

Béton fibré à ultra-hautes performances (BFUP) et les ouvrages d'art en Amérique du Nord

Gaston Doiron, M.Eng, P.Eng.
Lafarge Canada Inc. – Ductal, Toronto, Ontario

Résumé

Le BFUP (béton fibré à ultra-hautes performances) utilisé avec des éléments préfabriqués permet de minimiser les impacts de la construction d'ouvrages d'art sur la circulation; offre une durée de vie accrue et réduit les coûts d'entretien. Un aperçu des principales caractéristiques du BFUP et leurs impacts sur la durabilité des ouvrages sera présenté. Un sommaire des projets achevés en Amérique du Nord sera fourni. Les applications et les techniques utilisées pour le coulage sur place du BFUP seront examinées. Le type de joints (transversaux, longitudinaux, connexions entre la poutre et le tablier), l'équipement, le contrôle de la qualité, les méthodes de pose, la cure, etc. seront discutés en détail. Un exposé des techniques prometteuses, tel que l'utilisation de dalles gaufrées préfabriquées en BFUP, sera présenté, et les étapes d'un projet typique seront expliquées.

Introduction

Le BFUP est un béton avec une résistance en compression supérieure à 150 MPa. Le plus gros agrégat est de la grosseur d'un grain de sable (moins de 1 mm de diamètre) et de courtes fibres (0.2 mm de diamètre x 12 mm de longueur) fournissent une résistance en flexion. La résistance extrême en compression et la capacité de se déformer avec la formation de micro fissures sont deux caractéristiques importantes d'un BFUP. Ce béton est en usage en Amérique du Nord depuis plus de 15 ans. Son utilisation dans les ouvrages d'art à commencer ici au Québec en 1997 avec la construction du premier pont en BFUP au monde à Sherbrooke. Ce pont de 60 m est composé de 6 segments de treillis post-tendus. Le tablier ne fait que 30 mm d'épaisseur. Si vous en avez l'occasion, je vous invite à le visiter.





La flèche rouge montre l'endroit où la passerelle traverse le cours d'eau. Google map

Caractéristiques du BFUP

La résistance en compression, la durabilité et la faible porosité sont toutes des propriétés recherchées pour la construction d'ouvrages qui vont avoir une durée de vie bien au-delà des 40 à 50 ans de nos structures existantes. Couplés avec des tabliers en béton hautes performances avec armature composite, les ouvrages d'art peuvent facilement atteindre 75 ans. Si toutes les composantes sont en BFUP, la durée de vie sera de plusieurs centaines d'années. Le BFUP s'inscrit donc dans une démarche pour minimiser le temps de construction et réduire les coûts d'entretien à court et à long terme. Évidemment une étude doit être faite pour déterminer le système optimum en tenant compte d'une foule de facteurs.

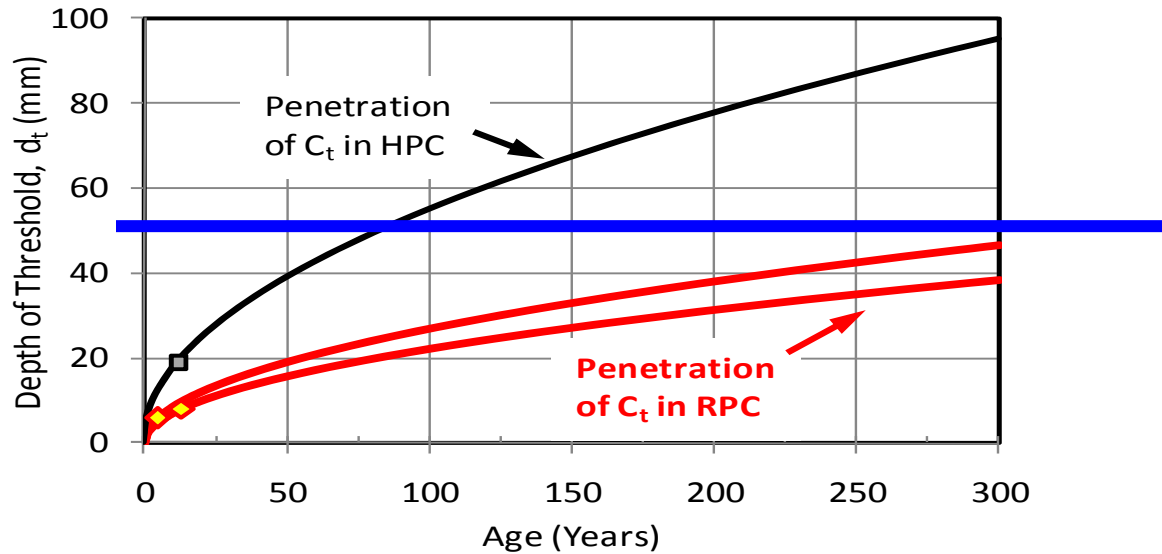
La clé du mélange pour un BFUP est l'eau ou plus précisément la très petite quantité d'eau qui est utilisée (ratio eau/ciment +/- 0.2). Pour que ce mélange puisse fonctionner avec si peu d'eau un adjuvant et une matrice avec de très fines particules sont utilisés. L'optimisation granulométrique du mélange doit être très précise. Les composantes sont sélectionnées avec des dimensions relatives qui permettent aux particules de rouler l'une sur l'autre et créer un produit extrêmement compact avec de minuscules porosités discontinues. Comparés à un béton normal, les constituants du BFUP font en sorte que le comportement du produit final est littéralement à une autre échelle.

