

(39) PC複合トラス橋の適用性に関する一考察

高德 裕平¹・加藤 敏明²・野村 敏雄³

¹正会員 株式会社大林組 東京本社 土木技術本部構造技術部
(〒108-8502東京都港区港南2-15-2品川インターシティB棟)
takatoku.yuhei@obayashi.co.jp

²正会員 株式会社大林組 東京本社 土木技術本部構造技術部
(〒108-8502東京都港区港南2-15-2品川インターシティB棟)
kato.toshiaki@obayashi.co.jp

³正会員 株式会社大林組 技術研究所 土木構造研究室
(〒204-8558東京都清瀬市下清戸4-640)
nomura.toshio@obayashi.co.jp

PC複合トラス橋は、PC箱桁橋のコンクリートウェブを鋼トラス材に置き換えた構造で、従来のPC橋に比べて主桁自重の軽減や施工の省力化によるコストダウンが可能であり、今後の発展が期待される橋梁形式である。国内では数橋の実施例があり、新しい橋梁形式として設計・施工に関する技術基準が確立しつつある。複合トラス構造では、特に鋼トラス材軸力をコンクリート床版へ伝達する格点部の構造が重要となる。筆者らは格点部の構造として、シンプルかつ施工性・経済性に優れた構造を目標に、二重管格点構造を開発した。本論文では、この格点構造の開発や橋梁の設計を通して得た知見をもとに、複合トラス橋の適用性に関する一考察について述べる。

Key Words : composite structure, steel web truss, joint structure

1. はじめに

PC複合トラス橋は、通常のPC箱桁橋のコンクリートウェブを鋼トラス材に置き換えた構造で、鋼とコンクリートの長所を組合せることにより、主桁自重の軽減、施工の省力化および景観性の向上を目指したものである。図-1に複合トラス橋のイメージ図を示す。

複合トラス橋の設計においては、鋼とコンクリートの複合構造であることから、通常のPC箱桁橋とは異なる留意点があり、PC複合トラス橋特有の設計手法を用いることとなる。本論文においては、筆者らが複合トラス橋の詳細設計や技術開発を通して得た知見をもとに、今後の複合トラス橋の適用性に関する一考察について述べる。

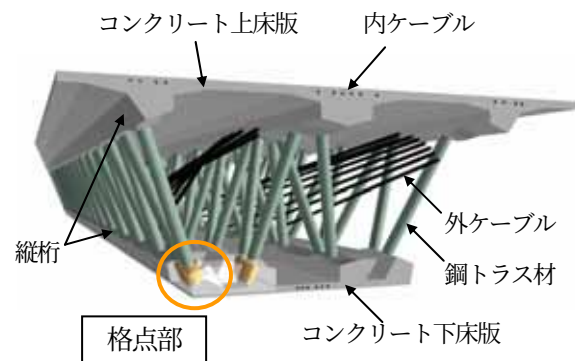


図-1 複合トラス橋イメージ図

表-1 PC複合トラス橋の実績

橋 名	最大支間長	全幅員	構造形式
猿 田 川 橋	110m	17.259m	PC7 径間連続 π 型複合トラス橋
巴 川 橋	119m	17.253m	PC5 径間連続 π 型複合トラス橋
木ノ川高架橋	85m	11.15m	PC4 径間連続複合トラス橋
山 倉 川 橋 梁	53.2m	6.75m	PC 単径間連続複合トラス橋
志 津 見 大 橋	75m	10.75m	PC5 径間連続複合トラス橋

2. 複合トラス橋の施工事例

(1) 複合トラス橋の施工事例

複合トラス橋は、1984年にアルボア橋で始めて施工されて以来、海外ではブローネ高架橋（写真-1）、ブラ・ド・ラ・プレン橋など数橋が施工されている。一方、アルボア橋とほぼ同時期に施工されたシラン高架橋（写真-1）の構造形式であるコンクリートトラスウェブ橋はその後の採用事例は少ない。国内においては、現在施工中の橋梁を含め5橋の事例がある。国内における複合トラス橋の施工事例を表-1に示す。



写真-1 ブローネ高架橋のセグメント

(2) 複合トラス橋の構造概要

これまで設計・施工されたトラス橋のスパン・桁高の関係を図-2に示す。複合トラス橋の場合、ウェブが鋼トラスであることから桁高変化に対する主桁重量増減の感度は低く、桁高が大きくなってもウェブ重量が大きく変わらないという利点がある。このため、複合トラス橋では通常の箱桁橋と比べ、桁高を大きく設定する傾向にある。これまで施工された複合トラス橋の最大支間長は、国内では猿田川橋・巴川橋の119mが最長となる。

