

(45) 波形鋼板と超高強度繊維補強コンクリートを用いた手延べ桁の開発 — 鳥崎川橋 —

安里 俊則¹・東田 典雅²・堀口 政一³・白谷 宏司⁴

¹正会員 西日本高速道路株式会社 関西支社 吹田管理事務所（〒567-0043 茨木市大字小坪井527-12）
E-mail:toshinori.yasuzato@jhnet.go.jp

²正会員 東日本高速道路株式会社 関東支社 高崎管理事務所（〒370-0015 高崎市島野町831）
E-mail:norimasa.higashida@jhnet.go.jp

³正会員 鳥崎川橋（PC上部工）工事共同企業体（〒049-2323 北海道茅部郡森町字上台町330-76）
E-mail:masa@ce.aisei.co.jp

⁴正会員 大成建設株式会社 土木設計部（〒163-0606 新宿区西新宿1-25-1）
E-mail:shira@ce.aisei.co.jp

北海道縦貫自動車道の鳥崎川橋は、橋長 554m、最大支間 56m の 11 径間連続波形鋼板ウェブ箱桁橋で、押出し工法で架設される橋梁である。

本橋においてはコスト削減を目指して、従来の仮設手延べ桁を用いず、鋼上弦材、波形鋼板ウェブ、および超高強度繊維補強コンクリート（UFC）で構成される波形鋼板手延べ桁を採用した。この手延べ桁は、押出し完了後に上下床版コンクリートを打設することで本設主桁の一部として利用する。

このような手延べ桁構造は前例がないことから、実施工に先立ち種々の実験や解析に基づく検討を行った。この検討は、押出し時の安全性や設計の妥当性などを確認した。

本論文では、まず、この波形鋼板手延べ桁の構造概要を紹介し、次に、設計およびこの新しい複合構造を実現するために行われた検討結果の概要を述べる。

Key Words : corrugated steel web, incremental launching, ultra high strength fiber reinforced concrete

1. 鳥崎川橋と波形鋼板手延べ桁の概要

(1) 鳥崎川橋の概要

北海道縦貫自動車道の鳥崎川橋の全体図を図-1に、標準断面を図-2に示す。本橋は11径間連続の波形鋼板ウェブPC箱桁橋で、A2橋台側からの押出し工法により架設される。

押出し工法においては、主桁の下面の線形は直線あるいは単一円とする必要があるが、本橋の橋面の平面線形は直線区間とR=4000mの曲線区間で構成され、また、縦断線形もA1橋台からA2橋台に向けて3.5%で下った後、3.545%の登り勾配となっている。そのため、下床版の下面の縦断および平面線形をそれぞれ単一円に近似し、桁高や左右の張出床版長を調整して橋面では道路計画の線形に合致させている。ただし、P1橋脚からA1橋台までの区間では、道路計画と近似円では平面線形の差が大きくなって左右の張出床版長が著しくアンバランスになるため、押出しは図-1中に示す位置までとし、残りの区

間の主桁は押出し完了後の支保工施工とした。

(2) 波形鋼板手延べ桁の概要

本橋ではコスト削減方策の一環として、従来のPC橋の押出し架設に用いられる鋼製仮設手延べ桁の代わりに、本設の主桁の押出し先頭区間を、波形鋼板ウェブ、鋼上弦材、および超高強度繊維補強コンクリートの下弦材で構成される軽量の構造として押出し架設を行い、押出し完了後にこの先頭区間の上下床版を製作して完成形の主桁とする施工方法を採用した。

図-3に鳥崎川橋における波形鋼板手延べ桁の構造概要を示す。この手延べ桁部は、図-1中のA1橋台～P1橋脚間の押出し区間と支保工施工区間の境界から、A2橋台に向かって44.8mの区間の本設主桁との兼用である。

手延べ桁の上弦材は鋼部材で、波形鋼板ウェブ上のフランジ鋼板と孔あき鋼板ジベル（PBL）用の鋼板で構成されている。これらは、完成形では押出し完了後に製作されるコンクリート上床版と波形鋼板ウェブの接合部材

