

松の木7号橋（銀山御幸橋）の設計と施工

石黒 亙*1・村田 嘉宏*2・須合 孝雄*3

1. まえがき

一般国道108号は、宮城県石巻市を起点、秋田県本荘市を終点とし、東北地方の太平洋側と日本海側を結ぶ総延長196kmの主要な路線である(図-1)。この間、県境の鬼首峠や秋田県内の雄勝～由利郡境の松の木峠等急峻な山間部の隘路が多く、さらに豪雪地帯であることもあって、大型車の交互通行や冬期交通が不能となり、交通上の大きな障害になっている。このため、これら峠部では通年の円滑な交通確保を目的に、平成8年供用を目指して大規模な道路改良工事を行っている。

松の木7号橋は、このうち、秋田県が道路改良工事を行っている通称「松の木道路」(S49～H8)に建設された山岳橋梁であり、厳しい地形や気象に制約を受ける施工条件をクリアするために、PCと鋼の合成構造を採用し、斜吊り押し架設を行う等特徴ある計画、設計、施工を実施したので、その概要を報告する。

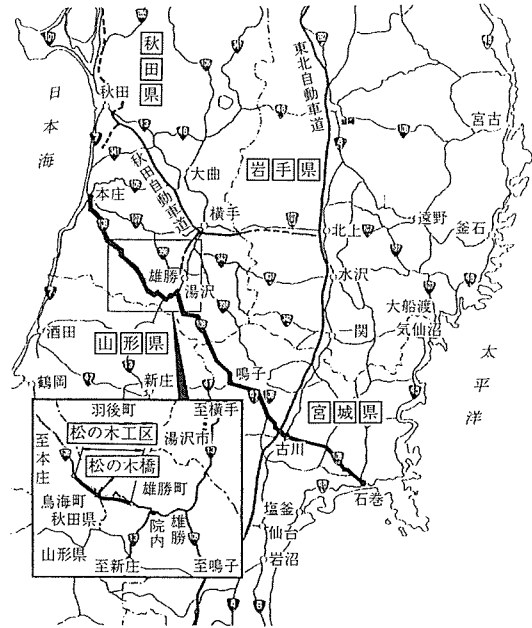


図-1 位置図



写真-1 松の木7号橋全景

*1 Wataru ISHIGURO : 秋田県 土木部道路建設課

*2 Yoshihiro MURATA : ドーピー建設工業(株) 東北支店

*3 Takao SUGOH : ドーピー建設工業(株) 東北支店

2. 橋梁概要

2.1 橋梁概要

工事名称：国道橋梁整備事業，路線名：国道108号

橋名：松の木7号橋（銀山御幸橋）

工事場所：秋田県雄勝郡雄勝町松の木地内

工期：平成4年～平成7年

発注者：秋田県

道路規格：3種4級

橋長・幅員： $L=210\text{ m}$ ， $W=6.0\text{ m}$ (8.5 m)

支間割： $27.4\text{ m}+3@45.5\text{ m}+44.9\text{ m}$

構造形式：上部工 波形鋼板ウェブPC箱桁

下部工 逆T式橋台，壁式橋脚

設計荷重：TL-20，雪荷重： 100 kgf/cm^2

縦断勾配： $I=6.0\%$

平面線形： $R=\infty$

2.2 主要材料仕様

主桁コンクリート： $\sigma_{ck}=400\text{ kgf/cm}^2$

波形鋼板（ウェブ）：SMA 490 AW

一次鋼材（内ケーブル）：PC 鋼棒 $\phi 32$ SBPR 930/1080

二次鋼材（外ケーブル）：PC 鋼より線 9S 15.2 SW-PR 7 BN

横締め鋼材：PC 鋼棒 $\phi 32$ SBPR 930/1080

斜吊り鋼材：SEEE-F 230

3. 橋梁の計画

3.1 計画上の問題

山岳地域の道路改良工事における自然条件の厳しさは、松の木7号橋施工位置ではさらに増幅される。すなわち、道路線形が沢沿いに山地斜面部に入り込むため、橋梁区間は蛇行して流れる急溪流の片斜面上を通過するという極めて特異なロケーションにならざるを得ない（図-2）。また、冬期間の積雪は3 mを超える県内有数の豪雪地帯でもあることから、まず、橋梁計画に当たっての問題点を次のように設定してみた。

1) 片側が急斜面で橋と近接するため、雪崩や積雪の橋への影響を最小にするには、桁と地山の離れを確保する必要があり、ほぼ全長にわたって側面や桁下での切土が発生する。

2) 斜面上の橋脚位置では、普通のタイプの橋脚であるとするれば、掘削が斜面のかなり上部にまで及び、自然の植生への影響が極めて大きくなる。

3) 斜面が急であることから、架設時において桁下空間の利用ができなくなり、架設工法の制約を受ける。

4) 施工ヤードが終点側の A_2 橋台の背面に限られる。

5) 3 m を超える豪雪地帯であり、4 ヶ月間は厳しい気象条件下に置かれることから、施工時期の制約を受ける。

3.2 計画の方針

以上のように、自然環境の保全と施工、架設の合理化という難しい二つの要求を、適切な橋梁計画によって同時に両立させなければならないことから、「環境に優しく、かつ厳しい地形、気象条件に適する橋梁」をデザインコンセプトとして設定し、次の項目を橋梁計画における基本方針とした。

1) 構造の工夫によって、切土や掘削の影響を最小限にとどめ、山岳道路の自然景観と植生の保全を図る。

2) 厳しい地形、気象条件下でも安全で、周辺の自然環境への影響の小さい合理的な架設工法を採択する。

4. 橋梁の設計

4.1 基本的な構造形式の決定

計画の諸条件、問題点はすでに述べたとおりであるが、凹凸の激しい地形との調和、地形改変の制限を前提とした構造、支間割を比較検討した結果、下部構造の規模の大きくなる少径間の連続構造は好ましくなく、最大支間長 45.5 m の 5 径間連続桁が最適と判断された（図

