

(38) 上弦材をノンプレストレス合成構造とした複合トラス橋の構造特性に関する基礎的研究

日野 伸一¹・元 大淵²・園田 佳巨³・山口 浩平⁴
左東有次⁵・福井 圭太⁶・工藤奈津子⁷

¹正会員 九州大学大学院教授 工学研究院建設デザイン部門 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)
E-mail:hino@doc.kyushu-u.ac.jp

²Girder Inovation Forever Co., LTD (〒1466-3, Garak-dong Songpa-gu Seoul Korea)

³正会員 九州大学大学院助教授 工学研究院建設デザイン部門 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

⁴正会員 九州大学大学院助手 工学研究院建設デザイン部門 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

⁵正会員 (株)富士ピー・エス 九州支店技術部 (〒810-0073 福岡市中央区舞鶴2-2-11)

⁶学生会員 九州大学大学院 工学府都市環境システム工学専攻 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

⁷学生会員 九州大学大学院 工学府建設システム工学専攻 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

近年、工費削減と施工の合理化を目的とした橋梁形式として、PC上下弦材と鋼斜材を組み合わせた複合トラス橋が開発実用化されている。著者らは、①上床版を施工時は鋼断面、活荷重載荷時は場所打ちコンクリートとの合成断面で抵抗する、②下床版はプレキャストPC断面とする、③上下床版と鋼斜材との接合部は外付けタイプとする、との特徴をもつ新しい複合トラス形式の橋梁構造を提案している。本論文は、トラス斜材の傾斜角、下床版の剛性変化などをパラメータとした一連の数値解析と、スパン長5.0mの縮尺模型はり供試体を用いた曲げ載荷試験を実施して、本橋の構造および設計法に関する種々の知見についてまとめたものである。

Key Words : Prestressed Composite Truss Girder, Nonprestressed Upper Slab, Steel Pipe

1. まえがき

近年、工費削減と施工の合理化を目的とした橋梁形式として、PC上下弦材と鋼斜材を組み合わせた複合トラス橋が開発実用化されている。ウェブ材を鋼トラスにすることで、以下のような特長が挙げられる。

- ① コンクリート量が従来のPC橋に比べ8割程度になり、下部工への荷重負担を軽減することができる。

- ② ウェブ材の鉄筋組立やコンクリート打設が不要となり、施工の合理化、工期短縮を図ることができる。
③ ウェブ材の橋軸方向の剛性が小さいため、下床版へのプレストレスの導入効率を向上させることができる。

フランスでの施工実績を参考に、国内では猿田川橋・巴川橋などが建設されているが、最適な部材形状や格点部構造など解明すべき多数の課題が残されているのが現

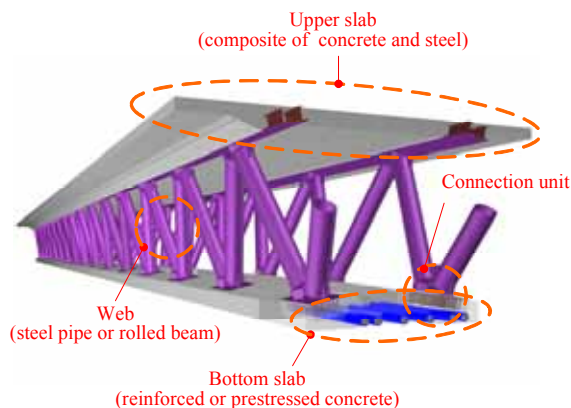


図-1: 複合トラス桁橋 (概略図)



写真-1: 試験施工された複合トラス桁橋 (実物)

状である^{1), 2)}。そこで本研究は、上記の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, 写真-1**に示す複合トラス桁橋（Prestressed Composite Truss Girder, 以下PCT桁と略称する）の開発を目的とするものである。既存の複合トラス橋に対して、本構造の特徴としては以下のようものが挙げられる³⁾。

- ① 上床版を施工時は鋼断面、活荷重載荷時は場所打ちコンクリートとの合成断面で抵抗する。
- ② 下床版はプレキャストPC断面とする。
- ③ 上下床版と鋼斜材との接合部は、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。

本論文は、上記のような新しい複合トラス形式の橋梁構造を提案し、その主要要因が各断面力に及ぼす構造について数値解析によって考察するとともに、スパン長5.0mの縮尺模型はり供試体を用いた曲げ載荷試験⁴⁾を実施して得られた、本橋の構造および設計法に関する種々

