

ダクトルを用いたPC歩道橋の特徴と事例

—日本初のダクトルによる連続桁橋「三兼池橋」を例として—

武者 浩透^{*1}・石田 有三^{*2}・稻原 英彦^{*2}

Keywords : UFC, Ductal, ultra-high strength, fiber reinforced concrete, bridge, precast segment, wet joint, PBL
UFC, ダクトル, 超高強度繊維補強コンクリート, 橋梁, プレキャスト, ウェットジョイント, PBL

1. はじめに

近年, 圧縮強度 200N/mm^2 を有する超高強度繊維補強コンクリート (Ultra-high strength Fiber reinforced Concrete; 以下, UFC) が開発され, 土木構造物への適用が進んでいる。このUFCは強度が高いだけでなく, 鋼繊維の補強効果により高い韌性が確保され, マトリックスの緻密構造により極めて高い耐久性をも有している。

大成建設ではUFCが持つ高いポテンシャルに着目し, 2000年にUFCである「ダクトル」を技術導入して技術開発を進め, 2002年には日本初のUFC橋となる「酒田みらい橋」¹⁾を建設した。2004年には, この橋の建設に際して行われた実験やそれまでの開発成果をベースとして, UFCを構造物へ適用する際の指針「超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)」²⁾ (以下, UFC指針) が土木学会から発刊されている。

ダクトルを用いた構造物では, その超高強度や高耐久性によって実現される部材の薄肉化と軽量化の利点により, 橋梁分野での適用が先行しており, 8~20cmといった部材厚やスパン 50mを超える単純桁など, 従来のコンクリートでは達成できなかった構造が可能である。ダクトル橋梁としては, 国内では現在までに歩道橋 9 橋, 道路橋 (部分使用を含む) 3 橋が完成している。

ダクトル橋梁はその材料や特性の特殊性により, その設計手法から構造形式, 施工方法に至るまで, 従来のコンクリートにない新しい技術が用いられている。本報告では, まず UFC であるダクトルの特性を紹介し, ダクトルを使用した歩道橋の特徴について述べる。次

に, 2007年に福岡県大野城市に建設された橋長 81.2m の歩道橋「三兼池橋」を事例とし, 三兼池橋の設計から施工までを, ダクトル橋の特有な技術を中心として紹介し, その特徴を述べる。

2. UFC(ダクトル)の特性

ダクトルは, セメント, ポゾラン材等の反応性微粉末を使用した無機系複合材に鋼繊維が配合された材料であり, 次に示す特性を有している。

2.1 超高強度

圧縮強度の設計基準強度 (特性値) 180N/mm^2 を有するほか, 引張強度についても設計上考慮することが可能である。標準熟養生 (90°Cの蒸気養生) により所定の強度が発現し, 物性値も安定するため, 収縮およびクリープも非常に小さい。表-1に通常の高強度コンクリートと対比したダクトルの物性値を示す。

2.2 高耐久性

ダクトルの水結合材比はW/B=0.14と, 水和反応限界まで単位水量を低く抑えており, 生成物中の空隙を極限まで抑えた最密充填により組織は高緻密である。表-1に示すように, ダクトル中の物質移動に関する抵抗性は極めて高く, 透水係数および塩化物イオンの拡散係数は, 通常の高強度コンクリートの $1/10^6$ および $1/300$ 程度である。そのため, 鋼材位置 (かぶり 20m m) における塩化物イオン濃度の経年変化も極めて遅い(図-1)。

2.3 高韌性

ダクトルは, 高張力鋼繊維 (引張強度 $2.0 \times 10^3\text{N/mm}^2$ 以上, 直径 0.2mm, 長さ 15mm) を容積比で 2%も配合するため, 鋼繊維の架橋効果によりひび割れ幅の抑制効果に極めて優れ, 高い韌性を有する。そのため, ダクトルの構造物には原則として鉄筋を使用しない。

*1 技術センター 土木技術開発部 土木技術開発プロジェクト室
*2 土木本部 土木設計部

表-1 ダクトルと高強度コンクリートの比較²⁾
Table 1 Characteristics of Ductal and conventional high strength concrete