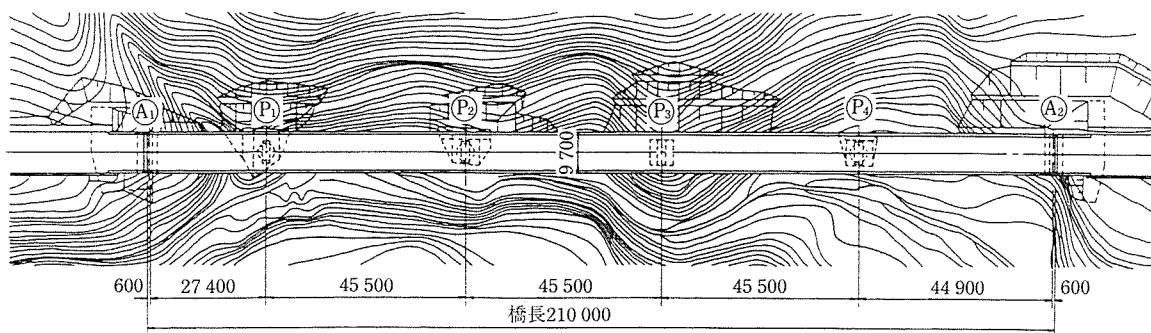


図-2 架橋位置の地形

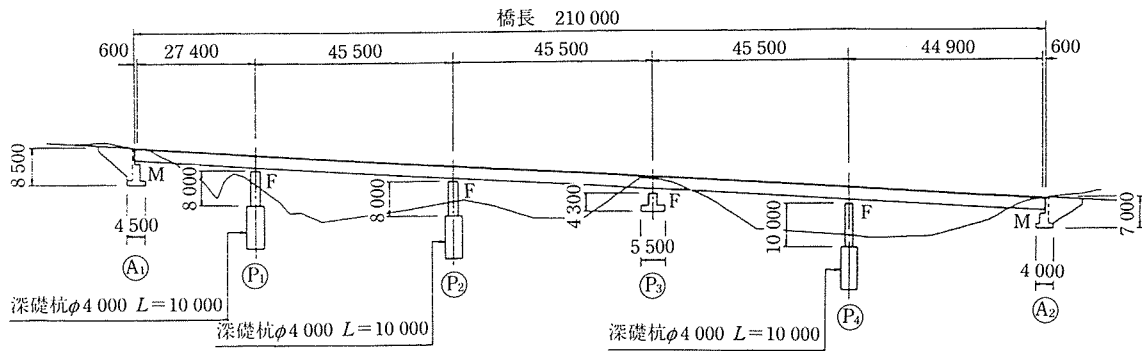


図-3 側面図

3)。また、桁下空間の利用制限から、架設工法は押出し工法が基本となるが、より省力的な架設を可能にするには主桁の軽量化を図ることが最も有効であると考えられ、これを検討した結果、PC箱桁より軽量で鋼桁より経済性に優れる両者の合成構造である波形鋼板ウェブPC箱桁が、この条件と規模の橋では最も適していると判断された(図-4)。なお、松の木7号橋は本格的な合成構造としては国内初であるが、異種材料の組合せによる合成構造の研究開発はヨーロッパにおいて早くから進

められており、フランスのモープレ橋、コニャック橋等いくつかの実施例がある。

4.2 構造上の特徴

本橋は、構造的に見ると次に示すような特筆すべき幾つかの特徴を有している。

(1) 波形鋼板ウェブPC箱桁

この構造は、次のような力学的特性を持つ。

- 1) 軸力、曲げモーメントは上下床版(PC部分)で受け持ち、せん断に対しては基本的に波形鋼板ウェブで受け持つ。
- 2) 鋼板ウェブは波形構造であることから(図-5)、アコーディオン効果があり、プレストレスによる床版の橋軸方向の伸縮を拘束するものではなく、PC部と一体で挙動する。
- 3) 鋼板ウェブは橋軸直角方向に波形になっていることから、面外方向の力に対して曲げ剛性を有する。以上のような力学的特性から、次のような効果が得られると考えられる。
- 4) ウェブ重量の減少により、主桁自重が従来のPC箱桁に比べ25%程度軽量化され、桁下部での仮設機材が不用である押出し工法が可能になることに加え、下部工への荷重負担が軽減されることにより、下部工の構造をスレンダーにすることが可能となり、自然の植生に与える影響を最小限にすることが

