



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ**

---

**Διπλωματική Εργασία**

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΣΕ ΣΕΙΣΜΟ**

**Αγγελόπουλος Γεώργιος**

**A.M. 07114093**

*Επιβλέπων:* Νομικός Παύλος, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις ...../...../2020

Νομικός Παύλος, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Δημήτριος Δαμίγος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Μπενάρδος Ανδρέας, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

**ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2020**

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έγινε υπό τη επίβλεψη του κύριου Παύλου Νομικού, Αναπληρωτή Καθηγητή Ε.Μ.Π., τον οποίο θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά για την ανάθεση του θέματος, την επίβλεψη της εργασίας και την πολύτιμη υποστήριξή του καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής. Τον ευχαριστώ, παράλληλα, για το χρόνο που διέθεσε για τη μελέτη και τη διόρθωση της εργασίας, καθώς και για την υπομονή και κατανόηση του.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου και την αδελφή μου , Κωνσταντίνο, Δέσποινα και Έφη για την υποστήριξη όλα αυτά τα χρόνια αλλά και την κατανόηση που έδειξαν. Ακόμα ένα μεγάλο ευχαριστώ στην Αναστασία για την βοήθεια που μου έδωσε όλον τον καιρό που έκανα την Διπλωματική εργασία, αλλά και για όλα αυτά τα χρόνια που είναι δίπλα μου.

Δεν γίνεται να μην ευχαριστήσω και την οργάνωση μου την Αριστερή Συσπείρωση, που είναι μια οικογένεια για μένα, και για όλα αυτά που μου έμαθε τα τελευταία χρόνια. Ένα ακόμα πιο μεγάλο ευχαριστώ στον Αριστερό Χώρο Μεταλλειολόγων ΜΕΤαλλουργών. Για όλους τους μεγάλους συντρόφους αλλά και το Έτος μου, που μου δείξαν ότι υπάρχει και άλλος δρόμος μπροστά στον ατομικό, για όλα αυτά που ζήσαμε στις πορείες και στις καταλήψεις της σχολής , και είμαι σίγουρος ότι ποτέ δεν θα με αφήσουν από δίπλα τους. Τέλος ευχαριστώ και όλους τους μικρούς συντρόφους που μου δείχνουν καθημερινά με το πείσμα τους ότι υπάρχει συνέχεια και να είναι σίγουροι ότι δεν θα τους αφήσω ποτέ μόνους τους. *Γιατί οι αγώνες δεν αντλούν την ποιήση τους από το παρελθόν, αλλά από το μέλλον της ανατροπής, και εσείς είστε το μέλλον.*

## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται το αντικείμενο της σεισμικής συμπεριφοράς των σηράγγων και την αριθμητική προσομοίωση της απόκρισης μίας σήραγγας στη σεισμική διέγερση. Προκειμένου να διαμορφωθούν τα αριθμητικά μοντέλα που εξετάστηκαν και έπειτα να πραγματοποιηθεί η αριθμητική ανάλυση, χρησιμοποιήθηκε το δισδιάστατο υπολογιστικό πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, RS2 2019 (Rocscience 2019).

Αρχικά, αναλύθηκαν οι συνθήκες σχεδιασμού και διάνοιξης μια σήραγγας καθώς αποτελούν σημαντικά κριτήρια για έναν μηχανικό κατά την διάρκεια της κατασκευής της. Έπειτα αναλύθηκαν οι επιδράσεις των σεισμικών κυμάτων στις σήραγγες και τα ρήγματα τα οποία δημιουργούνται, αλλά και άλλες αστοχίες οι οποίες δημιουργούνται κατά την διάρκεια ενός σεισμού. Τονίζεται η σημασία της σεισμικής ανάλυσης απο την σκοπιά του μηχανικού σε κάθε υπό κατασκευή σήραγγα. Ο καθορισμός του σεισμικού περιβάλλοντος, η εκτίμηση της απόκρισης του εδάφους και της κατασκευής σε σεισμική δόνηση αποτελούν βασικά κριτήρια της μελέτης της σεισμικής συμπεριφοράς μιας σήραγγας πριν την κατασκευή της.

Στη συνέχεια μελετάται η συνάρτηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών, των γεωτεχνικών παραμέτρων και της μεθόδου σεισμικής ανάλυσης με την απόκριση μίας αβαθούς σήραγγας υπό συνθήκες σεισμικής φόρτισης. Για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε το υπολογιστικό μοντέλο RS2 της Rocscience, το θεωρητικό υπόβαθρο του οποίου περιγράφεται σε αυτήν την εργασία. Αναλύονται διεξοδικά τα βήματα που ακολουθήθηκαν για την δημιουργία των μοντέλων στο πρόγραμμα και εντέλει λαμβάνονται αποτελέσματα σχετικά με τις μετατοπίσεις στην επιφάνεια του εδάφους, στην περιφέρεια της σήραγγας, των εντατικών μεγεθών (αξονικές δυνάμεις, ροπές κάμψης, τέμνουσες δυνάμεις) που αναπτύσσονται στην επένδυση της σήραγγας και τα στοιχεία διαρροής της γεωμάζας.

Τα μοντέλα τα οποία δημιουργήθηκαν, διαφοροποιήθηκαν με βάση τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά, το ύψος των υπερκειμένων, το μέτρο ελαστικότητας και τη διατμητική αντοχή της γεωμάζας. Σημαντικό στοιχείο είναι ότι εξετάστηκε η επίδραση των χαρακτηριστικών του σεισμικού κραδασμού, χρησιμοποιώντας εξιδανικευμένους παλμούς Ricker με διαφορετικό συχνοτικό περιεχόμενο, αλλά και πραγματική σεισμική καταγραφή από τον σεισμό Duzce του Νοεμβρίου 1999 στην Τουρκία, για τον οποίον καταγράφηκαν σεισμικές επιταχύνσεις έως και 1.0g (δηλ. σεισμικές επιταχύνσεις ίσες με την επιτάχυνση της βαρύτητας), και ο οποίος οδήγησε σε κατάρρευση μέρος της τότε υπό κατασκευή σήραγγας Bolu. Επιπλέον, εξετάστηκε η μεθοδολογία σεισμικής φόρτισης της σήραγγας με την ψευδοστατική μέθοδο, όπου η δυναμική ανάλυση αντικαθίσταται από μία ισοδύναμη στατική φόρτιση με κάποιον σεισμικό συντελεστή. Στην παρούσα εργασία εξετάστηκε σεισμικός συντελεστής ίσος με τον συντελεστή μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης των αντίστοιχων δυναμικών κραδασμών.

Τέλος καταγράφονται και ερμηνεύονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων και με την χρήση διαγραμμάτων και πινάκων πραγματοποιούνται συγκρίσεις μεταξύ των μοντέλων, με σκοπό να διαμορφωθεί μία πλήρης εικόνα για την απόκριση της σήραγγας τόσο κατά τη διάρκεια όσο και μετά το στάδιο της σεισμικής φόρτισης, λαμβάνοντας υπόψη όλα τα χαρακτηριστικά των μοντέλων.

## Abstract

The current thesis deals with the design of a tunnel and its seismic loading in respect of a tunnel's behavior earthquakes. In order to formulate the models used and then to perform the numerical analysis, the two-dimensional finite element computer program Rocscience (2019), RS2 2019 was used.

The thesis begins with the design and drilling conditions of a tunnel were analyzed as they are important criteria for an engineer during its construction. The effects of seismic waves on the tunnels and faults that are created, as well as other failures that are created during an earthquake, were then analyzed. The importance of seismic analysis from the point of view of the engineer in every tunnel that is going to be built is emphasized. The control of the seismic character, the manifestation of the response of its issues and the required messages in each year, are created basic elements of the disposition of the seismic application of drainage images before its construction.

On the next chapter of this we study the function of the geometric users, the geotechnical parameters and the diffusion mood is studied with the response of a shallow supply corridor with the different colors. This simulation was conducted using Rocscience's RS2 computer model , the theoretical background of which is also included in this thesis The steps followed in the program are analyzed in detail and finally results are obtained regarding the displacements on the ground surface, in the periphery of the tunnel, of the intensive quantities (axial forces, bending moments, shear forces) that develop in the tunnel lining and the yielded element of geomass.

The models that were created were differentiated based on their geometric characteristics, the height of the supernatants, the measure of elasticity and the shear strength of the geomass. The effect of seismic vibration characteristics was examined, using idealized Ricker pulses with different frequency content, but also a real seismic record from the Duzce earthquake of November 1999 in Turkey, for which seismic accelerations of up to 1.0g were recorded (ie. seismic accelerations equal to the acceleration of gravity), and which led to the collapse of part of the then under construction Bolu tunnel. In addition, the methodology of seismic loading of the tunnel with the pseudostatic method was examined, where the dynamic analysis is replaced by an equivalent static charge with a seismic factor. In the present work, a seismic coefficient equal to the maximum seismic acceleration coefficient of the respective dynamic vibrations was examined.

On the final part of the thesis we list and interpret the results of the analysis and by using diagrams and tables we conduct comparisons of the models, in order to shape a thorough view of the models after the seismic loading stage, taking into account all the characteristics of our models.

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

### Περιεχόμενα

ΠΡΟΛΟΓΟΣ - ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....	ii
Περίληψη.....	iii
Abstract .....	iv
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ .....	v
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ .....	vii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	xi
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 <sup>ο</sup> : ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	12
1.1 Σκοπός της εργασίας .....	12
1.2 Διάρθρωση της εργασίας .....	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 <sup>ο</sup> : ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΥΠΟ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ.....	13
2.1 Εισαγωγικά στοιχεία .....	13
2.2 Τύπος Σηράγγων και μέθοδοι κατασκευής.....	13
2.3 Υπόγειες Κατασκευές .....	15
2.4 Σεισμική απόκριση .....	15
2.4.1 Εδαφική κίνηση .....	17
2.4.2 Επίδραση των τοπικών εδαφικών συνθηκών .....	19
2.4.3 Εδαφική Αστοχία .....	21
2.5 Εμφάνιση ρωγμών κατά μήκος της επένδυσης σήραγγας .....	22
2.6 Γενικές παρατηρήσεις για τη σεισμική συμπεριφορά υπόγειων κατασκευών.....	25
2.7 Παραδείγματα απόκρισης σηράγγων σε σεισμικές φορτίσεις.....	28
2.7.1 Γενικά στοιχεία για έναν σεισμό .....	28
2.7.2 Επίδραση σεισμικών κυμάτων στις σήραγγες .....	30
2.7.3 Ανάλυση Σεισμικού κινδύνου .....	31
2.7.4 Ο σεισμός του Kobe .....	32
2.7.5 Ο σεισμός ChiChi στην Ταιβάν .....	35
2.7.6 Σήραγγες Bolu, Τουρκία .....	37
2.7.7 Σεισμός L' Aquila .....	38
2.8 Η γενική μεθοδολογία της σεισμικής ανάλυσης από την σκοπιά του μηχανικού. ....	41
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 <sup>ο</sup> : ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΚΑΙ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΤΟΥΣ ΣΕ ΣΕΙΣΜΟ.....	44
3.1 Υπολογιστικό πρόγραμμα RS2 2020 .....	44
3.2 Μοντέλο Mohr – Coulomb .....	46
3.2.1 Αναλυτικός σχεδιασμός μοντέλου προσομοίωσης .....	47
3.2.1.1 Ρυθμίσεις Μοντέλου –Project Settings.....	48

3.2.1.2	Δημιουργία εξωτερικών ορίων μοντέλου (Boundaries) .....	49
3.2.1.3	Ιδιότητες των Υλικών.....	50
3.2.1.4	Εγκατάσταση Πλέγματος.....	52
3.2.1.5	Προσδιορισμός Οριακών Συνθηκών .....	53
3.2.1.6	Για την εκσκαφή σήραγγας στο μοντέλο μας και την τοποθέτηση σκυροδέματος επένδυσης.....	54
3.2.1.7	Ορισμός δυναμικού φορτίου και τοποθέτηση παλμού (Δυναμική διέγερση).....	58
3.2.1.8	Επισκόπηση των Time Queries σε μια δυναμική ανάλυση RS2.....	63
3.2.2	Υπολογισμός Δεδομένων των μοντέλων μας.....	64
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 <sup>ο</sup> : ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ .....		66
4.1	Εισαγωγικά .....	66
4.2	Συμβολισμοί γεωτεχνικών παραμέτρων σχεδιασμού .....	66
4.3	Πίνακας μηχανικών χαρακτηριστικών των σηράγγων για τα μοντέλα .....	68
4.4	Δυναμική ανάλυση και σεισμική φόρτιση.....	69
4.5	Τελική προσομοίωση των μοντέλων μαζί με την δυναμική ανάλυση και την σεισμική φόρτιση 71	
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 <sup>ο</sup> : ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ .....		74
5.1	Αποτελέσματα δυναμικών αριθμητικών αναλύσεων.....	74
5.1.1	1 <sup>η</sup> σειρά αριθμητικών προσομοιώσεων (Rickerf <sub>n</sub> =1, α=0.6) .....	74
5.1.2	2 <sup>η</sup> σειρά αριθμητικών προσομοιώσεων (Rickerf <sub>n</sub> =2, α= 0.6).....	90
5.1.3	3 <sup>η</sup> σειρά αριθμητικών προσομοιώσεων (σειсмоγράφημα Duzce).....	96
5.2	Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης για μοντέλα με ψευδοστατική φόρτιση.....	101
5.3	Αριθμητική προσομοίωση για όλα τα μοντέλα με στάδια στην σεισμική φόρτιση.....	106
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 <sup>ο</sup> : ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....		118
6.1.	Επίδραση του σεισμικού κραδασμού στην απόκριση της σήραγγας – Δυναμική ανάλυση.....	118
6.2.	Εκτίμηση σεισμικής απόκρισης με ψευδοστατική ανάλυση .....	118
6.3.	Επίδραση της ακαμψίας και της διατμητικής αντοχής του γεωυλικού.....	119
6.4.	Επίδραση του βάθους της σήραγγας.....	119
6.4.	Επίδραση του συχνοτικού περιεχομένου του σεισμικού κραδασμού. ....	120
6.5.	Σύγκριση μεταξύ εξιδανικευμένου και πραγματικού σειсмоγραφήματος.....	120
6.6.	Χρονική εξέλιξη της απόκρισης της σήραγγας.....	120
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....		121

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1: Τυπικές διατομές σηράγγων.....	14
Σχήμα 2.2: Προσδιορισμός της σεισμικής εδαφικής κίνησης με το βάθος: (1) χρονοϊστορία επιτάχυνσης σε επιφανειακή απόθεση βράχου, (2) διαδικασία υπολογισμού της χρονοϊστορίας επιτάχυνσης στο βραχώδες υπόβαθρο, (3-4) χαρακτηριστικά της εδαφικής απόκρισης στην επιφάνεια του εδάφους και στο βάθος που βρίσκεται η σήραγγα.....	16
Σχήμα 2.3: Πηγές ασύγχρονης κίνησης και χωρικής μεταβλητότητας της εδαφικής κίνησης (α) μέτωπο κυμάτων, (β) μηχανισμός ρήγματος, (γ) ετερογένεια των εδαφικών αποθέσεων, (δ) τοπικές εδαφικές συνθήκες.....	16
Σχήμα 2.4: Απλοποιημένη αναπαράσταση των διαφόρων τύπων παραμόρφωσης των σηράγγων εξαιτίας των σεισμικών κυμάτων (τροποποιημένα μετά τους Owen & Scholl, 1981).....	22
Σχήμα 2.5: Στατιστικά αποτελέσματα βλαβών σε υπόγειες κατασκευές από σεισμικές διεγέρσεις (Sharma and Judd, 1991).....	27
Σχήμα 2.6: Παγκόσμιος χάρτης τεκτονικών πλακών ( Τα στοιχεία που παρατηρούμε είναι 1) Ζώνη Αφαίρεσης, 2) Αβέβαιο όριο πλάκας, 3) Ρήγματα μετασχηματισμού πλάγιας ολίσθησης, 4) Άξονας κορυφογραμμής.....	29
Σχήμα 2.7: Τύποι ρηγμάτων.....	29
Σχήμα 2.8: Σχέση σεισμικής ροής με χαρακτηριστικά διαρροής (Krammer , GeotechnicalEarthquakeEngineering).....	32
Σχήμα 2.9: Διάταξη εγκάρσιου οπλισμού στα κεντρικά υποστυλώματα (Iida et al., 1996).....	33
Σχήμα 2.10: Κατάρρευση του σταθμού Daikai εξαιτίας της αστοχίας των κεντρικών υποστυλωμάτων (Iida et al., 1996). .....	34
Σχήμα 2.11: Σκαρίφημα της βλάβης στον υπόγειο σταθμού Dakai (Iida et al., 1996).....	34
Σχήμα 2.12: Αστοχία πρανούς σε είσοδο σήραγγας, σεισμός Chi-Chi, Taiwan (Hashashetal., 2001)..	36
Σχήμα 2.13: Αριθμός σηράγγων που υπέστησαν διάφορους τύπους ζημιών και τοποθεσίες σηράγγων σε σχέση με την εκτοπισμένη ζώνη σφάλματος (Roberto Guidotti and Alberto Castellani) .....	37
Σχήμα 2.14: Σήραγγα Bolu, τμήμα που αποκαταστάθηκε μετά το σεισμό (Menkiti, 2001) .....	38
Σχήμα 2.15: (Επάνω) Γεωλογική μηκοτομή του βουνού Gran Sasso, και οι θάλαμοι του INFN, (κάτω) εγκαταστάσεις των εργαστηρίων του Εθνικού Ινστιτούτου Πυρηνικής Φυσικής, INFN .....	39
Σχήμα 2.16: (αριστερά) Εντοπισμός ίχνους βλαβών που αφορούν τη σήραγγα του αυτοκινητόδρομου Gran Sasso, που καταγράφηκε κατά την κατασκευή. (δεξιά) ίχνος βλαβών στο κατακόρυφο επίπεδο, κοντά στην είσοδο της σήραγγας.....	40
Σχήμα 2.17: Παραμορφώσεις κατά το διαμήκη άξονα της σήραγγας ( OwenandScholl, 1981).....	42
Σχήμα 2.18: (Α) Ωοειδής παραμόρφωση κυκλικής διατομής, (Β) Στρέβλωση ορθογωνικής διατομής	43
Σχήμα 3.1: Επιλογή σταδίων στο πρόγραμμα.....	48
Σχήμα 3.2: Επιλογή Μονάδας Αντοχής – Metric, StressasMPa .....	49
Σχήμα 3.3: Δημιουργία κυκλικής σήραγγας.....	49
Σχήμα 3.4: Εισαγωγή ιδιοτήτων των υλικών για τις προσομοιώσεις σε αβαθείς σήραγγες (Τα νούμερα είναι ενδεικτικά) .....	51
Σχήμα 3.5: Ιδιότητες εντατικού πεδίου για βαθιά σήραγγα .....	52
Σχήμα 3.7: Πίνακας ιδιοτήτων για τον πυρήνα της σήραγγας μας (Δεύτερο στάδιο).....	54
Σχήμα 3.8: Πίνακας εντολών για την εκσκαφή της σήραγγας.....	54
Σχήμα 3.9: Πίνακας εντολών ορισμού ιδιοτήτων της επένδυσης.....	55
Σχήμα 3.10: Πυρήνας της σήραγγας για το στάδιο της αποτόνωσης μαζί με το σκυρόδεμα που δεν είναι ακόμη ενεργοποιημένο .....	56
Σχήμα 3.11: Εκσκαφή της σήραγγας και ενεργοποίηση της επένδυσης από σκυρόδεμα.....	56
Σχήμα 3.12: Πίνακας εντολών για την τοποθέτηση της σφήνας και αποτύπωσή της .....	58

Σχήμα 3.13: Δυναμική Ανάλυση .....	59
Σχήμα 3.14: Πίνακας Εντολών για το Δυναμικό Στάδιο .....	59
Σχήμα 3.15: Πίνακας εντολών για τον ορισμό της Δυναμικής Διέγερσης .....	60
Σχήμα 3.16: Πίνακας εντολών για τον παλμό που τοποθετείται σε κάθε περίπτωση .....	61
Σχήμα 3.17: Πίνακας εντολών για την ψευδοστατική σεισμική φόρτιση .....	61
Σχήμα 3.18: Πίνακας εντολών τοποθέτησης ορίου απορρόφησης .....	62
Σχήμα 3.19: Πίνακας εντολών για τον καθορισμό σημείων .....	64
Σχήμα 3.20: Αποτύπωση των <i>Time Queries</i> .....	64
Σχήμα 3.21: Αποτύπωση πίνακα υπολογισμού δεδομένων .....	65
Σχήμα 4.1: Παλμός <i>Ricker</i> , $f_n=1$ , $a_{max}=0.6$ .....	70
Σχήμα 4.2: Παλμός <i>Ricker</i> , $f_n=2$ , $a_{max}=0.6$ .....	70
Σχήμα 4.3: Σεισμός <i>Duzce</i> .....	70
Σχήμα 4.4: Ψευδοστατική σεισμική φόρτιση .....	71
Σχήμα 4.5: Πρώτο στάδιο .....	71
Σχήμα 4.6: Αποτόνωση πυρήνα σήραγγας .....	72
Σχήμα 4.7: Ανασκαφή και υποστήριξη σήραγγας .....	72
Σχήμα 4.8: Δυναμική διέγερση με παλμό στην κάτω επιφάνεια .....	73
Σχήμα 4.9: Ψευδοστατική σεισμική φόρτιση .....	73
Σχήμα 4.10: Σήραγγα κυκλικής διατομής με σφήνα και δυναμική ανάλυση (μοντέλο που προετοιμάστηκε αλλά τελικά δεν παρουσιάζεται) .....	73
Σχήμα 5.1: Κατακόρυφη και οριζόντια τάση, γεωστατική κατάσταση πριν και μετά την εκσκαφή ....	74
Σχήμα 5.2: Stage 2, μετατοπίσεις στην φάση της αποτόνωσης .....	75
Σχήμα 5.3: Stage 3, μετατοπίσεις γύρω από τη σήραγγα ( $max \rightarrow 0.0231m$ ) .....	75
Σχήμα 5.4: Stage 3, καθιζήσεις για την επιφάνεια του εδάφους ( $max \rightarrow -0.007m$ ) .....	75
Σχήμα 5.5: Stage 3, σημεία διαρροής της γεωμάζας και εφελκυστική τάση ( <i>Yielded Elements</i> ) .....	76
Σχήμα 5.6: Stage 3, αξονικές δυνάμεις στην επένδυση της σήραγγας .....	76
Σχήμα 5.7: Stage 3, Ροπές κάμψης στην επένδυση της σήραγγας .....	76
Σχήμα 5.8: Stage 3, Τέμνουσες Δυνάμεις στην επένδυση της σήραγγας .....	77
Σχήμα 5.9: Stage 4, Ολικές μετατοπίσεις γύρω από την εκσκαφή ( $max \rightarrow 0.0332m$ ) .....	77
Σχήμα 5.10: Stage 4, Καθιζήσεις στην επιφάνεια ( $max \rightarrow -0.004m$ ) .....	77
Σχήμα 5.11: Stage 4, στοιχεία διαρροής του εδάφους και ελάχιστη κύρια τάση ( $\sigma_3$ ) .....	78
Σχήμα 5.12: (Α) Αξονικές δυνάμεις (0.578 – 0.776 MN), (Β) Ροπές Κάμψης (0.044 – 0.05 MNm), (Γ) Τέμνουσες Δυνάμεις (0.034 – 0.039 MN) .....	78
Σχήμα 5.13: Κατακόρυφη και οριζόντια τάση, γεωστατική κατάσταση πριν την εκσκαφή .....	79
Σχήμα 5.14: Stage 2, Ολικές μετατοπίσεις γύρω από την σήραγγα στην φάση της αποτόνωσης .....	80
Σχήμα 5.15: Ολικές μετατοπίσεις γύρω από την σήραγγα ( $max \rightarrow 0.0108m$ ) .....	80
Σχήμα 5.16: Καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους ( $max \rightarrow -0.0036m$ ) .....	80
Σχήμα 5.17: Stage 3, Ελάχιστη κύρια τάση και σημεία διαρροής της γεωμάζας .....	81
Σχήμα 5.18: Stage 3, Αξονικές δυνάμεις στην επένδυση της σήραγγας (0.436-0.477 MN) .....	81
Σχήμα 5.19: Stage 3, Ροπές κάμψης στην επένδυση της σήραγγας (-0.003- 0.003 MNm) .....	81
Σχήμα 5.20: Stage 3, Τέμνουσες Δυνάμεις στην επένδυση της σήραγγας (-0.002 – 0.002 MN) .....	82
Σχήμα 5.21: Stage 4, ολικές μετατοπίσεις γύρω από την εκσκαφή ( $max \rightarrow 0.0532m$ ) .....	82
Σχήμα 5.22: Stage 4, Καθιζήσεις στην επιφάνεια ( $max \rightarrow 0.006m$ ) .....	82
Σχήμα 5.23: Stage 4, στοιχεία διαρροής του εδάφους και ελάχιστη κύρια τάση ( $\sigma_3$ ) .....	83
Σχήμα 5.24: (Α) Αξονικές δυνάμεις (0.457 – 0.89 MN), (Β) Ροπές Κάμψης (0.07 – 0.105 MNm), (Γ) Τέμνουσες Δυνάμεις (0.039 – 0.056 MN) .....	83



Σχήμα 5.25: Κατακόρυφη και οριζόντια τάση, γεωστατική κατάσταση πριν την εκσκαφή .....	85
Σχήμα 5.26: Ολικές μετατοπίσεις γύρω από την σήραγγα στη φάση της αποτόνωσης.....	85
Σχήμα 5.27: Μετατοπίσεις γύρω από την σήραγγα ( $max \rightarrow 0.0354m$ ).....	85
Σχήμα 5.28: Καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους( $max \rightarrow -0.013m$ ) .....	86
Σχήμα 5.29: Σημεία διαρροής της γεωμάζας (YieldedElements) και ελάχιστη κύρια τάση (EffectiveSigma 3).....	86
Σχήμα 5.30: Αξονικές Δυνάμεις στην επένδυση της σήραγγας (0.801-0.86MN).....	86
Σχήμα 5.31: Ροπές κάμψης στην επένδυση της σήραγγας (-0.003- 0.003 MNm) .....	87
Σχήμα 5.32: Τέμνουσες Δυνάμεις στην επένδυση της σήραγγας (-0.002 – 0.002 MN).....	87
Σχήμα 5.33: Ολικές μετατοπίσεις γύρω από την εκσκαφή ( $max \rightarrow 0.0357m$ ).....	87
Σχήμα 5.34: Καθιζήσεις στην επιφάνεια, Stage 4 ( $max \rightarrow -0.012m$ ).....	88
Σχήμα 5.35: Στοιχεία διαρροής γεωμάζας και εφελκυστική τάση, Stage 4.....	88
Σχήμα 5.36: (Α) Αξονικές δυνάμεις (0.884 – 1.098MN), (Β) Ροπές κάμψης (- 0.041 – 0.037MNm), (Γ) Τέμνουσες Δυνάμεις (-0.033 – 0.032MN).....	89
Σχήμα 5.37: Ολικές μετατοπίσεις γύρω από την εκσκαφή ( $max \rightarrow 0.028m$ ).....	90
Σχήμα 5.38: Stage 4, Καθιζήσεις στην επιφάνεια( $max \rightarrow -0.007m$ ) .....	90
Σχήμα 5.39: Ελάχιστη κύρια τάση (EffectiveSigma 3) και στοιχεία διαρροής της γεωμάζας .....	91
Σχήμα 5.40: Αξονικές δυνάμεις (0.509 – 0.581 MN).....	91
Σχήμα 5.41: Ροπές Κάμψης (-0.022 – 0.021 MNm).....	91
Σχήμα 5.42: Τέμνουσες Δυνάμεις (-0.016 – 0.016 MN) .....	92
Σχήμα 5.43: Ολικές Μετατοπίσεις γύρω από την εκσκαφή ( $max \rightarrow 0.0105m$ ).....	92
Σχήμα 5.44: Καθιζήσεις στην επιφάνεια ( $max \rightarrow -0.0036m$ ) .....	92
Σχήμα 5.45: Ελάχιστη κύρια τάση και στοιχεία διαρροής της γεωμάζας .....	93
Σχήμα 5.46: Αξονικές Δυνάμεις (0.463 – 0.564 MN).....	93
Σχήμα 5.47: Ροπές Κάμψης (-0.008 – 0.01 MNm).....	93
Σχήμα 5.48: Τέμνουσες Δυνάμεις (-0.008 – 0.009 MN) .....	94
Σχήμα 5.49: Ολικές μετατοπίσεις γύρω από την εκσκαφή ( $max \rightarrow 0.0354m$ ).....	94
Σχήμα 5.50: Καθιζήσεις στην επιφάνεια ( $max \rightarrow -0.013m$ ).....	94
Σχήμα 5.51: Ελάχιστη κύρια τάση (Effective Sigma 3) και στοιχεία διαρροής της γεωμάζας .....	95
Σχήμα 5.52: Αξονικές Δυνάμεις (0.844 – 0.896 MN).....	95
Σχήμα 5.53: Ροπές Κάμψης (-0.01 – 0.011 MNm).....	95
Σχήμα 5.54: Τέμνουσες Δυνάμεις (-0.008 – 0.008 MN) .....	96
Σχήμα 5.55: Ολικές Μετατοπίσεις γύρω από την εκσκαφή ( $Max \rightarrow 0.45m$ ) .....	97
Σχήμα 5.56: Καθιζήσεις στην επιφάνεια ( $max \rightarrow 0.27m$ ).....	97
Σχήμα 5.57: Ελάχιστη κύρια τάση (Effective Sigma 3) και στοιχεία διαρροής της γεωμάζας .....	97
Σχήμα 5.58: Αξονικές Δυνάμεις (0.838 – 2.04 MN).....	98
Σχήμα 5.59: Ροπές Κάμψης (-1.265 – 1.354 MNm).....	98
Σχήμα 5.60: Τέμνουσες Δυνάμεις (-0.566 – 0.556 MN) .....	98
Σχήμα 5.61: Ολικές Μετατοπίσεις γύρω από την σήραγγα ( $Max \rightarrow 0.408m$ ).....	99
Σχήμα 5.62: Καθιζήσεις στην επιφάνεια ( $Max \rightarrow 0.12m$ ).....	99
Σχήμα 5.63: Εφελκυστική Τάση και στοιχεία διαρροής της γεωμάζας.....	99
Σχήμα 5.64: Αξονικές Δυνάμεις (1.673 – 3.038 MN).....	100
Σχήμα 5.65: Ροπές Κάμψης (-1.065 – 0.971 MNm).....	100
Σχήμα 5.66: Τέμνουσες Δυνάμεις (-0.492 – 0.511 MN) .....	100
Σχήμα 5.67: Ολικές μετατοπίσεις γύρω από την εκσκαφή ( $max \rightarrow 0.26m$ ) .....	101
Σχήμα 5.68: Καθιζήσεις στην επιφάνεια ( $max \rightarrow 0.085$ ).....	102
Σχήμα 5.69: Ελάχιστη κύρια τάση και στοιχεία διαρροής της γεωμάζας .....	102
Σχήμα 5.70: Αξονικές Δυνάμεις (0.316 – 1.179MN).....	102

Σχήμα 5.71: Ροπές κάμψης (-0.485 – 0.467 MNm).....	103
Σχήμα 5.72: Τέμνουσες Δυνάμεις ( -0.21-0.223 MN).....	103
Σχήμα 5.74: Καθιζήσεις στην επιφάνεια (max→ 0.122m).....	104
Σχήμα 5.75: Ελάχιστη κύρια τάση και στοιχεία διαρροής της γεωμάζας .....	104
Σχήμα 5.76: Αξονικές Δυνάμεις (0.563-1.582 MN) .....	105
Σχήμα 5.77: Ροπές Κάμψης (-0.529-0.518 MNm) .....	105
Σχήμα 5.78: Τέμνουσες Δυνάμεις (-0.237-0.23 MN).....	105
Σχήμα 5.79: Αποτύπωση σταδίων σεισμικής φόρτισης για τον παλμό Ricker $f_n=1$ .....	107
Σχήμα 5.80: Dynamic Excitation 0.4sec (0.441-0.559 MN) .....	108
Σχήμα 5.81: Dynamic Excitation 0.8 sec (0.398-0.624 MN) .....	108
Σχήμα 5.82: . Dynamic Excitation 1.2 sec (0.294-1.019 MN) .....	108
Σχήμα 5.83: Dynamic Excitation 1.6 sec (0.369- 1.031 MN) .....	109
Σχήμα 5.84: Dynamic Excitation 2.0 sec (0.439-0.846 MN) .....	109
Σχήμα 5.85: Dynamic Excitation 3.0 sec (0.482-0.859 MN) .....	109
Σχήμα 5.86: Dynamic Excitation 0.4sec (-0.005-0.005 MNm).....	110
Σχήμα 5.87: Dynamic Excitation 0.8 sec (-0.032-0.035MNm).....	110
Σχήμα 5.88: Dynamic Excitation 1.2 sec (-0.194-0.173MNm).....	110
Σχήμα 5.89: Dynamic Excitation 1.6 sec (-0.096-0.073MNm).....	111
Σχήμα 5.90: Dynamic Excitation 2.0 sec (-0.066-0.047MNm).....	111
Σχήμα 5.91: Dynamic Excitation 3.0 sec(-0.019-0.02MNm).....	111
Σχήμα 5.92: Dynamic Excitation 2 sec (-0.071-0.062 MN) .....	112
Σχήμα 5.93: Dynamic Excitation 4 sec (-0.187-0.22 MN) .....	112
Σχήμα 5.94: Dynamic Excitation 6 sec (-0.628-0.608 MN) .....	112
Σχήμα 5.95: Dynamic Excitation 8 sec (-0.689-0.744MN).....	113
Σχήμα 5.96: Dynamic Excitation 10 sec (-0.566- 0.556 MN) .....	113
Σχήμα 5.97: Dynamic Excitation 12 sec (-0.702- 0.65 MN) .....	113
Σχήμα 5.98: Dynamic Excitation 14 sec (-0.615-0.584 MN) .....	114
Σχήμα 5.99: Dynamic Excitation 16 sec (-0.564 – 0.634 MN).....	114
Σχήμα 5.100: Dynamic Excitation 18 sec (-0.561-0.636).....	114
Σχήμα 5.101: Dynamic Excitation 20 sec (-0.584- 0.61 MN) .....	115
Σχήμα 5.102: DynamicExcitation 25 sec (-0.573-0.622 MN).....	115

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Πιθανοί σύνδεσμοι μεταξύ αιτιών και τα αντίστοιχα αποτελέσματα – Αδύναμη ή αποφασιστική επιρροή .....	25
Πίνακας 2: Συμβολισμοί γεωτεχνικών χαρακτηριστικών και ιδιοτήτων των υλικών .....	68
Πίνακας 3: Συμβολισμός ιδιοτήτων υλικών για την επένδυση .....	68
Πίνακας 4: Συμβολισμός ιδιοτήτων για τα μοντέλα μας .....	69
Πίνακας 5: Συμβολισμοί και τιμές για την επένδυση της σήραγγας .....	69
Πίνακας 6: Σύγκριση δυνάμεων, ροπών κάμψης και μετατοπίσεων πριν και μετά την σεισμική φόρτιση, $h=10m$ και $E=50MPa$ .....	79
Πίνακας 7: Σύγκριση δυνάμεων πριν και μετά την σεισμική φόρτιση, $h=10m$ και $E=100 MPa$ .....	84
Πίνακας 8: Σύγκριση δυνάμεων γύρω από την σήραγγα πριν και μετά την σεισμική φόρτιση ( $h=20m$ , $E=50MPa$ ) .....	89
Πίνακας 9: Σύγκριση αποτελεσμάτων για την σεισμική φόρτιση των Παλμών Ricker 1 και 2. ....	96
Πίνακας 10: Αποτελέσματα του σταδίου 4 για τα μοντέλα με την σεισμική φόρτιση Duzce .....	101
Πίνακας 11: Σύγκριση αποτελεσμάτων για το μοντέλο $H=10m$ και $E=50MPa$ για όλους τους τύπους σεισμικής φόρτισης .....	103
Πίνακας 12: Σύγκριση αποτελεσμάτων των αριθμητικών προσομοιώσεων για το μοντέλο $H=20m$ και $E=50 MPa$ .....	106
Πίνακας 13: Αποτελέσματα για το μοντέλο με $H=10$ και $E=50$ στον παλμό Ricker 1 .....	115
Πίνακας 14: Αποτελέσματα για το μοντέλο με $H=10$ και $E=100$ στον παλμό Ricker 1 .....	116
Πίνακας 15: Αποτελέσματα για το μοντέλο με $H=20$ και $E=50$ στον παλμό Ricker 1 .....	116
Πίνακας 16: Αποτελέσματα για το μοντέλο με $H=10$ και $E=50$ στον παλμό Ricker 2 .....	116
Πίνακας 17: Αποτελέσματα για το μοντέλο με $H=20$ και $E=50$ στον παλμό Ricker 2 .....	117
Πίνακας 18: Αποτελέσματα για το μοντέλο με $H=10$ και $E=50$ για τον σεισμό Duzce .....	117
Πίνακας 19: Αποτελέσματα για το μοντέλο με $H=20$ και $E=50$ για τον σεισμό Duzce .....	117

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup> : ΕΙΣΑΓΩΓΗ

---

## 1.1 Σκοπός της εργασίας

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση ευστάθειας σήραγγας σε σεισμό. Θα παρουσιαστούν περιπτώσεις από την βιβλιογραφία που έχουν συμβεί αστοχίες σε σήραγγες με αποτέλεσμα κατολισθήσεις ή δημιουργία ρηγμάτων, τη συσχέτιση με την επιτάχυνση στην επιφάνεια του εδάφους και συνεπώς με τις ζώνες της σεισμικής επικινδυνότητας των κανονισμών. Επίσης, θα πραγματοποιηθεί προσομοίωση με το πρόγραμμα RS2, καθώς μας ενδιαφέρει η μεθοδολογία προσομοίωσης – σχεδιασμού σηράγγων σε σεισμό.

Αφού χρησιμοποιήθηκαν συγκεκριμένα στοιχεία (γεωτεχνικά, ιδιότητες των υλικών μας, παλμούς με συγκεκριμένη συχνότητα), ακολούθησε η αναλυτική περιγραφή τους και έπειτα η προσομοίωσή τους, εξάγοντας συμπεράσματα για όλες τις αλλαγές που μπορεί να υποστεί μια σήραγγα μετά τον σεισμό.

Ο προσδιορισμός των παραγόντων εκείνων που επηρεάζουν τη φέρουσα ικανότητα των σηράγγων αποτελεί κρίσιμο αντικείμενο μελέτης. Η διερεύνηση των σεισμών στην παγκόσμια κοινότητα, τόσο πριν το συμβάν όσο και μετά είναι σημαντική για τα έργα ενός Μεταλλειολόγου – Μεταλλουργού Μηχανικού, και για την προστασία του έργου αλλά και για την προστασία της ανθρώπινης ζωής.

## 1.2 Διάρθρωση της εργασίας

Στο 1<sup>ο</sup> Κεφάλαιο γίνεται μία σύντομη περιγραφή του θέματος της διπλωματικής μαζί με την διάρθρωση των κεφαλαίων.

Στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο γίνεται αναφορά στους κύριους παράγοντες που προκαλούν επιφανειακές καθιζήσεις και τα φαινόμενα που τις ενισχύουν, καθώς και οι τρόποι πρόληψης και αντιμετώπισης των προβλημάτων που προκαλούν στην επιφάνεια, κατά τη διάνοιξη της σήραγγας. Επίσης, γίνεται αναφορά σε βασικά στοιχεία που αφορούν την όρυξη σηράγγων, την συμπεριφορά των σηράγγων στους σεισμούς και παραδείγματα ζημιών υπόγειων έργων σε μεγάλους σεισμούς από το παρελθόν.

Στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά η λειτουργία του προγράμματος που χρησιμοποιήθηκε για την αριθμητική προσομοίωση των μοντέλων που επιλέχθηκαν.

Στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο περιγράφονται οι παράμετροι που επιλέχθηκαν καθώς και η μεθοδολογία κατασκευής των μοντέλων, στα οποία και πραγματοποιήθηκε η αριθμητική ανάλυση.

Στο 5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο παρατίθενται τα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης και γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Στο 6<sup>ο</sup> κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που αντλήθηκαν από την παρούσα εργασία.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup> : ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΥΠΟ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ

---

### 2.1.Εισαγωγικά στοιχεία

Οι υπόγειες κατασκευές θεωρούνται γενικά ασφαλείς κατά την διάρκεια των σεισμών, κυρίως λόγω της παρατηρηθείσας συμπεριφοράς τους κατά το παρελθόν. Πολλές σήραγγες έχουν σχεδιαστεί και κατασκευαστεί χωρίς να λαμβάνονται υπόψη σεισμικές δράσεις. Τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά, καθώς πρόκειται για γραμμικές κατασκευές και όχι για σημειακά έργα αλλά και το γεγονός ότι περιβάλλονται από έδαφος στο σύνολο τους, διαφοροποιούν σημαντικά τη συμπεριφορά τους σε σχέση με τις επιφανειακές κατασκευές. Στο σχεδιασμό των υπόγειων κατασκευών, τα αδρανειακά φορτία είναι δευτερεύουσας σημασίας σε σχέση με τα φορτία κινηματικής φύσεως, δηλαδή τις επιβαλλόμενες παραμορφώσεις λόγω σεισμικής ταλάντωσης και τις μόνιμες παραμορφώσεις λόγω εδαφικής αστοχίας.

Οι υπόγειες εγκαταστάσεις που είναι κατασκευασμένες σε περιοχές με σεισμική δραστηριότητα πρέπει να αντέχουν τόσο στη στατική όσο και στη σεισμική φόρτιση. Ιστορικά, υπόγειες εγκαταστάσεις έχουν βιώσει χαμηλότερο βαθμό βλάβης από τις επιφανειακές δομές. Παρ' όλα αυτά, μερικές υπόγειες κατασκευές έχουν βιώσει σημαντικές ζημιές σε πρόσφατους μεγάλους σεισμούς.

Τα τελευταία χρόνια και ύστερα από την πλήρη κατάρρευση του υπόγειου σταθμού του μετρό Daikai το 1995 στο Κόμπε της Ιαπωνίας, έγινε αισθητή η ανάγκη συνυπολογισμού των σεισμικών φορτίσεων στον σχεδιασμό υπογείων έργων. Η κατάρρευση τμήματος μήκους 400 m της δίδυμης σήραγγας Bolu στην Τουρκία κατά τον σεισμό του Düzce το 1999 επιβεβαιώνει την ανάγκη αυτήν. Έμφαση πρέπει να δοθεί στο γεγονός ότι ο αντισεισμικός σχεδιασμός λήφθηκε υπόψη στο σχεδιασμό σήραγγας για πρώτη φορά το 1960 από τους μηχανικούς Parsons Brinckerhoff (Wang, 1993). Σήμερα δεν υπάρχουν κανονισμοί που να υποδεικνύουν με σαφείς οδηγίες το πως πρέπει να ληφθεί υπόψη ο σεισμός στο σχεδιασμό των σηράγγων. Οι μηχανικοί υιοθετούν διάφορες μεθόδους από τη βιβλιογραφία προκειμένου να λάβουν υπόψη τους το σεισμό στο σχεδιασμό.

Στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιείται μια σύντομη παρουσίαση της γνώσης που υπάρχει σήμερα όσον αφορά τον αντισεισμικό σχεδιασμό των υπόγειων κατασκευών. Παρουσιάζονται χαρακτηριστικά παραδείγματα αστοχιών κατά τη διάρκεια πρόσφατων ισχυρών σεισμών και αναφέρονται διάφορες μέθοδοι ανάλυσης υπόγειων κατασκευών που υπόκεινται σε σεισμική κίνηση.

### 2.2.Τύπος Σηράγγων και μέθοδοι κατασκευής

Οι υπόγειες εγκαταστάσεις αποτελούν αναπόσπαστο μέρος της υποδομής της σύγχρονης κοινωνίας και χρησιμοποιούνται για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένων σιδηροδρομικών γραμμών, αυτοκινητοδρόμων, αποθήκευσης υλικών, αποβλήτων και υδάτινων μεταφορών.

Οι μέθοδοι διάνοιξης σηράγγων, ταξινομούνται γενικά σε τρεις κατηγορίες: ανοικτού ορύγματος, συμβατικής διάνοιξης, και μηχανικής διάτρησης. Το μήκος της σήραγγας και οι

συνθήκες του εδάφους παίζουν πρωταρχικό ρόλο στην επιλογή της μεθόδου διάνοιξης. Την επιλογή της μεθόδου διάνοιξης σηράγγων, κατά Stille & Nord (1988), επηρεάζουν οι εξής τέσσερις βασικοί παράγοντες:

- Η γεωλογία και το γεωυλικό.
- Η γεωμετρία και τα στοιχεία χάραξης της σήραγγας.
- Οι συνθήκες επί τόπου του έργου.
- Οι οικονομικοί όροι της σύμβασης που διέπουν την κατασκευή του έργου.

Οι βασικές κατηγορίες διάνοιξης σηράγγων είναι οι εξής:

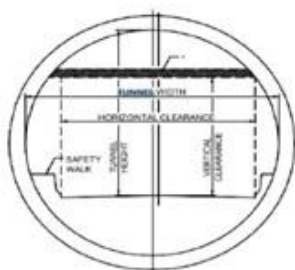
- Μέθοδος εκσκαφής με συμβατικές μεθόδους (NATM).
- Μηχανοποιημένη διάνοιξη σηράγγων (TBM).
- Μέθοδος εκσκαφής με μηχανήματα σημειακής κοπής (Roadheader).
- Μέθοδος εκσκαφής και επανεπίχωσης.

Έτσι με βάση και τα παραπάνω, οι σήραγγες μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις γενικές κατηγορίες, ανάλογα με τη μέθοδο κατασκευής τους. Στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζονται οι τυπικές διατομές για κάθε επιλογή μεθόδου εκσκαφής.

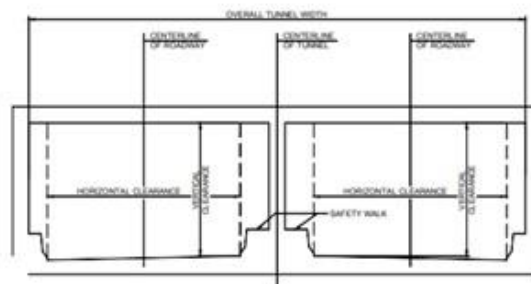
(Α) κατασκευές με μηχανοποιημένη διάνοιξη (συνήθως κυκλικές διατομές),

(Β) κατασκευές με εκσκαφή και επανεπίχωση (συνήθως ορθογωνικές διατομές) και

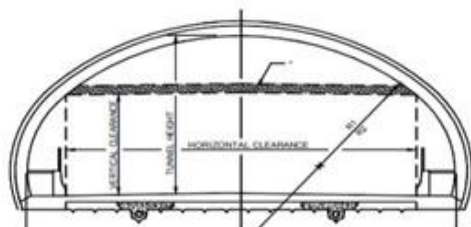
(Γ) κατασκευές με συμβατικές μεθόδους (Πεταλοειδής διατομή βυθισμένες σήραγγες).



**(Α) Κυκλική Διατομή**



**(Β) Ορθογωνική Διατομή**



**(Γ) Πεταλοειδής Διατομή**

**Σχήμα 2.1: Τυπικές διατομές σηράγγων**

Οι κατασκευές με διάτρηση έχουν το βασικό πλεονέκτημα ότι μπορούν να κατασκευαστούν χωρίς να επηρεάζουν σημαντικά το βράχο ή το έδαφος που βρίσκεται πάνω από την εκσκαφή. Η μέθοδος αυτή προτιμάται έναντι της μεθόδου της εκσκαφής και επανεπίχωσης (cut and cover) σε περιπτώσεις: (1) σημαντικού βάθους εκσκαφής και (2) ύπαρξης υπέργειων κατασκευών. Η συνήθης εφαρμογή της μεθόδου NATM είναι η διάνοιξη της διατομής της σήραγγας σε μια ή περισσότερες φάσεις και η άμεση υποστήριξη του τοιχώματος με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (άοπλο, ινοπλισμένο, οπλισμένο με χαλύβδινο πλέγμα ή ενισχυμένο με χαλύβδινες νευρώσεις από ράβδους ή διατομές I) και αγκύρια (παθητικά ή προεντεταμένα).

### 2.3.Υπόγειες Κατασκευές

Οι υπόγειες κατασκευές περιορίζονται από το εδαφικό μέσο στο οποίο είναι εγκιβωτισμένες και δεν έχουν τη δυνατότητα να μετακινηθούν εντελώς ανεξάρτητα από αυτό και να σημειώσουν μεγέθυνση στην διέγερση. Οι υπέργειες κατασκευές δεν υπόκεινται κατευθείαν στη διέγερση του εδάφους, καθώς η διέγερση αυτή υφίσταται μεγέθυνση ανάλογα με τα δυναμικά χαρακτηριστικά της ίδιας της κατασκευής. Επίσης, σε αντίθεση με τις υπέργειες κατασκευές, οι υπόγειες εμφανίζουν σημαντικά μεγαλύτερη απόσβεση εξαιτίας του εγκιβωτισμού τους. Αυτοί είναι οι σημαντικότεροι παράγοντες που καθιστούν την απόκριση των υπόγειων κατασκευών ευνοϊκότερη από εκείνη των υπέργειων έναντι σεισμικών φορτίων (Wang, 1993). Γενικώς, τα σεισμικά φορτία σχεδιασμού για τις υπόγειες κατασκευές επιβάλλονται σε όρους παραμόρφωσης και τάσεων στην κατασκευή από το περιβάλλον έδαφος. Αντιθέτως, οι επιφανειακές κατασκευές σχεδιάζονται για τις αδρανειακές δυνάμεις που προκαλούνται από τις εδαφικές επιταχύνσεις.

### 2.4.Σεισμική απόκριση

Η απόκριση των υπόγειων θαλάμων υπό σεισμική διέγερση εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Μπορούμε να διακρίνουμε τρεις βασικούς παράγοντες οι οποίοι είναι οι εξής:

α) η σεισμική κίνηση, όπως η ένταση και το μέγεθος του σεισμού.

β) η κατάσταση του περιβάλλοντος γεωυλικού γύρω από την σήραγγα, όπως, δηλαδή, η κατάσταση της βραχομάζας ή της εδαφομάζας, το βάθος της ζώνης υπερφόρτισης, η τοποθεσία σε σχέση με τη ζώνη αστοχίας

γ) η δομική κατάσταση της σήραγγας, η ρευστοποίηση, η διάρρηξη ενεργών ρηγμάτων, οι κατολισθήσεις που προκαλούνται από σεισμό (Σοφιανός)

Ως προς την παρατηρηθείσα σεισμική συμπεριφορά των υπογείων κατασκευών, μπορούν να γίνουν οι παρακάτω γενικές παρατηρήσεις:

(α) η ένταση των βλαβών μειώνεται με την αύξηση των υπερκειμένων

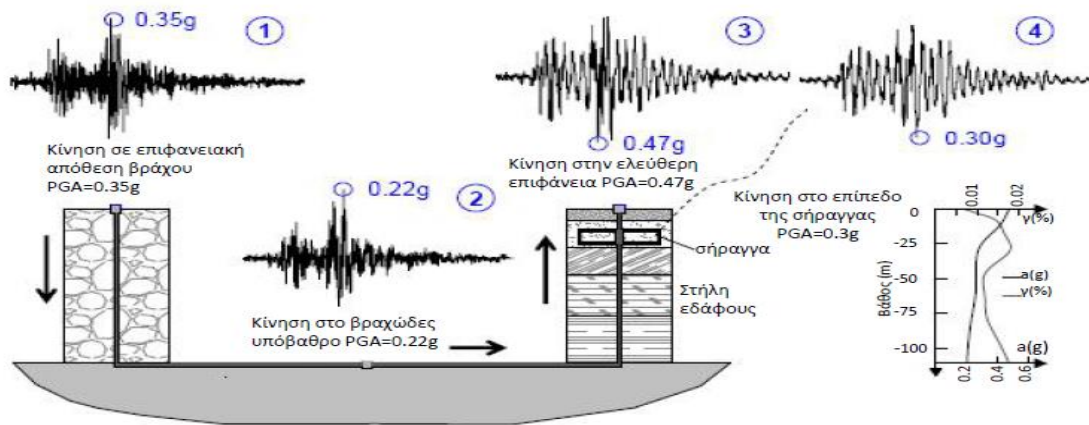
(β) οι σήραγγες που κατασκευάζονται σε έδαφος είναι πιο ευάλωτες σε σχέση με αυτές που διανοίγονται σε υγιή βράχο

Οι επιπτώσεις του σεισμού στις υπόγειες κατασκευές ταξινομούνται σε 2 κατηγορίες:

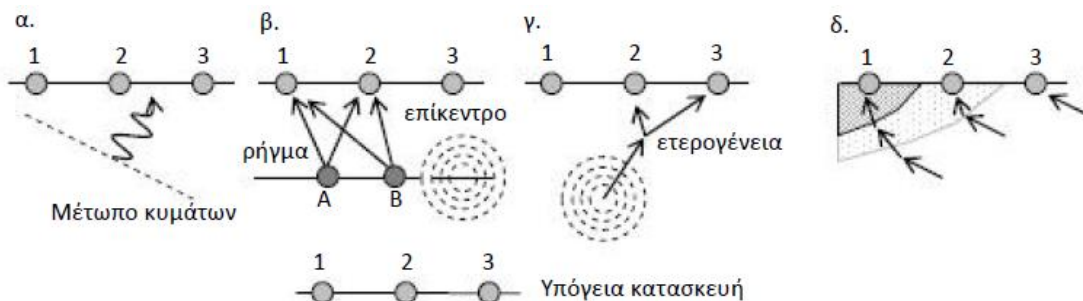
α) στην εδαφική κίνηση εξαιτίας της μετάδοσης κυμάτων

β) στην εδαφική αστοχία - μόνιμες εδαφικές παραμορφώσεις όπως ρευστοποίηση, μετακίνηση ρηγμάτων και κατολισθήσεις.

Η σεισμική κίνηση εκφράζεται είτε σε όρους επιτάχυνσης, είτε σε όρους μετακίνησης ανάλογα με τη μέθοδο που εφαρμόζεται. Μόλις προσδιοριστεί η κίνηση σε επιφανειακή απόθεση βράχου, είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν διάφορες μέθοδοι ανάλυσης (γραμμικές, ισοδύναμες γραμμικές και μη γραμμικές αναλύσεις) για να προσδιοριστούν τα χαρακτηριστικά της εδαφικής κίνησης στο βάθος που βρίσκεται η υπόγεια κατασκευή. Για εκτεταμένες κατασκευές τα χαρακτηριστικά της εδαφικής κίνησης πρέπει να προσδιορίζονται σε διάφορα βάθη. Συνήθως πραγματοποιείται μια ανάλυση για τον υπολογισμό της σεισμικής εδαφικής κίνησης στο βραχώδες υπόβαθρο καθώς και μία μονοδιάστατη (1D) ανάλυση για τα μεταδιδόμενα προς τα πάνω κύματα SH και SV (σχήμα 2.2). Δισδιάστατη ανάλυση (2D) ή τρισδιάστατη ανάλυση (3D) πραγματοποιείται σε περίπτωση πολύπλοκων εδαφικών συνθηκών και γεωμετριών (κουλάδες). Οι αναλύσεις πραγματοποιούνται με βάση τις ολικές τάσεις, ενώ οι ενεργές χρησιμοποιούνται όταν κρίνεται απαραίτητο.



Σχήμα 2.2: Προσδιορισμός της σεισμικής εδαφικής κίνησης με το βάθος: (1) χρονοϊστορία επιτάχυνσης σε επιφανειακή απόθεση βράχου, (2) διαδικασία υπολογισμού της χρονοϊστορίας επιτάχυνσης στο βραχώδες υπόβαθρο, (3-4) χαρακτηριστικά της εδαφικής απόκρισης στην επιφάνεια του εδάφους και στο βάθος που βρίσκεται η σήραγγα



Σχήμα 2.3: Πηγές ασύγχρονης κίνησης και χωρικής μεταβλητότητας της εδαφικής κίνησης (α) μέτωπο κυμάτων, (β) μηχανισμός ρήγματος, (γ) ετερογένεια των εδαφικών αποθέσεων, (δ) τοπικές εδαφικές συνθήκες



Για την ανάλυση στη διαμήκη διεύθυνση, η χωρική μεταβλητότητα της εδαφικής κίνησης πρέπει να εκτιμηθεί κατάλληλα (Kramer, 1996, Zerva et al, 1988, Zerva, 1993, 1994, Zerva & Zervas, 2002, Zerva & Beck, 2003). Η εδαφική κίνηση μεταβάλλεται με το χώρο και το χρόνο όσον αφορά το πλάτος κύματος, τη φάση, τη συχνότητα και τη διάρκεια. Αυτές οι παράμετροι επηρεάζουν σημαντικά την απόκριση των εκτεταμένων κατασκευών. Για παράδειγμα, οι διαφορικές μετακινήσεις μπορεί να είναι σημαντικές ακόμη και σε μικρές αποστάσεις. Υπάρχουν 4 σημαντικοί παράγοντες που μπορεί να προκαλέσουν τη χωρική μεταβλητότητα:

- α) η κλίση του μετώπου των κυμάτων,
- β) ο μηχανισμός του ρήγματος
- γ) η ετερογένεια των εδαφικών αποθέσεων και
- δ) οι τοπικές εδαφικές συνθήκες (Σχήμα 2.3)

Συνήθως η σεισμική εδαφική κίνηση εκτιμάται θεωρώντας συνθήκες ελεύθερου πεδίου, αγνοώντας τις πιθανές επιπτώσεις των υφιστάμενων κατασκευών στα χαρακτηριστικά της κίνησης. Όμως σε αστικές περιοχές, η δόνηση των υπέργειων κατασκευών κατά τη διάρκεια του σεισμού είναι δυνατόν να προκαλέσει πολύπλοκα φαινόμενα αλληλεπίδρασης με τις υπόγειες κατασκευές οι οποίες διέρχονται συχνά λίγα μέτρα κάτω από τη θεμελίωση. Η αλληλεπίδραση αυτή αναμένεται να επηρεάσει τη μετάδοση των σεισμικών κυμάτων. Συνεπώς τροποποιείται η δυναμική απόκριση της σήραγγας, ενώ την ίδια στιγμή η ύπαρξη σήραγγων κοντά στην επιφάνεια και στη θεμελίωση των κατασκευών, μπορεί να μεταβάλλει την απόκριση των ίδιων των κατασκευών.

#### 2.4.1.Εδαφική κίνηση

Η εδαφική κίνηση αναφέρεται στην παραμόρφωση του εδάφους, η οποία προκαλείται λόγω της διάδοσης των κυμάτων. Οι κυριότεροι παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται το επίπεδο βλάβης εξαιτίας της εδαφικής κίνησης είναι:

- α) το σχήμα, οι διαστάσεις και το βάθος της κατασκευής
- β) οι ιδιότητες του περιβάλλοντος εδάφους ή βράχου
- γ) οι ιδιότητες της κατασκευής
- δ) η σφοδρότητα της εδαφικής κίνησης

Η αδράνεια του περιβάλλοντος εδάφους είναι μεγαλύτερη από την αδράνεια της ίδιας της κατασκευής και συνεπώς η απόκριση των υπόγειων κατασκευών εξαρτάται από την απόκριση του εδάφους και όχι από τα αδρανειακά τους χαρακτηριστικά.

Καθώς τα σεισμικά κύματα συναντούν μια υπόγεια κατασκευή, την αναγκάζουν να παραμορφωθεί τόσο στη διαμήκη όσο και στην εγκάρσια διεύθυνση (Owen & Scholl, 1981). Υπάρχουν 3 είδη παραμορφώσεων που περιγράφουν πλήρως την απόκριση των υπόγειων κατασκευών:

α) αξονική παραμόρφωση

β) διαμήκης κάμψη

γ) ovaling/racking (ωσειδής/διατμητική παραμόρφωση).

Οι αξονικές παραμορφώσεις σε σήραγγες παράγονται από τα συστατικά των σεισμικών κυμάτων που παράγουν κινήσεις παράλληλες προς τον άξονα της σήραγγας και προκαλούν εναλλασσόμενο εφελκυσμό και θλίψη. Οι παραμορφώσεις κάμψεως προκαλούνται από τα συστατικά των σεισμικών κυμάτων που παράγουν κινήσεις σωματιδίων κάθετα προς τον διαμήκη άξονα. Οι εκτιμήσεις σχεδιασμού για τις αξονικές και καμπτικές παραμορφώσεις είναι γενικά προς την κατεύθυνση κατά μήκος του άξονα της σήραγγας Wang (1993).

