

## PC複合トラス橋の設計

さるたがわ      ともえがわ  
— 猿田川橋・巴川橋（上り線） —

|      |       |      |
|------|-------|------|
| 技術本部 | 土木技術部 | 鈴木宣政 |
| 技術本部 | 土木技術部 | 藤岡篤史 |
| 技術本部 | 土木技術部 | 伊藤祐一 |

**概要：**猿田川橋・巴川橋は、新東名高速道路のうち静岡 I.C.～清水 I.C.（仮称）間の静岡市北東部に位置する PC 複合トラス橋である。本構造形式は、コンクリート上下床版と鋼トラスウェブを組み合わせた構造であり、主桁の軽量化や周辺環境にとけ込みやすい景観性に特徴がある。2006 年 1 月に下り線工事が完成を迎えているが、今回上り線工事では下り線で得られた知見をもとに断面形状を変更するなどの更なるコスト縮減への取り組みを行っている。

**Key Words：**複合，トラス，格点構造，コスト縮減

## 1. はじめに

猿田川橋・巴川橋（上り線）は、静岡市中心部から北東に約 7.5km に建設される橋長 610m（7 径間）および橋長 479m（5 径間）の PC 連続ラーメン複合トラス橋である。この構造は、PC 箱桁橋のコンクリートウェブを軽量の鋼トラス材に置換した複合構造である。従来の PC 箱桁橋に対して以下の長所を有している。

- ①主桁の軽量化による下部構造および基礎構造を含めた橋梁全体の合理化
- ②ウェブの型枠・鉄筋組み立てやコンクリート打設の不要による施工の省力化
- ③ウェブの透過性を活かした景観性

本橋の構造形式選定の条件は、i)架橋地点が山岳地であることから長支間化が可能な構造、ii)有効幅員 16.5m の広幅員を有する山岳橋梁であるため死荷重の軽減と下部構造・基礎構造の縮小化、iii)橋梁全体が市街地からも眺望できるため周辺の自然環境にとけ込む景観性、であった。そこで、軽量化と景観性の要求を満足する構造として PC 複合トラス構造が採用されている。写真-1 に完成予想図を示す。

