

PC 複合トラス橋格点部の構造特性に関する研究

野村 敏雄 大野 了
加藤 敏明
(本社土木技術本部構造技術部)

A Study on Structural Performance of Joint in PC Hybrid Truss Bridge

Toshio Nomura Satoru Ohno
Toshiaki Kato

Abstract

A PC Hybrid Truss Bridge is composed of upper and lower PC slabs connected with steel trusses at the web to reduce its self-weight and to rationalize construction. The joints between PC slabs and steel trusses are especially important for transferring forces between members. A new type of joint that has outer tubes welded to steel plates outside the steel trusses in the concrete slabs was proposed and static loading tests were carried out to verify the strengthening performance.

The following results were obtained; 1) The proposed new type of joint has a high enough bond strength to carry the design loads. 2) The shear strength can be calculated by the proposed formula incorporating the contributions of the concrete, the shear reinforcement and the shear steel plate.

概 要

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橋梁で、PC箱桁橋に比べて自重の軽減や施工の合理化が可能である。しかし、鋼トラス材に大きな軸力が作用する場合、合理的な格点構造が確立されておらず、その終局耐力や力の伝達機構について不明な点が多い。そこで、シンプルな構造で施工性・経済性に優れた、外側リブ付き鋼管(トラス材)と内外リブ付き孔あき二重管からなる二重管方式の格点構造を考案した。

格点部の基本的構造特性を把握するために、引き抜き実験や水平加力実験などを行った結果、以下のことが明らかになった。1) 二重管方式は良好な付着性能を有し、設計荷重に対して十分な耐力を発揮する。2) 格点部のせん断耐力はコンクリート、せん断補強筋および連結プレートの累加強度で求められる。

1. はじめに

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橋梁で、PC箱桁橋に比べて自重の軽減や施工の合理化が可能であり、今後の発展が期待される構造形式の一つである。Fig.1に示すようにPC複合トラス橋においては、鋼トラス材と床版が直接接合される格点部が最も重要な部分であり、その構造についてはこれまでに各種提案^{1), 2)}が行われ、実験や解析について報告されている。しかし、長スパンとなり鋼トラス材に比較的大きな軸力が作用する橋梁に対しては、国内施工実績もなく、格点部の終局耐力や力の伝達機構についての検証が必要と考えられる。

そこで、高軸力作用化においても十分な耐力を有する格点構造として、外側リブ付き鋼管(トラス材)および内外リブ付き孔あき二重管からなる構造を考案した。

本研究は、その格点構造の構造特性を確認することを目的として、①引抜き実験(実物大模型)と②耐荷力実験(1/2縮尺模型)を行い、付着性能やせん断伝達機構を検討したものである。

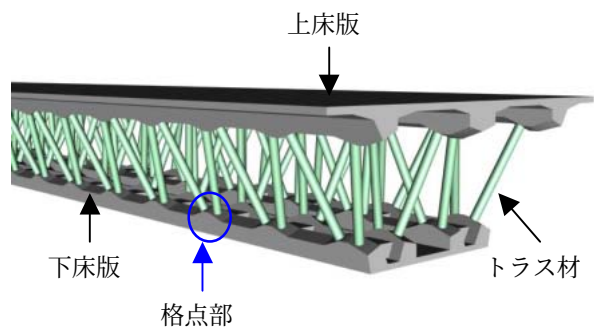


Fig. 1 PC複合トラス橋
PC Hybrid Truss Bridge

2. 二重管格点構造

二重管格点構造は、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。

3. 引抜き実験

二重管定着構造について、実物大引抜き実験により、付着特性などの基本的な力学性状と引抜き耐力の確認を行った。

二重管定着構造をFig.3に示す。本定着構造の基本は内側鋼管(トラス材)外面リブによる付着定着であるが、内側鋼管周辺コンクリートを剛性の高い外側鋼管で拘束してリブ付着性能の向上を図っている。さらに、外側鋼管の内外にもリブを付け、内外鋼管間にコンクリートの圧縮ストラットを形成することで、内側鋼管の引抜き力を外側鋼管に伝達し、より表面積の大きい外側鋼管の外リブ付着と孔のコンクリートジベル効果によりコンクリートへの定着を図る構造である。

