

芝川高架橋の設計・施工 —ストラットを有する PC 箱桁橋—

寺田 典生*1・福永 靖雄*2・三浦 純夫*3・塚本 慎*4・中島 豊茂*5

1. はじめに

芝川高架橋は、第二東名高速道路清水 IC(仮称)～富士 IC(仮称)間の静岡県富士郡芝川町に位置し、斜度 45° を超える急峻な山岳部に建設されている PC 連続箱桁橋である。本橋は上り線に 1 橋、下り線に 2 橋の合計 3 橋から構成されている。架設方法は大型移動架設機 (3 500 kN・m ワーゲン) を用いた張出し架設工法である。

本橋の主桁断面形状は、ストラットにより張出し床版を支える形式の箱桁断面である。この形式はわが国において施工事例がなく、第二東名高速道路で初の採用となった。この構造の特徴は、下床版の幅を従来の一室箱桁断面に比較して小さくすることができ、上部構造の軽量化と橋脚および基礎構造の縮小化を可能としたことである。本報告書

は、上部工の技術的に特徴のある項目および設計・施工・実験について報告するものである。

2. 橋梁概要

2.1 全体概要

芝川高架橋の全体概要を以下に示す。また、全体一般図を、図-1 に示す。

工事名 : 芝川第一高架橋(PC 上部工)工事

発注者 : 日本道路公団 静岡建設局

施工者 : オリエンタル建設(株) 常磐興産ピーシー(株) 共同企業体

構造形式 : 2 径間連続 PC 箱桁ラーメン橋, 5 径間連続 PC 箱桁橋, 4 径間連続 PC 箱桁橋

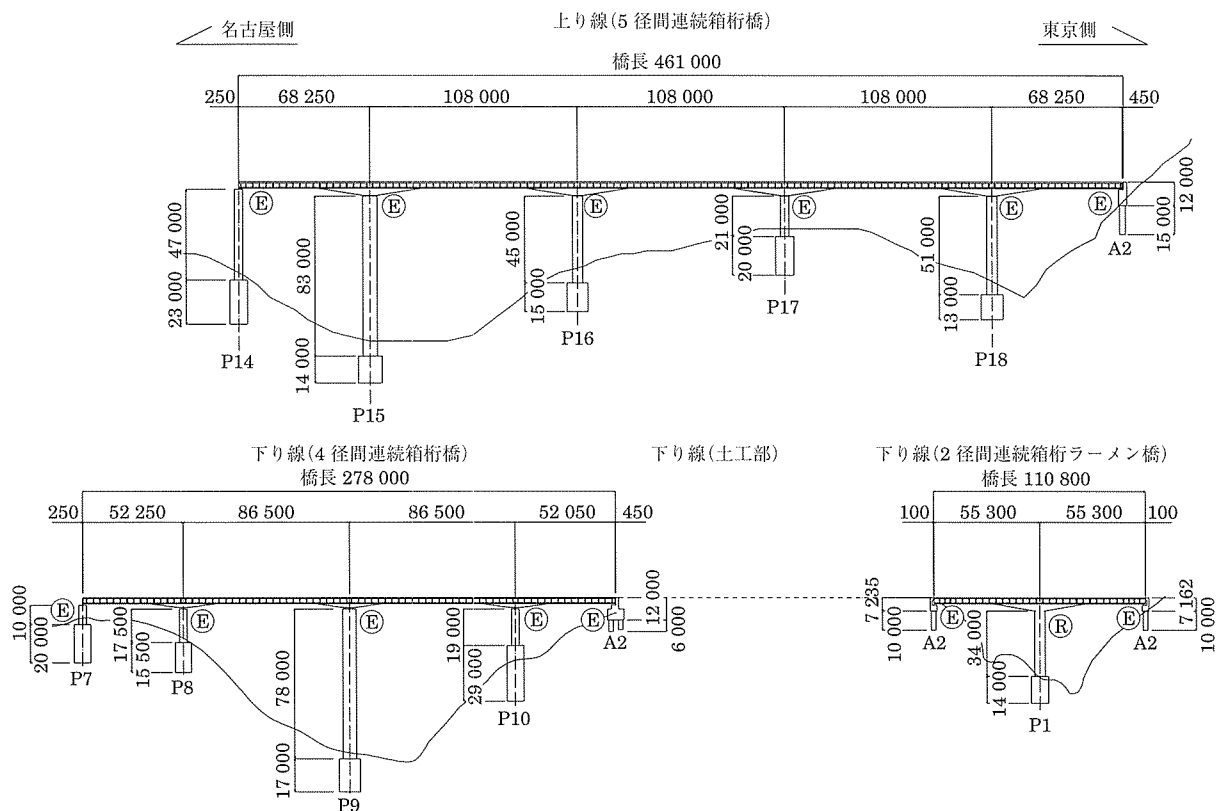


図-1 芝川高架橋全体一般図

*1 Norio TERADA : 日本道路公団 静岡建設局 建設部 構造技術課 課長

*2 Yasou FUKUNAGA : 日本道路公団 静岡建設局 富士工事事務所 構造工事区 工事長

*3 Sumio MIURA : オリエンタル建設(株)・常磐興産ピーシー(株)共同企業体 所長

*4 Shin TSUKAMOTO : オリエンタル建設(株)・常磐興産ピーシー(株)共同企業体 副所長

*5 Toyoshige NAKAJIMA : オリエンタル建設(株)・常磐興産ピーシー(株)共同企業体

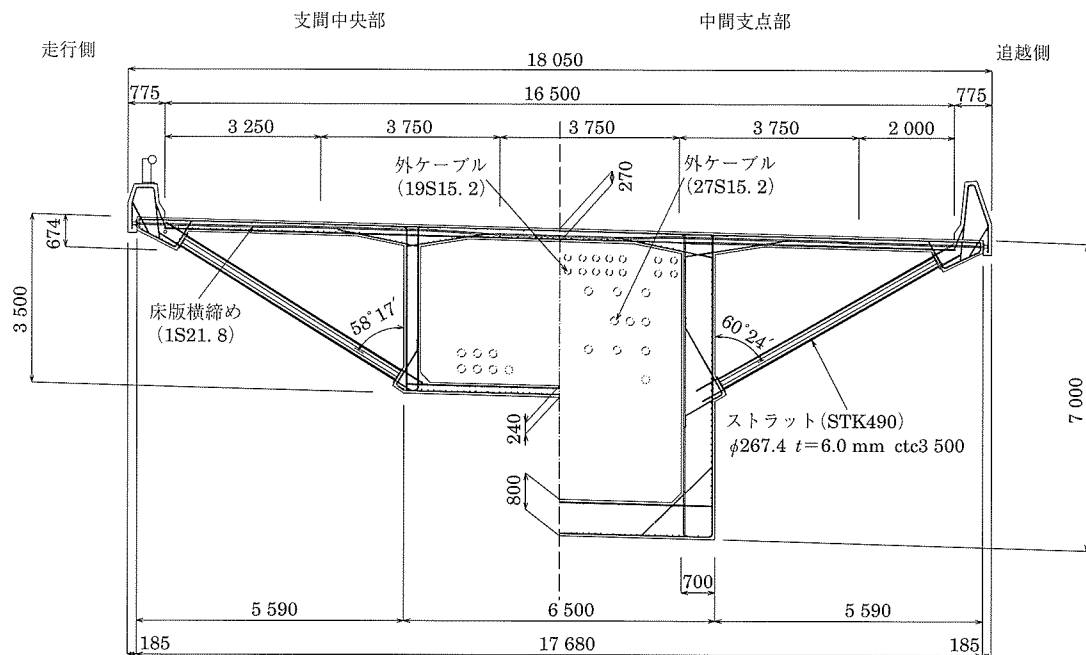


図-2 ストラット付 PC 箱桁橋断面

表-1 主要材料表（5 径間連続桁橋）

種 別	仕 様	単 位	5 径間
コンクリート	$\sigma_{ck} = 40 \text{ N/mm}^2$	m ³	7 034
