

Υπολογιστικός Αντισεισμικός Σχεδιασμός Κτηριακών Κατασκευών από Ωπλισμένο Σκυρόδεμα κατά τους Ευροκώδικες

Computational Earthquake-Resistant Design of Reinforced Concrete Building Structures to Eurocodes

Άρης Ι. ΘΕΟΦΙΛΟΥ¹

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Το λογισμικό RC-PADD 2, εκμεταλλευόμενο την υψηλή υπολογιστική ισχύ των σημερινών υπολογιστών, εκτελεί με μια πιο ακριβής και θεμελιώδης προσέγγιση ένα σχετικά μεγάλο αριθμό υπολογισμών προς ικανοποίηση των διατάξεων των αντισεισμικών κανονισμών.

Στο παρών άρθρο περιγράφονται οι μεθοδολογίες υπολογισμού των αντοχών σχεδιασμού, των ικανοτικών δυνάμεων και του δείκτη πλαστιμότητας καμπυλοτήτων των στοιχείων. Επίσης, περιγράφεται η μεθοδολογία ελέγχου της σχετικής καμπτικής αντοχής μεταξύ δοκών και υποστυλωμάτων.

Το λογισμικό χρησιμοποιεί μη-γραμμικά μοντέλα για το μη περισφυγμένο σκυρόδεμα και το περισφυγμένο σκυρόδεμα και ένα διγραμμικό μοντέλο για τον χάλυβα ωπλισμού. Επίσης, υιοθετεί ένα επαναληπτικό αλγόριθμο για τον υπολογισμό του ουδέτερου άξονα κατά τον οποίο η διατομή διακριτοποιείται σε ένα μεγάλο αριθμό ινών.

ABSTRACT: The computer program RC-PADD 2, exploiting the high performance of present computers, conducts with a more precise and fundamental approach a relatively large number of calculations in order to fulfil the provisions of the seismic codes.

The present article describes the methodology for the calculation of the design resistance, the maximum design forces and the rotational ductility of members. In addition it describes the checks for the relative bending moment resistance ratio between beams and columns.

The program uses nonlinear constitutive material models for unconfined and confined concrete and a bilinear model for the reinforcement steel. In addition, it adopts an iterative algorithm for the calculation of the neutral axis in which the cross-section is discretized to a large number of fibres.

¹ Πολιτικός Μηχανικός, QuakeFrame Software Ltd, Λευκωσία, Κύπρος, email: aris@quakeframe.com

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το λογισμικό RC-PADD 2 εκμεταλλεύόμενο την υψηλή υπολογιστική ισχύ των σημερινών υπολογιστών, με μια πιο ακριβής και θεμελιώδης προσέγγιση εκτελεί ένα σχετικά μεγάλο αριθμό υπολογισμών, προς ικανοποίηση των διατάξεων των αντισεισμικών κανονισμών. Μερικά από τα πλεονεκτήματα του υπολογιστικού αντισεισμικού σχεδιασμού σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους, είναι η χρήση πιο ανεπτυγμένων μοντέλων υλικών και αλγορίθμων, η αντικειμενικότερη αντιπροσώπευση της κατασκευής, ο υπολογισμός περισσότερων παραμέτρων και η πιο ακριβής λύση.

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ RC-PADD

Το όνομα RC-PADD σημαίνει “Reinforced Concrete – Post Analysis Designer and Detailer” δηλαδή “Ωπλισμένου Σκυροδέματος – Μετά Αναλύσεως Σχεδιασμός και Διαστασιολόγηση” και αναπτύχθηκε από την εταιρεία QuakeFrame Software Ltd. Το λογισμικό εισάγει τα αποτελέσματα της επίλυσης της κατασκευής η οποία εκπονήθηκε από κάποιο άλλο αξιόπιστο λογισμικό δομοστατικής ανάλυσης και εκτελεί μια σειρά υπολογισμών και ελέγχων σύμφωνα με τις διατάξεις των κτηριακών κανονισμών. Κατά την διάρκεια του δομοστατικού σχεδιασμού ο χρήστης έχει την δυνατότητα να προσδιορίσει τον ωπλισμό των στοιχείων κατά την κρίση του. Συνεπώς, όλοι οι υπολογισμοί που εκπονούνται στο RC-PADD βασίζονται στον πραγματικό ωπλισμό, το οποίο είναι εξαιρετικά σημαντικό στον αντισεισμικό σχεδιασμό.

Η διαδικασία του σχεδιασμού αποτελείται από δύο στάδια. Κατά το πρώτο στάδιο ο ωπλισμός προσδιορίζεται από τον χρήστη και εκπονούνται οι υπολογισμοί για τις αντοχές σχεδιασμού και τις πλαστιμότητες καμπυλοτήτων. Αφότου το πρώτο στάδιο του σχεδιασμού ολοκληρωθεί επιτυχώς για όλα τα μέλη, ακολουθεί το δεύτερο στάδιο κατά το οποίο ελέγχονται οι ικανοτικές τέμνουσες και η αποφυγή εκδήλωσης αρθρώσεων στα υποστυλώματα.

ΠΡΑΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΧΡΗΣΗΣ

Μερικά βασικά χαρακτηριστικά που λήφθηκαν υπ’όψη στην ανάπτυξη του RC-PADD είναι η ευκολία χρήσης του και η παραγωγικότητα όγκου εργασίας, ώστε να είναι εφικτή και ελκυστική η πρακτική εφαρμογή του σε επαγγελματικές μελέτες. Μέσω ενός διαδραστικού περιβάλλοντος η εισαγωγή των δεδομένων γίνεται με αρκετά εύκολο και απλό τρόπο. Ο κύριος όγκος εργασίας του χρήστη είναι ο προσδιορισμός του ωπλισμού των μελών. Συγκεκριμένα, ο χρήστης επιλέγει τον αριθμό και την διάμετρο του ωπλισμού. Το λογισμικό άμεσα απαγορεύει την εισαγωγή διαμέτρων ωπλισμού εκτός των προκαθορισθέντων μεγεθών. Ταυτόχρονα εκτελεί ένα αριθμό ελέγχων και ενημερώνει τον χρήστη εάν κάποιοι παράμετροι της διαστασιολόγησης υπερβούν τα επιτρεπτά όρια, όπως για παράδειγμα η απόσταση των ράβδων ωπλισμού. Η διατομή

του μέλους με τις ράβδους διαμηκούς ωπλισμού απεικονίζεται στην οθόνη για οπτική επόπτευση της από τον χρήστη.

Μετά την εισαγωγή του ωπλισμού ο χρήστης εκτελεί τους υπολογισμούς αντοχής για το συγκεκριμένο μέλος με το πάτημα ενός ηλεκτρονικού κουμπιού. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται λεπτομερώς να είναι εύκολη η εποπτεία τους από τον χρήστη. Τα μεγέθη δυνάμεων σχεδιασμού και αντοχών σχεδιασμού παρουσιάζονται μαζί με τον αντίστοιχο έλεγχο. Σε περίπτωση αποτυχίας των ελέγχων, ο χρήστης μπορεί εύκολα να εντοπίσει την λανθασμένη παράμετρο και να την διορθώσει.

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Η ανάλυση της κατασκευής εκπονείται με την χρήση ενός τρισδιάστατου προσομοιώματος στο οποίο τα υποστυλώματα και οι δοκοί αντιπροσωπεύονται με μονοδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία τύπου πλαισίου και οι πλάκες και τα τοιχώματα με δισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία τύπου κελύφους. Είναι σημαντικό το προσομοίωμα να είναι επαρκώς διακριτοποιημένο ώστε τα αποτελέσματα να είναι ακριβή και επίσης να υπολογιστούν με ακρίβεια οι δυνάμεις στις περιοχές των μελών της κατασκευής.

Στην έκδοση 2 του RC-PADD μπορούν να εισαχθούν τα αποτελέσματα της ανάλυσης από τα λογισμικά ETABS και SAP2000 της εταιρείας Computers & Structures, Inc.

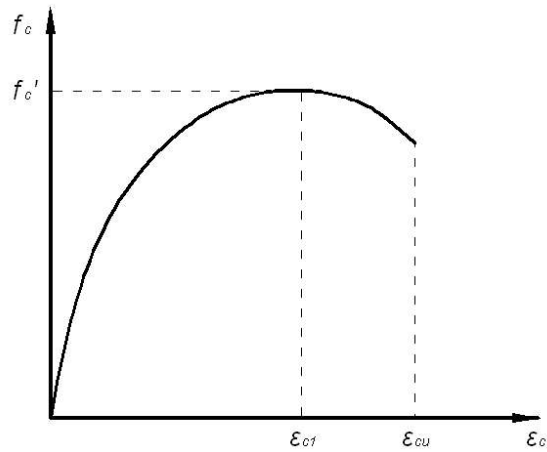
ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ

Κατά την διαστασιολόγηση των δομικών στοιχείων ο χρήστης εισάγει τα δεδομένα του ωπλισμού. Ταυτόχρονα το λογισμικό εκτελεί ένα αριθμό υπολογισμών για να ελέγξει εάν τα κριτήρια διαστασιολόγησης πληρούνται. Μερικά από τα κριτήρια είναι το εμβαδό και ο λόγος του ωπλισμού, η διάμετρος και η απόσταση μεταξύ των ράβδων. Επίσης, το λογισμικό διευκολύνει τον χρήστη στην διαστασιολόγηση με την αυτόματη ενημέρωση του συνεχόμενου ωπλισμού στην περίπτωση συνεχόμενων δοκών.

