

LE COMPORTEMENT EN FLEXION COMPOSÉE DE POTEAUX EN BÉTON ARMÉ CONFINÉS PAR DES POLYMÈRES RENFORCÉS DE FIBRES DE CARBONE (PRFC)

Mathieu Boucher-Trudeau, Patrick Paultre, Nathalie Roy et Rami Eid
Centre de recherche en génie parasismique et en dynamique des structures (CRGP)
Département de génie civil, Université de Sherbrooke

RÉSUMÉ

Le confinement est une méthode connue de réhabilitation des poteaux de ponts en béton armé. Il peut avoir pour effet d'augmenter la ductilité ainsi que la résistance en flexion de l'élément. Le béton, l'acier ou les polymères renforcés de fibres (PRF) peuvent être utilisés comme matériaux de confinement. Les PRF présentent les avantages suivants par rapport au béton et à l'acier : ils sont légers, présentent une grande résistance, sont faciles d'installation et ils résistent à la corrosion. Leur usage est maintenant reconnu par le code canadien de calcul des ponts routiers (CSA S6-06) tout comme par la norme S806-02 Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers. Les deux normes recommandent de procéder à une analyse sectionnelle pour la réhabilitation de poteaux soumis à la combinaison d'efforts axiaux et de flexion.

Toutefois, peu d'essais en laboratoire ont été réalisés sur des poteaux en béton armé confinés par des polymères renforcés de fibres de carbone (PRFC) de grandeur réelle soumis à des efforts combinés de charge axiale et de flexion. Le programme expérimental présenté comprend huit poteaux circulaires ayant un diamètre de 300 mm et 2 mètres de hauteur. Les paramètres étudiés sont le taux de charge axiale (constant durant l'essai), soit 10% et 35% de la capacité brute du poteau, la présence ou non du confinement par PRFC et l'espacement des étriers (75 mm ou 150 mm).

En plus de valider certains faits bien connus – augmentation de la résistance sous charge axiale importante et augmentation de la ductilité en général, les résultats ont permis de valider un modèle de comportement innovateur qui considère le confinement passif fourni par les étriers et par le recouvrement en matériau composite.

Introduction

Le béton est un matériau dont les propriétés mécaniques changent lorsqu'il est confiné par des pressions externes. Ce phénomène de confinement peut être mis à profit pour réhabiliter des poteaux de ponts en béton armé. En effet, le confinement peut avoir pour effet d'augmenter la ductilité ainsi que la résistance en flexion de l'élément. Toutefois, peu d'essais en laboratoire ont été réalisés sur des poteaux en béton armé confinés par des polymères renforcés de fibres de carbone (PRFC) de grandeur réelle soumis à des efforts combinés de charge axiale et de flexion. Dans le cadre de ce projet de recherche, huit poteaux en béton armé de taille réelle ont été testés sous charge de compression constante et charge latérale cyclique.

Programme expérimental

L'influence des trois paramètres suivants a été étudiée :

- Espacement des étriers de 75 (S75) et 150 mm (S150) ;
- Charge axiale constante appliquée de 10% (P10) et 35% (P35) de la capacité brute de la section;
- Une (C1) et aucune (C0) couche de PRFC autour du poteau.

Le tableau 1 présente le programme expérimental qui permet de couvrir les huit cas obtenus à partir de la combinaison de ces trois paramètres.

Tableau 1 – Programme expérimental

Identification du poteau	Espacement des étriers mm	Charge axiale % de $A_g f_c'$	Couches de PRFC
S75P10C0	75	10	0
S75P10C1	75	10	1
S75P35C0	75	35	0
S75P35C1	75	35	1
S150P10C0	150	10	0
S150P10C1	150	10	1
S150P35C0	150	35	0
S150P35C1	150	35	1