Propriétés	béton	haute-performance	BFUP
Contenu eau/ciment	0.40 – 0.70	0.24 – 0.35	0.14 – 0.25
Dimension max. des agrégats (mm)	20 – 25	10 – 15	0.4 – 0.6
Résistance en compression (MPa)	20 – 40	40 – 100	150 - 225
Résistance en flexion (avant fissures) (MPa)	0	0	20 - 60
Résistance à l'abrasion kg/m ²	1	0.08	0.01
Pénétration des chlorures (nombre de coulomb)	> 2000	500 – 2000	< 100

(sommaire adapté de divers sources)

Une autre caractéristique du BFUP est sa fluidité. C'est un béton qui est pour ainsi dire auto-plaçant et qui enrobe bien les armatures. Il ne nécessite aucune vibration pour la mise en place. Cette fluidité joue un rôle important dans utilisation du BFUP pour les ouvrages d'art.

Divers tests de durabilité ont démontré que le BFUP a une porosité extrêmement faible. Donc, c'est le matériau idéal pour faire face aux cycles de gel et dégel et ralentir les effets des chlorures. Depuis 1996 des spécimens de BFUP font partis de l'étude menée par New Brunswick University qui est en charge du projet à Treat Island Maine pour le US Army Corps of Engineers. [1]



Predicted Rate of Penetration of $C_t = 0.05\%$ ^[1]

Le quai est à mi-marrée, donc l'hiver il est constamment exposé au cycle de gel et dégel. Il est possible d'extrapoler les résultats des 16 dernières années pour prédire que le BFUP comparé au béton hautes performances offre une résistance à la pénétration des chlorures exceptionnelle d'au moins 10 fois supérieure.

Pour ce qui est de la dureté, des tests d'abrasion [2] permettent de démontrer que le BFUP a une dureté similaire à une pierre naturelle telle que le granite.

Fibres métalliques vs organiques (PVA)

Le BFUP (dans le cas de Lafarge) est une gamme de produits et deux types principaux de fibres (2 à 4 % en volume) sont utilisés selon l'application. Pour les joints ou applications structurales, la fibre métallique (résistance en tension de 2,600 MPa) offre la meilleure performance. Cependant, si les efforts sont moindres, des fibres organiques peuvent être utilisées. La fibre organique fut utilisée dans les applications où un nouveau tablier fut installé par-dessus un tablier existant. Dans ce cas spécifique, la largeur du pont fut accrue en allongeant le tablier en porte-à-faux de chaque côté du tablier existant. Ici, les joints ne sont pas sollicités de façon conventionnelle, donc la résistance additionnelle des fibres métalliques n'est pas nécessaire et on peut utiliser les fibres organiques.



Joint complété – Noden Causeway



Installation du nouveau tablier – pont Current River

Structures complétés en Amérique du Nord

Le BFUP se retrouve dans de nombreux éléments structuraux. Que se soit pour l'optimisation d'une poutre, les joints entre panneaux préfabriqués ou des dalles gauffrées, chaque application prend avantage des propriétés qu'offre le BFUP par rapport aux bétons normaux ou de haute performance pour faciliter la construction d'ouvrages d'art.

