

## 論文 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

村田 裕志<sup>\*1</sup>・Chunyakom SIVALEEPUNTH<sup>\*1</sup>・二羽 淳一郎<sup>\*2</sup>・片桐 誠<sup>\*3</sup>

要旨：超高強度繊維補強セメント系複合材料は，200MPa 以上の圧縮強度を有する材料であり，さらに鋼繊維補強されていることで大変優れた変形能力を有する材料である。この材料をプレレストコンクリート（PC）はりのウェブ部材にプレキャストトラスとして利用することで，ウェブ部材の断面積を大幅に減少させ，軽量化を可能となる。本研究では，トラスの厚さが異なる 2 体の複合 PC はりの実験結果を対象に非線形 FEM 解析を行い，耐荷機構に関して数値解析的に検討し，実験の耐荷機構を再現できることを確認した。

キーワード：超高強度繊維補強セメント系複合材料，複合構造，非線形 FEM 解析

## 1. はじめに

近年，橋梁構造の長大化に伴い，構造物の一層の軽量化が求められている。PC 橋梁の軽量化には，ウェブ部材を高強度化し，断面を減少させることが有効な手段の一つであると考えられる。そこで著者らは，最近開発された超高強度繊維補強セメント系複合材料<sup>1)</sup>(Ultra High Strength Fiber Reinforced Cementitious Composites：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た。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，ウェブ部材として適用することで，ウェブ部材の断面積を減少させ，PC 橋梁の軽量化が可能となる。さらに，UFC をプレキャストのトラスとして場所打ちの 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全体を低く抑えることになる。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 製のプレキャストトラスをウェブ部材として適用した複合 PC はりを作製し，載荷実験を行った<sup>2)</sup>。

本論文は，実験を行った複合 PC はりを対象として，2次元の非線形 FEM 解析を行い，数値解析的に複合 PC はり部材の力学的挙動を確認するものである。

## 2. 実験概要および実験結果

図 - 1 に複合 PC はりの概要図を示す。解析対象は接合部を有する複合 PC はりであり，斜線部のウェブ部材に，UFC で製作したプレキャストトラスを用いている。なお，このトラスは鉄筋による補強は一切行っていない。解析では，トラス厚さ  $b_w$  が 60mm (供試体名 T60) および 40mm (供試体名 T40) の 2 種類の供試体を対象とした。

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，トラスとフランジ部の接合のため，ずれ止め筋として鉄筋 (D19 SD295A:降伏強度  $f_y=349\text{MPa}$ ) を各トラスを貫通するように配置し，接合棒鋼 (D13 SD295A:  $f_y=353\text{MPa}$ ) と接続した (図 - 2)。また，トラス上下端面およびトラス同士の間接合部となる部分にキーを設けた。また，主鉄筋として下フランジ部には PC 鋼棒 (13 SBPR1080/1230:  $f_y=1243\text{MPa}$ ) を 2 本配置し，トラスとフランジ部の接合部には 5 本のせん断補強筋 (D10 SD295A:  $f_y=349\text{MPa}$ ) を 66mm 間隔で配置した。ここで，軸方向鉄筋比は 1.86% である。また，トラスとフランジ部との接合の強化を目的として，上フランジ部にも，下フラ

\*1 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (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 太平洋セメント(株) 中央研究所第 1 研究部第 8 グループ 工博 (正会員)

