

# UFC を用いた東京国際空港 GSE 橋梁の UFC 桁製作と施工

武者浩透<sup>1</sup>・福原哲<sup>2</sup>・土方遍<sup>3</sup>・一戸秀久<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 大成建設株式会社 技術センター (〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 344-1)

<sup>2</sup>正会員 工修 大成建設株式会社 東京支店 (〒163-6008 東京都新宿区西新宿 6-8-1)

<sup>3</sup>正会員 大成建設株式会社 東京支店 (〒245-0051 東京都新宿区西新宿 6-8-1)

<sup>4</sup>関東地方整備局 東京空港整備事務所 (〒144-0041 東京都大田区羽田空港 3-3-1)

東京国際空港 GSE 橋梁は、東京国際空港再拡張事業で建設される橋長 48m、幅員 15m の道路橋で、その桁部には超高強度繊維補強コンクリート (UFC) が採用されており、世界最大の UFC 道路橋である。本橋では UFC 桁の採用により、総質量 50 t ものトローイングトラクターを連行荷重として考慮し、かつ 46.0m の支間長を確保しながら、従来のコンクリート橋に比べて 80% の桁高に抑えている。また、UFC には鉄筋を使用しないため、ウェブの部材厚を 15 cm とするなどの部材の薄肉化を実現しており、40% の自重削減を実現している。本稿では、GSE 橋の構造とその特徴、UFC 桁製作時の品質管理手法とそのデータについて報告する、また、現場施工についてもその概要を報告する。

**キーワード：**超高強度繊維補強コンクリート、UFC、プレキャスト、プレストレス、道路橋

## 1. はじめに

東京国際空港 GSE 橋梁 (以下 GSE 橋) は、国際線エプロン整備事業で建設される GSE 通行のための橋梁である。GSE とは Ground Support Equipment の略称で、空港の地上業務や航空機への支援業務に使用される機材のことをいう。本橋は国際線の北側と南側のエプロンを繋ぐため空港連絡道路の上空に架設される (図-1~3)。本橋の床版部には従来の場所打ちコンクリートが用いられているが、プレキャストブロックで架設される U 形状の桁には超高強度繊維補強コンクリート (Ultra high strength Fiber reinforced Concrete : UFC) を用いた桁が採用されている (図-5)。

