



Γεώργιος Ε. Μαγείρου

Georgios E. Mageirou

Συμβολή στο σχεδιασμό πολυώροφων μεταλλικών πλαισίων έναντι καμπτικού λυγισμού Contribution to the design of multi-story steel frames against flexural buckling

Διδακτορική διατριβή, 2011

Επιβλέπων: Χάρης Ι. Γαντές, Αναπληρωτής Καθηγητής

Doctoral Thesis, 2011

Supervisor: Charis J. Gantes, Associate Professor

Περίληψη

Η παρούσα διατριβή πραγματεύεται προβλήματα μη γραμμικής συμπεριφοράς επιπέδων πλαισιακών φορέων από χάλυβα και κυρίως προβλήματα του καμπτικού λυγισμού τους και της εύκαμπτης απόκρισής τους έναντι πλευρικών φορτίων.

Στο μεγαλύτερο μέρος της η εργασία ασχολείται με τη βελτίωση της ακρίβειας της μεθόδου του ισοδύναμου μήκους λυγισμού για τον υπολογισμό του ελαστικού κρίσιμου φορτίου λυγισμού υποστυλμάτων πολυώροφων πλαισίων με άκαμπτες και ημι-άκαμπτες συνδέσεις. Τα υποστυλώματα προσομοιώνονται μεμονωμένα, λαμβάνοντας υπόψη τη συνεισφορά των μελών που συντρέχουν στους ακραίους κόμβους τους μέσω στροφικών ελατηρίων, ενώ η αντίσταση που προβάλλει το σύστημα δυσκαμψίας προσομοιώνεται με ελατήριο ευθυγράμμου κίνησης. Προτείνονται αναλυτικές σχέσεις, γραφήματα και πίνακες για τον υπολογισμό του ισοδύναμου μήκους λυγισμού υποστυλμάτων για όλα τα εύρη μετάθεσης. Η εκτίμηση της στροφικής δυσκαμψίας των μελών που συντρέχουν στους ακραίους κόμβους του υποστυλώματος πραγματοποιείται μέσω αναλυτικών σχέσεων, λαμβάνοντας υπόψη όλες τις πιθανές συνοριακές συνθήκες στο απέναντι άκρο τους καθώς και την επιρροή της αξονικής τους δύναμης. Προτείνεται ένα νέο κριτήριο χαρακτηρισμού της μεταθετότητας που αποδεικνύεται πιο αξιόπιστο από το προτεινόμενο στον Ευρωκώδικα 3.

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται μια εύχρηστη μέθοδος για την αξιολόγηση της σπουδαιότητας της επιρροής 2ης τάξης στην απόκριση μεταλλικών πλαισίων και την εκτίμηση του επαυξητικού συντελεστή α , με τον οποίο μπορούν να πολλαπλασιάζονται τα μεγέθη έντασης και παραμόρφωσης που προκύπτουν από γραμμική ανάλυση. Ακόμα, διερευνάται η αλληλεπίδραση της θλιπτικής αξονικής δύναμης και καμπτικής ροπής σε μέλη πλαισίων.

Τέλος, διερευνάται η επιρροή του προσήμου των αρχικών ατελειών καθώς και της ανελαστικής συμπεριφοράς του υλικού στην αντοχή πλαισιακών μεταθετών φορέων μορφής Γ.

