

# 論文 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

田中 良弘\*1・武者 浩透\*2・大竹 明朗\*3・下山 善秀\*4

要旨：反応性粉体コンクリート（以下 Reactive Powder Concrete：RPC と定義）と呼ばれる超高強度繊維補強コンクリートは、高強度、高靱性、高耐久性の特徴をもつ。RPC を PC 橋梁に適用するための設計・施工方法の研究開発を実施した結果、スパン 50m、有効幅員 1.6m の歩道橋の設計では、従来のコンクリート材料による PC 橋梁に比較して自重が約 1/4 に低減され、これによる基礎の大幅なコストダウンが見込まれた。設計・施工法を検証するために、載荷実験および材料のミキシングから型枠、打設、養生、脱型までの一連の施工実験を実施した。

キーワード：繊維補強コンクリート，新材料，加熱養生，ウェットジョイント，外ケーブル

## 1. はじめに

新材料 RPC（商品名 Ductal）は、超高強度セメント系マトリックスに超高強度の鋼繊維を混合することにより、鉄筋による補強を必要としない材料である。この材料を構造物へ適用した事例は大小を含め世界で 20 例程あり、そのうち橋梁は 2 例で、実構造物での用途開発が展開している状況である。従って、RPC を適用した構造物の設計・施工法は、まだ十分に確立されていない。本研究の目的は、国内で初めての PC 橋梁に適用するにあたり、この材料の特性を活かした設計施工法を検討し、さらに施工の確認実験と構造部材の載荷実験を実施して、設計手法を明らかにすることである。この成果は、今後期待される橋梁をはじめとするコンクリート構造物への用途開発の基本的なエンジニアリング情報を提供するものである。

と小さく水和反応の水が最小限にとどめられ、また細密充填の概念により粒度調整がなされている<sup>1)</sup>。そのために、鋼繊維（直径 0.2mm、長さ 15mm）を配合する前後でフロー値（JIS R 5201）がほとんど変化せず 240～270mm である。このモルタル試験用のフロー値はスランプフローの 600mm 程度に相当し、従って自己充填性能を有しコンクリート打設時の締固めは不要である。また、マトリックスの粘性が高いので鋼繊維の沈下や材料分離はない。但し、鋼繊維の配向性を考慮した打設方法を考慮する必要がある。また、ミキサーの能力に依存するが材料の混練りに 10～12 分の時間を要する。打設時の温度にもよるが、可使時間は 2～4 時間を期待できる。ポリカルボン酸系の高性能減水剤を多量に使用しているため凝結時間が 18～20 時間後となり長い。

表-1 RPC の配合表

水	セメント	珪砂、シリカ	鋼繊維	高性能減水剤
180	818	1479	157	24

単位：kg/m<sup>3</sup>，水180kg/m<sup>3</sup>は高性能減水剤の水分19kg/m<sup>3</sup>を含む

## 2. RPC の材料特性

### 2.1 RPC のフレッシュ性状

本研究で使用した RPC は、ポルトランドセメント、シリカフューム、珪石粉末などを細密充填されるようにプレミックス配合した。その配合を表-1 に示す。配合の特徴は、W/C が 22%

### 2.2 RPC の力学性状

4x4x16cm 供試体を適用した曲げ試験（JIS R 5201）による応力-たわみ曲線を図-1 に示す。

\*1 大成建設(株) 技術センター土木技術研究所部長 Ph.D. (正会員)

\*2 大成建設(株) 土木本部土木技術部橋梁技術室副課長 工修 (正会員)

\*3 大成建設(株) 土木本部土木設計第1部橋梁設計室副課長 工修 (正会員)

\*4 太平洋セメント(株) 中央研究所第1研究部ダクトル開発グループ GL 工博 (正会員)