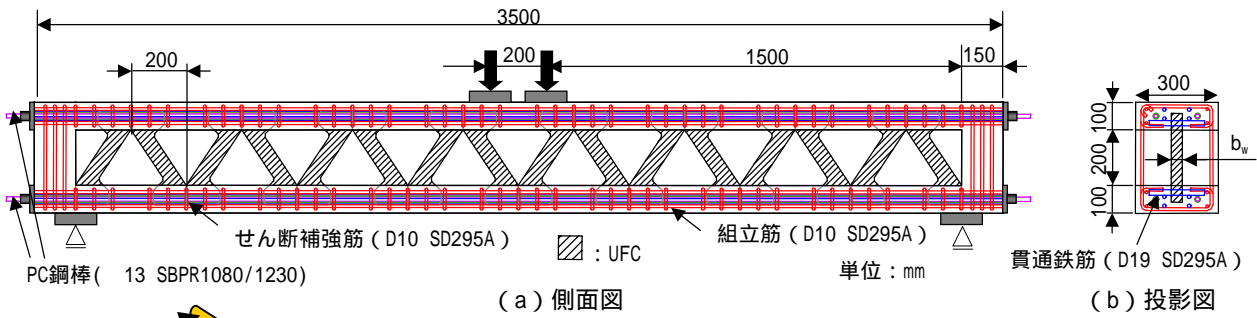


図 - 1 供試体概要図

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 W/C [%]	細骨材率 s/a [%]	単位量[kg/m <sup>3</sup> ]				
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	高性能AE減水剤 SP
15	30.0	53.3	170	567	871	765	9.1

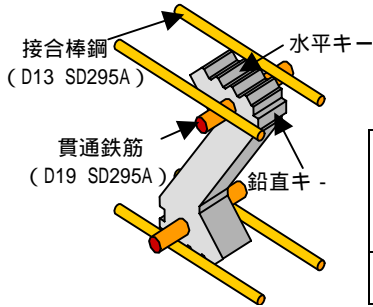


図 - 2 接合方法

表 - 2 実験結果

試験体名	トラス厚さ [mm]	荷重 P <sub>a</sub> [kN]	コンクリート			UFC			PCグラウト
			圧縮強度	引張強度	弾性係数	圧縮強度	引張強度	弾性係数	圧縮強度
			[MPa]	[MPa]	[GPa]	[MPa]	[MPa]	[GPa]	[MPa]
T60	60	115.0	69.1	3.5	32.9	195.1	8.8	52.9	34.9
T40	40	78.8	77.3	3.1	32.3	206.7	7.6	53.3	35.1

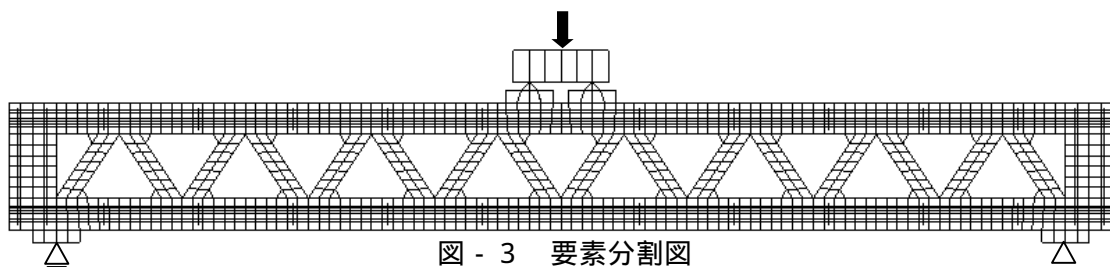


図 - 3 要素分割図

ンジ部と同一の PC 鋼棒を 2 本配置してプレストレスを導入した。

フランジ部のコンクリートは目標圧縮強度を 60MPa とし、また過密な配筋となっているため、スランプフロー 60±10cm を目標として配合を決定した (表 - 1)。

プレストレスは、上フランジ部では PC 鋼棒 1 本に 50kN ずつ計 100kN を、下フランジ部には 75kN ずつ 150kN 導入し、グラウトをシース管にグラウトを注入した。また、トラス同士間にはエポキシ樹脂で接着した。

載荷は 2 点静的単調載荷とし、支点にはテフロンシートにグリー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。

実験結果を表 - 2 に示す。実験では、T60 お

および T40 のどちらも一時的に荷重がピークを迎え (以降、この荷重を P<sub>a</sub> と称す)、その後再び荷重は増加した。実験では、UFC のトラス部材が、複合 PC はりの片側せん断スパンで大きく損傷し、破壊形式の非対称性が確認された。

### 3. 解析概要

#### 3.1 解析モデル

解析は、汎用 FEM 解析プログラム DIANA を用いて、2 次元の非線形 FEM 解析を行った。なお、実験での損傷の非対称性を考慮して、複合 PC はり全体を解析することとした。図 - 3 に要素分割図を示す。コンクリートと UFC には、4 節点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、