Οι παραμορφώσεις ή οι οριζόντιες παραμορφώσεις σε μια δομή σήραγγας αναπτύσσονται όταν τα διατμητικά κύματα μεταδίδονται κάθετα ή σχεδόν κάθετα στον άξονα της σήραγγας, με αποτέλεσμα τη στρέβλωση του σχήματος εγκάρσιας διατομής της επένδυσης της σήραγγας. Οι θεωρήσεις σχεδιασμού για αυτόν τον τύπο παραμόρφωσης είναι στην εγκάρσια κατεύθυνση. Η γενική συμπεριφορά της επένδυσης μπορεί να προσομοιωθεί ως θαμμένη δομή υποκείμενη σε παραμορφώσεις εδάφους κάτω από μία κατάσταση δισδιάστατης επίπεδης παραμόρφωσης.

Τα διαγωνίως πολλαπλασιαζόμενα κύματα υποβάλλονται σε διαφορετικά τμήματα της δομής σε μετατοπίσεις εκτός φάσης που απεικονίζονται στο Σχήμα 2.4ε, με αποτέλεσμα ένα κύμα διατμητικής συμπίεσης που διέρχεται κατά μήκος της δομής. Γενικά, μεγαλύτερα πλάτη μετατόπισης συνδέονται με μεγαλύτερα μήκη κύματος, ενώ οι μέγιστες καμπύλες παράγονται από βραχύτερα μήκη κύματος με σχετικά μικρά πλάτη μετατόπισης Kuesel (1969).

Οι σήραγγες αποτελούν αρκετά δύσκαμπτες κατασκευές έχοντας σημαντικές διαστάσεις, συνεπώς η αλληλεπίδραση εδάφους – κατασκευής δεν μπορεί να αγνοηθεί. Η αλληλεπίδραση αυτή σχετίζεται με 2 κρίσιμες παραμέτρους:

α) τη σχετική δυσκαμψία μεταξύ εδάφους και κατασκευής

β) τα χαρακτηριστικά της διεπιφάνειας μεταξύ τους.

Και οι δύο παράμετροι μεταβάλλονται με τη σεισμική διέγερση, καθώς εξαρτώνται από το μέτρο διάτμησης και την αντοχή, τα οποία εξαρτώνται από τις παραμορφώσεις και τη μη γραμμική συμπεριφορά του εδάφους.

Όσον αφορά τη σχετική δυσκαμψία μεταξύ εδάφους και κατασκευής: η παραμόρφωση του εδάφους επιβάλλει περιορισμούς στη μετακίνηση της σήραγγας, όμως εξαιτίας της διαφοράς δυσκαμψίας μεταξύ των δύο μέσων, η σήραγγα δεν ακολουθεί τις επιβαλλόμενες παραμορφώσεις. Μία σχετικά δύσκαμπτη κατασκευή αντιστέκεται στις επιβαλλόμενες παραμορφώσεις, σε αντίθεση με μια εύκαμπτη που τις ακολουθεί. Επιπλέον, η παραμόρφωση μιας εύκαμπτης κατασκευής μπορεί να είναι πολύ μεγαλύτερη από την παραμόρφωση στο ελεύθερο πεδίο. Η συνολική σεισμική συμπεριφορά της κατασκευής εξαρτάται από τις ιδιότητες του εδάφους που μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια της σεισμικής διέγερσης και από τα αδρανειακά χαρακτηριστικά της ίδιας της κατασκευής.

Η σχετική δυσκαμψία του εδάφους προς την κατασκευή καλείται λόγος δυσκαμψίας  $F$  (Owen & Scholl, 1981, Wang, 1993). Η τιμή αυτού του λόγου σχετίζεται με το αναμενόμενο επίπεδο τάσεων στην κατασκευή:

- $F \rightarrow 0$ : η κατασκευή είναι δύσκαμπτη και δεν θα παρουσιάσει κάποια παραμόρφωση.
- $F < 1$ : η κατασκευή είναι πιο δύσκαμπτη από το περιβάλλον έδαφος, συνεπώς το επίπεδο παραμόρφωσης της κατασκευής θα είναι μικρότερο από το επίπεδο παραμόρφωσης στο ελεύθερο πεδίο.
- $F = 1$ : η κατασκευή έχει ίση δυσκαμψία με το περιβάλλον έδαφος, συνεπώς θα ακολουθήσει την παραμόρφωση στο ελεύθερο πεδίο.
- $F > 1$ : η παραμόρφωση racking της κατασκευής είναι ενισχυμένη σε σχέση με τις παραμορφώσεις στο ελεύθερο πεδίο.

Όσον αφορά τα χαρακτηριστικά της διεπιφάνειας μεταξύ της κατασκευής και του περιβάλλοντος εδάφους, αυτά σαφώς επηρεάζουν τη σεισμική απόκριση του όλου συστήματος (Sedarat et al, 2009). Απλοποιητικά θεωρείται ότι η σήραγγα παραμορφώνεται σε οριζόντια διάτμηση, καθώς υποτίθεται ότι ανάπτυξη διατμητικών τάσεων κατά μήκος της σήραγγας, μειώνει στο ελάχιστο την εντός επιπέδου κατακόρυφη διατμητική παραμόρφωση και το λικνισμό της κατασκευής. Ωστόσο, αυτό δεν αποδεικνύεται ούτε πειραματικά ούτε αριθμητικά.

Όταν η διεπιφάνεια είναι ικανή να παραλάβει υψηλές διατμητικές τάσεις με μικρές παραμορφώσεις, τότε αναπτύσσονται υψηλές τάσεις στην επένδυση της σήραγγας. Αν η κατασκευή είναι δύσκαμπτη, οι μετακινήσεις του περιβάλλοντος εδάφους περιορίζονται, οι παραμορφώσεις του εδάφους γύρω από την κατασκευή είναι μικρές και η μείωση του μέτρου διάτμησης είναι επίσης μικρή. Αντιθέτως, όταν η διεπιφάνεια δεν είναι ικανή να παραλάβει υψηλές διατμητικές τάσεις, τότε μεταφέρει στη δύσκαμπτη κατασκευή μικρότερες διατμητικές τάσεις (Huo et al, 2005). Ωστόσο, η ύπαρξη σημαντικών μετακινήσεων στη μάζα του εδάφους έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη μεγάλων διατμητικών παραμορφώσεων στη διεπιφάνεια, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε ολίσθηση κατά μήκος της διεπιφάνειας. Η ολίσθηση οδηγεί σε υψηλότερη συγκέντρωση τάσεων, υψηλότερες παραμορφώσεις και συνεπώς μείωση του μέτρου διάτμησης, προκαλώντας μεγαλύτερες παραμορφώσεις στο περιβάλλον έδαφος και υψηλές τάσεις στη διεπιφάνεια. Συνεπώς, αυξάνεται η πιθανότητα να αναπτυχθούν σημαντικές μετακινήσεις στη μάζα του εδάφους, αν και μειώνεται η ικανότητα να μεταφερθούν διατμητικά στην κατασκευή. Εν κατακλείδι, η σχετική δυσκαμψία εδάφους – κατασκευής και τα χαρακτηριστικά της διεπιφάνειας συσχετίζονται και μπορεί να έχουν αντίθετες επιπτώσεις στην απόκριση της κατασκευής.

#### 2.4.2. Επίδραση των τοπικών εδαφικών συνθηκών

Πρωταρχική σημασία για τον καθορισμό της πιθανής σεισμικής διέγερσης στην περιοχή του ενδιαφέροντος έχει η αξιολόγηση της επιρροής της εδαφικής απόθεσης στην ένταση και το φασματικό περιεχόμενο του κραδασμού. Τέτοιου είδους προβλέψεις είναι πολύτιμες για τον προσδιορισμό κατάλληλων διεγέρσεων για τον αντισεισμικό σχεδιασμό των πάσης φύσεων κατασκευών που βρίσκονται στην συγκεκριμένη θέση. (Γιαννακού, 2005).

Για αρχή, οι συχνά παρατηρούμενες διαφοροποιήσεις στην έκταση και ένταση των σεισμικών βλαβών αποδίδονται σε διαφορές στις «τοπικές» εδαφικές συνθήκες. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν οι σεισμοί: του Kantoto 1923 (Ohsaki, 1969), του Καράκας το 1967 (Seed κ.α., 1972) , του Μεξικού το 1957, 1962, και 1985 και της Loma Prieta το 1989. Το πρόβλημα της επιρροής των τοπικών εδαφικών συνθηκών έχει μελετηθεί σε μεγάλο βαθμό τις δύο τελευταίες δεκαετίες, τόσο με επιτόπου παρατηρήσεις όσο και με την θεωρητική ανάλυση. Είναι πια γενικώς αποδεκτό ότι ένα συγκεκριμένο επιταχυνσιογράφημα εμπεριέχει σε κάποιον βαθμό τα χαρακτηριστικά των εδαφικών στρώσεων της περιοχής της καταγραφής, και ότι η ένταση της δόνησης διαφοροποιείται με το βάθος από την επιφάνεια. Στην ουσία το εδαφικό στρώμα παίζει κατά κάποιον τρόπο τον ρόλο ενός κυματικού “φίλτρου” ενισχύοντας εκείνες τις αρμονικές συνιστώσες του προσπίπτοντος κυματισμού των οποίων η συχνότητα πλησιάζει τις δικές του ιδιοσυχνότητες (ή ταυτίζεται με αυτές).

Ο όρος “εδαφική ενίσχυση” (και “εδαφική απομείωση”) χρησιμοποιείται για να περιγράψει ένα τέτοιο φαινόμενο ενισχυτικό (ή απομειωτικό) φιλτραρίσματος, έχουν δε επινοηθεί αρκετές μέθοδοι για να το αναλύσουν. Οι παρατηρήσεις δείχνουν ότι οι συνιστώσες που ενισχύονται είναι συνήθως οι χαμηλόσυχνες αρμονικές, ιδίως όταν αυτές επαναλαμβάνονται για κάμποσους κύκλους, ενώ αντίθετα οι υψηλόσυχνες συνιστώσες συχνά αποδυναμώνονται μέσα από μαλακούς ή και βαθείς εδαφικούς σχηματισμούς. (Γιαννακού, 2003).

Ωστόσο η σπουδαιότητα της “εδαφικής ενίσχυσης” (τροποποίησης , γενικότερα) αποτέλεσε για μεγάλο διάστημα αμφιλεγόμενο θέμα της αντισεισμικής μηχανικής. Σε αυτό συντέλεσαν και οι μεγάλες αβεβαιότητες ως προς την ένταση και το φασματικό περιεχόμενο του προσπίπτοντος σεισμικού κυματισμού (στην βάση του σχηματισμού) και ως προς την μεθοδολογία ανάλυσεως. Σήμερα είναι πια γενικώς αποδεκτό ότι σε κραδασμούς μικρής και μέτριας έντασης που παράγονται από μακρινούς σεισμούς και σε εδαφικές στρωματογραφίες που παρουσιάζουν ανομοιογένεια ως προς της δυσστησία των επάλληλων στρώσεων, η εδαφική απόκριση τροποποιεί σημαντικά τον κραδασμό , κάτι που προβλέπεται σχετικώς ικανοποιητικά με τις διαθέσιμες θεωρητικές μεθόδους. Η πρόβλεψη είναι δυσχερέστερη στις περιπτώσεις ισχυρού διεγείροντος κραδασμού, περίπλοκης ανελαστικής συμπεριφοράς του εδάφους, και ασαφούς κάτω συνόρου του εδαφικού σχηματισμού. Η συνεχώς αυξανόμενη αλλαγή επιταχυνσιογραφημάτων από σεισμούς σε όλο τον κόσμο οδηγεί σε ταχεία βελτίωση των γνώσεων μας στην επιστημονική αυτή περιοχή. (Γιαννακού, 2003).

Για την ανάλυση της επιρροής των τοπικών εδαφικών συνθηκών στα χαρακτηριστικά του εδαφικού κραδασμού έχουν αναπτυχθεί αρκετές μέθοδοι, αναλυτικές και αριθμητικές: η συνήθης παραδοχή είναι ότι τα σεισμικά κύματα διαδίδονται μόνον κατακορύφως. Παράλληλα η ανάλυση προϋποθέτει ομοιομορφία των εδαφικών στρώσεων ως προς το πάχος και τις ιδιότητες στην οριζόντια έννοια έτσι ώστε η ανάλυση να γίνεται σε μία μόνο διάσταση, την κατακόρυφη. Οι αναλυτικές μέθοδοι βασίζονται στην αναλυτική επίλυση της κυματικής εξίσωσης για κάθε στρώμα , ενώ οι αριθμητικές βασίζονται στην διάκριση του εδάφους ή σε σύστημα συγκεντρωμένων μαζών και ελατηρίων, ή σε πεπερασμένα στοιχεία (σπανιότερα δε και σε δίκτυο πεπερασμένων διαφορών). Οι αναλυτικές μέθοδοι προτιμούνται για γραμμική ή ισοδύναμη γραμμική συμπεριφορά. Οι αριθμητικές χρησιμοποιούνται απαραίτητως εάν τα εδαφικά στρώματα παρουσιάζουν

εντόνως μη- γραμμική συμπεριφορά. Εκτεταμένες αναφορές στο θέμα πραγματοποιούν οι Finn (1981) και Roesset και Tassoulas (1981). (Γιαννακού, 2003)

Υπάρχουν όμως και παραδείγματα όπου η σημασία της εδαφικής ενίσχυσης θα μπορούσε να αμφισβητηθεί. Η ένταση και το συχνοτικό περιεχόμενο μιας συγκεκριμένης καταγραφής είναι δυνατόν να επηρεαστούν σε μεγάλο βαθμό από διαφορές:

- Στον μηχανισμό της σεισμικής διάρρηξης
- Στον προσανατολισμό της περιοχής ως προς το ρήγμα
- Στην γεωλογία της σεισμογενούς ζώνης και της «κυματικής διαδρομής»
- Στο ανάγλυφο της τοπογραφίας και του γεωλογικού υποβάθρου της συγκεκριμένης περιοχής

Σε μερικές περιπτώσεις η αθροιστική επίδραση όλων αυτών των παραγόντων ενδέχεται να επισκιάσει τον ρόλο του εδαφικού προφίλ. (Γιαννάκου 2003).

### 2.4.3.Εδαφική Αστοχία

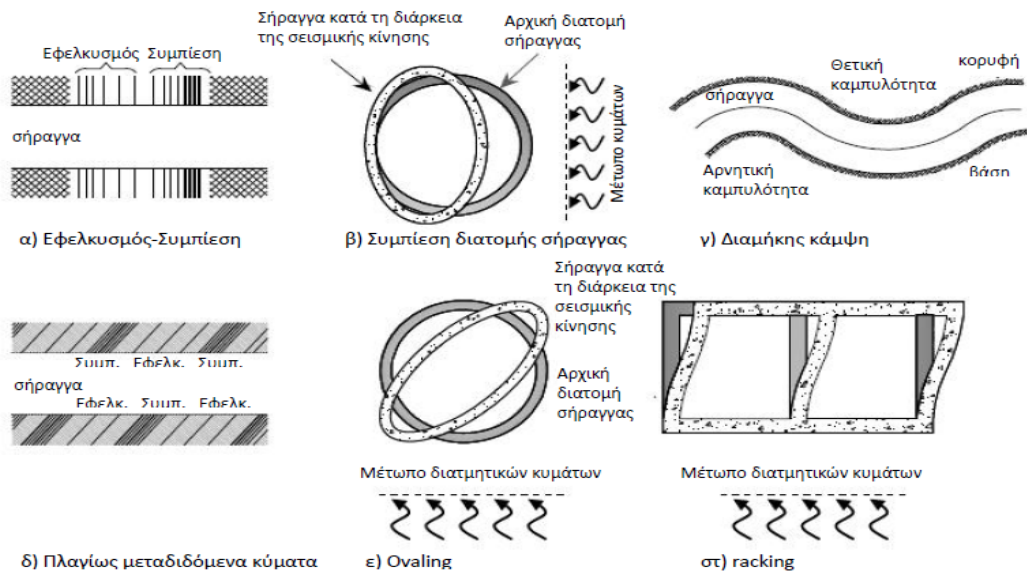
Οι εδαφικές αστοχίες εκδηλώνονται με διάφορους τρόπους, όπως η μετακίνηση στη θέση του ρήγματος, οι κατολισθήσεις και η ρευστοποίηση. Όλες αυτές οι μορφές μπορεί να οδηγήσουν σε αστοχία ολόκληρης της κατασκευής, παρόλο που οι βλάβες περιορίζονται σε συγκεκριμένα σημεία. Ο σχεδιασμός των υπόγειων κατασκευών μπορεί να προβλέψει εδαφικές αστοχίες, όμως το κόστος σε αυτή την περίπτωση θα είναι ιδιαίτερα υψηλό. Για παράδειγμα, στην περίπτωση ρευστοποιήσιμων εδαφών εφαρμόζονται διάφορες τεχνικές σταθεροποίησης και ενίσχυσης του εδάφους χρησιμοποιώντας πασσάλους, καθώς επίσης και τεχνικές βελτίωσης των συνθηκών αποστράγγισης.

Παρόμοιες τεχνικές εφαρμόζονται και στην περίπτωση κατολισθητικών φαινομένων τα οποία οδηγούν σε αυξημένη συγκέντρωση μετακινήσεων και σε κατάρρευση της διατομής της σήραγγας (Wang, 1993). Στην περίπτωση μετακινήσεων ρηγμάτων, οι υπόγειες κατασκευές πρέπει να αντέχουν τις αναμενόμενες μετακινήσεις, ώστε οι βλάβες να είναι περιορισμένες. Κάποιες από τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι επιπτώσεις λόγω μετακίνησης ρηγμάτων είναι η μεγέθυνση της διατομής της σήραγγας και η κατασκευή συνδέσμων πλαστιμότητας (Power et al, 1998). Πολλές φορές όμως δεν είναι οικονομικά ή τεχνικά εφικτό να σχεδιαστεί μια υπόγεια κατασκευή ώστε να είναι ανθεκτική σε πιθανές μετακινήσεις ρηγμάτων. Η καλύτερη λύση είναι να αποφεύγεται η διασταύρωση της κατασκευής με ενεργά ρήγματα αν και αυτό πολλές φορές είναι αδύνατο (Rowe, 1992). Στις περιπτώσεις αυτές είναι προτιμότερο ο μηχανικός να αποδέχεται τη μετακίνηση και να παρέχει τα μέσα για τη διευκόλυνση των επισκευών της κατασκευής (Kuesel, 1969).

Οι συνηθέστεροι τύποι σεισμικής αστάθειας σηράγγων περιλαμβάνουν :

- Παραμορφώσεις της διατομής
- Τοπικές καταπτώσεις και ολισθήσεις
- Μετακινήσεις κατά μήκος εγκάρσιων ρηγμάτων και κυματοειδείς παραμορφώσεις κατά μήκος του άξονα
- Επιφανειακές θραύσεις των τοιχωμάτων
- Παραμορφώσεις των συστημάτων υποστήριξης ή ρωγματώσεις επενδύσεων

- Αύξηση των εισροών υπόγειου νερού και βλάβες στις εισόδους



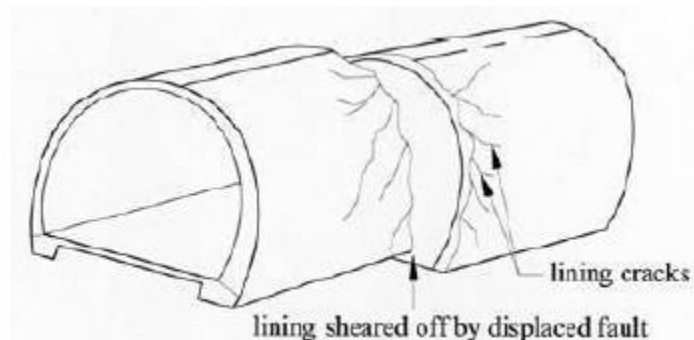
Εν

Σχήμα 2.4: Απλοποιημένη αναπαράσταση των διαφόρων τύπων παραμόρφωσης των σηράγγων εξαιτίας των σεισμικών κυμάτων (τροποποιημένα μετά τους Owen & Scholl, 1981)

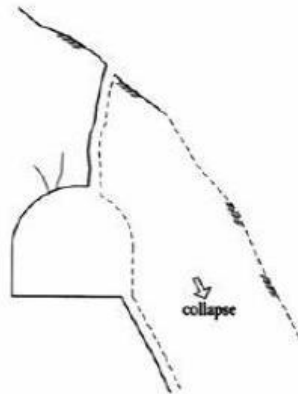
## 2.5. Εμφάνιση ρωγμών κατά μήκος της επένδυσης σήραγγας

Οι Wang et al. (2001) προτείνουν διάφορα υποδείγματα ρωγμών που προκλήθηκαν στην επένδυση της σήραγγας κατά τη διάρκεια σεισμών. Τα παρακάτω έξι σχέδια είναι εκείνα που είναι τα συνηθέστερα:

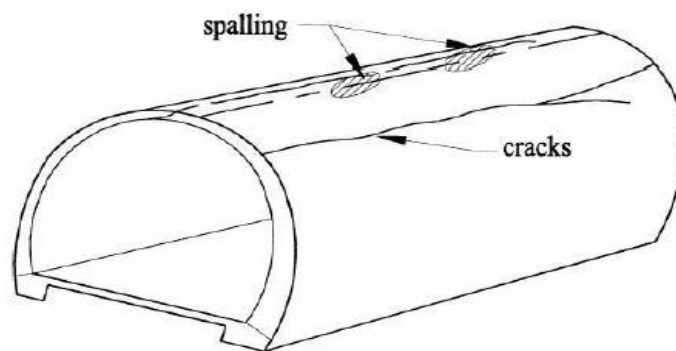
α) Ρωγματωμένη επένδυση από διάτμηση: Εμφανίζεται κατά το πέρασμα της σήραγγας μέσω ενεργών ρηγμάτων.



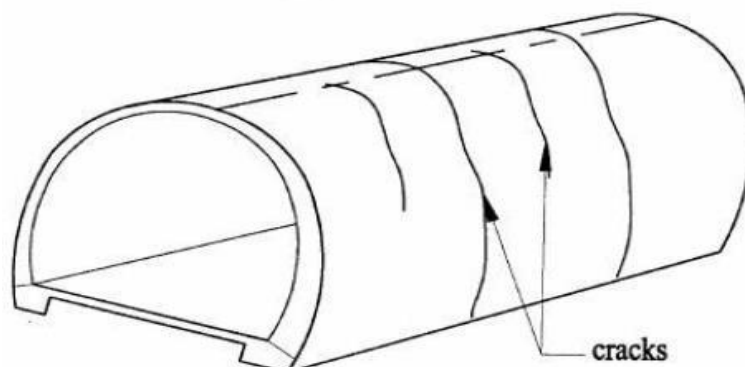
β) Αστοχία πρανών και κατάρρευση σήραγγας: Εμφανίζεται όταν η σήραγγα είναι παράλληλη προς πλαγιές δημιουργώντας κατολισθήσεις που διέρχονται την επένδυση.



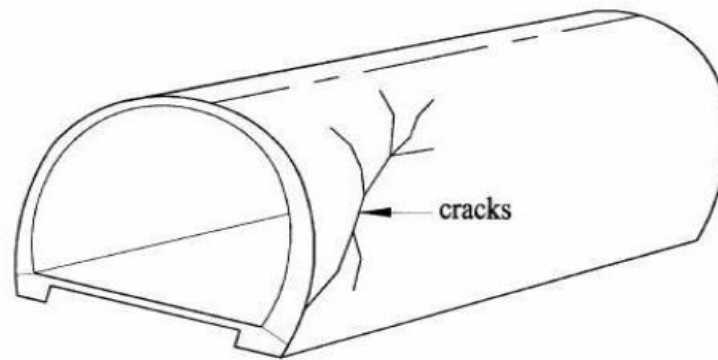
γ) Διαμήκεις ρωγμές: συμβαίνει όταν η σήραγγα υποβάλλεται σε υψηλότερες παραμορφώσεις που οφείλονται στο περιβάλλον έδαφος.



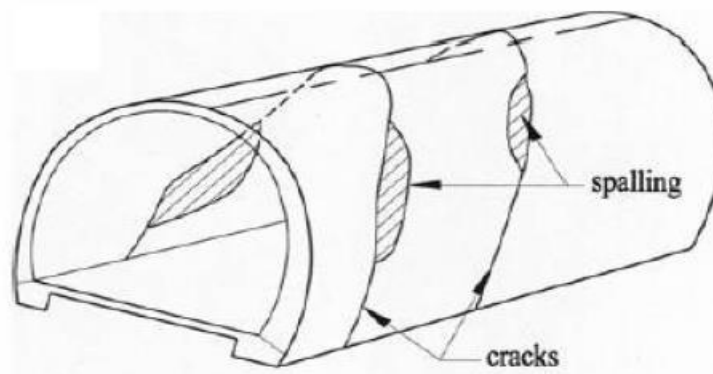
δ) Εγκάρσιες ρωγμές: συμβαίνει όταν η επένδυση της σήραγγας τέμνει ασθενείς διακλάσεις



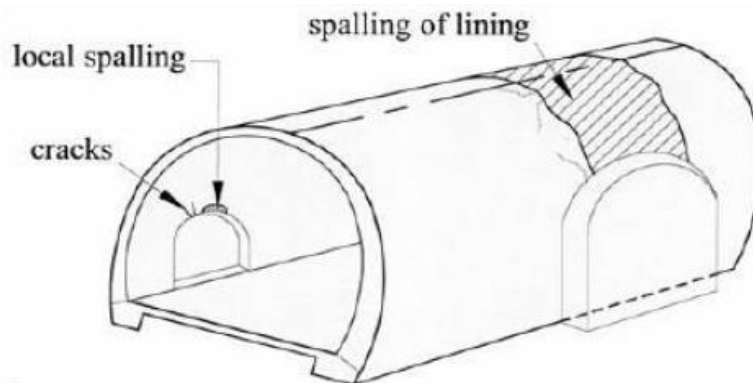
ε) Κεκλιμένες ρωγμές: συμβαίνει για ένα συνδυασμό διαμήκων και εγκάρσιων ρωγμών.



στ) Εκτεταμένες ρωγμές: συμβαίνει όταν υπάρχει μερική κατάρρευση των επενδύσεων για σεισμική ένταση παραμόρφωση.



ζ) Παραμόρφωση επένδυσης: συμβαίνει όταν υπάρχει εγκάρσια ελάττωση λόγω της κατάρρευσης του invert.





Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται οι πιθανοί σύνδεσμοι μεταξύ αιτιών (γεωλογικούς, γεωτεχνικούς και διαρθρωτικούς παράγοντες) και τα αποτελέσματα (τύπος ζημιάς σύμφωνα με το σχ. 6), όπου αποδεικνύεται τότε η επιρροή είναι αδύναμη ή αποφασιστική.

**Πίνακας 1: Πιθανοί σύνδεσμοι μεταξύ αιτιών και τα αντίστοιχα αποτελέσματα – Αδύναμη ή αποφασιστική επιρροή**

Πιθανές	α	β	γ	δ	ε	στ	ζ	η
Εκσκαφή σε κατά μήκος ρηγμάτων	*							
Δυσμενείς συνθήκες του εδάφους				ο		*		
Διεπιφάνεια σκληρού μαλακού εδάφους						*		
Πλησίον επιφάνειας πρηνούς και στομίου της σήραγγας		*		*	*	*		
Κατάρρευση κατά την κατασκευή			ο		ο		ο	
Εμφάνιση ρωγμών πριν από σεισμό			ο	ο				
Κακοί στατικοί υπολογισμοί				ο	ο			*
Επένδυση άοπλου σκυροδέματος	ο	ο		ο	ο	ο	ο	*
Αποσαθρωμένο υλικό επένδυσης			ο	ο				
Ύπαρξη κοιλότητας πίσω από επένδυση			*					

\*κρίσιμος σύνδεσμος ο αδύναμος σύνδεσμος (Wang et al., 2001)

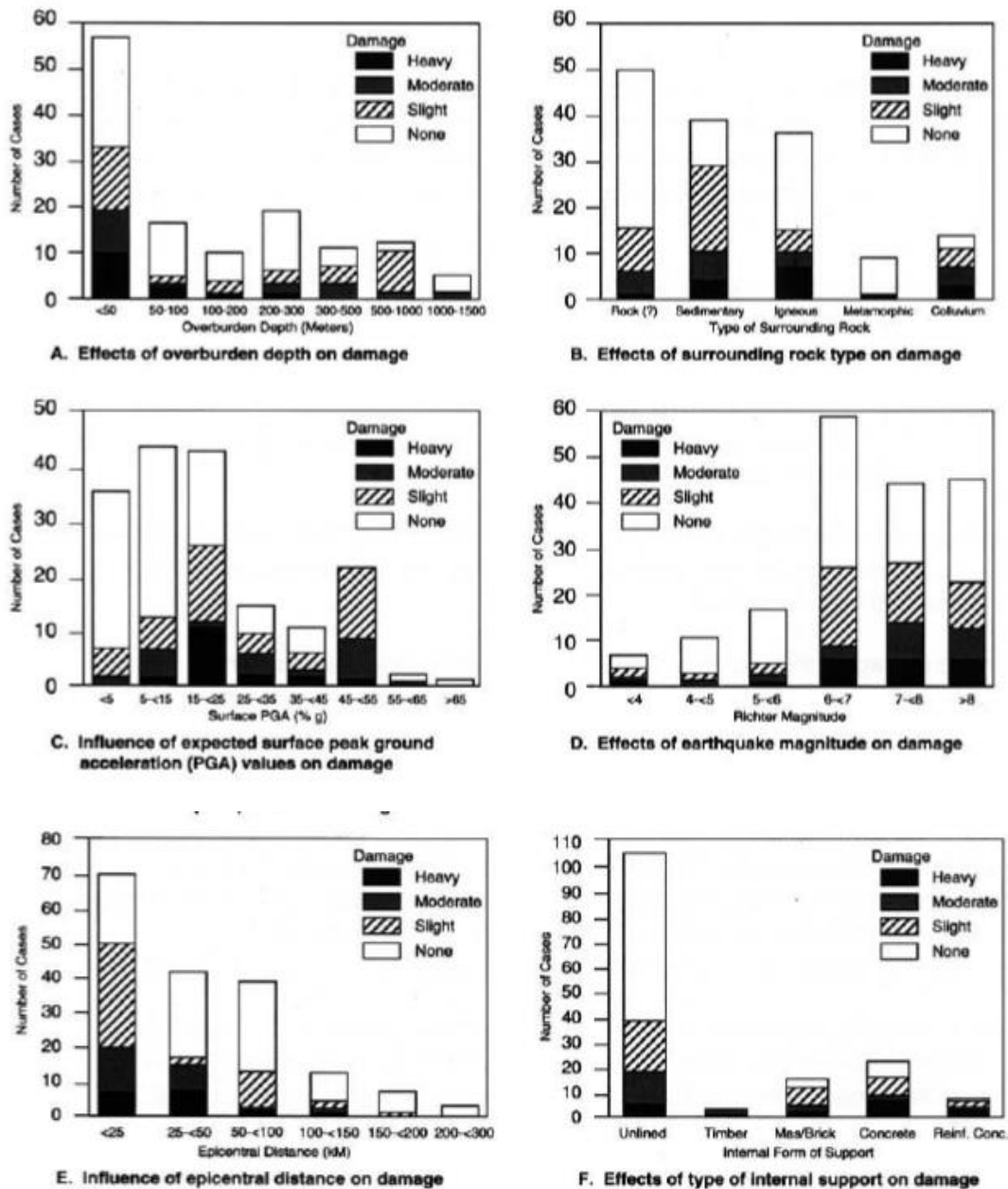
## 2.6.Γενικές παρατηρήσεις για τη σεισμική συμπεριφορά υπόγειων κατασκευών

Όσον αφορά τις υπόγειες κατασκευές, τα δεδομένα που περιγράφουν την απόκρισή τους σε σεισμικές διεγέρσεις είναι περιορισμένα σε σχέση με τις πληροφορίες που είναι διαθέσιμες για τις υπέργειες. Πιστεύεται ότι υπάρχουν πολλές περιπτώσεις βλαβών από σεισμικά γεγονότα οι οποίες δεν εντοπίστηκαν και δεν καταγράφηκαν ποτέ. Αδιαμφισβήτητα, όμως, οι περιπτώσεις καλής συμπεριφοράς που δεν έχουν καταγραφεί, με μικρές ή και καθόλου βλάβες, είναι ακόμα περισσότερες (Wang,1993). Συνεπώς, οι έρευνες που έχουν δημοσιευτεί μέχρι σήμερα και αφορούν τις εν λόγω κατασκευές περιλαμβάνουν ένα μικρό τμήμα του συνόλου των περιπτώσεων, ενώ πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στους περιορισμούς που εμπεριέχει η κάθε έρευνα. Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων ερευνών είναι εκείνες των Duke και Leeds (1959), Stevens (1977), Dowding και Rozen (1978), Owen και Scholl (1981), Sharma και Judd (1991), Power et al. (1998) και Kaneshiro et al. (2000). Συγκεκριμένα, οι Sharma και Judd (1991) κατέγραψαν ένα εκτενή κατάλογο των βλαβών που σημειώθηκαν σε υπόγειες κατασκευές από ένα σύνολο 192 περιπτώσεων σεισμικών διεγέρσεων, επεκτείνοντας την υπάρχουσα έρευνα των Owen και Scholl. Συνέδεσαν την τρωτότητα των υπόγειων κατασκευών με έξι παράγοντες: το υπερκείμενο έδαφος, το είδος εδάφους, την μέγιστη εδαφική επιτάχυνση, το μέγεθος του σεισμού, την επικεντρική απόσταση και το είδος της στήριξης. Πρέπει να σχολιασθεί ότι το μεγαλύτερο μέρος των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε στην έρευνά τους αφορούσε σεισμούς μεγέθους μεγαλύτερου ή ίσου του 7. Τα αποτελέσματα της έρευνας παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.5. Όπως προαναφέρθηκε, πρέπει να ληφθεί υπόψη η ποιοτική φύση της έρευνας στην μελέτη των συγκεκριμένων αποτελεσμάτων. Επίσης, η

στατική εξάρτηση των διαφόρων παραμέτρων του προβλήματος μπορεί να οδηγεί συχνά σε παράλογα συμπεράσματα (Wang,1993).

Λαμβάνοντας υπόψη το σύνολο των καταγεγραμμένων περιπτώσεων σε υπόγειες κατασκευές, διεξάγονται οι ακόλουθες γενικές παρατηρήσεις σχετικά με την απόκρισή τους σε σεισμικές διεγέρσεις (Hashash et al., 2001):

1. Οι υπόγειες κατασκευές εμφανίζονται λιγότερο τρωτές από τις υπέργειες για το ίδιο επίπεδο σεισμικής έντασης.
2. Οι αναφορές για βλάβες σε υπόγειες κατασκευές μειώνονται όσο αυξάνεται το ύψος της υπερκείμενης εδαφικής στρώσης.
3. Κατασκευές σε μαλακά εδάφη εμφανίζονται περισσότερο τρωτές έναντι αυτών που διανοίγονται σε βραχώδεις σχηματισμούς.
4. Οι επενδυμένες σήραγγες είναι πιο ασφαλείς από τις μη επενδυμένες. Ακόμα, η καταπόνηση της σήραγγας δύναται να μειωθεί με σταθεροποίηση του περιβάλλοντος εδάφους.
5. Σήραγγες υπό συμμετρική φόρτιση εμφανίζουν μεγαλύτερη σταθερότητα έναντι άλλων.
6. Το επίπεδο εδαφικής επιτάχυνσης και ταχύτητας, το μέγεθος του σεισμού και η επικεντρική απόσταση επηρεάζουν την τρωτότητα της κατασκευής.
7. Η διάρκεια της σεισμικής δόνησης είναι καθοριστικής σημασίας για την τρωτότητα της κατασκευής.
8. Υψίσυχνες συνιστώσες της κίνησης (που αναμένονται κοντά στο επίκεντρο) μπορεί να προκαλέσουν διάρρηξη του βράχου (σε μη επενδυμένη σήραγγα) ή του σκυροδέματος (σε επενδυμένη σήραγγα).
9. Η κίνηση δύναται να αυξηθεί σε μία σήραγγα, όταν το μήκος κύματος αυτής είναι μεταξύ μίας έως τέσσερις φορές τη διάμετρο της σήραγγας.
10. Σημαντικές βλάβες μπορεί να εμφανιστούν στις εισόδους των σηράγγων εξαιτίας κατολισθήσεων.



Σχήμα 2.5: Στατιστικά αποτελέσματα βλαβών σε υπόγειες κατασκευές από σεισμικές διεγέρσεις (Sharma and Judd, 1991)

Από τη στατιστική αξιολόγηση των στοιχείων προέκυψε ότι σοβαρές ή μέτριες βλάβες προκλήθηκαν:

- σε σήραγγες βάθους μέχρι 300m. Σημειώνεται ότι οι περισσότερες περιπτώσεις σοβαρών βλαβών αναφέρθηκαν για σήραγγες σε βάθη  $\leq 100m$ ,
- όταν οι επίκεντρικές αποστάσεις ήταν  $\leq 50km$ ,
- κατά τη διάρκεια σεισμών μεγέθους  $M_s \geq 6-7$  της κλίμακας Richter.

Η παρατηρούμενη μείωση των βλαβών σε μεγάλα βάθη είναι δυνατό να αποδοθεί στην εκθετική απόσβεση των επιφανειακών κυμάτων (Rayleigh), στην αύξηση του μέτρου ελαστικότητας με αυξανόμενο βάθος, καθώς και στις μικρές διαστάσεις των σηράγγων σε σχέση με τα επικρατέστερα μήκη κυμάτων. Επενδεδυμένες σήραγγες γενικά παρουσίασαν

υψηλότερα ποσοστά βλαβών από τις μη. Η στατιστική αξία αυτής της παρατήρησης είναι προφανώς ασαφής καθώς υπεισέρχονται οι παράγοντες της ποιότητας εδάφους (κατά τεκμήριο πτωχής) και των ανάλογων διαφορών μεταξύ των ιδιοσυχνοτήτων εδάφους/ συστήματος υποστήριξης (Σεισμική ευστάθεια σηράγγων σε βράχο, Μπαντής και Σχοινάς, 2001).

Άλλα στοιχεία συσχετισμού μεταξύ βλαβών και κρίσιμων σεισμικών χαρακτηριστικών αφορούν στην εδαφική επιτάχυνση ( $\alpha$ ) και ταχύτητα ( $v$ ) :

- $\alpha < 0.29$   $v = 20\text{cm/sec}^{-1}$  Άθικτη σήραγγα
- $0.2 < \alpha < 0.5g$   $v = 90\text{cm/sec}^{-1}$  Μέτριες βλάβες
- $\alpha > 0.5g$   $v > 100\text{cm/sec}^{-1}$  Σοβαρές βλάβες

## 2.7. Παραδείγματα απόκρισης σηράγγων σε σεισμικές φορτίσεις

### 2.7.1. Γενικά στοιχεία για έναν σεισμό

Οι σεισμοί διακρίνονται σε επιφανειακούς (βάθος έως 20 km και σε εξαιρετικές περιπτώσεις έως 60 km), ενδιάμεσου βάθους (έως 300 km) και μεγάλου βάθους (300-720 km). Οι σεισμοί δημιουργούνται λόγω της ξαφνικής ολίσθησης ενεργών ρηγμάτων οι συσσωρευμένες τάσεις στην επιφάνεια των οποίων υπερβαίνουν το όριο θραύσης του υλικού. Το σημείο πάνω στην επιφάνεια του ρήγματος στο οποίο δημιουργείται ένας σεισμός ονομάζεται υπόκεντρο ή εστία, ενώ η προβολή του σημείου αυτού στην επιφάνεια ονομάζεται επίκεντρο. Το βάθος στο οποίο βρίσκεται η εστία ονομάζεται εστιακό βάθος.

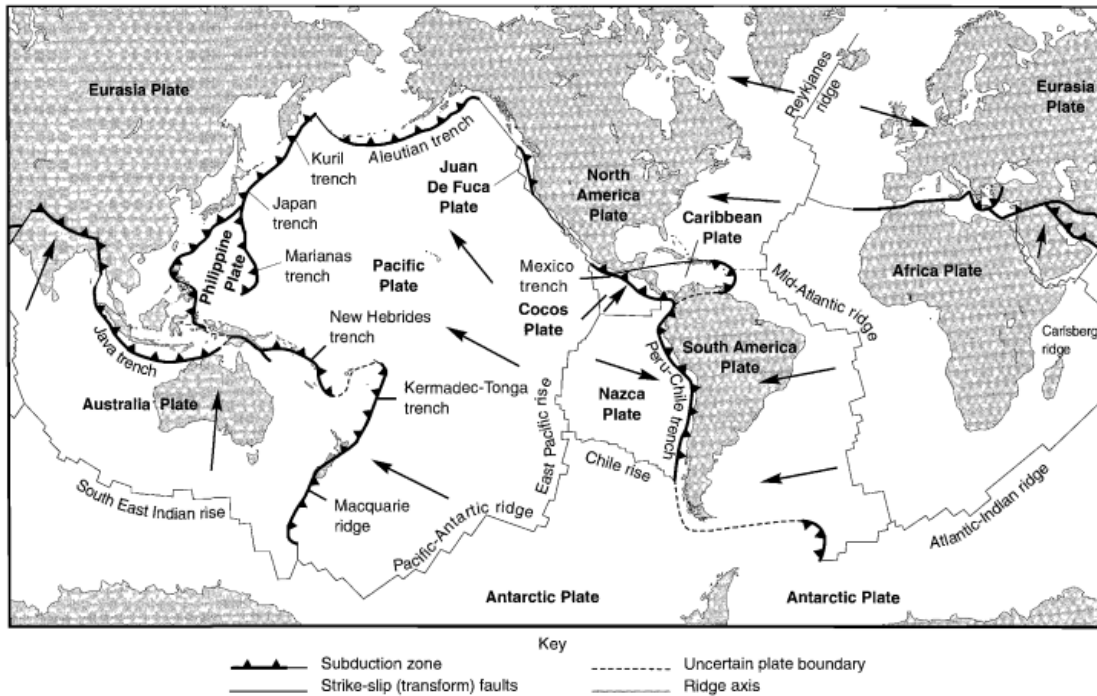
Με τα χρόνια προτάθηκαν πολλές θεωρίες για να εξηγήσουν τα αίτια ενός σεισμού. Η θεωρία των τεκτονικών πλακών θεωρείται γενικά η πλέον αξιόπιστη. Σύμφωνα με αυτή την θεωρία το εξωτερικό στρώμα της γης, η λιθόσφαιρα, αποτελείται από περίπου 12 σκληρές τεκτονικές πλάκες. Αυτές οι πλάκες, οι οποίες έχουν μέσο πάχος 50 μίλια βρίσκονται πάνω στην σχετικώς μαλακή ασθενόσφαιρα και μετακινούνται σαν άκαμπτα σώματα. Οι πλάκες αυτές αλληλεπιδρούν μεταξύ τους με τρεις βασικούς τρόπους:

α) Απομάκρυνση των πλακών και σχηματισμός της μεσωκεάνιας ράχης

β) Οριζόντια ολίσθηση της μιας πλάκας πάνω στην άλλη και δημιουργία ρήγματος

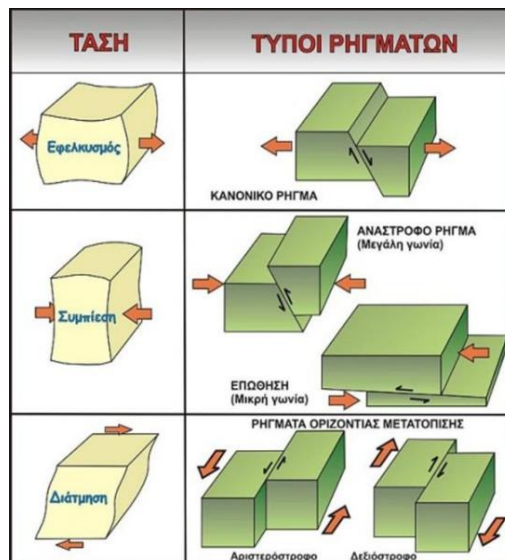
γ) Βύθιση μιας ωκεάνιας πλάκας υψηλής πυκνότητας κάτω από μια ηπειρωτική πλάκα χαμηλής πυκνότητας και ο σχηματισμός τάφρου και νησιωτικού τόξου. ( Αμαλία Γιαννακού)

Κάθε τύπος αλληλεπίδρασης πλακών παράγει σημαντική καταπόνηση πάνω στα πετρώματα του φλοιού. Η καταπόνηση αυτή συσσωρεύεται με την βαθμιαία κίνηση των τεκτονικών πλακών. Τα πετρώματα παραμορφώνονται αλλά διατηρούν την αρχική τους θέση λόγω της συνέχειας, των μηχανικών δεσμών και της τριβής. Όταν η συσσωρευμένη τάση υπερβεί την αντοχή των πετρωμάτων επέρχεται διάρρηξη, η οποία δημιουργεί κύματα που διαδίδονται στο φλοιό της γης και προκαλούν την εδαφική δόνηση (Αμαλία Γιαννακού, 2003).



Σχήμα 2.6: Παγκόσμιος χάρτης τεκτονικών πλακών ( Τα στοιχεία που παρατηρούμε είναι 1) Ζώνη Αφαίρεσης, 2) Αβέβαιο όριο πλάκας, 3) Ρήγματα μετασχηματισμού πλάγιας ολίσθησης, 4) Άξονας κορυφογραμμής

Οι σεισμοί γενικά παρουσιάζονται σε επιφάνειες αδυναμίας του φλοιού της γής, τα ρήγματα. Ρήγματα δημιουργούνται όταν δύο βραχώδη υποστρώματα ολισθαίνουν μεταξύ τους. Με βάση τη διεύθυνση της σχετικής ολίσθησης διακρίνονται σε οριζόντια, κανονικά και αναστροφα ρήγματα.



Σχήμα 2.7: Τύποι ρηγμάτων

Το μέγεθος ( $M$ ) ενός σεισμού είναι το μέτρο της ενέργειας που απελευθερώνεται και είναι ανεξάρτητο από την επικεντρική απόσταση.

Οι κυριότερες κλίμακες σεισμικών μεγεθών είναι:

- Τοπικό μέγεθος ( $M_{L, Richter}$ )
- Επιφανειακό μέγεθος ( $M_s$ )
- Μέγεθος σεισμικής ροπής ( $M_w$  ή  $M_o$ )

Η κλίμακα Richter δεν έχει ούτε κάτω, ούτε άνω όριο, μπορεί να έχει αρνητικές τιμές, αλλά πρακτικά δεν έχουν καταγραφεί σεισμοί μεγαλύτεροι των 9,5 R. Αύξηση του μεγέθους σεισμού κατά μία μονάδα ισοδυναμεί με αύξηση της εκλυόμενης ενέργειας κατά περίπου 31 φορές. Ωστόσο, είναι σημαντικό να περιγραφεί η επίδραση των σεισμικών κυμάτων στις σήραγγες μαζί με παραδείγματα ιστορικών αστοχιών ώστε να εξαχθούν κάποια κρίσιμα συμπεράσματα.

### 2.7.2. Επίδραση σεισμικών κυμάτων στις σήραγγες

Οι μηχανισμοί παραμόρφωσης των σηράγγων κατά τη διέλευση σεισμικών κυμάτων περιλαμβάνουν:

- Ζώνες εναλλασσόμενων θλιπτικών και εφελκυστικών παραμορφώσεων κύματα παράλληλα ή υπό γωνία προς τον άξονα.
- Εφαπτομενικές Παραμορφώσεις λόγω πρόσπτωσης των κυμάτων από και προς τον άξονα.
- Ακανόνιστες παραμορφώσεις της διατομής ως αποτέλεσμα της παγίδευσης" και διάχυσης της σεισμικής ενέργειας γύρω από τη σήραγγα.

Η επικράτηση ή όχι των παραπάνω φαινομένων εξαρτάται κατά ένα βαθμό από το μήκος ( $\lambda$ ) του σεισμικού κύματος (Hendrom & Fernandez, 1983). Έχει δειχθεί ότι δυναμική ενίσχυση των τάσεων κατά την πρόσπτωση των σεισμικών κυμάτων στα τοιχώματα της σήραγγας είναι πιθανή όταν το μήκος κύματος των μέγιστων ταχυτήτων είναι 8 φορές μεγαλύτερο της μέγιστης διάστασης της εκσκαφής (Μπαντής και Σχοινάς, 2001).

Τα σεισμικά κύματα διακρίνονται σε διαφορετικά είδη ανάλογα με τα χαρακτηριστικά διάδοσής τους. Υπάρχουν δύο μεγάλες κατηγορίες: στην πρώτη ανήκουν τα κύματα χώρου και στην δεύτερη τα επιφανειακά κύματα. Στα κύματα χώρου η διαταραχή διαδίδεται προς όλες τις κατευθύνσεις στερεού σώματος π.χ. της γης, ενώ στα επιφανειακά κύματα η διαταραχή διαδίδεται παράλληλα σε διαχωριστικές επιφάνειες όπως η επιφάνεια της Γης. Τα σεισμικά κύματα διακρίνονται σε κύματα χώρου (επιμήκη P [=διαμήκη] και εγκάρσια S), επιφανειακά κύματα (Rayleigh, Love, Stonley κ.ά.) και άλλα κύματα (διαυλικά, ουράς, στάσιμα, κ.ά.). Τα κύματα P έχουν μεγαλύτερη ταχύτητα από τα S, ενώ τα Love μεγαλύτερη από τα Rayleigh. Τις μεγαλύτερες επιπτώσεις στις κατασκευές έχουν τα κύματα επιφανείας, επειδή έχουν το μεγαλύτερο πλάτος. Το πλάτος των σεισμικών κυμάτων μειώνεται με την αύξηση της επικεντρικής απόστασης λόγω των φυσικών ιδιοτήτων του φλοιού της Γης. Οι ταχύτητες των κυμάτων P και S εξαρτώνται από τις ελαστικές ιδιότητες του μέσου διάδοσής τους (βράχου, εδάφους). Η άφιξη των διαμήκων κυμάτων P προηγείται της αφίξεως των διατμητικών καθώς για οποιοδήποτε υλικό ισχύει ότι  $V_p > V_s$ .

### 2.7.3.Ανάλυση Σεισμικού κινδύνου

Για να εκτιμήσουμε τον σεισμικό κίνδυνο σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία ή περιοχή, πρέπει να επισημανθούν όλες οι πιθανές πηγές σεισμικής δραστηριότητας καθώς και η πιθανότητα μελλοντικής τους ενεργοποίησης τους. Ένας μεγάλος σεισμός καταγράφεται σήμερα από εκατοντάδες σειсмоγράφους σε όλο τον κόσμο. Μέσα σε ώρες οι σεισμολόγοι μπορούν να καθορίσουν το μέγεθος, να προσδιορίσουν την επιφάνεια αλλά και να αξιολογήσουν τα χαρακτηριστικά της πηγής.

- **Γεωλογικές ενδείξεις**

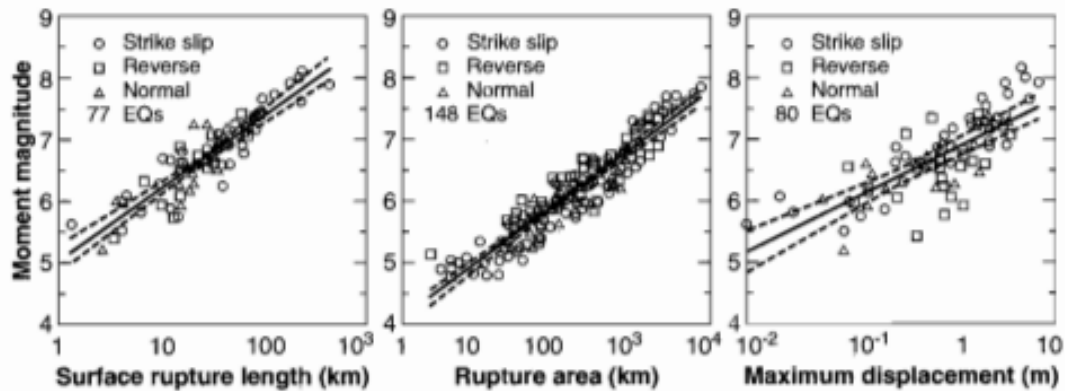
Η θεωρία των τεκτονικών πλακών μας διαβεβαιώνει ότι οι σεισμοί καταγράφονται γεωλογικά είτε υπό μορφή αναβαθμών είτε σχετικών μετακινήσεων. Η μελέτη της γεωλογικής καταγραφής παλαιάς σεισμικής δραστηριότητας ονομάζεται παλαιοσεισμολογία. Η αναγνώριση σεισμικών πηγών από γεωλογικές ενδείξεις είναι ζωτικής σημασίας και αποτελεί δύσκολο πολλές φορές μέρος της ανάλυσης σεισμικού κινδύνου. Η έρευνα γεωλογικών ενδείξεων σεισμικών πηγών επικεντρώνεται στην αναγνώριση ρηγμάτων (Γιαννακού, 2003).

#### **1) Ενεργά ρήγματα**

Η παρουσία ενός ρήγματος από μόνη της δεν σημαίνει πιθανότητα μελλοντικών σεισμών. Ο όρος ενεργό ρήγμα είναι σημαντικός και έχει αποτελέσει θέμα συζήτησης και αντιπαράθεσης για πολύ καιρό. Παρόλη την διχογνωμία, έχει συμφωνηθεί η χρήση του όρου «ενεργό ρήγμα» για την περιγραφή ενός ρήγματος το οποίο ενέχει σεισμικό κίνδυνο και του όρου «ανεργό ρήγμα» για ρήγμα του οποίου η σεισμική δραστηριότητα που έλαβε χώρα στο παρελθόν είναι απίθανο να επαναληφθεί.

#### **2) Δείκτες σεισμικής εντάσεως**

Οι γεωλογικές ενδείξεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση του μεγέθους παλαιότερων σεισμών με τη συσχέτιση των παρατηρούμενων χαρακτηριστικών των παραμορφώσεων με τις γνωστές εντάσεις των καταγραφέντων σεισμών. Μελέτες σε όλο τον κόσμο έχουν δείξει ότι τα ρήγματα δεν διαρρηγνύονται σε όλο τους το μήκος ή την επιφάνειά τους. Αντίθετα, μεμονωμένα κομμάτια του ρήγματος με φυσικά ελεγχόμενα σύνορα διαρρηγνύονται κατ'επανάληψη. Το μήκος διάρρηξης, η επιφάνεια διάρρηξης και η μετακίνηση του ρήγματος μπορούν να εκτιμηθούν από μετασεισμικές γεωλογικές έρευνες υπαίθρου. Η συσχέτιση του μεγέθους του σεισμού με τέτοιες ποσότητες περιλαμβάνει αναφορά σε περιορισμένα στοιχεία και συνακόλουθα παράγει μια εκτίμηση της αναμενόμενης τιμής της έντασης του σεισμού. Η αβεβαιότητα σε αυτές τις εκτιμήσεις που μπορεί να είναι σημαντικές πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά την εφαρμογή τους. Εμπειρικές σχέσεις βασισμένες σε στατιστικές αναλύσεις ιστορικών σεισμικών δεδομένων απ'όλο τον κόσμο παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα (St. Krammer, 1993).



Σχήμα 2.8: Σχέση σεισμικής ροής με χαρακτηριστικά διαρροής (Kramer , *GeotechnicalEarthquakeEngineering*)

- **Τεκτονικές Ενδείξεις**

Η θεωρία των τεκτονικών πλακών και η ελαστική θεωρία υποστηρίζουν ότι οι σεισμοί συμβαίνουν για να εκτονωθεί η συσσωρευμένη ενέργεια που δημιουργείται κατά τη σχετική μετακίνηση δύο τεκτονικών πλακών. Επομένως, ο ρυθμός μετακίνησης θα πρέπει να στηρίζεται με τον ρυθμό συσσώρευσης της ενέργειας και τον ρυθμό απελευθέρωσης της ενέργειας ( Smith, 1976, Woodward-Clyde, Consultants, 1979, Idriss, 1985).

- **Ιστορικές Πηγές**

Πηγές σεισμών μπορούν επίσης να βρεθούν από τις καταγραφές ιστορικής σεισμικότητας. Οι ιστορικές αναφορές στις συνέπειες της εδαφικής δόνησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν προκειμένου να επιβεβαιωθεί η ύπαρξη παλαιότερων σεισμών και να εκτιμηθεί η γεωγραφική κατανομή της έντασης. Όταν υπάρχουν επαρκή στοιχεία, η μέγιστη ένταση μπορεί να καθοριστεί και να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της τοποθεσίας του επίκεντρου και του μεγέθους του σεισμού. Αν τα ιστορικά αρχεία έχουν χρονολογηθεί μπορούν να χρησιμοποιηθούν επίσης για την εκτίμηση του ρυθμού επανεμφάνισης των σεισμών, ή της σεισμικότητας μια περιοχής.

#### 2.7.4.Ο σεισμός του Kobe

Ο σεισμός του Kobe το 1995 προκάλεσε την κατάρρευση του υπόγειου σταθμού μετρό Daikai, ο οποίος είχε κατασκευαστεί με την μέθοδο εκσκαφής και επανεπίχωσης. Ο σταθμός αυτός, που σχεδιάστηκε χωρίς να ληφθούν υπόψη σεισμικές δράσεις, αποτελεί την πρώτη σύγχρονη υπόγεια κατασκευή που αστόχησε κατά τη διάρκεια σεισμικού επεισοδίου. Τα κεντρικά υποστυλώματα του σταθμού αστόχησαν, οδηγώντας στην πλήρη κατάρρευση της πλάκας οροφής και την καθίζηση των υπερκειμένων κατά περίπου 2.5 m.

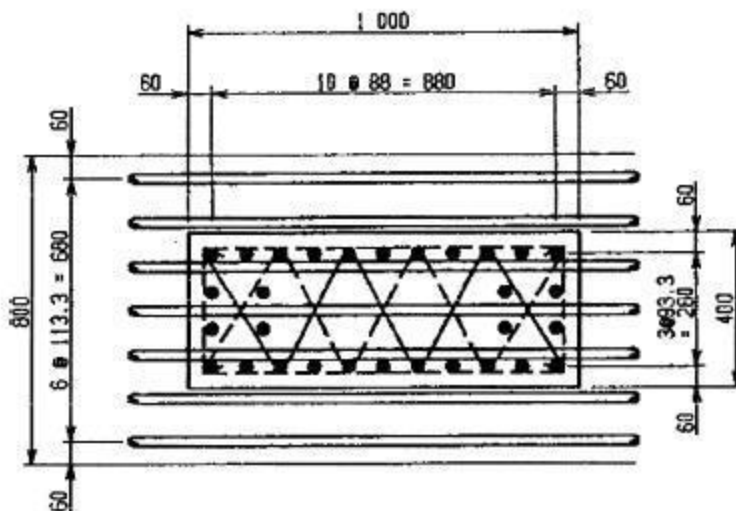
Ο σεισμός Hyogoken-Nambu (1995) προκάλεσε την κατάρρευση του υπόγειου σταθμού Dakai στην περιοχή Kobe της Ιαπωνίας . Ο σχεδιασμός του σταθμού, ο οποίος χρονολογείται το 1962, δεν περιλάμβανε αντισεισμικά μέτρα. Είναι η πρώτη κατάρρευση σύγχρονης υπόγειας κατασκευής λόγω σεισμικής διέγερσης. Τα κεντρικά υποστυλώματα



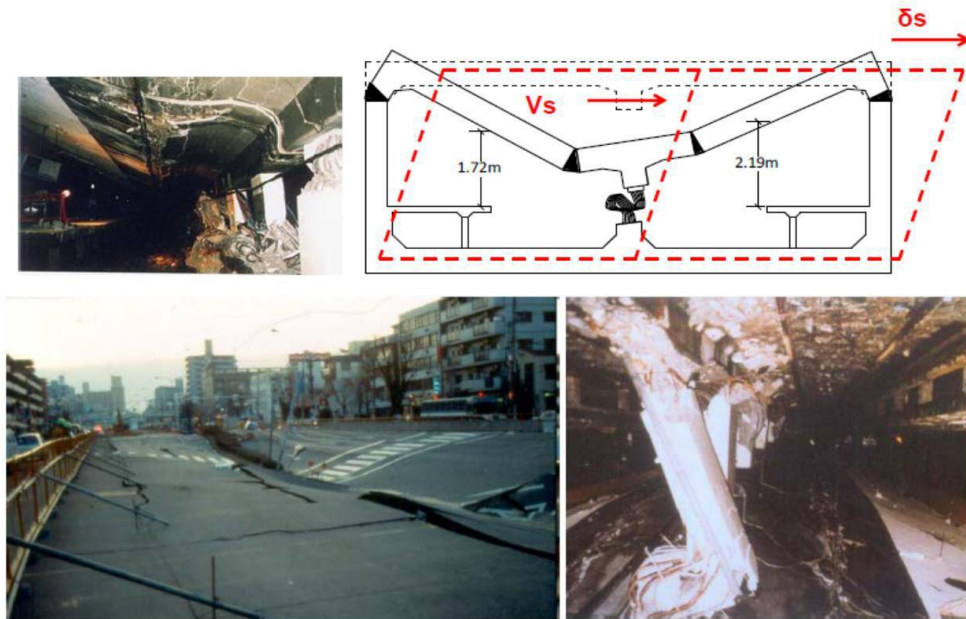
του σταθμού αστόχησαν, γεγονός που συνοδεύτηκε από κατάρρευση της πλάκας οροφής και από καθιζήσεις του υπερκείμενου εδάφους. (Hashashetal, 2001 ).

