PERFORMANCE STUDY OF CONCRETE-FILLED STEEL TUBES

A. Chair¹, A. Djebbar¹, N. Djebbar¹

¹ LMDC, Civil Engineering Département, Constantine 1 University, Algeria

Abstract. Abstract. Concrete-filled steel tubes circular section columns are increasingly used in the design of modern multi-stories structures. Investigations developed in recent decades confirm their beneficial use. They are used as a structural component system, given their excellent energy absorption and dissipation, or as a rehabilitation tool for recovery of damaged components after a seismic event. They contribute through their performance to confer high strength to elements, as high ductility and high rigidity, with a remarkable optimization of the used materials.

The main objective of this work is to review the principal models characterizing the behavior laws of concrete confined by steel jacket. An analysis based on Samantha model was conducted to highlight the parameters affecting the sectional behavior, and to evaluate the gains in strength and deformation. A section strength capacity investigation is presented. Results are compared with some codes recommendations.

This type of structure can be used in Algeria for rehabilitating old buildings, or strengthening reinforced concrete columns to improve their structural performance. However, new regulatory measures should be considered in order to introduce this compound element in the construction.

1 Introduction

Les poteaux circulaires composites en tubes d'acier remplis de béton sont de plus en plus utilisés dans la conception des structures modernes multi-étagées (tours). Les investigations développées ces dernières décennies confirment leur emploi bénéfique comme élément structurel qui présente de bonne performance du point de vue résistance, ductilité et rigidité, avec une optimisation remarquable des matériaux mis en œuvre. En plus de ces avantages, les tubes en acier servent aussi de coffrage, réduisant ainsi le coût et la durée de réalisation. Ils constituent les éléments principaux développant la capacité de résistance pour reprendre les charges verticales et servir de contreventement pour équilibrer les charges latérales.

Une série d'études est présentée dans ce contexte [Tomi 1991; Liang et Uy 2000; Susantha et al. 2001; Bradford, Loh, et Uy 2002; Huang et al. 2002; Morino et Tsuda 2002; Hu et al. 2003; Han 2004; Ehab et Young 2006]. Les résultats d'essais expérimentaux existants ont été passés en revue afin de mieux cerner les principaux paramètres influant sur les lois de comportement du matériau: diamètre du poteau, épaisseur du tube d'acier, résistance du béton et limite élastique de l'acier.

L'objectif principal de ce travail est de présenter une synthèse des différents modèles caractérisant les lois de comportement du béton confiné par chemise en acier. Une analyse articulée sur le modèle de Susantha², a été menée pour faire ressortir les facteurs prédominants sur le comportement sectionnel, et pouvoir évaluer les gains en résistance et en déformation. Une investigation relative à

la capacité de résistance de la section est développée, et les résultats obtenus ont été comparés avec certains codes en l'occurrence Euro 4⁹ et ACI¹⁰.

2 Observations expérimentales

Les figures 1, 2 présentent les relations $\sigma - \epsilon$ découlant des résultats expérimentaux de Giakoumelis¹⁰ et Tomii¹¹, sur des spécimens en tubes d'acier circulaires remplis de béton sous chargement monotone axial, où les principaux paramètres sont mis en évidence.

Essai sur machine universelle : le comportement charge déformation de la région test du poteau est enregistré à travers deux capteurs potentiométriques de déplacement (LVDT) placés sur deux faces opposées du poteau. La charge étant appliquée selon une incrémentation qui lui correspond à chaque fois une série de lectures (déformation longitudinale et transversale mesurées à partir des jauges électriques). L'incrément de la charge dans la région inélastique est tributaire des déformations.

Use A4 paper size (210 x 297 mm) and adjust the margins to those shown in Table 1. The final printed area will be 172 x 252 mm.

2.1 Effet de f_{co}

La figure 1 montre l'influence de la résistance du béton sur le comportement $\sigma - \epsilon$ du spécimen. On constate que la rigidité initiale (pente des diagrammes) est non affectée par f_{co} , alors que la capacité de déformation s'en trouve réduite.