ΥΛΙΚΑ

Μη Περισφυγμένο Σκυρόδεμα

Για το μη περισφυγμένο σκυρόδεμα χρησιμοποιείται το παραβολικό διάγραμμα σχέσης τάσης – παραμόρφωσης που παρουσιάζεται στο Σχήμα 1 όπως καθορίζεται στον Ευροκώδικα 2 (2004).



Σχήμα 1. Διάγραμμα μοντέλου μη περισφυγμένου σκυροδέματος.

$$f_c = f_{c1}' \cdot \left[\frac{k \cdot \eta - \eta^2}{1 + (k - 2) \cdot \eta} \right] \quad (1)$$

$$\eta = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} \quad (2)$$

$$k = 1.05 \cdot E_c \cdot \frac{\varepsilon_{c1}}{f_{c1}'} \quad (3)$$

όπου f_{c1}' η επί τόπου μέγιστη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, ε_{c1} η παραμόρφωση του σκυροδέματος στο σημείο της μέγιστης αντοχής, ε_{cu} η μέγιστη παραμόρφωση του σκυροδέματος.

Περισφυγμένο Σκυρόδεμα

Για το περισφυγμένο σκυρόδεμα χρησιμοποιείται το διάγραμμα σχέσης τάσης – παραμόρφωσης που προτάθηκε από τους Kent και Park (1971), το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.

Τμήμα AB $\varepsilon_c \leq \varepsilon_{c1}$

ισχύουν οι εξισώσεις για το αντίστοιχο τμήμα του μη περισφυγμένου σκυροδέματος

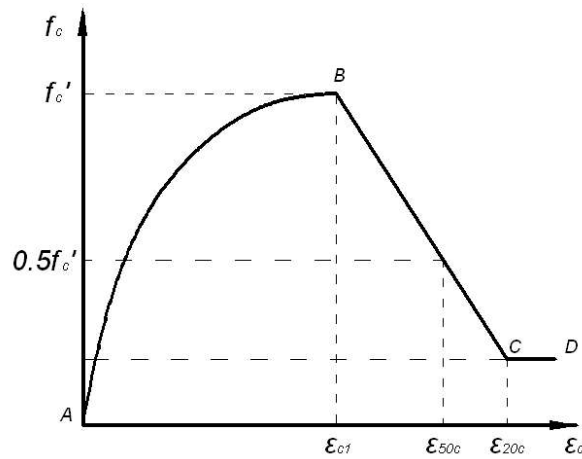
Τμήμα BC $\varepsilon_{c1} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{20c}$

$$f_c = f_{c1}' \cdot [1 - Z \cdot (\varepsilon_c - \varepsilon_{c1})] \quad (4)$$

$$Z = \frac{0.5}{\varepsilon_{50c} - \varepsilon_{c1}} \quad (5)$$

$$\varepsilon_{50c} = \frac{3 + 0.29 \cdot f_c'}{145 \cdot f_c' - 1000} + 0.75 \cdot \rho_s \sqrt{\frac{b''}{s_h}} \quad (6)$$

όπου f_c' η επί τόπου μέγιστη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος εκπεφρασμένη σε N/mm^2 , E_c το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος, ρ_s ο λόγος του όγκου του εγκάρσιου ωπλισμού προς τον όγκο του σκυροδέματος μετρημένο στο εξωτερικό σημείο των συνδετήρων, b'' το πλάτος του περισφυγμένου πυρήνα σκυροδέματος μετρημένο στο εξωτερικό σημείο των συνδετήρων, s_h η απόσταση μεταξύ των συνδετήρων.



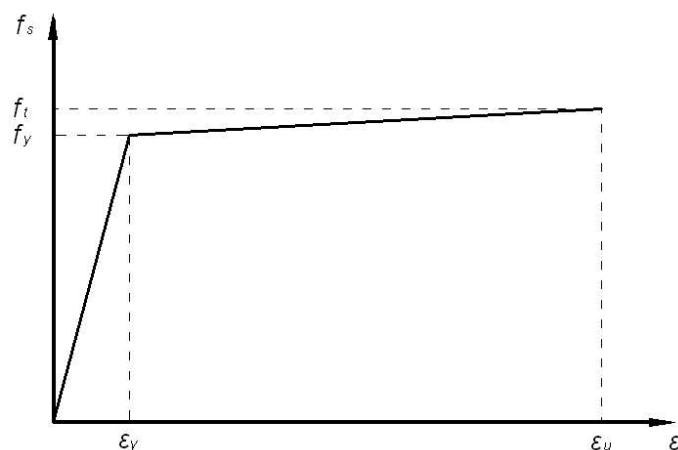
Σχήμα 2. Διάγραμμα μοντέλου περισφυγμένου σκυροδέματος.

Τμήμα CD $\varepsilon_c \geq \varepsilon_{20c}$

$$f_c = 0.2 \cdot f_c' \quad (7)$$

Χάλυβας Ωπλισμού

Για τον χάλυβα χρησιμοποιείται το διγραμμικό μοντέλο που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.



Σχήμα 3. Διάγραμμα μοντέλου χάλυβα ωπλισμού.

όπου f_y η τάση διαρροής του χάλυβα, f_t η μέγιστη εφελκυστική αντοχή του χάλυβα, ϵ_y η παραμόρφωση διαρροής του χάλυβα, ϵ_u η μέγιστη παραμόρφωση του χάλυβα.

ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Στο σχεδιασμό των στοιχείων υιοθετείται η μέθοδος της Οριακής Κατάστασης Αστοχίας η οποία εφαρμόζεται με την μεθοδο του Επιμέρους Συντελεστή Ασφαλείας Υλικού κατά τους Ευροκώδικες. Οι συνδυασμοί δράσεων κατηγοριοποιούνται από τον χρήστη σύμφωνα με την κατάσταση σχεδιασμού όπως ορίζονται στους Ευροκώδικες (2004), για κάθε μια από τις οποίες εφαρμόζεται διαφορετικός Επιμέρους Συντελεστής Ασφαλείας Υλικού.

Πίνακας 1. Καταστάσεις σχεδιασμού και επιμέρους συντελεστές ασφαλείας υλικών.

| Κατάσταση Σχεδιασμού | γ_c | γ_s |
|------------------------------|------------|------------|
| Μόνιμη | 1.50 | 1.15 |
| Τυχηματική λόγω δυστυχήματος | 1.20 | 1.00 |
| Τυχηματική λόγω σεισμού | 1.50 | 1.15 |

όπου γ_c ο επιμέρους συντελεστής ασφαλείας για το σκυρόδεμα, γ_s ο επιμέρους συντελεστής ασφαλείας για τον χάλυβα.

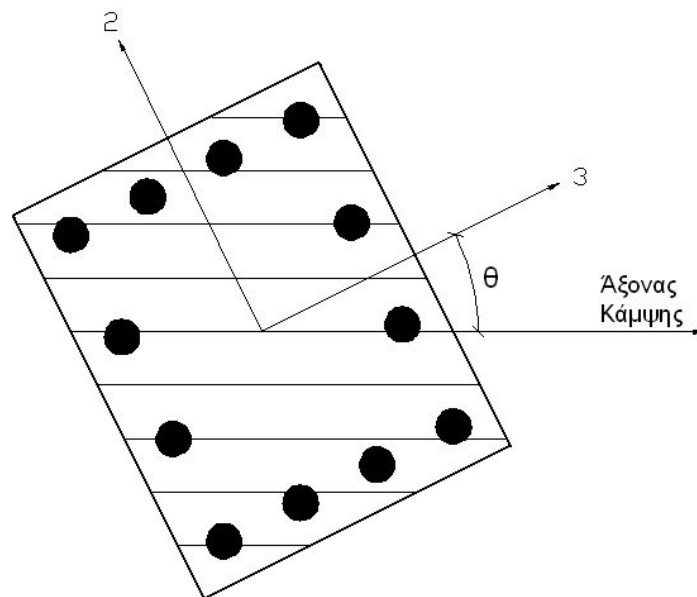
ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ

Διακριτοποίηση Διατομής

Η διατομή του μέλους διακριτοποιείται σε ένα μεγάλο αριθμό ινών οι οποίες είναι παράλληλες προς τον άξονα κάμψης. Σε κάθε ίνα το εμβαδό του σκυροδέματος χαρακτηρίζεται από το πάχος και το πλάτος της ίνας ενώ ο ωπλισμός χαρακτηρίζεται ως σημειακός με προδιαγεγραμμένο εμβαδό. Ο άξονας κάμψης δύναται να περιστραφεί επί των τοπικών αξόνων του μέλους κατά γωνία θ , όπως δυκνείται στο Σχήμα 1. Με βάση δοκιμές έχει βρεθεί ότι ένας αριθμός 500 ινών προσδίδει ικανοποιητική ακρίβεια αποτελεσμάτων.

Ουδέτερος Άξονας

Η θέση του ουδέτερου άξονα υπολογίζεται με την χρήση ενός επαναληπτικού αλγόριθμου. Κατά τον αλγόριθμο, η θέση του ουδέτερου άξονα ανιχνεύεται σε ένα προκαθορισμένο μέρος του συνολικού βάθους της διατομής. Σε κάθε βήμα του αλγόριθμου η θέση του ουδέτερου άξονα μεταβάλλεται κατά ένα αριθμό ινών ο οποίος είναι συνάρτηση του βαθμού ανισοζυγίας των δυνάμεων. Η τελική θέση του είναι εκείνη στην οποία έχει επιτευχθεί ο χαμηλότερος βαθμός ανισοζυγίας των δυνάμεων.