Abstract

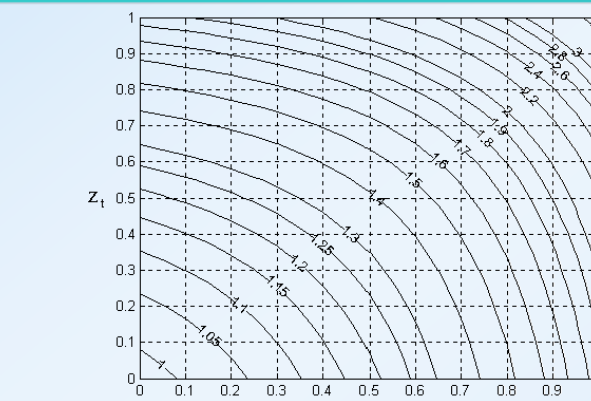
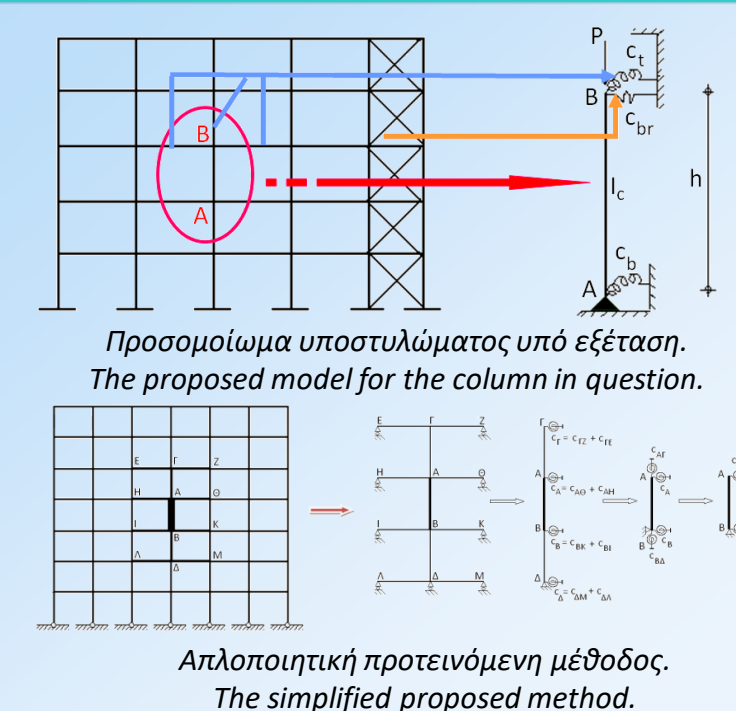
The objective of the present thesis is to propose approximate linearised methods for the treatment of non-linear problems characterising the behaviour of plane steel frames, such as buckling and second order effects.

The main part of the thesis deals with the improvement of the effective buckling length method for the evaluation of the elastic critical buckling loads of columns in multi-story frames with rigid and semi-rigid connections. The columns are modelled individually, with the contribution of the members converging at the top and bottom end taken into account by equivalent rotational springs, while the resistance provided by the bracing system is modelled via a translational spring. Analytical expressions, graphs and tables are proposed for the calculation of the effective buckling length for a wide range of sway ability. A complete set of the rotational stiffness coefficients of the adjacent members are proposed, accounting for the presence of the axial force as well as for the boundary conditions at the far end. A new criterion for the sway characterisation of frames is also proposed, which is proven to be more reliable than the one included in Eurocode 3.

Next, a simple method is presented for the estimation of the importance of second order effects and the evaluation of the amplification factor α to be used as a multiplier of stresses and strains obtained from linear analysis, in order to approximate the corresponding quantities from non-linear analysis. Furthermore, the interaction of the compressive axial forces and the bending moments in steel members is investigated.

Finally, the influence of the direction of imperfections and the material non-linearity on the buckling capacity of "gamma"-shaped sway frames is investigated.

1



Συντελεστής ισοδύναμου μήκους λυγισμού K για υποστυλώματα σε μερικώς μεταθετά πλαίσια με αδιαστατοποιημένη αντίσταση του ελατηρίου ευθυγράμμου κίνησης 0,5. Effective buckling length factor K for columns in partially sway frames with non-dimensional translational spring stiffness equal to 0.5.

Προσομοίωμα υποστυλώματος υπό εξέταση.

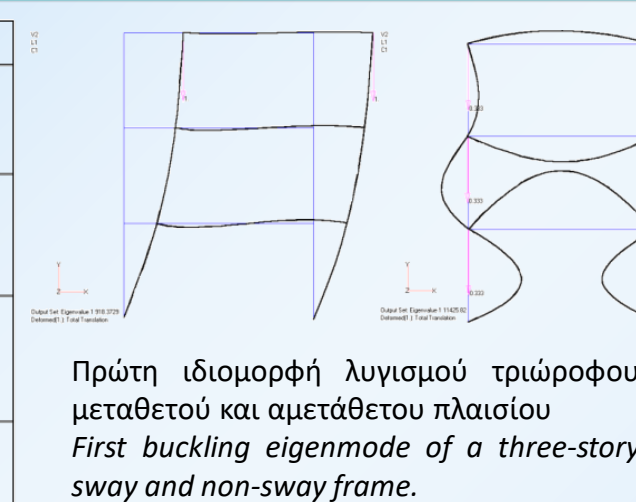
c_b και c_t : Στροφικές δυσκαμψίες ελατηρίων στη βάση και την κορυφή του υποστυλώματος, υπολογιζόμενες αθροίζοντας τη συμβολή των στροφικών δυσκαμψιών των μελών που συντρέχουν στον άνω και κάτω κόμβο του υπό εξέταση υποστυλώματος.
 c_{tr} : Αντίσταση του ελατηρίου ευθυγράμμου κίνησης το οποίο προσομοιώνει την αντίσταση στη σχετική μετάθεση των δύο άκρων του υποστυλώματος, η οποία προέρχεται από σύστημα παρεμπόδισης αυτής ή από την επαφή με άλλες κατασκευές.

