

論文 超高強度鋼繊維補強セメント系複合材料を用いた複合 PC 部材における数値解析的研究

村田 裕志*1・川口 哲生*1・兵頭 彦次*2・二羽 淳一郎*3

要旨：超高強度鋼繊維補強セメント系複合材料¹⁾ (Ultra High Strength Steel Fiber Reinforced Cementitious Composites : 以下 UFC と略記する) は 200MPa 以上の圧縮強度を有する新材料であり, 鋼繊維補強することによって靱性にも大変優れた材料である。UFC を PC はりのウェブ部分にプレキャストパネルとして適用することによりウェブ厚を大幅に減少し, 軽量化を可能にすることができる。本研究ではウェブ厚 2 通りとパネル形状 2 通りを組み合わせた計 4 体の複合構造 PC はりの実験を対象に非線形有限要素解析を行い, 耐荷機構に関する数値解析的な評価を行った。その結果, 実験で得られた現象を再現することができた。

キーワード：超高強度, 複合構造, 非線形有限要素解析, プレストレストコンクリート

1. はじめに

近年, 橋梁構造の長大化に伴い構造物全体の軽量化が求められている。PC 橋梁においては, 軽量化の手法としてウェブ厚を薄くするためにウェブ部分の部材を高強度化することが有効な手段の一つとして考えられる。そこで, 最近開発され実用化が進められている 200MPa 以上の圧縮強度を有する UFC をウェブ部材へ適用することを検討した。UFC は, セメントをベースとした材料であり, 高い圧縮強度に加え, 鋼繊維補強による優れた靱性を示す。その優れた強度特性から UFC をウェブ部材として適用する効果は, ウェブ厚を減少し, 橋梁全体として軽量化を可能とすることに加え, これをプレキャストパネル化して場所打ちの PC 構造と組み合わせることで, 施工の省力化や全体のコストを低く抑えることにも繋がると考えられる。

この構造形式の合理性とその効果を明らかにするため, 実験室レベルで UFC プレキャストパネルをウェブ部に適用した複合 PC はりを製作し, 載荷実験を行った。本論文は, 実験で用いた複合 PC はりを対象として, 2 次元の非

線形有限要素解析を行い, 数値解析的に複合 PC はり部材の力学的挙動を把握することとした。

2. 解析概要

2.1 解析対象

図-1 に解析対象とした複合 PC はりの概要図を示す。図に示すように解析対象は接合面を有する複合 I 型はりであり, 斜線部のウェブ部には UFC をプレキャストパネルとして用いている。なお, このパネルは鉄筋による補強は一切行っていない。パネル形状は 3 角形と 4 角形の 2 ケースであり, それぞれウェブ厚 b_w を 20mm と 40mm の 2 種類に変化させ, 計 4 ケースを解析対象とした。

せん断スパンは 1500mm, 有効高さは 350mm であり, 有効高させん断スパン比 $a/d=4.23$ となっている。また, ウェブーフランジ間の接合のため, ずれ止め筋として異形鉄筋 D19 を各パネルを貫通するように配置してある。主鉄筋として $\phi 29$ の中空 PC 鋼棒を 2 本, D10 のせん断補強筋をせん断スパン間に 100mm 間隔で配置し

*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 太平洋セメント (株) 中央研究所第 1 研究部第 8 グループ (正会員)

*3 東京工業大学大学院教授 理工学研究科土木工学専攻 工博 (正会員)