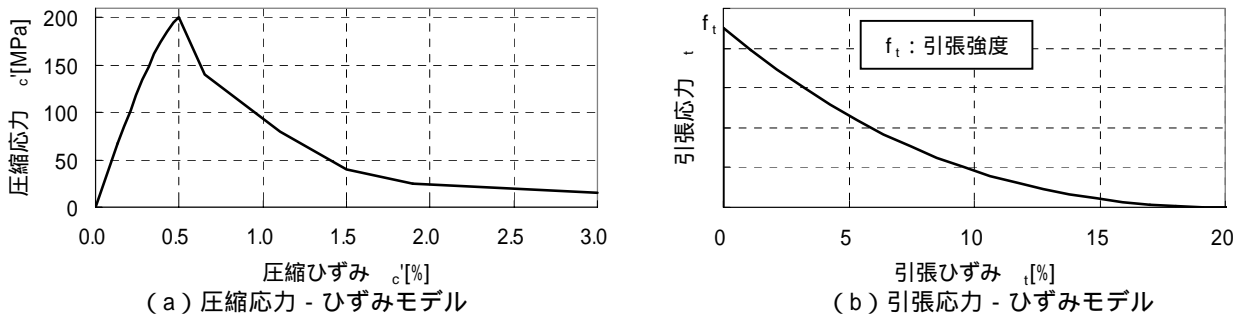


図 - 4 UFC の構成則<sup>3)</sup>

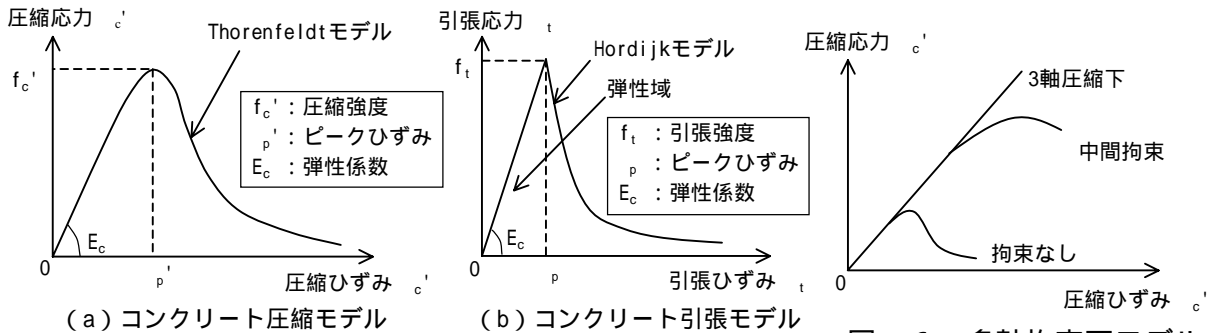


図 - 5 コンクリートの構成則

図 - 6 多軸拘束下モデル

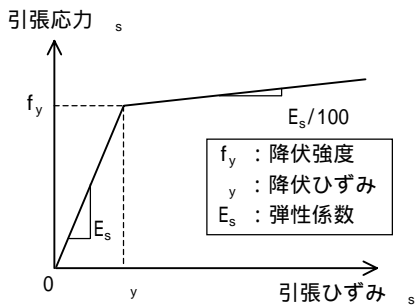


図 - 7 鉄筋モデル

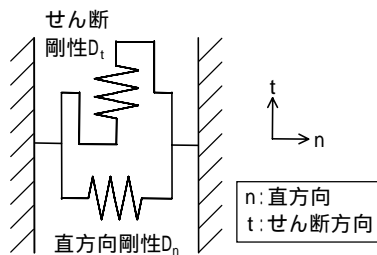


図 - 8 界面要素

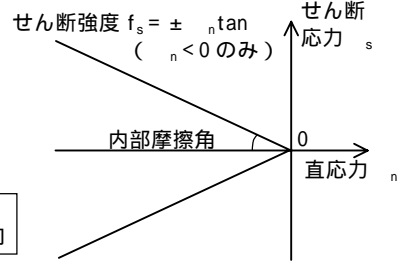


図 - 9 摩擦モデル

載荷板直下で圧壊することを防止するために、載荷板とコンクリートの間に厚さ 1mm の界面要素を挿入して水平方向の滑りを許容した。なお、解析において載荷は変位制御で行い、支点の水平方向の拘束はないものとした。求解法として割線剛性収束法を用い、不釣り合いエネルギーと外力エネルギーの比が  $1.0 \times 10^{-4}$  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分布ひび割れモデルの 1 つである、回転ひび割れモデルを用いた。また、ひび割れは 1 要素に 1 本発生するものと仮定し、ひび割れ幅を平均要素幅  $h_{cr}$  ( $=33\text{mm}$ ) で除すことにより、平均ひずみを算出した。

#### (2) UFC

図 - 4 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>3)</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>3)</sup>のひび割れ幅を、要素幅で除すことでひずみに変換した。

#### (3) コンクリート

圧縮応力を受けるコンクリートの構成則は、Thorenfeldt モデル(図 - 5 (a))を使用した。このモデルは、圧縮強度が 60MPa クラスの高強度コンクリートにも対応している。また、引張応力を受けるコンクリートには Hordijk モデル(図 - 5 (b))を用いた。ここで、破壊エネルギー  $G_F$  は、 $0.15\text{N/mm}$  とした。