この UFC 材料は、水セメント比 W/C が約 22% であり、シリカフェーム等の反応性粉体も配合されてい



図-2 GSE 橋 側面図

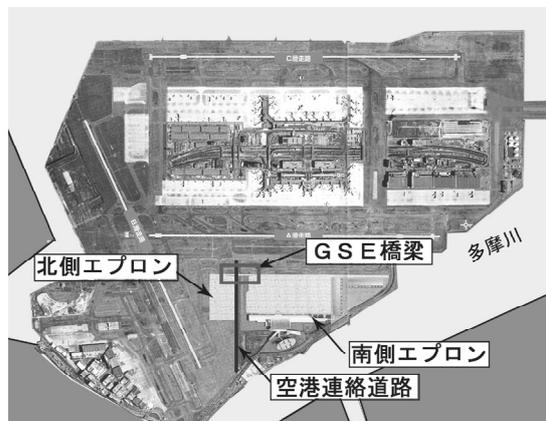


図-1 GSE 橋 位置図



図-3 GSE 橋 完成予想 CG

側面図（道路中心）

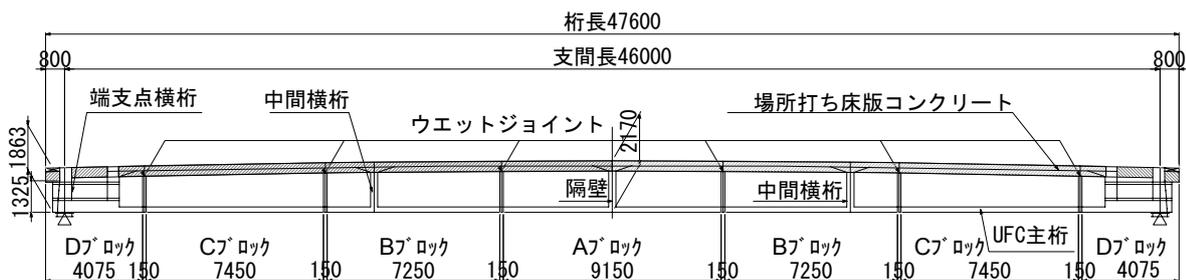


図-4 GSE 橋 構造一般図

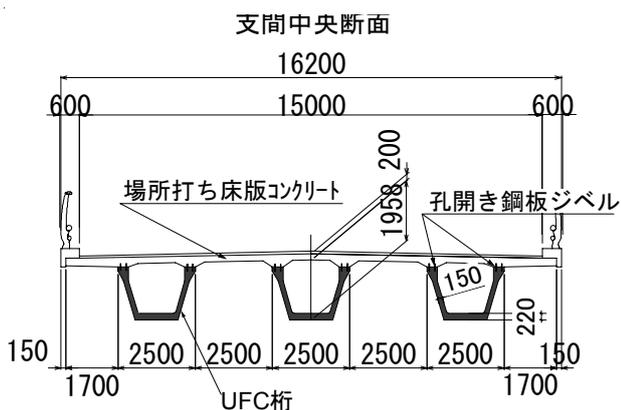


図-5 GSE 橋 断面図

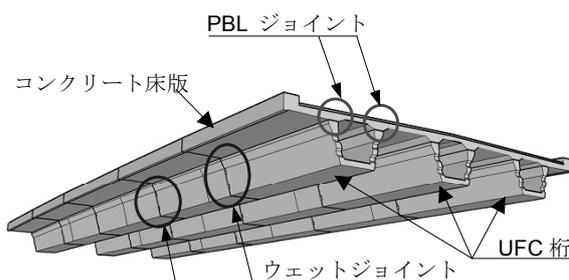


図-6 ジョイント位置図

ることから、水結合材比 W/B では実に約 14%と、通常のコンクリートの 1/4 程度の水しか配合されていない。そのため圧縮強度が  $180\text{N/mm}^2$  と超高強度であり、非常に緻密な硬化体であるため、極めて優れた耐久性をも兼ね備えている。また、単位体積当たり  $157\text{kg}$  と多量の鋼繊維（直径  $0.2\text{mm}$ 、長さ  $15\text{mm}$ ）を配合しているため、靱性を確保でき、UFC 部材には鉄筋を用いないのが通例である（表-1）。この超高強度や高耐久性によって実現される UFC 部材の薄肉化と、PC 鋼材によるプレストレスを併用することにより、UFC 構造物は近年、日本で橋梁を中心として PC 構造物への適用が増えつつある。

本橋では、その UFC 桁の採用により、総質量  $50\text{t}$  もの航空機を牽引するためのトーイングトラクターを連行荷重として考慮し、かつ  $46.0\text{m}$  の支間長（図-4）を確保しながら、端部桁高を  $1.86\text{m}$  と桁高スパン比  $H/L=1/25$  に抑えてアプローチ部の土工量を削減している。また、部材厚をウェブで  $15\text{cm}$ 、下床版で  $22\text{cm}$  と従来の PC 橋に比べて  $1/2$  以下とし、床版を含めた橋の自重を従来より  $40\%$  削減して、下部工の規模縮小を可能とした。そして、UFC は非常に緻密な材料であるため、維持管理の負荷が少ない高耐久な橋を実現している。



写真-1 GSE 橋 プレキャストブロック

## 2. GSE 橋の構造概要

GSE 橋は、橋長  $48.0\text{m}$  のポストテンション UFC 単純合成 3 室箱桁橋であり、支間長は  $46.0\text{m}$  である。断面構成は、U 型形状の UFC プレキャスト桁 ( $f'_{ck} = 180\text{N/mm}^2$ ) と場所打ちのコンクリート床版 ( $f'_{ck} = 40\text{N/mm}^2$ ) を孔開き鋼板ジベル（以下 PBL）で結合している（図-6、写真-1）。この PBL による結合方式は、鋼桁とコンクリート床版といった鋼とコンクリートとの部材の合成に用いられるのが通常であるが、UFC 橋においてはコンクリート同士である UFC 桁と床版

