

## **ΑΝΤΟΧΗ ΣΥΜΜΙΚΤΩΝ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ ΣΕ ΕΚΚΕΝΤΡΗ ΦΟΡΤΙΣΗ**

**Γεώργιος Χατζηγεωργίου**

Επίκουρος Καθηγητής

Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης

Ξάνθη, Ελλάδα

e-mail: gchatzig@env.duth.gr

**Αστέριος Λιόλιος**

Καθηγητής

Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης

Ξάνθη, Ελλάδα

e-mail: liolios@civil.duth.gr

### **1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Το παρόν άρθρο εξετάζει τη συμπεριφορά και την φέρουσα ικανότητα κυκλικών σύμμικτων υποστυλωμάτων από χαλύβδινες κοίλες δοκούς πληρούμενες με σκυρόδεμα. Η ανάλυση των διατομών αυτών γίνεται με το μοντέλο ινών το οποίο υιοθετείται για να περιγράψει την πλήρη συμπεριφορά των σύμμικτων υποστυλωμάτων υπό έκκεντρο αξονικό φορτίο (αξονική δύναμη με καμπτική ροπή) λαμβάνοντας υπόψη την πλήρη καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων του σκυροδέματος και του χάλυβα, τα οποία υποβάλλονται σε τριαξονική και διαξονική εντατική κατάσταση, αντίστοιχα. Συγκρίσεις μεταξύ της προτεινόμενης μεθόδου και πειραματικών αποτελεσμάτων κάνουν φανερό ότι η πρώτη οδηγεί σε μια απλή, άμεση και ακριβής εκτίμηση της συμπεριφοράς των σύμμικτων υποστυλωμάτων.

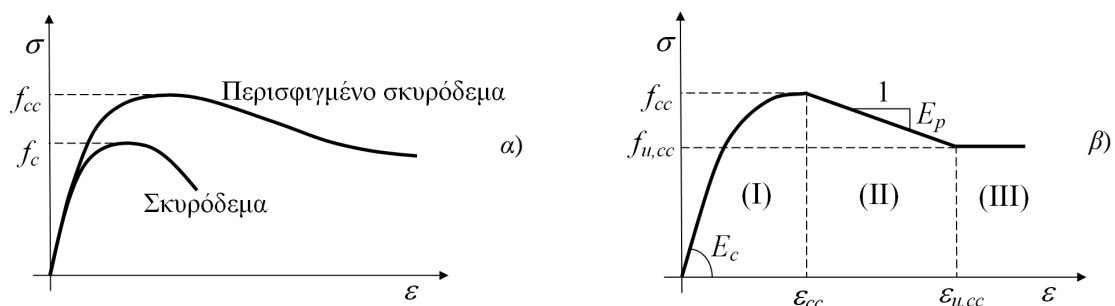
### **2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Λαμβάνοντας υπόψη την υψηλή θλιπτική αντοχή και δυσκαμψία του σκυροδέματος και την πολύ υψηλή τάσης διαρροής και πλαστιμότητα του χάλυβα γίνεται φανερό ότι τα σύμμικτα υποστυλώματα χάλυβα-σκυροδέματος, μπορούν να εκμεταλλευτούν όλα τα παραπάνω πλεονεκτήματα [1]. Δύο βασικοί τύποι σύμμικτων υποστυλωμάτων έχουν προταθεί: ένα μεταλλικό στοιχείο, συνήθως διατομής-I, το οποίο εγκιβωτίζεται πλήρως ή μερικώς στο σκυρόδεμα και επίσης ένα μεταλλικό στοιχείο κοίλης διατομής πληρούμενο με σκυρόδεμα. Στο παρόν άρθρο εξετάζεται η 2<sup>η</sup> περίπτωση (Concrete-Filled steel Tubes - CFT) σύμμικτων υποστυλωμάτων [2-4]. Πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχουν σημαντικές διαφορές στις προτεινόμενες θεωρίες και κανονισμούς που εξετάζουν τη συνεργασία σκυροδέματος-χάλυβα. Για παράδειγμα, το Αμερικανικό Ινστιτούτο Σκυροδέματος (ACI [5]) θεωρεί ότι τα δύο υπό εξέταση υλικά δε συνεργάζονται καθόλου και το σύμμικτο υποστυλώμα εξετάζεται ως ισοδύναμο υποστυλώμα οπλισμένου σκυροδέματος. Με τον τρόπο αυτό δε λαμβάνεται υπόψη η

