

Κατά την αντισεισμική μελέτη ενός κτηρίου, ένας δομοστατικός μηχανικός οφείλει να γνωρίζει τις παραδοχές που κάνει το τεχνικό λογισμικό που χρησιμοποιεί. Συγχρόνως, πρέπει να επιλέξει τις κατάλληλες μεθόδους προσομοίωσης της κατασκευής του ώστε να αποφύγει σφάλματα που ενδεχομένως να οδηγήσουν σε υποδιαστασιολόγηση των δομικών στοιχείων της κατασκευής. Πρωταρχικά όμως καλείται να ελέγξει την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων του τεχνικού λογισμικού, μέσω πρότυπα επιλυμένων κτηριακών κατασκευών.

Στην Ελλάδα, έχουν γίνει ήδη κάποιες προσπάθειες σύνταξης πρότυπων αντισεισμικών αναλύσεων. Η πρώτη από αυτές έρχεται το 2005 με τη χορηγία του ΟΑΣΠ και συγγραφική ομάδα καθηγητών του ΑΠΘ. Εμπεριέχει 22 παραδείγματα κτηρίων.

Slide με κτήριο ΟΑΣΠ

Τον Φεβρουάριο του 2011, έγινε η δεύτερη διευρωπαϊκή προσπάθεια δημιουργίας μιας πρότυπης ανάλυσης κτηριακής κατασκευής από οπλισμένο σκυρόδεμα, με ενεργή συμμετοχή του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών. Είναι το πρώτο πρότυπο κτήριο με χρήση των Ευρωκωδίκων 2 και 8.

Slide με κτήριο Φαρδή

Τέλος, το Σεπτέμβριο του 2011, η ίδια συγγραφική ομάδα του ΑΠΘ που έκανε τις αναλύσεις στη μελέτη του ΟΑΣΠ, εξέδωσε ένα σύγγραμμα με 3 πρότυπα επιλυμένα κτήρια.

Slide με κτήρια Αβραμίδη

Δυστυχώς, όμως, οι αναλύσεις αυτές είχαν λάθη, όπως λάθος συνεργαζόμενα πλάτη πλακοδοκών, λάθος φορτία ή επιφάνειες φόρτισης, λάθος αδρανειακά μεγέθη των μελών της κατασκευής κ.α. Κυρίως όμως δεν περιέγραφαν αναλυτικά όλη τη διαδικασία, όπως τον τρόπο εύρεσης των αδρανειακών μεγεθών των μελών, τον τρόπο ορισμού της ακαμψίας των κόμβων δοκών-υποστυλωμάτων, τη διαδικασία εύρεσης ταυτόχρονων μέγιστων εντατικών μεγεθών για σεισμική δράση κατά X και Y. Τις περισσότερες φορές, επαφίονταν σε αυτοματοποιημένες διαδικασίες του εκάστοτε τεχνικού λογισμικού.

Με αυτή τη διπλωματική εργασία, θα προσπαθήσω να εξηγήσω ορισμένα λεπτά σημεία στην ανάλυση των κατασκευών.

Ας αρχίσουμε από τη διαφραγματική λειτουργία των πλακών των ορόφων που συναντάται στα περισσότερα κτηριακά έργα και περιγράφει την κίνηση της πλάκας ενός ορόφου, σαν δίσκος απαραμόρφωτος εντός του επιπέδου του.

Η διαφραγματική λειτουργία του φορέα, εφόσον εξασφαλίζεται από ατενείς πλάκες, σημαίνει μηδενικές αξονικές παραμορφώσεις των δοκών, αν οι δοκοί έχουν οριστεί χωρίς εκκεντρότητα. Αυτό είναι εφικτό μόνο στην περίπτωση του ενός αμφίπακτου πλαισίου και μόνο αν ληφθεί το διάφραγμα στη στάθμη του κέντρου βάρους της δοκού. Στους πραγματικούς φορείς, οι δοκοί σπάνια είναι της ίδιας διατομής. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, το κέντρο βάρους των δοκών να μην έχει σταθερή θέση σε σχέση με τη στάθμη του ορόφου/διαφράγματος.

