

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ-ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΑΝΤΕΛΗΣ Α. ΖΕΡΒΑΣ

Διπλ. Πολιτικός Μηχανικός Α.Π.Θ.

**ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ
ΠΛΑΙΣΙΑΚΩΝ ΦΟΡΕΩΝ ΜΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ
ΜΟΝΟΠΛΕΥΡΗΣ ΕΠΑΦΗΣ**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 1993

Πρόλογος

Στον τομέα Επιστήμης και Τεχνολογίας των κατασκευών του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του ΑΠΘ, σημαντικό τμήμα των ερευνητικών δραστηριοτήτων καλύπτει η ενασχόληση με τη θεωρητική και αναλυτική μελέτη προβλημάτων στατικής και δυναμικής των κατασκευών, που υφίστανται κάθε μορφής ανισοτικούς περιορισμούς.

Μέσα στο γόνιμο αυτό κλίμα, από τον Φεβρουάριο του 1989, με την καθοδήγηση της καθηγήτριας κ. Ε. Μητσοπούλου, ασχολήθηκα με τη μελέτη του δυναμικού προβλήματος μονόπλευρης επαφής. Έμφαση δόθηκε στην μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς τρισδιάστατων κατασκευών που εδράζονται στο έδαφος με συνθήκες μονόπλευρης επαφής. Το αποτέλεσμα της ενασχόλησης με το θέμα εκφράζεται από την παρούσα διατριβή.

Φτάνοντας στο τέλος της προσπάθειας επιθυμώ να ευχαριστήσω ιδιαιτέρως την καθηγήτρια κ. Ε. Μητσοπούλου για την ολόπλευρη ηθική και επιστημονική συμπαράσταση καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διατριβής.

Ευχαριστώ θερμά τον καθηγητή κ. Κ. Αναστασιάδη και τον αναπλ. καθηγητή κ. Ι. Αβραμίδη, για τη συμμετοχή τους στην τριμελή συμβουλευτική επιτροπή και τις πολύτιμες συμβουλές τους.

Ιδιαιτέρως θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Π.Δ. Παναγιωτόπουλο για την επιστημονική βοήθεια, την ηθική συμπαράσταση, καθώς και για την υλικοτεχνική υποδομή του Εργαστηρίου Μεταλλικών Κατασκευών, την οποία έθεσε στη διαθεσή μου, για την πραγματοποίηση των αριθμητικών επιλύσεων και των εκτυπώσεων.

Ευχαριστώ, επίσης, τους συναδέλφους και φίλους κ.κ. Γ. Νικολαΐδη, Θ. Νικολαΐδη και Ε. Μυστακίδη για τη βοήθεια που προσέφεραν σε διάφορες φάσεις της διατριβής.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

1.1	Θέση του προβλήματος	1
1.2	Στόχοι της διατριβής	2
1.3	Διάρθρωση της διατριβής	3

Κεφάλαιο 2 Βιβλιογραφική επισκόπηση

2.1	Απλοποιημένα μοντέλα για τη μελέτη της δυναμικής μονόπλευρης επαφής κατασκευών με το έδαφος	5
2.2	Σύνθετα αναλυτικά και πειραματικά μοντέλα για τη μελέτη της δυναμικής μονόπλευρης επαφής κατασκευών με το έδαφος	8
2.3	Γενικότερη αναφορά στο δυναμικό πρόβλημα μονόπλευρης επαφής μεταξύ σωμάτων	11
2.4	Γενικότερη αναφορά στη μελέτη ανισοτικών προβλημάτων	12

Κεφάλαιο 3 Επίλυση του διαχριτοποιημένου δυναμικού προβλήματος μονόπλευρης επαφής-χρούσης

3.1	Το πρόβλημα της μονόπλευρης επαφής. Βασικές παραδοχές	13
3.2	Διαχριτοποίηση στο χώρο και το χρόνο για την επίλυση του δυναμικού προβλήματος επαφής	18
3.2.1	Γενικές εξισώσεις δυναμικής ισορροπίας	18
3.2.2	Χρονική διαχριτοποίηση των εξισώσεων δυναμικής ισορροπίας	20
3.2.3	Επίλυση του μονοπλεύρου προβλήματος. Αναγωγή σε πρόβλημα τετραγωνικού προγραμματισμού με αγνώστους τις μεταχινήσεις στο σύνορο G_s	21
3.2.4	Ο αλγόριθμος Hildreth d'Esopo	24
3.3	Τρόπος επιβολής καταναγκασμένων μεταχινήσεων στο σύνορο G_s με τη χρησιμοποίηση των πολλαπλασιαστών Lagrange. Υπολογισμός του μητρώου επιρροής	25
3.4	Συνολική παρουσίαση της πορείας υπολογισμού σε κάθε χρονικό βήμα	28
3.5	Το πρόβλημα της χρούσης της κατασκευής με το έδαφος	29