#### (4) 多軸応力下の破壊基準

コンクリートの多軸拘束状態を考慮するために、破壊基準として Selby and Vecchio モデルを用いた(図 - 6)。また、横方向ひび割れを考慮した圧縮挙動には、Vecchio and Collins によるモデル<sup>4)</sup>を用いた。

#### (5) 鉄筋

鉄筋はコンクリートと完全に付着しているとし、降伏強度  $f_y$  に達するまで初期剛性  $E_s$  ( $=200\text{GPa}$ ) の弾性挙動を示し、その後は剛性を  $0.01E_s$  として直線的に応力が増加するバイリニアモデル(図 - 7)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  $75\text{kN}$  (計  $150\text{kN}$ ) を、上フランジ部では 1 本あたり  $50\text{kN}$  (計  $100\text{kN}$ ) のプレストレスを与えた。

#### (6) 界面要素の構成則

界面要素はばね状のモデルであり、直方向  $n$  とせん断方向  $t$  に抵抗する(図 - 8)。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、内部摩擦角は試験結果から  $30^\circ$  として適用した(図 - 9)。

#### (7) 載荷板、支承板および分配桁

載荷板、支承板および分配桁は弾性体とし、弾性係数を  $200\text{GPa}$  とした。

### 3.3 諸特性

コンクリートと UFC の材料特性は実験値を使用した。鉄筋の降伏強度は、PC 鋼棒を  $1250\text{MPa}$ 、SD295A を  $340\text{MPa}$  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、弾性係数を界面厚さ ( $1\text{mm}$ ) で除して  $32000\text{N/mm}^3$  とし、せん断剛性  $D_t$  は、ほぼフリーとさせるために  $10\text{N/mm}^3$  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、片側せん断スパンのトラスの引張強度を、実験値よりも  $0.5\text{MPa}$  増加させて解析した。この値は引張強度試験の標準偏差 ( $0.5\text{MPa}$  程度) を考慮したものである。

