίσταση της μεμβράνης και του εύκαμπτου καλύματος. Έτσι, η πίεση που πραγματικά ασκείται στο έδαφος είναι μικρότερη από αυτή της βολίδας. Η απώλεια αυτής της πίεσης υπολογίζεται με τον ακόλουθο τρόπο και είναι γνωστή και ως “διόρθωση μεμβράνης” ή “αντίσταση μεμβράνης” είτε υπάρχει κάλυμα της βολίδας, είτε πρόκειται για βολίδα με σχισμές παράλληλες προς τον άξονά του σωλήνα της (slotted tube). Όταν το πρεσσιόμετρο είναι έτοιμο και έχει οριστεί ο αρχικός όγκος του κεντρικού κελιού μέτρησης V_c , η βολίδα θα πρέπει να είναι όρθια στην επιφάνεια του εδάφους και να διογκώνεται και να επανέρχεται στην αρχική της κατάσταση τέσσερις με πέντε φορές μέχρι το μηχάνημα καταγραφής του όγκου να φτάσει τα 700cm^3 (Εικόνα 5.4). Ο λόγος που τοποθετείται όρθια είναι ότι πρέπει να λειτουργεί σε παραπλήσιες συνθήκες με τις κανονικές συνθήκες λειτουργίας της μέσα στην κατακόρυφη γεώτρηση. Αν αφεθεί οριζόντια στο έδαφος, τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης μπορεί να επηρεαστούν καθώς το βάρος της βολίδας μπορεί να μεταβάλλει τη συμπεριφορά της μεμβράνης ή του καλύματος. Η βολίδα διογκώνεται και επανέρχεται στην αρχική της κατάσταση λίγες φορές, καθώς η εμπειρία έχει δείξει πως η καινούρια μεμβράνη και το κάλυμα που χρησιμοποιούνται ή ακόμα και η μεμβράνη και το κάλυμα που έχουν μείνει για ένα βράδυ, πρέπει να έχουν τεντωθεί κάποιες φορές πριν τη διαδικασία της βαθμονόμησης, προκειμένου τα αποτελέσματα να είναι συνεπή και αξιόπιστα.

Η βολίδα πρέπει να διογκώνεται αργά χρησιμοποιώντας 9 – 10 διαβαθμίσεις πίεσης μέχρι να φτάσει στο μέγιστο όγκο. Το μέγεθος των προσαυξήσεων υπολογίζεται από την πίεση που απαιτείται για να δουλέψει η μεμβράνη τις 4 – 5 φορές πριν τη βαθμονόμηση. Η πίεση ασκείται για ένα λεπτό σε κάθε προσαύξηση, και καταγράφονται οι τιμές που δίνει το μηχάνημα καταγραφής του όγκου στα 15, 30 και 60sec. Οι τιμές αυτές καταγράφονται σε έναν πίνακα και αυτές των 60sec σχεδιάζονται σε ένα διάγραμμα. (σχήμα 5.5)

Η υδροστατική πίεση λόγω της υψομετρικής διαφοράς του μανομέτρου στη μονάδα ελέγχου και στο μέσον του κεντρικού θαλάμου μέτρησης της βολίδας, πρέπει να σημειώνονται. Η πραγματική πίεση στη βολίδα υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$p_r = p_m + \gamma_w * h_0,$$

όπου:

p_m = η πίεση του μανομέτρου,

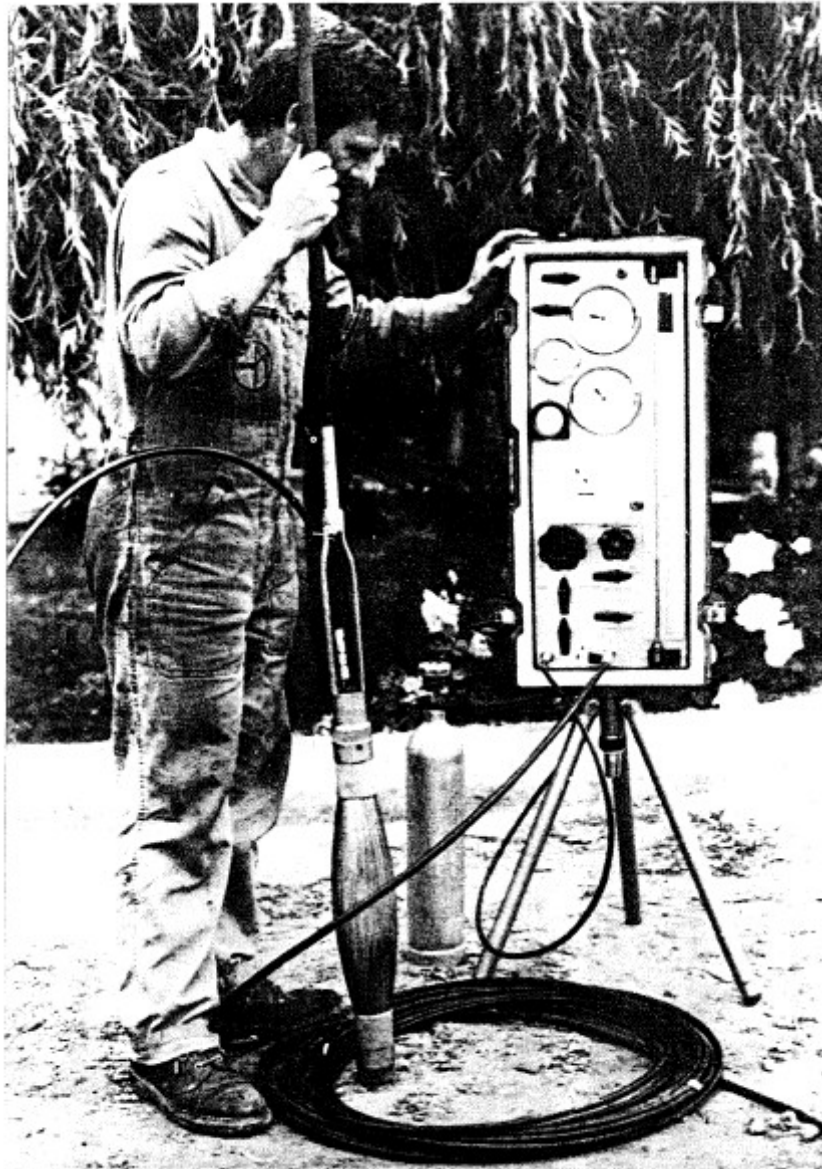
γ_w = η μοναδιαίο βάρους του νερού και

h_0 = η υψομετρική διαφορά ανάμεσα στο μανόμετρο της μονάδας ελέγχου και του μέσου

του κεντρικού θαλάμου μέτρησης, κατά τη διάρκεια της βαθμονόμησης.

Αυτό εξηγεί τη διόρθωση των 7KPa στον πίνακα του σχήματος 5.5. Αν η βολίδα είναι στο ίδιο ύψος με το μανόμετρο, κατά τη διάρκεια της βαθμονόμησης, τότε η διόρθωση δεν υφίσταται.

Η αντίσταση της μεμβράνης εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Θα πρέπει, λοιπόν, να βαθμονομείται κάθε φορά που το κάλυμα ή η μεμβράνη αντικαθίσταται. Ακόμα, το ίδιο κάλυμα και η ίδια μεμβράνη πρέπει να ξαναβαθμονομείται κάθε 20 δοκιμές.



Σχήμα5. 4: Βαθμονόμηση βολίδας τύπου GC με χαλύβδινο κάλυμα

Στο παρακάτω διάγραμμα του σχήματος 5.6 φαίνονται παραδείγματα διόρθωσης πιέσεων για τυπικούς συνδυασμούς καλυμάτων και μεμβρανών.

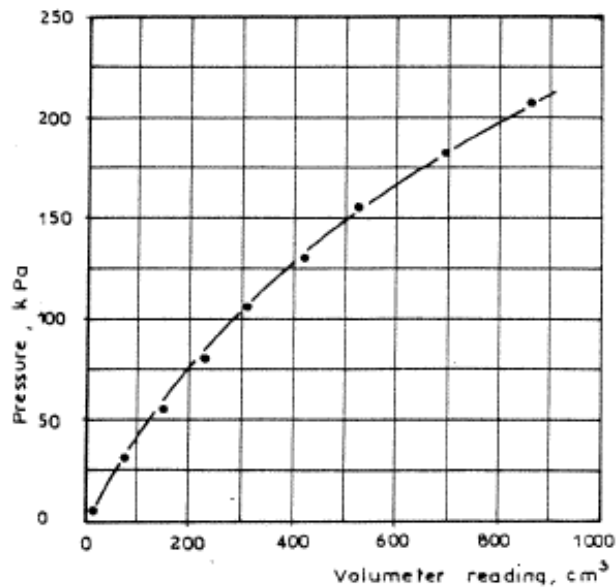
Calibration of Membrane Resistance

Cal No R 236-76 Site Valley Bottom Date 29 Feb 76
 Unit 44-GC Sheath Metallc Membrane Std Rubber
 Prob ϕ 8X h₀ 0.7m = 7 kPa Recommend.Press.Diff. 140 kPa

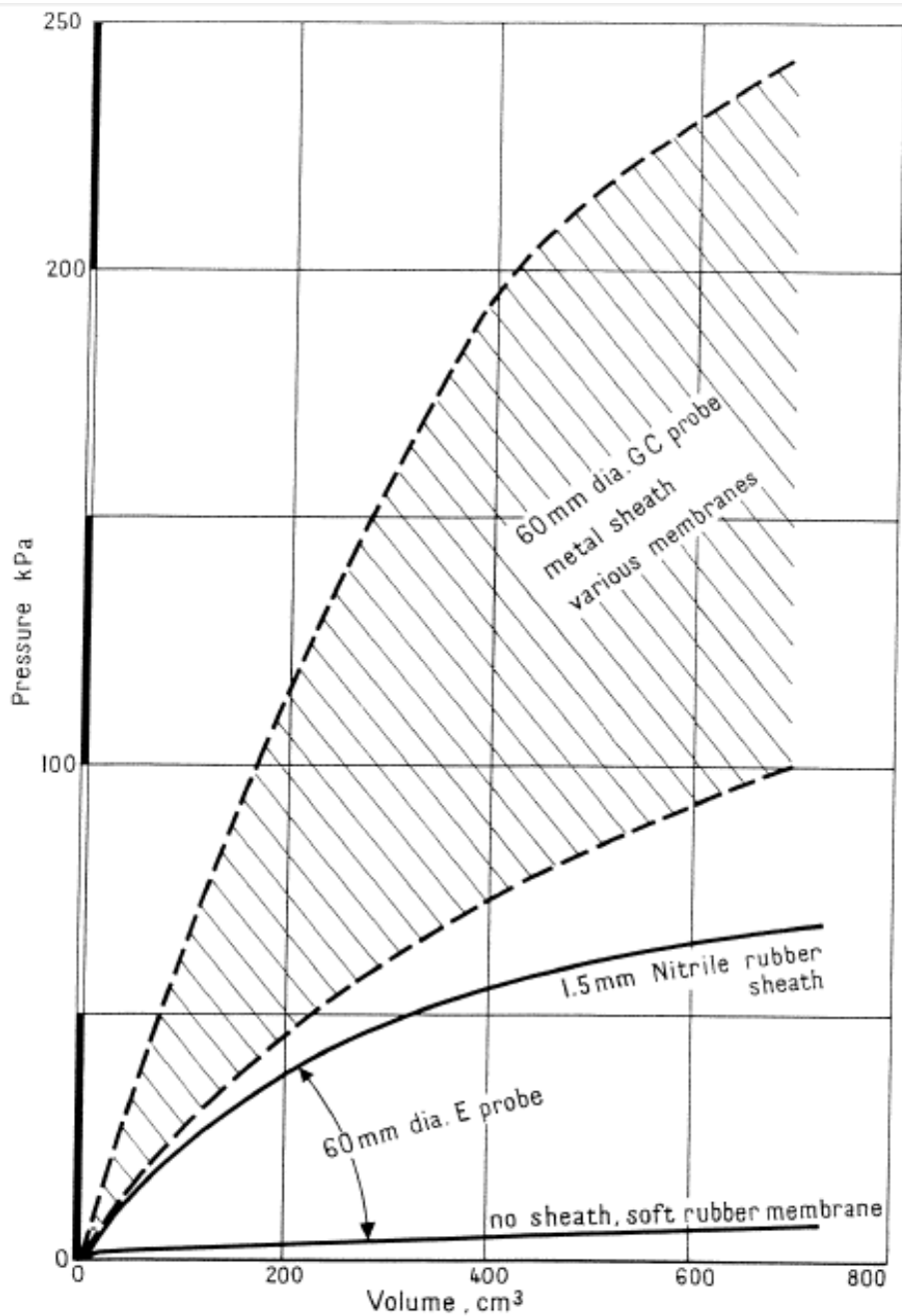
Note: Calibration to be carried out after setting initial volume to 538cm³

Press kPa	Diff kPa	Time sec	Vol cm ³	Cor. P cm ³
0	0		42	7
25	0	15	43	
	0	30	52	
	0	60	72	32
50	0	15	114	
	0	30	124	
	0	60	150	57
75	0	15	195	
	0	30	206	
	0	60	230	82
100	0	15	266	
	0	30	281	
	0	60	305	107
125	20	15	364	
	18	30	383	
	18	60	424	132

Press kPa	Diff kPa	Time sec	Vol cm ³	Cor. P cm ³
150	40	15	460	
	37	30	480	
	38	60	524	157
175	67	15	646	
	65	30	641	
	65	60	697	182
200	30	15	762	
	92	30	796	
	94	60	860	207



Σχήμα 5. 5: Πίνακες καταγραφής και καμπύλη αντίστασης της μεμβράνης



Σχήμα 5. 6: Παραδείγματα αντίστασης μεμβράνης για βολίδες τύπου E και GC. (BRU, 1974)

5.3 Ανάλυση Δοκιμής

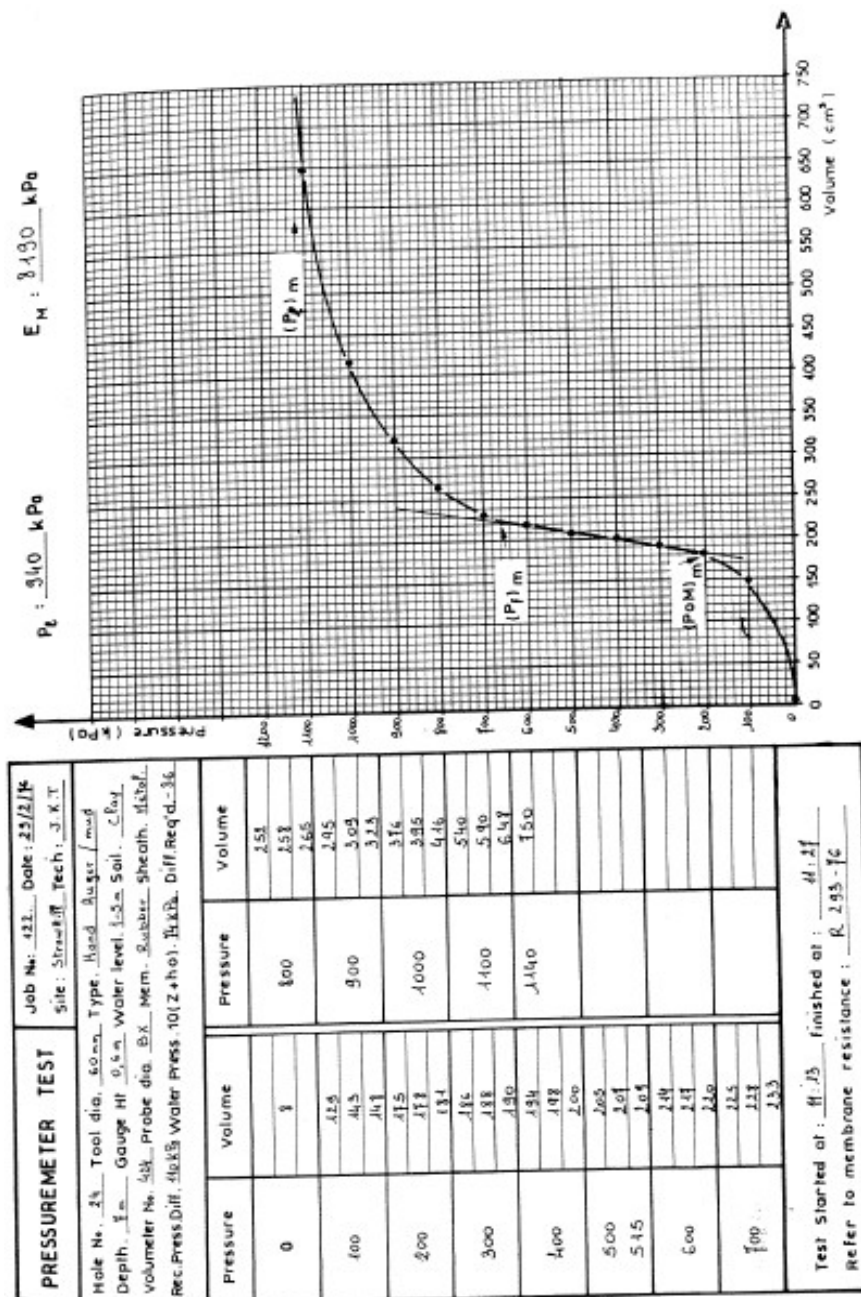
Στη συνέχεια, ο χειριστής πρέπει να κάνει την ανάλυση της πρεσσιομετρικής δοκιμής κατά τη διάρκεια αυτής. Συγκεκριμένα, πρέπει να αυξάνει το V_0 και να κρίνει πότε έχει επιτευχθεί η γειτνίαση του ρ . Πρέπει να ελέγχει, ακόμα, αν η γεώτρηση έχει ανοιχθεί σωστά. Αυτό συμβαίνει γιατί αν η γεώτρηση δεν είναι ικανοποιητική, τότε πιθανότατα να

μην γίνουν άλλες δοκιμές σε αυτή. Οι διαδικασίες που μπορεί να ακολουθήσει ο χειριστής για να ελέγχει τα παραπάνω είναι δύο και αναλύονται ακολούθως.

