

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 —

青木 圭一*1・長田 光司*2・山口 貴志*3・高德 裕平*4

1. はじめに

第二東名高速道路猿田川橋・巴川橋は、静岡 IC（仮称）と清水 IC（仮称）間に建設される最大支間長 119 m、有効幅員 16.5 m、最大橋脚高 72 m、全長は土工区間約 65 m を挟んで約 1.2 km に及ぶ橋梁である。

また本橋は、世界でも初となる連続ラーメン形式の複合トラス橋で、PC 箱桁橋のコンクリートウェブを鋼管トラス材に置き換え、上下の床版を連結する新しい構造を採用している。

本橋の設計に際しては、本構造形式の最重要部位である格点部に着目した部分模型実験¹⁾や複合トラス梁模型実験²⁾を実施し、その構造特性を把握したうえで詳細設計を行っている。また、本橋はトラス材が側面・断面方向ともワーレントラス構造となっていることから、その設計は平面骨組モデルによるステップ解析を基本としながらも、3次元 FEM 解析により各種断面力の検討を行い、設計に反映させている。複合トラス橋は施工事例も少なく、その設計手法が確立しているとはいえないことから、施工に際しては先行して張出し架設を行う橋脚において、張出し開始時から橋体完成までの鋼トラス材の応力、上下床版の応力および橋面高さを計測し、本橋の挙動を把握するとともに、平面保持の成立など設計の妥当性を検証しながら施工を進めた。

本報告では、複合トラス橋である本橋の詳細設計や設計・施工段階で行った設計手法の検証、実橋での計測や載荷実験について報告するものである。

2. 工事概要

猿田川橋・巴川橋の工事概要を下記に示す。また、構造一般図を図-1に示す。

構造形式：PC 多径間連続複合トラスラーメン橋

道路規格：第一種 I 級 A 規格

設計荷重：B 活荷重

・猿田川橋（下り線）

橋 長：625.0 m (7 径間)

支 間 長：63.5 + 2@90.0 + 100.0 + 2@110.0 + 58.5 m

有効幅員：16.5 m

平面線形：A = 1 000 m ~ R = 3 000 m

勾 配：縦断勾配：0.440 %

横断勾配：2.83 % ~ 4.00 %

・巴川橋（下り線）

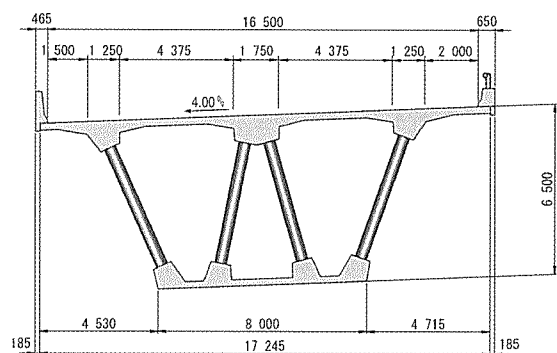
橋 長：479.0 m (5 径間)

支 間 長：57.0 + 3@119.0 + 62.0 m

有効幅員：16.5 m

平面線形：R = 3 000 m ~ A = 1 600 m ~ R = 4 000 m

断面図



側面図

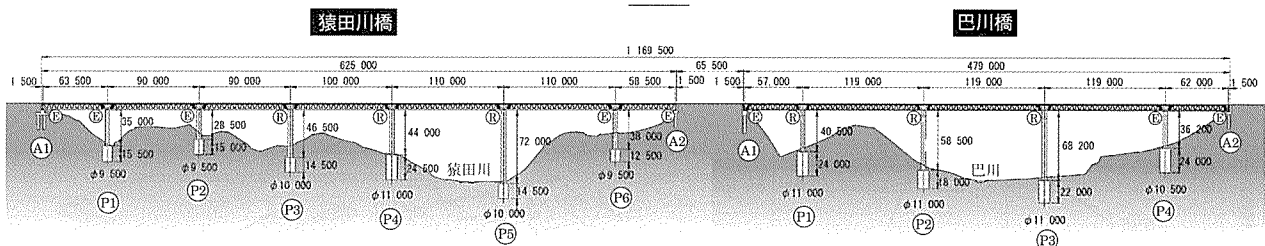


図-1 構造一般図

*1 Keichi AOKI：中日本高速道路(株) 横浜支社 横浜技術事務所 技術指導第三課長

*2 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

*3 Takashi YAMAGUCHI：(株)大林組・昭和コンクリート工業(株)・(株)ハルテック 共同企業体 工事長

*4 Yuhei TAKATOKU：(株)大林組 東京本社土木技術本部構造技術部 構造設計グループ主任

勾配：縦断勾配：0.440 %
横断勾配：3.00 %

3. 設計概要

3.1 設計方針

本橋は、格点部の重要性および耐久性への配慮の観点から、上・下床版に曲げ引張応力を発生させないフルプレストレスト構造としている。また、格点部の設計では設計荷重作用時において、トラス材の軸力伝達によるせん断ひび割れを発生させないこととし、終局荷重作用時および大規模地震時においては、格点部を他の部材に先行してせん断破壊させない耐力を確保することとしている。

