

7. 複合トラス橋の格点部の応力伝達機構に関する研究

太刀掛 正俊

1. 目的

近年、工事費の削減や施工の合理化が図れる橋梁形式として、コンクリート上下床版を鋼トラス材で結合した複合トラス橋が注目されている(写真-1)。本研究では、複合トラス橋の長所をさらに拡張した一形式として、上床版が場所打ちコンクリートによる合成構造、下床版がプレキャスト化の可能な PC 構造である“Prestressed Composite Truss Girder(以下、PCT と称す)”に着目した(図-1)。PCT は以下のような利点を有す。架設時に発生しうる負曲げに対して上床版の上弦材のみで抵抗することができ、主桁のプレキャスト化が可能となる。曲げ応力の増加による終局時では、上床版下面に発生する引張応力に上弦材が抵抗するため、破壊靱性の向上が期待できる。



写真-1 木ノ川高架橋

また、複合トラス橋における鋼トラス材とコンクリート床版との結合部である「格点部」の構造は重要であり、その構造が安全性や施工性、経済性に与える影響が非常に大きいため、これまで種々の構造形式が提案されるとともに模型実験や数値解析により耐力や疲労耐久性が検討されている(図-2)。しかし、複雑な構造であるなど合理化に向けた課題が残されているのが現状である。そこで本研究では、既往の格点構造よりも構造がシンプルで、耐力や疲労耐久性の評価式が比較的明らかな孔あき鋼板ジベル(以下、PBL)およびスタッドを用いた新しい格点構造を提案した(図-3)。



図-1 PCT の概念図

本論文ではまず、複合トラス橋の終局状態における各部材の断面力を弾性骨組解析により検討し、PCT の有用性を確認した。次に、L=70m の実橋載荷試験とその FEM 解析から実橋梁レベルでの PCT の全体挙動を把握し、さらに提案する格点構造の応力伝達機構の解明と設計手法の構築を目的として、格点部試験体を用いた載荷試験と FEM 解析、パラメータ解析をそれぞれ実施した。



図-2 既往の格点構造

2. 内容

2.1 PCT 形式の複合トラス橋の構造特性

複合トラス橋における鋼トラス材の合理的な傾斜角度と、下床版剛性の低下や格点部剛度の違いによる各部材断面力の変化について骨組解析により検討した。解析対象は図-4、パラメータは表-1 である。解析の結果、上下床版の断面力は傾斜角度に依存せず、鋼トラス材の合計応力も 50° 以上では顕著な差がなかったため、鋼材量の少ない 50° ~ 60° が最も合理的傾斜角度であることがわかった。図-5 に下床版剛性と格点部剛度の変化による断面力の推移を示す。下床版の剛性低下に伴い (Case1 Case3) 上床版には大きな曲げモーメントが発生している。上床版が PC 断面ではなく合成断面で抵抗する

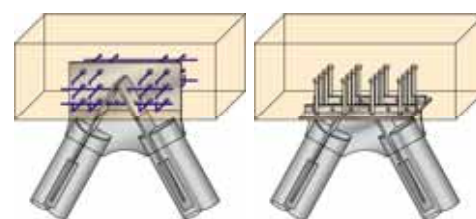


図-3 格点構造のイメージ

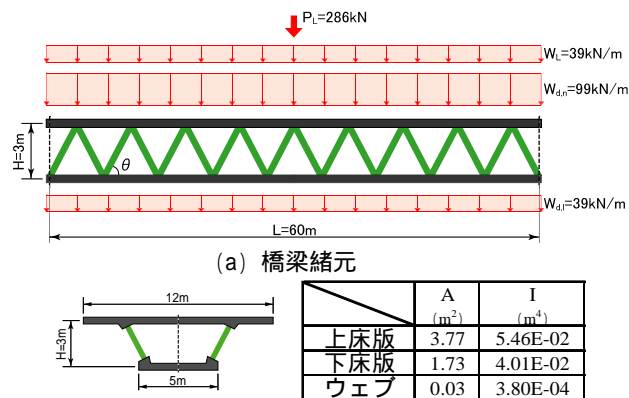


図-4 解析モデル

PCT では破壊靱性の向上が期待できる．さらに，格点部剛度を小さくすると，鋼トラス材での発生モーメント自体が小さくなるため，部材断面の縮小など優れた構造と成り得る．

