

コンクリート系新素材（R P C）を用いた P C 橋梁の開発 - 酒田みらい橋 -

武者浩透¹・大竹明朗¹・児玉明彦²・小林忠司³

¹正会員 工修 大成建設株式会社 土木設計部（〒163-06 東京都新宿区西新宿1-25-1）

²正会員 工修 太平洋セメント株式会社 中央研究所（〒285-8655 千葉県佐倉市大作2-4-2）

³正会員 工博（株）前田先端技術研究所（〒998-8611 山形県酒田市亀ヶ崎1-1-6）

近年、圧縮強度 $200\text{N}/\text{mm}^2$ 以上もの超高強度を有する反応性粉体コンクリート（略称R P C）が開発され、その実用化が進められている。そのR P C材料を活用したP C橋梁技術を開発し、山形県に日本で初めてR P Cを用いたプレストレストコンクリート橋「酒田みらい橋」を建設した。この橋は、R P Cの材料特性を有効に活用して大幅な部材厚の低減や軽量化をすることにより、長スパンで桁高が低くデザイン性に優れたP C橋梁が可能となり、経済性をも兼ね備えることができることを実証している。

キーワード：P C 橋、R P C、高強度、高耐久、軽量化、新素材

1. はじめに

近年、シリカフュームなどを使用した反応性粉体コンクリート（Reactive Powder Concrete：略称R P C）が開発され、その実用化が進められている。このR P C材料は、圧縮強度 $200\text{N}/\text{mm}^2$ 以上もの超高強度を有する上に、高い耐久性をも併せ持っており、様々な構造物への適用が考えられる。また、その強度特性を活かすことにより、従来の鉄筋コンクリート構造における高強度化の延長上では考えられないような部材の薄肉化や軽量化が実現可能となった。

このR P C材料を用いたスパン50mの歩道橋「酒田みらい橋」が山形県酒田市の市街地に建設された（写真-1）。この橋はR P Cを用いた日本で初めてのプレストレストコンクリート橋（P C 橋）であり、床版の厚さ5cmとし、ウェブに大きな円形開口部を設けるなど、R P Cの持つ高強度を十分に活かして、大幅な軽量化や形状の自由性を実現している。本稿では、R P Cを用いたP C橋梁の開発について、酒田みらい橋を実例として報告する。

2. 開発の経緯

高強度・高耐久でしかも経済性にも優れたP C橋梁の開発を従来の鉄筋コンクリート領域の中で考えた場合、材料や構造の面で数多くの課題が存在する。

そのため、R P Cといった鉄筋コンクリートの概念とは異なる新しい材料の開発とP C橋梁への適用性の研究が必要であった。以下に、鉄筋コンクリートの高強度化に伴う課題と新素材に求められる性能を示す。

(1) 鉄筋コンクリートの高強度化に伴う課題

ここでは、圧縮強度が $150\text{N}/\text{mm}^2$ を超えるようなコンクリートを用いた場合の課題について述べる。

a) 高強度鉄筋の開発

コンクリートの高強度化にバランスするように、高強度鉄筋の開発が不可欠である。しかも、高強度でかつ延性や曲げ加工性の優れた鉄筋の開発が必要となる。

b) 鉄筋の付着

コンクリートおよび鉄筋の高強度化を図っても鉄筋の表面積は変わらないことから、コンクリートの付着強度を著しく高めるか、もしくは鉄筋表面の凹凸形状を改良し、付着強度を確保する必要がある。

c) 鉄筋の継手・定着

太径鉄筋を用いた場合には、継手長や定着長が非常に長くなり現実的ではないため、超高耐力の継ぎ手や定着の機構が必要である。

d) 靱性・ひび割れの分散性

コンクリートも高強度化に伴い脆性的な特性を持つ傾向にあり、靱性やひび割れの分散性を確保する必要がある。そのため、剥落防止用に用いられている鋼織



写真 - 1 酒田みらい橋

維やビニロン繊維の混入も考えられるが、コンクリートとの付着や繊維自身の強度が弱いために、ひび割れ抑制の機能は果たせず、靱性やひび割れの分散性を確保するまでには至らない。また、付加材料であるためコスト増は免れない。

