

信楽第六橋・第七橋（下り線）の設計・施工

— 波形鋼板先行架設工法を用いた波形鋼板ウェブ PC 箱桁橋の施工 —

井手 俊也*1・小林 康範*2・平木 伸尚*3・山口 統央*4

1. はじめに

信楽第六橋（以下六橋）および信楽第七橋（以下七橋）は、琵琶湖の南端から東南東へ約 10 km、第二名神高速道路の大津 JCT と信楽 JCT の中間付近に建設される橋である。

本橋は 2 径間連続および 5 径間連続の波形鋼板ウェブ PC 箱桁橋である。現在国内において 100 橋を超える波形鋼板ウェブ PC 橋が建設されており、うち約 80 橋程度が張出し架設工法により施工されている。

本橋も張出し架設工法による施工を計画していたが急峻な山岳地域という地形的な制約から橋脚位置が決まり、とくに六橋では発注時の側径間吊り支保工部が 15 m を超える計画となっていた。そこで側径間部の施工において波形鋼板を先行架設して閉合し、コンクリート床板の打設荷重を波形鋼板で負担させる工法を考案した。この工法は中央閉合部にも適用でき、工期の短縮および鋼材量の低減が図れることが検討の結果分かり、六橋と七橋のすべての閉合

部に採用することにした。

本報告では、この工法の設計・施工について報告する。

2. 橋梁概要

2.1 橋梁諸元

本橋の諸元を下記に示す。図 - 1 に橋梁一般図を、写真 - 1 に全景写真（左手が七橋、右手が六橋、手前が下り線、奥が上り線）を示す。

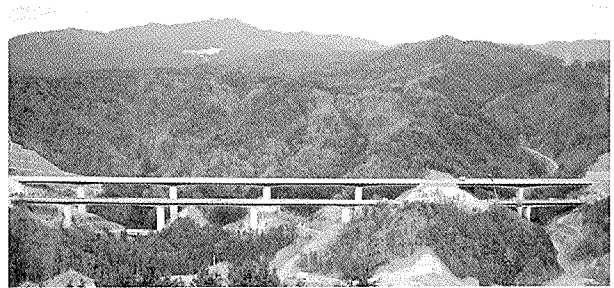
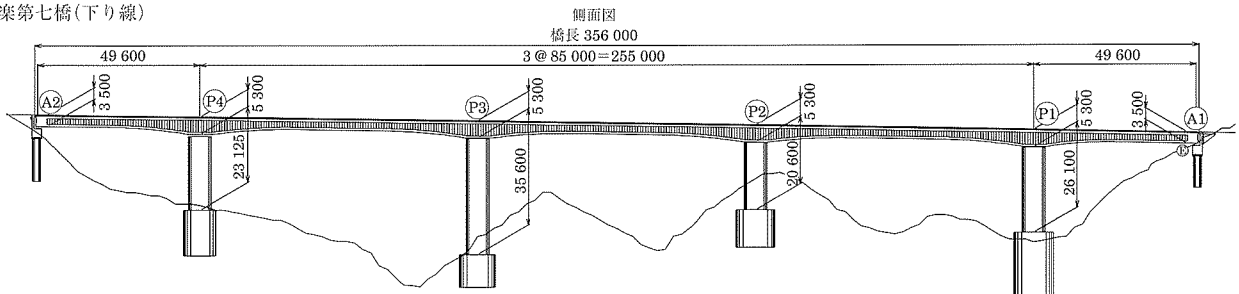


写真 - 1 信楽第七橋・第六橋全景

信楽第七橋(下り線)



信楽第六橋(下り線)

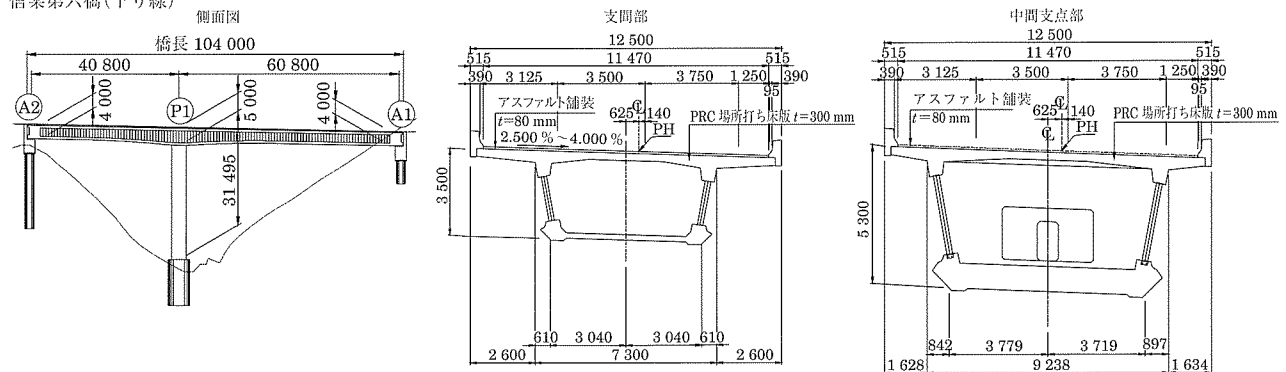


図 - 1 橋梁一般図

*1 Toshiya IDE：西日本高速道路(株) 技術部 技術グループサブリーダー（当時 大津工事事務所 工事長）

*2 Yasunori KOBAYASHI：西日本高速道路(株) 大津工事事務所

*3 Nobuhisa HIRAKI：八千代エンジニアリング(株) 技術推進本部 施工管理部

*4 Tsunehisa YAMAGUCHI：鹿島建設(株) 土木設計本部 プロジェクト設計部

路線名：第二名神高速道路
 橋名：信楽第七橋，信楽第六橋
 橋種：プレストレストコンクリート橋
 構造形式：（七橋）PC 5 径間連続ラーメン
 波形鋼板ウェブ箱桁橋
 （六橋）PC 2 径間連続ラーメン
 波形鋼板ウェブ箱桁橋

