RENFORCEMENT DE DALLES EPAISSES
VOLET EXPERIMENTAL ET NUMERIQUE

Rapport final
GCT-2012-01
Département de génie civil

Présenté à
Sylvain Goulet ing.
Chargé de projet
Ministère des transports du Québec

Par
Josée Bastien, ing. PhD, responsable
Marc Jolin, ing. PhD

Février 2012

Avant-Propos

Le présent document est largement inspiré de rapports d'étapes antérieurs (GCT-2009-07, GCT-2009-08, GCI-2010-01) auxquels ont contribué des étudiants gradués et professionnels de recherche sous la direction de Josée Bastien, professeure titulaire, et de Marc Jolin, professeur agrégé de l'Université Laval.

Table des matières

Avant-Propos ii
Table des matières iii
1 Contexte 1
2 Étude 2
2.1 Introduction 2
2.2 Conclusions 2
2.3 Études futures 6
2.4 Recommandations 7
3 Bibliographie 8

1 Contexte

Au Québec, les infrastructures routières en béton se détériorent rapidement. Le ministère des transports du Québec possède un grand nombre de structures en béton, notamment des structures de type dalle épaisse construites majoritairement dans les années 50 à 70. Les charges qui sollicitent ces structures sont aujourd'hui beaucoup plus importantes que celles prévues lors de leur conception. De plus, ce type de structure présente parfois une lacune au niveau de la résistance au cisaillement, ce qui peut entrainer une rupture fragile de l'ouvrage.

L'Université Laval, en collaboration avec le MTQ, a donc mis en place un projet qui vise à évaluer la capacité réelle en cisaillement des structures de type dalle épaisse et qui permettra d'évaluer l'efficacité de certains types de renforcement. Le projet consiste à soumettre des dalles grandeurs réelles renforcées et non renforcées à des sollicitations en cisaillement. Ces essais permettront de déterminer l'efficacité du renforcement en terme de gain en résistance à l'ultime en cisaillement et de comportement à la rupture. Des études numériques ont également été menées afin de modéliser le comportement des corps d'épreuve sous sollicitation en cisaillement.

Le présent document fait suite aux rapports GCT-2009-07, GCT-2009-08, GCI-2010-01 présentés au Ministère des transports du Québec dans le contexte de l'étude des dalles épaisses renforcées en cisaillement.

Le présent document résume les conclusions générales des rapports antérieurs liés à cette étude. Il est conseillé au lecteur de se familiariser avec les rapports précédents afin de bien saisir la portée du présent document.

2 Étude

2.1 Introduction

La fragilité des ruptures en cisaillement des dalles épaisses en béton armé ne contenant pas d'armature de cisaillement est préoccupante. En effet, la compréhension récente de certains mécanismes de résistance au cisaillement du béton armé, notamment l'effet d'échelle en cisaillement, combiné à la dégradation des structures routières, amène un questionnement sur leur résistance en cisaillement. Pour pallier à cette lacune, une méthode de renforcement en cisaillement a été évaluée. Pour ce faire, trois groupes de dalles de géométries différentes ont été confectionnés. La moitié de ces dalles a alors été renforcée par l'ajout de barres d'armature insérées dans des trous verticaux percés à partir du dessus de la dalle et injectés d'époxy. Ces dalles ont ensuite été soumises à des essais de flexion en trois points pour en déterminer la résistance au cisaillement. Par la suite, une étude numérique du comportement des dalles renforcées a été produite. Les principales conclusions de ces études expérimentale et numérique sont présentées dans ce qui suit.