Κεφάλαιο 4 Παρουσίαση του προγράμματος *UniDyn*

4.1	Δυνατότητες του προγράμματος	31
4.2	Δομή του προγράμματος	32

Κεφάλαιο 5 Αποτελέσματα - Συμπεράσματα

5.1 Γενικά στοιχεία	41
5.1.1 Προσομοίωση του εδάφους με ελατήρια. Συνθήκες μονόπλευρης επαφής	41
5.1.2 Παρουσίαση των φορέων που επιλύθησαν	42
5.1.3 Παρουσίαση της δυναμικής φόρτισης	48
5.1.4 Απόσβεση	51
5.1.5 Βήμα ολοχλήρωσης	51
5.1.6 Ταχύτητα σύγχλισης του αλγορίθμου τετραγωνικού προγραμματισμού	51
5.1.7 Πώς αντιμετωπίσθηκε η χρούση	51
5.1.8 Διευχρινήσεις ορολογίας και συμβόλων	53
5.2 9-όροφο δισδιάστατο κτίριο με σχέση ύψους/πλάτος:1.9	54
5.2.1 Σχληρό έδαφος	54
5.2.2 Μαλακό έδαφος	68
5.2.3 Όταν η χρούση δεν λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς	73
5.3 9-όροφο δισδιάστατο κτίριο με σχέση ύψους/πλάτος:2.59	75
5.3.1 Σχληρό έδαφος	75
5.3.2 Μαλακό έδαφος	82
5.3.3 Όταν η χρούση δεν λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς	85
5.4 5-όροφος χωρικός φορέας - παραμετρική ανάλυση	86
5.4.1 Σχληρό έδαφος	86
5.4.2 Μαλακό έδαφος	88
5.5 5-όροφος χωρικός φορέας - Σεισμοί	90
5.5.1 Σχληρό έδαφος	90
5.5.2 Μαλακό έδαφος	98
5.6 7-όροφος χωρικός φορέας - παραμετρική ανάλυση	100
5.6.1 Σχληρό έδαφος	100
5.6.2 Μαλακό έδαφος	102
5.7 7-όροφος χωρικός φορέας - Σεισμοί	103
5.7.1 Σχληρό έδαφος	104
5.7.2 Μαλακό έδαφος	109
5.8 5-όροφος χωρικός έκκεντρος φορέας - παραμετρική ανάλυση	111
5.9 5-όροφος χωρικός έκκεντρος φορέας - Σεισμοί	114

Κεφάλαιο 6 Γενικά συμπεράσματα

6.1 Συνοπτική παρουσίαση συμπερασμάτων	119
6.2 Αναλυτική παρουσίαση συμπερασμάτων παραμετρικής και σεισμικής ανάλυσης	120
Βιβλιογραφία	123
Παράρτημα	129
Summary	163

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Θέση του προβλήματος

Όταν ανάμεσα σε δύο σώματα, που έχουν κοινή επιφάνεια επαφής, δεν έχει, με χάποιον τρόπο, απαγορευθεί η δυνατότητα αποχωρισμού τμημάτων του κοινού συνόρου, εισάγεται ένα στοιχείο αβεβαιότητας. Δεν είναι εκ των προτέρων γνωστό, ποιά τμήματα του συνόρου θα διατηρηθούν σε επαφή ή θα την χάσουν, με μεταβαλλόμενη φόρτιση. Λόγω του ότι δεν μπορεί να μεταβιβαστεί εφελχυσμός μεταξύ των σωμάτων στο κοινό σύνορο, υπάρχει πλήρης εξάρτηση της συμπεριφοράς τους από την φόρτιση. Το μη-γραμμικό αυτό φαινόμενο αποκτά έντονο ενδιαφέρον όταν μελετάται η απόχριση των κατασκευών σε σεισμική διέγερση, με παραδοχή συνθηκών μονόπλευρης επαφής των θεμελίων της κατασκευής με το έδαφος, δηλαδή με συνυπολογισμό της πιθανότητας να υπάρξει μερική αποκόλληση (uplift) των θεμελίων από το έδαφος.

