

論文 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

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

要旨：プレストレスを導入した超高強度繊維補強コンクリート（UFC）をトラス部材として斜材に適用する複合トラス橋を想定した。その際、鋼材を用いた複合トラス橋と同様に格点構造が重要になる。そこで、UFC で作製した格点に多方向からプレストレスを与える格点構造を提案し、引張斜材のみにプレストレスを導入したケースと、引張斜材と圧縮斜材の両方にプレストレスを導入したケースの2体について、複合 PC 桁を作製して載荷実験を行った。その結果いずれも十分な格点構造の性能を示したが、圧縮斜材にプレストレスを導入することで格点構造の一体性に若干の改善が認められた。

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

1. はじめに

近年、主桁の重量低減を目的として鋼トラスをウェブに用いた複合トラス橋の施工例が増え、設計施工基準が整備されてきた¹⁾。しかし、鋼トラスは耐久性の観点から不利となるため、著者らは耐久性に優れた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）をトラス部材として使用し、場所打ちの PC 構造と組み合わせた複合 PC 橋梁を検討してきた^{3),4)}。UFC は高い圧縮強度に加え、鋼繊維補強による優れた変形能力を示し、プレストレスを導入してウェブ部材として適用することで、ウェブの断面積を減少でき、PC 橋梁の軽量化が可能となる。さらに、プレキャスト製品である UFC を場所打ちの PC 構造と組み合わせることで、施工の省力化や建設コストの低減も可能となる。

UFC をトラス部材として適用する場合、既存の鋼材を用いた複合トラス橋と同様に格点構造が重要となる。本研究では格点を UFC で製作し、引張斜材と圧縮斜材にプレストレスを導入するとともに、格点を交差させてプレストレスを与

える新たな格点構造を提案する。この格点構造の性能を把握するため、プレストレスを導入した UFC トラス部材をウェブに適用した複合 PC 桁を作製し、載荷実験を行った。供試体は引張斜材にプレストレスを導入したケースと引張斜材ならびに圧縮斜材にプレストレスを導入したケースの2体とし、その破壊性状を比較した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

複合 PC 桁はそのウェブを UFC トラス部材で、フランジを含むフレームを普通コンクリートで作製した。

(1) UFC

UFC の示方配合を表-1 に示す。UFC は、目標圧縮強度を 200N/mm^2 とした。プレミックス粉体は、セメント、シリカフューム、珪石微粉末などから構成され、最密充填理論に基づき、あ

表-1 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	2254	157	28

*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 荣誉研究員 Ph.D. (正会員)

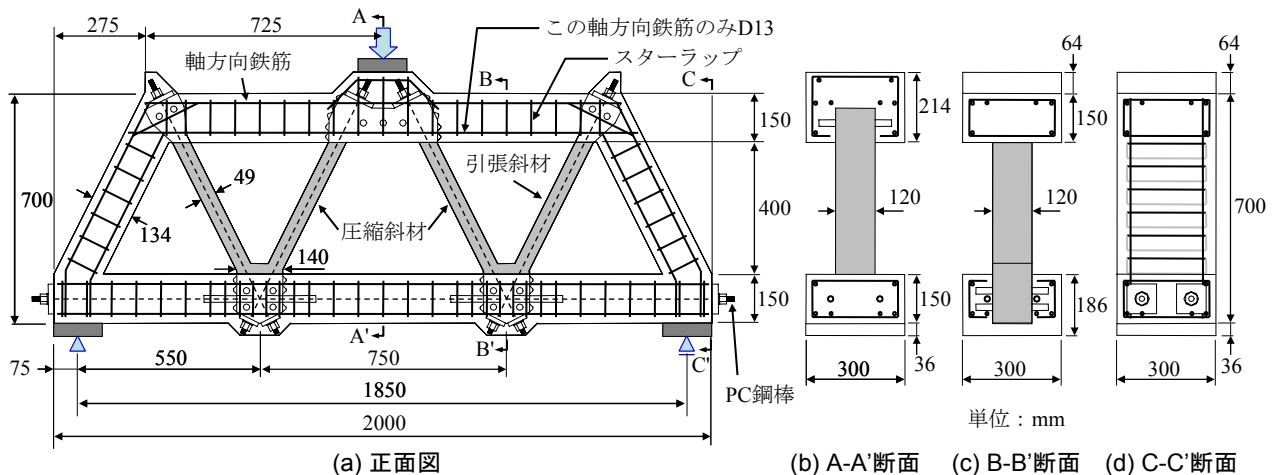
*4 太平洋セメント(株) 中央研究所ダクトル技術開発チーム 修(工) (正会員)

