MATEC Web of Conferences **2**, 02007 (2012)
DOI: 10.1051/matecconf/20120202007
© Owned by the authors, published by EDP Sciences, 2012

Behavior of composite columns in hollow steel section filled with concrete

Comportement des poteaux composites en profils creux en acier remplis de béton

F. FELLAH[1], A. SERIDI[2], et N. OTHMANI[1]

[1]Université Badji Mokhtar, Département De Génie Civil, BP 12, 23000 Annaba, Algérie
[2]Université M'hamed Bougara, Département De Génie Mécanique, 35000 Boumerdes, Algérie

Abstract. The purpose of this paper is the determination of flexural stiffness EI_x and EI_y of a concrete filled rectangular cross section of a composite steel column, under bi-axial bending (N, M_x and M_y). The rigidities will be estimated from a theoretical approach using a finite element analysis (element bar with 4 degrees of freedom), based on the equilibrium conditions at mid-span using the moment-curvature relationships (M-Φ) of the deformed element by applying the following equation: EI=M/Φ. The material behavior is the one adopted by Eurocode 2 and 3, respectively, for concrete and steel. To validate the theoretical approach used, two comparisons were made: one comparing the rigidities given by the moment-curvature relations versus those calculated by the Eurocode 4, and a second comparison between failure loads of two columns scale one with those tested in the laboratory [2]. Based on the results obtained, we may conclude that the theoretical approach used in this study and the models of behavior of materials are suitable for such problems.

Résumé. Le but de cet article, est la détermination des rigidités flexionnelles EI_x et EI_y d'une section mixte acier béton et plus précisément d'un poteau en tube d'acier de section rectangulaire, remplie de béton, sollicitée à la flexion bi-axiale (N, M_x et M_y). L'estimation des rigidités sera faite à partir d'une approche théorique par une analyse du poteau en éléments finis (élément barre à 4 degrés de liberté), basée sur les conditions d'équilibres à mi-portée en utilisant la relation moment-courbure (M–Φ) de l'élément déformé par application de l'équation suivante: EI=M/Φ. Le comportement des matériaux est celui comme adopté par les règlements Eurocode 2 et 3, respectivement pour le béton et l'acier. Afin de valider l'approche théorique utilisée dans cette étude, deux comparaisons ont été faites : une première permettant de comparer les résultats des rigidités déterminées par les relations moments courbures et celles calculées par l'Eurocode 4 et une deuxième comparaison entre les charges de ruines de deux poteaux de grandeurs natures avec ceux testés au laboratoire [2]. Au vu des résultats obtenus,

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 2.0, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Article available at http://www.matec-conferences.org or http://dx.doi.org/10.1051/matecconf/20120202007

nous pouvons conclure que l'approche théorique utilisée dans cette étude ainsi que les modèles de comportement des matériaux sont adéquats pour ce genre de problèmes.

1 Introduction

Dans le domaine de la construction, l'utilisation des structures en tube d'aciers remplis de béton remonte vers les années 1940-1950. Du point de vue résistance, seule la section d'acier était prise en compte, le vide intérieur était destiné à d'autres fonctions, par exemples canalisations pour fluides, irrigation de la structure pour une protection contre l'incendie, remplissage du vide par du mortier ou béton, afin de diminuer la transmission du bruit dans l'ouvrage et contribuer à la résistance à la stabilité au feu. A l'opposé, certains constructeurs utilisaient le tube d'acier comme coffrages perdus et l'on ne tenait compte que de la résistance du noyau intérieur. De nombreuses recherches ont été consacrées à l'étude de ce matériau composite notamment en Grande Bretagne, aux USA, en Allemagne, en Belgique et au Japon. La conclusion était très positive à propos de cette association acier-béton dans tous les points de vue, à savoir résistance, économie, technologie, etc. Tous les résultats d'essais ont abouti à une conclusion forte intéressante [1]: la résistance d'un profil creux, en acier, rempli de béton n'était pas la somme des résistances du béton et de l'enveloppe acier, le profil creux en acier rempli de béton est un nouveau matériau qui a son propre comportement. L'analyse de toute structure (poteaux, poutres, portiques etc.…), quel que soit sa nature (béton armé, charpente métallique, bois etc.…), nécessite la connaissance d'un paramètre très important à savoir la rigidité flexionnelle «EI».