Poutres en BFUP

L'un des premiers essais est d'évidemment de répliquer les formes de poutres utilisées dans la construction. La Federal Highways Administration (FHWA) fut l'une des institutions en Amérique du Nord qui s'est intéressée au BFUP au début des années 2000 [2]. De nombreux projets de recherches furent effectués pour valider les propriétés du BFUP et il est vite devenu apparent que ce matériau pourrait jouer un rôle important dans la réfection d'ouvrage existant et la construction de nouveaux ponts avec une bien plus longue durée de vie comparée à tout ce qui fut construit par le passé. Des poutres en I similaire à celles qui sont utilisées par l'industrie furent coulées en BFUP. Dans ces cas-ci, du point de vue armature, les étiers ne sont plus nécessaires. Le BFUP peut prendre les efforts de cisaillement. Un autre aspect important de ce matériau est sa capacité d'atteindre sa résistance ultime en compression après 3 jours de cure dans un environnement contrôlé où la température est maintenue à 90 degrés Celsius avec une humidité relative de 90%. Toutes les poutres peuvent être fabriquées et cette cure spéciale faite une seule fois pour tout le groupe de poutres. De cette façon, les poutres peuvent être livrées au site plusieurs semaines à l'avance. Des poutres en « bulb tee » furent également fabriquées avec le BFUP. Il y a actuellement 5 ponts aux Etats-Unis qui furent construits en utilisant des poutres en BFUP. La majorité de ces structures font parties de projets spéciaux où des fonds de

recherches étaient disponibles pour tester et valider ce type de construction. On s'est alors posé la question suivante: quel est le profil optimal d'une poutre en BFUP pour un ouvrage d'art? La réponse : un élément qui incorpore le tablier et des poutres profilées. La forme se rapproche de la lettre grecque PI.



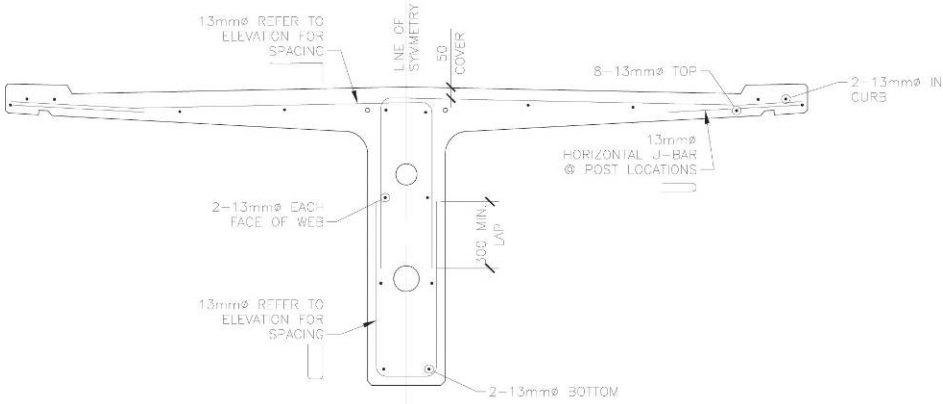
Installation des poutres – pont Buchanan County, Iowa

Ce système fut installé et testé au laboratoire de la FHWA en 2008 [3]. On peut comprendre que c'est un système très efficace et pour construction rapide. Cependant, la fabrication des moules et la coulée de ce type d'éléments ne sont pas habituelles et nécessitent une attention particulière.

Un autre exemple de poutre unique est la poutre en T pour deux passerelles pour piétons et cyclistes à Calgary. La poutre centrale de 33.6 m entre 2 appuis avec un tablier de 3.6 m de largeur et une épaisseur de 350 mm pour la poutre, utilise 40 m³ de matériel [4].



photos et diagrammes: Cohos Evamy, passerelle Glenmore en haut et Country Hills ci-dessus



Coulage sur site de joints pour systèmes de ponts préfabriqués

Suite à diverses discussions avec les représentants des ministères des transports au Canada et aux États-Unis, le concept de joint coulé sur place pour les éléments de dalles préfabriquées a pris de l'ampleur à partir de 2006. Rainy Lake, un pont au nord-ouest de l'Ontario est le premier ouvrage en Amérique du Nord où le BFUP fut utilisé pour ce type de construction.