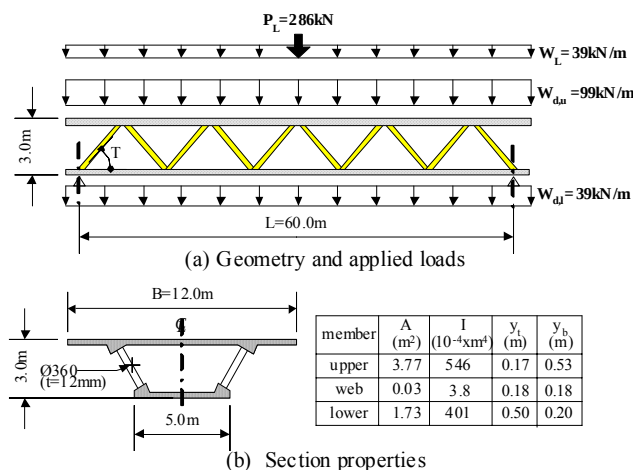
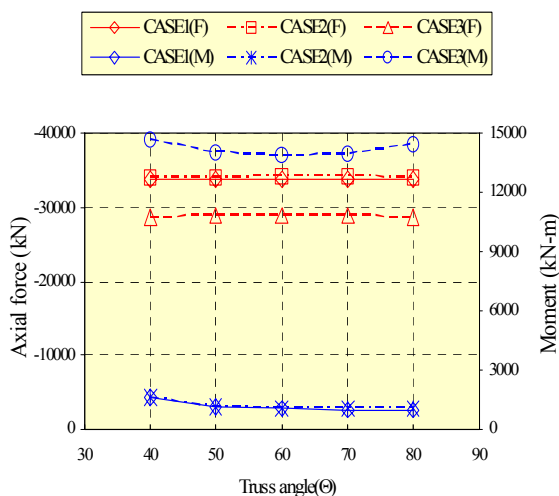
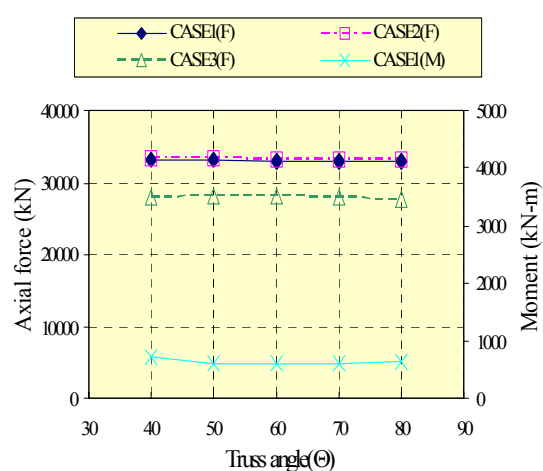


図-2：検討対象橋梁



(a) 上床版



(b) 下床版

図-3：上下床版の断面力変化

の知見について報告するものである。

2. 2次元弾性解析による本橋の構造要因についての考察

本橋のような鋼トラスウェブをもつ合成桁橋の設計と施工において、ウェブ材の傾斜角およびウェブ材と上下弦材（床版）との格点構造はきわめて重要である。ここでは、合成桁の設計コンセプトをトラス構造に拡張する際に考慮すべき主要構造因子、すなわち、ウェブ材の傾斜角と曲げ引張下でのコンクリート床版の剛性について検討する。検討対象とする複合トラス橋の諸元と荷重条件を**図-2**に示す。ウェブ材の傾斜角を40°, 50°, 60°, 70°, 80°に変化させてその影響を検討する。また、下床版の剛性が各断面力に及ぼす影響を検討するために、(1) Case 1：曲げモーメントおよび軸力に対する剛性を保持している場合、(2) Case 2：曲げ剛性のみを消失した場合、(3) Case 3：軸力と曲げに対する両方の剛性を消失した場合の3ケースについて、それぞれ2次元弾性解析を行った。

(1) ウェブ材の傾斜角の影響

ウェブ材の傾斜角に対する上下床版の断面力の変化を**図-3**に示す。同図に示すように、床版軸力はウェブ材の角度によってほとんど影響されないが、ウェブ材の角度が小さくなるにしたがって、曲げモーメントの値がやや大きくなる傾向がみられる。また、断面力の大きさを比較すると、軸力は曲げモーメントよりもはるかに大きくなっている。これは、力の伝達が主としてトラス作用に依存していることを意味している。しかしながら、床版に生じる曲げモーメントの値は小さいが、断面2次元モ