項目	単位	ダクトル ^(※1)	高強度コンクリート(例)
圧縮強度 ^(※2)	N/mm ²	180	40
ひび割れ発生強度 ^(※2)	N/mm ²	8.0	1.2
引張強度 ^(※2)	N/mm ²	8.8	2.7
ヤング係数	kN/mm ²	50	31
単位容積質量	kN/m ³	25.5	24.5
収縮ひずみ		50×10^{-6}	230×10^{-6}
クリープ係数		0.4	2.6
透水係数	cm/s	4×10^{-17}	1×10^{-10}
塩化物イオン拡散係数	cm ² /年	0.002	0.700

(※1):標準熟養生後

(※2):特性値

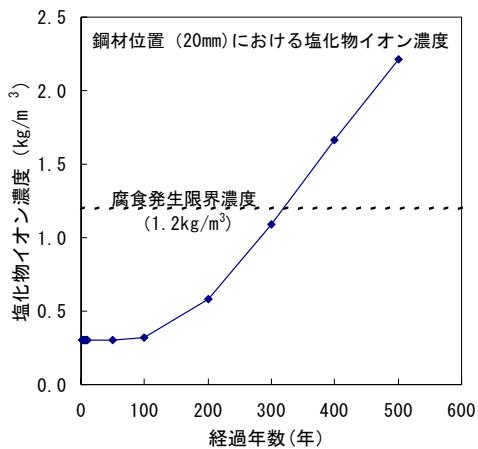


図-1 塩化物イオン濃度の経年変化¹⁾

Figure 1 Changes over time in chloride ion concentration
(表面塩化物イオン濃度:飛沫帶環境を想定し $13\text{kg}/\text{m}^3$)

3. ダクトル歩道橋の特徴

前項に示すような優れた特性を有するダクトルであるが、PC橋梁への適用性を考えた場合、その材料の性質上、以下に示すような制約条件がある。

①プレキャスト部材としての使用

ダクトルは高品位な材料であるため、その品質管理を厳格に行う必要がある。また、脱型後に 90°C の熱養生を行うため、蒸気養生設備が必要となる。そのため現時点では、ダクトル部材は工場での製作が必要であり、プレキャスト部材としての構造物への適用が前提である。

②経済性を考慮した適用

ダクトルでは粗骨材を用いず、反応性粉体を多量に配合することにより超高強度を確保している。また、靱性確保のため 1m^3 あたり 157kg もの多量な鋼纖維を配合している。このような配合であるため、ダクトルの

材料単価は必然的に高くなり、構造物への適用の際には、高強度を活用した部材厚の低減を図るほか、構造上や施工上の工夫により経済性を得ることが必要である。

以上の制約と先に述べた材料特性を踏まえ、ダクトルがPC歩道橋へ適用された事例においての、構造・形状の基本的な特徴を次に示す。

3.1 薄い部材厚

ダクトルは鉄筋を使用しないことによる「かぶり」の規定からの解放により、薄い部材厚が実現可能となる。図-2にダクトル歩道橋の部材厚とスパンの関係を示すが、スパン 50mまではその部材厚（上下床版およびウェブ厚）が 5~13cm の範囲でほぼ納まっている。また、多くのダクトル歩道橋で全外ケーブル方式を採用していることも、部材厚を薄く抑える要因となっている。

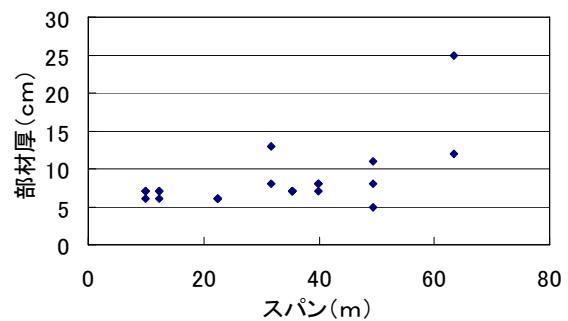


図-2 部材厚とスパンの関係

Figure 2 Relation between member thickness and span

3.2 軽量化

薄い部材厚の採用により、自重の大幅削減が可能である。図-3は橋面 m^2 当りのダクトル量とスパンの関係を示しているが、橋面 m^2 当りに換算したダクトル量（厚さ）は 20cm 前後と、一般のPC橋梁に比べて 1/4 程度の使用量であり、大幅な軽量化を裏付けている。

