

## 論文 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

村田 裕志<sup>\*1</sup>・千明 英祐<sup>\*2</sup>・二羽 淳一郎<sup>\*3</sup>・片桐 誠<sup>\*4</sup>

**要旨**：近年，橋梁のウェブ部分にコンクリートとは異なる部材を用いる複合 PC 構造の普及が進んでいる。複合 PC 構造のウェブ部分に，近年実用化が進められている超高強度繊維補強コンクリートを適用することで，様々なウェブ形状を持つ新しい構造形式の橋梁を実現できる。本研究では，ウェブ形状を三角パネル，四角パネルおよびハウトラスとした 3 体の複合 PC はりの実験を対象に，非線形 FEM 解析を実施して実験の挙動の再現を確認し，非線形 FEM 解析が設計ツールとして有用であることを示した。

**キーワード**：超高強度繊維補強コンクリート，複合 PC 構造，非線形 FEM 解析

## 1. はじめに

橋梁構造の軽量化が求められている中で，我が国においても，波形鋼板ウェブ複合 PC 橋梁や，鋼トラスウェブ複合 PC 橋梁といった，複合 PC 構造の橋梁の普及が進んでいる<sup>1)</sup>。著者らは，近年実用化が進められている超高強度繊維補強コンクリート<sup>2)</sup> (Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete : 以下 UFC と称す) を，ウェブ部材として適用することを検討してきた<sup>3)</sup>。UFC は，高い圧縮強度や鋼繊維補強による優れた靱性に加えて，高い流動性を有するため，様々な形に成型できる。これをウェブ部材として適用することで，コンクリート構造物として新たな構造形式を提案できる。

そこで，この複合 PC 構造形式の有効性を明らかとするため，UFC のウェブ部材の形状を三角形パネル，四角形パネルおよびハウトラス形式として適用した複合 PC はり (以降それぞれ TR, QU, HT と称す) を作製し，載荷実験を行った。

本論文は，実験の複合 PC はりを対象として，2次元の非線形 FEM 解析を実施して力学的挙動をシミュレートし，同時に FEM が本構造の設計ツールとして有用か否かを確認するものである。

## 2. 実験概要および実験結果

解析対象は，接合部を有する複合 PC はりであり，ウェブ部材には UFC で製作したプレキャスト部材を用いている。図-1 に複合 PC はりの概要図を示す。ウェブ厚さは 40mm であり，ウェブ部材には鉄筋による補強を一切行っていない。

せん断スパンは 1500mm，有効高さは 350mm，せん断スパン有効高さ比  $a/d=4.29$  とした。また，ウェブ部材とフランジ部の接合のため，ずれ止め筋として貫通鉄筋 (D19 SD295A : 降伏強度  $f_y=342\text{MPa}$ ) を各ウェブ部材を貫通するように配置し，接合鉄筋 (D13 SD295A :  $f_y=345\text{MPa}$ ) と接続した (図-2)。また，各ウェブ部材の上下端面およびウェブ部材同士の接合部にせん断キーを設け，コンクリートの打込みの前に，ウェブ部材同士をエポキシ系接着剤で接合した。

主鉄筋として，下フランジ部には 2 本の PC 鋼棒 ( $\phi 13$  SBPR1080/1230 :  $f_t=1249\text{MPa}$ ) を配置した。また，せん断補強とウェブ部材の突抜け防止のため，スターラップ (D10 SD295A :  $f_t=349\text{MPa}$ ) を 75mm 間隔で配置した。ここで，軸方向鉄筋比は 1.86%，せん断補強筋比は 0.63% である。

\*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 工学部土木工学科 (非会員)

\*3 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)

\*4 太平洋セメント(株) 中央研究所研究開発部 工博 (正会員)

