

上弦材を鋼コンクリート合成構造とする複合トラス橋の構造特性に関する実験的研究

(株) 富士ピー・エス	正会員	○ 左東 有次
九州大学大学院 工学研究院 工博	正会員	日野 伸一
九州大学大学院 工学研究院 博(工)	正会員	山口 浩平
九州大学大学院 工学府 修士課程		太刀掛 正俊

1. はじめに

近年、工事費の削減と施工の合理化を目的とした橋梁形式として、PC箱桁橋のコンクリートウェブを鋼管トラス材に置換した複合トラス橋が開発実用化されている。複合トラス橋においては、上下コンクリート床版と鋼トラス斜材との接合部の格点構造が、構造上重要な部位であり、これまで国内においては各種の格点構造¹⁾が提案され、模型実験や数値解析シミュレーションを行い、数橋が設計・施工をされているが、最適な部材形状や格点構造など解明すべき課題が残されているのが現状である。

そこで本研究では、既存の複合トラス橋の長所をさらに拡大し、プレキャスト化を可能とした新しい構造形式として、**図-1**に示す複合トラス橋 (Prestressed Composite Truss Girder, 以下PCT桁と略する)を提案する。既存の複合トラス橋に対して、本構造は以下のような特徴がある²⁾。

- (1) 上弦材は施工時には鋼断面、活荷重作用時は場所打ちコンクリートとの合成断面で抵抗する。
- (2) 下床版はPC構造であり、プレキャスト化が可能である。
- (3) 上下床版と鋼トラス斜材の接合部は、施工性の容易さと格点部の設計に柔軟性のある外付けタイプとする。

本研究では、5mのはり供試体を用いて曲げ試験を行い、全体構造の安全性を確認した。次に、この複合トラス橋の格点構造として、比較的構造がシンプルで耐力や疲労耐久性が比較的解明されている孔あき鋼板ジベルおよび頭付きスタッドを用いた格点構造 (**図-2**)を提案し、その応力伝達機構の解明ならびに格点構造の合理的な設計手法を提案することを目的として、下床版と鋼トラス斜材の格点部を模した供試体により静的載荷試験を実施した。

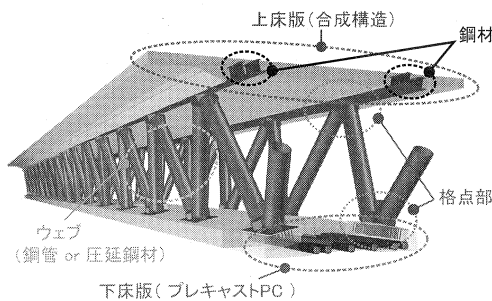


図-1 複合トラス橋概略図

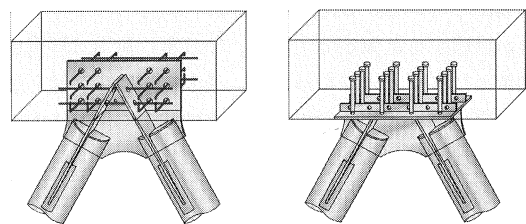


図-2 格点構造イメージ図 (a) 孔あき鋼板ジベルタイプ (b) スタッドタイプ

2. はり供試体による曲げ試験

2.1 供試体諸元および試験方法

供試体を**図-3**に示す。供試体は上床版幅 800mm、下床版幅 400mm、桁高 600mm、スパン 5mである。上床版は鋼とコンクリートの合成構造であり、下床版は 666kN (11N/mm²) のプレストレスを導入した PC 構造である。鋼トラス材は形鋼を使用した。使用材料の材料特性を**表-1**に示す。なお、本実験での上下床版と鋼トラス材の接合は、全て頭付きスタッド (φ22)を用いた。供試体は、斜材・上弦材を配置した下床版にプレ

ストレスを導入後、上床版にコンクリートを打設して製作した。この方法により、上下床版施工後にプレストレスを導入するよりも下床版へのプレストレス導入効率が向上している。

