

Prix AIPCR Construction, entretien et exploitation

DÉVELOPPEMENT D'UN PONT ROUTIER UTILISANT LE BÉTON FIBRÉ À ULTRA-HAUTES PERFORMANCES

Par Tadashi KUROIWA, West Nippon Expressway Co., Ltd, Koichi NISHIKAWA, East Nippon Expressway Co., Ltd, et Ikuo IWASAKI et Hikari OKUMA, Taisei Corporation (Japon)

Photos et figures © W.N.E. Co, E.N.E. Co., T.C.

PIARC Prize for Construction, Maintenance and Operation

DEVELOPMENT OF HIGHWAY BRIDGE APPLYING ULTRA HIGH STRENGTH FIBER REINFORCED CONCRETE

By Tadashi KUROIWA, West Nippon Expressway Co., Ltd, Koichi NISHIKAWA, East Nippon Expressway Co., Ltd, and Ikuo IWASAKI and Hikari OKUMA, Taisei Corporation (Japan)

Pictures and figures © W.N.E. Co, E.N.E. Co., T.C.

Le béton fibré à ultra-hautes performances (ci-après désigné « BFUP ») est un nouveau béton qui possède d'excellentes caractéristiques en termes de résistance, dureté, durabilité ou fluidité mais aussi la remarquable particularité de ne pas nécessiter d'armatures passives. Dans les années 1990, le BFUP a été développé comme béton de poudre réactif (BPR) en France [1], sous le nom de marque Ductal et a retenu l'attention ces dernières années [2,3]. La Société Japonaise des Ingénieurs Civils (*Japan Society of Civil Engineers*) a établi, en 2004, des « Recommandations pour la conception et construction des structures en béton fibré à ultra-haute performance » (ci-après désigné « Recommandations pour BFUP »), dans lesquelles il est mentionné qu'on estime que « le BFUP peut être utilisé plus de 100 ans sans aucune réparation spéciale ni renforcement ».

Le BFUP a été utilisé pour le pont routier « Horikoshi C » sur l'autoroute Est de Kyushu pour la première fois au Japon. Une vue d'ensemble de la conception et de la construction de ce pont sont décrites ici, de même que les discussions sur la capacité d'évolution future du BFUP.

VUE D'ENSEMBLE DU BFUP

Le BFUP, développé comme béton de poudre réactif en France, a une résistance à la compression et à la traction très élevées par rapport au béton conventionnel grâce à la conception unique de sa composition.

Les principales composantes du BFUP sont le ciment, le sable, la fumée de silice, les fibres métalliques, l'eau et le plastifiant réducteur d'eau. La haute résistance et la haute durabilité sont obtenues grâce à un rapport eau/ciment réduit qui est proche de la limite de la réaction d'hydratation, et à une compacité élevée résultant de l'optimisation du mélange granulaire (*figure 1*). Le matériau contenant 2 % en volume de fibres d'acier à haute résistance (diamètre de 0,2 mm et longueur de 15 mm), on peut obtenir une ténacité élevée sans utiliser aucune armature.

Grâce à sa maniabilité élevée, le BFUP est auto-plaçant et ne nécessite pas de vibration pendant le coulage.

En ce qui concerne la cure après le coulage, la procédure de base est de conduire la cure en première étape jusqu'à ce qu'on obtienne la résistance nécessaire au décoffrage (environ 40 à 50 N/mm²) puis de traiter à la vapeur pendant 48 heures à une température de 90°C (étuvage standard) après l'enlèvement du coffrage. Le retrait et le fluage sont extrêmement faibles car la résistance spécifique est obtenue par l'étuvage standard et les caractéristiques physiques restent stables. Le *tableau 1, page suivante*, montre les

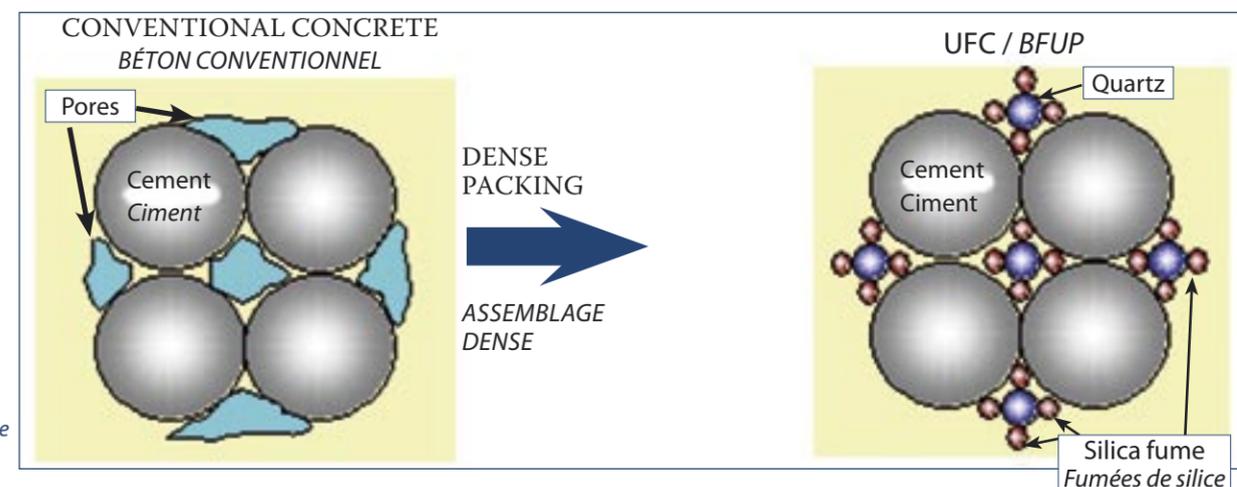


Figure 1 : Image montrant l'arrangement granulaire dense

Ultra high strength Fiber reinforced Concrete (UFC) is a new concrete material that possesses excellent characteristics such as ultra high strength, high toughness, high durability, high flowability, and also has a noteworthy feature in that it requires no reinforcing bars. UFC was developed in the 1990's as Reactive Powder Concrete (RPC) material in France [1], under the brand name of Ductal, and has become the focus of attention in recent years [2,3]. The Japan Society of Civil Engineers has established in 2004 the "Recommendations for Design and Construction of Ultra High-Strength Fiber-Reinforced Concrete Structures" (hereafter referred to as the "UFC Recommendations"), which states

"UFC is anticipated to be used for over 100 years without any special repairs or reinforcements."

For the first time in Japan, UFC has been applied in the "Horikoshi C Ramp Bridge," a highway bridge that was completed on the East Kyushu Expressway. An overview of the design and construction of this bridge is reported here, together with discussions on the ability of UFC to evolve henceforth.

OVERVIEW OF UFC

UFC, developed as RPC material in France, has far greater compressive and tensile strengths than conventional concrete by a unique mixing design.

The basic components of UFC are cement, sand, silica fume, mineral fillers, reinforcing fibers, water, and water-reducing admixture. The water/cement ratio is reduced to approach close to the hydration reaction limit and it achieves high compacted density by optimization of the granular mixture (*figure 1*), thus realizing ultra high strength and high durability. The material contains 2% high strength reinforcing

steel fibers (diameter 0.2 mm, length 15 mm) by volume, thereby creating high toughness without the need of using any reinforcing bars.

Since fresh UFC has high liquidity, it has self-compaction ability and no vibration is necessary during casting.

The first stage of curing is implemented until the form removal strength (about 40 to 50 N/mm²) is reached, and after removal of the form, it is steam-cured for 48 hours at a temperature of 90°C (standard heat curing). The amount of shrinkage and creep are extremely small because the specific strength is exhibited by standard heat curing and the physical characteristics remain stable. The physical characteristics and strength values of UFC and conventional high strength concrete are shown in *table 1, following page*.