また、複合トラス橋では柱頭部も鋼トラス材により構成する場合と柱頭部のみコンクリートウェブとする場合がある。ブローネ高架橋（写真-3）は前者、猿田川橋（写真-4）は後者となる。



写真-2 シラン高架橋



写真-3 ブローネ高架橋の柱頭部構造

(3) 格点構造

上・下コンクリート床版と鋼トラス材の接合部である格点構造は、構造上最も重要な部位であり、これまでの事例でも様々な構造が採用されている。複合トラス橋の格点構造は作用せん断力に対して十分な耐荷力を有していることが求められ、さらに、施工面への配慮も必要となる。これまでに採用された事例としては、ジベル鉄筋によるものやPCケーブルにより耐力の向上を図ったものがある。筆者らは、経済性、施工性に優れた格点構造として、二重管格点構造を開発し、安全性検証のための耐荷力実験を行い、実橋にて採用するに至った。¹⁾

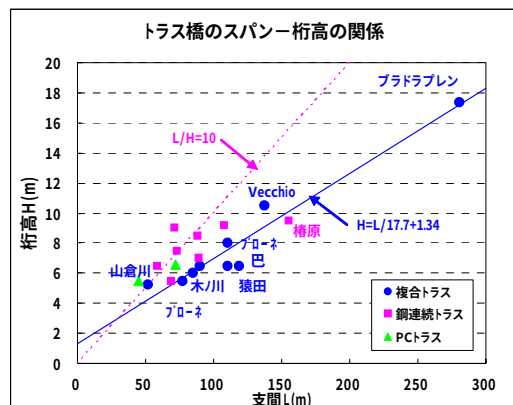


図-2 スパン桁高比



写真-4 猿田川橋の柱頭部構造

3. 複合トラス橋の設計・施工概要

複合トラス橋の設計・施工概要として、第二東名高速道路猿田川橋・巴川橋(写真-5)の事例を以下に紹介する。

(1) 第二東名高速道路 猿田川橋・巴川橋の概要

第二東名高速道路 猿田川橋・巴川橋の工事概要を下記に、全体平面図および主桁断面図を図-4に示す。²⁾

工 事 名：第二東名高速道路

猿田川橋（PC・鋼複合上部工）下り線工事
構造形式：PC連続複合トラスラーメン橋

道路規格：第一種 1 級 A 規格

設計荷重：B 活荷重

・猿田川橋（下り線）

橋 長：625.0m（7 径間）

支 間 長：63.5+2@90.0+100.0+2@110.0+58.5m

有効幅員：16.5m

平面線形：A=1000m～R=3000m

勾 配：縦断勾配：0.440%

横断勾配：2.83%～4.00%

・巴川橋（下り線）

橋 長：479.0m（5 径間）

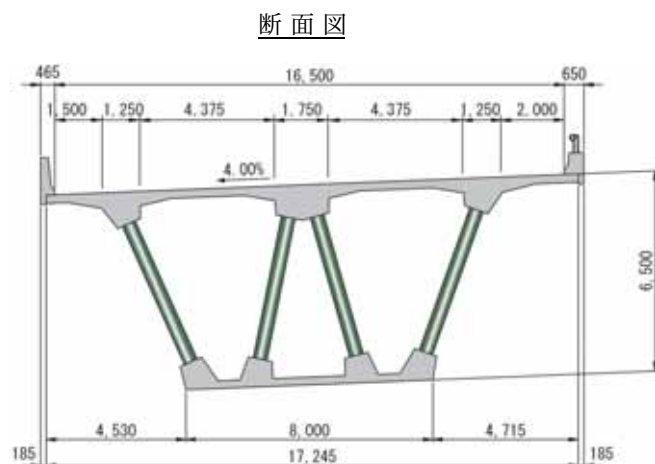
支 間 長：57.0+3@119.0+62.0m

有効幅員：16.5m

平面線形：R=3000m～A=1600m～R=4000m

勾 配：縦断勾配：0.440%

横断勾配：3.00%



(2) 格点構造

猿田川橋では図-5に示す二重管格点構造を採用している。二重管格点構造は、鋼トラス材本体の先端を加工した外面リブ付き鋼管およびその外側に配置するリブ付き孔あき鋼管、そしてその鋼管を連結するプレートで構成されている。トラス材軸力を定着部の外面リブからコンクリートを介して、外周に配置されたリブ付き鋼管に伝達される。さらに、この軸力をせん断力として外周の鉄筋コンクリートと連結プレートのSRC構造によって、もう一方のトラス材に伝達する。