Στη συνέχεια αναφέρονται περιπτώσεις κατά τις οποίες υπάρχουν ενδείξεις αποκόλλησης των θεμελίων από το έδαφος, κατά τη διάρκεια ισχυρών σεισμών [Psy83a, Koh91a]:

- Μετά το σεισμό της Alaska 1964, βρέθηκε πάγος κάτω από δεξαμενές πετρελαίου.
- Κατά το σεισμό του Arvin-Tehachapi, California το 1952, μερικοί υψηλοί πύργοι πετρελαίου τέντωσαν τα μπουλόνια των αγκυρώσεων και λικνίστικαν μπρός και πίσω.
- Η ανάλυση των ζημιών του νοσοκομείου βετεράνων στο σεισμό του San Fernando το 1971 έδειξε ότι υπήρξε μερική αποκόλληση των θεμελίων. Μετά το σεισμό αυτό, νέος κώδικας απαίτησε ότι τα νοσοκομεία της California πρέπει να υπολογίζονται για αρκετά μεγαλύτερες δυνάμεις [Chop].

Η σεισμική απόχριση κατασκευής εδραζόμενης στο έδαφος, συνήθως λαμβάνεται ισοδύναμη με την απόχριση, ομοίως επιπονούμενης κατασκευής πλήρως συνδεδεμένης με άκαμπτο έδαφος. Για δύο ουσιαστικούς λόγους, αυτή η παραδοχή μπορεί να οδηγήσει (ιδίως όταν υπάρχει επιφανειακή θεμελίωση) σε σημαντικά λάθη:

- Τα περισσότερα εδάφη δεν είναι τελείως άκαμπτα.
- Οι κατασκευές εδράζονται στο έδαφος, λόγω των δυνάμεων βαρύτητας, χωρίς να είναι σταθερά προσαρτημένες σε αυτό.

2 Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

Η πρώτη αιτία δημιουργίας λαθών έχει αντιμετωπισθεί ικανοποιητικά με την θεώρηση εδάφους το οποίο έχει την επιθυμητή ευχαριστία. Η παραδοχή όμως κατασκευής ακλόνητα συνδεδεμένης με το έδαφος, αντιμετωπίζει το έδαφος σαν να είχε την ίδια αντοχή σε εφελκυσμό και θλίψη. Ωστόσο, ενώ τα εδάφη παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή σε θλίψη, έχουν αμελητέα αντοχή σε εφελκυσμό. Συνεπώς, κατά τη διάρκεια ισχυρών σεισμικών διεγέρσεων, η ροπή ανατροπής που αναπτύσσεται στη βάση ορισμένων κατασκευών, μπορεί να είναι τόσο ισχυρή, ώστε να προκαλέσει μερική αποκόλληση τμημάτων των θεμελίων από το έδαφος. Σε αυτή την περίπτωση η κατασκευή αποκτά μη-γραμμική συμπεριφορά και αλλάζει ο τρόπος με τον οποίο αντιμετωπίζει την σεισμική διέγερση.

Για τη μελέτη της δυναμικής απόχρισης των κατασκευών, ώστε να λαμβάνεται υπόψη η μηδενική αντοχή του εδάφους σε εφελκυσμό, άρα η πιθανότητα μερικής αποκόλλησης, η ερευνητική προσπάθεια, όπως θα αναλυθεί στο κεφάλαιο 2, έχει χυρίως εχφραστεί μέσω απλοποιημένων μονοβάθμιων μοντέλων. Σε αντίθεση με το σημαντικό αριθμό των εργασιών με απλοποιημένα μοντέλα, σχετικά λίγες εργασίες έχουν γίνει για την επίλυση (π.χ. με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων) ρεαλιστικότερων μοντέλων, που να προσεγγίζουν ικανοποιητικά το πρόβλημα της δυναμικής μονόπλευρης επαφής των θεμελίων με το έδαφος.