Le but de cette communication, est la détermination des rigidités flexionnelles EI_x et EI_y d'une section mixte acier béton et plus précisément d'un poteau en tube d'acier de section rectangulaire, remplie de béton, sollicitée à la flexion bi-axiale (N, M_x et M_y) due à un effort normal de compression doublement excentré. La validation des résultats obtenus est basée, d'une part sur deux essais expérimentaux de détermination de charges de ruines [2] et d'autre part sur une formule [3] proposée par l'EUROCODE 4 à propos des rigidités élastique de flexion des sections transversales mixtes acier béton.

2 Modèles de comportement du béton et de l'acier

Les lois de comportement adoptées dans cette étude sont conformément aux modèles adoptés dans les Eurocodes 2 et 3 respectivement pour le béton [4] et l'acier [5].

3 Rigidité flexionnelle «EI» des sections en tubes d'acier remplis de béton

3.1 Rigidité élastique d'après l'Eurocode 4

La rigidité élastique réelle $(EI)_e$ de flexion de la section transversale d'un poteau mixte, en tube d'acier rempli de béton, est donnée par l'équation suivante [10]:

$$(EI)_e = E_a.I_a + 0.8.E_{cd}.I_c \quad (1)$$

Avec: I_a et I_c respectivement moments d'inertie du tube d'acier et du noyau béton;
E_a et E_{cd} respectivement les modules d'élasticité de l'acier et module sécant du béton.

3.2 Rigidité à partir de la relation moment-courbure

L'estimation des rigidités « EI » sera faite à partir d'une approche théorique, par une analyse du poteau en éléments finis (élément barre à 4 degrés de liberté), basée sur les conditions d'équilibres à mi-portée en utilisant la relation Moment- Courbure (M–Φ) de l'élément déformé. Ainsi, à partir du diagramme Moment-Courbure (M–Φ), la rigidité sera estimée par la relation (2).

$$EI = M/Ø \tag{2}$$

4 Relation moment-courbure

Comme il a été signalé précédemment, la détermination de la rigidité flexionnelle « EI » d'une section mixte, en tube d'acier rempli de béton, va être estimée à partir de la relation MOMENT-COURBURE. Dans notre étude, certaines simplifications et idéalisations doivent être adoptées, résumées dans les hypothèses fondamentales suivantes : le profil creux en acier et le noyau béton sont homogènes et isotropes, le béton tendu est négligé, l'hypothèse de Navier-Bernoulli est applicable, il y a interaction complète entre le tube d'acier et le noyau béton ($\varepsilon_{béton} = \varepsilon_{béton}$) et les déformations de cisaillement sont négligeables. La figure 1, montre une discrétisation de la section du poteau composite, section subdivisée en éléments acier et béton sous forme de maillages carrés de petites tailles (1mmx1mm) [6]. Le système d'axe est choisi de telle façon que l'origine O se situe dans la zone comprimée. La relation moment courbure dans le cas d'une flexion bi-axiale utilise six paramètres :la charge axiale P, les moments M_x et M_y, la distance Z de l'axe neutre au point O, la courbure Ø et l'angle d'inclinaison de l'axe neutre θ. Connaissant les valeurs de P, Ø, et θ, en passant par les lois de comportement des matériaux acier et béton, on peut aisément calculer en tout point $m(x_i ; y_i)$ de la section mixte les quantités P, M_x, M_y, $Ø_x$ et $Ø_y$. Par sommation sur tous les éléments, on peut déterminer les relations moments courbures M_x-$Ø_x$ et M_y-$Ø_y$.

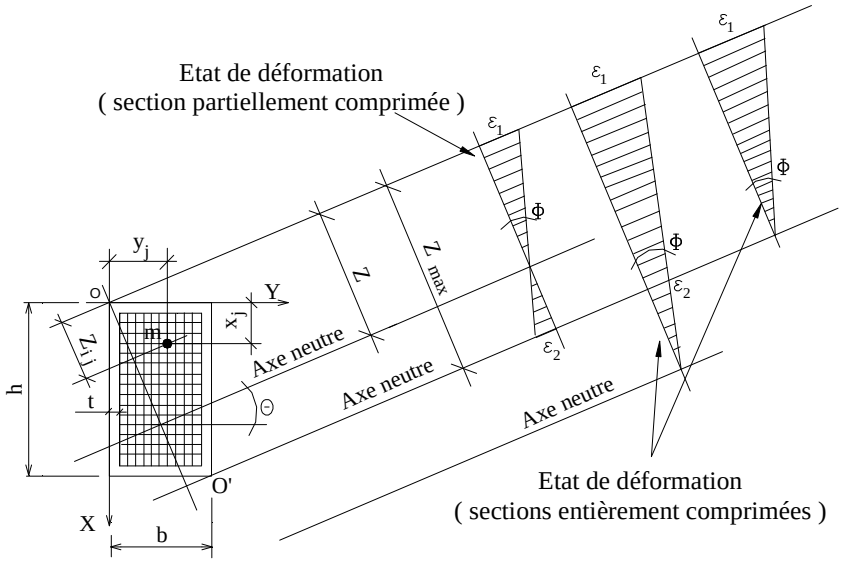

Fig. 1. Discrétisation section mixte en maillages rectangulaires (s=1mm2)

