

ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΟΥ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΣΤΗΝ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΕΞΩΤΕΡΙΚΩΝ ΕΚΡΗΞΕΩΝ ΣΕ ΚΤΙΡΙΑ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

ΔΡΑΚΑΤΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ-ΣΩΚΡΑΤΗΣ

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση της συμβολής του αντισεισμικού σχεδιασμού στην αντιμετώπιση εξωτερικών εκρήξεων σε κτίρια Ο.Σ.. Αρχικά γίνεται η σύγκριση των δύο φαινομένων (σεισμός & κρουστικό φορτίο) σε όρους φόρτισης, εν συνεχεία σε όρους συμπεριφοράς και τέλος σε όρους αποτίμησης υφιστάμενων κατασκευών. Εν συνεχεία θα διερευνηθεί η συμβολή του αντισεισμικού σχεδιασμού στην αντιμετώπιση εξωτερικών εκρήξεων σε κτίρια Ο.Σ. μέσω διενέργειας ανελαστικών αναλύσεων σε ένα κτίριο κατασκευασμένο το 1975 και κατόπιν στο ίδιο κτίριο μετά από ενισχύσεις, με στόχο αρχικά τη σεισμική αποτίμηση των δύο κατασκευών και στη συνέχεια τη σύγκριση της συμπεριφοράς τους κατά την έκρηξη (ικανοποιητική τοπική αντοχή και αντοχή έναντι προοδευτικής αστοχίας)

1. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΕ ΟΡΟΥΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

1.1 ΕΙΔΟΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

Η σημαντικότερη διαφορά του σεισμού από ένα κρουστικό φορτίο είναι το είδος της φόρτισης που προκαλούν στις κατασκευές. Ο σεισμός εφόσον είναι μια επιτάχυνση της βάσης της κατασκευής συναρτήσεται του χρόνου κατανέμεται σε όλο το κτίριο, και θεωρούμενος ως δύναμη είναι ανάλογος της μάζας του κτιρίου. Αντίθετα το κρουστικό φορτίο είναι μια πίεση (ή ισοδύναμα μια δύναμη) που ασκείται σε ένα μέρος της κατασκευής [4]. Ένα κοινό σημείο των δύο φορτίσεων είναι ότι δεν πολλαπλασιάζονται με συντελεστές ασφαλείας δράσεων επειδή είναι από μόνες τους οριακές καταστάσεις για την κατασκευή [7].

1.2 ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ

Παρότι και τα δύο φαινόμενα είναι δυναμικά, τα κρουστικά και εκρηκτικά φορτία έχουν πολύ υψηλότερη παλμική συνιστώσα, διότι έχουν πολύ μικρότερη διάρκεια από τους σεισμούς, περίπου 3 -4 τάξεις μεγέθους (millisecond έναντι sec ή δεκάδων sec)

1.3 ΚΙΝΔΥΝΟΣ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ

Όσον αφορά το σεισμό, παρότι ο κίνδυνος εμφάνισης του φαινομένου μπορεί να εκτιμηθεί με ικανοποιητική ακρίβεια μέσω επιταχυνσιογραφημάτων, λόγω της επαναληπτικότητας του φαινομένου, δε μπορεί δε καμία περίπτωση να μειωθεί.

Αντίθετα, σε ότι έχει να κάνει με τα κρουστικά φορτία ή φορτία εκρήξεων, ο κίνδυνος δε μπορεί να εκτιμηθεί με ακρίβεια λόγω της μη επαναληπτικότητας του φαινομένου (στην περίπτωση εκρήξεων μπορεί να είναι από ένα μικρό δέμα μέχρι μια νταλικά γεμάτη εκρηκτικά, ενώ στην περίπτωση των κρούσεων από ένα μικρό αυτοκίνητο μέχρι ένα αεροπλάνο) [4]. Παρ' όλες όμως αυτές τις αβεβαιότητες, ο κίνδυνος αυτός μπορεί να μειωθεί υιοθετώντας τις ακόλουθες γενικές στρατηγικές προστασίας που στόχο έχουν την αύξηση της απόστασης του κτιρίου από την προστατευόμενη του περίμετρο (Μέτρα προστασίας του κτιρίου και του προσωπικού που εργάζεται εντός αυτού και τα οποία δεν αφορούν παρέμβαση στο υφιστάμενο κτίριο αλλά σκοπό έχουν τη μείωση του κινδύνου από κρουστικά και εκρηκτικά φορτία):

- a) Μέτρα ασφαλείας που πρέπει να τηρούνται κατά την είσοδο κάθε ατόμου ή οχήματος (σε περίπτωση ύπαρξης υπόγειων γκαράζ) στο υπόγειο κτίριο ή σε τμήμα του (π.χ. αίθουσες παραλαβής δεμάτων, χώροι φορτοεκφόρτωσης) ως συνάρτηση της σπουδαιότητας του κτιρίου με σκοπό να μειωθεί το μέγεθος της απειλής. Στόχος

αυτών των μέτρων είναι η μείωση του κινδύνου εσωτερικής έκρηξης που είναι πιο δύσκολα αντιμετωπίσιμη από μια εξωτερική [4].

- b) Όσο το δυνατό μεγαλύτερη αύξηση της απόστασης του κτιρίου από την πηγή μιας εξωτερικής έκρηξης (αύξηση της απόστασης του κρασπέδου πεζοδρομίου του οικοδομικού τετραγώνου στο οποίο βρίσκεται το κτίριο, από το ίδιο το κτίριο, τοποθέτηση φυτών, μεγάλων γλαστρών περιμετρικά του κτιρίου [4 – 7].

2. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΕ ΟΡΟΥΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ

2.1 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΥΛΙΚΟΥ(ΑΝΤΟΧΕΣ – ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ)

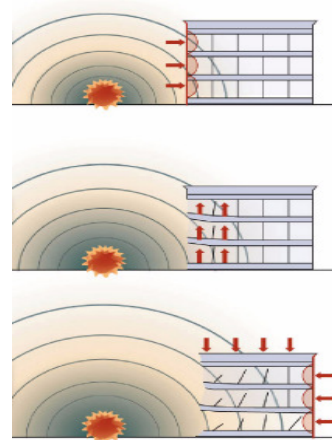
Η πιο σημαντική διαφορά όσον αφορά τη συμπεριφορά των κατασκευών Ο.Σ. σε σεισμό σε σχέση με κρουστικά φορτία έχει να κάνει με τη συμπεριφορά του ίδιου του υλικού. Παρότι, τόσο το Μέτρο Ελαστικότητας όσο και η μέγιστη παραμόρφωση είναι και στις δύο περιπτώσεις τα ίδια, τόσο η τάση διαρροής όσο και η τάση αστοχίας διαφέρουν. Ενώ σε σεισμικά φορτία δεν παρατηρείται καμία αύξηση της αντοχής, σε κρουστικά φορτία, το παλμικό κύμα που δημιουργείται, λόγω της ταχύτητάς του προσπαθεί να φέρει το υλικό στο όριο διαρροής του νωρίτερα απ' ότι αυτό μπορεί να αποκριθεί κι έτσι προκαλείται υψηλός ρυθμός παραμόρφωσης, δηλαδή το υλικό στην περίπτωση αυτή φτάνει την τάση διαρροής χωρίς να έχει τη στιγμή εκείνη την παραμόρφωση διαρροής. Έτσι, όταν το υλικό φτάσει στην παραμόρφωση διαρροής, θα μπορεί να αναλάβει τάση μεγαλύτερη από την τάση διαρροής, κατά 25 % σύμφωνα με τον κανονισμό UFC [6 - 3], αν συνυπολογισθεί η χρήση μέσων τιμών στα υλικά και η αύξηση της αντοχής του σκυροδέματος με το χρόνο [7].