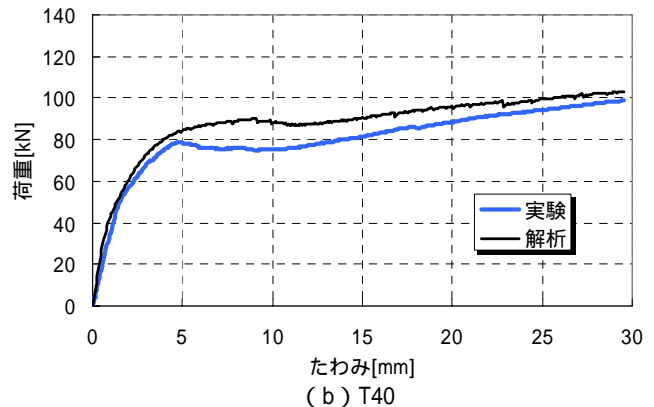
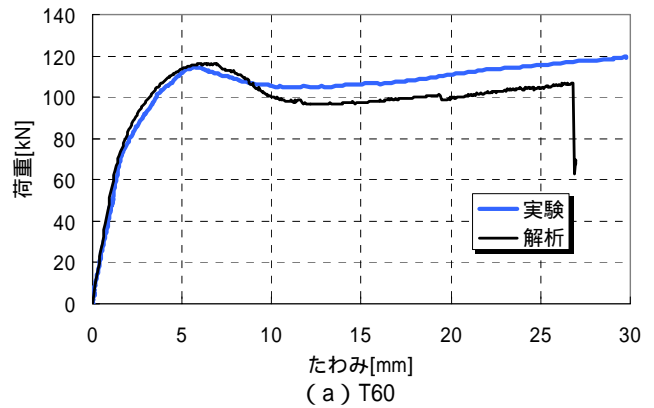


図 - 10 荷重 - たわみ曲線

## 4. 解析結果と実験結果の比較

### 4.1 荷重 - たわみ曲線

図 - 10 に実験および解析によって得られた荷重 - たわみ曲線を示す。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。図 - 10(a)において、T60 の実験ではたわみが  $5\text{mm}$  程度で  $P_a$  に達し、その後一度荷重が低下したが、すぐに回復し、再びゆるやかに上昇した。これは引張材として作用したトラスが破断した後、フランジ部と圧縮材のトラスで荷重を支える機構に変化したためと考えられる。解析では、最終的には載荷板直下のコンクリートが圧壊した。しかし  $P_a$  以降、一度荷重が低下した後に再び上昇する現象を再現することができた。特に  $P_a$  の値は実験結果と解析結果でほぼ一致している。本解析は、トラスとフランジ部の接合部の影響は考慮しておらず、トラス - フランジ間が完全に一体化しているという仮定を基に  $P_a$  を算出した。したがって、T60 においては本実験におけるトラス - フランジ間の接合方法は