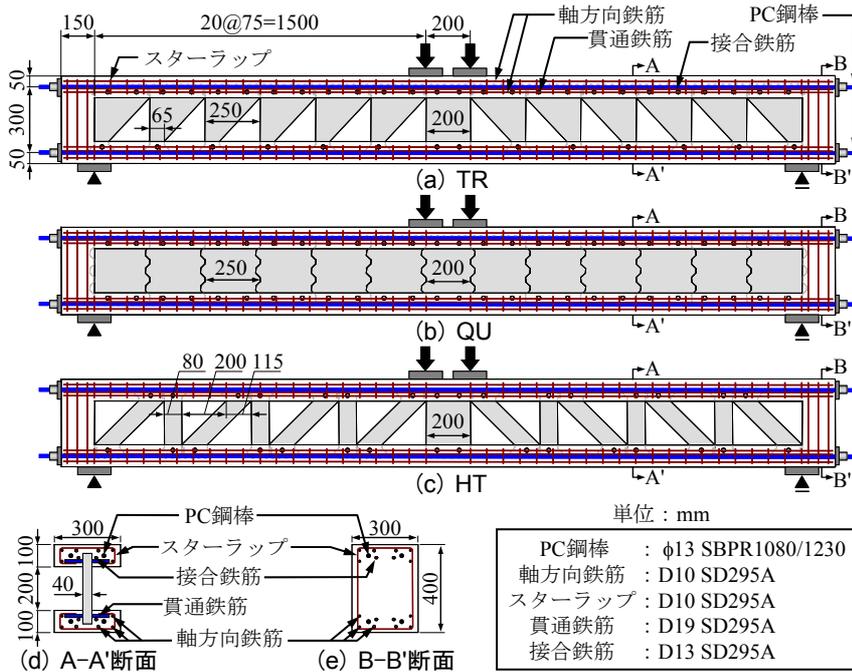


図-1 実験供試体概要

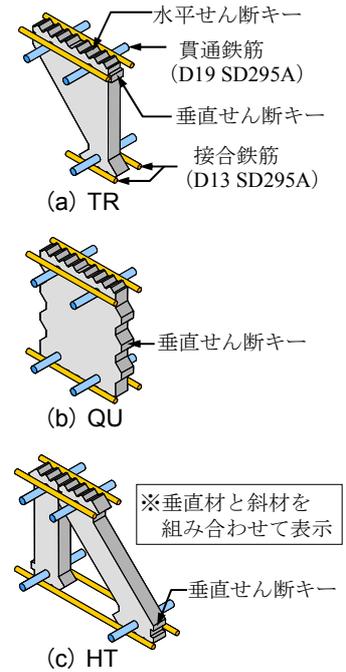


図-2 接合方法

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 <sup>3</sup> ]					
				水	セメント	細骨材	粗骨材	高性能AE 減水剤	消泡剤
15	30.0	3.0	53.2	170	567	857	766	7.93	5.67

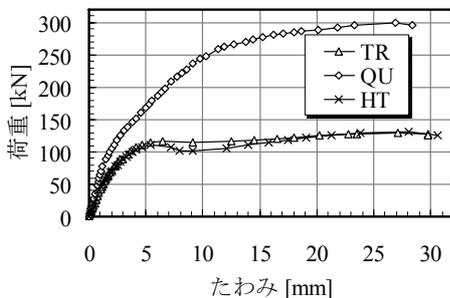


図-3 実験の荷重-たわみ曲線

表-2 各部材の材料特性

試験体名	フランジ部 (コンクリート)			ウェブ部 (UFC)		
	圧縮 強度 [N/mm <sup>2</sup> ]	引張 強度 [N/mm <sup>2</sup> ]	ヤング 係数 [kN/mm <sup>2</sup> ]	圧縮 強度 [N/mm <sup>2</sup> ]	引張 強度 [N/mm <sup>2</sup> ]	ヤング 係数 [kN/mm <sup>2</sup> ]
TR	59.3	3.5	28.7	204	9.7	53
QU	74.1	3.8	31.7			
HT	82.5	4.4	34.1			

フランジ部のコンクリートは圧縮強度の目標値を  $60\text{N/mm}^2$  とし、また過密な配筋となっているため、スランプフロー  $450 \pm 50\text{mm}$  を目標として配合を決定した (表-1)。

プレストレスはポストテンション方式で導入した。下フランジ部には下縁応力度  $5\text{N/mm}^2$  を目標として、PC 鋼棒 1 本につき  $75\text{kN}$  ずつ緊張した。さらに上フランジ部にも、ウェブ部材とフランジ部との接合の強化を目的として、下フランジ部と同一の PC 鋼棒を 2 本配置し、上縁応力度  $3\text{N/mm}^2$  を目標にそれぞれ  $50\text{kN}$  ずつ緊張した。緊張後、グラウトをシース管に注入し、PC