1. Χρησιμοποιώντας τον πίνακα του σχήματος 5.7 . Εκτός από τη στήλη που προορίζεται για τις αναγνώσεις πίεσης και όγκου στη μονάδα ελέγχου, υπάρχει και η στήλη για τους κατάλληλους υπολογισμούς που πρέπει να γίνονται κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Αυτοί οι υπολογισμοί είναι οι δύο. Αρχικά, πρόκειται για τον ερπυσμό κατά τη διάρκεια αύξησης της πίεσης. Στην περίπτωση αυτή, υπολογίζεται η διαφορά των μετρήσεων του όγκου στα 60sec και στα 30sec. Για παράδειγμα, στα 300KPa πίεσης, ο ερπυσμός είναι $190 - 188 = 2\text{cm}^3$. Ο υπολογισμός του ερπυσμού δείχνει ότι τα V_0 και ρ_{0M} αντιστοιχούν σε τιμές πίεσης 200KPa, όπου δηλαδή οι τιμές ερπυσμού εμφανίζονται αρχικά μικρές. Ακόμα, τα V_f και ρ_f είναι κοντά στα 600 – 700KPa, ανάμεσα στα οποία υπάρχει απότομη αύξηση του ερπυσμού. Με τις πληροφορίες αυτές, ο χειριστής μπορεί να καταλάβει αν η γεώτρηση είναι βαθμονομημένη σωστά με το V_0 μικρότερο από 200KPa και ότι η δοκιμή έχει περάσει το τέλος του ευθύγραμμου τμήματος που αντιστοιχεί στην καμπύλη δοκιμής. Στη συνέχεια, υπολογίζονται οι παραμορφώσεις ανάμεσα σε δύο αυξήσεις πίεσης, σχετικά με τα βασικά στοιχεία των μετρήσεων ανά λεπτό. Οι διαφορές αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση των V_0 και ρ_{0M} , χρησιμοποιώντας τον ερπυσμό. Ωστόσο, πάνω από όλα, οι διαφορές αυτές χρησιμοποιούνται για να κριθεί κατά πόσον η δοκιμή περνάει, μετά την ψευδοελαστική, στην πλαστική φάση η οποία αντιστοιχεί στο ευθύγραμμο τμήμα της καμπύλης δοκιμής, και κατά πόσον έχει επιτευχθεί η γειτνίαση του ρ_i .
2. Σχεδιάζοντας μία πρώτη πρεσσιομετρική καμπύλη (διάγραμμα του σχήματος 5.8) . Σε αυτή την περίπτωση σημειώνονται οι τιμές όγκου που δίνει το μηχάνημα μέτρησης του όγκου στο τέλος κάθε αύξησης της πίεσης, δηλαδή στα 60sec.

PRESSUREMETER TEST					Job No. <u>122</u> Date. <u>23 Feb 1976</u> Site. <u>Straw Hill School</u> Tech <u>J.K.T</u>				
Hole No. <u>24</u> Tool dia. <u>60 mm.</u> Type <u>Hand auger with Bentonite</u>					Depth <u>7 m.</u> Gauge Ht <u>0.6 m.</u> Water level <u>1.5 m</u> Soil <u>Silty Clay</u>				
Volumeter No. <u>424 G.C</u> Probe dia <u>B X</u> Membrane <u>Std. rubber</u> Sheath <u>metallic</u>					Rec. Press. Diff. <u>110 kPa</u> Water Press. (Z + ha) <u>74 kPa</u> Diff. Req'd <u>-36 kPa</u>				
Pressure kPa	Time sec	Volume cm ³	Guard Cell Pressure or Differ. kPa	Creep ①	Pressure kPa	Time sec	Volume cm ³	Guard Cell Pressure or Differ. kPa	Creep
				Change ②					Change
0		8			0 reading set for V ₀ = <u> </u> cm ³				
100	15	123	-36	5	300	15	295	-35	14
	30	143	-36			30	309	-36	
	60	148	-37			60	323	-36	
200	15	175	-38	3	1000	15	376	-39	21
	30	198	-39			30	395	-37	
	60	181	-37			60	416	-36	
300	15	186	-36	2	1100	15	540	-50	58
	30	188	-36			30	590	-55	
	60	190	-36			60	648	-45	
400	15	194	-35	2	1140	15	750		
	30	198	-36			30			
	60	200	-36			60			
500	15	205	-36	2		15			
	30	207	-34		30				
	60	209	-34		60				
515	15	214	-37	3		15			
	30	217	-36		30				
	60	220	-36		60				
600	15	219	-35	5		15			
	30	222	-36		30				
	60	233	-37		60				
700	15	225	-35	13		15			
	30	228	-36		30				
	60	233	-37		60				
800	15	252	-40	7		15			
	30	258	-40		30				
	60	265	-40		60				
① V ₆₀ - V ₃₀ ② V ₆₀ - V ₃₀					Refer to membrane resistance : <u>R 293 - 76</u>				
Test Started at : <u>11-13</u> finished at : <u>11-27</u>									
Remarks : <u>- differential pressure unstable at 1100 kPa.</u> <u>- sunny, dry, 20°C.</u>									

Σχήμα 5. 7: Πίνακες καταγραφής μετρήσεων της πρεσσιομετρικής δοκιμής



Σχήμα 5. 8: Πίνακας καταγραφής αποτελεσμάτων και πρώτη πρεσσιομετρική καμπύλη

5.4 Ερμηνεία αποτελεσμάτων

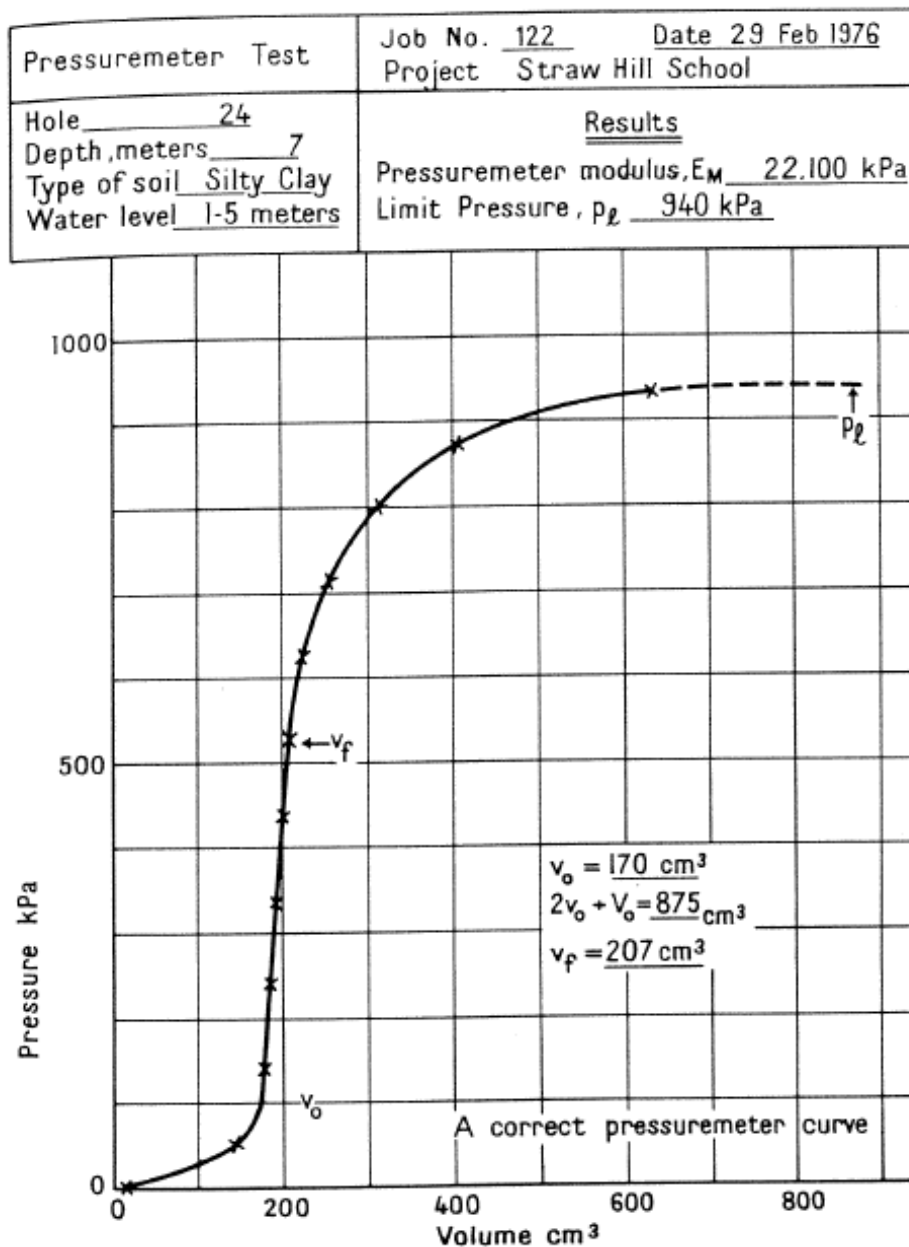
Εν συνεχεία, όσον αφορά στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων της δοκιμής, υπάρχουν δύο μέθοδοι που χρησιμοποιούνται, οι οποίες και ακολουθούν.

1. Σχεδιασμός της διορθωμένης πρεσσιομετρικής καμπύλης. Στην αρχή, οι

πληροφορίες που έχουν παρθεί από τη δοκιμή πρέπει να διορθωθούν για τις απώλειες όγκου και πίεσης. Ένας τρόπος να γίνει αυτό είναι να διορθωθούν οι τιμές που δίνονται κάθε ένα λεπτό, όπως φαίνεται στον πίνακα του Σχήματος 5.9. Οι τιμές του πίνακα λαμβάνονται από τον πίνακα του Σχήματος 5.7 και οι διορθώσεις από τις βαθμονομήσεις από τους πίνακες των Σχημάτων 5.2 και 5.5. Θεωρείται ότι η μηδενική ανάγνωση του μηχανήματος μέτρησης του όγκου έχει οριστεί στην τιμή του V_c στα 535cm^3 , ώστε οι τιμές αυτού να μπορούν να δίνονται ακριβώς και έτσι να λαμβάνεται η διόρθωση της μεμβράνης. Η διόρθωση του όγκου βασίζεται στις τιμές της στήλης (4) του πίνακα του Σχήματος 5.9, αφού έχει συνυπολογιστεί η υδροστατική πίεση, η οποία είναι σταθερή, καθώς εξαρτάται από την υψομετρική διαφορά του επιπέδου του νερού και της μονάδας ελέγχου, στις τιμές πίεσης του μανομέτρου. Οι διορθώσεις πίεσης βασίζονται στις διορθωμένες τιμές του όγκου της στήλης (6). Οι διορθωμένες τιμές όγκου και πίεσης, χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για τον σχεδιασμό της καμπύλης του σχήματος 5.10, η οποία είναι η διορθωμένη πρεσσιομετρική καμπύλη.

PRESSUREMETER TEST				Job No. <u>75-76</u> Date <u>2 March 76</u> Project <u>Strow Hill School</u>			
Hole No <u>24</u> Depth, m <u>1</u> Gauge Height, m <u>0.6</u> Membrane Calibration <u>R 293-76</u>				Note: zero volumeter reading corresponds to $V_0 = 535 \text{ cm}^3$ Volume Calibration <u>V 17-76</u>			
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
Increment	Pressure in Volumeter kPa	1 minute Volumeter Reading - cm^3	(2) Plus Hydrostatic Pressure, kPa	Volume Correction cm^3	Corrected Volume cm^3	Membrane Resistance kPa	Corrected Pressure kPa
0	0	8	6	0	8	5	1
1	100	148	106	4	144	55	51
2	200	184	206	6	178	64	142
3	300	190	306	7	183	68	238
4	400	200	406	9	191	70	336
5	500	209	506	10	199	75	431
6	600	220	606	11	209	80	526
7	700	233	706	12	221	83	623
8	800	265	806	13	252	90	716
9	900	323	906	13	310	106	800
10	1000	416	1006	14	402	133	813
11	1100	648	1106	14	634	173	933
12	1140	750 ⁺	1146	15	735 ⁺	190	956
13							
14							
15							
16							
17							
18							
19							

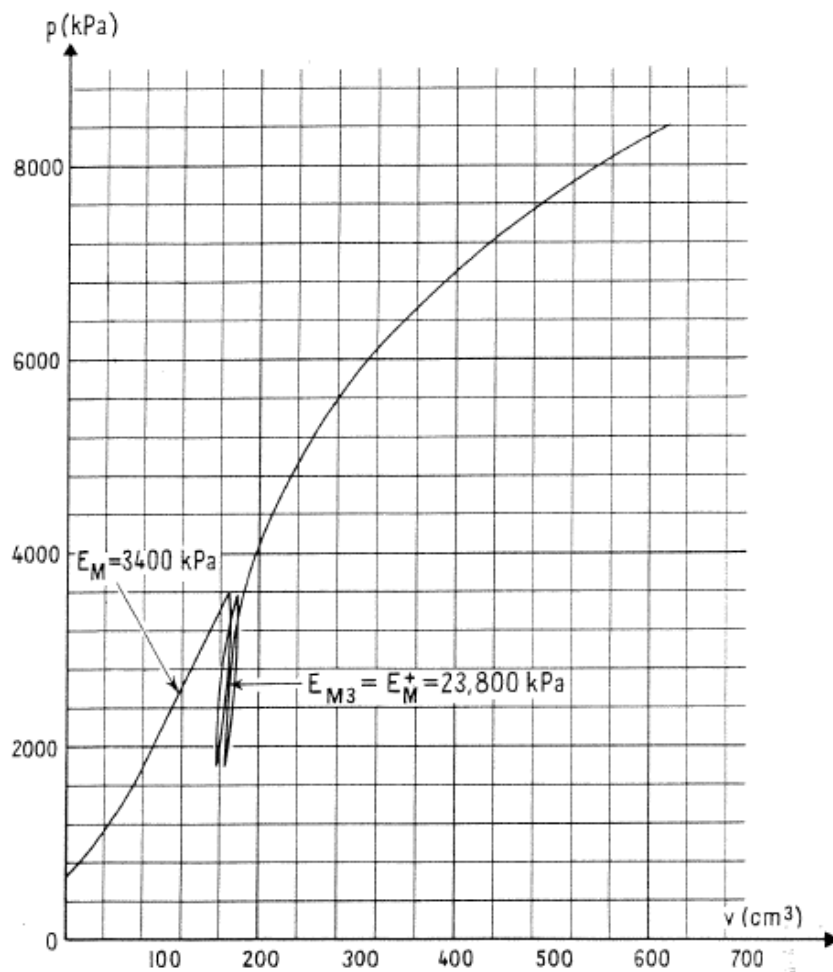
Σχήμα 5. 9: Υπολογισμοί διορθωμένων όγκων και πιέσεων για την πρεσσιομετρική δοκιμή



Σχήμα5. 10: Διορθωμένη πρεσσιομετρική καμπύλη

2. Σχεδιασμός της πρώτης πρεσσιομετρικής καμπύλης και διόρθωση ορισμένων σημείων όπως απαιτείται. (Διάγραμμα του Σχήματος 5.8) Συχνά οι τιμές που έχουν ληφθεί για την πίεση και τον όγκο, χαράσσονται σε μία καμπύλη p_m, V_m . Τα σημεία $(p_{0M})M$, $(p_f)M$ και $(p_l)M$ λαμβάνονται από την καμπύλη, μαζί με τις αντίστοιχες τιμές του V_m . Αυτά τα σημεία στη συνέχεια διορθώνονται για τις απώλειες όγκου και πιέσεων και τα αποτελέσματα, είναι σχετικά με αυτά της διορθωμένης πρεσσιομετρικής καμπύλης.

Στο διάγραμμα του Σχήματος 5.10 είναι φανερά τα διάφορα σημεία της διορθωμένης καμπύλης.