2.2 実橋載荷試験による全体挙動

橋長 70m の PCT 実橋(図-6)を用いて 3 点漸増載荷を行った．解析モデルは床版・上弦材・鋼トラス材は平面応力要素，鉄筋・PC 鋼材はトラス要素でそれぞれ離散化し，1/2 スパンをモデル化した．使用する材料構成則は図-7 とし，降伏曲面には鋼材で Von-Mises 則，コンクリートに修正 Mohr-Coulomb 則を用いる．本解析では格点部での鋼-コンクリート間は節点を共有した完全付着モデルとし，下床版に導入されるプレストレスはコンクリート引張強度に導入圧縮応力を加算することで簡易に再現した．図-8 に荷重-たわみ曲線を，図-9 にトラス材の荷重-ひずみ関係を示す．

いずれも解析値は実験値とほぼ一致し，PCT の実橋梁レベルでの全体挙動を精度良く把握できた．また，平面保持仮定によるひび割れ発生荷重計算値は $P=2790\text{kN}$ であり，実験値と解析値ともほぼ同値であった．なお，荷重-たわみにおいて降伏点の差異が比較的大きいが，これは解析にて入力する材料定数が実際と違うためである．

2.3 格点部試験体を用いた応力伝達機構の検討

格点部を模した形状の試験体を用い，載荷試験を行った(図-10)．試験体の種類は格点部に PBL を用いた TYPE1-1 と TYPE1-2，スタッドを用いた TYPE2 の計 3 種類であり，TYPE1-2 だけは他の 2 タイプに比べ，鋼管とガセット間の溶接を鋼管同心軸に限定し，鋼管の溶接部剛度を小さくした．表-2 に供試体の種類，図-11 に格点部詳細図を示す．なお，試験体の設計では PBL に保坂式を，スタッドに「PCI Design Handbook」をそれぞれ適用した．解析モデルは鉄筋にトラス要素，鋼材やコンクリートにソリッド要素を用いて離散化し，奥行方向に 1/2 と

表-1 解析パラメータ

	格点部剛度	下床版		格点部	備考
		A_{Lg}	I_{Lg}		
Case1	1	A_{Lg}	I_{Lg}	I_W	曲げと軸力に対する抵抗を保持 (剛度大)
	0.013	A_{Lg}	I_{Lg}	$0.013 \cdot I_W$	" (剛度小)
Case2	1	$0.5 \cdot A_{Lg}$	0	I_W	曲げに対する抵抗を喪失 (剛度大)
	0.013	$0.5 \cdot A_{Lg}$	0	$0.013 \cdot I_W$	" (剛度小)
Case3	1	$0.015 \cdot A_{Lg}$	0	I_W	PC鋼材で軸力を負担 (剛度大)
	0.013	$0.015 \cdot A_{Lg}$	0	$0.013 \cdot I_W$	" (剛度小)

A_{Lg} : 下床版の断面積 A_{Lg} : 全断面有効, 下床版断面積
 I_{Lg} : 下床版の断面二次モーメント I_{Lg} : 全断面有効, 下床版断面二次モーメント
 I_C : 格点部の断面二次モーメント I_W : 鋼トラス材の断面二次モーメント