Les poteaux ont été construits selon les règles de l'art, en évitant les chevauchements de barres dans la zone potentielle de rotule plastique. Des barres d'armature en acier 400R ayant une limite élastique testée de $f_y = 415$ MPa composent les barres longitudinales alors que des barres en acier 400W ayant une limite élastique testée de $f_y = 470$ MPa ont servi à confectionner les étriers circulaires. Un béton normal de 30 MPa commandé chez le fournisseur de béton local a été coulé au laboratoire de structure du département de génie civil de l'Université de Sherbrooke. Les poteaux réhabilités comptent une couche de PRFC de marque SikaWrap Hex C103 ayant 1,016 mm d'épaisseur, possédant une résistance à la traction théorique de 849 MPa et un module élastique de 70 552 MPa. Les fibres de carbone unidirectionnelles ont été installées dans le sens circonférentiel du poteau avec un chevauchement d'environ 150 mm dans le sens circonférentiel et sans chevauchement vertical entre les différents morceaux (mesurant chacun 630 mm de largeur). La résine Sikadur 330 a été utilisée afin d'apprêter la surface alors que la résine Sikadur 300 a été utilisée pour imprégner les tissus, le tout selon la procédure recommandée par le fabricant.

Trente (30) jauges de déformation ont été installées sur les barres longitudinales et les étriers circulaires afin d'étudier en plusieurs points le comportement du poteau. De plus, les poteaux réhabilités comptent des jauges de déformation placées sur les fibres de carbone à la hauteur de la zone de rotule plastique. Des LVDTs et des potentiomètres ont permis de mesurer la courbure moyenne aux endroits importants (voir figure 1).

Les charges sont appliquées à l'aide de vérins hydrauliques de marque MTS d'une capacité de 500 kN chacun. Un vérin horizontal fixé à la tête du poteau et appuyé sur le mur de réaction applique la charge latérale. La fondation en I est attachée à la dalle d'essai du laboratoire et tient lieu d'encastrement pour le poteau. Deux vérins verticaux situés de part et d'autre du poteau permettent d'appliquer la charge axiale. Ces vérins sont libres de tourner autour d'une rotule située approximativement à la hauteur de la zone de rotule plastique prévue lors des essais. Une poutre guide en acier située au-dessus du poteau permet d'empêcher les mouvements perpendiculaires à l'axe de chargement. Le montage et les plans sont présentés à la figure 1.

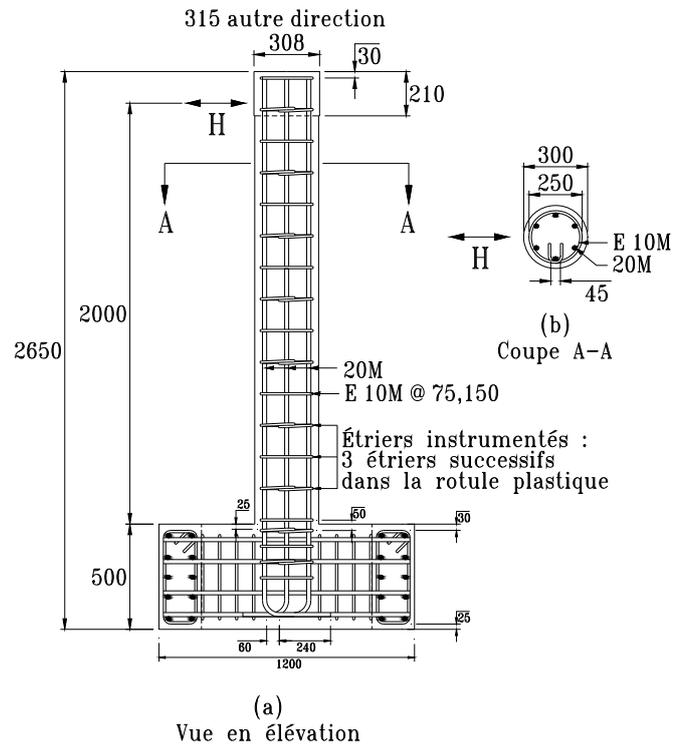


Figure 1 – Montage expérimental et plans généraux (en mm)