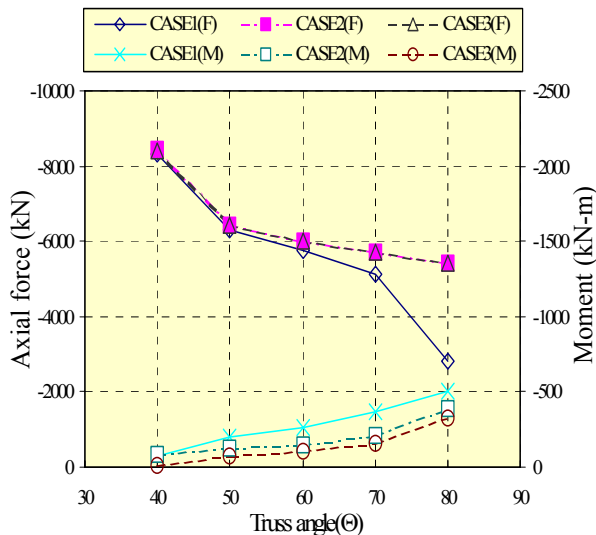


図-4：ウェブ材の断面力変化

ーメントが小さいために曲げモーメントによって生じる応力勾配を無視することはできない。

ウェブ材の傾斜角に対するウェブ材の断面力の変化を図-4に示す。角度が大きくなるに従って、ウェブ材の断面力は、曲げモーメントの値は増加するが、軸力の値は減少する。

ウェブ材の応力分布に対する軸力と曲げモーメントの両方の影響を見るために、各成分よる応力変化を図-5に示す。同図から、ウェブ材の角度が大きくなるに従って、軸力による応力は減少し、曲げモーメントによる応力は増加する。その結果、ウェブ材の角度変化にともない、合計（最大）応力はほとんど同等であるが、しいて言えば、ウェブ材角度50°のときに最小値であることがわかる。

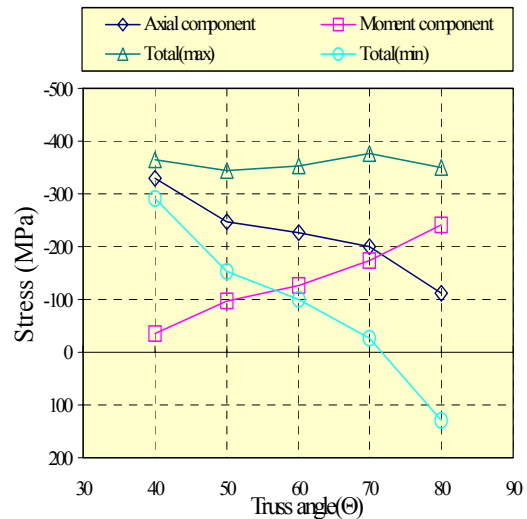


図-5：ウェブ材の応力変化

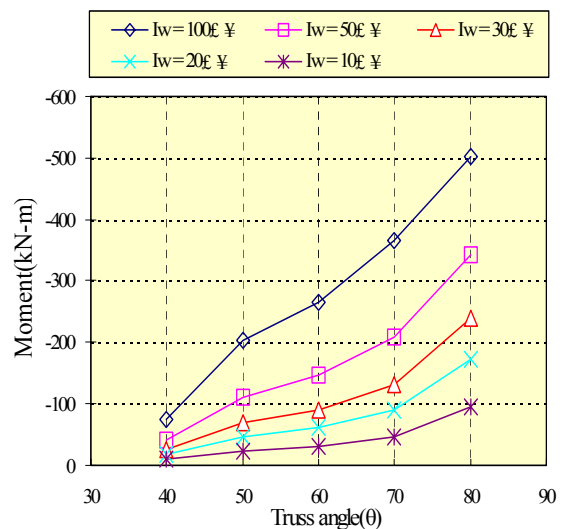


図-6：ウェブ材の曲げモーメント変化

(2) 下床版の剛性変化による断面力の再分配

既往の設計事例では、複合トラス桁はじん性的な破壊モードとなるように、すなわち下弦材の降伏後に上弦材が圧壊するように仮定した設計が行われている。しかしながら、図-3, 4は、断面力、特に曲げモーメントに対する顕著な再分配が、下床版の剛性変化にともなって起こる、ということを示唆している。したがって、部材剛性の変化はトラス構造では重要になるといえる。

a) 曲げ剛性の影響

下床版の曲げ剛性の変化は、ウェブ材と上床版の断面力に及ぼす影響は顕著ではないが（図-3, 4参照）、下床版の合計応力は、曲げモーメントによる応力負担がなくなるために減少する。したがって、曲げひびわれが発生後の下床版の挙動は、これらのひび割れに対する適切な補強を施すことにより改善することが期待される。

b) 軸方向剛性の影響

下床版の軸方向剛性の消失にともなって、上床版の曲

げモーメントが急増する。その結果、上床版の下縁に大きな引張応力が生じる。その引張応力に抵抗するのに十分なプレストレス導入が必要であるが、上床版に導入することができるプレストレス量は上縁の応力状態によって制限される。

