

曳田歩道橋

— UFC を用いた世界最大規模の PC 下路式歩道橋 —

松山 高広 *1・宮島 朗 *2・横畑 勝彦 *3・平井 康夫 *4

1. はじめに

国内における超高強度繊維補強コンクリート（以下、UFC）の適用事例は、2002年の酒田みらい橋をはじめとし、PC橋、水路・橋脚の補修およびデッキ、ルーバーなどの土木構造物や建築部材に拡大した。

橋梁に関しては、国内で12橋の施工事例^{1)~4)}があるが、その中で曳田歩道橋は、もっとも新しい橋梁であり、UFCを用いた世界最大規模のPC下路式歩道橋である。

曳田歩道橋は、鳥取県一般県道鷹狩渡一本線の道路拡幅に伴い、千代川の支川にあたる曳田川に架かる曳田橋（道路橋）に併設される歩道橋（単独橋）として計画された。

図-1に橋梁位置図を示す。

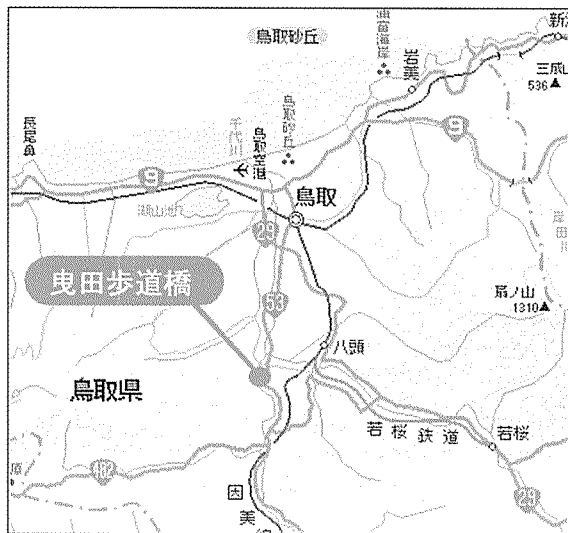


図-1 橋梁位置図

本歩道橋ではPC橋2案、鋼橋2案から、既設道路橋（3径間ポストテンション単純PC橋）への影響も含め、施工性、環境への配慮、維持管理および橋梁の耐用年数を100年としトータルコストを評価した結果、軽量化により橋脚の施工が不要で、1支間が可能なUFCを使用した単純PC下路桁橋が採用された。