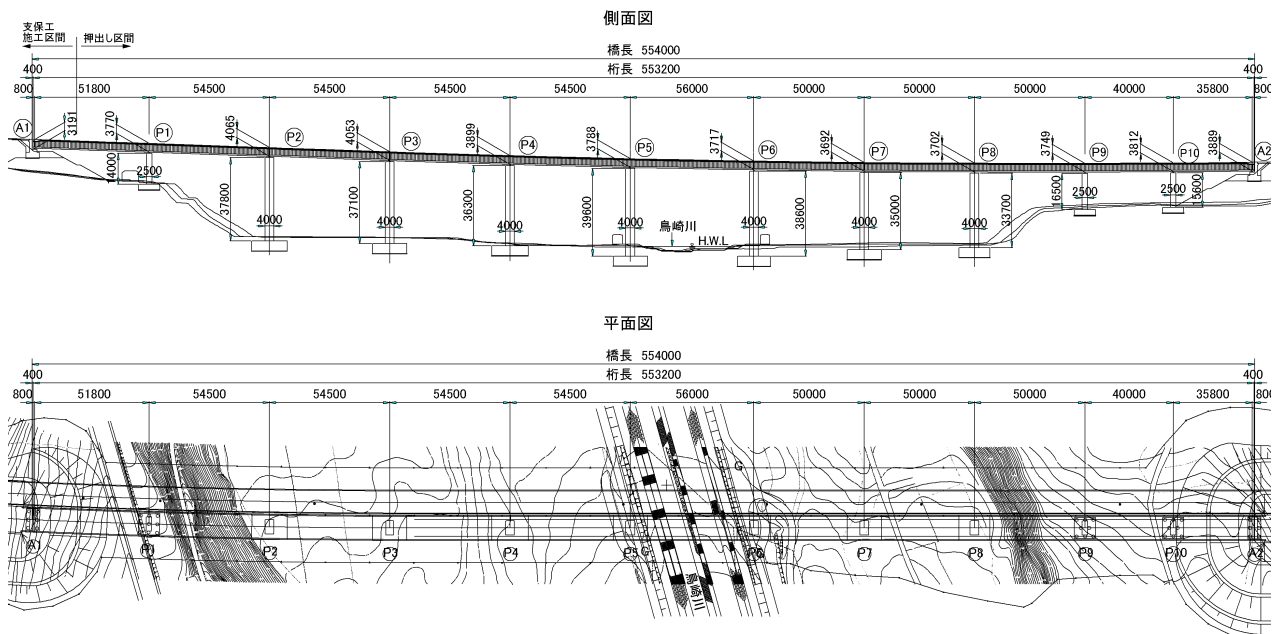


図-1 鳥崎川橋全体図

となる。また、手延べ桁の取付部付近の鋼床版型枠は、押し出し中は上弦材の一部として機能し、押し出し完了後は上床版コンクリート打設時の底型枠となり完成形も存置する。下弦材は超高強度繊維補強コンクリート（Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete：以降UFCと称する）の矩形部材で、完成形の下床版の一部となる。本橋で用いたUFCは、標準配合粉体と2vol.%の補強用鋼繊維を用い90℃で48時間の養生を行うことにより、設計基準強度 180N/mm^2 、ひび割れ発生限界応力が 8N/mm^2 の力学的特性を有するものである¹⁾。押し出し架設において手延べ桁を使用するのは、押し出しの先頭区間を軽量化して後方の本設主桁の断面力を軽減するためであるから、波形鋼板手延べ桁も軽量化を図る必要がある、そのためにはコンクリート下弦材を極力小さくしなければならない。その一方、下弦材の断面を小さくすれば押し出し中に下弦材に

