

猿田川橋・巴川橋（上り線工事）の設計・施工

長田 光司*1・宇佐美 惣*2・伊藤 祐一*3・藤岡 篤史*4

1. はじめに

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.間（仮称）に位置し、静岡市北東部の山間部に沿って標高約 120 m の高さに計画された合計 1.1 km の橋梁である。本橋の橋梁形式に求められた条件等は以下のとおりである。

- ① 静岡市街から眺望できるため、背景となる山岳地形にとけこみ、圧迫感のない橋梁形式が望まれた。
- ② 起伏のある山岳部に計画されたため、橋脚高さは最大 70 m となり、最大スパン 120 m を片持ち架設工法で施工できる橋梁形式が求められた。
- ③ 新東名高速道路の完成断面は 16.5 m であり、従来の PC 箱桁と比べ上部工の軽量化と下部構造および基礎構造の縮小化が求められた。

以上の条件を満足する形式として、わが国で初めて PC 連続ラーメン複合トラス橋が採用されることとなった。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き換えた形式であり、従来の PC 箱桁橋に対して以下の特長を有している。

- ① 透過性があり、圧迫感の少ない景観を創出することができる。

② 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が可能である。

③ ウェブの型枠・鉄筋組立てやコンクリート打設の不要による施工の省力化が可能である。

すでに下り線は平成 18 年 1 月に完成しており、現在これに引き続き、上り線の設計・施工が行われている。上り線では、下り線工事から得られた知見を活用することにより、更なる合理化に取り組んでいる。本稿では上り線工事での取組みについて報告する。

2. 橋梁概要

2.1 工事概要

工事名：第 2 東名高速道路 猿田川橋（PC 上部工）
上り線工事

工事場所：静岡県静岡市葵区北

発注者：中日本高速道路(株) 横浜支社

施工者：ピーエス三菱・安部日鋼工業共同企業体

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

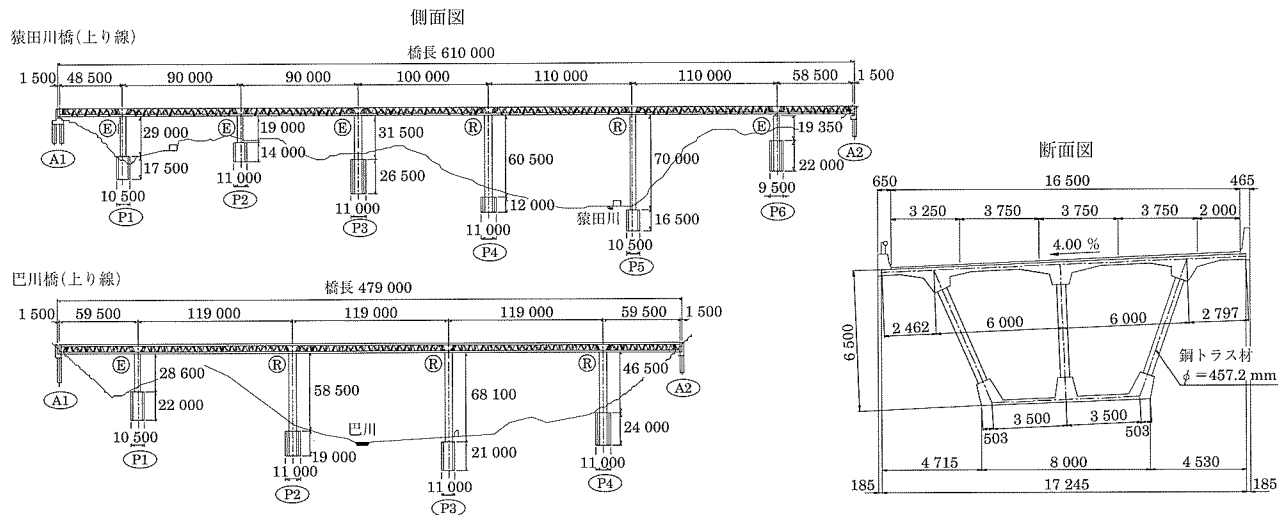


図 - 1 橋梁一般図

*1 Koji OSADA：中日本高速道路(株) 横浜支社 静岡工事事務所 構造工事長

*2 Osamu USAMI：中日本高速道路(株) 横浜支社 静岡工事事務所

*3 Yuichi ITO：(株)ピーエス三菱 技術本部 土木技術部長代理

*4 Atsushi FUJIOKA：(株)ピーエス三菱 技術本部 土木技術部

橋 長：(猿田川橋) 610.0 m, (巴川橋) 479.0 m
 支 間 割：(猿田川橋) 48.5 + 2@90.0 + 100.0 +
 2@110.0 + 58.5 m
 (巴川橋) 59.5 + 3@119.0 + 59.5 m
 幅 員：(全幅員) 17.615 m, (有効幅員) 16.500 m
 平面線形：(猿田川橋) $A = 1\ 058.217 \sim R = 2\ 880$ m
 (巴川橋) $R = 2\ 880 \sim 3\ 000$ m
 縦断勾配：(猿田川橋) 0.833 ~ 0.439 % ↙
 (巴川橋) 0.439 % ↙
 斜 角：90.0 度