そのため、本橋では、複合トラス構造の最重要部位である格点構造に「二重管格点構造」と「二面ガセット格点構造」を使用している^{1) 2) 3)}。

3.2 主方向の設計

(1) 主方向の解析モデル

主方向の構造解析には、上・下床版、鋼トラス材および外ケーブルを部材としてモデル化した平面骨組モデルを用いて、施工順序とクリープ・乾燥収縮の影響を考慮したステップ解析を行っている。通常の箱桁橋では床版がコンクリートウェブにて連続的に支持されるのに対し、本構造では床版が格点部で断続的に支持される構造であることから、格点間の曲げの影響に配慮して、梁としての上下縁（上床版上縁と下床版下縁）に加えて上床版下縁および下床版上縁についても照査を行っている。鋼トラス材断面力の算出にあたっては、断面方向への部材の傾斜と横方向荷重分担を考慮するため、立体骨組解析により、各荷重別に内ウェブ、外ウェブトラス材の断面力分担率（以降、立体比と呼ぶ）を決定している。さらに、柱頭部付近については、3次元FEM解析の結果を設計に反映させている。図-2に設計で用いた解析モデルの概要を示す。

(2) PC 鋼材配置

主桁の張出し架設時には、柱頭部上縁から張出しブロックの下床版にむけて配置した鉛直成分の高い外ケーブル(19S15.2B)を配置可能な範囲で積極的に使用している。この外ケーブルにより、主桁自重と逆向きにせん断力を与え、鋼トラス材に作用する断面力および格点部へのせん断力の低減を図るとともに、内ケーブル(12S15.2B)を上床版に

配置することで設計荷重作用時に引張応力を発生させないようにしている。

(3) 鋼トラス材の設計

鋼トラス材には、SM490YB材、外径φ457.2mm、板厚 $t=9\sim 30$ mmを使用して、軸方向力と曲げモーメントが作用する柱部材として設計を行っている。前述したように鋼トラス材の設計では、立体骨組解析により自重・橋面荷重・活荷重($L_{max} \cdot L_{min}$)について各トラス材の断面力を算出し、それぞれ平面骨組ステップ解析で得られた断面力を補正している。一例として猿田川橋の立体比を表-1に示す。平面骨組ステップ解析結果のクリープ・乾燥収縮およびプレストレスによる値は、自重の立体比を用いて補正している。

ここで、立体比1.0は平面骨組ステップ解析結果を示す。本橋では鋼トラス材が断面方向に傾斜しているため、立体比は1.0以上となる。

表-1 鋼トラス材断面力の立体化

	外側トラス	内側トラス
自重	1.04	1.10
橋面	1.09	1.07
活荷重 MAX	1.34	1.07
活荷重 MIN	1.13	1.18

本橋の設計荷重作用時の鋼トラス材の最大断面力は、巴川橋最大支間($L=119$ m)の柱頭部付近で4800kN、曲げモーメント150kN・mとなっている。また、本橋では高軸力の圧縮材について、鋼管内部にコンクリートを充てんしたCFT(Concrete Filled steel Tube)構造を採用し、板厚の低減を図っている。具体的には、コスト面から鋼管の製法の分岐点となる板厚30mmを超える範囲にCFT構造を採用している。

(4) 実橋での計測

前述したように本橋の詳細設計においては、3次元FEM解析を用い、設計に反映させている。しかし、複合トラス橋の設計手法は確立されているとはいえず、また施工実績も少ないことから、実橋における計測を実施することで、設計の妥当性を検証することとした。計測においては鋼トラス材、上下床版の応力度と施工時の主桁たわみ量に着目