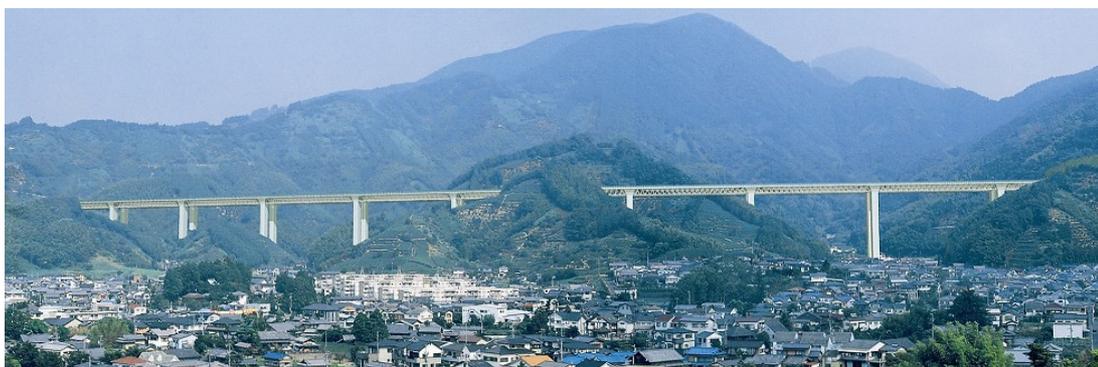


写真-1 完成予想図



鈴木宣政



藤岡篤史



伊藤祐一

## 2. 橋梁概要

### 2.1 橋梁諸元

本橋の諸元は下記の通りである。図-1に構造一般図を、図-2に主桁概要図を示す。また、表-1に使用材料一覧を示す。

工事名：第2東名高速道路 猿田川橋（PC 上部工）上り線工事

施主：中日本高速道路（株）横浜支社

工事場所：静岡県静岡市葵区北

工期：平成18年4月～平成21年3月

構造形式：（猿田川橋）PC 7径間連続ラーメン複合トラス橋

（巴川橋）PC 5径間連続ラーメン複合トラス橋

橋長：（猿田川橋）610m （巴川橋）479m

支間割：（猿田川橋）48.5 + 2@90.0 + 100.0 + 2@110.0 + 58.5m

（巴川橋）59.5 + 3@119.0 + 59.5m

幅員：（全幅員）17.615m（有効幅員）16.5m

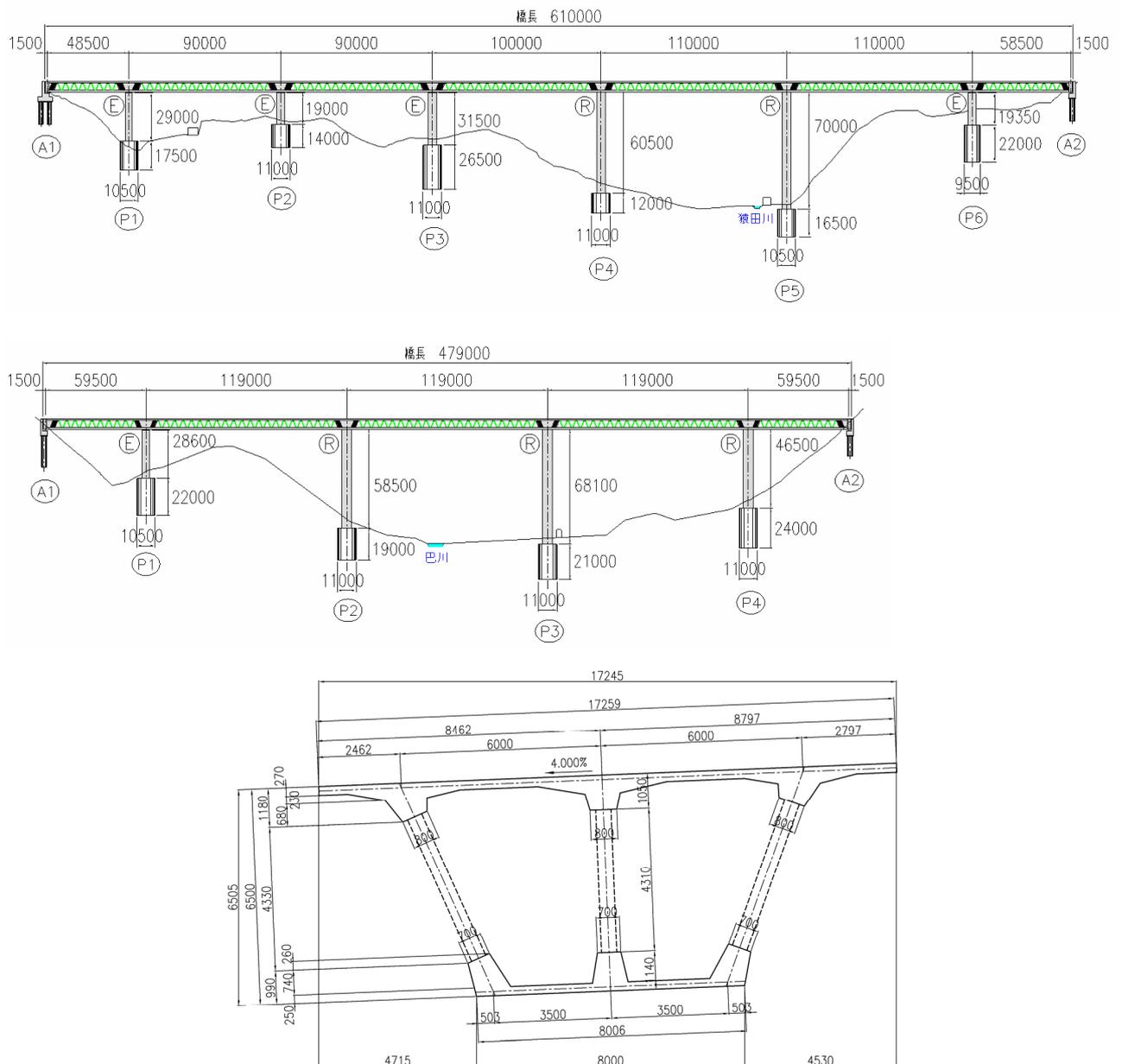


図-1 構造一般図

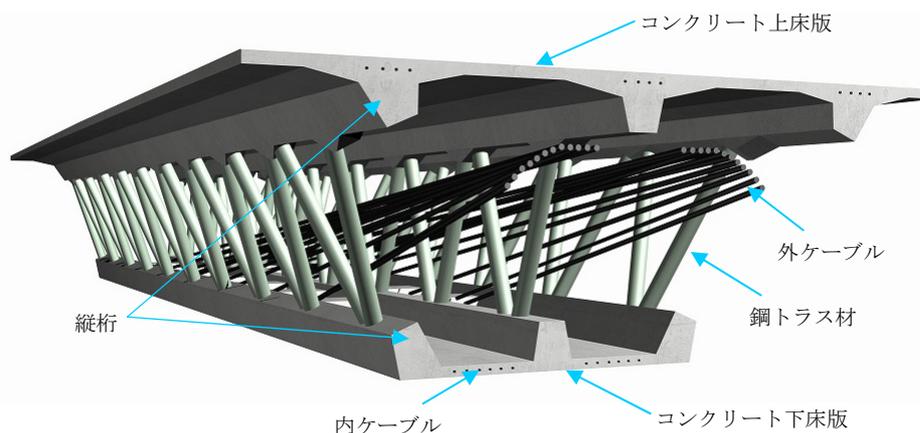


図-2 主桁概要図

表-1 使用材料

| 項目     | 仕様                                | 摘要                           |
|--------|-----------------------------------|------------------------------|
| コンクリート | $\sigma_{ck} = 40 \text{ N/mm}^2$ |                              |
| PC鋼材   | 12S15.2 (SWPR7BL)                 | 内ケーブル                        |
|        | 19S15.2 (SWPR7BL)                 | 外ケーブル (マルチ亜鉛メッキ)             |
|        | 1S21.8 (SWPR19L)                  | 上床版横締め                       |
|        | 1S28.6 (SWPR19L)                  | 横桁横締め                        |
| 鋼部材    | SM490YB, SM520C-H                 | 鋼トラス材 ( $\phi 457.2$ ) ・格点構造 |

## 2.2 主桁構造

図-1, 2に示したように, 上・下床版は場所打ちコンクリート床版, ウェブはワーレントタイプの鋼トラス材を橋軸方向に 5m 間隔で配置している. 主桁の施工は移動作業車を用いた張出架設工法で行い, その施工能力から1セグメント長を 5m としている. 断面方向のトラス材配置は3主構を採用し, 下り線工事での4主構から主構数を減らすことで更なるコスト縮減を図っている.

床版には「縦桁」と呼んでいるコンクリートビームを橋軸方向に配置し, この縦桁において床版とトラス材を接合している. また, この縦桁の配置により, 床版支持状態を格点部での点支持から縦桁での線支持とすることで, 床版設計での支配的支間方向を橋軸直角方向としている. 本橋の有効幅員は新東名高速道路の標準幅員である 16.5m であるが, 斜ウェブを採用し下床版幅を 8m とすることで下部構造の縮小化を図っている. また, 桁高変化に対する主桁重量増減の感度が低いという鋼トラスウェブの特性を活かして, 施工性や景観性の観点から 6.5m の等桁高としている. 最大支間に対する桁高支間比は, 猿田川橋で 1/16.9 (支間 110m), 巴川橋で 1/18.3 (支間 119m) である.

## 2.3 格点構造

図-3に本橋で使用する格点構造の概要図を示す. コンクリート床版と鋼トラス材の接合部である格点部は, 本構造の特徴的な構造であると同時に, 重要な構造部位である. 本橋の最大支間は 119m (巴川橋) と長支間であるため, 格点部には高い耐力が要求される. 図-3に示した「二面ガセット格点構造」は, 下り線工事に際し開発され採用された構造で, 高い耐力を有している. 本格点構造は, 鋼トラス材に溶接したガセットプレートを高力ボルトにより二面摩擦接合とし, 隣接するトラス材の軸力を鋼部材で直接伝達する構造である.

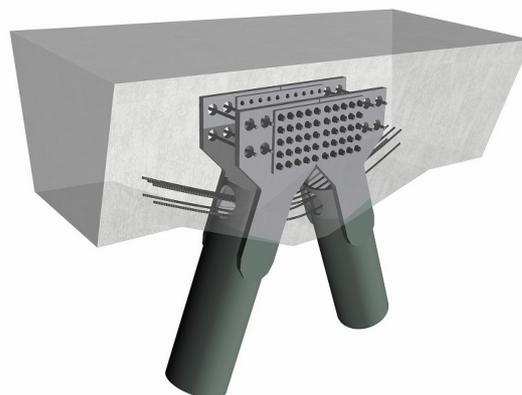


図-3 二面ガセット格点構造

### 3. コスト縮減への取り組み

#### 3.1 コスト縮減方針

下り線工事では、その施工を通して解析的検討、模型実験、施工時計測および実橋載荷試験を実施し、設計の妥当性の確認を含め多くの知見が得られている<sup>1),2),3),4)</sup>。今回上り線工事では、それらの知見をもとに更なるコスト縮減への取り組みを行っている。