道路規格：第1種第1級（A規格）

設計荷重：B活荷重

・信楽第七橋

橋長：356.000 m
 支間長：49.6 m + 3@85.0 m + 49.6 m
 有効幅員：11.470 m
 平面線形：R = 3 000 m ~ A = 1 200 m ~ R = 10 000 m
 横断勾配：i = 4.000 % ~ 2.500 % （片勾配）
 縦断勾配：i = 2.000 %

・信楽第六橋

橋長：104.007 m
 支間長：40.803 m + 60.804 m
 有効幅員：11.420 m
 平面線形：R = 10 000 m
 横断勾配：i = 2.500 % （片勾配）
 縦断勾配：i = 2.000 %

2.2 使用材料

主要材料および数量を表-1に示す。

表-1 主要材料数量表

	仕様	単位	数量		摘要
			七橋	六橋	
コンクリート	$\sigma_{ck} = 40 \text{ N/mm}^2$	m ³	4 200	1 200	
型枠		m ²	9 000	2 700	
鉄筋	SD 345	t	720	210	
PC鋼材	19S15.2	kg	48 000	5 300	主鋼材
	12S15.2	kg	65 000	21 000	主鋼材
	1S28.6	kg	33 000	10 000	床版横締め
波形鋼板	SM 490 Y 他	t	300	90	

3. 設計概要

六橋および七橋は暫定二車線の断面で施工し、将来的な交通需要の変化に対応できるように三車線へ拡幅可能としている（図-2）。また、架橋地点の制約から最大支間長が60 m ~ 85 m程度で、かつ主桁断面は将来の三車線での有効幅員16.5 mを考慮して、もっとも経済的となる将来三車線時にストラットを設置可能な2ウェブの一室PC箱桁を採用した。なお、主鋼材は張出し鋼材に12S15.2，連結鋼材に19S15.2と12S15.2とした。

3.1 主方向の設計

主方向の設計は、架設時のクリープと乾燥収縮を考慮し、フレームモデルにより解析した。本橋は暫定二車線で施工され、将来的な交通需要の変化に対応するため三車線への拡幅を可能としている。このため設計は、暫定時と拡幅時の2段階に分けて実施した。また、三車線へ拡幅した場合に増加する死活荷重に対応するための外ケーブルを配置可能な構造としている。

3.2 横方向の設計

将来三車線への拡幅は、主桁にストラットを設置し上床版を拡幅する方法で行う。このため暫定時断面では通常のフレームモデルにより設計を行い、拡幅時断面ではストラットを考慮した3次元FEM解析で設計を行った。また暫定時の床版部はPRC床版とし、拡幅用のPC鋼材を暫定時に設置しておくことが困難なため拡幅部の床版はRC構造とした。

なお、将来三車線への拡幅に伴い必要となる鉄筋は、暫定二車線施工時から配置している。将来拡幅するために次のような対策を施した（図-2）。

- ① 橋軸方向全長にわたり任意にストラットを設置できる受け台を設置
- ② 暫定二車線施工時の床版端部に接続用の鉄筋を設置し将来三車線への拡幅時にはその鉄筋を利用し拡幅床版部を施工

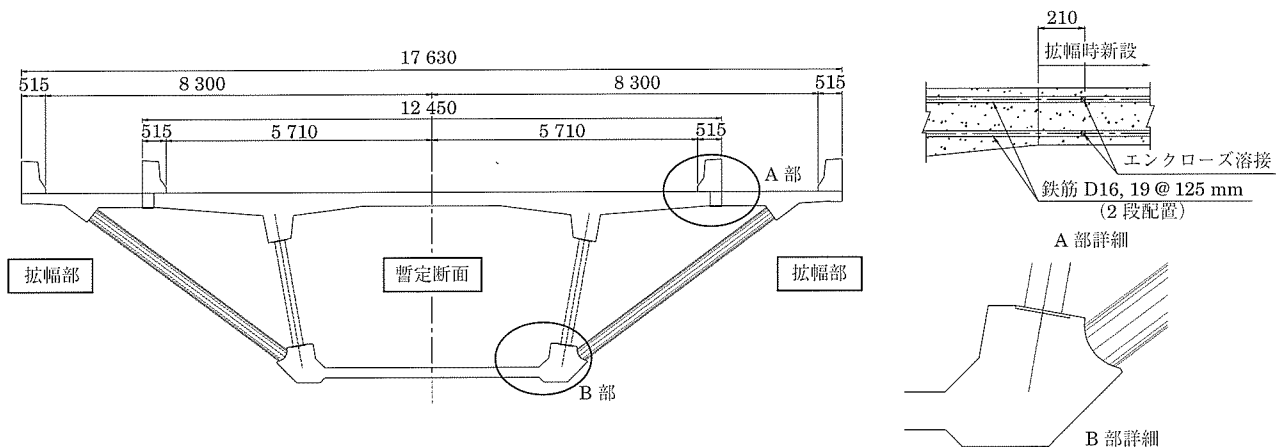


図-2 拡幅時の断面構造

4. 波形鋼板先行架設工法の検討

4.1 波形鋼板先行架設工法

通常、多くの波形鋼板ウェブ橋では、波形鋼板とコンクリートの上下床版とを接合するため、波形鋼板の上下に鋼フランジを設置し、その外面にアングルジベル等を設置している。これまでの波形鋼板ウェブ橋における上下の鋼フランジの主な役割はコンクリート床版との接合のためであった。