本橋は図-2に示すように11分割したセグメントを工場で作成し、現場で接合する構造である。

本報告はUFCの中でもっとも実績の多い「ダクトル（圧縮強度180 N/mm²）」を用いており、適用内容および部材の製造、現場施工について報告する。

2. 工事概要

工事概要を以下に示す。

工事名：県道鷹狩渡一本線歩道橋上部工事

（地方特定）

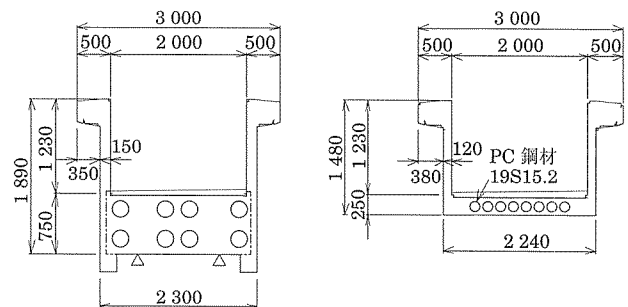
構造形式：ポストテンション方式単純PC下路桁橋

橋長：64.5 m

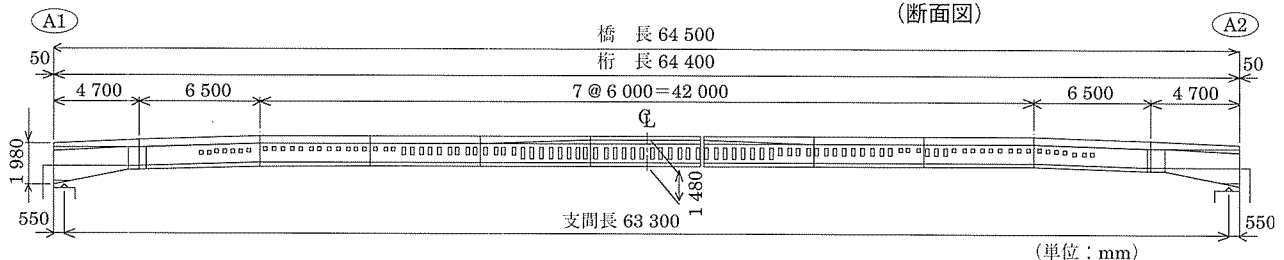
支間長：63.3 m

幅員：2.0 m

平面線形：R = ∞



（断面図）



（単位：mm）

図-2 橋梁一般図（側面図）

*1 Takahiro MATSUYAMA：(株)安部日鋼工業 技術工務本部 開発部

*2 Akira MIYAJIMA：(株)安部日鋼工業 技術工務本部 開発部

*3 Katsuhiko YOKOHATA：(株)安部日鋼工業 大阪支店 技術工務部

*4 Yasuo HIRAI：鳥取県東部総合事務所県土整備局 道路都市課

勾配：縦断 2% VCL = 60, 横断 2% 片勾配
 荷重：群集荷重 3.5 kN/m²・雪荷重 1.0 kN/m²

3. 上部工形式の選定

3.1 形式の抽出

橋梁形式の抽出については、鋼橋およびコンクリート橋から、以下の基本条件を満たす適用支間および架設工法から 4 形式を抽出した。

(1) 基本条件

- 1) 全幅 $B = 3.0$ m (有効幅員 2.0 m), 橋長 $L = 64.5$ m の直線橋
- 2) 河川内は渇水期施工を前提とする。また、上下部工施工時における河川内へのアプローチは、堤防から斜路を設置して行う。
- 3) 基準径間長 (20.0 m 以上) から単径間, 2 径間および 3 径間案が想定される。しかし、隣接する既設曳田橋は 3 径間のため、河川阻害率から 2 径間案は削除する。
- 4) 単径間案として、トラスおよびアーチ形式が考えられるが、主構が主部材となる同形式においては、本橋のような幅員の狭い橋梁には、効率が悪く工事費も割高となるため比較案から除外する。
- 5) 単径間案では支間長 = 40 m 以上となり、橋梁の固有振動数が歩行者の歩調と共振し歩行時に不快感を与える可能性があるため、歩行者に悪影響を及ぼさない構造とする必要がある (橋梁の固有振動数 = 1.5 ~ 2.3 Hz の範囲外)。
- 6) 河川内に橋脚を設置する場合、既設橋脚との間に中仕切壁を設置する必要がある。また、護床工を既設曳田橋の橋脚周囲に設置するため、施工順序、掘削規模等を考慮した計画が必要である。

(2) 橋梁形式の抽出

基本条件から以下の 4 タイプを抽出した。

- 1) PC 単純下路桁橋 (UFC 使用)
- 2) PC 3 径間連結プレテン中空床版橋
- 3) 鋼単純非合成箱桁橋
- 4) 鋼 3 径間連続非合成 H 桁橋

3.2 上部工橋梁形式の選定

上記形式から、経済性、施工性、環境への影響および維持管理等の比較を行い、以下の理由で PC 単純下路桁 (UFC 使用) を選定した。

- 1) 本橋の地質条件から 3 径間案は、中間橋脚の施工において仮設費が割高となる。そのため維持管理を含めたトータルコストについては、PC 単純下路桁橋 (UFC) が 4 案のなかでもっとも経済的である。
- 2) 下部工の施工は橋台のみであり、河川を掘削する必要がなく現況地形の変状は小さい。そのため環境への影響が少ない。
- 3) 耐久性が高く維持管理工事は、伸縮装置の取替えのみであり、そのため、交通規制は比較的軽微である。

3.3 UFC 橋の特徴

- 1) コンクリート橋であるが、従来のコンクリートと比較して強度、じん性および耐久性などの面で高い性能を

誇り、部材断面を薄くできるため、鋼橋とほぼ同等の軽量化を図ることが可能である。

- 2) $\sigma_{ck} = 180$ N/mm² の超高強度コンクリートを使用するため大容量のプレストレスの導入が可能であり、桁高を低くかつ長支間化が実現できる。
- 3) 本橋では支間長が 63.3 m となるが、鋼橋と比較して歩行者に悪影響を及ぼす共振が生じにくい構造である。
(たわみ振動数 = 1.03 Hz < 1.5 Hz ~ 2.3 Hz)
- 4) 補強筋を必要としない。

本橋は UFC のもつ特性から断面を薄くし、軽量化を計ることができ、標準床版厚 250 mm, 支間中央の桁高は 1 480 mm で、桁高/スパンは 1/43 を実現した。また歩行者への圧迫感を与えない配慮と、橋全体の美観性向上のためウェブに開口を設けた。開口の形状は歩行者の転落防止を考慮して $\phi 150$ mm ~ $W 150$ mm・ $H 600$ mm とした。

また、プレキャストセグメントの接合目地は、場所打ちの UFC (ウェットジョイント接合) で施工する構造とした。

写真 - 1 に着工前の状況を示すが、既設の曳田橋は PC 3 径間単純ポステン T 桁橋である。



写真 - 1 着工前状況

4. セグメント製造概要

4.1 事前検討

UFC 使用したプレキャストセグメント桁を製作するにあたり、プラントの能力、打込み方法、充てん性、型枠の変形および型枠拘束力、UFC の品質確認を目的に事前に桁端部変断面試験体を製作し、すべてを確認したうえで製造を開始することとした。

(1) プラントの能力

ミキサの能力は各工場異なる。UFC は、従来のコンクリートと異なり粘性が高くミキサへの負荷が大きくなるためミキサの練混ぜ性能試験を行い、「超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)」²⁾に準じ、使用する強制 2 軸式ミキサの公称容量 1.75 m³ に対して、1 バッチあたり最大練混ぜ量を 1.3 m³ とした。

(2) 型枠の変形および型枠拘束力の確認

UFCは従来のコンクリートと比べ、流動性が高く、自己充てん性に優れているが、凝結開始時間が20℃の環境温度の場合、練混ぜ開始から約12時間からとなり、打込み時には従来のコンクリート以上に、長時間にわたり型枠に液圧が作用する。そのため内型枠への浮力による影響を考慮し逆打ちとしたが、型枠の変形および安全性の確認は重要な項目であり、試験体により変形量を確認し十分な補強を検討した。写真-2に試験体型枠を示す。

またUFCは硬化時の自己収縮が大きく、初期養生の硬化時に型枠拘束によるひび割れが懸念されるため、事前にFEM解析により、自己収縮に対する緩衝材の効果を検討し、発生引張応力が、初期養生完了時のコンクリート引張応力以下となることを確認した。