Fig. 1. Effet de la résistance du béton f_{co}

2.2 Effet du rapport D/t

La figure 2 montre l'influence du rapport D/t (diamètre sur l'épaisseur du tube d'acier) selon la courbe charge-raccourcissement longitudinal de l'élément. On constate que la rigidité initiale est toujours non affectée, car l'intervention du confinement à ce stade reste négligeable. La résistance de l'élément augmente avec la diminution du rapport D/t. La capacité de déformation est non affectée.

Fig. 2. Effet du rapport D/t

3 Résumé de quelques modèles établis

3.1. Ehab *et al.*¹

L'approche utilisée dans l'établissement du modèle est similaire à celle de Mander *et al.*³ La contrainte pic de confinement et la déformation correspondante sont données par les expressions suivantes :

$$f_{cc} = f_{co} + 4.1 f_l \quad \text{et} \quad \epsilon_{cc} = \epsilon_{co} \left(1 + 20.5 \frac{f_l}{f_c} \right) \quad (1)$$

Où f_l représente la pression latérale de confinement imposée par le tube circulaire en acier.

Les expressions formulant la courbe contrainte déformation du béton confiné par le tube circulaire sont données par :

- pour la partie ascendante qui est d'ailleurs basée sur l'équation de Saenz⁴:

$$f_c = \frac{E_c \epsilon_c}{1 + (R + R_E - 2)x - (2R - 1)x^2 + Rx^3}, \quad \epsilon_c \leq \epsilon_{cc} \quad (2)$$

avec $x = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cc}}$ et R_E et R sont respectivement données

par les équations :

$$R_E = \frac{E_c \epsilon_{cc}}{f_{cc}} \quad \text{et} \quad R = \frac{R_E (R_\sigma - 1)}{(R_E - 1)^2} - \frac{1}{R_E} \quad (3)$$

Selon Hu *et al.*⁵, les constantes R_σ et R_ϵ sont prises égales à 4.

- pour la partie descendante, le modèle opte pour une variation linéaire dictée par l'expression suivante :

$$f_c = f_{cc} - \frac{(1 - rk_3) f_{cc}}{10 \epsilon_{cc}} (\epsilon_c - \epsilon_{cc}), \quad \epsilon_c \geq \epsilon_{cc} \quad (4)$$

Selon Hu *et al.*⁵, le coefficient k_3 dépend du rapport D/t et la limite élastique de l'acier f_{yh} . Le coefficient r est pris égal à 1 pour une résistance à la compression du béton inférieure à 30 MPa et 0.5 pour des contraintes supérieures à 100 MPa. Pour les autres valeurs de contrainte on procède à une interpolation⁶.

3.2. Han *et al.*⁷

Le confinement du béton est régi par les équations suivantes :

- Partie ascendante

$$\frac{f_c}{f_{cc}} = 2x - x^2, \quad \epsilon_c \leq \epsilon_{cc} \quad (5)$$

- Partie descendante

$$\frac{f_c}{f_{cc}} = \frac{x}{\beta(x-1)^\eta + x}, \quad \epsilon_c \geq \epsilon_{cc} \quad (6)$$

avec $x = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cc}}$

La résistance pic est formulée comme suit :

$$f_{cc} = \left[1 + (-0.0135 \xi^2 + 0.1 \xi) \left(\frac{24}{f_c} \right)^{0.45} \right] f_c \quad (7)$$

où $\xi = \frac{A_s f_{yh}}{A_c f_{co}}$

avec A_s : section du tube d'acier, f_{co} : résistance du béton
La déformation correspondante à la résistance pic est exprimée par :

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_{c1} + \left[1330 + 760 \left(\frac{f_c}{24} - 1 \right) \right] \xi^{0.2} \quad (8)$$

avec: $\epsilon_{c1} = 1300 + 12.5 f_c$, $\eta = 1.6 + 1.5 / x$

et

$$\beta = \begin{cases} \frac{f_c^{0.1}}{1.35 \sqrt{1 + \epsilon_{co}}} & (\xi \leq 3.0) \\ \frac{f_c^{0.1}}{1.35 \sqrt{1 + \epsilon_{co}} (\xi - 2)^2} & (\xi > 3.0) \end{cases} \quad (9)$$

3.3 Susantha et al.²

Le modèle proposé par l'auteur (2001), figure 3, est basé sur l'équation de Popovics⁸, qui ultérieurement a été modifiée par Mander et al.³.