e) 経済性

高強度コンクリートは材料単価が高いため、高強度化に応じた部材厚の低減などにより使用数量を減らし、その経済性を維持する必要がある。しかしながら、いくら高強度化を図っても、鉄筋コンクリートである以上かぶりが必要であり、高強度化に見合った部材厚の低減が難しい。かぶりを薄くするためには鉄筋の被覆が必要となり、コスト増の要因となってしまう。

f) 施工性

鉄筋が超高強度であるため、現場での鉄筋の加工・組立の作業効率が低下する。また、部材厚の低減が図れた場合、薄い部材厚に高強度鉄筋を精度良く配置する必要があり、施工性の課題が生じる。

これらの課題は、橋梁のように部材厚が主に 50cm 以下で、曲げ部材である場合には特に顕著になり、解決するには数多くの研究開発と長い年月が必要である。

(2) R P C の開発

圧縮強度が 150N/mm^2 を超えるようなコンクリートを考えた場合、前述のような課題を克服するには、鉄筋コンクリートの概念には捕らわれない、新しい材料の開発が必要であった。それは、鉄筋を必要とせ

ず、部材厚を薄くでき、靱性やひび割れ分散性に優れ、施工性がよく、しかも経済性をも兼ね備えた材料である。そして開発されたのが、R P C と呼ばれる反応性粉体コンクリートである。

この R P C はフランスで開発され、R P C 200、R P C 400、R P C 600 などの種類があり、R P C 600 は圧縮強度 600N/mm^2 を有するが、現在実用化されているのは R P C 200 の圧縮強度 200N/mm^2 を有する材料である。

この R P C 200 の材料思想を用いて、日本で調達できる材料で開発されたのが、ダクトアルと呼ばれる R P C である。次項でそのダクトアルについての材料特性を示す。

3. R P C の材料特性

(1) R P C 材料：ダクトアル

ダクトアルにはいくつかの種類があるが、今回実例として紹介する「酒田みらい橋」の橋体に用いられたのは鋼繊維が配合された「ダクトアル-F M」呼ばれるものである。ダクトアル-F M は、セメントと反応性微粉末、珪砂等の粉体と、鋼繊維、専用減水剤および水を練り混ぜることにより製造される。粗骨材は一切含まない。ダクトアル-F M の場合、容積比で 2% の高張力鋼繊維（ $\phi 0.2\text{mm}$ 、長さ $L=15\text{mm}$ ）を配合しているため、ダクトアル構造物には鉄筋を使用しないのが基本である。

ダクトアルの水セメント比は約 22% であるが、反応性の微粉末も配合されているため、水粉体比ではわ

表 - 2 ダクトアルF Mの配合

単位 (k g / m³)

水	ダクトアル粉体 (フレッシュ品)	鋼繊維	専用減水剤
W	P	S f	S p
175	2254	157	24

但し、水175kg/m³は専用減水剤24kg/m³を含む

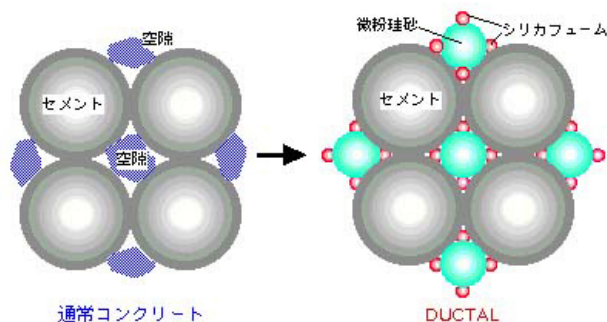


図 - 1 ダクトアルの最密充填イメージ

ずか8%である(表-1)。このように、水和反応限界付近の水分しか与えず、生成物中の空隙を極限まで抑えて最密充填を実現することが、この材料の開発思想である(図-1)。