2.2 主桁構造

図-1に橋梁一般図を、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。

上・下床版は場所打ちコンクリート床版とした。移動作業車による張出し架設工法の施工能力から1セグメント長を5.0 mとし、ウェブにはワーレントップの鋼トラス材を橋軸方向に5.0 m間隔で配置した。一方、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合理化を図った。

床版には「縦桁」と呼ぶコンクリートビームを橋軸方向に配置した。これにより、床版支持状態が格点部での点支持から縦桁での線支持となり、床版設計での支配的な支間方向を橋軸直角方向にすることができた。

本橋の有効幅員は新東名高速道路の標準である16.5 mと広幅員であるが、斜ウェブを採用し、下床版幅を8.0 mとすることで下部構造の縮小化を図った。また、桁高変化に対する主桁重量増減への影響が少な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6.5 mの等桁高とした。最大支間に対する桁高支間比は、1/18.3(巴川橋)であり、トラス形式としては非常にスレンダーな形状となっている。さらに、背景に広がる山岳部の緑とトラス材の色を調和させることにより優れた景観性を創造している。

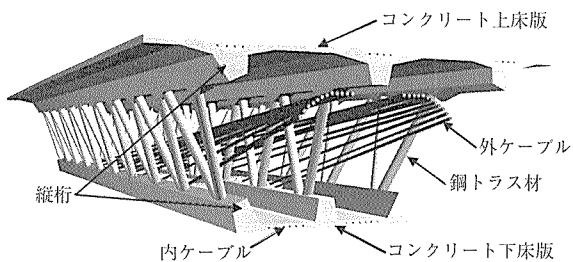


図-2 主桁概要図

表-1 使用材料一覧

項目	仕様	摘要
コンクリート	$\sigma_{ck} = 40$ N/mm ²	
PC 鋼材	I2S15.2 (SWPR7BL)	内ケーブル
	I9S15.2 (SWPR7BL)	外ケーブル (マルチ並給めつき)
	IS21.8 (SWPR19BL)	上床版横締め
	IS28.6 (SWPR19BL)	横桁横締め
鋼部材	SM490YB, SM520C-H	鋼トラス材 (ϕ 457.2)・格点構造

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、本形式の特徴的な構造であると同時に、重要な部位である。本橋の最大支間は119.0 m(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た。図-3に示した「二面ガセット格点構造」は、下り線工事に際して開発し、採用した構造で、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。

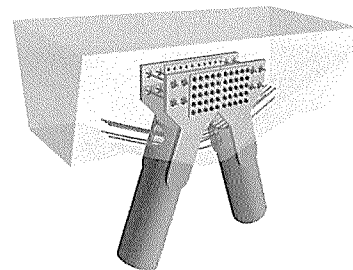


図-3 二面ガセット格点構造

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を得ている^{1~4)}。今回上り線工事では、それらの知見を活用することによる更なるコスト縮減への取組みを行った。

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、もっと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、以下の点について検討を行った。

- ① 主桁断面形状の検討：主構数を4主構から3主構に減らすことによる構造の安全性
- ② 格点構造の検討：格点構造のコンパクト化による鋼重の減少

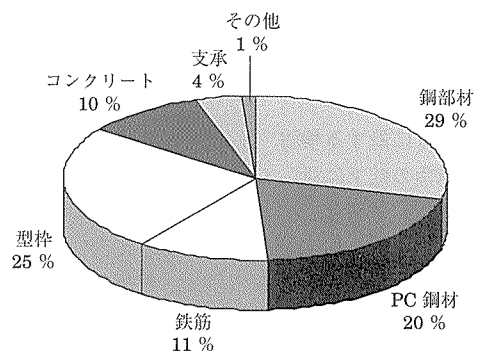


図-4 工費分析結果

3.2 主桁断面形状の検討

主桁断面を図 - 5 に示すように 4 主構から 3 主構に変更する場合の課題として、以下の項目が考えられた。

- i) 横方向断面剛性の低下
- ii) ねじり剛性の低下

PC 複合トラス橋はその施工事例が少なく、設計手法も確立されていない。しかしながら、下り線完成後の軸力測定等の結果から、適切な FEM 解析を行えば、実構造物の挙動は高い精度で推測可能であることが明らかとなっている³⁾。そのため、上記の課題に対して 3 次元弾性 FEM 解析を実施し、下り線の 4 主構断面との比較を行うことにより 3 主構断面の安全性を検証した。