Κατά τη διάρκεια του σεισμού, οι εγκάρσιοι τοίχοι στα άκρα του σταθμού λειτούργησαν ως διαφραγματικοί τοίχοι και απέτρεψαν την κατάρρευση της κατασκευής στα σημεία αυτά (Iida et al., 1996). Οι τοίχοι αυτοί εμφάνισαν σημαντικές ρωγμές, αλλά τα κεντρικά υποστυλώματα μόνο περιορισμένες βλάβες. Στις περιοχές της κατασκευής χωρίς εγκάρσιους τοίχους, η αστοχία των κεντρικών υποστυλωμάτων οδήγησε σε βύθιση της πλάκας οροφής, ενώ εμφανίστηκαν και ρωγμές πλάτους 150-250 mm κατά την οριζόντια διεύθυνση. Επίσης, ορισμένοι πλαστικοί αρμοί διαχωρίστηκαν, ενώ παράλληλα υπήρξε διαρροή νερού μέσω των ρωγμών που δημιουργήθηκαν. Η πλάκα θεμελίωσης δεν σημείωσε πολλές βλάβες.

Τα κεντρικά υποστυλώματα που είχαν κατασκευαστεί με ανεπαρκή εγκάρσιο οπλισμό εμφάνισαν έντονες ρωγματώσεις, ενώ ορισμένα αστόχησαν. Τα υποστυλώματα που είχαν κατασκευαστεί με σπειροειδή οπλισμό, επιπλέον του απλού συνδετήρα, δεν εμφάνισαν λυγισμό στο ίδιο βαθμό με τα υποστυλώματα χωρίς οπλισμό (Hashash et al., 2001).

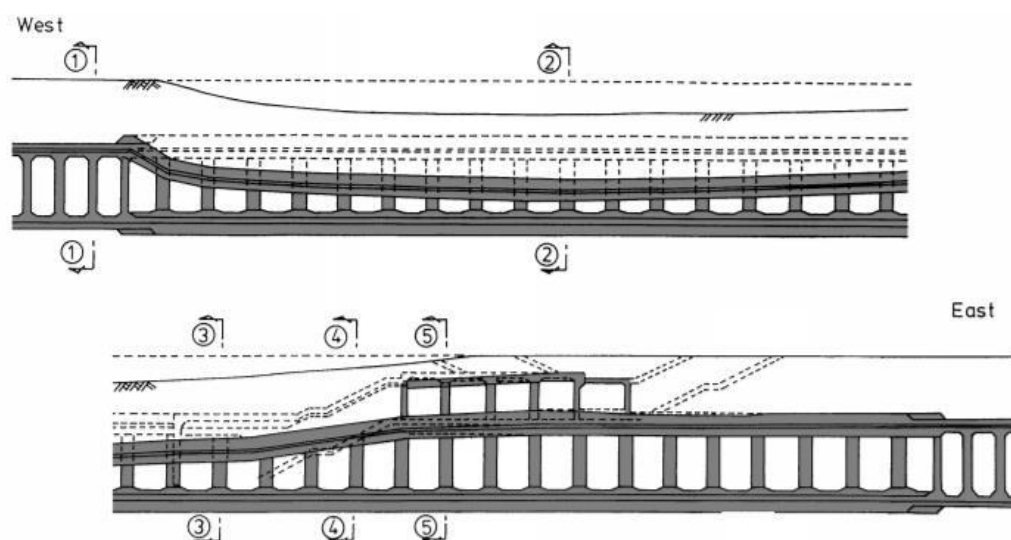


Σχήμα 2.9: Διάταξη εγκάρσιου οπλισμού στα κεντρικά υποστυλώματα (Iida et al., 1996)



**Σχήμα 2.10: Κατάρρευση του σταθμού Daikai εξαιτίας της αστοχίας των κεντρικών υποστυλωμάτων (Iida et al., 1996).**

Σύμφωνα με τους Iida et al. (1996), η σχετική μετακίνηση μεταξύ της πλάκας οροφής και της πλάκας θεμελίωσης εξαιτίας της κίνησης του υπεδάφους προκάλεσε την ισχυρή οριζόντια δύναμη που οφείλεται για την αστοχία του σταθμού. Τέτοιου είδους μετακινήσεις μπορεί να έχουν μικρές επιπτώσεις σε μία μικρή κατασκευή, αλλά σε κατασκευές μεγάλου μήκους, όπως είναι ένας υπόγειος σταθμός μετρό, είναι σημαντικές. Επιπλέον, πιστεύεται ότι το πάχος του υπερκείμενου εδάφους επηρέασε την έκταση των καταστροφών μεταξύ δύο διαδοχικών σταθμών, διότι πρόσθεσε σημαντικά κατακόρυφα φορτία στην κατασκευή. Μία ακόμα άποψη είναι ότι η αστοχία οφείλεται στις υψηλές τιμές της κατακόρυφης επιτάχυνσης (Hashash et al., 2001).



**Σχήμα 2.11: Σκαρίφημα της βλάβης στον υπόγειο σταθμού Daikai (Iida et al., 1996)**

Σύμφωνα με το EQE (1995): «Οι εκτεταμένες βλάβες στο σταθμό του Daikai μπορεί να είχαν αποφευχθεί με:

α) διαφραγματική λειτουργία της πλάκας

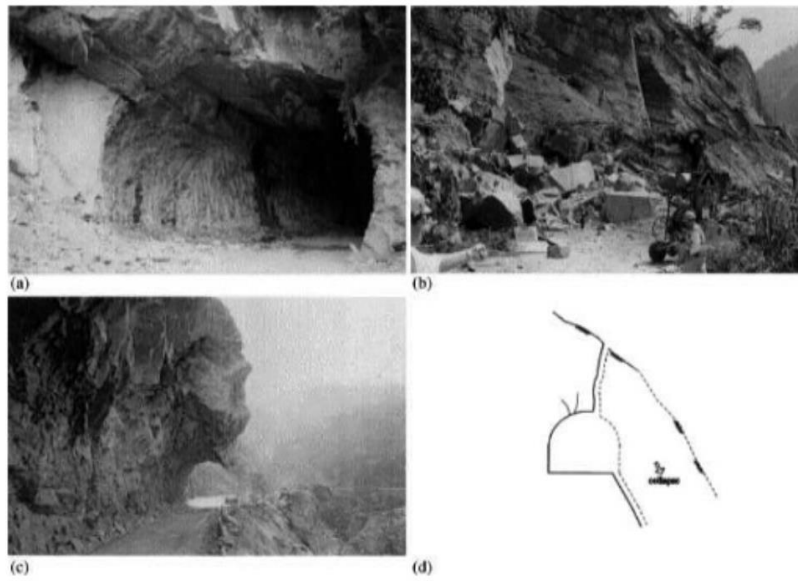
β) παθητικές ωθήσεις του εδάφους στους περιβάλλοντες τοίχους, οι οποίες θα ενεργοποιούνταν καθώς η σήραγγα παρουσίαζε διατμητική παραμόρφωση.

Η διαφραγματική λειτουργία της πλάκας δεν ενεργοποιήθηκε λόγω του μεγάλου μήκους του σταθμού. Η μέθοδος κατασκευής που χρησιμοποιήθηκε (μέθοδος εκσκαφής και επανεπίχωσης, όπου η εκσκαφή υποστηρίζονταν από διαφραγματικούς τοίχους, οι οποίοι απείχαν μικρή απόσταση από τον τοίχο της σήραγγας) κατέστησε τη συμμετοχή του περιβάλλοντος εδάφους δύσκολη έως αδύνατη, με αποτέλεσμα την αδυναμία ενεργοποίησης των παθητικών ωθήσεων. Ως αποτέλεσμα, η σήραγγα συμπεριφέρθηκε ως «ελεύθερη» κατασκευή με ελάχιστη έως μηδενική υποστήριξη από το έδαφος. Παρόλα αυτά, δεν είναι βέβαιο ότι η επαρκής συμμετοχή του εδάφους θα ήταν ικανή να αποτρέψει την αστοχία των υποστυλωμάτων. Η διατμητική αστοχία των υποστυλωμάτων προκάλεσε παρόμοιας μορφής βλάβες και στη σήραγγα Shinkansen, η οποία διέσχισε το βουνό Rokko .

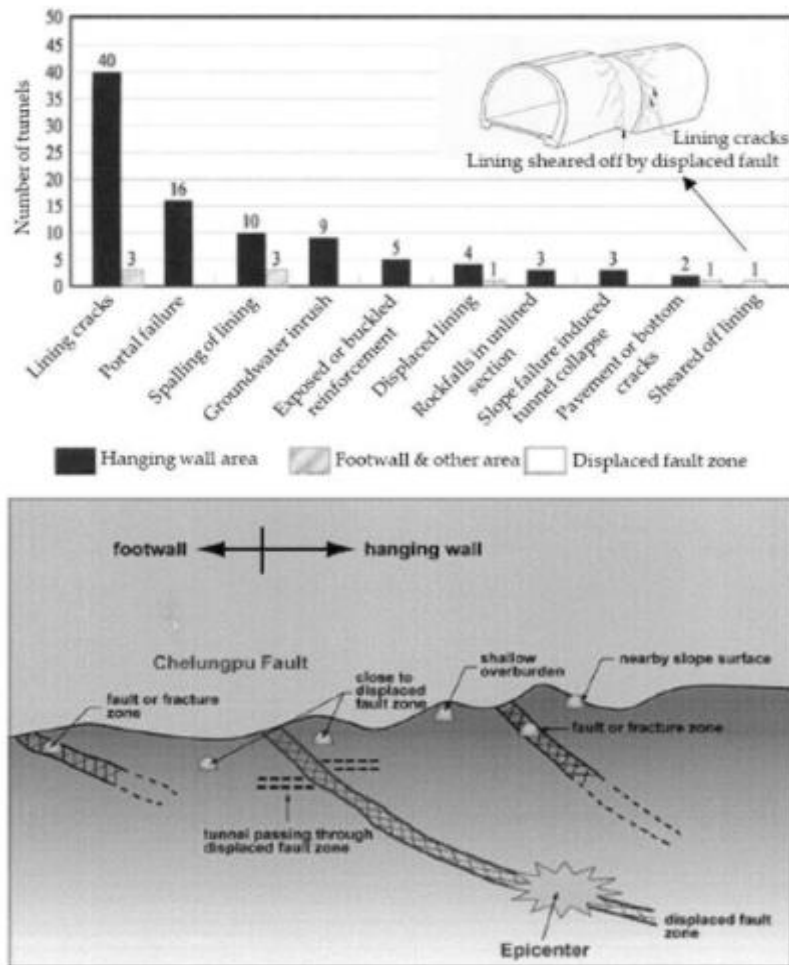
#### 2.7.5.Ο σεισμός ChiChi στην Ταϊβάν

Η περιοχή που επηρεάστηκε σε μεγαλύτερο βαθμό από το σεισμό στο Chi-Chi (1999) διέθετε αρκετές οδικές σήραγγες. Επρόκειτο για μεγάλες σήραγγες πεταλοειδούς διατομής, κατασκευασμένες σε βράχο. Στις σήραγγες δεν παρατηρήθηκαν ορατές βλάβες εξαιτίας του σεισμού. Οι κυριότερες βλάβες παρατηρήθηκαν στις εισόδους των σηράγγων, εξαιτίας της αστάθειας των πρανών (Σχήμα 2.10). Η κυκλοφορία διακόπηκε στη σήραγγα που διέσχιζε το ρήγμα Chelungpu , εξαιτίας της μετακίνησης που σημειώθηκε, η οποία ήταν της τάξεως των 4 m (Ueng et al., 2001). Δεν παρατηρήθηκαν βλάβες στο υπόγειο δίκτυο Ταϊpei, το οποίο βρίσκεται σε απόσταση 100 km από την περιοχή του ρήγματος (Hashash et al., 2001).

Στον σεισμό ChiChi στην Ταϊβάν η αστάθεια πρανών στα στόμια των σηράγγων ήταν πάρα πολύ συνηθισμένη. Η κατολίσθηση ως αποτέλεσμα εδαφικής δόνησης είναι ένα συνηθισμένο φαινόμενο. Η κατολίσθηση κατά μήκος μιας σήραγγας μπορεί να προκαλέσει συγκεντρωμένες διατμητικές μετατοπίσεις και κατάρρευση της διατομής. Η πιθανότητα κατολίσθησης είναι μεγαλύτερη όταν μια ήδη κατολισθείσα μάζα τέμνει τον άξονα σήραγγας. Ο κίνδυνος κατολίσθησης είναι επίσης μεγαλύτερος στα ρηχά νερά μιας σήραγγας και στα στόμια αυτής, όπου αποτελεί την συνηθέστερη μορφή αστοχίας. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται αν το στόμιο δρα και ως τοίχος αντιστήριξης.



Σχήμα 2.12: Αστοχία πρανούς σε είσοδο σήραγγας, σεισμός Chi-Chi, Taiwan (Hashashetal., 2001)

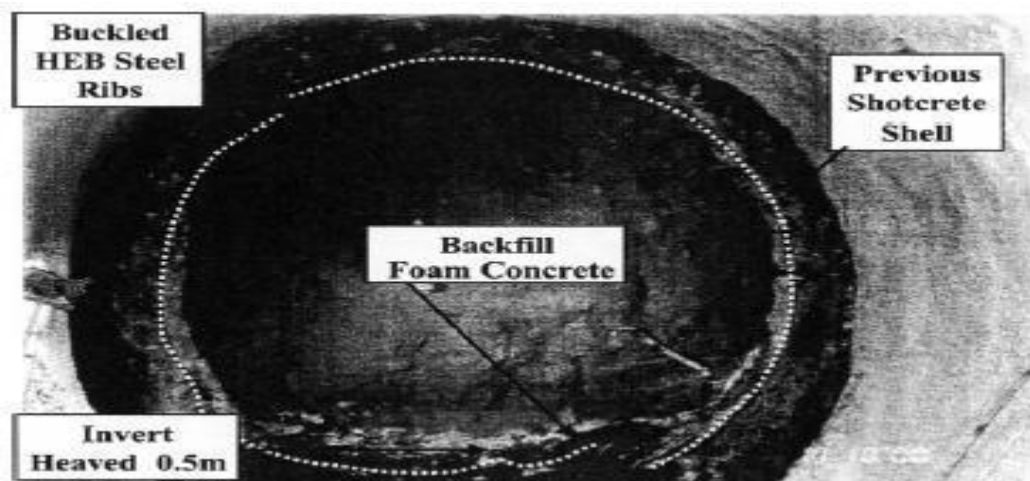


Σχήμα 2.13: Αριθμός σηράγγων που υπέστησαν διάφορους τύπους ζημιών και τοποθεσίες σηράγγων σε σχέση με την εκτοπισμένη ζώνη σφάλματος (Roberto Guidotti and Alberto Castellani)

## 2.7.6. Σήραγγες Βολυ, Τουρκία

Οι εν λόγω δίδυμες σήραγγες κατασκευάστηκαν με τη μέθοδο New Austrian Tunneling Method (NATM), κατά την οποία εφαρμόζεται συνεχής έλεγχος της απόκρισης της βραχομάζας και προστίθενται στοιχεία υποστήριξης μέχρι να δημιουργηθεί ένα σταθερό σύστημα. Η σήραγγα έχει διατομή μορφής τόξου, ύψους 15 m και πλάτους 16 m. Η κατασκευή ήταν ιδιαίτερα απαιτητική, επειδή διασταυρώνεται με αρκετά μικρά ρήγματα παράλληλα στο βόρειο τμήμα του ρήγματος της Ανατολίας. Στις 17 Αυγούστου 1999, ο σεισμός που σημειώθηκε στο Κοσεαλί επηρέασε ελάχιστα τις σήραγγες. Ορισμένες τριχοειδείς ρωγμές, οι οποίες είχαν παρατηρηθεί προγενέστερα στην τελική κατασκευή και βρισκόνταν σε συνεχή έλεγχο για πιθανές μετακινήσεις, δεν σημείωσαν καμία μετακίνηση κατά τη διάρκεια του σεισμού. Στις 12 Νοεμβρίου 1999, ο σεισμός προκάλεσε την κατάρρευση των δύο σηράγγων, σε απόσταση 300 m από την ανατολική είσοδό τους. Η αστοχία σημειώθηκε σε αργιλικό έδαφος, στο ημιτελές τμήμα της σήραγγας. Το τμήμα είχε καλυφθεί με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Προτάθηκαν αρκετοί μηχανισμοί στην προσπάθεια εξήγησης της μορφής αστοχίας, οι οποίοι αναφέρουν ως αίτια την ισχυρή εδαφική

κίνηση, τις μετακινήσεις του αργιλικού εδάφους και την αστοχία του πρανούς (Hashash et al., 2001).

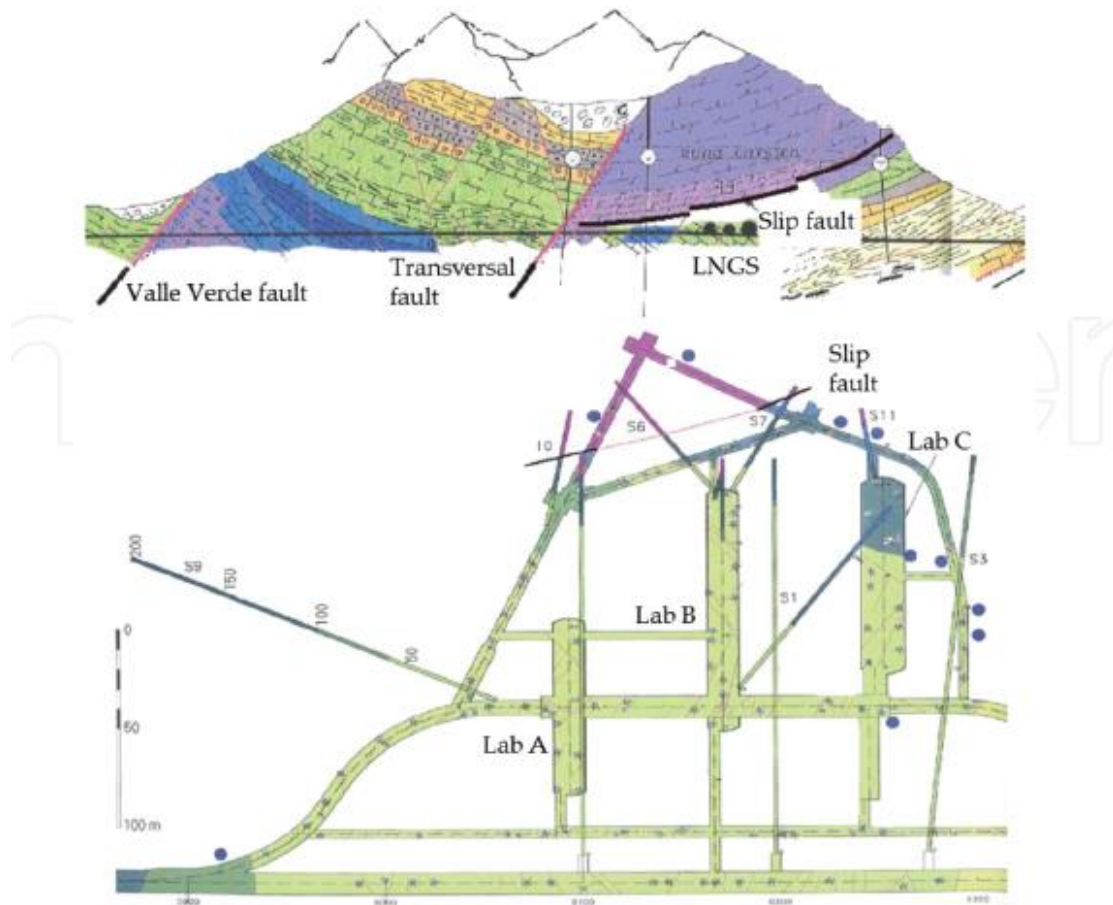


Σχήμα 2.14: Σήραγγα Volu, τμήμα που αποκαταστάθηκε μετά το σεισμό (Menkiti, 2001)

### 2.7.7.Σεισμός L' Aquila

Τα Εργαστήρια του Εθνικού Ινστιτούτου Πυρηνικής Φυσικής (INFN) βρίσκονται εντός του βουνού Gran Sasso (Abruzzo, Ιταλία)(εικόνα 2.9). Κατά τη διάρκεια του σεισμού της L' Aquila (2009), έχουν συλλεχθεί αρχεία επιτάχυνσης. Το επίπεδο πίεσης συμβαίνει συνήθως σε λεπτές επίπεδες πλάκες που ασκούνται μόνο από δυνάμεις φορτίου που είναι παράλληλες με αυτές), σε διάφορους σταθμούς στο Gran Sasso, με τιμές μέγιστης επιτάχυνσης εδάφους (GA) μεταξύ 0,35 και 0,5 g. Μερικά διαγράμματα έχουν συλλεχθεί, περίπου 1400 m κάτω από την κορυφή του βουνού, με τιμές PGA χαμηλότερες από 0,1 g (Roberto Guidotti και Alberto Castellani, 2018).

Το σχήμα από κάτω δείχνει τις τρέχουσες πληροφορίες σχετικά με την παρουσία βλαβών, που συλλέχθηκαν κατά τη διάρκεια της εκσκαφής σήραγγας στο Gran Sasso.



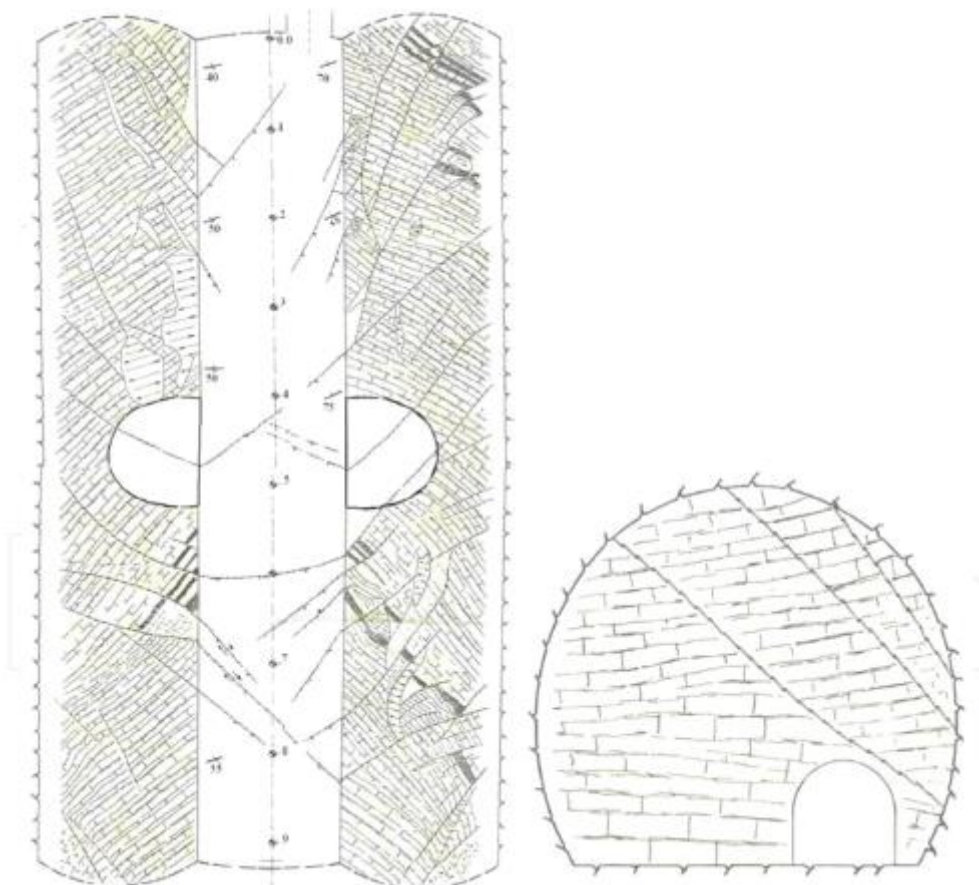
**Σχήμα 2.15: (Επάνω) Γεωλογική μηκοτομή του βουνού Gran Sasso, και οι θάλαμοι του INFN, (κάτω) εγκαταστάσεις των εργαστηρίων του Εθνικού Ινστιτούτου Πυρηνικής Φυσικής, INFN**

Εάν ένα ρήγμα δείχνει στοιχεία ότι έχει μετακινηθεί τουλάχιστον μία φορά τα τελευταία 100.000 χρόνια, τότε πρέπει να θεωρηθεί ως πιθανή πηγή σεισμών. Μια άλλη επικρατούσα άποψη είναι ότι εάν ένα ρήγμα έχει μετακινηθεί τουλάχιστον μία φορά τα τελευταία 5000 χρόνια, τότε θα πρέπει να θεωρείται πηγή καταστροφικών σεισμών σε οποιονδήποτε οικισμό σε ακτίνα 50 χιλιομέτρων. Επίσης εάν μια φορά ένα σημαντικό ρήγμα έχει σχηματιστεί, τότε οι μελλοντικοί σεισμοί δημιουργούνται κατά μήκος του ίδιου ρήγματος, και μετά από χρόνια δημιουργούνται όλο και μεγαλύτερες κάθετες και οριζόντιες μετατοπίσεις. Με αναφορά στο ίχνος βλαβών που παρουσιάζονται, προκύπτουν τα ακόλουθα σενάρια. Στο πρώτο σενάριο, η σεισμική κίνηση προέρχεται από ένα βαθιά ενσωματωμένο ρήγμα που δείχνει ένα επιφανειακό παρακλάδι. Η σήραγγα επηρεάζεται από το παρακλάδι, και βρίσκεται μέσα στο επίκεντρο της περιοχής. Στο δεύτερο σενάριο, η σήραγγα και το ρήγμα που διέρχεται βρίσκονται μερικές δεκάδες χιλιόμετρα από το επίκεντρο. Η σεισμική κίνηση δεν αποδίδεται σε ενέργεια απελευθερωμένη από το ρήγμα.

Ωστόσο, η σεισμική κίνηση μπορεί να ενεργοποιήσει μια σχετική κίνηση στις πλευρές του ρήγματος. Στο πρώτο σενάριο, κατά μήκος του ρήγματος, μια ενέργεια έχει

σωρευθεί, ικανή να ενεργοποιήσει την κίνηση. Τα αναμενόμενα αποτελέσματα είναι πιο σημαντικά, αλλά το γεγονός είναι ότι σχετίζεται με χαμηλότερη πιθανότητα εμφάνισης, επειδή ακόμη και αν εμφανιστεί το σεισμικό συμβάν, το επίκεντρο πρέπει να αντιστοιχεί ακριβώς στη διέλευση. Η κίνηση αυτού του ρήγματος είναι προέλευση του σεισμού.

Στο δεύτερο σενάριο, κατά μήκος του ρήγματος η σωρευμένη ενέργεια δεν είναι αρκετή για να ενεργοποιήσει τη σεισμική κίνηση, και η σχετική κίνηση κατά μήκος του ρήγματος προκαλεί κίνηση. Η πιθανότητα αυτού του γεγονότος είναι σε μια δίκαιη προσέγγιση που συνδέεται με την πιθανότητα της κίνησης του σεισμού, δηλαδή 2 ‰ το χρόνο (Roberto Guidotti και Alberto Castellani, 2018).



**Σχήμα 2.16: (αριστερά) Εντοπισμός ίχνους βλαβών που αφορούν τη σήραγγα του αυτοκινητόδρομου Gran Sasso, που καταγράφηκε κατά την κατασκευή. (δεξιά) ίχνος βλαβών στο κατακόρυφο επίπεδο, κοντά στην είσοδο της σήραγγας**

Εκτός από τον σεισμό L'Aquila (2009), σε αυτό το κομμάτι αναφέρεται σε παρατηρήσεις της απόκρισης των υπόγειων θαλάμων υπό σεισμική διέγερση που αναφέρεται στη βιβλιογραφία σχετικά με το (1) ο σεισμός Chi-Chi, Ταϊβάν (1999) και (2) ο Κόμπε σεισμός (2004).



Οι κοινές παρατηρήσεις είναι οι εξής:

- Όσον αφορά τις κατασκευές στην επιφάνεια, ή σε ρηχό βάθος, υπόγειες βαθιές κατασκευές υποβάλλονται σε δυναμικά κύματα που δονούνται σταθερά με το περιβάλλον τους.
- Οι ρηχές στοές υποφέρουν περισσότερο από τις βαθιές στοές, με το 60% των παρατηρούμενων ζημιών να αναφέρεται σε στοές βάθους κάτω των 50 m.
- Στοές με ορθογώνια διατομή (κατασκευές κοπής και κάλυψης) είναι πιο ευάλωτες από τις βαθιές κυκλικές σήραγγες.
- Το περιβάλλον έδαφος έχει τη μεγαλύτερη σημασία. Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω μεταξύ 192 παρατηρήσεων, το 79% των σηράγγων που έχουν εκσκαφθεί σε παραμορφώσιμο έδαφος έχουν υποστεί ζημιές ενώ αυτές που έχουν διανοιχθεί σε βράχο είχε ως αποτέλεσμα χαμηλότερες ζημιές (Roberto Guidotti και Alberto Castellani, 2018).

## 2.8. Η γενική μεθοδολογία της σεισμικής ανάλυσης από την σκοπιά του μηχανικού.

Οι σεισμικές δράσεις στις υπόγειες κατασκευές μπορούν να ομαδοποιηθούν σε δύο κατηγορίες:

- 1) Καταπόνηση προκαλούμενη από την εδαφική δόνηση
- 2) Καταπονήσεις προκαλούμενες λόγω εδαφικών μετακινήσεων, όπως ρευστοποίηση, διάρρηξη ρήγματος, και αστάθεια πρηνούς.

Η σεισμική καταπόνηση λόγω της εδαφικής δόνησης αναφέρεται στην παραμόρφωση του εδάφους λόγω της διάδοσης των κυμάτων. Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την σεισμική καταπόνηση λόγω των εδαφικών δονήσεων περιλαμβάνουν:

- α) το σχήμα, τις διαστάσεις και το βάθος της κατασκευής
- β) τις ιδιότητες-δυσκαμψία του περιβάλλοντος εδάφους ή βράχου
- γ) τις ιδιότητες-δυσκαμψία της κατασκευής
- δ) την ένταση της εδαφικής δόνησης

Ο σεισμικός σχεδιασμός των υπόγειων κατασκευών αποτελεί πρόκληση για πολλούς λόγους. Για τις υπόγειες κατασκευές η αδράνεια του περιβάλλοντος εδάφους είναι μεγάλη σε σχέση με την αδράνεια της κατασκευής. Μετρήσεις που έγιναν από τους Okamoto et al. (1973) για την σεισμική συμπεριφορά μιας σήραγγας σε πλήθος σεισμών, έδειξαν ότι η σεισμική απόκριση εξαρτάται κυρίως από την απόκριση του περιβάλλοντος εδάφους και ελάχιστα από τις ιδιότητες της ίδιας της κατασκευής. Για τον λόγο αυτό ο σεισμικός σχεδιασμός συνήθως επικεντρώνεται στην παραμόρφωση του ελεύθερου πεδίου και την αλληλεπίδραση του με την σήραγγα (Αμαλία Γιαννακού, 2003).

Συνήθως, η απόκριση μιας σήραγγας προσομοιώνεται ως ελαστικής δοκού υποβαλλόμενης σε παραμορφώσεις από το περιβάλλον έδαφος. Δύο τύποι

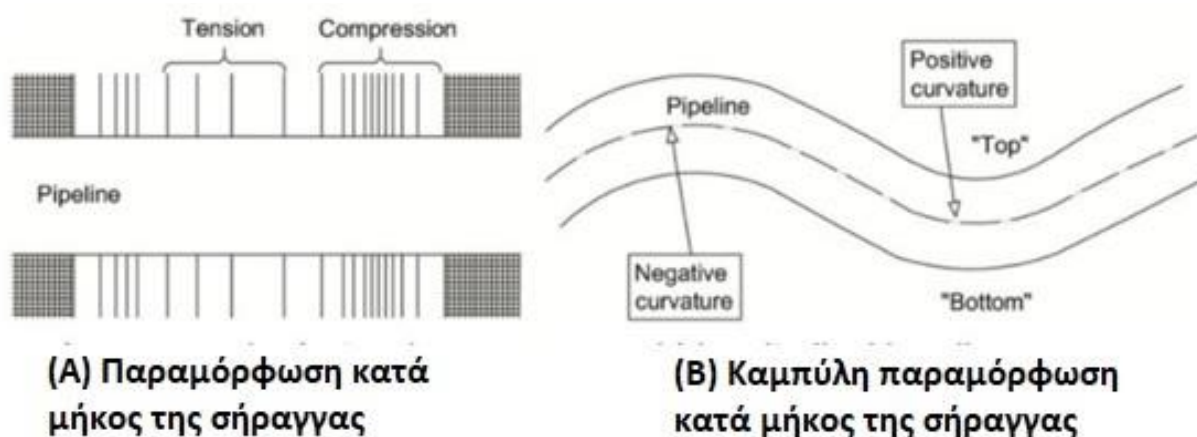
παραμορφώσεων εκφράζουν την απόκριση των υπόγειων κατασκευών σε σεισμικές κινήσεις:

α) κατά το διαμήκη άξονα της σήραγγας: αξονική συμπίεση και επιμήκυνση και διαμήκης κάμψη (σχήμα 2.17)

β) κατά την εγκάρσια έννοια: καμπτική παραμόρφωση της διατομής της σήραγγας (σχήμα 2.18)

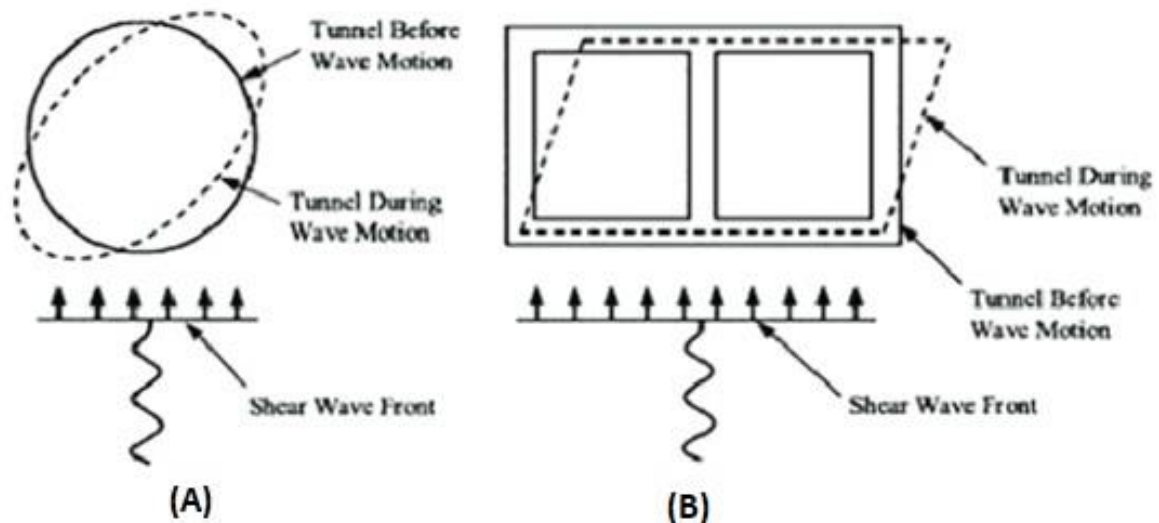
Η τελευταία διακρίνεται σε ωσειδή παραμόρφωση των κυκλικών διατομών (ovaling) και στρέβλωση των ορθογωνικών διατομών (racking)

Οι αξονικές παραμορφώσεις προκαλούνται από τις συνιστώσες των σεισμικών κυμάτων που παράγουν κινήσεις παράλληλες στον άξονα της σήραγγας και προκαλούν εναλλασσόμενη σύνθλιψη και επιμήκυνση. Οι δε καμπτικές παραμορφώσεις προκαλούνται από τις συνιστώσες των σεισμικών κυμάτων που παράγουν κινήσεις κάθετα στον διαμήκη άξονα. Κατά τον σχεδιασμό, η εξέταση των αξονικών και καμπτικών παραμορφώσεων γίνεται κατά την διεύθυνση του άξονα της σήραγγας.



Σχήμα 2.17: Παραμορφώσεις κατά το διαμήκη άξονα της σήραγγας ( OwenandScholl, 1981)

Οι παραμορφώσεις της διατομής της σήραγγας δημιουργούνται όταν διατμητικά κύματα διαδίδονται κάθετα ή σχεδόν κάθετα στον άξονα της σήραγγας, έχοντας ως αποτέλεσμα την παραμόρφωση της σύνδεσης. Στον σχεδιασμό η εξέταση αυτού του τύπου παραμόρφωσης γίνεται κατά την εγκάρσια έννοια (Γιαννακού 2003).



**Σχήμα 2.18: (A) Ωσειδής παραμόρφωση κυκλικής διατομής, (B) Στρέβλωση ορθογωνικής διατομής**

Συνήθως, η συμπεριφορά της επένδυσης προσομοιώνεται με μια πλήρως εγκιβωτισμένη κατασκευή η οποία υπόκειται σε εδαφικές παραμορφώσεις υπό συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης (plainstrain). Η πρόσπτωση κυμάτων υπό γωνία επιβάλλει διαφορικές μετατοπίσεις στα μέρη της κατασκευής. Γενικά, τα μεγαλύτερα εύρη μετατοπίσεων είναι συνδυσασμένα με μεγαλύτερα μήκη κύματος ενώ οι μέγιστες καμπυλότητες προκαλούνται από μικρότερα μήκη κύματος και για σχετικά μικρά εύρη μετατόπισης (Γιαννακού, 2003).

Για τους παραπάνω λόγους η αξιολόγηση της σεισμικής απόκρισης των υπόγειων κατασκευών απαιτεί τον καθορισμό της αναμενόμενης εδαφικής δόνησης και την εκτίμηση της απόκρισης του εδάφους και της κατασκευής στη δόνηση αυτή. Η προσέγγιση της σεισμικής συμπεριφοράς απαιτεί τα εξής βήματα:

1. Καθορισμός του σεισμικού – γεωτεκτονικού περιβάλλοντος και ανάλυση των σεισμικών παραμέτρων σχεδιασμού (μέγιστη επιτάχυνση, συχνότητες).
2. Εκτίμηση της απόκρισης του εδάφους στις δονήσεις σχεδιασμού.
3. Αξιολόγηση της απόκρισης της κατασκευής στη σεισμική δόνηση με βάση συγκεκριμένα κριτήρια σχεδιασμού (Γιαννακού 2003).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup> : ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΚΑΙ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΤΟΥΣ ΣΕ ΣΕΙΣΜΟ

---

Στα προηγούμενα αναλύθηκαν διεξοδικά οι περιπτώσεις αστοχιών σηράγγων σε σεισμό σε συσχέτιση με την επιτάχυνση στην επιφάνεια του εδάφους. Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται το υπολογιστικό πρόγραμμα RS2, που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία με σκοπό την μελέτη και την προσομοίωση – σχεδιασμού σηράγγων σε σεισμό. Επιπλέον, αναλύονται βήμα προς βήμα οι ενέργειες για την δημιουργία των αριθμητικών μοντέλων που κατασκευάστηκαν για τις προσομοιώσεις της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

### 3.1 Υπολογιστικό πρόγραμμα RS2 2020

Το υπολογιστικό πρόγραμμα RS2 είναι ένας δισδιάστατος κώδικας πεπερασμένων στοιχείων για τον υπολογισμό των τάσεων και των μετατοπίσεων γύρω από υπόγειες ή επιφανειακές εκσκαφές. Ο κώδικας RS2 είναι ιδιαίτερα διαδεδομένος στη γεωτεχνική και μεταλλευτική κοινότητα και χρησιμοποιείται τόσο για εκπαιδευτικούς και ερευνητικούς σκοπούς από μεγάλο αριθμό πανεπιστημίων ανά τον κόσμο, όσο και από μελετητικές εταιρείες και εταιρείες συμβούλων για τον σχεδιασμό επιφανειακών εκσκαφών, ορυχείων, υπόγειων μεταλλείων, σηράγγων, κ.α.

Ζητήματα τα οποία θα μπορούσαν να επιλυθούν μέσω του προγράμματος αυτού περιλαμβάνουν τα εξής:

- Προβλήματα επίπεδης παραμόρφωσης
- Ελαστική ή πλαστική συμπεριφορά υλικών
- Διάνοιξη εκσκαφής σε φάσεις
- Υλικά με διαφορετικές ιδιότητες στη διατομή της ανάλυσης
- Επίδραση στοιχείων υποστήριξης (π.χ. αγκύρια, εκτοξευμένο σκυρόδεμα κ.τ.λ.)
- Σταθερές τάσεις πεδίου ή μεταβαλλόμενες καθ' ύψος της διατομής λόγω βαρύτητας
- Προβλήματα παρουσίας ασυνεχειών στη γεωμάζα
- Προβλήματα παρουσίας υπόγειου νερού (με δυνατότητα ανάλυσης της πίεσης πόρων).
- Συμπεριφορά σήραγγας μετά από σεισμό
- Μετατοπίσεις σε όλα τα πεδία πριν και μετά από έναν σεισμό

#### Ιστορικά στοιχεία

**1992:** Αρχική έκδοση του προγράμματος Phases, που αναπτύχθηκε από την Rock Engineering Group στο Πανεπιστήμιο του Τορόντο. Το Phases ήταν ένα υβριδικό πρόγραμμα οριακών στοιχείων - πεπερασμένων στοιχείων για την προσομοίωση υπόγειων εκσκαφών σε βραχώμαζες. Το Phases είναι ένα αρκτικόλεξο για το «Plastic Hybrid Analysis of Stress for Estimation of Support». Η ανάπτυξη των εκδόσεων 1 και 2 συνεχίστηκε μεταξύ 1992 και 1996 (Introduction RS2).

**1996:** Η Rocscience αγόρασε τα δικαιώματα για το Phases από το Πανεπιστήμιο του Τορόντο και ανέπτυξε μια νέα έκδοση του λογισμικού και άλλαξε το όνομα σε Phase2. Η έκδοση 3 κυκλοφόρησε το 1997. Το πρόγραμμα είχε έναν εντελώς νέο αλγόριθμο πεπερασμένων στοιχείων (χωρίς την υποστήριξη οριακών στοιχείων). Αυτός ο αλγόριθμος πεπερασμένων στοιχείων αποτέλεσε τη βάση για νεότερες εκδόσεις του Phase2. Προστέθηκαν νέα μοντέλα υποστήριξης και βελτιώσεις διεπαφών. Το πρόγραμμα ήταν ακόμα σχεδιασμένο για εκσκαφές σε βραχώδη γεωυλικά, αλλά τώρα είχε καλύτερη υποστήριξη για επιφανειακές εκσκαφές (π.χ. εξόρυξη ανοιχτού ορύγματος). Η έκδοση 3 λειτουργούσε ακόμα σε περιβάλλον DOS (Introduction RS2).

**1998-1999:** Πραγματοποιήθηκε πλήρης επανεγγραφή της διεπαφής χρήστη για τη μετακίνηση του προγράμματος σε μια πλατφόρμα που βασίζεται στα Windows 95 (Win32). Το 1999, κυκλοφόρησε το Phase2 v4 για Windows (Introduction RS2).

**2001:** Κυκλοφόρησε η έκδοση v5. Μια πλήρης ενημέρωση στο περιβάλλον εργασίας χρήστη, προσθήκη πίεσης πόρων και ενεργών τάσεων για τον υπολογισμό της αστοχίας, νέα μοντέλα υποστήριξης, μεταβολή των ιδιοτήτων των υλικών σε στάδια, κ.λπ. Προοριζόταν να ξεκινήσει την ώθηση προς ένα γενικό εργαλείο γεωτεχνικής μοντελοποίησης τόσο για πετρώματα όσο και για εδάφη (Introduction RS2).

**2014 RS2 (Phase 2 v9.0):** Κυκλοφόρησε το RS2, το όνομα του οποίου είναι ένα αρκτικόλεξο για το "Rock and Soil 2-Dimensional". Η υπολογιστική βάση έχει αναβαθμιστεί πλήρως ώστε να περιλαμβάνει πλήρως συζευγμένη επίλυση κατά τη θεωρία Biot (Biot Theory, υδρομηχανική σύζευξη για ενοποιημένη ανάλυση), δυνατότητες δυναμικής ανάλυσης, παροδική ανάλυση ροής υπόγειων υδάτων και πολλά άλλα. Το RS2 αποτελεί ένα εργαλείο γενικού σκοπού γεωτεχνικής μοντελοποίησης ικανό να αναλύει τόσο δομές εδάφους όσο και βράχου (Introduction RS2).

### **Προετοιμασία του μοντέλου**

Η προετοιμασία του μοντέλου στο πρόγραμμα RS2 πραγματοποιείται με γραφική εισαγωγή της γεωμετρίας του και με εισαγωγή των παραμέτρων σε αντίστοιχες φόρμες εισαγωγής. Η γραφική εισαγωγή της γεωμετρίας γίνεται σε αυτόνομο περιβάλλον μορφής CAD. Η δημιουργία του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων γίνεται αυτόματα μέσω ενσωματωμένης γεννήτριας, ικανής να χειριστεί πολύπλοκες και σύνθετες εκσκαφές. Τα στοιχεία του πλέγματος μπορεί να είναι τριγωνικά τριών ή έξι κόμβων ή τετραπλευρικά τεσσάρων ή οκτώ κόμβων. Για την αρχική φόρτιση των πεπερασμένων στοιχείων του μοντέλου λαμβάνονται υπόψη είτε το ίδιο βάρος των στοιχείων είτε οι αρχικές τάσεις της γεωμάζας είτε και τα δύο ταυτόχρονα.

### **Στάδια εκσκαφής- υποστήριξης**

Τα στάδια εκσκαφής και υποστήριξης προσομοιώνονται μέσω σταδίων προσομοίωσης όπου είναι δυνατή η αφαίρεση στοιχείων της γεώμαζας, η αλλαγή των ιδιοτήτων τους, και της αρχικής τους φόρτισης, η προσθήκη ή αφαίρεση των στοιχείων της υποστήριξης και η αλλαγή των ιδιοτήτων τους. Επίσης είναι δυνατή η προσθήκη ή αφαίρεση εξωτερικής φόρτισης σε κάθε στάδιο προσομοίωσης.

### Ιδιότητες υλικών γεωμάζας

Τα στοιχεία που προσομοιώνουν το υλικό της γεωμάζας μπορεί να έχουν ελαστική ή πλαστική συμπεριφορά. Το υλικό μπορεί να είναι ισότροπο, εγκάρσιως ισότροπο ή ορθότροπο.

Προκειμένου να αναλυθεί η πλαστική συμπεριφορά υλικών διατίθενται διάφορα κριτήρια αστοχίας. Πιο σχετικά με τη συμπεριφορά της βραχώμαζας είναι τα κριτήρια Mohr-Coulomb, Hoek-Brown και Drucker-Prager. Υπάρχει η δυνατότητα προσομοίωσης δύο ειδών πλαστικής συμπεριφοράς:

- Ελαστικά – τελείως πλαστικά υλικά: οι παραμένουσες παράμετροι αντοχής ισούνται με τις αρχικές.
- Ψαθυρά υλικά: οι παραμένουσες παράμετροι αντοχής είναι μικρότερες των αρχικών.

Οι ιδιότητες των υλικών της γεωμάζας μπορούν να διαφοροποιούνται μεταξύ των διαδοχικών σταδίων της προσομοίωσης.

## 3.2 Μοντέλο Mohr – Coulomb

Το μοντέλο Mohr – Coulomb είναι το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε αρχικά κατά τη διαδικασία της προσομοίωσης μέσω του προγράμματος RS2. Αποτελεί ένα μοντέλο αστοχίας κατά το οποίο η συμπεριφορά του εδάφους θεωρείται γραμμική ελαστική – πλαστική (tutorials RS2).

Το μοντέλο Mohr - Coulomb είναι το συνηθέστερα χρησιμοποιούμενο μοντέλο αστοχίας των γεωυλικών και ειδικότερα των εδαφών (π.χ., Owen and Hinton, 1980, Pietruszczak, 2010). Οι προδιαγραφές αυτού του μοντέλου και του κριτηρίου διαρροής του, περιλαμβάνουν την υπόθεση Coulomb, η οποία υποθέτει μια γραμμική σχέση μεταξύ της διατμητικής αντοχής σε ένα επίπεδο και της ορθής (κάθετης) τάσης που ενεργεί επ' αυτής:

$$\tau = c - \sigma_n \tan\phi \quad (3.1.)$$

όπου  $\tau$  είναι η διατμητική αντοχή,  $\sigma_n$  είναι η ορθή τάση (θετική τάση),  $\phi$  είναι η γωνία εσωτερικής τριβής και  $c$  είναι η συνοχή. (tutorials RS2)

Η μηχανική συμπεριφορά ενός υλικού που διαμορφώνεται με μοντέλο Mohr – Coulomb περιλαμβάνει χαρακτηριστικά όπως:

- Ισοτροπική αντοχή σε διάτμηση (κορυφαία και παραμένουσα) που έχει χαρακτηριστική συνοχή-τριβή και αυξάνεται γραμμικά με το επίπεδο καταπόνησης/περιορισμού)
- Αντοχή σε εφελκυσμό (με τη χρήση αποκοπής)
- Διαστολή (αύξηση όγκου) ή κρίσιμη κατάσταση (σταθερός όγκος) κατά την αστοχία
- Εξάρτηση της διατμητικής αντοχής από τη γωνία Lode (παρατηρήθηκε για τα περισσότερα γεωυλικά) (tutorials RS2 2019).

Το μοντέλο είναι κατάλληλο για τη μελέτη γεωτεχνικών προβλημάτων που δεν περιλαμβάνουν ευρεία μεταβολή της πλευρικής πίεσης. Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο μείωσης της διατμητικής αντοχής (SSR), αυτό το μοντέλο μπορεί να αξιολογήσει

συντελεστές ασφαλείας ισοδύναμους με αυτούς που υπολογίζονται με βάση την ανάλυση οριακής ισορροπίας (π.χ. με το πρόγραμμα Slide προκειμένου για την μελέτη ευστάθειας πρανών) και σε ορισμένες περιπτώσεις παρέχουν καλύτερη πρόβλεψη των τρόπων αστοχίας και των συντελεστών ασφάλειας. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί με επιτυχία για υπολογισμούς μετατόπισης και τάσης σε προσομοιώσεις που περιλαμβάνουν βραχώδη ή εδαφικά γεωυλικά (tutorials RS2 2019).

Συνδυάζοντας το κριτήριο Coulomb με τον κύκλο του Mohr για την αναπαράσταση της εντατικής κατάστασης και λαμβάνοντας υπόψη τις αποδεκτές εντατικές καταστάσεις, το κριτήριο αστοχίας Mohr - Coulomb όσον αφορά τις κύριες τάσεις μπορεί να εκφραστεί ως:

$$F_s = 1/2 (\sigma_1 - \sigma_3) + 1/2 (\sigma_1 + \sigma_3) \sin\phi - c \cos\phi = 0 \quad (3.2.)$$

Ως προς τις αναλλοίωτες της τάσης, το κριτήριο Mohr - Coulomb διατυπώνεται ως:

$$F_s = I_1/3 \sin(\phi) + \sqrt{J_2} [\cos(\theta) - 1/\sqrt{3} \sin(\theta) \sin(\phi)] - c \cos(\phi) = 0 \quad (3.3.)$$

Ή σε άλλους όρους αναλλοίωτων της τάσης:

$$F_s = q + M_p - N_c = 0 \quad (3.4)$$

Όπου:

$$M = 3 \sin\phi / (\sqrt{3} \cos\theta - \sin\theta \sin\phi)$$

$$N = 3 \cos\phi / (\sqrt{3} \cos\theta - \sin\theta \sin\phi) \quad (3.5)$$

Το RS2 δέχεται κορυφαίες και παραμένουσες τιμές της γωνίας τριβής και της συνοχής. Αυτό σημαίνει ότι μετά την διαρροή η αντοχή του υλικού πέφτει αμέσως από την κατάσταση κορυφαίας αντοχής σε μια χαμηλότερη παραμένουσα τιμή. Το μοντέλο Mohr - Coulomb στο RS2 είναι ένα μοντέλο ελαστικό - ψαθυρό ή πλαστικό γενικά. Στην περίπτωση όπου οι παραμένουσες τιμές είναι οι ίδιες με τις μέγιστες τιμές, η συμπεριφορά είναι ελαστική - τέλεια πλαστική (tutorials RS2 2019).

$$Q_s = I_1/3 \sin(\psi) + \sqrt{J_2} [\cos(\theta) - 1/\sqrt{3} \sin(\theta) \sin(\psi)] = \text{const} \quad (3.6.)$$

όπου  $\psi$  είναι η γωνία διαστολής. Αυτή η παράμετρος θα πρέπει να είναι μικρότερη ή ίση με τη γωνία τριβής (παραμένουσα) η οποία καθιστά το νόμο ροής συσχετισμένο ή μη (tutorials RS2 2019).

### 3.2.1 Αναλυτικός σχεδιασμός μοντέλου προσομοίωσης

Για αρχή, αμέσως μετά το άνοιγμα του προγράμματος RS2 στον υπολογιστή, επιλέγεται η δημιουργία ενός νέου μοντέλου, πραγματοποιούνται κάποιες συγκεκριμένες ενέργειες οι οποίες περιγράφονται αναλυτικά παρακάτω. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, μετά την δημιουργία και την επεξεργασία των μοντέλων μας, θα ελεγχθούν οι μετατοπίσεις γύρω από την σήραγγα, αλλά και οι αξονικές δυνάμεις και οι ροπές κάμψης

στην επένδυσή της που έχουν συμβεί πριν και μετά την επιβολή της σεισμικής φόρτισης. Τέλος, με χρονικά σημεία τα οποία θα τοποθετηθούν γύρω από την σήραγγα αλλά και σε διαφορετικά μέρη θα καταγραφούν όλα τα δυναμικά χρονικά βήματα.

### 3.2.1.1 Ρυθμίσεις Μοντέλου –Project Settings

Το 1<sup>ο</sup> βήμα για δημιουργία ενός μοντέλου είναι ο ορισμός των σταδίων του μοντέλου στον πίνακα (μενού) των Ρυθμίσεων στο υπολογιστικό περιβάλλον, αφού ο ορισμός αυτός αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την σωστή δημιουργία του μοντέλου.

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία θα χρησιμοποιηθούν τρία διαφορετικά μοντέλα.

- 1) Εσκαφή αβαθούς Σήραγγας με δυναμική ανάλυση (4 Στάδια)
- 2) Εσκαφή αβαθούς σήραγγας με ψευδοστατική σεισμική φόρτιση (4 Στάδια)
- 3) Εσκαφή αβαθούς σήραγγας με πολυσταδιακή δυναμική ανάλυση (>4 Στάδια)

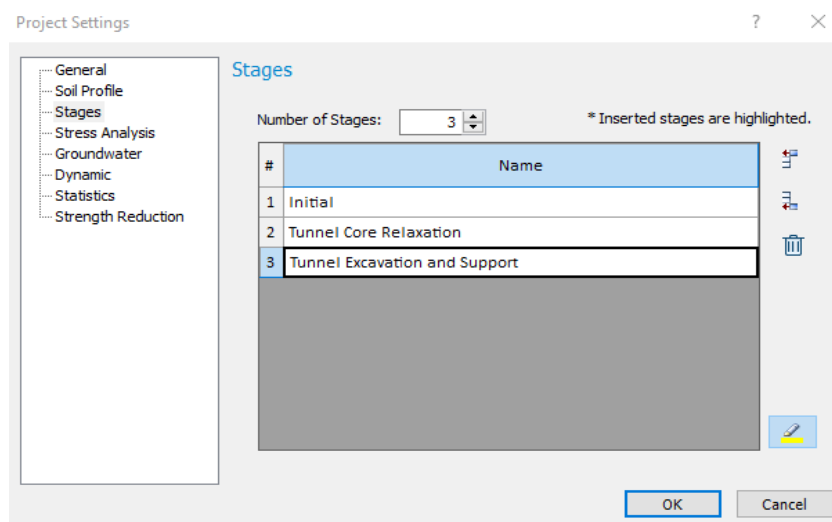
Στην συγκεκριμένη εργασία δημιουργούνται μοντέλα όπου καθένα από τα οποία περιλαμβάνει 4 ή και περισσότερα στάδια.

Για τα μοντέλα αβαθούς σήραγγας μας ενδιαφέρουν όλα τα παρακάτω.

Επιλέγεται: **Analysis → Project Settings → Stages**

Για αρχή έχω τα εξής 3 στάδια:

- 1) Initial
- 2) Tunnel Core Relaxation
- 3) Tunnel Excavation and Support

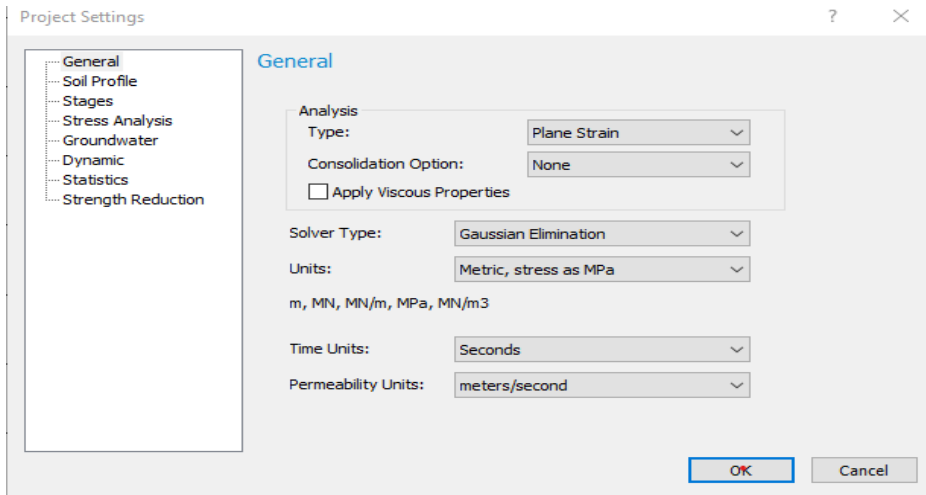


**Σχήμα 3.1: Επιλογή σταδίων στο πρόγραμμα**

Επίσης είναι απαραίτητο πριν την κατασκευή του μοντέλου να εισαχθούν κάποια γενικά στοιχεία για αυτό. Έτσι είναι αναγκαίο να έχει οριστεί το MPa (Metric Stress) στις επιλογές της μονάδας, καθώς αυτό καθορίζει τις μονάδες μήκους, αντοχής, βάρους που θα χρησιμοποιηθούν κατά την διάρκεια της προσομοίωσης.



Επιλέγεται: **Analysis → Project Settings → General**



Σχήμα 3.2: Επιλογή Μονάδας Αντοχής – Metric, StressasMPa

### 3.2.1.2 Δημιουργία εξωτερικών ορίων μοντέλου (Boundaries)

1. Προσθήκη Εξωτερικού Ορίου: Με τον τρόπο αυτόν ορίζεται η γεωμετρία του μοντέλου. Δίνονται, λοιπόν, συντεταγμένες (X,Y) στο πρόγραμμα. Σε αυτά τα προκαθορισμένα όρια θα εισαχθούν τα γεωλικά που περιβάλλουν τη σήραγγα.