鋼棒に付着を与えた。

載荷は 2 点静的単調載荷とし、支点到にテフロンシートでグリスを挟んだ減摩パッドを用いることで、水平方向の拘束を取り除いた。

実験から得た荷重-たわみ曲線を図-3 に、各部材の材料特性を表-2 に示す。TR ならびに HT においては、荷重が一時的に低下した後に、再び緩やかに増大した。一方 QU では、下フランジ部の PC 鋼棒が降伏するまで、荷重の低下は見られなかった。また TR では、ウェブ部材である UFC のパネルが、片側せん断スパンで大きく損傷し、破壊の非対称性が確認された。

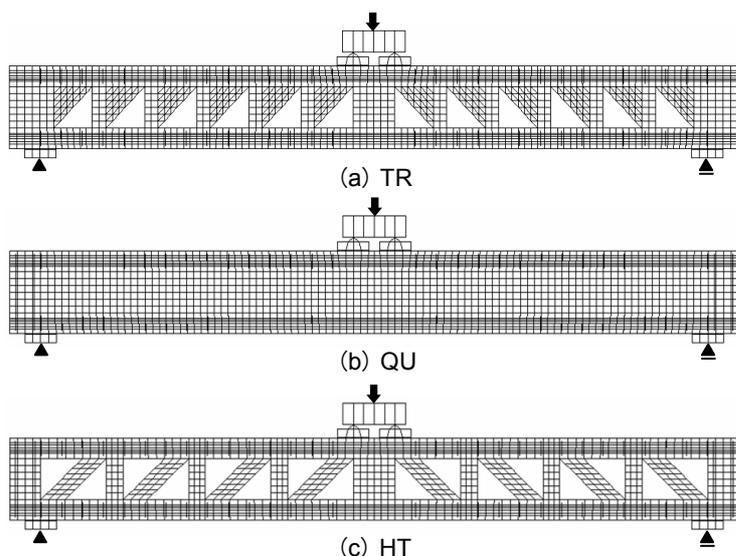
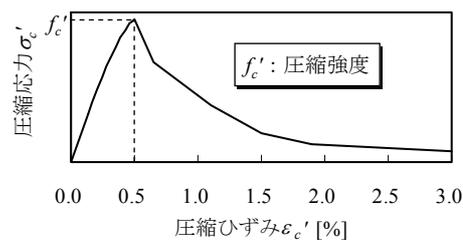
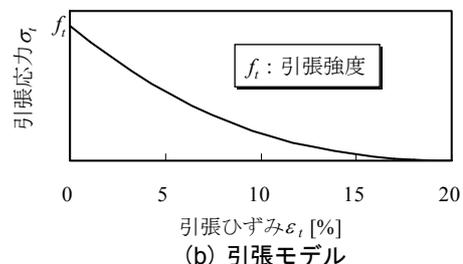


図-4 要素分割図



(a) 圧縮モデル



(b) 引張モデル

図-5 UFCの構成則

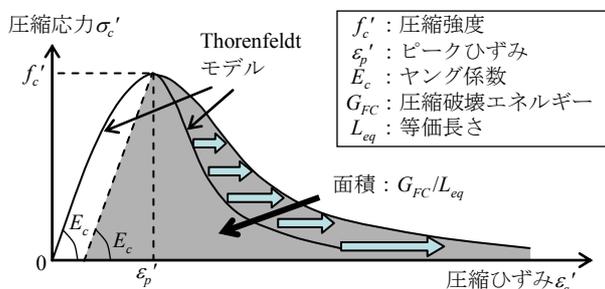


図-6 コンクリートの圧縮モデル

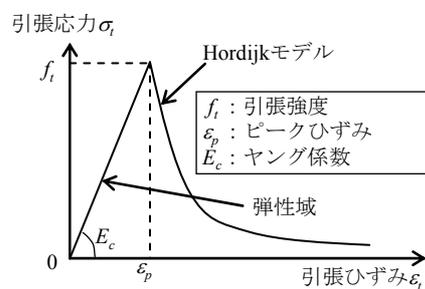


図-7 コンクリートの引張モデル

### 3. 解析概要

#### 3.1 解析モデル

解析コード DIANA 8.1 を用いて、2次元の非線形 FEM 解析を行った。なお、実験での破壊の非対称性を考慮して、図-4のように要素分割して供試体全体を解析した。コンクリートと UFC には、4 節点および 3 節点のアイソパラメトリック平面応力要素を用い、鉄筋には埋込み鉄筋要素を用いた。また、全供試体のウェブ部とフランジ部の間、および QU のウェブ部材同士間は完全に一体化しているとした。載荷板および支圧板によるコンクリートの拘束を避けるため、載荷板および支圧板と、コンクリートとの間に厚さ 1mm の界面要素を挿入して水平方向の滑りを許容した。