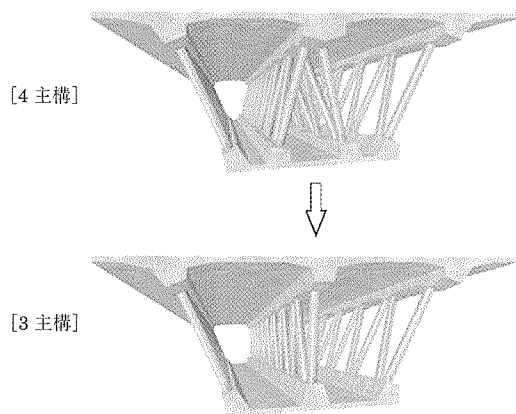


図 - 5 主構数変更概要図

(1) 横方向断面剛性の検討

横方向の断面剛性の低下に対しては、3次元弾性 FEM モデルにレベル 2 地震動に相当する横方向水平荷重を作用させた場合の断面変形量、および発生応力度の比較により検討を行った。解析モデルは図 - 6 に示すとおり、猿田川橋の最大支間長 110.0 m の径間を対象に 0.5 径間モデルとした。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た。また、モデルの拘束条件は、支間中央側を対象条件より橋軸方向固定とし、柱頭部側では 3 方向を固定した。

解析結果から得られた変形図を図 - 7 に、変位量と曲げ応力度の比較を表 - 2 に示す。変位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を示す結果となった。これにより、主構数の減少に伴う横方向断面剛性の低下はほとんどないことが確認できた。

(2) ねじりに対する検討

ねじり剛性の低下に対しては、3次元弾性 FEM モデルに B 活荷重半断面載荷相当のねじりモーメントを作用させた場合の断面変形量、および発生応力度の比較により検討を行った。解析モデルを図 - 8 に示す。解析モデルは、全長 50.0 m の片持ち梁とし、一端を 3 方向固定とした。

解析結果から得られたねじり角の分布を図 - 9 に示す。ねじり角の分布は、3 主構のねじり角の方が若干大きくな

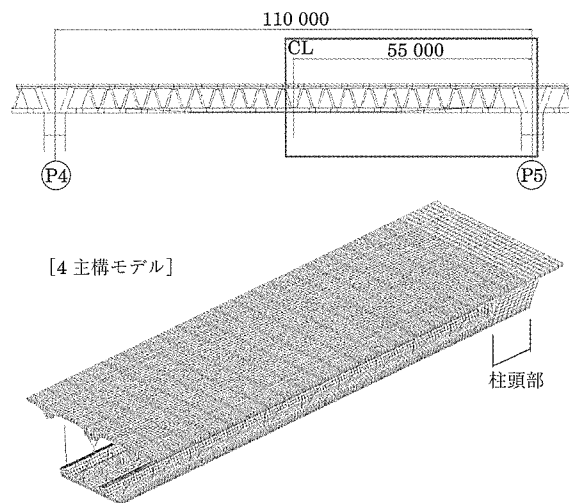


図 - 6 解析モデル（横方向剛性検討）

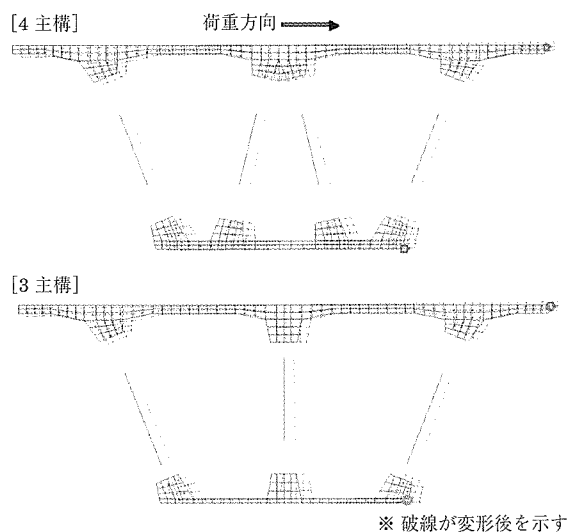


図 - 7 変形図（径間中央）

表 - 2 変位量および曲げ応力度（径間中央）

位置	4 主構		3 主構		
	水平方向	鉛直方向	水平方向	鉛直方向	
変位量 (mm)	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
曲げ応力度 (N/mm ²)	上床版	3.1		3.0	
	下床版	2.0		2.2	

表中の値は図 - 7 の○印の位置

っているがその差は小さく、両者とも分布はほぼ直線状になった。

次に、そり応力度およびせん断応力度の解析結果を表 - 3 に示す。下床版に発生するそり応力度およびせん断応力度は、3 主構の方が若干大きな値を示しているが、その差はそり応力度で 0.2 ~ 0.3 N/mm²、せん断応力度で 0.02 ~ 0.03 N/mm² と小さい。また、発生せん断応力度も 0.50 ~ 0.51 N/mm² であり、道示Ⅲに示される設計基準強度 $\sigma_{ck} =$