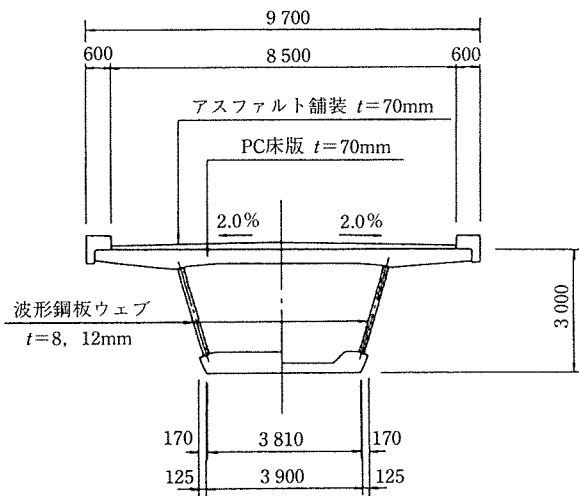


図-4 断面図

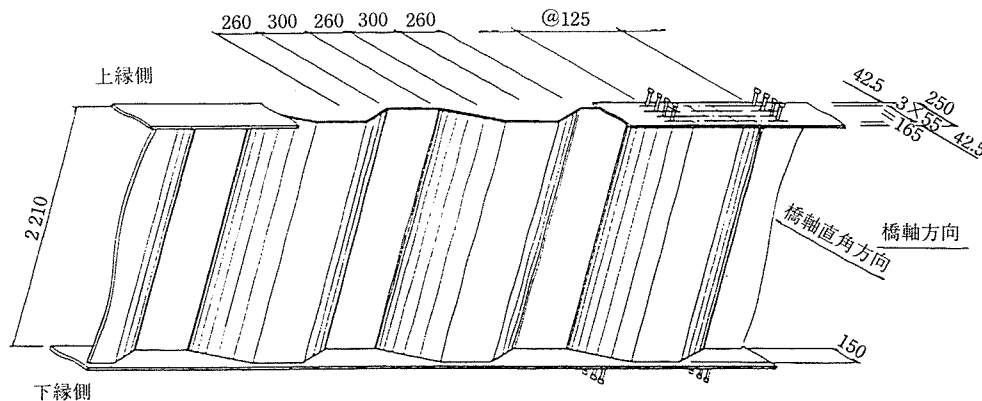


図-5 波形鋼板ウェブの構造

◇工事報告◇

できる。

- 5) 主桁の断面積の減少と軽量化によってプレストレス効率が向上し、PC鋼材量が減少する。
- 6) 波形鋼板ウェブのアコーディオン効果により、外ケーブルを積極的に採用することができ、維持管理上の効果も増す。
- 7) 波形鋼板ウェブの面外方向抗力により、面外方向の地震力に対しても有利である。

(2) 張出しの大きな逆断面桁と単柱式橋脚の組合せ床版張出しの大きい逆断面箱桁とハンマーヘッド形の張出しを持たない単柱式橋脚を組み合わせることにより、次に示すような利点が生じる。

- 1) 主桁の形状と軽量化により、橋脚をスレンダーな単柱式にすることができ、一般的な橋脚に比べて土工規模を著しく小さくできる(図-6)。

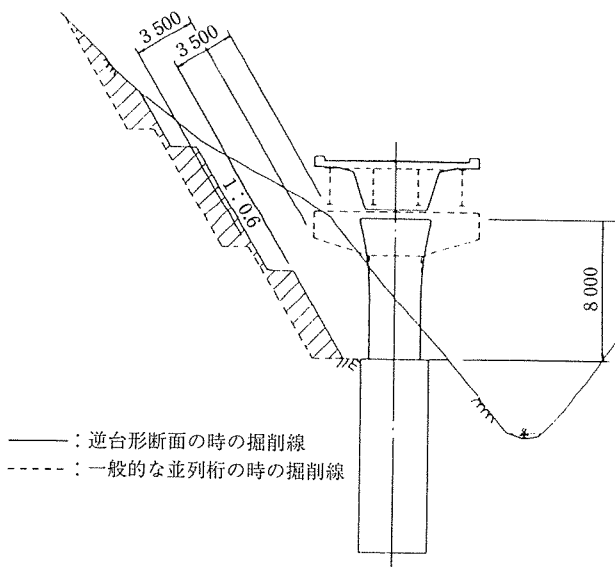


図-6 橋脚位置の横断面図

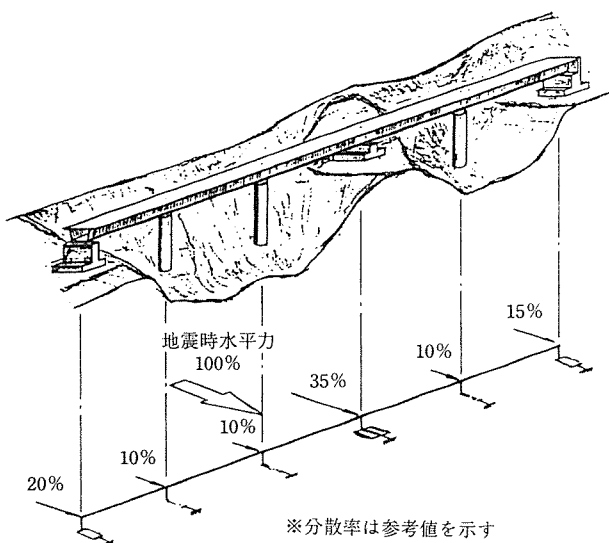


図-7 橋軸直角方向の地震力分散の概念図

- 2) 主桁が張出しの大きな箱桁であることから、地山との離れを大きくでき、雪崩や積雪に対する余裕確保のための地山掘削を最小限にすることができる。

以上のことから法面の掘削や下部工施工に伴う土工規模を縮小できることにより、周辺の自然環境に与える影響を極力小さくできる効果が得られる。

(3) ゴム支承による全方向反力分散構造

4基の橋脚のうち中間付近の屋根上に設置するP₃橋脚の曲げ剛性が他の橋脚に比べて著しく大きいことに着目して、P₃に橋軸直角方向にも変形できるゴム支承と水平ゴムダンパーを用いることによって、地震時水平力の多くをA₁、P₃、A₂に負担させ、斜面上に設置する他の橋脚の負担を小さくする構造とした(図-7)。これによって、橋脚の基礎部の小型化を図ることができ、施工に伴う掘削量を著しく軽減することができた。

(4) 外ケーブルの積極的活用

断面減少と軽量化によるプレストレストの効率化は先にも述べたが、内外ケーブルの荷重分担(内ケーブルは架設荷重時、外ケーブルは架設後の死荷重と活荷重)をさせることにより、従来に比べ外ケーブルを積極的に活用することができる。外ケーブルは今後のPC橋のメンテナンスにおいては、極めて有効な手段の一つに考えられている。

(5) メンテナンスフリーの構造形式

気象条件の極めて厳しい山岳橋梁での維持管理の効率化を考慮して、波形鋼板ウェブに世界で初めて耐候性鋼材を使用した。

5. 上部工の施工

5.1 主桁の製作

主桁は全19ブロック(図-8)の構成として、標準ブロック長は11.0 mである。主桁製作ヤードは、A₂橋台背面約60 mを使用し、後方30 m部分は全天候型の上屋設備を配置した。主桁ブロック製作の型枠設備は、波形鋼板ウェブを組み立てる下床版型枠設備と上床版型枠設備の都合上、両者を連続配置し、さらにブロック製作のサイクルには影響を及ぼさないようコンクリートを同時に打設できるよう配慮した。

