

PC 複合トラス橋格点部の構造特性に関する研究 (その2)

- 静的はり模型載荷実験による耐荷性能に関する検討 -

野村 敏雄

大野 了

(本社海外土木事業部海外土木第一部)

加藤 敏明

(本社土木技術本部構造技術部)

Study on Strengthening Performance of Joints in PC Hybrid Truss Bridges (Part2)

- Static loading test with 1/2-scale model specimen -

Toshio Nomura

Satoru Ohno

Toshiaki Kato

Abstract

In PC Hybrid Truss Bridges, the joints between PC slabs and steel trusses are especially important for transferring member forces. Two new joint systems have been developed for the Second Tomei Expressway. One is called a double steel tube connection and comprises an outer tube of welded steel plates outside the steel trusses in the concrete slabs. The other is called a double gusset plate connection and comprises gusset plates connected directly to the steel trusses.

A static loading test was performed on a 1/2-scale model specimen to verify the performance of these joint systems. The following conclusions were obtained. 1) The proposed joint systems has sufficient strength to carry the design loads. 2) Large residual strength was maintained after the shear yield of joints and excellent ductility was obtained.

概要

PC 複合トラス橋の格点部は、フランジに相当するコンクリート床版にウェブに相当する鋼トラスを定着させる構造となっており、構造上重要な部位となる。第二東名高速道路のPC 複合トラス橋では、鋼トラス材に大きな軸力が作用する場合も、十分な耐荷力を有するこの格点部の定着構造として、1) トラス材の外周に鋼管を配置し、連結プレートを配した二重管格点構造と、2) 格点部で隣接するトラス材をガセットプレートで結合した二面ガセット構造が採用される。

そこで、これら2種類の格点部を有する複合トラス橋の安全性と構造特性を確認するために、実橋を模擬した縮尺1/2の複合トラスはり模型による載荷実験を実施した結果、以下のことが明らかになった。1) いずれの格点部も、各設計荷重レベルにおいて十分な耐荷性能を有している。2) 格点部がせん断破壊した後も、梁全体として急激に破壊することなく、良好な変形性能を示した。

1. はじめに

従来、山岳部の急峻な地形で橋梁を施工する場合は、片持架設工法によるPC 箱桁橋が多く採用されている。しかし、支間が長くなる場合には、断面力に対する自重の影響や施工性の問題等が生じる可能性がある。

Fig. 1に示すPC 複合トラス橋は、PC 箱桁橋のウェブに鋼トラスを用いたコンクリート・鋼複合構造橋である。従来、15～30%程度の自重を占めるコンクリートウェブを鋼トラスにすることで自重の低減を図るとともに、基礎・下部構造の負担を低減することができる。

PC 複合トラス橋ではトラス材と上下床版との定着部は、軸力および曲げモーメント、せん断力を伝達する重要な部位である。長支間の場合、鋼トラス材に作用する軸力が大きくなることが想定されるので、Fig. 2に示す二重管格点構造¹⁾とFig. 3に示す二面ガセット格点構造が、第二東名高速道路で計画されているPC 複合トラス橋では採用されることになった。そこで、実橋で用いられるこれら2種類の格点部のはり部材としての安全性と構造特性を確認するために、縮尺1/2の複合トラスはり模型載荷実験を行った。

2. 格点構造

2.1 二重管格点構造

二重管格点構造¹⁾は、Fig. 2に示すように外側リブ付き鋼管(トラス材)、内外リブ付き孔あき二重鋼管、連結プレートで構成されている。トラス材の受持つ軸力は、リブ付き鋼管からコンクリートを介し、外側に配置される内外リブ付き鋼管に伝達される。さらに、この軸力はせん断力として外周コンクリートおよび連結プレートにより、一方のトラス材に伝達される構造となっている。

2.2 二面ガセット格点構造

二面ガセット格点構造は、Fig. 3に示すようにコンクリート桁内部で、トラス材端部に溶接したガセットを高力ボルトで添接板に摩擦接合した構造である。トラス材軸力は、基本的に高力ボルトにより摩擦接合された鋼部材間で直接伝達されと考えられる。

3. 試験体

試験体は実橋の1/4構面を模擬しており、上下床版、トラス材および格点部で構成される。Fig. 4に試験体の概要を示す。また、使用した材料とその強度試験結果をTable 1に示す。

