

論文 プレストレスを導入した UFC トラス材を有する複合 PC 部材の単純化格点構造

村田 裕志^{*1}・二羽 淳一郎^{*2}・大熊 光^{*3}・川口 哲生^{*4}

要旨：プレストレスを導入した超高強度鋼繊維補強コンクリート（UFC）のトラス材をウェブに適用した複合 PC 部材における単純化した格点構造を提案する。具体的には、格点部において、UFC 量を減らし、かつ UFC トラス斜材を X 字に交差させて、フランジコンクリートに埋め込むだけの単純な構造とした。この単純化した格点構造の性能を確認するため、実在の複合トラス橋の一部を縮小化し、この格点構造を取り入れた要素試験体の載荷実験を行った。その結果、この格点構造は、フランジの水平加力と逆対称曲げの外力に対して十分に抵抗できることを確認した。

キーワード：超高強度繊維補強コンクリート，複合 PC 構造，格点構造，トラス，ウェブ

1. はじめに

近年主桁の軽量化のため、従来の PC 箱桁橋のウェブを鋼トラスに置換した複合トラス橋が開発、実用化されてきた¹⁾。しかし、鋼トラスは耐久性の面で十分な配慮が必要であるため、著者らはウェブに超高強度繊維補強コンクリート²⁾（Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete: 以下 UFC と称する）を適用した橋梁構造を提案してきた³⁾。

この橋梁構造においても、既存の鋼トラスを用いた複合トラス橋と同様に、トラスとコンクリートフランジを一体化させるための格点構造が重要となる。既に UFC の格点部にずれ止め筋、せん断キーを設け、引張斜材と圧縮斜材の両方にプレストレスを導入するとともに、格点部に 2 方向からプレストレスを与える格点構造（図-1）を提案し、複合 PC 桁の載荷実験によってこの格点構造がせん断力に対して十分な性能を有していることを確認した⁴⁾。

本研究では、実用の観点から、さらに単純化した格点構造を提案する。具体的には、格点部

の UFC の体積を減少させて X 字とし、せん断キーを設けないものである。この単純化された格点構造の力学的性能を確認するために、要素試験体を作製して水平加力試験と逆対称曲げ試験を行った。試験体は実在の複合トラス橋の一部を縮小化し、単純化した格点構造を有する逆 V 字形の UFC トラスにコンクリートの上下フランジを接合したものとした。

2. 実験概要

2.1 使用材料

(1) コンクリート

コンクリートの示方配合を表-1 に示す。粗骨材には普通砕石を使用し、その最大寸法は 15mm

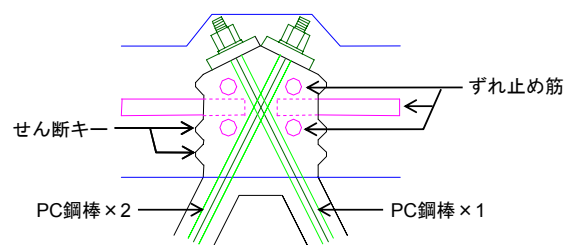


図-1 既に提案した格点構造

*1 東京工業大学 大学院理工学研究科土木工学専攻 修(工) (正会員)

*2 東京工業大学 大学院理工学研究科土木工学専攻教授 工博 (正会員)

*3 大成建設(株) 技術センター土木技術開発部ダクトル事業推進室 修(工) (正会員)

*4 太平洋セメント(株) 中央研究所ダクトル技術開発チーム 修(工) (正会員)

表－1 コンクリートの示方配合

粗骨材の最大寸法 [mm]	水セメント比 [%]	空気量 [%]	細骨材率 [%]	単位量 [kg/m ³]				
				水	セメント	細骨材	粗骨材	AE 減水剤
15	40.0	4.0	45.0	165	413	780	968	1.03

表－2 UFC の示方配合 [kg/m³]