図-4に下り線工事における工費分析結果を示す。主要材料のうち鋼部材（トラス材・格点構造部材）が全体に占める割合は29%であり、最も高い割合となっている。したがって、鋼重を減らすことがコスト縮減につながると考え、以下について検討を行っている。

- ①主桁断面形状の検討：主構数を下り線の4主構から3主構に減らすことで鋼重の減少を図る。
- ②格点構造の検討：格点構造のコンパクト化により鋼重の減少を図る。

#### 3.2 主桁断面形状の検討

図-5に主構数変更の概要を示す。下り線では、主桁断面として4主構のワーレントラス配置が採用されている。上り線では、通常の2室箱桁と同様に考えて、内ウェブを直ウェブ配置とする3主構断面に変更する。このように主構数を減少することにより、i)横方向断面剛性の低下、ii)ねじり剛性の低下が懸念される。下り線において実施された実橋計測およびFEM解析の結果、適切な解析により実構造物の性状を高い精度で推測可能であることが明らかになっている。そこで、上記の課題に対して3次元FEM解析を実施し、下り線の4主構断面と比較を行うことにより3主構断面の安全性を検証した。

##### (1)横方向断面剛性の検討

解析モデルを図-6に示す。解析モデルは、猿田川橋の最大支間長110mの径間を対象とした半径間モデルである。コンクリート部材はソリッド要素、鋼トラス材は梁要素でモデル化し、梁要素（鋼トラス材）を縦桁内に埋め込んだモデルとしている。荷重は、レベル2地震動に相当する橋軸直角方向慣性力を作用させる。

変形に関する解析結果を表-2および図-7に示す。また、橋軸方向の曲げ応力の結果を図-8に示す。変形量および曲げ応力度ともに4主構と3主構で有意な差は見られず、ほぼ同様の変形および応力性状が示されている。これにより、主構数の減少に伴う横方向剛性の低下はほとんどないことが確認されている。

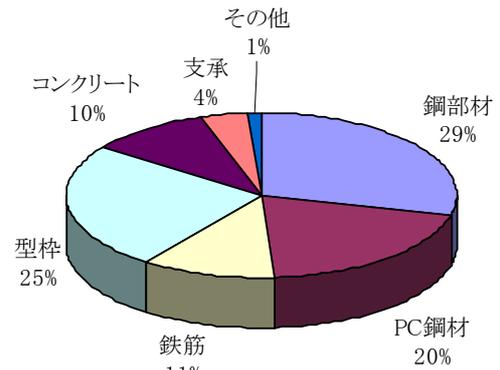


図-4 工費分析結果

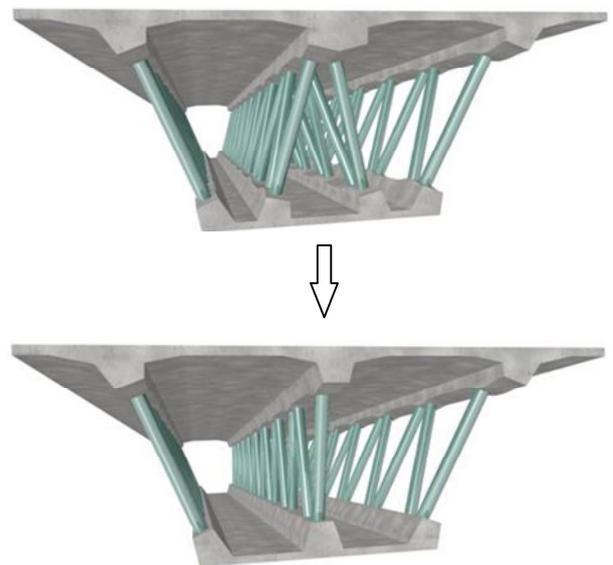


図-5 主構数変更概要図

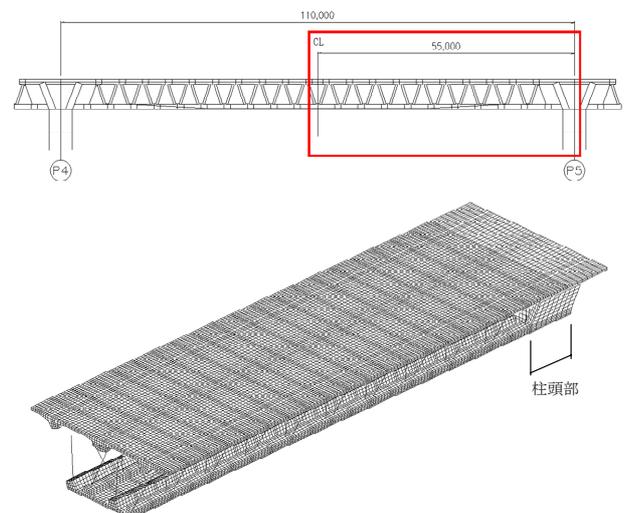


図-6 解析モデル（横方向剛性検討）

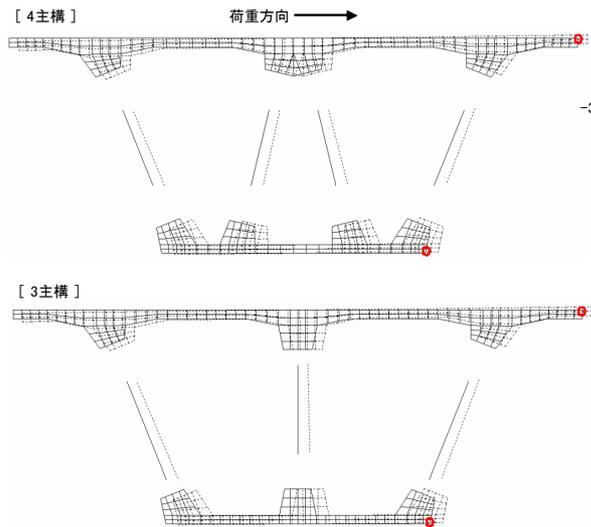


図-7 変形図 (径間中央)

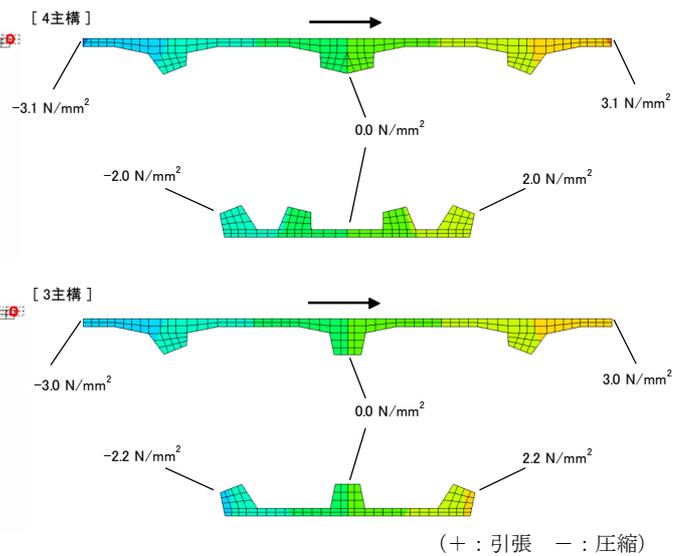


図-8 曲げ応力度 (径間中央)