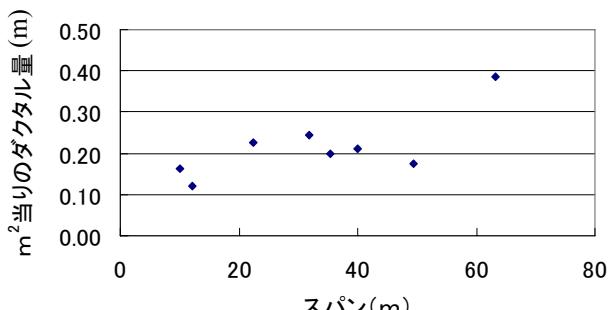


図-3 1m^2 当りのダクトル量とスパンの関係

Figure 3 Relation between Ductal quantity per unit area and span

3.3 低桁高・長スパン

部材が薄いため、プレストレスによる導入圧縮応力度が、従来のPC橋に比べて数倍高い上、軽量化により自重を支えるための力も少なくて済み、低桁高や長スパンが可能となっている(図-4)。

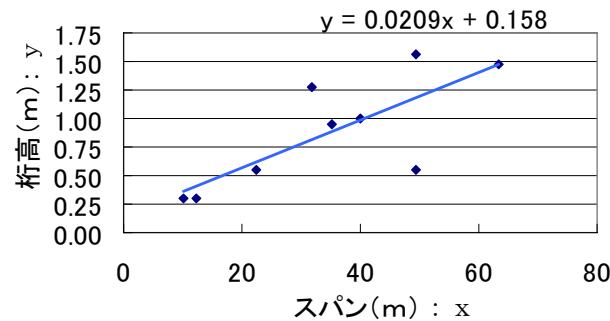


図-4 桁高とスパンの関係

Figure 4 Relation between girder height and span

4. 事例紹介：三兼池橋

4.1 三兼池橋の概要

三兼池橋は、ダクトルを用いた橋梁としては初めての連続桁形式を採用した橋であり、橋長は81.2mとダクトルを含めUFC橋としては最長である(図-5)。

本橋は、福岡の南東に位置する大野城市における上大利地区宅地造成区域内に建設された歩道橋である。宅地造成地内の三兼池の周囲に巡らせた遊歩道の回遊性を高めると共に、土地区画整理事業の記念碑的な役割を担っており、景観検討によりスレンダーなデザインが求められた。また、本橋の供用開始後に維持管理の点から、耐久性に優れたダクトル橋が採用された。このダクトルには鋼纖維が配合されており、部材内に鉄筋を配置しないのが通常である。その結果、鉄筋のかぶりに関する規定がなくなると共に、非常に高い圧縮強度($f_{ck} = 180\text{N/mm}^2$)を活用することにより、上

床版7cm、ウェブ厚8~20cm、下床版8cm(図-6)といった極めて薄い部材が実現されている。

以下に、三兼池橋の工事概要を示す。

発注者：大野城市上大利北地区画整理組合
設計施工：大成建設株式会社

規格：歩行者専用道路

架橋位置：福岡県大野城市上大利『三兼池公園』内

構造形式：PC2径間連続箱桁橋

使用材料：UFC(ダクトル)

橋長：81.2m、支間長：39.9m+39.9m

有効幅員：3.0m

架設工法：プレキャストブロック工法

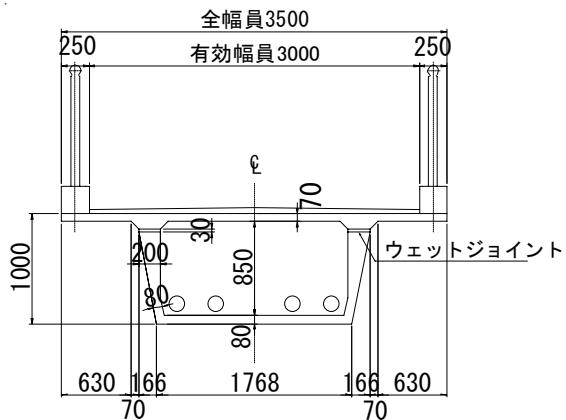


Figure 6 Cross section

4.2 景観検討

4.2.1 施設の位置付け

本橋は区画整理事業における施設として、三兼池公園に接する三兼池の上空に計画された(図-7)。景観デザインの検討を進めるにあたって、本橋梁を以下のように位置付けた。