荷重方法は2点漸増荷重である。

2. 2 解析概要

供試体の弾塑性挙動を把握するために、汎用非線形構造解析ソフト Marc を用いて検討を試みた。解析は2次元供試体モデル(斜材および上下床版は4節点平面要素、鉄筋およびPC鋼材は2節点トラス要素を適用)を用いて、弾塑性材料特性として以下の仮定を設けた。(1)鋼材には Mises 型の降伏条件を適用し、降伏後は初期剛性の1/100の硬化特性を与えた。(2)コンクリートには線形モール則を適用し、圧縮・引張域とも最大応力以降は軟化勾配を設定した。(3)格点部における荷重伝達機能を表現するために、斜材と上下床版の間に2方向のバネ要素を設けた。

2. 3 結果および考察

(1) 荷重-たわみ曲線

図-4 にスパン中央部の荷重-たわみ曲線を示す。解析値は斜材と上下床版の格点部をバネ要素とした場合と完全剛結とした場合である。荷重-たわみ曲線は荷重 200kN 付近まで線形的に増加しているが、その後はたわみが増加し、625kN でスパン中央部の下床版が曲げ引張破壊した。また、ひび割れ発生後、最大荷重まで斜材と上下床版の接合部にはずれ等は見られず、スタッドがずれ止めとして有効に機能していることが確認できた。実験値と解析値を比較すると、実験値はバネ要素を考慮した FEM 解析値と荷重-たわみ曲線がほぼ一致した。

表-2 にひび割れ荷重と最大荷重の実験値、計算値および FEM 解析値(バネ要素)を示す。計算値は、斜材を無視し、上床版を合成断面として算出している。また、終局時は下床版の PC 鋼材、鉄筋は降伏し、上床版が圧壊すると仮定している。ひび割れ荷重は解析値が実験値より多少大きくなったが、最大荷重は実験値と解析値がほぼ等しく、FEM 解析は比較的精度よく供試体の破壊挙動を再現していると考えられる。

(2) 荷重-ひずみ曲線

上床版と上弦材(鋼材)の荷重-ひずみ曲線を図-5 に示す。上床版のひずみは、荷重初期では線形的に増加しているが、下床版にひび割れが発生した 260kN 付近から多少増加している。一方、上弦材(鋼材)は下床版にひび割れが発生し剛性が低下した 260kN 付近から圧縮域から引張域になり、引張ひずみが増加しており、上弦材の鋼部材が引張抵抗部材として有効に機能していることがわかる。

図-6 に支間中央付近の斜材の荷重-ひ

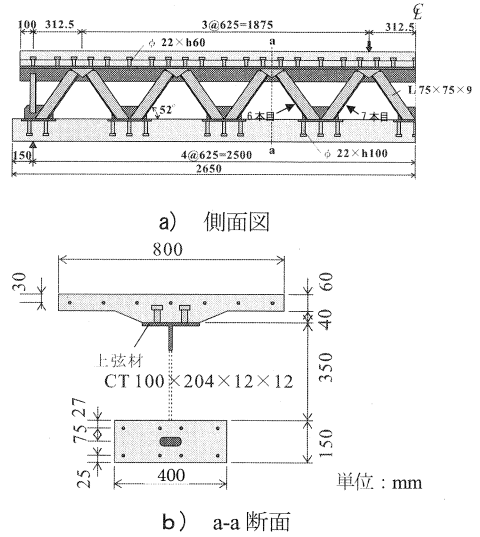


図-3 供試体概略図

表-1 材料特性

(1) コンクリート

部材	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)
上床版	31.7	2.4×10 ⁴
下床版	36.2	2.9×10 ⁴

(2) 鋼材

部材	降伏強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)
上弦材	245	2.1×10 ⁵
斜材		
鉄筋	295	
PC鋼材	1568	