水	プレミックス粉体	鋼繊維	高性能減水剤
180	2255	157	28

とした。細骨材には山砂を使用した。セメントには普通ポルトランドセメントを使用した。

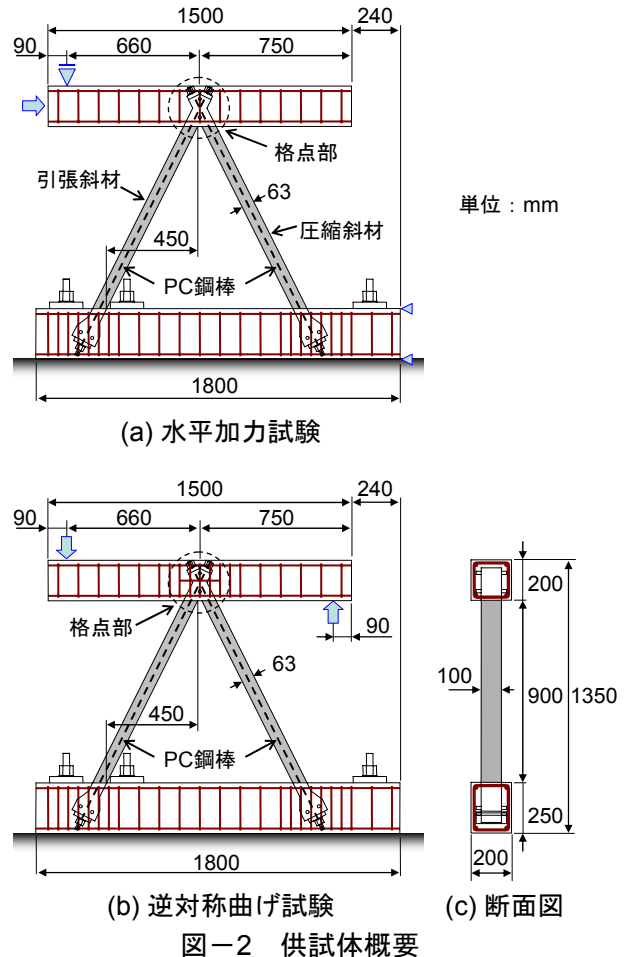
(2) UFC

UFC の示方配合を表－2 に示す。プレミックス粉体は、セメント、シリカフェーム、珪石微粉末などから構成され、最密充填理論に基づき、あらかじめ混合された粉体である。高性能減水剤は練混ぜ水の一部とした。直径 0.2mm で長さ 15mm の鋼繊維を UFC 体積に対する内割体積比で 2% 混入した。UFC の練混ぜは 12～14 分で行い、打込みを行った。打込み時にはフロー試験（JIS R 5201，落下なし）を行い、フローコーン引き上げから 180 秒後のフロー値が 270±10mm となるように管理した。打込み後はポリ塩化ビニリデンフィルムで覆った状態で 48 時間の湿潤養生を行った。その後、脱型して 90℃の蒸気養生を 48 時間行った。

2.2 供試体概要

(1) 全体概要

図－2 に水平加力試験および逆対称曲げ試験用の供試体の概要を示す。供試体は、複合 PC 桁の一部を取り出したものとなっており、逆 V 字形の UFC トラスと上下のコンクリートフランジで構成されている。実験の対象となる単純化した格点部を上フランジ側に配置した。供試体名を表－3 に示す。当初は格点部周囲のせん断補強筋比とずれ止め筋の有無をパラメータとして、4 体とも上フランジを水平に加力する試験を行う予定であった。しかし、N03 と D03 供試体で格点部に損傷が見られなかったため、N06 と D06 供試体については格点部をさらに厳しい応力状態とするため、逆対称加力により曲げモーメン