図-3に緩衝材の効果を示す。

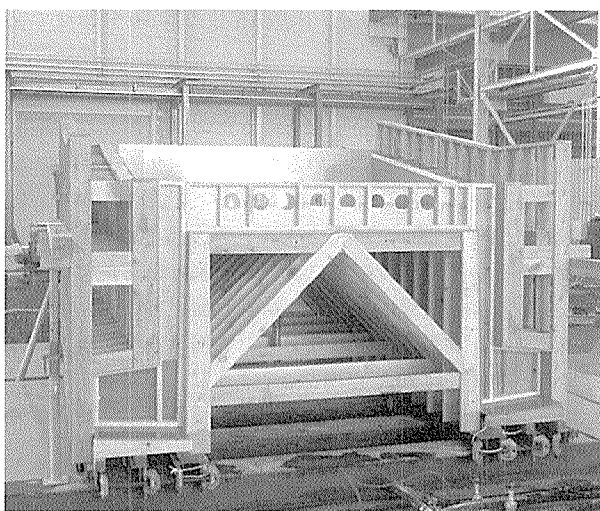


写真-2 試験体型枠

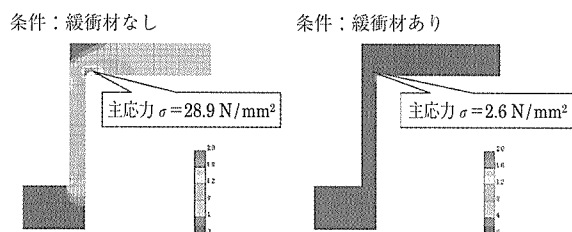


図-3 自己収縮に対する緩衝材の効果

(3) 打込み方法および充てん性

図-2に示したように本橋の桁端部は変断面である。前述のようにU型断面を逆打ちとする場合、変断面部は傾斜部となり、自己充てん性の高いUFCの打込みには伏せ型枠が必要である。そのため試験体により、打込み手順、伏せ型枠の設置手順および液圧に対する対処方法を確認した。また、開口部の製作方法についても検証した。写真-3に製作した試験体を示す。

(4) 各工程と役割分担の確認

本橋のセグメント製作にあたり、設備の関係で材料の投

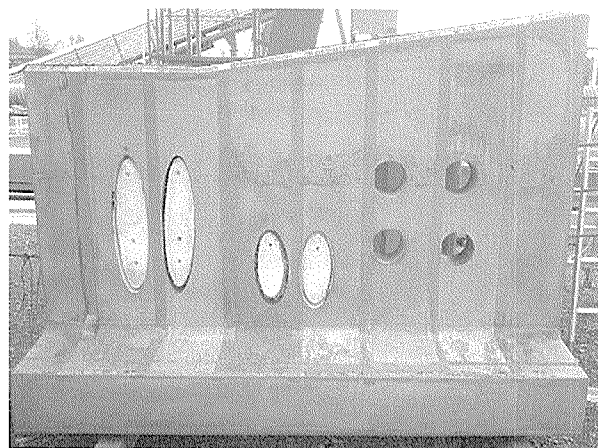


写真-3 試験体

入は、1バッチ分計量された材料を分配したトンバックを使用し、ミキサに直接投入する方法とした。また、UFCによる製造は、従来のコンクリート製造に対し注意する点が多く熟練した能力が必要となる。そのため、材料投入、練混ぜ、フロー試験、排出、ストックおよび打込み、養生など一連の製造工程の確認と役割分担を明確にする必要があった。試験体製作において実作業従事者のUFCに対する認識を向上させそれぞれの役割を周知徹底した。

4.2 製造の概要

図-4に製造フローを示すが、ここでは、練混ぜ・打込みおよび養生について説明する。

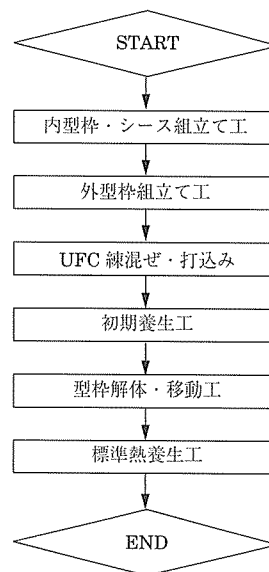


図-4 製造フロー

(1) 練混ぜ

練混ぜには粉体投入から排出まで平均35分を要した。フロー値測定は、標準配合粉体と水(混和剤添加済み)を練り混ぜる1次練り後、鋼繊維投入後に練り混ぜる2次練り後および打込み前の計3回実施した。練上がり時のフロー値は、240～270mmの安定した値を得ることができた。

写真-4にフロー値測定状況を示す。

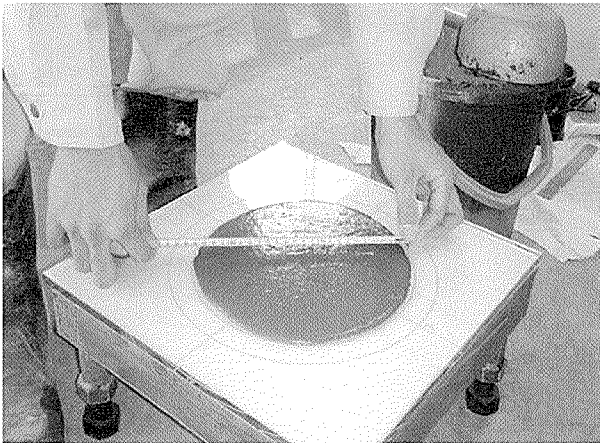


写真-4 フロー値測定状況

また、製造の時期が冬季であったため、目標のフロー値を確保するために、事前に材料と使用設備の加保温を実施し、計画どおり練混ぜを実施することができた。表-1に本橋の標準配合を示す。