Σε ό,τι έχει να κάνει με τις παραμορφώσεις και κατά συνέπεια τις αστοχίες, υπό σεισμική δράση είναι έντονα ανελαστικές αλλά κατανέμονται σε όλο το φορέα, ενώ υπό κρουστική δράση παρότι είναι επίσης έντονα ανελαστικές (λόγω του ότι το υλικό είναι το ίδιο: Ο.Σ.) αρχικά είναι τοπικές και στη συνέχεια όταν τα εναπομείναντα μέλη του φέροντα οργανισμού δε μπορούν ν' αναλάβουν τα κατακόρυφα φορτία, γίνονται και καθολικές προκαλώντας τη σταδιακή κατάρρευση του φορέα [4].

2.2 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ (ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑ – ΠΛΕΥΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ)

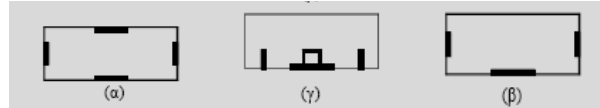
Η επαρκής πλαστιμότητα των μελών της κατασκευής είναι το ίδιο επιθυμητή τόσο έναντι σεισμού, όσο και έναντι εκρήξεων, χωρίς όμως αυτό να σημαίνει ότι οι περιοχές όπου παρατηρείται συγκέντρωση τάσεων είναι οι ίδιες [4].

Η σημαντικότερη διαφορά όσον αφορά την πλευρική αντίσταση της κατασκευής έναντι ενός σεισμού και μιας έκρηξης είναι η διαφραγματική λειτουργία. Λόγω των ανοδικών πιέσεων που δημιουργούνται στα κοντινά στην έκρηξη πατώματα των ανωτέρων ορόφων, όταν η έκρηξη συμβαίνει στην επιφάνεια του εδάφους, η διαφραγματική λειτουργία που υιοθετούμε τις περισσότερες φορές στις σεισμικές αναλύσεις δεν ισχύει. Σε αυτόν τον τομέα σημαντικό ρόλο παίζει και η θέση των τοιχωμάτων [7]. Για την αντίσταση σε φορτία εκρήξεων χρησιμοποιούνται με την ίδια λογική με τον αντισεισμικό σχεδιασμό [5], με ακόμη μεγαλύτερη προτεραιότητα την τοποθέτηση τους στην περίμετρο του κτιρίου που καταπονείται πρώτη από τα παραπάνω χτυπήματα, ούτως ώστε να μη μένουν εκτεθειμένα τα στην περίμετρο του κτιρίου τα πλαίσια, τα οποία είναι λιγότερο ανθεκτικά σε φορτία εκρήξεων, αλλά και να μην παραμορφώνονται επιπλέον τα διαφράγματα. Κύριος στόχος των στοιχείων αυτών είναι να

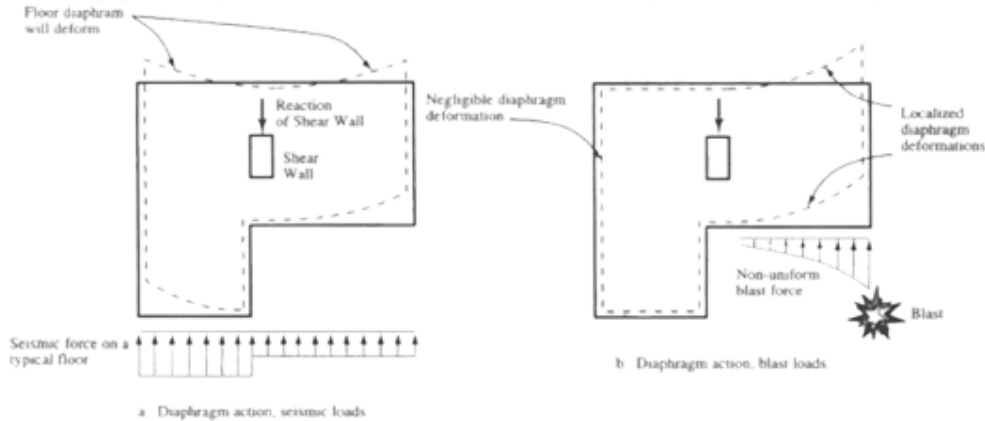


Σχήμα 1: Λειτουργία των πατωμάτων κατά τη διάρκεια μιας έκρηξης [10]

εμποδίσουν τη σταδιακή κατάρρευση του φορέα μετά την έκρηξη, αλλά επίσης να προστατεύσουν τους εσωτερικούς χώρους πίσω από θραύσματα προκληθέντα από την έκρηξη [8]. Επίσης στην περίπτωση που η προς προστασία πρόσοψη του κτιρίου βρίσκεται κοντά σε πολυσύχναστη οδό, προστατεύονται οι εν πανικό διερχόμενοι και οι εξερχόμενοι του κτιρίου από πτώσεις στοιχείων αμέσως μετά την έκρηξη.



Σχήμα 2: Προτεινόμενες κατά Ε.Α.Κ. διατάξεις τοιχωμάτων σε κάτοψη [5]



Σχήμα 3: Δράση πατωμάτων με εσωτερικό πυρήνα υπό σεισμικά και εκρηκτικά φορτία [4]

3. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗΣ

3.1 ΣΤΑΘΜΕΣ ΕΠΙΤΕΛΕΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Κατά την αποτίμηση υφιστάμενων κατασκευών Ο.Σ. στόχος είναι η ικανοποίηση των κριτηρίων επιτελεστικότητας (IO → Άμεση Χρήση, LS → Προστασία Ζωής, CP → Αποφυγή Κατάρρευσης) που επιλέγονται ανάλογα με τη σπουδαιότητα της κατασκευής [1].

Αντίθετα, όσον αφορά τις εκρήξεις, είναι εξαιρετικά αντικοινωνικός και ασαφής ο ορισμός σταθμών επιτελεστικότητας λόγω της μη γενικότητας του επιπέδου κινδύνου και των μέτρων ασφαλείας που τηρούνται σε κάθε κτίριο. Κατά την αποτίμηση ή και το σχεδιασμό βασικός στόχος είναι η ελαχιστοποίηση των ανθρώπινων απωλειών που επιτυγχάνεται με τις ακόλουθες ενέργειες [9]:

- Μείωση των τοπικών αστοχιών στο κτίριο
- Έλεγχος των ιπτάμενων θραυσμάτων
- Παρεμπόδιση της σταδιακής κατάρρευσης, τουλάχιστον μέχρι το κτίριο να εκκενωθεί

3.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗΣ

Και στις δύο περιπτώσεις (σεισμός, Κρουστικά και εκρηκτικά φορτία) μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες μέθοδοι. Οι διαφορές ανά μέθοδο έχουν ως εξής:

ΕΛΑΣΤΙΚΕΣ ΣΤΑΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

Στην περίπτωση της αποτίμησης έναντι σεισμού χρησιμοποιείται η ελαστική (ισοδύναμη) στατική μέθοδος (Απλοποιημένη φασματική Μέθοδος) με χρήση καθολικού συντελεστή συμπεριφοράς q ή τοπικών συντελεστών συμπεριφοράς m [1].