The proposed model for the column in question.

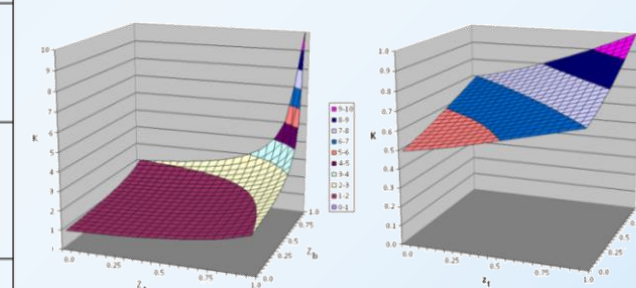
c_b and c_t : Stiffness of the bottom and top rotational springs, obtained by summing up the contributions of members converging at the bottom and top end, respectively.
 c_{tr} : Stiffness of the translational spring, modelling the resistance provided by the bracing system to relative transverse translation of the end nodes or by adjacent structures.

2

Συνολικές συνθήκες στο απέναντι άκρο	Χωρίς αξονική δύναμη	Με αξονική δύναμη
Πλευστότητα	$c_b = 4\pi^2$	$c_b = 4\pi^2 \left(\frac{\pi^2 h^2 \cos(\pi \sqrt{k_r})}{\pi^2 h^2 \cos(\pi \sqrt{k_r}) - 1} \right)$
Κυλιόμενη κίνηση	$c_b = \pi^2$	$c_b = \pi^2 \sqrt{k_r} \cos(\pi \sqrt{k_r})$
Ανέλιξη	$c_b = 3\pi^2$	$c_b = 3\pi^2 \left(\frac{\pi^2}{1 - \pi^2 \sqrt{k_r} \cos(\pi \sqrt{k_r})} \right)$
Απλή κυλιόμενη κίνηση	$c_b = 2\pi^2$	$c_b = 2\pi^2 \sqrt{k_r} \cos(\pi \sqrt{k_r})$
Απλή κίνηση	$c_b = 6\pi^2$	$c_b = 6\pi^2 \left(\frac{\pi^2}{2 - \pi^2 \sqrt{k_r} \cos(\pi \sqrt{k_r})} \right)$
Κίνηση	$c_b = 0\pi^2$	$c_b = -3\pi^2 \left(\frac{\pi \tan(\pi \sqrt{k_r})}{\sqrt{k_r}} \right)$
Σταθερό σύστημα	$c = \frac{P}{1 + \alpha}$	$c_b = \frac{(c^2 - \pi^2 \sqrt{k_r} \cos(\pi \sqrt{k_r}))}{(1 + \alpha^2 \sqrt{k_r} \cos(\pi \sqrt{k_r}) + \pi^2 \sqrt{k_r} \cos(\pi \sqrt{k_r}))}$
Ανέλιξη και σταθερό σύστημα	$c = 4\pi^2 \frac{3 + \alpha}{4 + \alpha}$	$c_b = \frac{(c^2 - \pi^2 \sqrt{k_r} \cos(\pi \sqrt{k_r}))}{(1 - c^2 \sqrt{k_r} \cos(\pi \sqrt{k_r}) - (2\pi^2 \sqrt{k_r} + \pi^2 \cos(\pi \sqrt{k_r})) + 2c^2 \pi^2 \sqrt{k_r})}$
Σταθερό σύστημα και απλή κίνηση	$c = 4\pi^2 \frac{A}{B}$	$c_b = \frac{D}{E}$



Πρώτη ιδιομορφή λυγισμού τριώροφου μεταθετού και αμετάθετου πλαισίου. First buckling eigenmode of a three-story sway and non-sway frame.