表-1 標準配合

配合	単位量 (kg/m ³)				合計
	水	ダクトルプレミックス	銅繊維	高性能減水剤	
	150	2,254	157	30	2,591

(2) 打込み

UFCは自己充てん性に優れた材料ではあるが、従来のコンクリートと比べ水結合材比が8%と低く、表面の乾燥が大きいのでドライスキンとなりやすい。そのため、ウェブ打込みにはコールドジョイント防止対策として、二股のトレミー管を使用し連続打込みを行った。写真-5にウェブ打込み状況を示す。

床版部は、ウェブと比べ表面積が大きく打込み時間の短縮が要求されるため、連続打込みを行った。床版には多くのシースが配置されているため、シース天端部の合流部、ウェブと床版部の打継部などは突き棒などにより、銅繊維の配向を分散させることに注意を払い、またドライスキン防止対策としては打込み完了後速やかにUFC天端にビニールフィルムを設置することとした。写真-6に床版の打込

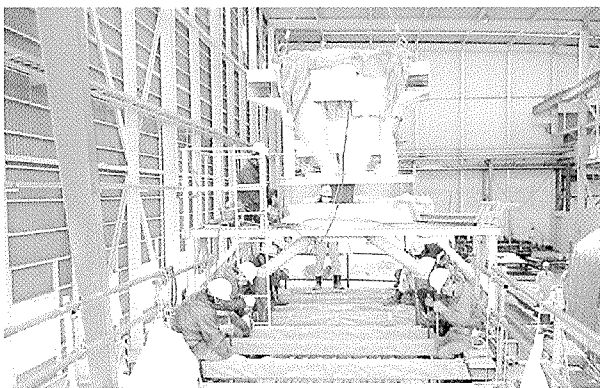


写真-5 ウェブ打込み状況

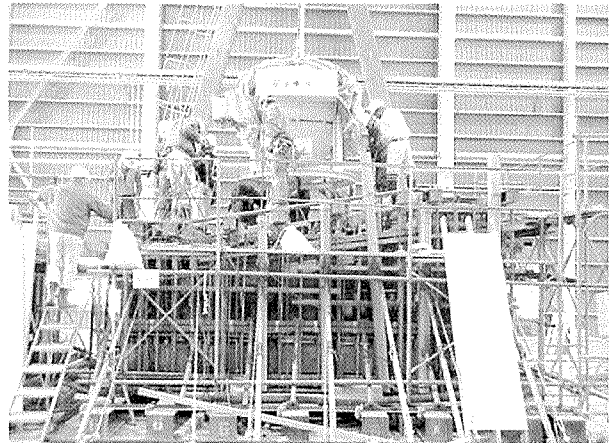


写真-6 床版打込み状況

み状況を示す。

打込みは、ウェブ15分、床版15分の計30分程度で完了した。

(3) 初期養生・型枠解体

型枠解体後の製品移動強度を得るために実施した初期養生は、セグメント移動に用いる埋込みインサート周辺に発生する応力から、必要強度を40 N/mm²と設定し、養生室内の雰囲気温度を20～35℃として、蒸気養生を24時間実施した。その際に温度応力によるひび割れを防止するために、養生室雰囲気温度とセグメント表面温度との温度差およびセグメント表面温度とセグメント部材内部温度との温度差が、それぞれ20℃以内となるように、熱電対を用い温度管理を行った。その結果ひび割れの発生もなく、脱枠完了時には所定の強度を得ることができた。

(4) 標準熱養生

標準熱養生は、超高強度の発現(圧縮強度180 N/mm²以上)を得られるとともに、硬化後の組織の緻密化を目的に行われる。また出荷後の自己収縮やクリープを大幅に低減し耐久性を向上することができる⁵⁾。初期養生と同様に各部位の温度差を20℃以内に保つよう管理し、養生室雰囲気温度は+3～+15℃/hrの上昇速度で行い、セグメント部材内部温度が90℃に達成した後48時間保持した。

降温時にはPC定着部などの部材厚が変化する部位はセグメント内部での温度差が生じやすいために、-1～-3℃/hrの比較的緩やかな速度で徐冷を行った。実際の温度履歴グラフの一例を図-5に示す。

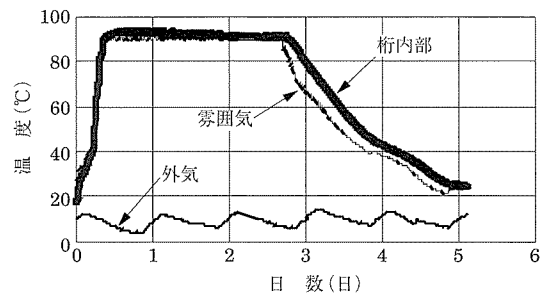


図-5 温度履歴グラフの例 (標準熱養生)

(5) 品質管理

標準熟養生完了時に、圧縮・割裂ひび割れ・引張強度試験を実施し、UFC 指針に準じた特性値を十分満足する結果が得られた。これは、練混ぜ、打込みおよび養生方法などが十分妥当であったためと考える。

表 - 2 に強度試験結果を示す。

表 - 2 強度試験結果一覧

管理項目	規格値	試験平均値
圧縮強度	180 N/mm ²	215 N/mm ²
ひび割れ発生強度	8.0 N/mm ²	9.9 N/mm ²
引張強度	8.8 N/mm ²	12.5 N/mm ²