解析において載荷は変位制御とし、求解法として割線法を用いた。収束計算については、繰返し計算におけるひずみエネルギーの変化量がそのステップの 1 回目の計算時のものと比べて 0.01% 以下となった際に収束と判定した。

### 3.2 構成則と材料特性

#### (1) ひび割れモデル

UFC とコンクリートのひび割れモデルには回転ひび割れモデルを用いた。ひび割れは 1 要素に 1 本発生するものと仮定し、ひび割れ幅を等価長さ  $L_{eq}$  で除すことにより、平均ひずみを算出した。なお、 $L_{eq}$  は四角形要素については各要素の面積の平方根の平均 (=33mm)、三角形要素については各要素の面積の 2 倍の平方根の平均 (=33mm) とした。

#### (2) UFC

図-5に、解析に用いた UFC の応力-ひずみモデルを示す。圧縮モデルは、圧縮試験から得られた応力-ひずみ関係<sup>4)</sup>を多直線近似した。引張モデルは、引張強度までは弾性体とし、ポストピークは切欠きはりの 3 点曲げ試験から得られた引張軟化曲線<sup>4)</sup>のひび割れ幅を、 $L_{eq}$  で除すことでひずみに変換した。

#### (3) コンクリート

コンクリートの構成則には、図-6および図

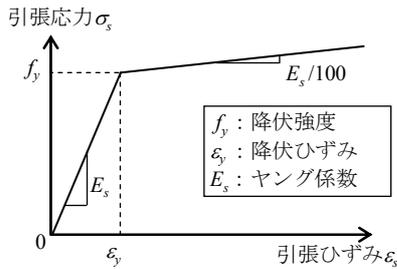


図-8 鋼材のモデル

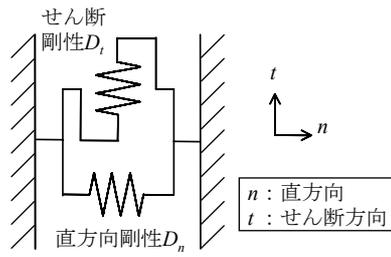


図-9 界面要素

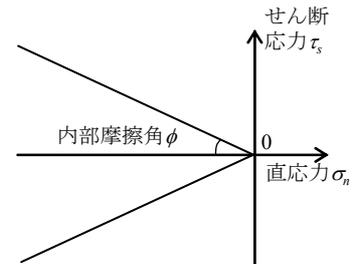


図-10 摩擦モデル

ー 7 に示すモデルを用いた。圧縮側には Thorenfeldt モデル<sup>5)</sup>に圧縮破壊エネルギー $G_{FC}$ を適用したものをを用いた。図-6 中において塗りつぶした領域の面積が、 $G_{FC}$ を等価長さ $L_{eq}$ で除したものと等しくなるように、Thorenfeldt モデルのポストピーク領域をひずみ軸方向に拡大した。ここで、 $G_{FC}$ [N/mm]は Nakamura らの検討<sup>6)</sup>から以下のように定めた。

$$G_{FC} = 8.77 \times \sqrt{f'_c} \quad (1)$$

ただし、 $f'_c$ は圧縮強度[N/mm<sup>2</sup>]である。

また、引張側には Hordijk モデル<sup>7)</sup>を用い、引張破壊エネルギー $G_F$ は、0.15N/mm とした。

#### (4) 鋼材

鉄筋と PC 鋼棒はコンクリートと完全に付着しているとした。構成則には、降伏強度 $f_y$ に達するまでヤング係数 $E_s$ (=200kN/mm<sup>2</sup>)の弾性挙動を示した後に、剛性を $0.01E_s$ として応力が増加するバイリニアモデル(図-8)を用いた。また、実験同様、PC 鋼棒には、下フランジ部では1本あたり75kN(計150kN)を、上フランジ部では1本あたり50kN(計100kN)のプレストレス力を与えた。