表－2 コンクリートの使用材料

材料	種類	物性もしくは成分
セメント	早強セメント	密度 3.14g/cm ³ ，比表面積 4490cm ² /g
細骨材	小櫃産陸砂	表乾密度 2.60kg/ℓ，吸水率 1.57%，粗粒率 2.63
粗骨材	青梅産碎石	表乾密度 2.64kg/ℓ，吸水率 0.63%，最大寸法 15mm，粗粒率 6.56
混和剤	高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸系，密度 1.10g/cm ³
	消泡剤	ポリアルキレングリコール系，密度 1.00g/cm ³

表－3 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	高性能AE 減水剤	消泡剤
15	30.0	4.5	51.2	165	550	831	792	5.78	5.50



図－1 供試体概要（引張斜材と圧縮斜材にプレストレスを導入するケース(CPC)）

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) コンクリート

コンクリートに使用した材料を表－2 に，示方配合を表－3 に示す。コンクリートは目標圧縮強

度を 60N/mm² とし，流動性はスランプ値 22±2.5cm で管理した。

2.2 供試体概要

(1) 複合 PC 桁

図－1 に複合 PC 桁供試体の概要を示す。供試体は，UFC トラスの引張斜材のみにプレストレスを導入するケース（以下，N-CPC と称す），ならびに引張斜材と圧縮斜材の両方にプレストレスを導入するケース（以下，CPC と称す）の 2 体であり，図－1 では CPC を示す。N-CPC は，UFC トラスの圧縮斜材に PC 鋼棒ならびに定着具が配置されていないこと以外は全て CPC と同じである。複合 PC 桁の全長は 2000mm，下フランジ下縁から上フランジ上縁までは 700mm であ

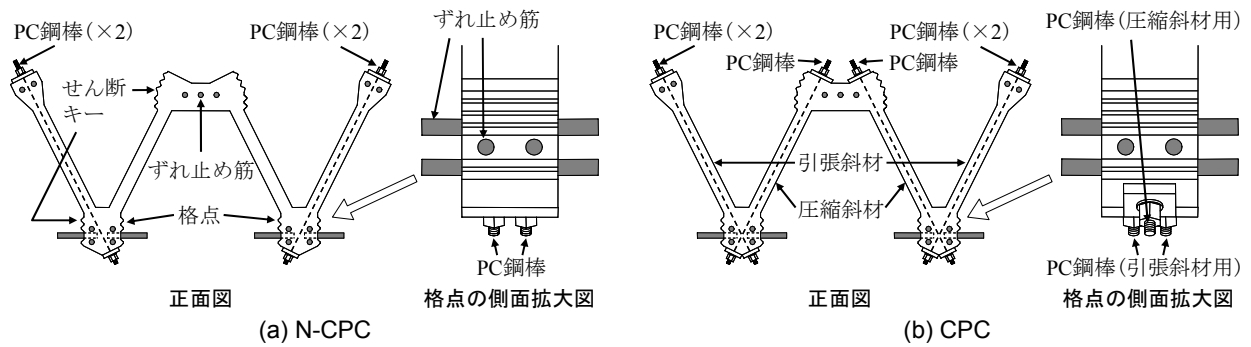


図-2 UFC トラスの概要

る。フランジ幅は 300mm，フランジ厚は 150mm となっており，UFC トラスは圧縮斜材，引張斜材の両方とも $49 \times 120\text{mm}$ の断面となっている。各部材の断面は，下フランジに最初にひび割れが発生し，その後 UFC トラスの引張斜材にひび割れが発生するように決定した。また，格点，載荷点および上フランジの端部にコンクリートの突起を設け，UFC トラスの PC 定着部はコンクリート中に埋め込んだ。

