

Εφαρμογή της στατικής μη γραμμικής ανάλυσης σε ασύμμετρα πολυώροφα κτίρια Ο/Σ. Σύγκριση με αποτελέσματα της μη γραμμικής ανάλυσης με χρονική ολοκλήρωση

Κωνσταντίνος Κωστινάκης

Μεταδιδακτορικός Ερευνητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ., email: kkostina@civil.auth.gr

Αντώνιος Καμαριώτης

Πολιτικός Μηχανικός Α.Π.Θ., email: antoniskam@hotmail.com

Ασημίνα Αθανατοπούλου

Καθηγήτρια, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ., email: minak@civil.auth.gr

Εκτενής περίληψη

Σύμφωνα με την πλειονότητα των σύγχρονων αντισεισμικών κανονισμών οι μέθοδοι ανάλυσης των κατασκευών λόγω σεισμικής διέγερσης διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τις ελαστικές ή γραμμικές και τις ανελαστικές ή μη γραμμικές μεθόδους. Στις περισσότερες περιπτώσεις μόνο οι μη γραμμικές μέθοδοι ανάλυσης είναι αυτές που μπορούν να εξασφαλίσουν την κατά το δυνατόν ρεαλιστική αποτίμηση της μηχανικής συμπεριφοράς των κατασκευών υπό ιδιαίτερα υψηλές εντάσεις φόρτισης που πλησιάζουν τα όρια αντοχής και αστοχίας τους, όπως π.χ. συμβαίνει σε πολλές περιπτώσεις σεισμικών καταπονήσεων. Οι εν λόγω μέθοδοι εφαρμόζονται κυρίως κατά την αποτίμηση της σεισμικής συμπεριφοράς των κτιρίων, ώστε να ληφθούν οι απαραίτητες αποφάσεις σχετικά με την αποκατάσταση ή την ενίσχυσή τους.

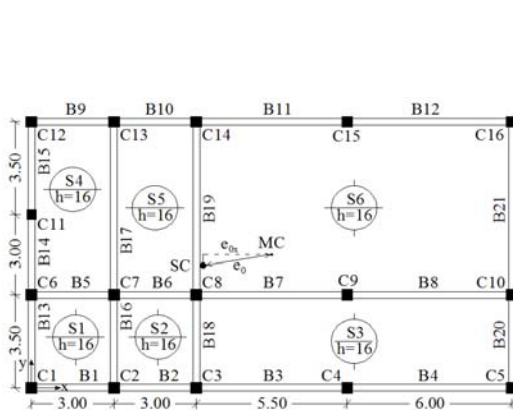
Ο EC8 προτείνει δύο μη γραμμικές μεθόδους ανάλυσης: τη στατική μη γραμμική ανάλυση (Pushover) και τη μη γραμμική ανάλυση με χρονική ολοκλήρωση (Nonlinear Time History Analysis (NTHA)). Η στατική μη γραμμική ανάλυση (Pushover) αποτελεί την πλέον διαδομένη ανελαστική μέθοδο για την εκτίμηση της φέρουσας ικανότητας τόσο των υφιστάμενων όσο και των νέων κτιρίων. Η μη γραμμική ανάλυση με χρονική ολοκλήρωση θεωρείται η πιο εξελιγμένη μέθοδος για την εκτίμηση της σεισμικής απόκρισης των κατασκευών. Ωστόσο προτείνεται και η χρήση της ανάλυσης Pushover λόγω της απλότητάς της σε αντιπαράθεση με τις NTHA αναλύσεις που έχουν μεγάλο υπολογιστικό κόστος και είναι αρκετά χρονοβόρες.