3.1 試験体

引抜き試験体および加力装置をFig.4に示す。試験体は3,000kNの引抜き力を想定した内側鋼管(STK490 ϕ 457.2 $\times$ t19)と外側鋼管(SKK490 ϕ 600 $\times$ t13, 孔径 ϕ 30)を大きさ1,540 $\times$ 1,540 $\times$ 1,050の鉄筋コンクリートへ埋め込んだ構造である。定着長は内側鋼管径とした。試験体に使用した材料試験結果をTable 1に示す。

3.2 破壊性状

載荷荷重と試験部分のコンクリート天端および内側鋼管天端、外側鋼管天端の鉛直変位との関係をFig.5に示す。また、Photo.1に試験体の切断面を示す。

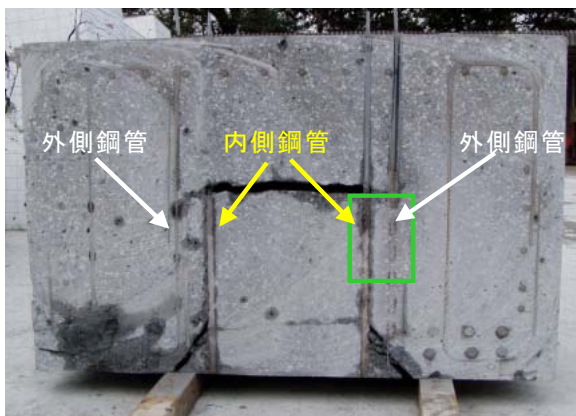


Photo.1 ひび割れ状況
Crack Pattern

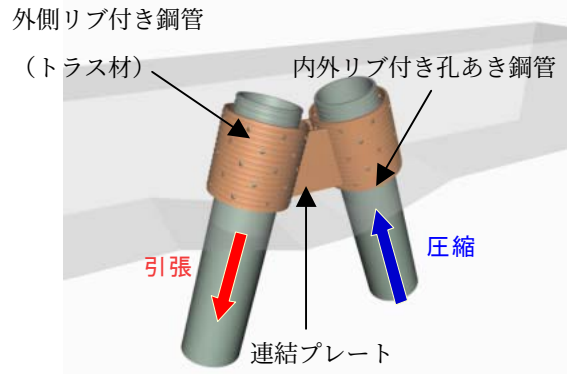


Fig. 2 二重管格点構造
Joint using Double Steel Tube Connection

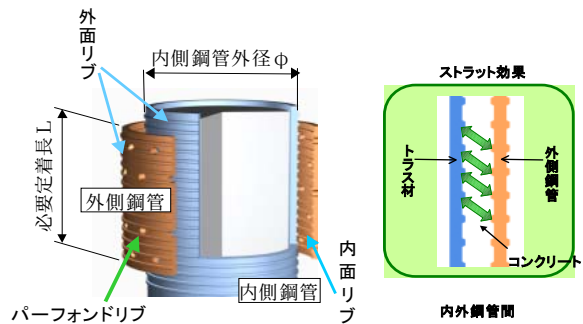


Fig. 3 二重管定着構造
Double Steel Tube Connection

Table 1 材料試験結果
Mechanical Properties

部材	単位: N/mm ²		
	鋼材 降伏強度	コンクリート 圧縮強度	引張強度
トラス材	474	57.7	3.7
外側鋼管	424		

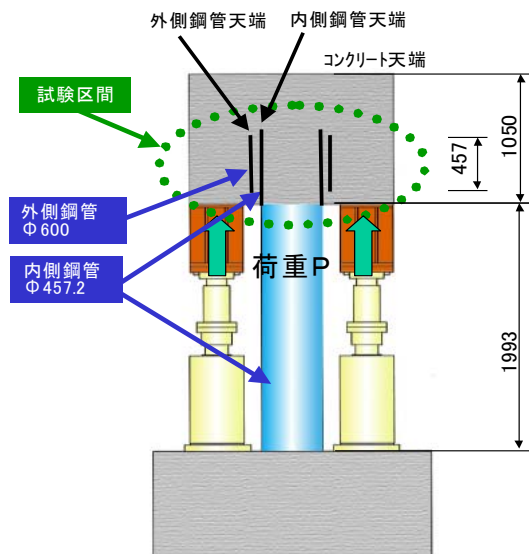


Fig. 4 試験体及び加力装置
Specimen and Loading Apparatus

まず荷重4,500kNでコンクリート下面へ放射状の初期ひびわれが生じ、剛性の低下が生じたが、これは内側鋼管の伸び領域が変化したことによると考えられる。その後、9,945kNで最大荷重に達した後、荷重の低下とともに変位が大きく進行した。

最大荷重後も外側鋼管とコンクリートの変位はほぼ同じであるが、内側鋼管の変位が反転していることから、内外鋼管の間での付着切れが生じたと考えられる。