1.2 Στόχοι της διατριβής

Οι στόχοι που τέθηκαν κατά την εκπόνηση της διατριβής είναι οι ακόλουθοι:

1. Η ανάπτυξη αριθμητικής μεθόδου για την αντιμετώπιση του δυναμικού προβλήματος μονόπλευρης επαφής-χρούσης μεταξύ ελαστικών σωμάτων. Αυτό επιτυγχάνεται με χρησιμοποίηση σχήματος διακριτοποίησης στο χώρο και στο χρόνο και επίλυση ενός προβλήματος τετραγωνικού προγραμματισμού, για κάθε χρονικό βήμα, μόνο για μικρό αριθμό αγνώστων, που είναι οι «μονόπλευρες» μετακινήσεις στο σύνορο. Κύρια επιδίωξη είναι χρησιμοποίηση της προτεινόμενης μεθόδου για τη μελέτη της σεισμικής απόχρισης μεγάλων κατασκευών, που στηρίζονται στο έδαφος, με δυνατότητα παραλαβής θλιπτικών, αλλά όχι εφελκυστικών τάσεων (συνθήκες μονόπλευρης επαφής).
2. Η ανάπτυξη προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων γενικής χρήσης, ως εργαλείο ελέγχου και εφαρμογής του προαναφερθέντος βασικού στόχου, με δυνατότητα αντιμετώπισης του δυναμικού προβλήματος μονόπλευρης επαφής-χρούσης, τρισδιάστατων μοντέλων, ανεξάρτητα από το μέγεθος της προς επίλυση κατασκευής και τον αριθμό των «μονοπλεύρων» μετακινήσεων στο σύνορο.
3. Με τη χρησιμοποίηση του προγράμματος, η πραγματοποίηση παραμετρικής και

σεισμικής ανάλυσης σειράς «ρεαλιστικών» κατασκευών, που στηρίζονται στο έδαφος με συνθήκες μονόπλευρης επαφής και σύγχριση με αντίστοιχα αποτελέσματα, που προκύπτουν με παραδοχή αμφιπλεύρων συνθηκών έδρασης των κατασκευών με το έδαφος. Μέσω της σύγχρισης των αποτελεσμάτων, προσπάθεια εξαγωγής συμπερασμάτων, σχετικά με τα χαρακτηριστικά της δυναμικής απόχρισης κατασκευών με συνθήκες μονόπλευρης επαφής.

4. Τέλος, μέσω των επιλύσεων, έλεγχος της ταχύτητας σύγχλισης του αλγορίθμου τετραγωνικού προγραμματισμού και της συνολικής λειτουργίας του σχήματος χωρικής και χρονικής διαχριτοποίησης που χρησιμοποιείται.

1.3 Διάρθρωση της διατριβής

Στο παρόν εισαγωγικό κεφάλαιο παρουσιάζονται η θέση του προβλήματος, οι στόχοι και η διάρθρωση της διατριβής.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται σύντομη βιβλιογραφική αναφορά σε εργασίες πάνω στο δυναμικό πρόβλημα μονόπλευρης επαφής κατασκευών εδραζόμενων στο έδαφος με σεισμική διέγερση, όπως επίσης στο γενικότερο πρόβλημα της δυναμικής μονόπλευρης επαφής μεταξύ σωμάτων και τέλος γίνεται αναφορά στην ερευνητική προσπάθεια αντιμετώπισης των ανισοτικών προβλημάτων.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται αριθμητική μέθοδος αντιμετώπισης του δυναμικού προβλήματος επαφής-χρούσης, μεταξύ ελαστικών σωμάτων. Χρησιμοποιείται διαχριτοποίηση στο χώρο και στο χρόνο και λύνεται ένα πρόβλημα τετραγωνικού προγραμματισμού για κάθε χρονική στιγμή, για μικρό αριθμό αγνώστων, που είναι οι «μονόπλευρες» μετακινήσεις στο σύνορο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μπορεί η προτεινόμενη μέθοδος να χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη της σεισμικής απόχρισης μεγάλων κατασκευών, που στηρίζονται στο έδαφος, με δυνατότητα παραλαβής θλιπτικών τάσεων, αλλά όχι εφελκυστικών (συνθήκες μονόπλευρης επαφής). Γίνεται εισαγωγή στο πρόβλημα μονόπλευρης επαφής, με παρουσίαση των ανισοτικών σχέσεων, που επιτρέπουν τη θεώρηση των μονοπλεύρων συνδέσμων ως αμφιπλεύρων. Στη συνέχεια γίνεται συνολική παρουσίαση της μεθόδου χρονικής και χωρικής διαχριτοποίησης, που καταλήγει στην επίλυση ενός προβλήματος τετραγωνικού προγραμματισμού στο σύνορο. Αναπτύσσεται ο τρόπος με τον οποίο επιβάλλονται οι καταναγκασμένες μετακινήσεις στο σύνορο μονόπλευρης επαφής και ο τρόπος υπολογισμού του μητρώου επιφροής, με τη βοήθεια των πολλαπλασιαστών Lagrange. Τέλος, παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο λαμβάνεται υπόψη η χρούση κατά την επαφή του φορέα με το έδαφος.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων *UniDyn*, που αναπτύχθηκε στα πλαίσια εκπόνησης της διατριβής για να χρησιμοποιη-