二重管格点構造の定着性能および耐荷性能については、模型実験および解析による評価を実施している。二重管格点構造の主な特徴は以下のとおりである。

①軸力レベルに応じた経済的な設計が可能である。

②正負交番軸力に対応可能である。

③内外の鋼管の間に適当な隙間があることで、張出し施工における上越し管理や鋼トラス材の据付け誤差に柔軟に対応できる構造となっている。



写真-5 猿田川橋全景写真

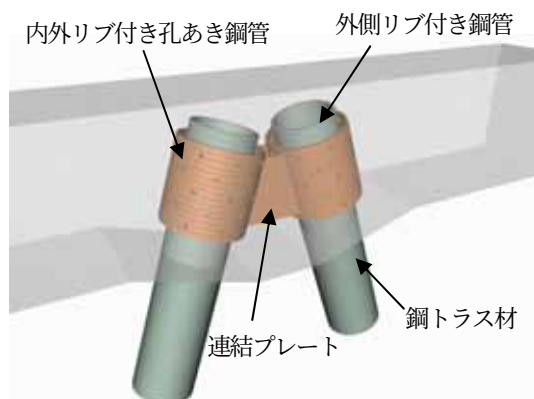


図-5 二重管格点構造

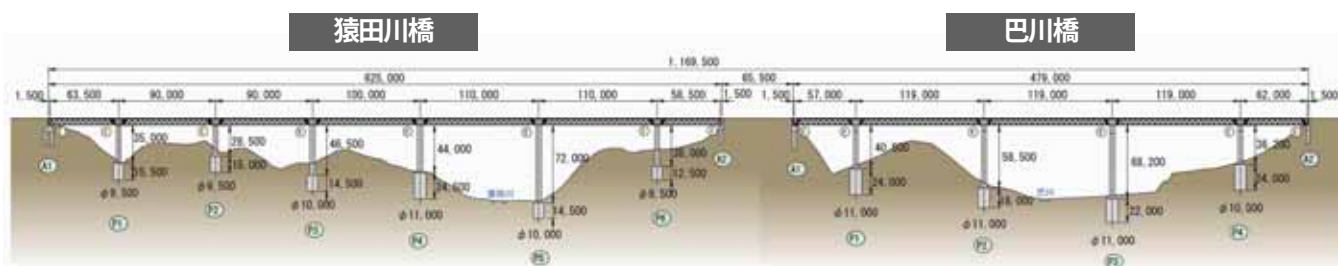


図-4 猿田川橋 構造一般図

(3)設計概要

a)構造概要

本橋は有効幅員が16.5mあるが、斜ウェブ断面とすることで橋脚幅を8mとして下部構造の小規模化を図っている。桁高については、6.5mの等桁高とすることで、桁高が大きくなってもウェブ重量が大きく変わらないというトラスウェブの利点を活かし、上・下床版の施工の合理化を図っている。猿田川橋最大スパン110mに対してスパン桁高比は16.9（巴川橋では18.3）となっており、鋼トラス橋（9～10）と比較すると桁高はかなり小さい。

b)設計方針

本橋では、格点部の重要性および耐久性への配慮などの観点から、設計荷重作用時において格点には、ひび割れを発生させないこととして上・下床版は引張応力を発生させないフルプレストスとした。また、終局荷重作用時および大規模地震時には、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。二重管格点部のせん断挙動に着目した本橋の設計方針を図-6に示す。

c)主方向の解析

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・収縮の影響を考慮したステップ解析を行っている。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を考慮するため、立体骨組解析により、断面内外の部材による分担率を考慮した。平面骨組解析モデルを図-7、立体骨組解析モデルを図-8に示す。²⁾

d)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大きい外ケーブル（19S15.2B）を積極的に使用している。この外ケーブルにより、主桁自重と逆向きのせん断力を与え、鋼トラス材の作用断面力および格点部に作用するせん断力の低減を図った。さらに、設計荷重作用時において上下床版に引張応力を発生させないように、外ケーブルと合わせて、内ケーブル（12S15.2B）を配置している。³⁾

e)鋼トラス材の設計

鋼トラス材には、SM490YB材、外径φ457.2mm、板厚=9～30mm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。