Photo.1の試験体切断面を観察すると、内側鋼管外リブ面にすべりが生じており、外側鋼管周辺コンクリートに変状は見られなかった。

3.3 ひずみ分布

Fig.6に内側鋼管軸力である荷重 P と定着部における内側鋼管の鉛直方向ひずみ ε_v と円周方向ひずみ ε_θ の分布を示す。

鉛直方向は試験区間全体で、引張ひずみが生じ、また、高さ方向に線形分布していることから一様な付着応力が作用していると考えられる。円周方向は内部にコンクリートが充填されているために、ひずみが小さく、概ね高さ方向に一樣に分布している。

3.4 付着応力度

Fig.7に二重管補強とリング筋補強³⁾を施した場合のリブ付き鋼管の平均付着応力度とすべり量（リブ付鋼管と周辺コンクリートの相対変位）の関係を示す。

最大付着応力度 τ_{max} は、リング筋補強 6.8N/mm^2 に対して、二重管は 15.4N/mm^2 と2倍以上になっており、リブ付鋼管の引抜きによる周辺コンクリートの鋼管法線方向への膨張を剛性の高い鋼管で拘束することで、付着性能が大きく改善されることが確認された。

3.5 必要定着長の設計

内側鋼管の定着部は一様な付着応力が作用していることから、許容付着応力度を τ_a とすれば、二重管定着構造の必要定着長は次式により算定できる。

$$L_{req} = N_d / (\pi \cdot \phi \cdot \tau_a) \quad \cdots (1)$$

ここで、 L_{req} : 必要定着長(mm)、 N_d : 引抜き力(N)、 ϕ : 内側鋼管径(mm)

許容付着応力度 τ_a は、最大付着応力度 τ_{max} に安全率 α を考慮し、松村⁴⁾の提案したリブ付き鋼管の付着応力度に対するコンクリート圧縮強度の補正を行うことで求められる。

内側鋼管径が457.2mm、コンクリート設計基準強度が 40N/mm^2 の場合、引抜き力と必要定着長の関係はFig.8のようになる。最小定着長を内側鋼管径とすると、この場合は3,000kN程度の引抜き力に対して引抜き耐力が確保される。