試験体は、実橋の柱頭部からの張出し部分を対象に、6本のトラス材と6ヶ所の格点部を有する。第1～3格点部を二面ガセット格点構造とし、第4～6格点部を二重管格点構造とした。なお、上下床版には、実橋の設計荷重時におけるコンクリートの斜圧縮応力度が 2.0 N/mm^2 程度となるようにプレストレス(上床版: 8-1 S 28.6, 下床版: 6-1 S 28.6)を導入した。

二重管格点構造のせん断耐力は、RCのせん断耐力と連結プレートのせん断耐力の和として表されと考えられる。本実験は格点部のせん断挙動および力の伝達機構の評価を目的としているが、重ね合わせの成立性を確認するために、せん断補強筋量と連結プレートの厚さをパラメータとして、第4～6格点部に適用した。Table 2に各格点部の諸元を示す。

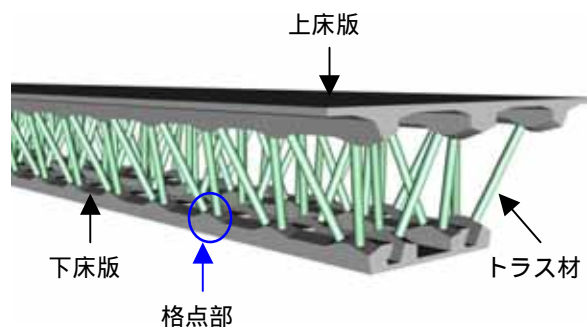


Fig. 1 PC複合トラス橋
PC Hybrid Truss Bridge

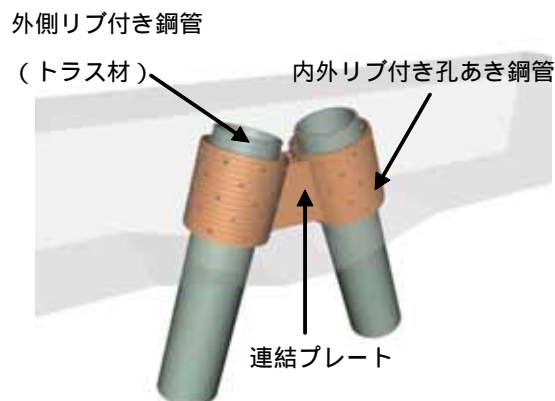


Fig. 2 二重管格点構造
Joint using Double Steel Tube Connection

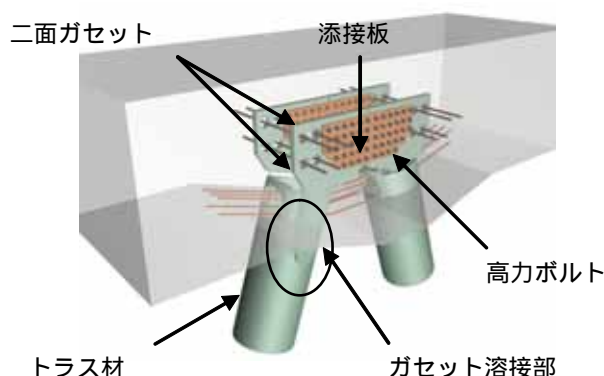


Fig. 3 二面ガセット格点構造
Joint using Double Gusset Plate Connection

Table 1 使用材料
Mechanical Properties

	材 料	鋼材降伏点および コンクリート圧縮強度 (N/mm^2)	弾性係数 ($\times 10^4 \text{ N/mm}^2$)	適用部位
トラス材	STK490 ($\phi 216.3$ $t=12.7$)	496	21.1	第1～第6トラス材
連結プレート	SM490A ($t=10.0$)	339	21.1	第 6格点部 (二重管格点構造)
	SM490A ($t=12.0$)	392	21.0	第 4格点部 (二重管格点構造)
	SM490A ($t=14.0$)	318	20.6	第 5格点部 (二重管格点構造)
	SM490YA ($t=13.0$)	414	21.4	第 1～第 3格点部 (二面ガセット格点構造)
鉄筋	D10 (SD345)	354	18.7	上下床版主鉄筋, せん断補強筋 (第 4, 6格点部を除く)
	D13 (SD345)	349	19.1	第 4格点部のせん断補強筋
	D16 (SD345)	353	18.8	第 6格点部のせん断補強筋
コンクリート	トラス材中詰め	50.5 (3.73)	2.89	圧縮トラス材充填コンクリート
	下床版	47.2 (3.70)	2.68	下床版、()内は引張強度
	上床版	43.9 (4.04)	2.79	上床版、()内は引張強度