[3 主構モデル]

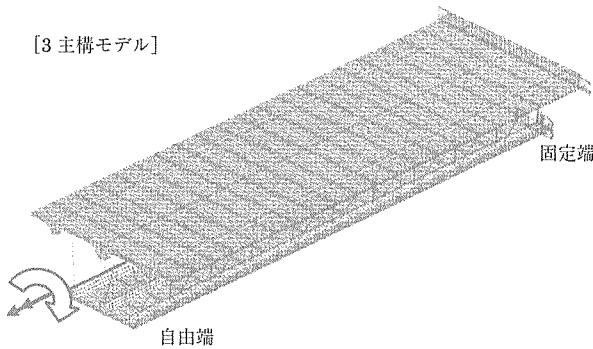


図 - 8 解析モデル (ねじり検討)

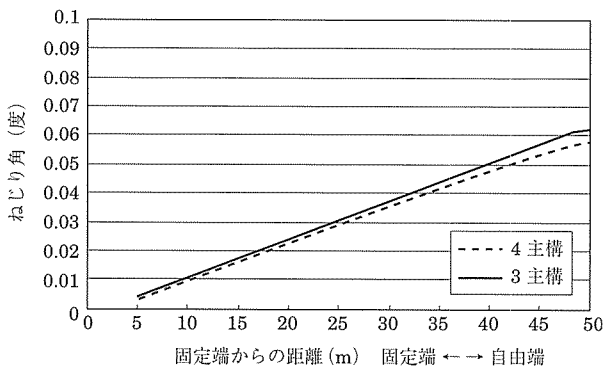
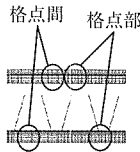


図 - 9 ねじり角分布

表 - 3 そり応力度およびせん断応力度

	位置		4主構	3主構
	そり応力度 (N/mm ²)	上床版	格点部	0.3
格点間			0.3	0.3
下床版		格点部	1.3	1.5
		格点間	0.9	1.2
せん断応力度 (N/mm ²)	上床版	格点部	0.42	0.36
		格点間	0.36	0.36
	下床版	格点部	0.49	0.51
		格点間	0.47	0.50

※そり応力度は固定端付近, せん断応力度は中央付近の値を示す。



40 N/mm² の場合のコンクリートが負担できる平均せん断応力度 ($\tau_c = 0.55 \text{ N/mm}^2$) より小さな値となっており, ねじり剛性の低下に対しても問題ないものと判断した。

3.3 格点構造の検討

下り線では格点構造として, 「二重管格点構造」と「二面ガセット格点構造」という2種類の格点構造を採用している(1, 2, 4)。今回の上り線では断面を3主構に変更することにより, トラス材1本あたりの軸力が増加するため, 格点構造には高い耐力が要求された。そのため, 上り線では格点構造として, 高耐力を有する二面ガセット格点構造を採用し, 全格点に対して適用することとした。

図 - 10 の上段に下り線で使用した格点構造の構造寸法を示す。下り線工事では, 二重管格点構造と二面ガセット格点構造を併用していることから, トラスの角度を合わせるために, 格点間距離が二重管格点構造で決定されており,

結果的に二面ガセット格点構造が大きなものとなった。上り線では, 全格点を二面ガセット格点構造に統一したため, 格点間距離を小さくすることができ, その結果, 図 - 10 の下段に示す形状寸法となり, コンパクト化を実現した。これにより格点1箇所あたり10%程度の鋼重減となった。

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, 鋼部材の重量を3割程度減少させられ, 全体工事費を5%程度縮減できる予定である。

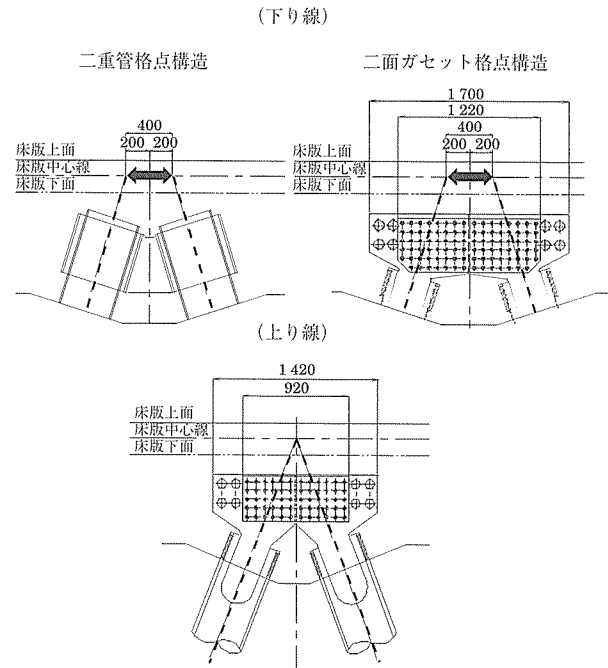


図 - 10 格点構造の形状比較 (4 000 kN タイプ)