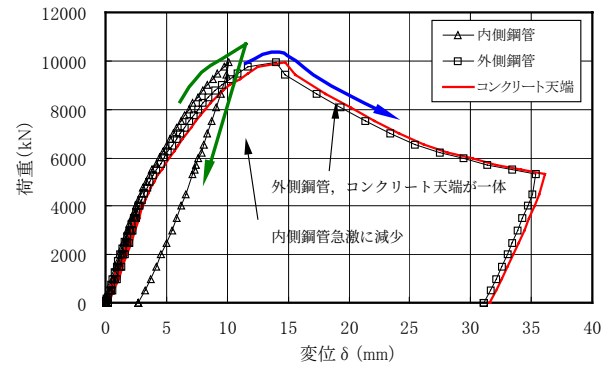


Fig. 5 載荷荷重と鉛直変位
Load-Displacement Relationship

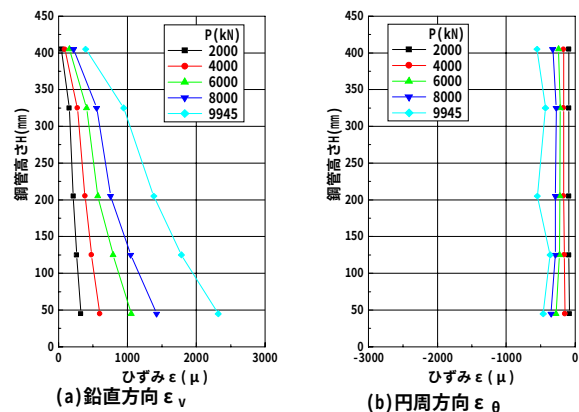


Fig. 6 鋼管のひずみ分布
Strain Distribution of Steel Tube

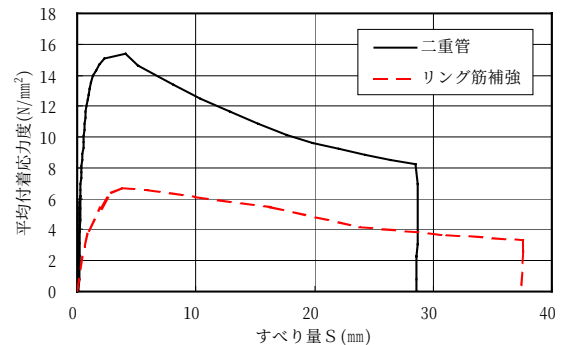


Fig. 7 付着応力度とすべりの関係
Bond Behavior of Double Steel Tube Connection

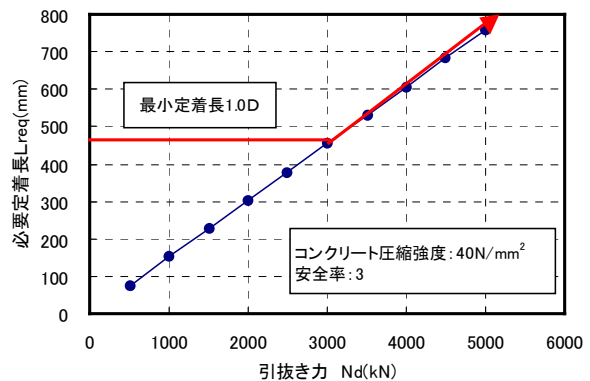


Fig. 8 必要定着長
Necessary Length of Anchor

4. 二重管格点構造の耐荷力実験

4.1 試験体

試験体はPC複合トラス橋の一部を取り出したFig.9に示すような構造とした。縮尺は1/2とし、実橋でのトラス材軸力3000kNを想定した。Table 2に試験体の諸元を示すが、梁コンクリートは□475×2800、コンクリート強度は呼び強度40とし、トラス材はSTK490φ213.3mmの鋼管である。Table 3に材料特性を示す。なお、格点部のリブ高さは1.5mmであり、リブ間隔は20mmである。また、外側鋼管の孔間隔は80mmとした。

荷重はFig.9に示すようなアクチュエータ(能力3000kN)を用いて、トラス材の設計荷重およびその1.7倍である終局荷重を確認した後、試験体が破壊に至るまで加力を実施した。

4.2 破壊性状

Fig.10に荷重と試験体中央の水平変位の関係を示す。また、Fig.11に破壊時のひびわれ状況を示す。

(1)格点部の破壊性状 設計荷重を若干超えた $P=575\text{kN}$ で格点部中央にせん断ひびわれが発生し、ほぼ終局荷重に相当する $P=951\text{kN}$ で連結プレートの降伏が始まった。