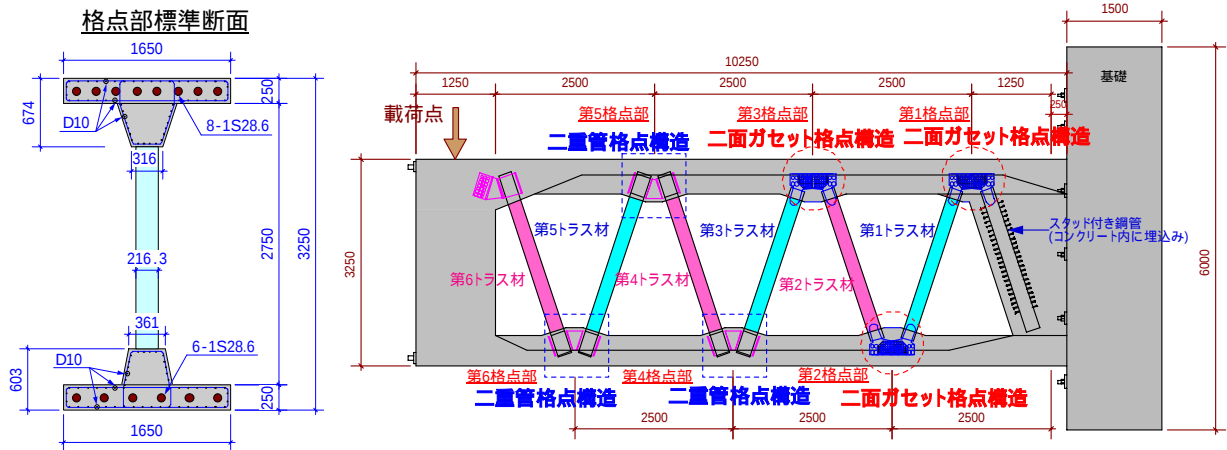


Fig. 4 複合トラスはり試験体
Test Specimen

4. 载荷方法

Fig. 5に载荷ステップを示す。载荷は、試験体頭部に取付けたアクチュエータにより、鉛直方向に漸増繰返し载荷とした。繰返し荷重は、設計荷重最大時と最小時の間およびL2地震最大時と最小時の間でそれぞれ3回の繰返しとした。

なお、今回の試験体形状およびその载荷形式の場合、事前の弾性骨組み解析から、第3～5トラス材の軸力が卓越すること、また、第1, 3, 5トラス材の軸力が引張りとなり、第2, 4, 6トラス材のそれが圧縮となることが確認されている。

5. 破壊性状

Fig. 6に試験体载荷点での荷重(P)と鉛直変位(δ)の関係を示す、Fig. 7に全体変形モードをそれぞれ示す。また、Photo 1に载荷終了時の試験体全景を示す。

試験体の破壊過程は、以下の通りであった。L2地震最大時まで大きな損傷はなく、終局荷重時(P=1075kN)付近で、第3, 4, 5格点部の引張トラス材付け根に放射状のひび割れが入ったが、荷重は低下しなかった。その後、P=1200kNで第3, 5格点部に、P=1230kNで第4格点部にそれぞれ初期のせん断ひび割れが発生した。

さらに荷重を増加させると、P=2081kNで第5格点部の連結プレートが初降伏し、P=2250kNで第5格点部のせん断補強筋が降伏した後、P=2370kNで第5格点部の連結プレートが全降伏し、荷重が若干低下した。その後、P=2380kN(最大荷重)で第4格点部のせん断補強筋の降伏と連結プレートの全降伏により荷重が再度低下した。そのまま载荷を続けると、第2格点部付近の第1トラス材側下床版のコンクリートが曲げ圧壊し、荷重が大きく低下した。