表 - 4 数量比較 (猿田川橋と巴川橋の合計)

		4主構	3主構	増減	
PC 鋼材	12S15.2	ton	377.9	369.4	- 8.5
	19S15.2	ton	386.1	392.9	6.8
鋼部材		ton	2 857.8	2 067.0	- 790.8

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 - 11 に示す。主方向の構造解析は, 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, 平面骨組モデルによる施工段階を考慮したステップ解析を行った。この際, 外ケーブルの効果を定量的に評価するため, 外ケーブルも部材としてモデル化した。一方, 柱頭部および桁端部の箱桁断面については, 通常の箱桁橋と同様に梁部材としてモデル化を行った。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

	解析モデル	摘要
平面骨組モデル	<p>解析モデル</p> <p>鋼トラス材 上床版 (A部) 外ケーブル(部材評価) 下床版 柱頭部(梁部材)</p> <p>【格点部のモデル化】 鋼トラス材軸線 床版図心 ・床版図心と鋼トラス材軸線のズレを考慮 ・床版と鋼トラス材は剛結合</p> <p>(A部) コンクリートウェブ部</p> <p>FEM モデル 剛部材 平面骨組モデル 仮斜材 比較 コンクリートウェブ部は仮斜材でモデル化</p>	<p>各部材の断面力を算出 施工順序を考慮したステップ解析</p>
立体骨組モデル	<p>縦桁 鋼トラス材 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"> ・死荷重分担率の算出 ・活荷重断面力の算出 ・橋面荷重断面力の算出
3次元弾性FEMモデル	<p>ソリッド要素 柱頭部 梁要素</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 - 11 主方向の解析モデル

たが、この仮斜材の剛度は、コンクリートウェブ部近傍をモデル化した FEM 解析と平面骨組解析との比較から決定した。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した。

また、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が異なる。さらに、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。そのため、鋼トラス材断面力の算出にあたっては、立体骨組モデルを用いた荷重分担の検討を行った。この際、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した。さらに、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も、自重に対する分担率を用いて平面骨組解析による断面力の補正を行った。一方、活荷重および橋面荷重については、影響面載荷や荷重作用位置の影響があるため、立体骨組解析による各トラス材の断面力を直接用いた。また、外ケーブルの偏向力により自重と逆方向きのせん断力が作用するが、この分担率は3次元弾性 FEM モデルを用いて算出し、平面骨組解析による断面力の補正を行った。表 - 5 に猿田川橋（上り線）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、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。外ケーブルによる偏向力は、図 - 12 に示すように自重と逆方向きのせん断力を作用させるため、鋼トラス材に作用する軸力を低減する効果がある。前述したように、鋼部材の重量を低減することがコスト縮減につながることから、本橋では外ケーブルを効率的に配置し、架設ケーブルにも外ケーブルを使用した。

(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 $\phi 457.2$, $t = 9 \sim 30$ 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

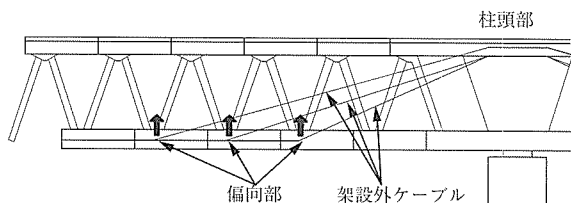


図 - 12 外ケーブルによる偏向力

る部材として道路橋示方書Ⅱ鋼橋編⁵⁾に従った。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てんした 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た。UOE 鋼管 $\phi 457.2$ mm の製造可能板厚は 30 mm 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 化を図った。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)⁶⁾ に従って部材耐力の照査を行った。なお、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 1 mm 単位で決定することを基本方針とした。

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次元弾性 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平面骨組解析により行った。FEM 解析では、モデル端部での境界条件の影響が出ないように、橋軸方向 5 セグメント分 (5.0 m \times 5 = 25.0 m) のモデル化を行った。また、橋軸方向の曲げの影響を排除する目的でウェブ直下において鉛直方向を固定する境界条件とした。

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の温度応力解析も併せて実施した。

5. 施工概要

5.1 柱頭部の施工

柱頭部の施工は、写真 - 1 に示す大型ブラケット支保工上で 3 リフトに分割して行った。また、型枠、鉄筋等の資材荷揚げ、コンクリート打設は、写真 - 2 に示すように完成している下り線の橋面上を有効利用することで施工の合理化を図った。