(2) UFC トラス

供試体の作製にあたっては，まず格点を含む UFC トラスを作製してプレストレスを導入した。

図-2 に UFC トラスの概要を示す。UFC トラスは格点も含めた W 字型とし，複合 PC 桁中では，中央の 2 本が圧縮斜材，外側の 2 本が引張斜材として働くようにした。

格点には，フランジとのずれを防ぐ目的で複合 PC 桁の軸方向とその直交方向にそれぞれ D19 SD345 のずれ止め筋を配置した。さらに UFC 自体にもせん断キーを設けた。また，複合 PC 桁の載荷点直下にあたる部分にもずれ止め筋とせん断キーを設けた。引張斜材の上端部には，引張斜材のフランジからの拔出しを防ぐためにずれ止め筋を設けた。なお，ずれ止め筋以外は UFC トラスには一切鉄筋補強を行っていない。

N-CPC では，引張斜材内に配置する PC 鋼棒を格点まで貫通させ，引張斜材に 30N/mm^2 のプレストレス量を発生させることを目標に， $\phi 13$ SBPR1080/1230 の PC 鋼棒を 2 本配置し，それぞれに 85kN ずつプレストレス力を導入した。CPC では，さらに圧縮斜材内に $\phi 13$ SBPR1080/1230

表-4 使用した鋼材一覧

鋼材名	材料特性
ずれ止め筋	D19 SD345, $f_y=376\text{N/mm}^2$, $E_s=200\text{kN/mm}^2$
軸方向鉄筋	D10 SD345, $f_y=371\text{N/mm}^2$, $E_s=200\text{kN/mm}^2$
	D13 SD345, $f_y=375\text{N/mm}^2$, $E_s=200\text{kN/mm}^2$
スターラップ	D10 SD345, $f_y=371\text{N/mm}^2$, $E_s=200\text{kN/mm}^2$
PC 鋼棒 (フランジ)	$\phi 17$ SBPR1080/1230, $f_y=1241\text{N/mm}^2$, $E_s=201\text{kN/mm}^2$
PC 鋼棒 (UFC トラス)	$\phi 13$ SBPR1080/1230, $f_y=1228\text{N/mm}^2$, $E_s=201\text{kN/mm}^2$

※ f_y は降伏強度， E_s はヤング係数を表す。

の PC 鋼棒を 1 本配置して格点まで貫通させ，格点内で引張斜材用の PC 鋼棒 2 本が圧縮斜材用の PC 鋼棒を挟むように交差させた。そして N-CPC と同様に引張斜材にプレストレスを導入することに加え，圧縮斜材に 15N/mm^2 のプレストレス量を発生させることを目標として，PC 鋼棒に 85kN のプレストレス力を導入した。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。

(3) フランジコンクリート

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。使用した全ての鉄筋ならびに PC 鋼棒の材料特性を表-4 に示す。打込み後は室内で 1 週間の湿潤養生を行った。

(4) 下フランジへのプレストレス導入

養生後は N-CPC，CPC のいずれも下フランジ内に $\phi 17$ SBPR1080/1230 の PC 鋼棒を 2 本配置

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]
N-CPC	224	9.51	56.1	69.5	4.13	32.0
CPC	236	8.96	55.2	71.4	3.99	32.0

し、5N/mm²のプレストレス量を発生させることを目標として、荷重直前にポストテンション方式でそれぞれ 136kN のプレストレスを導入した。なお、グラウトは充填していない。