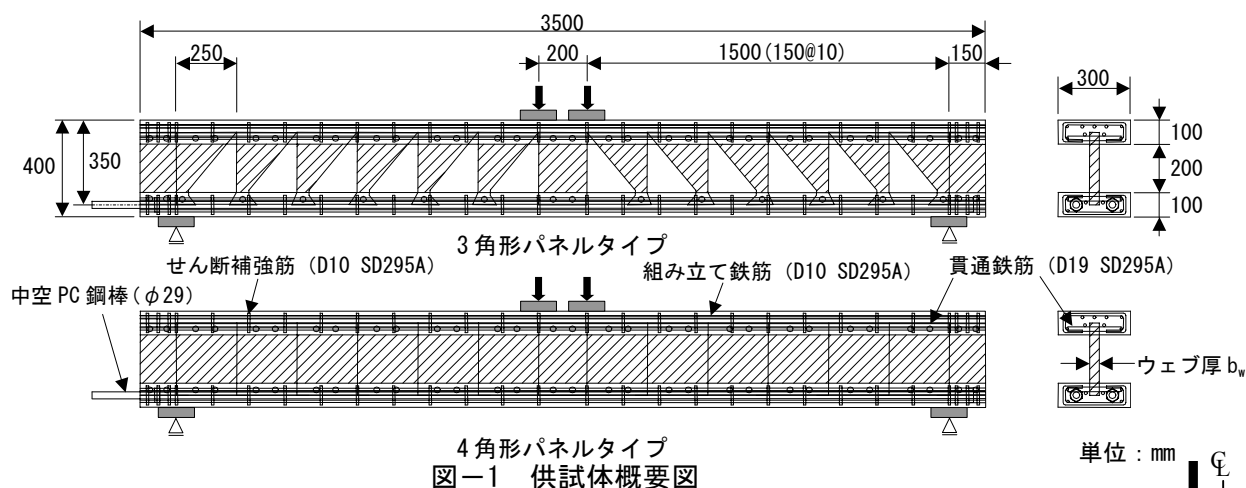


図-1 供試体概要図

である。軸方向鉄筋比は 1.7% である。

なお、3 角形パネルタイプと 4 角形パネルタイプはパネル形状と貫通鉄筋の位置が異なる以外、配筋等は全く同一である。また、4 角形パネル間の縦目地はエポキシ樹脂で接着した。また、支点はテフロンシートを用いて水平方向の拘束を取り除いた。

2.2 解析モデル

汎用有限要素解析プログラム DIANA を用いて 2 次元の非線形有限要素解析を行った。なお、対称性を考慮し、供試体の 1/2 を解析することとした。図-2 に要素分割図を示す。コンクリート要素と 4 角形パネルは 8 節点アイソパラメトリック 4 辺形要素、3 角パネルは 6 節点アイソパラメトリック 3 角形要素を用い、鉄筋には埋込み鉄筋要素を用いた。また、ウェブパネル-フランジ間、ウェブパネル同士間のずれを考慮するために接合面には厚さ 1mm の界面要素を配置してモデル化した。また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。求解法として線形剛性収束法を用い、収束判定は不釣り合いエネルギーと外力エネルギーの比が 1.0×10^{-4} 以下となった際に収束とした。