Σήμερα, η καλή απόδοση της μεθόδου Pushover για επίπεδα πλαίσια έχει μελετηθεί σε πλήθος εργασιών και έχει επαληθευτεί. Άλλωστε, αναγνωρίζεται ότι η Pushover έχει αναπτυχθεί με βάση τη θεώρηση επίπεδων συστημάτων λίγων ορόφων. Ωστόσο, η εφαρμογή της σε χωρικά συστήματα αποτελεί θέμα προβληματισμού σε ερευνητικό επίπεδο. Ειδικότερα, η απόδοση της χρήσης της μεθόδου Pushover σε πραγματικά χωρικά ασύμμετρα κτίρια έχει εξεταστεί από μικρό αριθμό ερευνητών, π.χ. από τους Fajfar et al. (2005) και Manoukas et al. (2012). Το γεγονός αυτό θέτει σε αμφισβήτηση τη δυνατότητα εφαρμογής της μη γραμμικής στατικής ανάλυσης σε ασύμμετρα, πολυώροφα κτίρια. Τέλος, περιορισμένη έρευνα έχει πραγματοποιηθεί (Fajfar and Kreslin, 2012) όσον αφορά στην επιρροή των στρεπτικών επιδράσεων και της συμμετοχής των ανώτερων ιδιομορφών ταλάντωσης στη σεισμική απόκριση στρεπτικώς ευαίσθητων κτιρίων. Το συγκεκριμένο

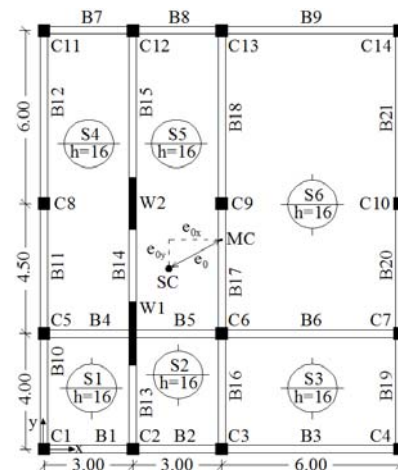
αντικείμενο αποτελεί μια από τις βασικές αδυναμίες της μεθόδου Pushover, όπως αυτή ορίζεται στον EC8, καθώς πάνω στο συγκεκριμένο θέμα παρουσιάζονται αρκετές ασάφειες.

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η εκτίμηση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων της μη γραμμικής στατικής ανάλυσης, έτσι όπως προτείνεται από τον EC8, κατά την εφαρμογή της σε ασύμμετρα, πολυώροφα κτίρια. Η σύγκριση γίνεται σε σχέση με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη μη γραμμική ανάλυση με χρονική ολοκλήρωση.

Πιο συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν δύο πεντάωροφα ασύμμετρα κτίρια Ο/Σ, οι κατόψεις των οποίων απεικονίζονται στο σχήμα 1. Το κτίριο Κ1 είναι ασύμμετρο αμιγώς πλαισιακό, ενώ το κτίριο Κ2 είναι ασύμμετρο στρεπτικώς ευαίσθητο με σύστημα τοιχομάτων στη μια διεύθυνση και πλαισιακό στην άλλη. Τα κτίρια σχεδιάστηκαν και διαστασιολογήθηκαν με βάση τους EC2 και EC8.



Σχ. 1α: Κάτοψη τυπικού ορόφου κτιρίου Κ1



Σχ. 1β: Κάτοψη τυπικού ορόφου κτιρίου Κ2

Για τα κτίρια αυτά διενεργήθηκαν μη γραμμικές αναλύσεις με χρονική ολοκλήρωση για 15 σεισμικές καταγραφές που περιγράφονται από ζεύγη επιταχυνσιογραφημάτων. Η επιλογή των επιταχυνσιογραφημάτων πραγματοποιήθηκε έτσι ώστε αυτά να πληρούν κάποια συγκεκριμένα κριτήρια αναφορικά με το μέγεθος, τη μέγιστη σεισμική επιτάχυνση εδάφους (PGA), την επικεντρική απόσταση και το είδος του εδάφους. Επισημαίνεται ότι προηγήθηκε αναγωγή των επιταχυνσιογραφημάτων σε κοινή σεισμική ένταση με βάση τη φασματική επιτάχυνση της θεμελιώδους ιδιομορφής. Επιπλέον, για κάθε σεισμική διέγερση οι άξονες εφαρμογής των επιταχυνσιογραφημάτων στράφηκαν ως προς τους άξονες αναφοράς των κτιρίων από 0° έως 360° με βήμα 90° και για κάθε γωνία υπολογίστηκαν οι μέγιστες τιμές των σχετικών μετακινήσεων των ορόφων (interstorey drifts).