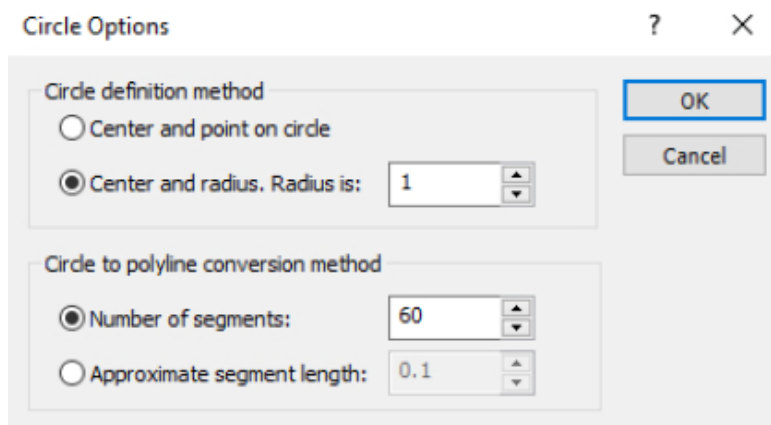
Επιλέγεται: **Boundaries→AddExternal**

Τοποθετούνται οι συντεταγμένες (coordinates) με βάση τα διαθέσιμα στοιχεία. Έτσι, ενδιαφέρον παρουσιάζουν το βάθος από την επιφάνεια, h, και η διάμετρος της σήραγγας, d, και με βάση αυτά προκύπτει ότι:

- Αριστερό όριο →  $-4 \times d$
- Δεξιό όριο →  $4 \times d$
- Επάνω όριο →  $h + 0.5 \times d$
- Κάτω όριο →  $-2 \times h + 0.5 \times d$

Με (0.0) για κέντρο της σήραγγας

Επιλέγεται: **Boundaries→ Add excavation**



Σχήμα 3.3: Δημιουργία κυκλικής σήραγγας

### 3.2.1.3 Ιδιότητες των Υλικών

Επιλέγω: **Properties**→ **DefineMaterials**

Είναι απαραίτητος ο καθορισμός των ιδιοτήτων των υλικών της γεωμάζας γύρω από τη σήραγγα που πρόκειται να μοντελοποιήσουμε. Κάθε φορά ανάλογα με τα στοιχεία που δίνονται, τοποθετούμε τιμές σε συγκεκριμένες ιδιότητες. Αυτά που βρίσκονται στο επίκεντρο της προσοχής είναι τα εξής:

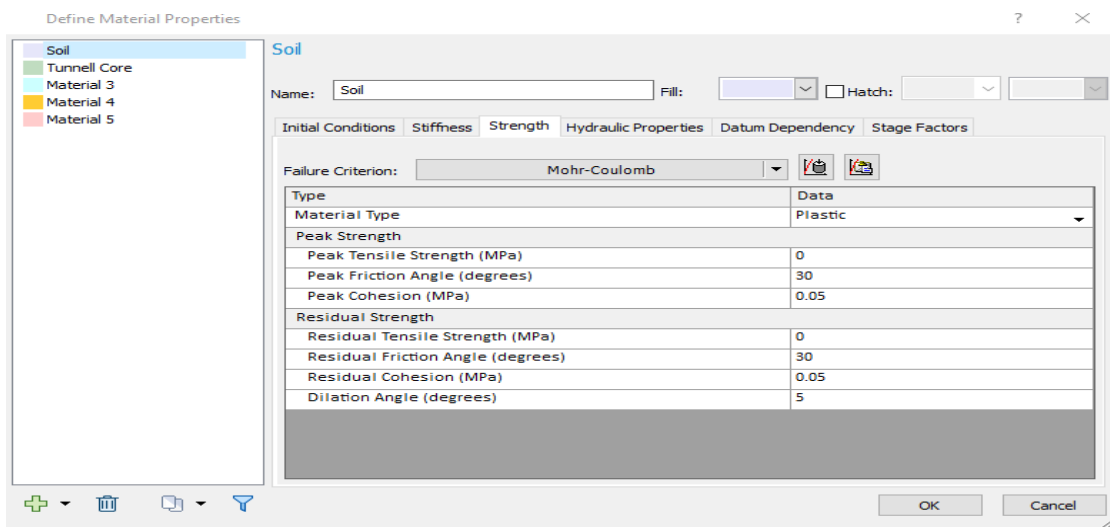
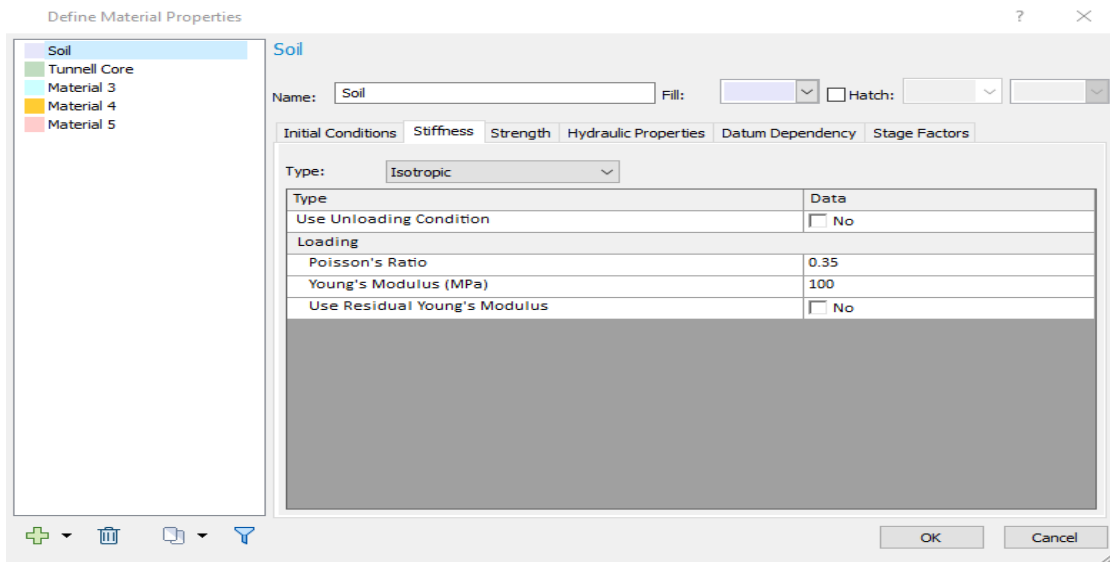
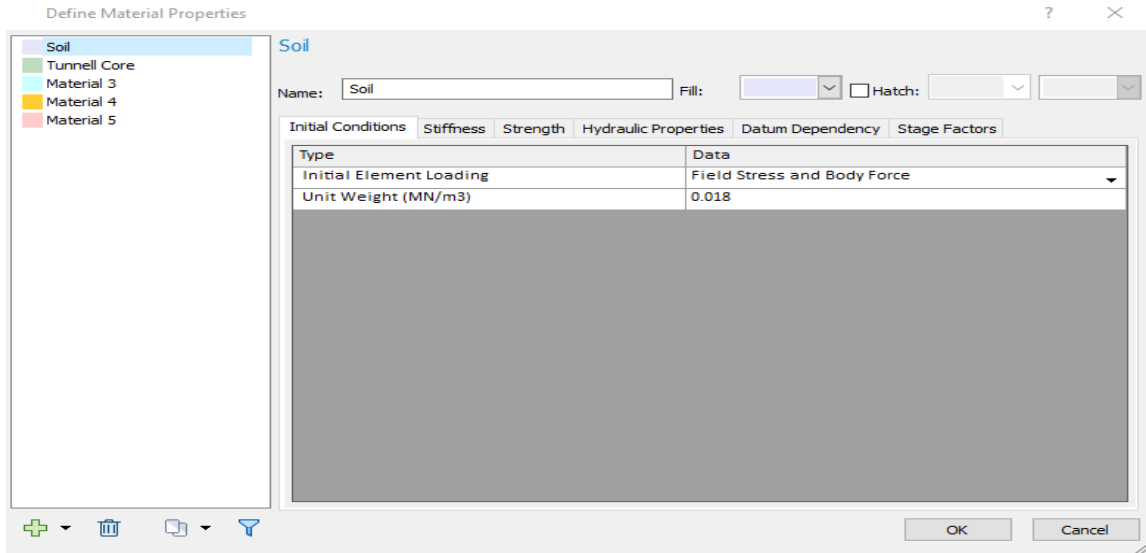
- **Poisson's Ratio** →  $\nu$  , **Λόγος Poisson**
- **Young's Modulus** →  $E_{soil}$ , **Το μέτρο του Young για το έδαφος**
- **Material Type**→ **Plastic or Elastic**, **Τύπος Υλικού**
- **Peak Friction Angle** →  $\Phi_{soil}$ , **Μέγιστη γωνία τριβής**
- **Peak Cohesion**→  $C_{soil}$ , **Μέγιστη συνοχή**
- **Dilation Angle**→  $5^\circ$ , **Γωνία Διαστολής**

**Κάποιες βασικές επισημάνσεις:**

Το μοναδιαίο βάρος (unit weight) του υλικού είναι το ίδιο με το μοναδιαίο βάρος φόρτισης που έχει εισαχθεί στο διάλογο Field Stress.

Για τάση πεδίου βαρύτητας, η προεπιλεγμένη ρύθμιση για «Αρχική φόρτιση στοιχείου» (στο παράθυρο διαλόγου Ορισμός ιδιοτήτων υλικού) είναι «Εντατικό πεδίο και δύναμη σώματος». Επειδή το μοντέλο αντιπροσωπεύει μια υπόγεια εκσκαφή κοντά στην επιφάνεια και ένα πεδίο βαρυτικής τάσης, οι δυνάμεις σώματος (body forces, αλλιώς «μαζικές δυνάμεις») για τη φόρτιση σε κάθε στοιχείο του μοντέλου είναι σημαντικές. Για ένα σταθερό πεδίο πίεσης, η αντίστοιχη επιλογή συνήθως είναι "Field Stress Only" (Tutorial RS2).

Δεδομένου ότι οι ιδιότητες ορίστηκαν με το πρώτο υλικό που επιλέχθηκε, δεν χρειάζεται να αντιστοιχιστούν στο μοντέλο. Από προεπιλογή, το RS2 εκχωρεί αυτόματα τις ιδιότητες του πρώτου υλικού σε όλα τα πεπερασμένα στοιχεία. Ωστόσο, για τα υλικά που αφορούν στο εσωτερικό της σήραγγας πρέπει να εκχωρηθούν διαφορετικές ιδιότητες που θα περιγραφούν στη συνέχεια. Για τις αβαθείς σήραγγες και τους πρώτους δύο τύπους μοντέλων αυτά που μας ενδιαφέρουν φαίνονται στις παρακάτω εικόνες (με ενδεικτικά νούμερα).



**Σχήμα 3.4: Εισαγωγή ιδιοτήτων των υλικών για τις προσομοιώσεις σε αβαθείς σήραγγες (Τα νούμερα είναι ενδεικτικά)**

Συγκεκριμένα, για τα μοντέλα αβαθούς σήραγγας προκύπτουν οι εξής επιλογές:

- Initial Element Loading→ Field Stress And Body Force
- Field Stress Type→ Gravity
- Type of Stiffness → Isotropic
- Strength→ Plastic

Αντίστοιχα, για ένα μοντέλο με βαθιά σήραγγα, θα έπρεπε να γίνουν οι παρακάτω επιλογές:

- Initial Element Loading→ Field Stress Only
- Field Stress Type → Constant

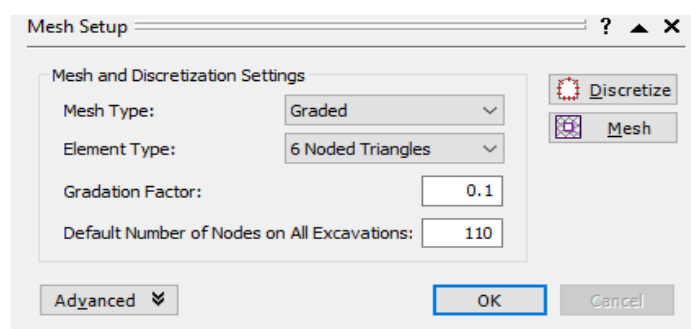


Σχήμα 3.5: Ιδιότητες εντατικού πεδίου για βαθιά σήραγγα

### 3.2.1.4 Εγκατάσταση Πλέγματος

Επιλέγω: **Mesh→MeshSetup**

- Στο πρόγραμμα μας επιλέγεται αυτόματα η διακριτοποίηση στο εξωτερικό όριο, ανάλογα με την απόσταση από τα όρια εσκαφής. Η διακριτοποίηση στην επιφάνεια του εδάφους είναι πιο λεπτομερείς κοντά στο πάνω μέρος του μοντέλου και μεταβαίνει σταδιακά σε πιο αδρομερή προς τα αριστερά και δεξιά άκρα του μοντέλου. Η διακριτοποίηση κατά μήκος των αριστερών, δεξιών και κάτω άκρων του εξωτερικού ορίου, είναι πολύ πιο χονδροειδές απ'ότι κατά μήκος του άνω άκρου κοντά στις επαφές (TutorialsRS<sub>2</sub> 2019).



Σχήμα 3.6: Εγκατάσταση πλέγματος

### 3.2.1.5 Προσδιορισμός Οριακών Συνθηκών

Οι επιλογές στο μενού Displacements στο πρόγραμμα RS2 Model, χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν:

- τις οριακές συνθήκες μετατόπισης (περιορισμοί) για το μοντέλο
- άλλες επιλογές ανάλυσης που σχετίζονται με τον εκτοπισμό

Δεδομένου ότι τα πρώτα δύο από τα μοντέλα τα οποία πρόκειται να δημιουργήσουμε είναι μοντέλα εκσκαφής (Excavation Model) σε αβαθή σήραγγα, πρέπει να προσδιοριστεί ότι η επιφάνεια του εδάφους είναι ελεύθερη επιφάνεια.

Άρα για το πάνω μέρος επιλέγεται: **Displacements→Free** και επιλέγεται η πάνω επιφάνεια.

Τα τριγωνικά σύμβολα των στηρίξεων πρέπει τώρα να απομακρυνθούν από την επιφάνεια του εδάφους, υποδεικνύοντας ότι είναι ελεύθερη να κινείται χωρίς συγκράτηση.

Στη συνέχεια πραγματοποιείται με τον ίδιο τρόπο ο προσδιορισμός των οριακών συνθηκών σε όλες τις πλευρές. Καθορίζεται η αριστερή και η δεξιά άκρη του εξωτερικού ορίου όπως μόνο στην κατεύθυνση X (δηλαδή ελεύθερη κίνηση στην κατεύθυνση Y) και το κάτω άκρο όπως περιορίζεται στην κατεύθυνση XY (Tutorial 2019 RS2).

Έτσι ακολουθούνται οι εξής εντολές:

- **Displacement→Restrain X για την δεξιά και αριστερή πλευρά**
- **Displacement→Restrain XY για την κάτω πλευρά**

#### **Displacement→Restrain X**

Η στήριξη αυτή ονομάζεται κύλιση. Στο συμβολισμό των στηρίξεων με τρίγωνα, που υιοθετεί ο κώδικας RS2), το σημείο στήριξης (δηλαδή το σημείο στο οποίο στηρίζεται ο υπερκείμενος φορέας) είναι η άνω κορυφή του τριγώνου. Η κύλιση δεσμεύει μόνο τον μετακινησιακό βαθμό ελευθερίας που ορίζεται κάθετα προς την έδρασή της. Συνεπώς, αφήνει ελεύθερο τον μετακινησιακό βαθμό ελευθερίας παράλληλα προς την έδραση, καθώς και την περιστροφή. Πλήρης δέσμευση ενός βαθμού ελευθερίας σημαίνει ότι η αντίστοιχη μετακίνηση ή στροφή είναι ακριβώς μηδέν. Για να επιτευχθεί αυτό, η στήριξη προκαλεί την κατάλληλη δύναμη ή ροπή ώστε να αντισταθεί στα φορτία που της επιβάλλει ο φορέας. Αυτή η δύναμη ή ροπή ονομάζεται αντίδραση στήριξης. Θεωρούμε ότι η έδραση της κύλισης είναι ανένδοτη και μπορεί να προκαλέσει αντίδραση οσοδήποτε μεγάλη. Κατά τους ελεύθερους βαθμούς ελευθερίας, η αντίδραση θα είναι ίση με το μηδέν.

#### **Displacement→RestrainXY**

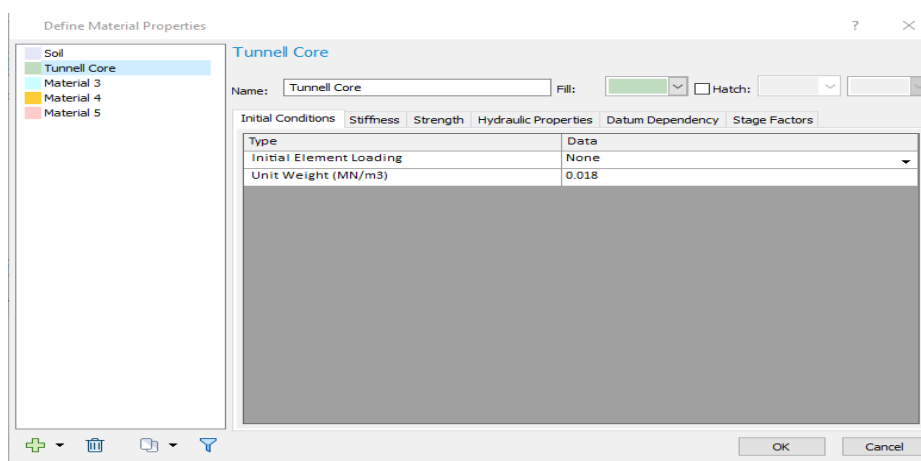
Η δεύτερη στήριξη στην οποία θα γίνει αναφορά ονομάζεται άρθρωση. Το σημείο στήριξης (δηλαδή το σημείο στο οποίο στηρίζεται ο υπερκείμενος φορέας) είναι η άνω κορυφή του τριγώνου ή το κέντρο της άρθρωσης. Η άρθρωση δεσμεύει και τους δύο μετακινησιακούς βαθμούς ελευθερίας. Συνεπώς, αφήνει ελεύθερη την περιστροφή.

Για ένα μοντέλο βαθιάς σήραγγας θα επιλέγαμε **Restrain XY** σε όλες τις πλευρές. Καθώς η άρθρωση αντιπροσωπεύει μια διεπαφή κατά την οποία δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί κίνηση. Σε μια άρθρωση εκχωρούνται ιδιότητες αντοχής και δυσκαμψίας.

Η σχετική κίνηση των δύο πλευρών μιας άρθρωσης μπορεί να είναι ελαστική ή ανελαστική (εάν η δύναμη διάτμησης της άρθρωσης υπερβεί την τάση διάτμησης).

### 3.2.1.6 Για την εκσκαφή σήραγγας στο μοντέλο μας και την τοποθέτηση σκυροδέματος επένδυσης

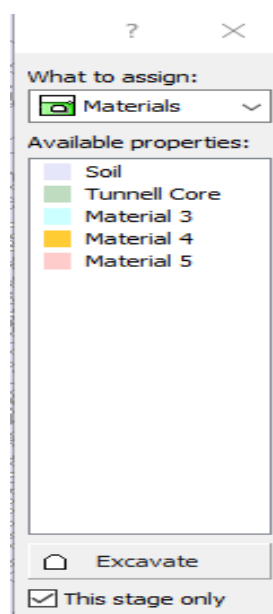
Άλλα δύο βήματα είναι αναγκαία για την συνέχεια της σχεδίασης του μοντέλου μας. Όσον αφορά τις αβαθείς σήραγγες, πηγαίνουμε στο δεύτερο στάδιο μας (Tunnel Core Relaxation), για τον πυρήνα της σήραγγας και τοποθετούμε το Tunnel Core, με βάση την εκχώρηση των ιδιοτήτων που έχουμε πραγματοποιήσει στο τρίτο βήμα.



**Σχήμα 3.7: Πίνακας ιδιοτήτων για τον πυρήνα της σήραγγας μας (Δεύτερο στάδιο)**

Στη συνέχεια πηγαίνουμε στο τρίτο στάδιο (Tunnel Excavation and Support) για την εκσκαφή και την δημιουργία της σήραγγας. Η προσομοίωση της εκσκαφής της σήραγγας γίνεται με την αφαίρεση του εδάφους μέσα από αυτήν. Οι εντολές είναι οι εξής:

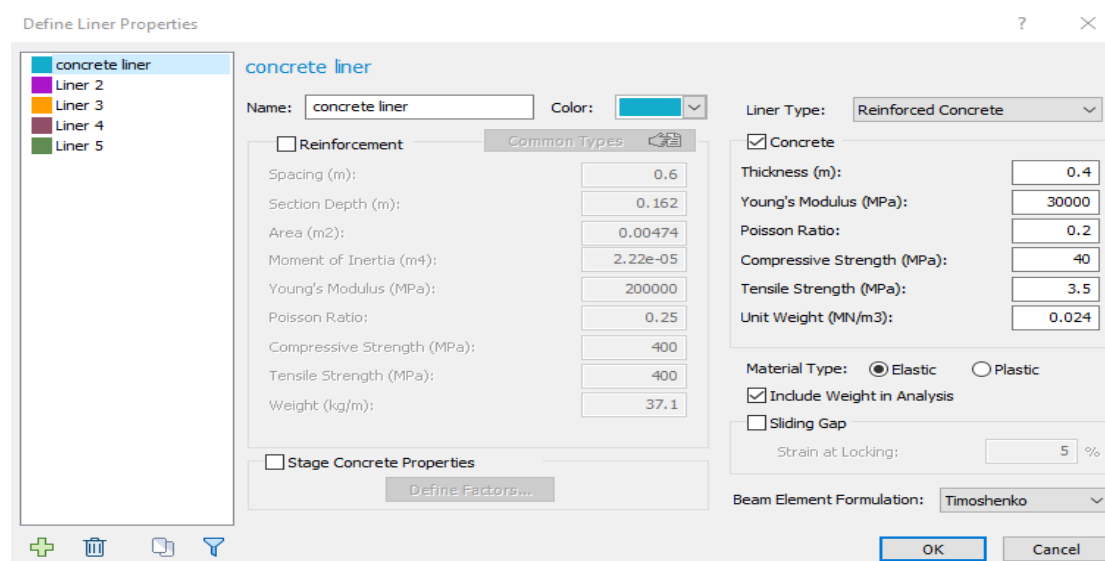
**Properties→ Assign Properties→ Excavate και επιλέγεται μόνο για αυτό το στάδιο**



**Σχήμα 3.8: Πίνακας εντολών για την εκσκαφή της σήραγγας**

Όσον αφορά την τοποθέτηση σκυροδέματος στην επένδυση ακολουθούνται τα εξής βήματα:

**Properties→ Define Liners, Η ονομασία που δίνουμε για αρχή είναι concrete liner**



**Σχήμα 3.9: Πίνακας εντολών ορισμού ιδιοτήτων της επένδυσης**

Σε πρώιμες εκδόσεις του προγράμματος RS2, η υποστήριξη Liner χρησιμοποιήθηκε κυρίως για να μοντελοποιήσει τις επενδύσεις σήραγγας, όπως ψεκασμός σε σκυρόδεμα ή σκυρόδεμα. Με κάθε νέα έκδοση του προγράμματος, οι δυνατότητες του μοντέλου υποστήριξης Liner επεκτάθηκαν ώστε να συμπεριλάβουν τύπους υποστήριξης που δεν είναι απαραίτητα liners, αλλά μπορούν να μοντελοποιηθούν χρησιμοποιώντας τις ίδιες γενικές διαδικασίες. Επομένως, ο όρος Liner support στο RS2 είναι πολλαπλών χρήσεων και τώρα καλύπτει μια μεγάλη ποικιλία τύπων γεωτεχνικής υποστήριξης (Tutorial RS2).

Όσον αφορά τον τύπο επένδυσης είναι σημαντικό να επιλεγεί το οπλισμένο σκυρόδεμα (Reinforced Concrete). Ο τύπος επένδυσης οπλισμένου σκυροδέματος απλοποιεί σημαντικά το έργο της μοντελοποίησης σύνθετων συστημάτων επένδυσης δύο συστατικών όπως οπλισμένο σκυρόδεμα ή σετ χάλυβα και σκυρόδεμα. Το στοιχείο ενίσχυσης είναι συνήθως χάλυβας (π.χ. ράβδος, δοκός I, δοκός πλέγματος) Το στοιχείο "σκυρόδεμα" μπορεί να αντιπροσωπεύει σκυρόδεμα, ή άλλο υλικό (Tutorial RS2).

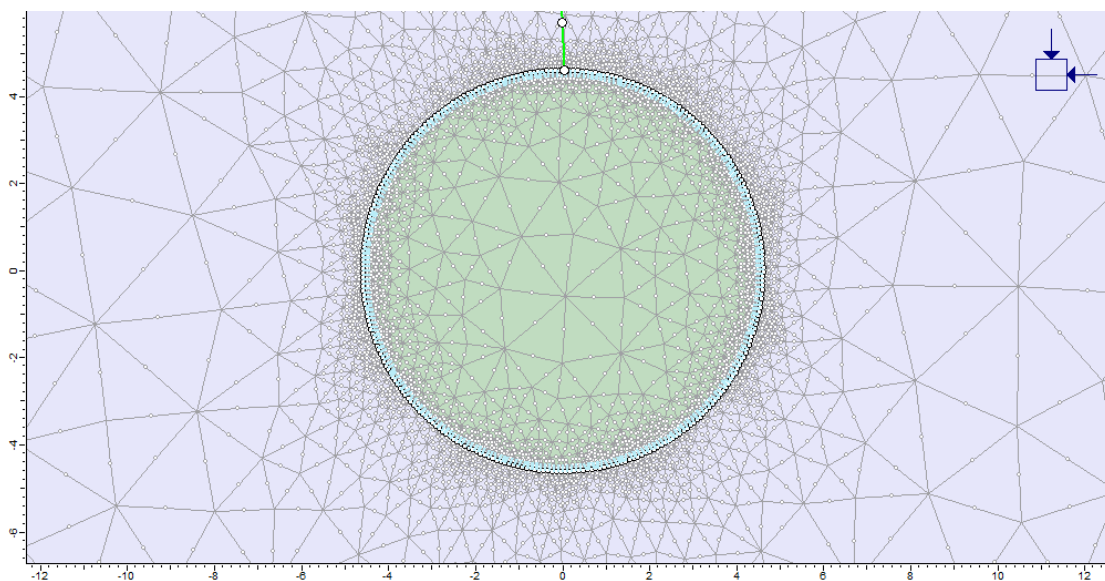
Οι ιδιότητες του οπλισμού και του σκυροδέματος καθορίζονται ξεχωριστά στο διάλογο εισόδου. Για σκοπούς ανάλυσης, το RS2 χρησιμοποιεί αυτά τα δεδομένα εισόδου για να προσδιορίσει μια ομοιογενή διατομή δοκού που έχει ιδιότητες ισοδύναμες με την πραγματική ενισχυμένη επένδυση. Μετά την ανάλυση, οι δυνάμεις εντός των στοιχείων οπλισμού και σκυροδέματος υπολογίζονται στη συνέχεια από τα συνολικά αποτελέσματα και εμφανίζονται σε διαγράμματα φέρουσας ικανότητας της υποστήριξης στο πρόγραμμα RS2 Interpret.

Ο τύπος επένδυσης για τη σήραγγα της προσομοίωσης στο RS2 σχεδιάστηκε να χρησιμοποιηθεί **ως ελαστικό υλικό στήριξης**. Αυτό επιτρέπει τον υπολογισμό των συντελεστών ασφαλείας της επένδυσης και την οπτικοποίηση των δεδομένων των

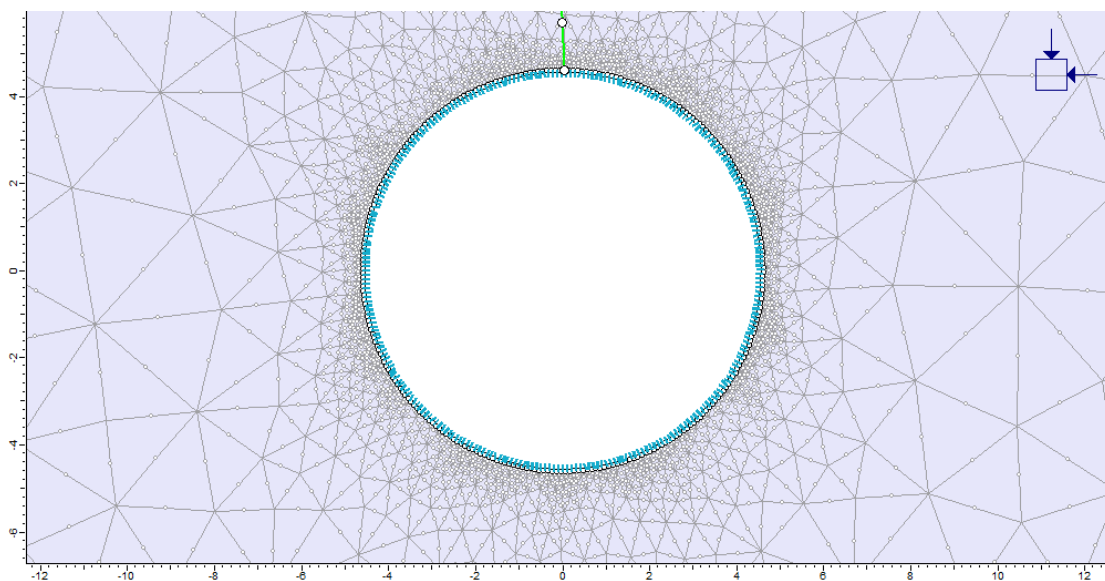
διαγραμμάτων αλληλεπίδρασης και φέρουσας ικανότητας. Σε πολλές περιπτώσεις θα πρέπει να χρησιμοποιείται ο τύπος ελαστικού υλικού για την επένδυση από σπλισμένο σκυρόδεμα.

Για το σκυρόδεμα μας ενδιαφέρουν τα εξής:

- **Thickness ( m), πάχος**
- **Young's Modulus (MPa), μέτρο του Young**
- **Poisson Ratio, Λόγος Poisson**
- **Compressive Strength (MPa), Θλιπτική αντοχή**
- **Tensile Strength (MPa), Εφελκυστική αντοχή**
- **Unit Weight (MN/m<sup>3</sup>), Μοναδιαίο βάρος**



**Σχήμα 3.10: Πυρήνας της σήραγγας για το στάδιο της αποτόνωσης μαζί με το σκυρόδεμα που δεν είναι ακόμη ενεργοποιημένο**



**Σχήμα 3.11: Εκκαφή της σήραγγας και ενεργοποίηση της επένδυσης από σκυρόδεμα**



## Δημιουργία σφήνας σε κυκλική σήραγγα

Στην πορεία της παρούσας διπλωματικής εργασίας εξετάστηκε και η δυνατότητα του κώδικα RS2 να προσομοιώσει τη δυναμική φόρτιση και το ενδεχόμενο βαρυτικής αστοχίας σε σήραγγες. Για το σκοπό αυτό προετοιμάσθηκαν μοντέλα όπου σχηματίζεται μία σφήνα στην οροφή της υπό εξέταση σήραγγας. Αν και τα αποτελέσματα αυτών των προσομοιώσεων δεν έδωσαν ξεκάθαρα στοιχεία για την δυνατότητα του προγράμματος να εντοπίσει αυτού του είδους τις αστοχίες, έχει αξία να περιγραφεί ο τρόπος προετοιμασίας των εν λόγω μοντέλων, κυρίως διότι περιλαμβάνει την εισαγωγή ασυνεχειών σε έναν κώδικα συνεχούς κατά τα άλλα μέσου.

Η εντολή που χρησιμοποιείται για την δημιουργία της σφήνας είναι το **Add Joint**. Η σφήνα ουσιαστικά σχηματίζεται από δύο ασυνέχειες κάθε μία από τις οποίες αντιπροσωπεύουν μια διεπαφή κατά την οποία μπορεί να πραγματοποιηθεί κίνηση.

Οι ασυνέχειες μπορούν να αντιπροσωπεύουν:

- Δομικές ασυνέχειες σε βραχομάζα
- Διεπαφές μεταξύ υποστήριξης (π.χ. επενδύσεις, πασσάλους, γεωσυνθετικά) και βράχο ή έδαφος
- Οποιοσδήποτε άλλος τύπος διεπαφής που μπορεί να προκύψει σε ένα γεωτεχνικό έργο

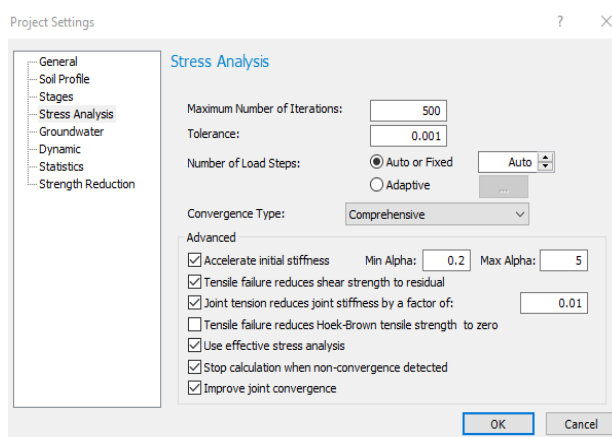
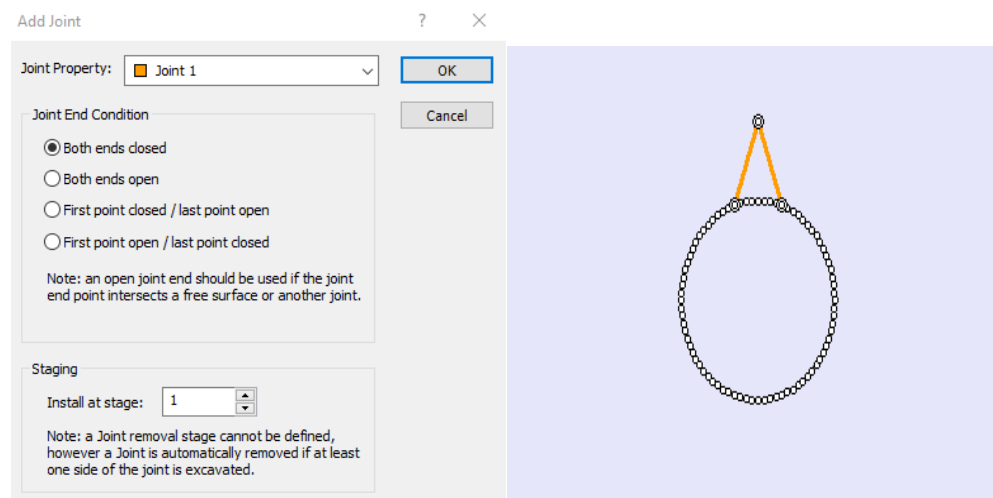
Ένα όριο ασυνέχειας (**Joint Boundary**) στο RS2 μας επιτρέπει να μοντελοποιήσουμε ρητά μία ασυνέχεια σε μια βραχομάζα. Ένα όριο ασυνέχειας μπορεί να αντιπροσωπεύει:

- μια φυσική ασυνέχεια που υπάρχει στη μάζα του πετρώματος πριν από την εκσκαφή
- μια τεχνητή (τεχνητή) ασυνέχεια (π.χ. ένας κατασκευαστικός αρμός που μπορεί να υπάρχει μετά την εκσκαφή μιας περιοχής και στη συνέχεια να συμπληρωθεί με άλλο υλικό)

Το ενδιαφέρον συγκεντρώνεται στο πρώτο σημείο, καθώς είναι αυτό που προσπαθούμε να δημιουργήσουμε στο μοντέλο μας. Σε αντίθεση με τα περισσότερα άλλα όρια στο RS2, σε ένα **Joint Boundary** εκχωρούνται ιδιότητες αντοχής και δυσκαμψίας που καθορίζουν την απόκριση του ορίου στην εφαρμοζόμενη τάση. Η ελαστική μετατόπιση και η ανελαστική ολίσθηση μπορεί να συμβούν κατά μήκος ενός συνόλου ασυνεχειών, εκτός από τις συνολικές μετατοπίσεις στην περιβάλλουσα βραχομάζα.

Για να προστεθεί ένα όριο ασυνέχειας στο μοντέλο ακολουθούνται οι εξής εντολές:

### Boundaries→Add Joint

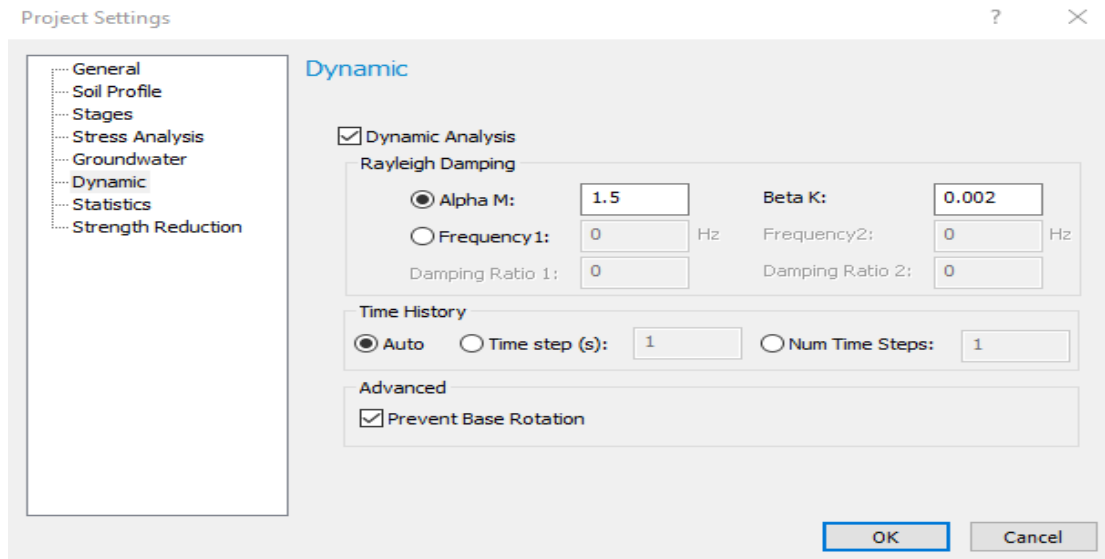


Σχήμα 3.12: Πίνακα εντολών για την τοποθέτηση της σφήνας και αποτύπωσή της

#### 3.2.1.7 Ορισμός δυναμικού φορτίου και τοποθέτηση παλμού (Δυναμική διέγερση)

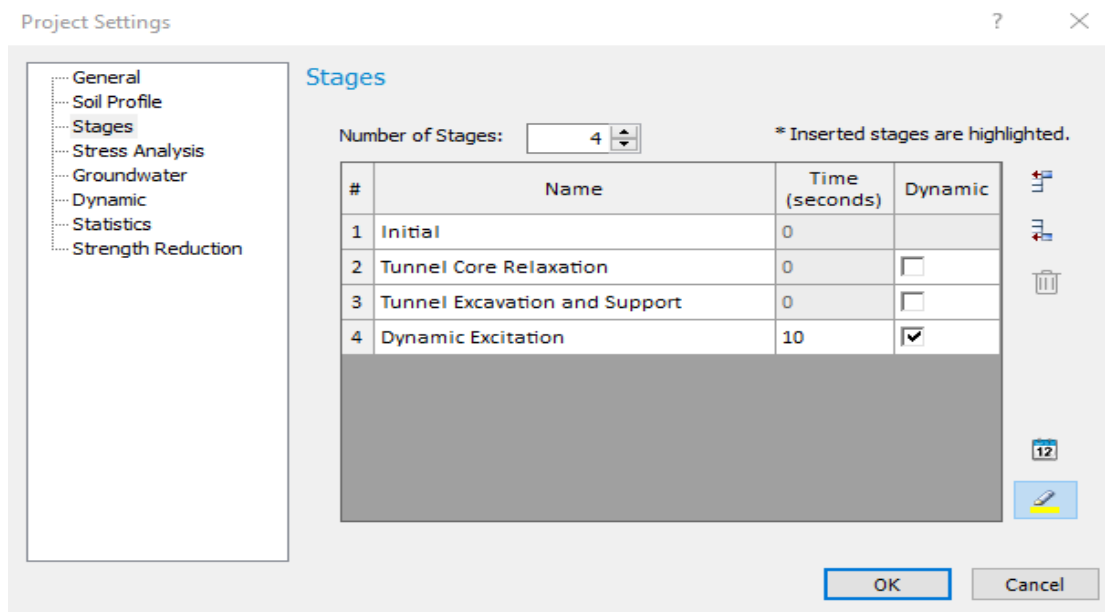
Για να προχωρήσουμε στην τοποθέτηση του δυναμικού φορτίου πρέπει πρώτα απ' όλα να τοποθετήσουμε ένα 4<sup>ο</sup> στάδιο με την ονομασία Dynamic Excitation. Σημαντική σημείωση είναι ότι για αρχή σε αυτόν τον πίνακα εντολών ορίζουμε και την χρονική διάρκεια του δυναμικού φορτίου (που στα μοντέλα μας θα είναι 10 δευτερόλεπτα για τον παλμό Ricker και 25 sec για το σειсмоγράφημα από το σεισμό Duzce). Οι εντολές που ακολουθούνται είναι οι εξής :

### Analysis→Project Settings→Dynamic→Dynamic Analysis



Σχήμα 3.13: Δυναμική Ανάλυση

#### Analysis→Project Settings→Stages



Σχήμα 3.14: Πίνακας Εντολών για το Δυναμικό Στάδιο

Στη συνέχεια, τοποθετείται η δυναμική διέγερση. Θα εμφανιστεί ο διάλογος **Define Dynamic Loads**, επιτρέποντας τον καθορισμό δυναμικών φορτίων στις κατευθύνσεις X ή / και Y. Οι επιλογές DefineDynamicLoads επιτρέπουν να οριστούν οι τιμές φόρτισης καθώς μεταβάλλονται με την πάροδο του χρόνου με σκοπό την δημιουργία της χρονοϊστορίας φόρτισης. (Tutorial RS2 – Theory).

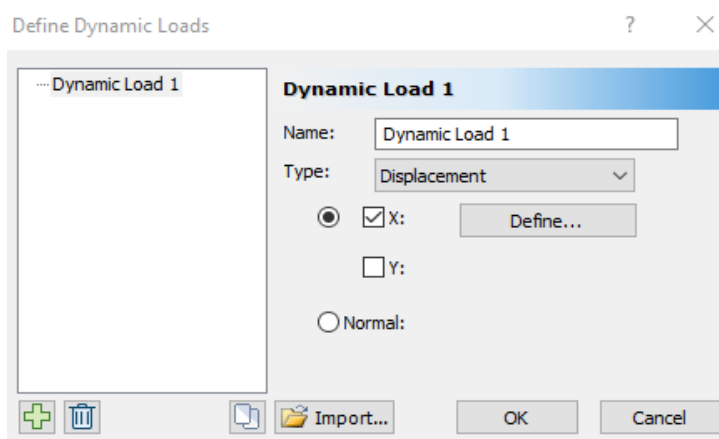
Οι διαθέσιμοι τύποι φορτίων στο RS2 μπορούν να χωριστούν σε εξωτερικά φορτία δύναμης και σε καθορισμένα φορτία κίνησης. Ο τύπος δύναμης εφαρμόζεται στο μοντέλο παρόμοια με τα γραμμικά στατικά φορτία και είναι ουσιαστικά εξωτερικές δυνάμεις που μπορούν μεταβάλλονται με την πάροδο του χρόνου και εφαρμόζονται σε κόμβους. Τα

φορτία μετατόπισης, ταχύτητας και επιτάχυνσης είναι προδιαγεγραμμένα φορτία κίνησης στους κόμβους του μοντέλου και πρέπει να έχουν τη διάρκεια της δυναμικής προσομοίωσης. Στο RS2, κόμβοι με δυναμικές προκαθορισμένες κινήσεις συγκρατούνται στην ισχύουσα κατεύθυνση και μετακινούνται κατά απαραίτητα ποσά μετατόπισης όπως υπαγορεύεται από τη συνάρτηση της δυναμικής φόρτισης. Πρέπει να σημειωθεί ότι με την εφαρμογή αυτών ως δυναμικά φορτία συγκρατούνται τμήματα του μοντέλου και αυξάνουν έτσι τη συνολική ακαμψία του συστήματος. Εάν ο τύπος δυναμικού φορτίου είναι ταχύτητα ή επιτάχυνση, οι χρονοϊστορίες των φορτίων που εισάγονται πρέπει να ολοκληρωθούν προκειμένου να αποκτηθεί το ιστορικό μετατόπισης που θα εφαρμοστεί στους δεσμευμένους κόμβους. Καθώς η συνάρτηση δυναμικής φόρτισης είναι πάντα διακριτή, η αριθμητική ολοκλήρωση πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας τον κανόνα του τραπεζίου. Προκειμένου για καθορισμένα φορτία κίνησης που ορίζονται σε μία μόνο κατεύθυνση, είτε Χ είτε Υ, δεσμεύονται στην κατεύθυνση που ορίζει το δυναμικό φορτίο και είναι ελεύθερο να κινείται προς την άλλη κατεύθυνση (Tutorial RS2- Theory).

Για την συγκεκριμένη εντολή πρέπει να δοθεί προσοχή σε κάποια σημαντικά σημεία:

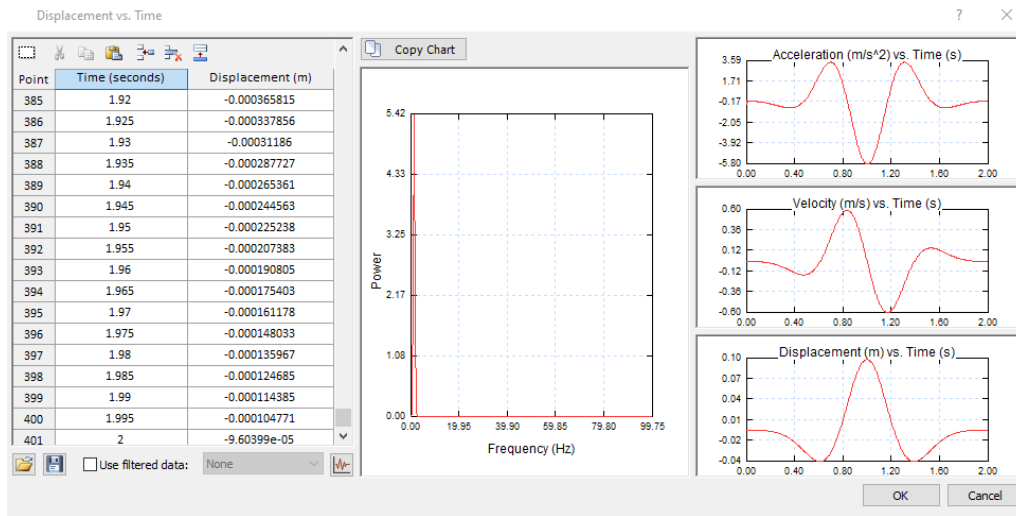
- Εάν το δυναμικό φορτίο Type = Line Force, ισχύουν τιμές (σε μονάδες που ορίζονται στις ρυθμίσεις – projectsettings) που πρέπει να εισαχθούν για διάφορα χρονικά σημεία.
- Εάν το δυναμικό φορτίο Type=Distributed Force, οι κατανεμημένες τιμές δύναμης (σε καθορισμένες μονάδες στις ρυθμίσεις) πρέπει να εισαχθούν για διάφορα χρονικά σημεία.
- Εάν το δυναμικό φορτίο Type = Μετατόπιση, πρέπει να εισαχθούν τιμές μετατόπισης για διάφορα χρονικά σημεία σε κατάλληλες μονάδες, ανάλογα με το εάν οι ρυθμίσεις έχουν οριστεί σε metric ή imperial.
- Εάν το δυναμικό φορτίο Type = Velocity, οι τιμές ταχύτητας πρέπει να εισαχθούν για αρκετά χρονικά σημεία σε μέτρα ανά δευτερόλεπτο ή πόδια ανά δευτερόλεπτο ανάλογα με το εάν έχουν ρυθμιστεί οι μονάδες σε metric ή imperial.
- Εάν το δυναμικό φορτίο Type = Acceleration, πρέπει να εισαχθούν τιμές επιτάχυνσης για διάφορα χρονικά σημεία σε τετραγωνικά μέτρα ανά δευτερόλεπτο ή τετραγωνικά πόδια ανά δευτερόλεπτο ανάλογα με το αν οι ρυθμίσεις είναι metric ή imperial (Tutorial RS2 Theory).

### Dynamic→Define Dynamic Loads



Σχήμα 3.15: Πίνακας εντολών για τον ορισμό της Δυναμικής Διέγερσης

Ο παλμός που τοποθετείται κάθε φορά είναι ανάλογα με αυτόν που επιλέγεται για το μοντέλο μας. Και ο τύπος που επιλέγεται είναι οι μετατοπίσεις. Ένα ενδεικτικό παράδειγμα είναι ο παλμός Ricker 0.6 γκαι  $f_n = 1$ :



Σχήμα 3.16: Πίνακας εντολών για τον παλμό που τοποθετείται σε κάθε περίπτωση

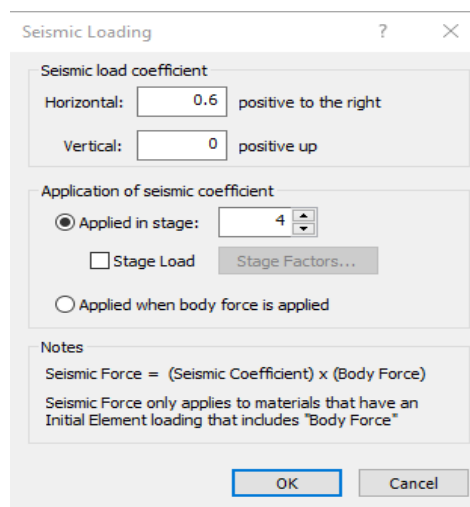
### Εφαρμογή ψευδο-στατικών σεισμικών φορτίων

Τα ψευδο-στατικά σεισμικά φορτία που θα δημιουργήσουμε λειτουργούν εφαρμόζοντας μια δύναμη σώματος προς την κατεύθυνση του σεισμικού φορτίου. Η κατεύθυνση μπορεί να είναι είτε οριζόντια, κατακόρυφη ή συνδυασμός και των δύο. Η σεισμική δύναμη για κάθε πεπερασμένο στοιχείο προσδιορίζεται χρησιμοποιώντας την εξίσωση:

Σεισμική Δύναμη = Σεισμικός Συντελεστής \* περιοχή στοιχείου \* μοναδιαίο βάρος υλικού στοιχείου

ή απλά ο σεισμικός συντελεστής επί το βάρος του πεπερασμένου στοιχείου. Το ίδιο βάρος ενός πεπερασμένου στοιχείου αναφέρεται επίσης ως η δύναμη του σώματός του.

### Loading → Seismic Loading



Σχήμα 3.17: Πίνακας εντολών για την ψευδοστατική σεισμική φόρτιση

Στον παραπάνω διάλογο Seismic Load, απλώς πληκτρολογούμε τον οριζόντιο και / ή κάθετο συντελεστή σεισμικού φορτίου και, στη συνέχεια, επιλέγουμε τη μέθοδο εφαρμογής. Εάν θέλουμε να εφαρμοστεί το φορτίο σε ένα συγκεκριμένο στάδιο, ορίζουμε την πρώτη επιλογή και ορίζεται το στάδιο στο οποίο εφαρμόζεται το φορτίο.

### Οριακές Συνθήκες Απορρόφησης – Boundary Conditions

Οι οριακές συνθήκες απορρόφησης και μετάδοσης παρέχουν στο τμήμα γραμμής αυτό που μερικές φορές ονομάζεται Lysmer-Kuhlemeyer. Είναι μια τεχνητή οριακή κατάσταση που επιδιώκεται να αναπαραχθεί η άπειρη οριακή συμπεριφορά του μέσου του εδάφους. Δηλαδή τα όρια απορρόφησης και μετάδοσης απορροφούν τα εισερχόμενα κύματα διάτμησης και πίεσης σαν το μοντέλο να μην είναι πραγματικά οριοθετημένο. Η υπόθεση αυτών των ορίων είναι ότι τα κύματα που υπάρχουν στο σύστημα θα εξαπλωθούν σύμφωνα με τις ταχύτητες κύματος διάτμησης και πίεσης του υλικού του εδάφους. Το όριο επομένως κατασκευάζεται από δύο αποσβεστήρες στο εξωτερικό όριο, το ένα κάθετο και το άλλο εφαπτόμενο στο όριοπροσανατολισμού, του οποίου ο συντελεστής απόσβεσης είναι ανάλογος με τις ταχύτητες κύματος. Οι ταχύτητες των κυμάτων υπολογίζονται χρησιμοποιώντας τις ακόλουθες εξισώσεις (Tutorial RS2 – Theory).

$$V_s = \sqrt{\frac{E}{2(1+\nu)\rho}}$$

$$V_p = \sqrt{\frac{E(1+\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}$$

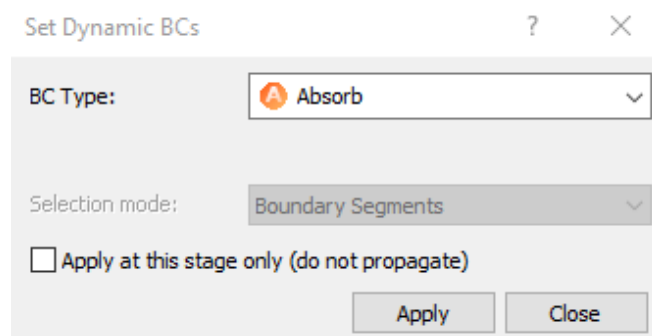
$V_s$  και  $V_p$  είναι οι ταχύτητες κύματος διάτμησης και κύματος πίεσης αντίστοιχα. Μέσω αυτών των ταχυτήτων μπορούν να καθοριστούν οι συντελεστές απόσβεσης.

$$C_p = \rho \cdot l_0 \cdot V_p$$

$$C_T = \rho \cdot l_0 \cdot V_s$$

Οι δείκτες P και T σημαίνουν κάθετες και εφαπτομενικές κατευθύνσεις.  $\rho$  είναι η πυκνότητα μάζας εδάφους και  $l_0$  είναι το μήκος του εξωτερικού ορίου που αποδίδεται σε αυτό το απορροφητικό οριακό στοιχείο (Tutorial RS2 – Theory).

### Dynamic → Set Dynamic Boundary Conditions



Σχήμα 3.18: Πίνακας εντολών τοποθέτησης ορίου απορρόφησης

### 3.2.1.8 Επισκόπηση των Time Queries σε μια δυναμική ανάλυση RS2

Το Time Query επιτρέπει να λαμβάνονται δεδομένα που εξαρτώνται από το χρόνο από μια δυναμική ανάλυση, που διαφορετικά δεν θα ήταν διαθέσιμα. Για τη δυναμική ανάλυση, πραγματοποιούνται διάφορα βήματα χρόνου μεταξύ των καθορισμένων χρόνων σταδίου και το RS2 δεν εξαγεί αυτόματα δεδομένα για όλους τους κόμβους πλέγματος για αυτά τα ενδιάμεσα βήματα χρόνου. Όταν καθορίζεται ένα Time Query, τα δυναμικά δεδομένα θα καταγράφονται για όλα τα δυναμικά χρονικά βήματα που συμβαίνουν στην προσομοίωση, στα καθορισμένα Time Queries. (Tutorial RS2).

#### Προσθήκη Time Queries

Τα Time Queries μπορούν να καθοριστούν ως μεμονωμένα σημεία ή γραμμές εντός του στερεού υλικού ή για Liners, χρησιμοποιώντας τις ακόλουθες επιλογές:

- **Add Solid Time History Query**
- **Add Liner Time History Query**
- **Add Time Query Line**

Τα Time Queries πρέπει να δημιουργηθούν στο RS2 Modeler, προτού πραγματοποιηθεί η ανάλυση. Μόλις δημιουργηθεί ένα Time Query, τα δυναμικά δεδομένα εξόδου στα καθορισμένα σημεία θα είναι διαθέσιμα για σχεδίαση στο πρόγραμμα RS2 Interpret (Tutorial RS2).

#### Πίνακας αποτελεσμάτων για τα Time Queries

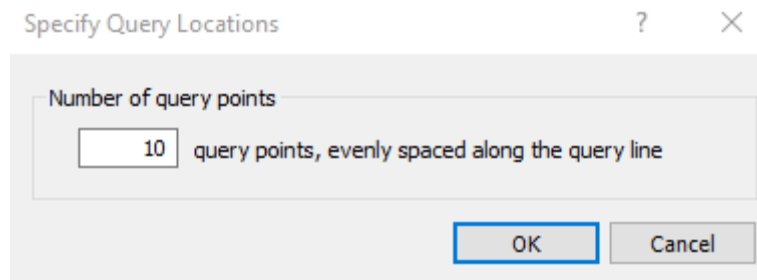
Τα δεδομένα εξόδου Time Query παρουσιάζονται σε γραφήματα στο πρόγραμμα RS2 Interpret με τις επιλογές Graph Time Queries ή Graph Time Query Lines (Tutorial RS2).

#### Add a Time Query Line

Για να δημιουργηθεί μια σειρά **Time Query** σημείων κατά μήκος ενός τμήματος γραμμής εντός του στερεού υλικού (δηλαδή βράχου ή εδάφους) χρησιμοποιείται η επιλογή Add Time Query Line.

#### **Dynamic→ Time Query→ Add Time Query Line**

Επιλέγουμε την καρτέλα Dynamic. Παρατηρείται το παράθυρο **Specify Query Locations**, στο οποίο εισάγεται ο αριθμός των σημείων **Time Query** στο τμήμα γραμμής. Είναι εφικτό να εισαχθεί μια τιμή μεταξύ 2 και 10, και μετά επιλέγεται το OK. Έτσι, χρειάζονται δύο ή περισσότερα σημεία που ορίζουν τη γραμμή. Με χρήση του ποντικιού για να τοποθετηθούν τα σημεία έναρξης και λήξης του τμήματος γραμμής ερωτήματος χρόνου ή εισάγονται συντεταγμένες x, y στη γραμμή προτροπής. Μετά την εισαγωγή του δεύτερου σημείου, το Time Query Line θα προστεθεί αυτόματα στο μοντέλο, με τον καθορισμένο αριθμό σημείων να εμφανίζεται (Tutorial RS2).



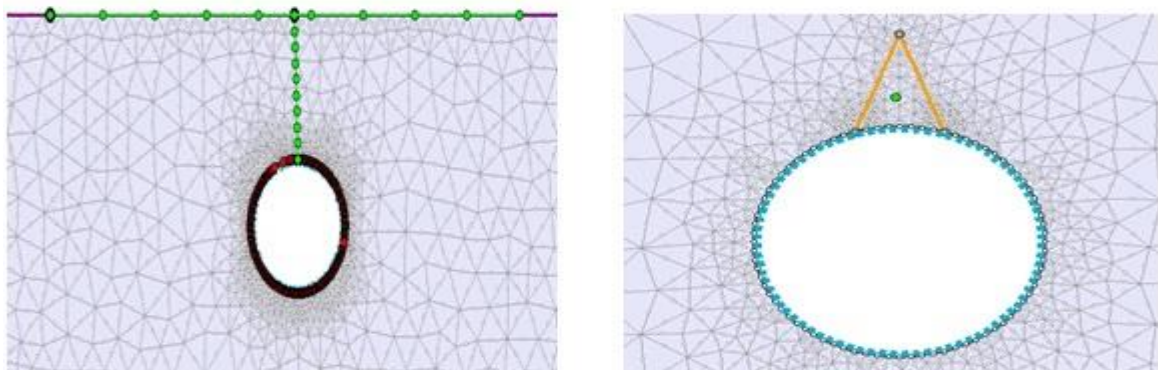
Σχήμα 3.19: Πίνακας εντολών για τον καθορισμό σημείων

### Add Liner Time History Query

#### Dynamic → Time Query → Add Liner Time History Query

Επιλέγεται η καρτέλα Dynamic από τον πίνακα εντολών. Ακολουθώντας την παραπάνω σειρά εντολών θα ζητηθεί να επιλεγούν οριακές κορυφές στις οποίες έχει εφαρμοστεί η επένδυση. Με χρήση του ποντίκι επιλέγονται οι κορυφές ορίου στις οποίες έχει εφαρμοστεί επένδυση. Είτε μεμονωμένες κορυφές είτε χρησιμοποιείται ένα παράθυρο επιλογής προκειμένου να επιλεχθούν πολλές κορυφές.

Μόλις επιλεγούν οι κορυφές, τα σημεία Time Query θα προστεθούν στο μοντέλο. Μπορεί να οριστεί οποιοσδήποτε αριθμός σημείων ερωτήματος χρόνου γραμμής. Τα σημεία ερωτήματος χρόνου γραμμής εμφανίζονται ως μικροί κόκκινοι κύκλοι στο τελευταίο στάδιο (**Dynamic Excitation**) (Tutorial RS2).