試験体の養生条件は、20 で 48 時間の後 90 で 48 時間の加熱養生（昇温、降温：15 / 時間）をしたもので、以降の特性は加熱養生を前提に示す。曲げ特性は、マトリックスに依存する初期クラックが 20~30MPa で発生した後に鋼繊維による bridging 効果で曲げ抵抗が更に増大して曲げ引張応力で 40~45MPa に達する。曲げによる破壊エネルギー吸収率は圧縮強度 30~50MPa の従来のコンクリートが 55~200Nm/m<sup>2</sup> に対して<sup>2)</sup>RPC は 36100Nm/m<sup>2</sup> と高い。RPC が高い靱性特性を示す理由は、高強度マトリックスと高強度鋼繊維の組合わせであると考えられる。0.2mm で長さ l=15mm ( l/ =75) の鋼繊維を容積で 2% 混入している。RPC の引張試験は難しくバラツキが多い。4x4x16cm 供試体の曲げ試験と 5x10cm にノッチを入れた引張試験の比較から曲げ強度の約 1/4.2 が純引張強度として推定できる<sup>3)</sup>。RPC は基本的に鉄筋による補強を考えない。

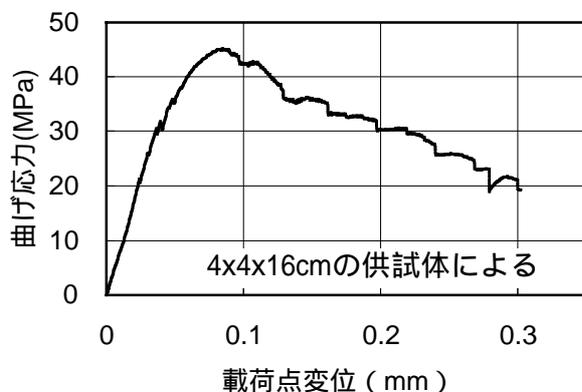


図-1 曲げ応力とたわみ曲線

### 2.3 RPC の耐久性状

RPC は細密充填により珪砂やセメント、シリカフュームの材料が密実にパッキングされ、水が必要最小限しか混入されていないので、緻密なマトリックスとなる<sup>1),3)</sup>。そのため、JISA6204 による 300 サイクルの凍結融解試験でも何の変化もない。また、ASTM-C-781 によるすり減り試験を 2 時間実施した結果、RPC が 1.06mm のすり減り深さに対して、従来のコンクリートが 2.33mm、黒御影石が 1.76mm であった。高緻密であるために通常の透水試験では透水係数を求

められず、圧力 200~300MPa を作用させた試験により 10<sup>-13</sup>~10<sup>-12</sup>cm/sec の透水係数を求められた。今後この材料に対する透水試験方法の開発が望まれる。塩化物イオンの拡散係数は人工海水による 6 ヶ月浸漬試験後に EPMA 分析により 0.0019cm/sec 以下であることを求めた。現在、RPC の耐海水性を長期的に調べる目的で、伊豆海洋公園において暴露試験を実施中である。

## 3. 設計の基本コンセプト

### 3.1 設計条件

設計対象となる歩道橋は、酒田市の一級河川「新井田川」にかかる 4 径間の旧 PC 歩道橋の架替えである。そのため、1) すりつけ道路のレベルを変更できない、2) 桁下は河川満潮位レベルから 0.6m の余裕が必要、3) 縦断勾配は 5% 以下とする、などの制約条件下で設計した。荷重条件は道路橋示方書に準拠し、RPC 材料に関連する構造設計法は、プイグ社<sup>4)</sup>による「Design Rules for Ductal」を適用した。

### 3.2 設計手法の基本

設計手法は限界状態設計法で、供用状態と終局状態を考慮する。図-2 に設計フローを示す。供用限界状態では、引張部材においてもクラックを発生させないが、終局限界状態ではクラックが発生した後に鋼繊維が引張抵抗することを基本としている。