Moreover, as shown in the same table, the resistivity related to mass transfer of UFC is extremely high; the permeability coefficient and the diffusion coefficient of the chloride ions are about 1/10⁶ and less than 1/300 times that of conventional high strength concrete.

Figure 1: Image showing dense packing arrangement

TABLEAU 1 : CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES DU BFUP
TABLE 1: UFC PHYSICAL CHARACTERISTICS

CARACTÉRISTIQUES ITEM	UNITÉS UNITS	BFUP (*) UFC (*)	BÉTON À HAUTE RÉSIDANCE CONVENTIONNEL CONVENTIONAL HIGH STRENGTH CONCRETE
Résistance à la compression / <i>Compressive strength</i>	N/mm ²	180	40
Résistance à la traction / <i>Tensile strength</i>	"	8,8 (8.8)	2,7
Résistance lors de l'apparition de la première fissuration / <i>First cracking strength</i>	"	8,0 (8.0)	1,3 (1.3)
Module d'Young / <i>Young's modulus</i>	kN/mm ²	50	31
Masse volumique / <i>Mass per unit volume</i>	kN/m ³	25,5 (25.5)	24,5 (24.5)
Déformation de retrait / <i>Shrinkage strain</i>		50 x 10 ⁻⁶	230 x 10 ⁻⁶
Coefficient de fluage / <i>Creep coefficient</i>		0,4 (0.4)	2,6 (2.6)
Coefficient de perméabilité à l'eau / <i>Water permeability coefficient</i>	cm/s	4 x 10 ⁻¹⁷	10 ⁻¹⁰
Coefficient de diffusion des ions chlore / <i>Chloride ion diffusion coefficient</i>	cm ² /an	0,002 (0.002)	0,700 (0.700)

(*) après l'étuvage standard / after standard heat curing

caractéristiques physiques et les valeurs de résistance du BFUP et du béton à haute résistance conventionnel.

De plus, comme le montre ce tableau, les propriétés de transfert du BFUP sont extrêmement élevées ; les coefficients de perméabilité et de diffusion des ions chlore sont respectivement environ 10⁻⁶ fois et 300 fois plus faibles qu'un béton à haute résistance conventionnel.

La figure 2, page de droite, montre le résultat de calcul de l'évolution temporelle de la concentration en ion chlore au niveau des éléments en acier (avec un enrobage de 20 mm). D'après cette même figure, en supposant des projections d'eau avec une concentration en ion chlorure de 1,3 kg/m³, en environnement particulièrement corrosif, on observe que les éléments en acier se corroderont après plus de 300 ans, si la concentration limite d'apparition de la corrosion est de 1,2 kg/m³.

VUE D'ENSEMBLE DU PONT

Le pont Horikoshi C se situe au nord de Kyushu au sud-ouest du Japon. Il s'agit d'une bretelle de l'échangeur Kyushu Nord où l'autoroute de Kyushu et l'autoroute Est de Kyushu se séparent (photo 1, page de droite). Les travaux

ont été réalisés en plusieurs phases en utilisant les routes existantes et celles nouvellement construites afin d'atténuer l'influence sur le trafic de l'autoroute de Kyushu qui est l'une des artères principales.

Pour cette raison, les conditions de construction étaient extrêmement difficiles car les travaux connexes devaient être réalisés dans un espace étroit, coincé entre les deux autoroutes en service.

Le pont a une travée unique de 16,6 m, la structure est composée de poutres précontraintes composites. Les poutres principales (figure 3, page de droite) sont fabriquées en BFUP et la dalle du tablier est en béton conventionnel (résistance caractéristique de 36 N/mm²). Etant donné que le BFUP ne nécessite aucune armature, l'épaisseur de l'âme réalisée avec ce matériau peut être limitée à seulement 90 mm grâce à sa résistance très élevée. Ce qui donne une forme de l'ouvrage très effilée par rapport une conception en béton conventionnel. Comme le poids d'une poutre principale est de 5 tonnes, cela a permis de transporter les 4 poutres en BFUP par un seul camion remorque.

Figure 3 : Coupe transversale
Figure 3: Cross-section

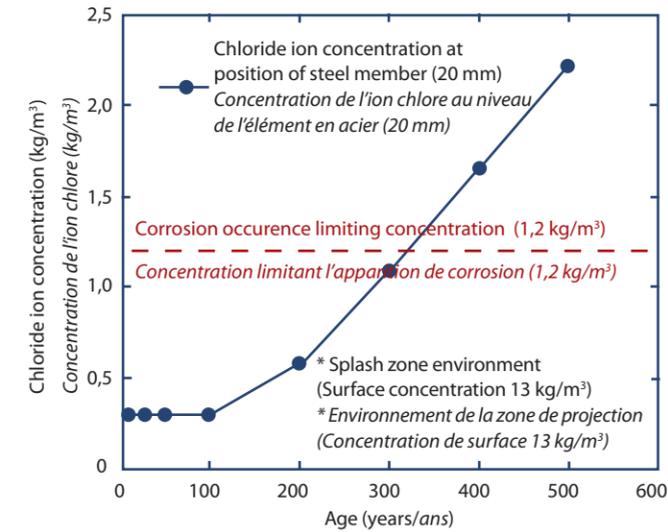


Figure 2: Change with time of chloride ion concentration
Figure 2 : Évolution avec le temps de la concentration d'ion chlore

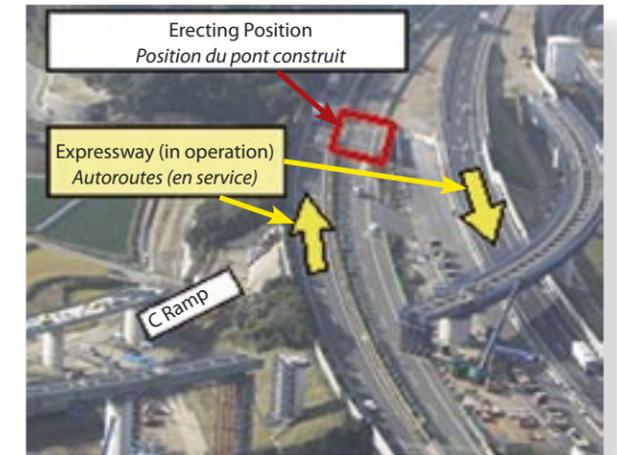


Photo 1: North kyushu JCT (during construction)
Photo 1 : Échangeur Kyushu Nord (pendant la construction)

Figure 2 shows the results of calculation of the change with time of chloride ion concentration at the position of the steel members (cover 20 mm). From the same figure, assuming a splash zone (surface chloride ion concentration of 1.3 kg/m³) with especially severe corrosive environment, it can be observed that the steel members will corrode after more than 300 years assuming the corrosion occurrence limiting concentration as 1.2 kg/m³.