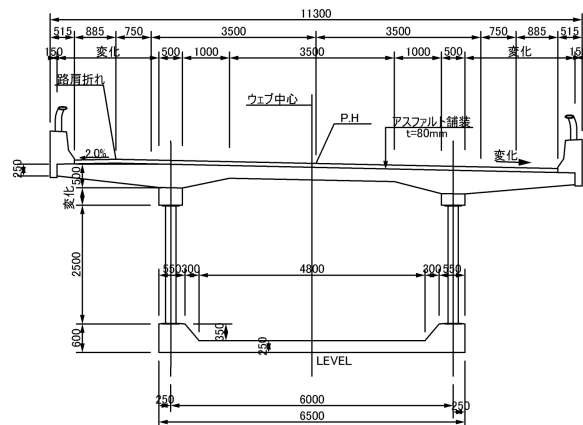


図-2 鳥崎川橋標準断面図

発生する応力変動も大きくなる。鳥崎川橋においては、押し出し中の下弦材の最大圧縮応力が 60N/mm^2 を超えるオ

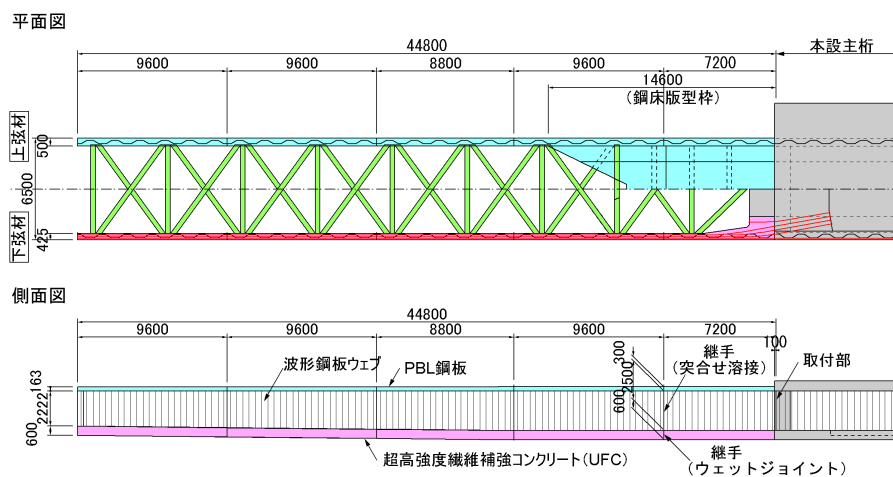
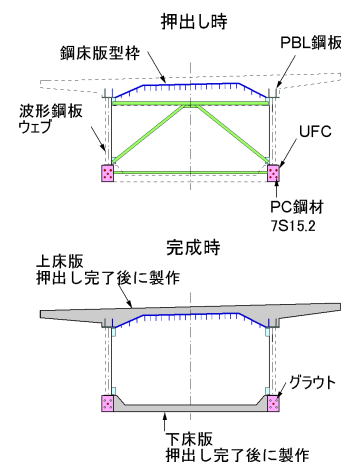


図-3 手延べ桁部の構造概要



このように、波形鋼板手延べ桁の上下弦材およびウェブは押し出し完了後も本設部材として利用し、また、仮設の横構や対傾構は、この区間の上下コンクリート床版製作時における波形鋼板の形状保持材として利用する。その結果、本橋では、従来の仮設鋼製手延べ桁を用いるよりも40%程度の架設費の削減を図ることができた。

まず本実験とは別の小型供試体を用いて予備実験を行ったところ、溶接温度が300℃を超えた時点でUFCの表面に爆裂の兆候が見られたため、溶接温度の上限を250℃と設定した。この管理温度による本実験の溶接ではUFCに爆裂は生じず、溶接部の残留応力は波形鋼板の降伏応力の約75%であった。既往の検討結果³⁾によれば、波形鋼板ウェブの板厚、波形状等が、せん断座屈強度が十分大きく座屈よりもせん断降伏が先行するような諸元の場合には、降伏値程度の応力が溶接部に残留していてもウェブのせん断耐力にほとんど影響を及ぼさないことから、本橋の手延べ桁においても、本実験で設定した溶接管理温度を適用すれば、溶接部の残留応力がウェブのせん断耐力を低下させることはないと判断した。

(3) 接合部の面外曲げ耐力確認実験

前述の通り、UFC下弦材と波形鋼板ウェブの接合部はアングルジベルである。完成後の活荷重時等にこの接合部に作用する面外曲げ（首振り）に対しては、図-6に示すようにジベル板にφ40mmの孔を設けて、PBLとして抵抗させることとした。通常のPBLではジベル孔に鉄筋を貫通させてせん断耐力を高めるのが一般的であるが、本橋では貫通鉄筋を省略している。このようなジベルの面外曲げに対する性能確認のため、実物大の接合部を再現した荷重実験を行った。

実験供試体と荷重方法の概要を図-7に示す。本実験の供試体の基本構造寸法等は、圧縮強度50N/mm²のコンクリートの場合のアングルジベル接合部に対する既往の実験例⁴⁾と合わせており、これらの実験結果と直接比較することができる。

本実験結果より得られたアングルジベル1個当りの荷重一変位を、既往のアングルジベルに対する実験結果と比較した一例を図-8に示す。圧縮強度50N/mm²のコンクリートを用い、貫通鉄筋を配置した既往のケース（A-1、A-2）よりも、本実験のUFCアングルは高い耐荷力を有することが分かった。鳥崎川橋の接合部に本実験結果を適用すると、設計面外曲げモーメントに対して安全率は7.8となる。本実験結果より、UFC下弦材に貫通鉄筋を有しないアングルジベルを配置した接合構造は十分な耐荷性能を有しており、鳥崎川橋の手延べ桁に適用可能であると判断した。