Les essais sont statiques et débutent avec l'application graduelle de la charge axiale jusqu'à la valeur désirée, soit 10% ou 35% de $A_g f'_c$, où A_g est l'aire brute de la section et f'_c est la résistance du béton à 28 jours. Après l'atteinte de la charge axiale, le chargement latéral cyclique débute avec le premier cycle, appliqué en contrôle par force. Ce cycle consiste à l'atteinte de $0,75M_y$ d'un côté ($+0,75M_y$), puis de l'autre ($-0,75M_y$), où M_y est le moment théorique de première plastification des armatures longitudinales. Ce cycle permet de fissurer le poteau et est suivi d'un cycle en contrôle par déplacement arrêté de chaque côté dès la première plastification des armatures longitudinales. La détection en temps réel de la plastification est possible grâce à l'observation des valeurs mesurées par les jauges de déformation collées sur les aciers d'armature dans la zone de rotule plastique. Le déplacement à la première plastification est noté pour chaque côté et le déplacement élastique (Δ_y) correspond à la moyenne des deux valeurs obtenues. Un second cycle de $\pm 1,0\Delta_y$ est effectué, puis l'essai est poursuivi avec 2 cycles de $\pm 1,5\Delta_y$, $\pm 2,0\Delta_y$, $\pm 3,0\Delta_y$ et ainsi de suite. La procédure de chargement est présentée à la figure 2. Enfin, l'essai est arrêté lorsqu'un des événements suivants se produit :

- La charge axiale ne peut être maintenue à 90% de la valeur initiale;
- La charge latérale maximale lors d'un cycle n'atteint pas 50% de la valeur maximale atteinte au cours de l'essai;
- Une barre longitudinale flambe ou rupture en traction, causant l'arrêt de l'hydraulique.

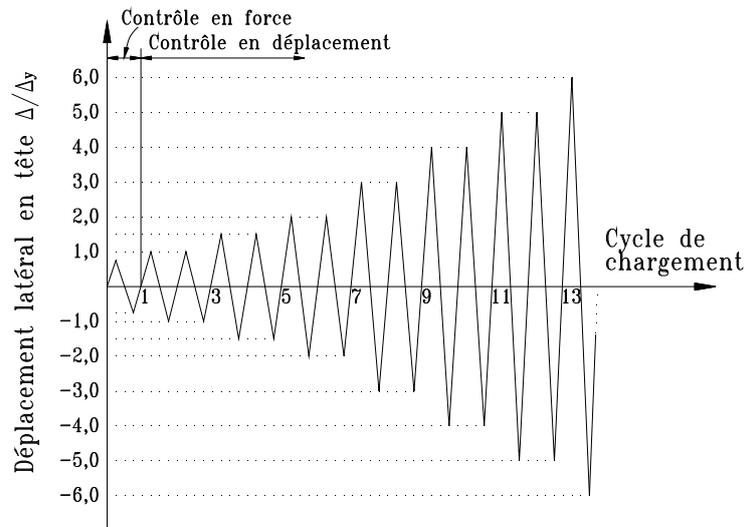


Figure 2 - Procédure de chargement pour les essais

Résultats

Les photos de deux poteaux prises juste après la fin des essais sont présentées à la figure 3. Les deux poteaux ont des étriers espacés de 75 mm et ont été soumis à une charge axiale constante égale à 10% de la capacité brute de leur section. La seule différence est que le poteau de droite comporte une couche de PRFC. Le poteau de gauche a résisté jusqu'à un déplacement de 172,5 mm alors que le poteau de droite s'est rendu à 288,1 mm. Des différences semblables ont été observées pour les autres poteaux. Une comparaison quantitative suit.

Dans le cadre du projet, les courbes force-déplacement et moment-courbure ont été générées. Afin d'avoir une idée globale du comportement des poteaux, et de façon à limiter la taille du présent article, seules les courbes force-déplacement sont présentées à la figure 4.