型枠設備は、ウェブ直下部分が押し出し時の滑り架台となり、その他の型枠はすべてジャッキによって組立、解

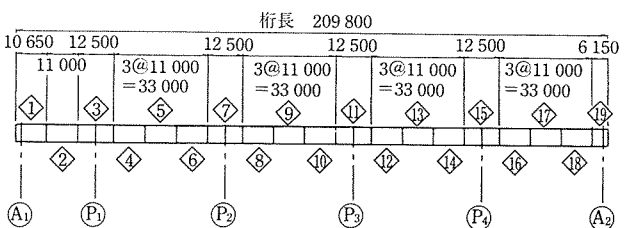


図-8 主桁ブロック割図

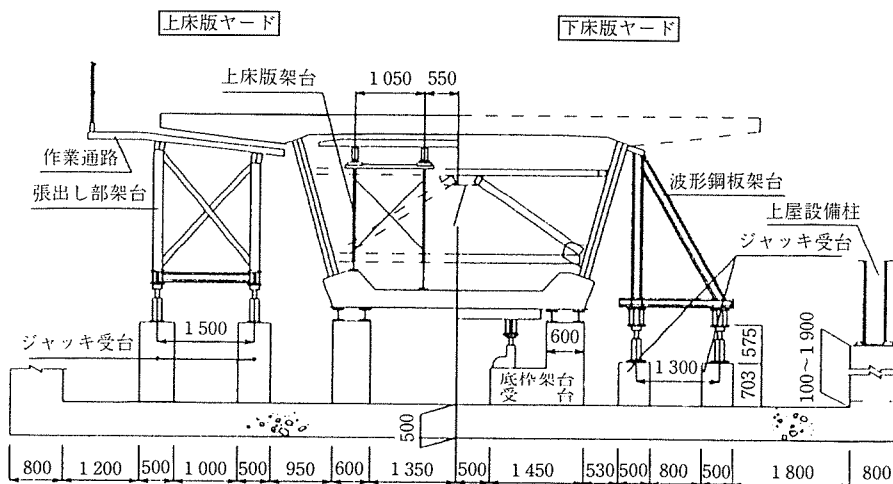


図-9 主桁ヤード図

体ができる構造とした(図-9)。

波形鋼板ウェブは、工場で所定の波形状にプレス加工された鋼板の上下にフランジプレートを溶接し、そのフランジプレートにスタッドジベルを溶植したものである(図-5, 写真-2)。この鋼材パネルは、ブロックの標準長 11.0 m に対して 2 枚 (5.5 m+5.5 m) の構成とした。

波形鋼板ウェブと上・下床版コンクリートの接合は、ウェブの上下に溶接したフランジに溶植したスタッドジベル ($\phi=22$ mm) で行うため、下床版製作時に下フランジのスタッドジベルをコンクリートと接合し、波形鋼板ウェブを対傾構により形状保持した状態で連続配置し



写真-2 波形鋼板ウェブ

た上床版製作ヤードにいったん押出した後、下フランジのスタッドジベルの上床版コンクリートと接合する。

横桁・隔壁部およびデビエータ部についてもせん断力の伝達を考慮し、波形鋼板ウェブの内面にスタッドジベルを溶植して一体化を図った。

また、先端 3 ブロックまでは手延桁として活用するため、上床版コンクリートの施工を行わず、剛性を高めるため上縁側フランジ間に鋼床版を配置して補強した。この鋼床版の断面形状を、コンクリート上床版下面の形状寸法に合わせ、押出し完了後もそのまま、上床版の埋設型枠として活用した。

5.2 押出し架設

(1) 概要

押出し工法の採用は、架設位置が沢沿いの片斜面上であり、植生の保全や冬期の雪崩等を考慮すると、桁下空間が利用できないことから、最も有効な架設工法と判断したためである。また、下部構造の小型化、桁断面の縮小により橋脚ごとにジャッキ設備をセットするスペースがないため、集中方式(TL工法)の採用となった。

通常の押出し工法では、主桁先端部に架設用手延べ桁を取り付け、施工中の張出し時の断面力を低減するものであるが、本工法では主桁断面を活用するという方針の中、先端 3 ブロックの上床版コンクリートを施工せず、鋼床版として補強・軽量化したものを手延べ桁の代わり

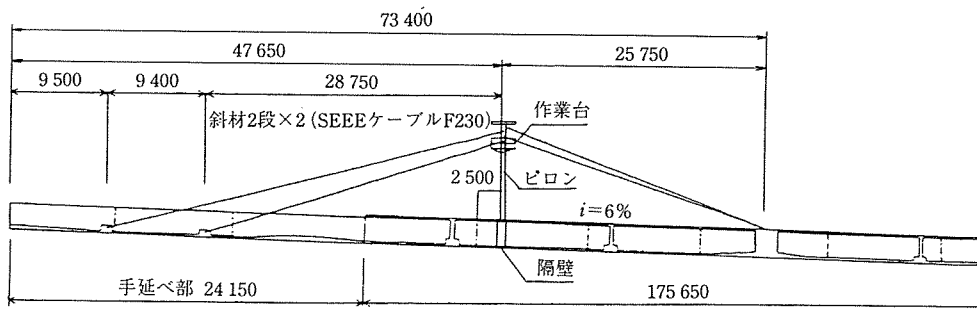


図-10 手延べ部概略図

◇工事報告◇

とし、さらに第5ブロック上床版上にピロン柱を立て、斜吊りケーブルによって先端手延べ部を補強する斜吊り併用押し工法とした(図-10)。

(2) 押し設備

押し設備は、反力台であるA₂橋台に設置した500tジャッキである(写真-3)。また、架設時の安定計算上から仮支柱を、製作ヤードからA₂橋台まで2基、A₂~P₄の間に1基の合計3基を設置した。