鉄 筋	SD 345	t	1 529
外ケーブル	19S15.2（エボキシ）	t	136
	27S15.2（エボキシ）	t	143
床版横締め	1S21.8（プレグラウト）	t	41
ストラット	$\phi 267.4 \text{ } t=6 \text{ mm}$ （STK 490）	本	266

2.2 橋梁諸元・主要材料

本橋を代表して、5 径間連続 PC 箱桁橋の橋梁諸元を以下に示す。また、断面図を図-2 に、主要材料表を表-1 に示す。

道路規格：第1種1級A規格

設計荷重：B活荷重

橋 長：461.0 m

支間長：67.25 + 3@108.0 + 67.25 m

有効幅員：16.50 m (3.250 + 3@3.750 + 2.000 m)

架設工法：ワーゲンによる張出し施工

2.3 橋梁概要

本橋の架橋位置は、斜度 45° を越える急峻な山岳部であり、本橋の橋脚高さは、最大 83 m となり第二東名高速道路でもっとも高い橋脚を有する山岳橋梁である。また、架橋位置に至る仮橋・栈台は最大高さ 35 m、面積にして約 7 000 m² に達する第二東名高速道路建設の中でもっとも難関な工事である。

このような急峻な地形では、下部工、基礎工断面を小さくし、構造物掘削も少なくすることが、コスト縮減へ向け有効である。

本橋では、ストラットとよばれる部材を用いて、張出し床版を支持する『ストラット付 PC 箱桁橋』を採用した。この形式は、張出床版幅を大きくすることができるため、

箱桁底版幅が小さくなる。これにより、上部工の重量が軽量化され、下部工、基礎工の断面も小さくできるため、経済性が向上する。

図-3 に第二東名高速道路の広幅員における、PC 箱桁とストラット付 PC 箱桁の断面比較を示すが、張出し長は従来の構造の約 2 倍に相当する 6 m 程度となり、下床版幅を 6.5 m とすることが可能となった。

この結果、本橋の場合、PC 箱桁橋に比較して、下部構造は断面積で約 50%、上部構造は約 80%まで断面を縮小することができた。

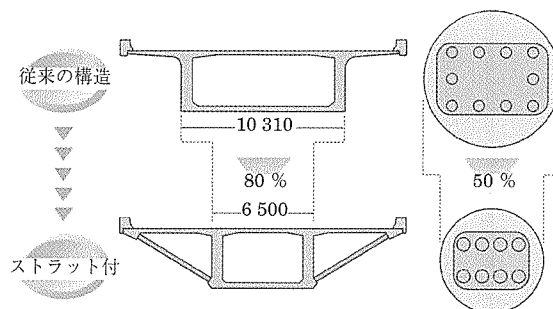


図-3 断面形状比較（従来構造とストラット構造）

3. ストラット付 PC 箱桁構造の設計

ストラット付 PC 箱桁橋は、海外においては、すでに施工実績がある。しかしながら国内においては、本橋での採用が初めてであり、上床版、ストラット本体およびストラット接合部は、従来の箱桁橋にない特徴を有するため、構造上検討を要すべき点があった。