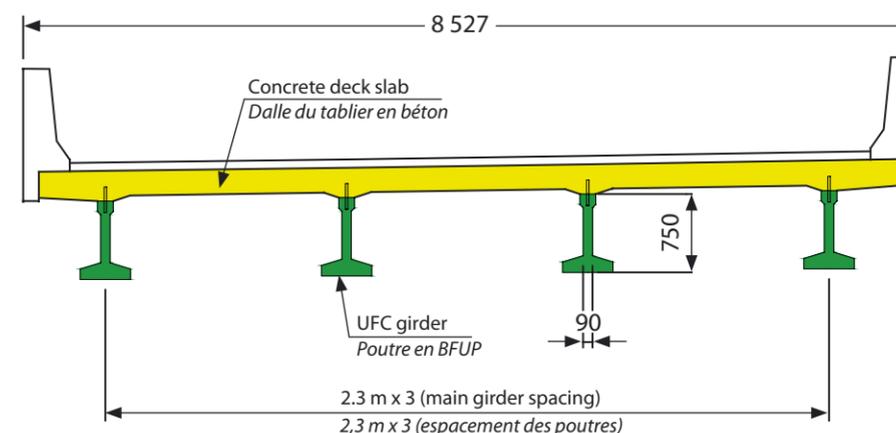
OVERVIEW OF THE BRIDGE

The Horikoshi C Ramp Bridge is located north of Kyushu, which is the southwestern island of Japan. It is one of the ramp bridges in the North Kyushu junction (JCT), where the Kyushu Expressway and the East Kyushu Expressway branch off (photo 1). To mitigate the effect on the traffic in the Kyushu Expressway, which is an important trunk route,

the work was implemented in stages using the existing roads and the newly constructed roads.

For this reason, the construction conditions were extremely severe, with proximity work being performed in a narrow space sandwiched by two expressways in operation.

The bridge structure is a single span pre-tensioned composite girder 16,6m long. The main girder (figure 3) is made of UFC and the deck slab is made of conventional concrete (characteristic strength of 36 N/mm²). Since UFC does not require any reinforcing bars, the web thickness utilizing its ultra high strength is only 90 mm, achieving a very slender form compared to the conventional concrete. The weight of one main girder became 5 tons, enabling 4 UFC girders to be transported in just one trailer.



AVANTAGES DU BFUP

Ce pont a été conçu initialement avec des poutres en béton précontraint conventionnel.

Le trafic sur la route située sous l'autoroute devait être arrêté pendant le transport ainsi que les travaux de montage des poutres. Il a été estimé, dans le projet initial, qu'il faudrait interrompre le trafic pendant 2 jours pour la construction des 11 poutres en béton précontraint. Il fallait par ailleurs une grue de grande capacité pour le montage des poutres en béton précontraint qui pèsent chacune 12 tonnes.

En adoptant les poutres composites en béton précontraint utilisant le BFUP, on a obtenu les améliorations suivantes :

- le nombre de poutres à construire a été diminué de 11 à 4 ; l'interruption de trafic sur la route pendant le transport et les travaux de montage des poutres a été diminuée de 2 jours à environ 2 heures,
- la capacité de la grue utilisée pour le montage des poutres a pu être réduite de 120 tonnes à 50 tonnes,
- le nombre de camions remorques transportant les poutres a été réduit de 6 à 1,
- comme le BFUP a une durabilité extrêmement élevée, les frais d'exploitation et de maintenance sont réduits grâce à l'augmentation de la durée de vie de la structure et à la réduction des coûts d'entretien,
- la charge permanente de la structure, y compris la dalle du tablier, a été réduite de plus de 30 % par rapport à celle du projet initial. Pour cette raison, le comportement parasismique) de la fondation a été amélioré.

MISE AU POINT DU PONT ROUTIER EN BFUP

La *figure 4* montre les détails de la coupe transversale du pont. Les poutres principales sont précontraintes afin de profiter des caractéristiques de la résistance du BFUP et le coût a pu être réduit par l'adoption du système de précontrainte par prétension.

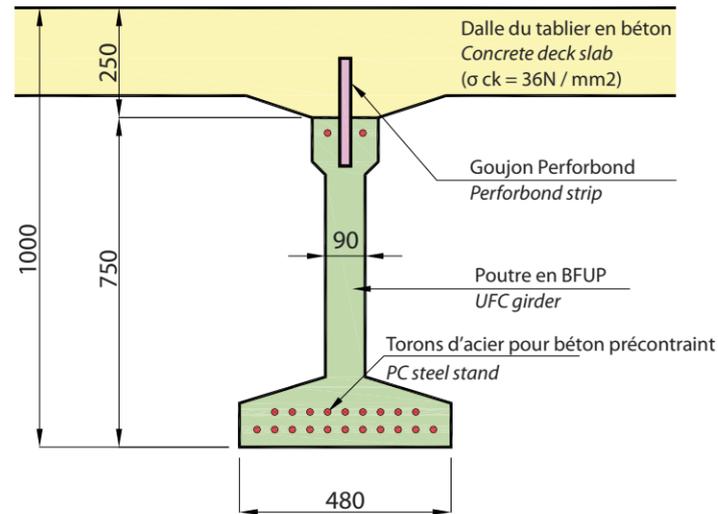


Figure 4 : Détail de coupe transversale

La méthode de liaison a une importance capitale pour ce pont en construction composite. La liaison par des attentes en acier nécessite de nombreuses barres d'armature qu'on ne peut pas utiliser avec les poutres en BFUP à cause de leur section transversale très effilée. Pour cette raison, il a été décidé de développer une méthode de liaison avec « goujon Perforbond (Perforbond strip) », excellent par son faible encombrement, sa rigidité et sa résistance.

Un modèle d'une poutre précontrainte à échelle 1 (longueur de poutre 10,6 m) a été réalisé dans l'usine de préfabrication (*photo 2, page de droite*) afin de valider la possibilité de fabrication des poutres en BFUP et divers essais de vérification ont été réalisés.

Les mesures contre le retrait endogène pendant la fabrication du BFUP ont une importance capitale.

Les caractéristiques physiques du BFUP après étuvage standard sont extrêmement stables comme mentionné ci-dessus. Toutefois, au jeune âge, le retrait est important comme pour les bétons à haute résistance fabriqués avec d'autres systèmes de poudre. Les mesures citées ci-dessous ont donc été adoptées afin d'éviter la fissuration provoquée par le retrait :

- comme les effets dus au retrait endogène gênent dans la section transversale s'avèrent très importants,

◀ Figure 4: Cross section detail



Photo 2: State when formwork was removed
Photo 2 : Etat après retrait du coffrage

ADVANTAGES OF UFC

Initially, the bridge was planned as the hollow type pre-tensioned girders, using conventional concrete.

The traffic in the crossroad under the expressway had to be stopped during the transportation of the girders and during the erection work. In the initial plan, it was judged that the traffic had to be stopped for 2 days for the construction of 11 PC girders. A large crane was also necessary for erecting PC girders, each of which weighed 12 tons.

By adopting PC composite girders using UFC, the following improvements were obtained:

- the number of girders to be erected was reduced from 11 to 4; the traffic control at the crossroad during transportation of girders and during the erection work was

- reduced significantly from 2 days to approximately 2 hours,
- the capacity of the crane used during erection of girders was reduced from 120 t to 50 t,
- the number of trailers for transporting the main girders was reduced from 6 to 1,
- since UFC has extremely high durability, the lifecycle costs can be reduced because the life of the structure will increase and maintenance costs will decrease,
- the dead load of superstructure including deck slab was reduced by more than 30% compared to the original design. For this reason, aseismicity of the substructure is enhanced.

DEVELOPMENT OF UFC HIGHWAY BRIDGE

Figure 4, left page, shows the details of cross section of the bridge. To utilize the ultra high strength properties of UFC, the main girders were made of prestressed structures, and the cost was reduced by adopting the pre-tensioned system.

The connection method is extremely important for this bridge of composite construction. A connection using dowel bars required many reinforcing bars and these could not be arranged in a UFC girder of very slender cross section. For this reason, it was decided to develop a connection method using a Perforbond strip because of its compactness, excellent rigidity and bearing capacity.

To confirm the manufacturability of UFC girders, the pre-tensioned girder of the real-size model (girder length 10.6 m) was manufactured in the precast products factory (*photo 2*) and various verification tests were carried out.