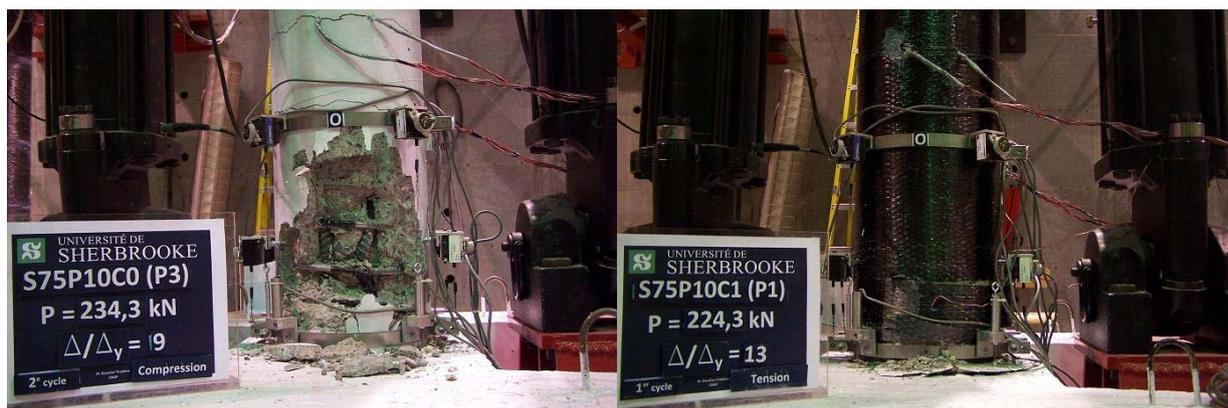
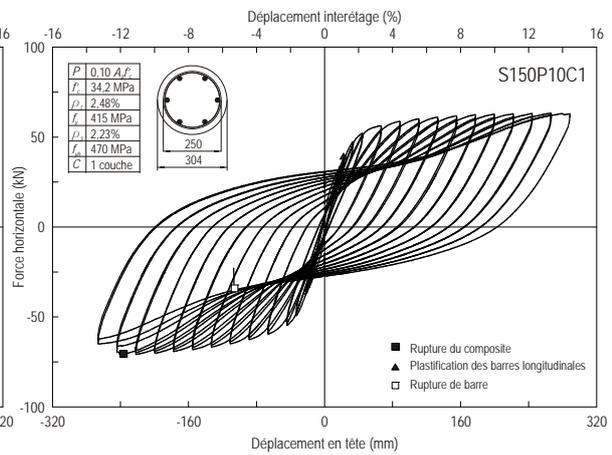
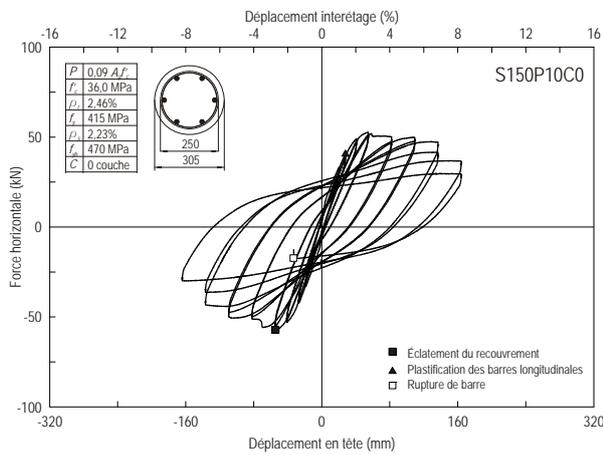
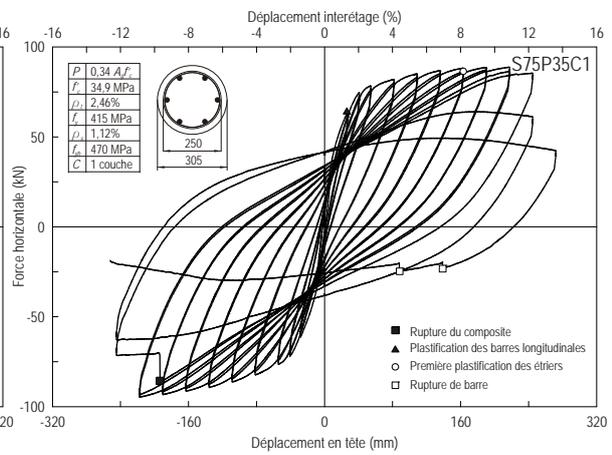
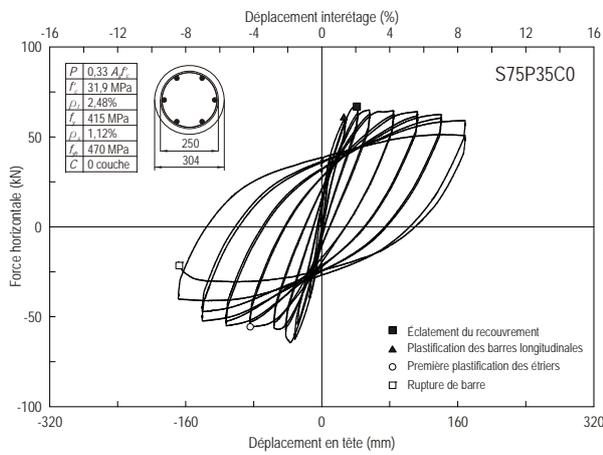
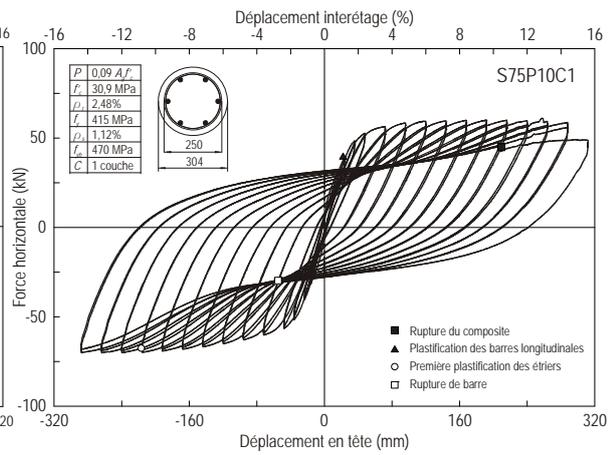
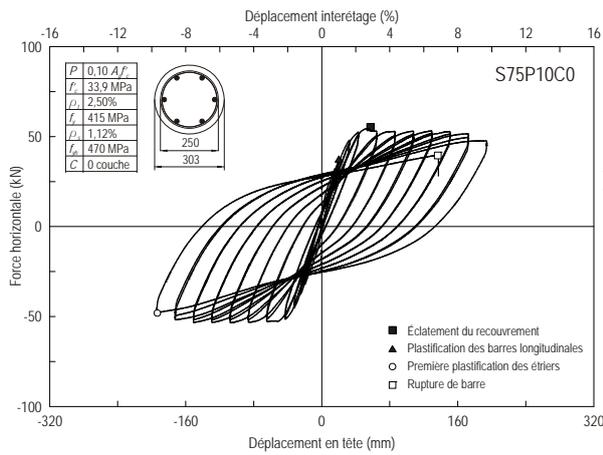