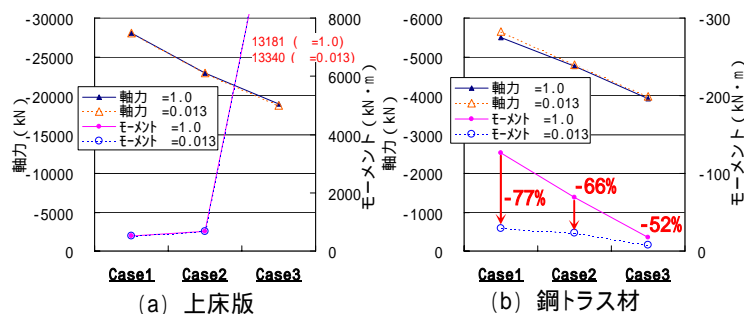


図-5 断面力の変化

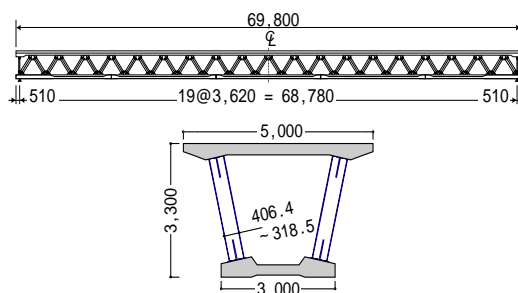


図-6 PCT 実橋の諸元

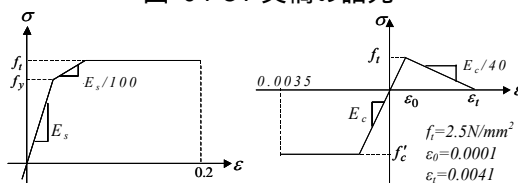


図-7 材料構成則

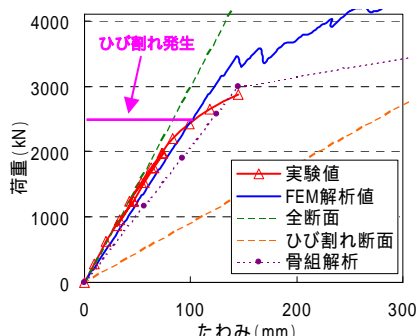


図-8 荷重-たわみ曲線

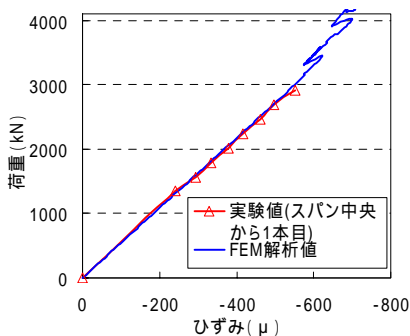


図-9 荷重-ひずみ曲線

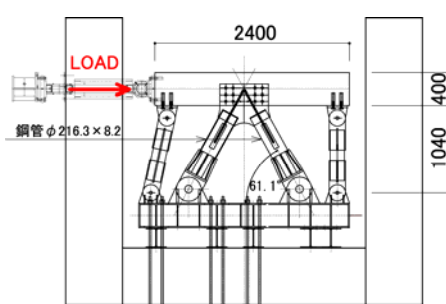


図-10 載荷要領

した。鋼-コンクリート間は付着なしとし、材料構成則は図-7である。図-12, 図-13, 図-14に荷重-水平変位曲線, 鋼管の荷重-ひずみ曲線, ガセットの主ひずみ分布をそれぞれ示す。

試験の結果, TYPE2 は 1608kN にてジベル部でせん断破壊したが, TYPE1-1 と TYPE1-2 では 1951kN, 1844kN でも破壊せず耐力を保持した。荷重-変位曲線において, 実験値は FEM 解析値よりも大きい, これは実験値の補正が十分にできなかったためである。また, 鋼管の軸ひずみはいずれの試験体もトラス理論による計算値と一致し, 曲げひずみは TYPE1-2 ではほとんど発生しないため, 鋼管

の溶接部剛度を小さくすると鋼管を軸部材として設計可能であることがわかった。さらに, TYPE1-2 ではガセットにひずみが比較的均等に発生し, 効率の良い荷重伝達が行われていることがわかった。なお FEM 解析では, PBL の貫通鉄筋やスタッドのひずみ性状は精度良く評価はできていないものの, ひび割れ発生やガセットと鋼管の降伏荷重等は実験値と一致するため, 大まかな挙動は再現できた。表-3 に最大耐力に対する実験値と設計値の比較を示す。設計値は実験値に対し 1.6 倍以上の安全性を有し, ガセットが抵抗するせん断耐力分を考慮した場合でも 1.1 倍以上の安全性を有す。これはガセットの露出部における荷重伝達により, ジベル部に作用する軸力が小さくなったためである。

2.4 パラメータ解析による格点部の応力伝達機構の検討

試験供試体におけるガセットの露出部での軸力分担率, 床版とガセット(露出部・埋設部)の荷重分担率の評価を目的とし, TYPE1-2 供試体を基本モデルとするパラメータ解析を実施した。解析パラメータは ガセット剛度の大小, 鋼管との溶接部剛度の大小の計 2 項目とし, 合計 4 ケースの解析を実施した。パラメータを表-4 に示す。

ガセット剛度の変化は露出部にスリットを設けることにより簡易的に模擬した(図-15)。また床版分担率は,

表-2 試験体の種類

名前	TYPE1-1	TYPE1-2	TYPE2
接合部	孔あき鋼板ジベル		スタッド
詳細	孔径 30, 20ヶ所	孔径 30, 12ヶ所	19×190, 16本
溶接形状			
溶接部剛度	大	小	大

