

白沢橋 (曲線を有する波形鋼板ウェブPC箱桁橋) の設計・施工

長野県 大町建設事務所 建設課
 (株)長野技研
 ドービー建設工業(株)東京支店 正会員
 ドービー建設工業(株)東京支店 正会員

手塚 雄保
 小林雄二郎
 山田 和男
 藤田 貴敏

1. はじめに

白沢橋は、長野県大町市街から立山連峰を貫いて富山県立山町を結ぶ通称「立山黒部アルペンルート」の一部となる主要地方道扇沢大町線を横断する一級河川「白沢川」に架かる橋梁である(写真-1)。今回、道路防災対策上架替が必要となった本橋梁は、施工実績の少ない平面線形 R=250m を有する波形鋼板ウェブPC単純箱桁橋で施工を行なうこととなった(図-1)。曲線橋の技術的課題として、波形鋼板ウェブPC箱桁断面が、曲線の影響によりどのように断面変形するか知見が少ないため、構造全体の挙動を十分に把握する必要があった。そのため、事前解析として、実橋を忠実に再現した立体FEM解析を行い、既往の設計式が妥当であるかの確認を行なうとともに、実橋に対して載荷試験を実施した。また、波形鋼板ウェブと床版コンクリートの接合方法として、上床版に対してはスタッドジベル接合、下床版についてはパーフォンドリブ接合を採用した。一方、本橋の施工にあたっては、支柱式支保工により架設するため、渇水期に行う必要があり、また積雪により冬季閉鎖となるため、急速施工が必要とされた。

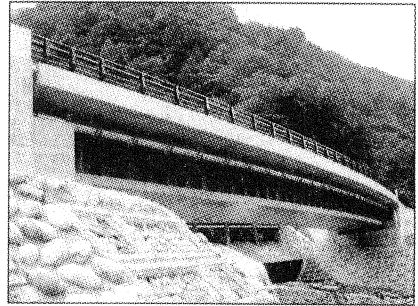


写真-1 全景

本論文では、設計に対する技術的検討、施工を行った結果を報告する。

2. 橋梁概要

橋 長	51.600 m	コンクリート	$\sigma_{ck} = 40 \text{ N/mm}^2$
支 間	50.000 m	波形鋼板	SMA490W
有効幅員	8.000 m	外ケーブル	SWPR7B 19S12.7
活 荷 重	B活荷重	内ケーブル	SWPR7B 12S15.2
架設工法	支柱式支保工	鉄 筋	SD295A
工 期	平成 12 年 6 月 15 日 ～平成 13 年 7 月 20 日		

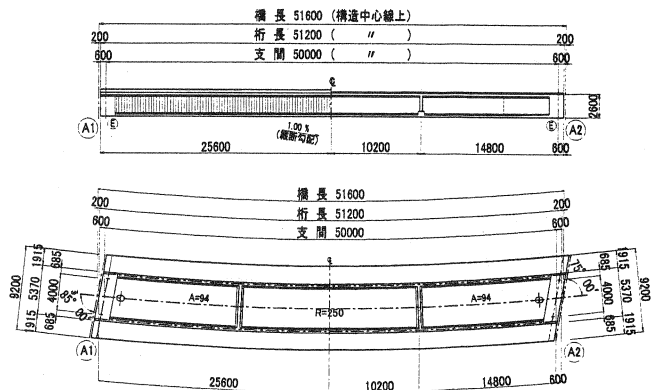
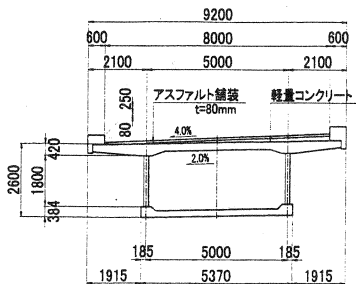