4 Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

Θεί ας εργαλείο εφαρμογής της αριθμητικής μεθόδου, που αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Παρουσιάζονται οι δυνατότητες του προγράμματος και επίσης δίδονται διαγράμματα ροής και χρήσμες πληροφορίες για την λειτουργία του προγράμματος. Το πρόγραμμα *UniDyn* έχει τη δυνατότητα δυναμικής επίλυσης τρισδιάστατων φορέων ανεξάρτητα από το μεγεθός τους και τον αριθμό των «μονοπλεύρων» μεταχινήσεων στο σύνορο μονόπλευρης επαφής θεμελίων-εδάφους.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται αποτελέσματα επιλύσεων φορέων στο επίπεδο και στο χώρο, με επιτρεπόμενη ή όχι αποχόλληση από το έδαφος. Όλες οι επιλύσεις έγιναν με το πρόγραμμα *UniDyn*. Αρχικά δίδονται γενικές πληροφορίες για τον τρόπο εφαρμογής των μονοπλεύρων συνθηκών επαφής, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και τα δεδομένα των κτιρίων, καθώς επίσης τα χαρακτηριστικά των διεγέρσεων της σεισμικής και της παραμετρικής ανάλυσης. Ακολουθούν στοιχεία κοινά για όλα τα μοντέλα (χρονικό βήμα, απόσβεση, χρούση, ταχύτητα σύγχλισης του αλγορίθμου τετραγωνικού προγραμματισμού). Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα της παραμετρικής και της σεισμικής ανάλυσης των κτιρίων που επιλύθησαν.

Στο έκτο κεφάλαιο συνοψίζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις επιλύσεις. Προκύπτει σαφώς ότι οι φορείς με μονόπλευρες συνθήκες έδρασης στο έδαφος, εαν κατά τη διάρκεια της δυναμικής επιπόνησης υπάρξει μερική αποχόλληση των θεμελίων από το έδαφος, αποκτούν ιδιαίτερα δυναμικά χαρακτηριστικά και τα μεγέθη απόχρισης μπορεί να διαφοροποιηθούν σημαντικά από τα αντίστοιχα μεγέθη απόχρισης των φορέων με αμφίπλευρες συνθήκες στήριξης.

Ακολουθούν η βιβλιογραφία και το παράρτημα στο οποίο παρατίθενται πρόσθετα σχήματα, που προέκυψαν από τις επιλύσεις που πραγματοποιήθηκαν, αλλά για λειτουργικούς λόγους δεν ενσωματώθηκαν στο κεφάλαιο των αποτελεσμάτων.

Η εργασία ολοχληρώνεται με περίληψη στην αγγλική γλώσσα.

Κεφάλαιο 6

Γενικά συμπεράσματα

Μετά τη μελέτη των αποτελεσμάτων, είναι δυνατό να εξαχθούν γενικά συμπεράσματα για τη συμπεριφορά φορέων με μονόπλευρες συνθήκες έδρασης στο έδαφος, σε σύγκριση με τη συμπεριφορά των ίδιων φορέων με αμφίπλευρες συνθήκες στήριξης. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα συμπεράσματα ισχύουν για κατασκευές με επιφανειακή θεμελίωση και περιμετρική διάταξη τοιχείων και στύλων (όλες οι κατασκευές που επιλύθησαν είναι αυτού του τύπου).

Στο υποκεφάλαιο 6.1 γίνεται συνοπτική παράθεση των συμπερασμάτων, ενώ στο υποκεφάλαιο 6.2 παρουσιάζονται αναλυτικά τα συμπεράσματα της παραμετρικής και της σεισμικής ανάλυσης.