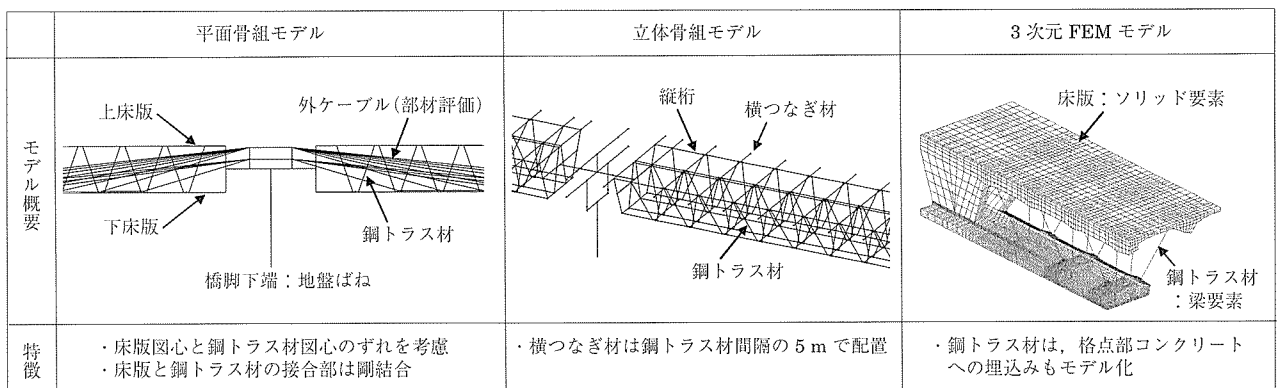


図-2 解析モデル概要図

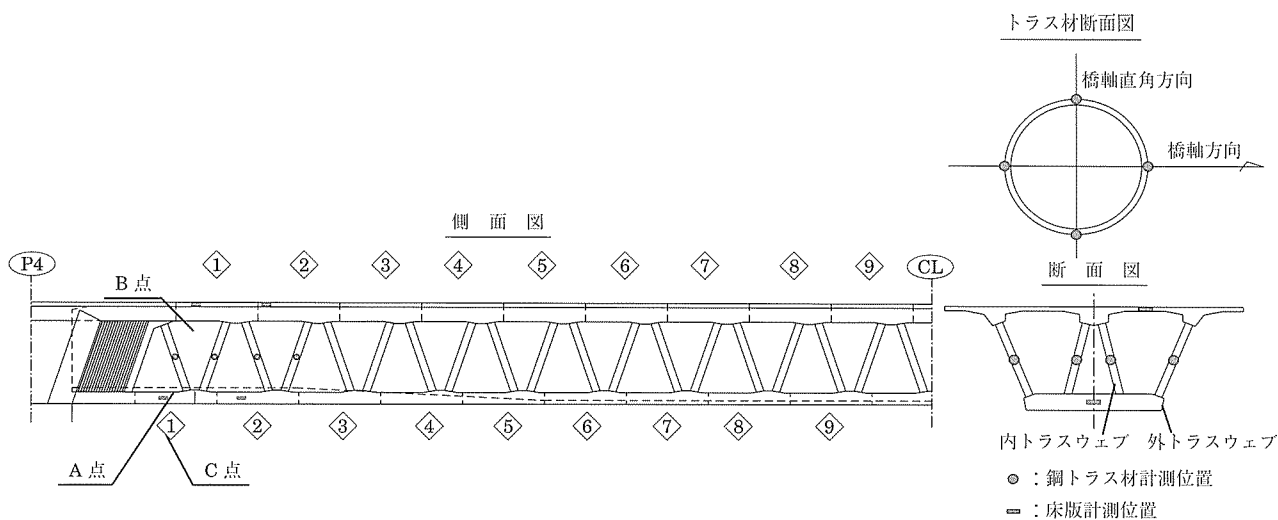


図-3 鋼トラス材および曲げ応力度計測位置図

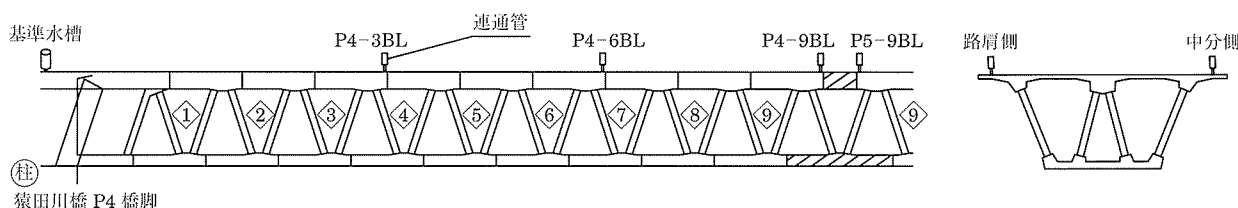


図-4 橋面高さ計測イメージ図

することとし、先行して張出し施工を行うP4張出し（P5側）に計器を設置することとした。

鋼トラス材については、張出し架設に伴う軸力の変化、外ケーブル緊張に伴う軸力減少など、ステップ解析の結果の妥当性や立体骨組解析による立体比の検証を行う。

床版については、外気温の影響や上下床版の温度変化とそれに伴う応力度変化、そして張出し架設に伴う主方向の曲げ応力度の変化の検証を行う。鋼トラス材応力度および主方向の曲げ応力度の計測位置は図-3に示す。計測位置は、それぞれの応力度が卓越する猿田川橋P4のP5側張出し1, 2ブロックとした。

橋面高さの計測は、柱頭部橋面上に基準水槽を、ブロック継目先端に連通管式変位計を設置し、基準水槽との水頭差から橋面高さをリアルタイムに計測することで、実測値と設計値の比較を行うこととした（図-4参照）。

計測結果を図-5～図-9に示す。計測位置A点での各施工ステップごとに発生する鋼トラス材応力度については、主桁断面全体のトラス材平均応力度を図-5に、内トラス、外トラスウェブのそれぞれに着目した応力度を図-6に示す。なお、鋼トラス材の応力度は図-3のトラス材断面図に示すように4箇所測定を行っており、グラフは4箇所の平均値を用いている。また、計測点B, C点の上下床版の1日の温度履歴を図-7に、各施工ステップごとに発生する主方向の上縁、下縁の曲げ応力度を図-8に、P4張出し施工の3, 6, 9ブロックの橋面高さの各施工ステップごとの推移を図-9に示す。