上記の問題の解決策として、下床版のひび割れ進展を回避すること、また上床版のひびわれに対する抵抗力を増加させることの二つが考えられる。一般に、コンクリート部材が用いられる場合、供用荷重状態下ではプレストレス導入によってひびわれを回避することはできても、終局荷重状態でのひびわれを回避することは難しい。

鋼-コンクリート合成構造を上床版に適用するならば、上床版の下部に配置された鋼材が施工中および供用荷重下での圧縮に抵抗することができる。さらに、曲げモーメントが供用荷重状態を超えて増加するに従って、鋼材の応力状態は、曲げによる引張力のために、圧縮状態

から次第に引張状態へと変化する。また、コンクリート床版に作用する圧縮応力がより増大する。しかし、コンクリート床版が圧縮破壊するまで鋼材が引張応力に抵抗すれば、桁に必要な延性破壊モードは保証されることになる。

④ ウェブと格点部の曲げ剛性

トラスウェブを有する箱桁の設計で見直すべきもう一つの重要な点は、ウェブ材と上下床版が結合される格点部である。理想的なピン結合のトラス構造の格点部は、ウェブ軸力を上下床版に伝達する機能を有するが、剛結結合部には、床版とウェブ材の間に曲げモーメントも生じる。したがって、床版とウェブ材が剛結結合される場合のウェブ材の応力は、軸力と曲げモーメントの両方を考慮して算定しなければならない。

図-6は、ウェブ材の曲げ剛性が元の値に対して50%、30%、20%、および10%まで減少したときの構造解析結果を示す。同図に示されるように、ウェブ材の曲げモーメントは、トラスの角度とともに、ウェブ材の曲げ剛性に影響される。これまで日本で施工された橋梁は、トラスウェブを有する箱桁タイプがほとんどであるが、ウェブ材には、景観上の理由から鋼管が使用されている。し

かしながら、鋼管の曲げ剛性（断面2次モーメント）は、その形状から断面積の増加に比例して増加する。したがって、格点部が剛結で、かつ軸力の増加によって断面積を増加させる必要があるならば、増加軸力によって必要とされる断面積よりさらに増加しなければならない。それは、ウェブに作用する曲げモーメントの値も、断面積の増加に比例してさらに大きくなるためである。この問題を解決するために、設計者によって曲げ剛性を調整できる露出タイプの格点構造を、本橋では適用することにする（図-7 (b) 参照）。

(3) 格点部の構造

a) 上床版とウェブ材の結合

既存のトラスウェブを有する複合桁橋と異なって、本橋の上床版は、鋼はりコンクリート版からなる合成構造である。したがって、ウェブ材と上床版の接合部は、既存の鋼トラス橋のものと同様の構造にすることが可能である。上床版の鋼はりコンクリート版は、ガセットプレートを使用することによって単純に結合できる（図-8参照）。

b) 上床版のずれ止め

ずれ止めの種類と鋼はりの位置関係によって分類すれば、次の3つのタイプが考えられる。(a) コンクリート版から鋼はりを完全に露出させ、スタッドを用いて合成する（図-9 (a)）；(b) 下面を除いて鋼はりをコンクリート版に埋込み、スタッドを用いて合成する（図-9