(2) フレッシュ性状

ダクトアルのフレッシュ性状はモルタルフロー値で代表され、200～300mmである。このフロー値は、高流動コンクリートのスランプフローで600mmに相当し、高い自己充填の性能を有するため、締固め不要である。高流動であると同時に粘性が高く、所定のフロー値以内であれば鋼繊維の分散性も良く、沈降や分離も生じない。練混ぜ時間は、ミキサーの能力に依存するが10～15分を要する。また、高性能減水剤を多く使用するため、流動性の保持時間は練り上がり温度25℃程度で2～4時間が期待できる反面、凝結時間が18～20時間と長くなっている。

(3) 強度特性

ダクトアルは、常温養生で48時間(1次養生)、その後90℃の蒸気養生を48時間(2次養生)実施するのが標準である。打設2日後(1次養生後)で30～50N/mm²の圧縮強度が得られ、連続して蒸気による2次養生を実施した場合、打設4日後には200N/mm²以上の強度を得ることができる。ダクトアルの強度(2次養生後)を以下に示す。

- ・圧縮強度：200 N/mm² (φ5×10cm 供試体)
- ・曲げ強度：45 N/mm² (4×4×16cm 供試体)
- ・引張強度：9 N/mm²

曲げ特性はマトリックスに依存する初期クラックが20～30N/mm²で発生した後、鋼繊維による架橋効果で曲げ抵抗が増大し、曲げ引張応力で40～45N/mm²までに達する(図-2)。初期クラックが生じた後に、応力低下や変位の急激な増加なしに曲げ抵抗が増加する特性は、ダクトアルの付着強度が非常に高いことと、マトリックス成分と鋼繊維のプロポーシオンとのバランスが非常に良くとれているためである。最大応力到達後もその架橋効果により、ねばり強い曲げ特性を示す。

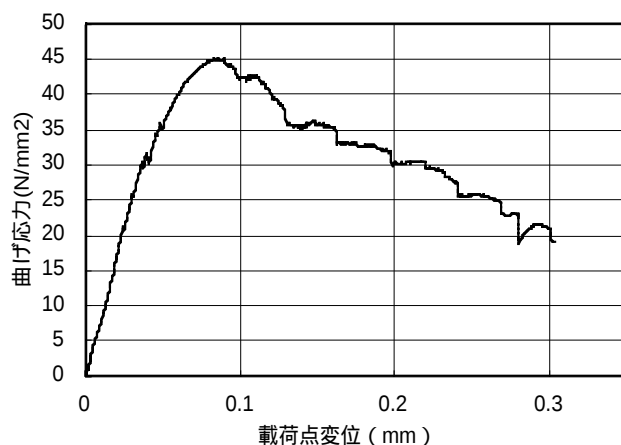


図 - 2 曲げ応力 - 変位図

(4) 耐久性状

ダクトアルの耐久性状(2次養生後)を以下に示す。

- ・耐摩耗性：普通コンクリートの2～3倍
- ・凍結融解抵抗性：300サイクル後、変化なし
- ・クリープ係数：普通コンの1/5以下

ダクトアルは最密充填により各成分が完全にパッキングされ、必要最小限の水しか配合されていないため、非常に緻密なマトリックスが形成されている。そのため、塩化物イオンの浸透に対しても高い抵抗性を示す。図-3に、高強度コンクリート(W/C=0.36)との塩化物イオン浸透深さの比較を示す。