①遊歩道の回遊性を高め、歩行者動線の機能を向上させる。

②事業の記念碑として、シンボリックな存在とさせる。

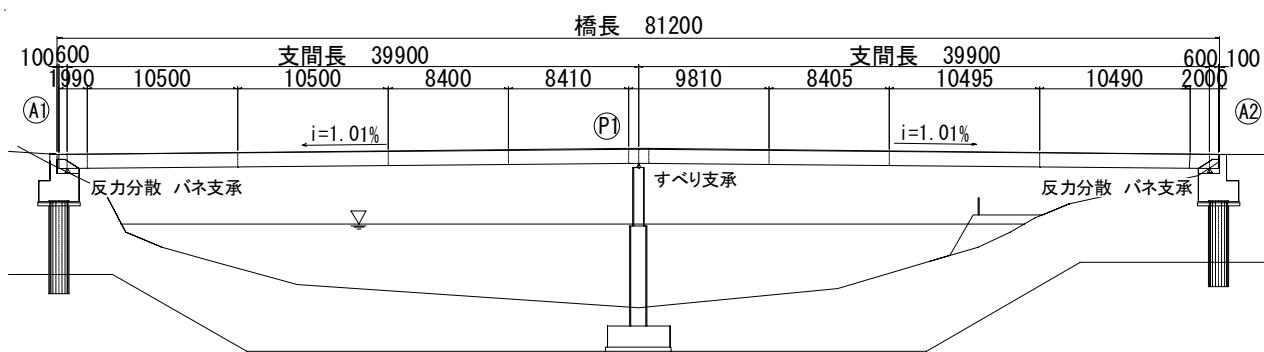


Figure 5 General view of Mikaneike Bridge



図-7 設置位置関係図

Figure 7 Layout of bridge and pond

4.2.2 橋梁の設置位置

本橋梁の設置位置は、三兼池の中央を横断する位置とし、東街区と西街区および運動公園を最短で結ぶ歩行者動線とした。また、土地区画整理事業の記念碑として、シンボリックな存在とさせるため、遊歩道の随所から橋梁を眺められる位置を選択した。

4.2.3 デザイン方針

本橋梁のデザイン方針としては、自然景観を阻害しないシンプルな形状とすることで、自然景観との調和を図ることを第一とした。また、シンボリックな存在とさせることを意識し、シンプルでありながら存在感があり、個性的な印象を持たすことを第二の方針とした。この二つの方針から、本橋梁は直線的な形状でありながら薄さを強調することにより、水上を歩くことへの緊張感を感じさせると共に、スレンダーな形状により近代的な印象を与え、新しい住宅地の未来を象徴するシンボルとしての存在感を演出することとした。

4.2.4 構造形式の選定

デザイン方針にて定められたスレンダー性を表現することと、本橋梁の共用開始後にメンテナンスフリーを実現するために、ダクトル（超高強度繊維補強コンクリート）を用いた2径間の連続桁方式を採用した。

施工性および経済性の観点から、1径間や3径間の構造形式（写真-1）も検討されたが、外部景観における直線性を強く出すこと、桁高を極限まで小さくすることに重きを置き、最終的に2径間の連続桁を採用した。

4.2.5 桁のデザイン

桁の形状は、外部景観における直線性およびスレンダー性を強調するため箱桁の等断面とし、橋梁のフェイシアラインを強調し、耐久性を高めることを目的に地覆にはステンレス製カバーを採用した（写真-2）。



写真-1 構造形式比較検討用CG

Photo 1 CG at structural study



写真-2 ステンレス製の地覆カバーとアルミ鋳物高欄

Photo 2 Curb cover of stainless steel, and balustrade of Aluminum cast metal

4.2.6 橋脚のデザイン

RC構造の橋脚は、水面下の部分を矩形断面とし、水面上は小断面の二本柱形状とした（写真-3）。スレンダーな桁を受ける柱を極限迄細くすることで、橋梁本体の薄さを強調している。