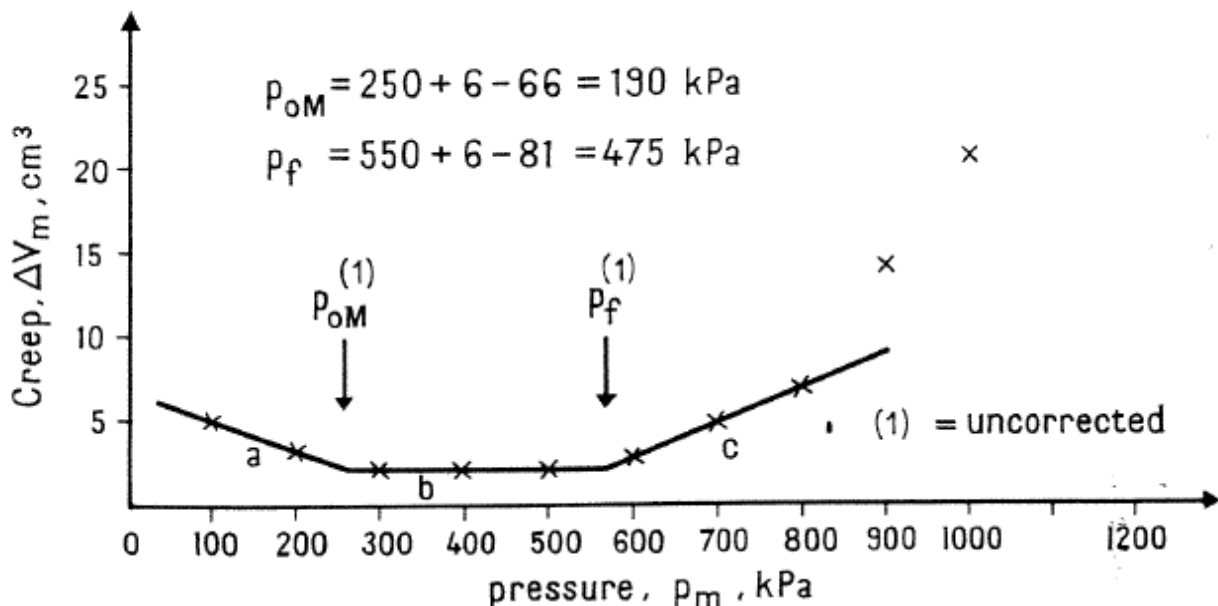
Σχήμα5. 11: Διορθωμένη πρότυπη καμπύλη δοκιμών σε γρανιτικό έδαφος

5.3.1 Οριακή πίεση

Στο τμήμα του διαγράμματος του Σχήματος 5.10, από το 0 μέχρι το V_0 , θεωρείται ότι η βολίδα διογκώνεται μέχρι τη στιγμή που έρχεται σε επαφή με τα τοιχώματα της γεώτρησης και σπρώχνει το έδαφος προς την αρχική του θέση, τη θέση, δηλαδή, που ήταν το έδαφος πριν τη διάνοιξη της γεώτρησης. Έτσι, το V_0 που είναι η αρχή του ευθύγραμμου τμήματος της καμπύλης αντιπροσωπεύει τον αρχικό όγκο της κοιλότητας και είναι η τιμή του όγκου η οποία πρέπει να διπλασιαστεί για την επίτευξη της οριακής πίεσης στο p_i , όπως για παράδειγμα, στο $2 V_0 + V_c$. Σε αυτήν την περίπτωση το p_i είναι 940KPa, βασισμένο στο $V_c = 535 \text{ cm}^3$ και στο $V_0 = 170 \text{ cm}^3$.

5.3.2 Πίεση ερπυσμού

Η πίεση p_f αντιστοιχεί στο σημείο p_f, V_f στο τέλος του ευθύγραμμου τμήματος της πρεσσιομετρικής καμπύλης και ονομάζεται πίεση ερπυσμού. Χρησιμοποιείται κυρίως για να υπολογιστεί το πρεσσιομετρικό μέτρο παραμόρφωσης E_m . Κάποιες φορές είναι δύσκολο να επισημανθεί ακριβώς το σημείο p_f, V_f και για αυτό το λόγο σχεδιάζεται η καμπύλη ερπυσμού, ως βοηθητική. Η καμπύλη ερπυσμού αποτελείται από τις τιμές του ερπυσμού (διάγραμμα σχήματος 5.7, creep) στον άξονα των ψ και από τις τιμές της πίεσης στον άξονα των χ (Διάγραμμα σχήματος 5.12). Η πίεση ερπυσμού, p_f , βρίσκεται στην τομή των δύο εφαπτομένων b και c . Από το διάγραμμα σχήματος 5.10 φαίνεται ότι η πίεση ερπυσμού p_f είναι της τάξης του 525KPa. Αυτό επαληθεύεται από το διάγραμμα σχήματος 5.12, όπου φαίνεται ότι είναι ίση με 475KPa. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η πίεση ερπυσμού p_f , για τον προσδιορισμό του πρεσσιομετρικού μέτρου παραμόρφωσης E_m , λαμβάνεται ίση με 525KPa.



Σχήμα5. 12: Διάγραμμα ερπυσμού

5.3.3 Όγκος V_f

Ο όγκος V_f είναι ο όγκος που αντιστοιχεί στην πίεση ερπυσμού p_f στην καμπύλη δοκιμής.

5.3.4 Οριζόντια ολική πίεση ηρεμίας, p_0 (και p_{0M})

Η οριζόντια ολική πίεση ηρεμίας του εδάφους πριν από τη διάνοιξη της γεώτρησης ή την έναρξη της δοκιμής είναι απαραίτητο να εκτιμάται για κάθε ύψος. Αυτό το μέγεθος ονομάζεται πίεση ηρεμίας και υπολογίζεται βάσει της παρακάτω εξίσωσης:

$$p_0 = [z \cdot \gamma - u] K_0 + u ,$$

όπου:

z = το βάθος από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι το κέντρο της βολίδας,

γ = το μοναδιαίο βάρος του εδάφους,

u = πίεση πόρων στο επίπεδο της βολίδας και

K_0 = ο συντελεστής της υπόλοιπης πίεσης του εδάφους

Οι τιμές για τα γ και K_0 λαμβάνονται, σύμφωνα με τον τύπο και την κατάσταση του εδάφους. Η πίεση πόρων, u , είναι πολύ κοντά στην υδροστατική πίεση και αυτό καθιστά πολύ απλό τον υπολογισμό της, βάσει του επιπέδου του υδροφόρου ορίζοντα. Για παράδειγμα, πάνω από το επίπεδο του υδροφόρου ορίζοντα θεωρείται μηδενική, ενώ αλλιώς υπολογίζεται από τον τύπο:

$$u = \gamma_w (z - h_w),$$

όπου:

γ_w = το μοναδιαίο βάρος του νερού και

h_w = το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα.

Άξιο προσοχής είναι το γεγονός ότι δεν πρέπει να συγχέεται η p_0 με την p_{0M} , την πίεση που αντιστοιχεί στον όγκο V_0 στην αρχή του ευθύγραμμου τμήματος της καμπύλης δοκιμής. Όταν, θεωρητικά, η p_{0M} θα πρέπει να είναι ίση με την p_0 , στην πράξη έχει βρεθεί ότι είναι πολύ δύσκολο να καθοριστεί με ακρίβεια η p_{0M} , εφόσον υπάρχουν ένα ή δύο το πολύ σημεία στην καμπύλη δοκιμής, σε αυτή την πρώιμη φάση της. Εξάλλου, αυτή η πρώιμη φάση είναι εκείνη που επηρεάζεται περισσότερο από τη διατάραξη των τοιχωμάτων της γεώτρησης. Η διατάραξη αυτή, όμως, είναι αναπόφευκτη και έτσι η p_{0M} δεν έχει καμία σχέση με την πραγματική πίεση του εδάφους. Επιπλέον, ο όγκος V_0 είναι εξίσου σημαντικός, καθώς ένα μικρό λάθος μπορεί να έχει κάποια επίπτωση στην πίεση p_i . Η εξαίρεση στον κανόνα ότι η p_0 πρέπει να υπολογιστεί, έρχεται με τις δοκιμές που πραγματοποιούνται σε έντονα υπερστερεοποιημένα εδάφη ή σε βράχους. Στις περιπτώσεις αυτές, είναι δυνατόν να προβλεφθεί ο συντελεστής K_0 και έτσι χρησιμοποιείται η πίεση p_{0M} . Ακόμη, η p_{0M} χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί το πρεσσιομετρικό μέτρο

παραμόρφωσης E_m , δεδομένου ότι συντονίζεται με τον όγκο V_0 , σε κάποιο σημείο του ευθύγραμμου τμήματος της καμπύλης δοκιμής.

5.3.5 Καθαρή οριακή πίεση p^*

Η καθαρή οριακή πίεση p^* , η οποία παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον στον σχεδιασμό θεμελίωσης, ορίζεται ως εξής:

$$p^* = p_i - p_0.$$

Είναι προφανές ότι αν η πίεση p_i είναι μεγάλη, και εφόσον εξετάζεται η p^* , τότε κάποιο λάθος στον υπολογισμό της πίεσης p_0 είναι αμελητέο. Αυτός είναι ένας ακόμα λόγος που η p_{0M} είναι αποδεκτή όταν πρόκειται για σκληρά εδάφη και βράχους, όπως προαναφέρθηκε. Αντίθετα, όταν η p_i είναι μικρή, είναι απαραίτητη η ακριβής εκτίμηση της p_0 . Αυτό συμβαίνει σε σχετικά μαλακά εδάφη, για τα οποία ο συντελεστής K_0 μπορεί να εκτιμηθεί σε έναν λογικό βαθμό εμπιστοσύνης. Έτσι, η πίεση p_0 υπολογίζεται με αρκετή ακρίβεια.

5.3.6 Πρεσσιομετρικό μέτρο παραμόρφωσης E_M

Ανάμεσα στο V_0 και το V_f , το έδαφος συμπεριφέρεται λιγότερο ή περισσότερο σαν ελαστικό υλικό, δεδομένου ότι η καμπύλη είναι σχεδόν ευθεία στην συγκεκριμένη περιοχή. Η εξίσωση της ακτινικής επέκτασης της κυλινδρικής κοιλότητας σε άπειρο ελαστικό μέσο είναι:

$$G = V * \Delta p / \Delta V,$$

όπου:

G = το μέτρο διάτμησης,

V = ο όγκος της κοιλότητας και

p = η πίεση στην κοιλότητα.

Για κάθε πρεσσιομετρική δοκιμή, $\Delta V = \Delta v$, και η εξίσωση γίνεται:

$$G = V * \Delta p / \Delta v.$$

Όταν $\Delta p / \Delta v$, δηλαδή η κλίση της πρεσσιομετρικής καμπύλης, είναι σταθερή από την τιμή V_0 μέχρι την V_f , ο όγκος V δεν είναι σταθερός. Ως εκ τούτου, η τιμή του G εξαρτάται από τη θέση κατά μήκος της γραμμής V_0, V_f , όπου και υπολογίζεται. Ακόμα, το μέσον του τμήματος V_0, V_f , με όγκο $(V_0 + V_f) / 2$ (έτσι ώστε $V = V_c + [(V_0 + V_f) / 2] = V_m$)

χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί το G .

Στην περίπτωση αυτή, ονομάζεται μέτρο διάτμησης G_M , λόγω του Louis Ménard, ο οποίος πρώτος πρότεινε αυτή τη διαδικασία. Επομένως, ισχύει:

$$G_M = V_m \cdot \Delta p / \Delta v.$$

Για να μετατραπεί το μέτρο διάτμησης, G_M , σε κάτι περίπου ισοδύναμο με το μέτρο Young, υποθέτοντας ξανά ότι το έδαφος είναι ελαστικό, χρησιμοποιείται ο ακόλουθος τύπος:

$$G_M = E_p / [2(1+\nu)],$$

όπου:

E_p = ένα μέτρο παραμόρφωσης και

ν = ο λόγος του Poisson.

Τα E_p και ν είναι άγνωστα, αλλά συχνά είναι δυνατόν λαμβάνοντας λογικές τιμές για το ν , να υπολογίζεται το E_p .

Για παράδειγμα, μία κορεσμένη άργιλος, η οποία δεν μεταβάλλεται σε συνθήκες νερού, θα έχει σταθερή τιμή για τον λόγο του Poisson $\nu=0,5$. Τα μερικώς κορεσμένα εδάφη και τα εδάφη που στραγγίζουν εντελώς κατά τη διάρκεια της δοκιμής έχουν σαφώς τιμές ν μικρότερες του 0,5. Όμως, το ουσιαστικό θέμα του μηχανικού δεν είναι ο υπολογισμός του E_p , αλλά αυτός του G_M . Έτσι, το Centre d' Etudes Ménard (1967) πρότεινε να θεωρηθεί η τιμή του ν σταθερά για όλα τα εδάφη για τον υπολογισμό του E_p , και η ίδια τιμή να χρησιμοποιείται για να μετατρέπεται το E_p σε G_M , όταν είναι απαραίτητος ο υπολογισμός του μέτρου παραμόρφωσης. Η τιμή που επιλέχθηκε είναι $\nu = 0,33$, και τα το μέτρο παραμόρφωσης που προκύπτει ονομάζεται μέτρο παραμόρφωσης Ménard (E_m), για κάθε έδαφος, όπου:

$$E_m = 2 (1 + \nu) G_M \Rightarrow$$

$$E_m = 2 (1 + 0,33) G_M \Rightarrow E_m = 2,66 G_M.$$

Βάσει και των παραπάνω, ισχύει: $E_m = 2,66 V_m \cdot \Delta p / \Delta v$.

Στην πράξη:

$$\Delta p = p_f - p_{0M}$$

$$\Delta v = V_f - V_0 \text{ και}$$

$$V_m = V_c + (V_f + V_0) / 2.$$

Επομένως,

$$E_m = 2,66 [V_c + (V_f + V_0) / 2] (p_f - p_{0M}) / (V_f - V_0).$$

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, ισχύει:

$$E_m = 2,66 [535 + (207 + 170) / 2] (525-100) / (207-170) = 22,1 \text{ Κρα.}$$

Με τη χρήση του προγράμματος Η/Υ Excel επιλύθηκε το παραπάνω παράδειγμα και με τη χρήση της βάσης δεδομένων που δημιουργήθηκε ακολούθησαν οι αναλύσεις των αποτελεσμάτων των πρεσσιομετρικών δοκιμών σε Αθήνα και Θεσσαλονίκη, καθώς και τα διαγράμματα τα οποία προέκυψαν.

6. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

6.1 ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΠΡΕΣΣΙΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

Εισαγωγή

Παρακάτω παρουσιάζονται και αξιολογούνται τα αποτελέσματα πρεσσιομετρικών δοκιμών, που εκτελέσθηκαν στα πλαίσια διερεύνησης των γεωτεχνικών συνθηκών που επικρατούν στο υπέδαφος της περιοχής της Θεσσαλονίκης για την κατασκευή σημαντικών έργων. Παρουσιάζεται η μεθοδολογία εκτέλεσης των δοκιμών και η αντιμετώπιση των ιδιαιτεροτήτων των σχηματισμών κατά την εκτέλεση αυτών. Τα αποτελέσματα των δοκιμών συναξιολογούνται, ενώ σχολιάζονται βασικές πρεσσιομετρικές καμπύλες και τα παράγωγα μεγέθη από αυτές. Στη συνέχεια, συγκρίνονται τα αποτελέσματα των δοκιμών, λαμβάνοντας υπόψη παράλληλα στοιχεία από κοντινές δειγματοληπτικές γεωτρήσεις, καθώς και από επί τόπου και εργαστηριακές δοκιμές, ενώ στη βάση δεδομένων που δημιουργήθηκε, συναξιολογούνται βασικές πρεσσιομετρικές καμπύλες και τα παράγωγα από αυτές μεγέθη.

Για τον γεωτεχνικό σχεδιασμό σημαντικών τεχνικών έργων στην περιοχή της Θεσσαλονίκης, εκτελέσθηκαν συμβατικές έρευνες με δειγματοληπτικές γεωτρήσεις και εργαστηριακές δοκιμές σε χαρακτηριστικά δείγματα και αρκετές πρεσσιομετρικές δοκιμές. Τα αποτελέσματα των ερευνών αποσκοπούν στον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων των σχηματισμών του υπεδάφους και στην εκτίμηση των γεωτεχνικών παραμέτρων αντοχής και συμπίεστότητάς τους.

6.1.1 Γεωλογία της περιοχής

Η περιοχή της Θεσσαλονίκης ανήκει στη ζώνη του Αξιού (Παιονίας) και Περιοδοπικής, ενώ σε ένα μικρό τμήμα της ανατολικά, συναντώνται κρυσταλλοσχιστώδη πετρώματα της Σερβομακεδονικής μάζας. Στα ανώτερα στρώματα υπάρχουν ιζήματα του Τεταρτογενούς και του Νεογενούς, με λιμναίες, υφάλμυρες και χερσαίες φάσεις. Η δομή των εδαφικών σχηματισμών συνίσταται από ιλύες με αργίλους, με κυμαινόμενα ποσοστά

αδρομερών κλασμάτων. Τα ιζήματα αυτά καλύπτουν ασύμφωνα το Αλπικό Υπόβαθρο, το οποίο συνίσταται κυρίως από μεταμορφωμένα πετρώματα της Μαγματικής σειράς Χορτιάτη. Συνοπτικά, οι γεωλογικοί σχηματισμοί που κυρίως συναντώνται στο υπέδαφος της περιοχής είναι οι ακόλουθοι :

Αρχικά συναντάται το Αρχαιολογικό Στρώμα, με πρόσφατες επιχώσεις από ιλύες, αργιλώδεις άμμους, αδρομερή υλικά, παρουσία τεχνητών και πρόσφατων υλικών και προϊόντων αποσάθρωσης. Στη συνέχεια, πρόσφατα Τεταρτογενή υλικά από διλουβιακές αποθέσεις και χαλαρές κλαστικές αποθέσεις, ιλυοαργιλώδη υλικά, καθώς και αμμοχαλικώδεις αποθέσεις από τους χειμάρρους της περιοχής. Ακόμα, υπάρχουν παλαιότερα Τεταρτογενή υλικά, από κλαστικά ετερογενή μίγματα αργίλων και ιλύων, με αδρομερή υλικά έως κροκάλες, με αποθέσεις φάσεων οξειδίου του Μαγγανίου. Συναντάται ακόμα ψαμμιτομαργαϊκή σειρά του Πλειόκαινου, από θαλάσσιες και λιμνοθαλάσσιες φάσεις λεπτόκοκκης άμμου, με τοπικά υλικά κυμαινόμενης συγκόλλησης, καθώς και σειρά ερυθρών αργίλων από λιμνοθαλάσσιες έως αποθέσεις λιμναίου τύπου, χαλαρές έως σφιγρές και σκληρές, με αργιλώδη έως ιλυοαργιλώδη υλικά, με τοπικές ενδιαστρώσεις άμμων. Τέλος, συναντάται το Αλπικό Υπόβαθρο, που συνίσταται από γνευσιοσχιστόλιθους, πρασινοσχιστόλιθους και σχιστοψαμμίτες, κυρίως από μεταμορφωμένα πετρώματα της μαγματικής σειράς του Χορτιάτη.