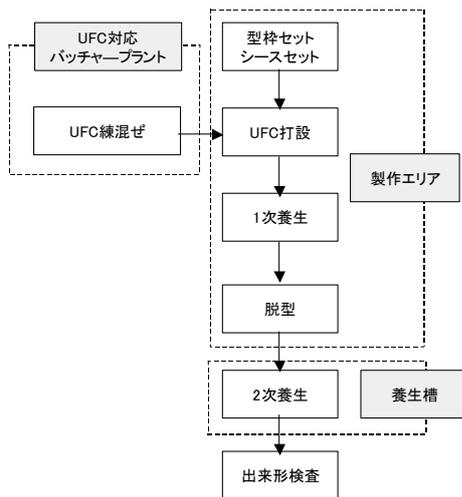


図-7 UFC 桁 製作フロー



写真-2 UFC プレミックス粉体

との結合構造として開発され、歩道橋<sup>1)</sup>や道路橋<sup>2)</sup>に採用されている。UFCのプレキャスト桁は、現場への運搬を考慮して断面の幅を2.5m、長さを10m以下とし、かつ重量を25t以下に抑えて7分割されている(図-4)。UFC桁は、架設地点の支保工上に架設された後、ウェットジョイントと呼ばれるUFCの場所打ちにより桁間ジョイント部が充填され、プレストレスの導入により橋体が一体化される(図-6)。

### 3. UFC 桁の製作

図-7にプレキャスト工場におけるUFC桁の製作フローを示す。UFC材料は独自の配合であるため、予め各種の材料が配合比率によって混合されたプレミックス材として供給される。今回のように大型の構造物を製作する場合には、フレコンと呼ばれる大きな袋体で1t単位での材料供給となる(写真-2)。そのためUFC材料をミキサーに供給するには、専用の設備が必要となる。よって、GSE橋のUFC桁の製作は、UFC材料に対応した練混ぜ設備を有し、UFC部材製作の実績の多いコンクリート2次製品工場にて行った。

表-1 UFC 基本配合

	プレミックス粉体	鋼繊維	高性能減水剤	水
配合 kg/m <sup>3</sup>	2,254	157	28* (liquid)	162
単位水量：180				

\*) 高性能減水剤の添加量は、練混ぜ時の環境条件や目標フローによって調整される

表-2 フレッシュ性状の品質管理項目

項目	時期・回数	判定基準
コンシステンシー	1) 桁1ブロック打設毎に1回(強度用供試体採取時)	250±30mm
空気量	2) 製造時に目標範囲外であった場合	3.5±2.0%
コンクリート温度		5℃以上、40℃以下

#### (1) UFC の練混ぜ

UFCは水結合材比W/Bが約14%と極めて単位水量が少なく、ミキサーによる練混ぜの初期には餅のような粘性の高い状態となるため、ミキサーに大きな負荷が掛かる。そのため、ミキサーの定格容量の5～8割程度をUFCの練混ぜ量と設定するのが通常である。今回の製作では、水平2軸強制練りの1.5m<sup>3</sup>ミキサーを用いて、1.1m<sup>3</sup>の練混ぜを行った。本橋での最大ブロックは、長さ9.15mの中央のAブロックであり、その体積は8.72m<sup>3</sup>となるため、Aブロックでは8バッチの練混ぜを行っている。

また、UFCには、単位水量を減らすためと流動性を確保するために多量の高性能減水剤が用いられるが(表-1)、それが効果を発揮するまでに時間を要するため、1バッチの練混ぜ時間は、10～15分(鋼繊維の投入時間：約2分を含む)程度と長くなる。そのため、材料投入から練り上がりまでの1バッチあたりの所要時間は25分と長くなり、8バッチの練混ぜには長い時間を要することから、本橋ではミキサー2基を使用して練混ぜを実施し、練混ぜ時間の短縮を図った。

表-2に打設前のUFCフレッシュ性状の品質管理項目を示す。コンシステンシーの項目では、UFCは骨材を含まないことからモルタルのフロー試験器具を用いてフローの確認を行い、流動性や充填性が適正な範囲であるかを確認している。UFCは練混ぜ設備の能力や、練混ぜ時の天候等を考慮して、目標フロー値が得られるように高性能減水剤の添加量を調整している。本橋の場合は、練混ぜ・打設量が多く、練混ぜから打設までに1時間30分程度要するバッチがあるため、目標フロー値を260mmと設定した。