3. 波形鋼板手延べ桁の設計概要

(1) 主方向の設計

波形鋼板手延べ桁の主方向の設計においては、押出しの各ステップを追跡した2次元骨組解析（弾性梁理論）に基づき断面力を算出した。また、骨組解析の妥当性の

確認や、各部材の局所的な応力の評価のため、手延べ桁全体を再現した3次元弾性FEM解析も実施した。

骨組解析による曲げモーメントを、上下弦材のヤング係数差を考慮した断面係数で除して算出した応力と、3

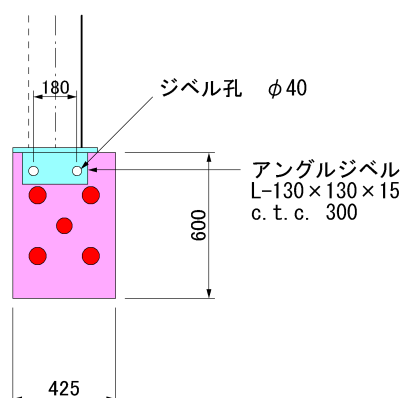


図-6 下弦材と波形鋼板の接合部

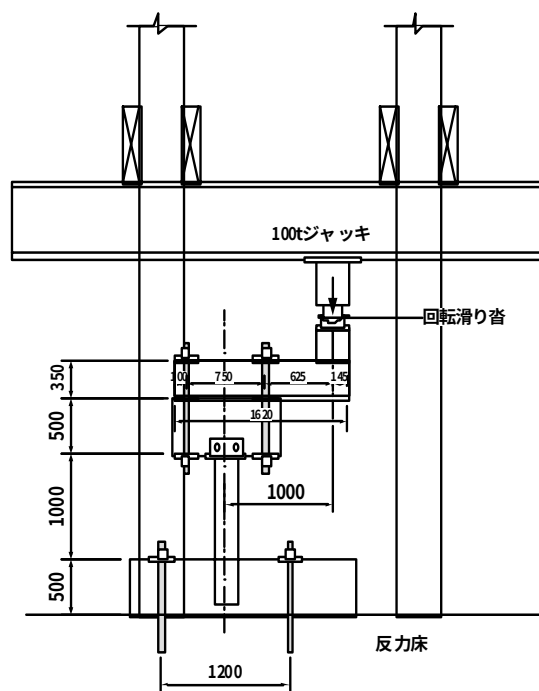


図-7 接合部の面外曲げ荷重実験の設備概要

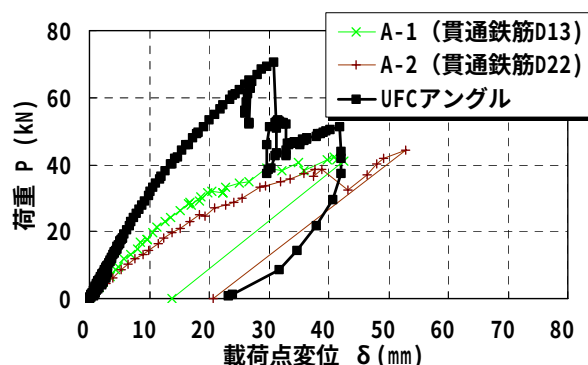


図-8 面外曲げ荷重実験結果（既往の実験値⁴⁾との比較）

次元FEM解析による応力は、波形鋼板直上付近の上弦材（フランジ、PBL鋼板）やUFC下弦材では近い値となった。鋼床版型枠では、局所的には骨組解析に基づく応力より30～35%大きくなったが、鋼床版の断面平均応力と骨組解析に基づく応力との差は4%以下であった。以上の結果より、弾性梁理論に基づく応力評価は妥当と判断したが、鋼床版部の照査においては安全側を考慮して、弾性梁理論に基づく応力を1.4倍した値を設計応力とした。

波形鋼板手延べ桁が仮査を通過する際、仮査上の下弦材には大きな局部曲げ応力が発生する。この局部応力はFEM解析により評価し、弾性梁理論に基づく全体曲げによる応力と合わせて、下弦材の軸方向の設計応力とした。この局部曲げ応力については、4章で述べる手延べ桁の縮小梁供試体を用いた載荷実験において詳細に考察する。

UFC下弦材の軸方向応力に対する制限値は、圧縮については「超高強度繊維補強コンクリート設計・施工指針（案）」¹⁾に基づき設計基準強度の60%とした。引張については、同指針によれば設計基準強度180 N/mm²のUFCでは8 N/mm²の引張強度が期待できるが、本橋では、工場製作のプレキャスト部材同士の継手（ウェットジョイント）における接着面の付着引張強度がほとんど期待できないこと、2章で述べたように波形鋼板と下弦材の接合部材がUFCの製作時の収縮を拘束するために軸方向引張応力が残留することなどを鑑み、押出し中、完成後設計荷重時ともフルプレストレスとした。

(2) ブロック継手部の構造

波形鋼板手延べ桁のブロック継手は、上弦材のフランジおよび PBL 鋼板は突合せ溶接、下弦材は現場打ちの UFC によるウェットジョイント、ウェブは突合せ溶接とした。下弦材のウェットジョイントによる継手部では、前述のように軸方向応力に対してはフルプレストレスとし、仮査通過時に下弦材に生じるせん断力に対しては摩擦で抵抗すると考えて照査した。摩擦係数は既往の実験結果¹⁾より 0.7 とした。ウェブおよび上弦材の鋼部材の溶接継手の照査は、従来の鋼橋と同様の方法で行った。