Les équations régissant le modèle sont comme suit :

- branche ascendante : $\varepsilon_c \leq \varepsilon_{cc}$

$$f_c = f_{cc} \left[\frac{rx}{r-1+x^r} \right] \quad (10)$$

$$\text{avec } x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \quad \text{et} \quad r = \frac{E_c}{E_c - \frac{f_{cc}}{\varepsilon_{cc}}}$$

$$\text{et } f_{cc} = f_c + 4f_{rp}, \quad \varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left[1 + 5 \left(\frac{f_{cc}}{f_c} - 1 \right) \right] \quad (11)$$

La contrainte latérale de confinement est prise égale à :

$$f_{rp} = \frac{2}{\frac{D}{t} - 2} f_{yh} \quad (12)$$

Fig. 3. Loi de comportement du béton selon Susantha

- branche descendante : $\varepsilon_c \geq \varepsilon_{cc}$

$$f_c = f_{cc} - Z(\varepsilon_c - \varepsilon_{cc}) \quad (13)$$

où Z est le taux d'adoucissement, qui est fonction des conditions suivantes :

$$- Z = 0 \quad \text{pour } R_t(f_{co} / f_{yh}) \leq 0.006$$

$$- Z = 1.0 \times 10^5 R_t \frac{f_{co}}{f_{yh}} - 600$$

$$\text{pour } R_t(f_{co} / f_{yh}) \geq 0.006 \quad \text{et} \quad f_{yh} \leq 283 \text{ MPa}$$

$$- Z = 1.0 \times 10^5 R_t \frac{f_{co}}{f_{yh}} - 6000$$

$$\text{pour } R_t(f_{co} / f_{yh}) \geq 0.006 \quad \text{et} \quad f_{yh} \geq 336 \text{ MPa}$$

$$- Z = \left(\frac{f_{yh}}{283} \right)^{13.4} \left[1.0 \times 10^5 R_t \frac{f_{co}}{f_{yh}} - 600 \right]$$

pour

$$R_t(f_{co} / f_{yh}) \geq 0.006 \quad \text{et} \quad 283 \text{ MPa} \leq f_{yh} \leq 336 \text{ MPa}$$

$$\text{avec } R_t = \sqrt{3(1-\nu^2)} \frac{f_{yh}}{E_s} \frac{D}{2t}$$

Les figures 4, 5 et 6 montrent analytiquement l'effet des principaux paramètres influents selon le modèle de Susantha. On remarque que le modèle reflète raisonnablement les résultats expérimentaux, en l'occurrence l'influence de f_{co} et D/t. Concernant l'effet de la limite élastique sur la courbe contrainte-déformation, on constate qu'il est bénéfique sur le comportement de l'élément.

Fig. 4. Effet du rapport D/t

Fig. 5. Effet de la limite élastique de l'acier f_{yh}

4 Etude paramétrique selon le modèle de Susantha et al.²

Fig. 6. Effet de la résistance du béton f_{co}

4.1 Evaluation des paramètres de confinement

De la relation contrainte-déformation, on définit les caractéristiques suivantes :

- Le gain en résistance, le paramètre K_s ($K_s = f_{cc}/f_{co}$) exprimant le rapport des contraintes pics des bétons confinés et non confiné ;
- Le gain en déformation, le paramètre K_d ($K_d = \varepsilon_{cc}/\varepsilon_{co}$) exprimant le rapport des déformations correspondantes respectivement aux contraintes pics du béton confiné et non confiné ;
- Gain en résistance

$$K_s = 1 + 4(f_m/f_c) = 1 + \frac{8}{\left(\frac{D}{t} - 2\right)} \frac{f_{yh}}{f_c} \quad (14)$$

Le coefficient K_s est directement proportionnel à f_{yh} et inversement proportionnel à f_{co} et D/t .