その後、連結プレートが $P=1200\text{kN}$ で全体降伏、そして $P=1377\text{kN}$ で最大荷重に達するとともに、引張側鋼管位置においてスターラップの降伏が確認された。最大荷重に達した後、格点部中央のせん断ひびわれが発達し、梁の主筋に沿って進展するようになり、荷重が $P=1000\text{kN}$ 程度まで低下した。

(2)トラス材の降伏性状 設計荷重の1.7倍である終局荷重近傍の $P=776\text{kN}$ 、 $P=826\text{kN}$ で圧縮材、引張材の順にコンクリート梁との付根部分で降伏ひずみに達した。

その後、引張側鋼管の降伏が顕著となり、円周方向に降伏域が進展するとともに、格点部でも降伏が生じた。しかし、外側鋼管の降伏は生じなかった。

4.3 トラス材のひずみ分布

Fig.12に格点部におけるトラス材のひずみ分布を示す。荷重はトラス材の設計荷重時に相当する状態である。

引張側鋼管をみると曲げモーメントと軸力が作用しているために、格点部の内側と外側ではひずみ分布が異なっている。しかし、引張が卓越する内側のひずみ分布から明らかなように、梁下縁から上縁に向かって線形分布となっており、別途実施した引抜試験結果と同様に一様な付着性状が伺える。

4.4 作用せん断力

Fig.13に格点部分に作用するせん断力と変位の関係を示す。

格点部のせん断力は連結プレート V_p 、せん断補強筋 V_s およびコンクリート V_c で分担されると考えられる。そこ

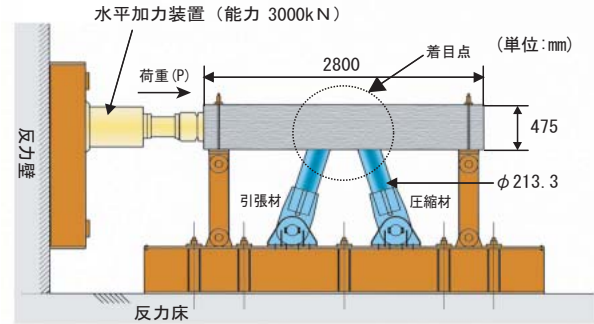


Fig. 9 試験体および加力装置
Specimen and Loading Apparatus

Table 2 試験体諸元
Test Specimen

部 材	仕様および寸法(単位:mm)
トラス材	STK490 φ213.3×t11.2
外側鋼管	SKK400 φ305.0×t18
連結プレート	SM490 t12
コンクリート梁	□-475×475×2800

Table 3 材料特性
Mechanical Properties

部材	鋼材,鉄筋 降伏強度	単位: N/mm ²	
		コンクリート 圧縮強度	引張強度
トラス材	431	56.4	4.1
外側鋼管	283		
連結プレート	352		
鉄筋	368		