したがって、立体 FEM 解析等を用い種々の検討を行い、この解析の妥当性および構造の安全性を確認するため、実

物大試験体を用いた試験を実施した。

図 - 4 に芝川高架橋におけるストラット付 PC 箱桁構造のイメージ図を示す。

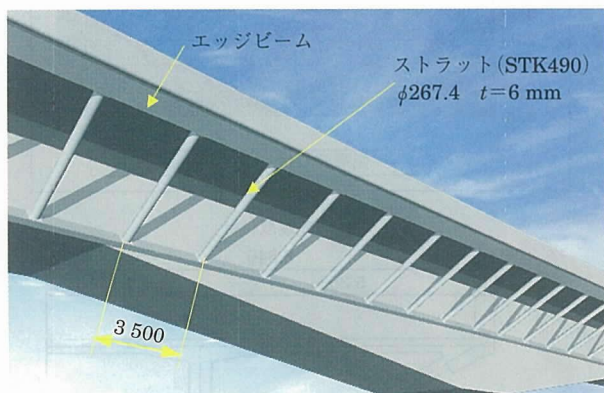


図 - 4 芝川高架橋の構造イメージ図

3.1 ストラットに支持された上床版の設計

上床版の設計における発生応力は、3次元 FEM 解析により算出した。解析モデルは、図 - 5 に示すように橋軸方向長さ 30m、橋軸直角方向を全幅員とするモデルにより 3次元 FEM 解析を行った。荷重は、桁自重、橋面荷重、活荷重を載荷した。

上床版橋軸方向の設計は、ひびわれ幅制御とする RC 構造とし、配置する鉄筋量を決定した。

上床版橋軸直角方向の設計は、ひびわれの発生を許容しない、コンクリートの縁応力を制御する PC 構造とし、上床版の厚さ、配置する鉄筋量および PC 鋼材量を決定した。この結果、上床版の厚さは 270 mm となり、PC 鋼材量は 1S21.8 mm の PC 鋼より線を 500 mm ピッチで配置した。

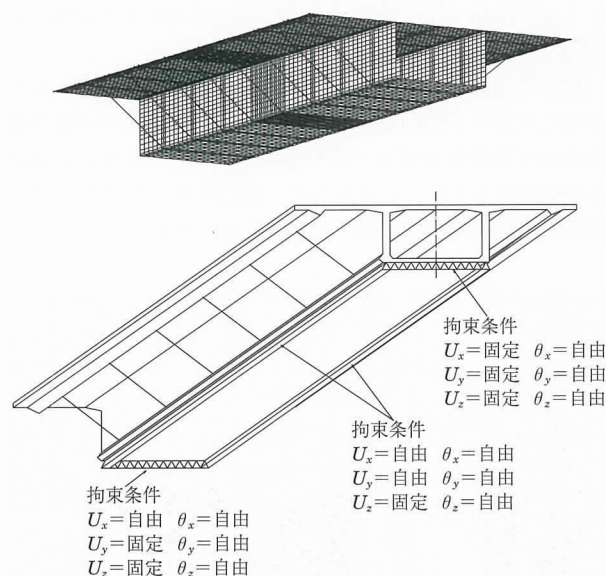


図 - 5 3次元 FEM 解析モデル

3.2 ストラットの設計および配置間隔

ストラットを現場打ちの鉄筋コンクリートで製作するこ

とは、十分な品質が確保できないことから困難であり、プレキャストコンクリート製か鋼製となる。本橋の場合は、急峻な地形上で張出し架設施工を行うため、施工上必要な荷役設備を最小限とすることから鋼製ストラットとした。

ストラットの橋軸方向間隔は、ストラット部の配筋・PC 鋼材配置の施工性および、型枠設備の転用、施工時の張出し床版の変形等を考慮し、張出し施工での標準ブロック長となる 3.5 m 間隔とした。ストラットは、設計上想定される荷重に対し十分な座屈安全性を満足する直径 267.4 mm、厚さ 6 mm の鋼管とした（図 - 6）。この断面の鋼管は、同等の耐力を有するコンクリート製ストラットの約 1/4 の重量となり、施工性に優れたものである。また、ストラット部の防錆においてはライフサイクルコストを考慮し、亜鉛アルミ合金メッキを用い、定着部の防錆をさらに高めるため水切りおよびボルトの腐食防止キャップを設けた。（写真 - 1）

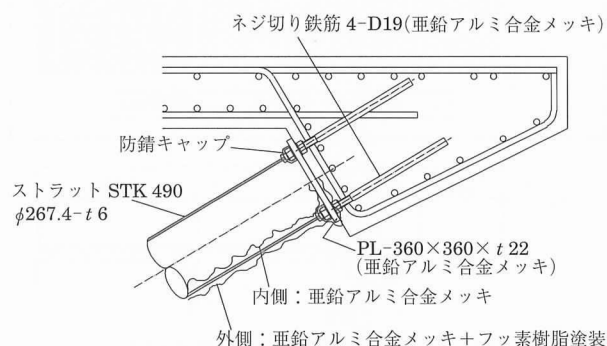


図 - 6 ストラットおよび接合部断面形状（上床版接合部）



写真 - 1 ストラットの防錆（ウェブ接合部）

3.3 ストラットと上床版の接合部の検討

ストラットと床版の接合断面形状は、図 - 6 に示すように傾斜したストラットの支圧面がストラット部材軸に対して直角となるように決定した。

上床版とそれを支えるストラットとの接合面の橋軸方向の連続性は活荷重載荷時の応力検討結果より決定した。すなわち、図 - 7（左図）に示す接合部周辺にみにブロック状突起をつける不連続な形状（突起形状）と、図 - 7（右図）に示すビーム状に連続する形状（エッジビーム）の両者を