Σχήμα 3.20: Αποτύπωση των Time Queries

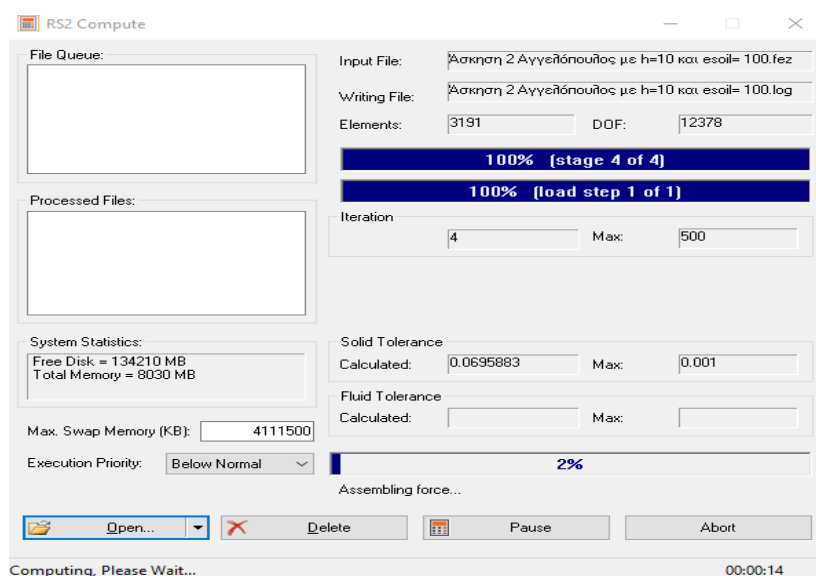
### 3.2.2 Υπολογισμός Δεδομένων των μοντέλων μας

Για τον υπολογισμό των αποτελεσμάτων για το μοντέλο RS2, ορίζεται η επιλογή Compute από τη γραμμή εργαλείων ή το μενού Analysis. Αυτό θα πραγματοποιήσει την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων για το τρέχον μοντέλο. Κάποιες σημαντικές σημειώσεις για τον υπολογισμό των δεδομένων μας:



- Η επιλογή Compute δεν είναι ενεργοποιημένη εκτός εάν υπάρχει το πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων.
- Εάν επιλέξουμε Compute πριν από την αποθήκευση ενός αρχείου, θα ζητηθεί πρώτα να αποθηκευτεί το αρχείο και στη συνέχεια θα εκτελεστεί η ανάλυση.
- Εάν για κάποιο λόγο πρέπει να ακυρώσουμε την ανάλυση μετά την επιλογή Compute, επιλέξτε το κουμπί Abort στο παράθυρο διαλόγου Compute και η ανάλυση θα τερματιστεί.
- Εάν πραγματοποιήσουμε μοντελοποίηση ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, υπολογίζεται αυτόματα όταν επιλέγεται το Compute. Μπορούμε επίσης να υπολογίσουμε τη ροή υπόγειων υδάτων ανεξάρτητα από την εντατική ανάλυση επιλέγοντας την επιλογή Compute Groundwater (Tutorial RS2).

### Analysis→ Compute



**Σχήμα 3.21: Αποτύπωση πίνακα υπολογισμού δεδομένων**

Το πρόγραμμα RS2 αποτελείται από 3 ενότητες προγράμματος:

- MODEL
- COMPUTE
- INTERPRET

Το **INTERPRET** είναι η μονάδα επεξεργασίας που χρησιμοποιείται για την οπτικοποίηση δεδομένων και την ερμηνεία των αποτελεσμάτων ανάλυσης RS2. Τα περιγράμματα δεδομένων μπορούν να προβληθούν (π.χ. μετατόπιση, συντελεστής αντοχής) και τα αποτελέσματα μπορούν να εμφανιστούν στο μοντέλο ή σε διαγράμματα (Tutorial RS2). Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων (**INTERPRET**) είναι το μετά – επεξεργαστικό πρόγραμμα που χρησιμοποιείται για την οπτικοποίηση και ερμηνεία της ανάλυσης των αποτελεσμάτων. Είναι αναγκαίο να τρέξει πρώτα το μοντέλο με το **COMPUTE**, ώστε να υπάρξει η δυνατότητα να εμφανιστούν τα αποτελέσματα στο **INTERPRET**. Επιλέγεται Compute για να τρέξουν τα αρχεία και να γίνει η τασική ανάλυση και έπειτα επιλέγεται Interpret για να διαβαστούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν (Χαλαστάνης, 2015).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup> : ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

---

### 4.1 Εισαγωγικά

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η προσομοίωση των καθιζήσεων, των μετατοπίσεων, της εντατικής κατάστασης κατά τη διάνοιξη της σήραγγας αλλά και όλων των δυνάμεων που αναπτύσσονται γύρω από την σήραγγα επιλέχθηκαν συγκεκριμένες γεωτεχνικές παράμετροι. Αυτές οι παράμετροι είναι ενδεικτικές και χρησιμοποιήθηκαν για τη γεωτεχνική μελέτη της σήραγγας στα καταστατικά μοντέλα που εφαρμόστηκαν στην παρούσα εργασία. Παρακάτω αναλύονται τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά που χρειάστηκαν για την αναπαράσταση, καθώς και η μεθοδολογία που ακολουθήσαμε.

### 4.2 Συμβολισμοί γεωτεχνικών παραμέτρων σχεδιασμού

Το πρώτο βήμα είναι να προστεθεί το όριο εκσκαφής. Έτσι, τα δύο βασικά γεωτεχνικά στοιχεία που μας ενδιαφέρουν είναι η διάμετρος της σήραγγας (**D**) και το ύψος από την επιφάνεια (**H**).

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, μας ενδιαφέρουν κάποια συγκεκριμένα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά. Για κάθε υλικό, οι ιδιότητες ομαδοποιούνται στις ακόλουθες καρτέλες: Strength, Stiffness, Datum Dependency, Stage Factors.

- **Unit Weight ( MN/ m<sup>3</sup> )**

Το μοναδιαίο βάρος ενός υλικού στο πλαίσιο διαλόγου **Define Material Properties**, λειτουργεί σε συνδυασμό με την αρχική φόρτιση στοιχείου και ισχύει μόνο εάν το Body Force περιλαμβάνεται στην αρχική φόρτιση στοιχείου. Δηλαδή, το μοναδιαίο βάρος είναι ενεργοποιημένο μόνο εάν το **Initial Element Loading** είναι είτε Field Stress & Body Force ή Body Force Only (Tutorial RS2).

- **Poisson's Ratio και Young's Modulus (MPa)**

Ένα ιστροπικό υλικό σημαίνει ότι οι ιδιότητες του υλικού δεν ποικίλλουν ανάλογα με την κατεύθυνση. Οι ελαστικές ιδιότητες ενός ιστροπικού υλικού καθορίζονται από μία μόνο τιμή του Young's Modulus και μία τιμή **Poisson's Ratio**. Ως λόγος Poisson ορίζεται ο λόγος της πλευρικής προς την εγκάρσια παραμόρφωση. Μπορεί να υπολογιστεί μέσω εργαστηριακών δοκιμών. Για ένα ιστροπικό υλικό μπορούμε να ορίσουμε μια υπολειμματική τιμή του **Young's Modulus (E<sub>soil</sub>)** επιλέγοντας το Young's Modulus (υπόλοιπο) πλαίσιο ελέγχου. Αυτή η επιλογή ενεργοποιείται μόνο εάν ο τύπος υλικού = πλαστικό και το κριτήριο αστοχίας = Mohr-Coulomb, Hoek-Brown ή Drucker-Prager (Tutorial RS2).

- **Material Type κριτήριο Mohr Coulomb**

### Ελαστικό υλικό

Εάν επιλέξουμε **Material Type = Ελαστικό**, τότε οι παράμετροι κριτηρίου αστοχίας που εισάγουμε θα χρησιμοποιηθούν μόνο για τον υπολογισμό και τη γραφική παράσταση του συντελεστή αντοχής εντός του υλικού. Αν και ένα ελαστικό υλικό δεν μπορεί να "αστοχήσει", η περιβάλλουσα αστοχίας επιτρέπει τον υπολογισμό ενός βαθμού υπέρτασης (Tutorial RS2).

### Πλαστικό υλικό

Εάν επιλέξουμε **Material Type= Πλαστικό**, οι παράμετροι αντοχής που θα εισαγάγουμε θα χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση εάν συμβεί διαρροή. Αυτό είναι αντίθετο με τα ελαστικά υλικά, όπου οι παράμετροι αντοχής χρησιμοποιούνται μόνο για τη λήψη τιμών του συντελεστή αντοχής, αλλά δεν επηρεάζουν τα αποτελέσματα της ανάλυσης (δηλαδή δεν επηρεάζονται οι τάσεις και οι μετατοπίσεις) (Tutorial RS2).

Εάν ορίσουμε ένα υλικό ως πλαστικό, μπορούμε επίσης να ορίσουμε παραμέτρους παραμένουσας αντοχής και μια παράμετρο διαστολής, ανάλογα με το κριτήριο αντοχής. Εάν οι παράμετροι παραμένουσας αντοχής είναι ίσες με τις παραμέτρους αιχμής, τότε ορίζεται ένα "ιδανικά" ελαστικό-πλαστικό υλικό. Η διαστολή είναι ένα μέτρο της αύξησης του όγκου του υλικού κατά τη διάτμηση (Tutorial RS2).

Για το κριτήριο Mohr-Coulomb ορίζουμε τις ακόλουθες παραμέτρους:

- **Συνοχή ( $C_{soil}$ )**
- **Γωνία τριβής ( $\Phi_{soil}$ )**
- **Αντοχή σε εφελκυσμό (Tensile Strength)**

Εάν ο τύπος υλικού = πλαστικό, μπορούμε να ορίσουμε :

- **Γωνία διαστολής (Dila)**
- **Παραμένουσα τιμές συνοχής (Residual Cohesion,  $C_{soil}$ )**
- **γωνία τριβής και αντοχή σε εφελκυσμό**

### Ιδιότητες Σκυροδέματος

Πρώτα απ' όλα, σημειώνεται ότι το "σκυρόδεμα" στοιχείο μιας επένδυσης οπλισμένου σκυροδέματος δεν πρέπει απαραίτητα να είναι σκυρόδεμα. Μπορεί να αντιπροσωπεύει σκυρόδεμα ή άλλο υλικό που περιβάλλει την ενίσχυση. Το όνομα σκυροδέματος επιλέχθηκε για ευκολία ως τυπικό υλικό μήτρας για την ενισχυμένη επένδυση. Οι απαιτούμενες ιδιότητες σκυροδέματος είναι:

- **Thickness ( t )**
- **Young's Modulus (  $E_c$  )**
- **Poisson's Ratio (  $\nu$  )**
- **Compressive Strength**
- **Tensile Strength**

Με βάση τα παραπάνω, στους παρακάτω πίνακες θα γίνει μια σύνοψη όλων των γεωμετρικών στοιχείων.

**Πίνακας 2: Συμβολισμοί γεωτεχνικών χαρακτηριστικών και ιδιοτήτων των υλικών**

Συμβολισμός	Γεωτεχνική Παράμετρος / Ιδιότητες Υλικών
D (m)	Διάμετρος σήραγγας
H(m)	Βάθος από την επιφάνεια
Unit Weight( Mn/m <sup>3</sup> )	Μοναδιαίο Βάρος
$\nu$	Λόγος Poisson
E <sub>soil</sub> (MPa)	Μέτρο Ελαστικότητας
C <sub>soil</sub> (MPa)	Μέγιστη Συνοχή
$\Phi_{soil}$	Μέγιστη Γωνία Τριβής
Dila	Γωνία Διαστολής
E' <sub>soil</sub> (MPa)	Μέτρο Ελαστικότητας (για τον πυρήνα)

**Πίνακας 3: Συμβολισμός ιδιοτήτων υλικών για την επένδυση**

Συμβολισμός	Ιδιότητες Υλικών για την επένδυση
t(m)	Πάχος
E <sub>c</sub> (MPa)	Μέτρο Ελαστικότητας
$\nu$	Λόγος Poisson
$\sigma_{ci}$ (Mpa)	Αντοχή σε Θλίψη
$\sigma$	Αντοχή σε Εφελκυσμό
Unit Weight(Mn/m <sup>3</sup> )	Βάρος Μονάδας

### 4.3 Πίνακας μηχανικών χαρακτηριστικών των σηράγγων για τα μοντέλα

Για αρχή, επεξεργαστήκαμε 12 μοντέλα, τα οποία παρατίθενται παρακάτω.

- Παλμός Ricker →  $f_n = 1$  και  $a_{max} = 0.69$ 
  - Αβαθή σήραγγα
  - Κυκλικής διατομής σήραγγα με σφήνα
- Παλμός Ricker →  $f_n = 2$  και  $a_{max} = 0.69$ ,
  - Αβαθή σήραγγα
- Σεισμός Dsuzce
  - Αβαθή σήραγγα
- Ψευδοστατική Σεισμική Φόρτιση

Συγκεντρωτικά χωρίζονται σε τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις. Οι πρώτες τρεις αφορούν τις αβαθείς σήραγγες (Παλμός Ricker, Σεισμός Dsuzce, με ψευδοστατική φόρτιση) και θα τις παραθέσουμε στον παρακάτω πίνακα βοηθητικά. Η τέταρτη περίπτωση αφορά το μοντέλο με τη σφήνα, για το οποίο το RS2 δεν έδωσε ξεκάθαρα αποτελέσματα. Έτσι, η 4<sup>η</sup> περίπτωση δε περιλαμβάνεται στα αποτελέσματα της εργασίας.

**Πίνακας 4: Συμβολισμός ιδιοτήτων για τα μοντέλα μας**

Συμβολισμός	1 <sup>η</sup> Περίπτωση	2 <sup>η</sup> Περίπτωση	3 <sup>η</sup> Περίπτωση
D	9m	9m	9m
H	10m	10m	20m
Unit Weight	0.018 Mn/m <sup>3</sup>	0.018Mn/m <sup>3</sup>	0.018Mn/m <sup>3</sup>
V	0.35	0.35	0.35
E <sub>soil</sub>	50MPa	100MPa	50MPa
C <sub>soil</sub>	0.02MPa	0.05 MPa	0.02MPa
Φ <sub>soil</sub>	25°	30°	25°
D <sub>ila</sub>	5°	5°	5°
E' <sub>soil</sub>	10MPa	20MPa	10MPa

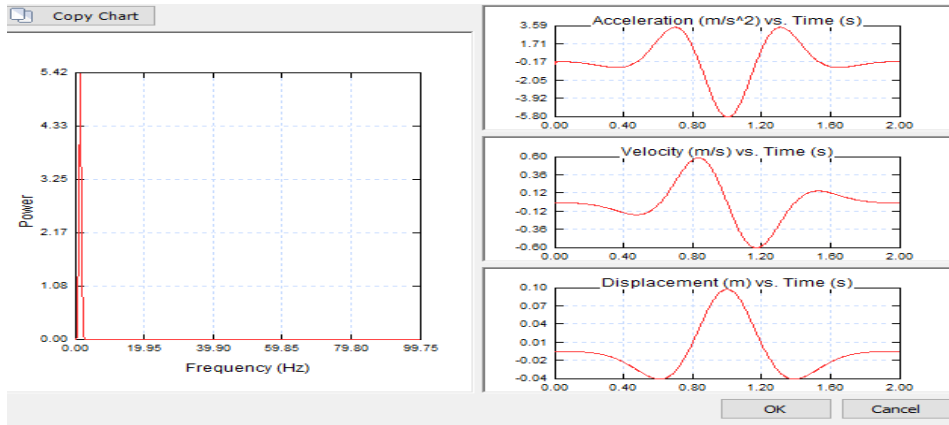
Όσον αφορά την επένδυση της σήραγγας τα στοιχεία των υλικών που θα χρησιμοποιήσουμε σε κάθε μοντέλο είναι κοινά όποτε θα τα παραθέσουμε στον πίνακα που ακολουθεί.

**Πίνακας 5: Συμβολισμοί και τιμές για την επένδυση της σήραγγας**

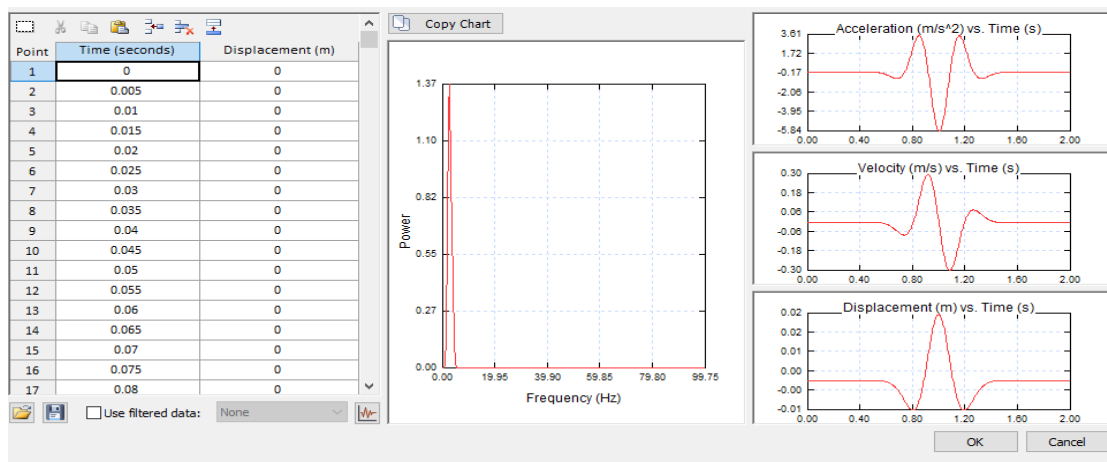
Συμβολισμοί	Τιμές
t	0.4m
E <sub>c</sub>	30000 MPa
v	0.2
σ <sub>ci</sub>	40MPa
σ <sub>t</sub>	3.5 MPa
Unit Weight	0.24/m <sup>3</sup>

#### 4.4 Δυναμική ανάλυση και σεισμική φόρτιση

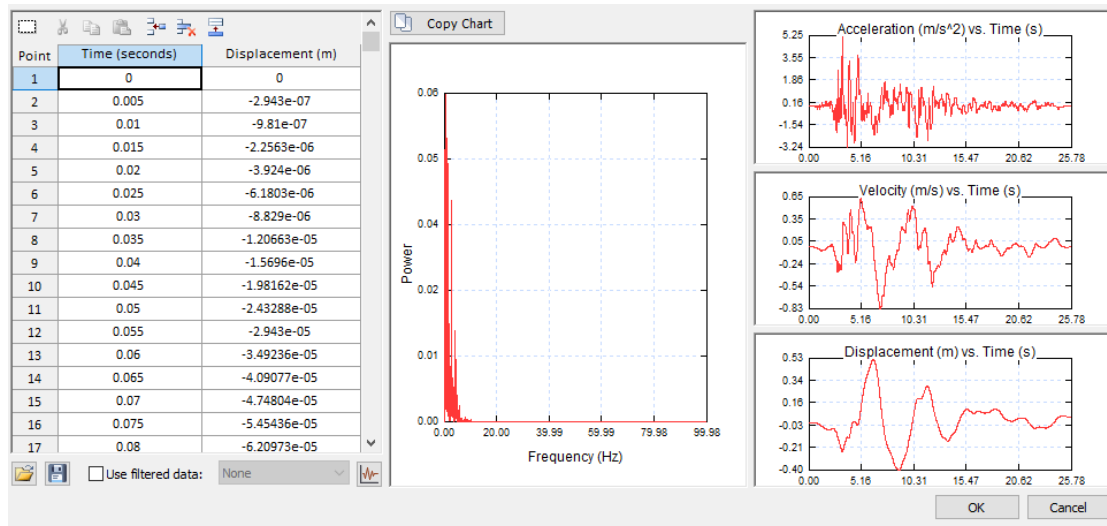
Όπως περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, στα μοντέλα που δημιουργούμε τοποθετείται σεισμική φόρτιση για να ελεγχθούν οι μετατοπίσεις και τις δυνάμεις που αναπτύσσονται σε συγκεκριμένα σημεία της σήραγγας. Παρακάτω παρατίθενται οι παλμοί που χρησιμοποιήθηκαν για τις σεισμικές φορτώσεις.



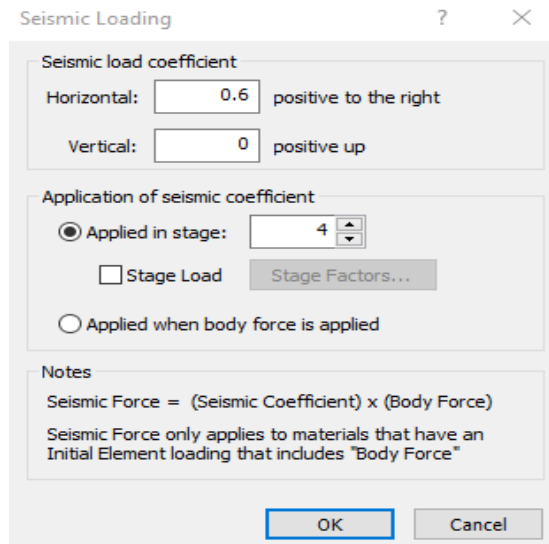
Σχήμα 4.1: Παλμός Ricker,  $f_n=1$ ,  $a_{max}=0.6$



Σχήμα 4.2: Παλμός Ricker,  $f_n=2$ ,  $a_{max}=0.6$



Σχήμα 4.3: Σεισμός Duzce

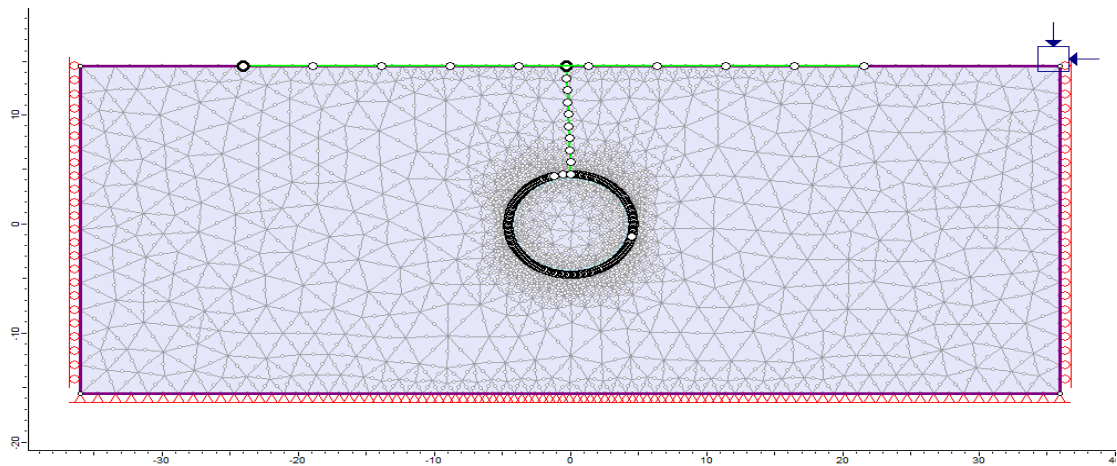


Σχήμα 4.4: Ψευδοστατική σεισμική φόρτιση

#### 4.5 Τελική προσομοίωση των μοντέλων μαζί με την δυναμική ανάλυση και την σεισμική φόρτιση

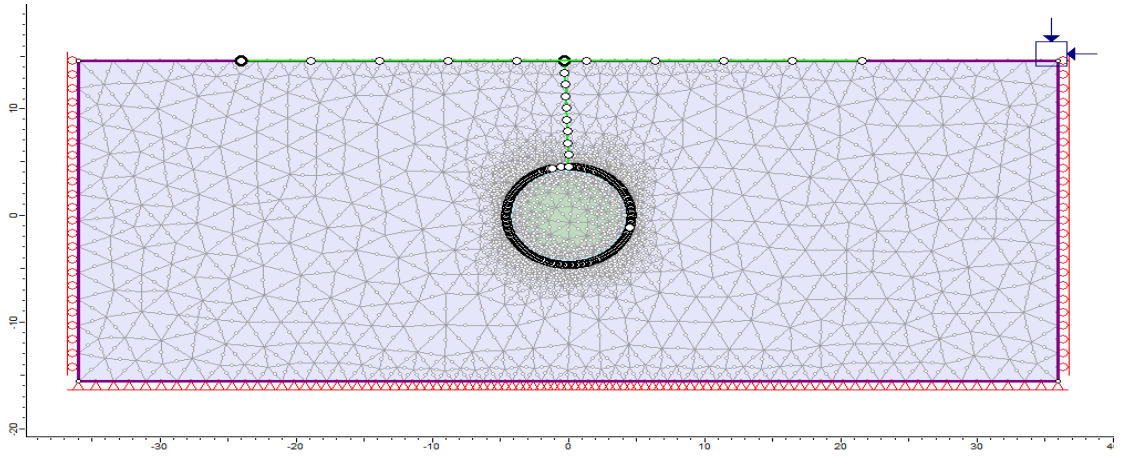
Ακολουθούν ενδεικτικές εικόνες από τα μοντέλα για να συμβάλλουν στην κατανόηση των αποτελεσμάτων που θα προκύψουν στο επόμενο κεφάλαιο.

- **Initial**



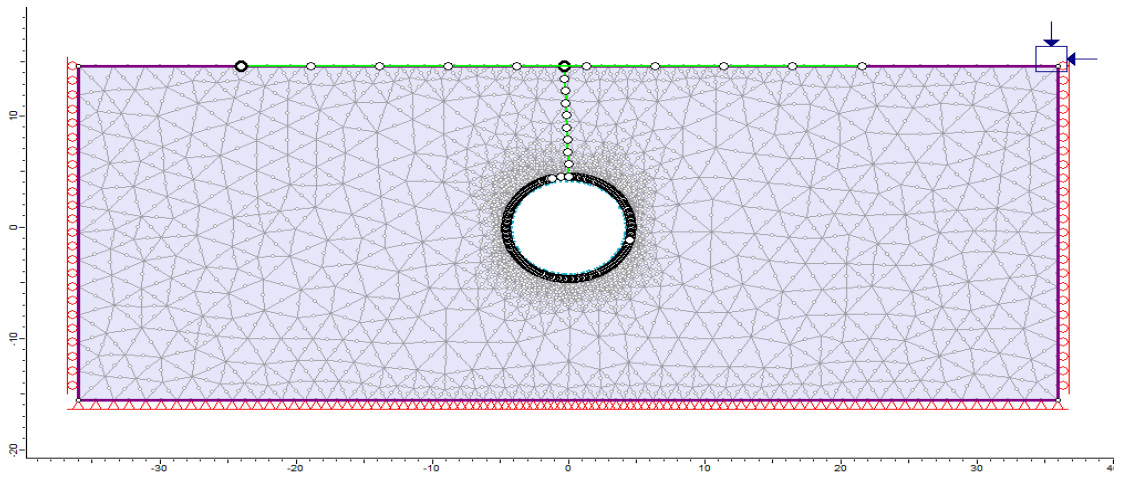
Σχήμα 4.5: Πρώτο στάδιο

- **Tunnel Core Relaxation**



Σχήμα 4.6: Αποτόνωση πυρήνα σήραγγας

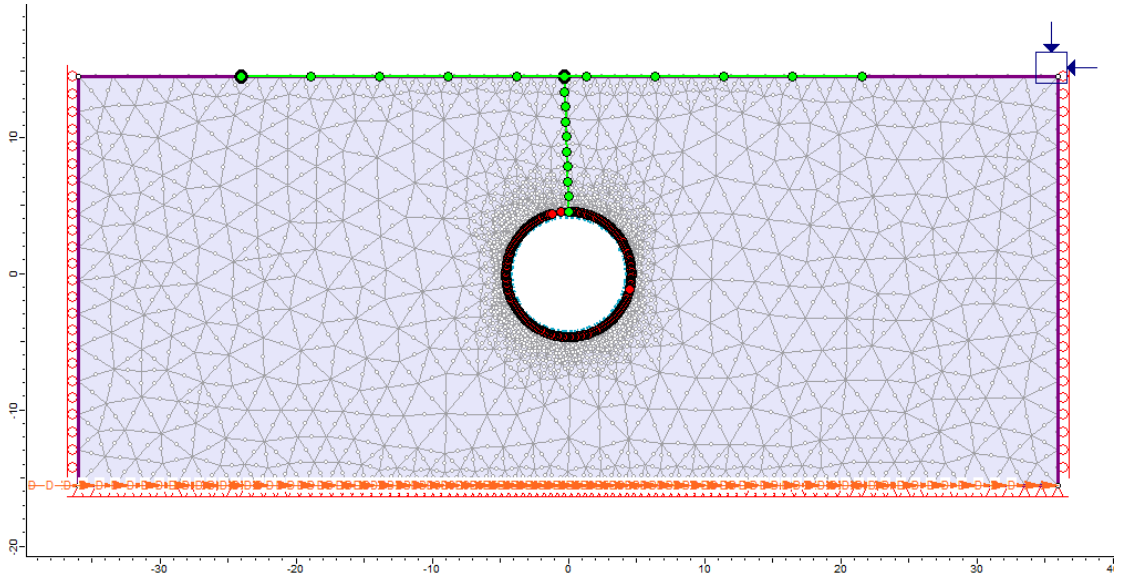
- Tunnel Excavation and support



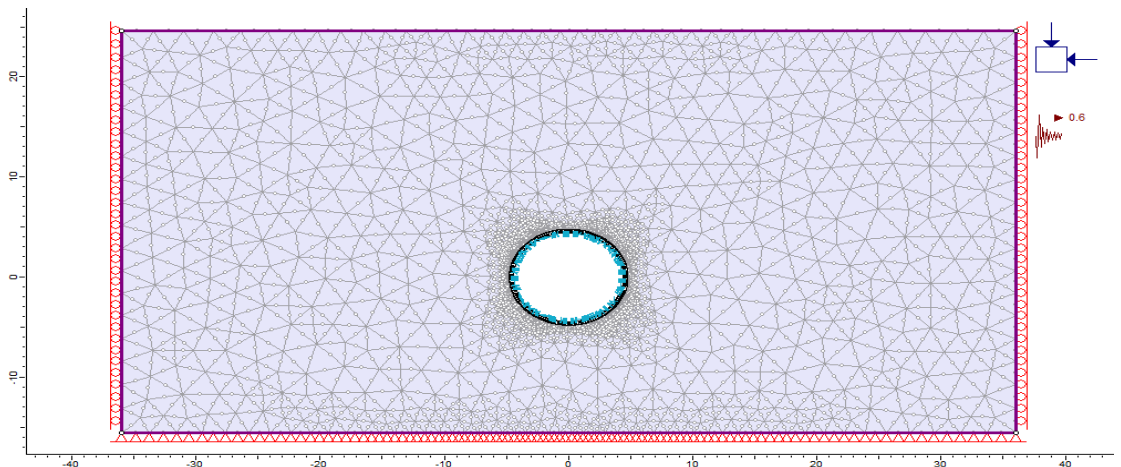
Σχήμα 4.7: Ανασκαφή και υποστήριξη σήραγγας

- Dynamic Excitation μεπαλμόRicker,  $f_n=1$  και  $a_{max}= 0.6$

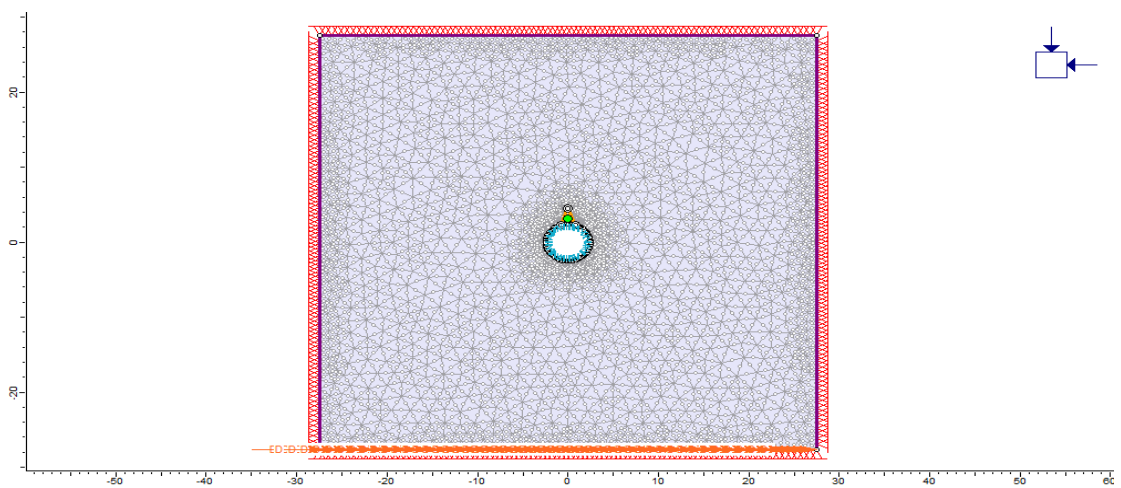




Σχήμα 4.8: Δυναμική διέγερση με παλμό στην κάτω επιφάνεια



Σχήμα 4.9: Ψευδοστατική σεισμική φόρτιση



Σχήμα 4.10: Σήραγγα κυκλικής διατομής με σφήνα και δυναμική ανάλυση (μοντέλο που προετοιμάστηκε αλλά τελικά δεν παρουσιάζεται)

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup> : ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

### Εισαγωγικά Στοιχεία

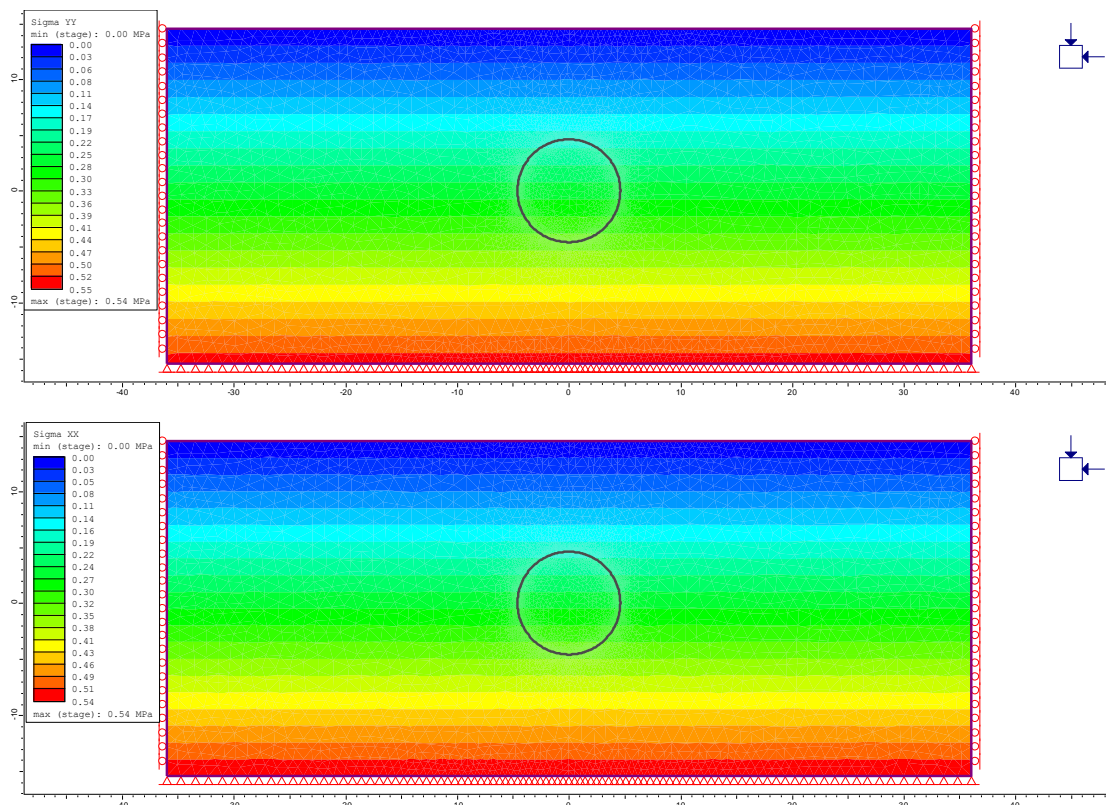
Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρατεθούν όλες οι αριθμητικές αναλύσεις που έχουν γίνει στα μοντέλα που δημιουργήθηκαν. Θα πραγματοποιηθεί σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των αντίστοιχων σταδίων (stages) κάθε μοντέλου. Πιο ειδικά θα συγκρίνουμε τα αποτελέσματα του σταδίου της εκσκαφής της κάθε σήραγγας, με το στάδιο της δυναμικής ανάλυσης, αλλά θα πραγματοποιήσουμε και σύγκριση των αποτελεσμάτων της ψευδοστατικής με την δυναμική ανάλυση.

### 5.1 Αποτελέσματα δυναμικών αριθμητικών αναλύσεων

#### 5.1.1 1<sup>η</sup> σειρά αριθμητικών προσομοιώσεων (Ricker $f_n=1$ , $\alpha=0.6$ )

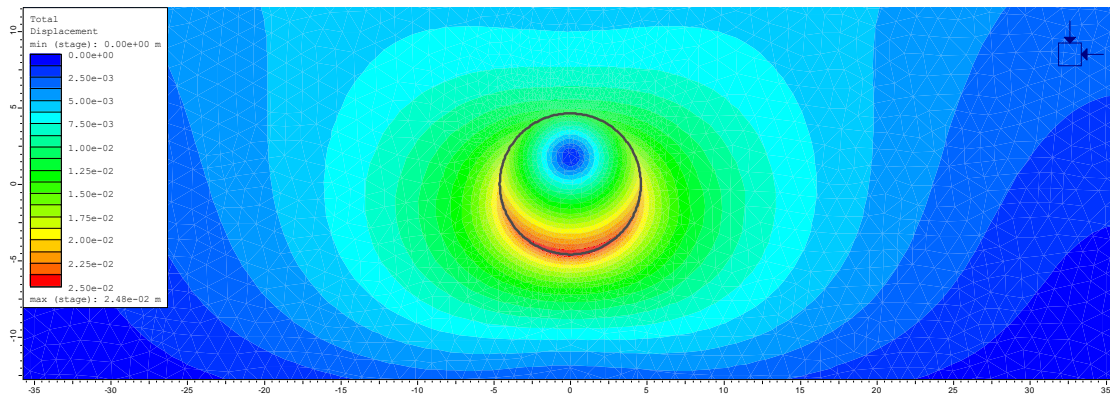
##### Μοντέλο αβαθούς σήραγγας με $h=10\text{m}$ και $E=50\text{ MPa}$

- Αρχικό στάδιο



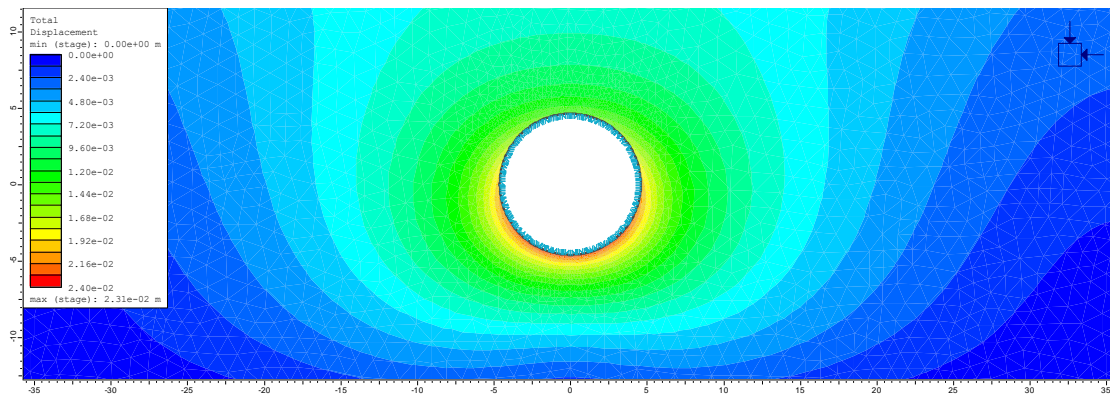
Σχήμα 5.1: Κατακόρυφη και οριζόντια τάση, γεωστατική κατάσταση πριν και μετά την εκσκαφή

- Δεύτερο στάδιο αποτόνωσης



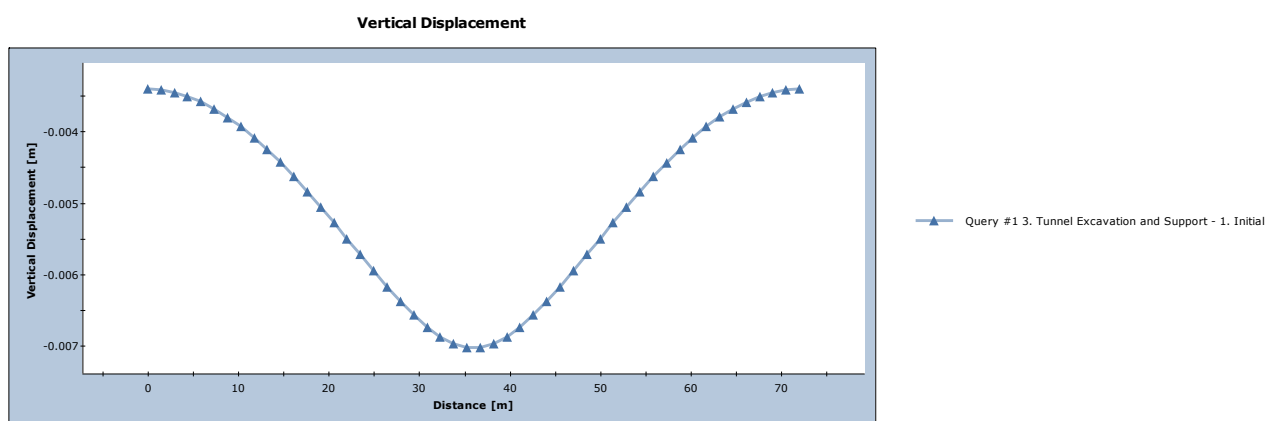
Σχήμα 5.2: Stage 2, μετατοπίσεις στην φάση της αποτόνωσης

- Στάδιο εκσκαφής και τοποθέτηση υποστήριξης



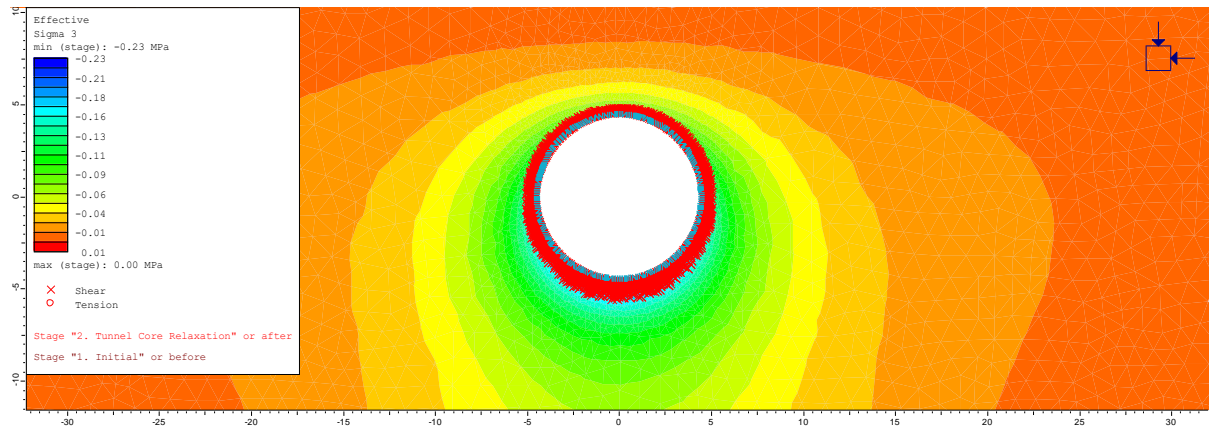
Σχήμα 5.3: Stage 3, μετατοπίσεις γύρω από τη σήραγγα ( $max \rightarrow 0.0231m$ )

- Καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους

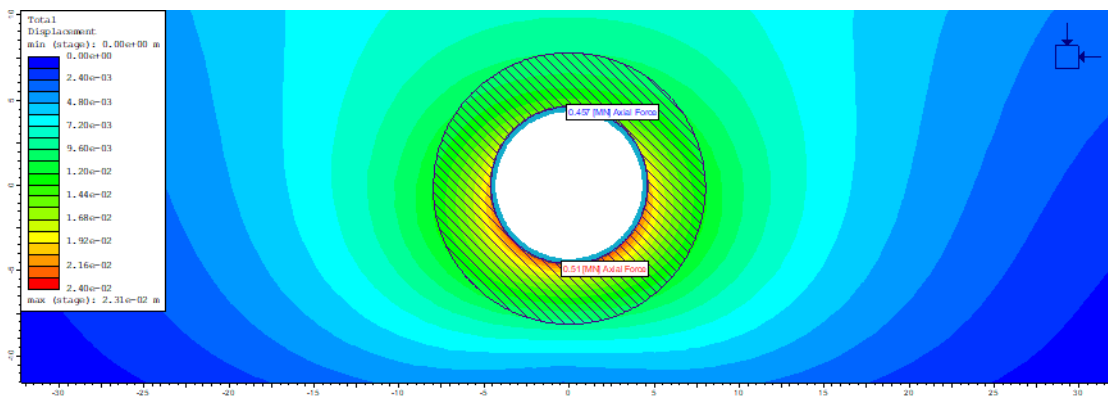


Σχήμα 5.4: Stage 3, καθιζήσεις για την επιφάνεια του εδάφους ( $max \rightarrow -0.007m$ )

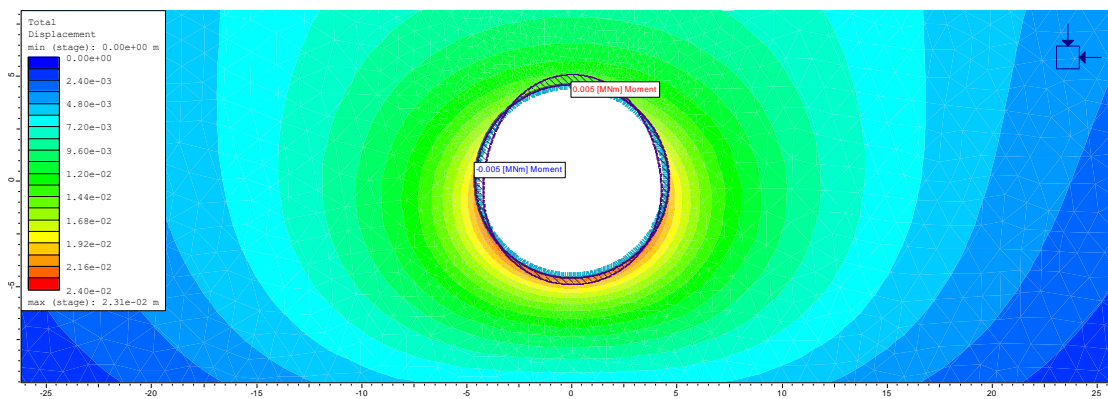
- Ελάχιστη κύρια τάση και σημεία διαρροής της γεωμάζας πέριξ της εκσκαφής



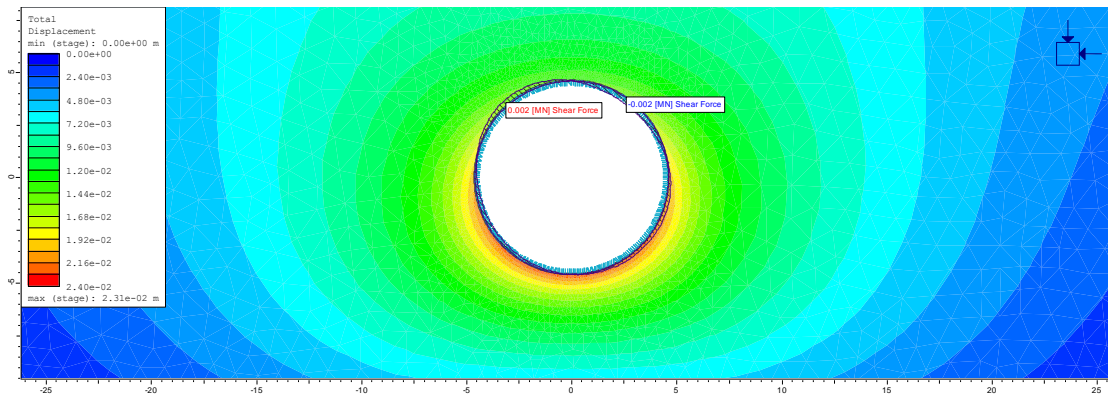
Σχήμα 5.5: Stage 3, σημεία διαρροής της γεωμάζας και εφελκυστική τάση (Yielded Elements)



Σχήμα 5.6: Stage 3, αξονικές δυνάμεις στην επένδυση της σήραγγας

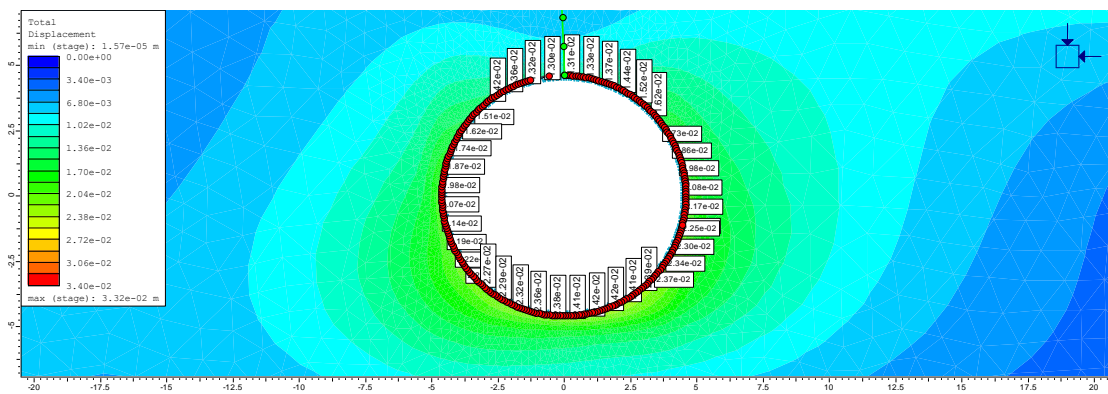


Σχήμα 5.7: Stage 3, Ροπές κάμψης στην επένδυση της σήραγγας

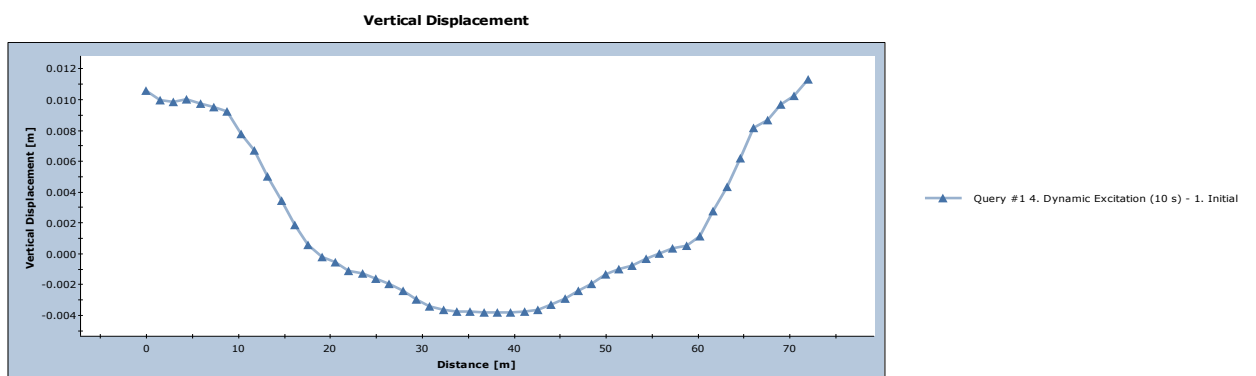


Σχήμα 5.8: Stage 3, Τέμνουσες Δυνάμεις στην επένδυση της σήραγγας

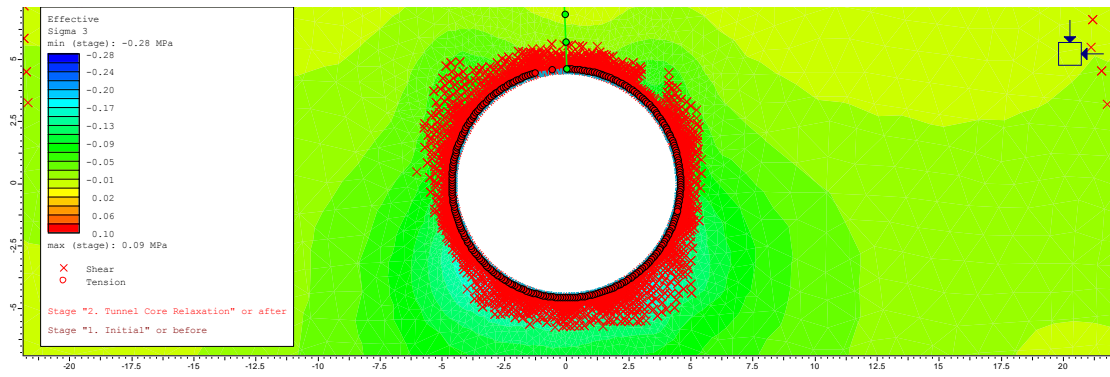
- Προχωρώντας στο επόμενο στάδιο έχουμε τοποθετήσει στο κάτω όριο του μοντέλου τον παλμό Ricker με  $f_n=1$  και  $a=0.6$ . Η δυναμική ανάλυση έχει διάρκεια 10 δευτερόλεπτα. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της δυναμικής ανάλυσης με βάση τις μετατοπίσεις γύρω από την εκσκαφή, τα εντατικά μεγέθη που αναπτύσσονται στην επένδυση της σήραγγας καθώς και η σύγκριση με το προηγούμενο στάδιο της εκσκαφής της σήραγγας.



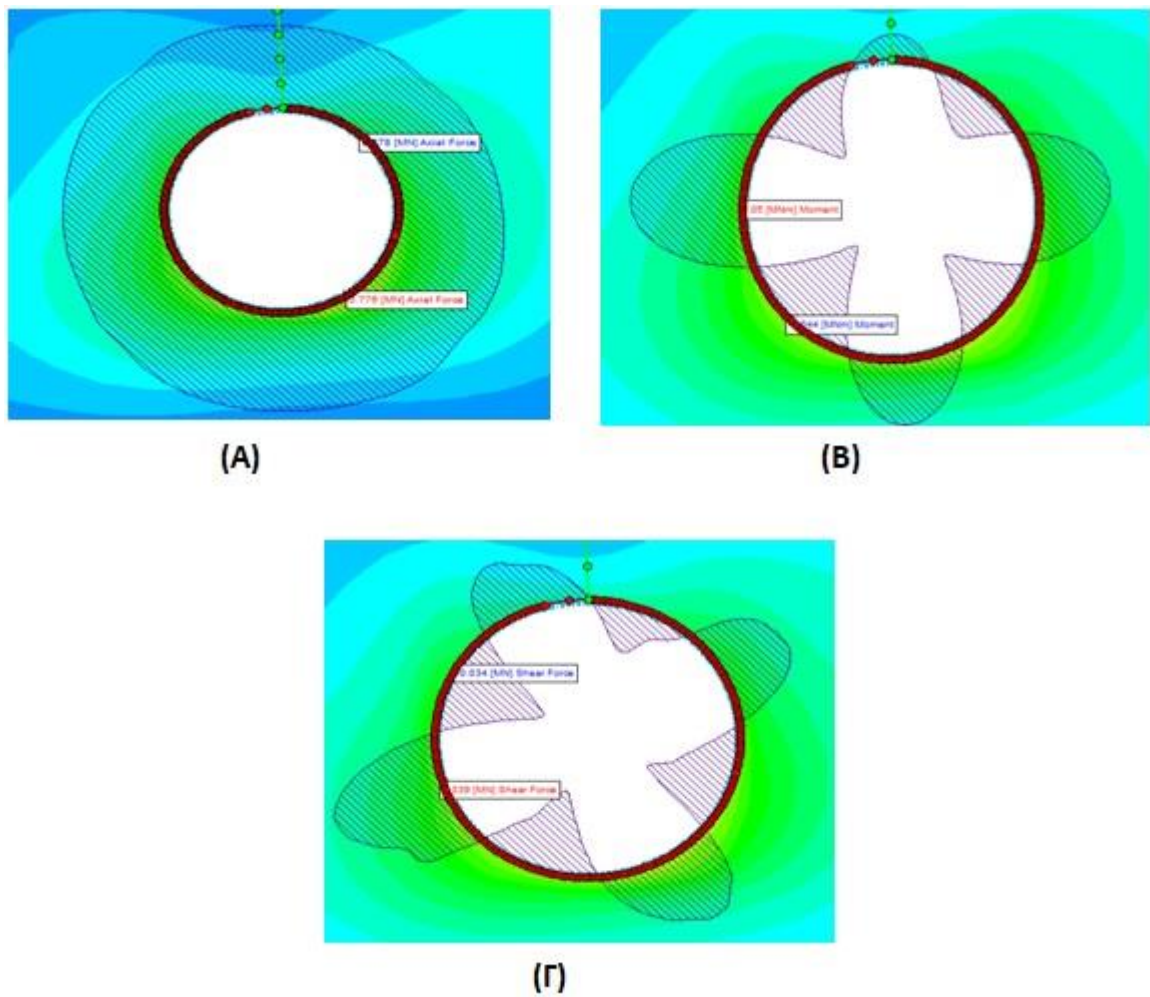
Σχήμα 5.9: Stage 4, Ολικές μετατοπίσεις γύρω από την εκσκαφή(max→0.0332m)



Σχήμα 5.10: Stage 4, Καθιζήσεις στην επιφάνεια(max→-0.004m)



Σχήμα 5.11: Stage 4, στοιχεία διαρροής του εδάφους και ελάχιστη κύρια τάση ( $\sigma_3$ )



Σχήμα 5.12: (A) Αξονικές δυνάμεις (0.578 – 0776MN), (B) Ροπές Κάμψης (0.044 – 0.05 MNm), (Γ) Τέμνουσες Δυνάμεις (0.034 – 0.039MN)

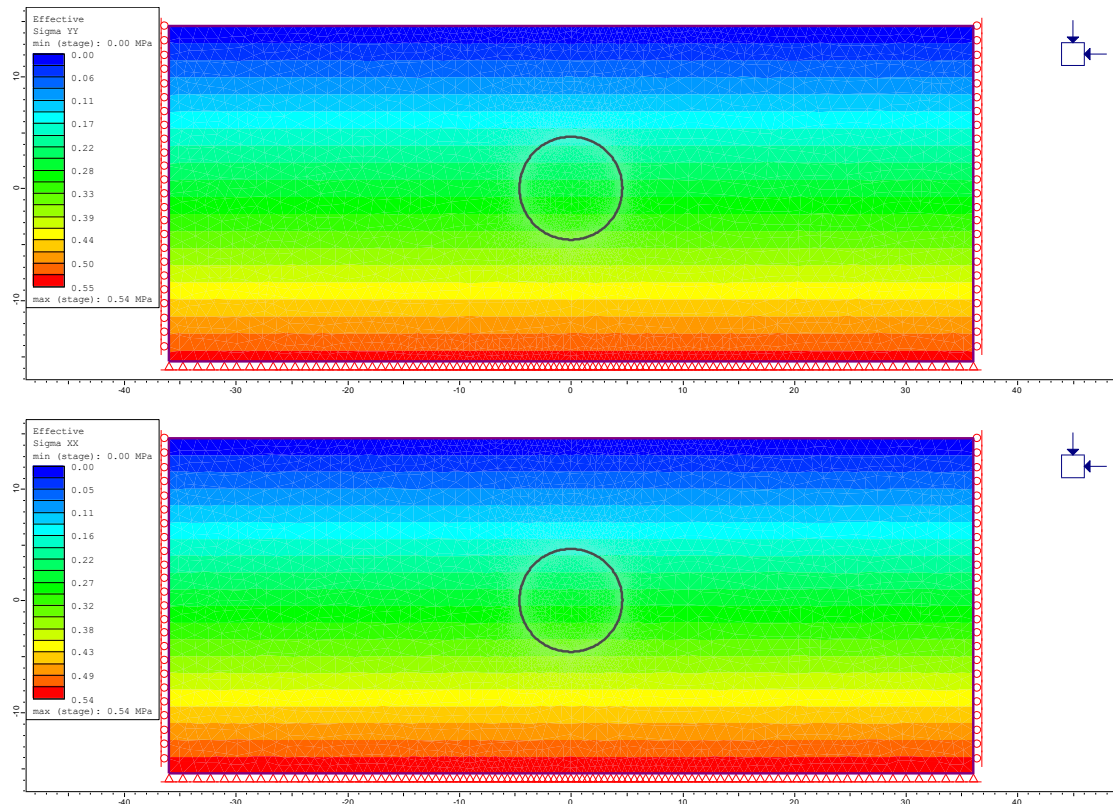
Στην συνέχεια δίνεται πίνακας με τα εντατικά μεγέθη που αναπτύσσονται στην επένδυση της σήραγγας πριν και μετά την σεισμική φόρτιση για να παρατηρηθούν με ευκολία οι αλλαγές που μπορεί να έχουν πραγματοποιηθεί.