4. 波形鋼板手延べ桁の曲げ載荷実験

(1) 実験目的

波形鋼板手延べ桁は前例のない構造である。そこで、この構造の基本的な力学的特性の把握や鳥崎川橋の押出し架設時の安全性の確認のため、縮小梁供試体を用いた載荷実験を行うこととした。

具体的な検討項目は下記の通りである。

- 1) 鳥崎川橋の押出し時における安全性および設計計算の妥当性の確認
- 2) 波形鋼板手延べ桁の耐荷力の把握
- 3) 継手部の性能確認
- 4) 仮査通過時の下弦材の挙動把握

(2) 実験供試体と載荷荷重

実験供試体を図-9に示す。スケールは実物の約1/25である。本実験では、まず波形鋼板手延べ桁の挙動特性に関する基本的なデータを収集することを目的とし、上弦材はフランジ鋼板のみのシンプルな断面とした。ケース1は継手のないタイプ、ケース2は継手を有するタイプで、継手の有無による挙動特性や耐荷力の比較を行う。

載荷ステップを図-10に示す。鳥崎川橋の押出し架設では橋脚・橋台を10回通過し、手延べ桁はその度正負交番の曲げを受けるため、本実験では最初に、押出し架設時の手延べ桁の最も厳しい応力状態を再現した上向き、下向きの荷重を10回繰返し交番載荷した。続いて、上フランジが降伏するまで上向き荷重を載荷し、最後に桁が破壊するまで下向き荷重を載荷した。

(3) 非線形FEM解析

本実験結果との比較考察のため、非線形FEM解析も併せて行った。使用プログラムはDIANA Release 7.2である。

上フランジおよび波形鋼板はシェル要素でモデル化した。下弦材は、計算の簡易化を図るため梁要素でモデル化した。鋼部材の降伏応力は材料試験値とし、降伏後のヤング係数は降伏前の1/100のバイリニアとした。UFCの

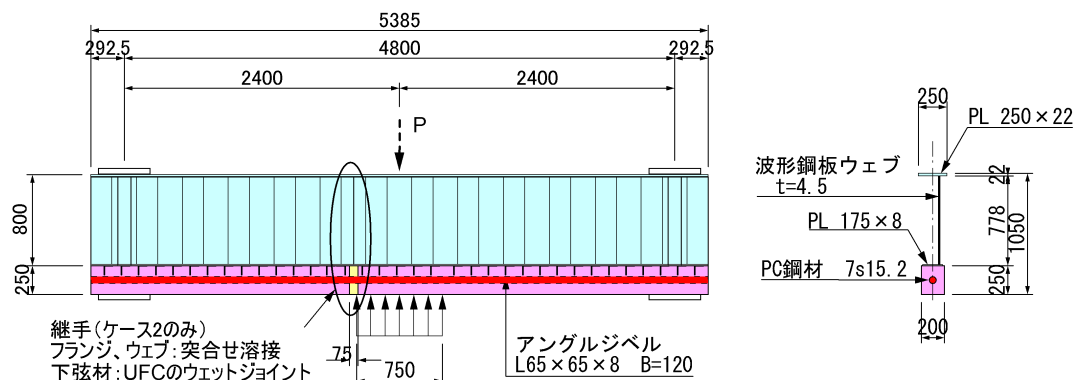


図-9 曲げ載荷実験供試体

応力－ひずみ関係は、圧縮側については「超高強度繊維補強コンクリート設計・施工指針（案）」¹⁾に準じたが、引張側については、製作時に引張応力が残留していることを鑑み、図-11に示す関係を用いることとした。

(4) 実験結果および考察

a) 荷重－変位曲線

本実験およびFEM解析による載荷荷重と支間中央の鉛直変位の関係を図-12に示す。図中で、縦軸の荷重値が負の場合は上向き載荷、正は下向き載荷である。

押出し架設時を再現した10回の繰返し交番載荷時には、荷重－変位関係は線形であり、繰返し載荷に伴う剛性低下や部材の損傷は見られなかった。

上向き載荷による上フランジの降伏荷重は押出し時の荷重の約2倍であった。実験ではその時点で載荷を止めたため上向き荷重に対する耐力は不明であるが、押出し時に想定される負曲げに対し、少なくとも2.0以上の安全率を有していたことになる。