2.2 Conclusions

Les essais sur les dalles non-renforcées en cisaillement permettent de confirmer certains aspects sur la résistance au cisaillement des poutres en béton armé sans armature de cisaillement. Tout d'abord, les équations de la norme CAN/CSA-S6-06 ont permis de prédire la résistance des dalles non-renforcées en cisaillement avec un écart maximum de 19%. Notre expérience a montré que ces équations sous-estiment la capacité des poutres peu profondes fortement armé en flexion, alors qu'elles surestiment celle des poutres profondes faiblement armé en flexion. Pour ce dernier type de poutre, l'équation proposée par Sherwood (Sherwood, Lubell et al. 2006) semble offrir une meilleure marge de sécurité. Également, la rupture en cisaillement des dalles survient sans signe avant-coureur, la flèche et la fissuration ne laissant présager aucun problème. Enfin, la perte de capacité suite à la rupture en cisaillement est très grande et très rapide.

L'ajout de renforcement en cisaillement modifie le comportement en cisaillement des dalles. Les principales constatations et conclusions associées à l'ajout de renforcement en cisaillement ancrés à l'aide d'adhésif époxy sont résumés ci-après:

- Comparativement au comportement des dalles non renforcées en cisaillement;
    - la flèche à la rupture des dalles 1B est près de deux fois plus élevée alors que la charge maximale est augmentée de 45%. Il y a une faible réserve de capacité suite à la rupture, bien que le comportement demeure plutôt fragile.
    - la flèche à la rupture des dalles 2B est un peu plus grande, alors qu'il n'y a pas une augmentation significative de la charge maximale .
    - la flèche à la rupture des dalles 3B est plus de deux fois supérieure, alors que la charge maximale est augmentée de 45% .
- Le comportement de chacune des dalles de ce projet se compare avec celui de poutres renforcées avec des étriers conventionnels verticaux. Le comportement après la charge maximale est cependant plus fragile. La perte d'ancrage des barres entraine une diminution plus rapide de la capacité qu'avec des étriers conventionnels.
- Comparativement aux dalles non renforcées en cisaillement, il y a une nette augmentation de l'énergie emmagasinée avant la rupture pour les dalles de types 1 et 3, alors que pour les dalles de type 2, l'augmentation n'est pas significative .
- L'ajout de renforcement de cisaillement :
    - ne permet pas de retarder l'apparition des premières fissures de cisaillement;
    - réduit la vitesse de propagation des fissures;
    - augmente l'importance de la fissuration avant l'atteinte de la rupture.
- La largeur des fissures à la rupture demeure modérée c'est-à-dire de un à trois millimètres au maximum. Par contre, leur présence, à une charge largement inférieure à la charge maximale, permet leur détection par inspection visuelle.

- L’étude des déformations des barres de renforcement en cisaillement montre que les efforts peuvent être transmis du béton vers les renforcements au moment de la fissuration en cisaillement et que les renforcements permettent une redistribution des efforts d’une barre de renforcement à une autre ou d’une portion de la structure vers une autre. Cependant :

    - Pour les configurations étudiées, avec un espacement longitudinal de 0,75d_v, le glissement successif des barres, qui perdaient leur ancrage, faisait en sorte que seule une rangée de barre apportait une contribution significative à la résistance au moment de la rupture. Cette contribution maximale de l’ordre de A_vF_y).correspond environ au gain de résistance observé pour les dalles de type 1 et 3.

    - Une réduction de l’espacement longitudinal des armatures de cisaillement pourrait permettre la contribution d’une seconde rangée de barres et ainsi améliorer le comportement et la sécurité du renforcement.

- La performance des dalles 2B, en terme de gain de résistance et de comportement à la rupture, est inférieure à celle des dalles 1B et 3B. Cette situation peut être expliquée par une multitude de facteurs. La taille des barres, l’écart entre la taille des barres et celle des trous, la longueur des barres, le type de confinement aux extrémités des barres par les armatures longitudinales et la présence d’instrumentation semblent être des facteurs qui pourraient avoir pénalisé les dalles 2B par rapport aux autres dalles renforcées en cisaillement. Par conséquent :

    - L’utilisation de barres 10M n’est pas recommandé pour ce type de renforcement étant donné que les raisons ayant entrainé la mauvaise performance des dalles 2B n’ont pu être déterminées avec précision.

- L’espacement transversal maximal des renforcements pourrait être revu à la baisse pour tenir compte du peu de confinement qu’offrent les barres de renforcement droites.