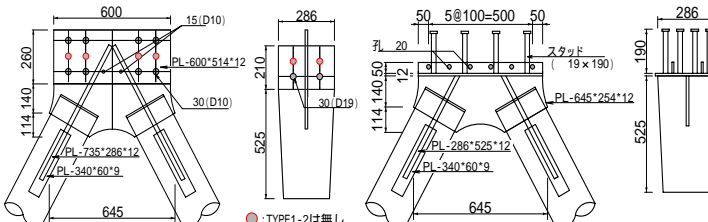


図-11 格点部の詳細図 (左:TYPE1-1, 右:TYPE2)

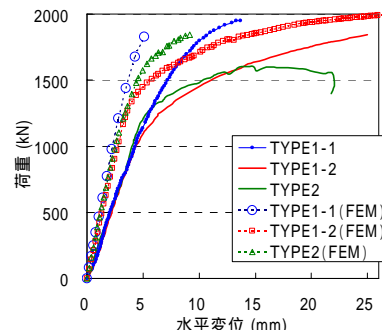


図-12 荷重-水平変位曲線

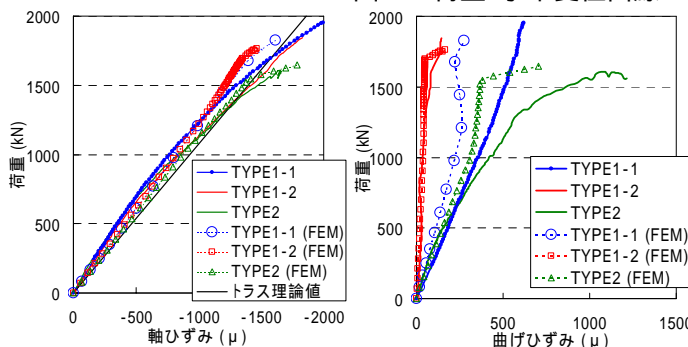


図-13 荷重-ひずみ曲線(圧縮鋼管)

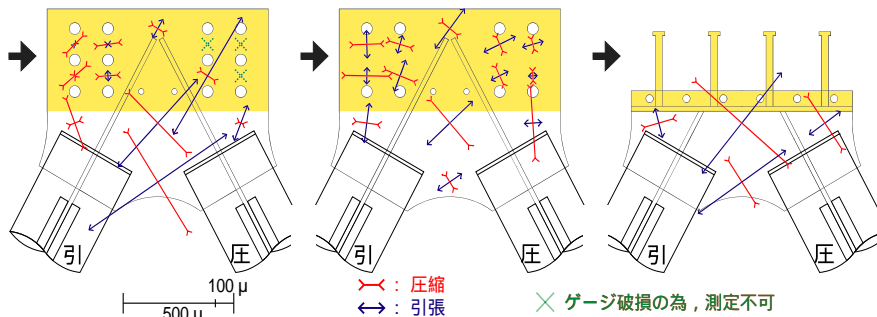


図-14 ガセットの主ひずみ分布

表-3 最大耐力に対する実験値と設計値の比較 (単位:kN)

		TYPE1-1	TYPE1-2	TYPE2
最大荷重	P_{max}	1951 (未破壊)	1844 (未破壊)	1608 (破壊)
設計値	P_{d1}	1255	916	779
設計値	P_{d2}	1830	1491	1256
	$P_{d1} + P_g$			
	P_{max} / P_{d1}	1.6	2.0	2.1
	P_{max} / P_{d2}	1.1	1.2	1.3

鋼材のみの格点部モデル(床版無しモデル)を別途解析し、中央断面における「床版無しモデルでの全せん断力」から「通常モデルでのガセットの全せん断力」を差分することで導出した。

図-16 に中央断面でのせん断力の分布図を示す。スリットなしの場合では溶接部剛度の大きい Case2 の方が溶接部剛度の小さい Case1 に比べ、露出部における荷重伝達が大きくなっているが、スリットありの場合では違いがほとんどないことがわかった。図-17 に各部位の荷重分担率を示す。鋼管の溶接部剛度が大きい Case2 では、全せん断力の半分近くを露出部で伝達するが、溶接部剛度の小さい Case1 では床版やガセットの埋設部での分担率が高く、効率の良い荷重伝達ができることがわかった。また、スリットを入れた場合では、溶接部剛度による違いはなく、「床版：ガセット埋設部 = 3：7」と一定値である。