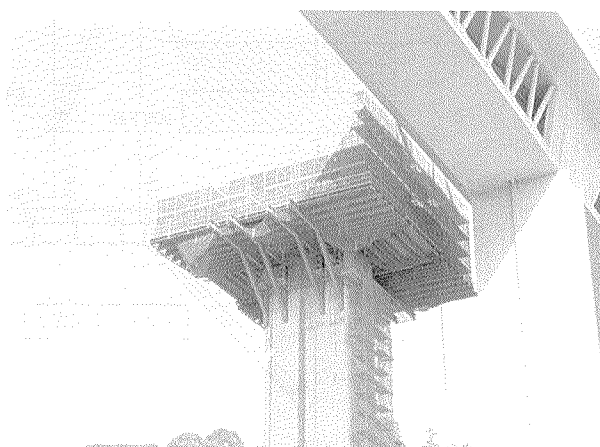


写真 - 1 ブラケット支保工

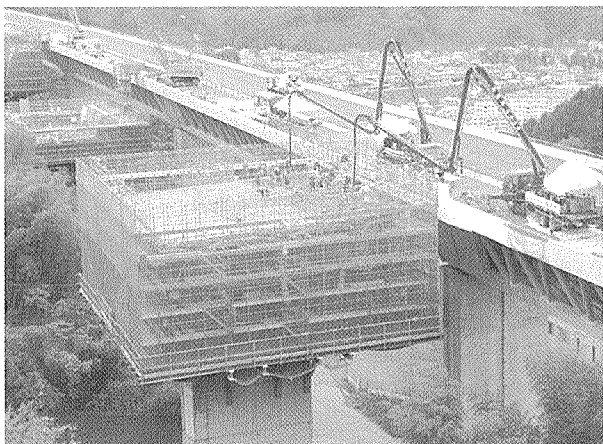


写真 - 2 柱頭部のコンクリート打設

柱頭部のコンクリートウェブには、鋼トラスウェブからコンクリートウェブへの力の伝達を円滑にするために、図 - 13 に示すように第1トラス材と格点構造で連結されたスタッド付き鋼トラス材（埋込みトラス材）が埋設されている。本橋では、前述のとおりすべての格点部に二面ガセット格点構造を採用したため、柱頭部内に埋め込まれる鋼トラス材の設置精度により、張出し施工区間のトラス材設置位置