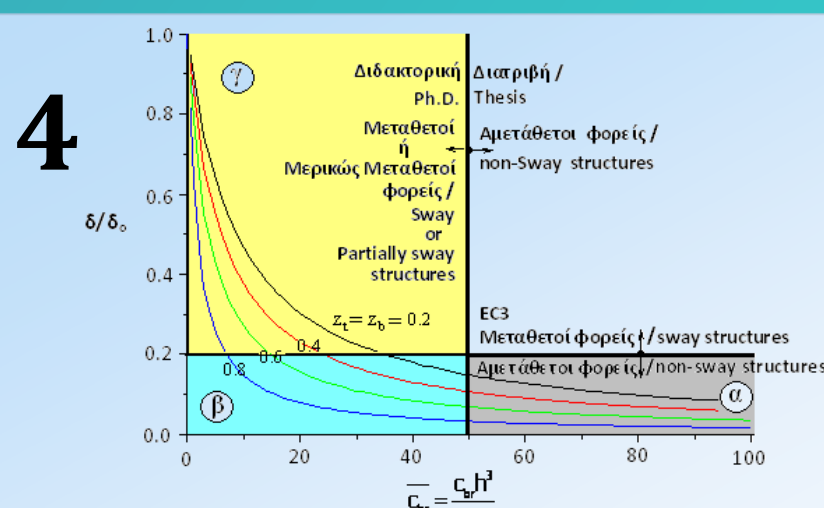
Τρισδιάστατα γραφήματα συντελεστή ισοδύναμου μήκους λυγισμού K για υποστυλώματα σε μεταθετά και αμετάθετα πλαίσια. 3-D graphs of the effective buckling length factor K for columns in sway and non-sway frames.

Στροφικές δυσκαμψίες μελών που συντρέχουν στους ακραίους κόμβους του υπό εξέταση υποστυλώματος. Rotational stiffness expressions of the converging members at the end nodes of the column in question.

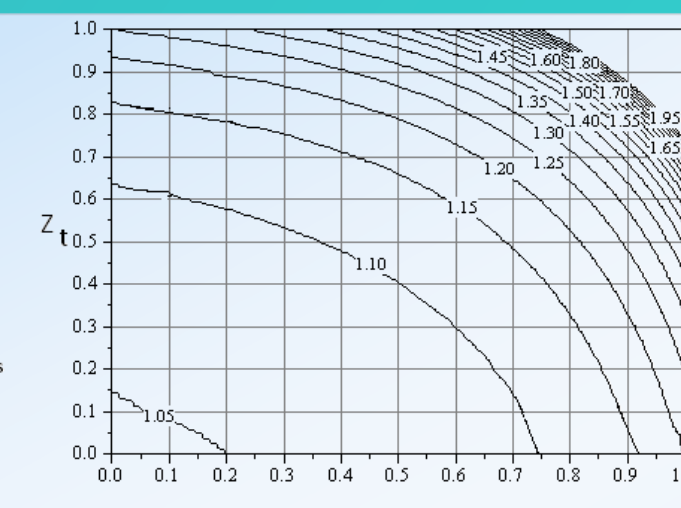
Στροφικές δυσκαμψίες μελών. Προτεινόμενες σχέσεις υπολογισμού στροφικών δυσκαμψιών μελών, τρισδιάστατα γραφήματα συντελεστή ισοδύναμου μήκους λυγισμού K για υποστυλώματα σε μεταθετά και αμετάθετα πλαίσια.

Rotational stiffness of converging members. Proposed expressions for the estimation of rotational stiffness of converging members, 3-D graphs of the effective buckling length factor K for columns in sway and non-sway frames.

4



Μεταθετότητα πλαισίων για διάφορες τιμές των συντελεστών κατανομής z_b , z_t και του αδιαστατοποιημένου συντελεστή του ελατηρίου ευθυγράμμου κίνησης. Sway ability of frames for different levels of the non-dimensional distribution factors z_b , z_t and the non-dimensional translational spring constant.