- Gain en déformation

$$K_d = \frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{co}} = \left[1 + 5 \left(\frac{f_{cc}}{f_c} - 1 \right) \right] \quad (15)$$

Le coefficient K_d est directement proportionnel à f_{cc} et inversement proportionnel à f_{co} .

5 Détermination de la capacité axiale ultime P

Les figures 4, 5 et 6 montrent analytiquement l'effet des principaux paramètres influents selon le modèle de Susantha. On remarque que le modèle reflète raisonnablement les résultats expérimentaux, en l'occurrence l'influence de f_{co} et D/t . Concernant l'effet de la limite élastique sur la courbe contrainte-déformation, on constate qu'il est bénéfique sur le comportement de l'élément.

Fig. 7. Élément en tube d'acier soumis à une force de compression P

L'équation de base permettant de déterminer la charge ultime est de la forme:

$$P = P_c + P_s = A_c f_c + A_s f_s \quad (16)$$

Dans cette équation les termes A_c et A_s sont supposés connus, ils représentent respectivement l'aire du béton et celle de l'acier enveloppant. Les contraintes f_c et f_s respectivement du béton et de l'acier, sont à déterminer. Pour résoudre cette équation, un code en Visual Basic a été développé s'appuyant sur l'algorithme suivant :

- Initialiser une valeur de P_{ext} (effort sollicitant l'élément).
- Initialiser des valeurs de D/t , D , f_{yh} , f_{co} .
- Initialiser une valeur de la déformation dans le béton ε_c .
- Déterminer les contraintes dans le béton et l'acier (f_c et f_s) en utilisant les lois de comportement contraintes-déformations appropriées.
- Calculer l'effort axial P par l'équation 16.
- Comparer P_{ext} et P.
- Si l'équilibre entre les deux efforts, sollicitant et résistant est satisfaisant, la combinaison la combinaison P, D/t , D , f_{yh} , f_{co} constitue une solution du problème et passer à l'étape 8, sinon revenir à l'étape 3 et incrémenter la valeur de ε_c .
- Calculer la valeur de contrainte latérale de confinement f_{rp} .
- Incrémenter P_{ext} .

5.1 Etude comparative et vérification des résultats

Les tableaux 1 et 2 présentent les dimensions et propriétés des différents spécimens [Ehab et Young 2006], ainsi que les résultats relatifs aux différentes équations, y compris celle qui a été proposée dans cette étude. Les résultats traités par MEF dans le tableau 2 sont présentés par Ehab¹ : l'élément fini est un solide tridimensionnel à 8 nœuds (C3D8), le programme d'analyse est ABAQUS. Les hypothèses utilisées : comportement à l'interface béton-tube modélisé ; courbes multi linéaires σ - ε de l'acier utilisées ; effets du béton et béton confiné pris en considération.

Tableau.1. Dimensions et propriétés des spécimens

Spécimen	Dimensions				Propriétés des matériaux	
	L [mm]	D [mm]	t [mm]	D/t	f_{co} [MPa]	f_{yh} [MPa]
S1	300	114	7.6	15	30	343
S6	300	114	2.85	40	30	343
S11	300	114	2.07	55	30	343
S16	300	114	1.63	70	30	343
S21	714	238	11.90	20	30	507
S26	714	238	3.9	60	30	507
S31	1080	360	8.00	45	30	525
S36	1080	360	6.55	55	30	525