Για την αποτίμηση όσον αφορά τα κρουστικά φορτία, τα αμερικανικά κανονιστικά κείμενα (GSA 2003, DoD 2005) υιοθετούν τυπικές στατικές αναλύσεις στις οποίες εισάγουν

τη δυναμική συμπεριφορά μέσω του συντελεστή δυναμικής ενίσχυσης, ο οποίος είναι συνήθως ίσος με 2 [2].

ΕΛΑΣΤΙΚΕΣ ΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

Για τη σεισμική αποτίμηση όλες οι μέθοδοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν εξαρτώνται από τον σεισμικό κίνδυνο (φάσμα σχεδιασμού ή επιταχυνσιογραφήματα) [1].

Στην περίπτωση των κρουστικών φορτίων χρησιμοποιούνται χρονοϊστορίες δύναμης (κατ' αναλογία με τα επιταχυνσιογραφήματα) και η αποτίμηση γίνεται με χρήση των λόγων επάρκειας. Επειδή όμως περιορίζεται σε κατασκευές που συμπεριφέρονται ελαστικά κατά τη διάρκεια της κρούσης δεν είναι ακριβείς για τις συνθήκες περιπτώσεις κτιρίων [2].

ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΕΣ ΣΤΑΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

Πρόκειται ουσιαστικά για υπερωθητικές (Pushover) αναλύσεις που χρησιμοποιούνται κυρίως για τον έλεγχο της σεισμικής επάρκειας μιας κατασκευής [1]. Έναντι κρουστικών φορτίων, τα ίδια σταδιακά αυξανόμενα φορτία ασκούνται στο φορέα αφού προηγουμένως αφαιρεθεί ένα υποστύλωμα (για προσομοίωση της κρούσης).

ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΕΣ ΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

Για τη σεισμική αποτίμηση χρησιμοποιούνται επιταχυνσιογραφήματα ενώ η ανελαστική συμπεριφορά του υλικού εισάγεται άμεσα στο προσομοίωμα [1].

Στην περίπτωση της αποτίμησης έναντι εκρήξεων υπάρχουν δύο μέθοδοι αποτίμησης:

- 1) Ανάλυση σταδιακής (ή προοδευτικής) κατάρρευσης κατά την οποία γίνεται αφαίρεση ενός πρωτεύοντος δομικού στοιχείου (κατά προτίμηση υποστυλώματος) και ακολουθεί ανάλυση του απομένοντος δομήματος για τα κατακόρυφα φορτία, η οποία είναι ανεξάρτητη του κινδύνου (π.χ. ένταση και απόσταση του χτύπηματος). Η τελευταία αυτή μέθοδος παρότι δεν εξαρτάται από το χτύπημα για το οποίο σχεδιάζεται κατασκευή (και υπό αυτήν την έννοια θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και για σεισμική αποτίμηση αν ένα δομικό μέλος είναι αποδεδειγμένα πιο ευάλωτο) εφαρμόζεται κυρίως σε περιπτώσεις κρουστικών φορτίων λόγω της ρεαλιστικότερης απεικόνισης του αποτελέσματος ενός κρουστικού φορτίου. Σκοπό έχει να αποκαλύψει αν η ξαφνική απώλεια του αφαιρεθέντος στοιχείου (ξαφνικές αλλαγές στη γεωμετρία του φορέα) μπορεί να προκαλέσει αλυσιδωτές αστοχίες στα υπόλοιπα δομικά μέλη, οδηγώντας τελικά σε μερική ή ολική κατάρρευση της κατασκευής, ή τα φορτία της κατασκευής μπορούν να βρουν εναλλακτικά μονοπάτια για να φτάσουν στο έδαφος. Η ανάλυση αυτή εφαρμόζεται σε 3 στάδια [2]:

- a) Αρχικά βρίσκουμε τις μετατοπίσεις του αρχικού φορέα για το συνδυασμό των κατακόρυφων φορτίων
- b) Αφαιρούμε το υποστύλωμα και υπολογίζουμε τις (στατικές) μετατοπίσεις του φορέα
- c) Εφαρμόζουμε στον απομένοντα φορέα αρχικές συνθήκες τις μετατοπίσεις που βρήκαμε στο προηγούμενο βήμα ούτως ώστε αυτός να επιστρέψει στη θέση του αρχικού φορέα και κάνουμε την ανάλυση. Θεωρώντας για απλοποίηση ότι οι μετατοπίσεις του αρχικού φορέα υπό τα κατακόρυφα φορτία είναι αμελητέες σε σύγκριση με αυτές που θα προκληθούν από την απώλεια του κατακόρυφου στοιχείου μπορούμε να εφαρμόσουμε μηδενικές αρχικές συνθήκες και κάνουμε τη δυναμική ανάλυση με αρχικές συνθήκες τις μετατοπίσεις του αφόρτιστου αρχικού φορέα (που είναι μηδενικές και περίπου ίσες με αυτές του αφόρτιστου βλαμμένου φορέα αν αγνοήσουμε το ίδιο βάρος του αφαιρεθέντος υποστυλώματος)

- 2) Ανελαστική δυναμική ανάλυση με τη χρήση της παλμικής φόρτισης ως χρονοϊστορία. Αποτελεί την πιο ρεαλιστική μέθοδο διότι η διέγερση μπαίνει άμεσα στην αποτίμηση και περιλαμβάνει τα ακόλουθα 3 στάδια με το καθένα να χρησιμοποιεί ως αρχικές συνθήκες τις μετατοπίσεις που προκύπτουν από το τέλος του προηγούμενου σταδίου:
 - a) Εξαναγκασμένη ταλάντωση (με μηδενικές αρχικές συνθήκες)
 - b) Ελεύθερη ταλάντωση
 - c) Ανάλυση σταδιακής κατάρρευσης (Στατική εφαρμογή των κατακόρυφων φορτίων)

4. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΒΟΛΗΣ ΤΟΥ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΣΤΗΝ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΕΞΩΤΕΡΙΚΩΝ ΕΚΡΗΞΕΩΝ ΣΕ ΚΤΙΡΙΑ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Το πρώτο στάδιο των αναλύσεων γίνεται σε ένα τυπικό δώροφο κτίριο Ο.Σ. 14.5mX13m αποτελούμενο από τρία πλαίσια σε κάθε διεύθυνση, κατασκευασμένο το 1975 με σκυρόδεμα κατηγορίας B160 (C16/20) και χάλυβα SIII (S400) με δοσμένα όλα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και τους οπλισμούς. Θεωρείται Στάθμη Αξιοπιστίας Δεδομένων «Ικανοποιητική».

Ακολούθως γίνονται αναλύσεις στο ίδιο δώροφο κτίριο Ο.Σ., με την προσθήκη 4 περιμετρικών τοιχωμάτων, 2 στη διεύθυνση της παλμικής φόρτισης και 2 κάθετα σε αυτή (το ένα στην πρόσοψη του κτιρίου που δέχεται πρώτο την παλμική φόρτιση και το άλλο στην απέναντι πλευρά), τοποθετημένα ως φτερά στα γωνιακά υποστυλώματα (K300/300) με μήκος 1m και πάχος 0.2m με οπλισμό 6Φ10+ 4Φ20 σε διάταξη κρυφού υποστυλώματος στην απέναντι πλευρά του υπάρχοντος γωνιακού.