Pont Rainy Lake 2006



Pont Rainy Lake avec couche de bitume 2010



Exemple de joint



Exemple de clés

Comme vous le savez sûrement, le joint entre les éléments préfabriqués était le lien faible du système par le passé. Un joint typique (longitudinal ou transversal) avait par le passé une largeur de 400 à 600 mm avec un grand nombre de barres d'armature afin de pouvoir développer la résistance requise entre les panneaux. La venue du BFUP change tout ceci pour grâce à la grande résistance du BFUP pour les tests de traction. La longueur de développement requise pour une barre d'armature est très courte comparée au béton normal. De nombreux tests par la FHWA ont confirmé qu'un joint d'une largeur de 150 mm était suffisante pour résister aux efforts avec des barres #5 (15M) et ceci peu importe le type de barre (i.e. acier normal, inox, fibre de verre). Maintenant, la majorité des joints utilisés ont 200 mm ou moins de largeur et les barres d'armature n'ont pas besoin de se toucher d'un panneau à l'autre. Ceci permet le design de panneaux avec barres qui sont espacés afin d'éliminer le contact entre elles. Par le fait même, la pose des panneaux préfabriqués sur les poutres est simplifiée et plus rapide. Le fait que le joint soit maintenant si petit veut dire que les quantités requises de BFUP sont réduites et la coulée du joint plus rapide.

En plus des joints longitudinaux et transversaux, il faut également considérer l'action composite entre le tablier et les poutres. Les goujons sont installés dans une série de clés. Ces clés sont reliées entre elles avec espace entre le dessous du tablier et la poutre d'au moins 25 mm. Comme le BFUP est auto plaçant, le matériel va se répandre d'une clé à l'autre et remplir complètement la cavité entre le tablier et la poutre.



Notez que nous pouvons également modifier la fabrication des panneaux préfabriqués pour éliminer les ouvertures pour les clés sur la surface supérieure de tablier. Les panneaux sont coulés avec des cavités qui permettent d'installer à l'avance les goujons. Le panneau est déposé sur les poutres et les goujons. Le BFUP sera maintenant introduit à un joint transversal et le matériel va se déplacer sous le tablier et remplir toutes ces cavités. Ce processus offre donc une meilleure esthétique si la surface du tablier n'est pas recouverte d'un matériau d'usure.

La forme et la construction des joints avant la coulée du BFUP est importante. Par exemple, pour simplifier la construction et éliminer coffrages inférieurs. Nous suggérons la fabrication de panneaux avec des côtés en forme de clé. C'est-à-dire que l'espace entre les panneaux pour les bords inférieurs peut être dimensionné de telle sorte que l'utilisation de bandes de mousse EVA (éthylène vinyle acétate) de 25 mm d'épaisseur par exemple soit suffisante. Les bandes EVA

sont collées à l'un des panneaux avant la pose et l'autre panneau vient se coller contre ce dernier. Il en résulte un joint étanche qui peut rester en place donc pas besoin d'aller sous le tablier pour retirer un coffrage. Des bandes de mousse peuvent également être utilisées pour sceller le joint entre le dessous du tablier et les poutres. Ici, le poids du tablier procure une bonne étanchéité.

Le BFUP offre une excellente alternative pour la construction avec éléments préfabriqués car le joint devient maintenant l'élément le plus solide de l'assemblage. Évidemment, la construction avec éléments préfabriqués permet un meilleur contrôle des composantes car elles sont fabriquées dans un environnement contrôlé et peuvent être fabriquées à l'avance et être disponibles lorsque le site est prêt. L'autre aspect intéressant est que ce système peut être utilisé en régions éloignées. Ceci est une approche que le ministère des transports de l'Ontario utilise depuis 2006. Jusqu'à maintenant, quinze ouvrages ont été construits avec le BFUP comme matériau pour les joints dans le nord ouest de l'Ontario.