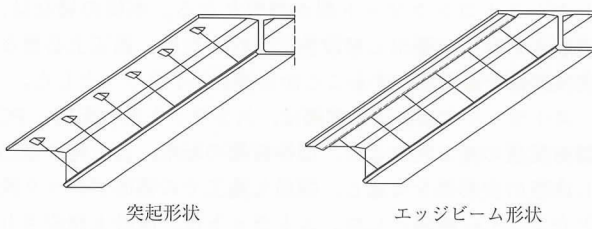


図-7 ストラット接合部の形状比較

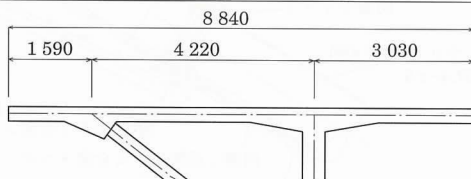
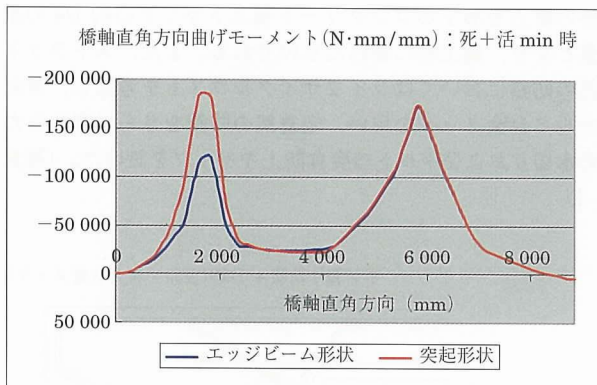


図-8 橋軸直角方向曲げモーメント

比較検討した。この結果、連続するビーム形状としたほうが応力的に有利となることから連続構造を採用した（図-8）。さらに、ストラット接合部においては耐久性の観点から、接合部にはプレストレスを導入することとした。

3.4 ストラットと上床版の取付け位置の検討

ストラット取付け位置については、図-9（上図）に示す張出し床版先端部での取付けと、図-9（下図）に示す張出し床版の中間での取付けの検討を行った。図-10に床版上縁の橋軸直角方向の応力分布を示す。図-10に示すとおり、張出し先端配置は張出し床版のハンチ部、中間配置は、ストラット接合部直上で上縁の引張応力度が最大となる。張出し先端配置を採用した場合、中間配置と比べ応力度を約85%にできることが明らかとなった。以上より、橋軸直角

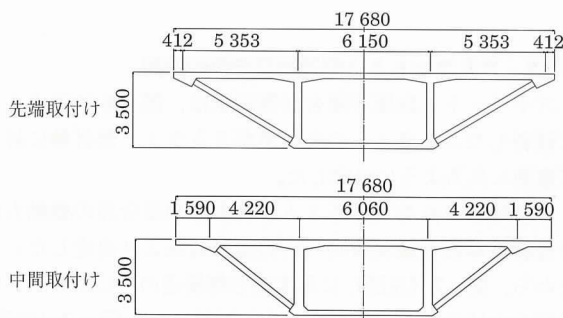


図-9 ストラット取付け位置の比較

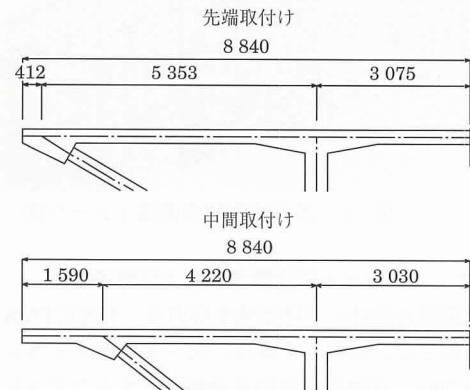
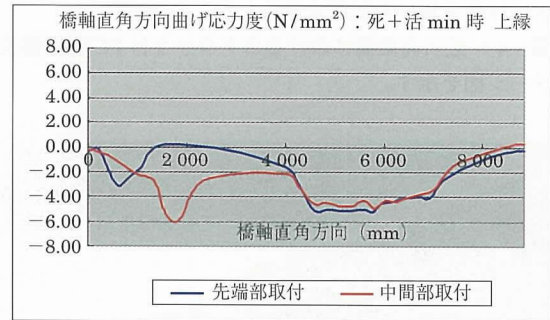


図-10 橋軸直角方向の曲げ応力度

方向の応力を低減でき、配置されるPC鋼材量を軽減することが可能となり経済性の向上も図れる張出し床版先端部での取付け構造を採用した。

4. 実物大確認試験

4.1 実物大試験体による静的載荷試験

本橋の設計に用いたFEM解析による設計方法の妥当性とストラットに支持された床版、ストラットおよびストラットの接合部の耐久性を検証する目的で実物大試験体による静的載荷試験を行った（写真-2）。

試験体形状は、本橋の柱頭部および第一ブロックをモデル化した長さ10.250mの実物大とした。解析方法の妥当性の検証は実験供試体をモデル化したFEM解析値と実験値との比較により行うこととした。実験結果と比較するFEM解析は設計時の照査に用いたものと同じ条件とした。

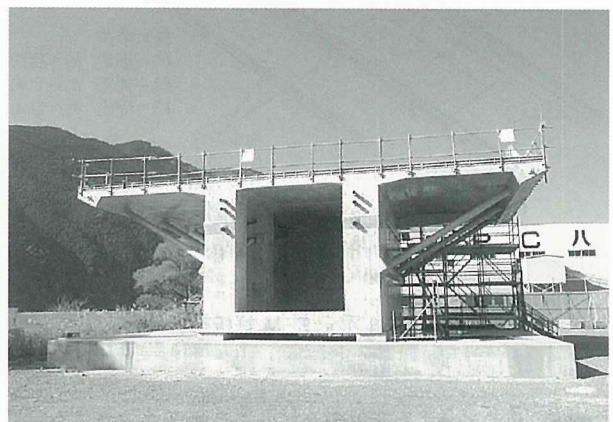


写真-2 実物大試験体の全景

実験では設計に用いた活荷重載荷を再現することが困難であるため、着目断面での設計荷重時に発生するモーメントと等価なモーメントが発生する荷重をタイヤの接地面積に相当する載荷装置の上から集中載荷した。