Slide με πλαίσιο

Η σημασία της εκκεντρότητας φαίνεται σε μία αμφιέρειστη δοκό με ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο. Εάν οι στηρίξεις βρίσκονται στο κέντρο βάρους της διατομής, δεν υπάρχουν παραμορφώσεις στον κεντροβαρικό άξονα και άρα η ροπή είναι $ql^2/8$ ενώ η αξονική δύναμη είναι μηδέν. Αντιθέτως, σημαντική αξονική δύναμη αναπτύσσεται, εάν η δοκός στηρίζεται στο κάτω πέλμα της. Η καμπτική ροπή στις στηρίξεις, είναι ίση με $-ql^2/16$ ενώ στο μέσο του ανοίγματος είναι μειωμένη κατά 50% δηλαδή $ql^2/16$.

Slide με θεωρ. προσομοίωμα πλαισιακών κόμβων

Slide με εκκεντρότητα άξονα δοκού-διαφράγματος 1

Το φαινόμενο γίνεται εντονότερο όταν η δοκός καταμηθεί σε πεπερασμένο αριθμό τμημάτων, ώστε να σχηματιστούν τα βέλη ελέγχου στην Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας. Φυσικά, αν μεταφέρουμε την αξονική στο κάτω πέλμα, ως ροπή με μοχλοβραχίονα $h/2$, η τελική ροπή που αντιστοιχεί στο κάτω πέλμα είναι ίση με εκείνη της κεντροβαρικά στηριζόμενης δοκού.

Slide με εκκεντρότητα άξονα δοκού-διαφράγματος 2

Γίνεται, έτσι σαφές, ότι τα αποτελέσματα που λαμβάνουμε λόγω της εκκεντρότητας του κέντρου βάρους των δοκών, από τη στάθμη του διαφράγματος καθιστούν την εποπτεία αλλά και διαστασιολόγηση των δοκών, μια επίπονη διαδικασία, με μεγάλο κίνδυνο λάθους.

Συνεπώς, τα περισσότερα λογισμικά ορίζουν τις δοκούς χωρίς εκκεντρότητα, με τον κεντροβαρικό τους άξονα να διέρχεται από τη στάθμη του διαφράγματος. Έτσι, με μηδενική εκκεντρότητα, τα διαγράμματα ροπών εμφανίζονται στις συνηθισμένες μορφές ενώ η διαστασιολόγηση γίνεται ευκολότερη αφού γίνεται μόνο για κάμψη και όχι για αξονική δύναμη.

Slide με προσομοίωμα πλαισιακών κόμβων Midas/PAΦ

Τα λογισμικά προσομοιώνουν τη διαφραγματική λειτουργία με εξαρτημένους βαθμούς ελευθερίας για κάθε διάφραγμα ή με προσαύξηση του εμβαδού της διατομής των δοκών. Η προσαύξηση του εμβαδού της διατομής κάθε δοκού με έναν

συντελεστή σημαίνει ότι για τα στοιχεία των δοκών, το πρόγραμμα λαμβάνει εμβαδόν 60 φορές μεγαλύτερο από το ονομαστικό. Αυτό οδηγεί σε μικρές αξονικές των δοκών που όμως μπορεί να θεωρηθούν και αμελητέες. Αντιθέτως, μια ανάλυση με εξαρτημένους βαθμούς ελευθερίας, θα έδινε μόνο καμπτικές ροπές για τις δοκούς.

Διαφοροποιήσεις στα αποτελέσματα μπορεί να προκύψουν από την παραδοχή που θα γίνει για την προσομοίωση των απολύτως στερεών βραχιόνων. Η προσομοίωση τους, μπορεί να επιτευχθεί είτε με εκκεντρότητες των επιμέρους στοιχείων που τους απαρτίζουν, είτε με στιβαρούς βραχίονες (rigid links) μεταξύ των έκκεντρων κόμβων.