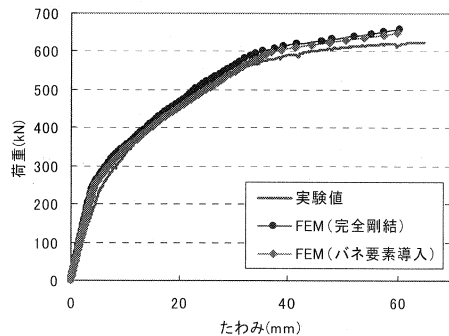


図-4 荷重-たわみ曲線

表-2 荷重比較

	実験値 (kN)	計算値 (kN)	解析値 (kN)	実験値 計算値	実験値 解析値
ひび割れ荷重	259	246	290	1.05	0.89
最大荷重	625	597	640	1.05	0.98

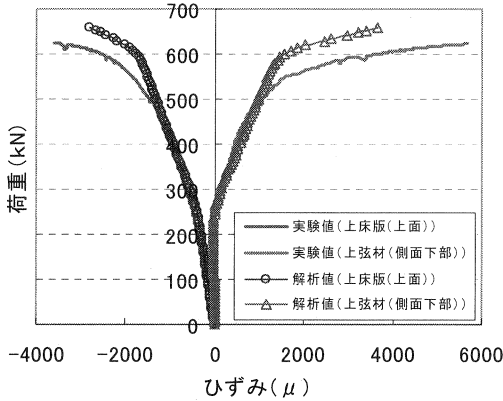


図-5 上床版、上弦材の荷重-ひずみ曲線

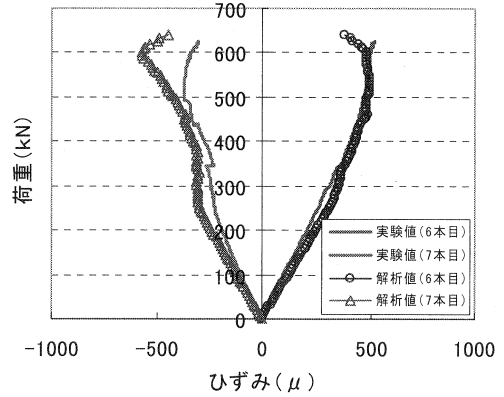


図-6 斜材の荷重-ひずみ曲線

ずみ曲線を示す。引張斜材 (6 本目) の荷重-ひずみ曲線はほぼ線形であるが、圧縮斜材 (7 本目) は下床版にひび割れの発生した 260kN 付近からひずみの増加が小さくなっている。また、いずれの斜材とも終局時には降伏しなかった。

図-7 に下床版の荷重-ひずみ曲線を示す。下床版にひび割れの発生した 260kN 付近から実験値と解析値に差を生じている。これは、下床版にひび割れが発生したため、ひずみがひび割れに集中したものと考えられる。図-5~7 より解析値は実験値と比較的合っており、FEM 解析値は比較的精度よく供試体の挙動を再現していると考えられる。

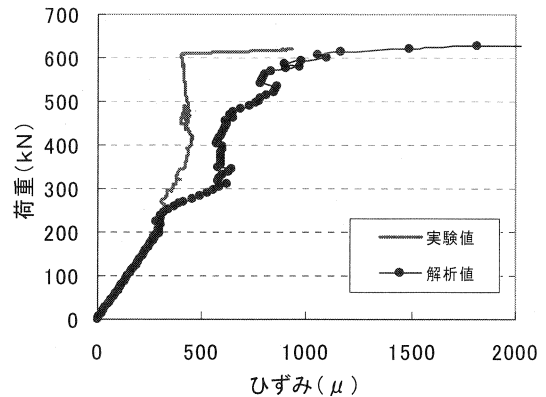


図-7 下床版の荷重-ひずみ曲線

(3) ひび割れ分布

図-8 に終局状態におけるひび割れ分布図を示す。スパン中央部付近に曲げひび割れが集中し、上床版のコンクリート圧壊前に下床版が曲げ引張破壊した。ひびわれは曲げモーメントが支配的な支間中央部以外では、格点部付近にひび割れが集中する傾向が見られ、格点部構造の重要性を示唆している。