#### (5) 界面要素の構成則

界面要素は直方向 $n$ とせん断方向 $t$ に抵抗するばね状のモデルである(図-9)。構成則は応力-変位関係で表される。直方向は圧縮側では剛性 $D_n$ の弾性体とし、引張側は剛性を0とした。せん断方向は剛性 $D_t$ でせん断強度 $f_s$ に到達後、その応力を保つものとした。また、Coulomb の摩擦モデルを、粘着力は0、内部摩擦角 $\phi$ は試験結果から $30^\circ$ として適用した(図-10)。

#### (6) 載荷板、支圧板および分配桁

載荷板、支圧板および分配桁は弾性体とし、弾性係数を200GPaとした。

#### 3.3 諸特性

コンクリートと UFC の材料特性には、実験値を用いた。鋼材の降伏強度 $f_y$ は、PC 鋼棒を1250MPa、SD295A を340MPaとした。界面要素の直方向剛性 $D_n$ は、界面がコンクリートであると仮定し、ヤング係数を界面の厚さ(1mm)で除して30000N/mm<sup>3</sup>とし、せん断剛性 $D_t$ は、筆者らが行った検討<sup>8)</sup>から10N/mm<sup>3</sup>とした。

また、破壊形式の非対称性を解析で再現するために、過去の検討<sup>8)</sup>から、片側せん断スパンのウェブ部材(UFC)の引張強度を、実験値よりも0.5N/mm<sup>2</sup>増加させて解析した。

### 4. 解析結果と実験結果の比較

#### 4.1 TR についての比較

図-11 に解析から得られた荷重-たわみ曲線を、実験結果と併せて示す。たわみは、上フランジと下フランジの中央部の変位の平均値から支点変位を差し引いたものである。これより、解析によって概ね実験の荷重-たわみ曲線を再現できたことが確認できる。実験では、たわみが7mm程度で荷重が一時的に122kNのピークを示して低下した後、再び緩やかに上昇した。解析では、たわみが8mm程度で一時的に実験値よりも高い127kNという荷重でピークを示し、その後実験よりも荷重が急激に低下した後再度上昇した。

図-12 に実験および解析から得られたひび割れ性状を示す。解析では変形も重ねて表示しており、ひび割れ性状は、主引張ひずみの矢線図

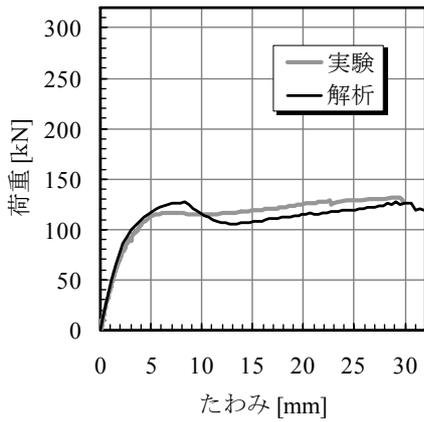


図-11 TRの荷重-たわみ曲線

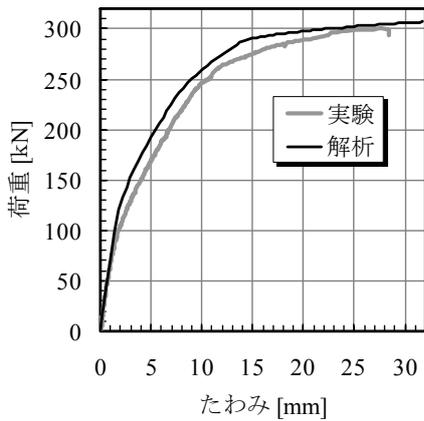


図-13 QUの荷重-たわみ曲線

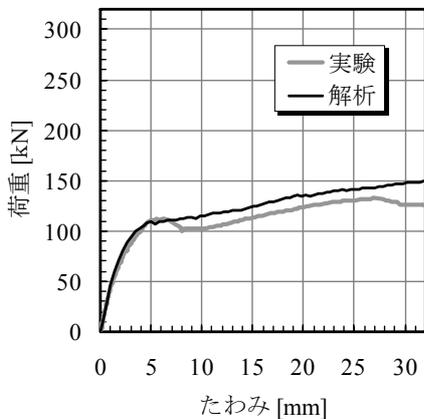


図-15 HTの荷重-たわみ曲線

を90度回転させ、その大小を濃淡で示している。実験は載荷終了時、解析はたわみが30mmに達したときのものを示している。実験では、図中の左側せん断スパン内において4枚のウェブ部材のパネルで上フランジ部との接合部付近に大きなひび割れが発生した。解析では、スパン中央の左隣のパネルで、実験と同様に上部にひび割れが発生したが、さらに左側の4枚のパネルでは下フランジ部の接合部付近でひび割れが発生し、破断した。これは、実験ではパネル下部