**Πίνακας 6: Σύγκριση δυνάμεων, ροπών κάμψης και μετατοπίσεων πριν και μετά την σεισμική φόρτιση,  $h=10m$  και  $E=50MPa$**

Δυνάμεις-Μετατοπίσεις	Stage 3 (εκσκαφή και υποστήριξη)	Stage 4 (δυναμική ανάλυση)
Αξονικές Δυνάμεις min-max(MN)	0.457-0.51	0.578-0.776
Ροπές Κάμψης min-max(MNm)	-0.005-0.005	0.044-0.05
Τέμνουσες Δυνάμεις min-max(MN)	-0.002 -0.002	0.034-0.039
Vertical Displacement Max (m)	-0.007	-0.004

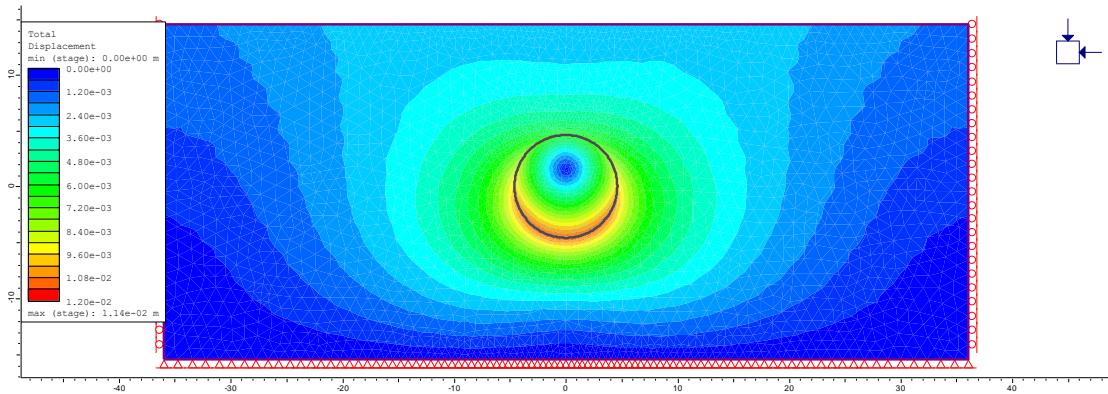
Στο συγκεκριμένο μοντέλο διατηρείται σταθερό το βάθος εκσκαφής αλλά διπλασιάζεται το μέτρο ελαστικότητας (από 50MPa σε 100MPa) και αυξάνεται η συνοχή (από 20KPa σε 50KPa) και η γωνία τριβής (από 25° σε 30°). Έτσι, προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα:

- **Αρχικό στάδιο**



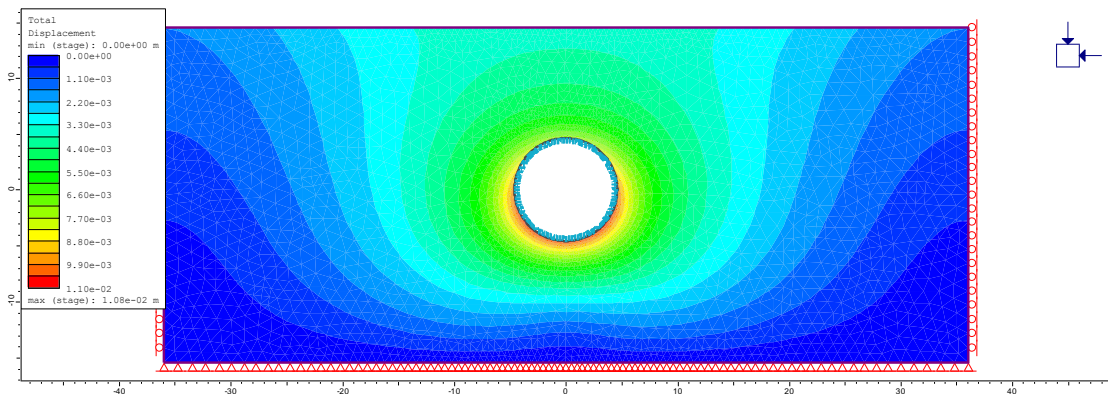
**Σχήμα 5.13: Κατακόρυφη και οριζόντια τάση, γεωστατική κατάσταση πριν την εκσκαφή**

- Δεύτερο στάδιο αποτόνωσης

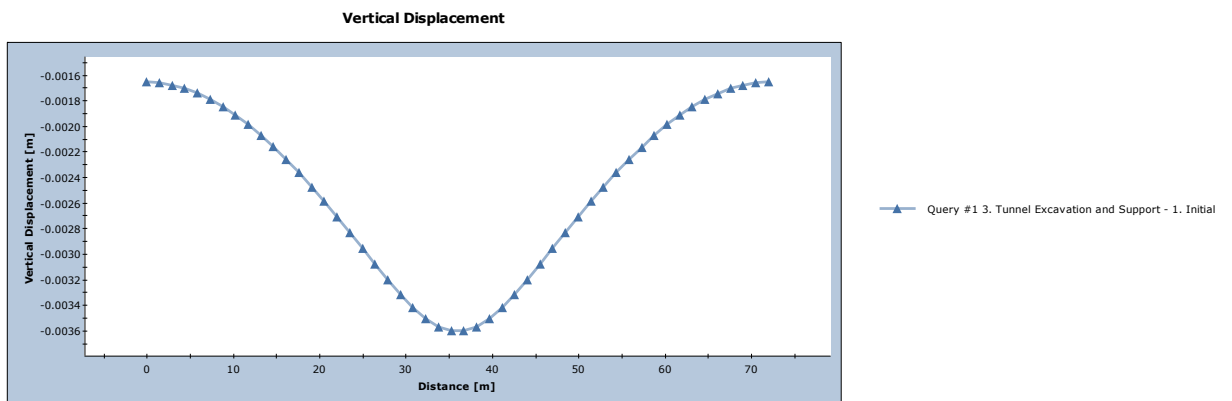


Σχήμα 5.14: Stage 2, Ολικές μετατοπίσεις γύρω από την σήραγγα στην φάση της αποτόνωσης

- Στάδιο εκσκαφής και τοποθέτηση υποστήριξης

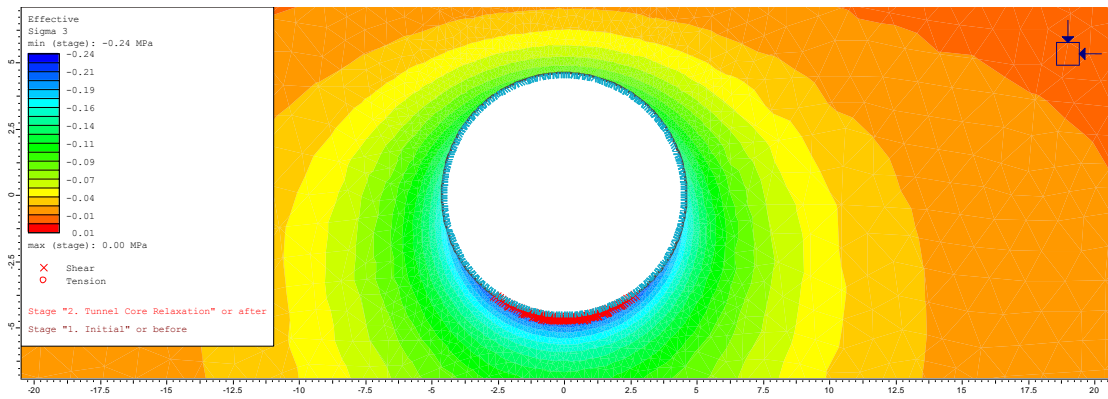


Σχήμα 5.15: Ολικές μετατοπίσεις γύρω από την σήραγγα ( $max \rightarrow 0.0108m$ )

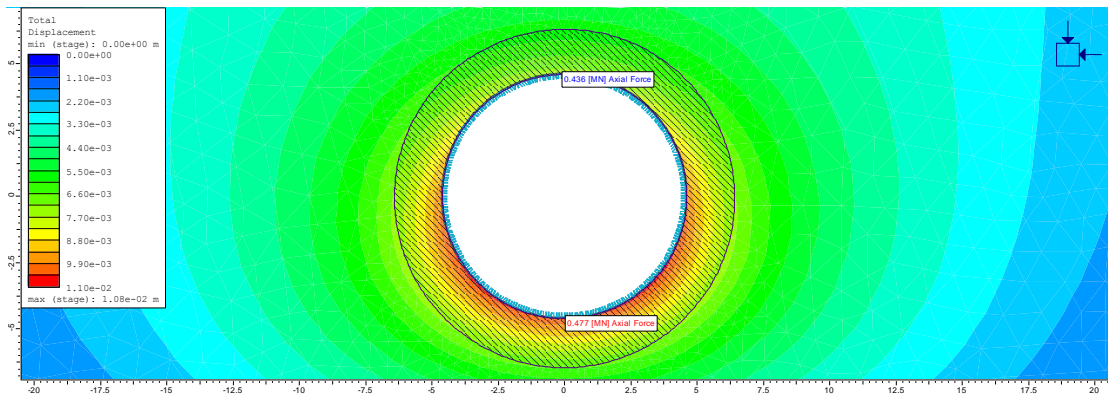


Σχήμα 5.16: Καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους ( $max \rightarrow -0.0036m$ )

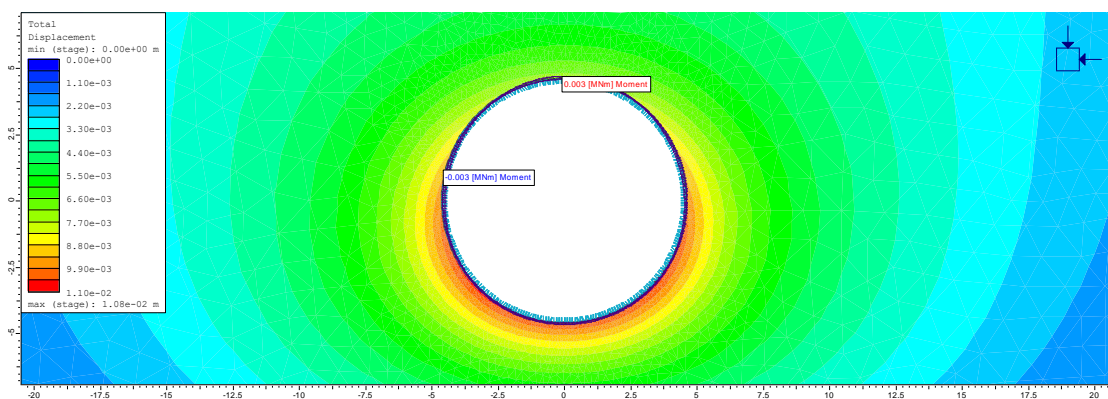




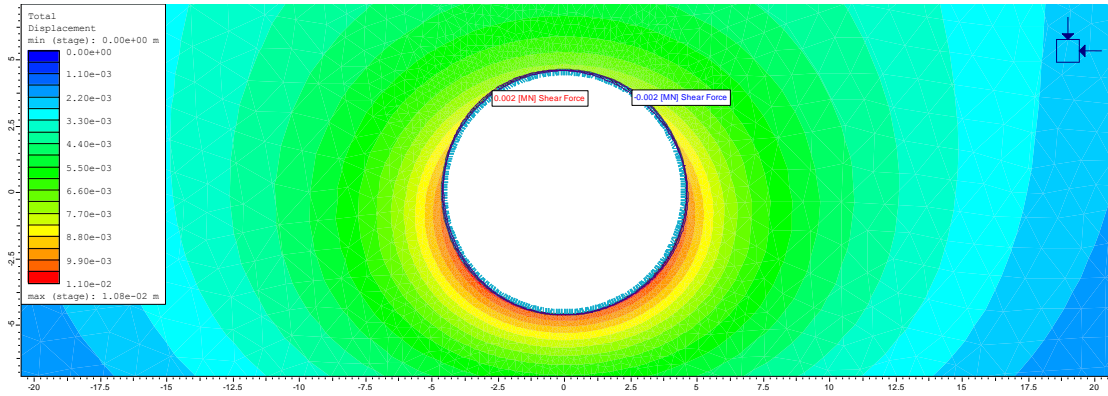
**Σχήμα 5.17: Stage 3, Ελάχιστη κύρια τάση και σημεία διαρροής της γεωμάζας**



**Σχήμα 5.18: Stage 3, Αξονικές δυνάμεις στην επένδυση της σήραγγας (0.436-0.477MN)**

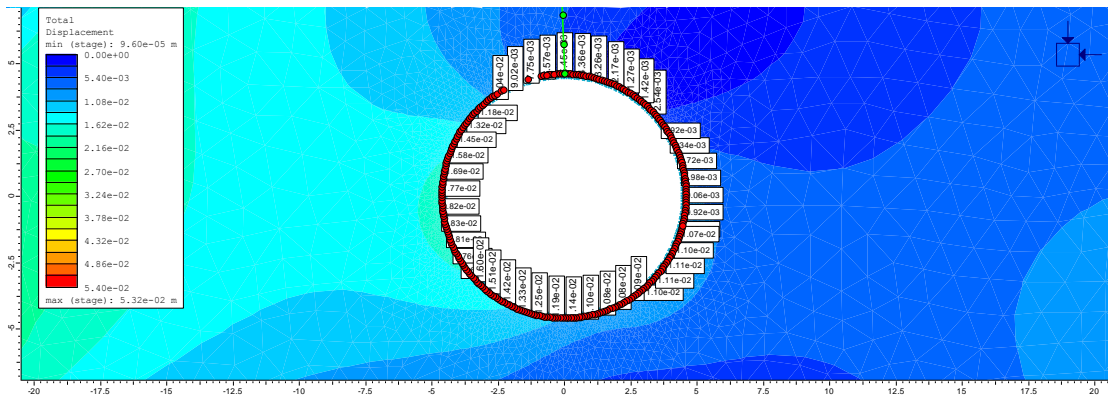


**Σχήμα 5.19: Stage 3, Ροπές κάμψης στην επένδυση της σήραγγας(-0.003- 0.003MNm)**

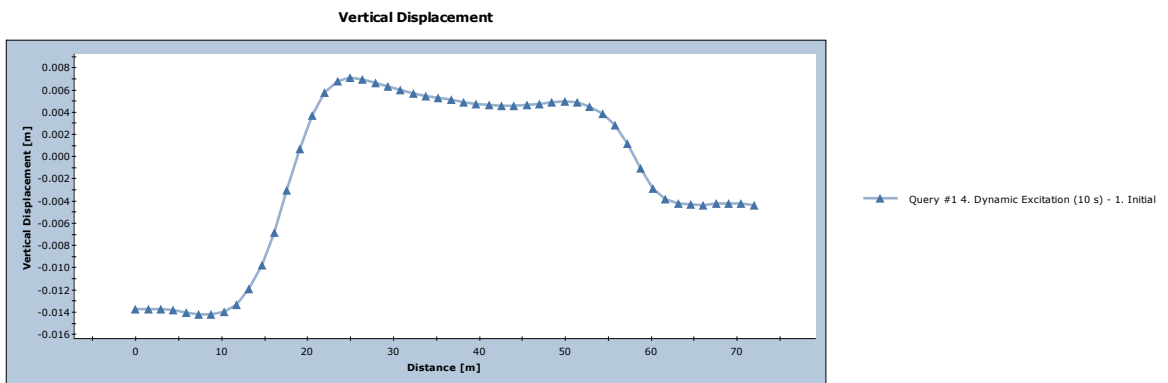


**Σχήμα 5.20: Stage 3, Τέμνουσες Δυνάμεις στην επένδυση της σήραγγας (-0.002 – 0.002MN)**

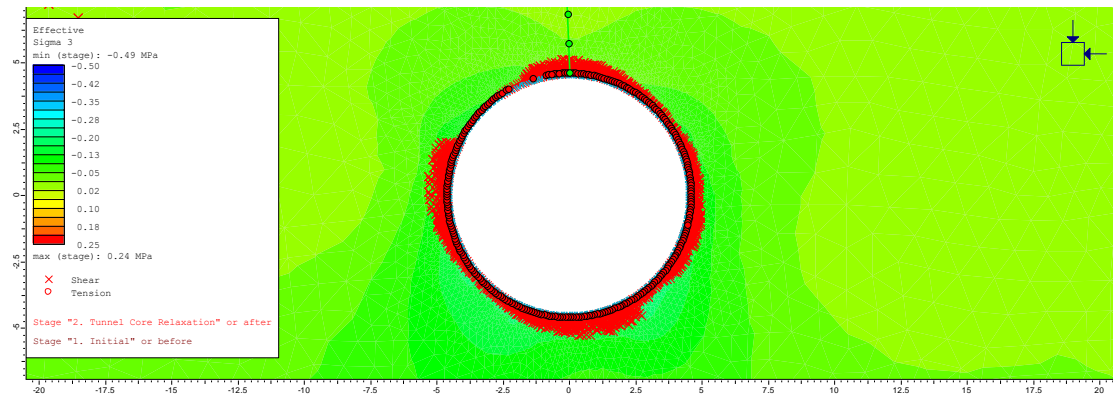
- Στο επόμενο στάδιο, εφαρμόζεται σεισμική φόρτιση με τον παλμό Ricker. Στο προηγούμενο κεφάλαιο δόθηκαν τα χαρακτηριστικά για τον παλμό Ricker. Με τον ίδιο τρόπο θα κινηθούμε και σε αυτό το μοντέλο, και στη συνέχεια θα παραθέσουμε τις εικόνες και θα συγκρίνουμε τα αποτελέσματα με το προηγούμενο στάδιο.



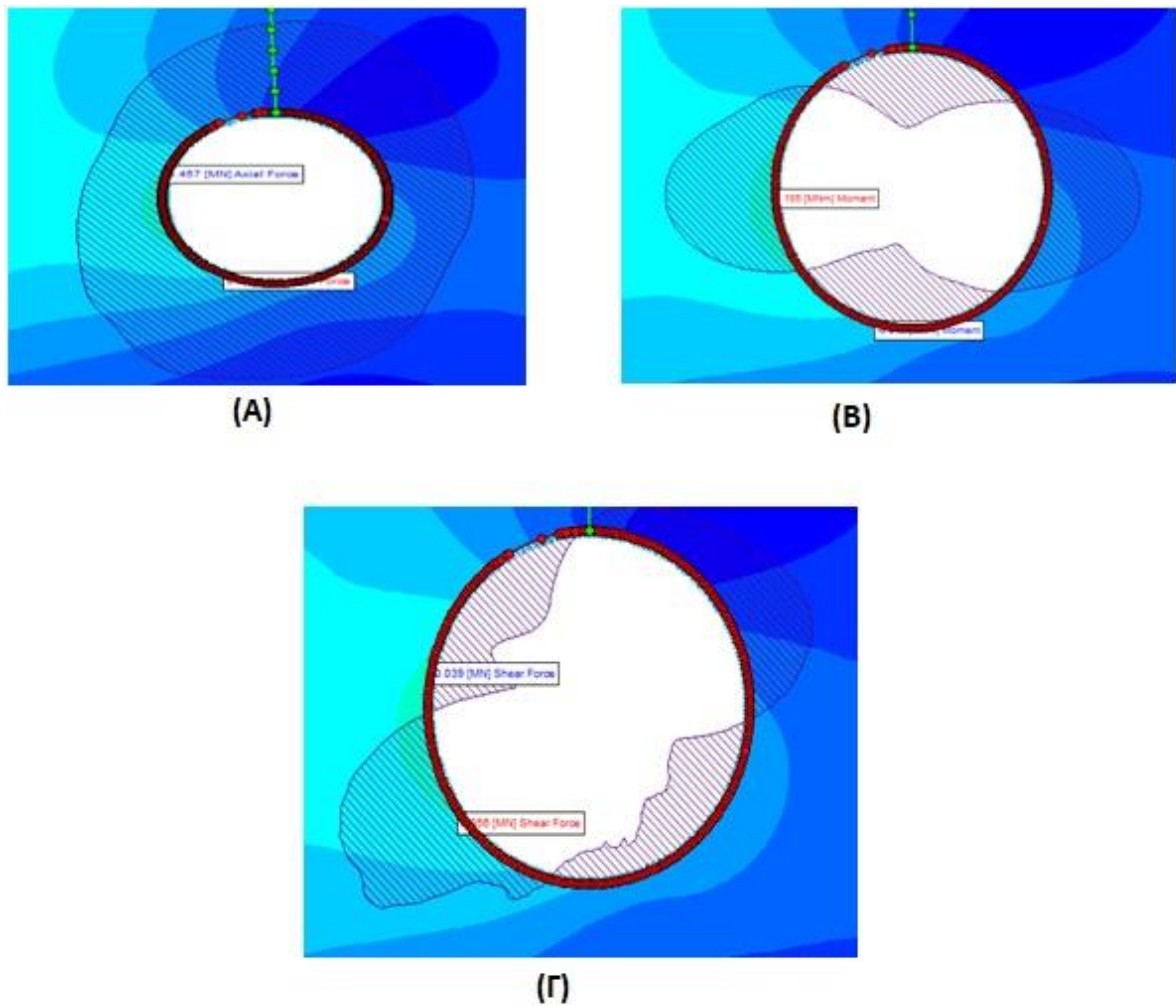
**Σχήμα 5.21: Stage 4, ολικές μετατοπίσεις γύρω από την εκσκαφή(max→0.0532m)**



**Σχήμα 5.22: Stage 4, Καθιζήσεις στην επιφάνεια (max→0.006m)**



Σχήμα 5.23: Stage 4, στοιχεία διαρροής του εδάφους και ελάχιστη κύρια τάση ( $\sigma_3$ )



Σχήμα 5.24: (A) Αξονικές δυνάμεις (0.457 – 0.89MN), (B) Ροπές Κάμψης (0.07 – 0.105 MNm), (Γ) Τέμνουσες Δυνάμεις (0.039 – 0.056 MN)

Στην συνέχεια δίνεται πίνακας με τις δυνάμεις και τις ροπές που αναπτύσσονται στην επένδυση της σήραγγας πριν και μετά την σεισμική φόρτιση, καθώς και με τις μέγιστες καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους, ώστε να είναι ευδιάκριτες οι αλλαγές που μπορεί να έχουν πραγματοποιηθεί λόγω της δυναμικής φόρτισης.

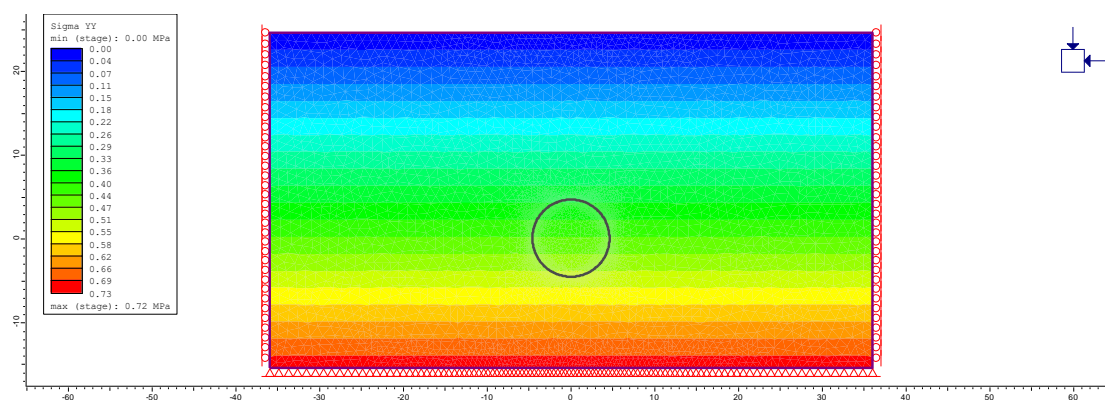
**Πίνακας 7: Σύγκριση δυνάμεων πριν και μετά την σεισμική φόρτιση,  $h=10m$  και  $E= 100 MPa$**

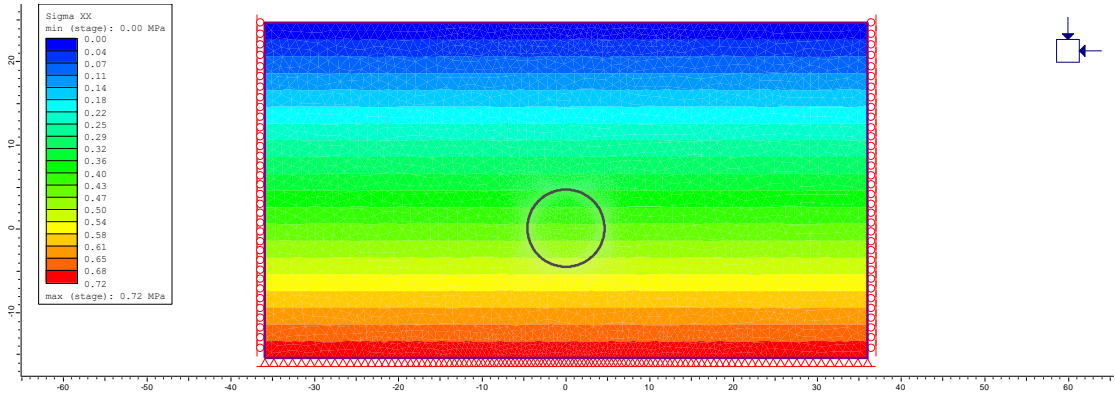
Δυνάμεις	Stage 3 (εκσκαφή και υποστήριξη)	Stage 4 (δυναμική ανάλυση)
Αξονικές Δυνάμεις min-max (MN)	0.436-0.477	0.457-0.89
Ροπές Κάμψης min-max( MNm)	-0.003-0.003	0.07-0.105
Τέμνουσες Δυνάμεις min-max (MN)	-0.002-0.002	0.039-0.056
Vertical Displacement max ( m )	-0.0036	0.006

**Μοντέλο αβαθούς σήραγγας με  $h=20m$  και  $E_{soil}= 50 MPa$**

Σε αυτό το μοντέλο διπλασιάζεται το βάθος της σήραγγας και διατηρείται σταθερό το μέτρο ελαστικότητας στην τιμή του πρώτου μοντέλου. Έτσι οι τιμές για την συνοχή και την γωνία τριβής μένουν ίδιες. Οι τιμές αναφέρονται στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο, και πιο συγκεκριμένα στην παράγραφο 4.2.

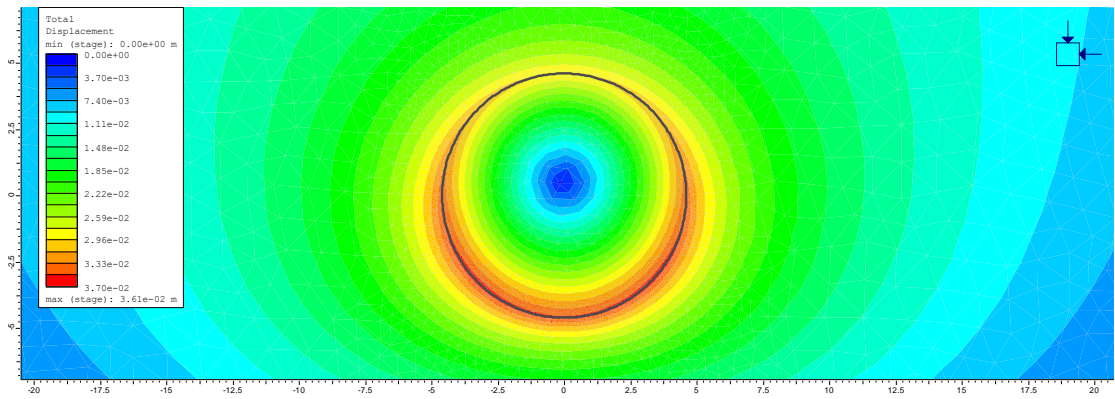
- Αρχικό στάδιο, Stage 1





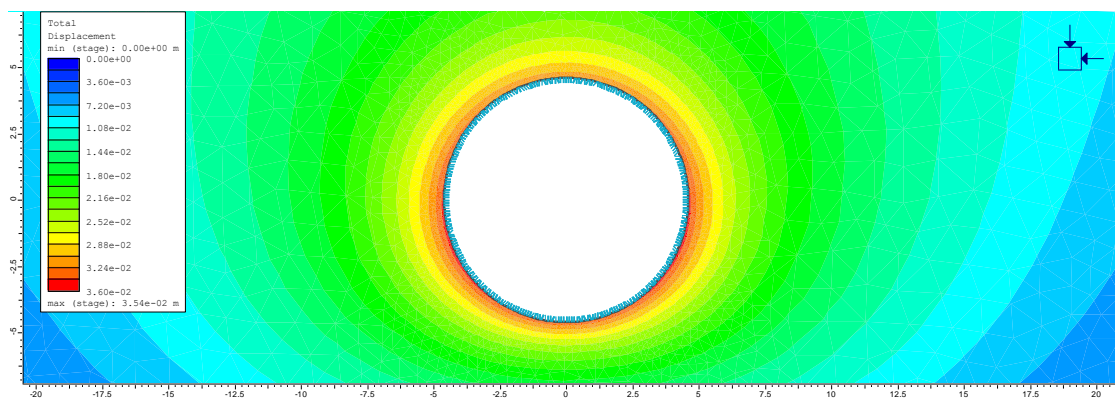
**Σχήμα 5.25: Κατακόρυφη και οριζόντια τάση, γεωστατική κατάσταση πριν την εκσκαφή**

- Δεύτερο στάδιο αποτόνωσης

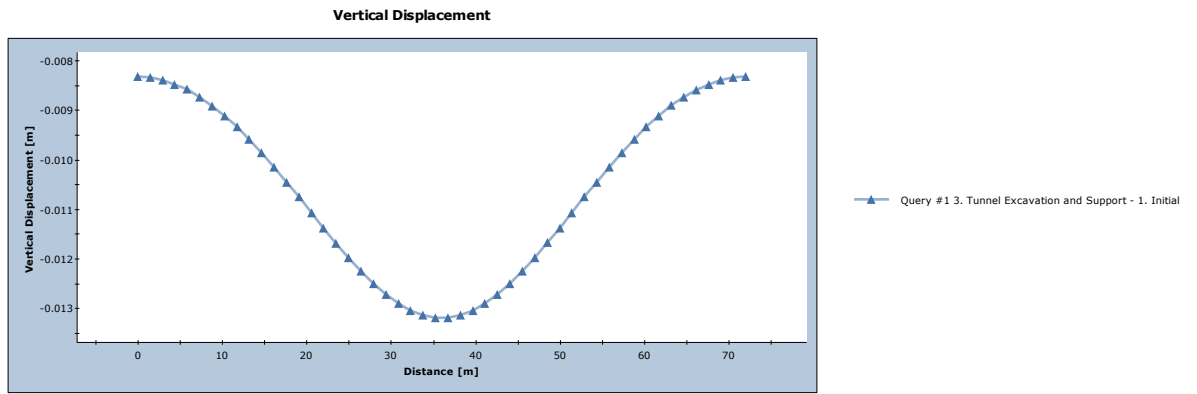


**Σχήμα 5.26: Ολικές μετατοπίσεις γύρω από την σήραγγα στη φάση της αποτόνωσης**

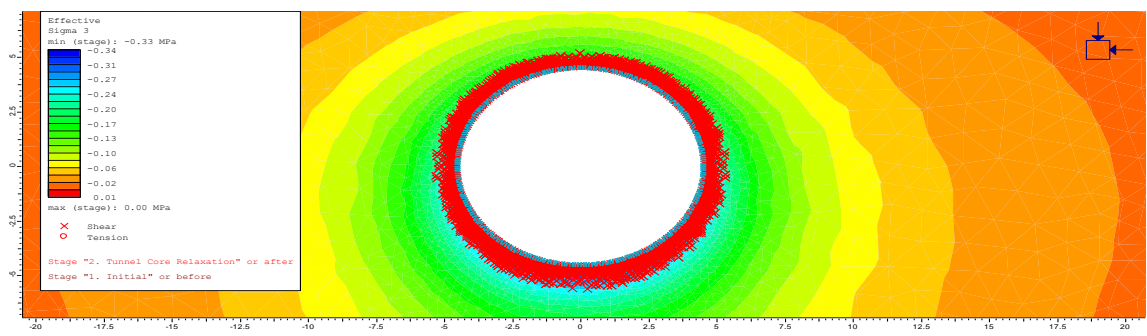
- Στάδιο εκσκαφής και υποστήριξης



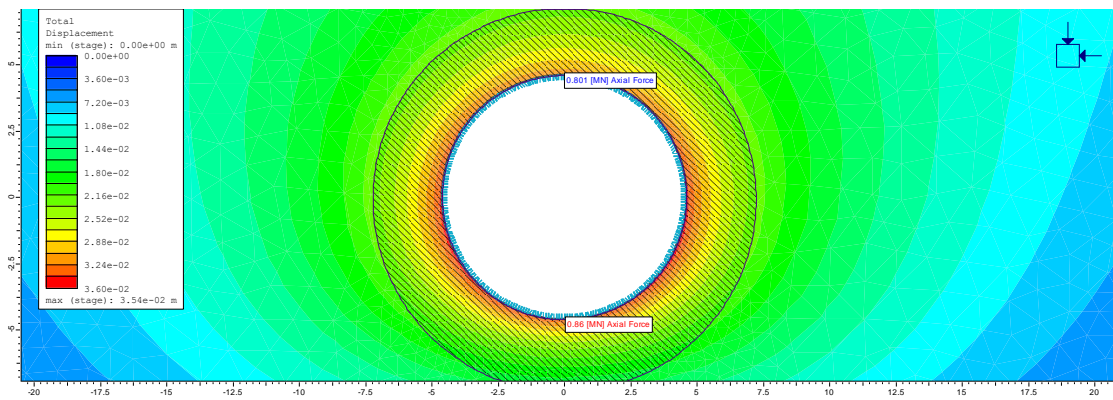
**Σχήμα 5.27: Μετατοπίσεις γύρω από την σήραγγα (max → 0.0354m)**



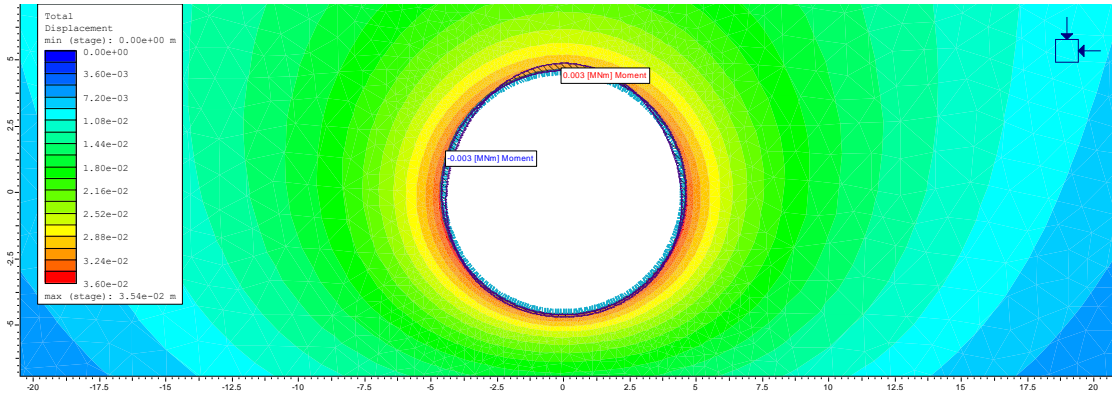
**Σχήμα 5.28: Καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους(max→-0.013m)**



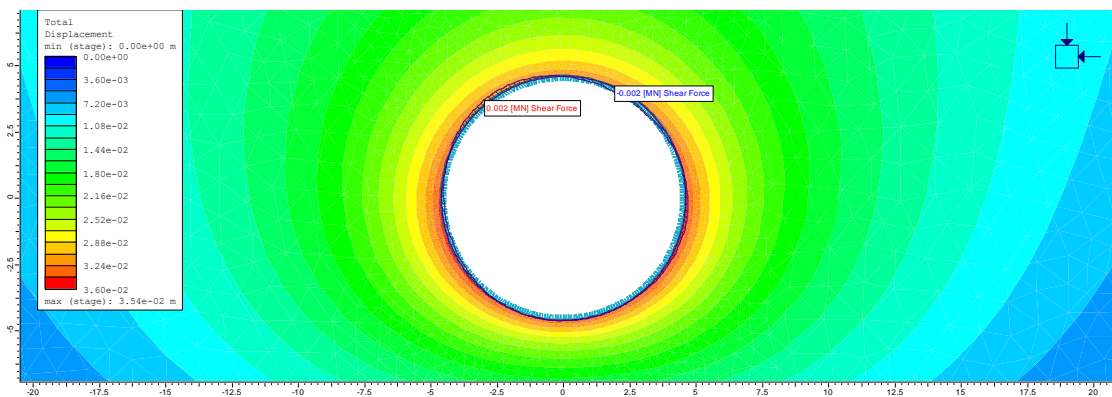
**Σχήμα 5.29: Σημεία διαρροής της γεωμάζας (YieldedElements) και ελάχιστη κύρια τάση (EffectiveSigma 3)**



**Σχήμα 5.30: Αξονικές Δυνάμεις στην επένδυση της σήραγγας (0.801-0.86MN)**

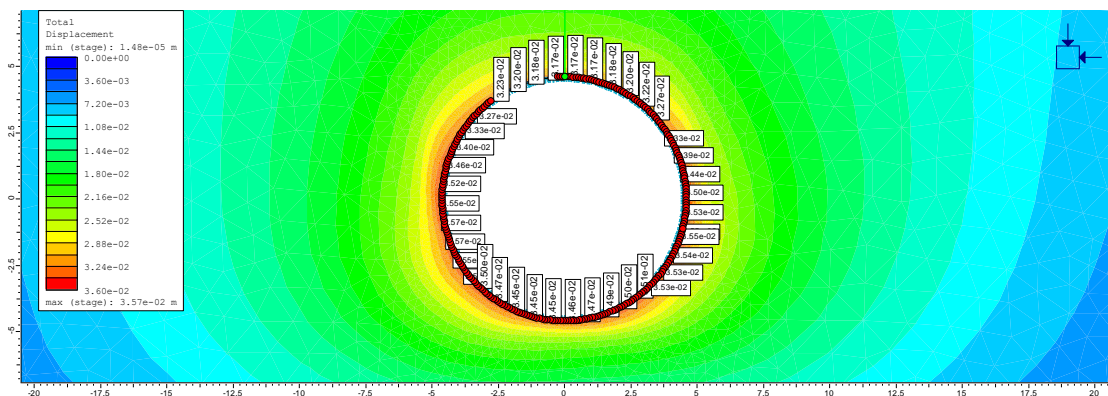


Σχήμα 5.31: Ροπές κάμψης στην επένδυση της σήραγγας (-0.003- 0.003 MNm)

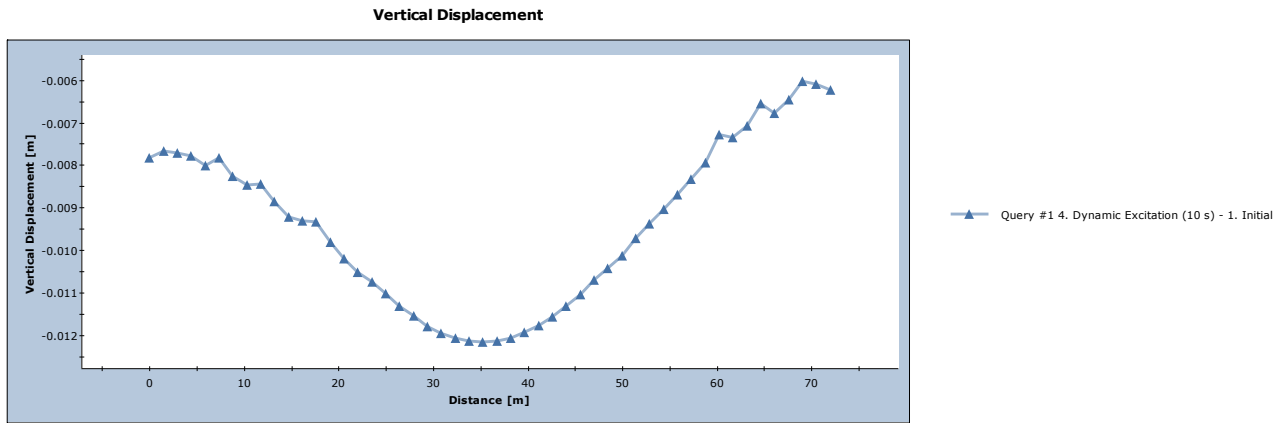


Σχήμα 5.32: Τέμνουσες Δυνάμεις στην επένδυση της σήραγγας (-0.002 – 0.002 MN)

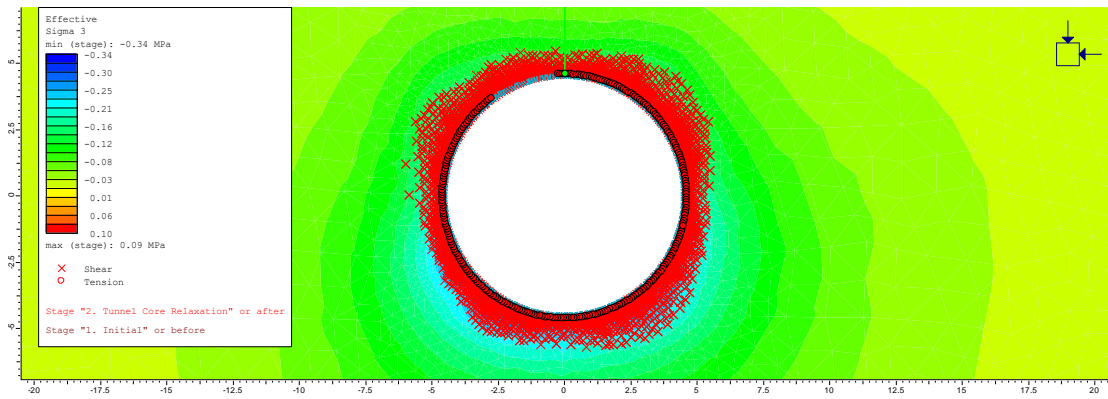
- Τοποθέτηση σεισμικής φόρτισης με τον παλμό Ricker,  $f_n=1$  και  $\alpha =0.6$ . Με τον ίδιο τρόπο θα κινηθούμε και σε αυτό το μοντέλο. Αυτά που μας ενδιαφέρουν στο Stage 4 είναι τα παρακάτω:



Σχήμα 5.33: Ολικές μετατοπίσεις γύρω από την εκσκαφή (max→0.0357m)

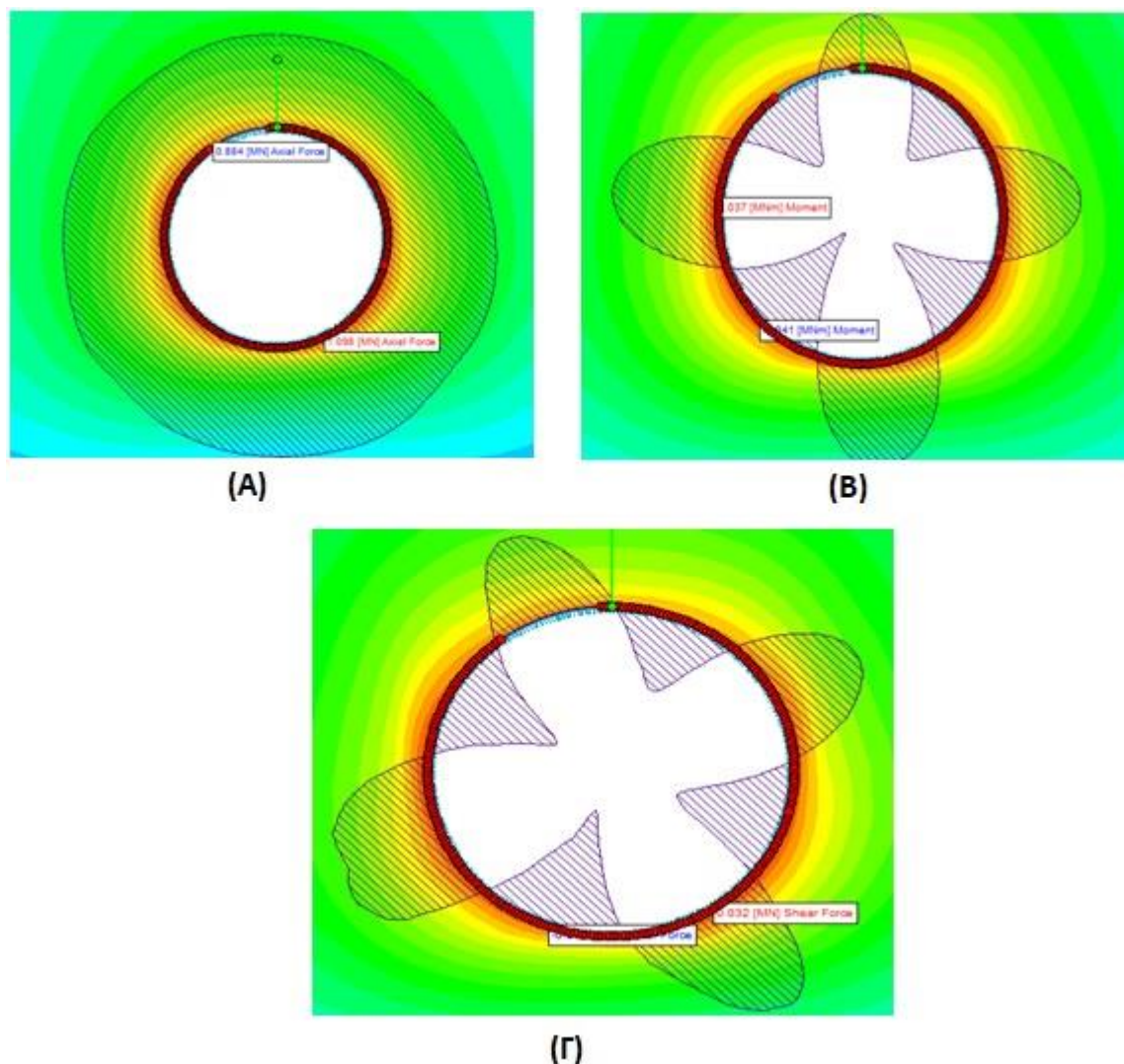


**Σχήμα 5.34: Καθιζήσεις στην επιφάνεια, Stage 4 (max→-0.012m)**



**Σχήμα 5.35: Στοιχεία διαρροής γεωμάζας και εφελκυστική τάση, Stage 4**





Σχήμα 5.36: (A) Αξονικές δυνάμεις (0.884 – 1.098MN), (B) Ροπές κάμψης (- 0.041 – 0.037MNm), (Γ) Τέμνουσες Δυνάμεις (-0.033 – 0.032MN)

Πίνακας 8: Σύγκριση δυνάμεων γύρω από την σήραγγα πριν και μετά την σεισμική φόρτιση ( $h=20m$ ,  $E=50MPa$ )

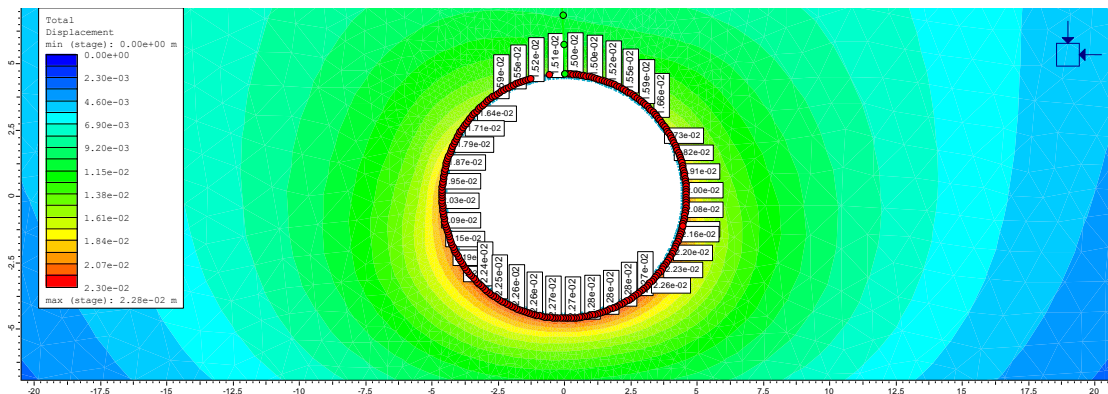
Δυνάμειςκαι Μετατοπίσεις	Stage 3 (εκσκαφή και υποστήριξη)	Stage 4 (δυναμική ανάλυση)
Αξονικές Δυνάμεις min-max(MN)	0.801-0.86	0.884-1.098
Ροπές Κάμψης min-max(MNm)	-0.003-0.003	-0.041-0.037
Τέμνουσες Δυνάμεις Min-max(MN)	-0.002-0.002	-0.033-0.032
Vertical Displacement max (m)	-0.013	-0.012

### 5.1.2 2<sup>η</sup> σειρά αριθμητικών προσομοιώσεων (Ricker fn=2, α= 0.6)

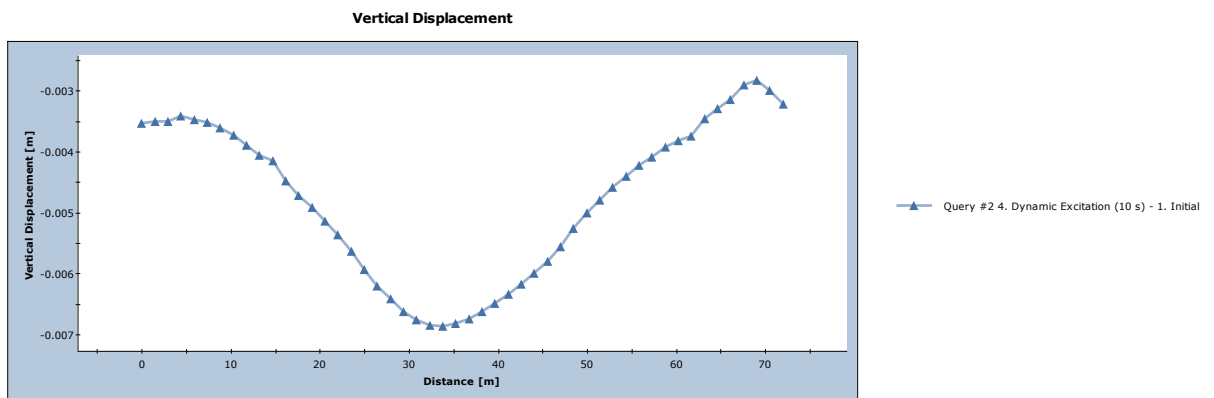
Όσον αφορά τα πρώτα 3 στάδια για τα μοντέλα μας σε αυτή τη σειρά προσομοιώσεων είναι ακριβώς ίδια με τα αντίστοιχα στάδια των μοντέλων της πρώτης σειράς προσομοιώσεων που παρουσιάστηκαν παραπάνω. Ωστόσο, το ενδιαφέρον σε αυτόν τον παλμό εστιάζεται στο στάδιο της δυναμικής ανάλυσης (Stage 4) και στην αποτύπωση σε εικόνες και τιμές των δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση της σήραγγας, των καθιζήσεων στην επιφάνεια και των ολικών μετατοπίσεων γύρω από την σήραγγα. Τέλος στη σύγκριση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα με τον 1<sup>ο</sup> παλμό Ricker.

Μοντέλο με  $h=10$  και  $E_{soil}= 50$  MPa

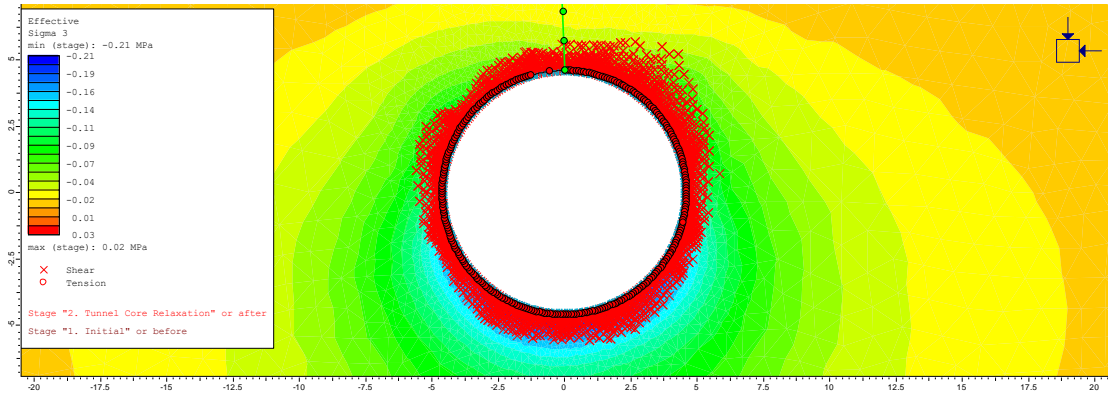
- Stage 4, Σεισμική φόρτιση



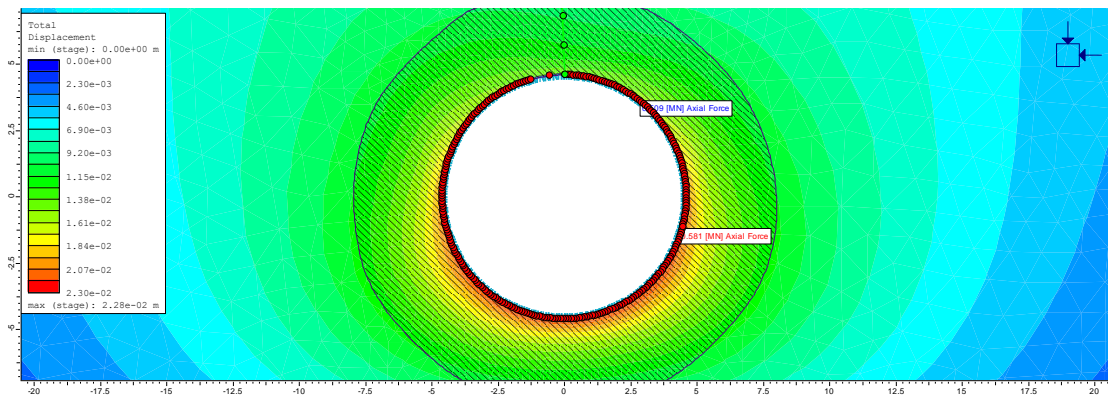
Σχήμα 5.37: Ολικές μετατοπίσεις γύρω από την εκσκαφή ( $max \rightarrow 0.028m$ )



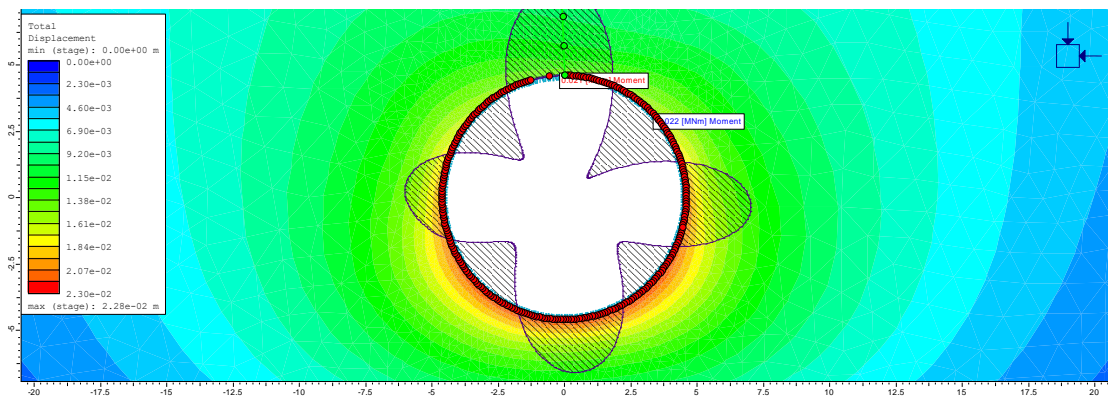
Σχήμα 5.38: Stage 4, Καθιζήσεις στην επιφάνεια ( $max \rightarrow -0.007m$ )



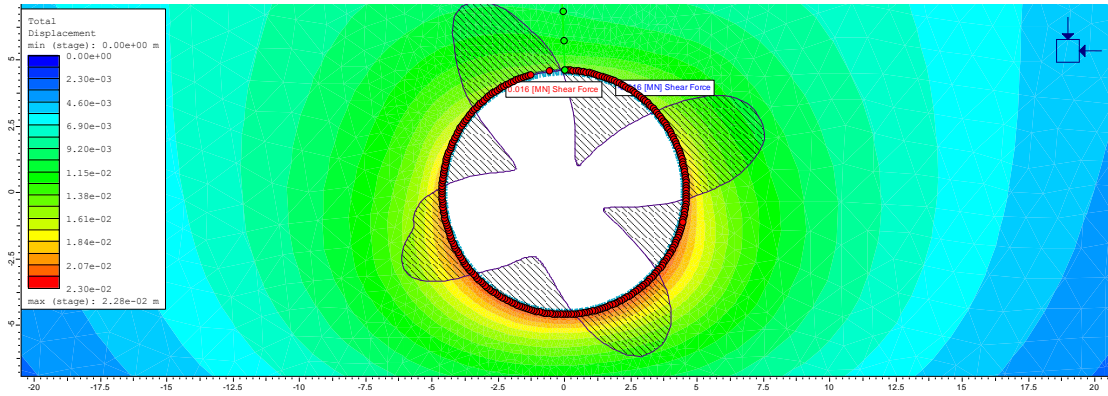
Σχήμα 5.39: Ελάχιστη κύρια τάση (EffectiveSigma 3) και στοιχεία διαρροής της γεωμάζας



Σχήμα 5.40: Αξονικές δυνάμεις (0.509 – 0.581 MN)



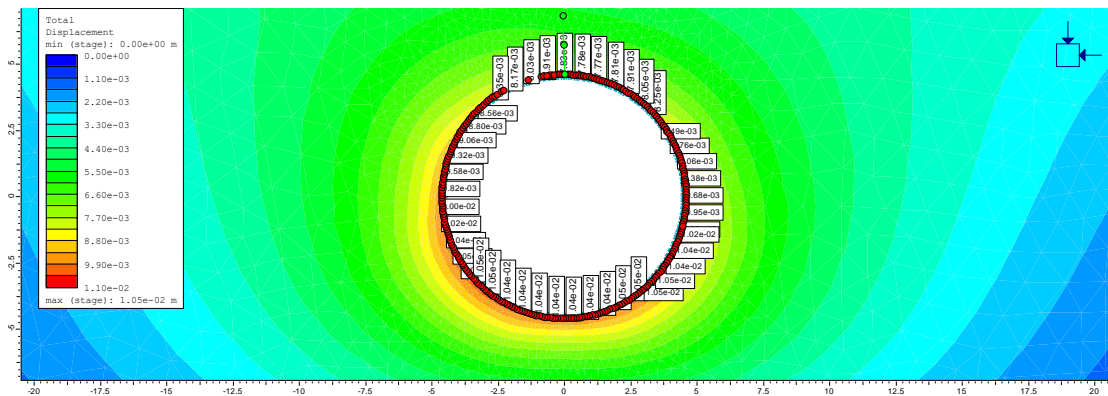
Σχήμα 5.41: Ροπές Κάμψης (-0.022 – 0.021 MNm)



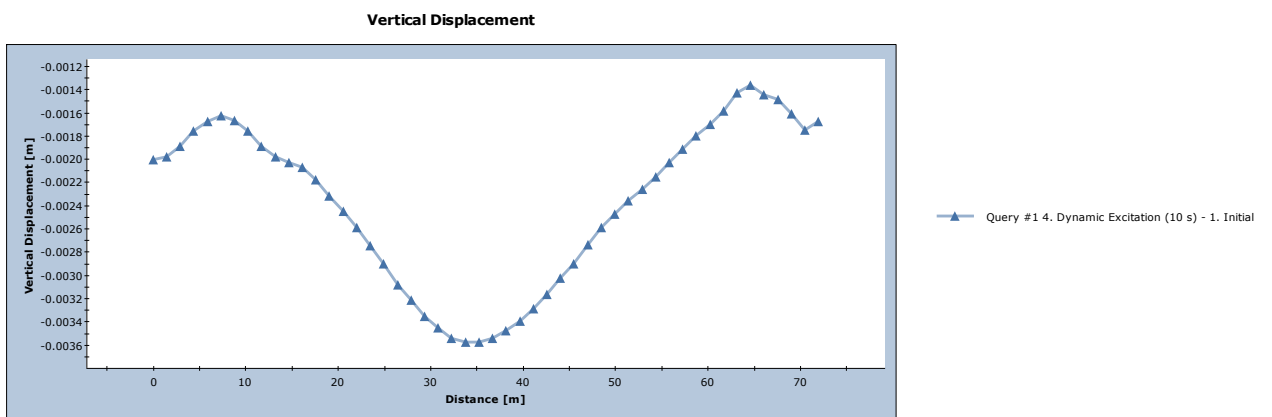
Σχήμα 5.42: Τέμνουσες Δυνάμεις (-0.016 – 0.016 MN)