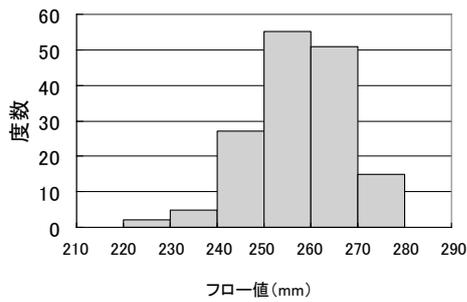


図-8 打設前 フロー値

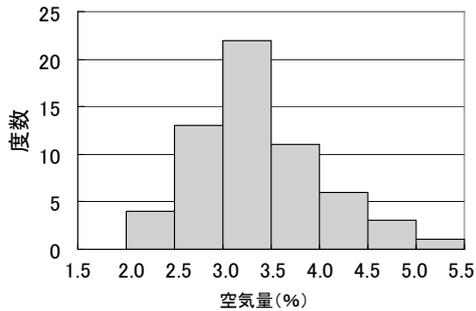


図-9 打設前 空気量

本橋ではフレッシュ性状のデータを集積するため、品質管理要領では「1ブロックあたり1回」であるところを、ほとんど全てのバッチ：155バッチについて打設前のフロー試験を行った。図-8に打設前のフロー値の度数分布を示す。打設時期が6月～10月と暑中であったが、比較的に良くコントロールされ、 $260 \pm 20\text{mm}$ の範囲にほとんどのデータが入っている。空気量についても、品管の回数よりも頻度を上げてデータを集積した。図-9に打設前の空気量の度数分布を示す。

また、今回はUFCの練り上がり後のフローの保持性の確認試験も実施した。実施時期は、暑中の高温により時間とともにフローの低下が懸念される8月とし、その日の外気温は $31^\circ\text{C}$ 、打設前UFC温度は $33^\circ\text{C}$ であった。気温の上昇が予想されたため、その日は高性能減水剤を調整して、練り上がり直後で $270\text{mm}$ を超えるように目標値を設定した。練り上がり直後から30分毎にフロー値を確認した結果を図-10に示す。非常に暑い外気温にも関わらずフローの保持性は良く、打設時の1時間30分後でも $250\text{mm}$ 程度、3時間後でも $240\text{mm}$ と高い流動性を保持している。

## (2)型枠

練り上がったUFCは、高い流動性を有する自己充填コンクリートである。そのため、 $15\text{cm}$ といった薄い部材厚でも打設が容易であり、棒パイプレーター

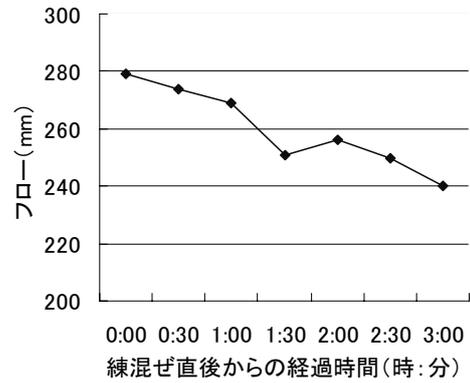


図-10 フロー値の経時変化

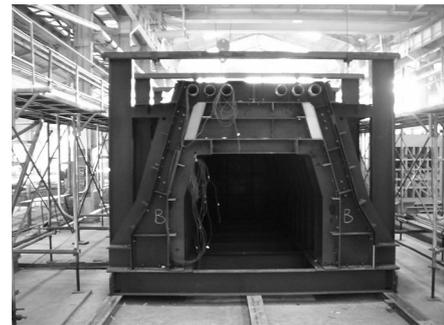
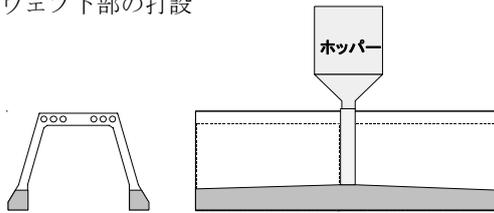


写真-3 鋼製型枠

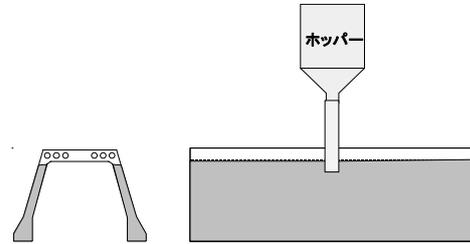
のような振動締め固めが不要な反面、流動性による留意点を型枠計画時に考慮する必要がある。以下にその留意点と本橋における対応を述べる。