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填したCFT（Concrete Filled steel

Tube）構造を採用し、板厚の低減を図っている。具体的には板厚が30mmを超える部材を対象とし、鋼とコンクリートの合成断面での許容応力度設計により板厚を決定し、部材耐力の照査を行っている。

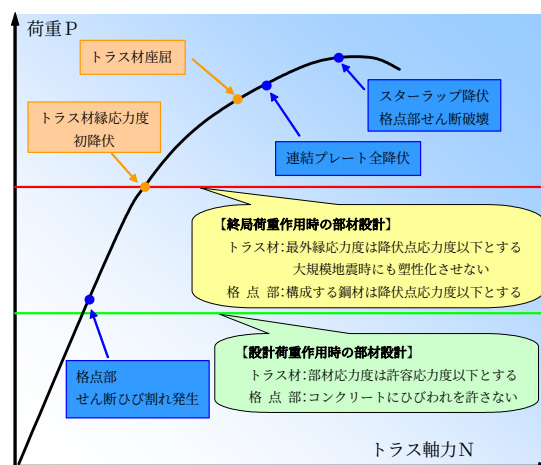


図-6 二重管格点部のせん断挙動に着目した設計方針

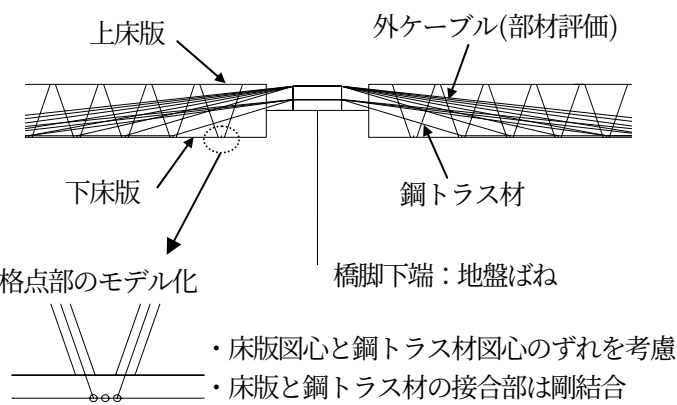


図-7 平面骨組解析モデル概要図

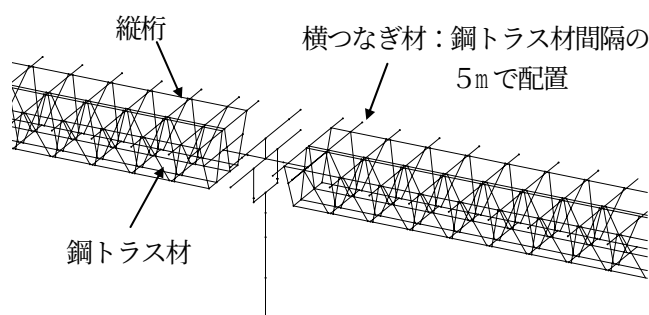


図-8 立体骨組解析モデル概要図

(4) 施工概要

a) 施工手順

猿田川橋・巴川橋では、移動作業台車を用いた張出し架設工法を採用している。主桁の張出し施工手順を図-9、施工状況写真を写真-6に示す。

b) 柱頭部の施工

本橋の柱頭部は、施工ブロック長（橋軸方向）が約17.5mであり、従来のPC箱桁橋の12mと比べて長い。

柱頭部の特徴的な構造として、鋼部材からコンクリートへの遷移区間となるよう、格点構造で連結された頭付きスタッド付き鋼トラス材がコンクリートウェブ内に埋設されている。また、ウェブ側面にテクスチャーを施すなど景観に十分な配慮を行っている（写真-7）。

c) 鋼トラス材の架設

本橋では鋼トラス材が3次的に配置されているため、その据付けに対する難易度はきわめて高い。施工サイクル短縮のためには、その作業がクリティカルパスにならないよう移動作業車内で効率よく行わなければならない。