6.1 Συνοπτική παρουσίαση συμπερασμάτων

Τα συμπεράσματα που προέχουν από τα αποτελέσματα των επιλύσεων μπορούν να συνοψισθούν ως ακολούθως:

1. Έαν κατά τη διάρκεια της δυναμικής διέγερσης, συμβεί αποχόληση τμημάτων της θεμελίωσης από το έδαφος (θεώρηση μονόπλευρης επαφής) η κατασκευή παρουσιάζει μη-γραμμική συμπεριφορά, αποχτά ιδιαίτερα δυναμικά χαρακτηριστικά και οι τιμές απόχρισης στη διέγερση μπορεί να διαφοροποιηθούν σημαντικά από τις τιμές απόχρισης του αντιστοίχου αμφιπλεύρου φορέα.
2. Κυρίαρχο ρόλο στη συμπεριφορά του μονοπλεύρου φορέα διαδραματίζει η σχέση των συγχειριμένων χαρακτηριστικών του διεγείροντος αιτίου με την θεμελιώδη ιδιοπερίοδο της κατασκευής για αμφίπλευρες συνθήκες στήριξης. Για θεμελίωση σε σχληρό έδαφος, ο μονόπλευρος φορέας έχει «θεμελιώδη ιδιοπερίοδο» ή «ιδιοπερίοδο συντονισμού» μετατοπισμένη προς τα δεξιά, ενώ, για μαλακό έδαφος, δεν παρατηρείται αυτή η μετατόπιση.
3. Η ένταση διέγερσης είναι ουσιαστικός παράγοντας στη συμπεριφορά του μονοπλεύρου φορέα. Η αύξηση στην ένταση διέγερσης (για σχληρό έδαφος), προκαλεί όλο και μεγαλύτερη μετατόπιση προς τα δεξιά της «θεμελιώδους ιδιοπεριόδου» του μονοπλεύρου φορέα.

4. Για τα μεγέθη απόχρισης που ελέγχθησαν (ροπή στη βάση του περιμετρικού τοιχείου, ροπή στη βάση του απέναντι περιμετρικού στύλου, οριζόντια μετατόπιση κορυφής) υπήρξε η ακόλουθη γενική ευχόνα (τάση) για το μονόπλευρο φορέα:
- Για σκληρό έδαφος: μείωση ροπής τοιχείου, επιβάρυνση ροπής περιμετρικού στύλου, μείωση ή αύξηση της μετατόπισης κορυφής. Οι διαφοροποιήσεις από τη γενική τάση και αναλυτικότερος σχολιασμός γίνεται στο υποχειράλιο 6.2.
 - Για μαλακό έδαφος: μείωση όλων των μεγεθών απόχρισης που ελέγχθησαν.
5. Για τους φορείς που επιλύθησαν, η θεώρηση ή όχι της χρούσης των θεμελίων με το έδαφος δεν αλλάζει τη μορφή του φαινομένου, εκτός από μικρή επιβάρυνση των τιμών απόχρισης μονοπλεύρου όταν δεν συμπεριλαμβάνεται η χρούση στους υπολογισμούς, από τις τιμές μονοπλεύρου που προκύπτουν για τελείως πλαστική χρούση. Για αυτό το είδος των φορέων, η θεώρηση συνθηκών μονόπλευρης επαφής δημιουργεί τις διαφοροποιήσεις αμφιπλεύρου-μονοπλεύρου, χωρίς η χρούση να επιφεράζει ουσιαστικά αυτές τις διαφοροποιήσεις.
6. Η ταχύτητα σύγχλισης του αλγορίθμου τετραγωνικού προγραμματισμού, χρίνεται πολύ υχανοποιητική. Σε καμία περίπτωση δεν χρειάσθηκαν πάνω από 30 επαναλήψεις παρόλο που χρησιμοποιήθηκε πολύ μικρός αριθμός για τον έλεγχο σύγχλισης ($\epsilon = 0.000001$). Το αποτέλεσμα είναι ότι, ο χρόνος που απαιτείται για την επίλυση φορέα με μονόπλευρες συνθήκες στήριξης δεν είναι πολύ μεγαλύτερος από αυτόν που χρειάζεται για την επίλυση του αντιστοίχου αμφιπλεύρου φορέα (το πολύ 60% περισσότερος χρόνος).