一方、このフランジ付きの波形鋼板に着目すると、構造的には鋼1桁のウェブ部分が波形になっている形状である。今回採用した施工方法は、この波形鋼板を先行架設し、フランジおよびウェブを結合して剛性を確保することにより移動作業車の架設材に利用し、移動作業車により上下コンクリート床版を構築する工法である。この工法を採用することにより、吊り支保工の組立て・解体がなくなり工期短縮が図れること、さらに波形鋼板先行架設区間を長く取ることにより主鋼材の数量を減らせることが可能となる。波形鋼板先行架設区間はスパン中央や桁端部の閉合区間にあたり、一般には正曲げが卓越する箇所になる。このため張出し施工区間先端付近に配置される張出し鋼材は完成時には不要になることが多い。この工法により合理的な鋼材配置が可能となる。

具体的には、両側の張出し施工完了後、閉合部区間の波形鋼板をフランジおよびウェブ部を連結して剛性を確保し、張出し施工部で使用した移動作業車により、上下コンクリート床版をブロック施工する。これにより施工の合理化を図っている。この手順を、七橋を例に図-3に示す。

- ① 張出し施工完了
 - ② 移動作業車の前方作業エリアを利用して、閉合区間の波形鋼板の連結を行う。
 - ③ 移動作業車を用いて閉合区間をブロックごとに上下コンクリート床版の施工を行う。
 - ④ 閉合区間の施工終了後、移動作業車を解体する。
- 七橋と六橋の適用箇所を図-4、5に示す。

4.2 波形鋼板先行架設部の設計

閉合区間の波形鋼板で構成された断面剛性は周辺のコクリート断面の剛性に比べ相対的に小さいため、全体的な橋体の挙動が不明なことや接合部付近の波形鋼板や上下コンクリートの局所的な応力の集中が懸念された。

この閉合区間の設計は、2段階に分けて行なった。初めに波形鋼板の剛性を評価したフレームモデルにより全体的な挙動や断面力の照査を把握し、次に閉合区間付近をシェルとソリッドでモデル化した3次元弾性FEM解析により局所応力などを把握した。

(1) フレーム計算での検討

1) 検討手法

波形鋼板の軸剛性は、アコーディオン効果による軸力の低減からウェブ部分を評価せずフランジ部のみ評価した。波形鋼板の曲げ剛性は、ウェブ部も考慮した全断面の剛性とした。