Slide με προσομοίωμα πλαισιακών κόμβων b, c, d

Η μεν εκκεντρότητα των στοιχείων, ορίζεται κατά τα γνωστά από τη μητρική στατική, με το μητρώο εκκεντροτήτων του κάθε μέλους του φορέα. Οι στιβαροί βραχίονες ωστόσο, πρόκειται για δοκούς με φαινομενικά άπειρη δυσκαμψία, δυστρεψία, δυσμησία και δυστένεια — συνήθως $10^5 - 10^8$ φορές τα μεγέθη των μελών που συνδέουν

Η διαφορά των αποτελεσμάτων είναι αμελητέα, ωστόσο μπορεί να προκαλέσει παρανοήσεις. Το φαινόμενο γίνεται εντονότερο στην περίπτωση που οι στιβαροί βραχίονες έχουν σημαντικό μήκος, όπως στους άκαμπτους βραχίονες σύνδεσης δοκού-τοιχώματος. Αν ο άκαμπτος βραχίονας, προσομοιωθεί με στιβαρό βραχίονα (rigid link) και στους κόμβους που ενώνει, τοποθετηθεί δοκός, τότε η δοκός θα εμφανίσει εντατικά μεγέθη, μικρά αλλά υπαρκτά.

Αυτό φυσικά έρχεται σε αντίθεση με την πλήρη ακαμψία που θεωρούμε εμείς θεωρώντας την ύπαρξη άκαμπτου βραχίονα στον κόμβο των δύο στοιχείων.

Ένα ακόμη μειονέκτημα είναι η σημαντική αύξηση των βαθμών ελευθερίας. Χαρακτηριστικά, ο πενταώροφος φορέας με απλή συμμετρία του Αβραμίδη, για τη θεώρηση κόμβων της συγγραφικής ομάδας, έχει με χρήση εκκεντροτήτων 150 βαθμούς ελευθερίας ενώ με χρήση στιβαρών βραχιόνων 852 βαθμούς ελευθερίας. Καθίσταται λοιπόν σαφές, ότι η χρήση στιβαρών βραχιόνων αυξάνει την πολυπλοκότητα του ορισμού του προσομοιώματος και μειώνει την εποπτεία του.

Slide με κτήριο Αβραμίδη Α

Στο μητρώο στιβαρότητας της κατασκευής συνήθως λαμβάνονται

στρεπτικές και διατμητικές παραμορφώσεις. Οι στρεπτικές βρίσκονται μέσω της στρεπτικής ροπής αδράνειας της διατομής του κάθε μέλους και δεν αποτελούν ιδιαίτερο πρόβλημα.

Ωστόσο, σε δοκούς από οπλισμένο σκυρόδεμα, το βέλος από διάτμηση μπορεί να έχει την ίδια τάξη μεγέθους όπως το βέλος από ροπή κάμψης. Έτσι, κατά την μόρφωση του προσομοιώματος του φορέα, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι διατμητικές παραμορφώσεις. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω των επιφανειών διάτμησης των διατομών A_{sy} και A_{sz} που αποτελούν μια απομείωση της επιφάνειας A της διατομής μέσω ενός διορθωτικού συντελεστή.

Ο Pilkey, στο βιβλίο του, παραθέτει προσεγγιστικούς τύπους για τον διορθωτικό συντελεστή συνήθων διατομών εμπεριέχοντας το λόγο Poisson ν . Αντιθέτως, τα τεχνικά λογισμικά SAP2000 και Midas Gen, υπολογίζουν το εμβαδόν διάτμησης αγνοώντας το λόγο Poisson.

Τύπος Pilkey

Στην πραγματικότητα όμως, λόγω του φαινομένου της παρασιτικής διατμητικής δυσκαμψίας (shear locking), η επιφάνειες διάτμησης μιας διατομής υπερεκτιμώνται. Έτσι, για μια ορθογωνική διατομή $b \times h$, με λόγο Poisson $\nu = 0.3$, η εξίσωση του Pilkey, δίνει συντελεστή διόρθωσης κοινό για κατακόρυφο ή οριζόντιο επίπεδο διάτμησης.

Αντιθέτως, η εξίσωση του Renton που λαμβάνει υπόψη το λόγο των διαστάσεων της ορθογωνικής διατομής, δίνει τιμές διαφορετικές για επιμήκεις διατομές όπως τοιχώματα.

Τοίχωμα και τιμές A_{sy} A_{sz}

Κέντρο διάτμησης μιας δοκού ανοικτής διατομής (π.χ. C, L), με τον κορμό κατακόρυφο, είναι το σημείο εκείνο από το οποίο αν διέρχεται φορτίο σε κατακόρυφο, ως προς τη διατομή, επίπεδο, η δοκός κάμπτεται χωρίς να στρέφεται.