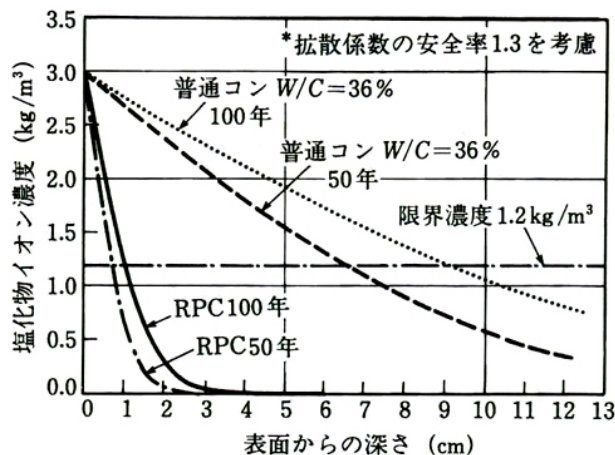


図 - 3 塩分浸透濃度の比較

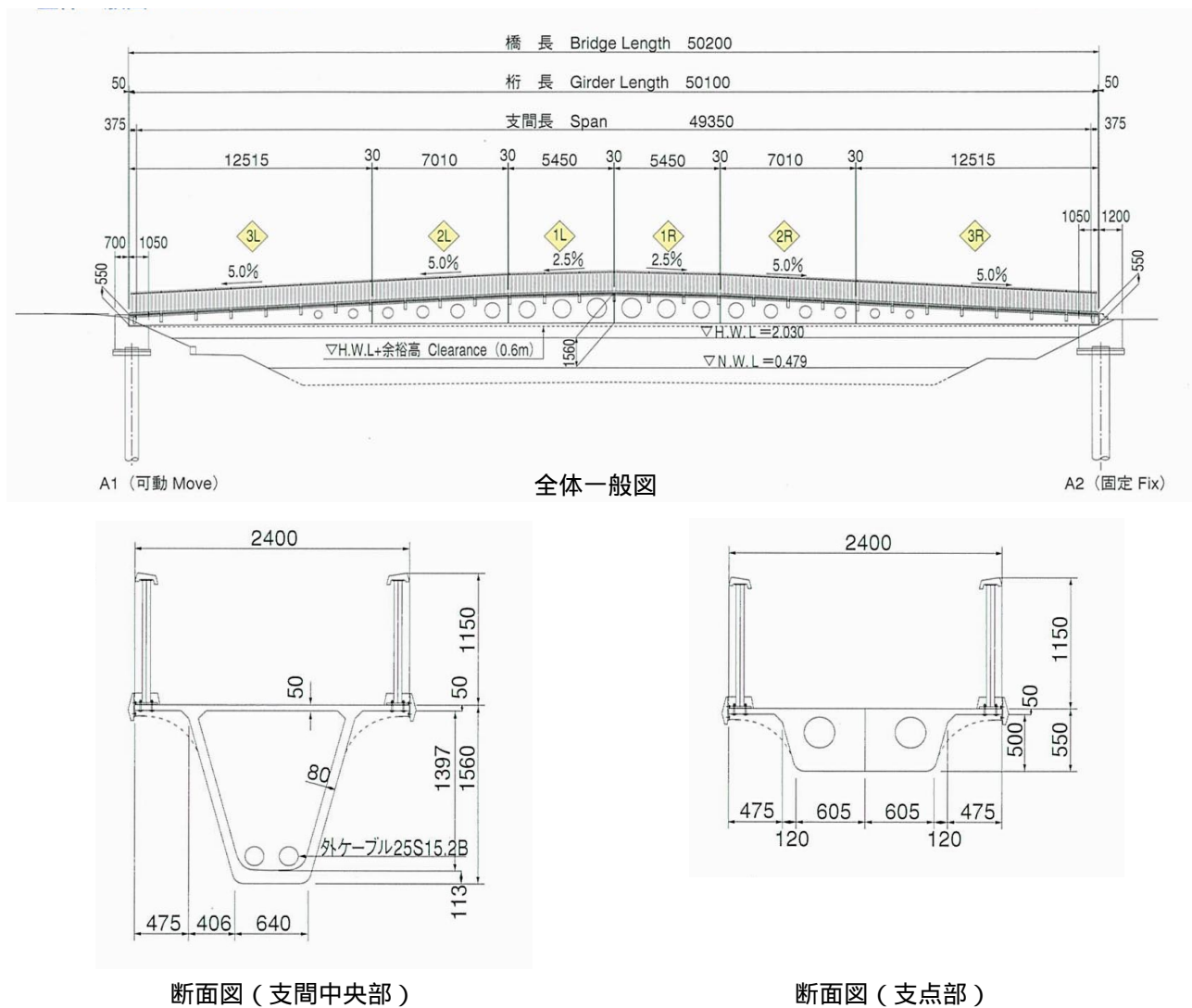


図 - 4 酒田みらい橋 一般図

4. P C 橋梁への適用：酒田みらい橋

R P C 材料の特性を活かした P C 橋梁の開発を行った .その実例として ,スパン50mの P C 歩道橋「酒田みらい橋」を紹介する . 酒田みらい橋の一般図を図 -4 に ,従来の P C 橋と鋼トラス橋との構造比較を図 -5 に示す .