表-2 解析結果 (径間中央の変形量 : mm)

| 位置  | 4主構  |      | 3主構  |      |
|-----|------|------|------|------|
|     | 水平方向 | 鉛直方向 | 水平方向 | 鉛直方向 |
| 上床版 | 9.9  | 3.0  | 9.7  | 3.3  |
| 下床版 | 12.9 | 1.2  | 13.3 | 1.0  |
| 変位差 | 3.0  | 1.8  | 3.6  | 2.3  |

※表中の値は図-7の○印の位置

(2)ねじりに対する検討

解析モデルを図-9に示す。解析モデルは、全長50mの片持ち梁とし、一端を完全固定とする。荷重は、B活荷重半断面載荷相当のねじりモーメントを自由端に作用させる。

ねじり角の分布および変形図 (全体・自由端) を図-10および図-11に示す。ねじり角の分布によると、3主構のねじり角の方が若干大きくなっているがその差は小さく、両者とも分布はほぼ直線になっている。変形図においても異常な変形は見られず、両者ともに全長に渡り一樣な変形をしていることがわかる。

そり応力 (橋軸方向) およびせん断応力の解析結果を図-12に示す。下床版に発生するそり応力およびせん断応力は、3主構の方が若干大きい値を示しているが、その差は小さい。また、発生応力度はコンクリートで十分負担できる大きさであることから、ねじりに対しても問題ないと判断される。

以上、下り線の4主構断面との比較検討を行った結果、3主構断面とすることによる横方向剛性およびねじり剛性の低下は確認されないことから、上り線工事では3主構断面が採用された。

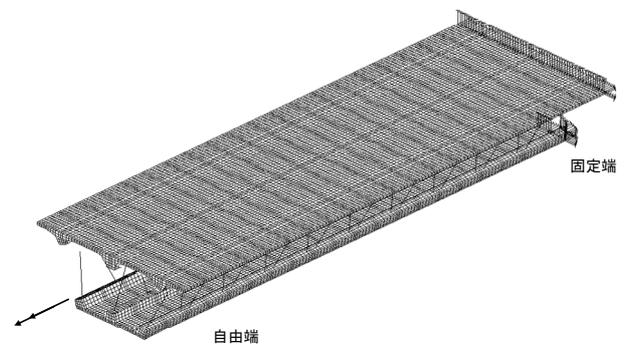


図-9 解析モデル (ねじり検討)

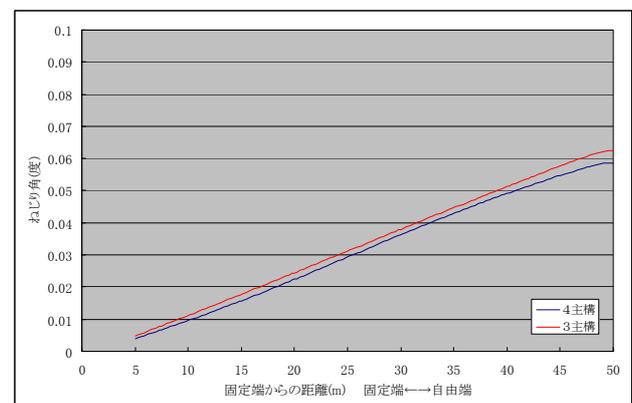


図-10 ねじり角分布

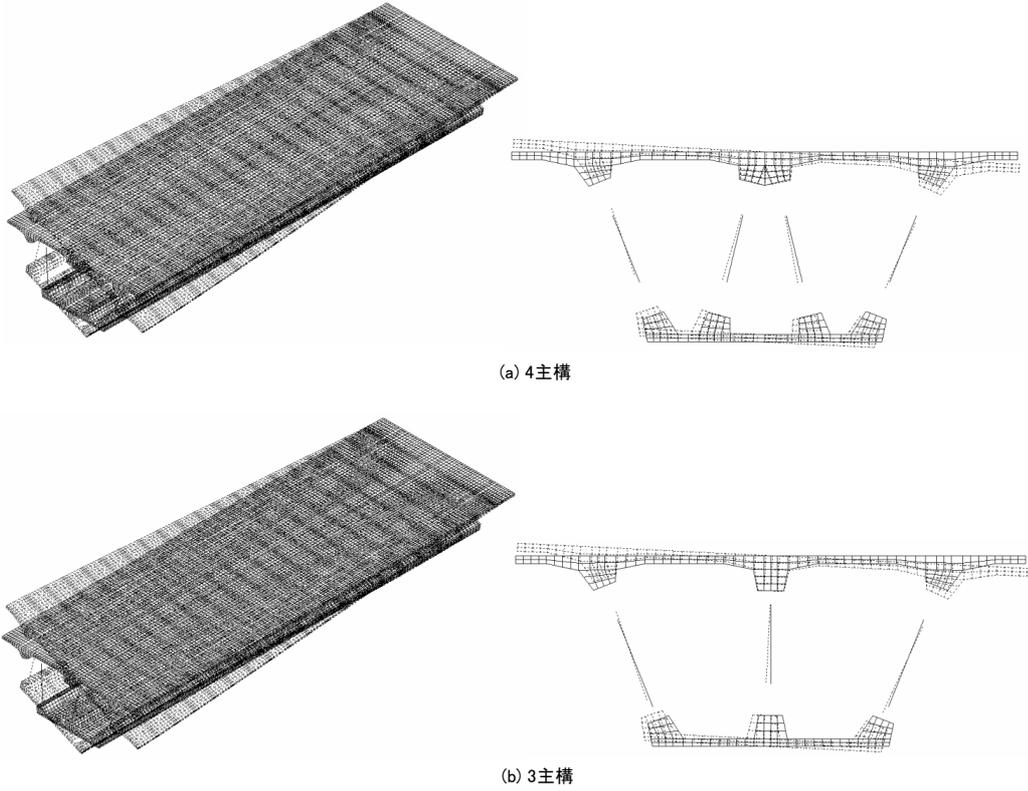


図-1-1 解析結果 (変形図)