Σχήμα 4. Διακριτοποίηση Διατομής σε ίνες

Κατά τον επαναληπτικό αλγόριθμο η θέση του ουδέτερου άξονα μετατοπίζεται κατά n ίνες ως ακολούθως:

$$|FUnbalance| \leq 1.0, \quad n = n + MaxN \cdot |FUnbalance|^2$$

$$|FUnbalance| > 1.0, \quad n = n + MaxN$$

όπου $FUnbalance$ ο βαθμός ανισοζυγίας των δυνάμεων και $MaxN$ ο μέγιστος αριθμός μεταβολής ινών.

ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΙ ΔΡΑΣΕΩΝ

Οι συνδυασμοί δράσεων δημιουργούνται από τον χρήστη, ο οποίος προσδιορίζει για τον κάθε ένα την κατάσταση σχεδιασμού. Επίσης προσδιορίζει το είδος των συνηθισμένων δράσεων μεταξύ βαρύτητας, σεισμού ή άλλου είδους. Ο Πίνακας 2 παρουσιάζει ένα παράδειγμα συνδυασμού δράσεων.

Πίνακας 2. Συνδυασμός δράσεων COMB2X.

| Συνδυασμός | Δράση | Συντελεστής | Είδος |
|------------|-------|-------------|----------|
| COMB2X | DEAD | 1.0 | Βαρύτητα |
| | LIVE | 0.3 | Βαρύτητα |
| | EX | 1.0 | Σεισμός |
| | EY | 0.3 | Σεισμός |

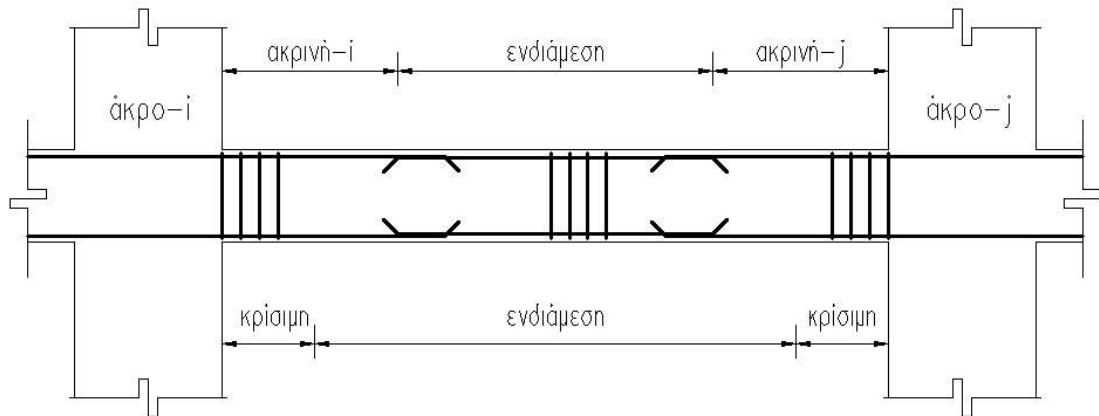
ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΔΟΚΩΝ

Περιοχές Δοκού

Η δοκός διακριτοποιείται σε δύο είδη περιοχών κατά την διαμηκή διεύθυνση, οι οποίες αφορούν στον προσδιορισμό του διαμηκού και του διατμητικού ωπλισμού, όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.

- Περιοχές διαμηκού ωπλισμού, οι οποίες αποτελούνται από δύο ακρινές και μία ενδιάμεση περιοχή. Οι δύο ακρινές περιοχές εκτείνονται κατά μια πεπερασμένη απόσταση από τα άκρα των δοκών, η οποία για παράδειγμα είναι ίση με 0.25 φορές το μήκος της δοκού για σχεδιασμό σύμφωνα με τους Ευροκώδικες για μέσο επίπεδο πλαστιμότητας (DCM).
- Περιοχές διατμητικού ωπλισμού, οι οποίες αποτελούνται από δύο κρίσιμες περιοχές και μια ενδιάμεση περιοχή. Οι κρίσιμες περιοχές εκτείνονται κατά μια πεπερασμένη απόσταση από τα άκρα των δοκών, η οποία για παράδειγμα είναι ίση με 1.0 φορά το βάθος της δοκού για σχεδιασμό σύμφωνα με τους Ευροκώδικες για μέσο επίπεδο πλαστιμότητας (DCM).

Κατά την δημιουργία των συνδυασμών δράσεων, σε κάθε περιοχή υπολογίζονται οι μέγιστες δυνάμεις. Κατά το σχεδιασμό των στοιχείων οι αντιστάσεις υπολογίζονται σε κάθε περιοχή ξεχωριστά.



Σχήμα 5. Περιοχές δοκού.

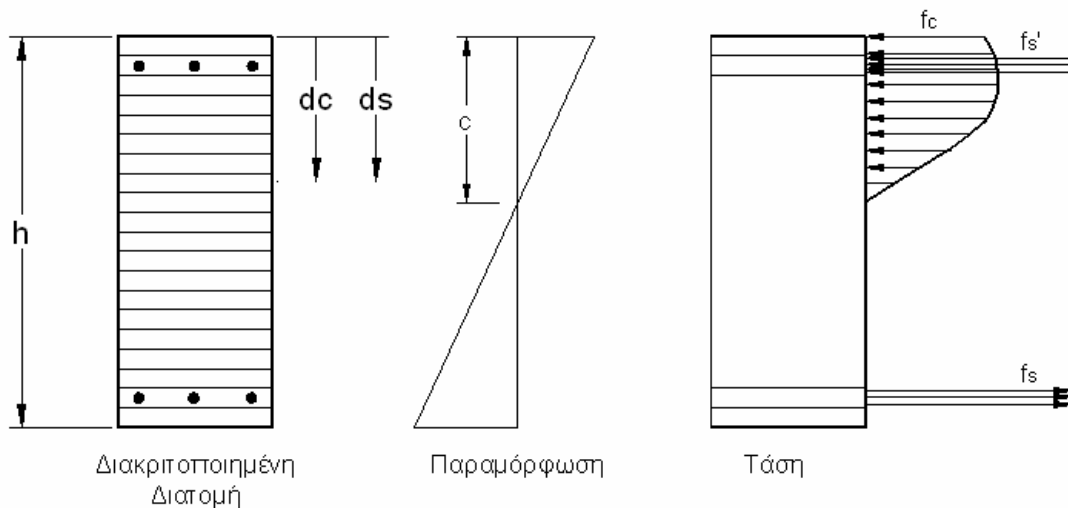
Ουδέτερος Άξονας

Κατά τον σχεδιασμό της δοκού υπολογίζεται το βάθος του ουδέτερου άξονα c . Για τον υπολογισμό χρησιμοποιείται ο προαναφερθείς αλγόριθμος.

Καμπτική Αντοχή Σχεδιασμού

Αφού υπολογιστεί το βάθος του ουδέτερου άξονα υπολογίζεται η καμπτική αντοχή σχεδιασμού της δοκού M_{Rd} με αριθμητική ολοκλήρωση, όπως φαίνεται στην ακόλουθη εξίσωση. Στον υπολογισμό χρησιμοποιείται το μοντέλο μη περισφυγμένου σκυροδέματος.

$$M_{Rd} = \sum_{i=0}^n F_{cd,i} \cdot (d_c - c) + \sum_{i=0}^n F_{sd,i} \cdot (d_s - c) \quad (8)$$



Σχήμα 6. Διαγράμματα παραμόρφωσης και τάσης διατομής.

όπου $F_{sd,i}$ η αντοχή σχεδιασμού του ωπλισμού της ίνας i , $F_{cd,i}$ η αντοχή σχεδιασμού του σκυροδέματος της ίνας i , n ο συνολικός αριθμός ινών, d_c το βάθος του θλιβόμενου σκυροδέματος, d_s το βάθος του ωπλισμού όπως δυκνούνται στο Σχήμα 6.

Τέμνουσα Αντοχή Σχεδιασμού

Στον υπολογισμό της τέμνουσας αντοχής σχεδιασμού V_{Rd} λογίζεται μόνο η συνεισφορά του διατμητικού ωπλισμού, όπως φαίνεται στην ακόλουθη εξίσωση.

$$V_{Rd} = \frac{(A_v \cdot z \cdot f_{yd})}{s_{rv}} \quad (9)$$

όπου A_v το εμβαδό του διατμητικού ωπλισμού, z η απόσταση μεταξύ του εφελκυσμένου και του θλιβόμενου ωπλισμού, f_{yd} η τάση διαρροής σχεδιασμού του χάλυβα, s_{rv} η απόσταση μεταξύ των συνδετήρων του διατμητικού ωπλισμού.