Tableau.2. Dimensions et propriétés des spécimens

Spécimen	Capacité axiale ultime				
	Analyse	MEF	P _{EC4}	P _{ACI}	Analyse P _{EC4}
S1	1339.0	1560.0	1554.2	1028.2	0.86
S6	812.5	757.5	798.5	529.5	1.02
S11	683.4	567.9	654.3	443.2	1.04
S16	594.2	491.3	459.1	329.7	1.29
S21	6488.3	7360.0	7782.3	5206.5	0.83
S26	3389.0	2932.0	3694.8	2540.9	0.92
S31	9466.0	8440.0	10391.5	7017.3	0.91
S36	8349.5	7200.0	9127.1	6231.0	0.91

Les résultats obtenus sont confrontés aux différentes méthodes de calcul préconisées par l'Eurocode 4⁹ et l'ACI¹⁰, selon les équations suivantes:

$$P_{EC4} = A_c f_c \left(1 + \eta_1 \frac{t}{D} \frac{f_{yh}}{f_c}\right) + A_s f_{yh} \eta_2 \quad (17)$$

A_c : aire de la section transversale du béton

A_s : aire de la section transversale de l'acier de construction.

f_c et f_{yh} : résistances caractéristiques conformément à l'EC2 ou à l'EC3.

t : épaisseur de la paroi du tube en acier.

D : diamètre extérieur du poteau.

Les valeurs des coefficients η_1 et η_2 pour $0 \leq e \leq \frac{d}{10}$:

$$\eta_1 = \eta_{10} \left(1 - 10 \frac{e}{d}\right); \quad \eta_2 = \eta_{20} + (1 - \eta_{20}) 10 \frac{e}{d}$$

Pour $e > \frac{d}{10}$ $\eta_1 = 0$ et $\eta_2 = 1.0$

e : excentrement du chargement

$$\eta_{10} = 4.9 - 18.5 \bar{\lambda} + 17 \bar{\lambda}^2 \quad (\text{mais} \geq 0)$$

$$\eta_{20} = 0.25 (3 + 2 \bar{\lambda}) \quad (\text{mais} \leq 0)$$

$\bar{\lambda}$: élancement non dimensionnel

$$P_{ACI} = 0.85 A_c f_c + A_s f_{yh} \quad (18)$$

La validation des résultats obtenus par l'analyse proposée selon le modèle de Susantha en comparaison avec l'Eurocode 4 montre une bonne concordance.

5.2 Analyse des résultats et discussion

Les figures 8, 9 et 10 montrent analytiquement l'effet des principaux paramètres sur la variation de la capacité ultime des tubes d'acier remplis de béton.

Les Figures 9a et 9b montrent respectivement la variation de f_{co} avec la charge portante P et la contrainte latérale de confinement f_{rp} pour différentes valeurs de D/t .

Fig. 8. Effet du rapport D/t (suite)

5.2.1 Effet de la résistance du béton f_{co}

Sur la Figure 9a, la charge portante P croît avec la diminution de D/t pour une valeur de D constante. Cependant le taux d'accroissement de la charge diminue avec la diminution de D/t . Sur la Figure 9b, la variation de la contrainte latérale de confinement croît avec l'augmentation de f_{co} et le rapport D/t jusqu'à une certaine valeur de f_{co} ($f_{co} \approx 70$ MPa). Au delà de cette valeur, la contrainte latérale de confinement diminue avec l'accroissement de f_{co} . Cette diminution devient de plus en plus significative avec le décroissement de D/t . Ces courbes mettent en évidence l'influence de l'interaction béton - tube d'acier : plus le béton est résistant, moindre est sa capacité de déformation transversale générant l'étreinte latérale.