ευεργετική περισφιγξη του σκυροδέματος αλλά και η δυσμενής διαξονική καταπόνηση του χάλυβα. Επίσης, το Αμερικανικό Ινστιτούτο Χαλύβδινων Κατασκευών (AISC [6]) εξετάζει το σύμμικτο υποστύλωμα ως ισοδύναμο χαλύβδινο υποστύλωμα. Αντίθετα, ο Ευρωκώδικας 4 (EC4 [7]) εξετάζει λεπτομερέστερα τη συνεργασία των δύο υλικών που συνθέτουν τα CFT υποστυλώματα. Η παρούσα εργασία παρουσιάζει αρχικά ένα απλό και αποτελεσματικό μοντέλο για τη συμπεριφορά και την φέρουσα ικανότητα κυκλικών CFT στύλων. Πρόκειται για ένα μοντέλο ινών το οποίο χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει την πλήρη καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων του σκυροδέματος και του χάλυβα. Στη συνέχεια, γίνεται εκτεταμένη εφαρμογή της θεωρίας αυτής δημιουργώντας μια πολύ μεγάλη βάση δεδομένων για CFT υποστυλώματα. Κάνοντας στη συνέχεια ανάλυση παλινδρόμησης για τη βάση αυτή παρουσιάζονται αναλυτικές σχέσεις για την φέρουσα ικανότητα των κυκλικών σύμμικτων υποστυλωμάτων υπό έκκεντρη φόρτιση. Συγκρίσεις μεταξύ αναλυτικών και πειραματικών αποτελεσμάτων κάνουν φανερό ότι η προτεινόμενη μέθοδος παρέχει μια απλή, άμεση και ακριβής εκτίμηση της οριακής αντοχής των κυκλικών CFT στύλων, ιδιαίτερα χρήσιμη στις πρακτικές εφαρμογές.

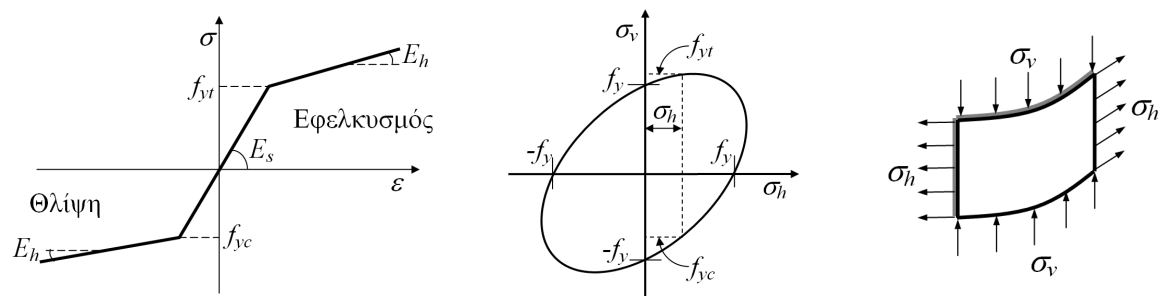
### 3. ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΚΑΙ ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Η συνεργασία των δύο διαφορετικών υλικών οδηγεί το σκυρόδεμα σε τριαξονική θλίψη και το χάλυβα σε διαξονική εντατική κατάσταση. Πιο συγκεκριμένα το σκυρόδεμα παρουσιάζει βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες λόγω τη περισφιγξης από χάλυβα όπως φαίνεται στο Σχ. 1α, ενώ το Σχ. 1β παρουσιάζει το αντίστοιχο προτεινόμενο μοντέλο. Είναι φανερό ότι η περισφιγξη αυξάνει σημαντικά την αντοχή και ιδιαίτερα την πλαστιμότητα του σκυροδέματος.