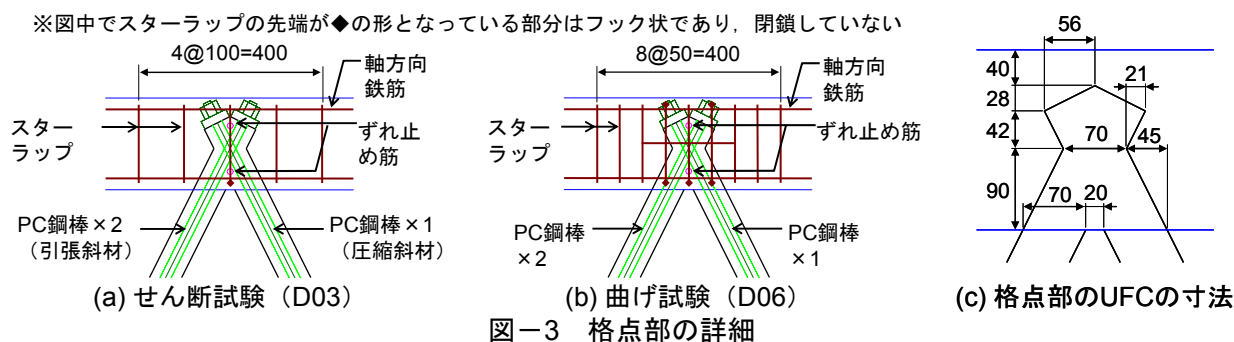
図－2 供試体概要

表－3 供試体名

供試体名	せん断補強筋比	試験	ずれ止め筋
N03	0.32%	水平加力	無
D03			有
N06	0.63%	逆対称曲げ	無
D06			有

トを加えることとした。

供試体の断面形状は、鋼トラスを用いた我が国初の複合トラス橋である木ノ川高架橋⁵⁾の断面形状を約 1/5 に縮小化したものとした。トラスに関しては、木ノ川高架橋で用いられている鋼管（φ＝406 mm）のうち、最も厚い t＝22 mm の鋼管を、同じ重量となるように UFC トラスに置換して縮小化した。その際、木ノ川高架橋における、圧縮斜材内の充填コンクリートの重量も



考慮した。その結果 UFC トラスの断面は 63 mm × 100 mm となった。

水平加力試験では、上フランジに水平载荷することで、図-2(a)中の左側の UFC 斜材が引張力を受け、右側の UFC 斜材が圧縮力を受ける。なお、上フランジの载荷点側の上部で鉛直方向の変位を拘束し、上フランジが常に水平を保つようにした。

逆対称曲げ試験では、上フランジの一方の端部を上側から载荷し、他方を下側から同じ力で载荷することで、格点部に曲げモーメントのみを作用させるようにした。

(2) 格点部

単純化した格点部の詳細を図-3に示す。図中では水平加力試験、逆対称曲げ試験の両方ともずれ止め筋のあるケースを表している。UFC の格点部は斜材が交差した X 字形となっており、その内部では図-3(a), (b)中の左側の斜材内の PC 鋼棒 2 本が右側の斜材内の PC 鋼棒 1 本を挟むようにして、それぞれが交差している。これらの PC 鋼棒によって、UFC トラスの両方の斜材にプレストレスを与え、UFC の格点部を強化している。水平加力試験では格点部周りにスターラップを 100 mm 間隔で配置し、そのせん断補強筋比は 0.32%となっている。逆対称曲げ試験では間隔を半分の 50 mm としてせん断補強筋比を 2 倍の 0.63%とした。使用した全ての鋼材を表-4に示す。

(3) 供試体作製方法

供試体の作製にあたっては、まず格点を含む逆 V 字形の UFC トラスを作製してプレストレスを導入した。2 本ある斜材の両方に 30 N/mm² の

表-4 使用した鋼材一覧

鋼材名	種類
ずれ止め筋	D16 SD345
軸方向鉄筋	D13 SD345
スターラップ	D6 SD345
PC 鋼棒 (UFC トラス内)	φ17 SBPR1080/1230

プレストレスを導入した。図-3 中で左側にある斜材内の 2 本の PC 鋼棒にはそれぞれに 90 kN ずつ、合計 180 kN のプレストレスを導入した。反対側の斜材内の 1 本の PC 鋼棒には、180 kN のプレストレスを導入した。なお、プレストレスはポストテンション方式によって導入し、グラウトの充填は行っていない。

UFC トラスにプレストレスを導入後、UFC トラスを型枠にセットし、フランジ用の鉄筋を組み立ててコンクリートの打込みを行った。供試体の養生方法は湿潤養生とした。

(4) 载荷

水平加力試験の载荷は、1000 kN 油圧ジャッキと電動ポンプを用いて、1 点静的単調载荷とした。浮き上がり防止の部分には、供試体が水平方向に拘束されるのを防ぐため、2 枚のテフロンシートの上にグリスを挟んだ減摩パッドを挿入した。

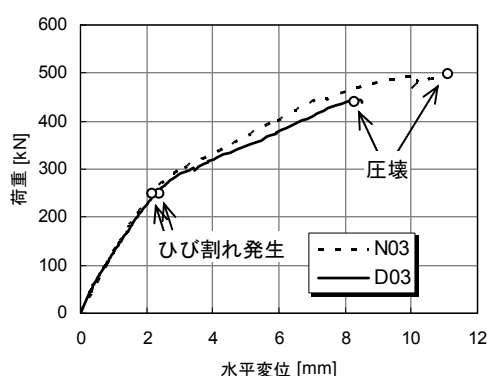
逆対称曲げ試験の载荷は 200 kN 油圧ジャッキを 2 つ用い、1 つの電動ポンプで同じ油圧をかけることによって、上フランジの両端部において、相反する方向に等しい力が加わるようにした。