3. 結論

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 骨組解析により、複合トラス橋の終局状態では、上床版に過大なモーメントが発生し、格点部を柔にすると鋼トラス材に発生するモーメントだけが小さくなることがわかった。PCT 形式の複合トラス橋では上床版が合成構造であるため、破壊靱性の向上が期待でき、格点部を柔にした構造は鋼トラス材を軸力部材とする、より合理的な構造となり得る。
- (2) 実橋載荷試験により、PCT 橋が有効な構造形式であること、ひび割れ発生荷重などの導出方法の妥当性が確認された。また、全体挙動は簡単な 2 次元 FEM 解析により適切に再現できることがわかった。
- (3) 格点部試験体の載荷試験により、格点部の大まかな挙動を実験的および解析的に把握した。ただし、PBL やスタッドの既往耐力評価式を用いた場合、格点部の耐力は設計値の 1.6 倍以上の十分な安全側にあり、埋設部のガセットのせん断抵抗を考慮しても 1.1 倍以上の安全側の評価を与える。
- (4) 鋼トラス材である鋼管とガセット間の溶接を鋼管図心上に限定し、溶接部剛度を小さくすると、鋼管やガセットに付加曲げが発生しないため、応力分布が均一になり、床版をより効率的に利用した荷重伝達ができることがわかった。
- (5) ガセットの露出部をなくすと、荷重分担率に鋼管の溶接部剛度が与える影響がなくなり、露出部がある場合よりも床版をより有効に利用した荷重伝達が可能となることがわかった。

今後は、PCT の試設計や格点部における設計フローの構築などを通して、PCT の実用化に向けて詳細に検討する予定である。

表-4 パラメータ

	ガセット剛度	溶接部剛度
Case1	大	小
Case2	大	大
Case3	小(スリット有り)	小
Case4	小(スリット有り)	大

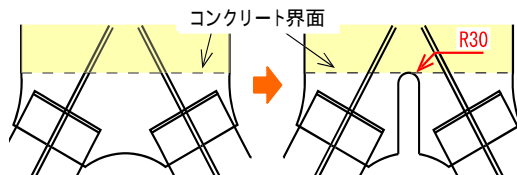
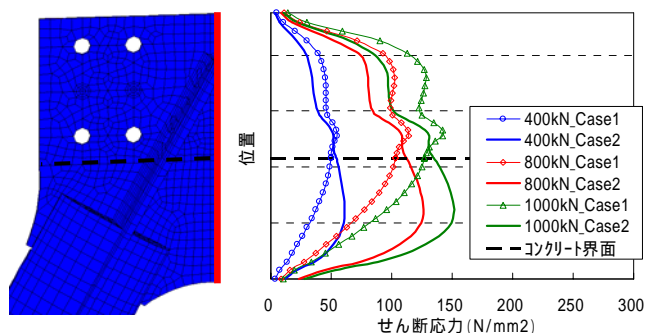
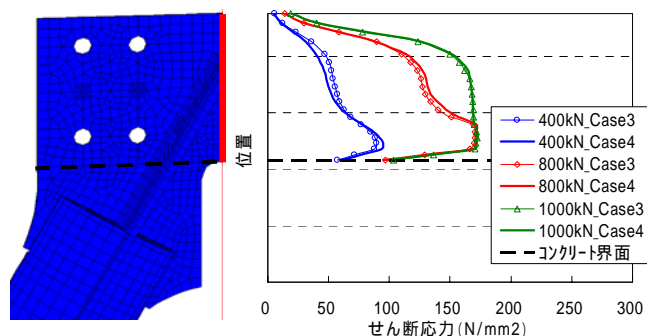


図-15 スリットの入れ方



(a) ガセット剛度大 (スリットなし) 【Case1, Case2】



(b) ガセット剛度小 (スリットあり) 【Case3, Case4】

図-16 せん断力の分布図

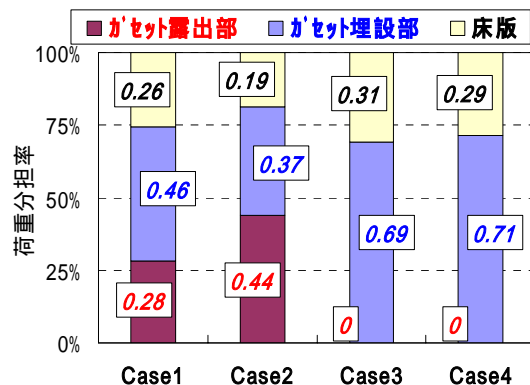


図-17 各部位の荷重分担率