Η τέμνουσα αντοχή σχεδιασμού λόγω του διατμητικού ωπλισμού συγκρίνεται με την μέγιστη επιτρεπτή τέμνουσα αντοχή σχεδιασμού λόγω λοξής θλίψης κορμού $V_{Rd,max}$, όπως φαίνεται στην ακόλουθη εξίσωση. Η γωνιά της θλιπτικής χορδής με τον διαμηκή άξονα λαμβάνεται ως 45° .

$$V_{Rd,max} = \frac{(b \cdot z \cdot 0.6 \cdot f_{cd})}{2} \quad (10)$$

όπου b το πλάτος του στοιχείου, f_{cd} η αντοχή σχεδιασμού του μη περισφυγμένου σκυροδέματος.

Τρόπος Αστοχίας

Το λογισμικό έχει την δυνατότητα να ελέγξει εάν η δοκός αστοχεί με τον επιτρεπτό εφελκυστικό τρόπο ή με τον απαγορευμένο θλιπτικό τρόπο. Ο τρόπος αστοχίας του στοιχείου καθορίζεται ως εφελκυστικός όταν η παραμόρφωση του εφελκυσμένου ωπλισμού υπερβαίνει την τιμή 0.005 αλλιώς ως θλιπτικός. Η μεθοδολογία αυτή προδιαγράφεται στον κανονισμό ACI-318 (2008).

Ικανοτική Τέμνουσα Δύναμη Σχεδιασμού

Το λογισμικό έχει την δυνατότητα να αναγνωρίσει την συνδεσμολογία των στοιχείων. Έτσι, είναι σε θέση να υπολογίσει το άρθροισμα των καμπτικών αντοχών σχεδιασμού σε κάθε κόμβο α για τα υποστυλώματα και τις δοκούς ξεχωριστά. Η ικανοτική καμπτική ροπή σχεδιασμού των δοκών σε κάθε άκρο α υπολογίζεται ως ακολούθως.

$$M_{d,beam,\alpha} = \gamma_{Rd,beam} \cdot M_{Rd,beam,\alpha} \cdot \min \left(1, \frac{\sum M_{Rd,column,\alpha}}{\sum M_{Rd,beam,\alpha}} \right) \quad (11)$$

όπου $M_{d,beam,\alpha}$ η ικανοτική καμπτική ροπή σχεδιασμού των δοκών στο άκρο α , $M_{d,column,\alpha}$ η ικανοτική καμπτική ροπή σχεδιασμού των υποστυλωμάτων στο άκρο α , $\gamma_{Rd,beam}$ ο συντελεστής υπεραντοχής για τις δοκούς.

Το λογισμικό έχει την δυνατότητα να αναγνωρίσει τις δράσεις βαρύτητας, οι οποίες προσδιορίζονται από τον χρήστη κατά την διαδικασία δημιουργίας των συνδυασμών δράσεων. Η ικανοτική τέμνουσα δύναμη σχεδιασμού $V_{Ed,max}$ υπολογίζεται ως ακολούθως.

$$V_{Ed,max} = \frac{\left(|M_{d,i-end}^+| + |M_{d,j-end}^-| \right)}{L} + \max\left(|V_{Ed,i-end,gr}|, |V_{Ed,j-end,gr}| \right) \quad (12)$$

όπου $M_{d,a}^+$ και $M_{d,a}^-$ η μέγιστη θετική και αρνητική καμπτική ροπή στο άκρο α , L το μήκος του στοιχείου, $V_{Ed,a,gr}$ η τέμνουσα δύναμη σχεδιασμού δράσης βαρύτητας στο άκρο α .

Πλαστιμότητα Καμπυλοτήτων

Ο δείκτης πλαστιμότητας καμπυλοτήτων της δοκού μ_ϕ υπολογίζεται στις δύο ακρινές περιοχές, με την μεθοδολογία που προτείνουν οι Park και Paulay (1975).

Η καμπυλότητα διαρροής ϕ_y υπολογίζεται ως ακολούθως. Στους υπολογισμούς χρησιμοποιείται το μοντέλο περισφυγμένου σκυροδέματος.

$$\phi_y = \frac{f_y}{E_s} \cdot \frac{1}{d_t - c_{yld}} \quad (13)$$

όπου c_{yld} το βάθος του ουδέτερου άξονα κατά το σημείο διαρροής του πρώτου εφελκόμενου ωπλισμού, και d_t το βάθος του πρώτου διαρρέοντος εφελκόμενου ωπλισμού.

Η καμπυλότητα αστοχίας ϕ_u υπολογίζεται ως ακολούθως.

$$\phi_u = \frac{\varepsilon_{cu}}{c_{ult}} \quad (14)$$

όπου c_{ult} το βάθος του ουδέτερου άξονα κατά το σημείο αστοχίας.

Ο δείκτης πλαστιμότητας καμπυλοτήτων της δοκού μ_ϕ υπολογίζεται στις δύο ακρινές περιοχές ως ακολούθως.

$$\mu_\phi = \frac{\phi_u}{\phi_y} \quad (15)$$

Η ελάχιστη επιτρεπτή τιμή του δείκτη πλαστιμότητας καμπυλοτήτων υπολογίζεται εφαρμόζοντας τον συντελεστή $\mu_{\phi, factor}$ στον απαιτούμενο δείκτη πλαστιμότητας $\mu_{\phi, required}$ ώστε να ικανοποιείται η διάταξη 5.2.3.4(4) του Ευροκώδικα 8 (2004), σε περίπτωση χρησιμοποίησης διαφορετικού είδους ωπλισμού. Ο συντελεστής $\mu_{\phi, factor}$ παίρνει τιμή 1.0 σε περίπτωση χρησιμοποίησης ωπλισμού τύπου C και τιμή 1.5 σε περίπτωση χρησιμοποίησης ωπλισμού τύπου B.

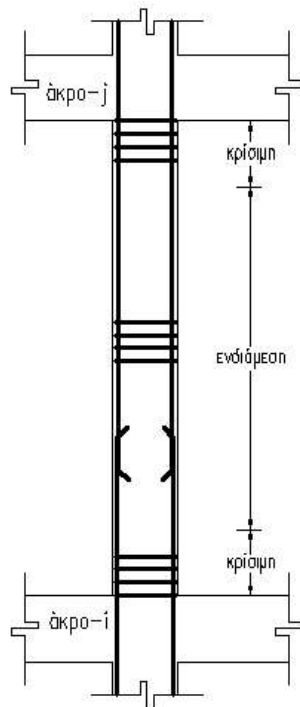
$$\mu_{\phi} \geq \mu_{\phi, required} \cdot \mu_{\phi, factor} \quad (16)$$

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ

Περιοχές Υποστυλώματος

Ο διαμηκός ωπλισμός ορίζεται ως ομοιόμορφος κατά ολόκληρο το μήκος του υποστυλώματος.

Για τον ορισμό του διαμηκικού ωπλισμού το υποστυλόμετρο διακριτοποιείται σε περιοχές κατά την διαμηκή διεύθυνση, οι οποίες αποτελούνται από δύο κρίσιμες περιοχές και μια ενδιάμεση περιοχή. Οι κρίσιμες περιοχές εκτείνονται κατά μια πεπερασμένη απόσταση από τα άκρα του υποστυλώματος, για παράδειγμα ίση με 1.0 φορές το μέγιστο πλάτος του υποστυλώματος για σχεδιασμό σύμφωνα με τους Ευροκώδικες για μέσο επίπεδο πλαστιμότητας (DCM). Η ενδιάμεση περιοχή εκτείνεται μεταξύ των εσωτερικών άκρων των δύο κρίσιμων περιοχών.



Σχήμα 7. Περιοχές υποστυλώματος.

Αξονική Αντοχή Σχεδιασμού

Η αξονική αντοχή σχεδιασμού N_{Rd} του υποστυλώματος υπολογίζεται με αριθμητική ολοκλήρωση, όπως φαίνεται στην ακόλουθη εξίσωση.

$$N_{Rd} = 0.80 \cdot \left(\sum_{i=0}^n F_{cd,i} + \sum_{i=0}^n F_{sd,i} \right) \quad (17)$$

όπου $F_{sd,i}$ η αντοχή σχεδιασμού του ωπλισμού της ίνας i , $F_{cd,i}$ η αντοχή σχεδιασμού του σκυροδέματος της ίνας i και n ο συνολικός αριθμός ινών.

Στην ανωτέρω εξίσωση, ο συντελεστής 0.80 εφαρμόζεται λόγω πιθανής εκκεντρότητας της αξονικής δράσης, όπως προδιαγράφεται στον κανονισμό ACI-318 (2008).

Ουδέτερος Άξονας

Το βάθος του ουδέτερου άξονα c υπολογίζεται για ένα αριθμό γωνιών περιστροφής του άξονα κάμψης επί των τοπικών αξόνων του μέλους. Για τον υπολογισμό χρησιμοποιείται ο προαναφερθείς αλγόριθμος.

Καμπτική Αντοχή Σχεδιασμού

Εφ' όσον υπολογιστεί το βάθος του ουδέτερου άξονα υπολογίζεται η καμπτική αντοχή σχεδιασμού M_{Rd} του υποστυλώματος με αριθμητική ολοκλήρωση, όπως φαίνεται στην ακόλουθη εξίσωση. Στον υπολογισμό χρησιμοποιείται το μοντέλο μη περισφυγμένου σκυροδέματος.

$$M_{Rd} = \sum_{i=0}^n F_{cd,i} \cdot \left(d_c - \frac{h}{2} \right) + \sum_{i=0}^n F_{sd,i} \cdot \left(d_s - \frac{h}{2} \right) \quad (18)$$

όπου $F_{sd,i}$ η αντοχή σχεδιασμού του ωπλισμού της ίνας i , $F_{cd,i}$ η αντοχή σχεδιασμού του σκυροδέματος της ίνας i , n ο συνολικός αριθμός ινών, d_c το βάθος του θλιβόμενου σκυροδέματος, d_s το βάθος του ωπλισμού, h το συνολικό βάθος της διατομής κάθετης προς τον άξονα κάμψης όπως δυκνούνται στο Σχήμα 6.