以上の破壊状況から、各格点部は、想定した各設計荷重段階に対して、十分な耐荷性能を有していることが確

Table 2 二重鋼管格点構造のパラメータ
Specifications of each Joint

適用格点部	せん断補強筋(p_w :鉄筋比)	連結プレート
第5格点部	SD345 D10@65 ($p_w=0.50\%$)	SM490A t14×2
第4格点部	SD345 D13@75 ($p_w=0.77\%$)	SM490A t12×2
第6格点部	SD345 D16@85 ($p_w=1.06\%$)	SM490A t10×2

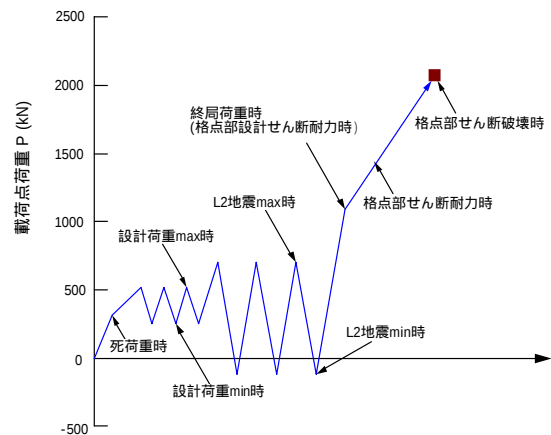


Fig. 5 载荷ステップ
Loading Steps

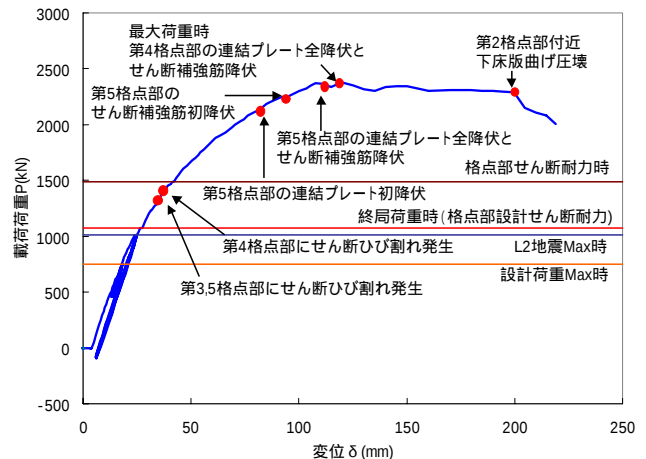


Fig. 6 荷重～変位関係
Load Displacement Relationship

認できた。また、せん断力が卓越する格点部が複数配置された複合トラス橋では、万一、一つの格点部が破壊した場合でも、脆性的な破壊とはならず、耐荷力を保持することから、橋梁全体で変形性能の優れた構造であることが分かった。

6. 格点部の応力状態

前節で述べたように、二重管格点構造の破壊性状は、せん断補強筋の降伏および連結プレートの全降伏に至った際に生じると考えられる。

ここでは、実験時にせん断降伏した第4、5格点部およびせん断ひび割れの進行が顕著であった第3格点部の応力状態について検討を行った。各格点部の連結プレートおよび添接板の応力履歴をFig. 8に、せん断補強筋の応力履歴をFig. 9に示す。また、各格点部のひび割れ状況をPhoto 2に示す。なお、連結プレートおよび添接板の応力は、三軸ゲージにより測定し、降伏の判定は式(1)に示すように、von Misesの降伏条件を適用した。

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2} \quad (1)$$

(a) 第5格点部：連結プレートの応力は、荷重の増加とともに増大し、プレート幅の狭い箇所から順次、降伏応力に達している。また、せん断補強筋の応力も同様に荷重の増加とともに増大し、せん断補強筋は概ね降伏している。

(b) 第4格点部：連結プレートの応力は、荷重の増加とともに増大するが、第5格点部の連結プレートが全降伏（図中の●印）した後、連結プレートの応力が急激に増加している。これは、第5格点部が降伏ヒンジとなり、第4格点部に力が伝達されたため、第4格点部のプレート応力が増加したと考えられる。

(c) 第3格点部：添接板の応力は、載荷中、降伏応力に達しなかった。また、せん断補強筋も一部降伏しているものの、その他は降伏応力に対して余裕があった。したがって、第3格点部（二面ガセット格点構造）は、第5、第4格点部がせん断破壊した後、最終破壊状況である下床版の曲げ圧壊に至るまで、十分な耐荷力を保持していたと考えられる。