Σχ. 1: Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης σκυροδέματος: α) πείρ. δοκιμή, β) προσομοίωμα

Επίσης για το χάλυβα υιοθετείται το διγραμμικό μοντέλο τάσης-παραμόρφωσης καθώς και το κριτήριο von Mises για την διαξονική εντατική κατάσταση, όπως φαίνεται στο Σχ. 2.

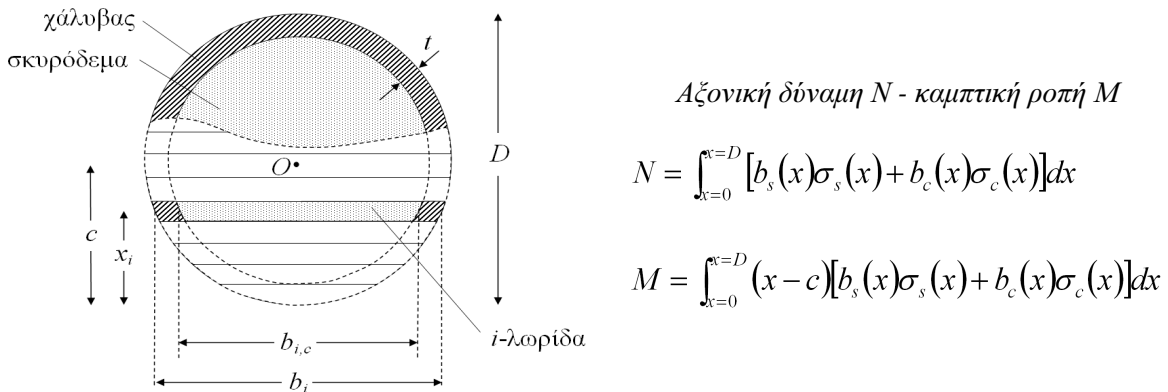


Σχ. 2: Μηχανική συμπεριφορά και κριτήριο αστοχίας για το χάλυβα

Για τις αναλυτικές σχέσεις των προσομοιωμάτων αυτών ο αναγνώστης παραπέμπεται στο [3].

#### 4. ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΙΝΩΝ ΓΙΑ ΤΑ CFT – ΒΑΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Για τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς των CFT στύλων κάτω από θλιπτικά αξονικά φορτία με ή χωρίς εκκεντρότητα υιοθετείται το μοντέλο ινών. Η βασική αρχή του μοντέλου είναι ο χωρισμός της διατομής σε λωρίδες (ίνες) όπου για κάθε μια από αυτές, γνωρίζοντας την μέση ανοιγμένη παραμόρφωση, προσδιορίζεται η μέση τάση, η αντίστοιχη αξονική δύναμη και καμπτική ροπή με υιοθέτηση της βασικής αρχής Bernoulli-Euler για την επιπεδότητα των διατομών. Η εφαρμογή του μοντέλου παρουσιάζεται στο Σχ. 3.



Σχ. 3: Το μοντέλο ινών για τα σύμμικτα υποστλώματα

Πρέπει να σημειωθεί ότι το μοντέλο ινών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της αντοχής για την περίπτωση αξονική δύναμης με ή χωρίς καμπτική ροπή.

#### 5. ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΣΧΕΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ ΤΩΝ CFT

Σκοπός της ενότητας αυτή είναι να προτείνει απλές αναλυτικές/εμπειρικές σχέσεις για τον προσδιορισμό της οριακής αντοχής κυκλικών σύμμικτων υποστλωμάτων σε κεντρική θλίψη καθώς και της οριακής αντοχής κυκλικών σύμμικτων υποστλωμάτων σε συνδυασμό θλίψης και κάμψης. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι εν λόγω αναλυτικές/εμπειρικές σχέσεις προκύπτουν από πολυάριθμες εφαρμογές του μοντέλου των ινών μέσω και μιας διαδικασίας ανάλυσης παλινδρόμησης.