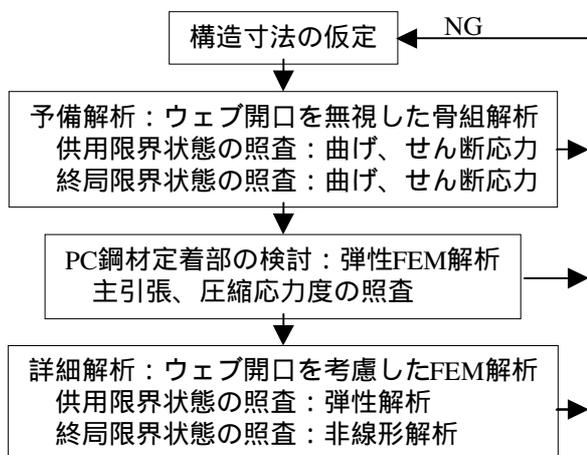


図-2 設計のフロー

### 3.3 構造形式の選定

RPC を適用することにより桁自重の低減が期

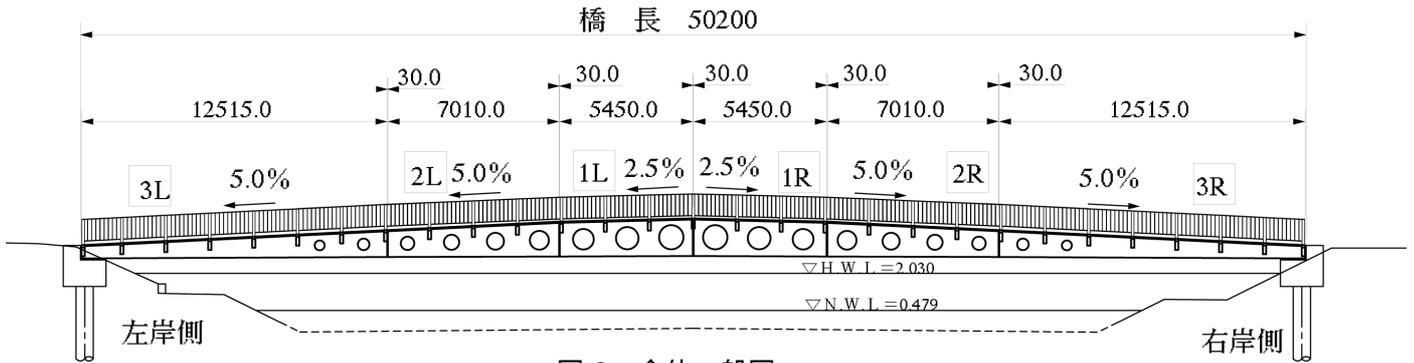


図-3 全体一般図



写真-1 完成予想の全景

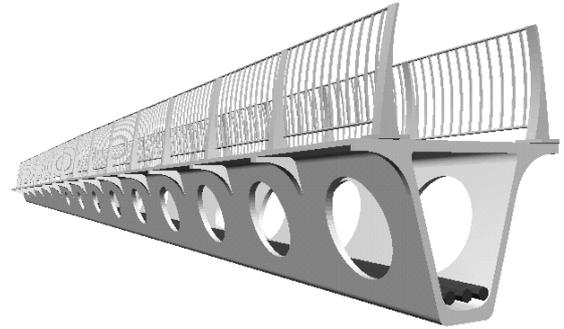


図-4 断面のパス

待できるため、橋長 50m に対して 1 スパンで設計を考える。橋梁端部において桁高を 55cm 程度にする制約条件から、下路橋形式の可能性を検討した結果、開断面であることによるウェブの座屈や捩り剛性の不足、下フランジの有効利用などの理由で不採用となった。結局、上路ボックス橋梁の変断面形式を適用することになった。図-3 に全体一般図を、図-4 に中央断面のパスを示す。また、写真-1 には完成予想の全景を示す。構造の特徴は、1) 全外ケーブル、2) ダイヤフラムを兼ねたデビエーター、3) ウェブの開口、4) 8 個のプレキャストブロック(PCaB) + ウェットジョイント、5) 一般部のみならず緊張端部でも鉄筋補強がない。図-3 に示すように 3L と 3R を構成する部材は断面中央より左右に分割された PCaB である。これら技術的検討の結果、上部工のコンクリート容積 = 22m<sup>3</sup>、自重 = 560kN と軽量化された。これを従来のコンクリートによる PC 橋梁で設計すると自重 = 2780kN で、桁下制限をクリアできない。

### 3.4 供用 / 終局限界状態の応力照査

基本的な断面の寸法を決める骨組みモデルによる予備解析の段階では、ウェブ開口部分の

影響を無視した。D を死荷重、L を活荷重とすると設計荷重 (D+L) を考慮した供用限界状態のフランジの曲げ応力とウェブのせん断応力の照査結果を、図-5 に示す。示す、ここでせん断応力の照査は、次式<sup>1) 3)</sup>により判定した。

$$\tau^2 - \sigma_x \sigma_t \leq 0.25 f'_t [f'_t + \frac{2}{3}(\sigma_x + \sigma_t)] \quad (1)$$

$$\tau^2 - \sigma_x \sigma_t \leq \frac{2 f'_t}{f_c} [0.6 f'_c - (\sigma_x + \sigma_t)] [f'_c + \frac{2}{3}(\sigma_x + \sigma_t)] \quad (2)$$