Γενικά στην περιοχή δεν αναπτύσσονται αξιόλογα υδροφόρα στρώματα, παρά μόνον περιορισμένες τοπικές υδροφορίες που εκφορτίζονται όταν διακόπτεται η συνέχεια των αδρομερών στρωμάτων και ενστρώσεων του υπεδάφους. Στην παραλιακή ζώνη, η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα ακολουθεί τις διακυμάνσεις της στάθμης της θάλασσας. Οι επικρεμάμενες υδροφορίες είναι σε βάθος 2m έως 6m και συνήθως στα σημεία που στο υπέδαφος παρουσιάζονται αδρομερή αμμοχαλικώδη στρώματα. Ακόμα, παρουσιάζεται υδροφορία εντός των αποθέσεων σε κοίτες παλαιών χειμάρρων, κυρίως στη διεπιφάνεια επιχώσεων με τα υποκείμενα σχετικά συγκολλημένα και αδιαπέρατα υλικά.

6.1.2 Διεξαγωγή των πρεσσιομετρικών δοκιμών

Οι πρεσσιομετρικές δοκιμές εκτελέστηκαν αρχικά βάση των Ελληνικών Προδιαγραφών Ε106-86, παρ. 11 και Ε102-84 παρ. 4 για το πρεσσιόμετρο Ménard, των Γαλλικών Προδιαγραφών ΝF Ρ94-110-1 και των Αμερικάνικων Προδιαγραφών ΑSΤM D4719. Πρόσφατα συντάχθηκαν οι Ευρωπαϊκές Προδιαγραφές ΕN-ΙSΟ 22476-4:

Geotechnical investigation and testing - Field testing - Part 4: Ménard pressuremeter test.

Στην περιοχή της Θεσσαλονίκης οι δοκιμές που αξιολογούνται, εκτελέστηκαν ανά 2m έως 3m, σε 22 πρεσσιομετρικές γεωτρήσεις, σε μέγιστο βάθος από 22m έως 50m.

Οι δοκιμές έγιναν με τυποποιημένες βολίδες τύπου Ménard, με τρεις ανεξάρτητους θαλάμους αερίου - υγρού της Γαλλικής εταιρείας APAGEO SEGELM. Οι βολίδες ήταν τύπου G: 60mm, οι οποίες έχουν συμβατικά εφαρμογή σε βάθος έως 50m, με μέγιστη επιβαλλόμενη πίεση 5MPa έως 10MPa (με ειδική βαλβίδα). Χρησιμοποιήθηκαν δύο είδη διαφορετικών βολίδων κατηγορίας AX και BX, αναλόγως των εμφανιζόμενων σχηματισμών και της δυνατότητας διατήρησης της ευστάθειας των τοιχωμάτων του διατρήματος στα βάθη των δοκιμών, εντός της γεώτρησης. Στον Πίνακα του Σχήματος 6.1 συνοψίζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά των βολίδων κατηγορίας AX και BX.

ΒΟΛΙΔΑ PROBE	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ DIAMETER (mm)	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ DRILLING DIAMETER (mm)		ΜΕΓΙΣΤΟΣ ΟΓΚΟΣ MAX VOLUME (cm ³)	ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΗ ΔΟΜΗ ΕΔΑΦΟΥΣ
		Min	Max		
AX	44	46	52	550	Σε χαλαρά - ασταθή εδάφη
BX	58	60	66	700	Σε σταθερά - ομοιογενή εδάφη

Σχήμα 6. 1: Βολίδες Ménard τύπου G

Η βολίδα τύπου BX με εύκαμπτα περιβλήματα έρχεται σε απευθείας επαφή με τα τοιχώματα της γεώτρησης. Το πρεσσιομετρικό μέτρο E_m προκύπτει θεωρώντας τις μετρήσεις μεταβολής της πίεσης (p_1, p_2), της μεταβολής του όγκου (V_1, V_2), σε συνδιασμό με το χαρακτηριστικό όγκο της βολίδας V_c και το δείκτη Poisson ν του εδάφους, ενώ εφαρμόζεται η ακόλουθη σχέση:

$$E_M = 2 \cdot (1 + \nu) \cdot \left[V_c + \left(\frac{V_1 + V_2}{2} \right) \right] \cdot \frac{(p_2 - p_1)}{(V_2 - V_1)} \quad (6.01).$$

Η βολίδα τύπου AX έρχεται σε επαφή με τα τοιχώματα της γεώτρησης μέσω ειδικής σχιστής χαλύβδινης σωλήνας (slotted tube). Στην περίπτωση αυτή το πρεσσιομετρικό μέτρο E_m προσδιορίζεται, λαμβάνοντας επιπλέον υπόψη και τον χαρακτηριστικό όγκο της σχιστής σωλήνας V_m, V_t , από την ακόλουθη σχέση:

$$E_M = 2 \cdot (1 + \nu) \cdot \sqrt{(V_m + V_c) \cdot (V_m + V_t)} \frac{(p_2 - p_1)}{(V_2 - V_1)}$$

(6.02).

Η διάτρηση της γεώτρησης γίνεται με ιδιαίτερη τεχνική και μεθοδολογία, έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται η διατάραξη του εδάφους στα τοι-χώματα του διατρήματος. Σε κάθε βάθος δοκιμής εκτελούνται τουλάχιστον 8 βαθμίδες αύξησης της πίεσης στη βολίδα, μέχρι τελικής διαρροής του εδάφους ή μέχρι μέγιστη επιβαλλόμενη πίεση 5MPa (ή 10MPa με ενισχυμένο σύστημα). Σε κάθε βήμα φόρτισης, στα μανόμετρα πίεσης και όγκου καταγράφονται οι μετρήσεις μεταβολής των όγκων V υπό την επιβαλλόμενη πίεση P σε χρόνους 15sec, 30sec, 60sec. Οι καμπύλες πίεσης - όγκου που προκύπτουν σε κάθε βάθος δοκιμής συνορθώνονται με βάση τις καθημερινές καμπύλες βαθμονόμησης της κάθε βολίδας που χρησιμοποιείται. Οι βαθμονομήσεις αυτές γίνονται για την βελτιστοποίηση των μετρήσεων της μεταβολής του όγκου V λόγω ιδίων διαστολών των τμημάτων του υδραυλικού συστήματος και της βολίδας σε ανυποχώρητη οπή, καθώς και για την συνόρθωση της πίεσης P λόγω της δυσκαμψίας του ελαστικού περιβλήματος της βολίδας σε ελεύθερη διόγκωση. Τελικά, σε κάθε βάθος δοκιμής, προκύπτει μία συνδιορθωμένη καμπύλη πίεσης - όγκου και μία καμπύλη ελέγχου της πίεσης ερπυσμού. Όπως έχει προειπωθεί, η πρεσσιομετρική καμπύλη διαχωρίζεται σε τρεις φάσεις. Στη φάση επανασυμπίεσης κατά την αρχή της δοκιμής μέχρι η βολίδα να συναντήσει τα τοιχώματα του διατρήματος και να αποκατασταθεί η αρχική πλευρική τάση. Στην ψευδοελαστική φάση όπου το διάγραμμα V - P είναι σχετικά ευθύγραμμο, ενώ η μεταβολή ΔV συναρτήσει του χρόνου υπό σταθερή πίεση είναι σχεδόν μηδενική. Στην πλαστική φάση, όπου επιταχύνεται η αύξηση των παραμορφώσεων, δηλαδή του όγκου V , με την αύξηση της επιβαλλόμενης πίεσης P μέχρι την οριακή πίεση p_{LM} , όπου πλέον η αύξηση του όγκου είναι ανεξέλεγκτη.

Τα βασικά και αρχικά παράγωγα μεγέθη από την πρεσσιομετρική καμπύλη είναι: Το πρεσσιομετρικό μέτρο Ménard E_M προκύπτει από την εφαπτόμενη γραμμή κατά μήκος της ψευδοελαστικής φάσης, ενώ οι οριακές πλευρικές πιέσεις p_{LM} και p_{LM}^* προκύπτουν από την ασύμπτωτη στο τέλος της πλαστικής φάσης της δοκιμής και για $V = V_c + 2V_1$. Η p_{LM}^* είναι η “καθαρή” πίεση αφού αφαιρεθούν οι υδροστατικές πιέσεις πόρων και η αρχική οριζόντια τάση εδάφους. Στη συνέχεια, η ερπυστική πίεση p_f προκύπτει στο όριο μεταξύ της ελαστικής και της πλαστικής φάσης, που διαχωρίζονται με βάση τις μεταβολές ΔV

συναρτήσει του χρόνου.

Εμμέσως, από την αξιολόγηση των μετρήσεων κάθε καμπύλης και ενδεχομένως από τη συναξιολόγηση ομάδας καμπυλών ή και σε συνδυασμό με εργαστηριακά αποτελέσματα, είναι δυνατόν να εκτιμηθούν η γωνία τριβής φ , η αστράγγιστη αντοχή c_u και το μέτρο ελαστικότητας - συμπίεσότητας E_s . Ο συντελεστής ωθήσεων ηρεμίας K_0 εκτιμάται κατά την αρχή της πρεσσιομετρικής καμπύλης, όταν αυτή συναντά τα τοιχώματα της οπής και όταν ευθυγραμμίζεται το διάγραμμα P-V (J.L. Briaud par. 7.2.). Ακόμα, αναλόγως του λόγου του E_M / p_{LM}^* και της δομής του εδαφικού σχηματισμού, εκτιμάται ο ρεολογικός συντελεστής α και το οιδημετρικό μέτρο συμπίεσης $E_s = E_M / \alpha$ (μέτρο μονοδιάστατης στερεοποίησης). Στον Πίνακα του Σχήματος 6.2 συνοψίζονται οι τιμές του ρεολογικού συντελεστή α με βάση τη Γαλλική Προδιαγραφή FASCICULE No 62 - V (1993) για εδαφικούς σχηματισμούς. Ακόμα, γενικά, ο λόγος E_M / p_{LM}^* έχει εύρος μεταβολής από 5 έως 40. Στον Πίνακα του Σχήματος 6.3 δίνονται βιβλιογραφικά εύρη τιμών, σύμφωνα με τους M. Gambin και J. Rousseau, για υλικά διαφορετικής δομής.

ΔΟΜΗ ΕΔΑΦΟΥΣ	ΤΥΡΦΗ	ΑΡΓΙΛΟΣ	ΙΛΥΣ	ΑΜΜΟΣ	ΑΜΜΟΧΑΛΙΚΑ
SOIL TYPE	PEAT	CLAY	SILT	SAND	SAND & GRAVEL
	α	E_M/P_{LM}^*	α	E_M/P_{LM}^*	α
Προστεροποιημένα εδάφη		>16	1	>14	2/3
Κανονικά στεροποιημένα εδάφη	1	9-16	2/3	8-14	1/2
Χαλαρά - αποσαθρωμένα εδάφη		7-9	1/2	5-8	1/2
				5-7	1/3

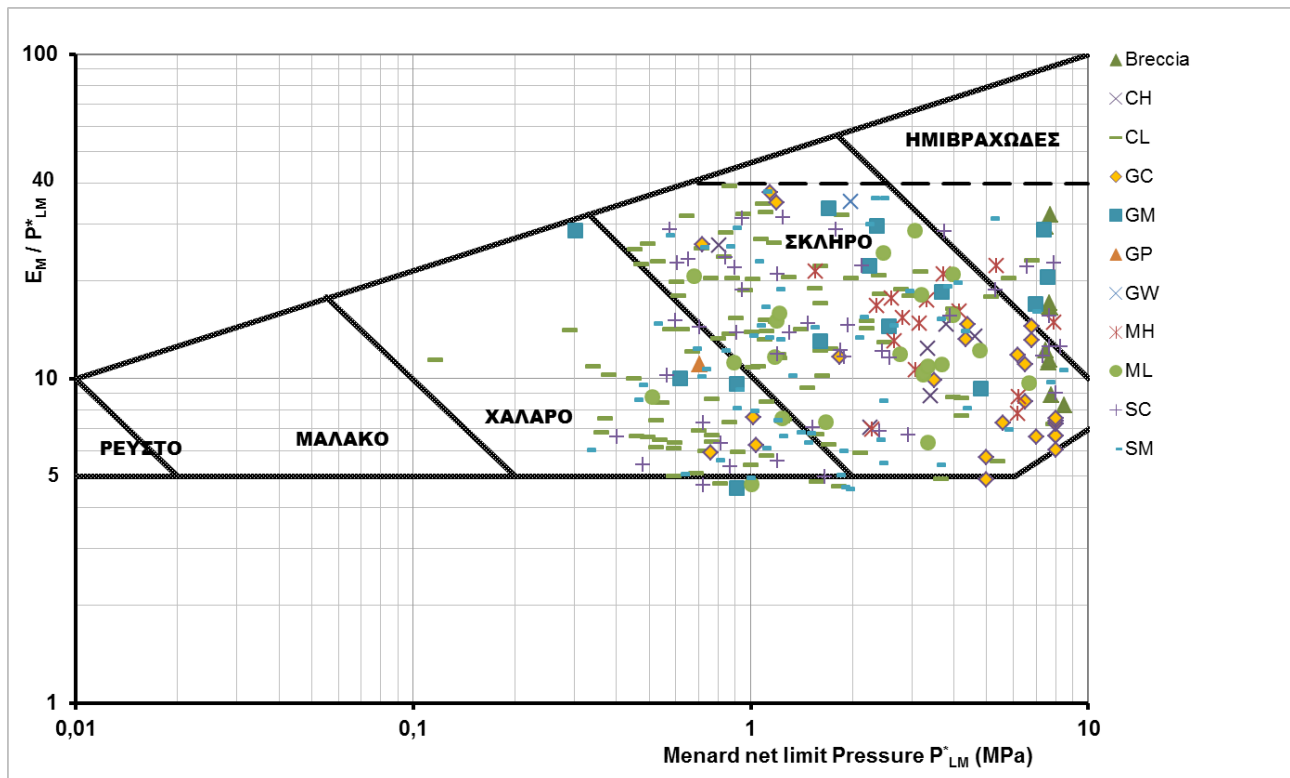
Σχήμα6. 2: Ρεολογικός συντελεστής α

ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ - SOIL TYPE	E_M (MPa)	P_{LM}^* (MPa)	E_M/P_{LM}^*
Οργανικές χαλαρές ιλύες	0,2 - 1,5	0,02 - 0,15	10
Μαλακές άργιλοι	0,5 - 3	0,05 - 0,30	10
Συνεκτικές -σφιφρές άργιλοι	3 - 8	0,30 - 0,80	10
Πολύ σφιφρές - σκληρές άργιλοι	8 - 40	0,60 - 2,00	12 - 20
Μάργες	5 - 100	0,60 - 6,00	8 - 15
Χαλαρές ιλυώδεις άμμοι	0,5 - 2	0,10 - 0,50	4 - 5
Ιλύες	2 - 10	0,20 - 1,50	6 - 10
Άμμοι και αμμοχάλικα	8 - 100	1,20 - 5,00	6 - 8
Ιζηματογενή αμμώδη υλικά	7,5 - 40	1,00 - 5,00	7 - 8
Ασβεστολιθικά υλικά	80 - 20.000	3,00 - >190	> 16
Πρόσφατες επιχώσεις (χωρίς συμπύκνωση)	0,5 - 1	0,05 - 0,30	10 - 17
Παλαιές επιχώσεις	4 - 15	0,40 - 1,00	10 - 15
Πρόσφατα συμπυκνωμένα επιχώματα	10 - 15	1,00 - 1,50	10 - 15

Σχήμα6. 3: Βιβλιογραφικά εύρη τιμών

6.1.3 Αξιολόγηση πρεσσιομετρικών δοκιμών

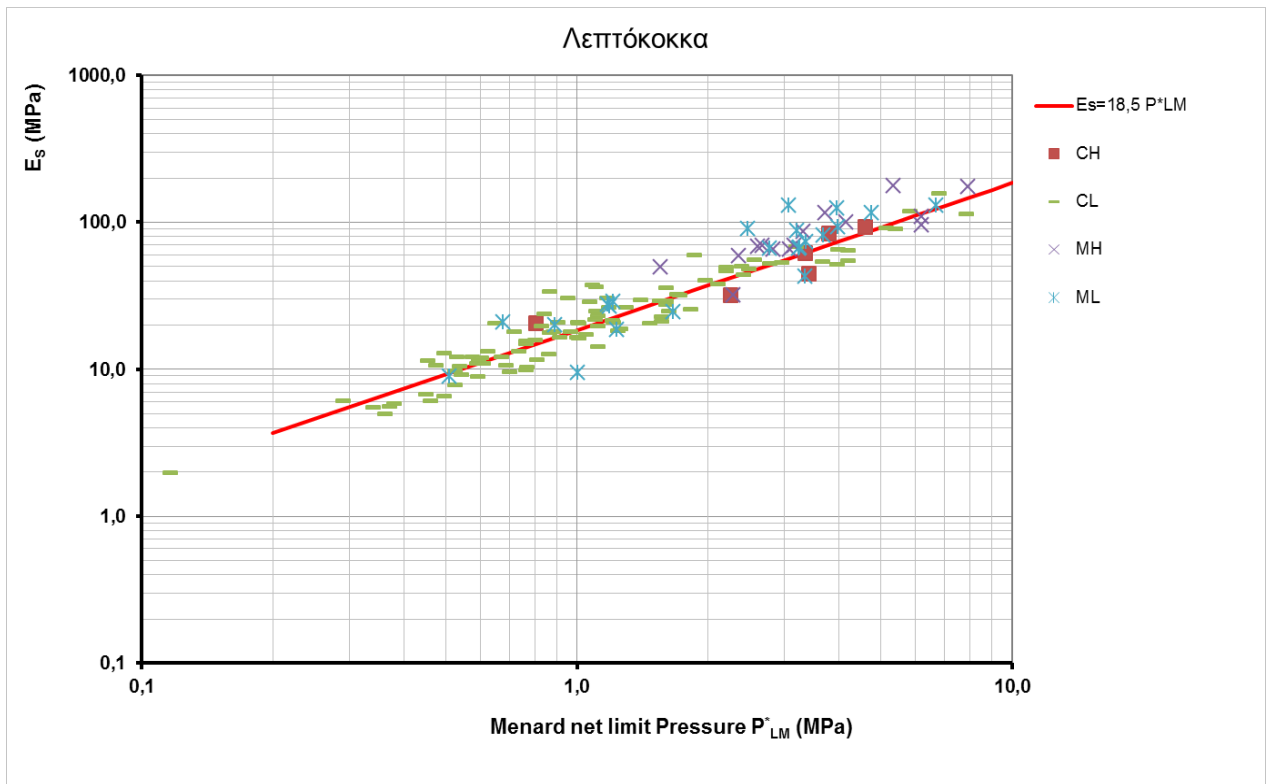
Στο Διάγραμμα του Σχήματος 6.4 γίνεται η συγκριτική θεώρηση των βασικών πρεσσιομετρικών παραμέτρων ($\log p_{LM}^*$, $\log E_M/p_{LM}^*$) ανά γεωτεχνικό σχηματισμό, κατά USCS, και γίνεται σαφής η απεικόνιση των χαμηλής πλαστικότητας αργιλικών και λεπτόκοκκων υλικών CL ($w_L < 50\%$, $IP > 7\%$).