Les résultats obtenus et la gamme limitée de configurations étudiées ne permettent pas, pour l’instant, de développer une méthode de calcul pour ce type de renforcement. Bien que

le renforcement des corps d'épreuve de ce projet se soit déroulé dans un contexte différent de celui d'un chantier de construction, la facilité de mise en place d'un tel renforcement a pu être constatée. En effet, le percement et le nettoyage des trous, l'injection de l'époxy et la mise en place de l'armature s'effectuent aisément dans un temps raisonnable. De plus, la méthode de nettoyage et d'injection proposée par HILTI permet d'obtenir une bonne propreté des trous et une faible quantité de bulles d'air entrainées dans l'époxy. Par contre, l'enchainement des activités doit tenir compte de la conservation de la propreté des trous de forage et du temps de travail autorisé par le produit d'injection.

En ce qui concerne la modélisation numérique du comportement des dalles (armées ou non armées en cisaillement), celle-ci est relativement complexe en raison de la rupture localisée et fragile des éléments. Il est alors difficile de saisir avec précision la progression de la fissuration et de la perte de rigidité des éléments en béton qui en résulte jusqu'à ultime. Certains auteurs ont également rapporté cette difficulté dans la littérature et il en est de même pour *ANSYS* et pour le logiciel *Response 2000* (Parvanova et al, 2001; Bentz, 2000) autre outil couramment utilisé.
Néanmoins, la modélisation numérique a permis de corroborer un ensemble de constats expérimentaux.

- Dans un premier temps, les schémas de fissuration numériques et les courbes charge-flèches obtenues numériquement donnent des informations générales intéressantes sur les comportements globaux. D'une part, l'introduction des armatures additionnelles de renforcement en cisaillement permettent de freiner la progression de la fissuration et ce faisant permettent d'atteindre des chargements ultimes plus importants. Ces chargements ultimes obtenus par les modèles sont du même ordre de grandeur que ceux obtenus en laboratoire.

Les schémas de fissuration numériques obtenus présentés indiquent bien les zones de fissurations, leur progression et leur orientation et sont en conformité avec les résultats expérimentaux obtenus. Puisque le modèle de fissuration utilisé est diffus, les barres de renforcement travaillent de façon plus globale qu'elles ne le font expérimentalement.

Toutefois le modèle numérique confirme que ces barres atteignent des niveaux de sollicitation nettement au-delà de leur limite élastique.

D'autre part, il est rapidement apparu que la modélisation numérique non-linéaire de ponts continus sur plusieurs portées s'avéraient, en raison de la nature localisée et fragile des ruptures anticipées ainsi qu'en raison de la nature non linéaire du comportement du béton, trop lourde pour obtenir des résultats valables. En effet, ce type d'analyse est fort exigente en termes de capacité de calcul et d'autre part, les non linéarités entraînent des difficultés de convergence.

.

2.3 Études futures

Cette étude a permis de mettre **e**n lumière quelques particularités des renforcements en cisaillement ancrés à l'aide d'époxy. Plusieurs paramètres n'ont cependant pas été pris en compte, ce qui laisse encore plusieurs questions en suspens avant d'être en mesure de proposer une méthode de calcul.

Ainsi, cette étude s'est concentrée sur le gain possible en capacité compte tenu de l'utilisation d'un minimum de renforcement (espacement maximum prévu par le norme CAN/CSA S6-06). Il serait donc intéressant d'évaluer différents espacements longitudinaux et transversaux de barres et un positionnement à 45° pour déterminer le moyen le plus efficace pour gagner en capacité dans l'éventualité où le gain de capacité avec les configurations étudiées ici serait trop faible pour certaines applications.

Également le fait qu'il n'y ait aucune réserve de capacité suite à l'atteinte de la capacité maximale est préoccupant. Dans cette optique, l'ancrage des barres à une ou aux deux extrémités pourrait être une alternative. L'étude de configurations supplémentaires pourrait également permettre de développer une méthode de calcul pour ce type de renforcement.