以下に , R P C を P C 橋へ適用した場合の利点と不利な点を示す .

(1) R P C 適用による利点

a) 非常に薄い部材厚 (写真 - 2)

ダクトルには 157kg/m^3 もの高張力鋼繊維が配合されているため ,鉄筋を使用しない .そのため ,部材厚が鉄筋のかぶりの制約を受けず ,上床版厚 5cm ,ウェブ厚 8cm といった部材厚が可能となった .ランダムな配向で分散して配置された鋼繊維が , ひび割れの抑



写真 - 2 中央ブロックの架設

制や分散性に大きく寄与し , 桁の靱性を確保している .

使用材料	ダクトアル	普通コンクリート ($\sigma_{ck}=40\text{N/mm}^2$)	鋼
断面図			
側面図			
上部工数量	ダクトアル 21m ³	コンクリート 110m ³	—
上部工重量	53t	275t	42t

図 - 5 構造比較図

b) 大幅な軽量化（従来の 5 分の 1 程度）

従来のコンクリート ($\sigma_{ck}=40\text{N/mm}^2$) では 275t の橋桁重量に対して、ダクトアルの重量はわずか 53t と 1/5 以下となっている。スパン 50m の箱桁の単位橋面積当たりのコンクリート量は約 $0.8\text{m}^3/\text{m}^2$ 程度であるが、本橋の場合には $0.17\text{m}^3/\text{m}^2$ となっている。つまり、橋面積当たりのダクトアル厚さはわずか 17cm である。

c) 低い桁高で長いスパン

本橋では、川の計画高水位と歩道への擦り付けレベルにより、桁端部で 55cm（写真 -3）と非常に厳しい桁高制限を受けたが、ダクトアルの高強度を活かすことにより、50m スパンが可能となった。単純箱桁の桁高支間比は標準で 1/17 程度であるが、本橋では桁端部で 1/90 であり、中央部においても 1/32 であり、著しく低い値となっている。



写真 - 3 桁端部（桁架設時）



写真 - 4 ウェブの円形開口部

d) 形状の自由度（写真 -4, 写真 -5）

躯体内部に鉄筋が存在せず、主方向は全外ケーブル方式を採用していることから、桁高 1.5m のウェブ部に直径 0.9m の開口部を設けるなど、大胆なデザインを実現している。



写真 - 5 桁内部状況

e) 経済性

上部工の軽量化により、下部工は杭が2本配置の杭基礎で対応でき、基礎が従来より半分程度の規模となった。また、桁は両岸からのクレーン架設によって行ったため、架設栈橋等の設備が不要であった。そのため、下部工の工事費用、上部工の架設費用の大幅な削減が可能となった。

(2) R P C 適用による不利な点

a) 工場設備の対応

本橋はプレキャストブロック工法を用いており、そのプレキャスト部材はコンクリート製品工場で製作したが、専用の材料を用いるために、既存の設備では対応できない点があり、工場設備の一部改造や人力に頼った製作となった。

b) 型枠の対応

R P C は高流動であるため、型枠の剛性と強度が必要である。また、打設面は水平でなくてはならない。

c) 品質管理の厳格化

単位水量が極端に少なく材料であるので、練混ぜ時や打設時の品質管理を厳格に行う必要がある。

(3) R P C 適用の総合評価

利点に挙げられているのは構造や施工面であり、不利な点は練混ぜ・打設といった部材製作の面である。構造面には、従来の鉄筋コンクリートでは成し得なかった部材厚や桁高および支間を実現でき、施工面では工事費の削減が可能となるため、そのメリットは計り知れない。一方、製作面では工場や作業の負荷が増えるが、対応は十分可能であった。酒田みらい橋においては、製作面で生じる費用増に比べて、構造・施工面での費用削減が大きく上回ったことから、上下部工全体で約10%の工事費削減を達成している。無論、R P C 適用によるメリットが全てのP C 橋梁で生じるものではないが、本橋のように長スパンや低桁高が要求される場合や、下部工事費の比率が高い場合、仮設設備に費用が大きい場合などには、R P C 適用の優位性が顕著になると判断される。