2.3 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²⁾とした。また、ひび割れは 1 要素に 1

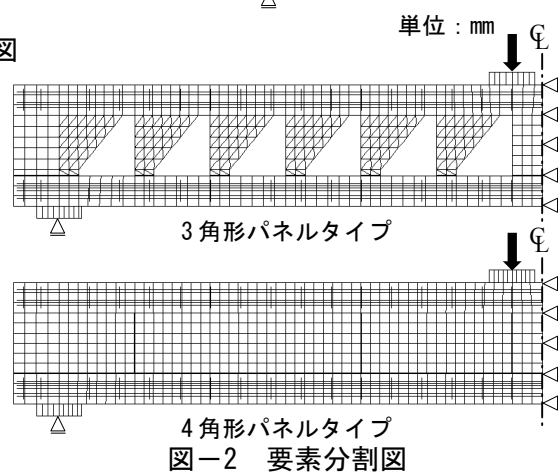


図-2 要素分割図

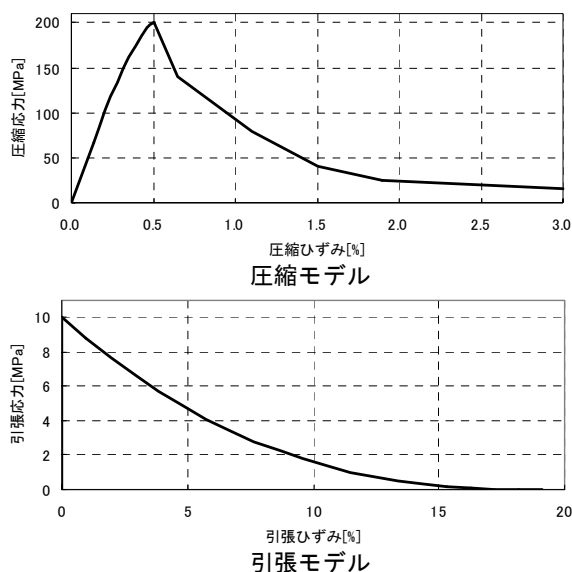


図-3 UFC の応力-ひずみ関係

本発生するものと仮定し、ひび割れ幅を平均要素幅 h_{cr} ($=33\text{mm}$) で割って平均ひずみに変換した。

(2) UFC

図-3 に解析に用いた UFC の応力-ひずみ関係を示す。圧縮モデルは圧縮試験から得られたものを多直線近似した。引張モデルは引張強度

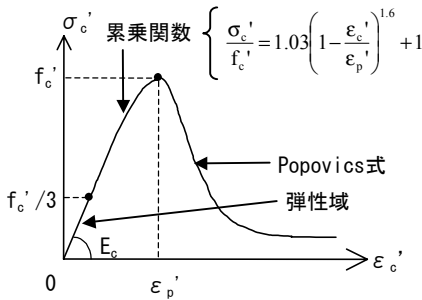


図-4 コンクリート圧縮モデル

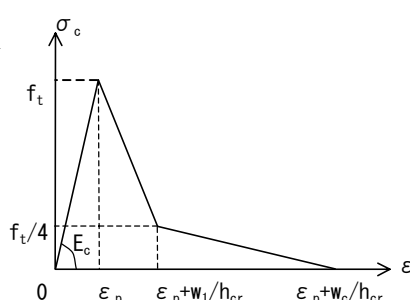


図-5 コンクリート引張モデル

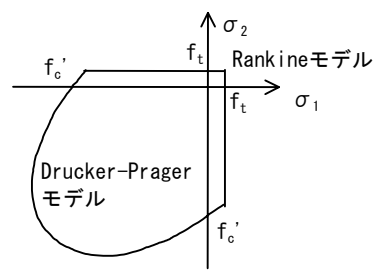


図-6 降伏曲面

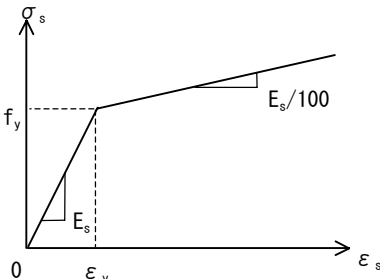


図-7 鉄筋モデル

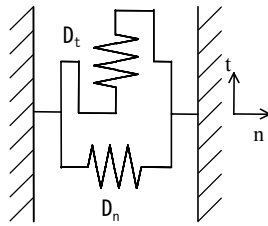


図-8 界面要素

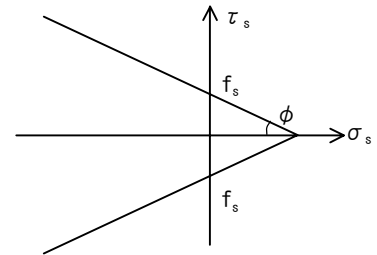


図-9 摩擦モデル

(=10MPa) までは弾性係数 50GPa の弾性体とし、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のひび割れ幅を要素幅で割ってひずみとしている。なお、破壊エネルギーは 18N/mm である。これは普通コンクリートの標準的な値 0.1N/mm の約 180 倍である。