滑り支承は、滑り面にステンレス板を巻いたコンクリート製とし、桁との間にはテフロン板を挿入して押し時の滑り摩擦を低減した。また橋台および橋脚上の支承は、本沓に押し用滑りプレートを取り付け、押し時の滑り沓として兼用した。

また、押し時の横桁ぶれ制限装置は、滑り支承および兼用沓と一体化して取り付け、架設時の桁の横ずれ制御や地震時の水平力に対処できる構造とした。

(3) 押し架設

押し架設は、ジャッキと引張り鋼材により、下床版下面に取り付けたブラケットまたは主桁を貫通したアンカーバーとの組合せにより行った(写真-4)。このとき支承部では、桁下面と支承上ステンレス板の間にテフロン板を挿入して桁と共滑りさせ、前方に出たテフロン板

を後方に戻して再挿入する作業を行った。

一方、ピロン柱は鋼製とし、その支承部はヒンジ構造とした。また、斜吊り鋼材としてPC鋼材のSEEE-F230型を前後各4本、計8本配置した。前方斜材の定着は、下床版に埋め込んだアンカーに鋼床版を貫通した斜吊りケーブルを定着し(写真-5)、後方のそれは、中間支点横桁上にPC鋼棒で固定したブラケットにケーブル端を定着した。

斜吊りケーブルの緊張は、ピロン柱側の定着端で行ったが、ここで、斜材張力は軸力としてピロン柱から主桁に伝わり、ピロン柱直下の主桁断面応力に大きく影響するため、架設ステップに応じてケーブルの緊張力を調整する必要があった。主なステップを図-11に示す。

このように、押し架設時に刻々と変化する主桁応力に合わせて斜材張力調整を行うため、主桁応力度の計測、斜材緊張の管理、先端たわみ量の測定を行いながら施工時の安全確保に努めた。

また、主桁製作、押し架設の時期が、冬期間と重なったため、斜吊り補強をしていない時期の手延べ桁部には山形の屋根を設置して、常に雪が滑り落ちるよう配慮した(写真-6)。その他、橋面に積った雪はその都度排除し、斜吊り補強した後の鋼床版部については、特に