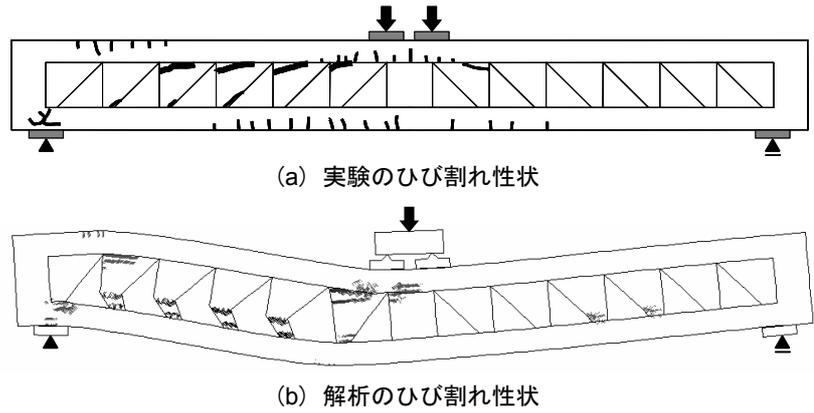


図-12 TRのひび割れ性状

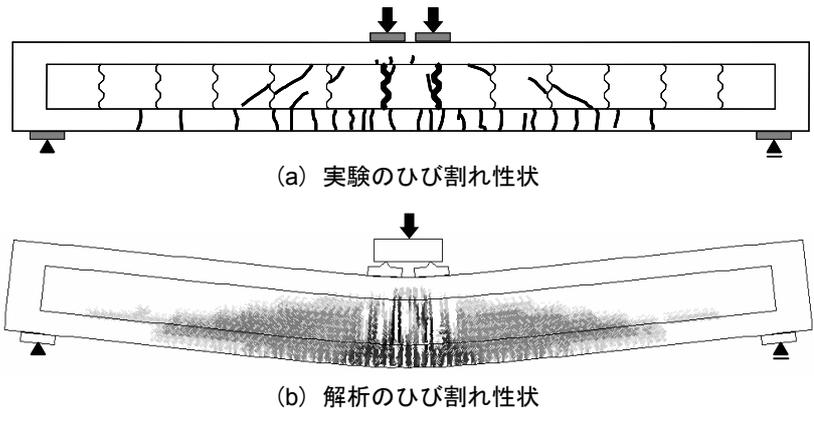


図-14 QUのひび割れ性状

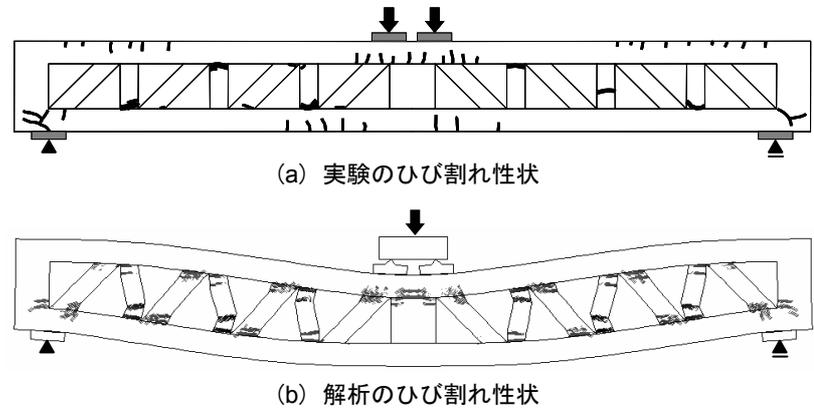


図-16 HTのひび割れ性状

に1本配置した貫通鉄筋を中心とした回転の自由度が存在するが、解析では接合を剛結としているために、実験よりもパネル下部に応力が集中しやすくなったためと考えられる。

#### 4.2 QUについての比較

図-13に実験と解析から得られた荷重-たわみ曲線を示す。PC鋼棒の降伏荷重は、実験で300kN、解析で290kNとほぼ一致しており、解析によってほぼ正確に実験の荷重-たわみ曲線を再現できた。解析では、実験よりも、ややひ