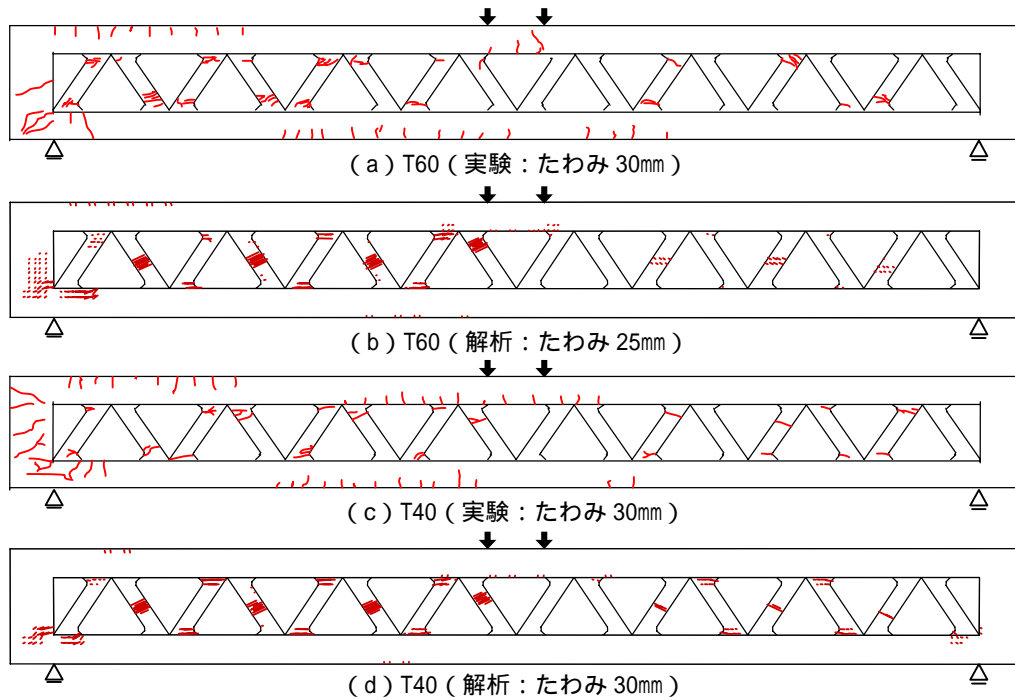


図 - 11 ひび割れ性状

高い一体性を有していることを示している。

T40 (図 - 10(b)) では、実験においてたわみが 5mm 程度でピーク荷重  $P_a$  に達し、一度荷重が落ちてから再び荷重が上昇した。解析では、実験の  $P_a$  よりもやや高い荷重でピークとなり、そこでのたわみが 9mm 前後と、実験を上回った。これは、接合の一体性がトラス厚さが薄くなることで低下し、解析で再現できなかったためと考えられる。しかし、一度荷重のピークを迎えてから再び荷重が上昇し、荷重 - 変位曲線の挙動は実験結果とほぼ同様となり、この間の挙動を概ね再現できている。

#### 4.2 ひび割れ性状

図 - 11 に実験および解析から得られたひび割れ性状を示す。実験は実験終了時(たわみ 30mm)のひび割れ、解析では、T60 は載荷板下のコンクリートが圧壊する直前のたわみ 25mm、T40 はたわみ 30mm の時のひび割れである。

T60 では、実験結果と同様に、解析において複合 PC はりの図中の左側(以降、左側スパン、右側スパンと称す)の引張材として作用したトラスに大きな幅を持つひび割れが発生した。解析ではトラス中央、実験ではトラス付け根部と、発生位置に差があるが、これは 2 次元解析では、

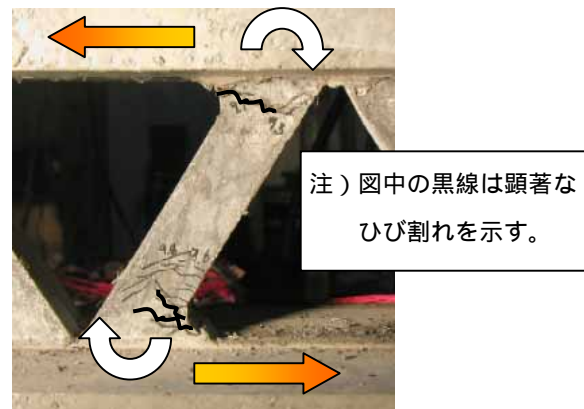


図 - 12 曲げを受けるトラス

注) 図中の黒線は顕著なひび割れを示す。

トラス付け根部の 3 次元的な応力集中を考慮できないことによるものと考えられる。右側スパンの引張材として作用したトラスのひび割れは卓越せず、実験結果と同様に破壊が左側スパンに集中した。また、圧縮材として作用したトラスにも、実験結果と同様に、トラスの上下部に曲げによるひび割れが発生した(図 - 12)。

T40 も、実験結果と同様に左側スパンのトラスにひび割れが卓越し、右側スパンのトラスに発生したひび割れは、ほとんど進展していく様子が確認されなかった。また、解析においても圧縮材として作用したトラスには曲げひび割れがトラス上下部に発生した。これは、複合 PC はりが曲げ変形を受けた際に、図 - 12 に示すよ