5. 構造実験による検証

酒田みらい橋では、部材の薄肉化やウェブ開口部の耐力の検証のため、様々な構造実験が行われ設計にフィードバックされている。実験では、R P C 材料を用いた桁では材料強度や鋼繊維の関係から、相似則などを用いて適切な縮小試験体を製作することが

難しいため、実物大試験体を用いている。ここでは、一般部曲げせん断実験とジョイント部の部曲げせん断実験の概要を示す。

(1) せん断耐力の検証

一般部曲げせん断実験の状況を写真-6に、その結果を図-6示す。この実験では、桁端部のせん断力卓越部分に着目し、供用・終局荷重時の状態と最終耐力の確認を行った。そのため、試験体の桁高は61cmとし、ウェブに開口部は設けていない。

結果は、供用時設計せん断力 $P_s=784\text{kN}$ に対し、その約1.5倍の荷重時にウェブ部にひび割れが生じ、最大荷重は $P_{\max}=2460\text{kN}$ と終局時設計せん断力 $P_u=1340\text{kN}$ の約1.8倍を超えた。また、斜めひび割れは複数に分散し、荷重 $P=2000\text{kN}$ 時に最大で1.0mmあった。一方、曲げひび割れは最大荷重に至っても発生していない。



写真-6 一般部曲げせん断実験

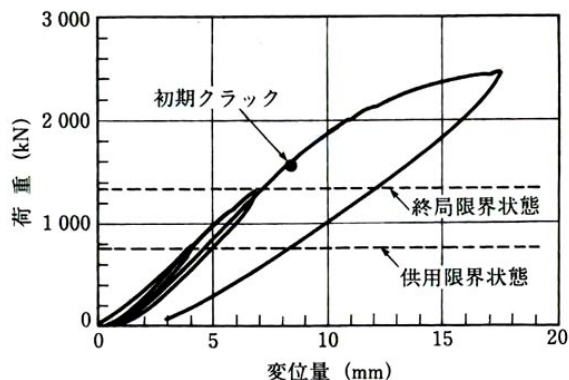


図-6 荷重-変位図

(2) ジョイント部の曲げせん断耐力

このジョイント部曲げせん断実験では、プレキャストブロックジョイント部およびウェブの開口部に着目し、終局荷重時の状態と最終耐力の確認を行った。なお、試験体の桁高は112cmとした。

実験の状況を写真-7に、その結果を図-7示す。初期せん断クラックが2000kN前後で、明確なせん断クラックは2680kNで発生し、最大耐力は2973kNであった。この最大耐力は、終局限界状態照査時のせん断力