Μοντέλο με H=10m και  $E_{soil} = 100MPa$

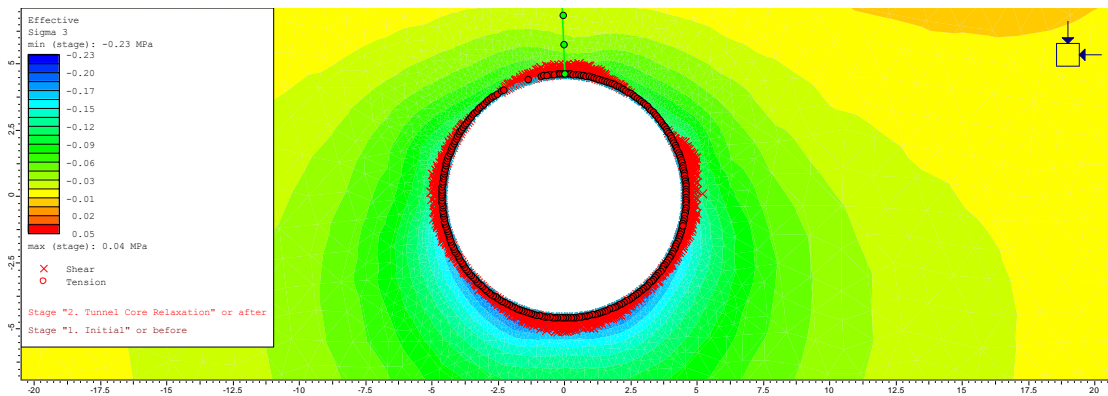
- Stage 4, Σεισμική Φόρτιση



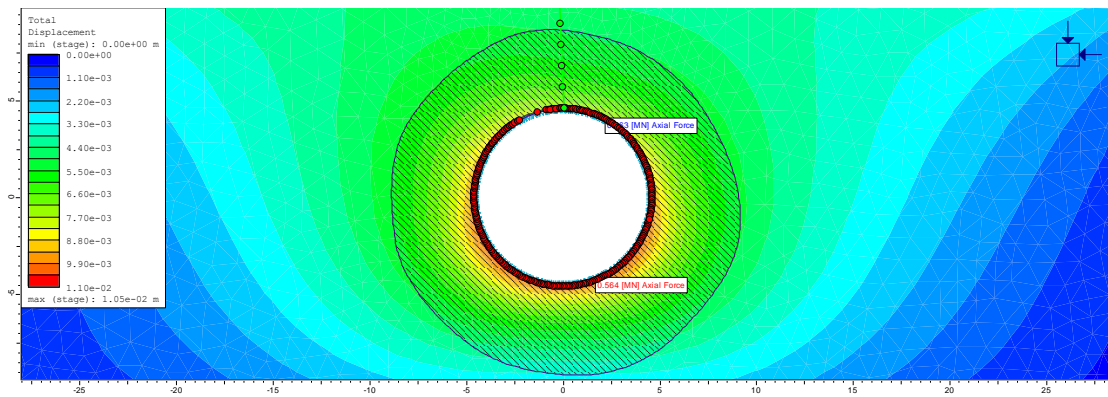
Σχήμα 5.43: Ολικές Μετατοπίσεις γύρω από την εκσκαφή ( $max \rightarrow 0.0105m$ )



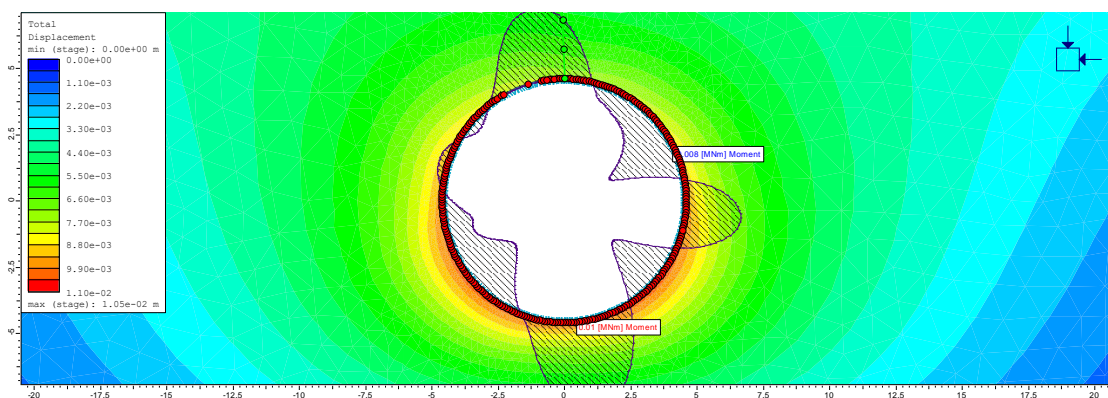
Σχήμα 5.44: Καθιζήσεις στην επιφάνεια ( $max \rightarrow -0.0036m$ )



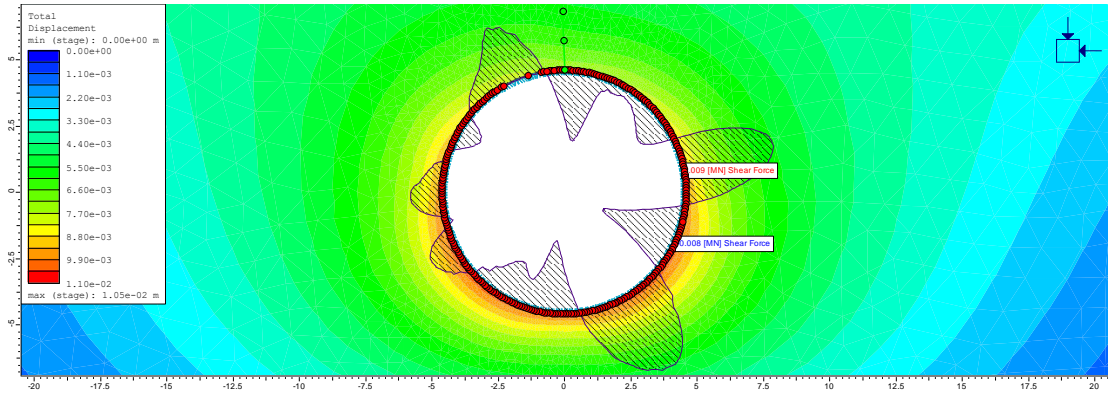
Σχήμα 5.45: Ελάχιστη κύρια τάση και στοιχεία διαρροής της γεωμάζας



Σχήμα 5.46: Αξονικές Δυνάμεις (0.463 – 0.564 MN)



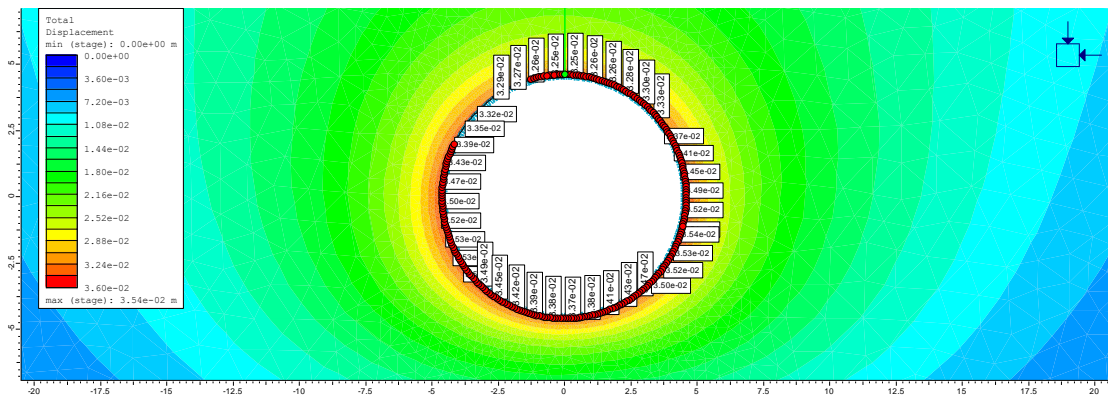
Σχήμα 5.47: Ροπές Κάμψης (-0.008 – 0.01 MNm)



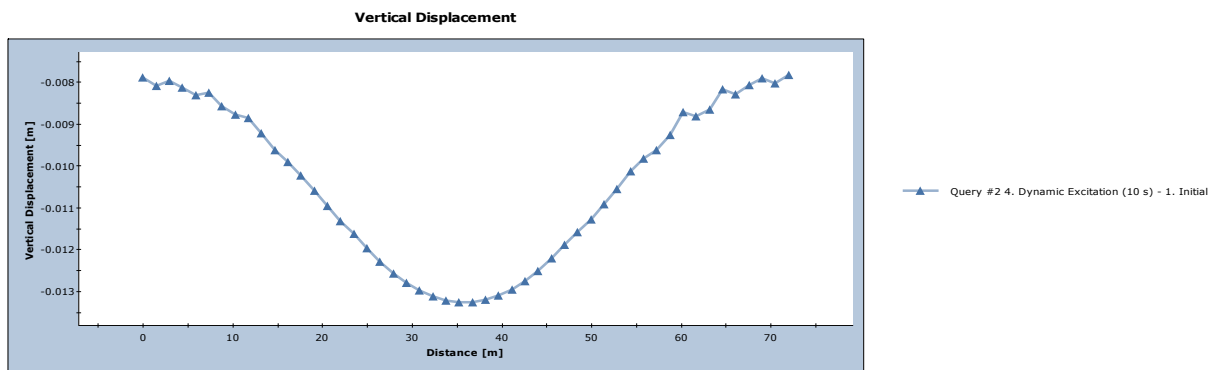
Σχήμα 5.48: Τέμνουσες Δυνάμεις (-0.008 – 0.009 MN)

Μοντέλο με H=20m και  $E_{soil} = 50 \text{ MPa}$

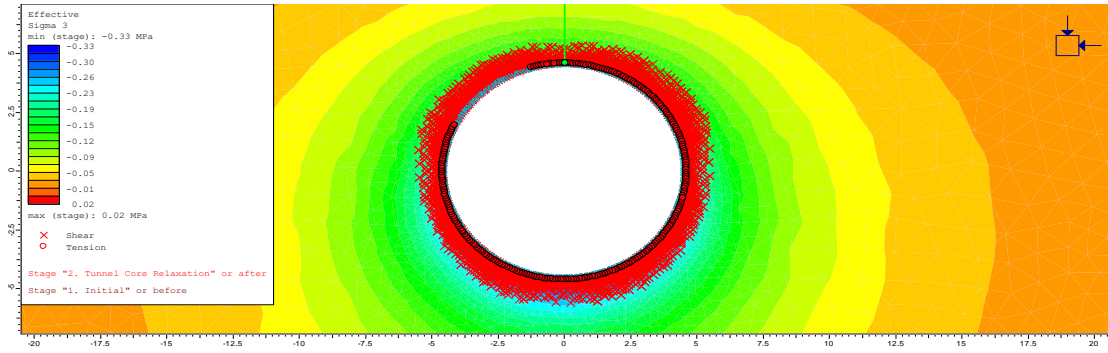
- Stage 4, Σεισμική Φόρτιση



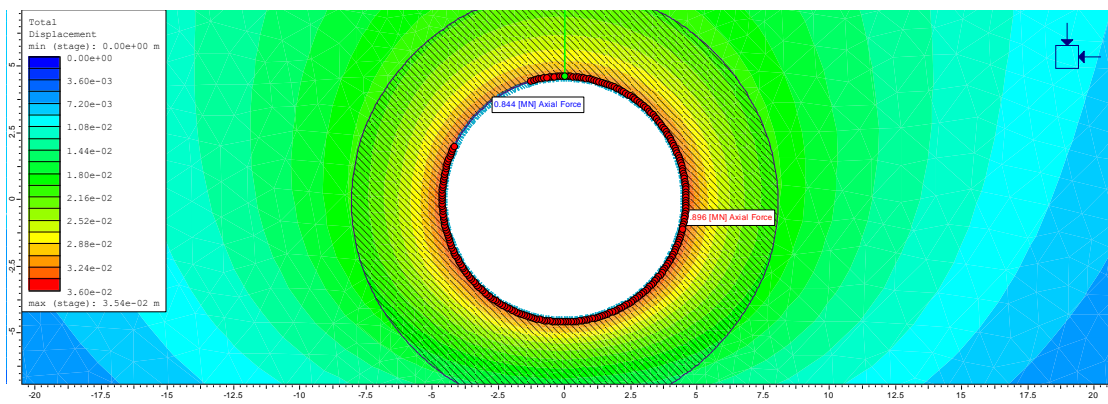
Σχήμα 5.49: Ολικές μετατοπίσεις γύρω από την εκσκαφή ( $max \rightarrow 0.0354m$ )



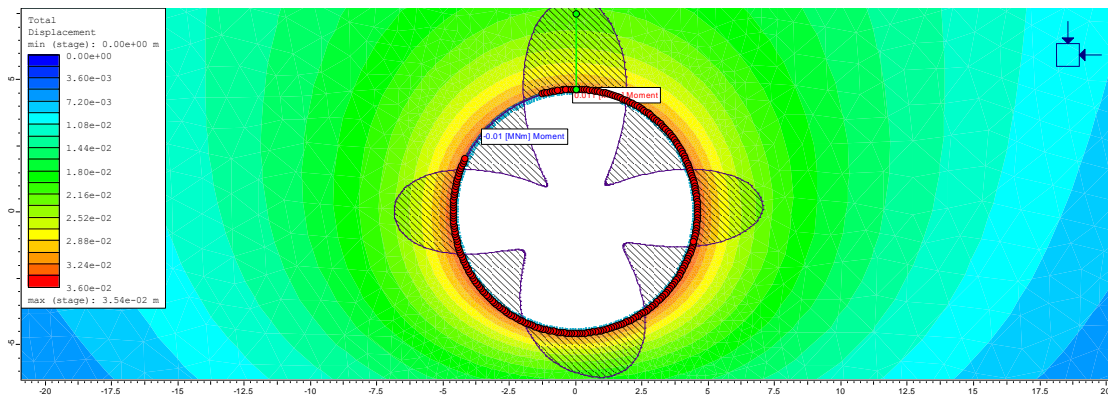
Σχήμα 5.50: Καθιζήσεις στην επιφάνεια ( $max \rightarrow -0.013m$ )



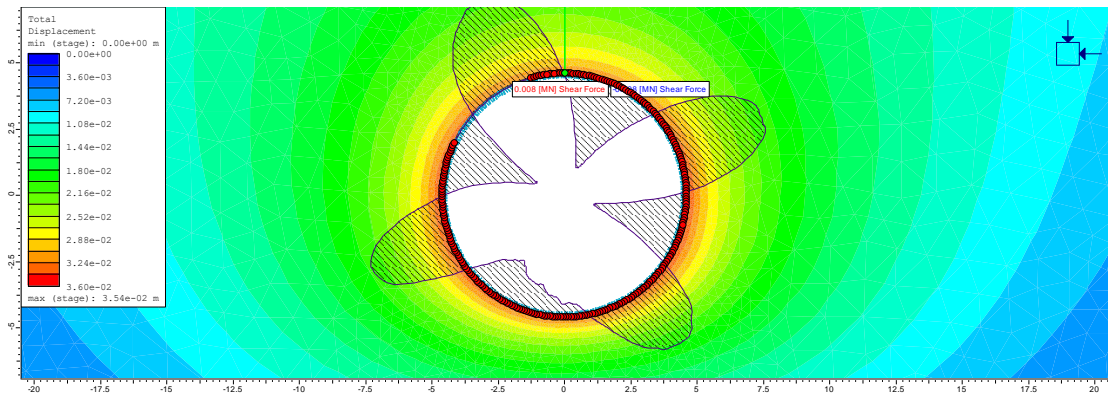
**Σχήμα 5.51: Ελάχιστη κύρια τάση (*Effective Sigma 3*) και στοιχεία διαρροής της γεωμάζας**



**Σχήμα 5.52: Αξονικές Δυνάμεις (0.844 – 0.896 MN)**



**Σχήμα 5.53: Ροπές Κάμψης (-0.01 – 0.01 MNm)**



Σχήμα 5.54: Τέμνουσες Δυνάμεις (-0.008 – 0.008 MN)

Στη συνέχεια παρατίθενται σε έναν πίνακα όλα τα αποτελέσματα για τα μοντέλα με τον παλμό Ricker $f_n=2$ . Έπειτα συγκρίνονται, για την σεισμική φόρτιση (Stage 4) με τον παλμό Ricker $f_n=1$ , οι δυνάμεις που αναπτύσσονται στην επένδυση της σήραγγας και οι καθιζήσεις που δημιουργούνται στην επιφάνεια.

Πίνακας 9: Σύγκριση αποτελεσμάτων για την σεισμική φόρτιση των Παλμών Ricker 1 και 2.

Δυνάμεις και Μετατοπίσεις	Παλμός Ricker 1			Παλμός Ricker 2		
	H=10, E=50	H=10, E=100	H=20, E=50	H=10, E=50	H=10, E=100	H=20, E=50
Αξονικές δυνάμεις min-max ( Mn)	0.578-0.776	0.457-0.89	0.884-1.098	0.509-0.581	0.463-0.564	0.844-0.896
Ροπές Κάμψης min-max (MNm)	0.044-0.05	0.07-0.105	-0.041-0.037	-0.022-0.021	-0.008 -0.01	-0.01-0.011
Τέμνουσες Δυνάμεις min-max(MN)	0.034-0.039	0.039-0.056	-0.033-0.032	-0.016-0.016	0.008-0.009	-0.008-0.008
Καθιζήσεις στην επιφάνεια max(m)	-0.004	0.006	-0.012	-0.007	-0.0036	-0.013
Ολικές μετατοπίσεις στην επένδυση max ( m)	0.0332	0.0532	0.0357	0.028	0.0105	0.0354

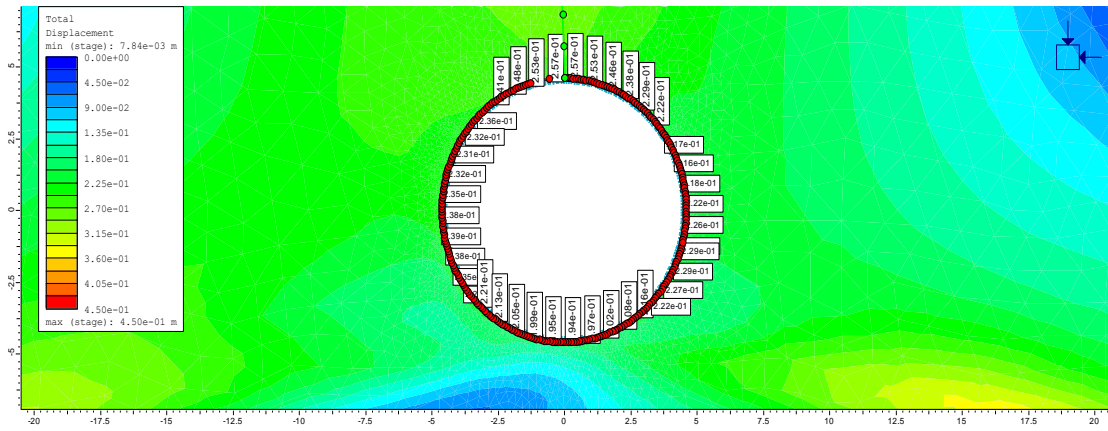
### 5.1.3 3<sup>η</sup> σειρά αριθμητικών προσομοιώσεων (σεισμογράφημα Duzce)

Σε αυτή τη σειρά προσομοιώσεων χρησιμοποιήθηκε στα μοντέλα το σεισμογράφημα από τον σεισμό του Duzce του 1999. Στο δεύτερο κεφάλαιο αναφερθήκαμε στον σεισμό Duzce και τις επιπτώσεις του στο περιβάλλον και σε σήραγγες. Για να είναι όσο πιο ακριβής γίνεται η αριθμητική προσομοίωση σε μια σήραγγα και τις γεωτεχνικές επιπτώσεις από έναν σεισμό είναι καλό να χρησιμοποιούμε και έναν παλμό απο πραγματικό σεισμό. Ο παλμός αυτό αποτυπώθηκε σε εικόνα στο προηγούμενο κεφάλαιο (Εικόνα 4.3). Παρακάτω παρατίθενται εικόνες από το πρόγραμμα RS<sub>2</sub>, και πιο συγκεκριμένα από το Stage 4, δηλαδή το στάδιο της σεισμικής φόρτισης. Έπειτα θα αποτυπωθούν τα νούμερα σε έναν πίνακα προκειμένου να συγκριθούν με τα αποτελέσματα από τους άλλους παλμούς.

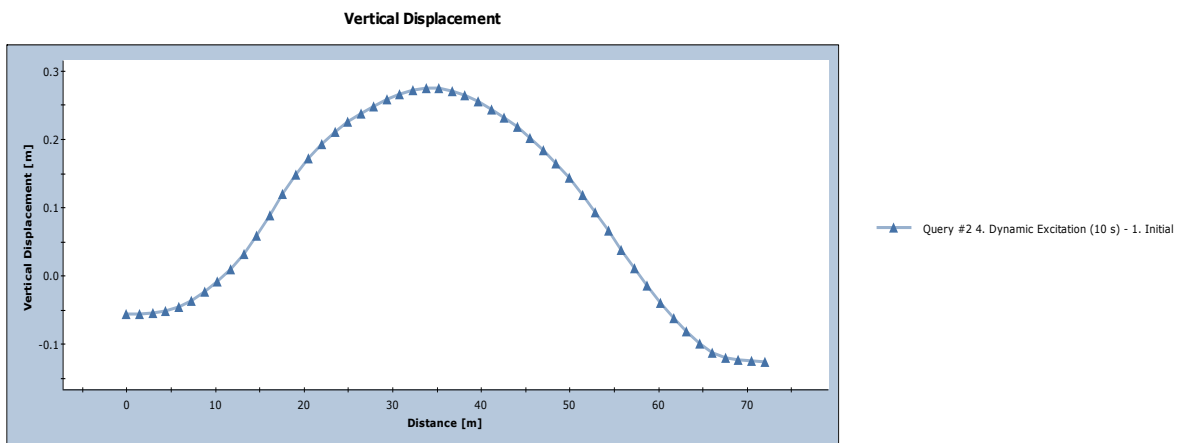


Μοντέλο με H=10m και  $E_{soil}=50\text{ MPa}$

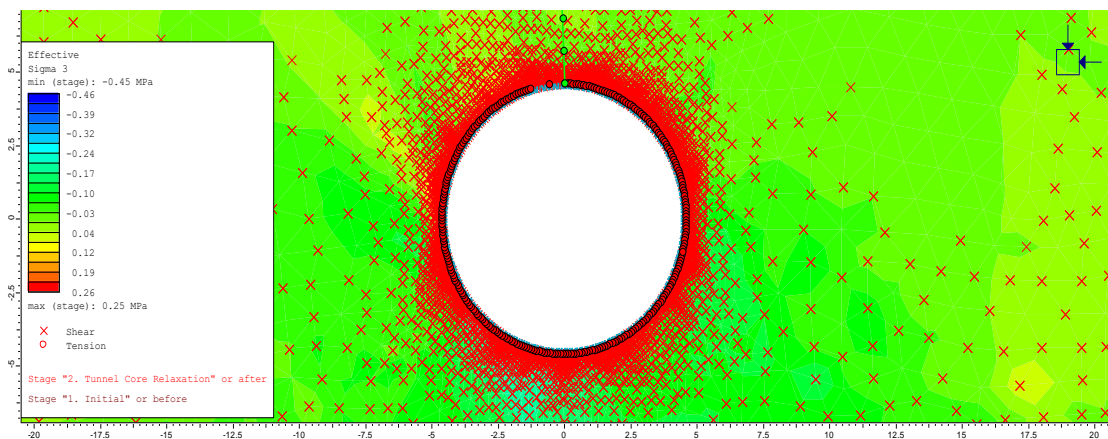
- Stage 4, Σεισμική φόρτιση



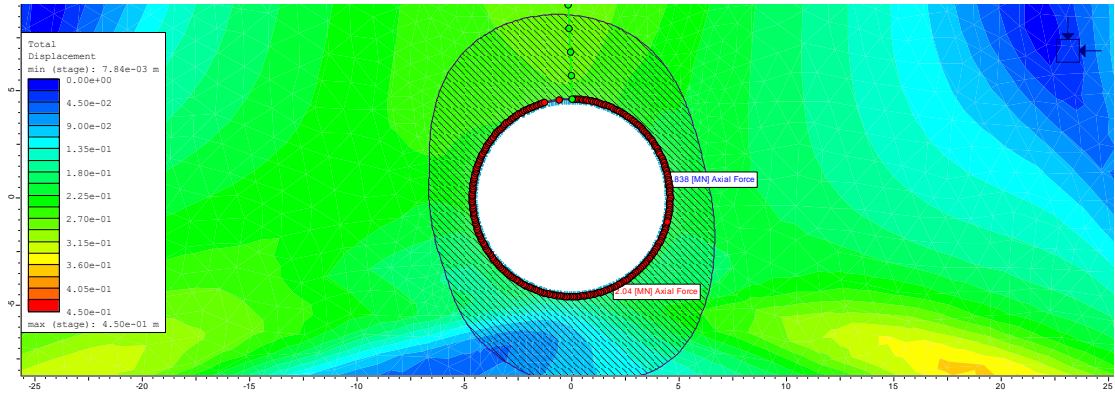
Σχήμα 5.55: Ολικές Μετατοπίσεις γύρω από την εκσκαφή (Max→0.45m)



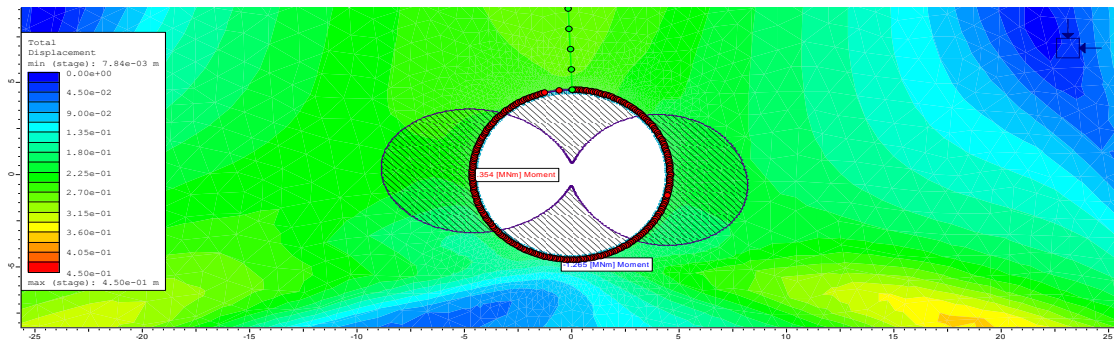
Σχήμα 5.56: Καθιζήσεις στην επιφάνεια (max→0.27m)



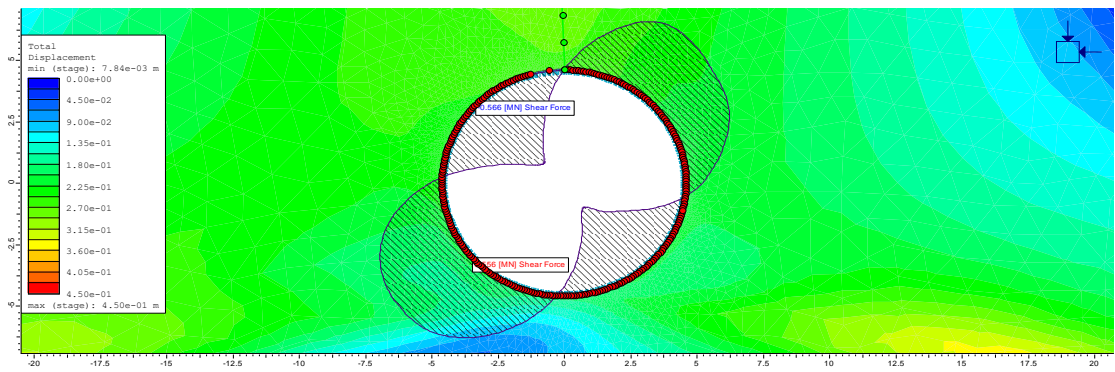
Σχήμα 5.57: Ελάχιστη κύρια τάση (Effective Sigma 3) και στοιχεία διαρροής της γεωμάζας



Σχήμα 5.58: Αξονικές Δυνάμεις (0.838 – 2.04 MN)



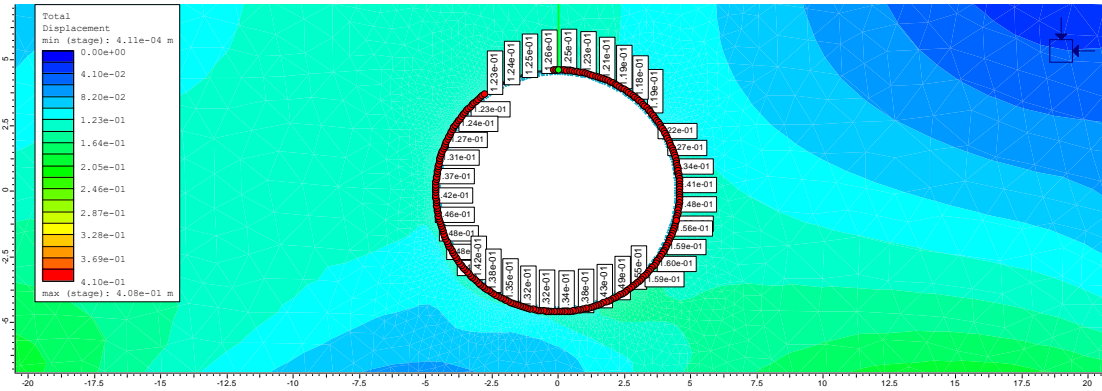
Σχήμα 5.59: Ροτές Κάμψης (-1.265 – 1.354 MNm)



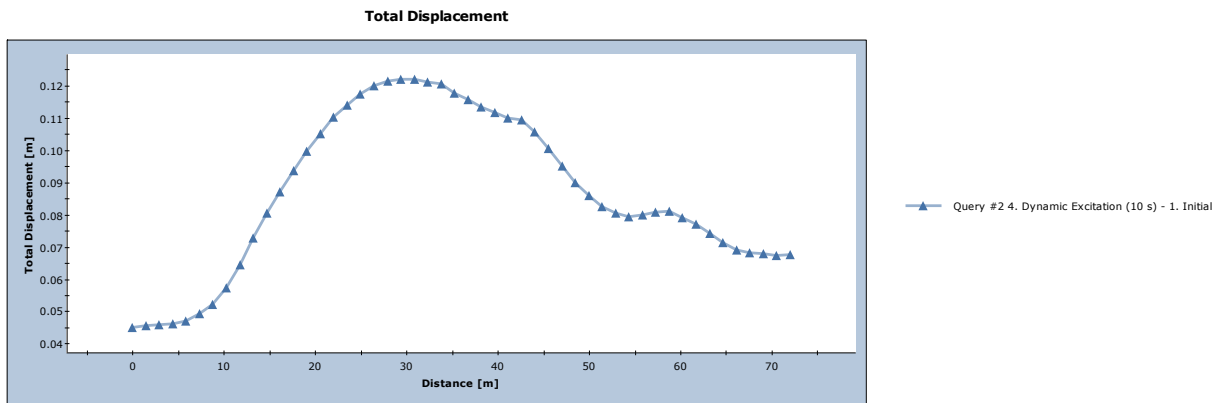
Σχήμα 5.60: Τέμνουσες Δυνάμεις (-0.566 – 0.556 MN)

Μοντέλο με H=20m και  $E_{soil}=50$  MPa

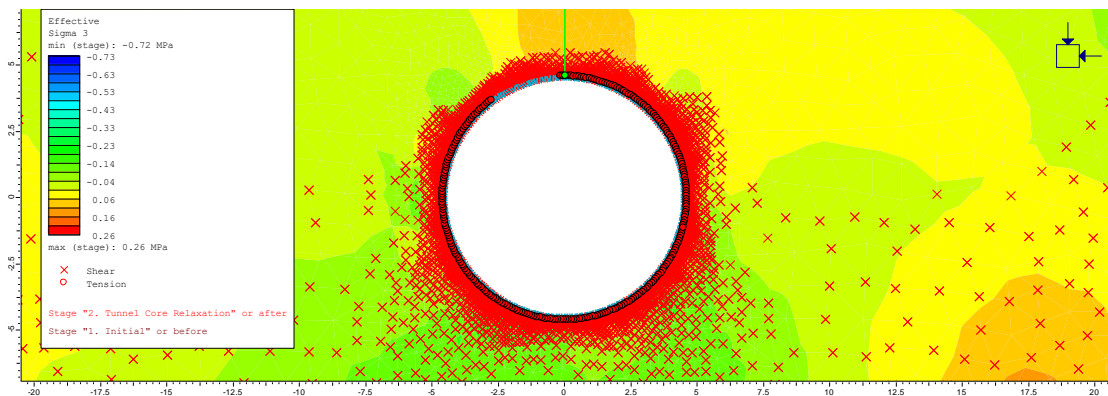
- Stage 4, Σεισμική Φόρτιση



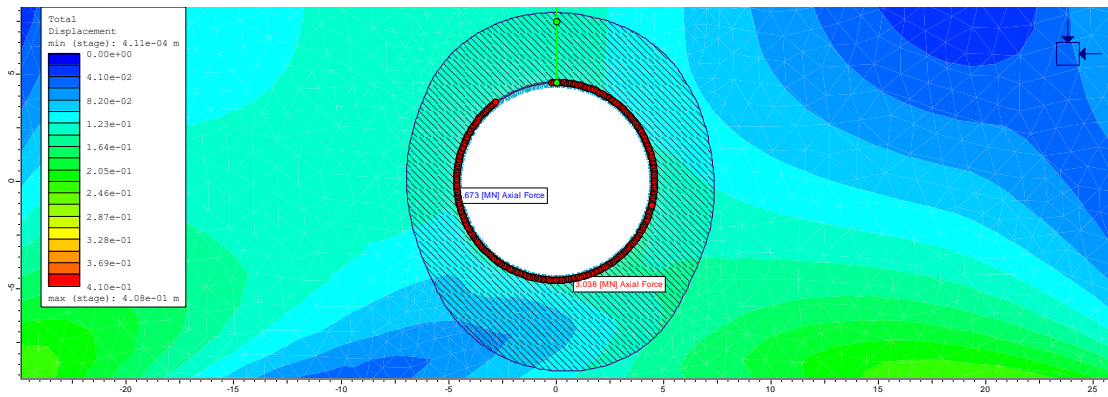
Σχήμα 5.61: Ολικές Μετατοπίσεις γύρω από την σήραγγα (Max→0.408m)



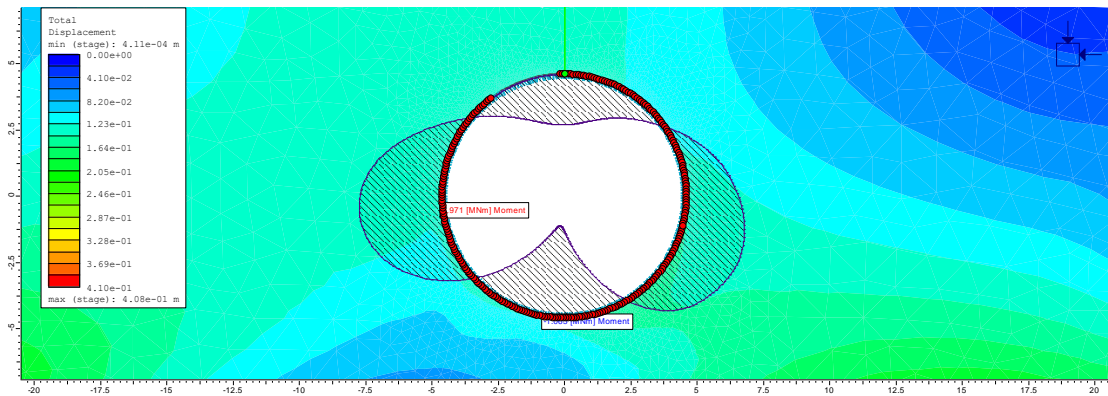
Σχήμα 5.62: Καθιζήσεις στην επιφάνεια (Max→ 0.12m)



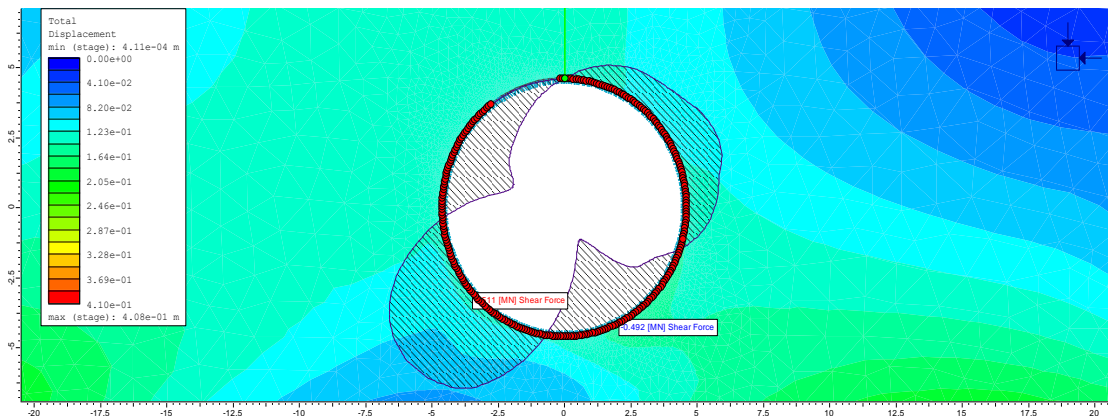
Σχήμα 5.63: Εφελκυστική Τάση και στοιχεία διαρροής της γεωμάζας



**Σχήμα 5.64: Αξονικές Δυνάμεις (1.673 – 3.038 MN)**



**Σχήμα 5.65: Ροπές Κάμψης (-1.065 – 0.971 MNm)**



**Σχήμα 5.66: Τέμνουσες Δυνάμεις (-0.492 – 0.511 MN)**

Σε συνέχεια του προηγούμενα πίνακα, παρατίθενται παρακάτω τα αποτελέσματα από τα δύο μοντέλα που εξετάστηκαν με τον παλμό από τον σεισμό Duzce. Στο ίδιο μοτίβο με τον προηγούμενο πίνακα προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα.

**Πίνακας 10: Αποτελέσματα του σταδίου 4για τα μοντέλα με την σεισμική φόρτιση Duzce**

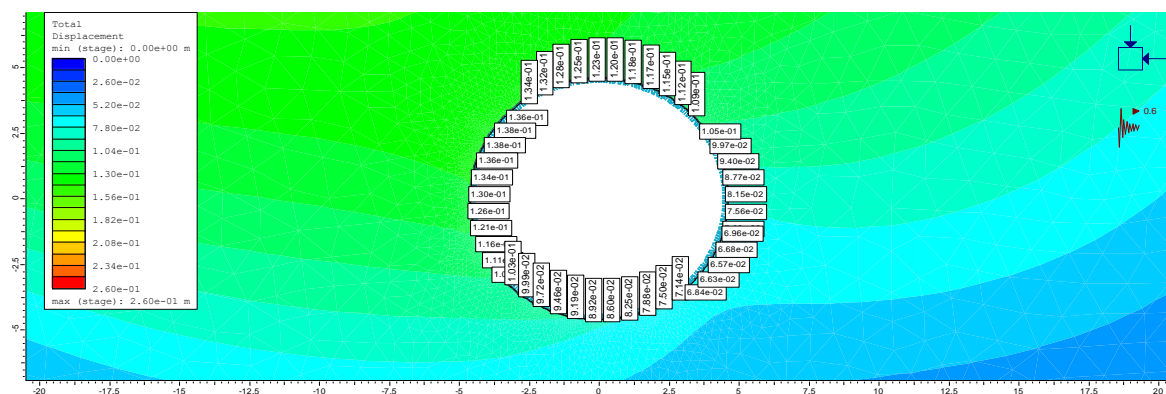
Δυνάμεις και μετατοπίσεις	Stage 4, Σεισμός Duzce	
	Μοντέλο με H=10 , E=50	Μοντέλο με H=20 , E=50
Αξονικές δυνάμεις min-max (MN)	0.838-2.04	1.673-3.038
Ροπές Κάμψης min-max (MNm)	-1.265-1.354	-1.065-0.971
Τέμνουσες Δυνάμεις min-max (MN)	-0.566-0.556	-0.492-0.511
Καθιζήσεις στην επιφάνεια max ( m )	0.27	0.12
Ολικές μετατοπίσεις γύρω από την σήραγγα (m)	0.45	0.408

## 5.2 Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης για μοντέλα με ψευδοστατική φόρτιση

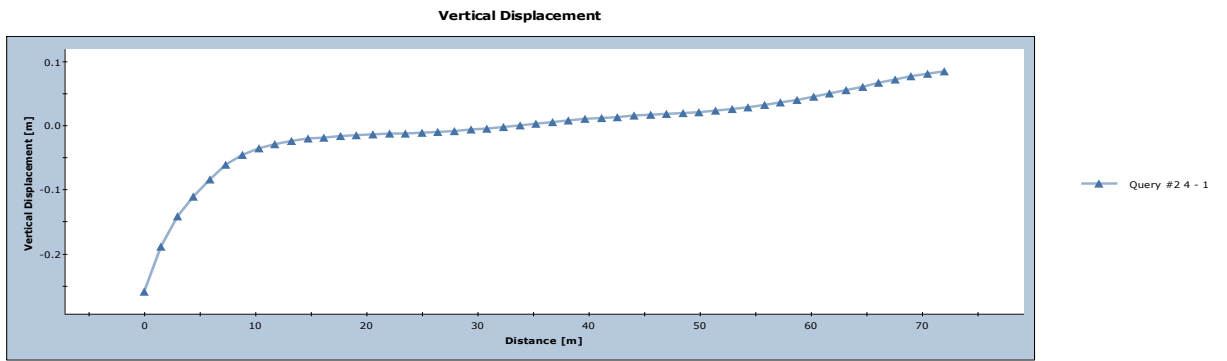
Τα ψευδο-στατικά σεισμικά φορτία που δημιουργούνται λειτουργούν εφαρμόζοντας μια δύναμη σώματος προς την κατεύθυνση του σεισμικού φορτίου. Η κατεύθυνση μπορεί να είναι είτε οριζόντια, είτε κατακόρυφη ή συνδυασμός και των δύο. Στις συγκεκριμένες περιπτώσεις είναι οριζόντια προς τα δεξιά, στο Stage 4 (πιο αναλυτική παρουσίαση στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο και συγκεκριμένα στην παράγραφο 3.2.1.7). Παρακάτω, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης για τα μοντέλα που περιγράφηκαν και έπειτα συγκρίνονται σε έναν πίνακα με τα αντίστοιχα αποτελέσματα από τις προηγούμενες σεισμικές φορτίσεις. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι τα αποτελέσματα για τα πρώτα τρία στάδια είναι κοινά, λόγω των κοινών χαρακτηριστικών που έχουν εισαχθεί στα μοντέλα. Ωστόσο, θα ήταν εφικτό να χρησιμοποιηθούν διαφορετικά χαρακτηριστικά και συνεπώς να προκύψουν και διαφορετικά αποτελέσματα.

### Μοντέλο με H=10m και E<sub>soil</sub>= 50 MPa

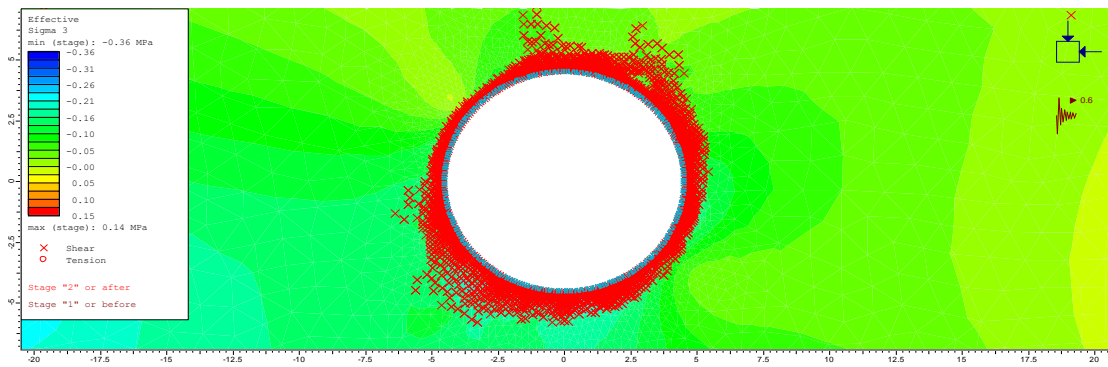
- Stage 4, Ψευδοστατική φόρτιση



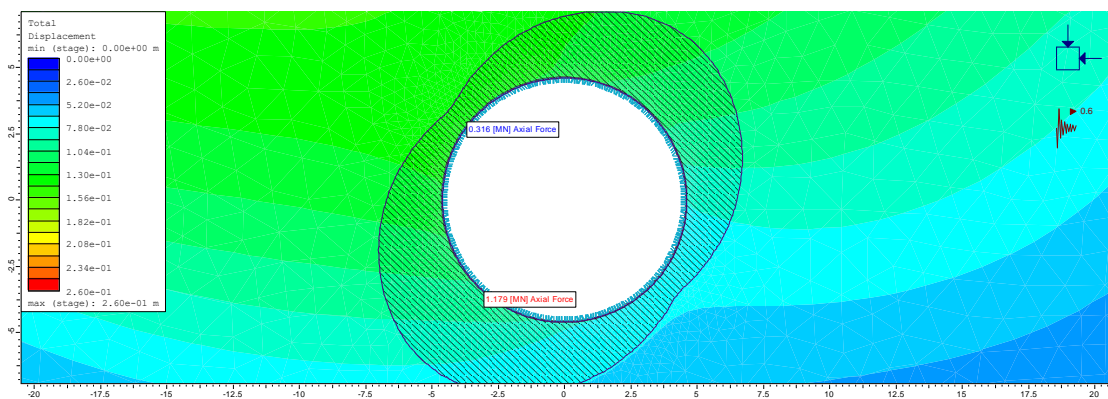
**Σχήμα 5.67: Ολικές μετατοπίσεις γύρω από την εκσκαφή (max→ 0.26m)**



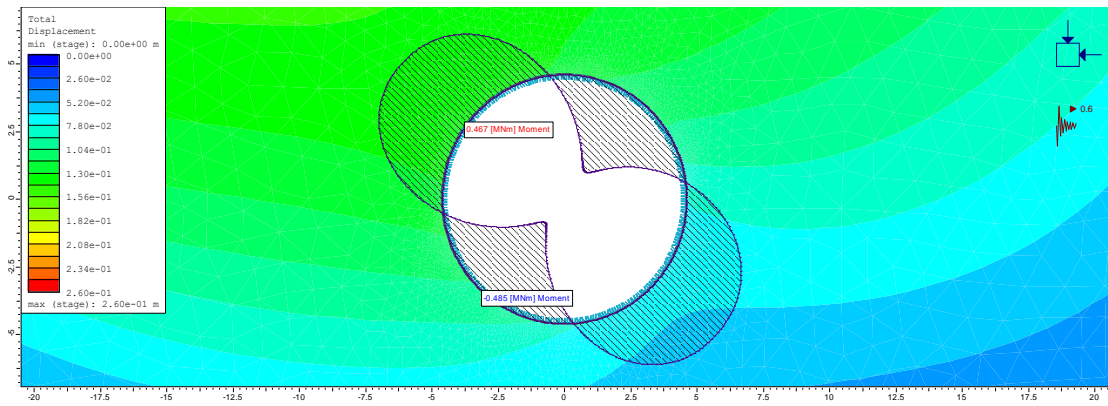
Σχήμα 5.68: Καθιζήσεις στην επιφάνεια ( $max \rightarrow 0.085$ )



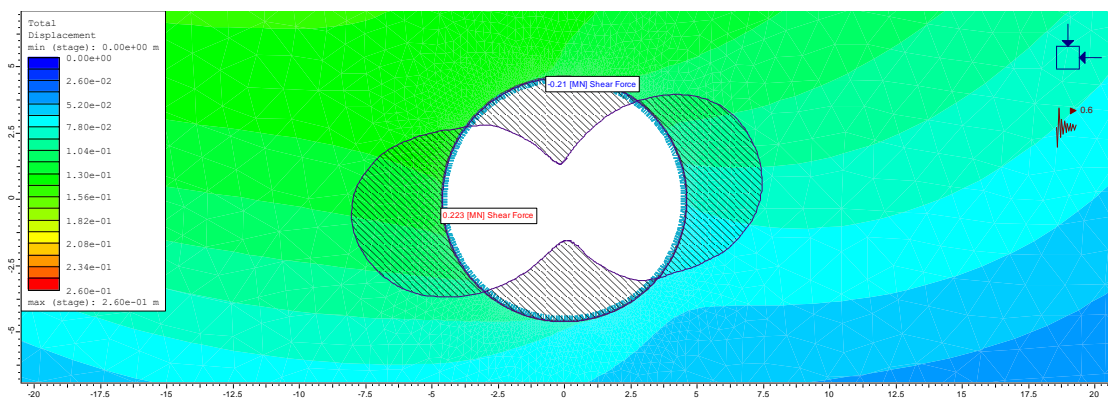
Σχήμα 5.69: Ελάχιστη κύρια τάση και στοιχεία διαρροής της γεωμάζας



Σχήμα 5.70: Αξονικές Δυνάμεις (0.316 – 1.179MN)



Σχήμα 5.71: Ροπές κάμψης (-0.485 – 0.467 MNm)



Σχήμα 5.72: Τέμνουσες Δυνάμεις (-0.21-0.223 MN)

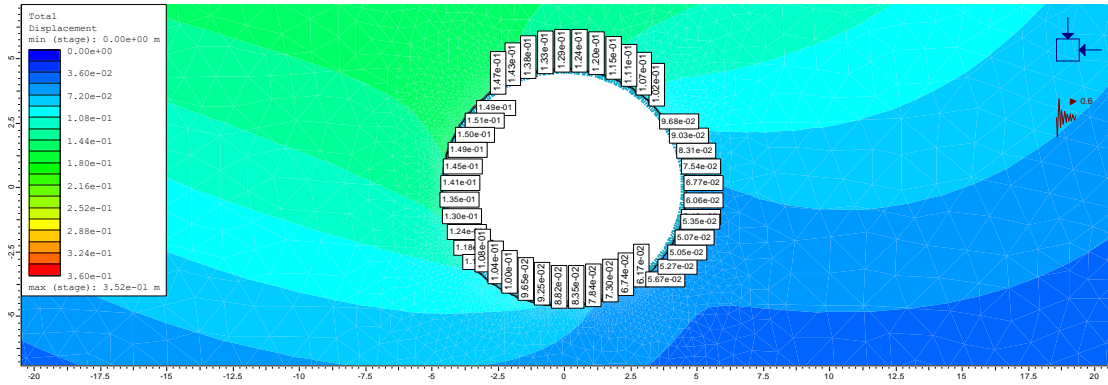
Στον πίνακα που ακολουθεί συγκρίνονται τα αποτελέσματα της σεισμικής φόρτισης για το **Stage 4**, σε σχέση με όλα τα υπόλοιπα μοντέλα και τους παλμούς που έχουν τοποθετηθεί (Παλμός Ricker  $f_n=1$  και  $f_n=2$ ,  $D_{suzce}$ ).

**Πίνακας 11: Σύγκριση αποτελεσμάτων για το μοντέλο  $H=10m$  και  $E=50MPa$  για όλους τους τύπους σεισμικής φόρτισης**

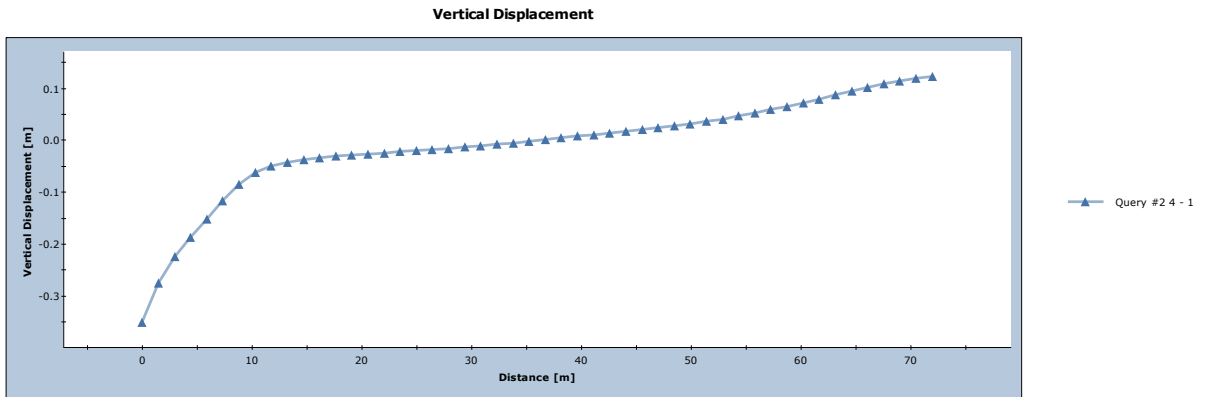
Δυνάμεις και μετατοπίσεις	Ricker $f_n=1$	Ricker $f_n=2$	$D_{suzce}$	Ψευδοστατική
Αξονικές δυνάμεις min-max (MN)	0.578-0.776	0.509-0.581	0.838-2.04	0.316-1.179
Ροπές Κάμψης min-max (MNm)	0.044-0.05	-0.022-0.021	-1.265-1.354	-0.485-0.467
Τέμνουσες Δυνάμεις min-max (MN)	0.034-0.039	-0.016-0.016	-0.566-0.556	-0.21-0.223
Καθιζήσεις στην επιφάνεια max ( m )	-0.004	-0.007	0.27	0.852
Ολικές μετατοπίσεις γύρω από την σήραγγα (m)	0.0332	0.028	0.45	0.26

Μοντέλο με  $H=20\text{m}$  και  $E_{\text{soil}}=50\text{ MPa}$

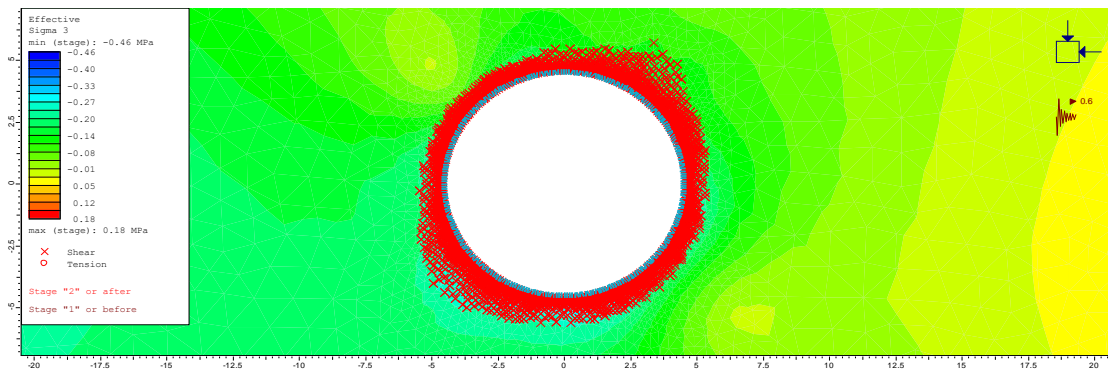
- Stage 4, ψευδοστατική φόρτιση



Σχήμα 5.73: Ολικές μετατοπίσεις γύρω από την εκσκαφή ( $\text{max} \rightarrow 0.352\text{m}$ )

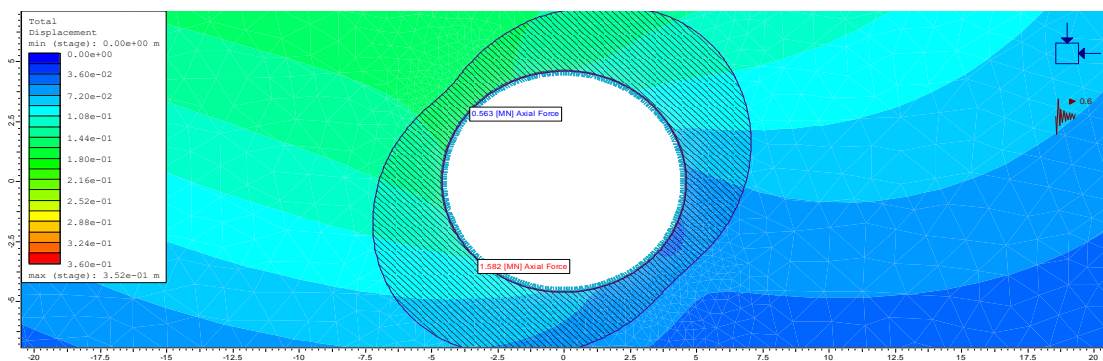


Σχήμα 5.74: Καθιζήσεις στην επιφάνεια ( $\text{max} \rightarrow 0.122\text{m}$ )

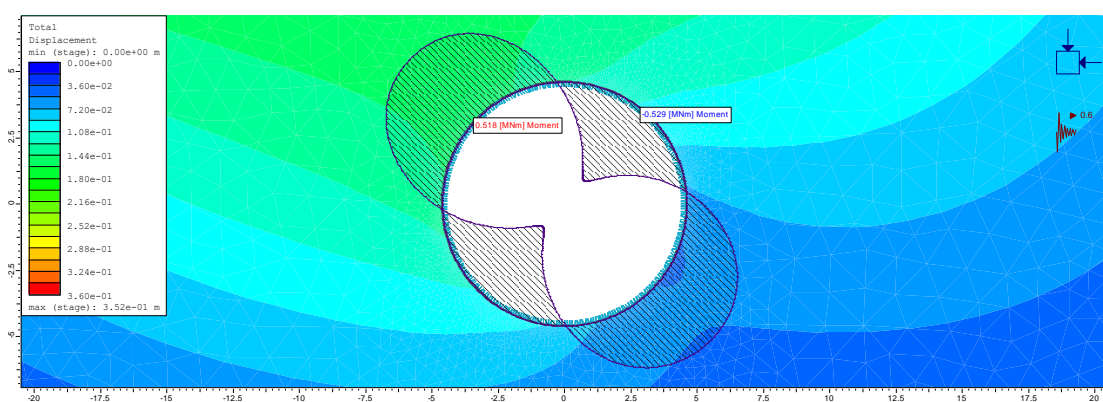


Σχήμα 5.75: Ελάχιστη κύρια τάση και στοιχεία διαρροής της γεωμάζας

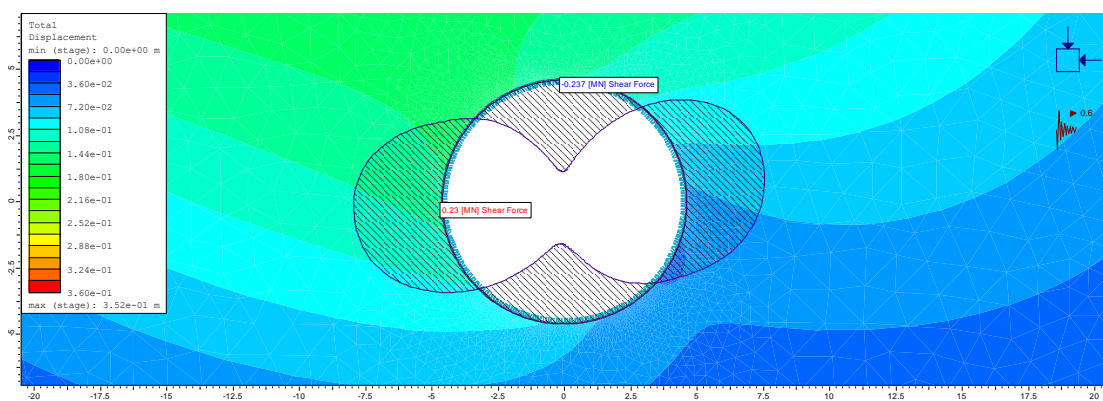




**Σχήμα 5.76: Αξονικές Δυνάμεις (0.563-1.582 MN)**



**Σχήμα 5.77: Ροπές Κάμψης (-0.529-0.518 MNm)**



**Σχήμα 5.78: Τέμνουσες Δυνάμεις (-0.237-0.23 MN)**

Στον ακόλουθο πίνακα παρίστανται τα αποτελέσματα των αριθμητικών προσομοιώσεων, τα οποία και συγκρίνονται με τις άλλες σεισμικές φορτίσεις.