以下に鋼トラス材単体の架設手順を示す。⁴⁾

- ① 下床版格点部内に埋設される部位の充填コンクリートを地上のヤードにて先行打設する。
- ② 揚重設備にて橋面上に荷揚げ後、トラス材運搬台車にて移動作業車の後方まで運搬する。
- ③ 移動作業車に設置した吊り天井クレーンにて、鋼トラス材の吊り込みを行う。
- ④ 所定の位置まで移動させた後、トラス受架台にトラス材を預ける。トラス受架台に設けた上下2箇所、の鉤型形状をした特殊バンドにより、トラス材を固定する。
- ⑤ トラス材を固定した後、最終的な微調整を行う。

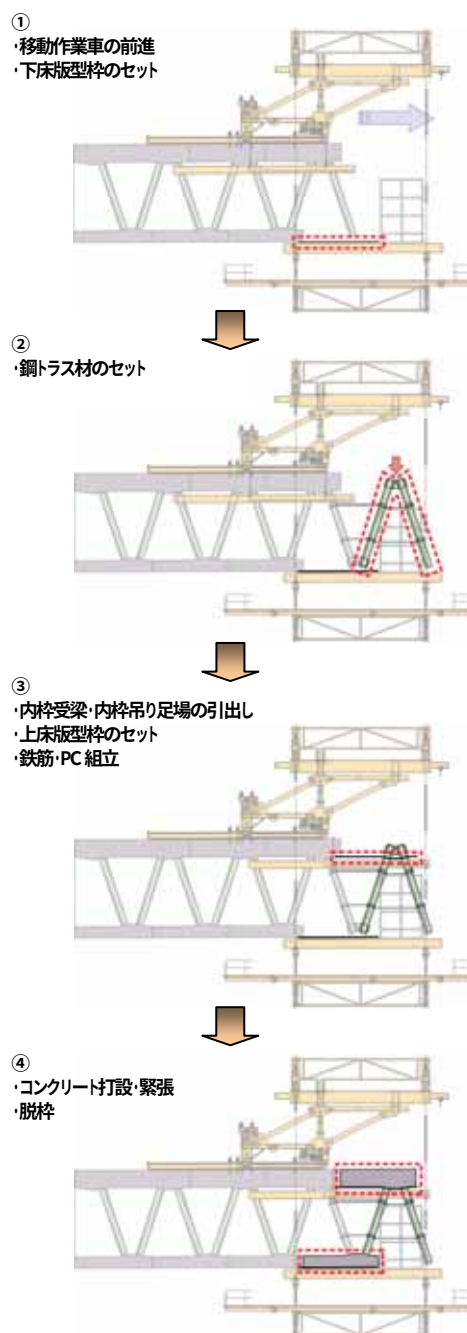


図-9 張出し施工手順図



写真-6 張出し架設状況



写真-7 柱頭部テクスチャ

4. 適用性に関する検討

上述した複合トラス橋の設計施工を通して、本構造をより合理的なものとするためには以下のような課題が挙げられる。

- ・トラス軸力の（効率的な）低減
- ・格点部せん断力の低減
- ・架設外ケーブル（定着突起）の削減

複合トラス橋では鉛直成分の大きな外ケーブルを配置することでトラス材軸力及び格点部せん断力の低減を図ることとなる。支間長が大きくなると、外ケーブル量が多くなり、結果として外ケーブル定着突起の増加に伴う主桁自重の増加や施工性への影響も懸念されることとなる。そこで、複合トラス橋をより合理的な構造とし、トラス材や格点部の設計を経済的なものとするためには、トラス材に発生する軸力を3000KN 程度以下に抑えることが設計のポイントとなる。そこで、図 - 10に示すような適用支間において複合トラス橋を採用することが考えられる。

図 - 10 に示した適用支間の考えは以下のとおりである。複合トラス橋を中規模支間(70~80m)へ適用し、外ケーブルに頼らない構造とする。また、それ以上の長支間橋梁ではエクストラドーズド形式として効率的なトラス材軸力の低減を図る。次に、これらの適用性に関する具体的な検討について述べる。

構造形式		適用支間 (m)			
		50m	100m	150m	200m
上路形式	PC複合トラス橋				
	エクストラードード PC複合トラス橋				

図-10 複合トラス橋の適用支間長

(1) 中規模支間橋梁への適用性に関する検討

複合トラス橋の適用性を検討するため、図-11に示す構造をもとに試設計を行った。架設工法は張出し架設工法を想定し、張出しブロック長もパラメーターとして検討した。その他、支間長・桁高をパラメーターとして経済性に関する検討を行うこととした。