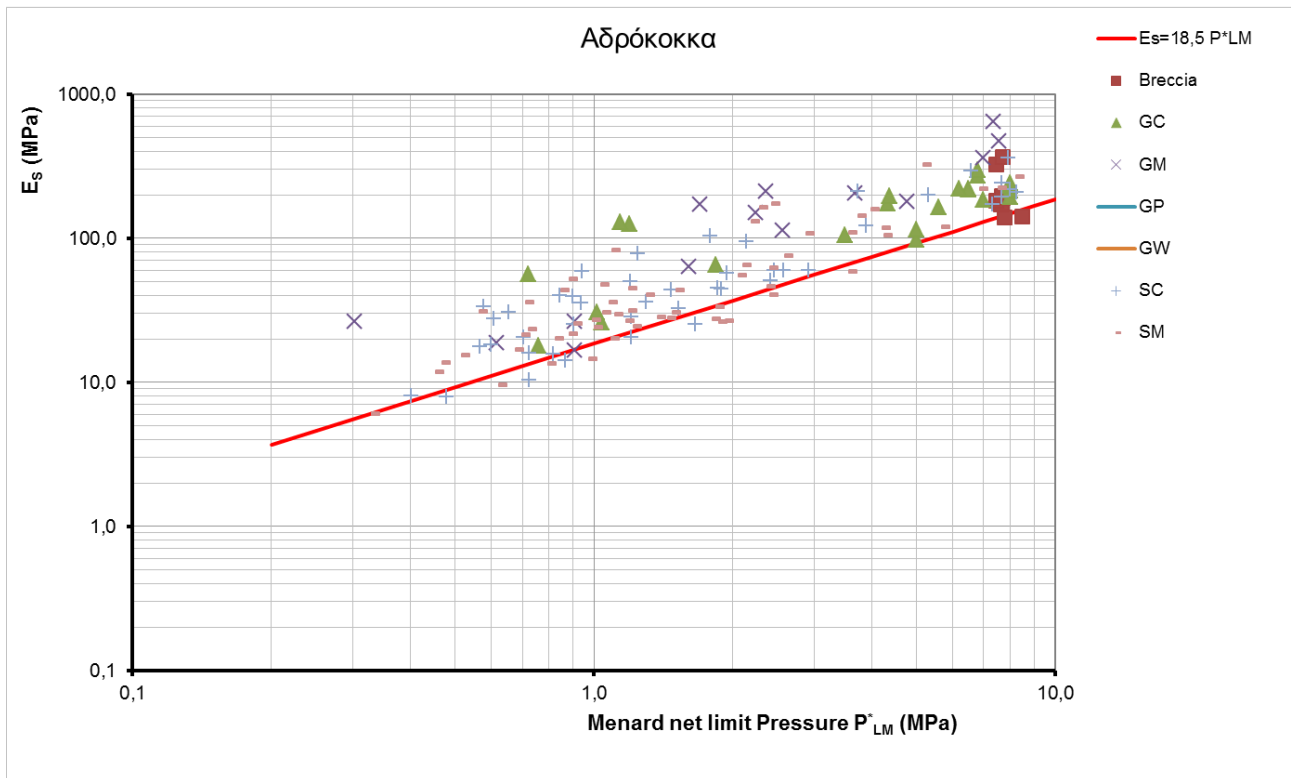
Σχήμα6. 4: Συγκριτική θεώρηση πρεσσιομετρικών παραμέτρων

Στο Διάγραμμα του Σχήματος 6.5 απεικονίζεται η κατανομή σε διλογαριθμικό διάγραμμα ($\log p_{LM}^*$, $\log E_S$) των λεπτόκοκκων υλικών CH, CL, MH, ML. Στα λεπτόκοκκα αυτά υλικά η σχέση συσχετισμού που είχε προταθεί (Ritsos et al 2005) παλαιότερα $E_S = (16 \text{ έως } 21) \cdot p_{LM}^*$ με μέση τιμή $E_S = 18,5 \cdot p_{LM}^*$ είναι επίσης αποδεκτή για $p_{LM}^* = 1,0 \text{ έως } 6,5 \text{ MPa}$. Στα δείγματα που ελέγχθηκαν η μέση τιμή είναι $E_S / p_{LM}^* = 19,4$, τιμή εντός του προτεινόμενου εύρους.

Αντίστοιχα, στο Διάγραμμα του Σχήματος 6.6 δίνεται αντίστοιχα η κατανομή σε ($\log p_{LM}^*$, $\log E_S$) και για τα αδρόκοκκα υλικά GC, GM, GP, GW, SC, SM και για το μερικώς συγκολλημένο κροκαλολατυποπαγές breccia, και φαίνεται ότι το μέτρο μονοδιάστατης στερεοποίησης E_S των υλικών αυτών είναι αυξημένο έναντι των λεπτόκοκκων υλικών έως και 2 φορές.

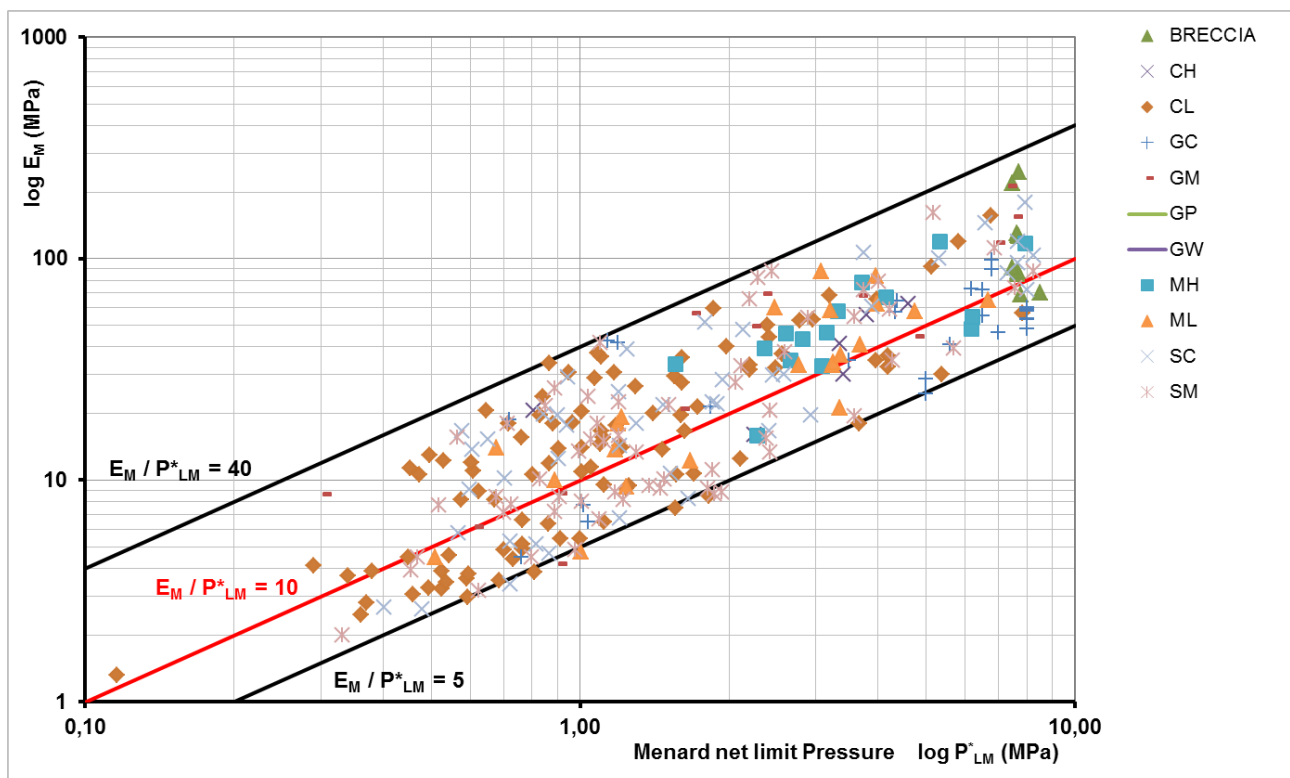


Σχήμα6. 5: Κατανομή λεπτόκοκκων υλικών



Σχήμα6. 6: Κατανομή αδρόκοκκων υλικών

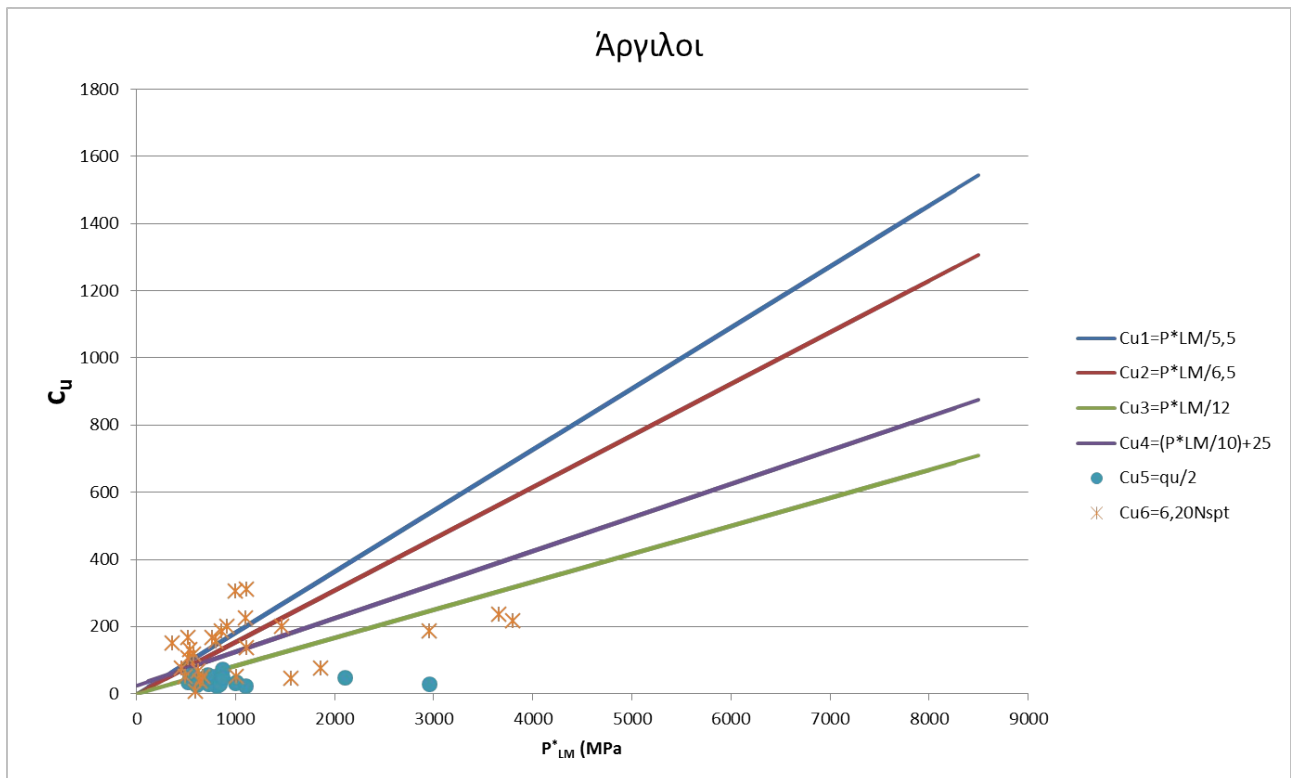
Σε αυτό το διάγραμμα του Σχήματος 6.7 φαίνεται η κατανομή όλων των πρεσσιομετρικών αποτελεσμάτων σε διάγραμμα ($\log p_{LM}^*$, $\log E_M$) τόσο για τα λεπτόκοκκα υλικά, όσο και για τα αδρόκοκκα υλικά. Το Διάγραμμα αυτό δείχνει πόσο στερεοποιημένα ή αποσαθρωμένα είναι τα εδαφικά υλικά. Είναι, επομένως, φανερό ότι πάνω από το 60% των υλικών στην προκειμένη περίπτωση βρίσκεται πάνω από το όριο του λόγου $E_M/p_{LM}^*=10$, επομένως πρόκειται για στερεοποιημένα ή κανονικά στερεοποιημένα εδάφη, ενώ το υπόλοιπο ποσοστό αφορά σε χαλαρά – αποσαθρωμένα εδάφη.



Σχήμα6. 7: Συνολική κατανομή

Το Διάγραμμα του σχήματος 6.8 αφορά στις Αργίλους και συσχετίζει τις τιμές της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής c_u , από την εργαστηριακή τριαξονική δοκιμή UU και από δοκιμές UCS, με p_L^* , από τη βασική εξίσωση του Baguelin et al, 1978: $c_{u,M} = p_L^* / (5,5 \text{ ως } 12)$, με τη βέλτιστη εφαρμογή της καμπύλης να αντιστοιχεί στην τιμή $c_{u,M} = (p_L^*/10) + 25$, με τις σχέσεις $c_u = q_u / 2$ και $c_u = 6, 20 N_{SPT}$ (από το διάγραμμα Stroud, 1974).

Από το Διάγραμμα προκύπτει, και σε αυτήν την περίπτωση, ότι οι τιμές κυμαίνονται στα ίδια όρια, με κάποιες μικρές αποκλίσεις, οι οποίες πιθανότατα οφείλονται ότι δεν είναι γνωστό αν τα δείγματα προέρχονται από την ίδια γεώτρηση ή και το ίδιο βάθος.



6.2 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΠΡΕΣΣΙΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ ΛΕΚΑΝΟΠΕΔΙΟΥ ΤΗΣ ΑΘΗΝΑΣ

Εισαγωγή

Οι πρεσσιομετρικές δοκιμές που διεξάχθηκαν εντός επιλεγμένων γεωλογικών σχηματισμών στο λεκανοπέδιο της Αθήνας, αξιολογούνται από άποψη γεωτεχνικής μηχανικής, αλλά και της μαθηματικής έκφρασης που συνίσταται για να σκιαγραφήσει τις γεωτεχνικές παραμέτρους που απαιτούνται για τον σχεδιασμό. Οι πρεσσιομετρικές δοκιμές είναι επαρκείς για την παροχή χρήσιμων πληροφοριών που αφορούν στη δομή σχηματισμού του λεκανοπεδίου της Αθήνας σχετικά με τη δύναμή τους.

Βάσει των διαθεσιμών πληροφοριών από τις πρεσσιομετρικές δοκιμές, δημιουργήθηκε μία βάση δεδομένων, συμπεριλαμβανομένων όλων των πιθανών στοιχείων που προκύπτουν από αυτές, και από τις πρεσσιομετρικές καμπύλες, όπως το Πρεσσιομετρικό μέτρο Ménard (E_M), η καθαρή οριακή πίεση (p_L^*) και η πίεση ερπυσμού (p_f). Όπου τα δεδομένα της δειγματοληψίας των γεωτρήσεων ήταν επίσης διαθέσιμα, η βάση δεδομένων εμπλουτίστηκε από τη γεωτεχνική περιγραφή των σχηματισμών, αλλά και τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες από τις εργαστηριακές αναλύσεις σε βάθη αντίστοιχα με τα βάθη που πραγματοποιήθηκαν οι πρεσσιομετρικές δοκιμές.

Οι σχηματισμοί όπου έγιναν οι δοκιμές, αναφέρονται γενικά σε ημισυνεκτικά ως συνεκτικά εδάφη, σκληρά εδάφη και μαλακούς βράχους. Οι περισσότερες δοκιμές πραγματοποιήθηκαν εντός του Νεογενούς και Τεταρτογενούς κλαστικών υλικών, με μεταβλητή κοκκομετρία, στον μανδύα των σχιστολίθων, αλλά και στους σχιστόλιθους, που αποτελούν ένα σημαντικό μέρος του υποστρώματος του λεκανοπεδίου της Αθήνας. Η εφαρμογή των πρεσσιομέτρων στους σχηματισμούς που ανέκυψαν στο λεκανοπέδιο της Αθήνας, δίνει τη δυνατότητα εκτίμησης σχεδόν όλων των απαραίτητων παραμέτρων για τον γεωτεχνικό σχηματισμό και ταυτόχρονα τη δυνατότητα συγκρίσεων μεταξύ όλων των δοκιμών για ακριβέστερη αξιολόγηση.

Σημειώνεται ότι σε κάποιες περιπτώσεις που οι σχηματισμοί ήταν συγκολλημένοι ή βραχώδεις, και δεν ήταν δυνατή η αξιολόγησή τους από αυτήν την άποψη. Έτσι, δεν συμπεριλαμβάνονται στη συγκεκριμένη εργασία.