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Η προσομοίωση τόσο της αρχικής όσο και της ενισχυμένης κατασκευής γίνεται στο πρόγραμμα SAP2000 με τη χρήση γραμμικού στοιχείου 2 κόμβων και 6 βαθμών ελευθερίας, που βρίσκεται στη βιβλιοθήκη του προγράμματος.

Για να απλοποιηθεί η ανάλυση κατά την απεικόνιση της διαδικασίας δυναμικής ανάλυσης γίνονται οι ακόλουθες παραδοχές

- 1) Για την προσομοίωση της μη γραμμικής (ελαστοπλαστικής) συμπεριφοράς του υλικού στο περιβάλλον του προγράμματος υιοθετείται το μοντέλο συγκεντρωμένης ανελαστικότητας (Plastic Hinge). Σύμφωνα με τη θεώρηση αυτή δημιουργούνται πλαστικές αρθρώσεις οι οποίες στη γενική περίπτωση μπορούν να εμφανισθούν οπουδήποτε στο μήκος των γραμμικών μελών. Παρ' όλα αυτά, για να απλοποιήσουμε το μοντέλο, επιτρέπουμε την εμφάνιση τους μόνο στα άκρα των γραμμικών μελών. Όσον αφορά τις δοκούς οι πλαστικές αρθρώσεις καθορίζονται από τη ροπή M3 και την αντίστοιχη γωνία στροφής χορδής (Rotation), ενώ για τα υποστυλώματα και τα τοιχώματα (στην περίπτωση του 2^{ου} φορέα) καθορίζονται από την αλληλεπίδραση αξονικής δύναμης και ροπής σε κάθε διεύθυνση (P-M2, P-M3)
- 2) Φαινόμενα γεωμετρικών μη γραμμικοτήτων αγνοούνται (P-δέλτα, P-Δέλτα) αγνοούνται καθότι ο δείκτης σχετικής μεταθετότητας θ σε κτίρια Ο.Σ. είναι μικρότερος του 0.1
- 3) Ο λόγος απόσβεσης ξ θεωρείται ίσος με 5% καθ' όλη τη διάρκεια της ανάλυσης
- 4) Όλοι οι κόμβοι δοκών-υποστυλωμάτων θεωρούνται επαρκείς ως προς την αναπτυσσόμενη ροπή και δυνατότεροι από τις δοκούς, συνεπώς οι πλαστικές αρθρώσεις δημιουργούνται είτε στην παρεία της δοκού, είτε του υποστυλώματος.

Για την εύρεση των γωνιών στροφής που εισάγονται σε κάθε άκρο στοιχείου χρησιμοποιούνται οι ακόλουθοι τύποι για τη μέση γωνία στροφής χορδής κατά την αστοχία και τη μέση τιμή του πλαστικού τμήματος της μέσης γωνίας στροφής κατά την αστοχία (Σχέσεις Σ8.α και Σ.8.β του κεφαλαίου 7 του ΚΑΝ.ΕΠΕ.) με κατάλληλη τροποποίηση για τα τοιχώματα που χρησιμοποιούνται στο ενισχυμένο φορέα. Οι τιμές που προκύπτουν για τα υπάρχοντα στοιχεία (και όχι τα τοιχώματα που προστίθενται στη συνέχεια) να διαιρούνται με 1.2 σύμφωνα με το εδάφιο 7.2.4.β.(iii) του ΚΑΝ.ΕΠΕ. διότι το κτίριο είναι κατασκευασμένο προ του 1985.

Επίσης ο ορισμός των κριτηρίων επιτελεστικότητας (IO, LS, CP) έγινε σύμφωνα με τα αναφερόμενα στο κεφάλαιο 9 του ΚΑΝ.ΕΠΕ. [1] λαμβάνοντας Σ.Α. προσομοιώματος για την αντοχή $\gamma_{Rd} = 1.8$.

Ακόμη, στο προσομοίωμα εισήχθησαν μειωμένες τιμές δυσκαμψίας που αντιστοιχούν στις ενεργές ρηγματωμένες διατομές [1] σύμφωνα με τον τύπο $K = M_y \cdot L_s / 3\theta_y$ (1)

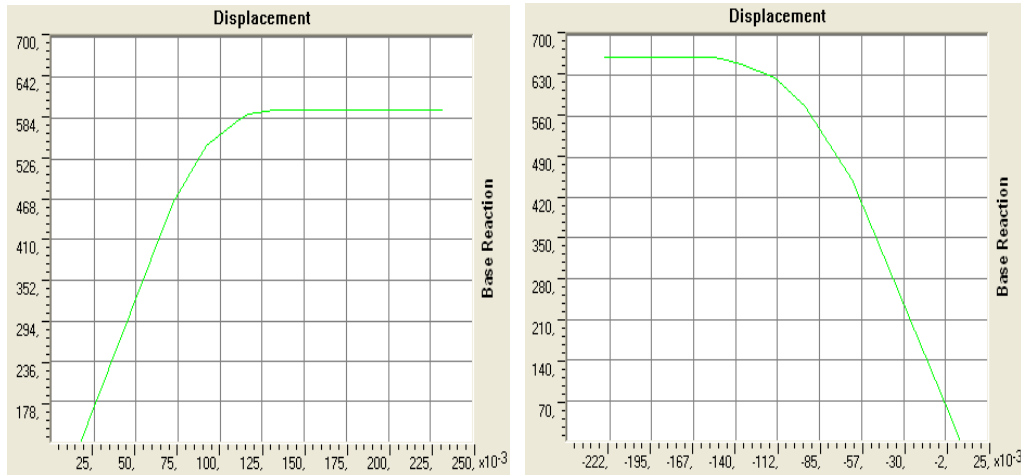
Τέλος, για να διερευνηθεί η επιρροή της τέμνουσας στη συμπεριφορά των πλαστικών αρθρώσεων υπολογίσθηκαν οι τιμές της τέμνουσας αντοχής που αντιστοιχούν στη διαρροή και στην αστοχία του υπόψη μέλους σε κάμψη και συγκρίθηκαν με τις τέμνουσες που αντιστοιχούν στη διαρροή σε κάμψη ($=M_y / L_s$), με τις τελευταίες να προκύπτουν μικρότερες πάντα. Επομένως προέκυψε ότι προηγείται η διαρροή σε κάμψη από την αστοχία σε τέμνουσα, οπότε δε χρειάζεται αλλαγή της πλαστικής γωνίας στροφής στο 40% της γωνίας στροφής στη καμπτική διαρροή θ_y [1].

Σε ό,τι έχει να κάνει με την ανάλυση έκρηξης, τόσο στο υφιστάμενο όσο και στο ενισχυμένο κτίριο, η μόνη διαφορά είναι ότι εφαρμόζονται συντελεστές υπεραντοχής 1.25 για τα υλικά (σκυρόδεμα & χάλυβας), γεγονός που έχει τεκμηριωθεί θεωρητικά παραπάνω.

4.1 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΟΥ ΚΑΙ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ

Αρχικά, πριν την προσομοίωση της εκρήξεως γίνεται στατική ανελαστική ανάλυση (Pushover) στο υφιστάμενο κτίριο με σκοπό την αποτίμηση της σεισμικής επάρκειάς του και συνεπώς της ανάγκης ή μη ενίσχυσής του. Από την ιδιομορφική ανάλυση προέκυψε ότι η 1^η ιδιομορφή είναι στροφική και αντιστοιχεί σε ιδιοπερίοδο $T_1 = 1.326\text{sec}$ και η δεύτερη είναι καμπτική κατά y με $T_2 = 1.3\text{sec}$.