(5) 考 察

1) 主桁断面全体平均の鋼トラス材応力度

図-5より、張出し施工時および完成系以降ともに計測値は、おおむね設計値と一致した挙動を示している。3ブ

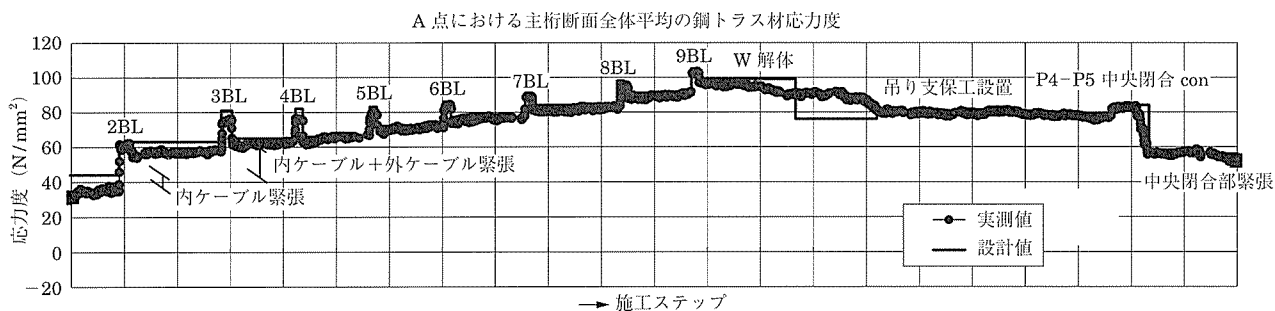


図-5 主桁断面全体平均の鋼トラス材応力度

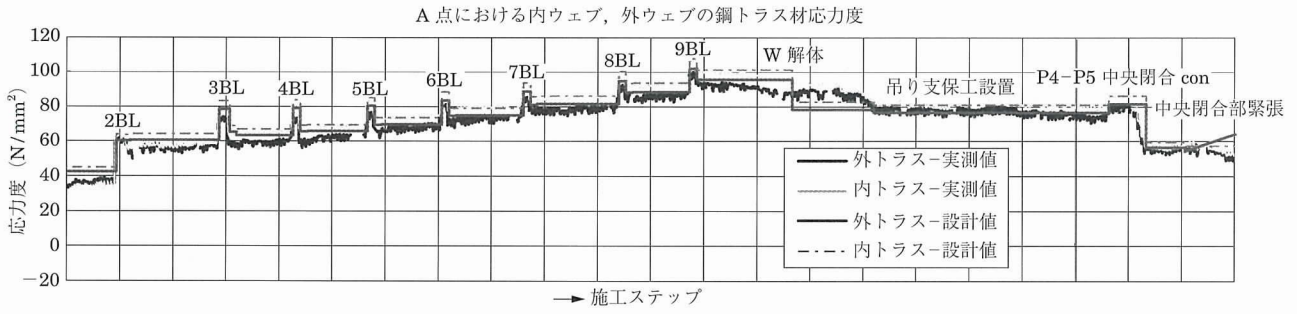


図-6 内ウェブ、外ウェブの鋼トラス材応力度

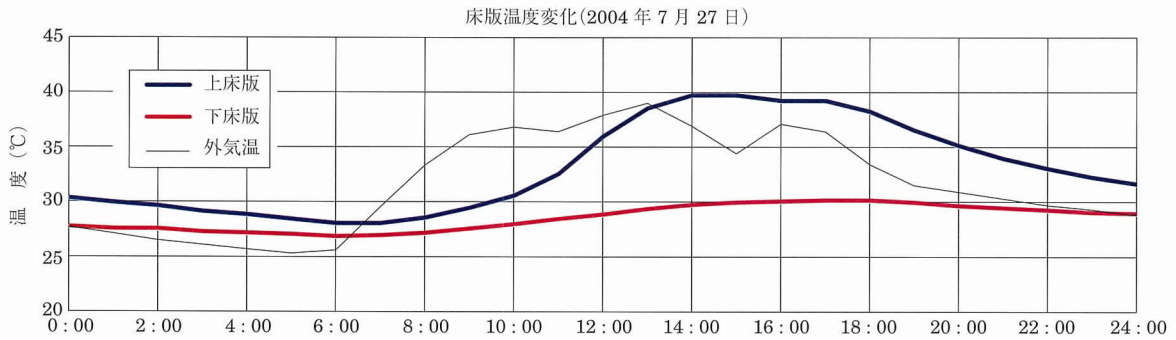


図-7 上下床版温度履歴

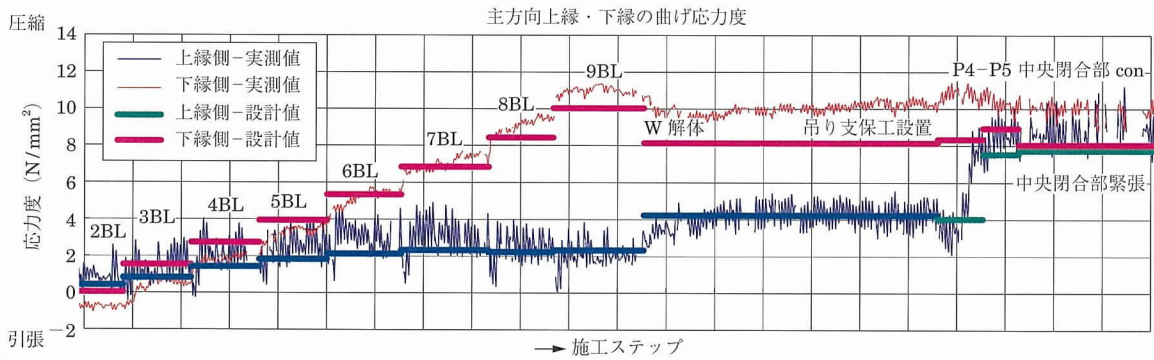


図-8 主方向の曲げ応力度履歴

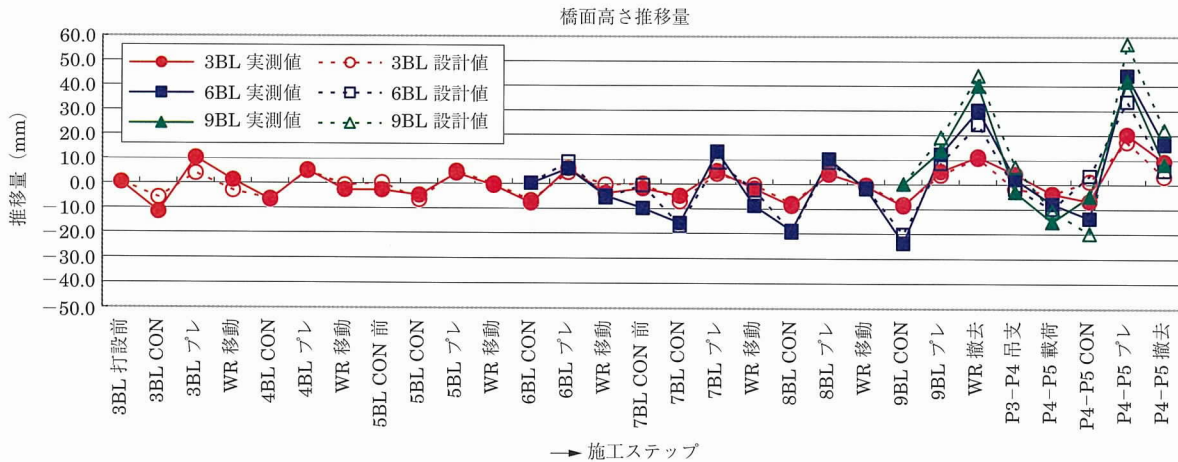


図-9 橋面高さの推移

ロックより外ケーブルを配置しており、この外ケーブル緊張に伴いトラス材に作用する応力が低減していることが分かる。とくに、外ケーブルの鉛直分力の大きい3ブロックでは応力度の低減が大きいことがわかる。なお、鋼トラス材応力度は曲げの影響を受けないトラス部材中心位置にて計測を行っている。

2) 内ウェブ、外ウェブのトラス材応力度

2ブロック以降の内ウェブ、外ウェブの鋼トラス材応力度について、計測値は設計値とおおむね合致しており、前述した鋼トラス材断面力の算出方法の妥当性が確認されたといえる。

3) 上下床版温度履歴

図 - 7 より、上床版の温度は外気温の変動の影響を大きく受け、上下床版の温度差は最大で 10℃ 程度ある。下床版の温度も若干外気温の影響を受けるが、上床版ほど顕著ではない。

4) 主方向の曲げ応力度履歴

中央閉合部施工後の下縁側応力度は設計値より 1.5 N/mm² 程度大きい値を示しているが、上縁・下縁の応力度ともに計測値はおおむね設計値と一致した挙動を示している。上縁側の応力度は外気温の影響を受け、最大 2 N/mm² 程度の日変動があり、下縁側応力度の日変動は 0.5N/mm² 以下である。上縁側・下縁側の応力度ともに施工進捗に伴う変化量は、おおむね設計値と合致した挙動を示しており、平面骨組ステップ解析の妥当性を検証することができた。

5) 橋面高さの推移

図 - 9 より、橋面高推移の実測値は設計値とほぼ合致する。本橋の上越し計算は前述した平面骨組モデルを使用し、曲げの影響に加え、せん断変形の影響も考慮することとした。これにより、施工時の主桁変位量を適切に算出できたと判断される。