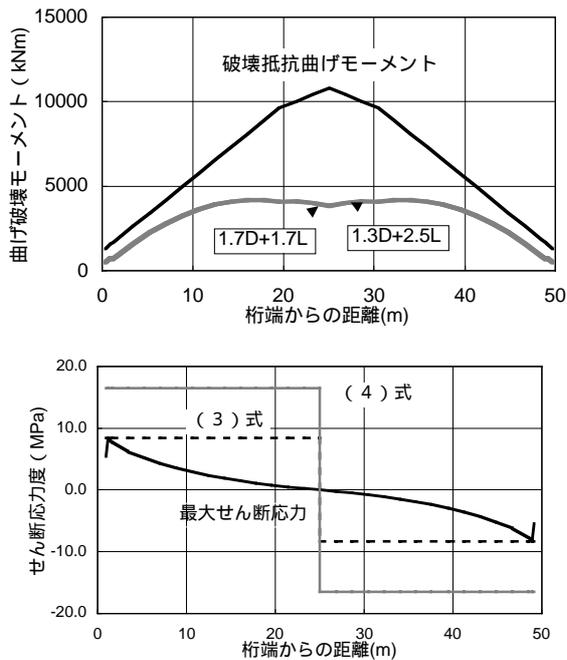
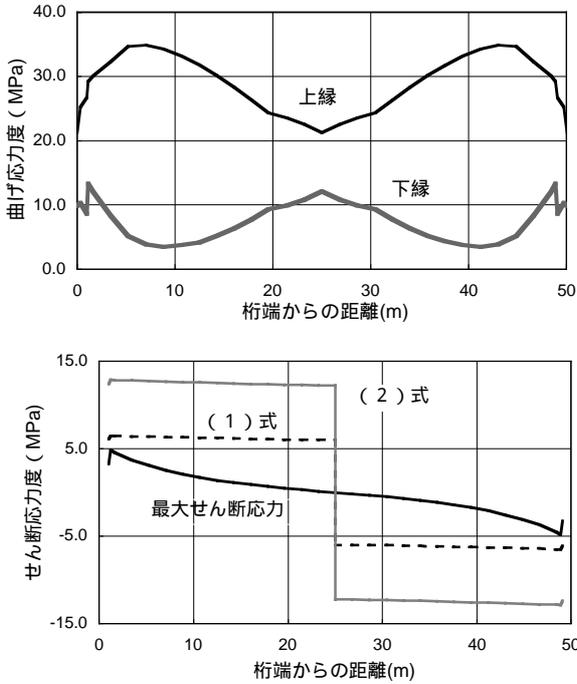
また、終局限界状態では、設計荷重を (1.3D + 2.5L) または (1.7D + 1.7L) の中で厳しい方を選択する。図-6 に終局限界状態での曲げとせん断の照査結果を示す。終局時のせん断応力は次式により照査した。ファイバーが負担する引張応力は引張実験に基づいて決めた特性値である。

$$\frac{f'_{fu}}{\gamma_b} \geq \left( \tau_u - \frac{0.16}{1.25} \sqrt{f'_c} \right) \tan(\beta_u) - \frac{F_{tu}}{b_n S'_t} \quad (3)$$