図 - 11 に荷重と載荷点変位との関係の実験結果および解析値を示す。図 - 11 に示すとおり T - 60 過積車荷重を想定した 350 kN の載荷時においても荷重と載荷点変位とは直線的な関係にあり FEM 解析で得られた荷重と載荷点変位の関係と実験結果はよく一致している。

図 - 12 に設計荷重時を想定した 213 kN の載荷時における、床版橋軸直角方向の解析での応力度と実験計測値との比較を示す。図 - 12 に示すとおり FEM 解析結果は、実験値と実験での分布状況の両者ともよく一致していた。本結果より、本橋での解析は妥当であり、また、上床版は十分な耐久性を有していることが確認できた。

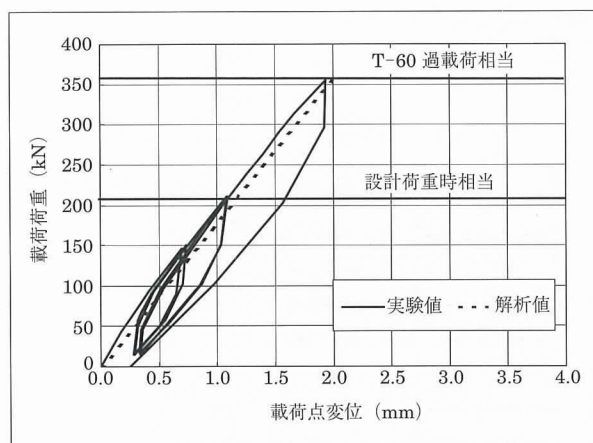


図 - 11 荷重と載荷点変位の関係

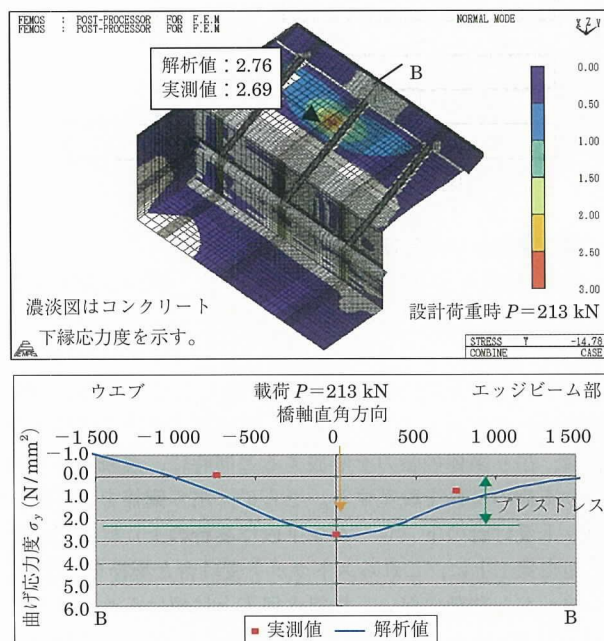


図 - 12 床版橋軸直角方向曲げ応力度分布

4.2 実物大試験体による定点繰返し載荷試験

ストラットおよびストラット接合部の疲労耐久性についても不明な点が多いため、ストラット周辺を取り出した実物大試験体により定点繰返し載荷試験を実施した。

載荷荷重は、最大荷重単位 T - 60 を橋軸方向に 1 台とし車線レーンの中央に載荷した場合相当の荷重を試験体に載荷した。すなわち、追越側の車線中央に T - 60 を載荷した場合にストラットに発生する軸力と同等となる荷重をストラット直上に載荷するものである。

載荷ステップは、T - 60 相当荷重を 50 万回載荷した後、変状がなければ、T - 60 の 2 倍相当の荷重を 200 万回返し載荷した。

この結果、T - 60 荷重の 2 倍相当の繰返し荷重 (200 万回) においても、ストラット本体およびストラット接合部に変状のないことを確認している。また、ストラット本体とプレート溶接部においても、疲労亀裂の発生等の損傷および変状がないことも確認した。

図 - 13 に各載荷ステップ終了時に静的載荷したときのストラット中央部の荷重とひずみとの関係の実験結果と解析値を示す。図 - 13 に示すとおり各載荷ステップのひずみは弾性的な関係にあり、各ステップのひずみ量はほぼ一致している。さらに、FEM 解析で得られた荷重とひずみの関係と実験結果はよく一致している。本結果より、ストラットおよびストラット接合部は、繰返し荷重においても十分な耐疲労耐久性を有していることが確認できた。