フレーム計算は施工手順を考慮し、各施工ステップの累積値でコンクリート部および波形鋼板部の応力を検討した。フレームモデルでの主な検討項目を以下に示す。

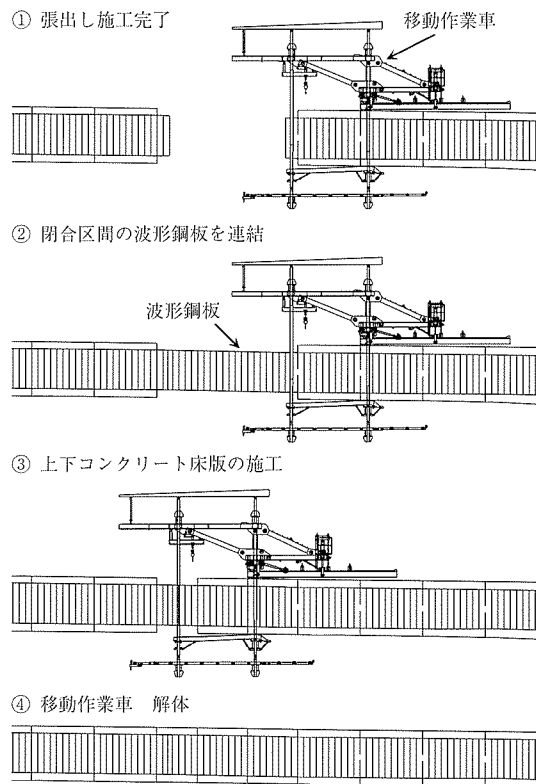


図-3 波形鋼板先行架設 施工手順

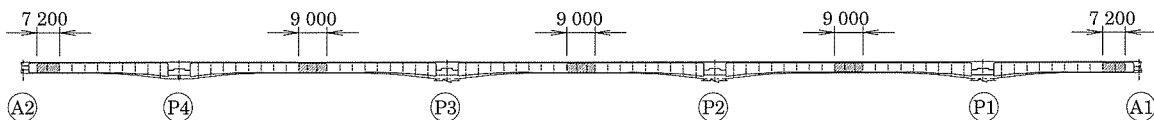


図-4 信楽第七橋 波形鋼板先行架設 適用箇所

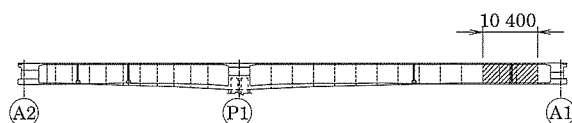


図-5 信楽第六橋 波形鋼板先行架設 適用箇所

- ① 波形鋼板およびコンクリート応力の照査
- ② 波形鋼板とコンクリートの結合部の検討
- ③ 波形鋼板連結部の検討
- ④ 残留応力度の影響

2) 検討結果

六橋の側径間閉合区間を例にとり検討結果を以下に示す。

① 波形鋼板およびコンクリート応力の照査

波形鋼板上下フランジの厚さは張出し施工区間で標準 16 mm となるが、閉合区間は施工時の応力度からフランジの

厚さを厚くした（上フランジ 19 mm，下フランジ 20 mm）。コンクリート床版部は許容応力度以下となった。

各施工ステップの波形鋼板およびコンクリート床版の応力度を図-6 に示す。

② 波形鋼板とコンクリートの結合部の検討

①の波形鋼板の応力度よりフランジ部に大きな引張力および圧縮力が作用する。この断面力に対し波形鋼板とコンクリートの結合部を検討した。フランジ部の断面力に対してはアングルジベルで抵抗するものとした。また、その影

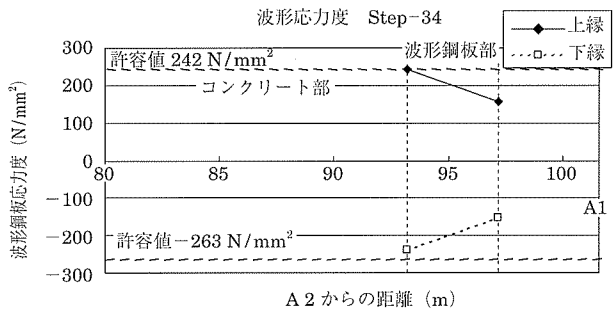
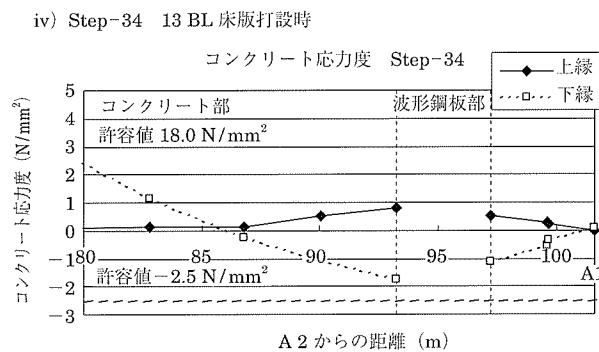
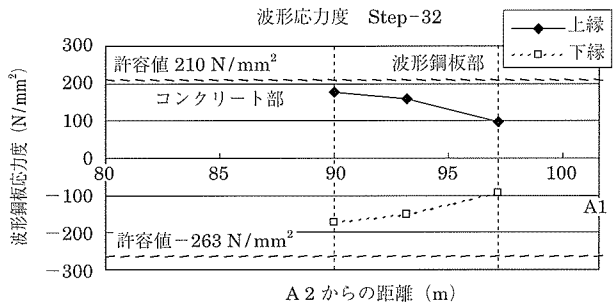
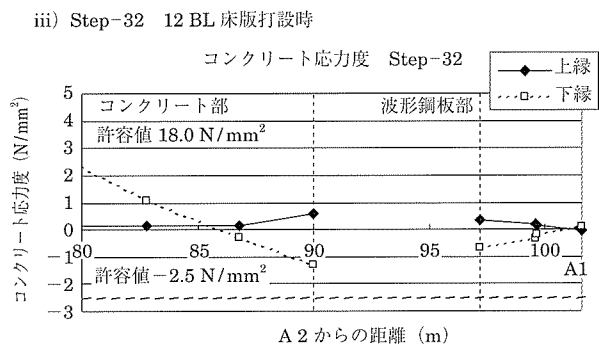
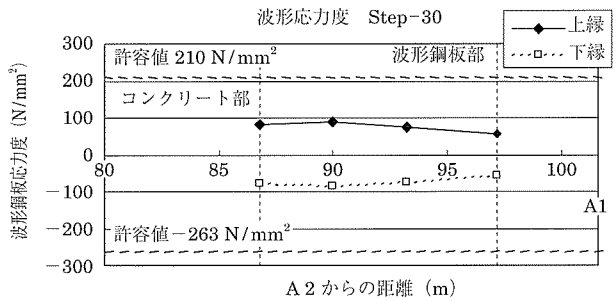
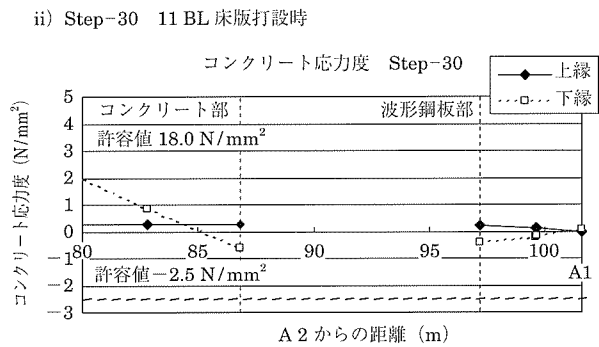
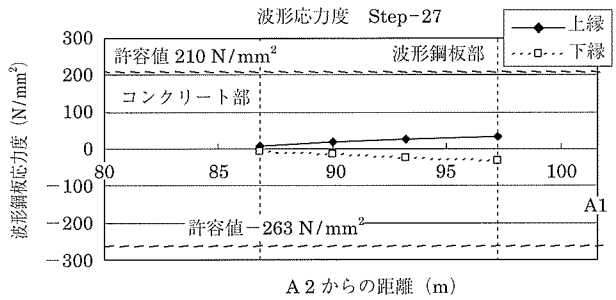
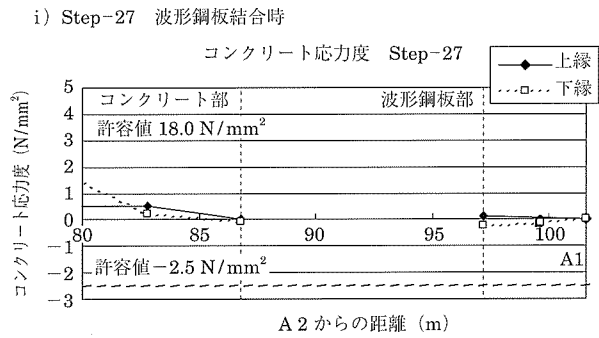