Νομογράφημα υπολογισμού του συντελεστή μεγένθυσης α , για διάφορες τιμές των συντελεστών κατανομής z_b , z_t . Graph for the evaluation of the amplification factor α , for different levels of the non-dimensional distribution factors z_b , z_t .

$$-32K^2 \bar{c}_{tr} (z_t - 1)(z_b - 1) + 4K \left[8K^2 \bar{c}_{tr} (z_t - 1)(z_b - 1) + K^2 \bar{c}_{tr} (z_t + z_b - 2z_t z_b) \pi^2 + (-z_t - z_b + 2z_t z_b) \pi^2 \right] \cos\left(\frac{\pi}{K}\right) + \pi \left[4K^2 \bar{c}_{tr} (4 - 5z_t - 5z_b + 6z_t z_b) - 16K^2 \pi^2 (1 - z_t - z_b + z_t z_b) - K^2 \bar{c}_{tr} \pi^2 z_t z_b + \pi^2 z_t z_b \right] \sin\left(\frac{\pi}{K}\right) = 0$$

Εξίσωση λυγισμού για τον υπολογισμό του συντελεστή ισοδύναμου μήκους λυγισμού K για υποστυλώματα σε μερικώς μεταθετά πλαίσια. Buckling equation for the evaluation of the effective buckling length factor K for columns in partially sway frames.

Γραφήματα χαρακτηρισμού του πλαισίου ως προς τη μεταθετότητα του καθώς και γραφήματα υπολογισμού του συντελεστή μεγένθυσης α (που ορίζεται ως ο λόγος της ροπής 2ης τάξης προς την αντίστοιχη ροπή 1ης τάξης) των εντατικών και παραμορφωσιακών μεγεθών από γραμμική ανάλυση, για την αποφυγή διεξαγωγής μη-γραμμικής ανάλυσης και εξίσωση λυγισμού για υποστυλώματα μερικώς μεταθετών πλαισίων.

Graphs for the characterisation of the structure according to its sway ability as well as graphs for the evaluation of the amplification factor α (defined as the ratio of the moment evaluated by the non-linear analysis to the first order moment), which can be used as a multiplier of stresses and strains obtained from the linear analysis in order to avoid carrying out a non-linear analysis and buckling equation for the columns in partially sway frames.

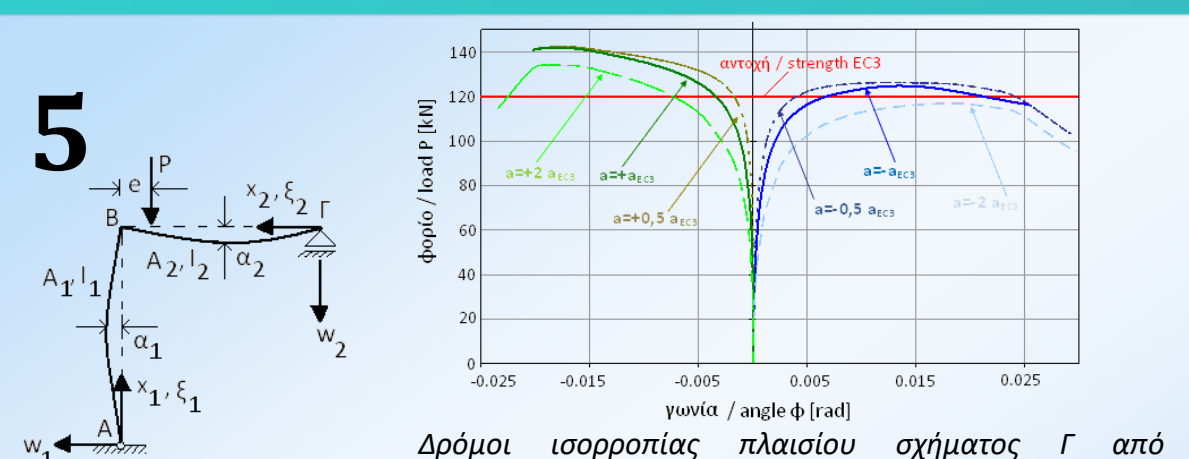
Χαρακτηριστικές δημοσιεύσεις Key publications

Gantes C.J. and Mageirou G.E., "Improved stiffness distribution factors for evaluation of effective buckling lengths in multi-story sway frames", *Engineering Structures*, Vol. 27(7) (2005), pp. 1113-1124.