5. 現場施工概要

本橋の施工は「支保工組立て工」,「運搬・架設工」,「場所打ち UFC 工」,「緊張・グラウト工」,「支保工解体工」の順で行った。表 - 3 に施工工程を示す。

5.1 支保工

セグメントを仮受けする支保工は、曳田川内の流水域にφ1500 mm のコルゲートパイプを6本埋設した盛土上に設置した。

図 - 6 に示すように支保工は、支柱式を採用し、セグメント重量が最大 195 kN であることと解体時の作業性を考慮し四角支柱を使用した。なお、支柱はセグメント接合目地ごとに1基ずつ独立させて設置した。

支保工の構造でとくに留意した点は、緊張時に発生する弾性短縮量を拘束しないこと、支柱反力が解体時に残存することからこれをキャンセルできる構造とすることである。

緊張時の弾性短縮を考慮し主桁の仮受け部に写真 - 7 に示すテフロン板を配置し移動可能な構造とした。支柱については写真 - 8 に示すように、支保工上段に油圧ジャッキが内蔵可能な解体専用ジャッキを使用した。なお、緊張・グラウトの項で概要を説明するが、支保工解体にあたっては、事前にプレストレス導入による2次応力の検討を行い、応力が構造物に悪影響を与えない方法で行った(5.4(2)参照)。

5.2 運搬・架設

11分割されたセグメントは2日に分け20tトレーラー11台で現場に運搬し、目地ごとに配置された支保工上に、

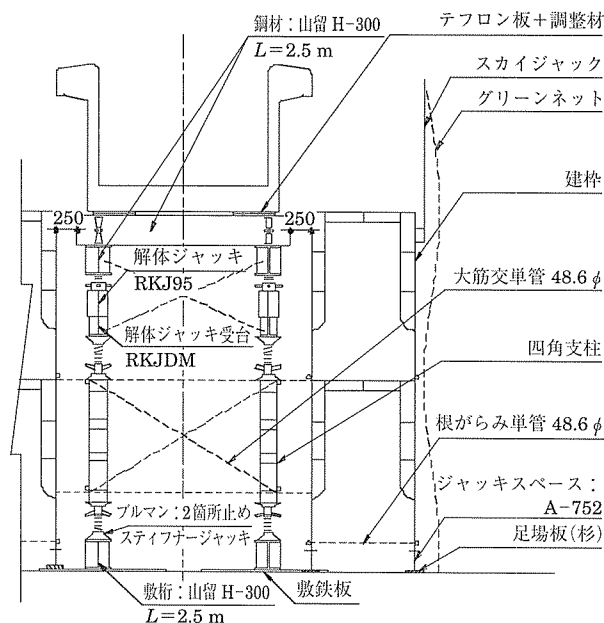


図 - 6 支保工構造図



写真 - 7 テフロン板配置

160tの油圧クレーンを用いて架設を行った。

架設順序は両端部のセグメントから順に行い支間中央のセグメントを最後に落し込み架設した。

本橋はウェブ厚が120mmと薄いU形断面の下路桁であることから、吊上げ時にウェブに作用する荷重について検

表 - 3 現場施工工程

工種	種別	2006年		2007年						
		10	20 31	1月	2月	3月	4月	5月		
				10 20 31	10 20 28	10 20 31	10 20 30	10 20 31		
準備工										
PC橋工	プレキャストセグメント搬入									
	プレキャストセグメント主桁組立て									
	支承工									
橋梁付属物工										
仮設工										
橋台工										
後片付け工										

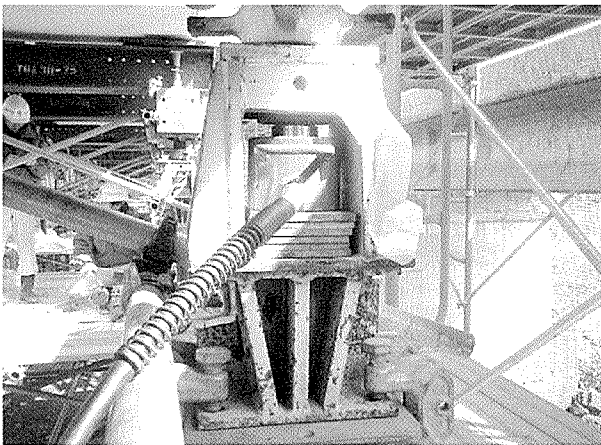


写真-8 解体専用ジャッキ使用

討を行いパイプサポートを使用して補強を行った。写真-9、10にセグメント架設状況を示す。

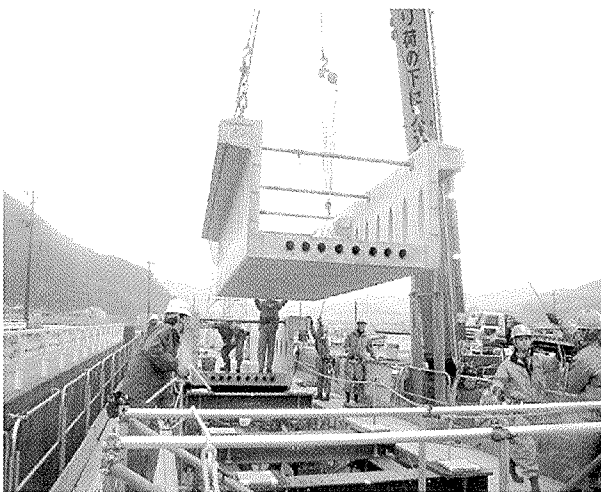


写真-9 セグメント架設



写真-10 セグメント架設完了

5.3 セグメント接合工

(1) 概 要

セグメントの接合は、ウェットジョイントで接合する構

造である。接合部を場所打ちにすることにより、セグメント製作精度の吸収のみならず、縦断線形に対しセグメントの製作が容易となる。

ウェットジョイント幅は設計では 30 mm であったが、床版内に配置されるシース ($\phi 95$) の接合施工性を考慮した結果、60 mm の幅に変更し施工した。