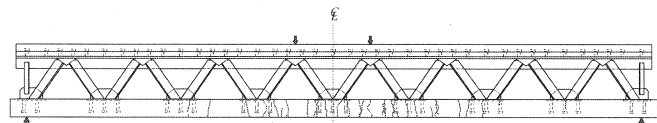


図-8 ひび割れ図

3. 格点部供試体による載荷試験

3.1 供試体諸元および試験方法

供試体の概要図を図-9 に示す。供試体は下床版と鋼トラス斜材の格点部を模した 1/2 縮尺とした。供試体は鉄筋コンクリート床版 (幅 500mm, 高さ 400mm, 長さ 2400mm) に鋼製のガセットを介して斜材となる鋼管 (φ216.2mm, 厚さ 8.2mm) を接合した。床版の主筋は D19 を上下に 4 本ずつ配置し、スターラップは D13 を 100mm ピッチで配置した。

供試体の種類を表-3 に示す。供試体はガセットとコンクリートの接合に孔あき鋼板ジベルを用いる TYPE1-1, TYPE1-2, 頭付きスタッドを用いる TYPE2 の 3 種類とした。TYPE1-2 は TYPE1-1 に比べて孔数を少なくし、接合部の耐力の違いを検証した。また、鋼管とガセットの溶接範囲を他の 2 タイプよりも減少させ、格点部の曲げ剛性を小さくした。これは、格点部の曲げ剛性の違いによる各部位の応力状態の変化を検証するためである。格点部の構造詳細を図-10 に示す。孔あき鋼板ジベルでは直径 30mm の孔に貫通鉄筋として

D10を配置した。また、主筋のD19(下段2本)も貫通鉄筋とした。スタッドは $\phi 19 \times 190\text{mm}$ を16本フランジプレートに溶接した。供試体の使用材料の諸元を表-4に示す。鋼管はSTK490を用い、ガセットなどその他の鋼部材はSM400を使用した。

載荷試験は図-9に示すような箱形載荷フレーム内に供試体を水平に固定し、載荷能力2000kNの油圧ジャッキを用いてコンクリート床版の軸方向に単純水平載荷した。床版の両側には、載荷による床版の回転を制御するため、両端をピン結合としたサポートを設置した。