6.2 Αναλυτική παρουσίαση συμπερασμάτων παραμετρικής και σεισμικής ανάλυσης

• Αποτελέσματα παραμετρικής ανάλυσης για σκληρό έδαφος

Η σύγχριση των αποτελεσμάτων της παραμετρικής ανάλυσης φορέων με αμφίπλευρες και μονόπλευρες συνθήκες στήριξης έδειξε ότι ο λόγος της ιδιοπεριόδου ημιτονοειδούς διέγερσης Τ προς τη θεμελιώδη ιδιοπερίοδο T_1 του αμφιπλεύρου φορέα διαδραματίζει κυρίαρχο ρόλο στις διαφοροποιήσεις των μεγεθών απόχρισης αμφιπλεύρου-μονοπλεύρου.

Για τιμές του λόγου T/T_1 μικρότερες της μονάδας, ο μονόπλευρος φορέας παρουσιάζει μειωμένες τιμές απόχρισης, με τις ποσοστιαίες διαφοροποιήσεις να αυξάνουν

όσο ο λόγος πλησιάζει προς τη μονάδα, δηλαδή την ιδιοπερίοδο συντονισμού του αμφιπλεύρου.

Για $T/T_1 = 1$, δηλαδή για συντονισμό του αμφιπλεύρου φορέα, εμφανίζεται η πλέον εντυπωσιακή μείωση τιμών απόχρισης για το μονόπλευρο φορέα (μέχρι και πάνω από 60% για τις ροπές τοιχείου).

Για ιδιοπεριόδους διέγερσης μεγαλύτερες από την ιδιοπερίοδο συντονισμού του αμφιπλεύρου φορέα, ο μονόπλευρος φορέας θα εμφανίσει τιμές απόχρισης που μπορεί να είναι μειωμένες ή αυξημένες σε σχέση με τις τιμές απόχρισης του αμφιπλεύρου φορέα, για την ίδια ιδιοπερίοδο διέγερσης. Για κάποια τιμή ιδιοπεριόδου διέγερσης μεγαλύτερη από την ιδιοπερίοδο συντονισμού του αμφιπλεύρου, ο μονόπλευρος φορέας θα παρουσιάσει τις μέγιστες τιμές απόχρισης, οι οποίες κατά κανόνα είναι μικρότερες από αυτές που εμφανίζει ο αμφίπλευρος φορέας όταν συντονίζεται. Το συμπέρασμα είναι σαφές: Η «θεμελιώδης ιδιοπερίοδος» ή «ιδιοπερίοδος συντονισμού» του μονοπλεύρου φορέα είναι μετατοπισμένη προς τα δεξιά σε σχέση με τη θεμελιώδη ιδιοπερίοδο του φορέα με αμφίπλευρες συνθήκες στήριξης.

Το πόσο δεξιότερα θα εμφανισθεί η «θεμελιώδης ιδιοπερίοδος» του μονοπλεύρου φορέα, εξαρτάται από την ένταση της διέγερσης. Όσο ή ένταση αυξάνει, τόσο ο μονόπλευρος φορέας εμφανίζει τη «θεμελιώδη ιδιοπερίοδο» του απομακρυσμένη προς τα δεξιά, σε σχέση με τη θεμελιώδη ιδιοπερίοδο του αμφιπλεύρου φορέα. Πρόσθετη επίπτωση από την αύξηση της έντασης διέγερσης είναι η μεγαλύτερη ευαισθησία που δημιουργείται στο μονόπλευρο φορέα, για τιμές της ιδιοπεριόδου διέγερσης μεγαλύτερες από την ιδιοπερίοδο συντονισμού του αμφιπλεύρου, δηλαδή, οι τιμές μονοπλεύρου εμφανίζονται αυξημένες σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές αμφιπλεύρου για πιο πολλές ιδιοπεριόδους διέγερσης. Τέλος, η αύξηση της έντασης διέγερσης προκαλεί μη-γραμμική αύξηση των μεγεθών απόχρισης του μονοπλεύρου φορέα (ενώ για τον αμφίπλευρο φορέα η αύξηση των μεγεθών απόχρισης είναι γραμμική). Αυτή η μη-γραμμική αύξηση ανάλογα με το μέγεθος απόχρισης, εμφανίζει διαφορετικά ποσοστά. Για παράδειγμα, στις επιλύσεις του υποχεφαλαίου 5.2.1 (9-όροφο), η ροπή τοιχείου μονοπλεύρου για αύξηση διέγερσης 50% αυξήθηκε κατά 45% και για διπλασιασμό της έντασης διέγερσης αυξήθηκε κατά 70%, ενώ τα αντίστοιχα ποσοστά αύξησης της ροπής μονοπλεύρου του περιμετρικού στύλου ήσαν 60% και 79%.