Mageirou G.E. and Gantes C.J., "Buckling strength of multi-story sway, non-sway and partially-sway frames with semi-rigid connections", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 62(9) (2006), pp. 893-905.

Mageirou, G.E., Gantes, C.J., Markou, K.P. and Bouras, C.G., "A unified approach for assessment of second-order effects and sway buckling strength in steel portal frames", *International Journal of Structural Engineering*, Vol. 4(4) (2013), pp. 273-294.

5

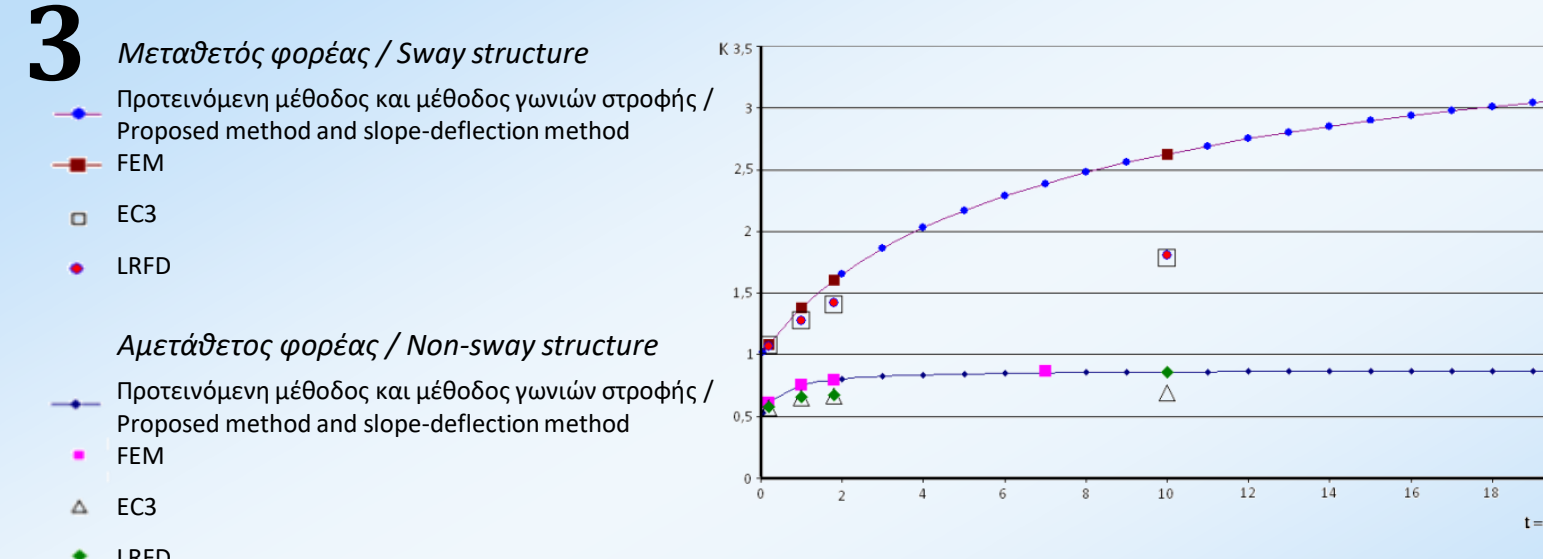


Πλαίσιο σχήματος Γ. "Gamma"-shaped frame. Δρόμοι ισορροπίας πλαισίου σχήματος Γ από ανελαστικές αναλύσεις με γεωμετρική μη γραμμικότητα. Equilibrium paths of "gamma"-shaped sway frame from material and geometrical non-linear analyses.

Πλαίσια μορφής Γ. Επιρροή του προσήμου των αρχικών ατελειών καθώς και της ανελαστικής συμπεριφοράς του υλικού στην αντοχή πλαισιακών μεταθετών φορέων μορφής Γ.

"Gamma"-shaped frames. The influence of the direction of imperfections and material non-linearity on the buckling capacity of "gamma"-shaped sway frames.

3



Αξιολόγηση προτεινόμενης μεθόδου. Συντελεστής ισοδύναμου μήκους λυγισμού (K) για αμφίπακτο μεταθετό και αμετάθετο διώροφο πλαίσιο.

Evaluation of the proposed method. Effective buckling length factor (K) for two-story sway and non-sway frame with fixed supports.