(2) 桁高の設定について

複合トラス橋の場合、ウェブが鋼トラスであることから桁高変化に対する主桁重量増減の感度は低く、桁高が大きくなってもウェブ重量が大きく変わらないという利点がある。

桁高の設定が複合トラス橋の経済性に与える影響を検討するため、モデル橋梁において、桁高を6.0mから7.0mの範囲で設定した場合について試設計を行った。図-12に架設時の鋼トラス材軸力を示す。試設計の結果、桁高変化が6.0mから7.0mの範囲では鋼トラス材軸力は3%程度の範囲でしか変化しないため、鋼トラス材板厚への影響はほとんどないことがわかった。また、最大張出し時に必要となるPC鋼材量(SBPR12S15.2)は桁高変化が0.5mに対し2本増となった。

この結果から、桁高を6.0mから7.0mに変更しても鋼トラス材板厚の低減効果が極めて小さいため、鋼トラス部材長が長くなることでコストが増加する結果となった。したがって、桁高を6.0mに設定した方がより経済的になると判断できる。

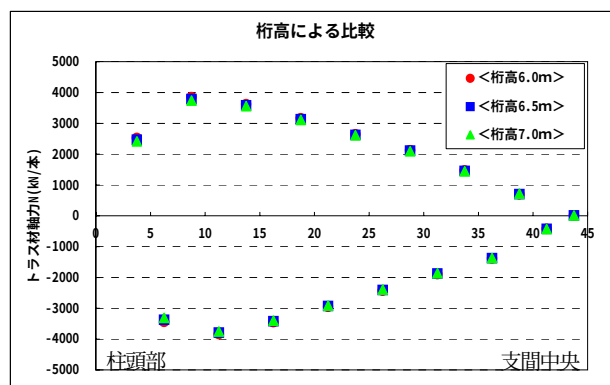


図-12 桁高ごとの架設時トラス材軸力

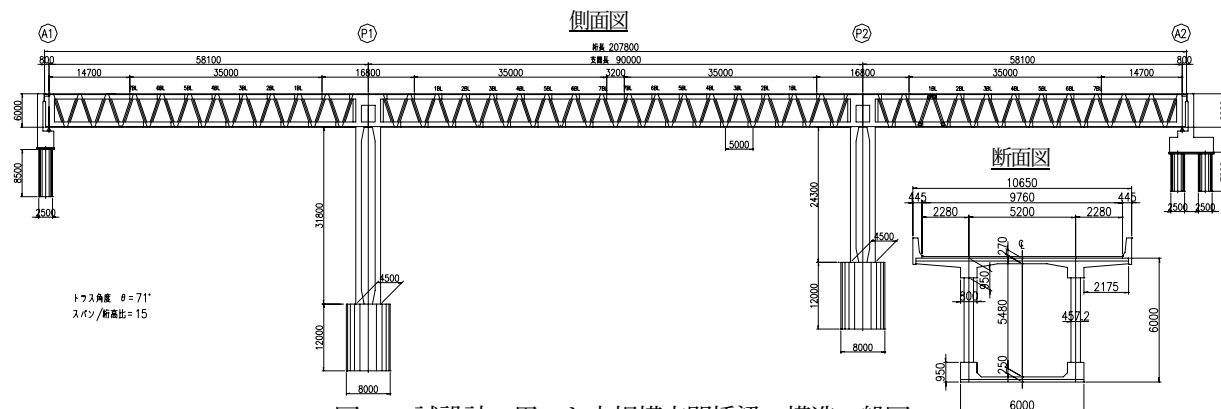


図-11 試設計で用いた中規模支間橋梁の構造一般図

(3)支間長の設定について

支間長が複合トラス橋の経済性に与える影響を検討するため、モデル橋梁にて支間長70m、80m、90mの3ケースで鋼トラス材の軸力を比較した。最大張出し時のトラス材軸力を図-13に示すが、支間長が90mから70mに変化することで、施工時のトラス材軸力は1000kN程度変化し、70mでは約3000kNとなっている。

構造系完成後での外ケーブル必要本数は、設計荷重時における支間中央部の曲げに対して決定され、19S15.2が8本必要となる。曲げに対して必要な外ケーブルは、1本あたり200kN程度のトラス材軸力低減効果があるため、完成系外ケーブルにより設計荷重時のトラス材軸力を3000kN以下とすることが可能となる。(図-14参照)よって、90m以下程度の支間長であれば、トラス材及び格点部の構造を比較的経済的なものとする事ができる。