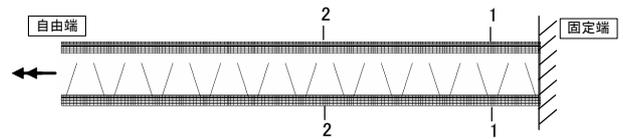
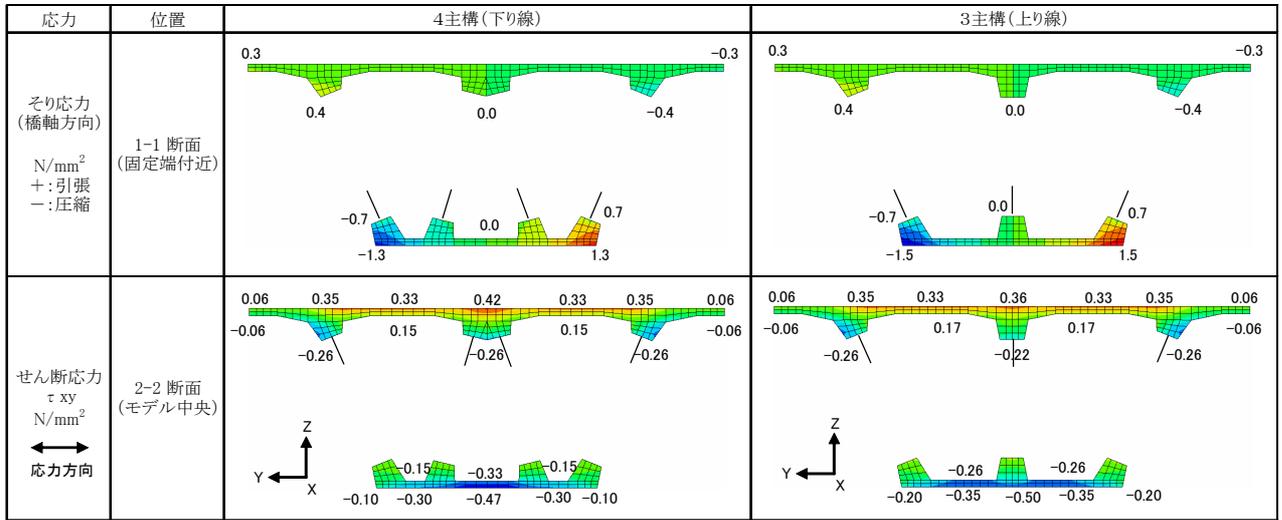


図-1-2 解析結果 (そり応力・せん断応力)

### 3.3 格点構造の検討

図-13に下り線にて採用された格点構造を示す。図-13(a)の二重管格点構造は、鋼とコンクリートの合成効果を期待した構造でコンクリートを介して力を伝達する機構である。図-13(b)の二面ガセット構造は、鋼材間で直接力を伝達する機構で高い耐力を有している。下り線では両者の格点構造を併用しており、鋼重が少なく経済的である二重管格点構造を基本配置とし、高軸力が作用する格点に対して二面ガセット格点構造を採用している。しかしながら、上り線では主構数を減じ3主構断面とすることから、鋼トラス材1本あたりに作用する軸力が増加し、高軸力タイプの二面ガセット格点構造の適用範囲が広がるものと予想される。表-3に格点タイプの配置比率について、下り線実績および3主構断面での試算結果を示す。表に示すように、3主構断面とした場合、主構数の減少により格点の絶対数が減少するため全体工事費は経済的となるが、二面ガセット格点構造の割合が増加することで格点1箇所あたりの工費は高くなる。したがって、二面ガセット格点構造の形状を縮小できれば更なるコスト縮減につながると考え、二面ガセット格点構造のコンパクト化について検討を行っている。

図-14(a)に下り線にて使用された作用軸力4000kN対応の二面ガセット格点構造を示す。この構造寸法は、併用する二重管格点構造とのプロポーシヨンの関係から図のようにトラス材軸線のズレ量を設定し決定されたものである。一方、二面ガセット格点構造を単独で寸法設定した場合、図-14(b)に示すようにトラス材軸線のズレ量を小さくでき格点構造を小さくすることが可能である(1格点あたり約10%の鋼重減)。しかしながら、変更形状では二重管格点構造とトラスの配置角

表-3 格点タイプの配置比率

|                | 全格点数 | 配置比率 (%) |          |
|----------------|------|----------|----------|
|                |      | 二重管格点    | 二面ガセット格点 |
| 下り線4主構<br>(実績) | 1536 | 63       | 37       |
| 上り線3主構<br>(試算) | 1128 | 40       | 60       |

※下り線実績：文献4)

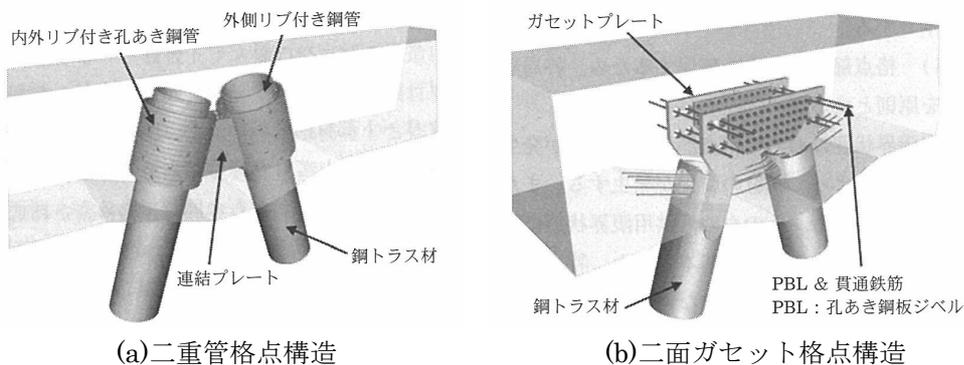


図-13 下り線の格点構造 (図は文献5)より引用)

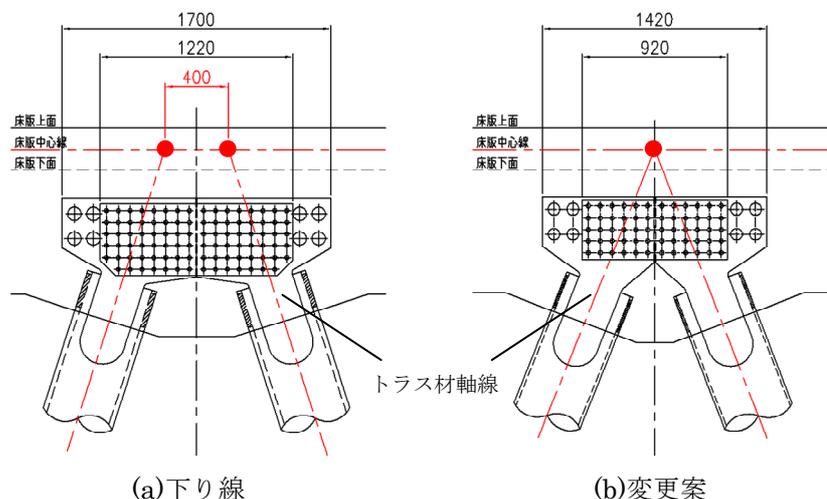


図-14 格点構造の形状比較 (作用軸力4000kNタイプ)