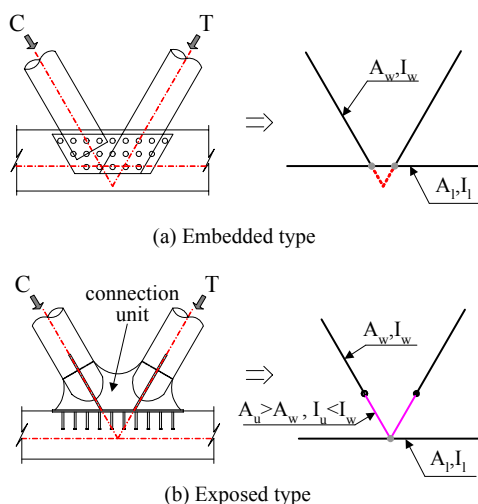


図-7：格点構造

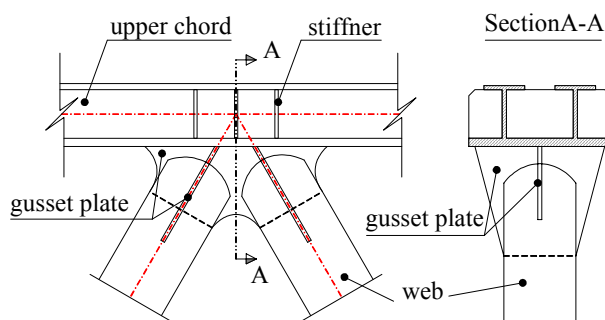


図-8：格点部詳細（上床版側）



(a) Exposed type : Stud



(b) Embedded type : Stud



(c) Embedded type : Perforated rib

図-9：鋼桁と上床版とのずれ止め構造

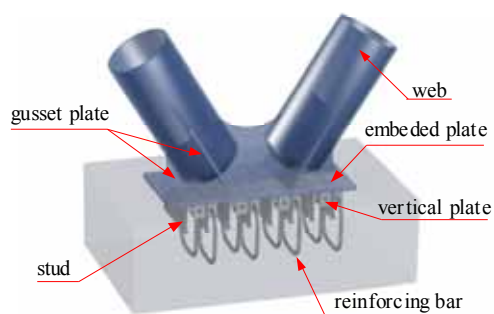
(b)) ; (c) 下面を除いて鋼はりをコンクリート版に埋込み、パーフォボンド構造を用いて合成する (図-9 (c)) .

外付けタイプは、景観面と維持管理上は不利であるが、プレキャスト床版と組み合わせて現場施工の省力化と工期短縮化を図るには有利となる場合がある。一方、埋込みタイプは、大気中に露出する鋼材と、コンクリート版との合成後の偏心量をそれぞれ最小限に抑えるなど、維持管理および構造性能の面で利点がある。しかし、それは、プレキャスト合成床版を採用する場合には、コンクリート版内に鋼はり突出することにより、床版の張出し部に適用するのは容易ではない、という不利な点がある。

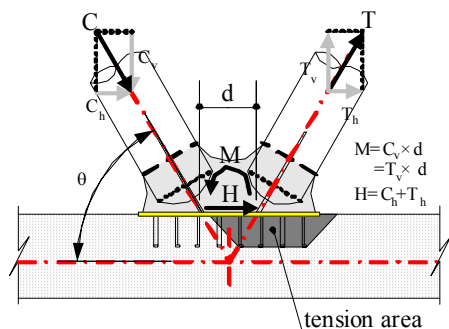
d) 下床版とウェブ材の結合

下床版とウェブ材の結合に対する格点部構造として、先ずウェブ端部に交差させてガセットプレートが取り付けられ、次に下床版に埋込まれるプレートの上面に溶接によってガセットプレートが接合され、また埋込みプレート下面には頭付スタッドやずれ止め材が溶接される構造である。(図-10 (a) 参照)。さらに、孔あき鉛直プレートは埋込みプレートの下側に付加的に溶接される。埋込みプレートと下床版との間のはく離を防ぐために、孔を通してフックタイプの鉄筋が配置される。

ウェブから下床版に伝達される軸力は、埋込みプレートの上面の中央で、水平力と曲げモーメントに変換されることになる (図-10 (b) 参照)。これらの水平力と



(a) 概略図



(b) 作用断面力

図-10：格点部詳細 (下床版側)

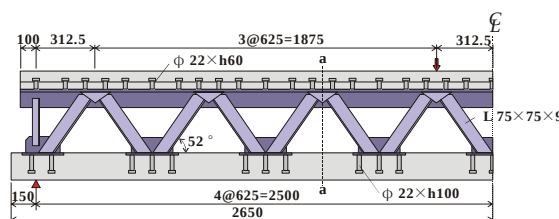
曲げモーメントは、頭付きスタッドを介して下床版に伝達される。このスタッドは、水平せん断力と引き抜き力の両方に抵抗できるものでなければならない。図-10に示すような格点部構造が下床版とウェブの接合に適用される理由は、頭付きスタッドの水平せん断力と引き抜き力が同時に作用する部材の接合に用いられた多数の研究成果があることと共に、既に検証された設計基準式⁵⁾が提示されているからである。

表-1：供試体概要

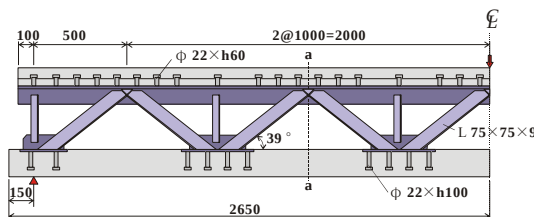
Type	斜材の角度	スタッド本数		下床版への導入プレストレス量
		上床版格点部	下床版格点部	
PCT-52	52°	8本	12本	666kN
PCT-39	39°	12本	16本	(約11N/mm ²)

表-2：材料特性

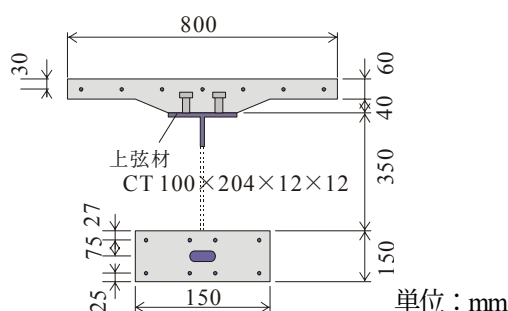
(a) コンクリート			(b) 鋼材		
部材	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	部材	降伏強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)
上床版	31.7	2.4×10^4	上弦材	245	2.1×10^5
下床版	36.2	2.9×10^4	斜材	295	
			鉄筋	295	
			PC鋼材	1568	



a) PCT-52



b) PCT-39



c) a-a 断面

図-11：供試体概略図 (1/2)