Figure 3 – Photos de poteaux après l'arrêt des essais



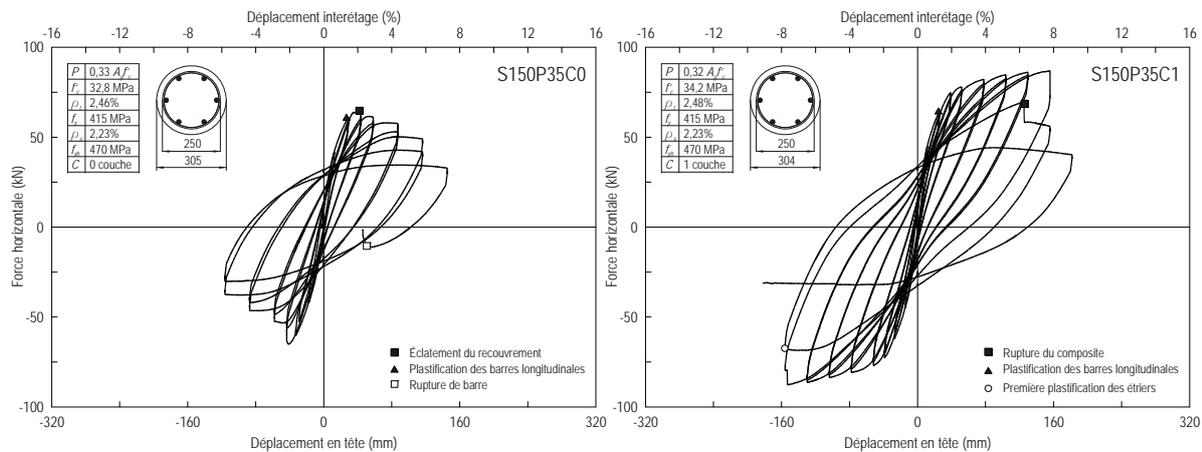


Figure 4 - Courbes force-déplacement

En comparant les courbes de la colonne de gauche (sans PRFC) avec les courbes de la colonne de droite (avec PRFC), il est évident que les déplacements ultimes augmentent avec l'ajout du PRFC. De plus, la charge latérale maximale reprise augmente avec l'ajout du confinement, bien que cette tendance soit plus forte pour les poteaux sollicités axialement à 35% de leur capacité brute. D'autre part, le comportement après la première plastification des aciers est ascendant pour les poteaux avec PRFC alors qu'il est généralement descendant pour les poteaux sans PRFC.