Όσον αφορά τις σεισμικές φορτίσεις για τη Στατική Υπερωθητική Ανάλυση, χρησιμοποιείται στη μεν διεύθυνση x κατανομή δυνάμεων καθ' ύψος ανάλογη με τη μάζα κάθε ορόφου, στη δε διεύθυνση y ανάλογη προς τη 2^η ιδιομορφή (που είναι καμπτική κατά y). Ως κόμβος ελέγχου επιλέγεται η κορυφή του κεντρικού στύλου. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν φαίνονται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 4: Καμπύλες Τέμνουσας Βάσης – Μετακίνησης Κόμβου ελέγχου για το υφιστάμενο κτίριο (Φόρτιση κατά x και κατά y)

Ακολουθώς βρίσκουμε τις στοχευόμενες μετακινήσεις (target displacements) για κάθε διεύθυνση φόρτισης, για να δούμε αν σε αυτές τις μετακινήσεις που αντιστοιχούν στο σεισμό σχεδιασμού η κατασκευή επαρκεί για τη στάθμη επιτελεστικότητας B (Προστασία Ζωής). Χρησιμοποιείται η ακόλουθη σχέση [1]: $\delta_t = C_0 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot (T_e^2 / 4\pi^2) \cdot \Phi_e$

Στην παραπάνω σχέση λαμβάνεται $C_0 = 1.2$ διότι πρόκειται για κτίριο 2 ορόφων, $C_1 = 1.0$ γιατί $T > T_2 = 0.6\text{sec}$ (περίοδος που αντιστοιχεί στην αρχή του κατιόντα κλάδου του φάσματος), $C_2 = 1.1$ διότι πρόκειται για φορέα τύπου 1 (κατασκευασμένος πριν το 1985 με διαθέσιμη πλαστιμότητα μετακινήσεων μικρότερη του 2), ενώ $C_3 = 1.0$ γιατί πρόκειται για κτίριο από Ο.Σ. όπου ο δείκτης μεταθετότητας θ είναι μικρότερος του 0.1. Τέλος Φ_e είναι η ελαστική φασματική ψευδοεπιτάχυνση που αντιστοιχεί στην ισοδύναμη ιδιοπερίοδο T_e στην υπόψη διεύθυνση.

Φόρτιση κατά x:

Από την καμπύλη αντίστασης που παρουσιάζεται παραπάνω ότι η ισοδύναμη πλευρική δυσκαμψία $K_e = 6555\text{kN/m}$, ενώ η ελαστική πλευρική δυσκαμψία είναι $K_0 = 8075\text{kN/m}$ $T_0 = 1.297\text{sec}$, οπότε $T_e = 1.439\text{sec}$ και $\Phi_e = \gamma_1 \cdot A_g \cdot \eta \cdot \theta \cdot \beta_0 \cdot (T_2/T)^{2/3} = 1.0 \cdot 0.24g \cdot 1 \cdot 1 \cdot 2.5 \cdot (0.6/1.439)^{2/3} = 0.335g$
 Επομένως τελικά $\delta_t = 1.2 \cdot 1.0 \cdot 1.1 \cdot 1.0 \cdot (1.439^2 / 4\pi^2) \cdot 0.335g = 227\text{mm}$

Φόρτιση κατά y:

Από την καμπύλη αντίστασης που παρουσιάζεται παραπάνω ότι η ισοδύναμη πλευρική δυσκαμψία $K_e = 6783\text{kN/m}$, ενώ η ελαστική πλευρική δυσκαμψία είναι $K_0 = 7576\text{kN/m}$ $T_0 = 1.3\text{sec}$, οπότε $T_e = 1.373\text{sec}$ και $\Phi_e = \gamma_1 \cdot A_g \cdot \eta \cdot \theta \cdot \beta_0 \cdot (T_2/T)^{2/3} = 1.0 \cdot 0.24g \cdot 1 \cdot 1 \cdot 2.5 \cdot (0.6/1.373)^{2/3} = 0.346g$
 Επομένως τελικά $\delta_t = 1.2 \cdot 1.0 \cdot 1.1 \cdot 1.0 \cdot (1.373^2 / 4\pi^2) \cdot 0.346g = 214\text{mm}$

Ο παραμορφωμένος φορέας κατά τη στοχευόμενη μετακίνηση, η οποία αντιστοιχεί στο σεισμό σχεδιασμού φαίνεται αμέσως παρακάτω για κάθε διεύθυνση φόρτισης.

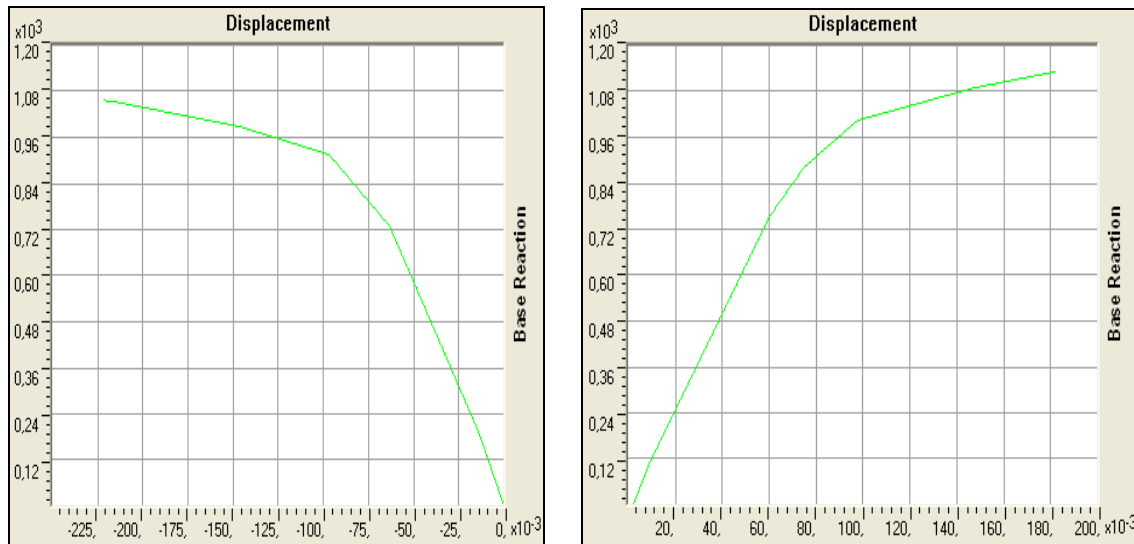


Σχήμα 5: Παραμορφωμένος φορέας υφιστάμενου κτιρίου για τη στοχευόμενη μετακίνηση (Διεύθυνση X και Y)

Παρατηρούμε ότι και για τις δύο διευθύνσεις φόρτισης και τις αντίστοιχες στοχευόμενες μετακινήσεις του κόμβου ελέγχου (επιλέγεται η κορυφή του κεντρικού στύλου) το υφιστάμενο κτίριο δεν επαρκεί για τη στάθμη επιτελεσματικότητας «Προστασία ζωής», διότι εμφανίζονται πλαστικές αρθρώσεις που έχουν ήδη ξεπεράσει το επίπεδο LS (Life Safety) που στο πρόγραμμα αντιστοιχεί σε χρώμα κυανό. Επομένως απαιτείται ενίσχυσή του.