6.2.1 Γεωλογία της περιοχής

Το αλπικό υπόβαθρο του λεκανοπεδίου της Αθήνας αποτελείται κυρίως από σχιστόλιθους και ανθρακικά πετρώματα (μάρμαρα). Ο σχιστόλιθος που επικρατεί είναι γνωστός ως “Αθηναϊκός σχιστόλιθος” και είναι ένας κλαστικός σχηματισμός ενός συγκεκριμένου φλύσχη που αποτελείται από εναλλαγές ελαφρώς δυναμομεταμορφωμένου αργιλοσχιστόλιθου και ψαμμίτη (μετα-αργιλοσχιστόλιθο, μετα-ιλυόλιθο, μετα-ψαμμίτη), με ενστρώσεις μάργας στον αμμώδη κρυσταλλικό ασβεστόλιθο, κροκαλοπαγή πετρώματα και τοπικά οφιολιθικά ολισθοστρώματα και ολισθόλιθοι. Τα χαμηλότερα μέρη αυτών των σχηματισμών είναι πιο συμπαγή και όχι καλά βαθμολογημένα, ενώ τα ανώτερα πιο λεπτά και καλά διαβαθμισμένα.

Ο Αθηναϊκός σχιστόλιθος παρουσιάζει μεταβλητές μηχανικές παραμέτρους, οι οποίες αντανakλούν άμεσα τη μεταλλική σύνθεση και το βαθμό διάβρωσής του. Τα ακριανά τμήματα των σχιστολιθικών σχηματισμών είναι τοπικά πλήρως αποσαθρωμένα και αναφέρονται σε συνεκτικό έδαφος (ελουβικού μανδύα) διαφορετικού πάχους. Οι σχιστόλιθοι γενικά είναι αδιαπέρατα πετρώματα, με κάποια διαπερατότητα στα αμμώδη – ανθρακικά τμήματά του.

Πάνω από τον Αθηναϊκό σχιστόλιθο εμφανίζονται τοπικά, σε διαφορετικό πάχος, ημισυνεκτικοί ως συνεκτικοί σχηματισμοί του Νεογενούς και του Τεταρτογενούς, οι οποίοι περιλαμβάνουν κλαστικά ιζήματα με μεταβλητά μεγέθη κόκκων. Ειδικά οι σχηματισμοί του Νεογενούς αποτελούνται κυρίως από μάργες (αργιλώδης ή ασβεστικές), ερυθροπηλίτες, ψαμμίτες, ιλυόλιθους και πυρίτες, ενώ οι σχηματισμοί του Τεταρτογενούς από τσιμέντο ή σαθρά υλικά (πηλό, άμμο, χαλίκια κλπ). Οι σχηματισμοί αυτοί είναι διαπερατοί και τοπικά εμφανίζεται ένας πτωχός υδροφόρος ορίζοντας, σε βάθος λίγων μέτρων (3,0 – 19.5 εκ.).

6.2.2 Διεξαγωγή των πρεσσιομετρικών δοκιμών

Όλες οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με τις Ελληνικές Προδιαγραφές Ε 106-86 και Ε 102-84, οι οποίες γενικά συμφωνούν με τις σχετικές Γαλλικές Προδιαγραφές NFP 94-110 και το ASTM D4719-87, ενώ ορισμένα ενδεικτικά στοιχεία ανακτήθηκαν από το Ρωσικό Πρότυπο ΓΟСТ 20276-99. Οι δοκιμές έγιναν σε βάθος 2-3 μέτρων, χρησιμοποιώντας βολίδες APAGEO SEGELM, τύπου AX ($d_i = 46-52\text{mm}$, $d_c = 44\text{mm}$) και BX ($d_i = 60-66\text{mm}$, $d_c = 58\text{mm}$), με τη διαδοχική αύξηση της πίεσης Δp κάθε 50KPa και το χρονικό βήμα Δt κάθε αύξησης της πίεσης κάθε 15,3 και 60sec.

Συνολικά, πραγματοποιήθηκαν και ταξινομήθηκαν στη βάση δεδομένων 518 δοκιμές, που έγιναν εντός 37 γεωτρήσεων με μέγιστο βάθος 40m. Οι γεωτρήσεις διανοίχθηκαν σε 15 θέσεις δοκιμών εντός του λεκανοπεδίου της Αθήνας σε αστικές περιοχές. Σε 216 δοκιμές ήταν επίσης διαθέσιμη η γεωτεχνική περιγραφή και κάποιες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες.

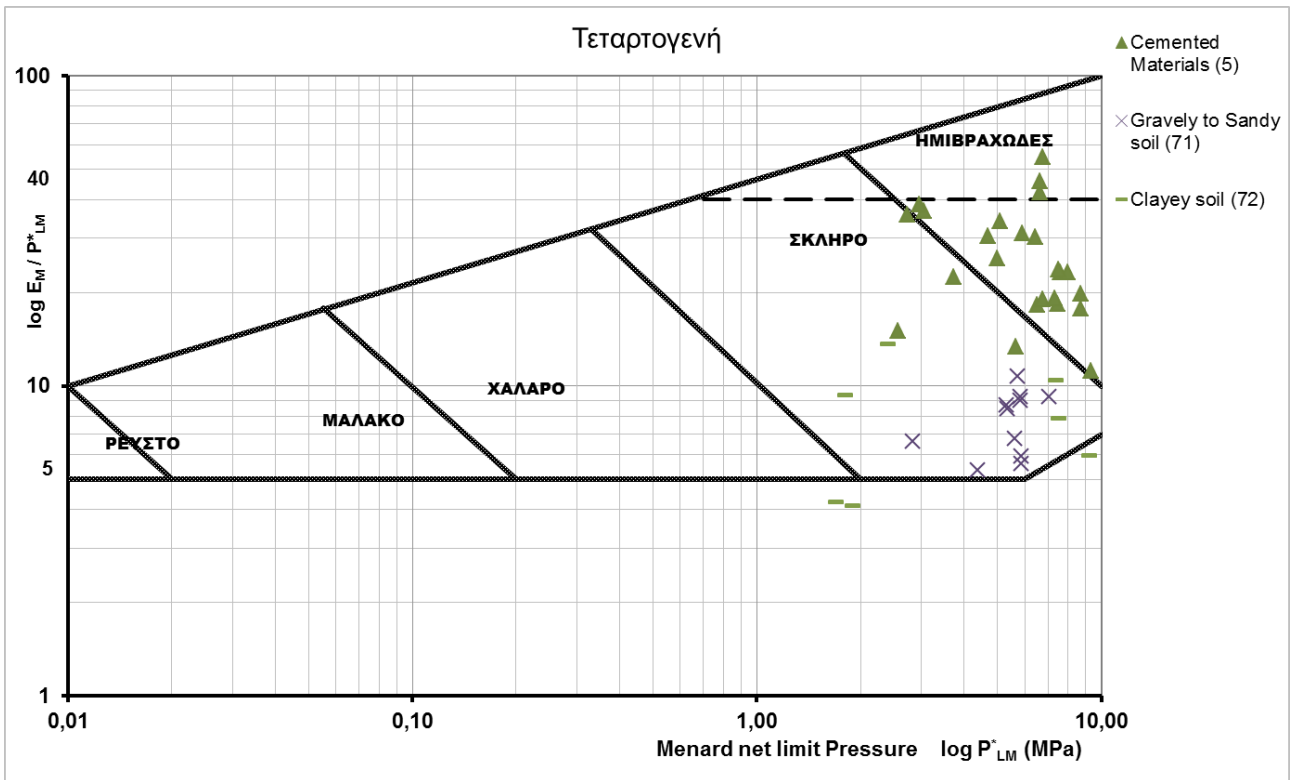
6.2.3 Αξιολόγηση πρεσσιομετρικών δοκιμών

Στα Διαγράμματα των Σχημάτων 6.9, 6.10 και 6.11, γίνεται η συγκριτική θεώρηση των βασικών πρεσσιομετρικών παραμέτρων ($\log p_{LM}^*$, $\log E_M/p_{LM}^*$) ανά γεωτεχνικό σχηματισμό, βάση της γεωλογικής δομής τους.

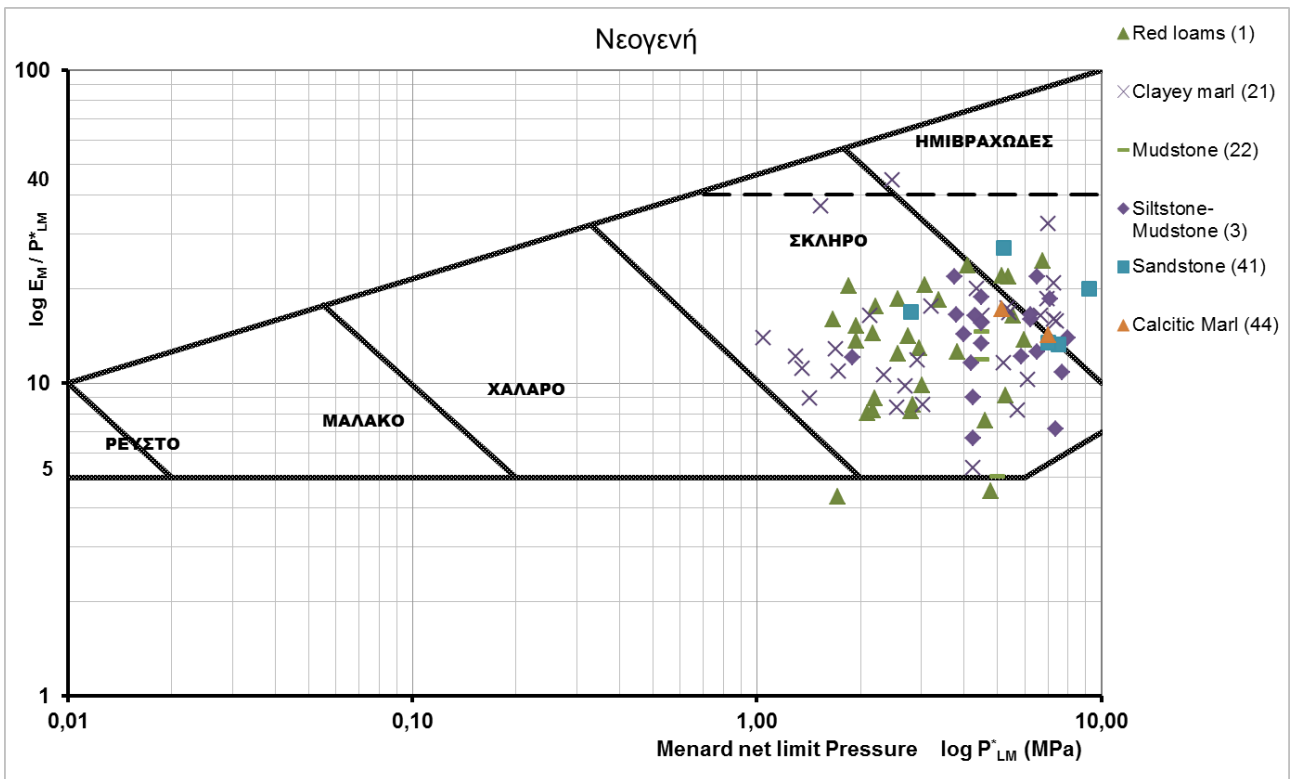
Έτσι, στο Διάγραμμα του Σχήματος 6.9, για τους Τεταρτογενείς σχηματισμούς, είναι φανερό ότι τα Αμμοχάλικα (71) και η Άργιλος (72), βρίσκονται στο εύρος τιμών που αντιστοιχεί σε σκληρό έδαφος, ενώ τα τσιμεντωμένα κορήματα και τα Λατυποπαγή (5) σε εκείνο που αντιστοιχεί σε ημιβραχώδες έδαφος.

Αντίστοιχα, το Διάγραμμα του Σχήματος 6.10, που αφορά στους Νεογενείς σχηματισμούς, δίνει εύρος τιμών για τους Ερυθροπηλίτες (1) και την Αργιλική Μάργα (21) που αντιστοιχεί σε σκληρό έδαφος, όπως και για τους Αργυλοϊλυόλιθους (22) και τους Ιλυόλιθους-Αργιλοϊλυόλιθους (3), ενώ οι Ψαμμίτες (41) χαρακτηρίζονται ως σκληρό – ημιβραχώδες έδαφος και οι Μαργαϊκοί Ασβεστόλιθοι (44) βρίσκονται στα όρια αυτών των δύο.

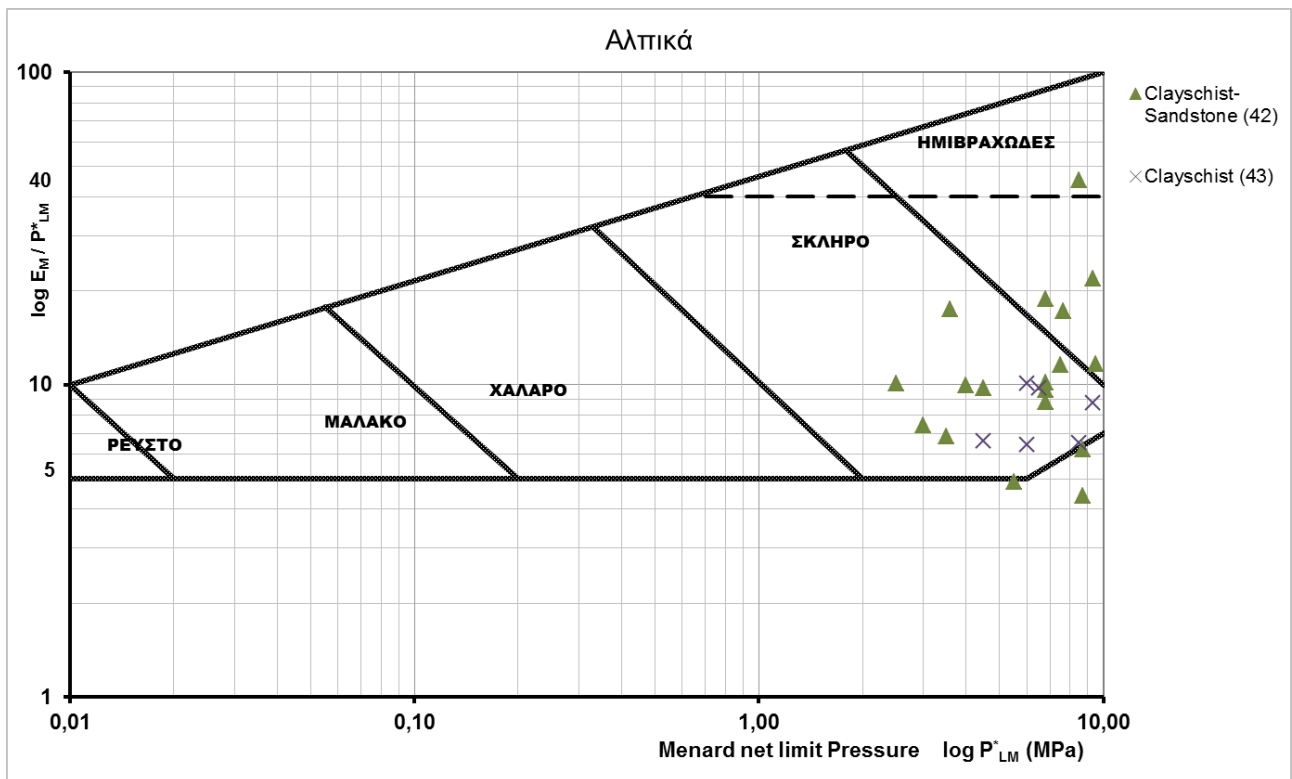
Στο Διάγραμμα του Σχήματος 6.11, για τους Αλπικούς σχηματισμούς, οι Μεταψαμμίτες-Μεταϊλυόλιθοι (42) δίνουν τιμές σκληρού ως ημιβραχώδους εδάφους, ενώ οι Αργιλικοί Σχιστόλιθοι (43) είναι καθαρά σκληροί.