7. 二重格点構造のせん断耐力評価

7.1 作用せん断力の推定

格点部に作用するせん断力は、トラス材軸力の鉛直成分と上下床版に作用するせん断力の総和と考えられる。しかし、作用するせん断力は、直接計測できないため以下の方法により推定した。

1) トラス材から伝達されるせん断力：トラス材ひずみを積分してトラス材軸力を算定し、その鉛直成分をトラス材から格点部に作用するせん断力とする。

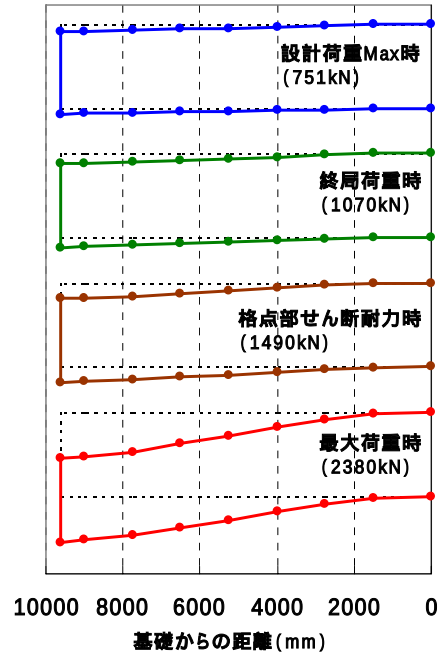


Fig. 7 変形モード
Deformation Mode



Photo 1 実験終了時試験体全景
Final View of Specimen

2) 上下床版から伝達されるせん断力：上下床版の主鉄筋のひずみ分布から平面保持を仮定し、各断面のモーメントを算定し、隣合う断面間でのモーメント勾配より上下床版のせん断力を求める。

Fig.10に格点部周辺の作用せん断力状況を、Table 3に最大荷重時の作用断面力の一覧をそれぞれ示す。なお、図表中の θ はトラス材の水平軸からの角度(71.7°)を示す。表から明らかなように、算出したせん断力は、格点部左右の値がほぼ等しくなっており、作用せん断力が適切に求められていると考えられる。

7.2 格点部のせん断耐力

二重管格点部のせん断耐力(V_{us})は、格点部をモデル化した部分模型実験結果^{1), 2)}より、コンクリートのアーチ作用(V_c)、せん断補強筋のトラス機構(V_s)と連結プレー

トのせん断降伏耐力(V_p)の総和として、以下の式(2)～(5)のように表すことが出来る^{3),4),5)}と考えられる。

$$V_{us} = V_c + V_s + V_p \quad (2)$$

$$V_c = \alpha \cdot \sigma_c \cdot b \cdot \left(\frac{D}{2}\right) \cdot \sin \theta \quad (3)$$

ここに、

σ_c : コンクリートの圧縮強度(N/mm^2)

α : コンクリートの圧縮強度に関する有効係数。部分模型実験結果より、ここでは $\alpha=0.22$ を採用する。

b : 有効幅(mm)、ここでは梁の全幅とする。

D : 有効高さ(mm) (Fig.11参照)