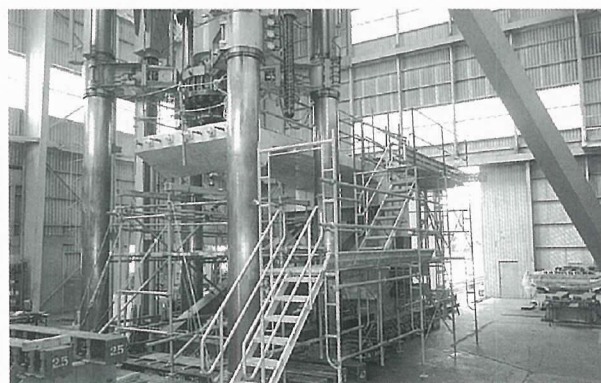


写真 - 3 繰返し載荷試験状況

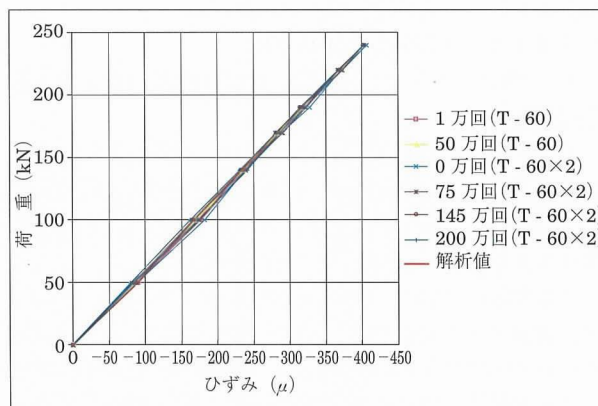


図 - 13 荷重とストラットひずみの関係

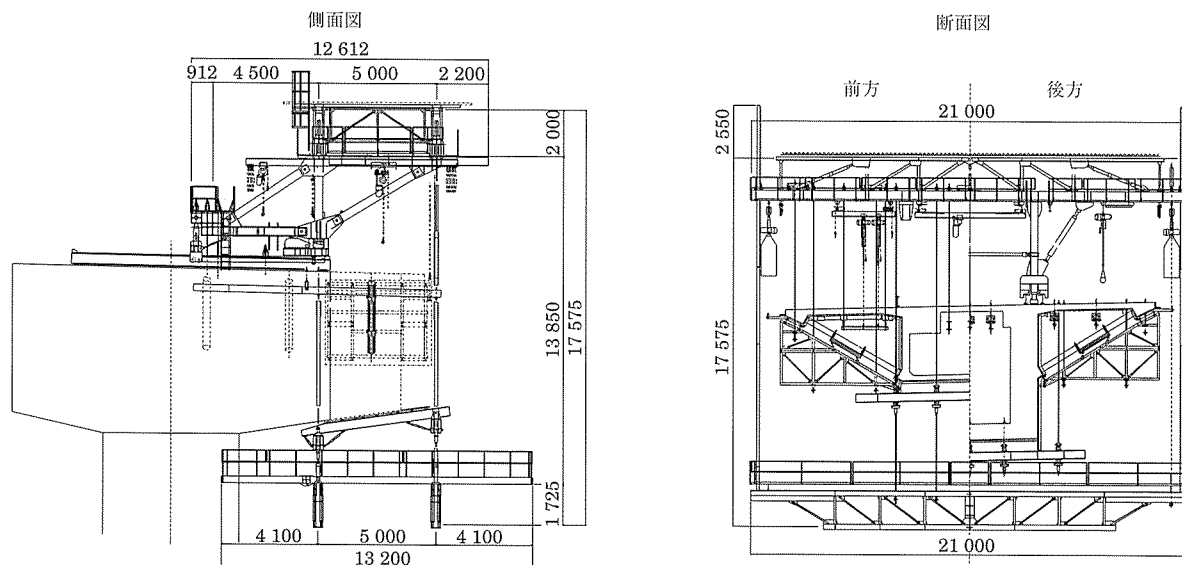


図 - 14 大型移動架設機（3 500kN・m の大型 2 主構ワーゲン）

5. ストラット付 PC 箱桁部の施工

本橋は、平成 13 年秋より本格的な施工に着手し、現在鋭意張出し施工中である。架設方法は、図 - 14 に示す大型移動架設機（3 500 kN・m の大型 2 主構ワーゲン）を用い、ストラットを一体化施工とした張出し架設工法にて行っている。

この場合、大型移動架設機の移動作業に伴う型枠移動時に、ストラットと型枠の一部とが干渉するようになる。すなわち、張出し架設工法の場合、ストラット付 PC 箱桁橋では、従来の PC 箱桁橋のように型枠を一体として移動することができず、型枠の一部小ばらしおよび分割移動が発生する。また、ストラットとの一体化施工のため、型枠据付けと同時に、ストラットを安全かつ精度よく据付けが必要がある。本工事ではストラットを受けるための架台（以下、ストラット受け架台）を製作し、これらの問題点に対処するものとした。図 - 15 に従来の PC 箱桁橋とストラット付 PC 箱桁橋の型枠施工フローの比較図を示す。

こうした中、本項では、ストラット付 PC 箱桁橋を張出し架設工法で施工する場合、特徴的施工ステップとなる「型枠の解体・移動・組立」ならびに「ストラットの設置方法」について、以下に述べるものとする。

① ストラット周辺部の型枠解体

図 - 16 にコンクリート打設、PC 鋼材緊張後の型枠解体概要図を示す。

ワーゲン移動時に型枠とストラットとが干渉するため、ストラット周辺部の型枠の一部を解体する必要がある。型枠の解体を必要とする部位は、ストラットの両端固定部となるエッジビーム部と連続リブ部である。

そこで型枠構造は、その部分の型枠フレーム（くし材）を、固定ピンで結合する構造にするとともに、ボルトピンを用いて回転できる構造とした。すなわち、固定ピンを抜くことで容易にフレームを回転させ、脱型できる構造とした。