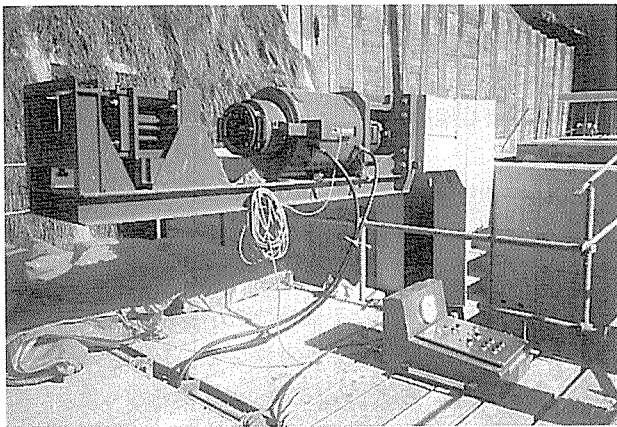


写真-3 押しジャッキ

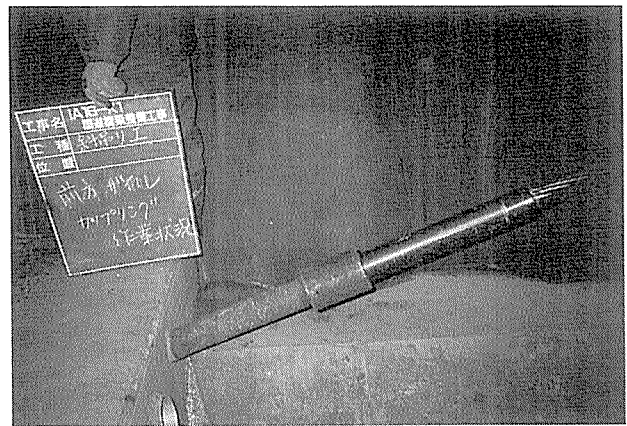


写真-5 前方斜材定着部

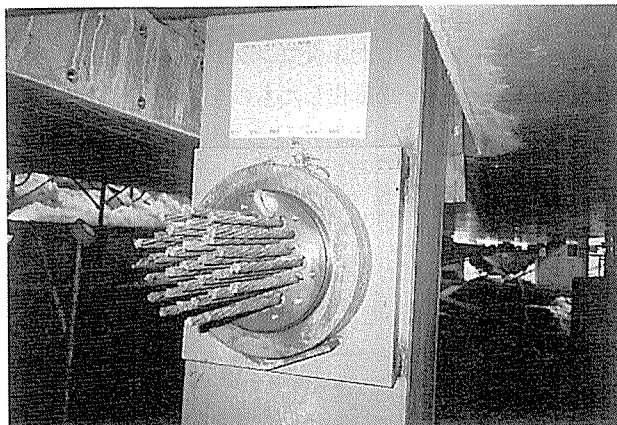


写真-4 アンカーバーセット状況

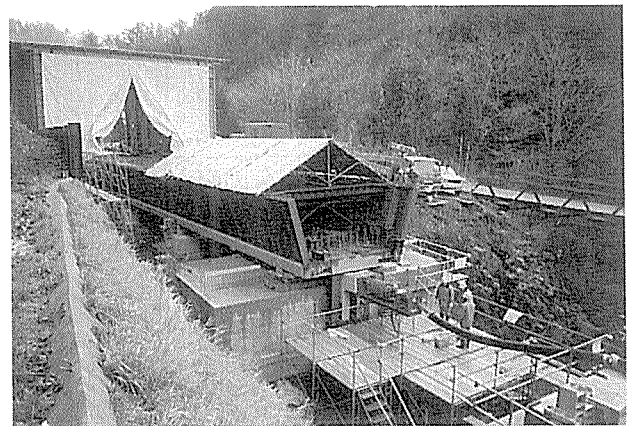


写真-6 雪よけの屋根

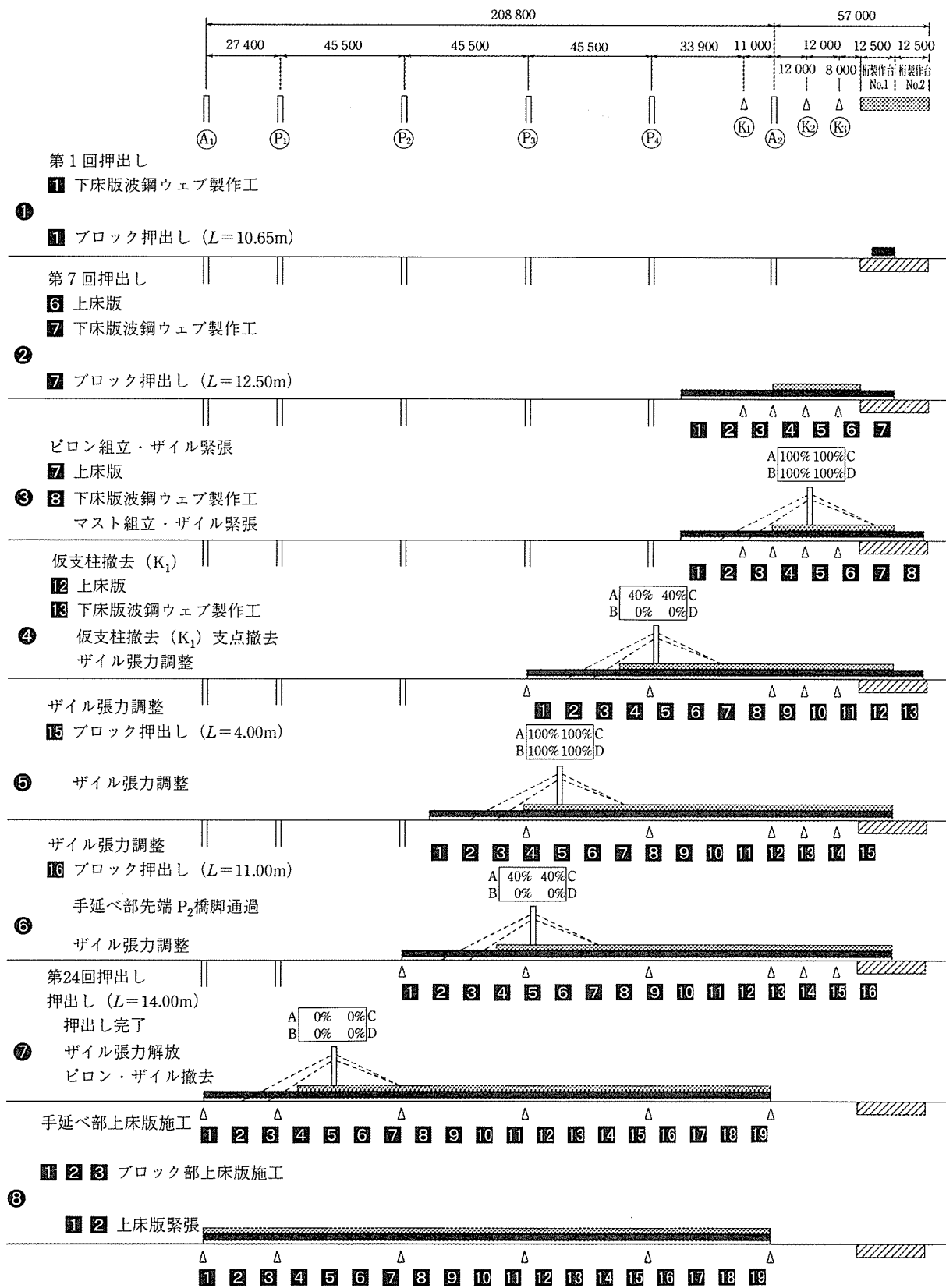


図-11 架設要領図

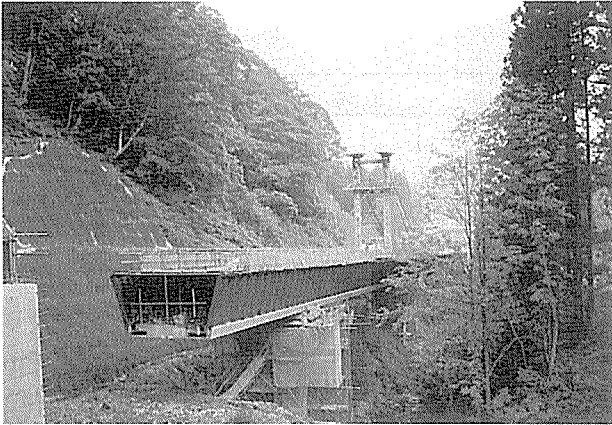


写真-7 斜吊り架設時状況

速やかに除雪した。写真-7に斜吊り架設時の状況を示す。

5.3 支承の据付け

押し出し架設時の支承位置はウェブ直下にあり、押し出し完了後には所定の位置にセットし直さなければならない。支承の移動は、主桁を A_1 橋台側から1ヶ所ずつジャッキアップして、押し出し滑りプレートをソールプレートに交換し、下部工に固定してあるベースプレート上を325 mm 横移動させて所定の位置に取り付けた。また、弾性ストッパーも同時にセットした。

5.4 外ケーブル

箱桁内部に配置した外ケーブルは、角変化によるプレストレスのロス、作業性等を考慮して、支点横桁を定着点とする2径間連続ケーブルとし、他のケーブルと1径間ずつ重なるようにした(図-12)。使用したPC鋼材は、240 t型9 S 15.2 (SWPR 7 BN)、定着装置は取替え可能な外ケーブル用 MC 9 S 15.2 とした。また、ケーブルの保護管は、高密度ポリエチレン管(PE管)を使用した。保護管内部にはスパイラルスペーサーを配置して、PC鋼材と保護管とのあきを確保し、グラウトが確実にできるようにした。以下にその手順を示す。