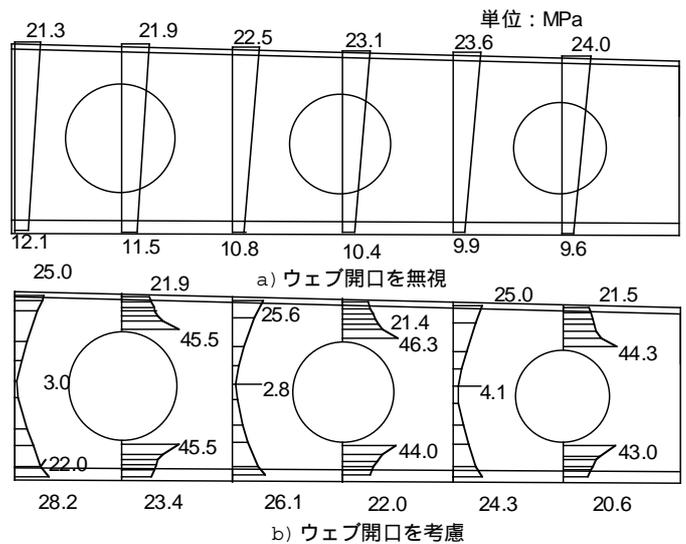
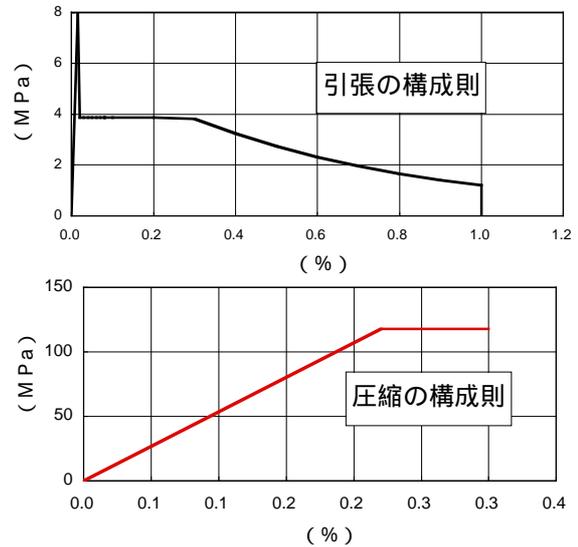
$$\tau_u \leq \frac{1}{1.25} \frac{0.85}{\gamma_b} 1.14 (f'_c)^{2/3} \sin(2\beta_u) \quad (4)$$

ここで、 $f'_c$  : 設計圧縮強度 (=180MPa)、 $\beta_u$  : せん断応力、 $\sigma_x$  : 橋軸方向応力度、 $\sigma_t$  : 鉛直方

応力、 $f_t$ ：ひび割れ発生限界の引張応力（ $=8\text{MPa}$ ）、 $f_{fu}$ ：ファイバーが負担する引張応力（ $=5\text{MPa}$ ）、 $F_{tu}$ ：鉛直方向プレストレス力、 $b_n$ ：ウェブ幅、 $S'_t$ ：鉛直方向 PC 鋼材のピッチである。なお、 $\alpha$  は  $30^\circ$  以上の範囲で使用する。



**3.5 ウェブ開口を考慮した全体 FEM 解析**  
 詳細設計としてウェブ開口を考慮した 1/2 対称モデルによる全体 FEM 解析を実施した。供用限界状態に対しては弾性解析を終局限界状態に対しては有限変形を考慮した非線形解析を実施し、ウェットジョイント部の応力、活荷重時のたわみなどを照査した。解析コードは DIANA で、使用した RPC 材料構成則<sup>1) 3)</sup>を図-7 に示す。なおウェットジョイント部の引張抵抗はゼロとした。なおウェットジョイント部の引張抵抗はゼロとした。供用限界状態のスパン中央付近におけるウェブ橋軸方向の応力を図-8 に示す。



開口があることにより開口上下端で軸圧縮応力が増大するが開口がない部分では逆に圧縮応力が減少する。しかしジョイント部においては全圧縮状態を保っている。活荷重満載時のスパン中央部の最大たわみは 85mm でスパン比 1/600 をほぼ満足している。