Σχήμα6. 9: Συγκριτική θεώρηση πρεσσιομετρικών παραμέτρων για Τεταρτογενείς Σχηματισμούς



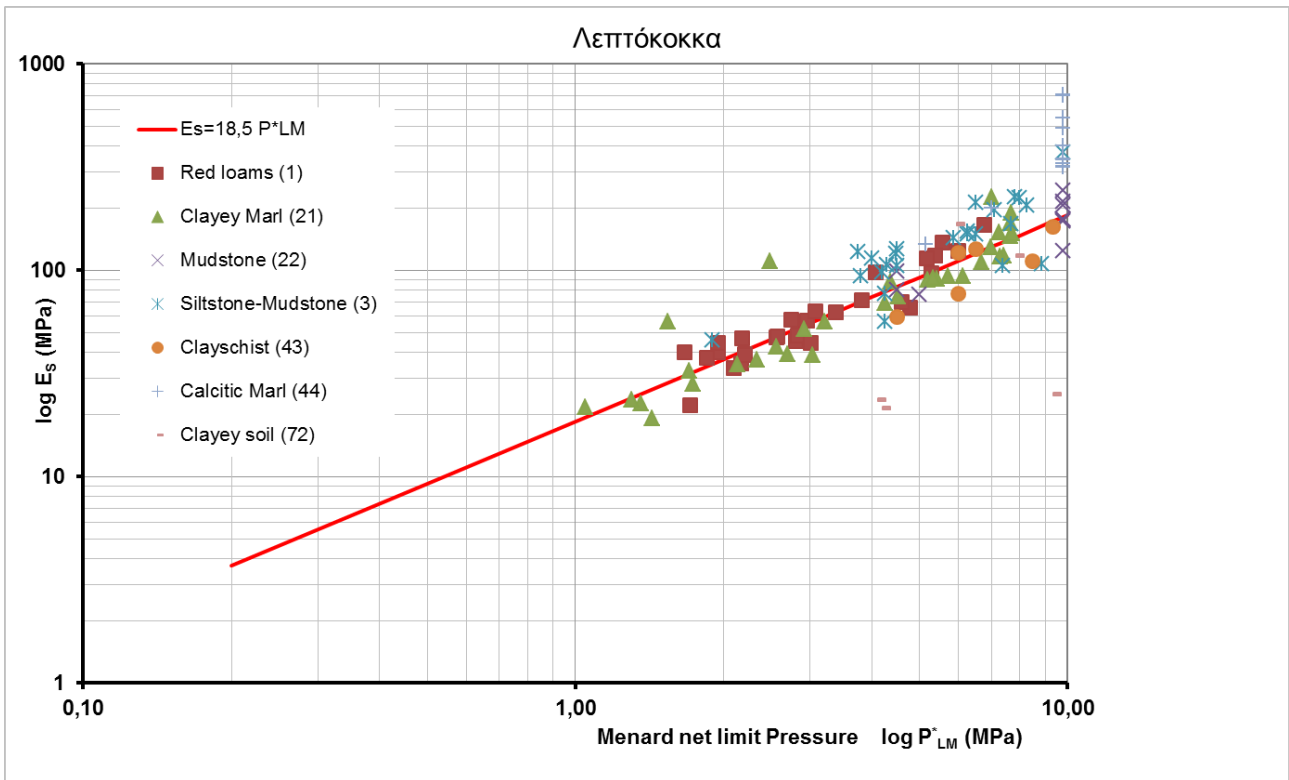
Σχήμα6. 10: Συγκριτική θεώρηση πρεσσιομετρικών παραμέτρων για Νεογενείς Σχηματισμούς



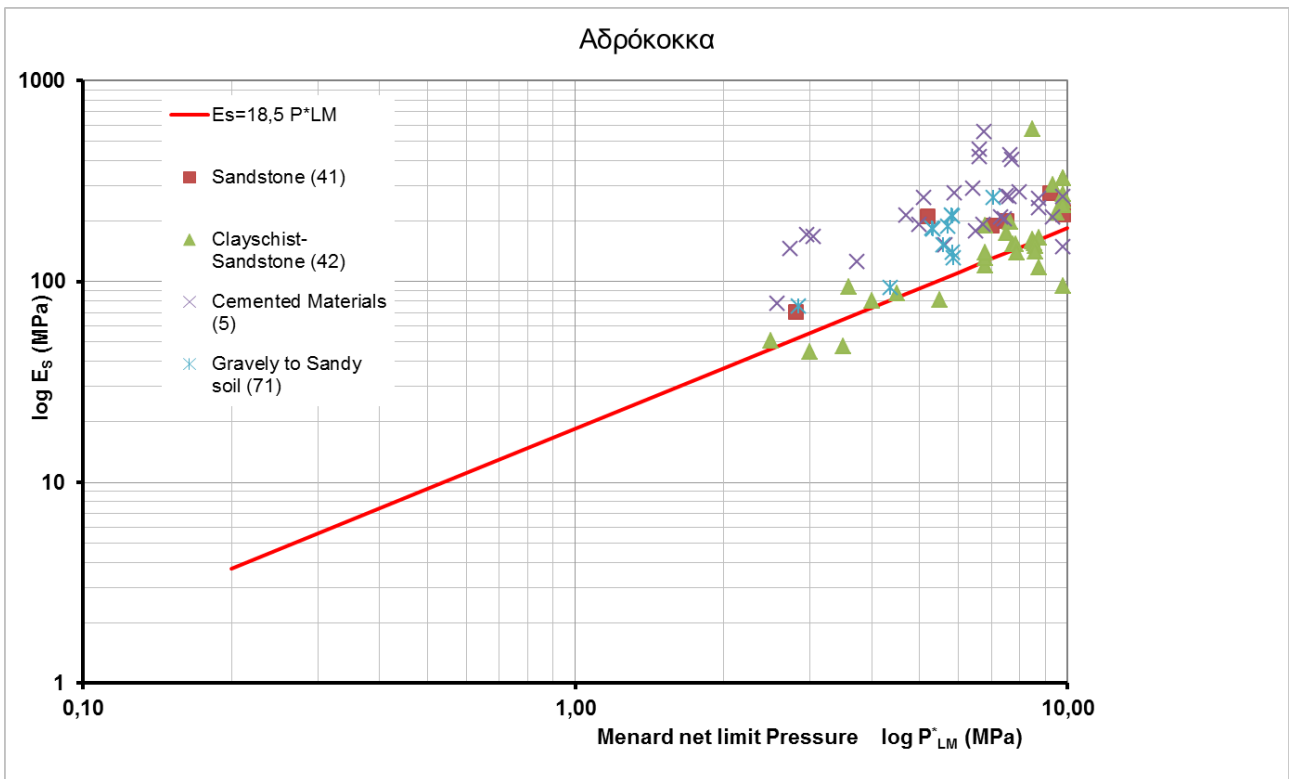
Σχήμαθ. 11: Συγκριτική θεώρηση πρεσσιομετρικών παραμέτρων για Αλπικούς Σχηματισμούς

Όπως και στις μετρήσεις της Θεσσαλονίκης, στο Διάγραμμα του Σχήματος 6.12 φαίνεται η κατανομή σε διλογαριθμικό διάγραμμα ($\log p_{LM}^*$, $\log E_S$) των λεπτόκοκκων υλικών. Τα λεπτόκοκκα υλικά στην προκειμένη περίπτωση είναι οι Ερυθροπηλίτες, η Αργιλική Μάργα, οι Αργυλοσίλυόλιθοι, οι Ιλυόλιθοι-Αγίλοϊλυόλιθοι, οι Αργιλικοί Σχιστόλιθοι, οι Μαργαϊκοί Ασβεστόλιθοι και η Άργιλος. Όμοια, η σχέση συσχετισμού που είχε προταθεί (Ritsos et al 2005) παλαιότερα $E_S = (16 \text{ έως } 21) \cdot p_{LM}^*$ με μέση τιμή $E_S = 18,5 \cdot p_{LM}^*$ είναι επίσης αποδεκτή για $p_{LM}^* = 1,0 \text{ έως } 6,5 \text{ MPa}$.

Αντίστοιχα, στο Διάγραμμα του Σχήματος 6.13 δίνεται αντίστοιχα η κατανομή σε ($\log p_{LM}^*$, $\log E_S$) και για τα αδρόκοκκα υλικά. Αυτά είναι οι Ψαμμίτες, οι Μεταψαμμίτες-Μεταϊλυόλιθοι, τα Λατυποπαγή και τα Αμμοχάλικα. Όμοια και σε αυτήν την περίπτωση, είναι φανερό ότι το μέτρο μονοδιάστατης στερεοποίησης E_S των υλικών αυτών είναι αυξημένο έναντι των λεπτόκοκκων υλικών έως και 2 φορές.

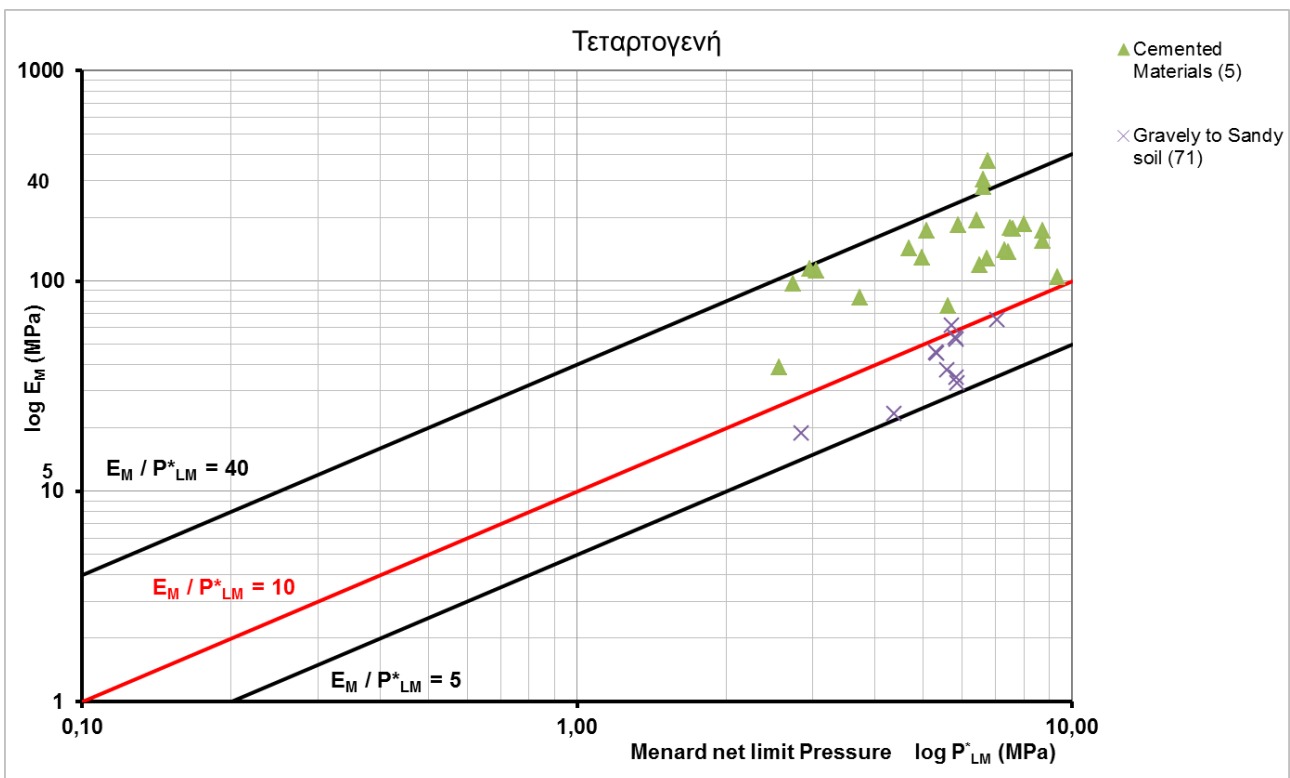


Σχήμα6. 12: Κατανομή λεπτόκοκκων υλικών

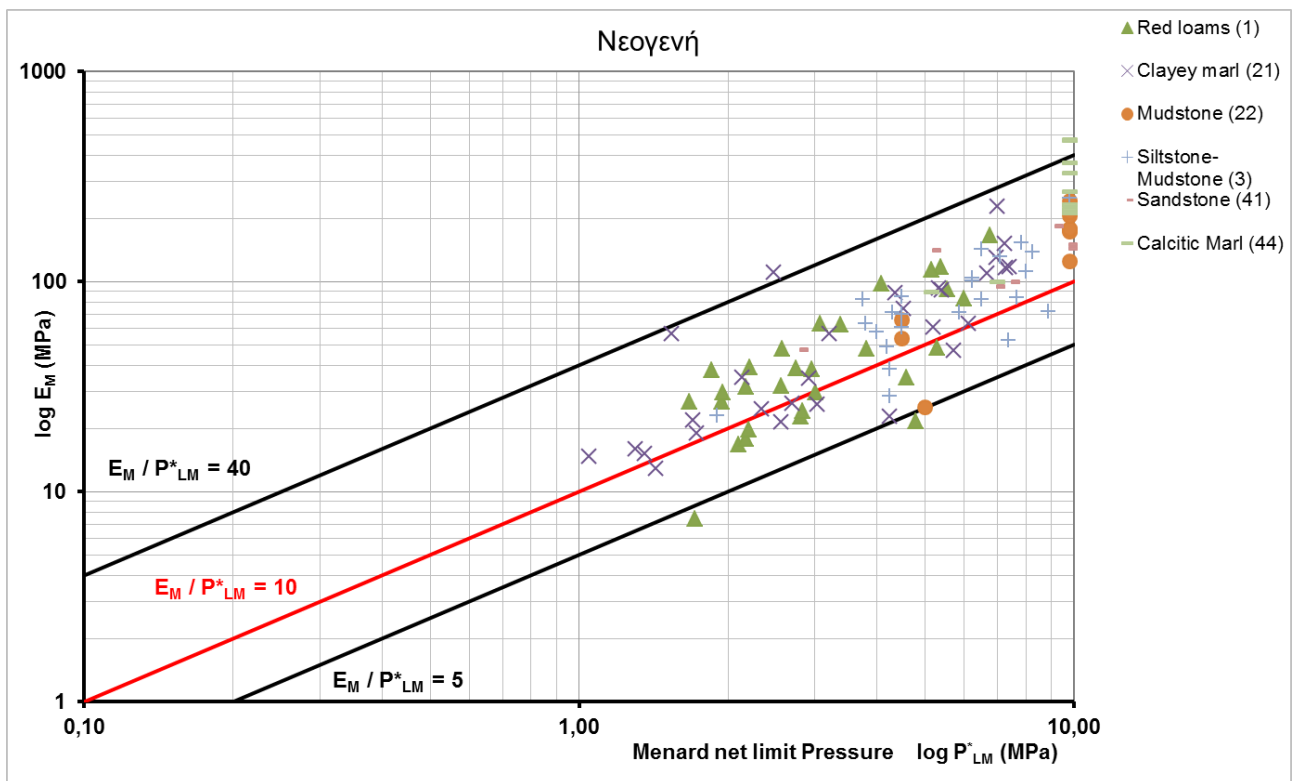


Σχήμα6. 13: Κατανομή αδρόκοκκων υλικών

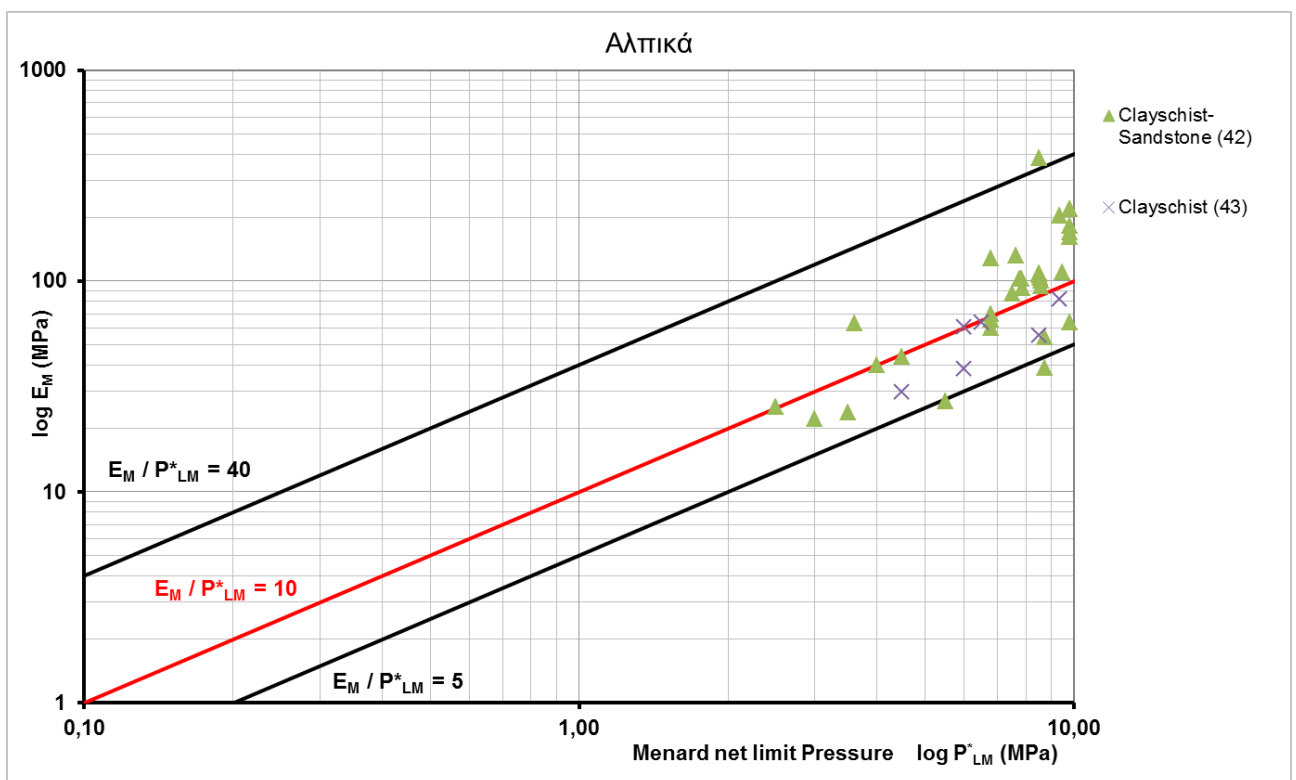
Στα Διαγράμματα 6.14, 6.15 και 6.16, όμοια με την περίπτωση της Θεσσαλονίκης και το αντίστοιχο Διάγραμμα του Σχήματος 6.7, απεικονίζεται η κατανομή όλων των πρεσσιομετρικών αποτελεσμάτων σε διάγραμμα ($\log p_{LM}^*$, $\log E_M$) τόσο για τα λεπτόκοκκα, όσο και για τα αδρόκοκκα υλικά και δείχνουν πόσο στερεοποιημένα ή αποσαθρωμένα είναι τα εδαφικά υλικά. Το Διάγραμμα 6.14 αφορά στους Τεταρτογενής, το 6.15 στους Νεογενής και το 6.16 στους Αλπικούς σχηματισμούς. Είναι, επομένως, φανερό ότι πάνω από το 80% των υλικών σε κάθε περίπτωση, βρίσκεται πάνω από το όριο του λόγου $E_M/p_{LM}^*=10$, επομένως πρόκειται για στερεοποιημένα ή κανονικά στερεοποιημένα εδάφη, ενώ το υπόλοιπο ποσοστό αφορά σε χαλαρά – αποσαθρωμένα εδάφη. Ακόμα, συγκριτικά με το αντίστοιχο διάγραμμα για την περιοχή της Θεσσαλονίκης, στην προκειμένη περίπτωση, εφόσον οι τιμές του p_{LM}^* είναι σε κάθε περίπτωση μεγαλύτερες του 1,00MPa, πρόκειται για ακόμα πιο σταθεροποιημένα εδάφη.