Tel que décrit dans Légeron et Paultre (2000), le calcul d'indices de ductilité et d'indices énergétiques permet de comparer quantitativement les poteaux entre eux. Avant de calculer ces indices, il faut tout d'abord idéaliser les courbes force-déplacement et moment-courbure de façon à calculer les valeurs idéalisées. L'idéalisation est réalisée selon les indications de la figure 5. L'aire sous la courbe enveloppe jusqu'à Δ_2 est la même que l'aire sous la courbe idéalisée. L'idéalisation de la courbe moment-courbure est effectuée de la même façon que celle de la courbe force-déplacement. La ductilité en déplacement est définie par :

$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta_2}{\Delta_{yf}}$$

alors que la ductilité en courbure est définie par :

$$\mu_{\phi} = \frac{\phi_2}{\phi_{yf}}$$

Le déplacement interétage est un paramètre simple et est basé sur le déplacement mesuré lors de la rupture :

$$\delta_u = \frac{\Delta_2}{z}$$

où z est la hauteur du poteau entre la fondation et le point d'application de la charge.

La dissipation de l'énergie est définie pour un cycle i par l'aire sous la courbe tel que :

$$E_i = \int_A^B H du .$$

L'énergie totale dissipée jusqu'à la rupture est définie comme suit :

$$E_{hysl} = \sum_{i=1}^n E_i$$

où n est le nombre de cycles jusqu'à la rupture. Pour comparer des poteaux, il est utile de normaliser cette énergie dissipée :

$$E_N = \frac{1}{H'_{\max} \Delta_{yl}} \sum_{i=1}^n E_i$$

où E_N est l'énergie dissipée normalisée.

Les indices de travail et de dommages permettent aussi de quantifier la capacité de dissipation d'énergie des éléments structuraux. Premièrement, un indice de travail facile à calculer a été défini ainsi par Gosain et coll. (1977) :

$$I_W = \sum_{i=1}^n \frac{H_i \Delta_i}{H'_{\max} \Delta_{yl}}$$

Ehsani et Wright (1990) ont présenté un indice d'endommagement qui combine l'énergie cyclique dissipée et l'énergie élastique :

$$D_{EW} = \frac{1}{H'_{\max} \Delta_{yl}} \sum_{i=1}^n E_i \left(\frac{K_i}{K_{yl}} \right) \left(\frac{\Delta_i}{\Delta_{yl}} \right)^2$$

où K_i et Δ_i sont définis à la figure 5. Tous les indices mentionnés ci-dessus ont été calculés et sont présentés au tableau 2.