Στην διαδικασία αυτή εξετάστηκαν 5 βασικές παράμετροι:

- η εξ. διάμετρος  $D$  της δοκού, η οποία μεταβαλλόταν από 100 έως 800 mm, και πιο συγκεκριμένα είχε 10 τιμές (mm): 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 500, 600, 800
- το πάχος αυτής  $t$ , το οποίο ορίζεται μέσω του λόγου  $D/t$ , ο οποίος κυμαινόταν από 10 έως 100, και πιο συγκεκριμένα είχε 10 τιμές: 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100
- η εκκεντρότητα του αξονικού φορτίου,  $e$ , η οποία ορίζεται μέσω του λόγου  $e/D$ , για την οποία εξετάστηκαν 10 τιμές: 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9
- η τάση διαρροής του χάλυβα  $f_y$  η οποία μεταβαλλόταν από 200 έως 800 MPa, για την οποία εξετάστηκαν 7 τιμές,  $f_y$  (MPa): 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800
- και η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος  $f_c$  η οποία κυμαινόταν από 10 έως 110 MPa, για την οποία εξετάστηκαν 7 τιμές,  $f_c$  (MPa): 10, 20, 30, 50, 70, 90, 110

Έτσι, προκύπτει η διερεύνηση  $10 \times 10 \times 10 \times 7 \times 7 = 49000$  CFT στύλων. Για τη βάση δεδομένων που προέκυψε, έγινε ανάλυση παλινδρόμησης με το πρόγραμμα MS-EXCEL.

Σύμφωνα με την παρούσα εργασία, η αντοχή σε έκκεντρο θλιπτικό φορτίο,  $N_{max}$ , προκύπτει από την εμπειρική σχέση

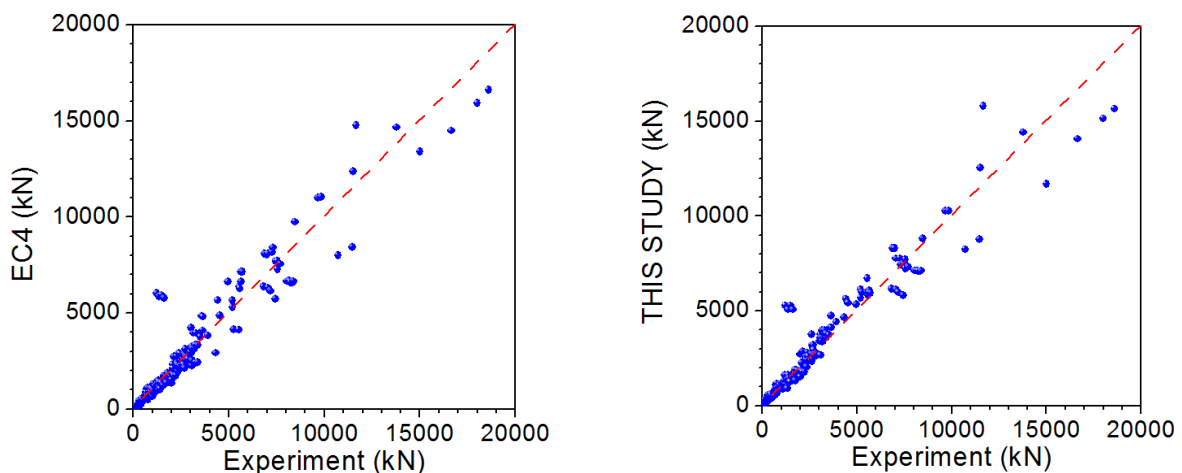
$$N_{max} = \left[ \frac{1 + a_1 \sqrt{t/D} + a_2 (t/D)}{1 + a_3 \sqrt{e/D} + a_4 (e/D)} \right] \cdot (A_c \cdot f_c + A_s \cdot f_y) \quad (1)$$