Διατομή L

Δυστυχώς, δημοφιλή προγράμματα (SAP2000, Midas Gen) λαμβάνουν τις δοκούς κεντροβαρικά αγνοώντας την στρέψη που προκαλείται λόγω διάτμησης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, ένα κεντροβαρικά φορτιζόμενος πρόβολος μιας πλακοδοκού Γ να μην στρέφεται λόγω απόστασης κέντρου βάρους και κέντρου διάτμησης.

Το κέντρο διάτμησης, όπως και η ενεργός επιφάνεια διάτμησης, εξαρτώνται από το λόγο Poisson ν του υλικού. Ο ακριβής

υπολογισμός τους γίνεται μέσω λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων.

Συνεπώς, η στρεπτική επιπόνηση των δοκών λόγω εκκεντρότητας του φορτίου σε σχέση με το κέντρο διάτμησης (ή ακόμη και με το κέντρο βάρους) είναι προτιμότερο να αγνοείται, διότι μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένα συμπεράσματα.

Η περιγραφή ενός κτηρίου ως μονοβάθμιου ή πολυβάθμιου ταλαντωτή, για την εύρεση των ιδιομορφών του, επιβάλλει την κατασκευή του μητρώου μάζας της κατασκευής. Το τελευταίο συνίσταται από τις μεταφορικές μάζες M_x και M_y κατ' όροφο καθώς και τη μαζική ροπή αδράνειας (mass moment of inertia) J_m που περιγράφει την αδράνεια του διαφράγματος ως τη στρέψη.

Μητρώο μάζας

Η μαζική ροπή αδράνειας ενός διαφράγματος προκύπτει από το άθροισμα των επιμέρους γραμμικών κι επιφανειακών μαζικών ροπών αδράνειας των μαζών των φορτίων που επιβάλλονται σε αυτό μετατοπισμένα ως προς το κέντρο μάζας του ορόφου σύμφωνα με το θεώρημα Steiner.

Ράβδος & ορθογώνιο

Ένα σύνθημα λάθος που κάνουν τα περισσότερα εμπορικά λογισμικά είναι η συγκέντρωση των μαζών στους κόμβους αρχής και τέλους κάθε γραμμικού στοιχείου. Αυτό επηρεάζει σημαντικά τη μαζική ροπή αδράνειας.

Για κατανεμημένο επιφανειακό φορτίο στην πλάκα και κατανεμημένο φορτίο στις δοκούς του μονώροφου κτηρίου του σχήματος προέκυψαν τρεις διαφορετικές μαζικές ροπές αδράνειας, μια πραγματική και δύο για θεωρήσεις 4 και 8 κόμβων μάζας

μονώροφο κάτοψη

Γίνεται αντιληπτό ότι η μαζική ροπή αδράνειας υπερεκτιμάται με τη θεώρηση κόμβων στα άκρα των ραβδόμορφων μελών της κατασκευής. Ο μελετητής καλείται να εξακριβώσει το σωστό υπολογισμό των μαζικών ροπών αδράνειας και αν είναι λάθος να τις διορθώσει χειροκίνητα στο μητρώο μάζας.

Διαφορετικά μοντέλα θεώρησης μαζών + Πίνακας

Εναλλακτικά, με πύκνωση των γραμμωτών/χωρικών πεπερασμένων δύναται να πετύχει πιο ομοιόμορφη κατανομή μαζών και συνεπώς, ακριβέστερο υπολογισμό των μαζικών ροπών αδράνειας.

Σε κάθε δοκάρι που κάμπτεται σε ένα επίπεδο συμμετρίας το φορτίο ισορροπεί από τις διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται

σχήμα πλακοδοκού ισορροπία

στο κορμό και οι οποίες προκαλούν τις αξονικές παραμορφώσεις σε αυτόν. Η αξονική παραμόρφωση μεταφέρεται στα πέλματα μέσω διατμητικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στις ακμές όπου τα πέλματα ενώνονται με τον κορμό.