図-6 各施工 Step でのコンクリートと波形鋼板応力度

響範囲はFEM解析の結果(図-15)よりコンクリートと波形鋼板との結合部から1m程度と仮定し、アングルジベルの補強範囲を定めた。

③ 波形鋼板連結部の検討

閉合区間の波形鋼板は1枚で構成されており、閉合区間の連結位置は両側端部の2箇所となる。連結はコンクリート断面から半波長(800mm)突出した位置とした。

通常の波形鋼板ではアコーディオン効果を期待しているためウェブ部は重ね継手で結合するがフランジ部は結合していない。本工法では波形鋼板を鋼1桁断面の架設部材として利用するため、波形鋼板が施工時の曲げモーメントに対して抵抗する。このためフランジ部の構造が重要となる。波形の連結方法は、施工時の曲げ耐力を確保するため、HTBによるボルト結合を採用した(図-7、写真-2)。また、ボルト結合するためのスペースを確保するために、連結部付近のアングルジベルにU字筋を溶接して耐力を向上させることで間隔を広げた。アングルジベルにU字筋を溶接すると疲労耐久性が低下することが報告されているため、対策としてアングルジベルの板厚を厚くした。

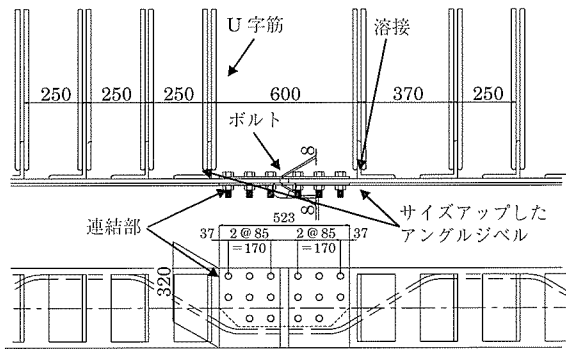


図-7 波形鋼板先行架設 連結部の構造

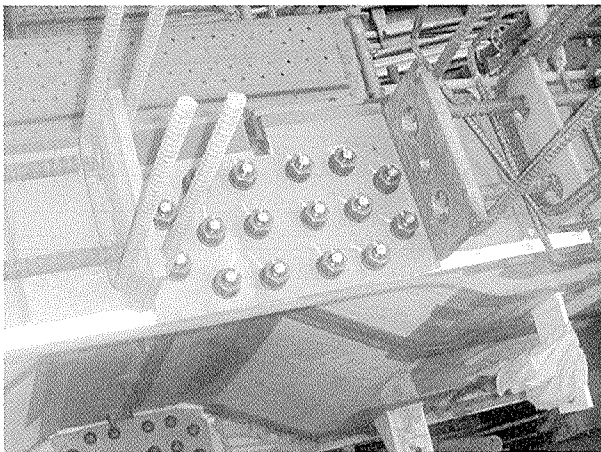


写真-2 波形鋼板先行架設 連結部

④ 残留応力度の影響

閉合区間の上下コンクリート床版施工終了までに生じた累計の曲げ応力は波形鋼板に残留するものとし、供用後のせん断力との合成応力度を検討した。検討の結果、波形鋼板先行架設の架設位置はスパン中央部や端支点部のせん断

力が比較的小さい箇所であるため、施工時の曲げ応力度と供用時のせん断応力度を合成しても許容応力度内であった。

(2) 3次元FEM解析での検討

1) 検討手法

上述のようにフレーム計算を用いて2次元的な挙動の安全性を検証した。しかし本橋の断面構成が斜めウェブのため横方向に動く局所的な挙動が懸念され、さらに波形鋼板ウェブ橋は波形鋼板とコンクリートの複合構造物であることから、コンクリートと鋼部材の接合部や鋼部材に局所に応力の集中がおこる可能性もあり3次元FEM解析による安全性の確認を実施した。

今回の解析対象は施工時となるため、コンクリートおよび波形鋼板は弾性範囲内にとどめるものとし弾性FEM解析で検討した。モデルは、閉合区間付近のコンクリートをソリッド要素、波形鋼板をシェル要素とし、その他の断面をフレーム要素とした。フレーム計算の妥当性の検証も併せて行うため、解析着目点である閉合部付近のソリッド要素にフレーム要素を組み合わせ、橋梁全体をモデル化した。境界条件、フレーム部の剛性等はフレーム計算モデルと同じとした。