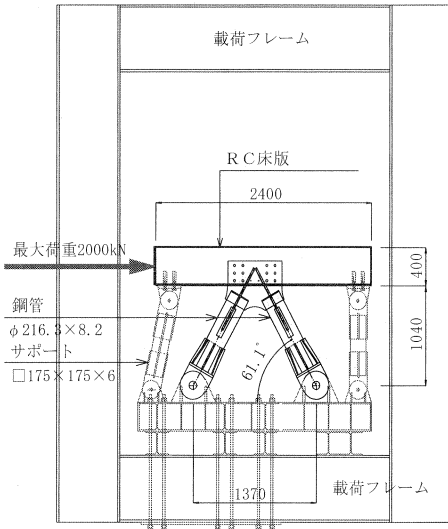


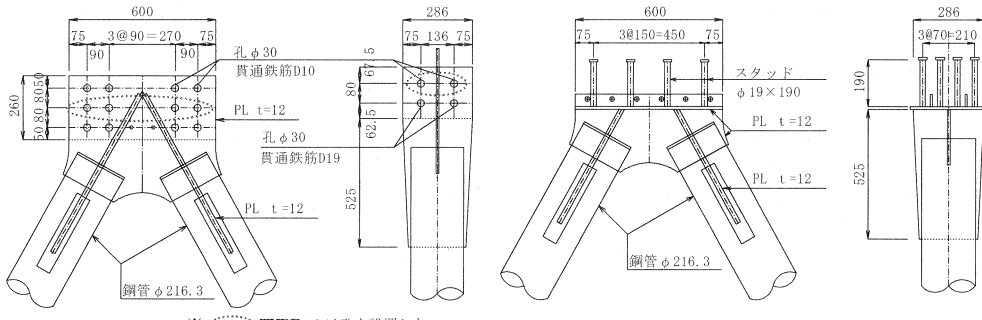
図-9 供試体と載荷試験要領

表-3 供試体の種類

供試体名	TYPE1-1	TYPE1-2	TYPE2
接合構造	孔あき鋼板ジベル		
接合詳細	孔径 $\phi 30, 20$ 箇所	孔径 $\phi 30, 12$ 箇所	$\phi 19 \times 190, 16$ 本
溶接形状			
曲げ剛性	大	小	大

表-4 材料諸元

種類	種類	引張強度 (N/mm^2)	降伏強度 (N/mm^2)	圧縮強度 (N/mm^2)	弾性係数 (kN/mm^2)
鋼管	STK490	573	370	—	208.6
鋼材	SM400	439	295	—	207.6
鉄筋	SD295A	D10	533	376	—
		D13	522	357	—
		D19	531	365	—
コンクリート	—	—	25.2	25.5	—



(a) 孔あき鋼板ジベル (TYPE1-1)

(b) スタッド (TYPE2)

図-10 格点部詳細図

3. 2 結果および考察

(1) 荷重-水平変位曲線

各供試体の荷重-水平変位曲線を図-11に示す。載荷初期の弾性域では各供試体の剛性はほぼ等しく、TYPE1-1とTYPE1-2で格点部の溶接部位を変化させたことによる格点部の剛性差の影響は明確に見られない。しかし、荷重1100kN以降、TYPE1-2はTYPE1-1に比べて、鋼管・ガセット溶接部での低剛性に起因した顕著な水平変位の増

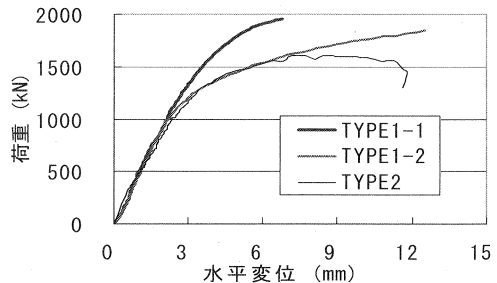


図-11 荷重-水平変位曲線

加が見られた。しかし、両供試体ともに荷重装置の最大能力である $P_{max}=1951\text{kN}$, 1844kN まで耐力を保持し、粘りのある挙動を示した。また、TYPE2 は荷重約 1100kN でフランジプレートの曲げ変形に伴う剛性低下が見られ、その後 $P_{max}=1604\text{kN}$ でコンクリート床版と接合部に顕著なずれが発生し破壊した。

(2) トラス鋼管の荷重-ひずみ曲線

各供試体の圧縮鋼管中央部における荷重-軸ひずみ曲線、荷重-曲げひずみ曲線を図-12 に示す。図中に示す点線はトラス理論により計算した値である。いずれの供試体とも荷重-軸ひずみ曲線は線形であり、計算値とほぼ等しく、供試体がトラス構造として機能しているといえる。

曲げひずみはTYPE1-1, TYPE2 とも荷重とほぼ比例して増加している。これは鋼管に曲げモーメントが発生していることを示している。一方、TYPE1-2 は曲げひずみがほとんど発生していない。これは、TYPE1-2 は他の供試体と異なり、ガセットと鋼管の図心軸上のみ溶接し擬似ヒンジ端としたため、格点部の曲げ剛性が小さく、鋼管には曲げモーメントがほとんど発生しなかったためと考えられる。なお、引張鋼管も同様の傾向であった。