3.3 床版の設計

PC 複合トラス橋である本橋の床版は、トラス格点部により断続的に支持された構造となっており、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た従来の PC 箱桁橋の床版とは異なる構造の床版であると考えられる。以下に、本構造特有の床版支持条件を考慮して行った床版の設計について述べる。

(1) 縦桁の配置

本橋は、格点部で断続的に支持された床版構造であるが、鋼トラスウェブとの交点にあたる部分には、橋軸方向に連続したコンクリート縦桁を配置した。これにより、格点での断続的な支持から縦桁での線支持的な構造とすることで、床版設計における支配的支間方向を橋軸直角方向とした。

(2) FEM 解析による床版断面力の算出

本橋の床版支間は、道路橋示方書Ⅲ 7.4.2 の活荷重曲げモーメント式の適用範囲であるが、上述した PC 複合トラス橋特有の支持条件を勘案して、立体 FEM 解析により、設計断面力の算出を行うこととした。

本橋では鋼トラス材板厚が変化するとともに形状が円環であることから、設計で用いる解析モデルを選定するにあたり鋼トラス材のモデル化において以下の項目による床版

設計への影響の検証を行った。

① 鋼トラス材のモデル化要素

② 鋼トラス材剛性 (板厚)

① 鋼トラス材モデル化要素の検討

上述したように、本橋の床版は縦桁部にて鋼トラス材に支持されることから、支持部となる鋼トラス材のモデル化は解析結果に大きく影響を与えることが考えられた。そこで、円環である本橋の鋼トラス材をシェル要素とビーム要素でモデル化し、それぞれの比較を行った上で、設計に用いる解析モデルを決定することとした。この時、鋼トラス材をビーム要素とする場合、コンクリート床版に埋込んだ形でモデル化する必要があることを事前の検討にて確認している。支間中央に T 活荷重を載荷した場合の上床版上縁床版応力の比較結果を図 - 10 に示す。検証の結果、鋼トラス材のモデル化をシェル要素で行った場合もビーム要素で行った場合も結果に差異は見られなかった。この結果から、鋼トラス材を軸剛性と曲げ剛性を考慮したビーム要素でモデル化して縦桁部に埋め込んでいれば、床版に生じる応力に影響はないことと判断し、設計で用いる解析モデルとしては鋼トラス材をビーム要素でモデル化することとした。