度が異なるため、変更案を用いる場合には全格点を二面ガセット格点構造に統一する必要がある。そこで、2種類併用ケースと二面ガセット統一ケースで経済比較を行っている。その結果、二面ガセット統一ケースの方が経済的となるため、本橋では全格点に対して二面ガセット格点構造が採用されている。

### 3.4 コスト縮減効果

4主構と3主構の数量比較を表-4に示す。主構数の減少および格点構造のコンパクト化により、鋼部材の重量は3割程度減少しており、全体工事費を5%程度縮減できる予定である。

表-4 数量比較 (猿田川橋・巴川橋)

|      |         |     | 4主構    | 3主構    | 増減     |
|------|---------|-----|--------|--------|--------|
| PC鋼材 | 12S15.2 | ton | 377.9  | 376.4  | -1.5   |
|      | 19S15.2 | ton | 386.0  | 393.4  | 7.4    |
| 鋼部材  |         | ton | 2849.0 | 2033.3 | -815.7 |

## 4. 設計概要

### 4.1 主方向の設計

#### (1)構造解析モデル

主方向の構造解析に用いた解析モデルを図-15に示す。主方向の構造解析には、トラスの構成部材(上・下床版・斜材)に発生する断面力を適切に評価するために、平面骨組モデルを用いている。また、上下床版はそれぞれ独立した部材としてモデル化していることから、外ケーブルの効果を定量的に評価するため、外ケーブルは部材としてモデル化する。柱頭部および桁端部の箱桁断面については、通常の間桁橋と同様に梁部材としてモデル化している。箱桁断面からトラス断面へ遷移する区間については、剛部材と仮斜材を用いてモデル化している。仮斜材の剛度はFEM解析とFRAME解析との比較から決定している。部材の結合条件は剛結合とし、格点部における床版軸線と鋼トラス材軸線とのズレも考慮する。解析は、施工段階を考慮したステップ解析を行い、各部材の断面力を算出する。なお、上・下床版はそれぞれ単独の部材として照査を行う。

本橋は3主構断面であることから、断面方向の各トラス材の荷重分担は異なると考えられる。また、外トラスは断面に対して斜めに配置されているため、その影響も考慮する必要がある。そこで、鋼トラス材断面力の算出に当たっては、立体骨組モデルを用いて荷重分担の検討を行っている。主桁自重に関しては、立体骨組解析により各トラス材の分担率を算出し、平面骨組解析で得られた断面力を補正する。活荷重および橋面荷重については、影響面載荷の影響や荷重作用位置の影響があるため、立体骨組解析により各トラス材の断面力を直接評価する。なお、クリープ・乾燥収縮およびプレストレスによる断面力については、自重による分担率を用いて補正を行う。また、外ケーブルの偏向力により自重と逆向きのせん断力が作用するが、この分担率は3次元FEMモデルを用いて算出し、平面骨組解析による断面力を補正する。表-5に猿田川橋における内・外トラス材の断面力分担比率の一例を示す。

表-5 断面力分担比率

|            | 内トラス | 外トラス |
|------------|------|------|
| 自重         | 1.00 | 0.89 |
| 橋面荷重       | 1.00 | 1.06 |
| 活荷重        | 1.00 | 1.00 |
| 外ケーブル逆せん断力 | 1.00 | 0.80 |

#### (2)PC鋼材配置

本橋では表-1に示したように、上床版の架設内ケーブルおよび下床版の完成系内ケーブルとして12S15.2を、架設外ケーブルおよび完成系外ケーブルとして19S15.2を使用している。鋼トラス材に作用する軸力は、通常の間桁橋のウェブに作用するせん断力が置き換わったものと考えられるため、外ケーブルの偏向力により自重と逆向きのせん断力を与えることで、鋼トラス材に作用する軸力を低減することが可能である。3章にて述べたように、鋼部材の重量を低減することによりコスト縮減につながることから、本橋では外ケーブルを積極的に配置し架設ケーブルにも外ケーブルを使用している。本橋(猿田川橋)のPC鋼材配置概要を図-16に示す。