また、ウェットジョイントの施工は、平均外気温 5℃ の環境条件のなか、ウェットジョイント部の圧縮強度を設計で求められた 100 N/mm² 以上発現させるため、初期養生後に型枠を解体し給熱養生を実施する工程とした。接合工の施工フローを図-7に示す。

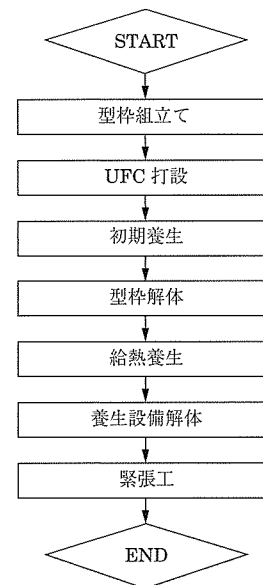


図-7 接合工施工フロー

(2) 練 混 ぜ

UFC の練混ぜは、公称容量 100 リットルの水平二軸ミキサ 2 台を使用し、合計 12 バッチ行った。1 バッチあたりの練混ぜ量は「超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)」⁵⁾に準じミキサ公称容量の 50 ~ 70 % を目安とし、試験練りにより練混ぜ時間、練上がりフローを確認した結果、1 バッチあたり 70 リットルの練混ぜ量と決定した。写真-11 に UFC の練混ぜ状況を示す。

(3) 型枠・UFC 打込み

ウェットジョイント部は、セグメント製作時にあらかじめ床版およびウェブ部に設置したインサートを型枠止め金具として使用し型枠を設置した。打込み方法は、床版部を打ち込み後、一方のウェブから片押しで打ち込むことにより未充てん部または空気だまりの防止に努めた。写真-12 にジョイント部の打込み状況を示す。

(4) 給 熱 養 生

打ち込み後、写真-13 のように橋桁全体を養生シートで囲い、ジェットファーネス、ラバーヒーターを用い初期養生を実施し、 $\sigma 1$ の圧縮強度は脱型強度 5 N/mm² を上回ることを確認して型枠を解体した。事前に実施した温度-強度関係の確認実験の結果に基づき、養生温度は 40℃ 以上を

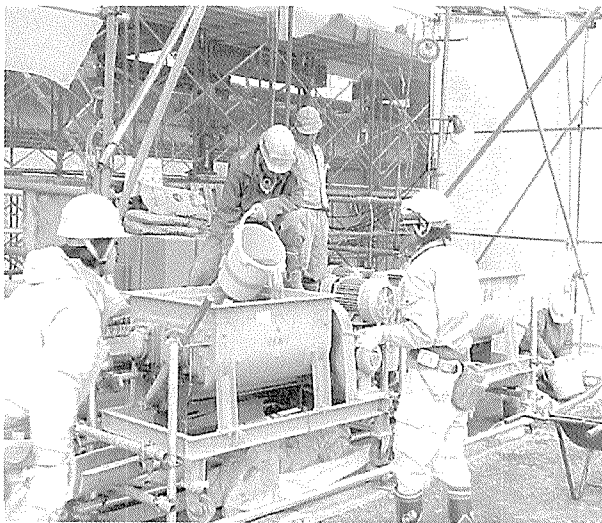


写真 - 11 UFC 練混ぜ

下を行い、急激な温度変化や部材間の温度差を生じさせないように最大 $-3\text{ }^{\circ}\text{C/hr}$ の比較的緩やかな速度で徐冷を行った。温度履歴グラフの一例を図-8に示す。

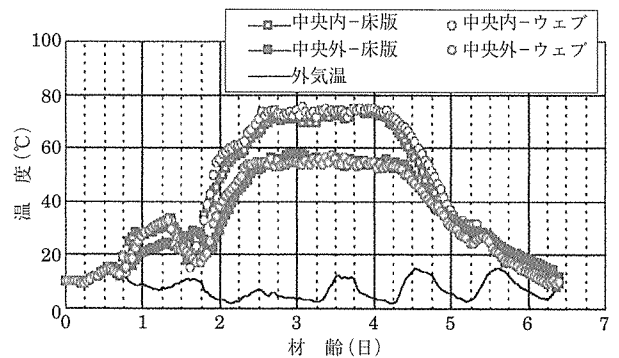


図-8 温度履歴グラフの例 (現場施工時)



写真 - 12 ジョイント部打込み (ホッパー使用状況)

5.4 緊張工における課題と対処

(1) 横そりおよび腹圧力の対処

図-9に養生、緊張、支保工解体の順序を示す。

緊張材はSWPR7BL 19S15.2を8ケーブル使用し、定着工法はVSL工法を採用した。緊張時の課題は、主桁断面がU形の薄肉部材であり、緊張による横そりのおそれがあること。また、図-10に示すように、PCケーブルが全て部材厚の薄い下床版内に配置され、偏向部が断面変化点の一箇所に集中し、プレストレス導入時の腹圧力による割裂の懸念があることであった。