όπου  $A_c$  και  $A_s$  είναι η επιφάνεια του σκυροδέματος και του χάλυβα, αντίστοιχα, ενώ  $a_1$  έως και  $a_4$  είναι οι παράμετροι οι οποίες θα πρέπει να προσδιοριστούν με βάση την ανάλυση παλινδρόμησης. Η παραπάνω σχέση επιλέχθηκε ως μια από τις απλούστερες και ταυτόχρονα πιο αποτελεσματικές ως προς την εκτίμηση του μέγιστου θλιπτικού φορτίου, εξετάζοντας περί τις 8000 μαθηματικές εξισώσεις με βάση το λογισμικό *Table Curve 3D* (V.2 - Jandel Scientific Software) και EXCEL (Microsoft). Με αντικατάσταση των τιμών των παραμέτρων, η Εξ. 1 γίνεται:

$$N_{max} = \left[ \frac{1 + 1.356 \sqrt{t/D} - 3.319 (t/D)}{1 - 0.566 \sqrt{e/D} + 8.408 (e/D)} \right] \cdot (A_c \cdot f_c + A_s \cdot f_y) \quad (2)$$

### 5.1 Αντοχή σύμμικτων υποστυλωμάτων σε θλίψη

Στο Σχ. 4 φαίνεται η ικανότητα εκτίμησης της αντοχής με βάση την Εξ. 2 και με βάση τον Ευρωκώδικα 4 [7] για 250 πειραματικές δοκιμές με κεντρικά εφαρμοσμένο θλιπτικό φορτίο ( $e=0.0$ ), εκτελεσμένες από διάφορους ερευνητές.

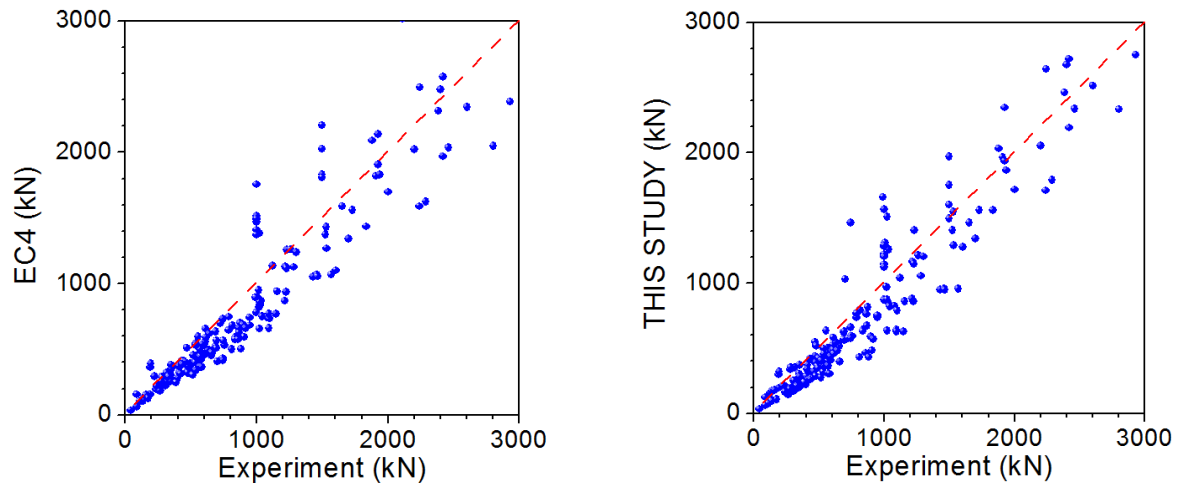


Σχ. 4: Εκτίμηση της αντοχής με αναλ. σχέσεις και σύγκριση με 250 πειραματικές δοκιμές

Είναι φανερό ότι η Εξ. 2 μπορεί να εκτιμήσει επιτυχώς την αντοχή των σύμμικτων υποστυλωμάτων σε καθαρή θλίψη, και δίνει μικρή απόκλιση από τις πειραματικές δοκιμές, παρόμοια με τους υπάρχοντες κανονισμούς δομικών κατασκευών.