② 鋼トラス材剛性 (板厚)

一般的な PC 箱桁橋では、床版および横方向の設計を行う場合の設計断面位置は、上フランジ厚、ウェブ厚さ、下フランジ厚および桁高がおのおの異なる数断面を選定して設計を行っている。

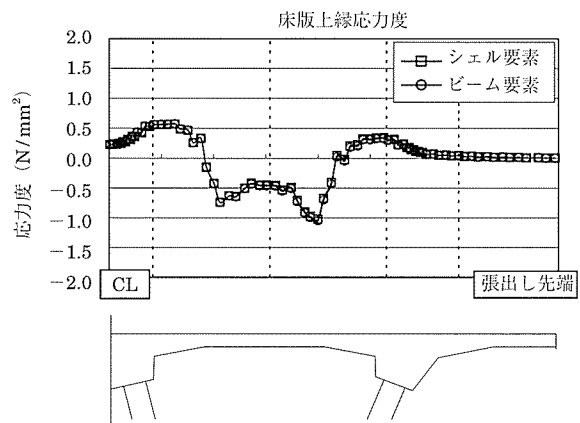


図 - 10 鋼トラス材モデル化による床版応力度の比較

本橋の場合、桁高 6.5 m と一定の等桁高であり、鋼トラス材の外径は ϕ 457.2 mm で一定であるが、鋼トラス材板厚は断面力に応じて支間中央から支点部において 9 mm ~ 30 mm まで変化させている。もっとも薄い板厚と厚い板厚でのトラス材の剛性比は 3 倍程度異なるため、事前検討を行い、鋼トラス材の剛性が床版設計に与える影響について検証することとした。

解析モデルは先述したように鋼トラス材をビーム要素でモデル化し、鋼トラス材は以下に示す鋼管の剛性 (板厚) をパラメータとした応力度の比較を行うこととした。

・板厚 $t = 10$ mm の場合 $A = 140.43$ cm² $I = 35$ 091 cm⁴

○ 工事報告 ○

・板厚 $t = 30 \text{ mm}$ の場合 $A = 402.44 \text{ cm}^2$ $I = 92 \text{ 173 cm}^4$
 荷重は主桁自重と活荷重（検証を目的とした解析のため、
 載荷は T 活荷重 1 台のみ）を載荷することとした。解析結
 果のうち、支間中央に T 活荷重を載荷した場合の床版応力
 の比較グラフを図 - 11 に示す。比較検討の結果より、本橋
 に使用するトラス材板厚範囲（9 mm ~ 30 mm）では、板
 厚を変化させても床版断面力に差が生じないことがわかっ
 った。これは、鋼トラス材の剛性の影響に比べ、鋼トラス材
 と床版との接合部である格点部の剛比の差が支配的である
 ためと思われる。したがって、1 ケースの板厚で床版断面
 力を解析しても設計上問題ないと判断した。

上述した検討結果から、図 - 12 に示すように FEM 解析
 モデルは上・下床版をソリッド要素、鋼トラス材をビーム
 要素とし、荷重を偏載荷するため、幅員方向に床版全幅を
 モデル化した。橋軸方向には境界条件の影響が出ないように、
 5 ブロック分をモデル化している。

(3) 活荷重による曲げモーメントの算出

図 - 13 に活荷重による断面力の解析結果を示す。断面力
 は、支持構造が異なることより、格点上と格点間では若干
 異なり、縦桁近傍では、格点上に荷重を載荷した方が 15 %
 程度大きな断面力となった。

また、FEM 解析結果からの設計曲げモーメントの算出方
 法については、「長支間場所打ち PC 床版の設計・施工マニ
 ュアル（案）」に準拠し算出している。

$$M_L = M_0 \times (1 + i) \times k_1 \times k_2 \times k_3$$

ここに、

$$i : \text{衝撃係数} = 20 / (50 + L) = 20$$

k_1 : 活荷重の載荷状態を考慮した曲げモーメント増加
 分 = 1.0（前輪の影響、連行載荷の影響、偏載
 の影響などに対する係数で、既往の結果より橋軸
 方向には T 荷重 1 列のみを考えた。）

k_2 : 異方性による曲げモーメント増加分 = 1.0

k_3 : 解析誤差、施工誤差を考慮して 10 % 見込んだ安
 全率 = 1.1

(4) 床版の設計方針

主方向の設計では、格点部の重要性に配慮して、設計荷
 重時にフルプレストレスとして設計を行っている。床版に
 ついて、支間内は従来の PC 箱桁橋と同様に PRC 設計とし
 たが、格点部を含む縦桁に接する設計断面（床版支点部）