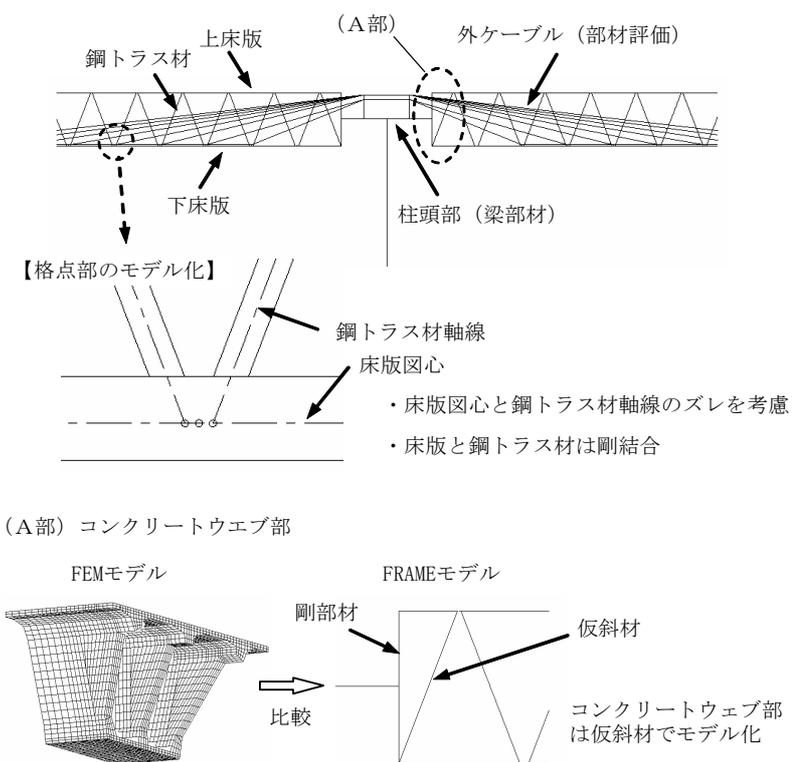
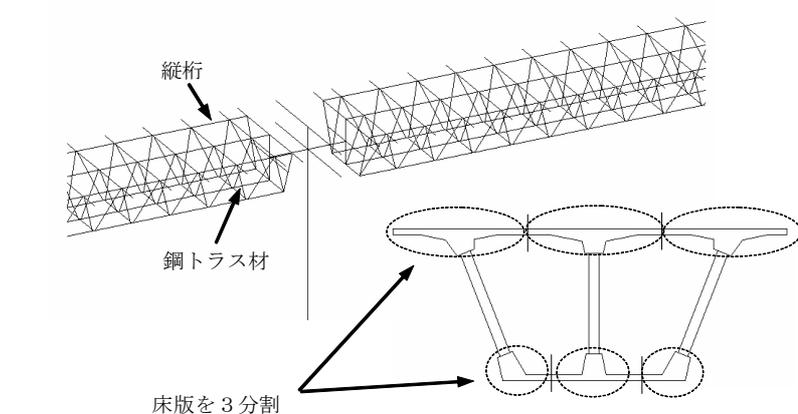
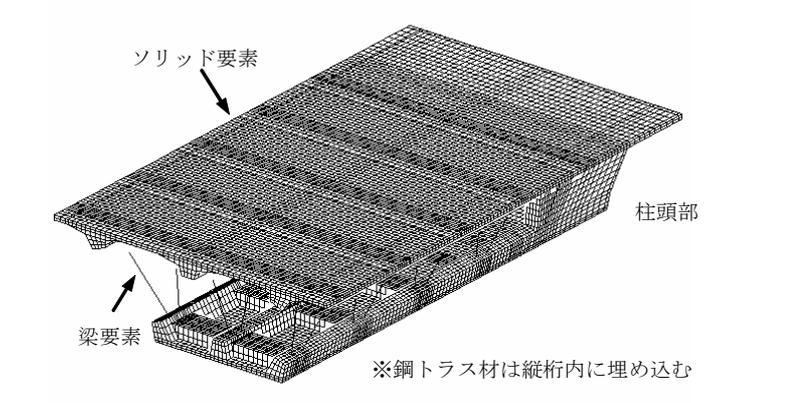
|                  | 解析モデル  | 摘要   |
|------------------|--|--|
| <p>平面骨組モデル</p>   | <p style="text-align: center;">解析モデル</p>  <p>(A部) コンクリートウェーブ部</p> <p>FEMモデル      FRAMEモデル</p> <p>剛部材      仮斜材</p> <p>比較      コンクリートウェーブ部は仮斜材でモデル化</p> | <p>各部材の断面力を算出<br/>                 施工順序を考慮したステップ解析</p>   |
| <p>立体骨組モデル</p>   |  <p>縦桁</p> <p>鋼トラス材</p> <p>床版を3分割</p>  | <p>各荷重による内、外トラス材の荷重分担の検討</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・死荷重分担率の算出</li> <li>・活荷重断面力の算出</li> <li>・橋面荷重断面力の算出</li> </ul> |
| <p>3次元FEMモデル</p> |  <p>ソリッド要素</p> <p>梁要素</p> <p>柱頭部</p> <p>※鋼トラス材は縦桁内に埋め込む</p>  | <p>外ケーブル偏向力による逆せん断力の内・外トラス材分担率の算出</p>  |

図-15 主方向の解析モデル

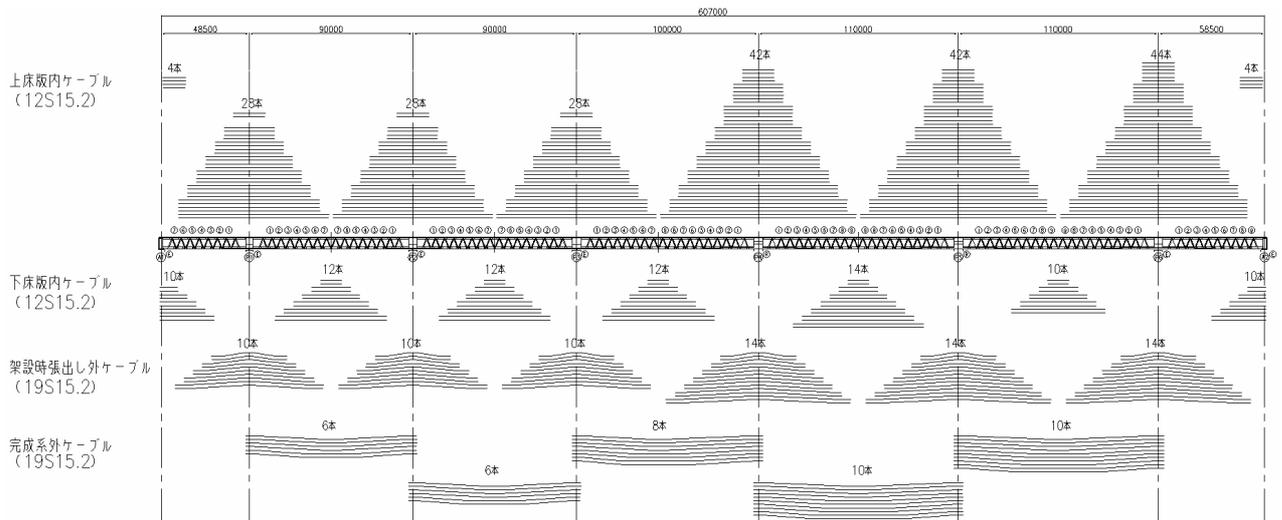


図-16 PC鋼材配置概要図(猿田川橋)

### (3)鋼トラス材の設計

鋼トラス材には、溶接構造用圧延鋼材を用いた市販品のUOE鋼管(SM490YB, 外径 $\phi$ 457.2,  $t=9\sim 30\text{mm}$ )を使用している。鋼トラス材の設計は、格点部において剛結合されていることから、軸方向力と曲げモーメントが作用する部材として道路橋示方書Ⅱ鋼橋編<sup>6)</sup>に従って行う。高軸力が作用する圧縮材については、鋼管内部に主桁と同様のコンクリートを充填したCFT構造(Concrete Filled steel Tube)とし、局部座屈の抑制を図るとともに鋼管板厚の低減を図っている。UOE鋼管 $\phi$ 457.2mmの製造可能板厚は30mmであるが、これを超える板厚が必要となる圧縮材に対してCFT化を図る。CFTの設計は、土木学会鋼構造物設計指針PART B 合成構造(第4編合成柱編)<sup>7)</sup>に従って部材耐力の照査を行う。

鋼管板厚の選定においては、前述の構造解析により得られた断面力に対して1mm単位で決定することを基本方針としている。しかしながら、解析モデルにおいて結合条件を剛結合としていることや軸線のズレを考慮しているため、一般的な鋼トラス橋(解析の結合条件:ピン結合)とは異なり、鋼トラス材の剛度(板厚)の変化に対して各部材に発生する断面力(特に曲げモーメント)の変化が敏感である。したがって、鋼管板厚の選定に際しては、隣接する鋼管や断面内の内・外トラス材の剛度の関係を考慮して決定することが重要である。