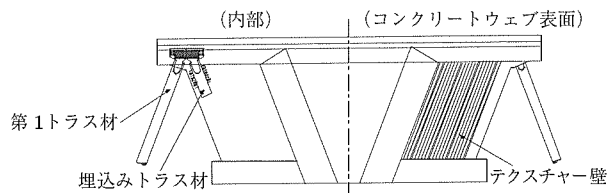


図 - 13 柱頭部構造

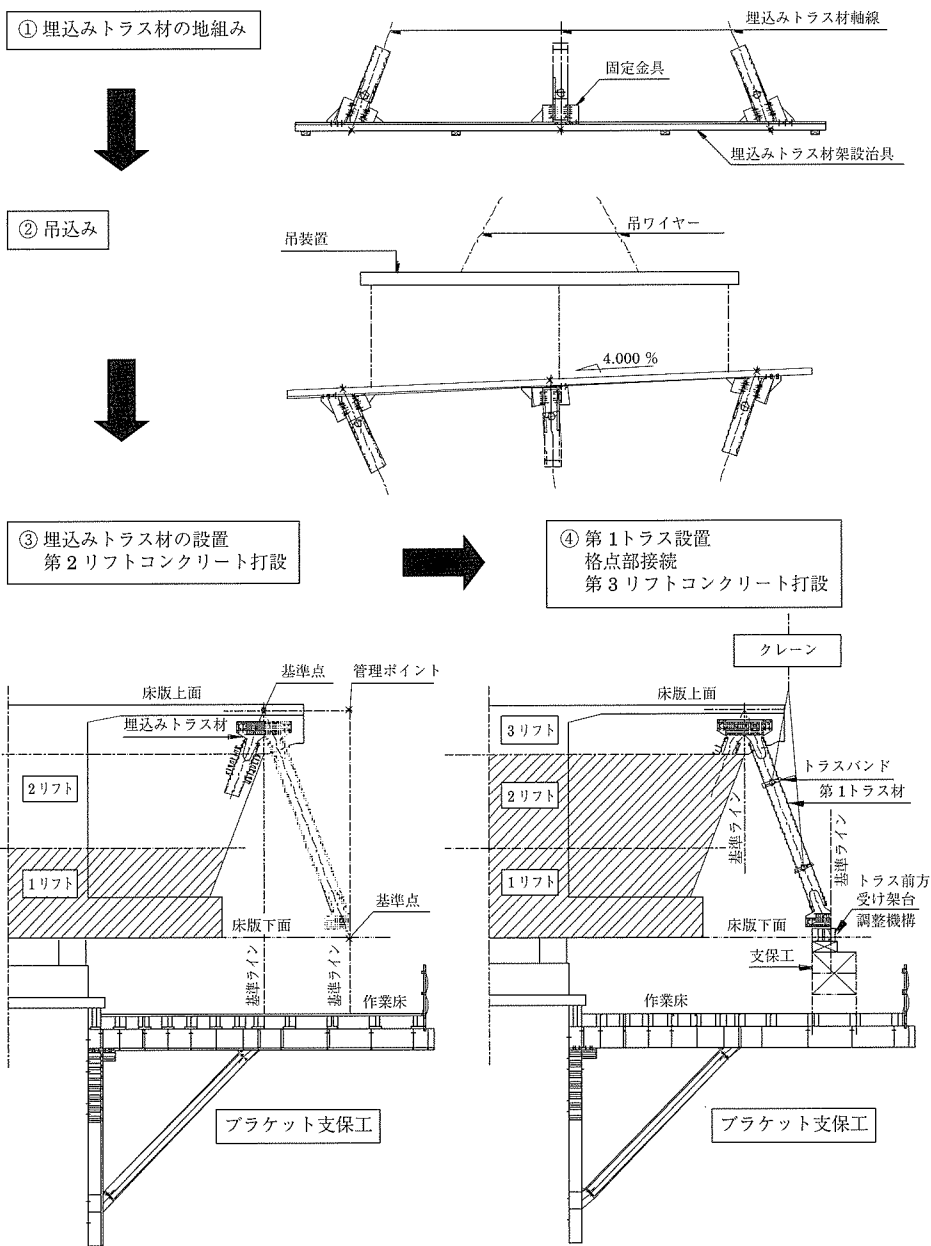


図 - 14 鋼トラス材の設置手順（柱頭部施工）

が大きく影響を受ける。そのため、この基準となる埋込みトラス材の設置精度をより高めるため、柱頭部におけるトラス材の据付けは、以下の手順に従って行った(図-14)。

- ① 埋込みトラス材は、所定の設置位置・角度となるように、あらかじめ下り線の橋面上にて架設治具(位置決め治具)を用いて、反転した状態で地組みする。
- ② 地組みした埋込みトラス材をクレーンにて吊り込み、所定の位置にセットする。なお、埋込みトラス材の設置は柱頭部の第2リフト施工時に行う。
- ③ 埋込みトラス材の設置位置の調整は、架設治具の位置を調整することにより行う。これにより、同一断面内の3本の埋込みトラス材を同時に調整することができ、1本ごとの設置に比べて各鋼管の設置によるばらつきを最小にすることが可能である。設置位置の調整作業後に、埋込鋼管を固定し第2リフトのコンクリート打設を行う。
- ④ 第2リフト施工後、第1トラス材を1本ごとにクレーンで吊り込み、トラス前方受け架台上へセットする。その際、トラス前方受け架台には各トラス材を橋軸方

向および橋軸直角方向へ調整可能な装置を設けておき、それにより微調整を行う。微調整完了後に、格点部の接続、第3リフトのコンクリート打設を行う。

柱頭部施工完了後の外観を写真-3に示す。

5.2 張出し施工

張出し施工は図-15に示すサイクルで行っている。

張出し施工に関して、PC複合トラス橋である本橋特有の事項について以下に述べる。

(1) 移動作業車

張出し施工には以下の理由から、3主構超大型移動作業車を使用している。

- ① 本橋の張出し施工における1セグメント長は5.0mであり、上下床版コンクリートの施工分割位置はウェブのワーレントラス形状に合わせて、上床版が2.5m先行する形式である。
- ② 床版コンクリートの施工分割位置は、縦桁内に埋め込まれる格点構造の寸法を考慮して、格点中心から1.35m前方としている。
- ③ 移動作業車のメインジャッキ位置は、上床版に過大な