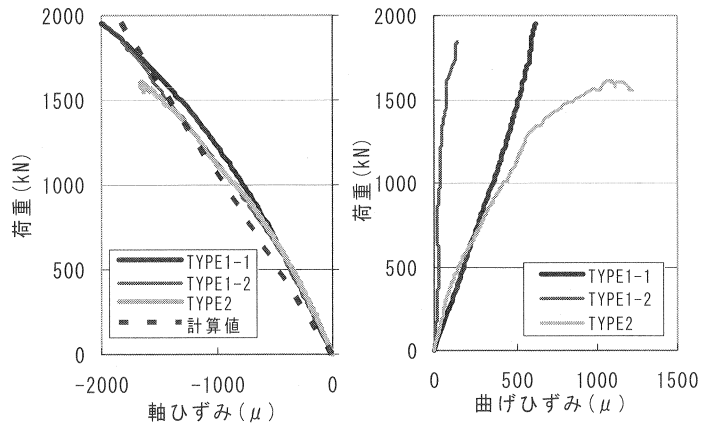
(3) 貫通鉄筋の荷重-ひずみ曲線

荷重 500kN , 1000kN 時における TYPE1-1 と TYPE1-2 の孔あき鋼板の孔内に配置した貫通鉄筋のひずみを図-13 に示す。両供試体ともに上段より下段の貫通鉄筋のひずみが大きく、また、荷重側 K3, K6 のひずみが、非荷重側 K9, K12 のひずみより大きい。つまり、孔あき鋼板ジベルではずれ止めとして、荷重側下段の貫通鉄筋が主として抵抗することがわかる。よって、今回の格点構造のように孔あき鋼板ジベルを群配置する場合には、貫通鉄筋に作用するせん断力が不均等になることに配慮する必要がある。

K3, K6 に着目すると、TYPE1-1 のひずみが TYPE1-2 より小さい。これは、TYPE1-1 が TYPE1-2 に比べて貫通鉄筋が多く、鉄筋 1 本あたりの作用せん断力が小さいためと考えられる。

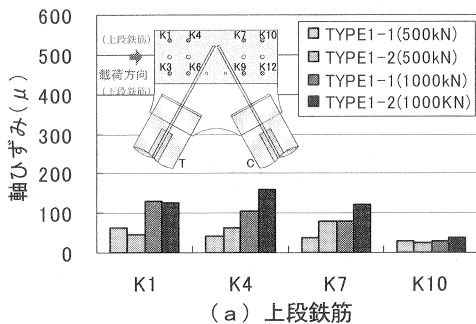
(4) ひび割れ分布

図-14 に荷重試験終了後の床版側面のひび割れ図を示す。いずれの供試体とも接合部から荷重方向に向かって、斜め方向のひび割れが発生している。TYPE1-1 は TYPE1-2 よりひび割れ本数は少なく、ひび割れ幅・長さとも小さい。これは、TYPE1-1 は TYPE1-2 と比べてずれ止め孔が多く、貫通鉄筋に発生した応力が小さいためと考えられる。

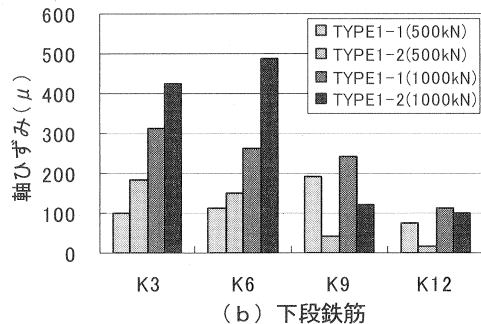


(a) 荷重-軸ひずみ曲線 (b) 荷重-曲げひずみ曲線

図-12 圧縮鋼管の荷重-ひずみ曲線



(a) 上段鉄筋



(b) 下段鉄筋

図-13 500kN, 1000kN 時の貫通鉄筋の軸ひずみ

(5) 耐力評価

各供試体の最大耐力の測定値 P_{max} と設計値 P_d の比較を表-5に示す。TYPE1-1, TYPE1-2の設計値は、保坂らの提案した孔内に貫通鉄筋を有する孔あき鋼板ジベルのせん断耐力式³⁾、TYPE-2の設計値は、「PCI Design Handbook」のスタッドのせん断耐力式と引張耐力式⁴⁾で求めた水平荷重である。