3. 実験結果と考察

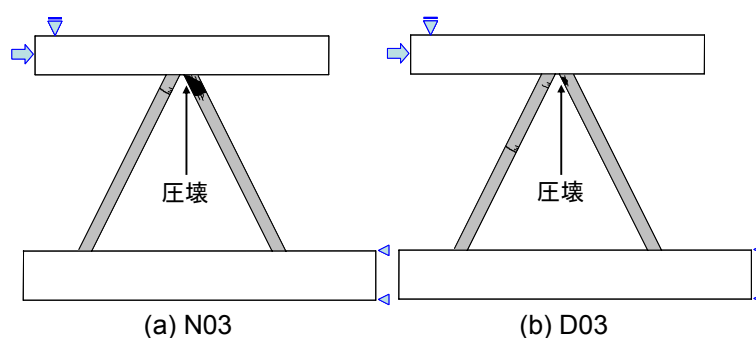
表-5 に水平加力試験、逆対称曲げ試験用の各供試体に用いた UFC とコンクリートの材料特性

表－5 コンクリートおよび UFC の材料特性

供試体名	UFC			コンクリート		
	圧縮強度 [N/mm ²]	ひび割れ発生 強度[N/mm ²]	ヤング係数 [kN/mm ²]	圧縮強度 [N/mm ²]	引張強度 [N/mm ²]	ヤング係数 [kN/mm ²]
N03	202	12.1	50.5	41.4	3.2	27.9
D03				41.7	3.4	28.1
N06	226	8.91	58.0	31.4	3.0	26.8
D06				34.0	3.1	27.1



図－4 水平加力試験の荷重－水平変位関係



図－5 水平加力試験のひび割れ図

を示す。UFC は 200 N/mm^2 を超える圧縮強度を示した。

3.1 水平加力試験

図－4 に水平加力試験を行った N03 と D03 供試体の荷重－水平変位関係を、図－5 にそれぞれのひび割れ図を示す。水平変位は上フランジの中央部のものである。表－6 には各荷重を示す。

(1) ずれ止め筋無し (N03)

N03 では、荷重が 250 kN になった時に引張斜材（図－5(a)中の左側の斜材）の上部にひび割れが発生した。それに伴い、荷重－水平変位関係の剛性が低下した。その後荷重は増加し、引張斜材のひび割れ幅は増大していき、 500 kN の時に圧縮斜材で圧壊した。その際、引張斜材内の PC 鋼棒のひずみは降伏ひずみ（約 6000×10^{-6} ）に達していた。格点部のコンクリートフランジには、ひび割れは一切発生しなかった。

(2) ずれ止め筋有り (D03)

D03 では、N03 と同様に荷重が 250 kN になった時に引張斜材の上部にひび割れが発生し、荷重－水平変位関係の剛性が低下した。その後引張斜材の中央にもひび割れが発生し、このひび割れ幅が増大していった。その後荷重は増加し

表－6 水平加力試験の結果 [kN]

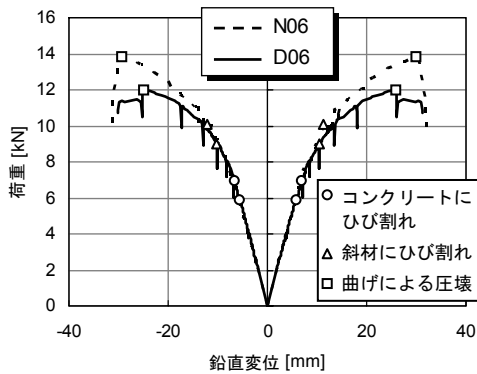
供試体	ひび割れ発生荷重	最大荷重
N03	250	500
D03	250	450

て 450 kN で圧縮斜材において圧壊した。N03 と同様に、格点部のコンクリートフランジにはひび割れは一切発生しなかった。

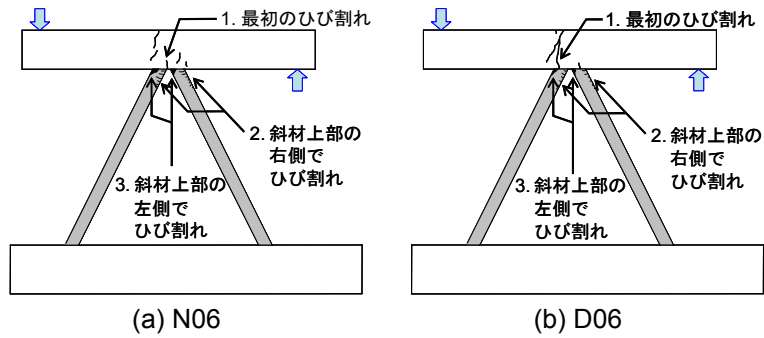
(3) 本格点構造の水平加力に対する抵抗性

N03 と D03 の実験では、格点部のコンクリートフランジに一切ひび割れが発生せずに圧縮斜材の圧壊によって耐力が決まったことから、本研究で提案した単純化した本格点構造は、水平加力に対して十分な抵抗性を有していると言える。N03, D03 供試体共に、実験終了後に格点部のコンクリートをはつり出して内部の UFC の状態を確認したが、損傷は全く見られなかった。