最後の下向き載荷においては、継手のないケース1では支間中央で下弦材のひび割れが大きくなり、また継手のあるケース2ではUFCの継手部の目開きが大きくなった。両ケースとも上フランジが降伏し、最終的には曲げ破壊により耐力が失われたが、ケース1とケース2を比較すると、ケース2の方が若干剛性低下が早く、またケース2の曲げ破壊荷重はケース1より8%程度小さかった。

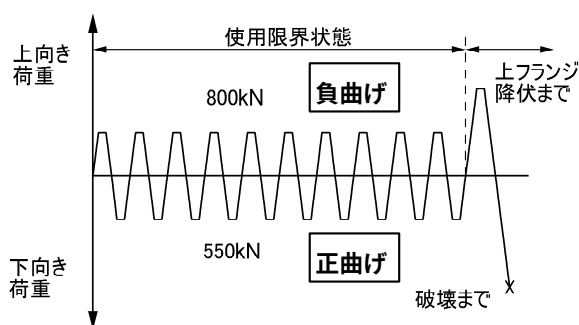


図-10 載荷ステップ

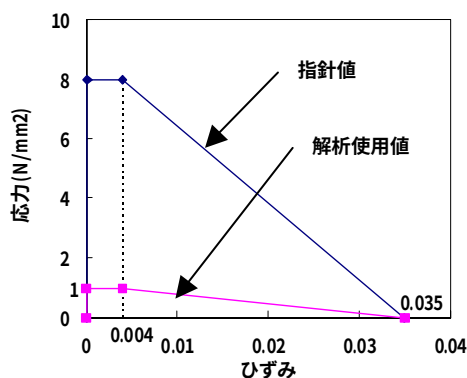


図-11 非線形 FEM 解析における UFC の
応力－ひずみ関係

その理由としては、波形鋼板と下弦材の接合部の下フランジ鋼板が、継手のないケース1では下弦材のひび割れが大きくなった支間中央では連続しており引張鋼材として寄与していたのに対し、継手のあるケース2では、目開きが生じた継手部ではフランジ鋼板も不連続なため、引張鋼材として働かなかったことが考えられる。しかしながら、継手のあるケース2においても破壊荷重は押出し時の2.9倍であり、鳥崎川橋の手延べ桁の押出し時には十分な耐力力を有していることが確認できた。

また、実験結果とFEM解析結果は全体的に良く一致しており、FEM解析により波形鋼板手延べ桁の挙動が概ね再現できることが確認された。

b) 上下弦材の曲げ応力

図-13は、押出し時を再現した載荷時（弾性範囲）の上下弦材の、弾性梁理論に基づく曲げ応力、すなわち単純梁として算出した曲げモーメントを断面係数で除して算出した応力を、実験で計測された応力と比較した結果の一例である。C2断面の上向き載荷時を除けば実験値と計算値は概ね一致している。しかし、手延べ桁が仮査上を通過する際を対象とした上向き載荷時の、載荷板（押出し時の仮査）に近いC2断面においては、実験では下弦材に局部的な曲げ応力が発生しており、弾性梁理論に基づく曲げ応力と重なった状態になっている。

上向き載荷時における載荷板周辺の下弦材応力の評価方法について検討するため、FEM解析において上向き荷重の載荷方法を分布荷重、集中荷重、強制変位など数パターン変えて実験値と比較した。上向き載荷時の荷重と下弦材応力の関係の一例を図-14に示すが、ここでは、FEM解析結果としては載荷板の受圧範囲で一様な強制変位を与えた場合のものを示している。載荷板の端部のC2断面における解析値は、上縁の引張応力および下縁の圧縮応力とも、C2、C3断面の実験値より若干大きめの値となっている。これは、図-15に模式的に示すように、実際には載荷板の中央付近では下弦材が載荷板から