六橋のFEM解析モデルを図-8に示す。

実際の荷重を再現するため荷重は、打設時のコンクリート自重が移動作業車を介して主桁に伝達されることから移動作業車の反力をモデルに荷重した。

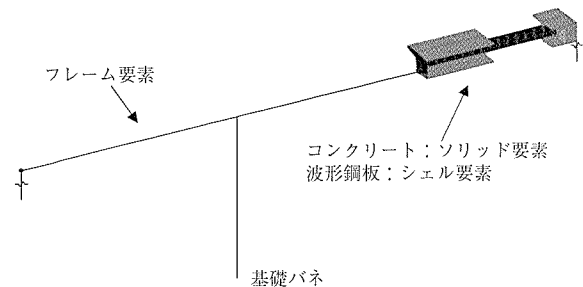


図-8 FEM解析モデル

2) 解析結果

六橋の側径間閉合区間を例にとり検討結果を以下に示す。

① 変形図

変形図を図-9、10に示す。

鉛直方向の最大たわみ量のFEM解析値とフレーム計算の結果が30%程度異なっているが、これはフレーム計算では節点の変位量しか出力されないため、FEM解析値の最大値位置とポイントがずれたためと考えられる。

横方向の変位量は最大で0.6mmと小さく、さらに施工

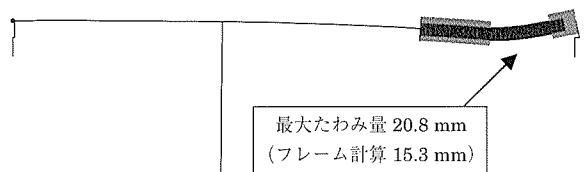


図-9 鉛直方向変形図

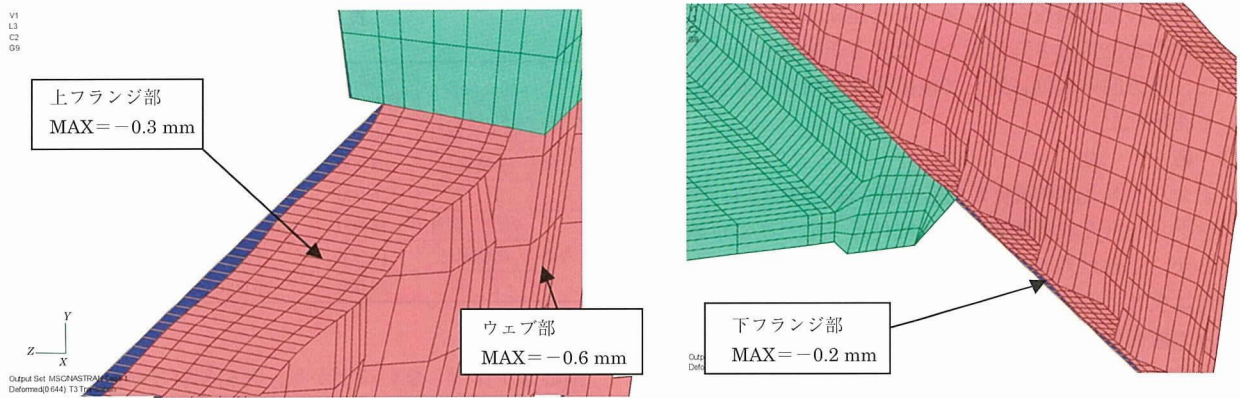


図 - 10 水平方向変形図

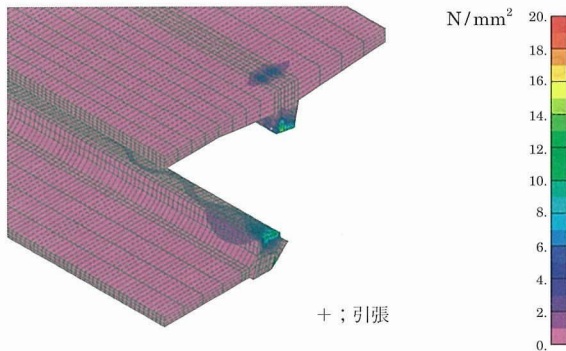


図 - 11 コンクリート主応力図

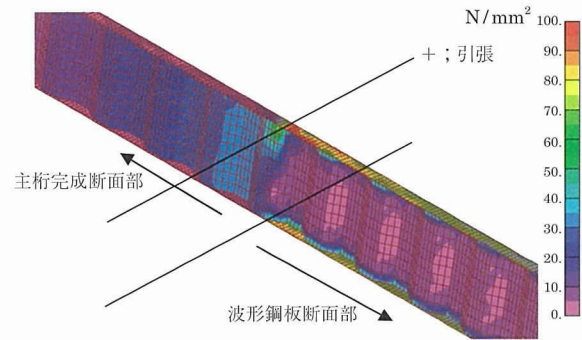


図 - 12 波形鋼板主応力図

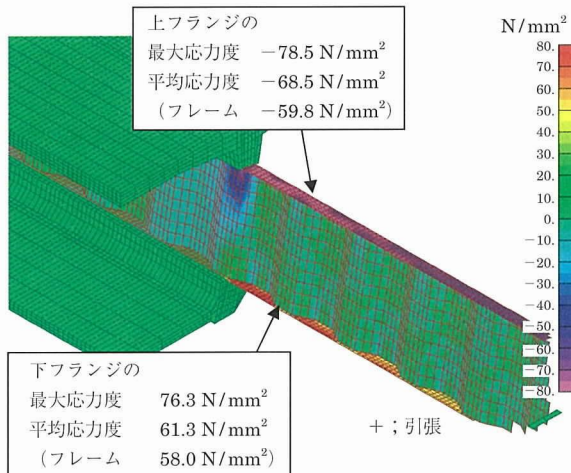


図 - 13 波形鋼板 橋軸方向応力図

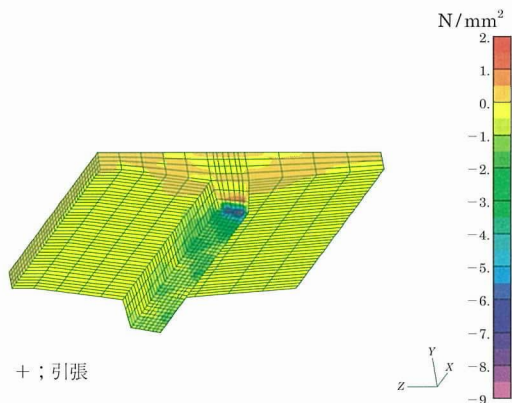


図 - 14 上床版コンクリート橋軸方向応力図

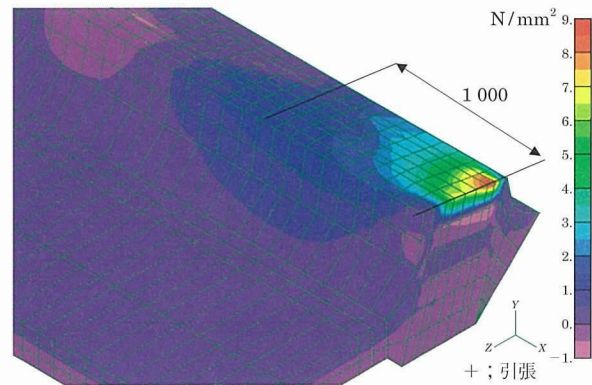
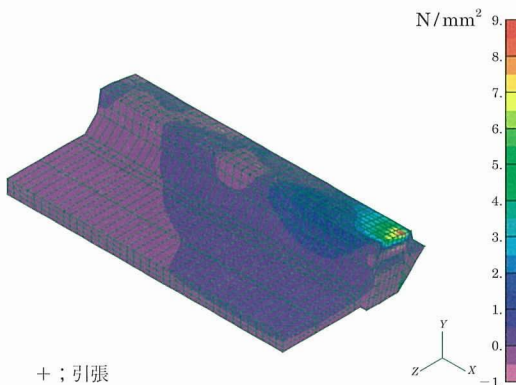


図 - 15 下床版コンクリート橋軸方向応力図

時には左右の波形鋼板をプレスにより連結するため、実際の横方向の変位量はさらに少なくなると予想される。したがって、横方向の変位に対して波形鋼板を補強する必要はないと判断した。

② 応 力

コンクリートと波形鋼板の主応力図を図 - 11, 12 に示す。

コンクリートと波形鋼板の接合部付近で応力度が卓越しているが、それ以外の主桁完成断面部では、とくに過大な応力度は生じておらず影響は限定的であった。また波形鋼板のみの断面ではフランジ部に応力が集中しているがウェブ部桁中央部の応力度レベルは低く、完成時にせん断力に主に抵抗する部分に対して施工時の影響は小さいことが分かった。