Έλεγχος Διαξονικής Καμπτικής Δύναμης

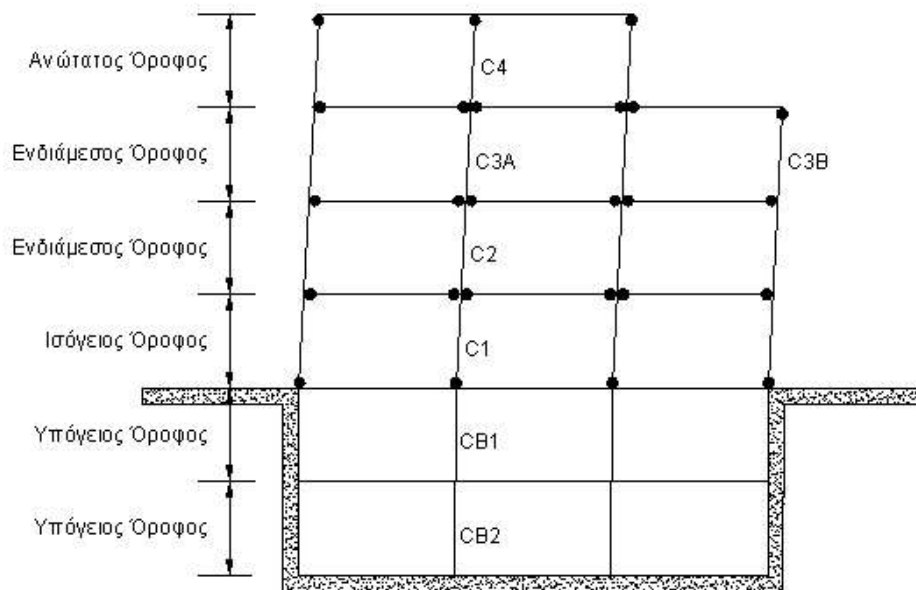
Η διαξονική καμπτική δύναμη σχεδιασμού ελέγχεται με παρεμβολή επί των καμπτικών αντοχών σχεδιασμού που υπολογίζονται σε διάφορες γωνίες περιστροφής του άξονα κάμψης.

Τέμνουσα Αντοχή Σχεδιασμού

Η μεθοδολογία υπολογισμού της τέμνουσας αντοχής σχεδιασμού είναι η ίδια με εκείνη των δοκών.

Ικανοτική Τέμνουσα Δύναμη Σχεδιασμού

Το λογισμικό έχει την δυνατότητα να αναγνωρίσει την συνδεσμολογία των στοιχείων. Έτσι, είναι σε θέση να υπολογίσει το άρθρσιμο των καμπτικών αντοχών σε κάθε κόμβο για τα υποστυλώματα και τις δοκούς ξεχωριστά. Επίσης, είναι σε θέση να αναγνωρίσει τον ισόγειο όροφο, κατόπιν προσδιορισμού του από τον χρήστη. Οι ικανοτικές δυνάμεις υπολογίζονται με διαφορετικό τρόπο μεταξύ των ανώγειων ορόφων, του ισόγειου ορόφου και των υπόγειων ορόφων.



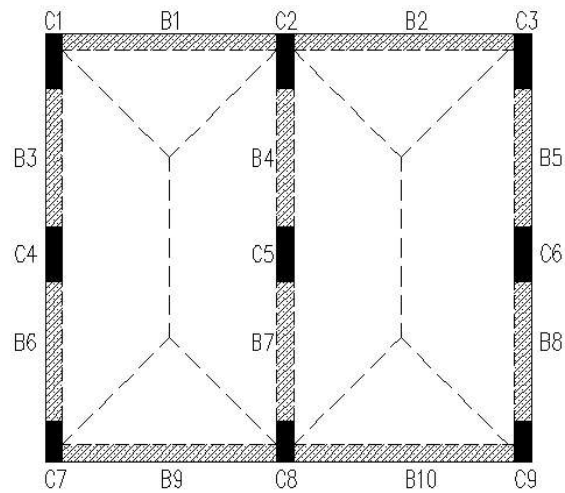
Σχήμα 8. Θέσεις πλαστικών αρθρώσεων.

Το Σχήμα 8 απεικονίζει μια πιθανή διάταξη των πλαστικών αρθρώσεων. Σημειώνονται τα ακόλουθα.

- Στους υπόγειους ορόφους δεν σχηματίζονται πλαστικές αρθρώσεις σε κανένα στοιχείο.
- Στον ισόγειο όροφο σχηματίζονται πλαστικές αρθρώσεις στο κάτω άκρο όλων των υποστυλωμάτων.
- Στους ενδιάμεσους ορόφους σχηματίζονται πλαστικές αρθρώσεις στα άκρα των δοκών.
- Είναι επιτρεπτό να σχηματιστούν πλαστικές αρθρώσεις στα άνω άκρα των υποστυλωμάτων σε περιπτώσεις που δεν συνεχίζονται στον υπερκείμενο όροφο.

Το Σχήμα 9 απεικονίζει μια κάτοψη ορόφου με μία πιθανή διάταξη στοιχείων.

- Στην διεύθυνση Χ (διεύθυνση της δοκού Β1), τα υποστυλώματα C1, C2, C3, C7, C8, C9, έχουν συνδεδεμένες δοκούς. Τα υποστυλώματα C4, C5, C6, δεν έχουν συνδεδεμένες δοκούς.
- Στην διεύθυνση Υ (διεύθυνση της δοκού Β3), όλα τα υποστυλώματα έχουν συνδεδεμένες δοκούς.



Σχήμα 9. Κάτοψη ορόφου.

Στους Πίνακες 3 και 4 παρουσιάζονται οι εξισώσεις υπολογισμού της ικανοτικής καμπτικής δύναμης σχεδιασμού για τα άνω και κάτω άκρα των υποστυλωμάτων.

Πίνακας 3. Ικανοτικές καμπτικές ροπές στο άνω άκρο των υποστυλωμάτων.

| | |
|---|--|
| Υποσύλωμα άνω ορόφου με συνδεδεμένες δοκούς στο άνω άκρο | $M_{d,top} = \gamma_{Rd,column} \cdot M_{Rd,top} \cdot \min \left(1, \frac{\sum M_{Rd,beam}}{\sum M_{Rd,column}} \right)$ |
| Υποσύλωμα άνω ορόφου χωρίς συνδεδεμένες δοκούς στο άνω άκρο | $M_{d,top} = \gamma_{Rd,column} \cdot M_{Rd,top}$ |
| Υποσύλωμα ισογείου με συνδεδεμένες δοκούς στο άνω άκρο | $M_{d,top} = \gamma_{Rd,column} \cdot M_{Rd,top} \cdot \min \left(1, \frac{\sum M_{Rd,beam}}{\sum M_{Rd,column}} \right)$ |
| Υποσύλωμα ισογείου χωρίς συνδεδεμένες δοκούς στο άνω άκρο | $M_{d,top} = \gamma_{Rd,column} \cdot M_{Rd,top}$ |
| Υποσύλωμα υπογείου | $M_{d,top} = \gamma_{Rd,column} \cdot M_{Ed,top}$ |

Πίνακας 4. Ικανοτικές καμπτικές ροπές στο κάτω άκρο των υποστυλωμάτων.

| | |
|---|---|
| Υποστύλωμα άνω ορόφου με συνδεδεμένες δοκούς στο κάτω άκρο | $M_{d,bottom} = \gamma_{Rd,column} \cdot M_{Rd,bottom} \cdot \min\left(1, \frac{\sum M_{Rd,beam}}{\sum M_{Rd,column}}\right)$ |
| Υποστύλωμα άνω ορόφου χωρίς συνδεδεμένες δοκούς στο κάτω άκρο | $M_{d,bottom} = \gamma_{Rd,column} \cdot M_{Rd,bottom}$ |
| Υποστύλωμα ισογείου | $M_{d,bottom} = \gamma_{Rd,column} \cdot M_{Rd,bottom}$ |
| Υποστύλωμα υπογείου | $M_{d,bottom} = \gamma_{Rd,column} \cdot M_{Ed,bottom}$ |

όπου $M_{d,bottom}$ η ικανοτική καμπτική ροπή σχεδιασμού στο κάτω άκρο, $M_{d,top}$ η ικανοτική καμπτική ροπή σχεδιασμού στο άνω άκρο, $\gamma_{Rd,column}$ ο συντελεστής υπεραντοχής για τα υποστυλώματα.

Η ικανοτική τέμνουσα δύναμη σχεδιασμού υπολογίζεται ως ακολούθως.

$$V_{Ed,max} = \frac{(|M_{d,top}| + |M_{d,bottom}|)}{L} \quad (19)$$

όπου L το μήκος του υποστυλώματος.