(5) 強度試験

UFC では、圧縮強度試験用およびヤング係数の算出用に $\phi 5 \times 10\text{cm}$ の管理供試体を、割裂引張試験用に $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の管理供試体を各ケースにつき 3 体ずつ作製した。

コンクリートでは、圧縮強度試験用およびヤング係数の算出用に $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の管理供試体を、割裂引張試験用に $\phi 15 \times 20\text{cm}$ の管理供試体を各ケースにつき 3 体ずつ作製した。

圧縮強度試験は JIS A 1108 に、割裂引張強度試験は JIS A 1113 に、ヤング係数の算出は JIS A 1149 に準じて行った。

(6) 載荷

載荷は 2000kN 耐圧機を用いて、1 点静的単調載荷とした。支点には、ローラー支承を用い、支点部で供試体が拘束されるのを防ぐため、供試体と支圧板の間に、2 枚のテフロンシート間にグリスを挟んだ減摩パッドを挿入した。

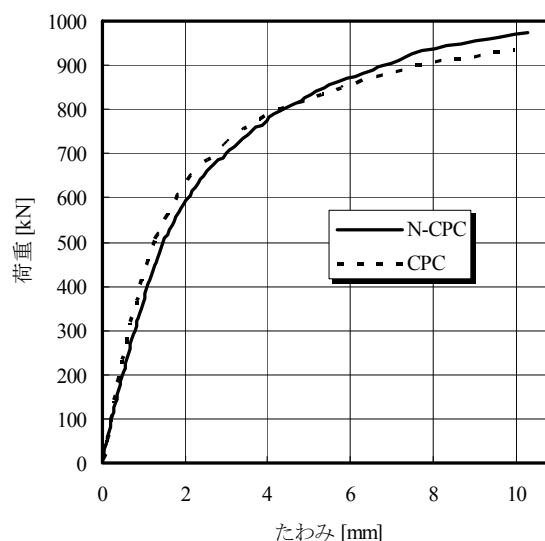
3. 実験結果

3.1 材料試験

表－5 にコンクリートならびに UFC の材料試験結果を示す。コンクリートと UFC はともに目標圧縮強度を満足した。

3.2 荷重－たわみ曲線

図－3 に実験から得られた荷重－たわみ曲線を示す。なお、たわみは下フランジの-span 中央部の変位から支点変位を差し引いたものである。



図－3 荷重－たわみ曲線

(1) N-CPC

N-CPC では、荷重が 420kN の時に下フランジに最初の曲げひび割れが発生した後、荷重が 700kN の時に下フランジ内の軸方向鉄筋が降伏した。最終的には引張斜材の上部のひび割れが大きく開口し、引張斜材内の PC 鋼棒のひずみが降伏ひずみに達した段階で載荷を終了した。

(2) CPC

CPC では、N-CPC と比較してやや初期剛性が高く、耐力はやや低下したが、荷重－たわみ曲線は N-CPC と同様の傾向となった。最初の曲げひび割れは、荷重が 480kN の時に下フランジに発生した。その後荷重が 690kN の時に下フランジ内の軸方向鉄筋が降伏した。最終的には引張斜材の下部のひび割れが大きく開口し、引張斜材内の PC 鋼棒のひずみが降伏ひずみに達した段階で載荷を終了した。このように、荷重－たわみ曲線からは圧縮斜材にプレストレスを導入した影響はほとんど認められなかった。

3.3 ひび割れ性状

図-4 に載荷終了後のひび割れ性状を示す。

(1) N-CPC

N-CPC では、荷重が 420kN の時に格点付近の下フランジの隅角部に、最初の曲げひび割れが発生した（図-4(a)中の 1）。その後格点間の下フランジに複数の曲げひび割れが発生し、荷重が 520kN の時に上フランジの圧縮斜材との接合部付近で曲げひび割れが発生した（図-4(a)中の 2）。UFC トラスには、荷重が 650kN の時に引張斜材の格点側で、ひび割れが生じ、それとほぼ同時に下フランジ端部の隅角部にひび割れが生じた（図-4(a)中の 3）。720kN で格点部の周囲の下フランジでひび割れが発生した（図-4(a)中の 4）。最終的に、荷重が 750kN で UFC トラスの引張斜材の上部にひび割れが生じ（図-4(a)中の 5）、このひび割れが大きく開口した。