#### 4.2 床版の設計

PC複合トラス橋の床版は、通常のPC箱桁橋のコンクリートウェブにより橋軸方向に連続的に支持される床版とは異なり、鋼トラス材が接合される格点部において断続的に支持される構造である。本橋では、格点部において縦桁を配置し連続的な支持構造とすることで、床版設計における支配的な支間方向を橋軸直角方向にしている。

床版の断面力算出は、床版に直接的に作用する荷重(自重・橋面荷重・活荷重)については3次元FEM解析により行い、その他の間接的に作用する荷重についてはFRAME解析により行う。表-6に各荷重に対する断面力算出方法の一覧を示す。

図-17に自重、橋面荷重および活荷重による断面力算出用の解析モデルを示す。解析モデルは、境界条件の影響が出ないように、橋軸方向に5セグメント分(5m $\times$ 5=25m)をモデル化している。自重および橋面荷重は解析モデルに直接載荷する。活荷重は、格点上および格点間に対して影響線載荷を行い、最も不利になるようにT荷重を載荷する。図-18に活荷重による曲げモーメント分布を示す。正の曲げモーメントは、格点上と格点間でほぼ同様な分布となっている。負の曲げモーメントについては、縦桁近傍において格点上載荷の方が10~20%程度大きな曲げモーメントとなっている。

また、本橋の床版は、広幅員であり縦桁部において断面が急変することから、張出し架設時の打継目部および中央閉合部に対して温度応力解析も併せて実施している。以上から、床版横締め(1S21.8)の配置は、標準部500mmピッチ、打継目付近375mmピッチ、中央閉合部250mmピッチとなっている。

表-6 断面力算出方法

|           | FEM | FRAME |
|-----------|-----|-------|
| 自重        | ○   |       |
| 橋面荷重      | ○   |       |
| 活荷重       | ○   |       |
| プレストレス    |     | ○     |
| クリープ・乾燥収縮 |     | ○     |
| 温度変化      |     | ○     |
| 風荷重       |     | ○     |
| 衝突荷重      |     | ○     |

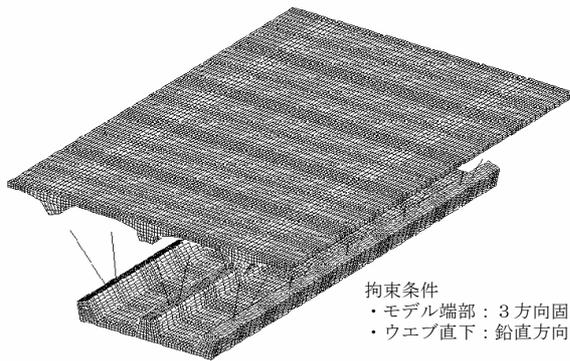


図-17 解析モデル (床版の設計)

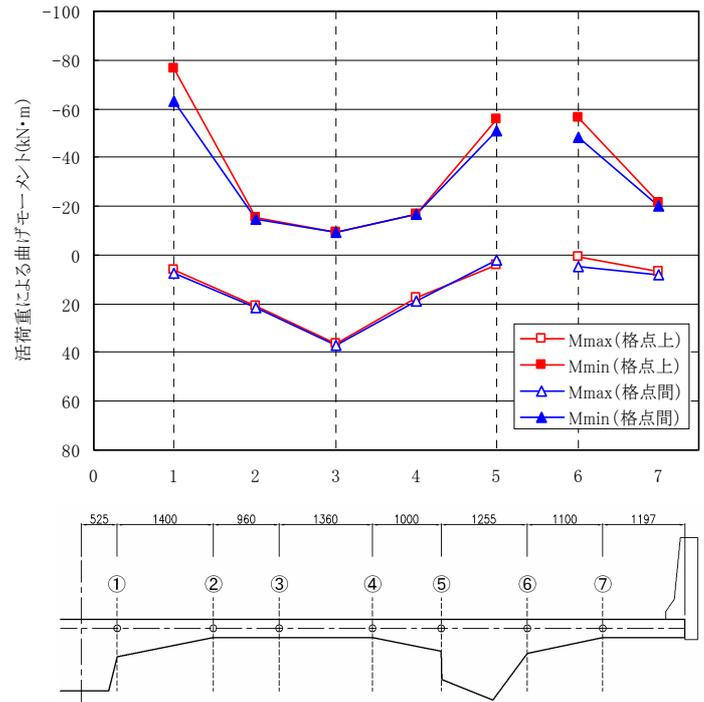


図-18 活荷重による曲げモーメント

## 5. あとがき

PC 複合トラス橋の国内実績は、道路橋の桁橋形式に限れば下り線を含め現時点で 3 例である。実績の少なさからもわかるように、その設計手法は確立されていない。そのため、下り線工事や同種橋梁の分析、解析モデルの検討、3次元 FEM をはじめとする解析的検討など、さまざまな検討を行った。本報告はその一部を紹介したものであるが、同種橋梁に限らず最近増加している技術提案の 1 つのヒントになれば幸いである。

本橋工事は、平成 19 年 6 月現在、猿田川橋の柱頭部の施工が開始されたところである。次号技報第 6 号では設計の詳細に加えて施工についても報告できればと思っている。

## 謝辞

本橋の設計では、NEXCO 中日本横浜支社建設チームおよび静岡工事事務所構造工事区の方々に多大なご支援を頂いております。関係各位に心よりお礼を申し上げます。

## 参考文献

- 1) 青木圭一・本間淳史・山口貴志・星加益朗：PC 複合トラス橋の設計・施工—第二東名高速道路 猿田川橋・巴川橋—，コンクリート工学，Vol.42，No.8，pp.38-43，2004.8
- 2) 青木圭一・能登谷英樹・加藤敏明・高德裕平・上平康裕・山口貴志：第二東名高速道路猿田川橋・巴川橋の設計・施工—世界初の PC 複合トラスラーメン橋—，橋梁と基礎，pp.5-11，2005.5
- 3) 青木圭一・長田光司・山口貴志・高德裕平：PC 複合トラス橋の設計・施工報告—第二東名高速道路 猿田川橋・巴川橋—，プレストレストコンクリート，Vol.48，No.3，pp.23-30，2006.5
- 4) 長田光司・宇佐美惣・山口貴志・池田尚治：第二東名高速道路猿田川橋・巴川橋の設計施工，コンクリート工学，Vol.44，No.10，pp.48-53，2006.10
- 5) プレストレストコンクリート技術協会：複合橋設計施工基準，2005.11
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編，2002.3
- 7) 土木学会：鋼構造物設計指針 PART B 合成構造，1997.5