Measures against self-shrinkage during manufacture of UFC are very important.

The physical characteristics of UFC are extremely stable after standard heat curing, as mentioned above. However, at a young material age, the self-shrinkage is large, similar to high strength concrete made of other powder systems. Therefore, the measures given below were adopted to prevent cracks accompanying shrinkage:

- since the constraining effect of self-shrinkage in its cross section shape was judged to be excessive, formwork specifications pursuing self-shrinkability using cushioning materials were adopted.
- to ensure that PC steel does not constrain self shrinkage of UFC during standard heat curing, it was decided to introduce prestress after the first stage curing. *Figure 5, following page*, shows the manufacturing flow of UFC girder.

The items below were confirmed by carrying out tests on the feasibility of manufacturing.

- PC steel strands were densely arranged in the lower flanges of the bridge to efficiently utilize the ultra

des spécifications pour le coffrage visant à atténuer ce phénomène ont été adoptées (matériaux amortissants).

- afin d'assurer que l'acier de précontrainte ne gêne pas le retrait endogène du BFUP pendant l'étuvage standard, il a été décidé d'introduire la précontrainte après la cure de première étape. La *figure 5* montre le déroulement des travaux de fabrication de poutre en BFUP.

Les points suivants ont été confirmés par la réalisation d'essais pour la faisabilité de la fabrication.

- Les torons d'acier pour la précontrainte ont été mis disposés dans la semelle des poutres afin de profiter de la capacité de la très haute résistance du BFUP dans le pont. La capacité de renforcement du BFUP a été confirmée.
- Des essais ont été réalisés pendant les étapes de fabrication sur le temps de décoffrage et le moment d'introduction de la précontrainte. Il a été vérifié l'absence (la non-apparition) de fissure.

Même si des **poutres BFUP précontraintes** ont déjà été utilisées dans les structures de bâtiment [4], les divers essais ci-dessous ont dû être effectués pour son application aux ponts routiers ; la performance structurelle a été vérifiée et les résultats obtenus ont été répercutés dans les calculs de conception :

- les caractéristiques physiques du BFUP au jeune âge ont été vérifiées par des essais de base afin d'introduire la précontrainte avant l'étuvage standard comme mentionné ci-dessus,
- la distribution de la tension dans les torons d'acier de précontrainte a été mesurée par des jauges de contrainte sur le modèle à l'échelle 1,
- la déformation de la poutre avant et après l'étuvage standard, le coefficient de fluage et le retrait endogène du BFUP ont été déterminés,
- les pertes de précontrainte ont été déterminées à partir de l'évolution de déformation de torons de précontrainte avant et après la cure, et la force réelle de précontrainte a été vérifiée,
- en ce qui concerne la détermination de la résistance lors de l'introduction de précontrainte, elle a été fixée à 70 N/mm² en tenant compte du niveau de

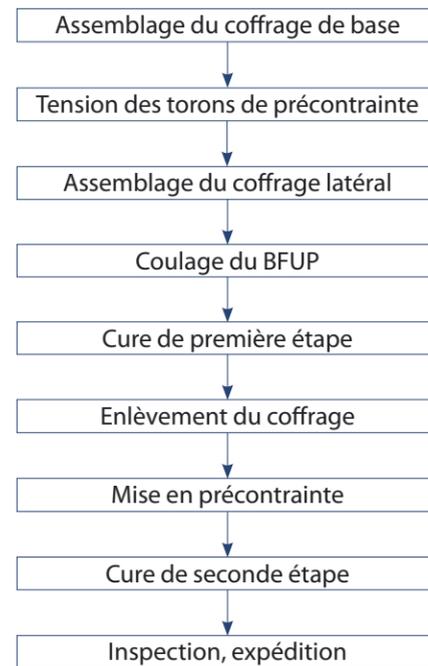


Figure 5 : Déroulement des travaux de fabrication

contrainte qui apparaît dans les poutres principales, de la déformation ou du temps de cure.

Le « **goujon Perfobond** » (**Perfobond strip**) qui a une excellente rigidité et résistance pour transférer la force de cisaillement, a été développé pour le raccordement des poutres en BFUP avec la dalle du tablier en béton. Il s'agit d'un premier exemple d'utilisation du PBL pour le raccordement entre les éléments en BFUP et en béton. Ainsi, la performance structurelle du raccordement a été vérifiée sur des corps d'épreuve.

La méthode de chargement adoptée était un essai de cisaillement à deux surfaces en appliquant le chargement sur la partie centrale de l'échantillon (BFUP) (*photo 3, page de droite*). Les plaques en téflon ont été installées sous les pièces en béton des deux côtés afin de réduire le frottement. Les résultats des essais ont confirmé l'absence de fissuration sous la charge théorique (dans les conditions de service et ultimes) au niveau des liaisons.

La méthode de liaison utilisant le PBL offre une rigidité excellente, et il a été prouvé que la méthode de conception

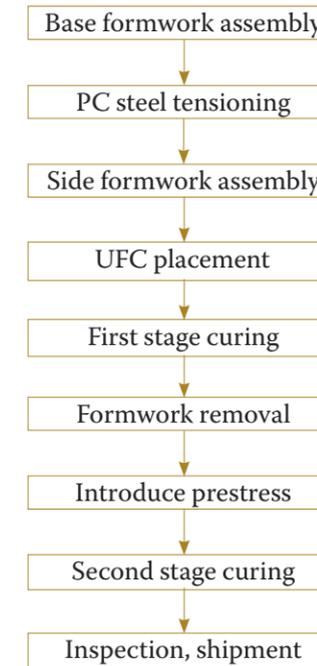


Figure 5: Manufacturing flow

high strength properties of UFC in the bridge; good consolidating ability of UFC was confirmed.

- Studies were carried out during the manufacturing stages such as when to remove the formwork and when to introduce prestress; the non-occurrence of cracks was verified.

Pre-tensioned UFC girders have been used in building structures until now [4], but for its application to road bridges, various tests mentioned below were implemented, the structural performance was verified and the results were reflected in design calculations:

- to introduce prestress before standard heat curing as mentioned above, the physical characteristics of UFC at an early age were verified by basic tests.

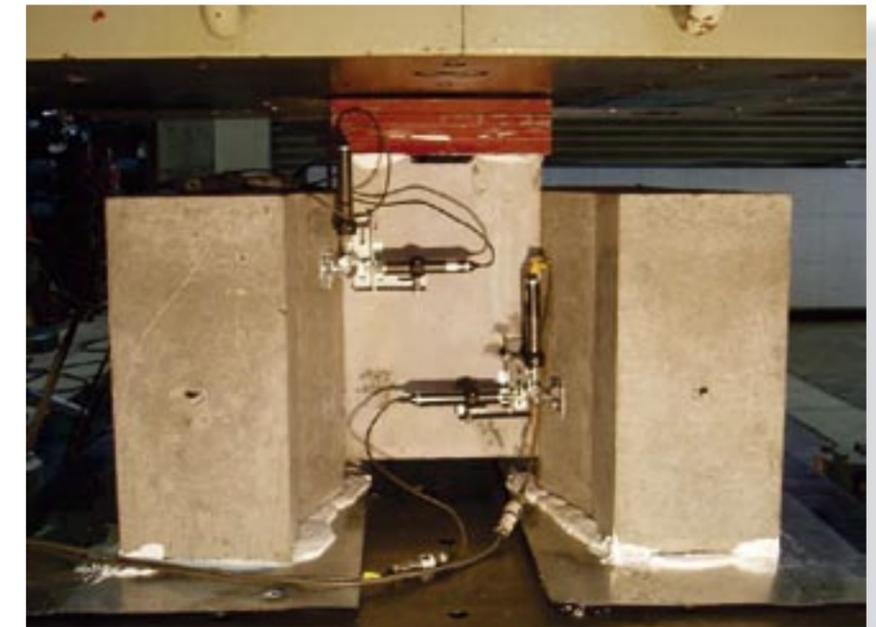


Photo 3: Shear loading test

Photo 3 : Essai de cisaillement par chargement

- the distribution of tension in the PC steel strand was measured using strain gauges on the real-size model.
- the deformation of girder before and after standard heat curing, the creep coefficient and self-shrinkage of UFC were determined.
- the prestress losses were determined from the change in strain of the PC steel strands before and after curing, and the effective prestress force was verified.
- the strength setting when introducing prestress was taken as 70 N/mm² with general considerations such as stress levels occurring in main girders, deformation, and curing time.