Πλαστιμότητα Καμπυλοτήτων

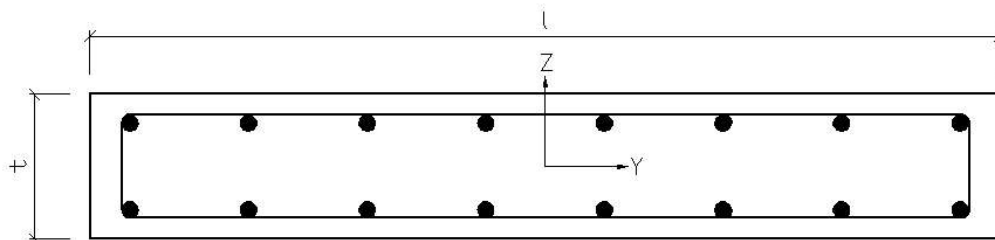
Ο δείκτης πλαστιμότητας καμπυλοτήτων του υποστυλώματος υπολογίζεται για κάθε διεύθυνση ξεχωριστά. Στους υπολογισμούς της καμπυλότητας διαρροής χρησιμοποιείται το μοντέλο περισφυγμένου σκυροδέματος. Η μεθοδολογία είναι όμοια με την εκείνη για τις δοκούς.

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ

Ωπλισμός

Ο κυρίως ωπλισμός εκτείνεται σε ολόκληρο το κατακόρυφο μήκος και η διάταξη του αποτελείται από δύο σειρές οι οποίες είναι παράλληλες προς την επιφάνεια του τοιχώματος.

Ο διαμηθικός ωπλισμός αποτελείται από συνδετήρες ή ανεξάρτητες ράβδους σε κάθε σειρά διαμηθούς ωπλισμού, οι οποίες εκτείνονται σε ολόκληρο το οριζόντιο μήκος και από συνδετήρες που εκτείνονται σε ολόκληρο το πλάτος και μερικώς στο οριζόντιο μήκος.



Σχήμα 10. Διατομή τοιχώματος.

Αξονική Αντοχή Σχεδιασμού

Η μεθοδολογία υπολογισμού της αξονικής αντοχής σχεδιασμού είναι η ίδια με εκείνη των υποστρωμάτων.

Ουδέτερος Άξονας

Το βάθος του ουδέτερου άξονα υπολογίζεται κατά τις δύο αξονικές δευθύνσεις. Για τον υπολογισμό χρησιμοποιείται ο προαναφερθείς αλγόριθμος.

Καμπτική Αντοχή Σχεδιασμού

Η μεθοδολογία υπολογισμού της καμπτικής αντοχής σχεδιασμού είναι η ίδια με εκείνη των υποστρωμάτων, με την διεύθυνση του άξονα κάμψης να λαμβάνεται ως παράλληλη και κάθετη προς την οριζόντια διαμετρική διεύθυνση.

Τέμνουσα Αντοχή Σχεδιασμού

Η μεθοδολογία υπολογισμού της τέμνουσας αντοχής σχεδιασμού είναι η ίδια με εκείνη των δοκών.

Ικανοτική Τέμνουσα Δύναμη Σχεδιασμού

Η ικανοτική τέμνουσα δύναμη σχεδιασμού υπολογίζεται ως η μέγιστη των ακόλουθων, σύμφωνα με την διάταξη 5.5.2.4.2 του Ευροκώδικα 8 (2004).

$$V_{Ed1,max} = \gamma_{Rd,wall} \cdot \left(\frac{M_{Rd}}{M_{Ed}} \right) \cdot V_{Ed} \quad (20)$$

$$V_{Ed2,max} = q \cdot V_{Ed} \quad (21)$$

Πλαστιμότητα Καμπυλοτήτων

Ο δείκτης πλαστιμότητας καμπυλοτήτων μ_ϕ υπολογίζεται για κάθε διεύθυνση ξεχωριστά. Η μεθοδολογία είναι η ίδια με εκείνη των υποστρωμάτων. Στους υπολογισμούς χρησιμοποιείται το μοντέλο μη περισφυγμένου σκυροδέματος.

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΚΟΜΒΩΝ

Για να εξασφαλιστεί ότι οι πλαστικές αρθρώσεις σχηματίζονται στις επιτρεπτές θέσεις, δηλαδή στα άκρα των δοκών ελέγχεται η ακόλουθη συνθήκη, σύμφωνα με την διάταξη 4.4.2.3 (4) του Ευροκώδικα 8 (2004).

$$\sum M_{Rd,column} \geq \gamma_{Rd,joint} \cdot \sum M_{Rd,beam} \quad (22)$$

όπου $\gamma_{Rd,joint}$ ο συντελεστής υπεραντοχής για τον κόμβο.

Το λογισμικό RC-PADD επιτρέπει την μη εφαρμογή του συγκεκριμένου ελέγχου στα ανώτατα υποστυλώματα, στα οποία είναι επιτρεπτό να σχηματιστεί πλαστική άρθρωση.

ΠΡΩΤΕΥΟΝΤΑ / ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΝΤΑ ΣΕΙΣΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Το λογισμικό RC-PADD έχει την δυνατότητα σχεδιασμού των δομικών στοιχείων είτε ως πρωτεύοντως ή ως δευτερεύοντως σεισμικού τύπου. Στην περίπτωση των πρωτεύοντων σεισμικών στοιχείων εκτελούνται όλοι οι προαναφερθέντες υπολογισμοί. Στην περίπτωση των δευτερεύοντων σεισμικών στοιχείων εκτελούνται μόνο οι υπολογισμοί αντοχής για κάθε περίπτωση φόρτισης ενώ παραλείπονται οι υπολογισμοί ικανοτικών δυνάμεων, πλαστιμότητας καμπυλοτήτων και οι έλεγχοι σχετικής αντοχής μεταξύ υποστυλωμάτων και δοκών.

Ο σχεδιασμός των δομικών στοιχείων ως δευτερεύοντως σεισμικού τύπου είναι χρήσιμος σε περιπτώσεις που ο αρχιτεκτονικός σχεδιασμός απαιτεί την απόκλιση από τις κυρίως προδιαγραφές του σεισμικού κώδικα, όπως για παράδειγμα την χρήση λεπτών υποστυλωμάτων ή δοκών.

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ

Το RC-PADD ανήκει στην κατηγορία των πρακτικά εφαρμόσιμων λογισμικών τα οποία χαρακτηρίζονται από την ευκολία χρήσης τους και την παραγωγικότητα όγκου εργασίας. Οποιαδήποτε σύγκριση με άλλα λογισμικά της ίδιας κατηγορίας είναι εφικτή μόνο σε γενικό επίπεδο και σίγουρα όχι σε καθολικό επίπεδο. Τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει το RC-PADD είναι τα ακόλουθα:

1. Οι υπολογισμοί των μελών εκπονούνται με βάση τον πραγματικό ωπλισμό ο οποίος προσδιορίζεται από τον χρήστη. Σε αντίθετη περίπτωση, όπου ο ωπλισμός προκύπτει από κάποιο αλγόριθμο του λογισμικού, οι ικανοτικοί έλεγχοι θα αναιρεθούν σε περίπτωση που ο χρήστης αλλάξει τον ωπλισμό είτε των δοκών ή των υποστυλωμάτων, κάτι που είναι πολύ συνηθές σε πραγματικά κατασκευαστικά έργα.

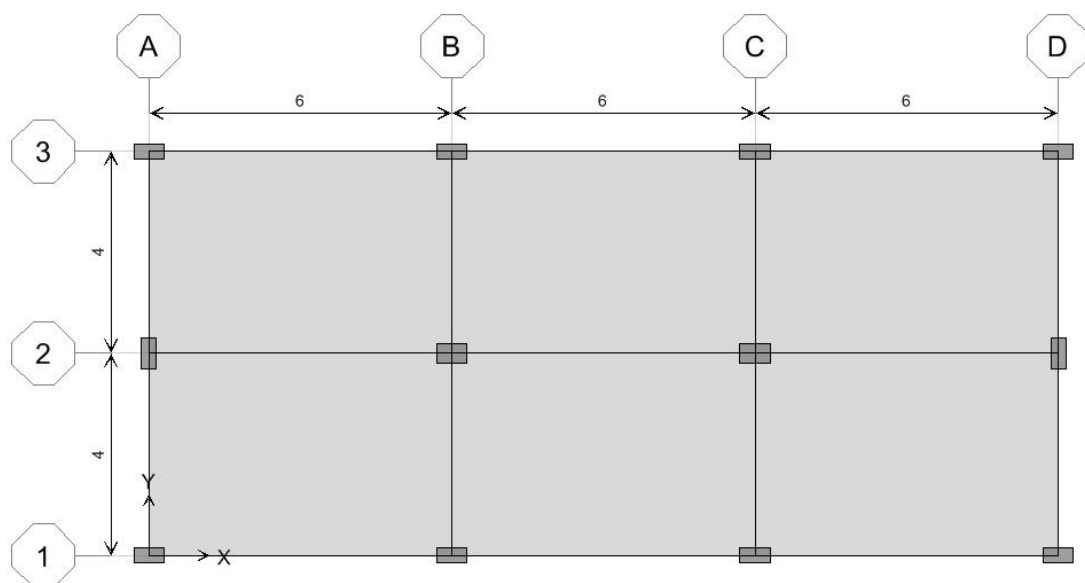
2. Υπολογίζει τον δείκτη πλαστιμότητας καμπυλοτήτων των μελών της κατασκευής. Στον αντισεισμικό σχεδιασμό η πλαστιμότητα καμπυλοτήτων των υποστυλωμάτων του ισόγειου ορόφου είναι ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες που πρέπει να ελέγχονται, όπως αναφέρουν οι Κάππος και Πενέλης (1990).
3. Επιτρέπει την υιοθέτηση ανεπτυγμένων μοντέλων υλικών όπως του παραβολικού μοντέλου για μη περισφυγμένο σκυρόδεμα και του μοντέλου για περισφυγμένο σκυρόδεμα των Kent και Park (1971), με τη χρήση των οποίων προκύπτει μια πιο ακριβής λύση.
4. Αναγνωρίζει το είδος των βασικών δράσεων. Έτσι είναι εφικτή η επίλυση της εξίσωσης (12) για την ικανοτική τέμνουσα δύναμη σχεδιασμού των δοκών η οποία περιλαμβάνει την τέμνουσα δύναμη σχεδιασμού λόγω της βαρυτικής δράσης.
5. Αναγνωρίζει το είδος της κατάστασης σχεδιασμού των συνδυασμών δράσεων. Έτσι είναι εφικτή η εφαρμογή του αντίστοιχου επιμέρους συντελεστή ασφαλείας υλικών για κάθε σχεδιασμό δράσης.
6. Υιοθετεί σχέσεις για τον υπολογισμό των ικανοτικών μεγεθών των υποστυλωμάτων που διαφέρουν ανάλογα με τον όροφο και την συνδεσμολογία των δοκών, οι οποίες παρουσιάζονται στους Πίνακες 3 και 4.
7. Επιτρέπει τον σχεδιασμό των μελών ως δευτερεύοντα σεισμικά μέλη. Έτσι είναι εφικτός ο σχεδιασμός μελών που δεν πληρούν τις προδιαγραφές για τα πρωτεύοντα σεισμικά μέλη, όπως λεπτά υποστυλώματα.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