また、ずれ止め筋の有無による差は水平加力試験の結果には見られず、この場合、ずれ止め筋の有効性は認められなかった。これより、UFC のみで UFC トラスと上フランジが充分に一体化していたものと考えられる。また、今回格点部に適用したような標準的なせん断補強筋比（ $= 0.32\%$ ）でも問題はないものと考えられる。



図－6 逆対称曲げ試験の荷重－鉛直変位関係



図－7 逆対称曲げ試験のひび割れ図

3.2 逆対称曲げ試験

図－6 に逆対称曲げ試験をした N06 と D06 供試体の荷重－鉛直変位関係を、図－7 にそれぞれのひび割れ図を示す。鉛直変位は、載荷点位置のものであり、鉛直上方を正としている。つまり、図－6 において上フランジの左側の載荷点の変位を負、反対側を正としている。表－7 には逆対称曲げ試験での各荷重を示す。

(1) ずれ止め筋無し (N06)

N06 では、荷重が 6 kN に達した時に、格点部のコンクリートフランジの下縁にひび割れが発生した。その後、荷重が 10 kN となった時に、図－7(a)中の左右両側の斜材の上部の右側に曲げひび割れが発生した。最終的には荷重が 14 kN となった時に図－7(a)中の左右両側の斜材の上部の左側が曲げによって圧壊した。

格点部のコンクリートフランジのひび割れは最初のひび割れ以外にもいくつか発生したが、いずれもひび割れ幅は増大しなかった。最大荷重時の上フランジ内の軸方向鉄筋の引張ひずみは、上側が約 400×10^{-6} 、下側が約 900×10^{-6} にとどまった。最大荷重時のスターラップのひずみは最大で 500×10^{-6} であった。

(2) ずれ止め筋有り (D06)

D06 では N06 と同様に、荷重が 7 kN に達した時に、格点部のコンクリートの下縁にひび割れが発生した。その後荷重が 9 kN の時に、図－7(b)中の左右両側の斜材の上部の右側に曲げひび割れが発生し、最終的には荷重が 12 kN となった時に図－7(b)中の左右両側の斜材の上部の左側

表－7 逆対称曲げ試験の結果 [kN]

供試体	ひび割れ発生荷重(フランジ)	ひび割れ発生荷重(トラス)	最大荷重
N06	6	10	14
D06	7	9	12

が曲げによって圧壊した。

上フランジ内の軸方向鉄筋の引張ひずみは上側が約 400×10^{-6} 、下側が約 850×10^{-6} であった。スターラップのひずみは最大で 300×10^{-6} であった。

(3) 本格点構造の逆対称曲げモーメントに対する抵抗性

N06 と D06 供試体の実験では、格点部のコンクリートフランジに若干の損傷が見られたが、両方の斜材の曲げ破壊によって耐力が決まったことから、単純化した格点構造は曲げモーメントに対して十分に抵抗できるものと考えられる。また、N06 と D06 の実験結果にほとんど差は見られず、逆対称曲げ試験からもずれ止め筋の有効性は認められなかった。

格点部のコンクリートのひび割れは全てがほぼ鉛直方向であり、格点部周辺のスターラップのひずみも保証されている降伏値(約 1700×10^{-6})の半分以下であった。このことから、せん断補強筋比を逆対称曲げ試験で用いた 0.63%から減少させても問題はないものと考えられる。