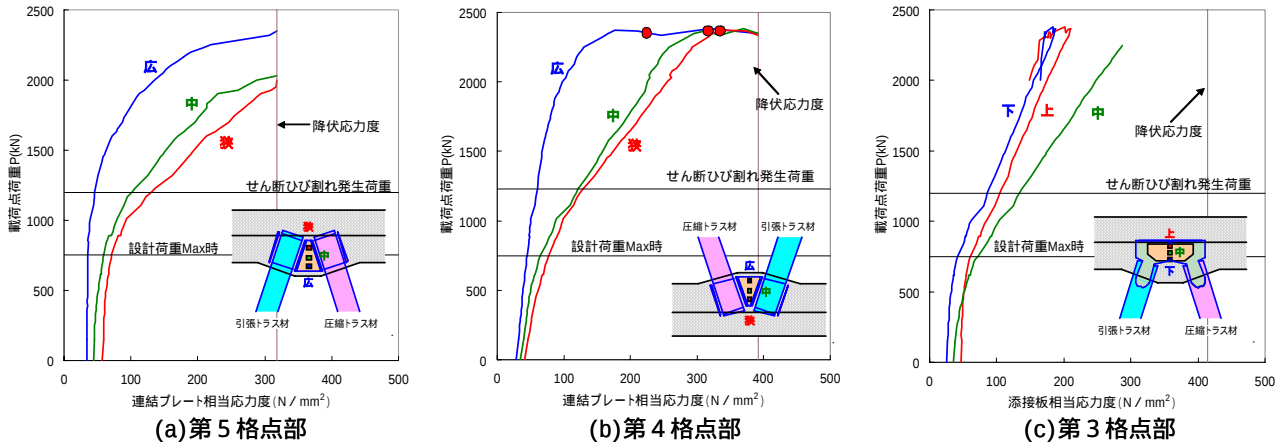


Fig. 8 連結プレートおよび添接版の応力履歴
Stress Hysteresis of the Connecting and Attachment Plate

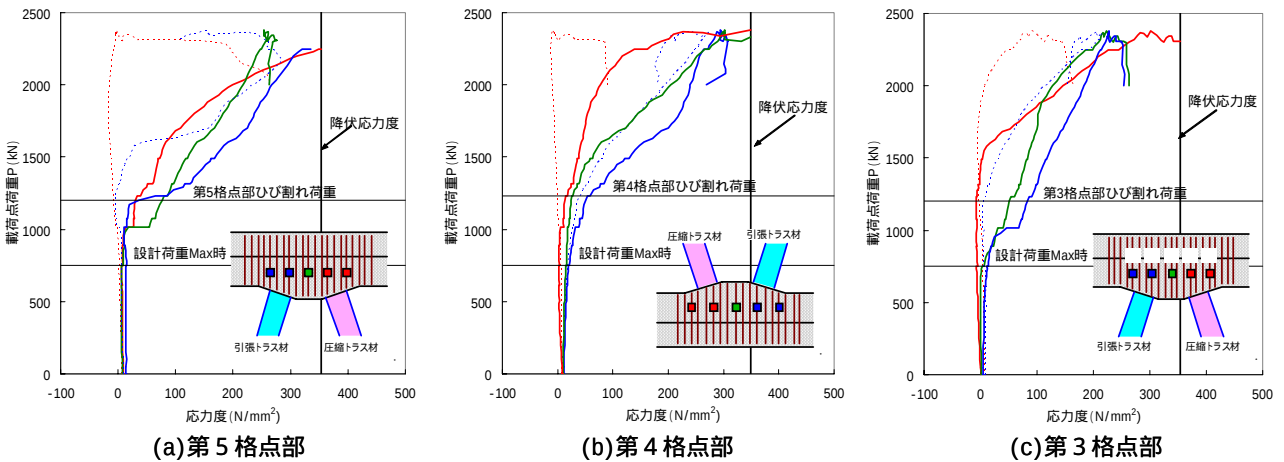


Fig. 9 せん断補強筋の応力履歴
Stress Hysteresis of the Shear Reinforcement

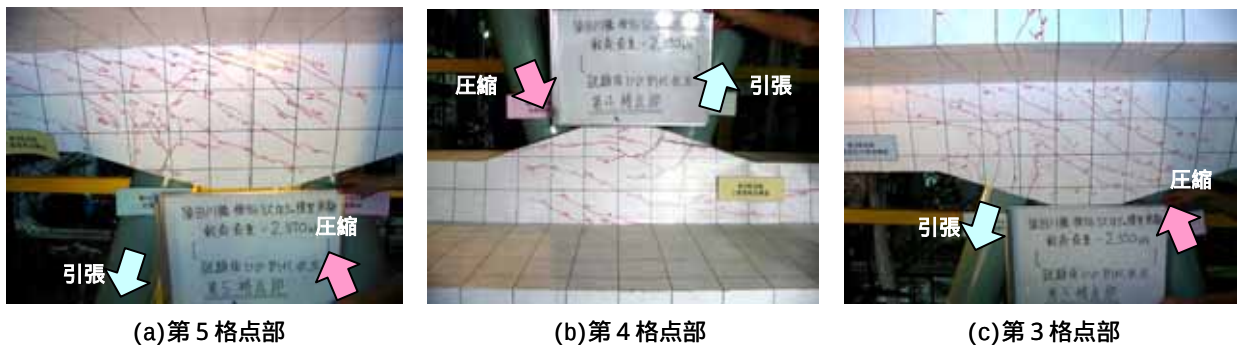


Photo 2 格点部のひび割れ状況
Crack Pattern of Joints

θ : アーチ機構の角度で $\tan \theta = (D/2) / L$ とする。

L : せん断スパン(mm) (Fig.11参照)