Σχήμα6. 14: Συνολική κατανομή Τεταρτογενών Σχηματισμών



Σχήμα6. 15: Συνολική κατανομή Νεογενών Σχηματισμών

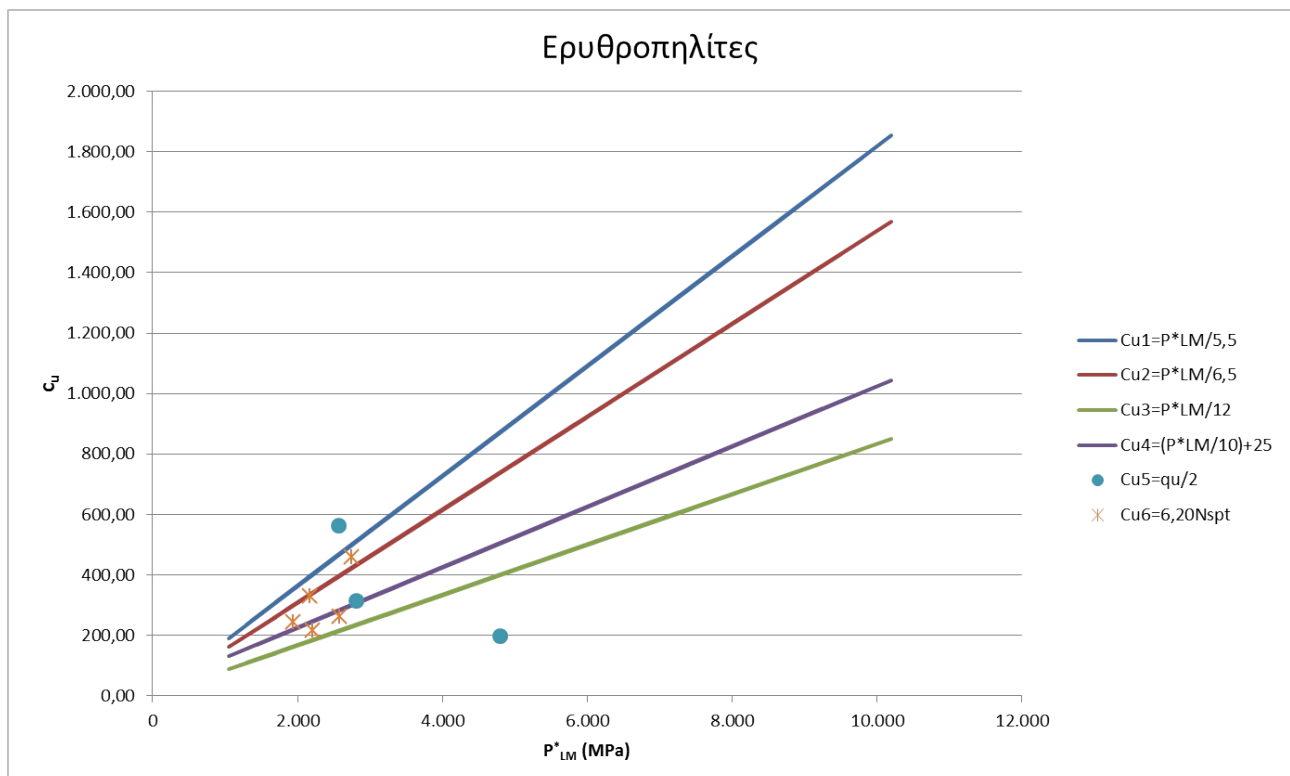


Σχήμα6. 16: Συνολική κατανομή Αλπικών Σχηματισμών

Το Διάγραμμα του Σχήματος 6.17 αφορά στους Ερυθροπηλίτες και, όμοια με την περίπτωση της Θεσσαλονίκης, συσχετίζει τις τιμές της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής c_u , από την εργαστηριακή τριαξονική δοκιμή UU και από δοκιμές UCS, με p^*_L , από τη βασική εξίσωση του Baguelin et al, 1978: $c_{u,M} = p^*_L / (5,5 \text{ ως } 12)$, με τη βέλτιστη εφαρμογή της καμπύλης να αντιστοιχεί στην τιμή $c_{u,M} = (p^*_L/10) + 25$, με τις σχέσεις $c_u = q_u / 2$ και $c_u = 6, 20 N_{SPT}$ (από το διάγραμμα Stroud, 1974).

Από το Διάγραμμα προκύπτει, και σε αυτήν την περίπτωση, ότι οι τιμές κυμαίνονται στα ίδια όρια, με κάποιες μικρές αποκλίσεις, οι οποίες πιθανότατα οφείλονται στο ότι δεν είναι γνωστό αν τα δείγματα προέρχονται από την ίδια γεώτρηση ή και το ίδιο βάθος.

Έτσι, κρίθηκε απαραίτητη περαιτέρω έρευνα ώστε να γίνουν σαφείς πληροφορίες για τα δείγματα, τις γεωτρήσεις και τα βάθη. Με τον τρόπο αυτό θα μπορούσε κανείς, συνεχίζοντας αυτή την εργασία να καταλήξει σε πολύ σημαντικά συμπεράσματα τόσο για τη c_u όσο και για τη γωνία εσωτρικής τριβής ϕ , τον συντελεστή K_0 , και τα λοιπά παράγωγα μεγέθη της δοκιμής, κάτι που όμως δεν ήταν αντικείμενο της συγκεκριμένης εργασίας.



Σχήμα6. 17: Διάγραμμα $c_u - p^*_L$ για Ερυθροπηλίτες

7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η συγκεκριμένη εργασία είχε ως σκοπό τη μελέτη της Πρεσσιομετρικής Δοκιμής. Μελετήθηκαν οι θεωρίες που αφορούν σε αυτή και τα παράγωγα μεγέθη αυτής, ενώ αναλύθηκαν οι μετρήσεις που ήδη υπήρχαν σε εδάφη της Θεσσαλονίκης και της Αθήνας, βάσει των Ευρωπαϊκών και Ελληνικών Προδιαγραφών, οι οποίες στηρίχθηκαν στις ακριβείς οδηγίες εφαρμογής της Πρεσσιομετρικής δοκιμής, τόσο κατά την εκτέλεση αυτής όσο και κατά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Στόχος ήταν η σύγκριση των αποτελεσμάτων προκειμένου να προκύψουν σαφή συμπεράσματα για την Πρεσσιομετρική δοκιμή, τόσο στη θεωρία, όσο και στην πράξη.

Έτσι, αναλύθηκε η θεωρία πάνω στην οποία βασίζεται η εδαφική αυτή δοκιμή, κατασκευάστηκε ένα πρόγραμμα προσδιορισμού των πρεσσιομετρικών μεγεθών από πρεσσιομετρικές δοκιμές σε Θεσσαλονίκη και Αθήνα και προέκυψαν κάποια βασικά διαγράμματα τα οποία συγκρίνουν τα αποτελέσματα αυτών των δοκιμών.

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν ακολουθούν:

- Οι πρεσσιομετρικές δοκιμές μπορούν να εκτελεστούν σε όλους τύπους εδαφικών υλικών και σε μαλακούς βράχους.
- Η πρεσσιομετρική δοκιμή αποτελεί αξιόπιστη μέθοδο μέτρησης της τάσης θραύσης του εδάφους και της παραμορφωσιμότητάς του.
- Οι πρεσσιομετρικές δοκιμές επιτρέπουν την ορθή εκτίμηση του βαθμού βελτίωσης που παρατηρείται στους χαλαρούς προενισχυμένους σχηματισμούς.
- Ορισμένες σχέσεις που αφορούν στην εκτίμηση του μέτρου E_s βασίζονται σε πρεσσιομετρικές δοκιμές που προτείνονται για υλικά με σημαντικό ποσοστό αργίλου.
- Οι βολίδες τύπου G-AX (Slotted tube) είναι καταλληλότερες από τις βολίδες τύπου G-BX (Flexible cover).
- Δίνονται τα προτεινόμενα διλογαριθμικά διαγράμματα απεικόνισης των πρεσσιομετρικών αποτελεσμάτων, και παράλληλα προτείνεται το συγκεκριμένο σύστημα ομαδοποίησης των αποτελεσμάτων, το οποίο δίνει σαφή αποτελέσματα.
- Είναι σαφής η απεικόνιση των χαμηλής πλαστικότητας αργιλικών και λεπτόκοκκων

υλικών CL (διάγραμμα 6.4), όπου γίνεται η συγκριτική θεώρηση των βασικών πρεσσιομετρικών παραμέτρων ($\log p_{LM}^*$, $\log E_m/p_{LM}^*$) ανά γεωτεχνικό σχηματισμό, κατά USCS, στην περιοχή της Θεσσαλονίκης,

- Όσον αφορά στους Τεταρτογενείς σχηματισμούς (Διάγραμμα 6.9), τα Αμμοχάλικα (71) και η Άργιλος (72), βρίσκονται στο εύρος τιμών που αντιστοιχεί σε σκληρό έδαφος, ενώ τα τσιμεντωμένα κορήματα και τα Λατυποπαγή (5) σε εκείνο που αντιστοιχεί σε ημιβραχώδες έδαφος.
- Όμοια, για τους Νεογενείς σχηματισμούς (Διάγραμμα 6.10), δίνεται το εύρος τιμών για τους Ερυθροπηλίτες (1) και την Αργιλική Μάργα (21) που αντιστοιχεί σε σκληρό έδαφος, όπως και για τους Αργυλοϊλυόλιθους (22) και τους Ιλυόλιθους-Αργιλοϊλυόλιθους (3), ενώ οι Ψαμμίτες (41) χαρακτηρίζονται ως σκληρό – ημιβραχώδες έδαφος και οι Μαργαϊκοί Ασβεστόλιθοι (44) βρίσκονται στα όρια αυτών των δύο.
- Ακόμα, όσον αφορά στους Αλπικούς σχηματισμούς (Διάγραμμα 6.11), οι Μεταψαμμίτες-Μεταϊλυόλιθοι (42) δίνουν τιμές σκληρού ως ημιβραχώδους εδάφους, ενώ οι Αργιλικό Σχιστόλιθοι (43) είναι καθαρά σκληροί.
- Τα λεπτόκοκα υλικά, και στις δύο περιπτώσεις εδαφικής μελέτης, παρουσιάζουν μια σχετική συγκέντρωση στα διαγράμματα απεικόνισης. Η προτεινόμενη σχέση συσχετισμού $E_s = 18,50 \cdot p_{LM}^*$ με εύρος συντελεστή από 16 έως 21 και για $p_{LM}^* = 1,0$ έως 6,5MPa είναι αποδεκτή για τα λεπτόκοκα υλικά. Επομένως, για τα λεπτόκοκα υλικά μπορούν να προκύψουν καταστατικές εξισώσεις που να είναι συγκρίσιμες μεταξύ τους.
- Τα αδρόκοκα υλικά, παρουσιάζουν αποκλίσεις στα διαγράμματα απεικόνισης αναλόγως της περιεκτικότητάς τους σε άμμο και σε χάλικες, και δεν μπορούν να αποφέρουν συγκρίσιμες εξισώσεις.
- Πάνω από το 60% των υλικών στην περίπτωση της Θεσσαλονίκης βρίσκεται πάνω από το όριο του λόγου $E_m/p_{LM}^*=10$, (διάγραμμα 6.7) επομένως πρόκειται για στερεοποιημένα ή κανονικά στερεοποιημένα εδάφη, ενώ το υπόλοιπο ποσοστό αφορά σε χαλαρά – αποσαθρωμένα εδάφη.
- Όσον αφορά τους σχηματισμούς της Αθήνας, πάνω από το 80% αυτών βρίσκεται πάνω από το όριο του λόγου $E_m/p_{LM}^*=10$ (διαγράμματα 6.14, 6.15 και 6.16), επομένως πρόκειται για στερεοποιημένα ή κανονικά στερεοποιημένα εδάφη. Το

υπόλοιπο ποσοστό αφορά σε χαλαρά – αποσαθρωμένα εδάφη. Ακόμα, συγκριτικά με το αντίστοιχο διάγραμμα για την περιοχή της Θεσσαλονίκης, στην προκειμένη περίπτωση, εφόσον οι τιμές του p_{LM}^* είναι σε κάθε περίπτωση μεγαλύτερες του 1,00MPa, πρόκειται για ακόμα πιο σταθεροποιημένα εδάφη.

- Η προσπάθεια συσχέτισμού των αποτελεσμάτων της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής, c_u , από την πρεσσιομετρική δοκιμή και εκείνων από τα εργαστηριακά αποτελέσματα., είχε ως αποτέλεσμα ότι οι τιμές κυμαίνονται στα ίδια όρια, με κάποιες μικρές αποκλίσεις, οι οποίες πιθανότατα οφείλονται στο ότι δεν είναι γνωστό αν τα δείγματα προέρχονται από την ίδια γεώτρηση ή και το ίδιο βάθος. Έτσι, κρίθηκε απαραίτητη περαιτέρω έρευνα ώστε να γίνουν σαφείς πληροφορίες για τα δείγματα, τις γεωτρήσεις και τα βάθη.

Τέλος, έγινε προσπάθεια αντίστοιχης συσχέτισης των τιμών της γωνίας εσωτερικής τριβής ϕ από τις πρεσσιομετρικές δοκιμές, με εκείνες που προκύπτουν από εργαστηριακά αποτελέσματα. Τα αντίστοιχα διαγράμματα δεν παρουσιάζονται στη συγκεκριμένη εργασία, λόγω ελλειπών πληροφοριών.

Επομένως, είναι απαραίτητη η συλλογή περισσότερων στοιχείων σχετικά με τις γεωτρήσεις, τα βάθη και τα δείγματα τα οποία μελετήθηκαν. Έτσι, θα μπορούσε κανείς, συνεχίζοντας αυτή την έρευνα να καταλήξει σε πολύ σημαντικά συμπεράσματα τόσο για τη c_u όσο και για τη γωνία εσωτερικής τριβής ϕ , τον συντελεστή K_0 , και τα λοιπά παράγωγα μεγέθη της δοκιμής, κάτι που όμως δεν ήταν αντικείμενο της συγκεκριμένης εργασίας.

8 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. F. Baguelin, J. F. Jezequel, D.H. Shields (1978): The Pressuremeter and foundation engineering
2. A. Ritsos, G. Migiros, A. Kollios, E. Kolovaris (2005): Evaluation of Pressuremeter tests performed within the formations of the Athens basin ISP5 - PRESSIO 2005
3. Α. Ρίτσος, Α. Μπασδέκης, Ν. Νάσκος: Εκτέλεση Πρεσσιομετρικών δοκιμών στην Περιοχή της Θεσσαλονίκης
4. Α. Γ. Αναγνωστόπουλος, Π. Σ. Ανδρέου (2006): Επιτόπου δοκιμές, ΕΜΠ, Δ.Π.Μ.Σ. 'Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων', 'Δομοστατικός Σχεδιασμός και Ανάλυση των Κατασκευών', Αθήνα
5. Michel Gambin, Jean-Pierre Magnan et Philippe Mestat (22-24 august 2005): ISP5 – PRESSIO 2005 Volume 1 & Volume 2, International Symposium 50 years of pressumeters, Marne-la-Vallee
6. A.A. Balkema: The Application of Pressuremeter Test Results to Foundation Design in Europe, Part 1 (Predrilles Pressuremeters/Self-boring Pressuremeters, Rotterdam
7. Γ. Μπουκουβάλας (Φεβρουάριος 2004): Σημειώσεις σε ειδικά θέματα θεμελιώσεων
8. Π. Γ. Μαρίνος, Ε. Ι. Αλέξη (2010): Διπλωματική εργασία Δ.Π.Μ.Σ. 'Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων': Εκτίμηση μέτρου παραμορφωσιμότητας ασθενών βραχομαζών, Σύγκριση μεθοδολογιών με δοδομένα σηράγγων και επίδραση στο σχεδιασμό υπογείων έργων, Αθήνα

9. European committee for standardisation: prEN 22476-4, Geotechnical investigation and testing – Field testing – Part 4: Ménard pressuremeter test, CEN/TC 341 N 457, 2009-10-08
10. Ελληνικές Προδιαγραφές για τη Δοκιμή Πρεσσιομέτρου E106-86 και E102-84
11. Jean-Louis Briaud (1992), The pressuremeter, A.A. Balkema/ Rotterdam/ Brookfield
12. Χρήστος Μαραγκός (1993): Σχεδιασμός Θεμελιώσεων με Δοκιμές Πεδίου, Θεσσαλονίκη
13. Braga M. Das: Principles of Geotechnical Engineering, Third Edition, Boston
14. Hans – George Kempfert Berhane Gebreselassie: Excavations and Foundations in soft soils, Spriner
15. Αναγνωστόπουλος Α. Γ., Παπαδόπουλος Β.Π. (2002), Επιφανειακές Θεμελιώσεις, εκδόσεις Συμεών
16. Edafos Engineering Consultants SA, E65 Motorway – Section 3, Geographical Unit N9, Final Geotechnical Design for Embankments, Appendix C: Empirical Correlations & Appendix D: Typical correlations used for the evaluation of geotechnical parameters
17. Braja M. Gas (1997), Advanced Soil Mechanics, Second Edition, Taylor&Francis
18. R. J. Mair & D. M. Wood, Pressuremeter Testing, methods and interpretation, Butterworths
19. B. G. Clarke, Pressuremeters in Geotechnical design, Blackie Academic & Professional

20. <http://www.geotechnique.info/SI/SI%20Book%20Chapter%209.pdf>

21. Α. Γ. Αναγνωστόπουλος (2008), Καθιζήσεις Επιφανειακών Θεμελιώσεων, 5η Αθηναϊκή Διάλεξη Γεωτεχνικής Μηχανικής, Ελληνική Επιστημονική Εταιρεία Εδαφομηχανικής και Γεωτεχνικής Μηχανικής, Ε.Μ.Π., Αθήνα