(2) CPC

CPC では、N-CPC と同様に荷重が 480kN の時に格点付近の下フランジの隅角部に曲げひび割れが発生した（図-4(b)中の 1）。その後格点間の下フランジに複数の曲げひび割れが発生し、荷重が 500kN の時に、上フランジの圧縮斜材との接合部付近で曲げひび割れが発生した（図-4(b)中の 2）。UFC トラスには、荷重が 670kN の時に引張斜材の格点側でひび割れが生じ、それとほぼ同時に下フランジ端部の隅角部にひび割れが生じた（図-4(b)中の 3）。N-CPC とは異なり、下フランジの格点部ならびに引張斜材の上部ではひび割れは生じず、最終的に引張斜材の下部に発生したひび割れが大きく開口した。このように、N-CPC、CPC のいずれのケースでも UFC の格点には損傷が認められず、提案した格点構造はトラス構造の格点としてせん断力に十分に抵抗できることが分かった。

4. 比較および考察

4.1 荷重－たわみ曲線

図-3 の荷重－たわみ曲線では、CPC は N-CPC と比較してやや初期剛性が高くなった。しかし

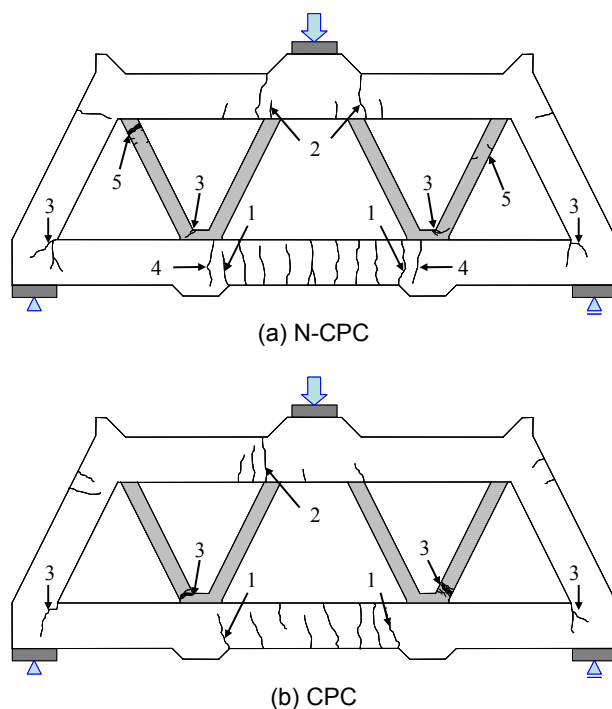


図-4 載荷終了後のひび割れ性状

理論上は、プレストレスの導入によっても、圧縮斜材の剛性は向上しないことから、このことを説明するのは困難である。この初期剛性の相違は、圧縮斜材にプレストレスを導入することによって、格点のずれ止め筋がより強く拘束を受け、コンクリートとの一体性が増したためではないかと考えられるが、さらに検討することが必要である。

なお、たわみで約 5mm を境に N-CPC の方が CPC よりも剛性が増加した。これは CPC において、UFC トラスの引張斜材にひび割れが生じた後の剛性の低下が大きかったためではないかと考えられる。CPC では引張斜材のひび割れが下部に集中しており、急激にエネルギーが解放されたことが予想される。

4.2 ひび割れ性状

図-4 のひび割れ性状において、N-CPC と CPC の違いは、格点部の周囲の下フランジのコンクリートにひび割れが発生したこと、UFC トラスの引張斜材のひび割れが 1 点に集中したことの 2 点である。N-CPC では、圧縮斜材にプレストレスを導入しなかったことにより、ずれ止め筋の効果が小さくなるため、ずれ止め筋が下フラン