Στο παράδειγμα συγκρίνεται η εφαρμογή του RC-PADD στα κτήρια Α και Β, η κάτοψη των οποίων δυκνείται στο Σχήμα 11, με κάρναβο 6 μέτρα επί 4 μέτρα. Τα κτήρια αποτελούνται από δύο ορόφους ύψους 3.0 μέτρα ο καθένας.

Σκοπός του παραδείγματος είναι να δείξει:

1. Τον βαθμό μεταβολής του δείκτη πλαστιμότητας καμπυλοτήτων των υποστυλωμάτων με την μεταβολή του πλάτους.
2. Ότι ο δείκτης πλαστιμότητας καμπυλοτήτων των υποστυλωμάτων είναι η πιο κρίσιμη παράμετρος στον αντισεισμικό σχεδιασμό στο συγκεκριμένο παράδειγμα.
3. Ότι στο κτήριο Β ο δομοστατικός σχεδιασμός πληρεί όλες τις πρόνοιες του αντισεισμικού κανονισμού εκτός από την πρόνοια για τον δείκτη πλαστιμότητας καμπυλοτήτων.



Σχήμα 11. Κάτοψη κτηρίου παραδείγματος.

Κτίριο A

Όλες οι δοκοί έχουν διατομή 250 μμ πλάτους και 500 μμ βάθος. Ο διαμηκίς ωπλισμός των δοκών επί των αξόνων 1, 3, A, B, C και D είναι 3Y16 άνω και κάτω, ενώ των δοκών επί του άξονα 2 είναι 3Y20 άνω και κάτω, ο οποίος είναι συνεχής κατά ολόκληρο το μήκος της δοκού και μεταξύ συνεχόμενων δοκών. Ο διατμητικός ωπλισμός των δοκών είναι συνδετήρες Y8 με απόσταση μεταξύ τους 100 μμ στις κρίσιμες περιοχές και 150 μμ στο μέσο της δοκού.

Τα υποστυλώματα επί των αξόνων 1 και 3 έχουν διατομή πλάτους x 600 μμ και πλάτους y 300 μμ. Ο διαμηκίς ωπλισμός είναι 5Y16 στις παρειές στην διεύθυνση x και 3Y16 στις παρειές στην διεύθυνση y . Ο διατμητικός ωπλισμός είναι συνδετήρες Y10 εκ των οποίων ένας συνεισφέρει στην διατμητική αντοχή στην διεύθυνση x και δύο στην διεύθυνση y . Στο συγκεκριμένο παράδειγμα οι τοπικοί άξονες των υποστυλωμάτων x και y είναι παράλληλοι προς τους γενικούς άξονες X και Y αντιστοίχως.

Τα υποστυλώματα A2 και D2 έχουν διατομή πλάτους x 300 μμ και πλάτους y 600 μμ. Ο διαμηκίς ωπλισμός είναι 3Y16 στις παρειές στην διεύθυνση x και 5Y16 στις παρειές στην διεύθυνση y . Ο διατμητικός ωπλισμός είναι συνδετήρες Y10 εκ των οποίων δύο συνεισφέρουν στην διατμητική αντοχή στην διεύθυνση x και ένας στην διεύθυνση y .

Τα υποστυλώματα B2 και C2 έχουν διατομή πλάτους x 600 μμ και πλάτους y 400 μμ. Ο διαμηκός ωπλισμός είναι 5Y16 στις παρειές στην διεύθυνση x και 4Y16 στις παρειές στην διεύθυνση y . Ο διατμητικός ωπλισμός είναι συνδετήρες Y10 εκ των οποίων δύο συνεισφέρουν στην διατμητική αντοχή στην διεύθυνση x και δύο στην διεύθυνση y .

Όλες οι πλάκες έχουν πάχος 150 μμ.

Η μόνιμη βαρυτική δράση των αναρτημάτων επί των πλακών λήφθηκε ως 3 KN/m², η μόνιμη βαρυτική δράση της τοιχοποιίας επί των δοκών του πρώτου ορόφου ως 5 KN/m, και η μεταβλητή βαρυτική δράση επί των πλακών ως 2 KN/m². Η σεισμική επιτάχυνση επιπέδου σχεδιασμού λήφθηκε ως 0.20 g.

Το σκυρόδεμα έχει χαρακτηριστική αντοχή $f_c' = 40$ N/mm², μέτρο χαρακτηριστικής ελαστικότητας $E_c = 35$ KN/mm², μέτρο μέσης ελαστικότητας $E_{cm} = 34$ KN/mm², παραμόρφωση κατά την μέγιστη τάση $\varepsilon_{cp} = 0.0022$, οριακή παραμόρφωση $\varepsilon_{cu} = 0.0035$ και φαινόμενο βάρος $\gamma_c = 24$ KN/m³. Ο χάλυβας ωπλισμού έχει χαρακτηριστική αντοχή διαρροής $f_y = 460$ N/mm², οριακή αντοχή $f_t = 460$ N/mm², μέτρο ελαστικότητας $E_s = 200$ KN/mm² και οριακή παραμόρφωση $\varepsilon_{cu} = 0.0800$.

Το γεωλογικό προφίλ είναι κατηγορίας B σύμφωνα με τον Ευροκώδικα 8. Στην δυναμική ανάλυση χρησιμοποιήθηκε το φάσμα απόκρισης τύπου 1 του Ευροκώδικα 8.

Το δομικό σύστημα είναι σχεδιασμένο ως μέτριου επιπέδου πλαστιμότητας (DCM) σύμφωνα με τον Ευροκώδικα 8. Σύμφωνα με την παράγραφο 5.2.5 του Ευροκώδικα 8, ο συντελεστής συμπεριφοράς q_0 είναι 3.6 για αυτό το επίπεδο πλαστιμότητας, ενώ για το συγκεκριμένο παράδειγμα λήφθηκε ίση με 3.5 για σκοπούς απλοποίησης. Η απαιτούμενη πλαστιμότητα καμπυλοτήτων μ_ϕ σύμφωνα με την παράγραφο 5.2.3.4 του Ευροκώδικα 8 δίδεται από την εξίσωση (23) και στο συγκεκριμένο παράδειγμα ισούται με 6.0.

$$\mu_\phi = 2 \cdot q_0 - 1 \quad (23)$$

Η ανάλυση του δομικού συστήματος εκπονήθηκε με το λογισμικό ETABS έκδοση 9.2, το οποίο χρησιμοποιεί την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων. Οι δοκοί και τα υποστυλώματα αντιπροσωπεύτηκαν με μονοδιάστατα πλαισιακά στοιχεία και οι πλάκες με δισδιάστατα στοιχεία κελύφους. Η διακριτοποίηση των στοιχείων έγινε ώστε κάθε δοκός να αποτελείται από περισσότερα από δεκα πεπερασμένα στοιχεία τα οποία να συνδέονται με κοινούς κόμβους με τις πλάκες. Για την ανάλυση για το σεισμικό φορτίο υιοθετήθηκε η δυναμική φασματική μέθοδος. Τα υποστυλώματα αντιπροσωπεύτηκαν ως πλήρως πακτωμένα στη βάση τους.

Μετά το πέρας της δομοστατικής ανάλυσης τα αποτελέσματα εισήχθησαν στο λογισμικό RC-PADD έκδοση 2.0, όπου δημιουργήθηκαν οι συνδυασμοί δράσεων που

παρουσιάζονται στους Πίνακες 5, 6 και 7. Οι υπολογισμοί του RC-PADD έδειξαν ότι ο δομοστατικός σχεδιασμός πληρεί τις πρόνοιες των Ευροκωδίκων.