の3.9倍であり、十分な耐力を保有していることが検証された。また、最終状態においてもジョイント部にはせん断クラックは確認されなかった。

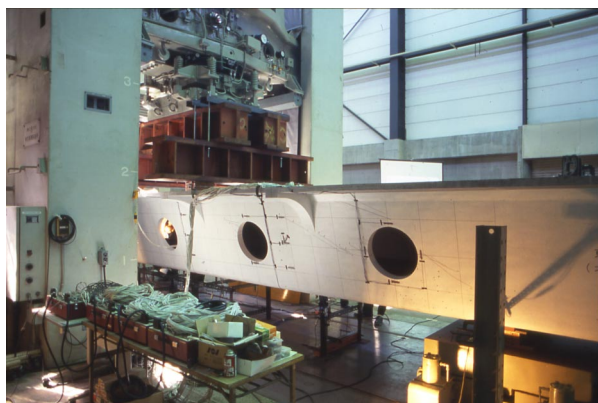


写真-7 ジョイント部曲げせん断実験

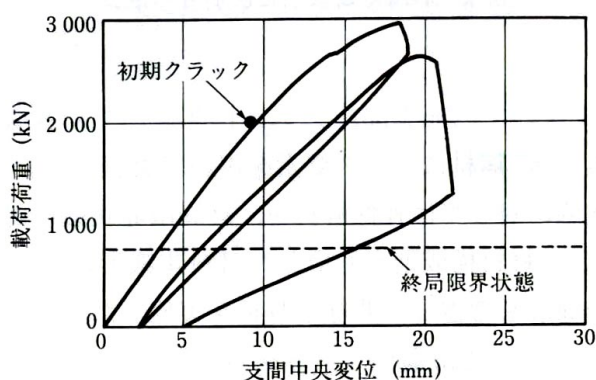


図-7 荷重-変位図

6. R P C 桁の架設

図-8に架設手順を示す。プレキャストブロックの架設では、R P C適用による軽量化が非常に有効であった。酒田みらい橋は、旧橋(4径間P C単純桁橋)の架け替え工事であったため、架設には3つの旧橋脚を仮支柱として用いた。これはR P Cの新設桁自重が旧橋の上部工自重とほぼ同等であることから、仮支柱として利用が可能となった。架設は、川の両岸から160tのトトラククレーンを用いて行った(写真-8)。ブロックの長さが5mから12.5mと大型ブロックであったにもかかわらず、その重量が、5.7t(支間中央部)～13.5t(支間端部)程度であり、架設に要した時間は片岸約3時間であった。