図-1 一般図

3. 設計及び実橋荷試験

1) 設計概要

波形鋼板ウェブPC箱桁橋の断面は、上下のコンクリート床版と波形鋼板ウェブから構成される。既往の設計基準として、曲げ特性は、波形鋼板が工学的に抵抗しないと考え、上下のコンクリート床版のみで抵抗する曲げ部材として平面保持の仮定に基づく通常の梁理論で評価している。また、せん断特性は、波形鋼板が全て受け持つと考え、ねじり特性は、図-2に示すねじり抵抗断面に対し、道路橋示方書に準じた純ねじり挙動を基本とした波形鋼板のねじりせん断挙動を考慮できる(1)式で評価し、ねじりせん断応力度は(2)式を用いて算出しており、以下の様に、FEM解析を用いて技術的検討を行った。

$$J_t = \frac{4A_m^2}{n_s t_1 (1+\alpha) + t_2 (1-\alpha) + n_s t_3 (1+\alpha) + t_4 (1-\alpha)} \dots (1)$$

$$\tau_{ts} = \frac{M_t}{2A_m t (1+\alpha)} \dots (2)$$

$$\tau_{tc} = \frac{M_t}{2A_m t (1-\alpha)}$$

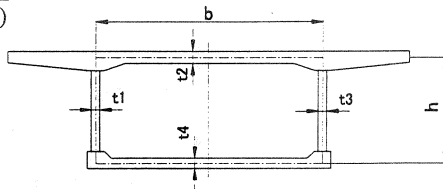


図-2 ねじり抵抗断面

- ここに、
- J_t : ねじり定数
 - A_m : 上下床版の床版中心高さとの波形鋼板の中心で囲まれた面積 (= $b \cdot h$)
 - b : 波形鋼板の中心間隔
 - h : コンクリート床版中心高
 - t_1, t_3 : 波形鋼板ウェブ厚
 - t_2, t_4 : 上下コンクリート床版厚
 - n_s : せん断弾性係数比 (G_s / G_c)
 - G_c : コンクリートのせん断弾性係数
 - G_s : 波形鋼板のせん断弾性係数
 - α : 修正係数 (= $0.4 \cdot h / b - 0.06 \geq 0$)
 - τ_{ts} : 波形鋼板ウェブのねじりせん断応力度
 - τ_{tc} : コンクリート床版のねじりせん断応力度
 - M_t : ねじりモーメント

2) ねじり特性の検討

曲線橋に対する波形鋼板ウェブPC箱桁構造のねじり特性に関して、評価式による設計値と立体FEM解析による値を比較し、力学的検証を行った。図-3に示す立体FEM解析モデルは、上下の床版コンクリートをソリッド要素、波形鋼板ウェブをシェル要素から構成し、 $R=250m$ の曲線橋を再現した。FEM解析によるねじり角は、斜角の影響の少ない支間中央付近に着目すると、支間方向に様な直線的な分布であり、純ねじり挙動を示している(図-4)。せん断力の影響の小さい支間中央の主桁自重に関して、設計値とFEM解析値のねじりせん断応力度分布を図-5に示す。両値はよく一致するとともに、FEM解析におけるねじりせん断応力度を積分して求めたねじりモーメントとねじり角から算出したねじり定数が、設計値と近似な値となり、(1)、(2)式は、本橋梁の構造全体に対して適用性があることが確認できた。更に、実橋に対して荷重試験を実施し、事前のFEM解析による値と実測値の比較を行った。