Construction de ponts avec BFUP en Amérique du Nord

Année	Pont	Localité	Usage
1997	Passerelle à Sherbrooke	rivière Magog, Sherbrooke, QC	tout le pont sauf tubes inox
2003	FHWA poutres PI	Langley, VA	2 poutres en PI
2005	Wapello/Mars Hill	Wapello County, Iowa	3 poutres in I de 33.5 m
2006	Rainy Lake	près de Fort Frances, ON	joints, clés et bordures
2007	Passerelle Glenmore	Calgary, AB	poutre centrale 33.6 m en T
2007	Sunshine Creek	ouest de Thunder Bay, ON	joints et bordures
2008	Cat Point Creek	Richmond, Virginie	5 poutres (bulb-tee) 24.3 m
2008	Hawk Lake	est de Kenora, ON	joints et bordures
2008	Jakway Park Bridge	Buchanan County, Iowa	3 poutres en PI
2008	Passerelle Country Hills	Calgary, AB	poutre centrale 33.6 m en T
2009	Buller Creek	nord de Vermillon Bay, ON	joints et bordures
2009	Canandaigua Outlet	Village of Lyons, New York	8 poutres (bulb-tee) 26 m
2009	Log River	sud de Nestor Falls, ON	joints et bordures
2009	Otego Creek	Oneonta, New York	joints et clés
2010	Chukuni River	nord de Ear Falls, ON	joints, clés et bordures
2010	Eagle River	est de Vermillon Bay, ON	joints, bordures, joints d'expansion
2010	LaValle River	ouest de Fort Frances, ON	joints et bordures
2010	Mathers Creek	au nord d'Emo, ON	joints, clés et bordures
2010	Wabigoon	nord de Vermillon Bay, ON	joints, bordures, coffrage pour pieux
2011	Bennett Creek	route 248 Greenwood, New York	joints
2011	Current River	Thunder Bay, ON	joints et clés
2011	Keg Creek	route US 6, Iowa	joints, clés et bordures
2011	Fingerboard	Staten Island, New York	joints
2011	MacKenzie River	nord de Thunder Bay, ON	joints, clés et bordures
2011	Noden Causeway	est de Fort Frances, ON	joints et clés
2011	Ramapo River	village of Sloatsburg, New York	joints et clés
2011	Shashawandah	Kettle Point, ON	joints, clés et bordures
2011	Steel River	est de Terrace Bay, ON	joints, clés et bordures
2011	Wabigoon	ouest de Dryden, ON	joints et clés
2011	Wapello County	Wapello County, Iowa	dalles gaufrées, joints et clés
2011	Whitemans Creek	près de Brantford, ON	joints, clés, coulis pour pieux
2011/12	Route 42 – pont de 100 pi.	nord ouest état de New York	joints et clés construction en hiver
2011/12	Route 42 – pont de 150 pi.	nord ouest état de New York	joints et clés construction en hiver

Autres systèmes et applications possibles pour le BFUP

Joints pour dalles d'approches

Si le tablier d'un pont est préfabriqué, les dalles d'approches peuvent l'être également. Ceci fait normalement parti du principe de construction accélérée. Donc, une fois le tablier complété, le joint est coulé entre les dalles d'approches et le tablier.



Joints au-dessus des piliers intermédiaires

Pour les ponts avec plusieurs travées, le BFUP peut également être utilisé pour assurer une continuité dans le tablier. Dans ce cas-ci, le joint est plus large que ceux pour les joints transversaux et longitudinaux.



Courbes/Parapets

Selon le design du pont, le garde-fou peut prendre diverses formes. Souvent c'est simplement une courbe en béton d'environ 300 mm de hauteur où l'on fixe un système de balustrades. Cette section en béton peut faire partie du panneau préfabriqué. Ce joint est coulé au même moment que les joints transversaux. Donc, du point de vue travail sur le chantier, ceci est plus rapide car on n'a pas besoin d'attendre la cure sur place de cette courbe.



Dans certains cas, un garde-fou plus substantiel et un muret en béton est requis. Ce muret peut être préfabriqué en sections et installé sur le chantier en utilisant le BFUP comme illustré. C'est une autre option pour une construction accélérée.



Pieux

Le pieu traditionnel d'acier ou de béton va se détériorer au cours des années. Ceci sera encore plus prononcé si le système est exposé à l'eau salée. Le département des transports de l'Iowa étudie depuis quelques années le pieu BFUP [5]. Des essais avec des pieux de 10 m furent très intéressants et on étudie maintenant comment faire le lien entre de longues sections.