Πίνακας 5. Συνδυασμός δράσεων COMB1.

| Συνδυασμός | Δράση | Συντελεστής | Είδος |
|------------|-------|-------------|----------|
| COMB1 | DEAD | 1.5 | Βαρύτητα |
| | LIVE | 1.5 | Βαρύτητα |

Πίνακας 6. Συνδυασμός δράσεων COMB2X.

| Συνδυασμός | Δράση | Συντελεστής | Είδος |
|------------|-------|-------------|----------|
| COMB2X | DEAD | 1.0 | Βαρύτητα |
| | LIVE | 0.3 | Βαρύτητα |
| | EX | 1.0 | Σεισμός |
| | EY | 0.3 | Σεισμός |

Πίνακας 7. Συνδυασμός δράσεων COMB2Y.

| Συνδυασμός | Δράση | Συντελεστής | Είδος |
|------------|-------|-------------|----------|
| COMB2Y | DEAD | 1.0 | Βαρύτητα |
| | LIVE | 0.3 | Βαρύτητα |
| | EX | 0.3 | Σεισμός |
| | EY | 1.0 | Σεισμός |

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα διερευνάται η συμπεριφορά των υποστυλωμάτων A1 και B1 και όλα τα συμμετρικά προς αυτά, τα οποία συνολικά αριθμούν οκτώ. Η διερεύνηση επικεντρώνεται στην σεισμική διέγερση στην διεύθυνση του άξονα Y, έτσι παρουσιάζονται μόνο τα αποτελέσματα του σεισμικού συνδυασμού COMB2Y στην φορά που προκαλεί μέγιστη αξονική δύναμη επί των εν λόγω υποστυλωμάτων. Στον Πίνακα 8 παρουσιάζονται οι δυνάμεις σχεδιασμού και οι αντοχές σχεδιασμού, στον Πίνακα 9 οι ικανοτική τέμνουσα σχεδιασμού, στον Πίνακα 10 οι ελέγχοι αποφυγής αρθρώσεων στα υποστυλώματα του πρώτου ορόφου και στον Πίνακα 11 οι δείκτες πλαστιμότητας καμπυλοτήτων.

Πίνακας 8. Δυνάμεις και αντοχές σχεδιασμού συνδυασμού δράσεων COMB2Y.

| COMB2Y | A1 | B1 |
|-----------------------------|--------------|--------------|
| P_{Ed} / P_{Rd} [KN] | -104 / -3590 | -223 / -3590 |
| $M_{x,Ed} / M_{x,Rd}$ [KNm] | 37 / 108 | 42 / 119 |
| $M_{y,Ed} / M_{y,Rd}$ [KNm] | 30 / 243 | 24 / 260 |
| $V_{x,Ed} / V_{x,Rd}$ [KN] | 1 / 323 | 12 / 323 |
| $V_{y,Ed} / V_{y,Rd}$ [KN] | 18 / 269 | 16 / 269 |

Πίνακας 9. Ικανοτική τέμνουσα σχεδιασμού συνδυασμού δράσεων COMB2Y.

| COMB2Y | A1 | B1 |
|---------------------------|-----------|-----------|
| $V_{x,d} / V_{x,Rd}$ [KN] | 109 / 323 | 135 / 323 |
| $V_{y,d} / V_{y,Rd}$ [KN] | 60 / 269 | 64 / 269 |

Πίνακας 10. Έλεγχος αποφυγής αρθρώσεων στα υποστυλώματα συνδυασμού δράσεων COMB2Y.

| COMB2Y | A1 | B1 |
|---|-----|-----|
| $\sum M_{Rd,beam}$ [KNm] | 105 | 105 |
| $\sum M_{Rd,column}$ [KNm] | 209 | 225 |
| Έλεγχος $\sum M_{Rd,column} \geq 1.3 \cdot \sum M_{Rd,beam}$ | OK | OK |

Πίνακας 11. Δείκτες πλαστιμότητας καμπυλοτήτων συνδυασμού δράσεων COMB2Y.

| COMB2Y | A1 | B1 |
|----------------|------|------|
| $\mu_{\phi x}$ | 7.70 | 6.87 |
| $\mu_{\phi y}$ | 8.37 | 7.33 |

Κτίριο Β

Στο κτίριο Β όλες οι παραμέτροι του κτιρίου Α διατηρήθηκαν οι ίδιες εκτός το πάχος y των υποστυλωμάτων επί των αξόνων 1 και 3 το οποίο μειώθηκε σε 250 μμ. Στον Πίνακα 12 παρουσιάζονται οι δυνάμεις σχεδιασμού και οι αντοχές σχεδιασμού, στον Πίνακα 13

οι ικανοτική τέμνουσα σχεδιασμού, στον Πίνακα 14 οι ελέγχοι αποφυγής αρθρώσεων στα υποστυλώματα του πρώτου ορόφου και στον Πίνακα 15 οι δείκτες πλαστιμότητας καμπυλοτήτων.

Πίνακας 12. Δυνάμεις και αντοχές σχεδιασμού συνδυασμού δράσεων COMB2Y.

| COMB2Y | A1 | B1 |
|-----------------------------|-------------|--------------|
| P_{Ed} / P_{Rd} [KN] | -96 / -3448 | -214 / -3448 |
| $M_{x,Ed} / M_{x,Rd}$ [KNm] | 31 / 85 | 35 / 93 |
| $M_{y,Ed} / M_{y,Rd}$ [KNm] | 30 / 241 | 22 / 254 |
| $V_{x,Ed} / V_{x,Rd}$ [KN] | 1 / 323 | 11 / 323 |
| $V_{y,Ed} / V_{y,Rd}$ [KN] | 15 / 206 | 13 / 206 |

Πίνακας 13. Ικανοτική τέμνουσα σχεδιασμού συνδυασμού δράσεων COMB2Y.

| COMB2Y | A1 | B1 |
|---------------------------|-----------|-----------|
| $V_{x,d} / V_{x,Rd}$ [KN] | 108 / 323 | 133 / 323 |
| $V_{y,d} / V_{y,Rd}$ [KN] | 51 / 206 | 54 / 206 |

Πίνακας 14. Έλεγχος αποφυγής αρθρώσεων στα υποστυλώματα συνδυασμού δράσεων COMB2Y.

| COMB2Y | A1 | B1 |
|---|-----------|-----------|
| $\sum M_{Rd,beam}$ [KNm] | 105 | 105 |
| $\sum M_{Rd,column}$ [KNm] | 166 | 178 |
| Έλεγχος $\sum M_{Rd,column} \geq 1.3 \cdot \sum M_{Rd,beam}$ | OK | OK |

Πίνακας 15. Δείκτες πλαστιμότητας καμπυλοτήτων συνδυασμού δράσεων COMB2Y.

| COMB2Y | A1 | B1 |
|----------------|-----------|-----------|
| $\mu_{\phi x}$ | 6.54 | 5.88 |
| $\mu_{\phi y}$ | 7.91 | 6.96 |

Είναι εμφανές ότι ο δείκτης πλαστιμότητας καμπυλοτήτων $\mu_{\phi x}$ των υποστυλωμάτων B1 είναι μικρότερη της απαιτούμενης. Συνεπώς συνολικά τέσσερα υποστυλώματα αποτυγχάνουν τον έλεγχο.

Συμπεράσματα

Συγκρίνοντας τα δύο κτήρια προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα

1. Ο δείκτης πλαστιμότητας καμπυλοτήτων των υποστυλωμάτων επί των αξόνων 1 και 3 μειώθηκε ουσιαστικά με την μείωση του πάχους τους. Συγκεκριμένα ο δείκτης πλαστιμότητας καμπυλοτήτων $\mu_{\phi x}$ μειώθηκε κατά 15% όταν το πάχος μειώθηκε κατά 17%.
2. Από τα αποτελέσματα του σχεδιασμού του κτηρίου B προκύπτει ότι η μόνη παράμετρος που αποτυγχάνει τον έλεγχο είναι ο δείκτης πλαστιμότητας καμπυλοτήτων των υποστυλωμάτων του ισόγειου ορόφου. Αυτό το συμπέρασμα είναι ιδιαίτερα σημαντικό επειδή τα πλείστα εμπορικά λογισμικά δεν ελέγχουν αυτή την παράμετρο, συνεπώς και το σημαντικό πλεονέκτημα του RC-PADD.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. American Concrete Institute, Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08)", 2008.
2. European Committee for Standardization (CEN), "Eurocode: Basis of structural design", CYS EN 1990:2002.
3. European Committee for Standardization (CEN), "Eurocode 2: Design of Concrete Structures: Part 1-1: General rules for buildings", CYS EN 1992-1-1:2004.
4. European Committee for Standardization (CEN), "Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance: Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings", CYS EN 1998-1:2004.
5. Kent D.C., Park R., "Flexural Members with Confined Concrete", Journal of the Structural Division, ASCE Vol. 97, ST7, July 1971, pp. 1969-1990.
6. QuakeFrame Software Ltd, "RC-PADD version 2.0 Design Manual", 2008
7. Πενέλης Γ.Γ, Κάππος Α. Ι., *Αντισεισμικές Κατασκευές από Σκυρόδεμα*, Εκδόσεις Ζήτη, 1990
8. Park R., Paulay T., *Reinforced Concrete Structures*, John Wiley and Sons, 1975.