最大耐力は設計値と比較して、TYPE-2は2.1倍、TYPE1-1は1.5倍以上、TYPE1-2は2.0倍以上となり、既往の耐力評価式は十分安全側の評価を与えることがわかった。これは、TYPE1-1, TYPE1-2の接合部の設計値は、鋼管に作用する軸力に対してコンクリート床版に埋設された引張側、圧縮側の孔あき鋼板ジベルが独立して抵抗すると仮定したが、鋼管がガセットプレートに結合されているため、床版から露出したガセット部も分担して鋼管の軸力に抵抗したと考えられる。TYPE2もTYPE1と同様にガセットプレートの寄与により、スタッドに作用する引張力が減少したため、耐力が設計値を大きく上回ったと推察される。

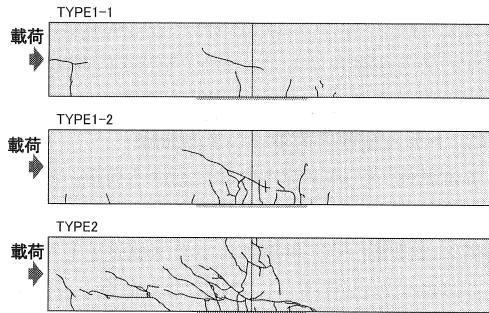


図-14 ひび割れ図

表-5 最大耐力の比較

	TYPE1-1	TYPE1-2	TYPE2
実験値 P_{max} (kN)	1951	1844	1604
設計値 P_d (kN)	1255	916	779
P_{max}/P_d	1.55	2.01	2.06

4. まとめ

複合トラス橋のはり供試体の曲げ試験、格点部供試体の載荷試験を行い、以下のことが明らかになった。

(A) はり供試体の曲げ試験

- (1) 本構造の供試体は設計上の耐力を保持すること、また、下床版のひび割れに伴う剛性低下後は、合成構造断面の上床版(鋼部材)が有効に機能することがわかった。
- (2) ひび割れは曲げモーメントが支配的な範囲を除いて、格点部付近に集中する傾向が見られ、格点部の構造が重要であるといえる。

(B) 格点部載荷試験

- (1) 孔あき鋼板ジベルやスタッドを用いた格点部の耐力に対する既往の耐力評価式は1.5倍以上の十分安全側の評価を与えることがわかった。
- (2) 鋼管とガセットの溶接範囲を鋼管図心に限定したTYPE1-2は、鋼管斜材に曲げモーメントがほとんど発生しない。
- (3) 孔あき鋼板ジベルタイプでは、ずれせん断+引張力に対して引張側下段の貫通鉄筋の負担が大きい。

今後は、格点部の実験結果をもとに解析的な検討を行い、ガセット、孔あき鋼板ジベルおよびスタッドなどの格点部の定量的な評価について究明する予定である。

最後に、本研究の遂行に際し韓国のG. I. F.の元大淵博士、九州大学工学研究院の園田佳巨教授に多大のご協力をいただいた。ここに伏して深く感謝いたします。

参考文献

- 1) (社)プレストレストコンクリート技術協会編：複合橋設計施工規準，技報堂出版，2005。
- 2) Dae Yon Won, Shin-ichi Hino, In Duk choi and Yeong Ho Eom : DESIGN OF PRESTRESSED COMPOSITE TRUSS GIRDER, The Eighth Japan-Korea Joint Seminar on Steel Bridges, 2005.
- 3) 保坂鐵矢ほか：孔あき鋼板ジベルのせん断特性に関する実験的研究，構造工学論文集，vol. 46A, pp. 1593-1604, 2000, 3
- 4) PCI : PCI Design Handbook, Precast/Prestressed Concrete Institute, Chicago, 1999.