Από την ιδιομορφική ανάλυση για το ενισχυμένο κτίριο προέκυψε ότι η 1^η ιδιομορφή είναι στροφική και αντιστοιχεί σε ιδιοπερίοδο $T_1 = 0.924\text{sec}$ και η δεύτερη είναι καμπτική κατά x με $T_2 = 0.815\text{sec}$.

Όσον αφορά την προσομοίωση των πλευρικών φορτίων στο ενισχυμένο με τα τοιχώματα κτίριο, χρησιμοποιείται στη μεν διεύθυνση x κατανομή δυνάμεων καθ' ύψος ανάλογη προς τη 2^η ιδιομορφή (που είναι καμπτική κατά x), στη δε διεύθυνση y ανάλογη με τη μάζα κάθε ορόφου. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν φαίνονται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 6: Καμπύλες Τέμνουσας Βάσης – Μετακίνησης Κόμβου ελέγχου για το ενισχυμένο κτίριο (Φόρτιση κατά x και κατά y)

Φόρτιση κατά x:

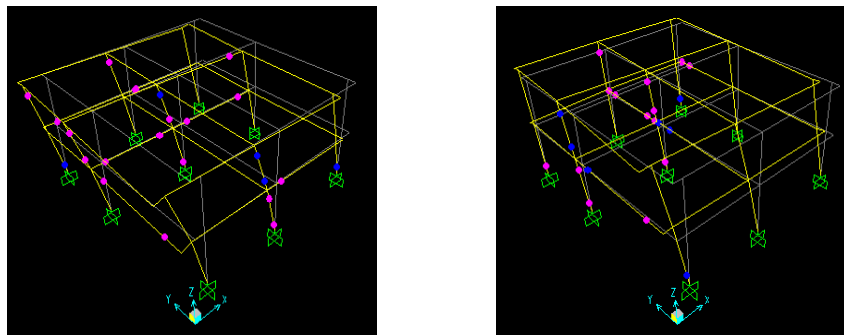
Από την καμπύλη αντίστασης που παρουσιάζεται παραπάνω ότι η ισοδύναμη πλευρική δυσκαμψία $K_e = 11845 \text{ kN/m}$, ενώ η ελαστική πλευρική δυσκαμψία είναι $K_0 = 13420 \text{ kN/m}$ $T_0 = 0.786 \text{ sec}$, οπότε $T_e = 0.8363 \text{ sec}$ και $\Phi_e = \gamma_1 \cdot A_g \cdot \eta \cdot \theta \cdot \beta_0 \cdot (T_2/T)^{2/3} = 1.0 \cdot 0.24 \text{ g} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 2.5 \cdot (0.6/0.836)^{2/3} = 0.481 \text{ g}$

Επομένως τελικά $\delta_i = 1.2 \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot (0.836^2 / 4\pi^2) \cdot 0.481 \text{ g} = 98 \text{ mm}$

Φόρτιση κατά y:

Από την καμπύλη αντίστασης που παρουσιάζεται παραπάνω ότι η ισοδύναμη πλευρική δυσκαμψία $K_e = 12505 \text{ kN/m}$, ενώ η ελαστική πλευρική δυσκαμψία είναι $K_0 = 12089 \text{ kN/m}$ $T_0 = 0.694 \text{ sec}$, οπότε $T_e = 0.6823 \text{ sec}$ και $\Phi_e = \gamma_1 \cdot A_g \cdot \eta \cdot \theta \cdot \beta_0 \cdot (T_2/T)^{2/3} = 1.0 \cdot 0.24 \text{ g} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 2.5 \cdot (0.6/0.6823)^{2/3} = 0.5507 \text{ g}$

Επομένως τελικά $\delta_i = 1.2 \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot (0.6823^2 / 4\pi^2) \cdot 0.5507 \text{ g} = 76 \text{ mm}$



Σχήμα 7: Παραμορφωμένος φορέας ενισχυμένου κτιρίου για τη στοχευόμενη μετακίνηση (Διεύθυνση X και Y)

Παρατηρούμε ότι και για τις δύο διευθύνσεις φόρτισης και τις αντίστοιχες στοχευόμενες μετακινήσεις του κόμβου ελέγχου (επιλέγεται η κορυφή του κεντρικού στύλου) το υφιστάμενο κτίριο επαρκεί για τη στάθμη επιτελεστικότητας «Προστασία ζωής», διότι εμφανίζονται μόνο πλαστικές αρθρώσεις που έχουν ήδη ξεπεράσει το επίπεδο Β και ΙΟ (Immediate Occupancy) που στο πρόγραμμα αντιστοιχούν σε χρώμα magenda και μπλε αντίστοιχα.

4.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΚΡΗΞΗΣ (BLAST ANALYSIS)

Η ανάλυση της έκρηξης που ακολουθήθηκε και για τα δύο κτίρια (υφιστάμενο & ενισχυμένο) περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια:

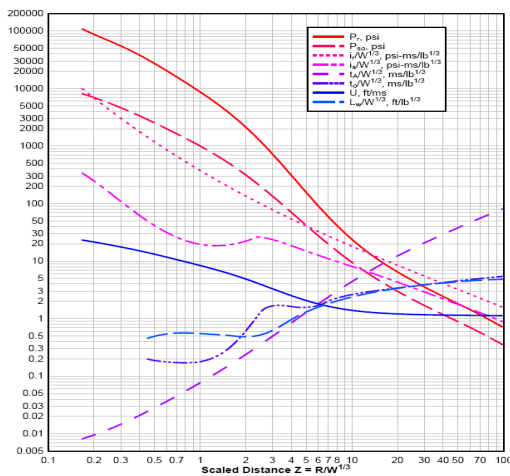
ΕΞΑΝΑΓΚΑΣΜΕΝΗ ΤΑΛΑΝΤΩΣΗ (FORCED VIBRATION)

Η ανάλυση έκρηξης γίνεται αρχικά στο υφιστάμενο κτίριο που προηγουμένως κρίθηκε σεισμικά ανεπαρκές για εξωτερική έκρηξη (που είναι και η πιο δύσκολα ελέγξιμη) προερχόμενη από πορτ-μπαγκάζ αυτοκινήτου γεμάτο με εκρηκτικά που ισοδυναμεί με $W = 250 \text{ lb TNT} (\approx 113 \text{ kg})$ ευρισκόμενο στην επιφάνεια του εδάφους. Αρχικά όλες οι πραγματικές αποστάσεις R από την πηγή της έκρηξης κανονικοποιούνται με τη χρήση της παραμέτρου $Z = R/W^{1/3}$ (2) [7]. Η εύρεση των πιέσεων (μέγιστων τοπικών και ανακλώμενων) που δρουν στα μέλη του μικρότερου εξωτερικού πλαισίου της κατασκευής γίνεται με τη χρήση του διαγράμματος της επόμενης σελίδας μετά από μετατροπή των μονάδων στο S.I.