写真-3 橋脚形状（施工中の低水位時）

Photo 3 Shape of pier

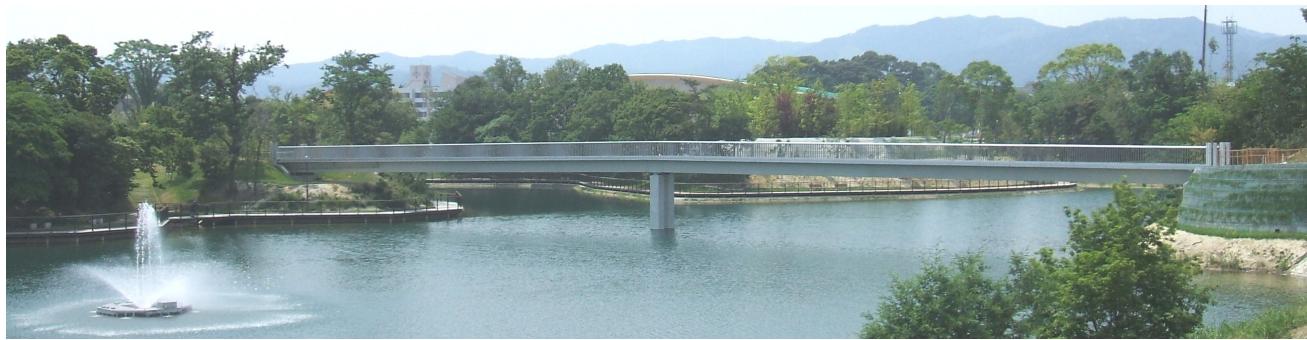


写真-4 完成後の橋梁全景

Photo 4 Panorama of Mikaneike Bridge

(注: アルミ高欄部が透けて見え, トップレールとステンレス地覆, 桁側面の3つのラインが強調されている)

4.2.7 付属物のデザイン

付属物として, 橋梁デザインの印象を大きく左右する要素として, 高欄や照明, 排水施設等が挙げられる。

高欄に関しては, 支柱を用いないバラスタータイプとし, 横方向の連続性を確保することで, 橋梁の直線性を高めた。高欄の所定の強度を確保するため, バラスターはアルミ鋳物を採用した。また, 板状のバラスターを採用することで, 斜め方向からの見えでは, 板構造が重なり視界を塞ぎ, 歩行者空間としての囲まれ感や安心感を与える(写真-3)と同時に, 橋梁直角方向からの見えでは, 視界の抜けを演出し, 特定の場所からの外部景観では, 背後の風景が透けて見える特徴的な景観(写真-4)を演出することを意図した。

照明も, 高欄と同様に横方向の連続性を確保するため, 支柱タイプの照明は用いず, 地覆埋め込みタイプのフットライトを採用し, 親柱の意匠照明(写真-5)と合わせて, 夜間景観を特徴的に演出することも意図した。舗装には透水性舗装を採用しており, 縦断勾配により舗装下を流れる雨水は, 橋梁の両端部に設けた縦排水部に集水され, 桁下を横引きしてアバット近辺で排水している。舗装面や橋脚等に排水施設を極力露出させないことを目指し, 歩きやすく, 直線的でスレンダーな橋梁デザインを強調させた。

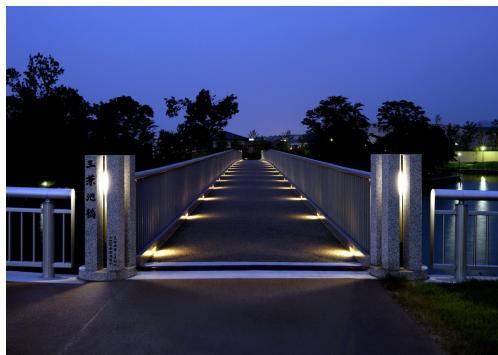


写真-5 正面景観 (夜間)

Photo 5 Front view

4.3 設計の概要

4.3.1 構造概要

(1) 桁高スパン比

通常のPC箱桁橋の場合, 桁高スパン比が1/20程度であるが, 本歩道橋はダクトルの使用によりスパン40mにも関わらず, 桁高を1mに抑えることが可能となり, 桁高スパン比1/40と非常にスレンダーなプロポーションを実現している。