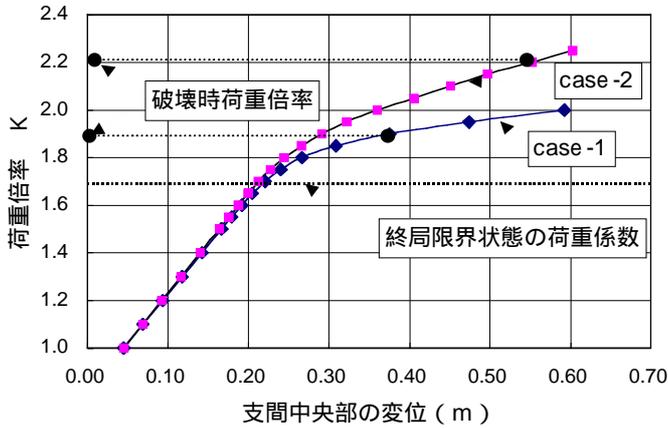


図-9 荷重倍率と変位の関係

図-9に終局限界状態に対する有限変形のFEM非線形解析による結果を示す。解析の荷重方法は、(D+L+prestress)を初期状態として  $K(D+L)$ により定義した荷重倍率  $K$  を 1.0 から 0.05 ずつ漸増した。解析要素は、ウェブをシェル要素、端部充実部をソリッド要素、PC ケーブルをトラス要素とした。  $K=1.7$  が終局限界状態の荷重に相当する。破壊の判定は、RPC の主圧縮ひずみが 0.3%以上、または主引張りひずみが 0.1%以上に達した状態を判定する。

スパン中央と端部の 3 箇所の偏向部のみを考慮した解析 case-1 は、現状の設計で計画している各ウェットジョイント部に設けた 7 箇所の偏向部を考慮した解析 case-2 に比較して 15%程度の耐力低下を生ずる。偏向部を 7 箇所設けることで最終耐力として、内ケーブルの場合とほぼ同等になるようにした。

#### 4. 施工確認実験

##### 4.1 RPC の混練り、打設、養生

RPC の混練りや打設に関しては、小規模な要素実験を実施している。今回は、実物大の構造載荷実験供試体を作成するに当たり、施工に関しても一連の確認実験を実施した。3L と 3R の PCaB を想定して、それぞれの部材を作成して中央部に幅 30mm のウェットジョイントを設けて横方向に緊張して一体化する。混練りは容量 1.75m<sup>3</sup>、モーター45KW の強制パン型ミキサー

写真-2 横緊張の完了

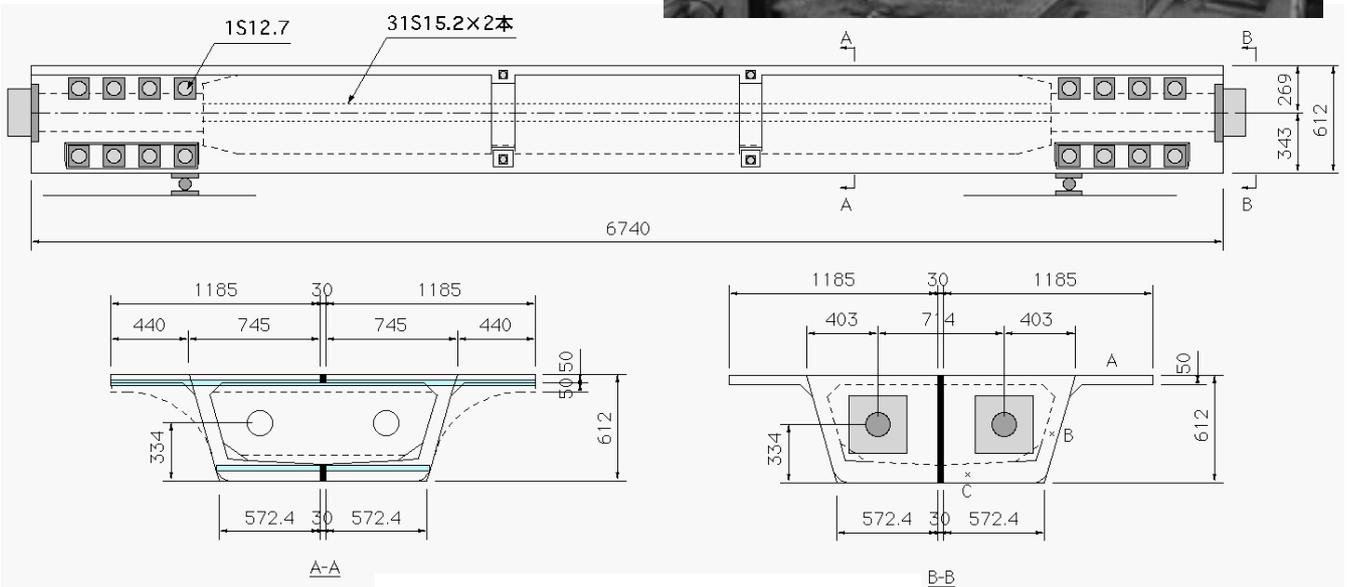


図-10 実物大の実験供試体

で行い、0.65m<sup>3</sup>/バッチをホッパーで受けてからトレミーを用いて打設した。養生は、1次養生を30で48時間、また2次養生を90で48時間で実施した。