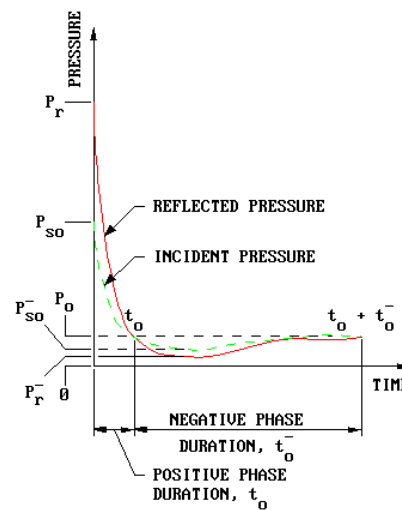
Τις μέγιστες τιμές δίνουν οι ανακλώμενες πιέσεις (P_{ro}) και αυτές χρησιμοποιούνται στην ανάλυση. Για να μετατραπούν αυτές οι πιέσεις σε δυνάμεις, τις πολλαπλασιάζουμε με την

κατακόρυφη επιφάνεια επιρροής κάθε μέλους δια το μήκος του υπόψη μέλους. Για το υφιστάμενο κτίριο οι επιφάνειες επιρροής βρίσκονται με τη μέθοδο των τραπεζίων (επειδή το εμβαδό του σκυροδέματος των στοιχείων σε πρόσοψη είναι παρόμοιο). Αντίθετα, για το ενισχυμένο κτίριο, επειδή η παρουσία του ενός τοιχώματος παράλληλα στην πρόσοψη επηρεάζει σημαντικά την κατανομή του φορτίου που πηγαίνει στην τοιχοπήρωση, θεωρήθηκε πιο ρεαλιστικό τα φορτία να κατανομηθούν στα στοιχεία ανάλογα με το ποσοστό σκυροδέματος σε πρόσοψη του κάθε στοιχείου ως προς τη συνολική επιφάνεια σκυροδέματος στον κάθε όροφο.

Η εύρεση των παραπάνω πιέσεων καθώς και του χρόνου άφιξης (t_A) του παλμού σε κάθε μέλος μπορούν να βρεθούν από το παρακάτω γράφημα [6] συναρτήσεως της κανονικοποιημένης απόστασης Z . Η διάρκεια του παλμού σε κάθε στοιχείο μπορεί να βρεθεί με τη χρήση του τύπου $t_d = 2 \cdot i_f / P_{r0}$, όπου η παράμετρος i_f προσδιορίζεται και αυτή από το παρακάτω γράφημα.



Σχήμα 8: Παράμετροι θετικής φάσης κρουστικού κύματος για έκρηξη στην επιφάνεια του εδάφους



Σχήμα 9: Χρονοϊστορία προσπίπτουσας και ανακλώμενης πίεσης

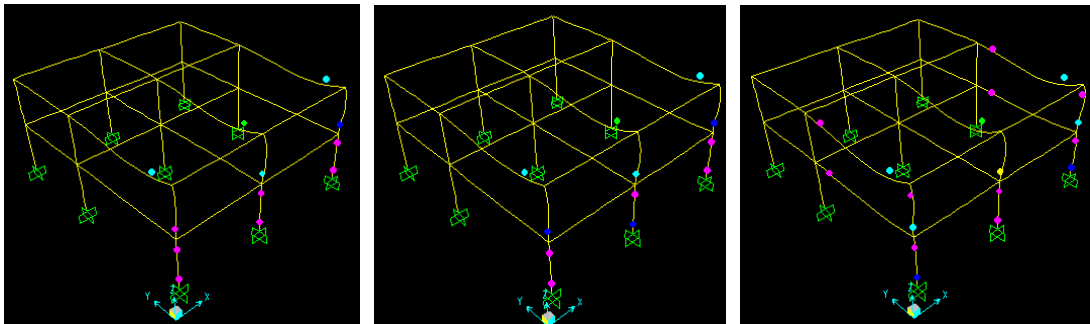
Στις αναλύσεις που ακολουθήθηκαν, θεωρήθηκε μόνο η θετική φάση της έκρηξης η οποία προσομοιώθηκε ως τριγωνικός παλμός. Επίσης, λόγω του μικρού ύψους του κτιρίου (2 μόλις όροφοι), κι επειδή οι αποστάσεις των μελών του πλησιέστερου προς την πηγή της έκρηξης πλαισίου είναι πολύ κοντινές μεταξύ τους, δεν υπάρχει ουσιαστική διαφοροποίηση ως προς το χρόνο άφιξης (t_A) του παλμού σε κάθε μέλος, ούτε ως προς τη χρονική διάρκεια του παλμού αυτού (t_d), παρά μόνο ως προς την πίεση στο κάθε μέλος και συνεπώς ως προς την κατανομημένη δύναμη που αυτό δέχεται. Έτσι ορίζεται η χρονοϊστορία δύναμης με μέγιστη τιμή μονάδα και διάρκεια όση προκύπτει και ακολούθως τοποθετούνται οι αντίστοιχες δυνάμεις που αντιστοιχούν στην κορυφή του παλμού σε κάθε μέλος ξεχωριστά. Αρχικά, χρησιμοποιείται η ανελαστική μέθοδος της άμεσης ολοκλήρωσης (Direct Integration Method) για την προσομοίωση της εξωτερικής έκρηξης με διάρκεια 9msec για χτύπημα από απόσταση 30m και 0.8msec για χτύπημα από απόσταση 10m

ΕΛΕΥΘΕΡΗ ΤΑΛΑΝΤΩΣΗ (FREE VIBRATION)

Η ελεύθερη ταλάντωση προσομοιώνεται ως ανελαστική άμεσης ολοκλήρωσης ανάλυση χρονοϊστορίας χωρίς τοποθέτηση κάποιου φορτίου στην κατασκευή που συνεχίζεται από το τέλος της εξαναγκασμένης ταλάντωσης.

ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΑΔΙΑΚΗΣ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ (PROGRESSIVE COLLAPSE ANALYSIS)

Πρόκειται ουσιαστικά για τη στατική ανελαστική ανάλυση του συνδυασμού των κατακόρυφων φορτίων, για τα οποία η κατασκευή θα πρέπει να επαρκεί. Παρότι σύμφωνα με τους Αμερικανικούς Κανονισμούς κατά την ανάλυση αυτή χρειάζεται να αφαιρείται μόνο ένα φέρον στοιχείο (συνήθως υποστύλωμα), στην περίπτωση που η ανάλυση αυτή αποτελεί τμήμα της προσομοίωσης της συμπεριφοράς ενός φορέα σε μία έκρηξη, υπάρχει περίπτωση περισσότερα ή και κανένα από ένα φέροντα στοιχεία (Υποστυλώματα, δοκοί ή τυχόν τοιχώματα) που βρίσκονται στο πλησιέστερο προς την πηγή της έκρηξης πλαίσιο να αστοχούν πρόωρα και να πρέπει να αφαιρεθούν από το υπόψη πλαίσιο κατά το στάδιο της ανάλυσης που εξετάζεται στο παρόν εδάφιο. Στη συγκεκριμένη ανάλυση χρησιμοποιήθηκε ο συνδυασμός $1.2G + 0.5L$ [6] χρησιμοποιώντας ως αρχικές συνθήκες αυτές του τέλους της ελεύθερης ταλάντωσης.