Connexion butée – pieu

Le pont Whitmans Creek de 40 m construit en Ontario l’an dernier faisait parti d’un projet pilote de construction rapide [6] du ministère des transports de l’Ontario. L’ancien pont fut démoli et la nouvelle structure complétée en 45 jours. En plus des joints, le ministère a également utilisé le BFUP dans une nouvelle application: comme coulis pour fixer les butées préfabriquées aux pieux.



Joints d’expansion

Au lieu du traditionnel joint où un angle en acier est installé, le BFUP peut être utilisé pour fixer cet angle au tablier. Le ministère des transports de l’Ontario a fait un essai en éliminant complètement l’angle d’acier sur l’un de ses projets. Le BFUP est utilisé pour les rebords du joint. Le but est de voir si le BFUP seul résiste bien au choc des roues et aux déneigeuses l’hiver.



“Link slab” (joint d’expansion large continu)

Le BFUP peut être utilisé dans la construction d’un large joint qui remplace un joint d’expansion traditionnel avec les angles d’acier. De cette façon, il n’y a pas de détérioration de la surface car on élimine le point d’accès pour l’eau. Nous sommes en train de planifier notre premier projet avec l’état de New York.

Revêtement d’appoint

Le BFUP fut utilisé en Europe sur diverses structures comme revêtement d’appoint pour refaire la surface d’un tablier existant. Certaines municipalités en Amérique du Nord nous ont approchés pour étudier la faisabilité pour divers projets. Cette technique est également utilisée en milieu industriel pour les planchers qui sont soumis à des conditions où un béton normal se désagrège rapidement.

Panneaux préfabriqués gaufrés

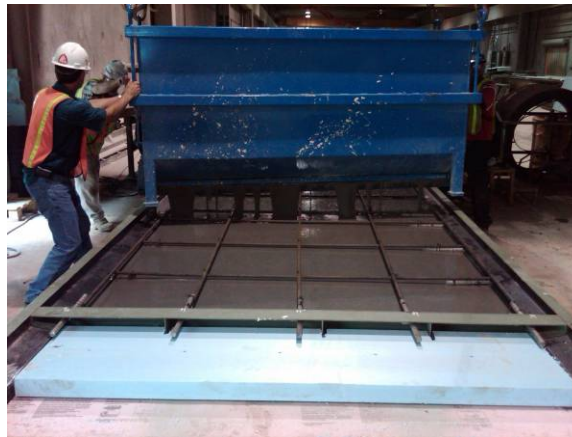
Le département des transports de l’Iowa est le chef de file dans ce domaine [5]. Un pont à Wapello County fut érigé en 2011 pour valider la technologie. Le tablier de 18 m x 10 m est supporté par 5 poutres standards. Les panneaux BFUP ont des arêtes de 200 mm et l’épaisseur de la dalle est de 65 mm. Les panneaux font 2.5m x près de 5 m. L’aspect intéressant de ce système est sa légèreté comparé à une dalle pleine de béton haute performance. Il y a une économie d’environ un tiers du poids. Ceci devient un concept très intéressant pour la réfection d’ouvrages existants.