#### 4.2 ウェットジョイント

左右のブロック間隔が30mmになるようにセットして、その間にRPCを充填した。硬化後、横方向に12.7mmのモノストランドにより緊張して一体化をした。写真-2に横締めした供試体を示す。橋軸方向には、15.2mmx31本より線のストランドを2本セットし、約3700kN/本の緊張力を与えた。

#### 5. 構造載荷実験

構造実験については緊張端部の支圧版の大きさを従来のコンクリートに使用するものより小さくしているために、定着体とアンカーヘッドの組み合わせで支圧性能試験を実施した。また、ウェットジョイントについては、せん断キーの効果を確認するための純せん断要素実験や、ジョイント部のせん断破壊形態を明らかにするための梁によるせん断実験を実施した。図-10に示す実物大の実験供試体のリブ位置で二点載荷（曲げ区間1.4m）で曲げせん断区間を1.8mとした、曲げせん断載荷実験を行い、終局限界状態での設計せん断力との比較より耐荷性能を評価した。図-11に実験結果を示す。これより、供用限界状態ではクラックの発生がなく、終局限界状態の荷重に対しては、ウェブに若干の斜クラックが発生したが耐力的には問題がなかった。最終耐力の載荷荷重は、2500kNでこれは終局限界状態の約1.8倍であることが分かった。

#### 6. おわりに

RPCの材料特性を活かした橋梁設計を試み、従来のコンクリートでは実現できなかったような構造形式を案出することができた。今回の検討では桁の自重を大幅に低減することができ、またスパンを飛ばすことができたので、基礎工事へのコスト低減を見積もることができた。

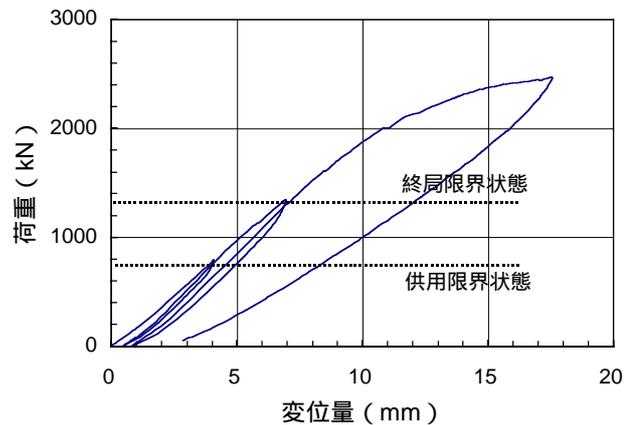


図-11 実物供試体の載荷実験結果

今後の展開としては、構造的な検証を実験や解析を通じて実施すると共に、実施工にかかる費用を検討してさらに詳細のコスト評価とコストダウンの技術開発をする必要がある。また、RPCの高耐久性が長期的な維持管理の費用にどのように影響していくかなど、現地での長期的なモニターのデータを得て、ライフサイクルコストの観点からのデータベースを蓄積する必要がある。

本研究は、山形県が主催する「庄内地域産学官連携推進会議」内に新たに設置された「新素材による橋梁建設技術委員会」（委員長：横浜国立大学 池田尚治教授）において設計施工方法についての技術的な評価を受けながら進めている。関係各位の方々に感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) Cheyreyzy, M.: Structural applications of RPC, Proc. of the Inte. Conf. New Technologies in Structural Engr., Vol.1 pp.5-14, July 1997.
- 2) CEB-FIP Model Code 1990, July 1991.
- 3) Behloul, M.: Analysis and modeling of the behavior of an ultra high performance fiber-reinforced cement matrix material, Doctoral thesis, ENS de Cachan, 1996.
- 4) Behloul, M.: Design rules for DUCTAL prestressed beams, Technical information from Bouygues, pp.1-15, Feb 2000.