波形鋼板の応力度を図 - 13 に示す。コンクリートと波形鋼板の結合付近の応力度はフレーム計算の値と多少差が生じたが、接合部付近のコンクリート床版が波形鋼板を拘束したためと考えられる。

橋軸方向のコンクリート応力度を図 - 14, 15 に示す。

波形鋼板部の曲げによる引張力の影響を受け、コンクリート部に局所的に高い応力度が生じている。この下フランジとコンクリート接合に生じる局所応力に対し抵抗できるアングルジベルの配置を検討し、コンクリート内部に過度なひび割れが生じないように補強鉄筋量を配置した。

5. 波形鋼板先行架設工法の評価

波形鋼板先行架設工法と従来の施工方法の鋼材配置を図 - 16, 数量比較を表 - 2 に示す。従来の施工方法とくらべ、波形鋼板先行架設部を施工するため柱頭部でのアンバランスモーメントが大きくなり柱頭部での必要張出し鋼材量は増加した。しかし、連結後に移動作業車を解体するため下縁に圧縮応力が作用すること、中央径間上で張出し鋼材の必要ない区間を長くできるため張出し鋼材による下縁の引

表 - 2 数量比較

(単位; kg)

		従来の架設工法	波形鋼板先行架設工法	増減
七橋	張出し鋼材	60 800	65 100	4 300 (7.1 %)
	連結鋼材	65 200	47 500	- 17 700 (- 27.1 %)
	合計	126 000	112 600	- 13 400 (- 10.6 %)
六橋	張出し鋼材	18 800	19 000	200 (1.1 %)
	連結鋼材	10 200	7 600	- 2 600 (- 25.5 %)
	合計	29 000	26 600	- 2 400 (- 8.3 %)

張応力が作用しないことから、連結鋼材量が低減可能となり、全体で 10 % 程度鋼材量を低減することができた。

工期も吊り支保工の組立て・解体作業がなくなり 20 日程度の短縮効果があった。

6. 施 工

6.1 施工概要

本工事は、2005 年 7 月に七橋の柱頭部施工を、2006 年 1 月より張出し施工を開始した。2006 年 5 月に A1 - P1 間において最初の波形鋼板先行架設工法を実施した。2006 年 11 月には、最長の波形鋼板先行架設区間である六橋 P1 - A1 間の施工を開始した。2007 年 1 月に六橋の本体工事が完成し、2007 年 5 月の工期に向けて橋面工、付属物工などの施工を行っている。