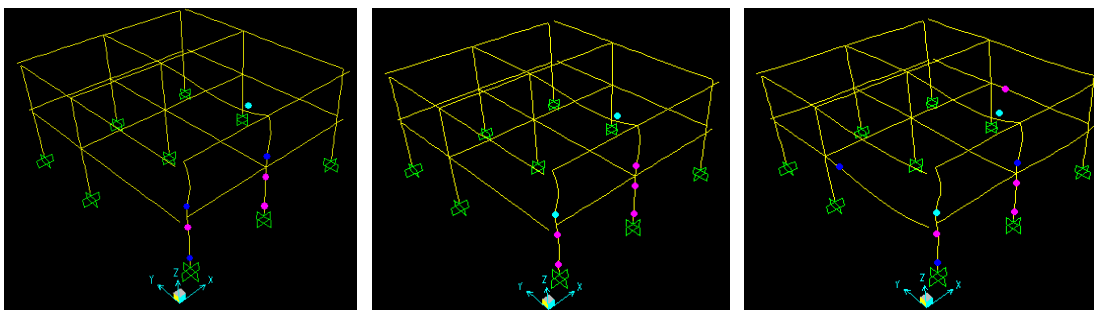
Εξαναγκασμένη ταλάντωση

Ελεύθερη ταλάντωση

Ανάλυση Σταδιακής

κατάρρευσης

Σχήμα 10: Παραμορφωμένη μορφή υφιστάμενου κτιρίου για χτύπημα από 30m απόσταση στα τρία στάδια ταλάντωσής του



Εξαναγκασμένη ταλάντωση

Ελεύθερη ταλάντωση

Ανάλυση Σταδιακής

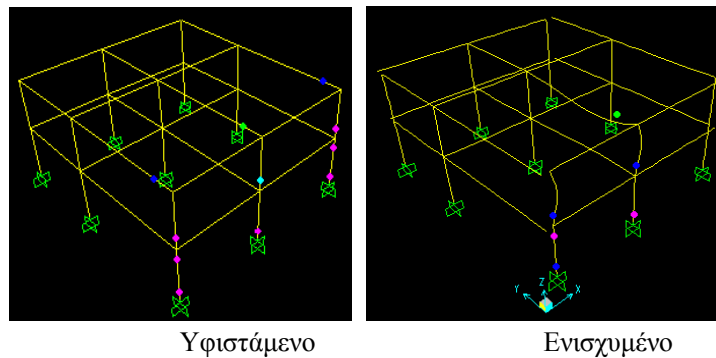
κατάρρευσης

Σχήμα 11: Παραμορφωμένη μορφή ενισχυμένου κτιρίου για χτύπημα από 30m απόσταση στα τρία στάδια ταλάντωσής του

Από τις παραπάνω αναλύσεις προκύπτει ότι για χτύπημα από 30m απόσταση με 113kg εκρηκτικής ύλης TNT το υφιστάμενο κτίριο έχει ξεπεράσει σε δύο σημεία το επίπεδο

επιτελεστικότητας «Αποφυγή Κατάρρευσης» και σε άλλα τέσσερα σημεία το επίπεδο επιτελεστικότητας «Προστασία Ζωής» και κρίνεται ανεπαρκές για αυτό το επίπεδο έκρηξης. Αντίθετα, το ενισχυμένο κτίριο εμφανίζει μόνο σε δύο σημεία πλαστικές αρθρώσεις που έχουν ξεπεράσει το επίπεδο «Προστασία Ζωής» κι επομένως κρίνεται επαρκές αφού αποφεύγεται η κατάρρευση.

Στη συνέχεια το ίδιο φορτίο εκρηκτικών τοποθετείται σε απόσταση μόλις 10m από το κτίριο, οπότε παρατηρούμε ότι τόσο το υφιστάμενο, όσο και το ενισχυμένο κτίριο δεν επαρκούν για τη στάθμη επιτελεστικότητας «Αποφυγή Κατάρρευσης». Και τα δύο κτίρια αστοχούν κατά την εξαναγκασμένη ταλάντωση, με μόνη διαφορά ότι το υφιστάμενο κτίριο αστοχεί νωρίτερα.



Σχήμα 12: Παραμορφωμένοι φορείς κατά την αστοχία για χτύπημα από 10m απόσταση

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν σε ότι έχει να κάνει με τη σύγκριση του αντισεισμικού σχεδιασμού με το σχεδιασμό έναντι κρουστικών φορτίων και εκρήξεων συνοψίζονται σε δύο άξονες:

- Παρότι τα δύο φαινόμενα παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές μεταξύ τους, η εφαρμογή των κανόνων αντισεισμικού σχεδιασμού μπορεί να βελτιώσει αισθητά τη συμπεριφορά κτιρίων Ο.Σ. σε κρουστικά φορτία, καθώς περιορίζονται οι τοπικές αστοχίες στο κτίριο και αποφεύγεται η σταδιακή κατάρρευση αυτού. Αξίζει να σημειώσουμε ότι στις παραπάνω αναλύσεις απαραίτητη προϋπόθεση για να είναι ρεαλιστική η κατανομή των παλμικών φορτίσεων στα μέλη, είναι η ικανοποιητική αγκύρωση των τοιχοπληρώσεων σε αυτά με σκοπό την ελαχιστοποίηση των ιπτάμενων θραυσμάτων
- Η υιοθέτηση των παραπάνω αρχών, που βελτιώνουν τη συμπεριφορά έναντι εκρήξεων, σε κτίρια που θα μπορούσαν να αποτελέσουν στόχο τρομοκρατικών επιθέσεων (πρεσβείες, κυβερνητικά κτίρια, ταχυδρομεία, τράπεζες, εμπορικά κέντρα κ.α.) μπορούν να εφαρμοστούν αρκετά εύκολα από τους αντίστοιχους φορείς λόγω της μεγάλης οικονομικής τους άνεσης.
- Από ένα επίπεδο κινδύνου και πάνω οι αρχές του αντισεισμικού σχεδιασμού δε μπορούν να προσφέρουν ικανοποιητική επιπρόσθετη αντοχή σε εκρήξεις. Στις περιπτώσεις αυτές επειδή είναι δύσκολη η μείωση της ποσότητας της εκρηκτικής

ύλης απαιτείται προσπάθεια για όσο το δυνατό μεγαλύτερη αύξηση της απόστασης του κτιρίου απ' την πηγή της έκρηξης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Κανονισμός Επεμβάσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ.) – Τελικό Κείμενο – Σεπτέμβριος 2010
- [2] Dynamic Analysis Procedures for Progressive Collapse, Elizabeth Agnew & Shalva Marjanishvili - STRUCTURE Magazine, April 2006
- [3] ASCE 41-06 Seismic Rehabilitation of Existing Buildings
- [4] Designing Buildings to resist Explosive Threats, Robert Smilowitz (National Institute of Building Sciences) – 2010
- [5] Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός (Ε.Α.Κ.) 2000 (Κεφάλαιο 5 – Σελίδες 132 – 135)
- [6] Unified Facilities Criteria (UFC) – Design of Buildings to resist Progressive Collapse, Department of Defense (DoD), July 2009 (Chapter 3, p. 46, 47, 63, 64, 90, 157 – Chapter, 4 p. 23, 63)
- [7] Structural Design for External Terrorist Bomb Attacks, Jon A. Schmidt – STRUCTURE Magazine, March 2003
- [8] Earthquake Resistance and Blast Resistance: A Structural Comparison, John R. HAYES, Jr - Stanley C. WOODSON - Robert G. PEKELNICKY - Chris D. POLAND - W. Gene CORLEY - Mete SOZEN - Michael MAHONEY - Robert D. HANSON – 13th World Conference on earthquake Engineering, Vancouver 2004
- [9] Blast Mitigation of Concrete Structures, Tarek Alkhrdaji – The Construction Specifier, March 2006
- [10] Introduction to Blast Loads, Mohamad Zineddin (<http://gfsc.aero>)