(2) 連続桁形式

ダクトル橋としては国内初の連続桁形式を採用している。スパンは, 39.9m+39.9mの2径間で, 橋長は81.2mであり, ダクトル橋では国内最長である。

(3) 全外ケーブル方式

PC構造は, 全外ケーブル方式を採用した。使用した外ケーブルは19S15.2であり, 4本の配置により10,400kNのプレストレスを与える。

(4) ブロック分割

ダクトルはその材料の特性と品質管理の点から, 工場製作のプレキャスト部材を現地で接合する工法を採用している。本橋のプレキャスト部材は, その製作・運搬および構造設計上の合理性を考慮して, その寸法が決定された。本橋のように橋体幅が3.5mある橋の場合, プレキャスト部材のトラック輸送における寸法上の制限と, 重量の制限により, 橋軸方向に2m程度に分割してセグメントとして運搬するのが通常である。しかしながら, ダクトル橋の場合, 鉄筋を用いないため部材厚さを極限まで削ることができ, 本橋では7~20cmといった部材厚により大幅な軽量化を実現しており, 大きなブロックでの運搬が可能であった。その利点を活用するため, 本橋では桁断面を, 上床版とU桁に分割した(図-5)。これにより, 幅が2.10mであるU桁はトラックの荷台幅に容易に納まり, 橋軸方向に8~10mといった大きなブロック単位での分割が可

能となった。一方、3.5m幅の上床版はトラック運搬が容易なように、かつU桁上に4枚もしくは5枚配置されるように、橋軸方向に2.1mの長さで36ブロックに分割された。

(5) 桁間の接合方法

桁間の接合にはせん断キーを設けたU桁を3cmの間隔で設置し、その間にダクトルの間詰めを行う接合方法（ウェットジョイント接合）を採用している。

この継目部の両側のプレキャスト桁側を凹型として壅ませ、そのわずかな隙間に同じ材料であるダクトルを打設して接合構造とする工法は、ダクトル橋梁特有の工法である。この工法は、酒田みらい橋¹⁾建設の際に開発され、実験によってそのせん断伝達性能が確認されており、UFC指針²⁾の参考資料に「継目部のせん断伝達耐力」として示されている。

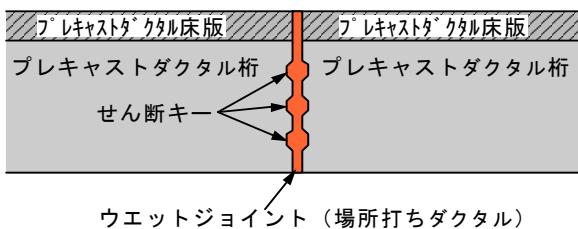


図-8 ウェットジョイント概要図

Figure 8 Outline of wet joint

(6) 床版と桁の結合方法

上床版とウェブとの接合方法には、孔開き鋼板ジベル（以下PBL：写真-6）を採用している。以下に結合構造概要を図-9に示す。この結合方法は、鋼桁もしくは波形鋼板プレートとコンクリート床版を結合する技術をダクトルに応用したものである。本橋の設計の際には、PBLの1個当りの耐力や、配置ピッチなどについて、過去の実験結果^{3), 4)}より設定している。

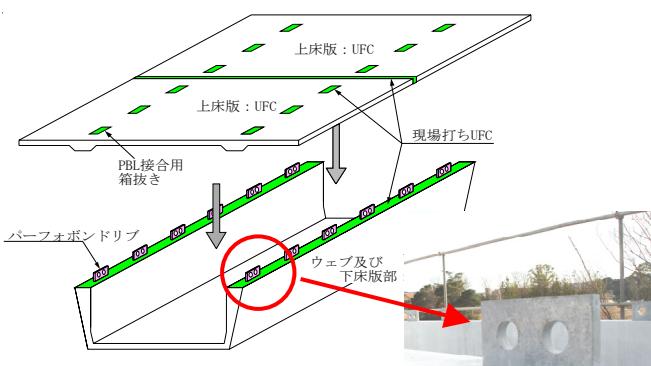


図-9 桁-床版結合概要図

Figure 9 Outline of girder-slab joint

写真-6 孔開き鋼板ジベル

Photo 6 Perfobond Strip shear connector

4.4 プレキャスト部材の製造

プレキャスト部材の製造はコンクリート2次製品工場で行った。製造フローを図-10に示す。このフローで特徴的なところは、鉄筋を配置しないため、鉄筋組みの工程がない点と、2次養生と呼ばれる高温の蒸気養生を行う点である。