3. 5m供試体による曲げ試験

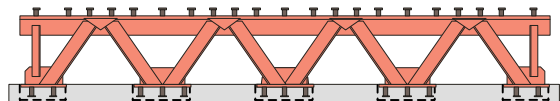
(1) 供試体諸元および試験方法

供試体は表-1に示すように斜材の角度とスタッド本数をパラメータとした上床版の幅800mm, 下床版の幅400mm, 高さ600mm, スパン5mの供試体で各2体, 計4体である。なお, 本実験での上下床版の結合材は, 全て頭付きスタッド(φ22)を用いた。表-2に使用材料の特性, 図-11にPCT-52, PCT-39の供試体概略図(1/2部分)を示す。この供試体は図-12に示すように, まず, 斜材を配置した下床版の打設を行い, その状態でプレストレスを導入し, 最後に上床版の打設を行う工法を採用して

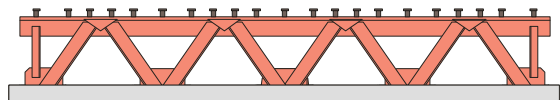
Step1 下床版の打設



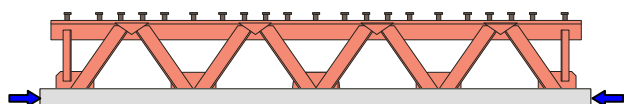
Step2 組み立てた鋼トラスの取り付け



Step3 格点部の打設



Step4 プレストレスの導入



Step5 上床版の打設

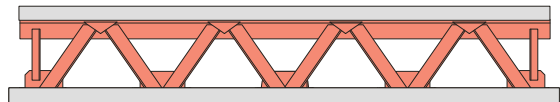


図-12: PCT 桁製作手順



写真-2: 載荷状況

いる。本工法によりプレキャスト化が可能になり, 従来の複合トラス橋よりも下床版へのプレストレス導入効率が改善されるとともに, 現場施工の省力化が容易となることが期待される。

写真-2に載荷状況を示す。載荷方法はPCT-52は2点載荷, PCT-39は1点載荷とした。また, PCT-52の1体目は漸増載荷であり, 他の3体は繰り返し載荷を行った。

(2) 解析概要

複合トラス構造の弾塑性挙動を解析的に把握するために, 汎用非線形構造解析ソフトMarcを用いた検討を試みた。解析には, 図-13に示す2次元供試体モデル(ウェブ材および上下床版は4節点平面要素, 鉄筋およびPC鋼材には2節点トラス要素を適用)を用い, 弾塑性材料特



図-13: 解析モデル

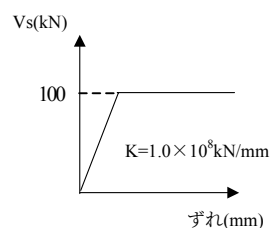


図-14: せん断ばね特性

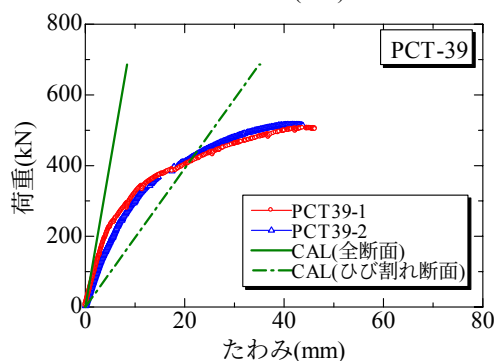
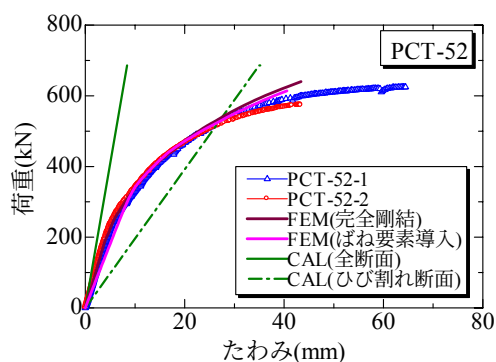


図-15: 荷重-たわみ曲線

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・クーロン則を適用し、圧縮・引張域ともに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、ウェブ材と上下床版の間に2方向のバネ要素を設けた。各バネの特性として、引張荷重に対してはジベルの引抜き抵抗を、圧縮荷重に対してはMarcの接触解析機能を用いた支圧特性を与え、せん断荷重に対しては、