- 1) 内部にスパイラルスペーサーをセットしたPE管を所定の位置に配置し、継手部を熱線ソケットで融着。
- 2) プッシングマシンでPC鋼より線を1本ずつ挿入。

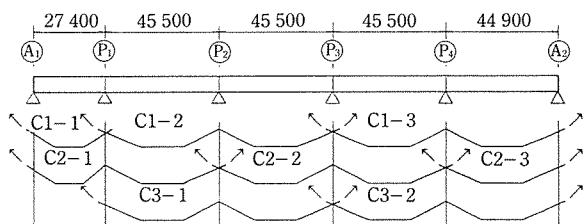


図-12 外ケーブル配置図

- 3) 定着体を組み立てた後、緊張ジャッキをセットし、 A_1 側ケーブルから順次 A_2 側に向かって、山側、谷側のケーブルを交互に緊張していく。
- 4) 定着部にグラウトキャップをセットし、ケーブルの角変化部にはエア抜パイプとグラウト充填確認用ホースを取り付け、グラウトを注入。
- 5) 最後に、定着体とグラウトキャップを保護するグリースキャップを取り付け、防錆油を充填する。

5.5 品質および安全管理

主桁の製作、架設工事においては、冬期間の豪雪時期の施工となったため、寒中施工における品質管理に十二分に配慮し、厳重な雪対策を施した。また、架設時には計測により主桁の挙動を監視して安全確認を行ったほか、地震対策として滑動防止ストッパーを別途配置し、横振れ制限装置とともに非常事態に備えた。これにより、震度3の地震に2度も見舞われたにもかかわらず、何事もなく無事に架設を終えることができた。

6. 実橋試験

6.1 試験目的

本橋は、波形鋼板ウェブを用いた異種材料の合成構造として、本格的な道路橋に採用された初めてのPC橋であり、外ケーブルも積極的に用いていることから、その挙動については未解明の部分が多い。そこで、本橋の挙動を実橋レベルで把握し、その力学的合理性を実証することによって、今後のこの種のPC橋の開発に資する目的で、以下に示す試験を実施した。

(1) 静的試験

静的試験は、本形式の採用に当たっての設計ガイドラインが構築できるデータ収集を目的として行ったものである。本橋の架設方法は、斜吊り併用押し出し工法であり、特に先端部は手延桁代わりとしてコンクリート床版に代えて鋼床版を取り付ける特殊構造としており、押し出し時の応力集中に伴う部材安定性の照査のため、応力照査上クリティカルとなる断面の施工時応力を計測した。

(2) 動的振動試験

本橋梁形式の動的挙動については、ほとんど研究されていないのが現状であることから、波形鋼板構造特有の振動特性、車輦走行時における外ケーブルの振動特性、桁と外ケーブルの共振性および動的応答倍率(衝撃係数)の検証を行うことを目的として実施したものである。

6.2 静的試験

(1) 施工時計測

施工時計測は、主桁応力がクリティカルとなるピロン柱直下のコンクリート断面内に設置した有効応力計と、斜吊りケーブル定着部に設置したロードセルによって行った。また、各押し出しステップ完了後に主桁先端のた

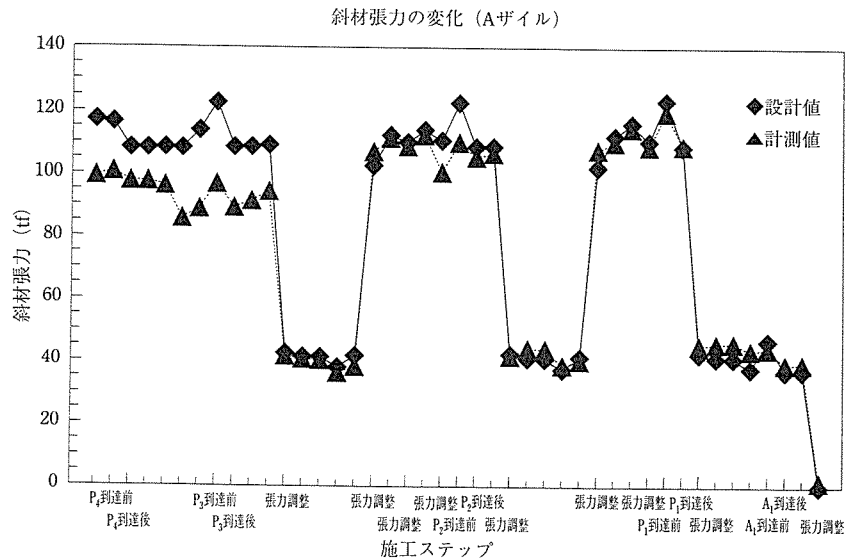


図-13 斜材張力測定結果

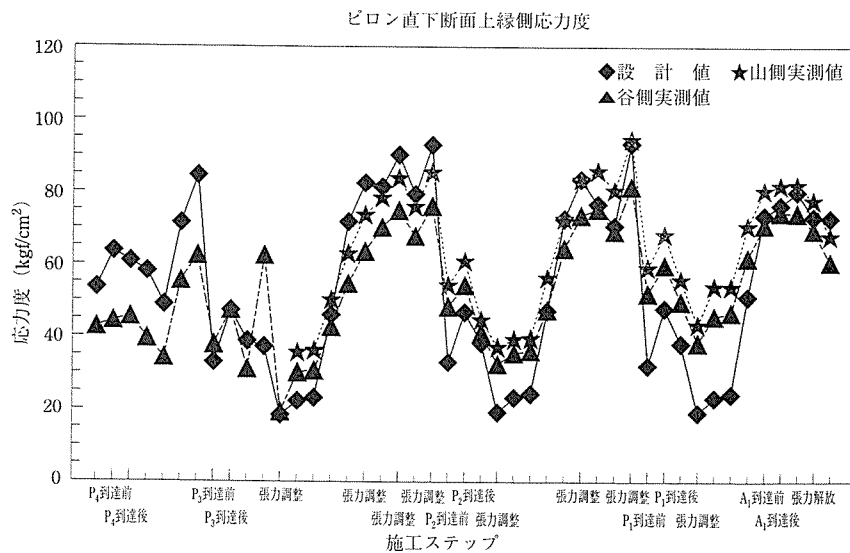


図-14 主桁応力度測定結果

表-1 主桁たわみ測定結果

施工段階	張出し長	設計値	計測値
P ₄ 到達前	33.900 m	97 mm	84 mm
P ₃ 到達前	45.500	148	136
P ₂ 到達前	45.500	138	129
P ₁ 到達前	45.500	150	141
A ₁ 到達前	27.400	115	101