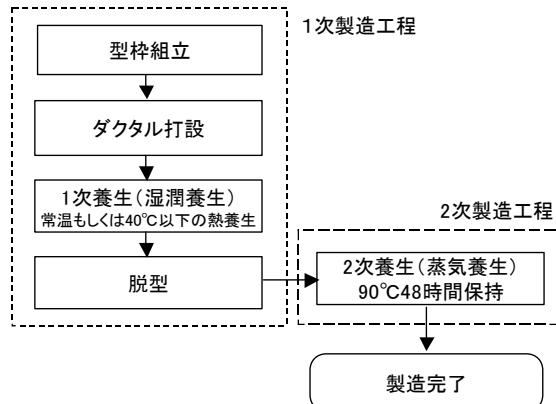


図-10 プレキャスト部材の製作フロー

Figure 10 Production flow of precast block

(1) 練混ぜ

ダクトルは粗骨材を含まない粉体系の材料で、水セメント比は22%であり、またシリカフューム等の反応性微粉体も含まれているため、水結合材比では14%以下と単位水量が非常に少ない。そのため粘性が高く、特に練混ぜ初期にミキサーに高い負荷が生じるため、練混ぜ定格数量の6~7割程度に練り量を減らすのが通例である。三兼池橋の部材製作に際しては、定格練混ぜ容量1.5m³の強制練り水平2軸ミキサーを用いたが、設備を改造して1.3m³と定格容量の約9割まで練混ぜ能力を増強して製造を行った。

(2) 打設

ダクトルはモルタルフロー用のコーンを用いたフローテストで250mm程度と非常に流動性の高い材料であることから、棒バイブレーター等は不要であり、充填性の確認とレベルリングの補助のために型枠振動機を適時使用する。U桁の打設に際しては、上下を反転した逆打ち方式を採用した。



写真-7 U桁打設状況

Photo 7 Casting of Ductal



写真-8 脱型後のブロック

Photo 8 Girder after removing

(3) 1次養生

ダクトルは打設後、1次養生と呼ばれる湿潤養生を行う。ダクトルの凝結開始は、10~12時間後と多量に添加される高性能減水材の影響で非常に遅い。しかし、凝結開始は遅いものの、一旦開始するとその強度発現は非常に速く、季節にもよるが夏季には $2\text{ N/mm}^2/\text{時間}$ ほどのスピードで強度が発現する。さらに $30\sim40^\circ\text{C}$ での促進養生を行えば、24時間後には、 $40\sim50\text{ N/mm}^2$ もの強度が確保でき、翌日脱型が可能である。

(4) 2次養生

ダクトルの製造上の大きな特徴は、2次養生と呼ばれる高温蒸気養生を行うことである。2次養生はダクトルの強度発現と部材の自己収縮を一気に促進して、安定した高緻密な硬化体を形成する手段である。ダクトルは2次養生として、 90°C の蒸気養生を48時間行うのが通例である。

(5) 品質管理

図-10に打設日毎に採取した供試体の強度試験結果を示す。圧縮強度に関しては、比較的に高い強度のものがあったため、標準偏差が多少大きくなっている。ひび割れ発生強度においては、ばらつきの少ない結果であった。