Perfobond strip (PBL), which has excellent rigidity and strength for transferring shear force, was

developed for the connections of UFC girder and concrete deck slab. This was the first time that PBL was used in the connections between UFC and concrete members. For this reason, the structural performance of the connection was verified by element tests.

The loading method adopted was as in a double-shear test taking the center of the specimen (UFC) as the loading surface (*see photo 3*). Teflon sheets were arranged at the base of concrete on both sides to reduce friction. From the test results, it was confirmed that no cracks occur in the connections under design loads (during use and ultimate).

The connection method using PBL offers excellent rigidity, and it was considered that the conventional

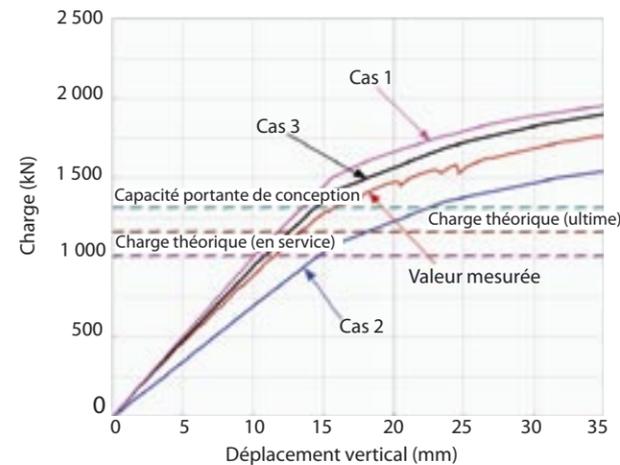


Figure 6 : Relation charge-déplacement

des poutres composites conventionnelles peut être appliquée aux poutres composites en BFUP. Toutefois, comme ce système structurel était le premier à être utilisé dans le pays et compte tenu de l'importance de cette structure, la vérification minutieuse du comportement du modèle à échelle 1 à travers les essais de charge s'avérait nécessaire.

Une poutre composite en forme de T, qui comprend la poutre BFUP précontrainte de taille réelle, ainsi que la dalle du tablier en béton in-situ, ont été fabriquées. Des épreuves de chargement en flexion quatre points ont été effectuées afin de vérifier le comportement de la poutre en flexion et cisaillement.

Le comportement et la capacité portante à la charge théorique (dans les conditions de service et ultimes) ont été vérifiés à partir des résultats d'essais. La figure 6 montre la relation entre les valeurs mesurées de la charge verticale P et le déplacement vertical δ . Cette figure montre aussi le résultat de l'analyse tri-dimensionnelle non-linéaire par la méthode de calcul par éléments finis réalisée en prenant les conditions de liaison de la poutre et de la dalle du tablier comme paramètres.

Les trois cas suivants ont été supposés comme condition de liaison :

- * Cas 1 : liaison rigide entre poutre et dalle du tablier (section transversale complète)

- * Cas 2 : PBL évalué en tant que ressort rigide (scellé à endroit où PBL n'est pas utilisé)
- * Cas 3 : liaison par ressort entre poutre et dalle du tablier (la raideur du ressort est fixée à partir du déplacement réel horizontal entre poutre et dalle du tablier)

La différence de rigidité entre les résultats calculés pour la section transversale complète (cas 1) et les valeurs réellement mesurées était d'environ 10 %, cela a permis de vérifier le niveau élevé de rigidité de la liaison par le PBL et la contribution de la force de frottement au niveau des surfaces de raccordement.

VUE D'ENSEMBLE DE LA CONCEPTION

Pour la conception détaillée de la poutre principale en BFUP, en vue d'exploiter l'ultra haute résistance telle que la valeur spécifique de 180 N/mm^2 de la résistance à la compression, 22 torons d'acier de précontrainte (1S15.2BL) ont été mis en place, la valeur de contrainte limite (8.0 N/mm^2) dans l'état limite de service à la limite d'apparition de fissure a été négligée. La résistance à l'état limite ultime a été vérifiée. Comme le BFUP conserve une résistance en traction contrairement au béton ordinaire, les courbes de contrainte-déformation de traction ainsi que celles de contrainte-déformation de compression ont été prises en considération pour le calcul de la résistance en flexion. La courbe de contrainte-déformation peut être déterminée à partir des caractéristiques d'adoucissement en traction du BFUP.

Concernant la conception de la dalle du tablier et les entretoises réalisées en béton ordinaire, la dalle du tablier a été réalisée en béton précontraint, avec une marge de sécurité vis à vis de la flexion sous les charges d'exploitation. Les traverses ont été conçues comme des poutres en béton armé. Du béton a été coulé par les trous situés dans la plaque en acier de la liaison Perfobond (*Perfobond strip*) et la structure en béton est conçue pour résister aux forces de cisaillement. Cette résistance est calculée par l'équation 1 ci-après. Il a été confirmé sur la base de connaissances obtenues par des recherches expérimentales de ces dernières années que la résistance au cisaillement peut être améliorée en

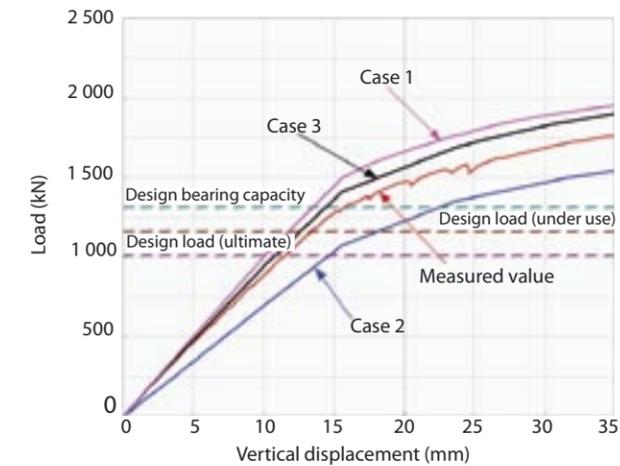


Figure 6: Load-displacement relationship

composite girder design method could be applied also to the UFC composite girder. However, considering that the structural system was the first to be used in the country and considering the importance of the structure, verification of the detailed behavior of the real-size model through loading tests was deemed necessary.

A composite T-shaped girder was manufactured, comprising pre-tensioned UFC girder of the real-size model and in-situ concrete deck slab. Two-point concentrated loading tests were carried out to verify the bending shear performance of the girder.

The behavior and bearing capacity at design loads (during use and ultimate) were verified from the test results. Figure 6 shows the actual measured values of vertical load P and vertical displacement, together with the results of three-dimensional non-linear FEM analysis performed,

taking the connection conditions of the girder and deck slab as parameters.

The three cases below were assumed for the connection conditions.