(4)張出しブロック長の設定について

大型移動作業車の最大施工長を考慮して、張出し長(=格点間隔)5mと4mでコスト比較を行った。張出し長が4mでは標準型2000kN・m、5mでは大型3500kN・mの移動作業車となる。

施工時の移動作業車の能力・重量が変わるため、最大張出し時の最大トラス材軸力は張出し長5mの方が550kN程度大きくなる(図-15参照)。ただし、柱頭部から2～3BLでは両者の軸力差はあるが、それ以降のブロックでは軸力差は非常に小さくなる。内ケーブル量は最大張出し時で決定されるが、移動作業車重量の差による柱頭部での鋼材必要本数の差は2本である。

張出し長4mでは施工ブロック数が2ブロック多いが、総PC鋼材量を比較するとその差は1%程しかない。張出し施工に関するコストはブロック長の長い5mの方が高くなるが、トラス本数と格点数が4mに比べて減るコスト低減効果の方が大きいと、5mの張出しブロック長の方が経済的であると判断される。

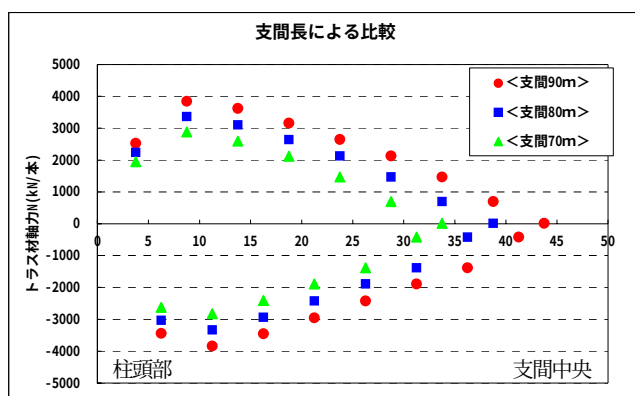


図-13 支間長ごとの架設時トラス材軸力

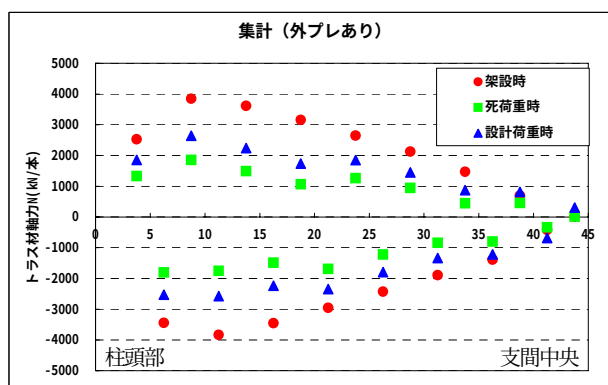


図-14 設計荷重時トラス材軸力(支間長90m)

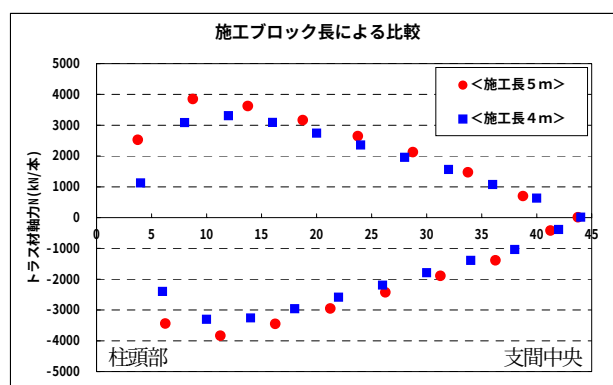


図-15 施工ブロック長ごとの架設時トラス材軸力

(5)エクストラードード形式の併用について

支間長が150m以上の長支間となる場合は、エクストラードード形式(図-16)を併用し、大偏心外ケーブルによる効率的なトラス材軸力の低減を図る必要があると考える。大偏心外ケーブルによるトラス材軸力の低減効果を検証するため、以下のような条件にて試設計を行った。試設計の対象は、支間長100mの2径間連続エクストラードード橋とし、1ブロック5.0mの移動作業車による張出し施工を想定した。幅員は9.75mの2車線対応、桁高は3.5mとし、斜材ケーブルは27S15.2を10段・2列配置としている。解析は図-17に示すような3次元FEMモデルを用い、張出しステップを再現し、施工時のクリープ・収縮の影響を考慮することとした。