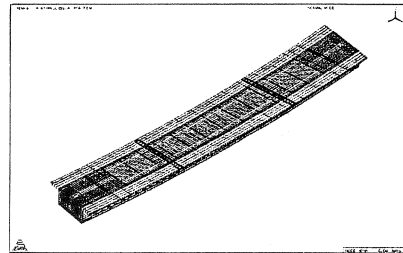


図-3 FEM解析モデル

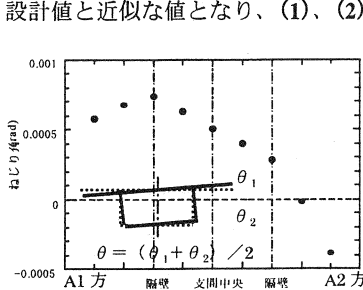


図-4 ねじり角

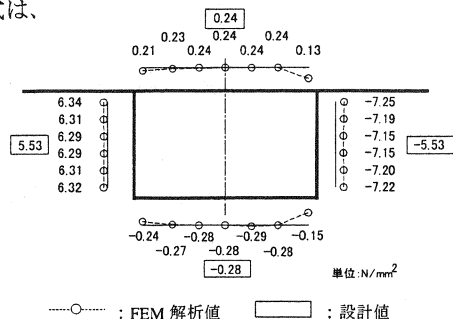


図-5 ねじりせん断応力度の分布

3) 実載荷試験

(1) 試験概要

試験は、トラック4台 (1台あたり約20t) を用い、曲げモーメントに着目した支間中央に静載荷する曲げ載荷試験と、ねじりモーメントに着目した支間中央の外周側に静載荷するねじり載荷試験を各2回ずつ実施した (写真-2)。ひずみゲージは、図-7の①~⑦断面に対して波形鋼板ウェブの両面について、図-6に示す12箇所に設置した。

(2) ねじりせん断応力度

ねじり載荷試験における波形鋼板ウェブ図心に対するねじりせん断応力度の実測値とFEM解析値の比較を図-8に示す。

実測値とFEM解析値は、⑤断面の2回目の実測値を除き、全ての断面に対して極めて近似な値であり、支間方向に一致したねじり挙動を示している。

支間中央付近のねじりせん断応力度は、せん断成分が小さいため、僅かな発生であり、外周側の波形鋼板ウェブの支点付近においては、斜角の影響も受け、せん断成分にねじり成分が付加されるため、卓越している。



写真-2 ねじり載荷状況

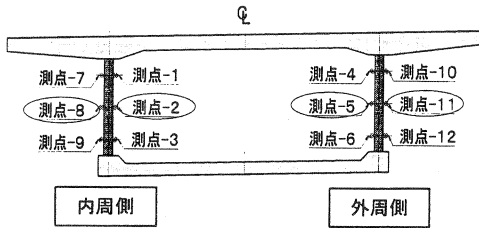


図-6 ゲージ取り付け位置図

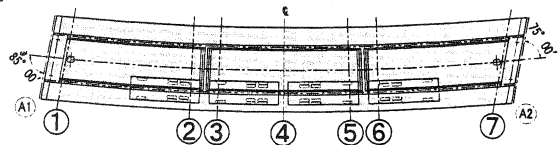


図-7 ねじり載荷位置図

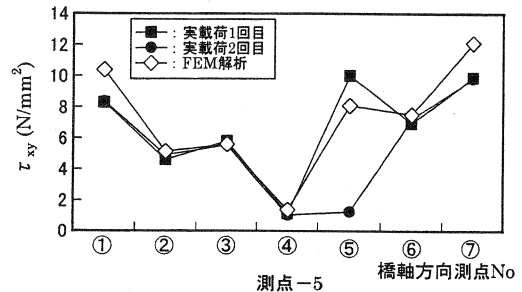
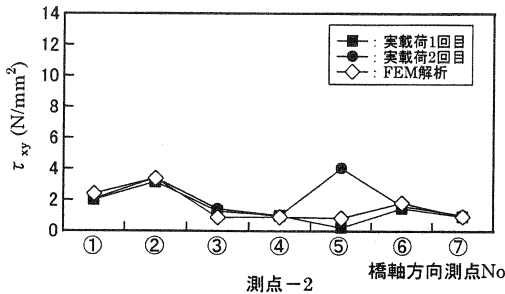
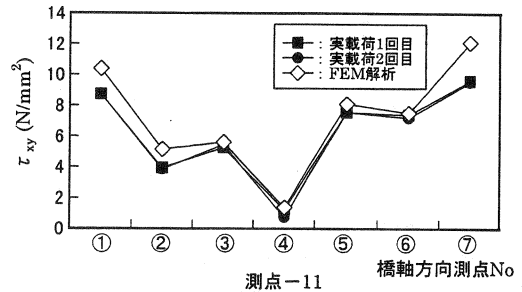
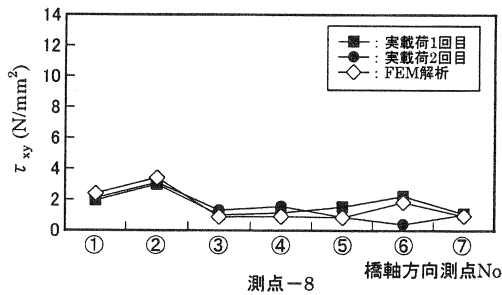