**Πίνακας 12: Σύγκριση αποτελεσμάτων των αριθμητικών προσομοιώσεων για το μοντέλο H=20m και E=50 MPa**

Δυνάμεις και μετατοπίσεις	Ricker $f_n=1$	Ricker $f_n=2$	Duzce	Ψευδοστατική
Αξονικές δυνάμεις min-max (MN)	0.884-1.098	0.844-0.896	1.673-3.038	0.563-1.582
Ροπές Κάμψης min-max (MNm)	-0.041-0.037	-0.01-0.011	-1.065-0.971	-0.529-0.518
Τέμνουσες Δυνάμεις mix-max (MN)	-0.033-0.032	-0.008-0.008	-0.492-0.511	-0.237-0.23
Καθιζήσεις στην επιφάνεια max (m)	-0.012	-0.013	0.12	0.122
Ολικές μετατοπίσεις γύρω από την σήραγγα (m)	0.0357	0.0354	0.408	0.352

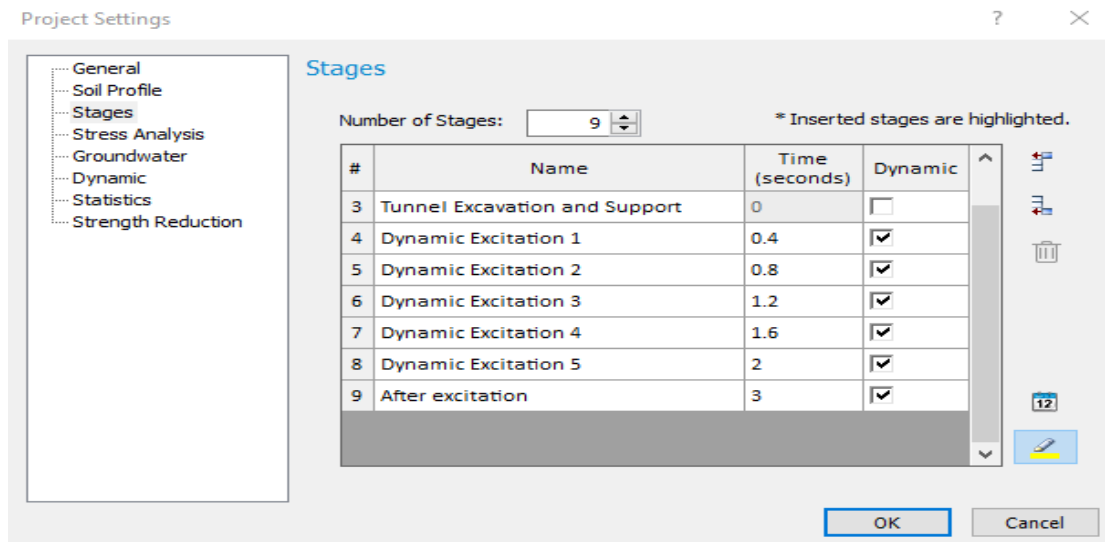
### 5.3 Αριθμητική προσομοίωση για όλα τα μοντέλα με στάδια στην σεισμική φόρτιση

#### Εισαγωγικά Στοιχεία

Τα παραπάνω αποτελέσματα από τις αριθμητικές προσομοιώσεις βασίστηκαν πάνω σε 4 στάδια.

- 1) Αρχική κατάσταση (Initial)
- 2) Αποτόνωση (Tunnel Core Relaxation)
- 3) Εκσκαφή και υποστήριξη (Tunnel Excavation and Support)
- 4) Δυναμική φόρτιση-διέγερση (Dynamic Loading-Excitation)

Ωστόσο, για μεγαλύτερη ακρίβεια των αποτελεσμάτων, το Stage 4 χωρίστηκε σε έξι στάδια. Με αυτόν τον τρόπο, όπως αποδείχθηκε από την αριθμητική προσομοίωση, επιτεύχθηκαν τα συγκεκριμένα αποτελέσματα για τις δυνάμεις που αναπτύσσονται γύρω από την επένδυση της σήραγγας κατά τη διάρκεια της σεισμικής διέγερσης. Πιο αναλυτικά, χωρίστηκε ο παλμός των δύο δευτερολέπτων για τον παλμό Ricker με τον εξής τρόπο:



**Σχήμα 5.79: Αποτύπωση σταδίων σεισμικής φόρτισης για τον παλμό  $Rickerf_n=1$**

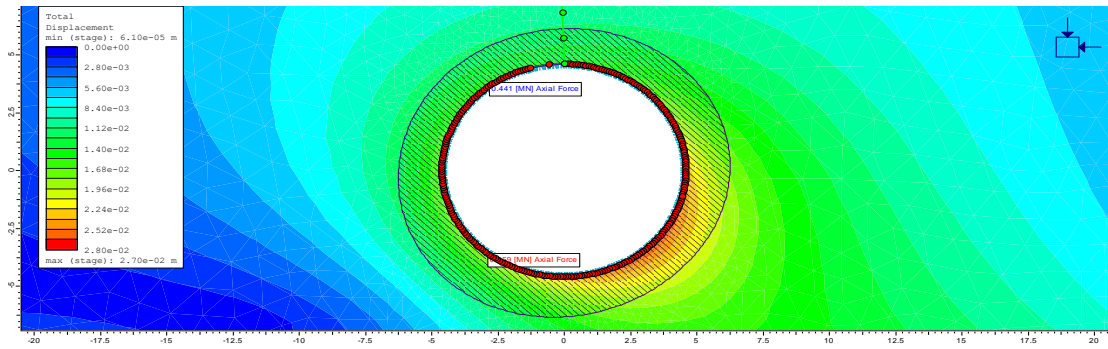
Όπως φαίνεται και από την παραπάνω εικόνα χωρίστηκε ο παλμός σε πέντε στάδια, 0.4 δευτερόλεπτα το καθένα, συμπεριλαμβάνοντας και ένα τελευταίο στάδιο, ένα δευτερόλεπτο μετά το τέλος της σεισμικής διέγερσης. Άρα στην τελική μορφή ο πίνακας εντολών **Stages**, έχει τα εξής στάδια:

1. Initial
2. Tunnel Core Relaxation
3. Tunnel Excavation and support
4. Dynamic Excitation 1
5. Dynamic Excitation 2
6. Dynamic Excitation 3
7. Dynamic Excitation 4
8. Dynamic Excitation 5
9. After Excitation

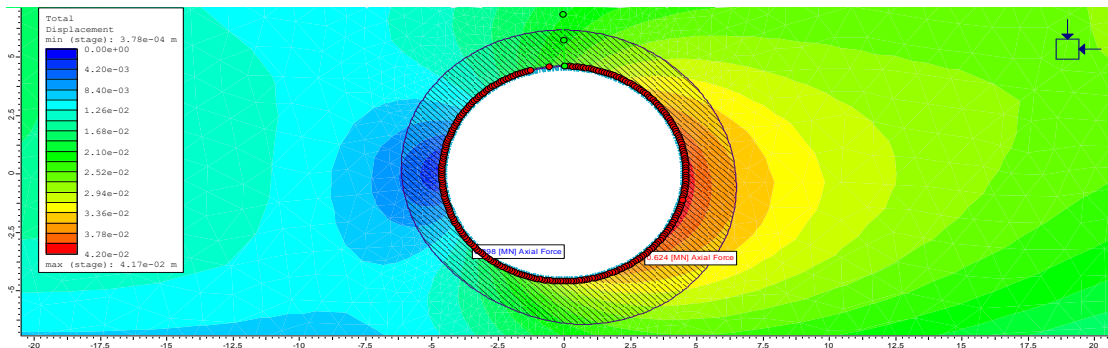
Με τον ίδιο τρόπο προσομοιώθηκε σε στάδια και ο **σεισμός Duzce**. Έτσι κατασκευάστηκαν δέκα στάδια για την δυναμική ανάλυση με 2 δευτερόλεπτα το καθένα, και ένα τελευταίο στάδιο 5 δευτερόλεπτα μετά την δυναμική ανάλυση.

Παρακάτω, αποτυπώνονται τα αποτελέσματα σε εικόνες για το μοντέλο με  $H=10m$  και  $E_{soil}=50 MPa$ , για τις δυναμικές αναλύσεις με όλους τους παλμούς, για τις δυνάμεις που αναπτύσσονται στην επένδυση της σήραγγας. Στο τέλος τοποθετούνται σε πίνακα τα αποτελέσματα για όλα τα μοντέλα ώστε να είναι ευδιάκριτη η μεταβολή των δυνάμεων ανά στάδιο.

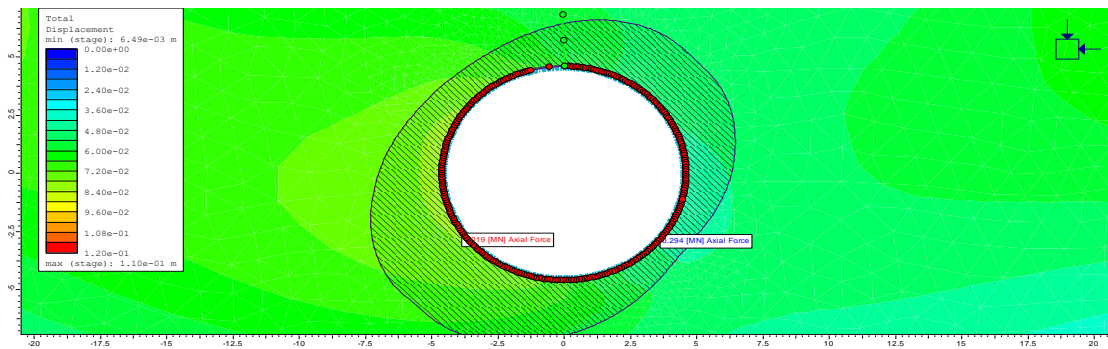
- Παλμός Ricker με  $f_n=1$  και  $a_{max}=0.6$
- Αξονικές Δυνάμεις



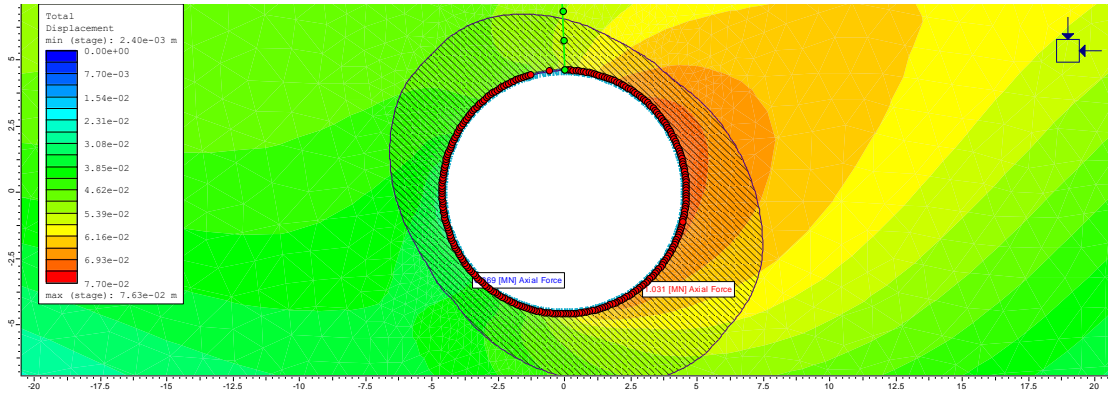
Σχήμα 5.80: *Dynamic Excitation 0.4sec (0.441-0.559 MN)*



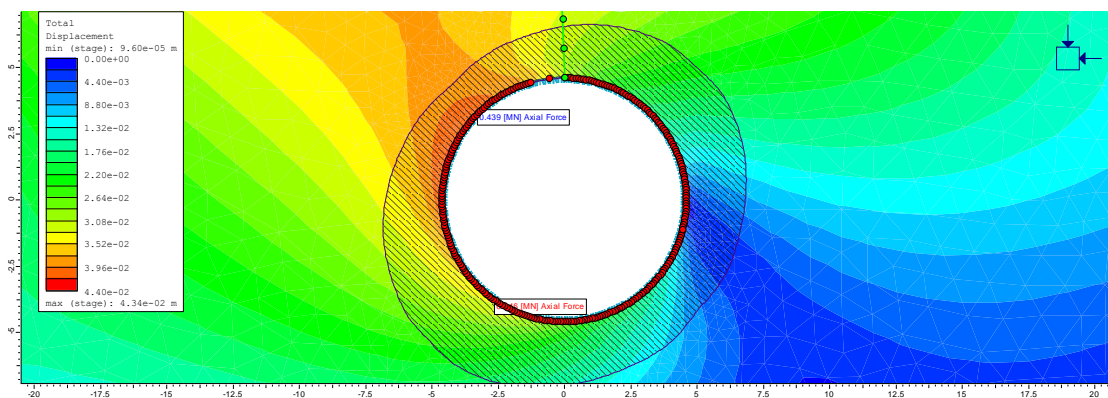
Σχήμα 5.81: *Dynamic Excitation 0.8 sec (0.398-0.624 MN)*



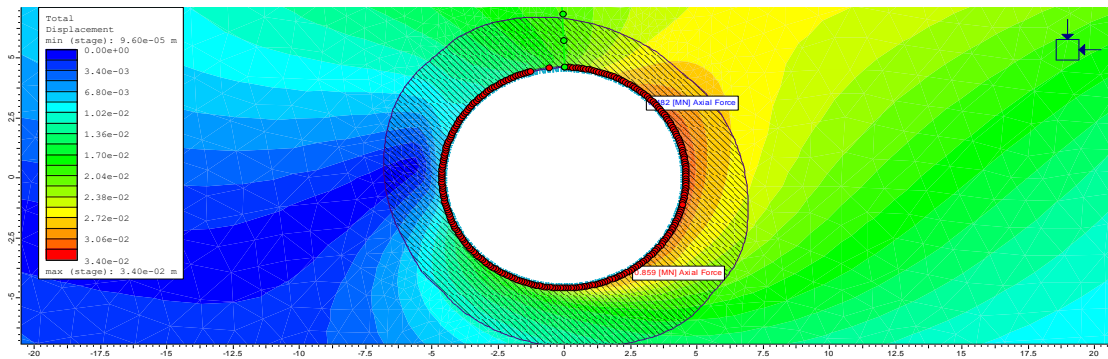
Σχήμα 5.82: *Dynamic Excitation 1.2 sec (0.294-1.019 MN)*



**Σχήμα 5.83: Dynamic Excitation 1.6 sec (0.369- 1.031 MN)**

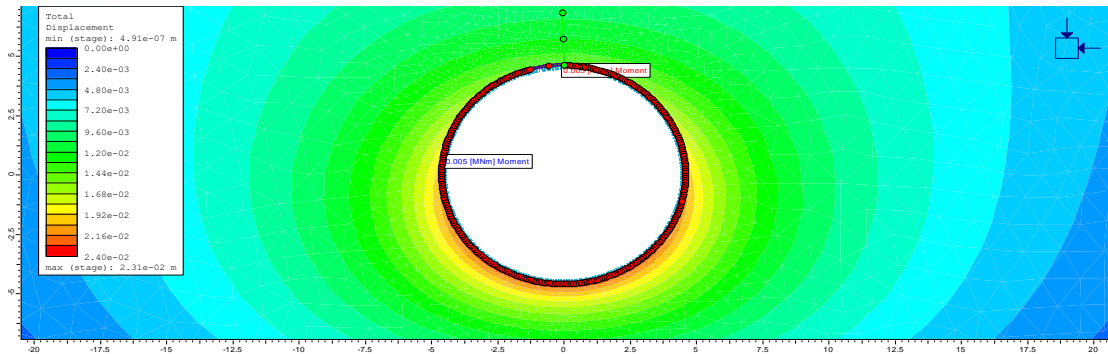


**Σχήμα 5.84: Dynamic Excitation 2.0 sec (0.439-0.846 MN)**

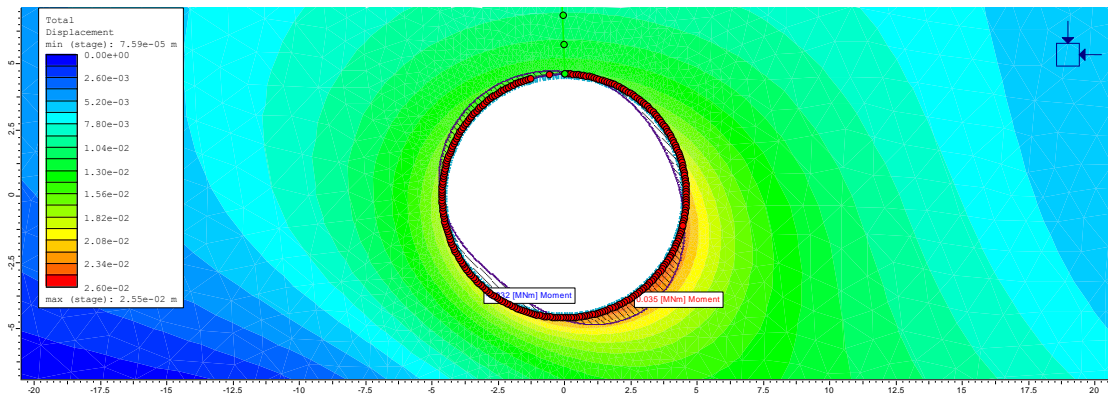


**Σχήμα 5.85: Dynamic Excitation 3.0 sec (0.482-0.859 MN)**

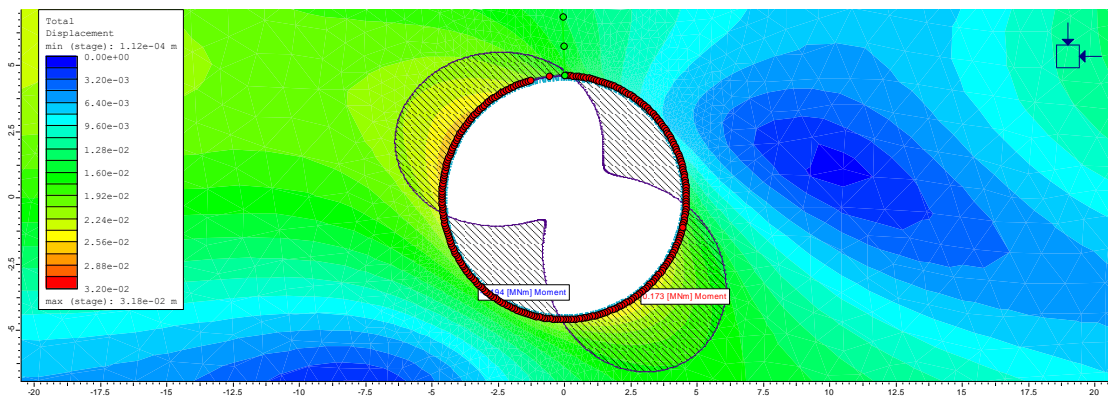
- Παλμός Ricker με  $f_n=2$  και  $a_{max}=0.6$
- Ροπές Κάμψης



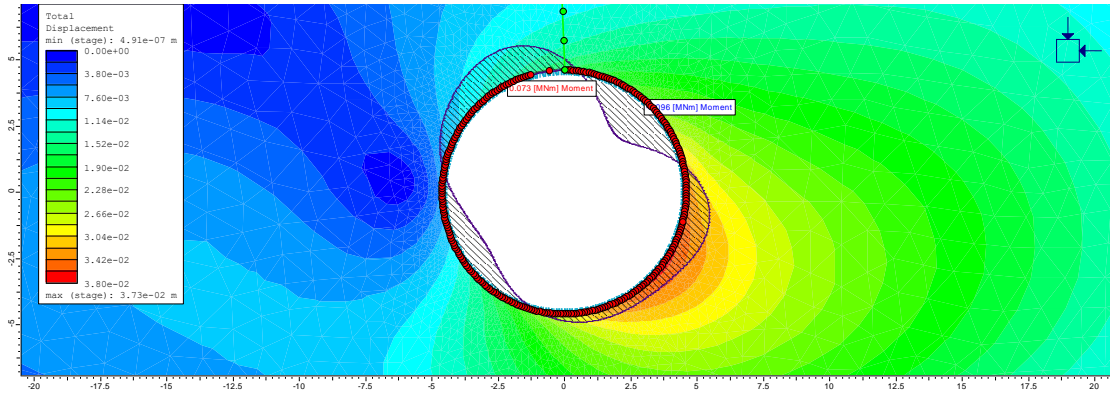
Σχήμα 5.86: Dynamic Excitation 0.4sec (-0.005-0.005 MNm)



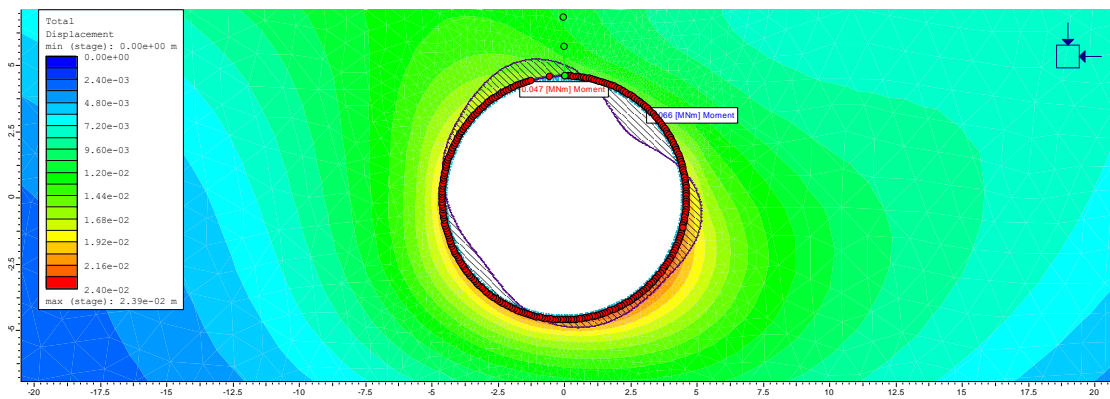
Σχήμα 5.87: Dynamic Excitation 0.8 sec (-0.032-0.035 MNm)



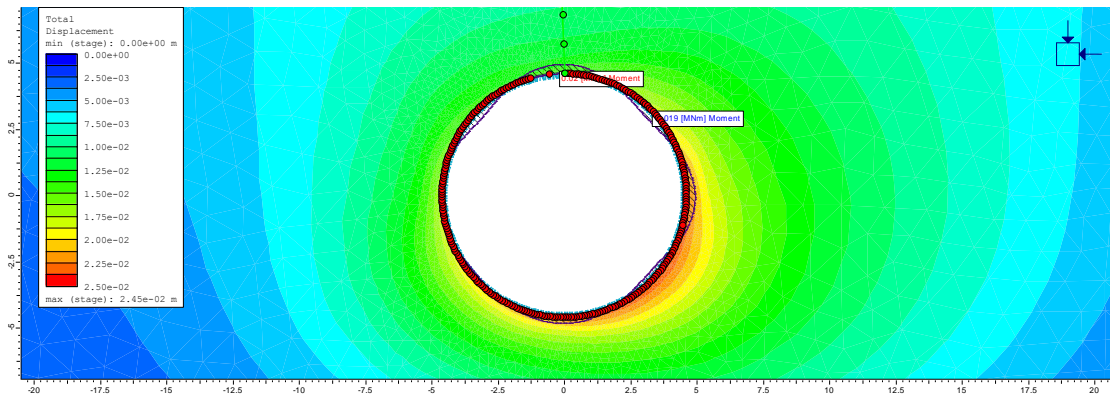
Σχήμα 5.88: Dynamic Excitation 1.2 sec (-0.194-0.173 MNm)



**Σχήμα 5.89: Dynamic Excitation 1.6 sec (-0.096-0.073MNm)**

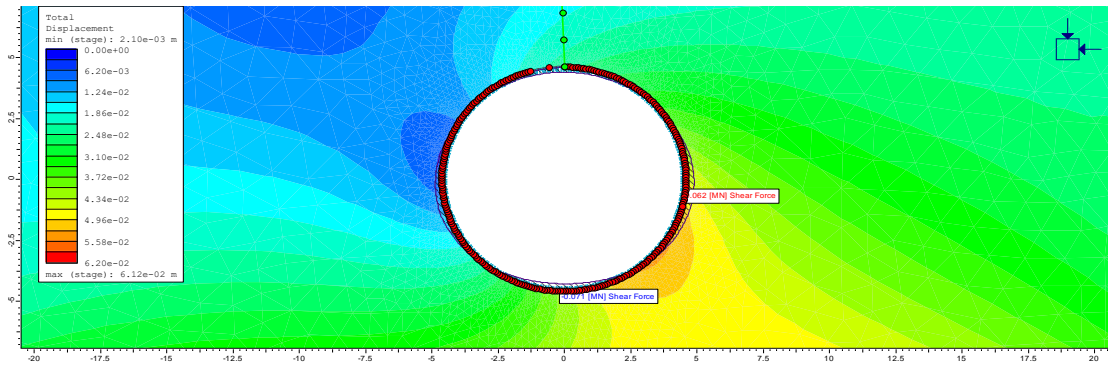


**Σχήμα 5.90: Dynamic Excitation 2.0 sec (-0.066-0.047MNm)**

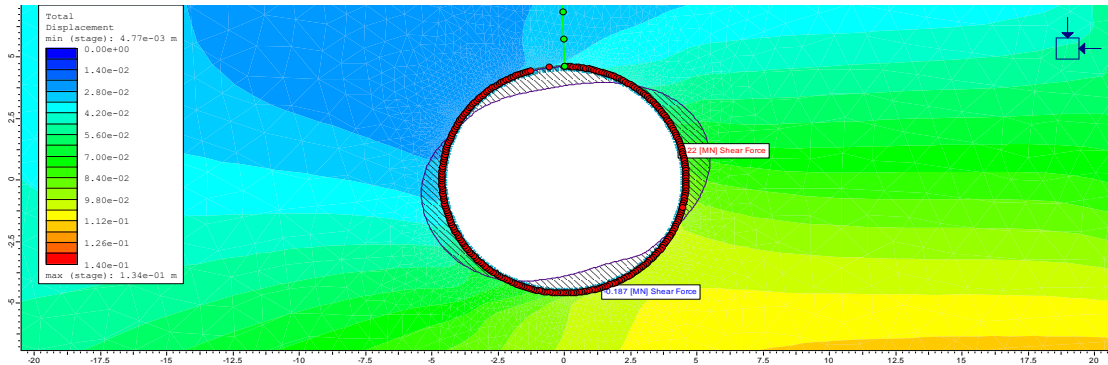


**Σχήμα 5.91: Dynamic Excitation 3.0 sec(-0.019-0.02MNm)**

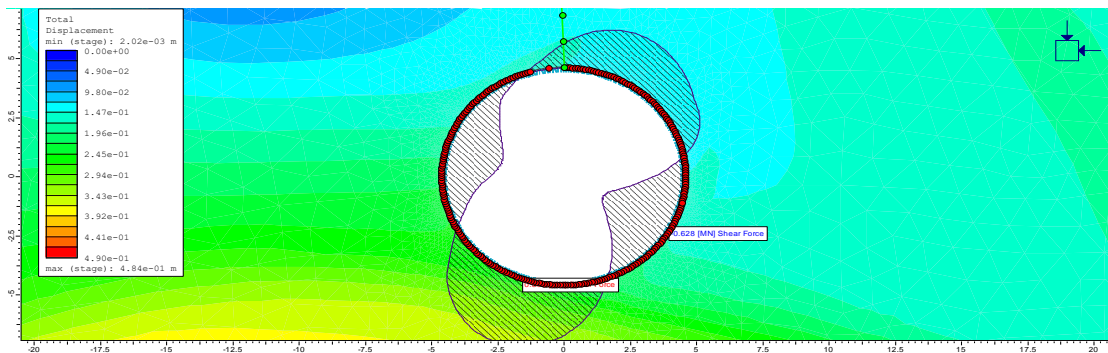
- Σεισμός Duzce
- Τέμνουσες Δυνάμεις



Σχήμα 5.92: *Dynamic Excitation 2 sec (-0.071-0.062 MN)*

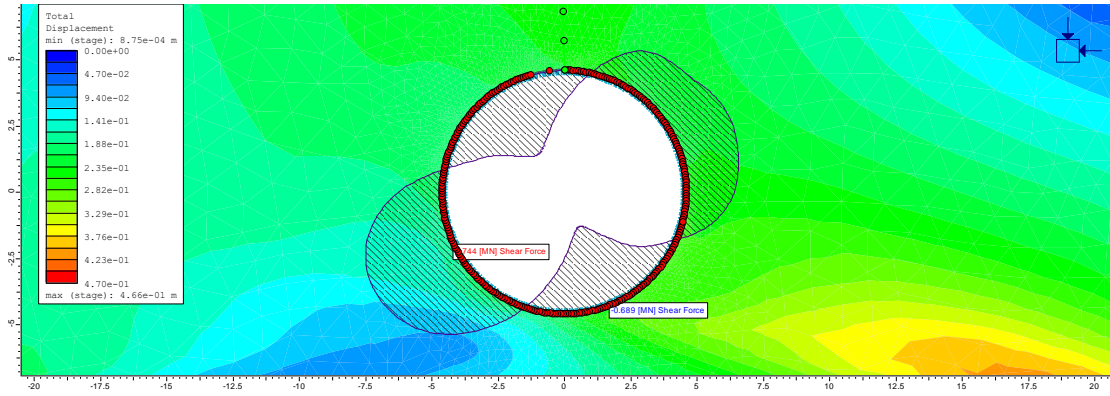


Σχήμα 5.93: *Dynamic Excitation 4 sec (-0.187-0.22 MN)*

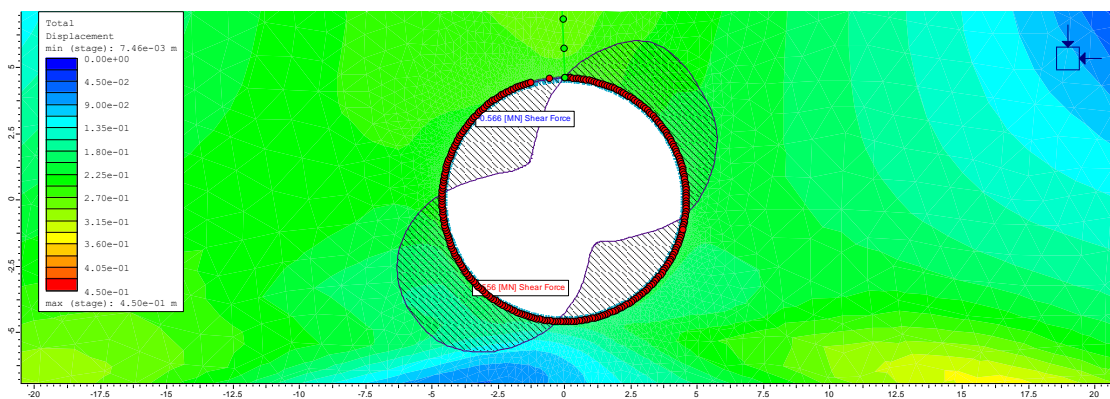


Σχήμα 5.94: *Dynamic Excitation 6 sec (-0.628-0.608 MN)*

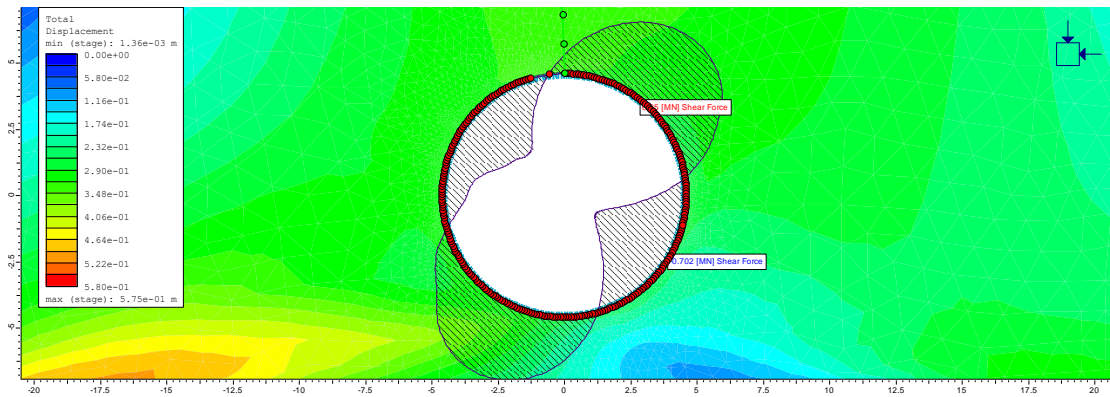




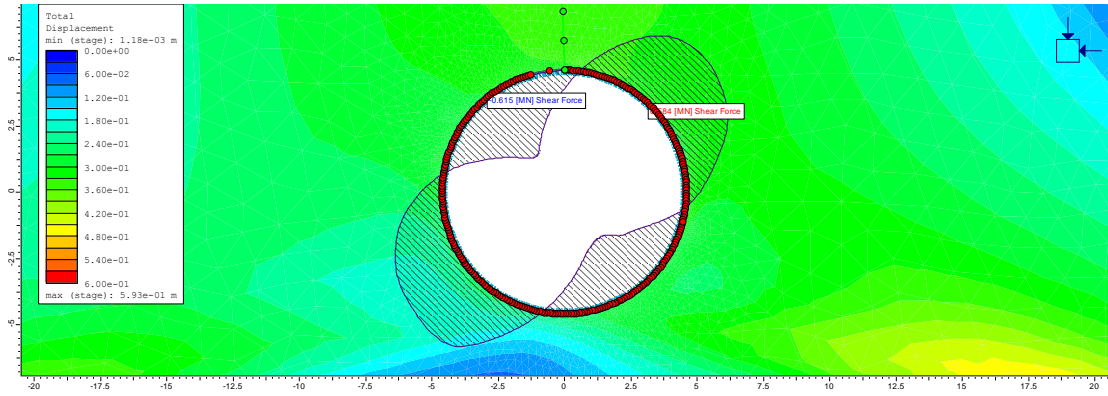
**Σχήμα 5.95: Dynamic Excitation 8 sec (-0.689-0.744MN)**



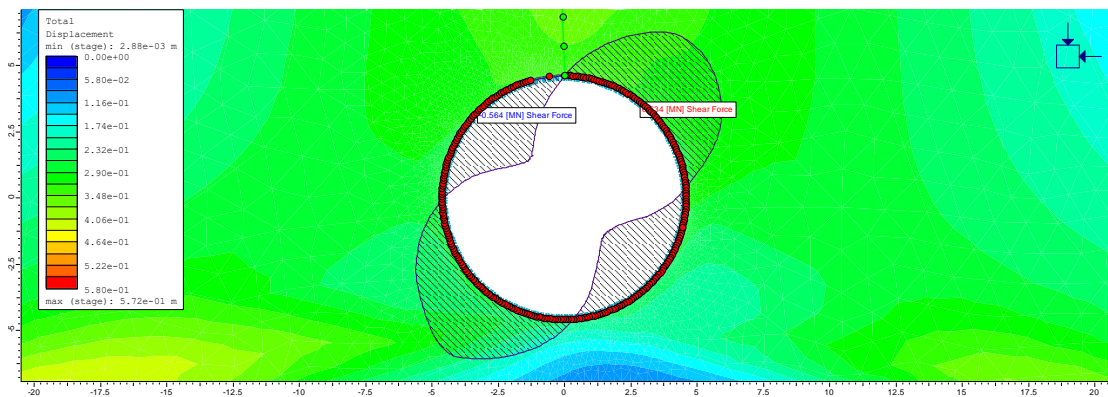
**Σχήμα 5.96: Dynamic Excitation 10 sec (-0.566- 0.556 MN)**



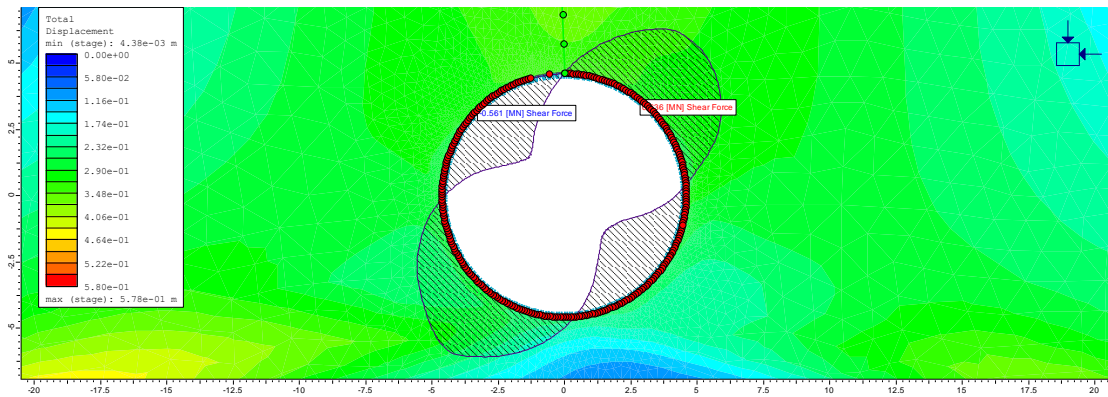
**Σχήμα 5.97: Dynamic Excitation 12 sec (-0.702- 0.65 MN)**



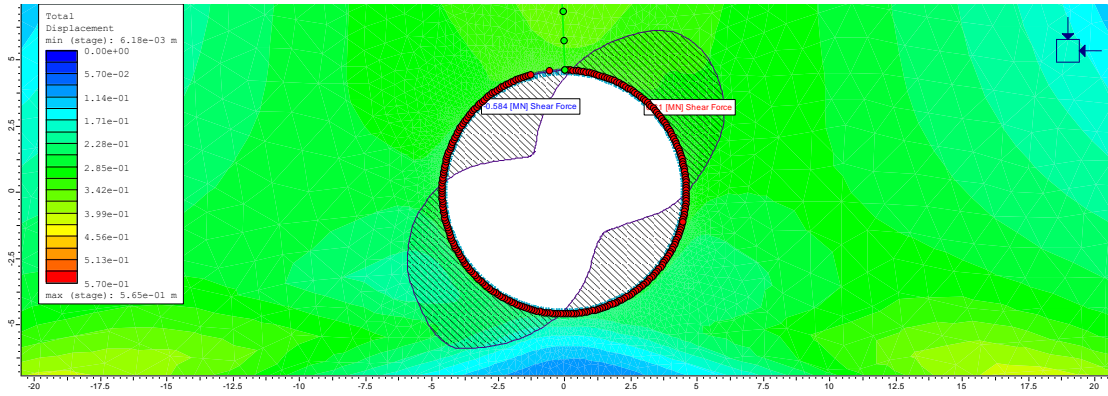
**Σχήμα 5.98: Dynamic Excitation 14 sec (-0.615-0.584 MN)**



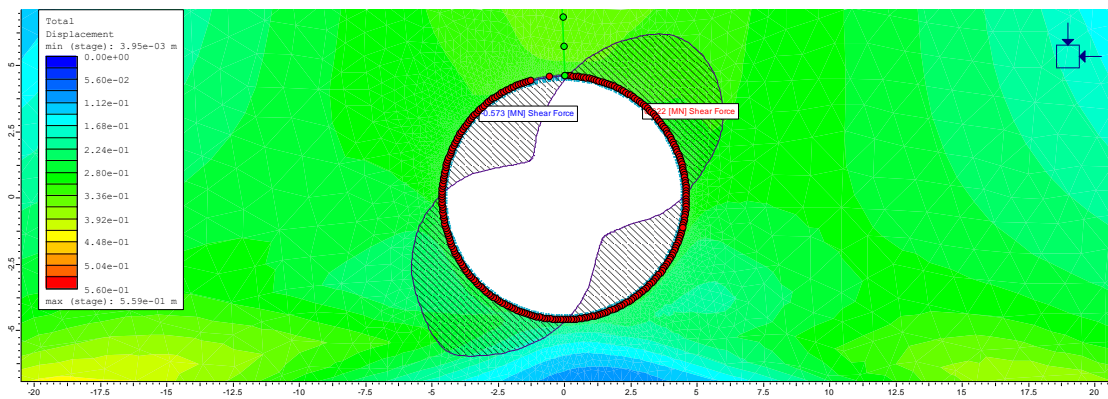
**Σχήμα 5.99: Dynamic Excitation 16 sec (-0.564 – 0.634 MN)**



**Σχήμα 5.100: Dynamic Excitation 18 sec (-0.561-0.636)**



Σχήμα 5.101: *Dynamic Excitation 20 sec (-0.584- 0.61 MN)*



Σχήμα 5.102: *DynamicExcitation 25 sec (-0.573-0.622 MN)*

Στη συνέχεια συγκεντρώνονται όλα τα αποτελέσματα σε πίνακες, προκειμένου να φανούν οι μεταβολές στις δυνάμεις στην επένδυση της σήραγγας με βάση τα δευτερόλεπτα που έχει εφαρμοστεί ο παλμός.

**Πίνακας 13: Αποτελέσματα για το μοντέλο με H=10 και E=50 στον παλμό Ricker 1**

Δυνάμεις στην επένδυση της σήραγγας	Στάδια Σεισμικής φόρτισης					
	0.4	0.8	1.2	1.6	2	3
Αξονικές δυνάμεις min-max (MN)	0.441	0.398	0.924	0.369	0.439	0.482
	0.559	0.624	1.019	1.031	0.846	0.859
Ροπές Κάμψης min-max (MNm)	-0.04	-0.059	-0.195	-0.234	-0.179	-0.116
	0.042	0.058	0.149	0.174	0.117	0.07
Τέμνουσες Δυνάμεις min-max (MN)	-0.021	-0.027	-0.097	-0.101	-0.079	-0.059
	0.018	0.033	0.081	0.097	0.083	0.047

**Πίνακας 14: Αποτελέσματα για το μοντέλο με H=10 και E=100 στον παλμό Ricker 1**

Δυνάμεις στην επένδυση της σήραγγας	Στάδια Σεισμικής φόρτισης					
	0.4	0.8	1.2	1.6	2	3
Αξονικές δυνάμεις min-max (MN)	0.365	0.281	0.26	0.195	0.469	0.453
	0.581	0.68	1.109	1.171	0.89	0.885
Ροπές Κάμψης min-max (MNm)	-0.051	-0.078	-0.13	-0.191	-0.112	-0.075
	0.054	0.077	0.14	0.163	0.137	0.098
Τέμνουσες Δυνάμεις mix-max (MN)	-0.026	-0.031	-0.062	-0.075	-0.059	-0.035
	0.022	0.037	0.079	0.103	0.063	0.054

**Πίνακας 15: Αποτελέσματα για το μοντέλο με H=20 και E= 50 στον παλμό Ricker 1**

Δυνάμεις στην επένδυση της σήραγγας	Στάδια Σεισμικής φόρτισης					
	0.4	0.8	1.2	1.6	2	3
Αξονικές δυνάμεις min-max (MN)	0.785	0.74	0.581	0.648	0.76	0.804
	0.906	0.968	1.371	1.399	1.283	1.144
Ροπές Κάμψης min-max (MNm)	-0.04	-0.059	-0.201	-0.254	-0.198	-0.123
	0.042	0.058	0.153	0.202	0.144	0.077
Τέμνουσες Δυνάμεις mix-max (MN)	-0.021	-0.026	-0.083	-0.106	-0.09	-0.062
	0.017	0.031	0.085	0.115	0.086	0.055

**Πίνακας 16: Αποτελέσματα για το μοντέλο με H=10 και E=50 στον παλμό Ricker 2**

Δυνάμεις στην επένδυση της σήραγγας	Στάδια Σεισμικής φόρτισης					
	0.4	0.8	1.2	1.6	2	3
Αξονικές δυνάμεις min-max (MN)	0.457	0.449	0.292	0.417	0.463	0.511
	0.51	0.551	0.788	0.618	0.586	0.588
Ροπές Κάμψης min-max (MNm)	-0.005	-0.032	-0.194	-0.096	-0.066	-0.019
	0.005	0.035	0.173	0.073	0.047	0.02
Τέμνουσες Δυνάμεις mix-max (MN)	-0.002	-0.018	-0.087	-0.048	-0.035	-0.017
	0.003	0.015	0.087	0.048	0.034	0.017

**Πίνακας 17: Αποτελέσματα για το μοντέλο με H=20 και E= 50 στον παλμό Ricker 2**

Δυνάμεις στην επένδυση της σήραγγας	Στάδια Σεισμικής φόρτισης					
	0.4	0.8	1.2	1.6	2	3
Αξονικές δυνάμεις min-max (MN)	0.802 0.86	0.793 0.898	0.637 1.096	0.771 0.957	0.827 0.897	0.842 0.897
Ροπές Κάμψης min-max (MNm)	-0.003 0.003	-0.033 0.035	-0.184 0.175	-0.09 0.081	-0.029 0.015	-0.019 0.012
Τέμνουσες Δυνάμεις mix-max (MN)	-0.002 0.002	-0.014 0.014	-0.082 0.084	-0.036 0.042	-0.015 0.014	-0.012 0.011

**Πίνακας 18: Αποτελέσματα για το μοντέλο με H=10 και E= 50 για τον σεισμό Duzce**

Δυνάμεις στην επένδυση της σήραγγας	Στάδια Σεισμικής φόρτισης										
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	25
Αξονικές δυνάμεις min-max (MN)	0.335 0.693	0.496 1.094	0.708 2.235	0.601 2.219	0.838 2.04	0.717 2.094	0.743 1.986	0.877 2.064	0.871 2.085	0.897 1.91	0.924 1.945
Ροπές Κάμψης min-max (MNm)	-0.151 0.148	-0.449 0.426	-1.37 1.205	-1.598 1.582	-1.26 1.355	-1.49 1.56	-1.35 1.351	-1.323 1.31	-1.32 1.316	-1.33 1.257	-1.326 1.282
Τέμνουσες Δυνάμεις mix-max (MN)	-0.071 0.062	-0.187 0.22	-0.628 0.608	-0.689 0.744	-0.56 0.556	-0.71 0.65	-0.61 0.584	-0.564 0.634	-0.56 0.636	-0.584 0.61	-0.573 0.622

**Πίνακας 19: Αποτελέσματα για το μοντέλο με H=20 και E= 50 για τον σεισμό Duzce**

Δυνάμεις στην επένδυση της σήραγγας	Στάδια Σεισμικής φόρτισης										
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	25
Αξονικές δυνάμεις min-max (MN)	0.684 1.029	0.622 1.566	0.904 2.724	1.095 3.128	1.673 3.038	1.366 2.969	1.635 2.882	1.605 2.815	1.591 2.866	1.688 2.713	1.642 2.765
Ροπές Κάμψης min-max (MNm)	-0.144 0.144	-0.501 0.474	-1.112 1.022	-1.293 1.093	-1.06 0.971	-1.21 1.071	-1.02 0.909	-1.039 0.962	-1.05 0.988	-1.009 0.917	-1.025 0.948
Τέμνουσες Δυνάμεις mix-max (MN)	-0.07 0.059	-0.213 0.228	-0.489 0.547	-0.612 0.578	-0.49 0.511	-0.51 0.547	-0.5 0.461	-0.449 0.486	-0.44 0.497	-0.472 0.463	-0.457 0.477

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6<sup>ο</sup> : ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

---

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η μελέτη της ευστάθειας σήραγγων σε σεισμό. Προς τούτο, εξετάζεται αριθμητικά η απόκριση μίας αβαθούς σήραγγας διατομής κυκλικής της σήραγγας υπό δυναμική φόρτιση σε τρεις διαφορετικές δυναμικές φορτίσεις: παλμό Ricker με  $f_n=1$ , παλμό Ricker με  $f_n=2$  και σε ένα πραγματικό σειсмоγράφημα που καταγράφηκε κατά το σεισμό του Duzce το 1999 στην Τουρκία. Η αριθμητική προσομοίωση των μοντέλων που κατασκευάστηκαν έγινε με το πρόγραμμα RS2. Δημιουργήθηκαν μοντέλα τα οποία είχαν διαφοροποίηση στην ακαμψία και τη διατμητική αντοχή των γεωυλικών, στο ύψος των υπερκειμένων, στο συχνοτικό περιεχόμενο της σεισμικής διέγερσης, στην μέθοδο προσομοίωσης και στην χρονική εξέλιξη της απόκρισης της σήραγγας.

Έτσι, από τις αριθμητικές προσομοιώσεις της παρούσας εργασίας προέκυψαν ορισμένα συμπεράσματα τα οποία θα γίνουν κατανοητά με την σύγκριση των φάσεων στατικής-δυναμικής ανάλυσης κάθε μοντέλου αλλά και μεταξύ των μοντέλων.

### 6.1. Επίδραση του σεισμικού κραδασμού στην απόκριση της σήραγγας – Δυναμική ανάλυση

Στο σύνολο των αριθμητικών μοντέλων, η σεισμική διέγερση οδηγεί σε πολύ σημαντική αύξηση των εντατικών μεγεθών που αναπτύσσονται στην επένδυση της σήραγγας μετά το τέλος του σεισμικού κραδασμού. Προκειμένου για τις αξονικές δυνάμεις η αύξηση αυτή κυμαίνεται από 27% έως 87% για τον παλμό Ricker  $f_n=1$ , από 4% έως 18% για τον παλμό Ricker  $f_n=2$  και από 250% έως 300% για το σειсмоγράφημα Duzce. Η πολύ μεγάλη αυτή ποσοστιαία αύξηση των αξονικών δυνάμεων στην επένδυση οφείλεται στην εκτεταμένη διαρροή των στοιχείων της γεωμάζας που παρατηρείται μετά από το σεισμικό κραδασμό, ειδικά για το σειсмоγράφημα Duzce. Σημειώνεται ότι, οι ροπές κάμψης και οι τέμνουσες δυνάμεις στη περίπτωση εφαρμογής των εξιδανικευμένων παλμών Ricker αυξάνονται μεν, όχι όμως σε βαθμό που να καθίστανται κρίσιμες για την ευστάθεια της σήραγγας. Αντίθετα, όταν η σήραγγα υφίσταται δυναμική φόρτιση με βάση το σειсмоγράφημα Duzce, οι ροπές κάμψης αυξάνονται υπέρμετρα, αγγίζοντας τα 1350 kNm, μέγεθος που σαφώς μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία την επένδυση της σήραγγας.

Αναφορικά με τις μετατοπίσεις στην περιφέρεια της σήραγγας παρατηρείται μία αύξηση των ολικών μετατοπίσεων μετά το πέρας του σεισμικού κραδασμού. Ειδικότερα για την περίπτωση δυναμικής φόρτισης με βάση το σειсмоγράφημα Duzce, οι ολικές μετατοπίσεις φθάνουν τα 45 cm, μέγεθος που σαφώς δεικνύει ότι η σήραγγα έχει οδηγηθεί σε αστοχία. Αντίστοιχα, οι καθιζήσεις που παρατηρούνται στην επιφάνεια του εδάφους φθάνουν τα 27 cm.

### 6.2. Εκτίμηση σεισμικής απόκρισης με ψευδοστατική ανάλυση

Η επίδραση της μεθόδου προσομοίωσης στα μοντέλα στα οποία έγινε επεξεργασία παίζει πολύ σημαντικό ρόλο. Με βάση και τον Πίνακα 6, παρατηρείται μεγάλη διαφορά στην ελάχιστη και στην μέγιστη τιμή για τις αξονικές δυνάμεις στην ψευδοστατική φόρτιση σε

σχέση με την δυναμική φόρτιση. Επίσης οι μετατοπίσεις στην επένδυση της σήραγγας και οι καθιζήσεις στην επιφάνεια είναι πιο μεγάλες σε σχέση με την δυναμική φόρτιση καθώς στην δυναμική φόρτιση. Σημειώνεται ότι η ψευδοστατική φόρτιση υλοποιήθηκε με την εφαρμογή μίας οριζόντιας δύναμης στο μοντέλο με συντελεστή 0.6, ίσο με τον συντελεστή μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης των παλμών Ricker. Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα των μοντέλων της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αυτή η προσέγγιση δίνει πολύ πιο συντηρητικά αποτελέσματα, σε σχέση με τη δυναμική ανάλυση, και συνεπώς θα πρέπει να χρησιμοποιείται λαμβάνοντας υπόψη όχι μόνο την αναμενόμενη μέγιστη σεισμική επιτάχυνση, αλλά και τη διαφοροποίηση του είδους της φόρτισης (στατική αντί για δυναμική).

### 6.3. Επίδραση της ακαμψίας και της διατμητικής αντοχής του γεωυλικού

Για την αξιολόγηση της επίδρασης της ακαμψίας και της διατμητικής αντοχής του γεωυλικού συγκρίνονται τα αποτελέσματα των μοντέλων με βάθος  $h=10\text{m}$  και διαφορετικές τιμές  $E$ ,  $c$ ,  $\phi$ . Η σύγκριση γίνεται για τα μοντέλα με δυναμική φόρτιση μέσω εξιδανικευμένων παλμών Ricker. Και για τους δύο παλμούς ( $f_n=1$  και  $f_n=2$ ) παρατηρείται μεγαλύτερη ποσοστιαία αύξηση των αξονικών δυνάμεων στην επένδυση με την αύξηση της ακαμψίας και της διατμητικής αντοχής του γεωυλικού. Σημειώνεται εν τούτοις, ότι σε απόλυτα μεγέθη οι τιμές των δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επένδυση της σήραγγας κατά το στάδιο της εκσκαφής αλλά και στο στάδιο της σεισμικής φόρτισης είναι κοντινές.

Αναφορικά με τις καθιζήσεις στην επιφάνεια δεν μπορούν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα καθώς η ακρίβεια των αποτελεσμάτων επηρεάζεται από το καταστατικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση τους γεωυλικού. Είναι γνωστό ότι το γραμμικά ελαστικό – πλαστικό μοντέλο Mohr-Coulomb παρουσιάζει αδυναμία ρεαλιστικής εκτίμησης των καθιζήσεων στην επιφάνεια του εδάφους (βλ. π.χ. Χριστοδούλου 2020). Ωστόσο, στο μοντέλο όπου το μέτρο του Young για το έδαφος ήταν μεγαλύτερο παρουσιάστηκε και μεγαλύτερη ολική μετατόπιση γύρω από τη σήραγγα στο τέλος του σεισμικού κραδασμού. Η συμπεριφορά αυτή απαιτεί περαιτέρω διερεύνηση για να εξεταστεί και η ταυτόχρονη επίδραση του συχνοτικού περιεχομένου των παλμών.

### 6.4. Επίδραση του βάθους της σήραγγας

Για την αξιολόγηση της επίδρασης του βάθους της σήραγγας συγκρίνονται τα αποτελέσματα των μοντέλων με ύψος υπερκειμένων  $h=10\text{ m}$  και  $h=20\text{ m}$ . Σε όλες τις περιπτώσεις μετά το τέλος του σεισμικού κραδασμού εμφανίζεται μικρότερη ποσοστιαία αύξηση των αξονικών δυνάμεων στην επένδυση της σήραγγας για μεγαλύτερο ύψος υπερκειμένων. Συγκεκριμένα, η ποσοστιαία αύξηση των αξονικών δυνάμεων για  $h=20\text{m}$  και παλμό Ricker 1 είναι 27% έναντι 52% για  $h=10\text{m}$  (σχεδόν μισή). Ομοίως, και για δυναμική φόρτιση με το πραγματικό σειсмоγράφημα Duzce η ποσοστιαία αύξηση για  $h=20\text{m}$  είναι 253% έναντι 300% για  $h=10\text{m}$ . Αξιοσημείωτο είναι ότι το ίδιο συμπέρασμα εξαγεται και από την ψευδοστατική ανάλυση (89% αύξηση αξονικών δυνάμεων για  $h=20\text{m}$  έναντι 131% για  $h=10\text{m}$ ). Συνεπώς, η επικρατούσα αντίληψη ότι η επίδραση του σεισμού σε μία σήραγγα μειώνεται με την αύξηση του βάθους της σήραγγας επιβεβαιώνεται και από αριθμητικά μοντέλα της παρούσας εργασίας.

#### 6.4. Επίδραση του συχνοτικού περιεχομένου του σεισμικού κραδασμού.

Για την αξιολόγηση της επίδρασης του συχνοτικού περιεχομένου του σεισμικού κραδασμού συγκρίνονται τα αποτελέσματα των μοντέλων για τους παλμούς Ricker με  $f_n=1$  και  $f_n=2$ . Προκύπτει χαμηλότερη ποσοστιαία αύξηση αξονικών δυνάμεων με την αύξηση του συχνοτικού περιεχομένου (Ricker -  $f_n=2$ ) ανεξάρτητα από το βάθος της σήραγγας ή από την ακαμψία και τη διατμητική αντοχή του γεωυλικού. Και στις δύο περιπτώσεις οι ροπές κάμψης και οι τέμνουσες δυνάμεις ήταν σε χαμηλά επίπεδα.

#### 6.5. Σύγκριση μεταξύ εξιδανικευμένου και πραγματικού σεισμογραφήματος

Η επίδραση του πραγματικού σεισμογραφήματος, έδωσε πολύ μεγαλύτερες τιμές νούμερα στην αριθμητική προσομοίωση για όλες τις δυνάμεις που αναπτύσσονται στην επένδυση της σήραγγας, για τις καθιζήσεις στην επιφάνεια της σήραγγας και για τις ολικές μετατοπίσεις γύρω από την περιφέρεια της σήραγγας. Η διάρκεια του πραγματικού σεισμογραφήματος ήταν μεγαλύτερη από τον Ricker, καθώς και η μέγιστη σεισμική επιτάχυνση και ταχύτητα του παλμού μας με βάση και τα διαγράμματα που παρουσιάστηκαν στην διπλωματική στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο.

#### 6.6. Χρονική εξέλιξη της απόκρισης της σήραγγας

Τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων με ενδιάμεσα στάδια για διάφορα διαστήματα των σεισμικών κραδασμών δίνονται στους πίνακες 13 έως 19. Με βάση αυτά, προκύπτει ότι τα εντατικά μεγέθη που ασκούνται στιγμιαία στην επένδυση της σήραγγας κατά τη διάρκεια του σεισμικού κραδασμού είναι αυξημένα σε ποσοστό από 18% έως 34% για τους παλμούς Ricker και από 15% έως 18% για τα μοντέλα με το σεισμογράφημα Duzce. Συνεπώς, η επένδυση της σήραγγας δέχεται στιγμιαία σημαντικά μεγαλύτερα φορτία από εκείνα που δέχεται μετά το πέρας του σεισμικού κραδασμού. Για την αξιολόγηση της σημασίας της αύξησης αυτής θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και τυχόν αύξηση της δυναμικής αντοχής των υλικών της επένδυσης της σήραγγας.



## BIBΛIOΓΡΑΦΙΑ

---

Τέλος, παρατίθεται μια καταγραφή των δημοσιευμάτων, συγγραμμάτων, εργασιών και βιβλίων, στα οποία βασίστηκε η ανάπτυξη της παρούσας εργασίας. Οι αναφορές ταξινομούνται αλφαβητικά:

### **Ελληνική Βιβλιογραφία:**

**Γ**ιαννακού Α., Νομικός Π., Αναστασόπουλος Ι., Γιούτα Μήτρα Π., Σοφιανός Α., Γκαζέτας Γ. (1997), «Δυναμική Απόκριση Σηράγγων – Διερεύνηση Ιστορικού Περιστατικού Σεισμικής Αστοχίας».

Γιαννακού Κ. Αμαλία ( 2003 ), «Σεισμική συμπεριφορά σηράγγων και η αστοχία της σήραγγας Βολυ ( 12-11-1999)», Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

**Σ**οφιανός Α. Ι. (2018), «Διάνοιξη Σηράγγων», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

**Χ**αλαστάνης Γ. (2016), «Αριθμητική Προσομοίωση της Μηχανικής Συμπεριφοράς της Βραχώμαζας σε Υπόγειες Εκμεταλλεύσεις Θαλάμων και Στύλων», Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Χριστοδούλου Β. (2020), «Κατασκευαστικά θέματα και αριθμητική προσομοίωση της διάνοιξης με ΤΒΜ του τμήματος Σταθμός Αγ. Βαρβάρα-Σταθμός Κορυδαλλός της επέκτασης της Γραμμής 3 του μετρό της Αθήνας προς Πειραιά». Διπλωματική εργασία, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών, ΕΜΠ.

### **Διεθνής Βιβλιογραφία:**

**G**uidotti Roberto and Castellani Alberto (2018), «Tunnel Vaults under Seismic Excitation».

**H**ashash Y.M.A., Hook J.J., Schmidt B. and Yao J.I-C. (2001) Seismic design and analysis of underground structures. Tunneling and Underground Space Technology.

Hassan Sedarat (2009), Contact interface in seismic analysis of circular tunnels.

**K**ramer Steven L. (1996), Geotechnical Earthquake Engineering.

**O**wen G.N., Scholl (1981) R.E. Earthquake engineering of large underground structures.

**R**ocscience (2019), RS2 2019Q User's Manual – Tutorials RS2 2019.

**S**harma Sunil and William R. Judd (1991), Underground opening damage from earthquakes.

**W**ang Jaw-Nan (Joe) (1993), Seismic Design of Tunnels - A Simple State-of-the-Art Design Approach.

**Z**erva Aspasia (1988), Earthquake Engineering Structural Dynamics.