- ① 高い流動性によりセルフレベルング効果があるため、打設面に勾配を設けられない。具体的には、 $1\text{m}$ の長さの部材であっても、その長さ方向に $5\text{cm}$ の打設面の勾配を設けることは困難である。そのため、打設面はあくまでも水平である必要がある。U形の桁（以下、U桁）の下床版を下にした状態で型枠を設置した場合には、桁高が変化する本橋では、ウェブの天端に勾配が生じてしまう。そのため、本橋ではU桁を逆さにし、下床版を上にした状態で打設することとし、型枠を計画した。
- ② UFCは凝結開始が10時間以降と、流動化状態が非常に長いため、型枠にコンクリートの液圧が長時間に渡り作用する。また、その高い流動性のため、通常のコンクリートでは全く問題とならないような $2\text{mm}$ 程度のわずかな隙間でも、UFCは漏れ出して止まらない状態となる。そのためUFCの型枠には、高い剛性と気密性が必要となる。以上の点と型枠の転用を考慮し、本橋では鋼製型枠を採用した（写真-3）。

1) ウェブ下部の打設



2) ウェブ上面までの打設



3) 下床版の打設

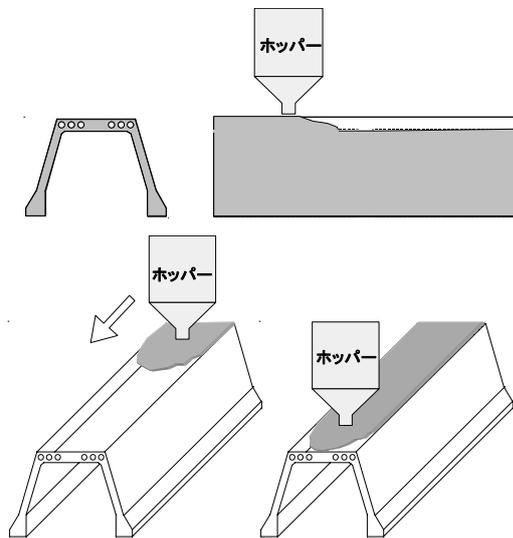


図-11 打設フロー

**(3)打設**

練り上がった UFC は 3.5m<sup>3</sup> の大型ホッパーを用いて打設した。図-11 に打設フローを示す。打設は、ホッパーに取り付けたトレミーホースを用いるが、ウェブ厚は 15cm と狭いが、鉄筋が配置されていないため、ウェブの下部まで差し込みが可能である。その筒先を UFC 内に保持しながら両ウェブを均等に上面まで打ち上げた。その際、UFC は自己充填であるため、棒バイブレータなどの振動締め固めは不要であるが、流動性の補助と充填を確実にするため型枠バイブレーターを短時間使用した。

UFC は単位水量が極めて少ないため、表面が乾き易い。特に下床版の打設では、打設面が広がるため、その面が乾き始めた時の対応は困難であり、出来るだけ短時間で打設を完了する必要がある。そのため下床版の打設では、ホッパーを桁端部の中央から桁



写真-4 UFC 打設状況

表-3 硬化後の強度管理項目

項目	検査方法	判定基準 (二次養生後)
圧縮強度	JIS A 1108	180N/mm <sup>2</sup> 以上
ひび割れ発生強度	UFC指針案による方法(JIS A 1113準拠)	8.0N/mm <sup>2</sup> 以上
引張強度	UFC指針案による方法(JIS A 1106またはJSCE-G 552 準拠)	8.8N/mm <sup>2</sup> 以上

方向に移動させながら一気に打設を行った。写真-4 に打設状況を示す。わずか 22cm 厚の下床版であるが、UFC の高い流動性により、非常に小さな流動勾配で桁方向に UFC が流動しているのが確認できる。

**(4)養生**

打設終了後、夜から翌朝まで 40℃ の蒸気養生を行った。UFC の凝結開始は 10 時間以降であるため、午前中に打設した場合でも夜までは硬化を開始しないが、この促進養生によって急激に強度が発現し、翌日の午前中には 30~40N/mm<sup>2</sup> の圧縮強度が得られる。その後、脱型して 2 次養生を実施する。

2 次養生は、90℃ の蒸気養生を 48 時間行う。この 2 次養生によって、強度は約 200N/mm<sup>2</sup> まで発現するとともに、自己収縮もほぼ終わってしまうため、収縮やクリープの少ない安定した硬化体が得られる。

**(5)硬化後 UFC の強度**

硬化後の UFC の強度管理項目を表-3 に示す。UFC は圧縮強度のみならず、引張強度においても通常のコンクリートより数倍の強度を有する。そのため鋼繊維補強を考慮せずに、UFC のマトリックスのみにおいて、設計で 8N/mm<sup>2</sup> の引張りを受け持てることになっている。よって、品質管理として硬化した UFC の引張強度を確認する必要がある。しかしながら、UFC の練混ぜ時には鋼繊維を投入してしまうため、打設時に採取する供試体には必然的に鋼繊維の入っ