図-8 波形鋼板ウェブのせん断応力度

(3) まとめ

曲げ荷重及びねじり荷重試験における上下床版コンクリートの橋軸方向応力度に関して、実測値とFEM解析値はほぼ一致した結果が得られ、波形鋼板ウェブに対する橋軸方向応力度は、ほとんど発生していなかった。更に、ねじりモーメントに着目したねじり荷重試験における波形鋼板ウェブのせん断応力度に関する実測値とFEM解析値が一致し、一様な挙動を示したことにより、本橋梁全体の力学的特性が確認され、既往の設計式が妥当であることが確認できた。

4) パーフォボンドリブの設計

波形鋼板ウェブと上下床版コンクリートの接合方法は、上床版は一般的なスタッドジベル接合を使用し、下床版は、接合面における下打ちコンクリート打設により発生するブリージングの影響を考慮して、図-9に示すパーフォボンドリブ接合を採用した。パーフォボンドリブの孔に鉄筋を貫通させたパーフォボンドリブ接合は、その孔に形成されるコンクリートジベルのために、鉄筋の拘束効果によるせん断耐力の増加も期待され、じん性の向上も図れる。パーフォボンドリブ接合のせん断耐力の算出にあたり、新谷らの提案式(3)、(4)を使用した⁴⁾。

$$Q = 1.571 \phi^2 \{-0.818 \cdot (\phi/\phi(40)) + 2.691\} \sigma_c \quad \dots\dots (3)$$

$$\Delta Q = 1.571 \phi^2 \{12.966 p - 0.312\} \sigma_c \quad \dots\dots (4)$$

ここで、

Q: パーフォボンドリブ1孔あたりのせん断耐力

ΔQ: 貫通鉄筋によるせん断耐力増加量

φ(40): 孔径 40mm

φ: 孔径 (mm)

p: 貫通鉄筋比 (p ≥ 0.06)

σ_c: コンクリートの圧縮強度

よって、パーフォボンドリブの貫通鉄筋を考慮したコンクリートジベル1孔あたりのせん断耐力はQ + ΔQとなる。

ここに、パーフォボンドリブの主な特徴を挙げる。

- ・ 下床版の下打ちコンクリート打設のためフランジプレート下面に発生するブリージングに対して、耐力低下の影響を受けない接合方法である。
- ・ パーフォボンドリブの孔に形成されるコンクリートジベルは、2面のせん断面を有するジベルとしてせん断力に抵抗する。
- ・ 孔径が大きいため、コンクリートと骨材の材料分離が発生しない。
- ・ せん断破壊機構に優れ、耐疲労に対して優れた構造である。

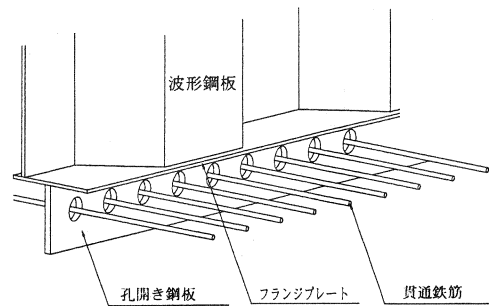


図-9 パーフォボンドリブ概略図

4. 施工について

1) 施工工程 (主桁製作)

表-1に示すとおり支柱式支保工による主桁製作は、雪どけの終わる渇水期から積雪によりアルペンルートが通行止めになるまでの極めて短い期間であった。PC箱桁橋においてウェブに波形鋼板を用いたことは、短い施工期間で施工するために極めて有効であった。

表-1 工程表 (主桁製作)

	9月	10月	11月	12月
支保工	■			
支承工		■		
主桁製作工 (下床版)		■		
波形鋼板工		■		
主桁製作工 (上床版)			■	
地覆工				■
支保工解体				■