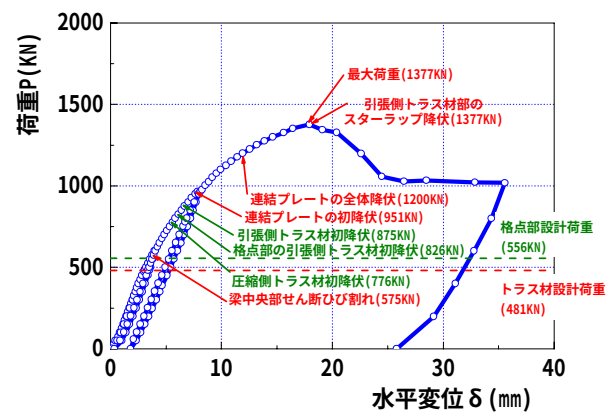


Fig. 10 荷重と変位の関係
Load-Displacement Relationship

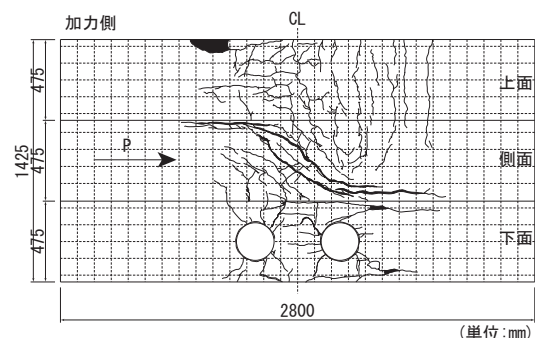


Fig. 11 ひびわれ状況
Crack Pattern

で、最大荷重後の耐力低下を V_c 、トラス理論によるせん断補強分を V_s 、連結プレートの降伏荷重を V_p として累加すると、最大荷重時の作用せん断力に概ね一致することが確認された。

5. 非線形解析

格点部には圧縮トラス材と引張トラス材によるトラス軸力の作用点が、梁の内部で一致しないことにより、せん断力が作用する。実験結果より格点部のせん断耐力は連結プレート、せん断補強筋およびコンクリートが負担するせん断力の和により表されることが考えられる。格点部を設計する上で、そのせん断耐荷機構を明らかにすることが重要であるので、非線形FEM解析による解析的な検討を行い実験結果の妥当性を検討した。

5.1 解析方法

Fig.14に示すように解析モデルは耐荷力実験と同様に格点部をモデル化しており、対称条件より1/2断面とした。材料特性はTable 3に示す実験値を用いた。Table 4にコンクリートおよび鋼材モデルを示す。

トラス材下端部の境界条件はピン支持とし、コンクリートとトラス材および連結プレートとの接合面は剥離・滑りを考慮した。接合面の滑り挙動は引抜き試験で得られた付着力-滑り関係を用いた。なお、解析には三次元非線形FEM解析ソフトFINAL[®] 5)を使用した。

5.2 破壊性状

Fig.15に最大荷重時のひびわれ状況を示す。また、Fig.16に荷重-変位曲線を示す。

ひびわれ状況から明らかのように、せん断破壊の性状を示す斜めひびわれや付着割裂の性状を示す主筋に平行なひびわれなどが生じており、実験結果と同様の破壊性状が再現されている。

初期剛性および連結プレートの初降伏に至るまでの挙動は実験結果と概ね一致している。しかし、連結プレートの初降伏以後、最大荷重に至るまでは解析結果の方が剛性低下が少なくなっている。したがって、最大荷重は概ね一致しているが、最大荷重時の変位は解析値の方がやや小さくなっている。これは、実験では連結プレートは上から下に向かって降伏が進み、全段面降伏に至るが、解析では連結プレートの最下端において降伏せず、荷重低下が生ずることに起因すると考えられる。