ジを支点側へ押し出すことによってひび割れが生じたのではないと思われる。

その結果、フランジによる UFC の格点への拘束が弱まり、UFC トラスとフランジがピン構造に近くなることで、引張斜材下部の応力集中が弱まり、引張斜材上部にもひび割れが発生したものと考えられる。UFC の格点とフランジをより剛に一体化するためには圧縮斜材へのプレストレスの導入が有効であると考えられる。

4.3 プレストレスのシミュレーション

N-CPC と CPC の両方について、プレストレスを導入した直後の格点の応力状態を調べるため、3次元弾性有限要素解析を行った。その際の引張主応力のコンター図を図-5に示す。なお、図中ではアンカープレートは省略して表示している。これより、N-CPC では格点部で広範囲に 3N/mm^2 以上の引張応力が発生していることが確認できる。しかし、CPC では引張応力が大幅に軽減されていることから、圧縮斜材にもプレストレスを導入することで引張主応力の発生を抑えられることを確認できた。

実験では UFC トラスの格点に収縮ひび割れは観察されなかったが、UFC は蒸気養生によって 450×10^{-6} 程度の収縮ひずみが生じる⁵⁾。今回の格点のようにずれ止め筋を配置した場合、さらに拘束応力が生じることが考えられるため、圧縮斜材にプレストレスを導入しない場合は注意を要する。

5. 結論

本研究では、プレストレスを導入した UFC トラスの格点構造を提案し、複合 PC 桁内としての力学性能を確認した。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) UFC トラスの引張斜材のみにプレストレスを導入した格点を持つ複合 PC 桁と、引張斜材と圧縮斜材の両方にプレストレスを導入した格点を持つ複合 PC 桁の荷重-たわみ曲線には大きな変化はなく、どちらの格点もせん断力に対して十分に抵抗できることが確

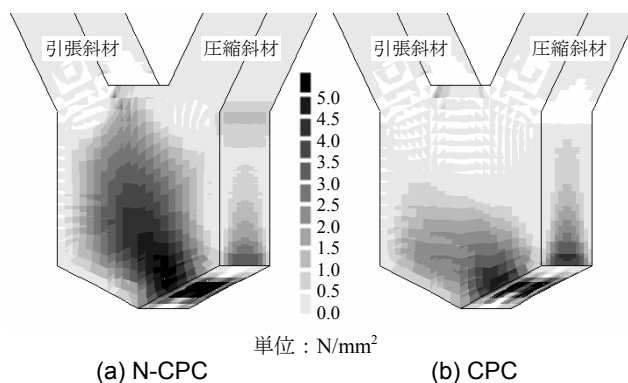


図-5 プレストレスによる引張主応力のコンター図

認できた。

- (2) 圧縮斜材にプレストレスを導入することで複合 PC 桁の剛性がやや上昇した。これはずれ止め筋の性能が上昇することで、UFC の格点とフランジがより一体化したためと考えられる。
- (3) 引張斜材のみにプレストレスを導入する場合は、格点部に大きな引張主応力が広範囲に発生するため、ずれ止め筋を配置する格点では拘束応力との和によってひび割れが生じないように注意を要する。

参考文献

- 1) プレストレストコンクリート技術協会：複合橋設計施工基準，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，千明英祐，二羽淳一郎，片桐 誠：様々な形状の UFC ウェブを有する複合 PC はりの数値解析的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.2，pp.1261-1266，2005.6
- 4) 村田裕志，二羽淳一郎，Chunyakom SIVALEEPUNTH，川口哲生，兵頭彦次：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
- 5) 佐藤正己，前堀伸平，片桐 誠，田中敏嗣：RPC の収縮およびクリープ特性に関する実験的検討，第 59 回土木学会年次学術講演会講演概要集，V-291，pp.679-680，2004.9