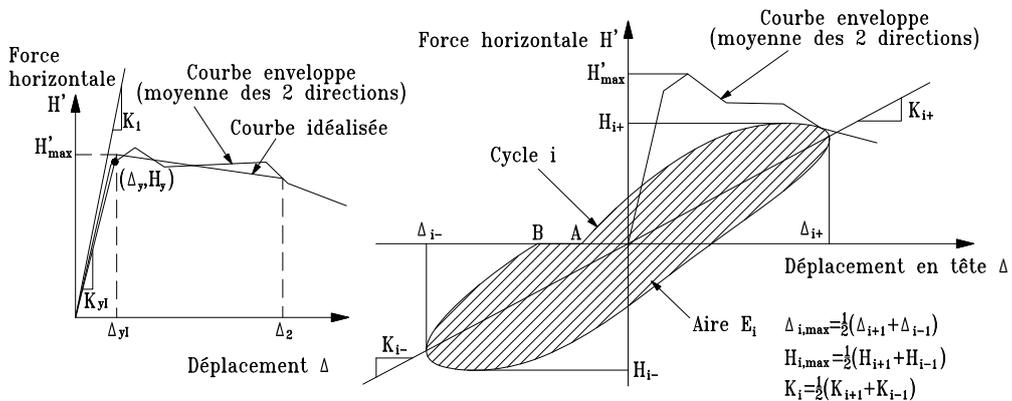


Figure 5 – Idéalisations des courbes et calcul des indices

Tableau 2 – Indices de ductilité et d'énergie

Poteau	μ_{Δ}	μ_{ϕ}	δ_u %	E_{hyst} J	E_N	I_W	D_{EW}
S75P10C0	5,6	10,9	8,6	72268	46,1	58,9	163,3
S75P10C1	8,3	17,7	14,4	156191	77,7	118,0	481,6
S75P35C0	4,6	9,3	7,0	54363	27,9	32,0	81,3
S75P35C1	6,3	10,0	10,9	162063	59,7	71,5	221,4
S150P10C0	3,8	8,5	6,8	38758	19,9	24,9	49,2
S150P10C1	7,6	12,5	13,3	158860	75,8	106,3	443,3
S150P35C0	2,7	9,1	4,4	29296	14,1	16,1	26,4
S150P35C1	4,7	8,1	7,8	81209	30,6	37,1	104,8

En comparant les poteaux non confinés avec les poteaux confinés (par exemple S75P10C0 avec le poteau S75P10C1), il est évident que la majorité des indices augmente avec l'ajout du composite. Seule l'augmentation de ductilité en courbure est faible ou inexistante pour les poteaux ayant une charge axiale de 35% de la capacité brute. Dans ce cas, c'est plutôt la charge latérale maximale qui augmente de façon appréciable.

En comparant des poteaux avec la même charge axiale et le même nombre de couches de PRFC, le confinement produit par les étriers peut être étudié. Les poteaux avec un espacement d'étriers de 75 mm se comportent tous mieux que les poteaux de 150 mm. Ici aussi, on constate que le confinement est plus efficace à un chargement axial de 10% de la capacité brute (le chargement typique pour les ponts).

Finalement, en comparant le poteau S75P10C0 avec le poteau S150P10C1 et le poteau S75P35C0 avec le poteau S150P35C1, on peut apprécier les possibilités concrètes de la réhabilitation. En effet, en prenant un poteau comportant une déficiente en armature transversale (S150) et en y ajoutant une couche de PRFC (C1), il est possible d'atteindre un comportement aussi ductile qu'un poteau comportant le double d'étriers (S75, C0), ou même mieux. Les indices liés à la capacité de dissipation d'énergie et d'endommagement suivent aussi cette tendance.

Conclusion

Le confinement est une méthode permettant d'augmenter la ductilité et la résistance en flexion des éléments en béton armé. Cependant, peu d'essais permettent de quantifier ces améliorations. Les essais réalisés dans le cadre de ce projet montrent clairement que le confinement à l'aide de PRFC augmente la ductilité ainsi que la capacité de dissipation d'énergie et d'endommagement d'un poteau donné. D'autre part, la capacité des poteaux réhabilités est maintenue après un endommagement prolongé, ce qui est bénéfique du côté de la sécurité parasismique. Finalement, il a été démontré qu'il est possible de mettre à niveau un poteau déficient en armature transversale en lui ajoutant un renforcement en PRFC.

Remerciements

Les auteurs désirent remercier Transports Québec, ISIS Canada, le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) ainsi que le Fonds québécois pour la recherche sur la nature et les technologies (FQRNT) pour leur support financier. Les auteurs remercient MM. Claude Aubé, Jason Desmarais et Laurent Thibodeau, techniciens au

département de génie civil de l'Université de Sherbrooke pour leur précieuse aide lors des divers travaux au laboratoire. Finalement, les auteurs remercient Adamou Saïdo-Sanda, Cédric Desprès, Éric Lapointe et Martin Lavictoire pour leur appui lors de la construction des poteaux.

Références

Canadian Standard Association, 2006. *Code canadien sur le calcul des ponts routiers – CAN/CSA-S6-06*. Mississauga, Ontario.

Canadian Standard Association, 2002. *Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers – CAN/CSA-S806-02*. Mississauga, Ontario.

Légeron, F. et Paultre, P., 2000. Behavior of High-Strength Concrete Columns under Cyclic Flexure and Constant Axial Load, *ACI Structural Journal* 97 (4), 591-601.

Gosain, K.N., Brown, H.R. et Jirsa, J.O., 1977. Shear Requirements for Load Reversals on RC Members. *Journal of Structural Division, ASCE* 103 (7), 1461-1476.

Ehsani, M.R. et Wright, J.K., 1990. Confinement Steel Requirements for Connections in Ductile Frames. *Journal of Structural Division, ASCE* 116 (3), 751-767.