Στη συνέχεια, διενεργήθηκαν μη γραμμικές στατικές αναλύσεις με τη χρήση της μεθόδου N2 που έχει υιοθετηθεί από τον EC8. Εφαρμόστηκαν όλες οι κανονιστικές διατάξεις που ορίζουν τον ακριβή τρόπο εφαρμογής των αναλύσεων και υπολογίστηκαν οι μέγιστες τιμές των σχετικών μετακινήσεων των ορόφων. Για το κτίριο Κ2, το οποίο όπως προαναφέρθηκε είναι στρεπτικώς ευαίσθητο, επιλέχθηκε η εφαρμογή της μεθόδου extended N2 (Fajfar, 1996) για την εκτίμηση της επιρροής των στρεπτικών επιδράσεων και των ανώτερων ιδιομορφών ταλάντωσης καθ' ύψος στα τελικά αποτελέσματα των σχετικών μετακινήσεων των ορόφων. Επιπλέον, για το κτίριο Κ1 εξετάστηκαν δύο εναλλακτικές μέθοδοι χωρικής επαλληλίας των οριζόντιων συνιστωσών των διεγέρσεων: α) διενέργεια των αναλύσεων Pushover με ταυτόχρονη εφαρμογή των οριζόντιων σεισμικών φορτίων και

στις δυο διευθύνσεις με τη χρήση του κανόνα του 30% και β) διενέργεια των αναλύσεων Pushover ανεξάρτητα στις δύο διευθύνσεις και στη συνέχεια επαλληλία των αποτελεσμάτων με χρήση του κανόνα SRSS.

Τέλος, πραγματοποιήθηκαν συγκρίσεις των σχετικών μετακινήσεων σε όλους τους ορόφους που προέκυψαν από τις δυο διαφορετικές μη γραμμικές μεθόδους που εφαρμόστηκαν. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων οδήγησε στα παρακάτω συμπεράσματα:

- Τα αποτελέσματα της ανάλυσης Pushover εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την κατανομή των οριζόντιων σεισμικών φορτίων.
- Η μέθοδος Pushover είναι πιο συντηρητική στα αποτελέσματα που δίνει για τους τρεις πρώτους ορόφους και των δύο κτιρίων. Ωστόσο, στον τέταρτο και στον πέμπτο όροφο κάποιες σχετικές μετακινήσεις ορόφων που προκύπτουν από την Pushover είναι μικρότερες σε σχέση με την ΝΤΗΑ.
- Η εφαρμογή της μεθόδου extended N2 στο μη κανονικό, στρεπτικώς ευαίσθητο κτίριο K2 μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τα αποτελέσματα στους ψηλότερους ορόφους της κατασκευής.
- Η ταυτόχρονη εφαρμογή των οριζόντιων σεισμικών φορτίων και στις δυο διευθύνσεις με τη χρήση του κανόνα του 30% είναι μια προσέγγιση η οποία, παρά το γεγονός ότι δεν προβλέπεται από τις διατάξεις του EC8, οδηγεί σε παρόμοια αποτελέσματα με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ανεξάρτητη εφαρμογή των δύο σεισμικών συνιστωσών στις οριζόντιες διευθύνσεις και στη συνέχεια επαλληλία των αποτελεσμάτων με τη χρήση του κανόνα SRSS.

Βιβλιογραφία

- CEN (2004), "Eurocode 2. Design of concrete structures – Part 1–1: General rules and rules for buildings", Brussels.
- CEN (2003), "Eurocode 8. Design of structures for earthquake resistance, Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings", Brussels.
- Fajfar, P. (1996), "The N2 method for the seismic damage analysis of RC buildings", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 25, No. 1, pp. 31-46.
- Fajfar, P. et al. (2005), "Torsional effects in the pushover based seismic analysis of buildings", *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 9, No. 6, pp. 831-854.
- Fajfar, P. and Kreslin, M. (2012), "The extended N2 method taking into account higher mode effects in elevation", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 40, No. 14, pp. 1571 - 1589.
- Manoukas, G, Avramidis, I. and Athanatopoulou, A. M. (2012), "Multimode pushover analysis for asymmetric buildings under biaxial seismic excitation based on a new concept of the equivalent single degree of freedom system", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. Vol. 38, pp. 88-96.