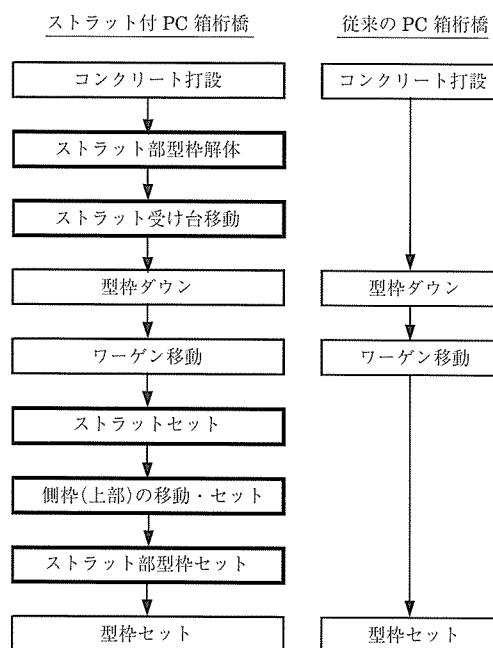


図 - 15 型枠施工フローの比較

② ストラット受け架台の移動

図 - 17 にストラット受け架台および連続ビーム部より下側の型枠移動概要図を示す。

ストラット受け架台は 3 本の架台縦梁と 6 本の吊鋼棒（総ネジ PC 鋼棒 φ 25）により吊り支えられている。前記①でのエッジビーム部および連続ビーム部の型枠脱型・解体後、吊り鋼棒の張力を解放すると同時に、連続ビーム部より下側の型枠を脱型する。さらに、吊り鋼棒を緩めストラット受け台の下（ワーゲン下段作業台の上）に設置した枠組支保工上に、これらストラット受け台と型枠を預ける。

ワーゲン移動に伴い、枠組支保工上に預けられたストラット架台・エッジビーム部型枠および連続ビーム部を含む下側型枠は、同時に移動する。このとき、主桁底版型枠な

らびに BOX 内上床版型枠もいっしょに移動させる点は、従来の PC 箱桁橋の場合と同様である。

③ストラットの設置

図 - 18 にストラット設置の概要図を示す。

ストラット受け架台に据付けるストラットは、はじめに橋面上などにおいて、あらかじめ製作された専用のストラット固定治具にセットする。作業性のよい、平らな橋面上において、専用のストラット固定治具に正確かつ精度よくセットすることは、本工事で用いた鋼製ストラットの設置工において、きわめて重要である。

このストラット固定治具にセットされたストラットを、その状態のままストラット受け架台の所定の位置に据付ける。ストラットの固定治具と受け架台とは、精度よく加工されたボルト止め構造で組立接合ができ、互いの接合部が合致できれば、基本的にストラットが所定の位置に据付けられる仕組みとなっている。なお、固定治具へのストラットのセットおよびその後のストラット受け架台への据付けは、全てワーゲン本体に設けられた荷役設備（電動チェーンブロック）により実施した。

さらに、ストラット固定治具は、ストラットの長手方向および橋軸方向の角度（上下端の倒れ）の微調整が行える構造となっている。これにより、わずかな施工誤差等に対しては、ストラット架台への据付け完了の後も、対応できる構造としている。

④張出し床版型枠の移動とセット

図 - 19 に張出し床版型枠および連続ビーム部より上側の型枠の移動概要図を示す。

ストラットのストラット受け架台への据付け完了後、それら型枠類の前方への引出し作業を実施する。張出し床版型枠は、BOX 内上床版型枠と同様に、型枠縦梁と吊り鋼棒により吊り支えられている。本橋では、張出し床版型枠を 2 本の型枠縦梁で支えており、その型枠の引出し作業を、レバーブロックを用いて実施した。この作業では、先に引出されたストラット受け架台上に作業足場を設け、安全にバランス良くかつ鋼管ストラットにキズをつけないよう慎重に引出すことに留意した。

また、このような施工方法より、張出し床版部の型枠縦梁も BOX 内上床版型枠縦梁と同様に、2 ブロック施工長の長さが必要となる。通常の PC 箱桁橋の場合、これらの側枠・張出し床版型枠を一体として、枠組支保工上に預けることができるため、その型枠縦梁長さは 1 ブロック施工長分でよい。張出し床版型枠構造において、従来の PC 箱桁橋との大きな相違の一つがここにある。

⑤ストラット周りの型枠セット

図 - 20 にストラット周り（エッジビーム部および連続ビーム部）の型枠組立概要図を示す。

前記 ①で小ばらし解体した型枠を、逆の要領で組み立てる。ただし、この場合、ストラットの間隔および主桁ブロックの分割長によっては、主桁単ブロックにおけるストラットの位置関係が変化する。