また、スターラップは実験では最大荷重に達するとともに降伏ひずみに達しているが、解析では連結プレートが負担していない分早く降伏が生じている。

5.3 格点部のせん断力分担

Fig.17に解析で得られた各せん断力分担状況を示す。

V_p は中央断面における連結プレート鉛直方向のせん断応力の総和、 V_s はトラス機構によるせん断補強筋の負担

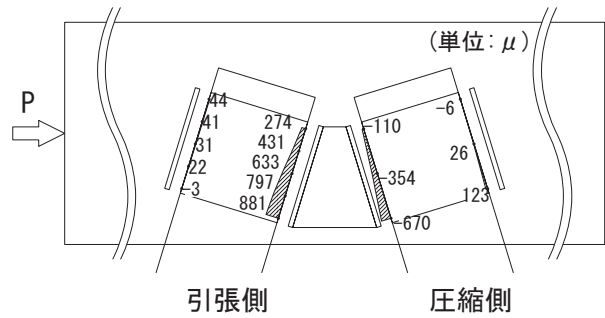


Fig. 12 格点部トラス材のひずみ分布
Strain Distribution of Steel Tube

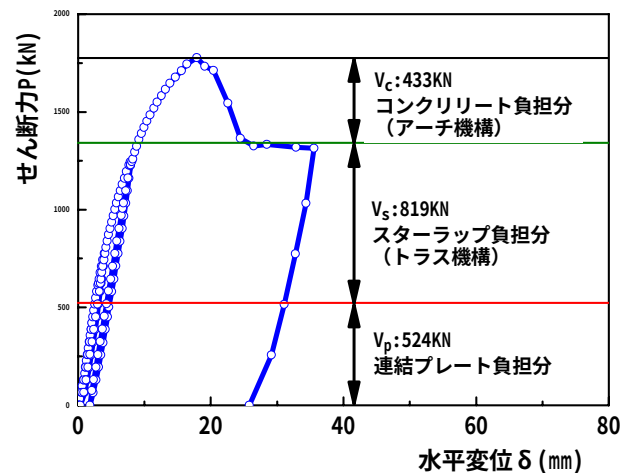


Fig. 13 せん断力-変位関係
Shear Force-Displacement Relationship

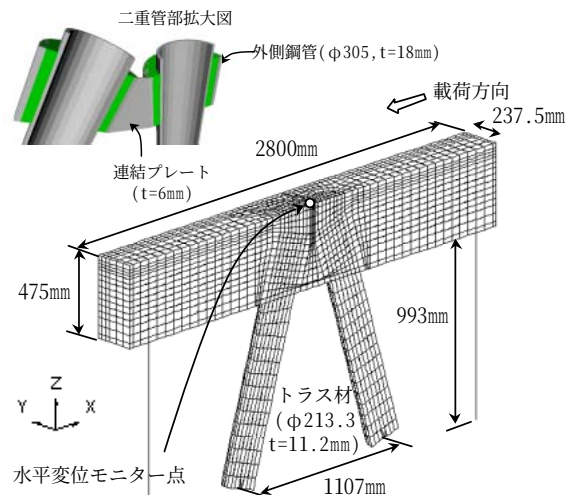


Fig. 14 解析モデル
Analytical Model

Table 4 材料モデル
Material Models

コンクリート	応力-ひずみ関係: 修正Ahmadモデル
	tension stiffening考慮
	ひび割れ後の圧縮劣化考慮
	ひび割れ後のせん断伝達考慮: Al-Mahaidiモデル
鋼材および鉄筋	応力-ひずみ関係: bilinear

力、また、 V_c はコンクリート断面に作用するせん断力として $V_c = Q_c - Q_t$ より求めた。ここで、 Q_t はコンクリート断面鉛直方向のせん断応力の総和 Q_c よりスターラップの引張力 T_s とコンクリート要素鉛直方向の圧縮応力の総和 C_c を用いて、 $Q_t = Q_c \times T_s / C_c$ として求めた。

格点部に作用するせん断力は、載荷荷重 $P=500\text{kN}$ 程度まではコンクリートのみで負担しており、理論値に一致する。また、実験と同様に載荷荷重 $P=500\text{kN}$ 程度でせん断ひびわれが発生するとともに、コンクリートの負担分が減少する。その結果、連結プレートとせん断補強筋（トラス機構）による負担分が増加し、それらが共同してせん断力を負担している。その後、最大荷重時に至るまで、コンクリート負担分に大きな変化はないが、連結プレートとせん断補強筋の負担分は荷重の増加とともに増大する傾向を示している。

荷重が $P=1300\text{kN}$ を越えるとコンクリートの破壊が大きく進行するために、せん断補強筋とコンクリート負担分が大きく変動し、解析的にやや不安定となる。

解析が安定している $P=1300\text{kN}$ 程度では全体の作用せん断力は理論値と概ね一致しているが、この時点で、連結プレートは全断面降伏に達していない。また、その後も解析の不安定化の影響により連結プレートの負担率が増加しないために、実験結果とはやや異なった分担率となっている。