- * Case 1: Rigid connection between girder and deck slab (integrated cross section)
- * Case 2: PBL evaluated as rigid spring (sealed at locations where PBL not used)
- * Case 3: Spring connection between girder and deck slab (spring constant set according to actual horizontal displacement between girder and deck slab).

The difference in rigidity between the results calculated for integral cross section (case 1) and the actually measured values was approximately 10%, thus verifying the high connection rigidity because of PBL and the contribution of friction force at the connecting surfaces.

OVERVIEW OF DESIGN

For the detail design of the UFC main girder to use the ultra high strength properties such as the specific value 180 N/mm^2 of compressive strength, 22 PC steel strands (1S15.2BL) were arranged, the stress limiting value (8.0 N/mm^2) at the crack occurrence limit in the serviceability limit state was suppressed and design bearing capacity in the ultimate limit state was verified. UFC keeps tensile loads unlike ordinary concrete. When calculating the flexural bearing capacity, the tensile stress-strain curves should also be considered together with the compressive stress-strain curves and reflected in the calculations. This tensile stress-strain curve can be determined based on the tensile softening characteristics of UFC.

With regard to the design of the deck slab and the cross girder using normal concrete, the deck slab was made of PC construction and safety was ensured against bending due to live loads. Cross girders have been designed as RC girders. Concrete filled in the holes provided in the steel plate exhibit the functions of Perfobond strip, and the concrete structure is designed to resist shear forces. Its strength is calculated by the equation shown in 1) (following page). Based on the knowledge obtained from experimental research and development in recent years, it was confirmed that by passing reinforcing bars through the holes, the shear strength can be improved, and the equation to calculate the

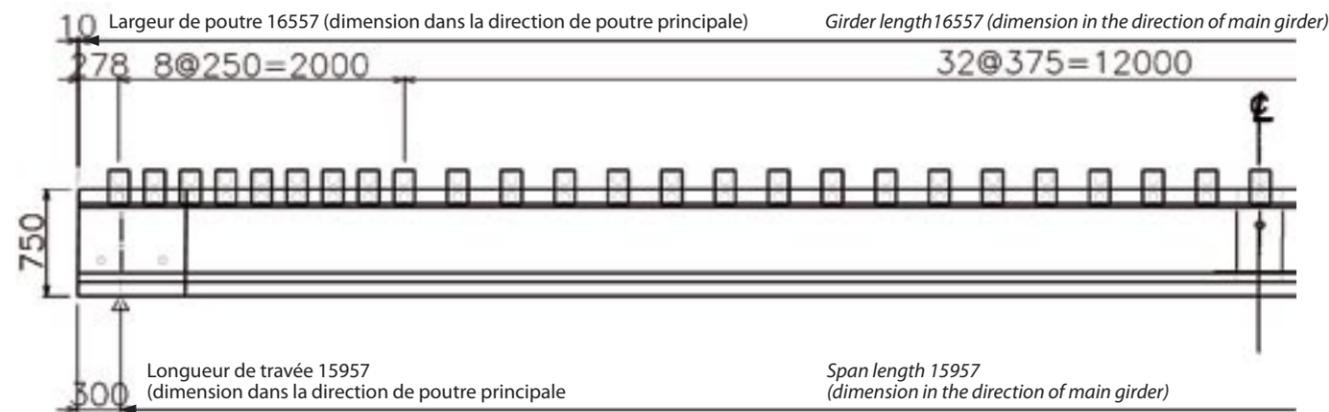


Figure 7 : Dessin de la disposition de PBL

Figure 7: Drawing of PBL arrangement

passant les armatures dans les trous. Ainsi, l'équation 2 ci-après a été proposée pour calculer la résistance.

1) Quand il n'y a pas d'armature traversant les trous

$$V_{ud} = \{3,38d^2(t/d)^{1/2} f'_c - 121\} / \gamma_b$$

d : diamètre de trous (mm) ; t : épaisseur de plaque (mm)
 f'_c : résistance à la compression du béton (N/mm²),
 γ_b : coefficient partiel

2) Quand les armatures sont mises en place dans les trous

$$V_{ud} = [1,45\{(d^2 - \phi st^2) f'_c + \phi st^2 f_{st}\} - 106,1] / \gamma_b$$

φst : diamètre d'armature dans le trou (mm) ;
 fst : résistance à la traction d'armature (N/mm²).

La différence de fluage, la différence due au retrait pendant le séchage et la différence de température de la dalle du tablier et de celle de la poutre principale ont aussi été prises en compte en plus des forces latérales agissant sur les poutres principales et les liaisons des dalles du tablier pour la conception du PBL, ceci conduisant à la disposition présentée par la figure 7.

VUE D'ENSEMBLE DE LA CONSTRUCTION

Comme le cas du modèle à échelle 1, les poutres BFUP précontraintes en I ont été réalisées dans l'usine de préfabrication, avec la composition suivante pour le BFUP. Des mesures ont été prises afin d'éviter le séchage prématuré de la surface pendant le coulage :

- composition standard du BFUP (premix), 2 254 kg/m³ ;
- fibres en acier, 157 kg/m³ ;
- eau (superplastifiant), 180 (22) kg/m³ ;
- la partie supérieure de la trémie a été couverte par une bâche plastique afin d'éviter l'évaporation d'eau ;
- un tube plongeur a été utilisé et le coulage a été effectué d'une manière continue par un seul endroit afin d'éviter la confluence d'écoulement et le chevauchement ;
- le coffrage a été couvert tout de suite après le coulage par une bâche afin d'éviter l'évaporation d'humidité.

La photo 4, page suivante, montre la phase de coulage. Il a été procédé à la cure de première étape après le coulage. Le coffrage latéral a été enlevé après la confirmation d'avoir obtenu la résistance requise, et la force précontrainte a été introduite.

Ensuite, il a été procédé à l'étuvage standard presque immédiatement, et le retrait, la déformation ainsi que la qualité de finition ont été vérifiés. Le tableau 2, page de droite montre la résistance à la compression, la résistance lors de l'apparition de la première fissure et la résistance à la traction du BFUP après l'étuvage standard. La dispersion des résultats des divers essais de résistance était très faible et la valeur moyenne a démontré que les valeurs de conception étaient pertinentes et satisfaisantes.

Les 4 poutres ont été transportées sur site par un camion remorque et placées en dépôt temporaire au bord de la route. Dans un espace étroit coincé par les autoroutes en service des deux côtés, les travaux de montage jusqu'à

TABLE 2. RESULTS OF UFC STRENGTH TESTS TABLEAU 2. RÉSULTATS D'ESSAIS DE RÉSISTANCE DU BFUP			
	COMPRESSIVE STRENGTH RÉSISTANCE À LA COMPRESSION	TENSILE STRENGTH RÉSISTANCE À LA TRACTION	FIRST CRACKING STRENGTH RÉSISTANCE LORS DE L'APPARITION DE PREMIÈRE FISSURE
Design strength/Résistance de conception	180	8.8 / 8,8	8.0 / 8,0
Number of data/Nombre de données	12	12	12
Average (Min.-Max.) values/ Valeur moyenne (min.-Max.)	220 (212-227)	11.9 (10.5-13.0) 11,9 (10,5-13,0)	11.1 (9.6-13.1) 11,1 (9,6-13,1)
Standard deviation and coefficient of variation/ Ecart type et coefficient de variation	4.6 (2.1%) 4,6 (2,1%)	0.7 (5.9%) 0,7 (5,9%)	1.2 (11%) 1,2 (11%)

Unit - unité : N/mm²

bearing strength given in 2) below has been proposed.