photo: Brian Moore, dessous du pont à Wapello County

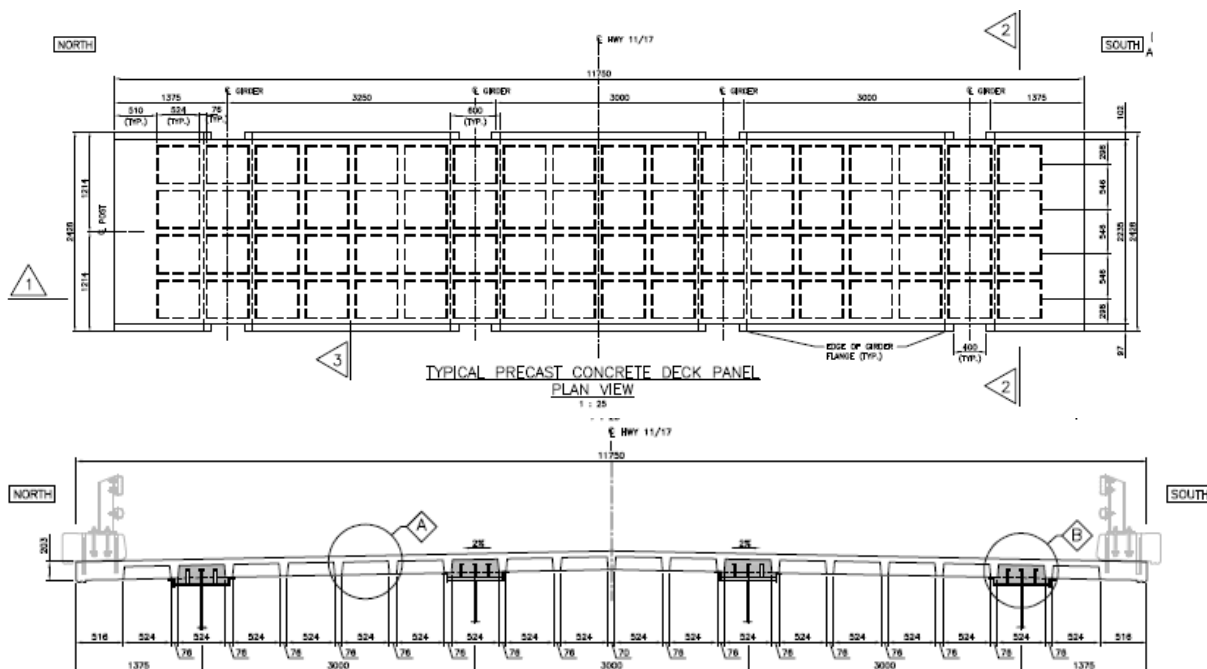


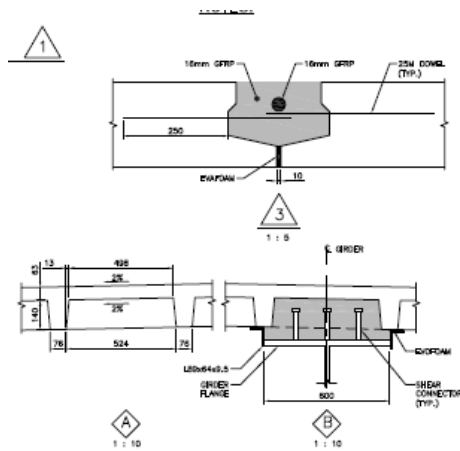
Panneaux pour le pont à Wapello County



Coulage d'un panneau pour le pont à Wapello County

Dans certains cas, il n'est pas possible de modifier la structure portante ou les coûts associés sont exorbitants. Le pont ne répond plus aux nouvelles normes car les charges de circulation sont maintenant accrues comparé au design initial. La largeur de tablier doit aussi être modifiée pour faciliter la circulation. Si le tablier est remplacé de façon conventionnelle (par exemple, une dalle pleine de 200 mm) son poids ne pourra pas être supporté par la structure existante. L'utilisation de panneaux en BFUP gauffrés et le fait qu'aucune surface de roulement n'est pas nécessaire allège considérablement le système et permet une réfection de l'ouvrage. C'est exactement le scénario qui est en jeu pour le ministère des transports de l'Ontario. Un ouvrage dans le nord-ouest est à la phase finale de design. Le tablier de 11.8m de largeur a une longueur d'environ 180 m. Les diagrammes ci-dessous donnent un aperçu des détails qui sont à l'étude. Le système proposé pour faire la connexion entre les goujons les panneaux du tablier est très intéressant car les "clés" ne sont pas ouvertes à la surface. Le BFUP va remplir toutes les cavités sans le besoin de clés traditionnelles. Comme il n'y aura pas de revêtement additionnel sur ce tablier, ceci aide encore plus pour prolonger la longévité de la structure. D'un point de vue visuel, l'absence de clés à la surface limite les distractions et donne une allure plus continue au tablier. Le début de la construction est prévu pour la fin 2012.





Diagrammes pont Big Pic River par Hatch Mott MacDonald et MTO

Exemple d'un projet typique

Un projet typique de joints aura un devis qui demande une résistance à la compression de 100 MPa après 48 heures et 140 MPa après 28 jours, par exemple. Dans le cas de Lafarge, par exemple, nous fournissons un prix fixe au contacteur pour le matériel et l'équipement nécessaire pour le mélange sur place du BFUP. Nous fournissons une personne ressource qui sera présente pour le mélange et la coulée du Ductal. Nous prélevons également des échantillons pour les tests usuels de compression. Donc, l'expertise de Lafarge offre une assurance au client que le contacteur a bien mélangé et placé le BFUP. Ce mode de soutien est critique pour le contacteur qui ne connaît pas le BFUP et permet d'utiliser une nouvelle technologie.