対処方法として、主桁の横そりについては、主桁図心に近いPCケーブルから順番に対称の2ケーブルを同時に緊張し、偏心曲げモーメントの発生を抑えることとした。

また、偏向部の割裂については、設計照査により安全性を確認したが、本橋のような大容量ケーブルを使用した薄肉部材の施工例は少ないため、設計照査時にさらなる安全対策としてケーブル配置の変更を提案した。FEM解析の結果、偏向部の集中応力が大幅に低減することが分かった。



写真 - 13 給熱養生状況

目標とし給熱養生を行い、 σ_4 の圧縮強度 147 N/mm^2 を確認したのち徐冷を行った。セグメント製造時と同様にセグメント内側(ラバーヒーター設置面)と外側の温度差を $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内に保つように、熱電対にて温度管理を行った。

温度上昇時に、最大 $15\text{ }^{\circ}\text{C/hr}$ の上昇速度でラバーヒーターの温度設定を行った。所定強度を確認したのちに温度降



図-9 養生、緊張、支保工解体順序

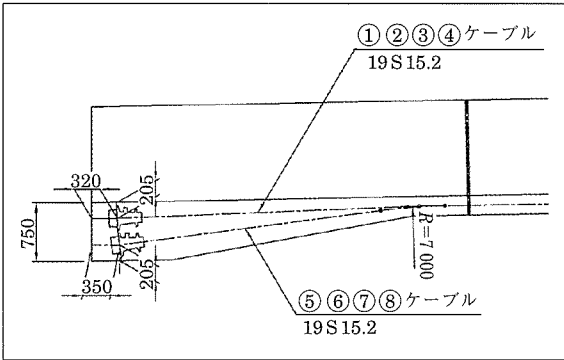


図 - 10 偏向部鋼材配置

図 - 11, 12 に FEM 解析結果を示す。さらに、実構造物にひずみゲージを設置し安全性を確認しながら緊張作業を実施し、無事に施工を完了した。なお、PC グラウトについて材料は、早強セメントを使用した高粘性型を採用し、注入作業は片押しで行った。

(2) 緊張により発生する 2 次力への対処

本橋施工時は、11 セグメントを 10 基の支保工で支持したいわば 11 径間の構造であるため、緊張によるプレストレス 2 次力が発生する。そのため、事前に緊張順序ごとに発生する反力と応力について検討し、主桁の安全性を確認して支保工の解体順序を決定した。

緊張は、2 次養生によるウェットジョイント部の収縮に対応するための 1 次養生後の仮緊張 (2 本) および 2 次養生後の本緊張を行った。

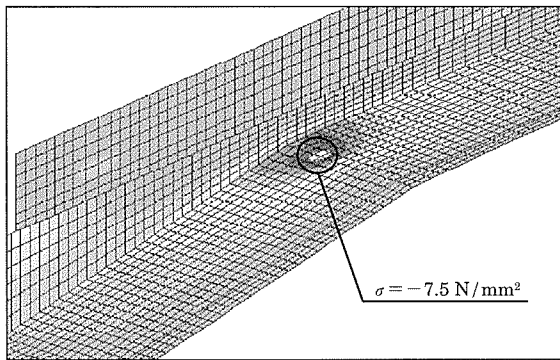


図 - 11 FEM 解析結果 (ケーブル配置変更前)

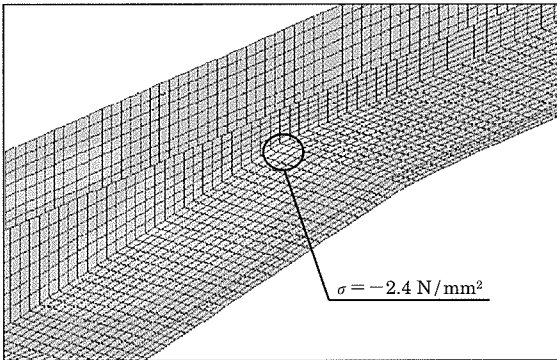


図 - 12 FEM 解析結果 (ケーブル配置変更後)

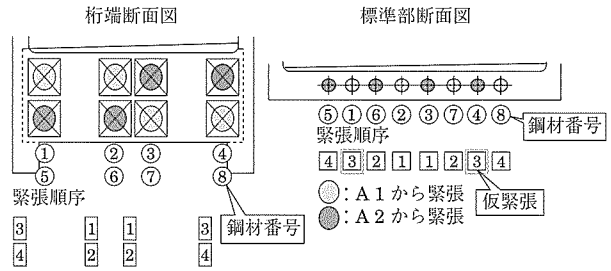


図 - 13 仮緊張 (ケーブル 2 本)

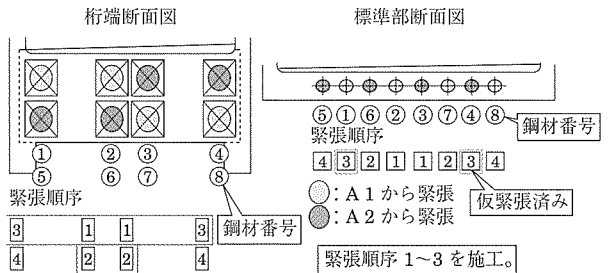


図 - 14 本緊張 (ケーブル 6 本緊張後、C5、C7 以外のジャッキを降下)

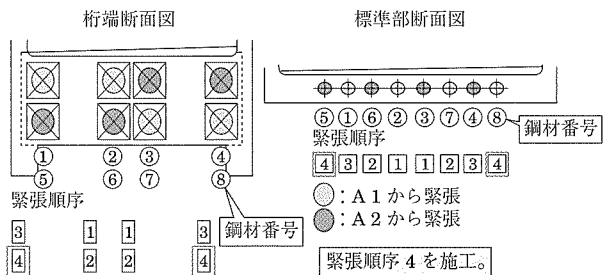


図 - 15 本緊張 (全ケーブル 8 本緊張後、C5、C7 のジャッキを降下)