1) When no reinforcing bars are passed through the holes

$$V_{ud} = \{3.38d^2(t/d)^{1/2} f'_c - 121\} / \gamma_b$$

d: Hole diameter (mm);
 t: Plate thickness (mm)
 f'_c: Compressive strength of concrete (N/mm²),
 γ_b: Coefficient of member

2) When reinforcing bars are passed through the holes

$$V_{ud} = [1.45\{(d^2 - \phi st^2) * f'_c + \phi st^2 fst\} - 106.1] / \gamma_b$$

φst: Diameter of reinforcing bar passed through hole (mm);
 fst: Tensile strength of reinforcing bar (N/mm²).

Creep difference, drying shrinkage difference and temperature difference in deck slab and main girder have also been considered in addition to the lateral forces acting on the main girders and connections of deck slabs used in the design of the PBL and the arrangement of PBL has been designed. (See figure 7)

OVERVIEW OF CONSTRUCTION

The UFC pre-tensioned I-girder for the actual bridge was manufactured in the precast product plant, similar to the real-size model with the following mix proportion.

The measures below were adopted because the surface was likely to become dry during placement:

- UFC standard mix proportion powder (premix), 2,254 kg/m³
- steel fibers, 157 kg/cm³;
- water (within, super plasticizer), 180 (22) kg/m³;
- the upper part of the placement hopper was covered by a plastic sheet, and evaporation of moisture was prevented;
- to prevent flow confluence and overlapping of members during placement, tremie pipe was used and placement performed continuously from one location;
- after placement, a sheet was immediately used to cover the

formwork and evaporation of moisture was prevented.

Photo 4, following page, shows the state of placement. First stage curing was performed after placement. After confirming that the specific strength was exhibited, the side formwork was removed, and prestress force was introduced.

Subsequently, standard heat curing was performed almost immediately, and the shrinkage, deformation and the quality of the finished work was verified. Table 2 shows the compressive strength, first cracking strength and tensile strength of UFC after the standard heat curing. The variation in the various strength test results was very small and the average value suggested that the design values were adequately satisfied.

Each of the 4 girders were transported to the site using one trailer, and were stored at the temporary storage space from the crossroad. In the narrow space sandwiched by expressways in use on both sides, the process

la fixation temporaire ont été achevés sans problème en environ 1 heure (photo 5).

L'échafaudage a été installé après le montage des poutres. La traverse et la dalle du tablier ont été construites tout en maintenant le trafic sur la route de croisement qui se situe directement en dessous. Ensuite le garde-corps a été construit et les travaux terminés (photo 6).

Il a été procédé à une épreuve de chargement sur site en utilisant un camion-benne de 10 tonnes après l'achèvement de la construction. D'après les résultats de mesure, le déplacement observé était identique à l'estimation donnée par l'analyse.



Photo 4: Coulage de poutre en BFUP
Photo 4: State of placement of UFC girder

POTENTIEL D'ÉVOLUTION DU BFUP DANS LE FUTUR

Les divers avantages issus des caractéristiques du BFUP ont été mentionnés jusqu'ici. Le potentiel de développement dans le futur du BFUP qui était le sujet de discussion du comité sur « l'Étude de la technologie des ponts utilisant le BFUP » (présidé par le Professeur Niwa de l'Institut de Technologie de Tokyo) qui a été constitué en lien avec la construction de ce pont, est présenté ci-après.

(1) Réalisation de poutres de pont de faible hauteur : la hauteur de poutre peut être abaissée par rapport aux ponts conventionnels qui ont la même longueur de travée grâce à l'ultra haute résistance du BFUP. Pour les routes dont le profil en long est déterminé par les ponts, le coût total du projet peut être réduit par la réduction du volume de remblai ainsi que la largeur à remblayer (largeur du terrain à acquérir) devant et derrière le pont grâce à la diminution de l'ensemble des travaux de terrassement.

La Figure 8, page de droite, montre un exemple de la comparaison entre la conception d'un pont avec poutre en BFUP et celle d'un pont en béton conventionnel qui franchit une route. En utilisant le BFUP, la hauteur du pont peut être abaissée de 2,0 m à 1,1 m. Par conséquent, le volume de remblai et la largeur à remblayer peuvent être diminués respectivement de 20 % et 10 %.



Photo 5: Montage des poutres en BFUP
Photo 5: State of erection of UFC girder



Photo 6. Photo montrant le pont achevé
Photo 6. Photo showing completed bridge

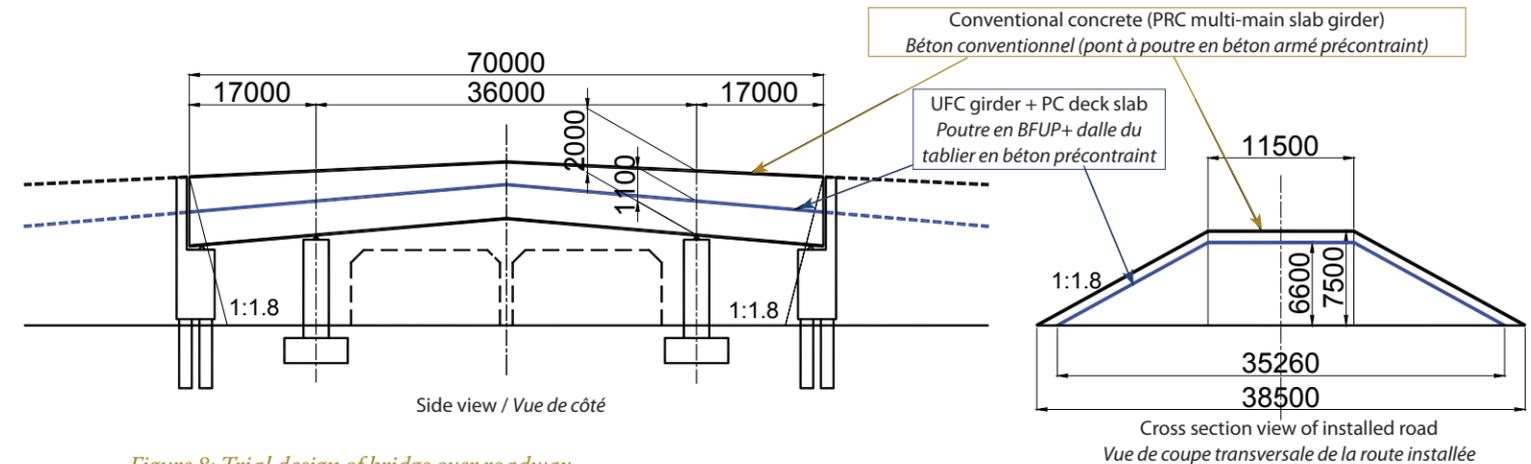


Figure 8: Trial design of bridge over roadway
Figure 8 : Conception expérimentale du pont qui passe sur une route

of erection to temporary fixation was completed without problems in approximately one hour. (Photo 5, left page)

After erecting the main girders, the scaffolding was installed. The cross girder and deck slab were constructed after ensuring that the flow of traffic in the crossroad directly beneath was uninterrupted. Subsequently, the bridge railing was constructed and the work was completed. (Photo 6, left page)

After completing the construction, on-site loading tests were carried out using a 10-t dump truck. From the measured results, the displacement was confirmed to be the same as estimated in the analysis.

ABILITY OF UFC TO EVOLVE HENCEFORTH

Various advantages arise from the characteristics of UFC mentioned

until now. The ability of UFC to evolve henceforth, discussed in the committee on the "Study of Technology Related to Bridges using UFC" (Chairperson: Professor Niwa of Tokyo Institute of Technology) formed in relation to the construction of this bridge, is introduced below.