わみも併せて計測した。いずれの計測結果とも設計値に近い値を得、設計手法の妥当性が確認できた(図-13、図-14、表-1)。

(2) 静的荷重試験

本橋の建設に先立って実施した1/2スケール模型桁実験で確認した構造特性が、実橋において再現されているかどうかを確認するため、予め計量しておいた大型ダン

プを橋面に載荷することによって、静荷重試験を行い、以下に示す項目を確認した(写真-8)。

- 1) 曲げによる上下床版のコンクリート応力度



写真-8 静的荷重試験

◇工事報告◇

- 2) 曲げ, せん断, ねじれによる波形鋼板ウェブおよびフランジプレートの応力度
- 3) せん断, ねじれによるスタッドジベルの応力度
- 4) デビエータの鉄筋応力度
- 5) 波形鋼板ウェブのボルト接合部の軸方向応力度
- 6) 静的たわみ
- 7) 外ケーブルのひずみ

計測は, コンクリート有効応力計, ロードセル, 鉄筋計, 一軸および三軸ひずみゲージをそれぞれ着目する点に設置して, データロガーにて行った。

計測結果として, 曲げおよびせん断についてはモデル実験で得られた特性が再現されていることを確認し, 設計手法の妥当性が再確認できた。また, スタッドジベルの応力度等については, 現在データ整理, 解析中であり, まとまり次第報告したいと考えている。

6.3 動的試験

(1) 試験方法

車輛の実走行に伴う実橋の挙動特性を把握するために, 次のような手法で振動を与える試験を行った。

- 1) 車輛走行法: 予め重さを計量した大型ダンプを試験車輛として用い, 速度や重量および走行状態を変化させて振動性状を計測する(写真-9)。



写真-9

- 2) 車輛踏台落下法: 試験車輛の前輪を踏台から落下させて減衰自由振動を起し, その振動特性を計測する。なお落下高さ, 位置は変化させる。
- 3) 人力加振法: 外ケーブルを人力により加振し, その自由減衰振動を測定することによって, 振動特性を把握する。

(2) 計測方法

ピックアップとしては, サーボ型加速度計を主桁上に配置して計測した。

(3) 固有値解析

固有値解析を行うための構造物の力学モデルは, 主桁と外ケーブルを分離した三次元骨組モデルとし, 次のよ

うな仮定を行った。

- 1) モデルは質点モデルとする。
- 2) 縦断線形の影響を考慮する。
- 3) 主桁の剛性は, 上下コンクリート床版のみとする。
- 4) 外ケーブルについては, プレストレス効果をモデル化して考慮する。

(4) 解析結果および考察

振動特性の計測結果から, 本橋は, 鋼橋と PC 橋の両方の振動特性を示していると考えられる。また, 橋体と外ケーブルの卓越振動数は異なっており, 橋体と外ケーブルとは共振しないことが確認された。

なお, 動的応答倍率(衝撃係数)等については, 現在解析中であり, 結果が出次第順次報告したいと考えている。

7. あとがき

波形鋼板ウェブ PC 橋については, 国内での実験・研究データが見あたらず, 国外においても詳細なデータの公表がされていないことから, 力学的に見ても未解明の部分が多いが, 本橋における実験データにより, この種の複合橋の合理性が証明され, 未解明な部分の解明に少しでも貢献できることを信じてやまない。

また, 本橋は, その構造的合理性や環境に優しいこと等が評価されて, 平成 7 年度土木学会田中賞(作品部門)および土木学会東北支部総合技術賞を受賞するに至ったが, 橋の計画, 設計, 施工に携った多くの皆様方に深く敬意を表し結びとしたい。

参考文献

- 1) 本田, 秋葉, 水木: 振動実験に基づく波形鋼腹板の動的特性に関する基礎研究, 鋼構造年次論文報告集, 第 1 巻, p. 844~p. 887, 1993 年 7 月
- 2) 加藤: 橋梁における新たな合成構造について, 土木学会東北支部技術講座, p. 15~p. 28, 1994 年 10 月
- 3) 花田, 加藤, 高橋: 波形鋼板ウェブ PC 箱桁「松の木 7 号橋」の模型実験, 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, p. 345~p. 350, 1995 年 10 月
- 4) 加藤, 寺田: 5 径間連続波形鋼板ウェブ PC 箱桁「松の木 7 号橋」, 橋梁, p. 4~p. 9, 1995 年 10 月
- 5) 加賀屋, 須合, 高橋: 松の木 7 号橋(波形鋼板ウェブ PC 橋)の施工, 土木学会東北支部技術研究発表会講演概要, p. 664~p. 665, 1996 年 3 月
- 6) 加賀屋, 村田, 立神: 松の木 7 号橋(波形鋼板ウェブ PC 橋)の施工時計測, 土木学会東北支部技術研究発表会講演概要, p. 666~p. 667, 1996 年 3 月
- 7) 石黒, 立神, 上平, 佐々木: 波形鋼板ウェブ PC 橋(松の木 7 号橋)の振動特性について, 土木学会第 51 回学術講演会

【1996 年 5 月 28 日受付】