2.4 Recommandations

Cette étude a permis de mettre en lumière plusieurs particularités des renforcements en cisaillement réalisés à l'aide de barres droites ancrés à l'aide d'époxy. Une attention plus particulière devrait être portée aux points suivants :

- Puisque les raisons ayant mené au comportement des dalles de type 2 ne sont pas connues hors de tout doute, il n'est pas recommandé, pour l'instant, d'utiliser les barres 10M pour ce type de renforcement.

- Les essais expérimentaux réalisés montrent que les espacements longitudinaux des armatures de cisaillement ne permettent pas aux fissures d'être interceptées efficacement par plusieurs barres de renforcement (pour les conditions géométriques étudiés). Il est donc recommandé de réduire l'espacement longitudinal des renforcements en cisaillement.

- Il apparaît fort probable que le confinement transversal apporté par des armatures droites soit inférieur au confinement apporté par les armatures de cisaillement conventionnels. L'étude expérimentale réalisée ne permet toutefois pas de définir plus précisément cet aspect.

3 Bibliographie

Angelakos, D., E. C. Bentz, et al. (2001). "Effect of Concrete Strength and Minimum Stirrups on Shear Strength of Large Members." ACI Structural Journal **98**(3): 291-300.

Bazant, Z. P. and M. T. Kazemi (1991). "Size Effect on Diagonal Shear Failure of Beams Without Stirrups." ACI Structural Journal **88**(3): 268-276.

Bentz, E. C. (2005). "Empirical Modeling of Reinforced Concrete Shear Strength Size Effect for Members without Stirrups." ACI Structural Journal **102**(2): 232-241.

Collins, M. P. and D. Kuchma (1999). "How Safe Are Our Large, Lightly Reinforced Concrete Beams, Slabs, and Footings?" ACI Structural Journal **96**(4): 482-490.

Daniel A Kuchma, M. P. C. (1998). "Advances in understanding shear performance of concrete structures." Progress in Structural Engineering and Materials **1**(4): 360-369.

Frosch, R. J. (2000). "Behavior of Large-Scale Reinforced Concrete Beams with Minimum Shear Reinforcement." ACI Structural Journal **97**(6): 814-820.

Hsiung, W. and G. C. Frantz (1985). "TRANSVERSE STIRRUP SPACING IN R/C BEAMS." Journal of Structural Engineering **111**(2): 353-362.

Ince, R., E. Yalcin, et al. (2007). "Size-dependent response of dowel action in R.C. members." Engineering Structures **29**(6): 955-961.

Kani, G. N. J. (1966). "Basic Facts Concerning Shear Failure." ACI Journal Proceedings **63**(6): 675-692.

Kani, G. N. J. (1967). "How Safe are Our Large Reinforced Concrete Beams?" ACI Journal Proceedings **64**(3): 128-141.

Kim, J.-K. and Y.-D. Park (1996). "Prediction of Shear Strength of Reinforced Concrete Beams without Web Reinforcement " Material Journal **96**(3): 213-222.

Lorenzis, L. D. and A. Nanni (2001). "Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams with Near-Surface Mounted Fiber-Reinforced Polymer Rods." ACI Structural Journal **98**(1): 60-68.

Lubell, A. S., E. C. Bentz, et al. (2009). "Shear Reinforcement Spacing in Wide Members." ACI Structural Journal **106**(2): 205-214.

Sherwood, E. G., E. C. Bentz, et al. (2007). "Effect of Aggregate Size on Beam-Shear Strength of Thick Slabs." ACI Structural Journal **104**(2): 180-190.

Sherwood, E. G., A. S. Lubell, et al. (2006). "One-Way Shear Strength of Thick Slabs and Wide Beams." ACI Structural Journal **103**(6): 794-802.

Tompos, E. J. and R. J. Frosch (2002). "Influence of Beam Size, Longitudinal Reinforcement, and Stirrup Effectiveness on Concrete Shear Strength." ACI Structural Journal **99**(5): 559-567.