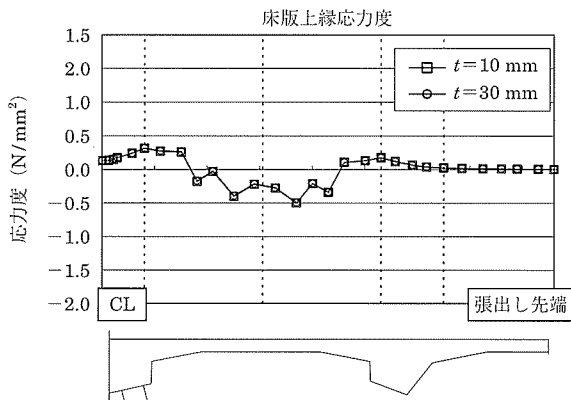


図 - 11 鋼トラス材剛性(板厚)による床版応力度の比較

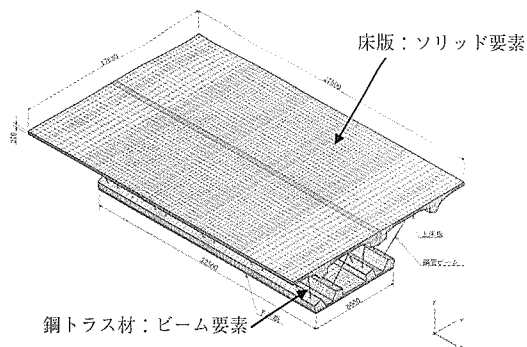


図 - 12 床版断面力算出用 FEM 解析モデル

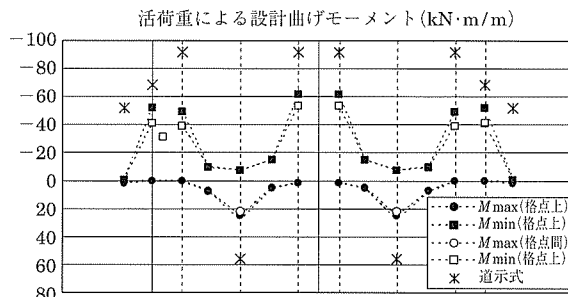


図 - 13 活荷重による設計断面力

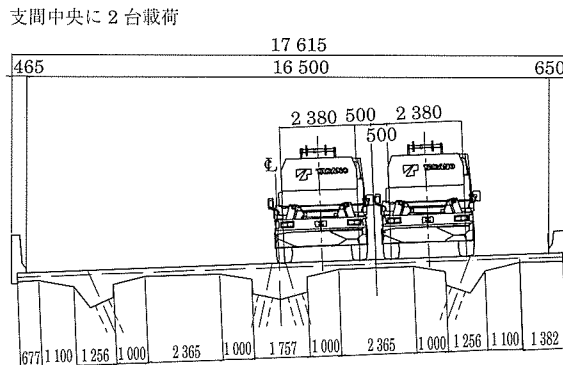
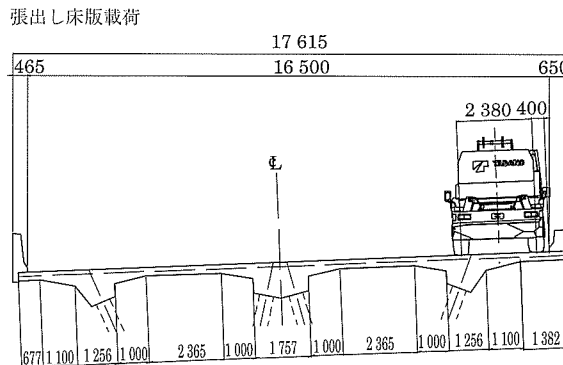


図 - 14 横方向の載荷ケース

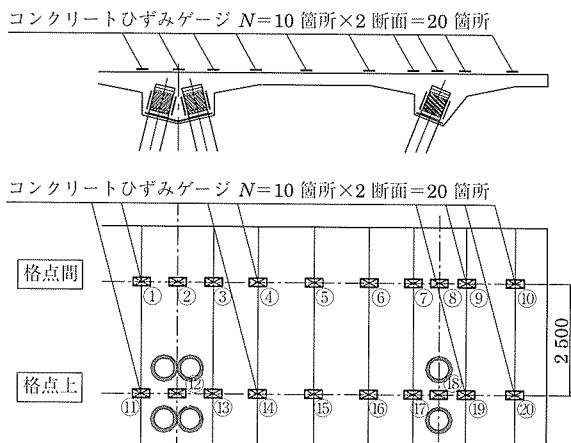


図 - 15 計測位置

は主方向と同様に格点部の重要性に配慮してフルプレストレスとして設計した。その結果、床版支間が短いことから、支間中央部の断面力が支配的とならず、その支間中央を含め、全設計断面でフルプレストレスの設計となっている。

(5) 実橋載荷実験

本橋では、上述した床版設計の妥当性を検証するため、ラフタークレーンを用いた載荷実験を行った。実験は、猿田川橋のP4-P5径間のP4側の8~9ブロック上にて行った。橋軸方向の荷重載荷位置は格点上と格点間とで発生断面力が異なることから、橋軸方向には格点上と格点間の2箇所に着目し、50tラフタークレーンを移動させて実験を行った。また、横方向の載荷ケースは張出し床版と床版支間内に着目して載荷ケースを決定した。横方向の載荷ケースを図-14に、ひずみ計測を行う位置を図-15に示す。載荷実験の状況写真を写真-1に示す。