Le graphe de la figure 2 montre un exemple de relations moments courbures M_x-$Ø_x$ pour un cas de chargement en flexion bi-axiale EXY1 dont les caractéristiques sont : section 120x80x5, longueur

3175mm, excentricités e_x=24mm et e_y=16mm, nombre d'éléments M.E.F.=10, contrainte de compression cubique du béton F_{cu}=45N/mm^2, limite élastique du tube en acier F_s=380 N/mm^2 et E_s=239KN/mm^2 est le module de Young. Il est à noter qu'un deuxième cas EXY2 (section 120x80x5, longueur 3175mm, e_x=60mm, e_y=40mm, nombre d'éléments M.E.F.=10, F_{cu}=44N/mm^2, F_s=350 N/mm^2 et E_s=226KN/mm2) a été traité dans cette étude, mais seuls les résultats ont été reportés au niveau des tableaux 1 et 2.

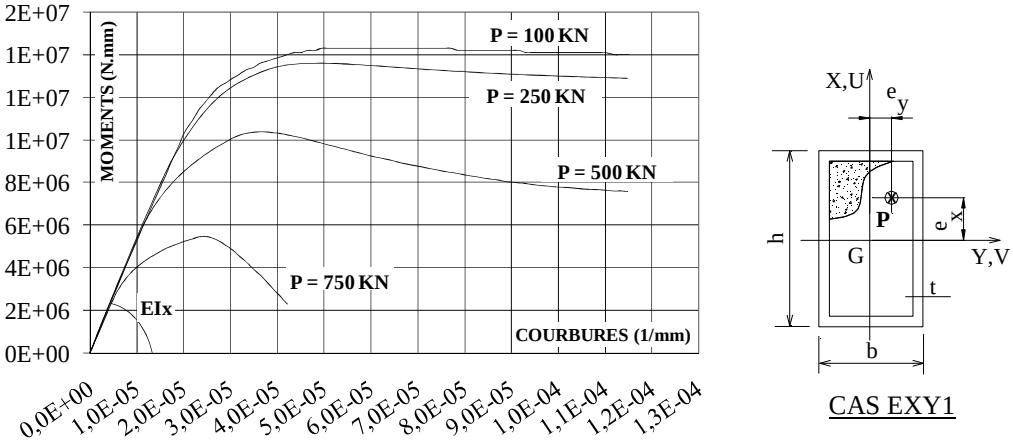

Fig. 2. Relations moments courbures par rapport à x-x. Cas EXY1.

5 Détermination de la charge de ruine par la méthode des éléments finis

L'analyse des structures par éléments finis consiste en sa discrétisation en plusieurs éléments de formes plus ou moins régulières.

5.1 Analyse linéaire de la stabilité

Nous allons étendre la méthode des éléments finis à l'analyse des problèmes d'instabilité de l'élasticité linéaire. Ce qui nous amènera à déterminer, par une méthode de calcul, l'intensité des forces nécessaire pour faire flamber une structure élastique. Certes la ruine d'une structure comprend sans doute des composantes d'instabilités et de déformations qui sont non-linéaires, mais l'approche du problème par une analyse linéaire est satisfaisante dans de nombreux cas et en particulier pour les poutres [7]. Le traitement de l'instabilité élastique comprend deux étapes: la formulation des équations des éléments et la résolution du système complet.

5.2 Théorie générale

Puisque dans cette étude, il s'agit d'étudier les poteaux, éléments travaillant principalement en compression axiale ou en compression avec flexions, c'est l'élément barre prismatique (élément poutre) à quatre degrés de liberté qui sera considéré. La structure dont il est question d'étudier est soumise à un chargement bi-axial par l'application d'un effort (P) doublement excentré de (e_x) et (e_y), ce qui est équivalent à une charge (P) appliquée au centre de gravité, plus deux moments de flexion M_x et M_y.

L'interaction de ces différents efforts F_x, F_y, F_z, M_x et M_y donnent lieu à des phénomènes d'instabilité élastique complexes en comparaison avec les modes de flambage simple. Une analyse indépendante est donc nécessaire pour déterminer les comportements en flexion dans les deux plans. Ce qui nous amène à étudier deux analyses possibles, une analyse flambement et flexion combinés dans le plan X-X et une autre dans le plan Y-Y. La figure 3 montre l'analyse dans le plan Y-Y.