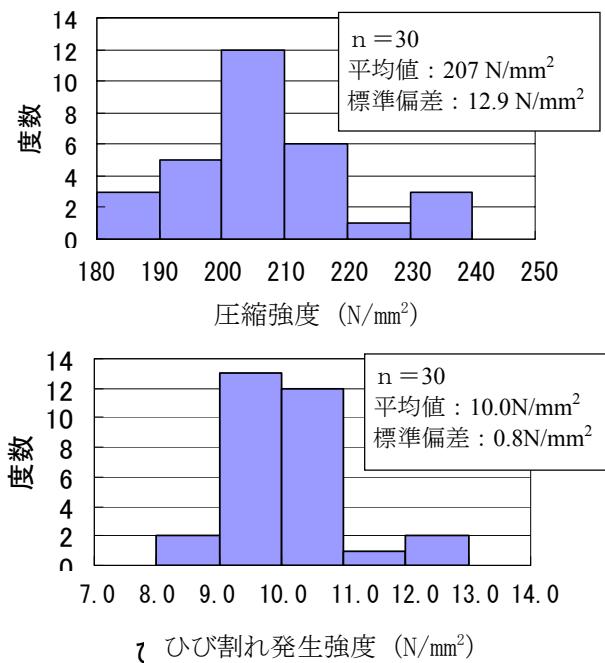


図-10 強度試験結果
Figure 10 Results of strength test

4.5 施工

図-11に上部工の施工フローを示す。

(1) 主桁設置

主桁(写真-9)の架設は、隣接した桟橋上の50t

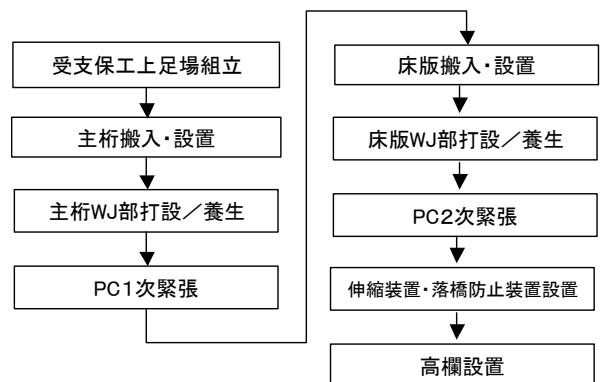


図-11 上部工 施工フロー

Figure 11 Construction flow

クローラークレーンを用いて行った(写真-10)。ダクトルを用いた薄肉化により、最大ブロック長の10.4mの桁においても、重量は9.2tと軽量であり、支保工の受け桁上に設置する際の位置調整も容易である。2日間で全11ブロックの架設を行ったが、実質の設置に要した時間は6時間程度であった。



写真-9 U形プレキャストブロック

Photo 9 U-shape precast block



写真-10 U桁架設状況

Photo 10 Erection of U-shape girder

(2) 主桁ウェットジョイント部打設

主桁は3cmの間隔を空けて設置され(写真-11)、その隙間にダクトルを打設する。非常にわずかな隙間であるが、流動性の非常に高いダクトルでは、その充填性に問題がないことを、型枠材にアクリル版を用いた打設にて目視確認している(写真-12)。



写真-11 ブロックの設置
Photo 11 Set of girder



写真-12 充填の確認
Photo 12 Check of filling



写真-14 PBL周りのダクトル充填
Photo 14 Casting Ductal around PBL

(3) 床版設置

主桁ウェットジョイント部の1次養生後、クレーンにて床版(1.5t)の設置を行った(写真-13)。各床版間および床版とウェブの間は、後日ダクトルで充填されるため、所定の位置にセットするだけの作業であり、全36枚の設置は、6時間程の作業で終了した。



写真-13 床版の設置
Photo 13 Erection of slab

(4) 床版ウェットジョイント部打設

床版のウェットジョイントは、PBL周りの開口部と床版-ウェブ間にダクトルを打設する。両ウェブの総延長が約160mに渡るため、ダクトル数量は1.53m³となった。そのため、現地に150L練りのミキサーを設置して、120L/バッチとし、ロス等も含めて16バッチの練混ぜを行った。目標フロー値は、充填性を考慮して260~280mmとし、縦断勾配の低い側のPBL開口部から打設を行い、順次開口部の充填を確認しながら打設を実施した(写真-14)。

5. おわりに

ダクトルの優れた特性により、従来のコンクリートの概念を超えた構造部材の諸元や構成が可能となり、さらには新たな施工技術などの様々な開発がなされて実施してきた。三兼池橋には、それら多くの先端技術が盛り込まれており、軽量化と長スパンを同時に実現するとともに、低桁高により景観設計のニーズにも対応している。通常のPC橋梁上部工が40~50N/mm²の強度のコンクリートで建設されている現在において、180N/mm²の強度を有する材料で、鉄筋を用いずに長スパンの橋梁を建設できる革新的な技術は、コンクリートの世界に新しい風を吹き込んだと言えるのではないだろうか。そして今後これらの技術が、コンクリート技術の発展の力強い追い風となれば幸いである。

参考文献

- 1) 武者浩透, 大竹明朗, 関文夫, 大熊光, 児玉明彦, 小林忠司: 無機系複合材料(RPC)を用いた酒田みらい橋の設計と施工, 橋梁と基礎, Vol. 36, No. 11, pp. 2-11, 2002.
- 2) 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イ-113, 2004
- 3) 細谷学, 武者浩透, 安部吉広, 信夫榮:「赤倉温泉ゆけむり橋」の施工-超高強度繊維補強コンクリートを使用したPC歩道橋-, プレストレスコンクリート, Vol. 46, No. 3, p16-23, 2004.
- 4) 福浦尚之, 田中良弘: 超高強度繊維補強コンクリートを用いた孔あき鋼板ジベルの力学的特性に関する基礎研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 26, No. 2, 2004