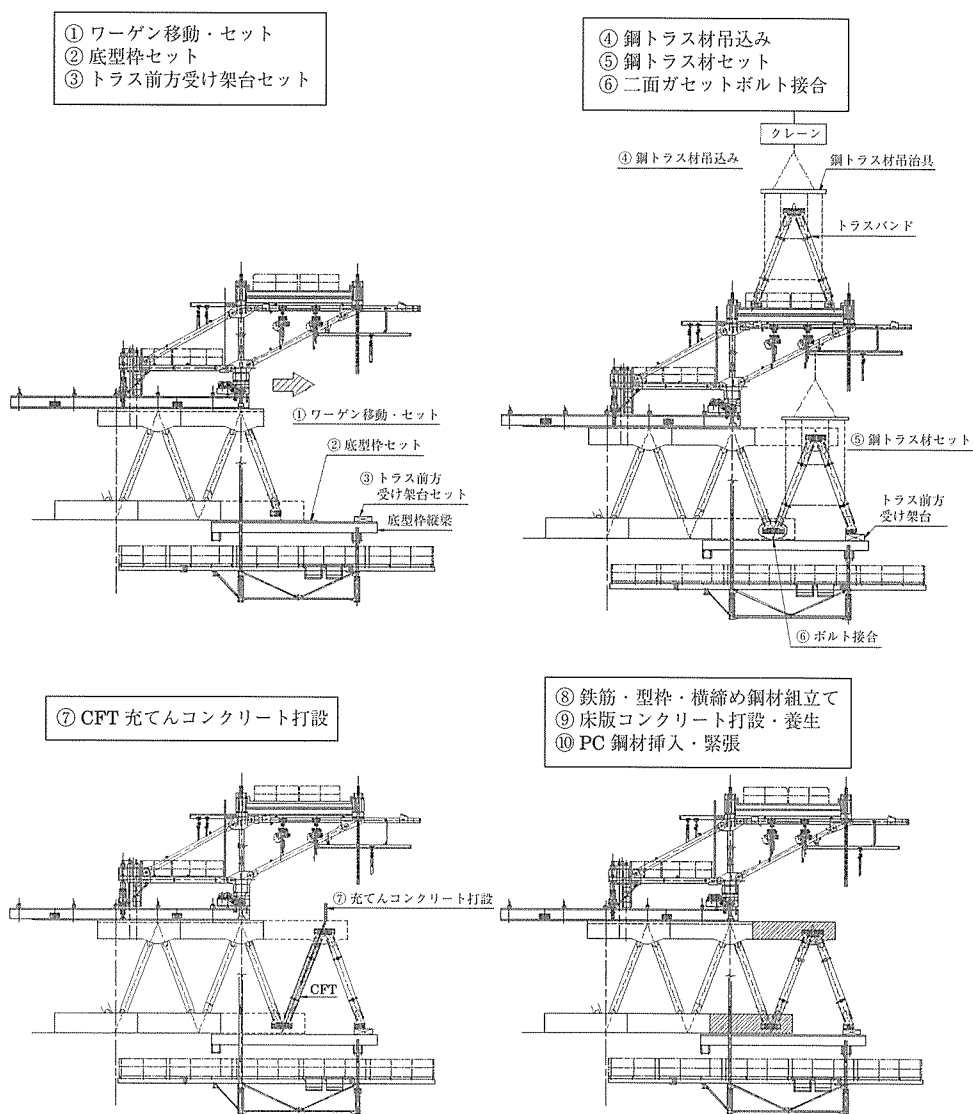


図-15 張出し施工サイクル



写真-3 柱頭部外観

応力が作用しないように格点部中心の直上としている。

(2) 鋼トラス材の架設

張出し施工時の鋼トラス材の架設は以下の手順により行っている。

- ① 下床版縦桁内に埋設される部位の充てんコンクリートを打設ヤードにて先行打設する (写真-4)。



写真-4 鋼トラス材への充てんコンクリート打設

- ② 架設する鋼トラス材は、下り線の橋面上にて逆V字形に地組みし、クレーンにより主構ごと一括架設する。
- ③ トラス材の架設に先立ち、移動作業車の下段前方横梁上にトラス前方受け架台を設置する。この受け架台を所定の位置に据えることでトラス材設置位置を管理する。
- ④ クレーンにて吊り込んだトラス材は、移動作業車内部に設置した吊装置を使用して、トラス材先端をトラス材前方受け架台に設置する。また、トラス材側面はトラス受け架台 (図-16) に預け、トラスバンドにより固定する。
- ⑤ 吊装置とトラス側面受け架台により最終調整を行った後に、格点部の接合を行う。その後、CFTの充てんコンクリートを打設する。

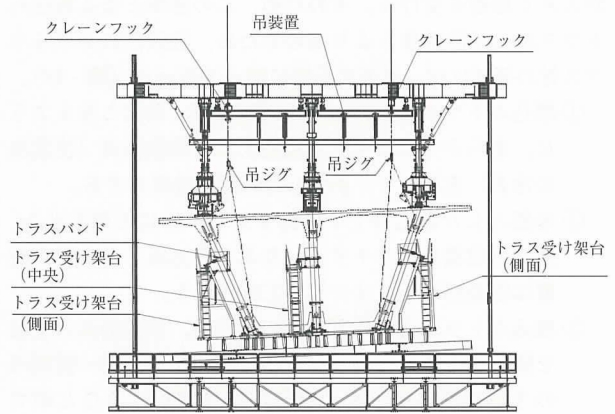


図-16 トラス受け架台

6. おわりに

本稿では、下り線施工時に得られた知見を活用することによるPC複合トラス橋の更なる合理化への取組みについて報告した。本橋は、平成20年3月時点で移動作業車による張出し架設を開始しており (写真-5)、平成21年春の完成を目指し鋭意施工中である。

最後に、本橋の設計・施工にあたり、適切な助言およびご指導をいただいた関係各位に深く感謝の意を表します。



写真-5 張出し架設状況

参考文献

- 1) 青木圭一・本間淳史・山口貴志・星益朗: 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) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編, 2002.3
- 6) 土木学会: 鋼構造物設計指針 PART B 合成構造, 1997.5

【2008年3月5日受付】