2) 波形鋼板製作

波形鋼板の形状を図-10に示す。波形鋼板の波高は、ウェブの横剛性に対する配慮から170mmとし、1波長は、軸方向パネル幅と斜方向パネル幅を等しくした上で1250mmとした。1枚の波形鋼板長さは、波形鋼板の運搬・架設性能及び曲線橋に対する波形鋼板摺付けに対する配慮から5000mm(4波長分)とした。波形鋼板の波付は、写真-3に示すとおり、1角ずつのプレスにより折り曲げて製作した。波付け加工後に上下のフランジプレートを溶接し、上床版にスタッドジベルを溶植、下床版にパーフォボンドリブを溶接した。更に、波形鋼板どうしの接合に用いるフランジプレートを波形鋼板端部の内側に溶接した。

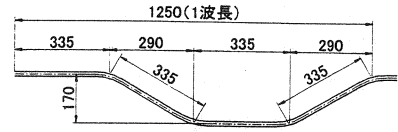


図-10 波形形状

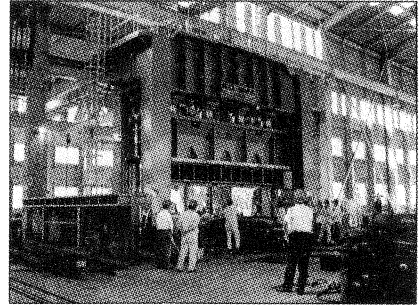


写真-3 波形鋼板の製作状況

3) 波形鋼板架設

波形鋼板の架設は、写真-4に示すとおり、下床版の仮鉄筋組立の後、A1橋台からA2橋台に向かって、クレーンにより架設した。波形鋼板ウェブの仮固定用にビティ杵をその脇に組み立て、1ラインの波形鋼板ウェブを順に架設し、架設完了後、波形鋼板ウェブ間に架設用対傾構を用いて固定した。更に、高力ボルトを用いて、波形鋼板ウェブの橋軸方向に対する接合を行った。高力ボルトは、トルシア形高力ボルトを用い、全箇所1次締め後、本締めを行った(写真-5)。なお、架設用対傾構は下床版コンクリート打設完了後速やかに取り外した。

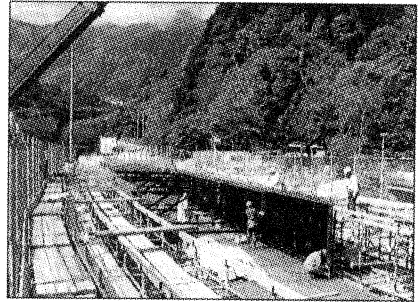


写真-4 波形鋼板の架設状況

4) パーフォボンドリブの施工

波形鋼板ウェブと下床版コンクリートの接合にパーフォボンドリブ接合を用いたことにあり、波形鋼板ウェブの架設完了後に孔中に貫通鉄筋を挿入して、下床版鉄筋組立は完了した(写真-6)。パーフォボンドリブ接合部において、波形鋼板ウェブのフランジプレートと型枠との隙間が狭く、十分なコンクリート打設口が確保できないため、下床版コンクリートに対して、入念な締め固めを行いながら打設を行った。

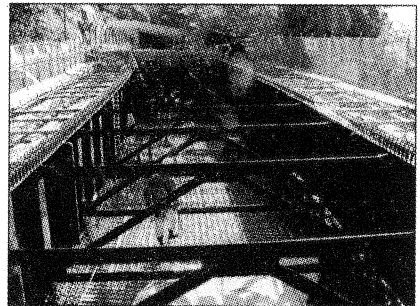


写真-5 波形鋼板の架設完了状況

5) 防錆対策

通常の橋梁完成後の箱桁内部は、外気に対して密閉状態ではなく、かつ風通しが悪いため、結露して湿潤状態になりやすく、錆が安定化しにくいいため、鋼板が腐食する可能性がある。本橋の波形鋼板の材質は、今後の維持管理への配慮から耐候性鋼板を使用しており、数年後の安定錆が生成されるまでの初期の錆に対しての方策が必要であった。

そのため、波形鋼板の箱桁内側は防錆塗装を行い、図-11に示すとおり、結露水を箱桁に残さない処理として、波形鋼板フランジプレートの脇に水切り板(SUS304)を設置して結露水を誘導し、更に、箱桁の外に結露水を排出するため、下