Fig. 9. Effet de la résistance du béton f_{co}

5.2.2 Effet de la limite élastique de l'acier f_{yh}

Les Figures 10a et 10b montrent l'influence de la limite élastique de l'acier sur la charge portante P . Comme l'illustrent les Figures 10a et 10c, la charge augmente avec la limite élastique de l'acier utilisé ; cette augmentation est moins importante pour les rapports D/t élevés. Elle devient insignifiante pour $D/t = 100$ (Fig. 10c). L'effet de l'étreinte latérale est beaucoup plus prononcé dans le cas de D/t faible. L'examen des Figures 10b et 10d révèle que l'effet de la limite élastique de l'acier f_{yh} sur la variation de l'étreinte latérale de confinement est plus important pour les petits diamètres et devient négligeable pour des rapports D/t importants.

Fig. 10. Effet de la limite élastique de l'acier f_{yh}

Conclusions

Cette étude a permis d'émettre les points suivants :

- les paramètres majeurs influençant le comportement du béton confiné par tube d'acier qui sont : la résistance du béton, la limite élastique du tube d'acier et le rapport géométrique D/t .
- le gain en résistance augmente avec l'augmentation de la résistance du béton, diminue avec l'accroissement du rapport D/t et croît proportionnellement avec la limite élastique de l'acier.
- le gain en déformation décroît avec l'augmentation de la résistance et est inaffecté par la variation du rapport D/t , ni par la variation de la résistance du béton.

Une équation directe pour l'analyse des tubes d'acier circulaires remplis de béton simple a été présentée. Le modèle de confinement a été parfaitement introduit. La prédiction des résultats obtenus a montré une bonne concordance avec ceux préconisés par les différents codes ainsi que ceux donnés par la méthode des éléments finis. Une étude paramétrique mettant en évidence l'influence des principaux paramètres, notamment le rapport D/t , la résistance du béton f_{co} et la limite élastique de l'acier transversal f_{yh} , a été menée. Les résultats analytiques ont montré l'effet favorable du confinement sur la capacité axiale ultime des éléments en TARB.

References

1. Ehab E., Young B., Behaviour of Normal Strength Concrete-Filled Compact Steel Tube Circular Stub Columns, *Journal of Constructional Steel Research*, **62** (2006) 706-715.
2. Susantha K. A. S., Hanbin G., Usami T., Uniaxial Stress-Strain Relationship of Concrete Confined by Various Shaped Steel Tubes, *Engineering Structures*, **23** (2001) 1331-1347.
3. Mander J. B., Priestley M. J. N., Park R., Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete, *Journal of Structural Engineering*, Vol.114, **8**, (1988), pp. 1804-1826.
4. Saenz LP, Discussion of Equation for Stress-Strain Curve of Concrete, by Desayi P. and Krishnan S., *Journal of the American Institute*, (1964), 1229 – 35.
5. Hu HT, Huang CS, Wu MH, Nonlinear Analysis of Axially Loaded Concrete – Filled Tube Columns with Confinement Effect, *Journal of Structural Engineering*, ASCE (2003) ; 129; 1322-9.
6. Tomii M., Ductile and Strong Columns Composed of Steel Tubes Infilled Concrete and Longitudinal Steel Bars, *Proc., 3rd Int. Conf. on Steel – Concrete Composite Structures*, Fukuoka, Japan, (1991).
7. Han LH, Concrete – Filled Tube Columns, Science Publishing Company, (2004).
8. Popovics S., A Numerical Approach to the Complete Stress-Strain Curve Concrete, Cement and Concrete Research, vol. **3**, (1973), pp. 583-599.
9. Eurocode 4. Design of composite steel and concrete structures. Part 1.1, General rules for buildings (with

- UK national application document) DD ENV 1994-1-1. London (UK): British Standards Institution; (1994).
10. Building code requirements for structural concrete and commentary, ACI 318-99. Detroit (USA): American Concrete Institute; (1999).
  11. Giakoumelis G, Lam D. Axial capacity of circular concrete-filled tube columns. *Journal of Constructional Research* (2004), **60**(7) : 1049-68.
  12. Tomii M, Yoshimura K, Morishita Y. Experimental studies on concrete filled steel tubular stub columns under concentric load ing. In: *International colloquium on stability of structures under static and dynamic load*; Washington, DC, (1977) ; 718-41.