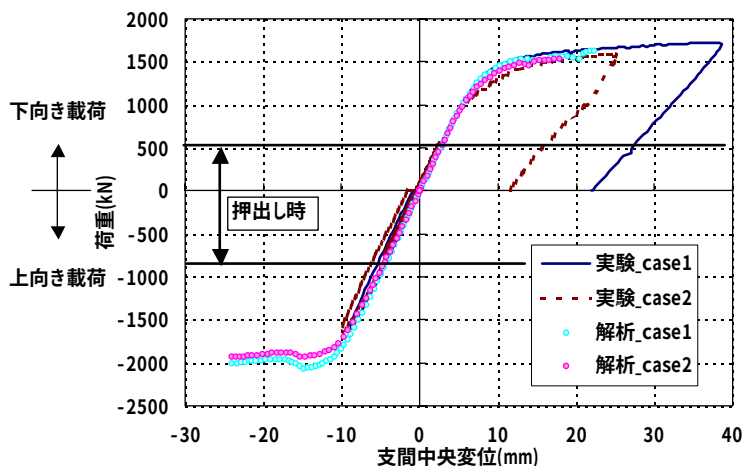


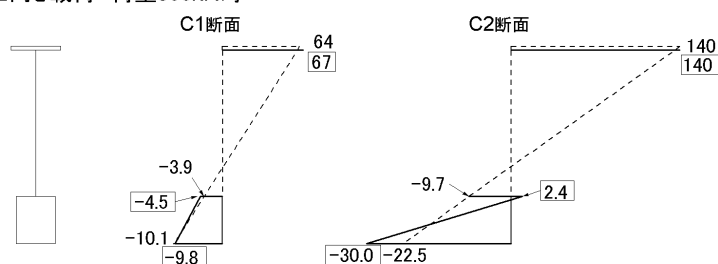
図-12 荷重－変位曲線

浮上っているのに対し、解析では浮上りを許さず載荷板の範囲で様な変位としたため、局部応力が載荷板の端部に集中したことによって考えられる。そのため、載荷板中央における下弦材上縁の解析値（図-14中の“解析C3上”）は圧縮で、局部応力がほとんど現れていない。

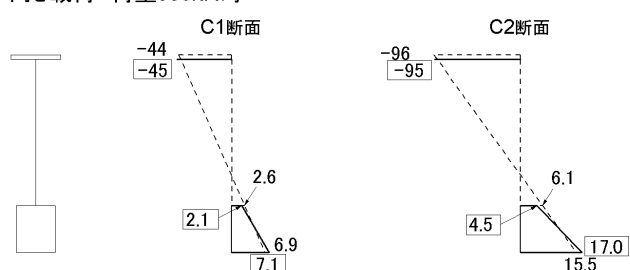
なお、図-14は、押出し時を想定した10回繰返し載荷時、すなわちUFC下弦材の目開きや鋼上弦材の降伏が生じる前の弾性範囲における荷重と下弦材応力の関係であるが、図-14中の載荷板中央における下弦材上縁の実験値（C3-1）は、荷重と変位の関係が非線形となっている。これは、荷重の増加と共に桁のたわみ（この場合は上反り）が大きくなるが、載荷板は剛性が高く変形が小さい

ため、載荷板からの支圧応力が、荷重の増加につれて等分布から次第に両端に集中するようになったためと考えられる。本論文では割愛するが、この推論が概ね妥当であることをFEM解析により確認した。また、図-14では見易くするため一部の実験結果しか載せていないが、2ケースの実験で得られた載荷板周辺の下弦材の応力には若干のばらつきが見られた。これは、載荷板からの支圧分布が下弦材製作時の下面の不陸などのために微妙に変化し、載荷板付近の局部応力に影響を及ぼしていたと推察される。ただし、実験で計測された上縁引張および下縁圧縮応力は、全て図-14中に示したC2断面のFEM解析結果を下回っていた。従って、実際の設計においても、

上向き載荷 荷重800kN時



下向き載荷 荷重550kN時



単位: N/mm²
応力は引張を正とする

囲みあり、実線: 実験値(ケース1)
囲みなし、破線: $\sigma = M/Z$ で算出した、局部応力を考慮しない計算値
(M: 単純梁としての曲げモーメント、Z: 断面係数)

図-13 応力分布 実験値と弾性梁理論値の比較（ケース1）

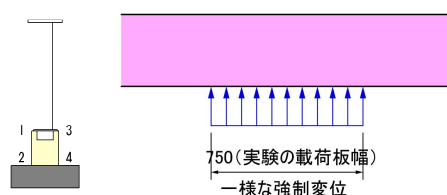
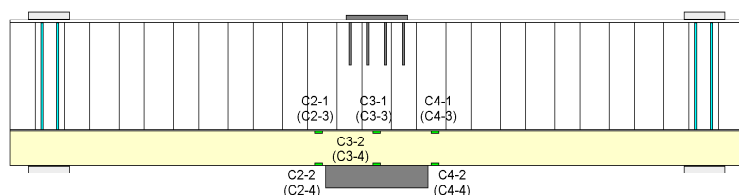
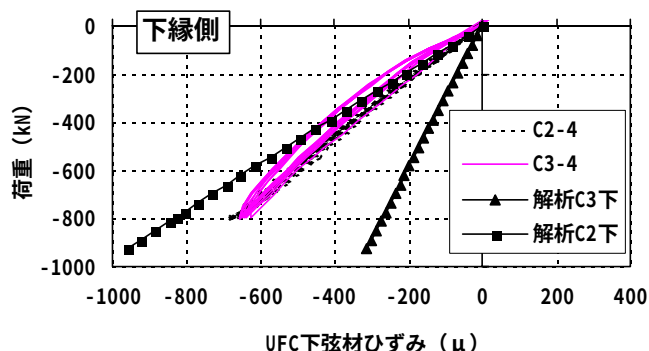
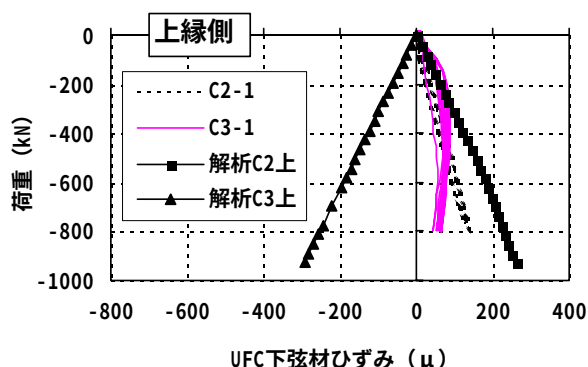