6. おわりに

二重管方式を用いたPC複合トラス橋格点部の基本的構造特性を把握するために、引抜き実験、水平加力実験および解析的検討を行った。

本研究によって得られた知見を以下に示す。

- (1) 二重管定着構造の引抜き耐力を確認するため、実物大の引抜き実験を行った。その結果、リブ付鋼管を外側鋼管で外套することで、良好な付着性能が得られ、シンプルでコンパクトな定着構造が実現できることがわかった。
- (2) 二重管方式を用いたPC複合トラス橋の格点部の耐荷力実験を行い、基本的な構造特性の検討を行った。その結果、設計荷重の2.5倍程度の耐荷力を有することや格点部のせん断耐力がコンクリート、鉄筋および連結プレートの累加強度で求められることが確認された。
- (3) 三次元非線形FEM解析により、二重管格点構造のせん断耐荷機構の検討を行った結果、耐荷力実験にて得られた二重管格点構造のせん断破壊経過を追跡することができた。格点部の設計を行う上で、最大荷重時のせん断力分担を評価する必要があるため、最大荷重近傍の解析精度の向上が今後の課題である。

参考文献

- 1) 本間，他：複合トラス橋接合部の耐荷力確認実験，

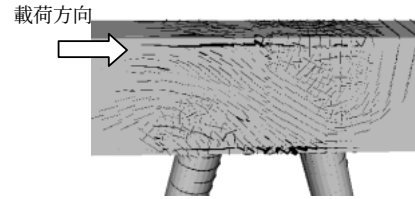


Fig. 15 ひび割れ状況
Crack Pattern

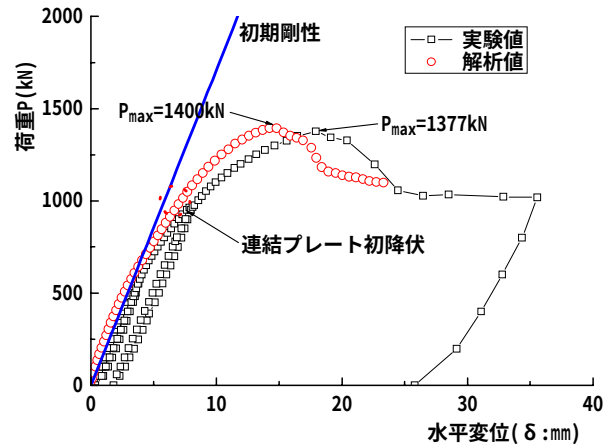


Fig. 16 荷重-変位曲線
Comparison of Load-Displacement Relationship

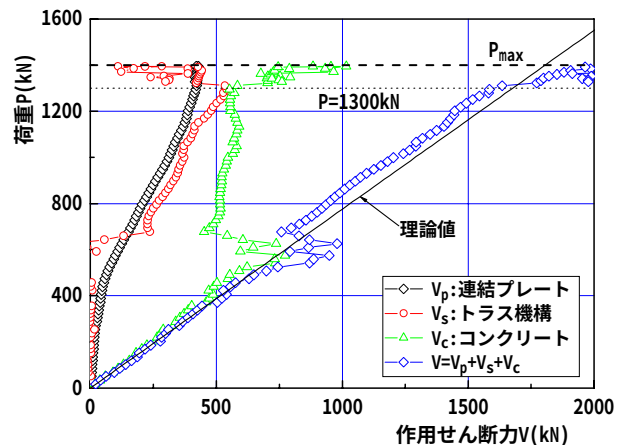


Fig. 17 せん断力分担
Allotment of Shear Force at Joint

プレストレスト技術協会第8回シンポジウム論文集，1998.10

- 2) 野呂，他：複合トラス橋梁の格点部の実験的研究，構造工学論文集，Vol.45A，2001.3
- 3) 大内，他：鋼管・コンクリート複合構造高橋脚の開発(その1)－模型の水平加力実験－，1994，大林組研究所報No.49
- 4) 松村：充填型鋼管コンクリート構造に於ける鋼管とコンクリートの付着性能の影響に関する研究，1990，九州大学博士論文
- 5) 長沼：三軸圧縮下のコンクリートの応力～ひずみ関係，日本建築学会構造系論文集，第474号，pp163-170，1995.8