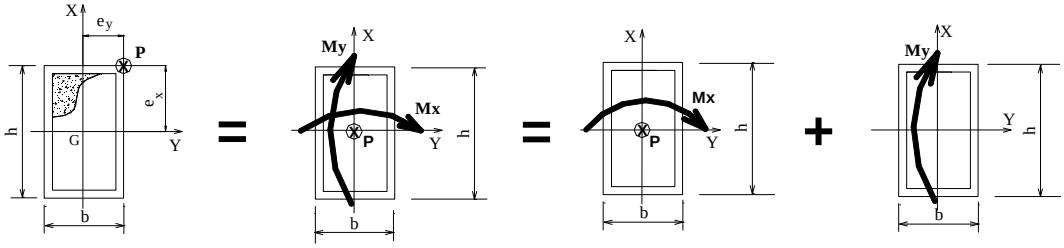

Fig. 3. Analyse 1- flambement et flexion combinés dans y-y

5.3 Théorie générale

Comme il a été précisé précédemment, l'analyse du cas bi-axial va être basée sur l'élément prismatique de section constante et l'on supposera qu'il ne subit que des déformations longitudinales et des déformations de flexion, les déformations d'effort tranchant sont négligées (cas des pièces à parois pleines). A partir des matrices de rigidités de flexion $[K_{fx}]$ et $[K_{fy}]$ et géométriques $[K_{gx}]$ et $[K_{gy}]$, on peut déterminer la matrice de rigidité d'un élément $[K]^e$ en flambage et flexion combinée par la résolution de l'équation (3) ci-après.

$$[K]^e = [K_f]^e - P.[K_g]^e \tag{3}$$

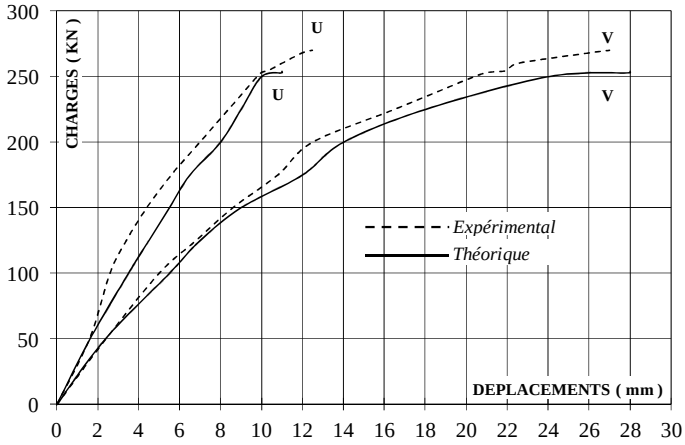

Fig. 4. Déplacements U et V. Cas EXY1.

La résolution de l'équation (3) permet de déterminer la charge de ruine P par flambement et flexion en étudiant l'équilibre de l'élément déformée à mi-portée. Un programme en langage FORTRAN a été élaboré en ce sens, avec un support de sous-programmes proposés par [8]. Les graphes représentés sur la figure 4 montrent l'évolution des déplacements U et V respectivement dans les plans X-X et Y-Y pour le cas EXY1.

6 Comparaisons des résultats et analyses

Cette section regroupe les résultats des charges de ruines et des rigidités flexionnelles obtenues par les deux méthodes théoriques que nous venons d'exposer, à savoir les relations moments-courbures pour la détermination de la rigidité flexionnelle et l'analyse du flambage et flexion combinés par éléments finis pour la détermination de la charge de ruine. Ces résultats sont comparés avec les mêmes cas de chargement EXY1 et EXY2 obtenus expérimentalement [2] à propos de la charge de ruine et la formulation théorique donnée par l'Eurocode 4 pour le calcul des rigidités. Les tableaux 1 et 2 ci-après regroupent les résultats et les comparaisons des deux cas EXY1 et EXY2.

Tableau 1. Résultats et comparaisons rigidités flexionnelles.