図-16 エクストラードード複合トラス橋

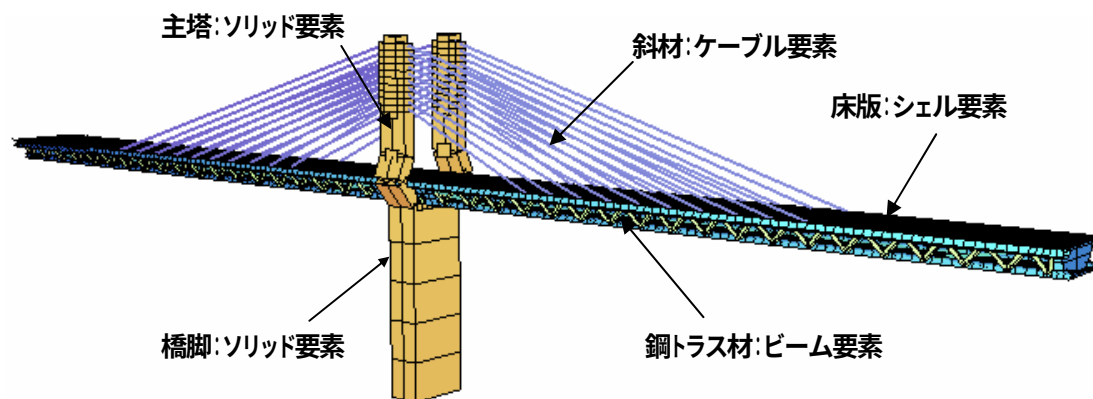


図-17 エクストラードード複合トラス橋 解析モデル概要図

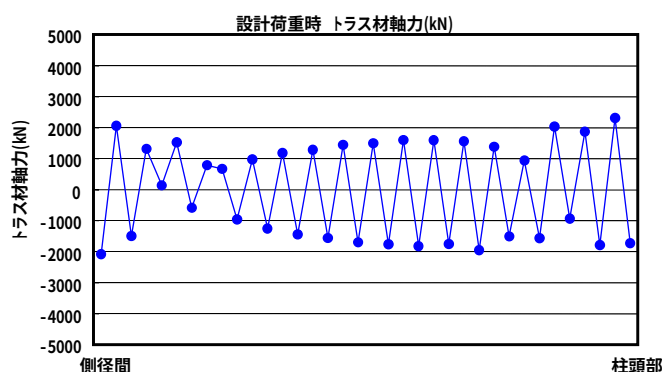


図-18 設計荷重時トラス材軸力

解析の結果、図-18に示すように設計荷重時の鋼トラス材軸力は一律2000Kn程度となり、斜材ケーブルによりトラス材軸力が低減かつ平準化されていることがわかった。この結果として、エクストラードード形式の複合トラス橋では、経済的な鋼部材の設計が可能と言える。

本試設計により、複合トラス構造とエクストラードード形式の併用は非常に合理的であると判断されるが、今後、実橋での採用に向けては斜材定着部と格点部の取合いなど、具体的な構造に対する検討が必要であると考えられる。

5. おわりに

以上、複合トラス橋の設計・施工概要と適用性に関する一考察を述べた。本報告が同形式の橋梁の設計・施工の一助となれば幸いである。

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, 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2005vol39, pp5~pp11, 2005.05
- 3) 高德, 長谷, 宮越, 佐藤: 第二東名高速道路 猿田川橋・巴川橋の設計ーPC複合トラス橋の設計ー, 第13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.63~66, 2004.10
- 4) 新倉, 本間, 宮越, 山口: 第二東名高速道路 猿田川橋・巴川橋の施工報告, 第13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.529~532, 2004.10

CONSIDERATION CONCERNING APPLICABILITY OF COMPOSITE TRUSS BRIDGE

Yuhei TAKATOKU, Kato TOSHIKI, Toshio NOMURA

The composite truss bridge is the structure to replace concrete web of PC box girder bridge with steel truss, and reduction in costs by the reduction of self-weight and labor saving of construction is more possible than a past PC bridge. In the composite truss structure, the joint structure where the steel truss axis power is especially transmitted to the concrete slab becomes important. Authors developed a double steel-pipe joint structure, aiming at an excellent structure in simplicity, construction, and the economy. In this thesis, consideration concerning the applicability of the composite truss bridge is Described, based on the finding obtained through the development of this joint structure and the design of the bridge.