(1) Realization of low girder height in bridge: the girder height can be reduced compared to conventional bridges with the same span because of the ultra high strength of UFC. For roads for which the vertical alignment is determined by the bridge parts, the total project costs can be reduced because of the reduction of fill volume and fill width (land acquisition width) before and after the bridge through decreased overall alignment work.

Figure 8 shows an example of comparison of designs of the UFC girder in a bridge over roadway and a conventional concrete bridge. By using UFC, the bridge

height has reduced significantly from 2.0 m to 1.1 m. As a result, the common fill volume and the common fill width of the road to be constructed reduced by 20% and 10% respectively.

The dead load reaction was reduced by nearly 30% because of the lighter weight. As a result, the substructure work costs were also reduced by 10%. In view of the above, the overall work cost was estimated to be reduced by 6% if the common fill is assumed to be purchased. Considering the reduction in the land acquisition cost, a much larger reduction in project expenses can be anticipated.

(2) For the same girder height, the span length can be significantly longer compared to that of the conventional bridge. For this reason, the number of bridge piers is reduced, the resistance to river flow and the cost of substructure work are reduced.

La charge permanente peut être réduite de près de 30 % grâce à la diminution du poids. En conséquence, le coût des travaux de fondation a pu être diminué de 10 %. Ainsi, on peut estimer réduire le coût total des travaux de 6 % si l'on doit acheter le matériau de remblai. Compte tenu de la réduction du coût d'acquisition du terrain, on peut s'attendre à une réduction importante des dépenses du projet.

(2) **Avec la même hauteur de poutre**, la longueur de la travée peut être considérablement plus longue qu'un pont conventionnel. Le nombre de piles de pont, la résistance à l'écoulement de l'eau ainsi que le coût des travaux de fondation peuvent être réduits en conséquence.

(3) **Comme les armatures ne sont pas nécessaires pour le BFUP**, l'épaisseur des éléments peut être réduite et on peut ainsi gagner en poids d'une manière significative. Si une structure composite avec béton est conçue, une économie de l'ordre de 20 à 40 % du poids serait réalisée. Si tous les éléments sont fabriqués en BFUP, la structure serait 80 % plus légère.

(4) **Les coûts du transport et des travaux de montage** peuvent être réduits si la structure est plus légère. De plus, comme la charge permanente de la superstructure est réduite, le coût des travaux de fondation peut être aussi réduit.

(5) **Grâce à une excellente durabilité du BFUP**, la réparation ou le renforcement ne sont pas nécessaires et on peut prévoir d'utiliser la structure pour plus de 100 ans. Les coûts d'exploitation et d'entretien peuvent être réduits grâce à la longue durée de vie de la structure.

Depuis l'achèvement du premier pont pour piétons en béton précontraint [2] au Japon en 2002, de nombreuses structures profitant des caractéristiques du BFUP ont été réalisées. En plus des ponts, le BFUP a un champ d'application large, tel que des ouvrages off-shore qui profitent de sa longévité, ou des bâtiments qui bénéficieront des avantages en matière de forme et de faible épaisseur.

CONCLUSIONS

Une étude pour les ponts routiers profitant des avantages structurels du BFUP en tant que nouveau matériau a été menée et le BFUP a été utilisé pour un pont routier pour la première fois au Japon. En adoptant la structure composite de poutres en BFUP et la dalle du tablier en béton conventionnel, les améliorations citées ci-après ont été réalisées par rapport à la conception initiale qui prévoyait d'utiliser le béton conventionnel :

- l'interruption du trafic sur l'intersection pendant le transport et le montage des poutres a pu être réduite de 2 jours à environ 2 heures ;
- la capacité de la grue pour le montage des poutres a pu être réduite de 120 tonnes à 50 tonnes grâce à la réduction du poids de chaque poutre de 12 tonnes à 5 tonnes ;
- le nombre de camions remorques transportant les poutres principales a pu être réduit de 6 à 1 ;
- les frais d'exploitation et de maintenance ont été réduits grâce à la longévité élevée des installations en BFUP ;
- la charge permanente de la superstructure a été réduite de plus de 30 % et l'asismicité (capacité asismique) de la fondation a été renforcée.

De nombreux avantages, comme l'abaissement de la hauteur de poutre, l'allongement des travées et l'allègement du poids des ponts, peuvent être attendus dans le développement futur du BFUP. Ce matériau remarquable qui présente des avantages considérables comme l'ultra haute résistance et une durabilité élevée ouvre des perspectives pour optimiser l'entretien d'infrastructures essentielles à la société.#

(Toutes les références mentionnées dans l'article se trouvent en page de droite).

(3) **Since reinforcing bars are not required in UFC**, the thickness of the members can be reduced and significant weight savings can be quantified. If a composite structure with concrete is designed, weight savings of 20% to 40% can be achieved. If all the members are made of UFC, then the structure can be made as much as 80% lighter.

(4) **Transportation and erection work costs** can be reduced if the structure is lighter. Moreover, since the superstructure reaction loads is reduced, the cost of substructure work is also reduced.

(5) **Thanks to the excellent durability of UFC**, no special repairs or reinforcements are necessary, and the structure may be anticipated to be in use for over 100 years. The lifecycle cost can be reduced since the structure has a long service life.

Since the completion of the first PC pedestrian bridge [2] in Japan in 2002, many structures utilizing the characteristics of UFC have been constructed. In addition to bridges, its application to a wide range of fields such as offshore structures using its high durability, and building structures utilizing its advantages of freedom in form and small thickness (design materials, etc.), may be anticipated.

CONCLUSIONS

A study for highway bridges utilizing the structural advantages of UFC as a new material has been conducted and UFC was applied to an actual road bridge for the first time in Japan. By adopting PC composite structure of UFC girders and the conventional concrete deck slab, the improvements described below were realized compared to the original design using conventional concrete:

- the traffic control at the crossroad during the transportation of the girders and the erection work was cut down from 2 days to about 2 hours;
- the capacity of the crane for the erection of the girders was reduced from 120 t to 50 t because the weight of each girder was reduced from 12 t to 5 t;
- the number of trailers for transporting the main girders was reduced from 6 to 1;
- the lifecycle costs can be reduced because of the extremely high durability of UFC material;
- the dead load of superstructure was reduced more than 30% and aseismicity of the substructure was enhanced.

Various advantages such as the realization of low girder height, long span and significant light weight in bridges can be expected in the development of UFC henceforth. This noteworthy material with its excellent advantages such as ultra high strength and high durability is expected to contribute to the maintenance of prime social assets into the future.#

ReferencesRéférences

[1]. Richard, P. and Cheyrezy, M. H.: *Reactive Powder Concrete with high ductility and 200-800 MPa compressive strength*, Mehta, P.K. (edition) *Concrete Technology Past, Present, and Future*. SP 144-24, pp.507, 1994

[2]. Y. Tanaka, H. Musha, A. Ohtake, Y. Shimoyama, O. Kaneko: *Design and Construction of Sakata-Mirai Footbridge Using Reactive Powder Concrete*, *Proceedings of the 1st fib Congress 2002*, Vol.1, pp.103-104, Session 1, October 2002

[3]. M. Behloul, O. Bayard, J. Resplendino: *Ductal Prestressed Girders for a Traffic Bridge in Mayenne, France*, 7th *International Conference on Short and Medium Span Bridge 2006*, AM-019-1-11, August 2006

[4]. M. Kayashima, Y. Shinozaki, T. Iizuka, M. Yamatoya: *Design and construction of bridge using ultra high strength fiber reinforced concrete of Fc 200 N/mm² grade*, *Concrete Engineering*, Vol. 43, No.7, July 2005, pp. 65-69#