本工事では、こうした各ブロック施工でのストラット位置の変化に対しても、対応できるよう型枠割付を考慮し、

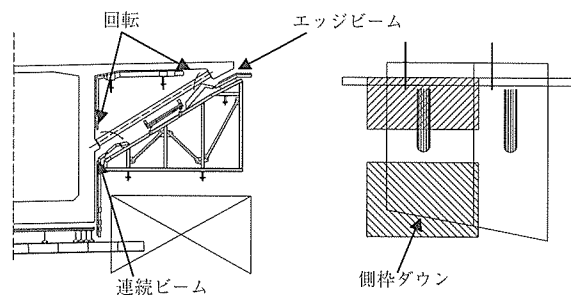


図 - 16 ストラット周辺部の型枠解体

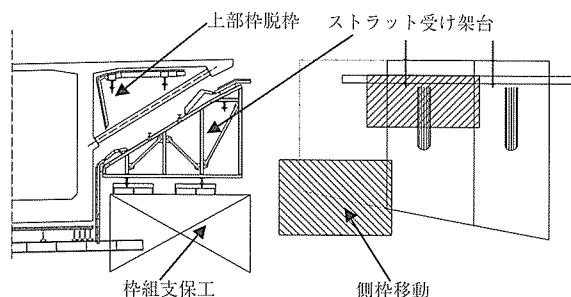


図 - 17 ストラット受け架台の移動

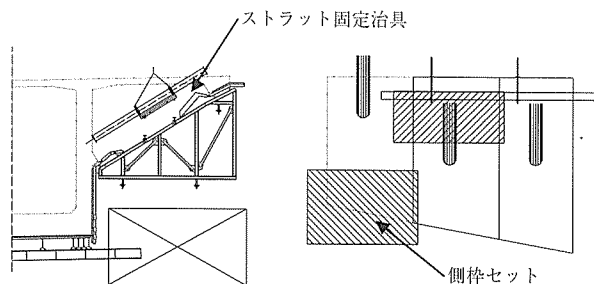


図 - 18 ストラットの設置

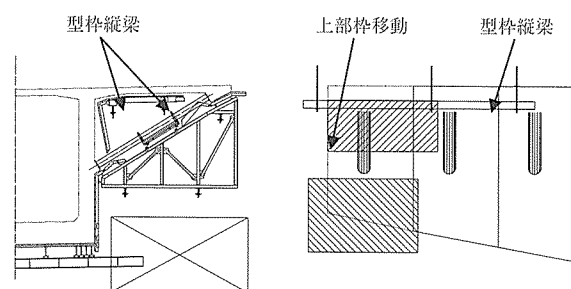


図 - 19 張出し床版型枠の移動とセット

鋼製型枠の製作を実施した。また、当然ではあるが、ストラット受け架台についても、ストラット据付け位置の変化に対応できる構造としている。

以上の施工ステップで、型枠の解体・移動・組立ならびにストラットの据付け作業が完了となる。その後は、従来の張出し施工と同様に、鉄筋、PC 鋼材（偏向管含む）、内型枠の組立を行い、コンクリートを打設する。そして、適切なコンクリート養生の後、所定のコンクリート強度確認

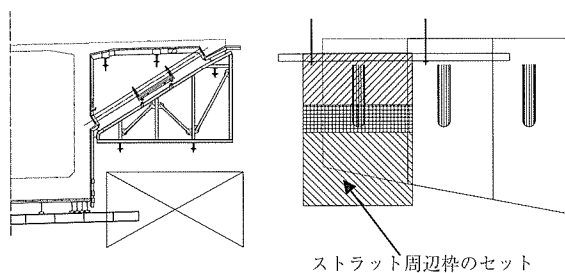


図 - 20 ストラット周りの型枠セット

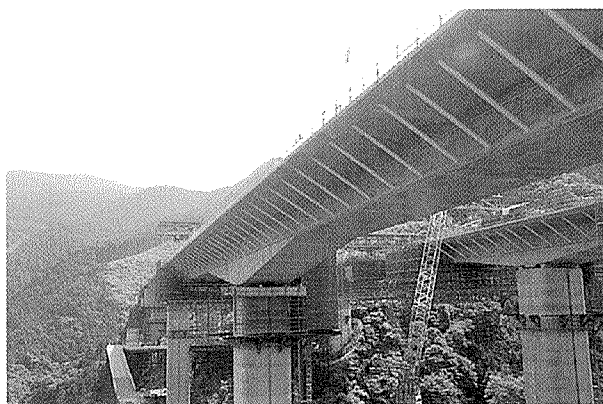


写真 - 4 施工状況

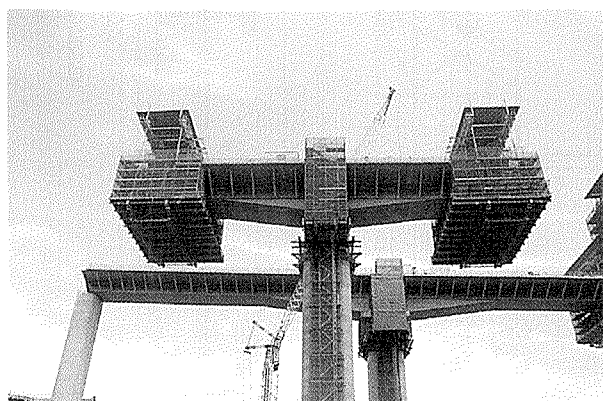


写真 - 5 施工状況

後、PC 鋼材の緊張工を行い、再度、上記の施工ステップに入っていくことになる。

本橋においては、以上のような施工方法にて、現地の施工を行っており、平成 15 年 6 月末現在、下り線（2 径間連続ラーメン橋）の橋体工は完成し、8 箇所の柱頭部施工はすべて完成している。写真 - 4, 5 に示すように、張出し施工は、全 184 ブロック中、134 ブロックの施工を終え、完成に向け鋭意施工中である。

6. あとがき

ストラット付 PC 箱桁橋は、急峻山岳地あるいは広幅員の橋梁建設における、工費削減を可能とする合理的な構造となるものではないかと考えられる。

国内で初めて採用、施工されたストラット付 PC 箱桁橋が今後計画・施工される同種の設計・施工の一助となれば幸いである。

謝 辞

本橋の設計・実験・施工にあたり、「ストラット・リブに支持された床版を有する PC 橋の設計施工に関する技術検討委員会（委員長：日本大学山崎淳教授）から、貴重なご意見、ご指導を頂きました。ここに、山崎委員長をはじめ、関係各位の皆様に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) FUKUNAGA, OSADA, NAKAJIMA, NISISU : Design and Experimental Research of Prestressed Concrete Box Girder Bridge supported Cantilevering Deck Slab with Inclined Struts, The First fib Congress 2002 (2002.10)
- 2) 福永：ストラット付 PC 箱桁橋の設計と施工（第二東名高速道路 芝川高架橋），橋梁と都市（2003.9）

【2003 年 7 月 23 日受付】