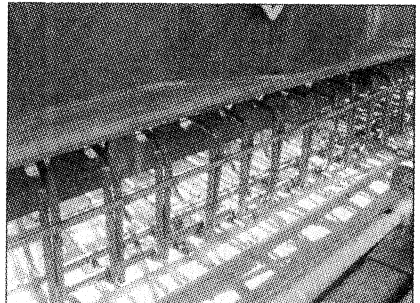


写真-6 パーフォボンドリブ施工状況

床版に水抜きパイプを 5mピッチに設置した。一方、波形鋼板の外側にも水切り板 (SUS304) を設置することで、波形鋼板の初期錆が下床版コンクリート側面を汚さないように景観的な配慮を行った。

5. まとめ

本設計・施工ならびに実載荷実験で得られた結果について以下にまとめる。

- 1) 実載荷試験を行った結果、解析値と実測値が一致し、支間方向に一様な挙動・変形を示したことにより、既往の設計基準が妥当であることが実証できた。それにより、波形鋼板ウェブPC箱桁構造が、曲線橋に対して有効であることを僅かながら確認できた。
- 2) ねじりせん断応力度は外周側の波形鋼板ウェブの支点付近において卓越した値を示したが、これは本橋梁が斜角を有しており、その影響により生じるねじり成分が更に付加されたものと考えられる。
- 3) パーフォボンドリブは孔開き鋼板に充填されたコンクリートジベルによりせん断力に抵抗するため、ブリージングにより耐力低下を受けにくい。そのため、下床版とフランジプレート付き波形鋼板ウェブの接合に適した接合方式の1つであると考えられる。
- 4) 本橋の施工時に、パーフォボンドリブ接合部においてフランジプレートと型枠の隙間を十分に確保できなかったため、下床版コンクリート打設時の施工性は低下した。そのため、主桁自重の増加は懸念されるが、フランジプレートと型枠に十分な隙間があることが望ましい。
- 5) 波形鋼板ウェブはコンクリートウェブと比べ主桁自重を軽減させることができ、架設も比較的容易なことから、通常のPC箱桁橋と比べ、施工の省力化と工期の短縮が可能である。

今後、上部工構造に対するコストの縮減・工期短縮等の要望が強まると思われる。波形鋼板ウェブPC箱桁橋がこれらの要望に見合う橋梁形式の一つであるとして提案するとともに、本橋梁の設計・施工報告が今後の参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 波形鋼板ウェブ合成構造研究会：波形鋼板ウェブPC橋計画マニュアル (案)、pp.30～39、1998
- 2) 上平謙二、立神久雄、本田秀行、園田恵一郎：波形鋼板を有するPC箱桁橋のせん断およびねじり特性に関する研究、プレストレストコンクリート、Vol40、No.3、1998
- 3) 上平謙二、新谷英司、蛭名貴之、園田恵一郎：波形鋼板ウェブPC箱桁橋のねじり挙動と隔壁間隔の関係について、プレストレストコンクリート、Vol41、No.1、pp.38～42、1999
- 4) 新谷英司、蛭名貴之、上平謙二、柳下文夫：波形鋼板コンクリート床版の結合方法に関する実験的研究、第9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.91～96、1999
- 5) 蛭名貴之、高橋恵悟、上平謙二、柳下文夫：パーフォボンドリブのせん断耐力に関する基礎的研究、第8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.31～36、1998
- 6) 手塚雄保、小林雄二郎、山田和男、藤田貴敏：曲線を有する波形鋼板ウェブPC箱桁橋の構造特性について、第10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.849～854、2000

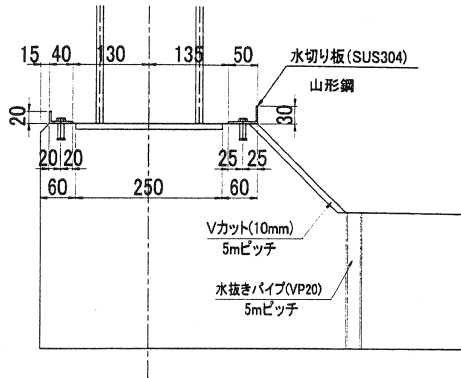


図-11 結露水の誘導