Όμως οι επίπεδες διατμητικές τάσεις στο πέλμα δεν είναι ομοιόμορφες κατά το πλάτος του και έτσι η διατομή του πέλματος δεν παραμένει επίπεδη με αποτέλεσμα να μειώνεται η ικανότητα του να φέρει αξονικές τάσεις όπως αυτές προβλέπονται από την απλή θεωρία της κάμψης.

Το φαινόμενο λέγεται υστέρηση διάτμησης (shear lag), και έχει ως αποτέλεσμα την μη σταθερή κατανομή των ορθών τάσεων κατά την κάμψη σε σημεία που ισαπέχουν από τον ουδέτερο άξονα.

Η υστέρηση διάτμησης έχει ως αποτέλεσμα οι τάσεις να είναι μεγαλύτερες στην ένωση κορμού με τα πέλματα και μικρότερες σε απόσταση από την ένωση.

σχήμα 3ων
πλακοδοκών

Στις πλακοδοκούς από σκυρόδεμα, ο ουδέτερος άξονας ακολουθεί παραβολική πορεία, λόγω της μείωσης της τάσης του σκυροδέματος κατά μήκος της πλάκας.

Σχήμα Brendel

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την πραγματική κατανομή τάσεων σε μια πλακοδοκό είναι το είδος του φορτίου (κατανεμημένο, συγκεντρωμένο), το είδος των στηρίξεων, οι αποστάσεις των γειτονικών δοκών, το άνοιγμα της δοκού και οι διαστάσεις της διατομής. Επιπλέον, η ανελαστική συμπεριφορά του σκυροδέματος, η συστολής ξηράνσεως και ερπυσμός, καθιστούν αδύνατο τον προσδιορισμό του ακριβούς σχήματος του ουδέτερου άξονα.

Για το λόγο αυτό, στον υπολογισμό της ροπής αντίστασης της διατομής (section modulus) ενός καμπτόμενου δοκαριού, χρησιμοποιείται αντί του πλάτους του πέλματος ένα ισοδύναμο ή ενεργό πλάτος (effective width) το οποίο πολλαπλασιαζόμενο με τη μέγιστη τάση (στο σημείο ένωσης πέλματος και κορμού) δίδει την αξονική δύναμη που συνολικά φέρει η διατομή.

Το ισοδύναμο πλάτος ορίζεται με την παραδοχή οριζόντιου ουδέτερου άξονα κατά πλάτος της διατομής και αναλογίας των τάσεων σε σχέση με την απόσταση κάθε σημείου από τον ουδέτερο άξονα. Η χρήση του ισοδύναμου πλάτους έχει σημαντικά πλεονεκτήματα — επιτρέπει στο μηχανικό να

εφαρμόσει τύπους απλής κάμψης τετραγωνικών διατομών σε πλακοδοκούς μορφής T.

Προκειμένου να διαπιστωθεί η ακρίβεια επίλυσης ενός φορέα με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία για την προσομοίωση των πλακών, έκκεντρα συνδεδεμένα με ορθογωνικές δοκούς, μορφώθηκε το κτήριο του παραδείγματος.

Finite building

Για λόγους σύγκρισης, ελέγχθηκαν τα στατικά προσομοιώματα με χρήση πλακοδοκών για διάφορα συνεργαζόμενα πλάτη καθώς και για το ήμισυ του πλάτους της πλάκας.

Από την ταύτιση των εντασιακών μεγεθών του υποστυλώματος, για τα μοντέλα με τα επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία και με τις πλακοδοκούς με πλάτος ίσο με το μισό της πλάκας, διαπιστώνουμε ότι η προσομοίωση απέχει από τον "πραγματικό" φορέα αφού περιγράφει μια πλήρως ελαστική παραμόρφωση της πλάκας.

building T-Beam
long

Καταλήγουμε λοιπόν, ότι ο μηχανικός οφείλει να είναι συντηρητικός στη χρήση νέων τεχνολογιών στη μελέτη της κατασκευής του, διότι χωρίς την κατάλληλη εποπτεία του τεχνικού λογισμικού μπορούν να καταλήξει σε λάθος συμπεράσματα και να υποδιαστασιολογήσει την κατασκευή του.

slide τελικό