表-3：荷重比較

Type		実験値 (kN)	計算値 (kN)	解析値 (kN)	実験値 計算値	実験値 解析値
PCT-52	ひび割れ荷重	259	246	290	1.05	0.89
	最大荷重	625	597	640	1.05	0.98
PCT-39	ひび割れ荷重	224	228	-	0.98	-
	最大荷重	496	487	-	1.02	-

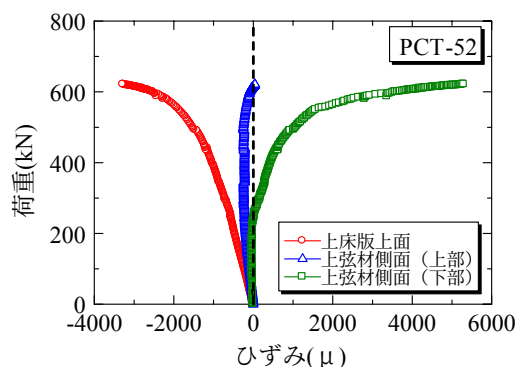


図-16：荷重-ひずみ曲線

図-14に示す簡易な完全弾塑性の特性を仮定した。

(3) 結果および考察

a) 荷重-たわみ関係

図-15にスパン中央部の荷重-たわみ曲線を示す。同図より、PCT-52はスパン中央部下床版の曲げ引張破壊が破壊を支配し、PCT-39は上床版の曲げ圧縮破壊により破壊した。また、PCT-52は、格点部でウェブ材と上下床版を完全剛結と仮定した場合の結果も併記しているが、いずれの結果も実験値を良好に再現していることがわかる。このことから、いずれの供試体も下床版へのひび割れ発生後、さらに最大荷重付近まで、スタッドによる十分な荷重伝達機能が保持されていることが推察される。

表-3にひび割れ荷重と最大荷重を示す。同表より、ひび割れ荷重は、両タイプともほとんど差がみられない。最大荷重は、斜材の角度を大きくした方が大きいことがわかり、両タイプとも設計上の耐力を保持し、有用な構造特性であることがわかる。また、FEM値は、ひび割れ発生荷重および最大荷重とも、実験値と近い値であることがわかる。

b) 荷重-ひずみ関係

一例として、図-16にPCT52-2の上床版、上弦材（鋼はり）の荷重-ひずみ曲線を示す。同図中の上弦材下部（鋼はり）に着目すると、荷重約300kNである下床版のひび割れにともなう剛性低下後に、上床版の鋼はりが圧縮域から引張域に転じており、上床版の鋼はりが有効に

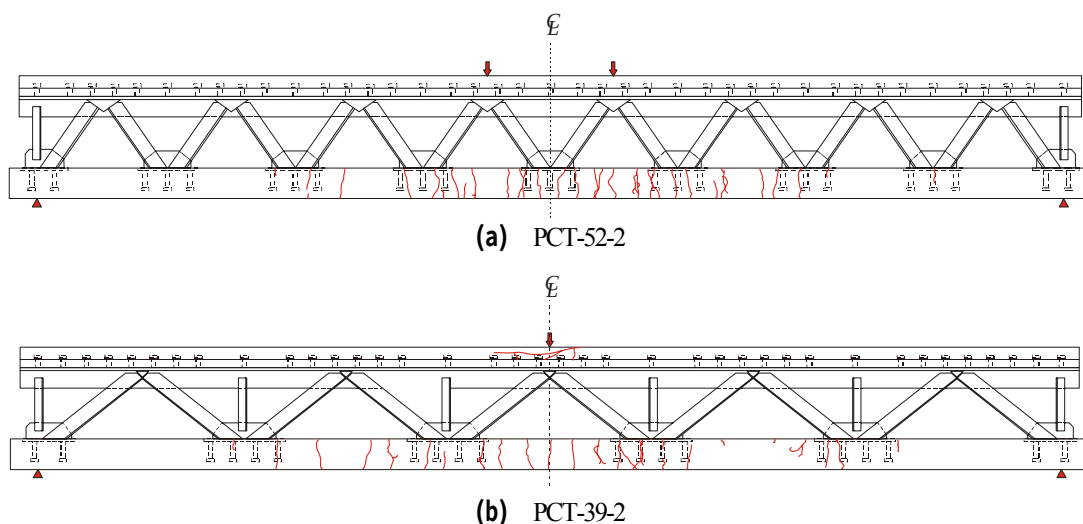


図-17：ひび割れ図

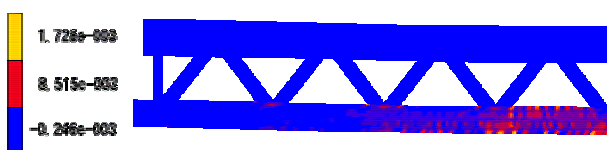


図-18：引張ひずみ分布 (Pmax)