Η αύξηση του λόγου ύψους/πλάτος, όπως προκύπτει από τη σύγχριση των δύο 9-ορόφων φορέων, προκαλεί μεγαλύτερες ποσοστιαίες διαφοροποιήσεις κατά τη σύγχριση των τιμών αμφιπλεύρου-μονοπλεύρου (μεγαλύτερη μείωση μεγίστης ροπής τοιχείου, αύξηση μεγίστης ροπής στύλου και μετατόπισης χορυφής μονοπλεύρου, για το κτίριο με μεγαλύτερο λόγο ύψους/πλάτος).

Συνοπτικά, η εικόνα που προκύπτει για τα μεγέθη απόχρισης είναι: μείωση της ροπής τοιχείου, επιβάρυνση της ροπής του περιμετρικού στύλου, μείωση ή μικρή

επιβάρυνση της μετατόπισης κορυφής μονοπλεύρου.

- Αποτελέσματα παραμετρικής ανάλυσης για μαλαχό έδαφος

Για όλες τις ιδιοπεριόδους διέγερσης οι τιμές των μονοπλεύρων μεγεθών εμφανίσθησαν μειωμένες. Για ιδιοπεριόδους διέγερσης χοντά στη θεμελιώδη ιδιοπερίοδο της κατασκευής, για ελαστική έδραση σε μαλαχό έδαφος, οι μειώσεις των τιμών μονοπλεύρου γίνονται ουσιαστικές. Σε αντίθεση με τα αποτελέσματα του σχληρού εδάφους, δεν παρατηρείται μετάθεση της «θεμελιώδους ιδιοπερίοδου» του μονοπλεύρου φορέα προς τα δεξιά, ακόμα και όταν αυξάνει η ένταση διέγερσης. Η κύρια επίπτωση από την αύξηση της έντασης διέγερσης είναι η μεγαλύτερη ελάφρυνση των μεγεθών απόχρισης του μονοπλεύρου φορέα.

- Αποτελέσματα σεισμικής ανάλυσης για σχληρό έδαφος

Τα αποτελέσματα της σεισμικής ανάλυσης επιβεβαιώνουν τα αποτελέσματα της παραμετρικής. Για σχληρό έδαφος έγινε φανερή η καθοριστική σημασία των χαρακτηριστικών της διέγερσης, σε σχέση με την ιδιοπερίοδο της κατασκευής. Εάν η θεμελιώδης ιδιοπερίοδος του αμφίπλεύρου φορέα βρίσκεται στην ισχυρή περιοχή του φάσματος του σεισμού, με δεδομένο ότι η «θεμελιώδης ιδιοπερίοδος» του μονοπλεύρου φορέα βρίσκεται δεξιότερα, μπορεί να εμφανισθεί σημαντικότατη μείωση της σεισμικής απόχρισης του μονοπλεύρου φορέα. Η αντίστροφη κατάσταση (με τον μονόπλευρο φορέα να ταλαντώνεται στην κρίσιμη περιοχή του φάσματος και τον αμφίπλευρο αριστερότερα σε μή κρίσιμη περιοχή) μπορεί να δημιουργήσει μεγάλη επιβάρυνση του μονοπλεύρου φορέα, όταν ο σεισμός είναι ταυτόχρονα πολύ ισχυρός (Pacoima, 5.7.1).

Η συνήθης συμπεριφορά του μονοπλεύρου φορέα είναι: μείωση ροπής περιμετρικού τοιχείου, επιβάρυνση της ροπής περιμετρικού στύλου, ενώ η οριζόντια μετατόπιση κορυφής εμφανίζει μικρή σχετικά μείωση ή επιβάρυνση, σε σχέση με τον αμφίπλευρο φορέα.

- Αποτελέσματα σεισμικής ανάλυσης για μαλαχό έδαφος

Για μαλαχό έδαφος, όπως και στην παραμετρική ανάλυση, όλα τα εξεταζόμενα μεγέθη μονοπλεύρου, εμφάνισαν μειωμένες τιμές. Μοναδική εξαίρεση παρουσιάστηκε για τον σεισμό Pacoima στο 7-όροφο κτίριο του υποκεφαλαίου 5.7.2 (επιβαρύνθηκε η ροπή βάσης του περιμετρικού στύλου και η μετατόπιση κορυφής).