図-14 上向き載荷時における下弦材応力の一例（ケース2）と FEM 解析における載荷方法

FEM解析で仮沓の受圧範囲の鉛直変位を一樣として浮上りを生じさせないようにすることで、下弦材の局部応力に対し適切に安全側の評価ができると考えられ、鳥崎川橋の手延べ桁の設計に反映した。

5. まとめ

鳥崎川橋の押出し架設は2005年1月より開始した。押出し完了は2006年2月の予定であるが、ここまで特に問題なく順調に進捗している。図-16に施工中の手延べ桁の状況を示す。押出し工の際には手延べ桁先端のたわみを経時的に計測し、設計計算値との比較を行っているが、ここまでは実測値と計算値は良好に一致している。

鳥崎川橋においては、波形鋼板ウェブ、鋼上弦材、およびUFC下弦材で構成される手延べ桁を用いた押出し架設工法を考案し、具体化に当たっては、まず製作性確認実験によりUFC下弦材と波形鋼板ウェブの組み合わせが実現可能であることを確認した。さらに手延べ桁を模擬した梁の荷重実験や、波形鋼板とUFC下弦材の接合部の面外曲げ耐力確認実験等を通して、この新しい複合構造の力学的特性に関する基礎知識を得ると共に、設計計算の妥当性の確認を行った。これらの知見が今後の橋梁技術の発展の一助となれば幸いである。

謝辞：鳥崎川橋の手延べ桁部の設計、施工におきましては、「波形鋼板ウェブPC箱桁橋の押出し架設に関する技術検討委員会」（委員長：山崎 淳 日本大学教授）にてご指導頂きました。ここに深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：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），2004。

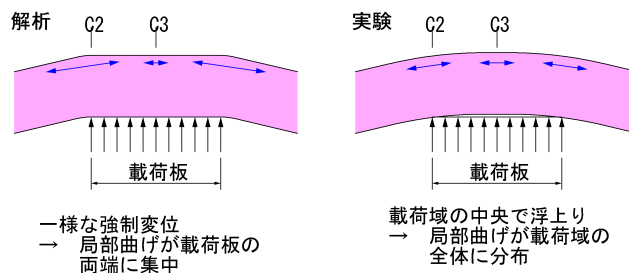


図-15 上向き荷重のモデル化と下弦材の局部応力



図-16 架設中の波形鋼板手延べ桁

- 2) 大島邦裕，東田典雅 他：波形鋼板ウェブ手延べ桁の製作実験，土木学会平成 17 年度全国大会第 60 回年次学術講演会論文集共通セッション，CS2-053，2005。
- 3) 阿田芳久，町勉 他：波形鋼板ウェブのせん断座屈耐力に関するパラメトリック解析，第 11 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，プレストレストコンクリート技術協会，pp.153-158，2001。
- 4) 鈴木永之，紫桃孝一郎 他：波形鋼板ウェブ橋におけるコンクリート床版接合部の横方向性状，コンクリート工学論文集第 15 巻第 1 号，2004.1

DEVELOPMENT OF LAUNCHING NOSE WITH CORRUGATED STEEL WEBS AND ULTRA HIGH STRENGTH FIBER REINFORCED CONCRETE - TORISAKI RIVER BRIDGE -

Toshinori YASUZATO, Norimasa HIGASHIDA, Masakazu HORIGUCHI
and Hiroshi SHIRATANI

Torisaki River Bridge is a box-girder, 11-span continuous bridge with corrugated steel webs, erected by incremental launching. In this project a unique launching nose was developed. Instead of a conventional temporary launching nose, it consists of upper chords of steel, corrugated steel webs, and lower chords which are made of ultra high performance fiber reinforced concretes. After the completion of the incremental launching, the nose is to be transformed to a part of the permanent girder with concreting its top and bottom slabs.

This paper first introduces the structural features of the launching nose, and outlines the design of the nose and some experimental examinations conducted to realize this new type of composite girder.