写真-5 UFC 桁 ストック状況

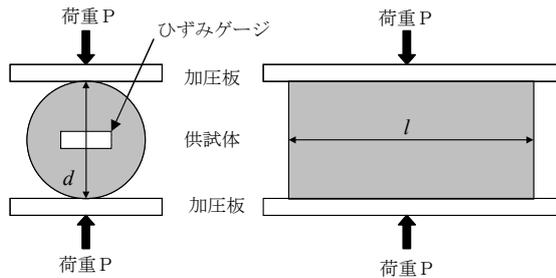


図-12 ひび割れ発生強度試験方法

表-4 ヤング係数 試験結果

NO	Pmax [KN]	$\sigma_{cmax}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E[\times 10^4]$ [N/mm <sup>2</sup> ]
1	1597	203	5.45
2	1555	198	5.46
3	1575	201	5.55
Mean	-	201	5.49
Ref.	CALCULATED ON JIS A 1149		
Name	タケ丸	Size	$\phi 10 \times 20h$ 11days

てしまう点と、純引張試験は試験方法が難しく日常的な品質管理の強度試験としては適さないため、図-12 に示すような割裂試験を用いて、ひび割れ発生強度求めることが土木学会のコンクリートライブラリー113「超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)」(以降、UFC 指針)<sup>3)</sup>に示されている。これは割裂ひび割れの発生位置にひずみゲージを貼り、そこにひび割れが発生したタイミングをゲージのひずみデータにより割り出し、その時の荷重をひび割れ発生強度、すなわち UFC マトリックスの引張強度とするものである。

また、管理項目の引張強度は鋼繊維による靱性の効果を把握するものである。この場合も引張強度試験の難易さを回避するために、3 等分点の曲げ強度試験により換算することが UFC 指針に示されている。

図-13 から図-15 に、各種強度の分布図を示す。各図の下限値は表-3 に示す強度管理値としており、いずれの値も管理値を満足していることがわかる。圧縮強度は平均値 208N/mm<sup>2</sup> を中心にきれいな正規分

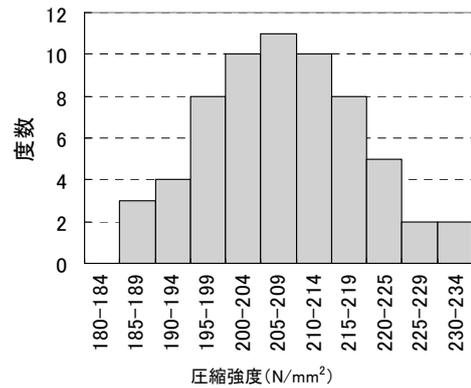


図-13 圧縮強度 分布図

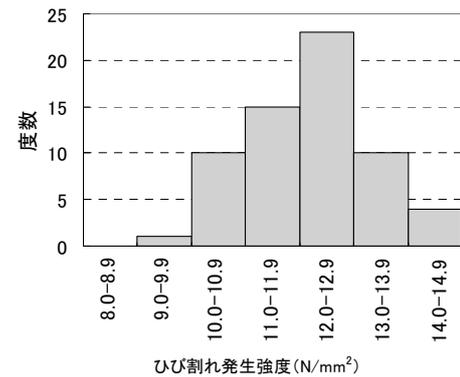


図-14 ひび割れ発生強度 分布図

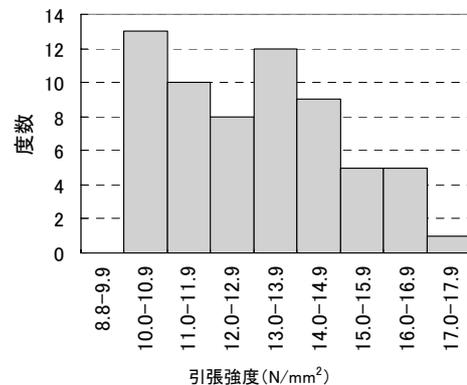


図-15 引張強度 分布図

布を示している。ひび割れ発生強度においても、平均値 12.1N/mm<sup>2</sup> を中心にきれいな正規分布である。引張強度に関しては、管理値の 8.8N/mm<sup>2</sup> を十分上回っているが、10~15N/mm<sup>2</sup> でばらついている。これは、鋼繊維の補強効果を確認した試験であるため、小さな供試体の限定されたひび割れの強度に依存しており、その位置での鋼繊維の配置によって影響を受けているものと考えられるが、詳細は不明である。