CHARGE P (KN)	RIGIDITES CAS EXY1		RIGIDITES CAS EXY2	
	EIx N/mm^2	EIy N/mm^2	EIx N/mm^2	EIy N/mm^2
50	$5{,}13.10^{11}$	$1{,}00.10^{12}$	$4{,}82.10^{11}$	$9{,}37.10^{11}$
100	$5{,}15.10^{11}$	$1{,}01.10^{12}$	$4{,}76.10^{11}$	$9{,}25.10^{11}$
125	$5{,}12.10^{11}$	$1{,}00.10^{12}$	$4{,}72.10^{11}$	$9{,}22.10^{11}$
$(EI)_{M-\Phi}$	$5{,}13.10^{11}$	$1{,}00.10^{12}$	$4{,}76.10^{11}$	$9{,}28.10^{11}$
$(EI)_{EUR.4}$	$6{,}00.10^{11}$	$1{,}21.10^{12}$	$4{,}46.10^{11}$	$8{,}49.10^{11}$
$\frac{(EI)_{M-\Phi}}{(EI)_{EUR.4}}$	0.855	0.826	1.067	1.093

$(EI)_{M-Ø}$: Rigidité théorique à partir de la relation moment-courbure.
$(EI)_{EUR.4}$: Rigidité à partir de l'Eurocode 4.

Tableau 2. Résultats et comparaisons charges de ruine.

CAS	charge de ruine (KN)		P_{exp}/P_{the}
	$P_{exp.}$ [2]	$P_{the.}$	
EXY1	268	254	1.055
EXY2	160	147	1.088

$P_{exp.}$: Charge de ruine expérimentale.
$P_{the.}$: Charge de ruine théorique.

A partir de cela, on peut dire que les méthodes théoriques, adoptées dans la présente étude, ont donné des résultats très satisfaisants et ce malgré plusieurs hypothèses simplificatrices et paramètres influents parmi lesquels on citera principalement ce qui suit:

a) La discrétisation de la section transversale du composite en grillage ou maillage influe beaucoup sur la précision de la courbe moments- courbures, surtout au niveau de la frontière de l'axe neutre.

b) Le nombre de points pris en compte pour la construction des courbes moments-courbures possède une grande influence sur les résultats théoriques (dans notre cas, 80 points on été pris en compte) puisque les rigidités (EI) et les moments intérieurs (M_{int}), nécessaires pour l'analyse théorique, sont déduits à partir de ces courbes par une interpolation linéaire.

c) L'inclinaison de l'axe neutre, nécessaire pour la génération des courbes moments courbures, a été déterminée à partir d'une homogénéisation de la section composite basée sur un coefficient d'équivalence entre l'acier et le béton égal à 15.

d) Les résultats théoriques de la charge de ruine ont été trouvés à partir d'un module d'élasticité longitudinal de l'acier E constant sur toute la hauteur, ce qui n'est pas vrai en pratique.

e) Les résultats théoriques, présentés dans la section 5, sont basées sur des imperfections de rectitude égales à 0.03b, soit dans notre cas une flèche initiale à mi-portée égale à 2.4 mm.

f) Le nombre de résultats donné par [2] sont aussi discutables puisqu'ils ont été obtenus à partir d'un seul essai pour chaque cas.

7 Conclusions

A partir des résultats théoriques obtenus, on peut tirer les conclusions suivantes:

- l'estimation des rigidités flexionnelles et de la charge de ruine des poteaux mixtes en tube d'acier remplis de béton sollicités en flexion bi axiale par la méthode théorique proposée dans cette étude est très proche de celle donnée par l'étude expérimentale et l'Eurocode 4.
- les modèles de comportement de l'acier et du béton adoptés par les Eurocodes 2 et 3 sont adéquats pour ce type de problème.

Références

1. OTUA - *L'acier pour construire*. Numéro spécial. Poteaux en profil creux remplis de béton. Une nouvelle façon d'associer l'acier et le béton. Code 5.003.
2. J.Zeghiche. *Concrete filled composite columns*. Master by research. January (1988).
3. EN 1994-1-1 (2004) Eurocode 4 - Calcul des structures mixtes acier-béton - Partie 1-1: Règles générales et règles pour les bâtiments.
4. EN 1992-1-1 (2004) Eurocode 2 - Calcul des structures en béton - Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments.
5. EN 1993-1-1 (2003) Eurocode 3 - Calcul des structures en acier - Partie 1-1: Règles générales et règles pour les bâtiments.
6. K.S.Virdi and P.J.Dowling. *The ultimate strength of composite columns in biaxial bending*. Pages 251 à 272. (1973).
7. R.H.Gallagher. *Introduction aux éléments finis*. Editions Pluralis pour la traduction française.
8. I.M.Smith and D.V.Griffiths. *Programming the finite element method*. John Wiley & Sons. (1988).
9. J.Jans. Charges ultimes des profils creux remplis de béton chargés axialement. Publications CRIF. MT 101. 1974. Bruxelles.