### 5.2 Αντοχή σύμμικτων υποστυλωμάτων σε θλίψη-κάμψη

Η αντοχή σε συνδυασμό θλίψης  $N$  – κάμψης  $M$  ή σε έκκεντρο θλιπτικό φορτίο  $N$  ( $e \neq 0$ ) προκύπτει μέσω διαγράμματος αλληλεπίδρασης  $N-M$ . Η Εξ. 2 λαμβάνει υπόψη την εκκεντρότητα του θλιπτικού φορτίου. Στο Σχ. 5 φαίνεται η ικανότητα εκτίμησης της αντοχής με βάση την προτεινόμενη Εξ. 2 και με βάση τον Ευρωκώδικα 4 [7] για 180 πειραματικές δοκιμές με έκκεντρα εφαρμοσμένο θλιπτικό φορτίο, εκτελεσμένες από διάφορους ερευνητές.



Σχ. 5: Εκτίμηση της αντοχής με αναλ. σχέσεις και σύγκριση με 180 πειραματικές δοκιμές

Είναι φανερό ότι η Εξ. 2 μπορεί να εκτιμήσει επιτυχώς την αντοχή των σύμμικτων υποστυλωμάτων σε συνδυασμό θλίψης-κάμψης, και δίνει μικρή απόκλιση από τις πειραματικές δοκιμές, παρόμοια με τους υπάρχοντες κανονισμούς δομικών κατασκευών.

## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκαν αριθμητικά προσομοιώματα και αναλυτικές σχέσεις οι οποίες χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό της αντοχής χαλύβδινων υποστυλωμάτων πληρούμενων με σκυρόδεμα είτε σε καθαρή θλίψη, είτε σε συνδυασμό θλίψης-κάμψης. Μέσω αριθμητικών παραδειγμάτων έγινε φανερό ότι αυτά μπορούν επιτυχώς να προσδιορίσουν την αντοχή των εν λόγω στοιχείων με τρόπο απλό και αποτελεσματικό, ιδιαίτερα χρήσιμο για την περίπτωση των πρακτικών εφαρμογών.

## 7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Shanmugam NE, Lakshmi B. "State of the art report on steel-concrete composite columns", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 57, 2001, pp. 1041-1080.
- [2] Hatzigeorgiou GD and Beskos DE. "Minimum cost design of fibre-reinforced concrete-filled steel tubular columns". Journal of Constructional Steel Research, Vol. 61, 2005, pp. 167-282.
- [3] Hatzigeorgiou GD, "Numerical model for the behavior and capacity of circular CFT columns. Part I: Theory", Engineering Structures, Vol. 30, 2008, pp.1573-1578.
- [4] Hatzigeorgiou GD, "Numerical model for the behavior and capacity of circular CFT columns. Part II: Verification and extension", Engineering Structures, Vol. 30, 2008, pp.1579-1589.
- [5] ACI Committee 318, Building code requirements for structural concrete and commentary (ACI 318-05). Detroit: American Concrete Institute, 2005.
- [6] AISC. Specification for structural steel buildings. Chicago: American Institute of Steel Construction, Inc., 2005.
- [7] Eurocode 4 - European Committee for Standardisation, EN 1994-1-1, Design of Composite Steel and Concrete Structures, Part 1.1 General Rules and Rules for Buildings, EU, 2004.

## **STRENGTH OF COMPOSITE COLUMNS UNDER ECCENTRIC LOADING**

**George Hatzigeorgiou**

Assistant Professor

Department of Environmental Engineering, Democritus University of Thrace

Xanthi, Greece

e-mail: gchatzig@env.duth.gr

**Asterios Liolios**

Professor

Department of Civil Engineering, Democritus University of Thrace

Xanthi, Greece

e-mail: liolios@civil.duth.gr

### **SUMMARY**

This paper examines the behavior and bearing capacity of circular composite columns consist of hollow steel beams filled with concrete. The analysis of these sections results from the fiber model which is employed to describe the complete behaviour of composite columns under eccentric axial load (axial force with bending moment). This model takes into account the full stress-strain curve of concrete and steel, which made in biaxial and triaxial stress state, respectively. Comparisons between analytical and experimental results make clear that the proposed method leads to a simple, direct and accurate evaluation of the composite columns behaviour.