$$V_s = \frac{\sigma_{sy} \cdot A_s \cdot D}{1.15 \cdot s} \cdot \cot \phi \quad (4)$$

ここに,

σ_{sy} : せん断補強筋の降伏応力度(N/mm²)

A_s : せん断補強筋の断面積(mm²)

s : せん断補強筋の配置間隔(mm)

ϕ : トラス機構の圧縮材の角度

$$V_p = \tau_{sy} \cdot A_w \quad (5)$$

ここに,

τ_{sy} : 連結プレートのせん断降伏強度(N/mm²)

A_w : 連結プレートの断面積(mm²)

Table 4に実験で得られた作用せん断力とせん断耐力式による計算値の比較を示す。実験値は計算値の約15%程度大きくなっている。この原因として、提案式がプレストレスの効果によるコンクリートの負担分の増加を考慮できていないことや、アーチ機構におけるコンクリートの圧縮強度に関する有効係数の与え方などが挙げられるが、現段階では、概ね安全側に評価できていると考えている。ただし、今後、FEM解析等を実施し、より精度の高い実験結果の検証を実施する必要がある。

8. まとめ

2種類の格点構造(二重管格点構造と二面ガセット格点構造)を有した複合トラス橋のはり模型実験を実施した結果、はり部材として十分な耐力と変形性能を有しており、その安全性が確認された。また、2種類の格点部構造は十分な耐荷性能を有しており、また、二重管構造のせん断耐力は提案した評価方法で算定可能なことが確認された。

謝辞

本研究を実施するにあたり、「第二東名高速道路 鋼・トラス複合構造橋梁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)」の委員の方々をはじめ関係各位に貴重な助言をいただきました。ここに記して、厚く御礼申し上げます。

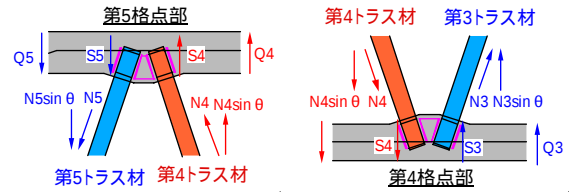


Fig. 10 格点部周りの作用断面力
Acting Section Force of Joint

Table 3 格点部周りの作用力
Estimated Force of Joints

格点部	トラス材軸力(kN)	Nsin θ(kN)	床版のせん断力(kN)	格点部せん断力(kN)	平均(kN)
第5格点部	N4	4390	Q4	-1340	2850
	N5	2710	Q5	300	
第4格点部	N3	4020	Q3	-510	3370
	N4	4390	Q4	-740	

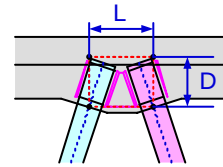


Fig. 11 せん断負担範囲
Shear Span and Effective Height of the Concrete

Table 4 実験値と計算値の比較
Comparison of Shear Force

格点部	実験値(kN)	計算値(kN)				/
		V_{us}	V_c	V_s	V_p	
第5格点部	2850	2460	350	680	1430	1.16
第4格点部	3370	2920	380	1030	1510	1.15

参考文献

- 1)野村,他:PC複合トラス橋格点部の構造特性に関する研究,大林組技術研究所報 No.68,2004
- 2)大野,他:PC複合トラス橋における格点構造の耐荷性能に関する実験的検討,コンクリート工学年次論文集,Vol.26, No.2, pp.697-702,2004
- 3)日本建築学会:鉄筋コンクリート構造物の終局強度型耐震設計指針・同解説,1990
- 4)土木学会:コンクリート標準示方書,構造性能照査編,2002
- 5)日本道路協会:道路橋示方書・同解説,コンクリート橋編,2002