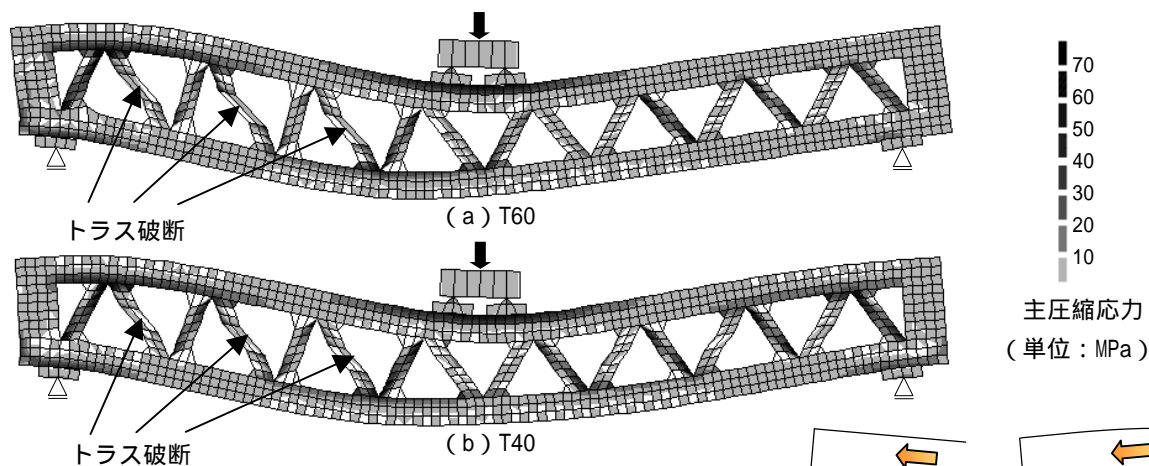


図 - 13 主圧縮応力図および変形図

うに上下フランジ部にずれが生じ、その結果トラスに曲げが作用したためと考えられる。

これらより、どちらのケースにおいても実験現象を精度良く再現できたと言える。

#### 4.3 主圧縮主応力分布と変形

図 - 13 に、20mm のたわみが生じた複合 PC はりの主圧縮応力分布と変形に関する解析結果を示す。変形は 10 倍に拡大して示している。

T60 では、変形から左側スパンの、引張材となったトラスが破断している様子が、一方で右側スパンの引張材のトラスは、ほとんどひび割れが開口していないことが確認できる。また、T60 の上フランジ部の左端付近が、上に凸に曲がっており、上フランジ部の下面に圧縮応力が集中している。これは図 - 11 に示すひび割れ性状からも確認できる。これは、載荷に伴い、図 - 14 のように部材端部は上フランジ部からは圧縮を受け、下フランジ部からは引張を受け、引張応力が集中しやすい部材端部の左下隅角部でひび割れが発生し、左側に倒れる形で上フランジ部に曲げが作用するためと考えられる。T40 (図 - 13(b)) においてもこの現象が見られる。

また、どちらのケースにおいても、右側スパンの、圧縮材となったトラスの圧縮応力が、左側スパンの圧縮材の圧縮応力より高くなっていることが確認できる。このことからトラスの破断後は、破断している側はフランジ部の曲げ、反対側ではトラスの作用を主として耐荷機構を形成していることが確認できた。

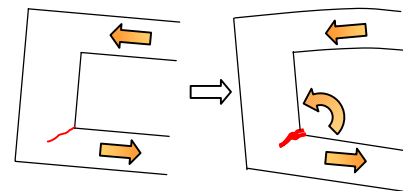


図 - 14 コンクリート端部変形のメカニズム

#### 5. 結論

- (1) 2次元非線形 FEM 解析により、UFC のトラスを用いた複合 PC はりの荷重 - たわみ曲線、およびひび割れ性状を精度良く再現することができた。
- (2) T60 では、2次元非線形 FEM 解析から、実験におけるトラスとフランジ部の接合方法はきわめて優れた一体性を示すことが確認された。
- (3) 2次元非線形 FEM 解析を用いて、複合 PC はりの主圧縮応力分布と変形を求めることにより、トラス破断後の複合 PC はりの耐荷機構を説明することができた。

#### 参考文献

- 1) 佐川康貴ほか：鋼繊維補強高強度モルタルの力学的性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.2，pp.199-204，2001.6.
- 2) 村田裕志ほか：ウェブに UFC トラス部材を用いた複合 PC はりに関する実験的研究，第 31 回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集，V-55，2004.3.
- 3) 掛井孝俊ほか：超高強度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.
- 4) Vecchio, F. J. and Collins, M. P.: Compression Response of Cracked Reinforced Concrete, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.119, No.12, pp.3590-3610, 1993.