また、6月に実施した試験練り時に確認した、UFC のヤング係数を表-4 に示す。

#### 4. GSE 橋梁の施工

表-5 に架設工程表を、図-16 に施工ステップ図を示す。

表-5 架設工程表

	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月
仮設ベント・支保工	—					—	—
セグメント架設工		—					
床版・横桁コンクリート工			—	—	—		
ウェットジョイント工				—			
PC緊張工					—		
ジャッキダウン工						—	
地覆・付属物工					—		—

以下に、GSE 橋梁の施工における特徴的な点について、その概要を説明する。

##### (1)UFC 桁の架設

架設位置は空港連絡道路上となるため、夜間に片側の車線を通行規制して、架設を行った。UFC 桁は幅 2.5m以下、長さ 10m以下、重量 25 t以下で設計されているため、一般のトレーラーで運搬が可能であり、360 t クレーンにて支保工上に架設した(写真 6~10)。その際、ウェットジョイントの幅 15cm を開けるとともに、上げ越し計算より決定した高さに各部ブロックを設置した。橋軸方向の縦断勾配や橋長の微調整等は、ウェットジョイントで調整することにより容易に可能である。

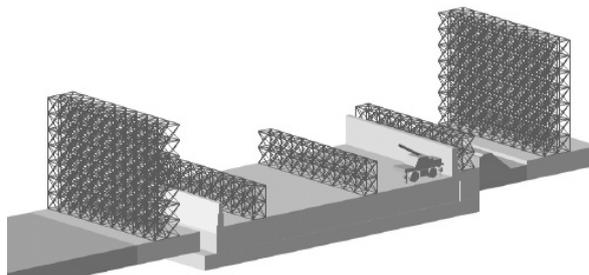


写真-6 UFC 桁の運搬・搬入

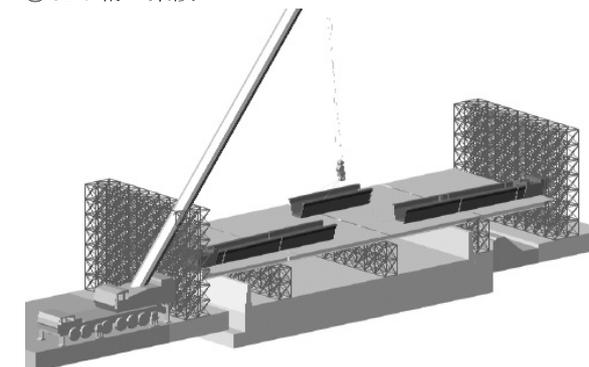


写真-7 UFC 桁の夜間架設

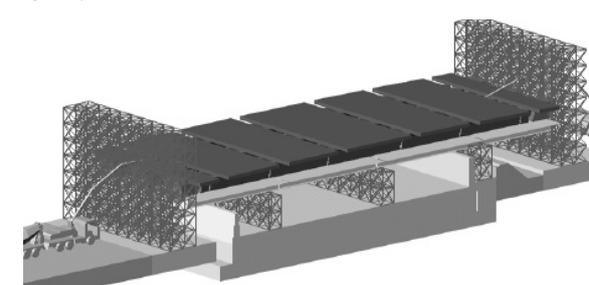
①仮設ベント・支保工の設置



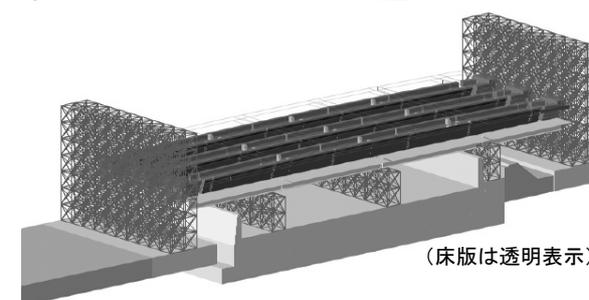
②UFC 桁の架設



③床版・横桁コンクリートの打設



④ウェットジョイントの打設・養生



⑤PC 緊張

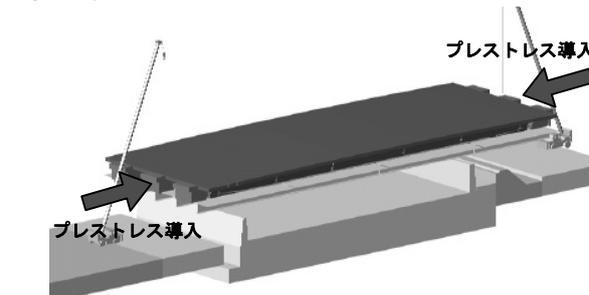


図-16 施工ステップ図

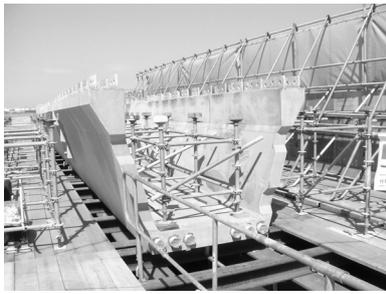


写真-8 架設された UFC 桁



写真-9 架設完了

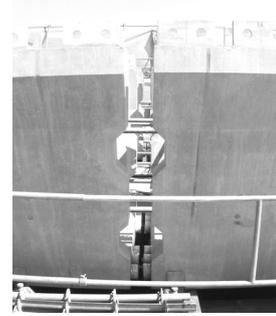


写真-10 UFC 桁の WJ 遊間



写真-11 上床版の施工



写真-12 ウェットジョイント (WJ) の養生

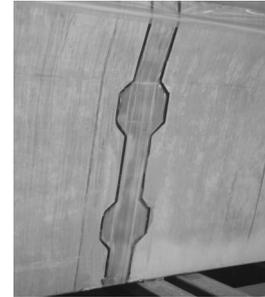


写真-13 養生後の WJ