写真-8 ブロック架設状況

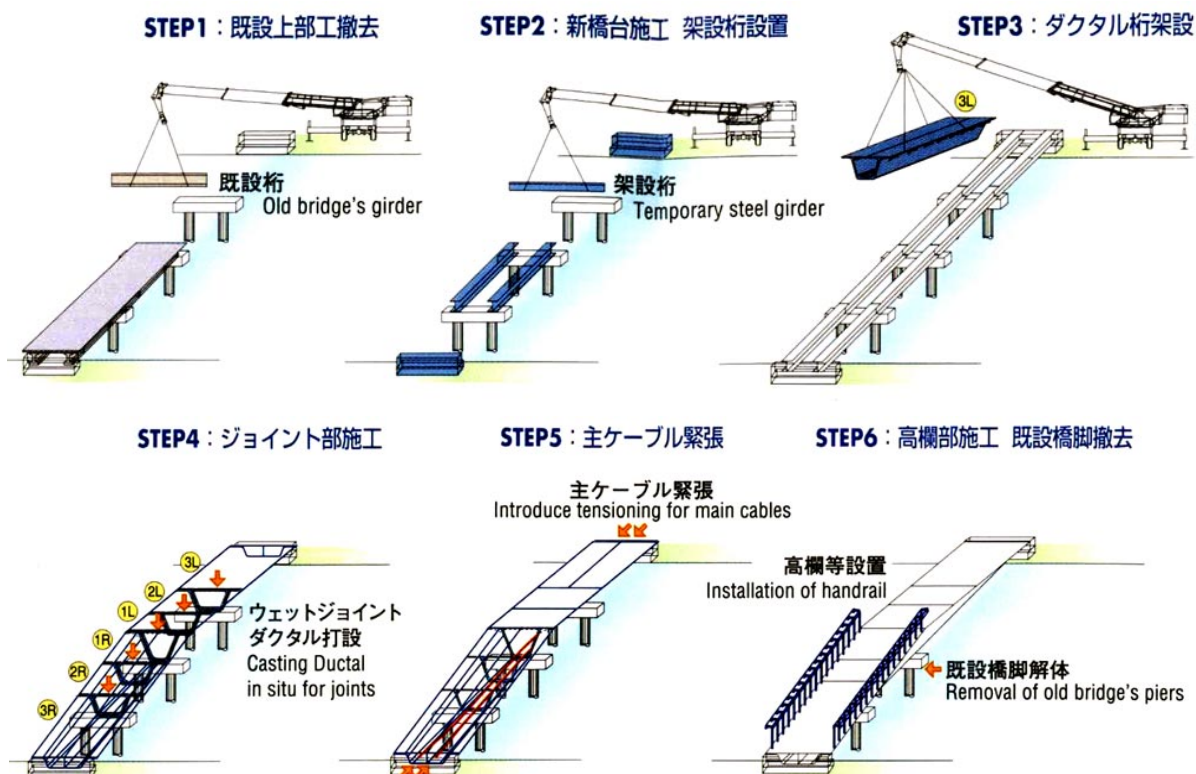


図-8 施工手順図

7. R P C の高欄や親柱への適用

ダクトアルには、鋼繊維が配合された「ダクトアル-F M」の他に、有機繊維が配合された「ダクトアル-F O」と呼ばれるものがあり、パネルやモニュメント等の意匠部材の分野で用いられている。これは、形状を比較的自由に設定することができ、緻密であるためなめらかな表面が得られるR P Cの特性を活用している。酒田みらい橋では、ダクトアル-F Oを様々な箇所に用いて、適用性の研究を行っている。

1) 高欄のトップレール（笠木：写真-9）

高欄の笠木部には、白色系の粉体を配合して、本体との色合いを変えている。ここでは、歩行者が笠木を直接触れることにより、ダクトアル部材表面のなめらかな感触を実感できる。



写真-9 ダクトアル製トップレール（笠木）

2) フェイシャルライン（化粧パネル：写真-10）

上床版の側面に水切りを兼用した化粧パネルを取り付けた。これは、最大厚さ30mm、最小厚さ5mmと、非常に薄い部材が可能であることを表している。

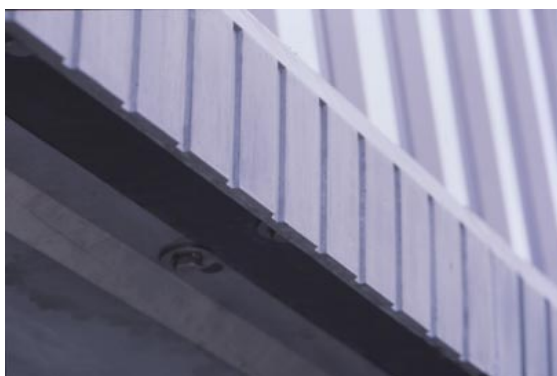


写真-10 フェイシャルライン（化粧パネル）

3) 親柱（写真-11）

親柱は、鋼製のウェブとフランジをイメージしたデザインとし、本橋には従来のコンクリートの領域を超えた、スチールの性能に近い材料が用いられていることを表現している。



写真-11 親柱と車止め

8. まとめ

酒田みらい橋は、R P C材料をP C橋梁に適用した日本で初めて橋梁であるが、構造や施工面の利点を活用し、製作面での課題を克服することにより、経済性をも兼ね備えた橋梁が可能であることを実証できた。

このようにR P Cは、その高強度とそれによって実現される軽量さから、30～70m程度のスパンの橋梁への適用が可能であり、低い桁高にも対応できるなど、P C構造物の適用範囲の拡大が期待される。景観デザインを実現する上で形状の自由度も大きな魅力であり、後半で紹介したような様々な意匠的な部材への適用も考えられる。また、仮設設備費や下部工の工事費などの削減により、全体工事費において経済性を得ることも可能である。さらにR P Cを用いた構造物は、高耐久・高寿命であり、ライフサイクルコストに優れ、使用材料が少ないことからCO₂排出量の大幅な削減（本橋の試算では7割の削減）が可能となるなど、数多くの環境面の利点も併せ持っていることも大きな魅力であり、今後のR P C分野の発展に大いに期待するものである。

参考文献

- 1) 田中良弘，武者浩透，大竹明朗，下山善秀：超高強度繊維補強コンクリートによるPC歩道橋の設計施工法，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.2，pp.1603-1608，2002.
- 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 first fib Congress 2002, vol-1, session-1, pp. 103-110 2002
- 3) 武者浩透，大竹明朗，児玉明彦，小林忠司：無機系複合材料（R P C）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.2-10，2002.
- 4) 武者浩透，大熊光，鴛田昇，児玉明彦：新素材ダクトアルを使用した新形式の橋 - 酒田みらい橋の計画と施工，土木施工，Vol.44，No.4，pp.10-18，2003.