4. 非線形有限要素解析

実験を行った 4 体に対して 2 次元の非線形有限要素解析を行い、その結果と実験結果を比較

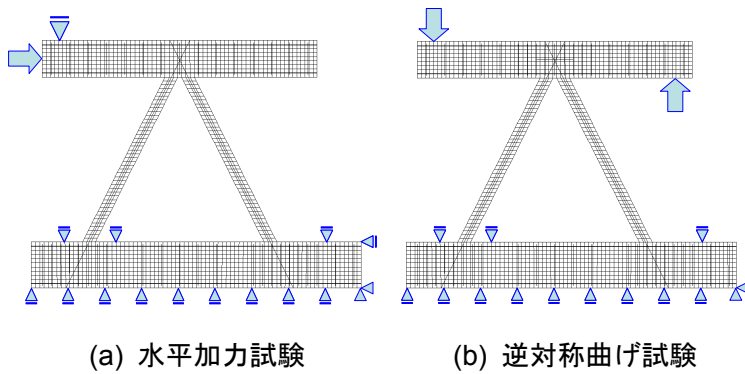


図-8 メッシュ分割図

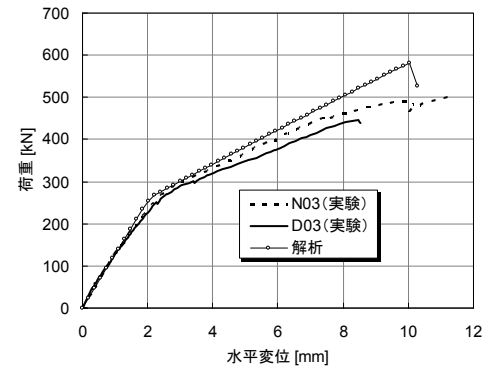


図-9 水平加力試験の荷重－水平変位関係

することで、提案した格点構造の性能を議論する。図-8に要素分割図を示す。解析はDIANA8.1を用いて実行した。材料強度に関しては、水平加力試験ではN03とD03供試体の平均値を用い、逆対称曲げ試験ではN06とD06供試体の平均値を用いた。UFCトラスとコンクリートフランジは完全に一体化していると仮定した。

図-9に水平加力試験の解析から得られた荷重－水平変位関係を、実験結果と併せて示す。図-10に逆対称曲げ試験の結果を同様に示す。これらの図から分かるように、解析結果は実験結果とほぼ同じ挙動を示した。解析では接合部を剛結と仮定しているが、今回のような静的単調载荷の条件下では、提案した格点構造が剛結に近い接合状態であるということが示された。

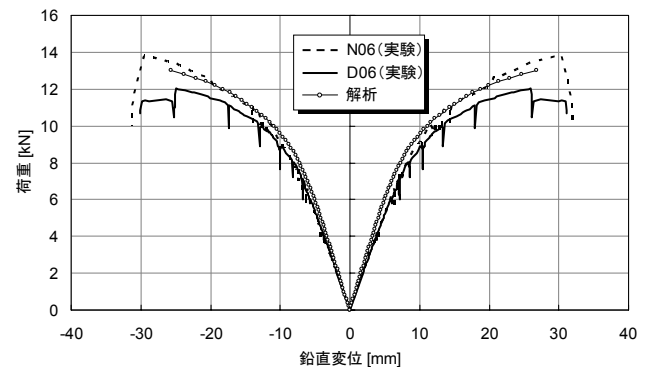


図-10 逆対称曲げ試験の荷重－鉛直変位関係

補強筋比を0.63%から減少させてもよいことが示された。

- (4) 2次元の非線形解析の結果と実験結果は同等であり、提案した格点構造は剛結に近い状態であることが示された。

5. 結論

本研究では、プレストレスを導入したUFCトラスを用いた複合PC構造の単純化格点構造を提案し、せん断力と曲げモーメントに対する力学性能を確認した。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 複合PC桁の一部をモデル化した要素試験体の水平加力試験と逆対称曲げ試験の結果、提案した格点構造はこれらの外力に十分に抵抗できることが認められた。
- (2) 提案した格点構造では、格点部のずれ止め筋の有無は耐荷性能にほとんど影響を与えないことがわかった。
- (3) 提案した格点構造では、格点部周りのせん断

参考文献

- 1) プレストレストコンクリート技術協会：複合橋設計施工規準，技報堂出版，2005
- 2) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案），コンクリートライブラリー，第113号，2004
- 3) 村田裕志ほか：UFCトラスをウェブ部に用いた新形式複合PC構造の提案，土木学会論文集，No.795/V-68，pp.145-155，2005.8
- 4) 村田裕志ほか：プレストレスを導入したUFCトラスを用いた複合PC桁の格点構造，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.2，pp.1285-1290，2006.7.
- 5) 南 浩郎ほか：那智勝浦道路木ノ川高架橋の施工－鋼管トラスウェブPC橋－，橋梁と基礎，Vol.38，No.1，pp.13-19，2004.1.