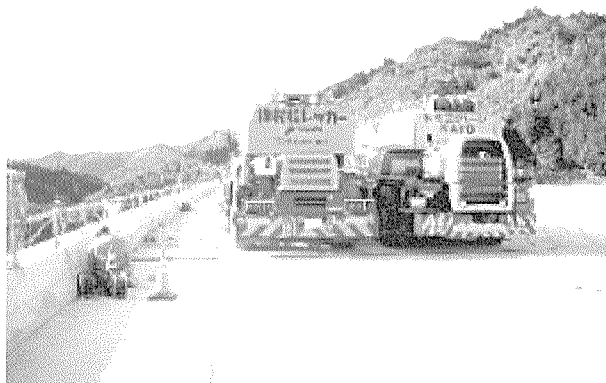


写真 - 1 載荷実験状況写真

(6) 実験結果と考察

床版上面側の曲げ応力度の解析結果と実験結果を図-16, 17に示す。解析結果と実験結果の比較から、床版に発生する応力度レベルは小さいが、以下のような考察が得られた。

- ・張出し床版に活荷重を載荷した場合、発生する曲げ応力度は、トラス格点上、格点間にかぎらず解析結果より実験結果の方が全範囲的に小さい値を示している。

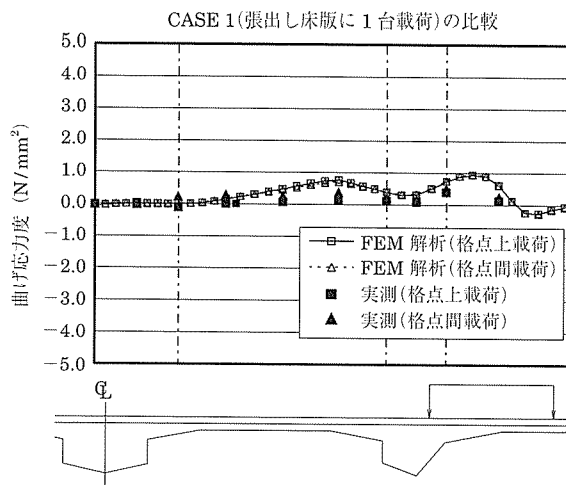


図 - 16 張出し床版載荷ケース

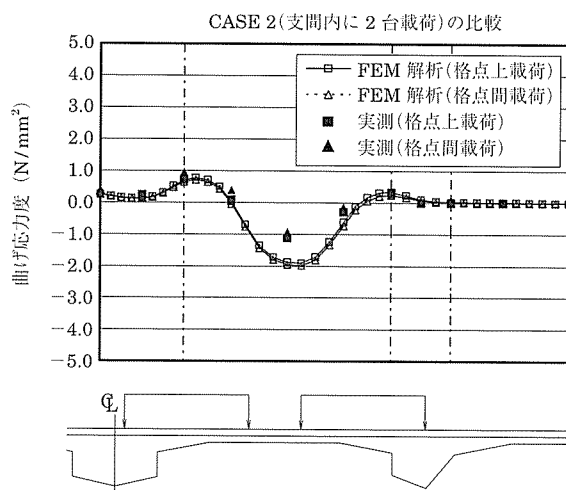


図 - 17 支間中央載荷ケース

- ・全体的に、実験結果は解析結果より若干小さな値を示す傾向にあるが、格点上・格点間とも床版に発生する曲げ応力度は事前に行った解析値におおむね合致した傾向を示している。

以上より、詳細設計で用いた床版のFEM解析モデルは計測結果に近い値を示しており、解析手法の妥当性が検証されたと判断できる。なお、今回の載荷実験では前輪の影響もあり、床版の詳細設計で用いたような道示に示すような荷重とは異なるため、格点部・格点間での応力に差は発生しないものであった。

4. おわりに

本工事は、世界初の複合トラスラーメン橋として平成14年3月から詳細設計や各種の実験を行い、また「第二東名高速道路 PC 複合トラス橋の設計施工に関する技術検討委員会」(委員長: 池田尚治横浜国立大学名誉教授)の各委員および関係各位の貴重なご意見・ご指導も頂き、平成18年1月末に無事竣工を迎えることができた。橋体完成後、さらに、ラーメンを有する本構造の動的特性を把握するため、

○ 工事報告 ○

振動実験を行ったが、これについては別途報告するものとする。

最後に、本橋の設計・施工にご指導頂いた方々をはじめ、工事に携わったすべての方に感謝の意を表します。

参考文献

1) 加藤, 本間, 青木, 星加: PC 複合トラス橋の格点構造に関する研

究, 第 12 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講演論文集, pp.277 ~ 280, 2003.10

2) 青木, 本間, 山口, 星加: PC 複合トラス橋の設計・施工—第二東名高速道路 猿田川橋—, コンクリート工学 Vol.42, No.8

3) 青木, 能登谷, 加藤, 高德, 上平, 山口: 第二東名高速道路猿田川橋・巴川橋の設計・施工, 橋梁と基礎, Vol.39, No.5

【2006 年 3 月 16 日受付】



刊行物案内

第 14 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

(平成17年11月)

本書は、平成17年11月に新潟市（朱鷺メッセ）で開催された標記シンポジウムの講演論文集です。

頒布価格：会員特価 10 000 円（非会員価格 12 000 円）（送料はいずれも 600 円）
体 裁：B5判，箱入り