び割れ発生荷重を過大評価しているが、これは図-14に示すひび割れ性状から説明できる。

実験では、スパン中央のパネルと両隣とのパネルが開口しているのに対し、解析ではウェブ部材の中央から支点方向に向けてひび割れが分散している。これはパネル同士間の接着をモデル化していないためであると考えられるが、破壊モードにはほとんど影響を与えないことが確認できた。また、片側のせん断スパンのUFCの引張強度を強化したのにもかかわらず、実験と同様に対称的な破壊を再現できた。

#### 4.3 HT についての比較

図-15に実験と解析から得た荷重-たわみ曲線を示す。実験ではたわみが6mm程度で、荷重が111kNを示した後に一時的に低下したが、解析では、一時的な低下は起こらずに、荷重が108kNで剛性が低下した後、緩やかな荷重の上昇が続いた。しかし、その後のたわみが10mm以降の荷重-たわみ曲線は概ね再現できた。

図-16に実験および解析から得たひび割れ性状を示す。実験では、引張を受ける垂直材にひび割れが発生した後、大きく開口し、さらに急激にひび割れ面でのずれが生じることで一時的な荷重の低下が起こった。解析においては、ひび割れ面でのせん断を考えない回転ひび割れモデルを用いているため、一時的な荷重の低下を再現できなかったものと考えられる。その後は、解析における片側のせん断スパンのUFCの引張強度を強化したことに関係なく、実験、解析の両方において引張を受けるトラスが両側のせん断スパンの全てにおいて破断している。これは、トラスの1本1本に対して中央のパネルが相対的に大きく、TRのような中央パネル自体の非対称な破壊を生じなかったためと考えられる。これにより、荷重-たわみ曲線の後半での挙動の一致が得られたと推測される。

#### 5. まとめ

本研究から得られた知見を以下にまとめる。

(1) 適切な材料モデルを組み込んだ2次元非線

形FEM解析により、UFC製の三角パネル、四角パネルおよびハウトラスをウェブ部に用いた複合PCはりの荷重-たわみ曲線ならびにひび割れ性状を概ね再現し、FEMが本構造の設計ツールとして有用であることを示した。

- (2) 四角パネルを用いた供試体で、パネル同士間の接着を剛結として取り扱っても、解析における複合PCはりの力学的挙動の再現の点でさほど問題はない。
- (3) UFCの引張強度に $0.5\text{N/mm}^2$ だけ差をつけて複合PCはりの解析を実施することで、対称的に破壊が生じるモードと、片側スパンに破壊が集中するモードのいずれも再現できることを確認した。

謝辞：オリエンタル建設(株)の中島豊茂氏、高澤昌憲氏、遠藤琢磨氏には、載荷実験の際にご協力頂きました。ここに記して深謝致します。

#### 参考文献

- 1) 園田恵一郎：複合構造の発展の経緯と今後の展望、土木学会 第5回複合構造の活用に関するシンポジウム講演論文集、pp.1-8, 2003.11
- 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) Sivaleepunth, C., Murata, H., Niwa, J. and Kawaguchi, T.: Experimental Study on Composite PC Beams by Applying UFC Truss as Web Member, Proceeding of the Japan Concrete Institute, Vol.26, No.2, pp.1801-1806, July 2004
- 4) 掛井孝俊, 川口哲生, 二羽淳一郎, 兵頭彦次：超高強度鋼繊維補強セメント系複合材料の破壊力学特性、第57回セメント技術大会講演要旨、pp.230-231, 2003.5
- 5) Thorenfeldt, E., Tomaszewicz, A. and Jensen, J. J.: Mechanical properties of high-strength concrete and applications in design, Symposium Proceedings, Utilization of High-Strength Concrete, Norway, 1987
- 6) Nakamura, H. and Higai, T.: Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, Modeling of RC Structures under Seismic Loads, ASCE, pp.471-487, 2001
- 7) Hordijk, D. A.: Local Approach to Fatigue of Concrete, PhD thesis, Delft University of Technology, 1991
- 8) 村田裕志, C. Sivaleepunth, 二羽淳一郎, 片桐誠：UFCトラス部材をウェブ部に用いた複合PCはりに関する数値解析的研究、コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp.1423-1428, 2004.6