Malaxeurs de 0.15 m³



Malaxeur de 0.5 m³



Tests sur place pour vérifier la fluidité du mélange.



Echantillons pour les tests de compression

Les joints longitudinaux et transversaux sont séparés avec l'aide de morceaux de plexiglas, par exemple. Il est important de pouvoir couler des sections spécifiques au cas où il y aurait bris d'étanchéité. De cette façon, il est aussi possible d'interrompre la mise en place à cause du mauvais temps, etc.

Dans plusieurs cas, la circulation demeure présente sur une moitié du pont alors que la construction progresse sur l'autre. Il est aussi nécessaire de revenir pour couler les joints entre les dalles d'approches et le tablier. Toutes ces étapes doivent être clairement spécifiées dans le devis.

Pour s'assurer que les joints sont pleins, les joints sont habituellement couverts avec des morceaux de contreplaqués vissés sur la surface des panneaux. Une cheminée (une boîte d'environ 300 mm de haut) est installée au bout d'un joint pour maintenir la pression. Cette pression va faire en sorte que le niveau du BFUP soit maintenu et que le BFUP demeure en contact avec la surface inférieure du contreplaqué. La surface du BFUP doit être couverte pour éviter la perte d'eau du mélange.

Le temps de cure va dépendre de la température ambiante. A 20 degrés Celsius, les joints peuvent habituellement être démoulés et sablés au niveau requis après 48 heures.

Conclusion

Je vous ai présenté un aperçu de diverses possibilités où le BFUP peut contribuer à réduire le temps de construction sur le chantier et prolonger la durée de vie des ouvrages d'art. La demande de BFUP pour les ouvrages d'art en Amérique du Nord est en pleine croissance. Lafarge prévoit participer à plus de 25 projets en 2012 comparé à 5 réalisations en 2010. Il y a également un intérêt marqué pour le revêtement d'appoint car prolonger la longévité des structures existantes est souvent le choix le moins coûteux. Le BFUP est maintenant une technologie qui a fait ses preuves. La recherche continue avec de nombreuses universités pour continuer de valider divers concepts. Du point de vue design, il reste encore du chemin à faire pour développer un code nord-américain. Cependant, grâce au North American UHPC Working Group qui regroupe environ 100 experts, les mesures pour y arriver commencent à prendre forme. Le BFUP et les éléments préfabriqués offrent de nombreux avantages qui peuvent maintenant être utilisés avec confiance pour la construction d'ouvrages d'art durables.

Références

- [1] Thomas, M., Green, B., O'Neal, E., Perry, V., Hayman, S., Hossack, A., *Marine Performance of UHPC at Treat Island*, 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials, Kassel, Germany, p. 365-370, 2012.
- [2] Graybeal, B., *Material Property Characterization of Ultra-High Performance Concrete*, Report No. FHWA-HRT-06-103, Federal Highway Administration, McLean, VA., 2006.
- [3] Graybeal, B., *Structural Behavior of a 2nd Generation Ultra-High Performance Concrete Pi-Girder*, Report No. FHWA-HRT-10-026, Federal Highway Administration, McLean, VA., 2009
- [4] Ghoneim, G.A.M., Perry, V.H., Carson, G., *Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete in Footbridges*, Proceedings of the 8th International Conference on Short and Medium span Bridges, Niagara Falls, Ontario, p. 346-1 to 346-11, 2010.
- [5] Sritharan, S., Aaleti, S., Bierwagen, D., Garder, J., Abu-Hawash, A., *Current research on Ultra High Performance Concrete (UHPC) for Bridge Applications in Iowa*, 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials, Kassel, Germany, p. 857-864, 2012.
- [6] Young, W.F., Boparai, J., Perry, V., Archibald, B.I., Salib, S., *Whiteman Creek Bridge – A Synthesis of Ultra High Performance Concrete and Fibre Reinforced Polymers for Accelerated Bridge Construction*, 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials, Kassel, Germany, p.849-856, 2012.