6.2 波形鋼板先行架設工法

波形鋼板先行架設工法の施工状況を写真 - 3 ~ 5 に示す。

波形鋼板先行架設工法の施工は通常の張出し部の施工完了した後に、閉合部に波形を先行架設するものである。このため、波形を接合するため、移動作業車前面足場の解体などの手間が生じるが、吊り支保工などの設置・撤去作業がなくなるため、安全かつ工期を短縮して施工することが可能であった。また、工程は主鋼材の組立て・緊張・グラ

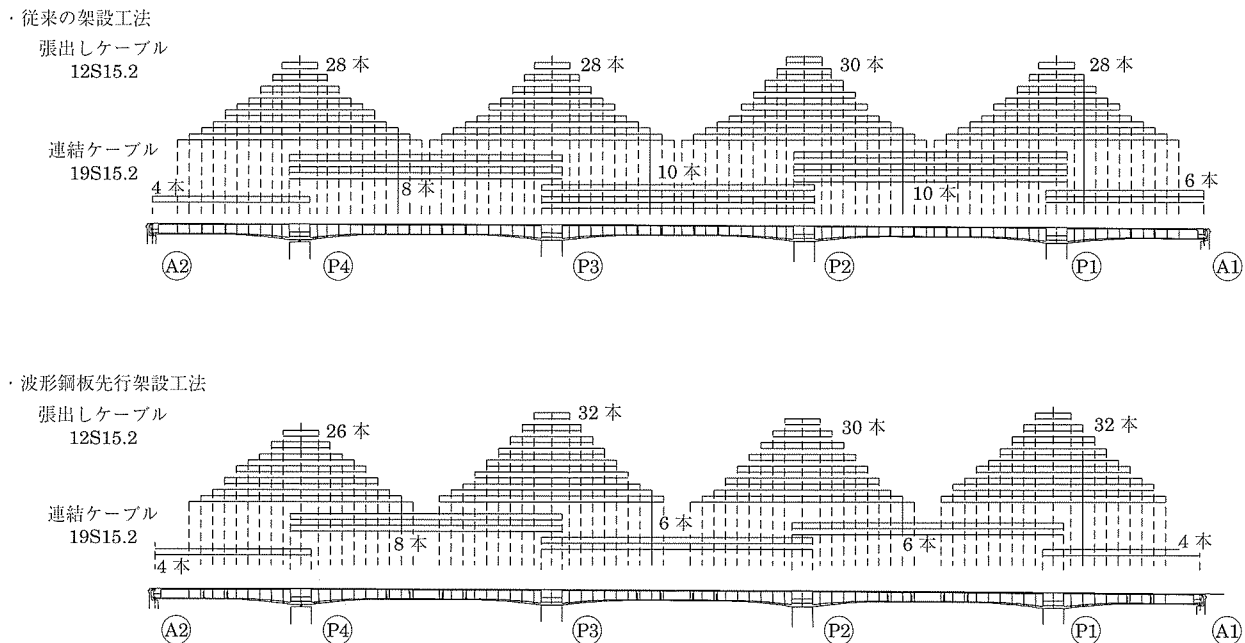


図 - 16 鋼材配置の比較



写真 - 3 波形鋼板先行架設施工状況（六橋側径間）

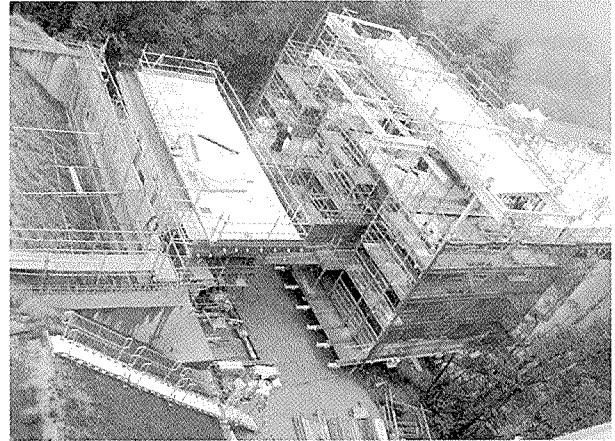


写真 - 5 波形鋼板先行架設施工状況（七橋側径間）



写真 - 4 波形鋼板先行架設施工状況（七橋中央閉合部）

ウト作業および波形鋼板の現場溶接作業がなくなるなど、通常の移動作業車での施工サイクルより3日程度短縮することができた。

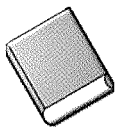
閉合ブロック長は最大10.4mであったが、これは吊り支保工では施工が困難と思われる長さであり、波形鋼板先行架設方式でのメリットを発揮できた。

7. おわりに

六橋、七橋（下り線）において、波形鋼板を先行架設して側径間および中央径間を閉合し、コンクリート床板の打設荷重を波形鋼板で負担させる工法を採用した。本工法の採用により、閉合部区間を長くすることで工期の短縮と鋼材量の低減が可能となった。また、閉合部区間を移動作業車で施工するため、安全確実な施工が可能となった。

本報告が同種の橋梁の設計・施工の一助になれば幸いである。

【2007年3月30日受付】



新刊図書案内

PC技術規準シリーズ

複合橋設計施工規準

頒布価格：会員特価 6,000 円（送料 500 円）

：非会員価格 6,825 円（送料 500 円）

社団法人 プレストレストコンクリート技術協会 編
技報堂出版