## (2) ウェットジョイントの打設・養生

本橋のウェットジョイント（以降、WJ）は 18 箇所あり、その UFC 量は  $3.3\text{m}^3$  であるため、WJ の打設は 100L クラスのミキサーを 2 台用意して、2 日間にわたって打設を行った。WJ の UFC 強度は、設計計算上の必要強度と、現場の養生条件等を考慮して  $120\text{N/mm}^2$  と設定した。打設後の WJ の養生は、ファーンレスと呼ばれる温風式の養生設備を用いて、桁内に温風を送風する風管を設置して 18 ヶ所の WJ を約 5 日間、 $40\sim 50^\circ\text{C}$  の温度で養生を実施した。強度の確認は、WJ の近傍に  $\phi 50$  のテストピースを設置して WJ と同一養生条件とし、そのテストピースの強度を順次確認して行った。養生 4 日目に十分強度が発現していることを確認した後、送風を停止して、桁に急激な温度変化を生じさせないようにゆるやかに降温した。養生後の WJ の強度は約  $160\text{N/mm}^2$  と、設計値の  $120\text{N/mm}^2$  を十分満足する値であった。

## (3) PC 緊張

WJ と上床版の施工が完了し、各部の強度が確認された後に、PC 鋼線 SWPR19L を各桁 6 本ずつ計 18 本を緊張し、合計で  $5,760\text{t}$  のプレストレスを導入した。この緊張により、支間中央の橋面レベルで約 6 cm 桁が上昇し、スパン 46m の UFC 橋が誕生した。

## 5. まとめ

GSE 橋では UFC 桁の採用により、桁高低減と大幅な自重削減を同時に可能とし、高耐久な橋梁を実現することができた。UFC 桁の製作においては、十分な品質管理を行うことにより、高品質な桁の量産化が可能であることを確認した。

GSE 橋梁は、世界最大の UFC 道路橋である。本橋には、これまで歩道橋などで培ってきた多くの UFC 技術が盛り込まれており、UFC の適用技術で世界をリードしている日本の技術力の象徴となる橋である。今後、これらの技術が UFC の発展ならびにコンクリート技術の発展の一助となれば幸いである。

謝辞：GSE 橋梁の設計・実験・施工において、ご指導・ご意見を頂きました東京大学の前川宏一教授ならびに関係各位の方々には深く感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 武者浩透，大島邦明，細谷学，稲原英彦：UFC を用いた PC 歩道橋の事例とその特徴，プレストレストコンクリート，Vol. 49，pp48-45No. 6，2007. 11
- 2) 黒岩正，西川孝一，岩崎郁夫，大熊光：超高強度繊維補強コンクリートを用いた道路橋の開発～北九州 JCT 堀越 C ランプ橋～，橋梁と基礎，Vol. 41，pp23-29，2007. 4
- 3) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリート設計・施工指針（案），コンクリートライブラリー第 113 号，2004