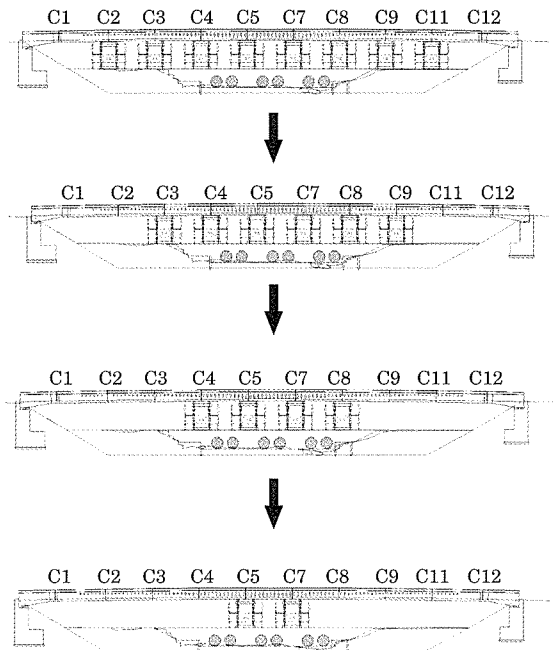


図 - 16 支保工解体順序

本緊張では、緊張ごとに各支保工上の桁のそりを確認しながら、端部の支保工からジャッキを降下させ、全ケーブル8本を緊張後、C5、C7のジャッキを降下し緊張作業を完了した。図-13～15は緊張順序を示し、図-16は支保工解体順序である。

6. おわりに

本橋の製造および施工に関しては、十分な事前検討と実作業従事者との綿密な打ち合せを行いながら作業を進めた結果、予定どおりの工程で所定の品質を得ることができた。

本橋は、平成19年5月に無事に施工が完了した(写真-14～17)。

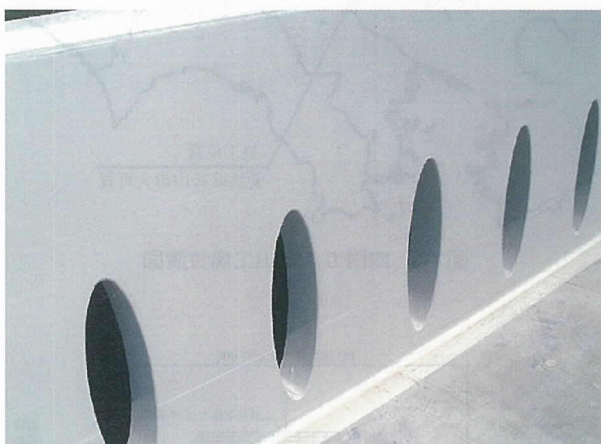


写真-14 架設完了(1)(ウェブ開口部)

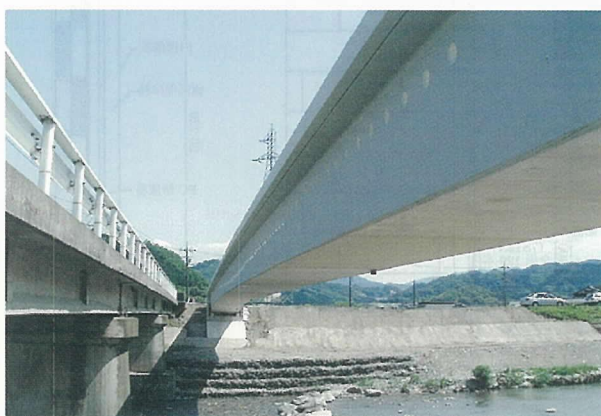


写真-15 架設完了(2)

UFCは従来のコンクリートではなしえなかった、薄肉部材による高強度、高じん性、高耐久性の特性を生かし、さまざまな構造物へ適応されていることにより、今後のさらなる発展が見込まれているものである。

本橋のように支間60mを超える橋梁をUFCを使用することで1支間で架橋できたことは、河川内の環境保全に少なからずとも貢献していると考えられる。

最後に、本橋の製造および施工に際して、多大なご指導、ご協力をいただきました関係各位に深く感謝の意を表すと



写真-16 架設完了(3)



写真-17 架設完了(4)

ともに、本報告が今後のUFCを用いたPC構造物の発展への一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) 細谷学, 武者浩透, 水谷篤司, 西浦哲雄: 超高強度繊維補強コンクリート(ダクトル)を用いたPC下路式歩道橋の施工, 第16回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.375-378, 2007
- 2) 大島邦裕, 中島稔, 田中浩二, 稲原英彦: 豊田市総合体育館横断歩道橋の施工 — 超高強度繊維補強コンクリート(ダクトル)を使用した歩道橋 —, 第16回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.379-382, 2007
- 3) 宮島朗, 平井康夫, 松山高広, 後藤理博: 超高強度繊維補強コンクリートを用いたPC下路式歩道橋の製造報告, 第16回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.383-386, 2007
- 4) 横畑勝彦, 平井康夫, 福島慶治, 辛軍青: 超高強度繊維補強コンクリートを用いたPC下路式歩道橋の施工報告, 第16回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.387-390, 2007
- 5) (社)土木学会: 超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案), 土木学会コンクリートライブラリー113, 2004

[2007年11月6日受付]