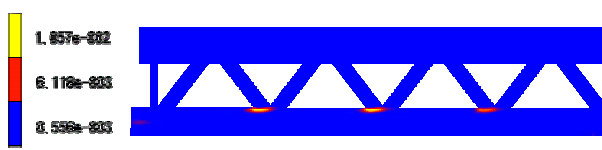


図-19：せん断ひずみ分布 (Pmax)

機能していることがわかる。また、終局時には上床版上面のひずみは 3000μ 以上で圧縮破壊していることがわかる。

c) ひびわれ分布

図-17に各タイプ2体目の終局状態におけるひび割れ分布図を示す。同図より、PCT-52ではスパン中央部付近に曲げ引張ひび割れが集中し、上床版のコンクリート圧壊前に下床版の曲げ引張破壊を呈した。一方、PCT-39では全体的にひび割れが分散した後、最終的には上床版上面が圧壊したことがわかる。

図-18は、最大荷重時の引張ひずみ分布を示したもので、下床版に典型的な曲げ引張によるひび割れが発生する様子が再現されていることが認められる。また、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、格点部構造の重要性を示唆している。

図-19は、格点部近傍に卓越するせん断ひずみ分布を示したものである。同図より、ウェブ材と下床版の荷重伝達状況が視覚的に把握でき、格点部を含めた理想的な複合トラス構造を模索する際の判断材料の一つとなることが期待できる。

4. まとめ

- ① ウェブ材の傾斜角変化にともない、ウェブ材の合計（最大）応力はほとんど同等であるが、しいて言えば、ウェブ材角度 50° のときに最小値となる。
- ② 下床版の軸力に対する剛性変化にともない、各断面力、特に曲げモーメントに対する顕著な再分配が起こることがわかり、下床版の剛性変化は本構造の設計に対してきわめて重要になるといえる。
- ③ ウェブ材の曲げモーメントは、トラスの角度とともに

に、ウェブ材の曲げ剛性に影響されるため、設計上の柔軟性に配慮して曲げ剛性を調整できる外付けタイプの格点構造が有用である。

- ④ 曲げ試験より、本構造の供試体は、設計上の耐力を保持していること、また下床版のひび割れにともなう剛性低下後は、合成構造断面の上床版が有効に機能していることがわかった。
- ⑤ 曲げ試験より、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、格点部構造が重要であるといえる。

今後は格点部の構造に重点を置いて、合理的な格点構造とその設計手法について実験および解析的検討を進める予定である。

参考文献

- 1) The Bras de la Plaine Bridge Gill Causse, Jean-Pierre Viallon, 白谷宏司（訳）：Reunion 島の複合トラス橋（ブラ・ド・ラ・プレイン橋），橋梁と基礎，pp.152-153, 2004.
- 2) 青木圭一，本間淳史，山口貴志，星加益朗：PC 複合トラス今日の設計・施工 一第二東名高速道路 猿田川橋・巴川橋一，コンクリート工学，Vol.42, No.8, pp.38-43, 2004.
- 3) 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.
- 4) 福井圭太，日野伸一，山口浩平，元大淵：鋼・コンクリート複合トラス桁橋の開発に関する基礎的研究，平成 16 年度土木学会西部支部研究発表会講演論文集，pp.21-22, 2005.
- 5) PCI : Design Handbook, Precast/Prestressed Concrete Institute, Chicago, 1999.

FUNDAMENTAL STUDY ON STRUCTURAL CHARACTERISTIC OF COMPOSITE TRUSS GIRDER BRIDGE WITH NONPRESTRESSED COMPOSITE UPPER SLAB

Shinichi HINO, Dae Yon WON, Yoshimi SONODA, Kohei YAMAGUCHI,
Yuji SATO, Keita FUKUI and Natsuko KUDO

The prestressed concrete box girder with truss web is very effective to reduce self weight of super-structure as well as sub-structure, but has not been advanced in view of design and construction technology as compared with existing concrete box girders. The PCT girder is a composite girder of new concept which was developed based on the following key words : 1)Composite structure, 2)Composite member, and 3)Truss system. The PCT girder can effectively overcome structural shortages of the conventional composite girders and construction limitation of concrete box girder with truss web. The major variable which should be examined when the design concept of beam structure is extended to truss structure, that is, the influence of inclination of web and redistribution of forces due to change of member stiffness are discussed, and a bending test on the composite truss beam with span length of 5.0m are also carried out to investigate the flexural behavior of the proposed structure up to failure.