(3) コンクリート

圧縮応力を受けるコンクリートは圧縮強度の 1/3 までは弾性体とし、その点からピークまでは滑らかに累乗関数で結び、ポストピーク域には Popovics 式³⁾ (式(1)) を使用した (図-4)。ここで、 n_c は式(2)で与えられる。また f_c' : 圧縮強度 (MPa), ϵ_p' : ピークひずみ (=2800 μ) である。

$$\sigma_c' = \left[\frac{n_c (\epsilon / \epsilon_p')}{n_c - 1 + (\epsilon / \epsilon_p')^{n_c}} \right] f_c' \quad (1)$$

$$n_c = 1 + 0.57(f_c' / 9.8) \quad (2)$$

また、引張応力を受けるコンクリートには 1/4 モデル (図-5) を用いた。ここで、コンクリートの破壊エネルギー G_F は、0.15N/mm とした。

(4) 2軸応力下の破壊基準

コンクリートと UFC の 2 軸応力状態を考慮するために、破壊基準として圧縮側は Drucker-Prager モデル、引張側には Rankine モデルを用いた (図-6)。

表-1 コンクリートの材料特性

f_c' [MPa]	f_t [MPa]	E_c [GPa]
70.0	3.8	35.0

表-2 鉄筋の降伏強度

中空 PC 鋼棒 [MPa]	SD295A [MPa]
930	340

表-3 界面要素の材料特性

	f_s [MPa]	D_n [N/mm ³]	D_t [N/mm ³]
ウェーブフランジ間(20mm)	30	50000	56
ウェーブフランジ間(40mm)	15	50000	28
4 角形パネル同士間	3	2000	15

(5) 鉄筋

鉄筋には降伏強度 f_y に達するまで初期剛性 E_s (=210GPa) の弾性挙動をとり、それ以降は E_s の 1/100 の剛性で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、中空 PC 鋼棒には 1 本あたり 78kN、計 156kN のプレストレスを導入した。

(6) 界面要素の構成則

界面要素は厚さ 1mm のばね状のモデルであり、軸方向 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、軸方向には剛性 D_n の弾性体とし、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、エポキシ樹脂を想定した界面要素ではプレストレスによる摩擦でせん断強度が増加することが考えられるため、Coulomb の摩擦

モデルを、内部摩擦角 ϕ を一般的な 20° として適用した(図-9)。

(7) 載荷板、支承板

弾性体とし、弾性係数は 210GPa とした。

2.3 諸特性

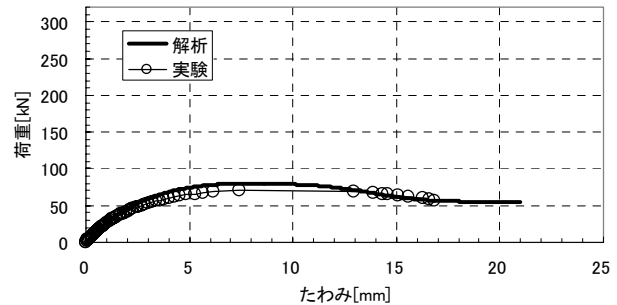
表-1~表-3に解析に用いた諸特性を示す。界面要素については、ウェブフランジ間に適用したものには2面せん断試験の結果を参考にしてウェブ厚 20mm 、 40mm それぞれの特性を決め、ウェブパネル同士間は別途当研究室で実施した樹脂とコンクリートとの付着せん断試験を参考に特性を決定した。

3. 解析結果と実験結果の比較

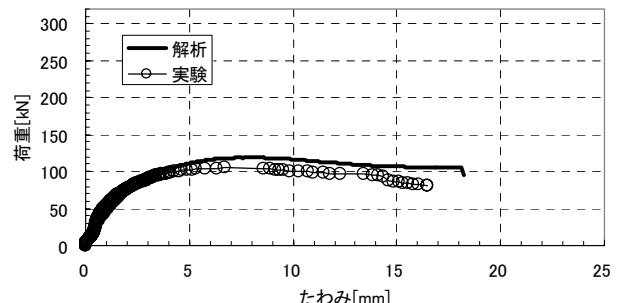
3.1 荷重-たわみ関係

図-10に実験および解析により得られた荷重-たわみ曲線を示す。たわみは下フランジ中央部のものである。3角形パネルタイプではウェブ厚 20mm のケースでは、解析結果が実験結果よりも耐荷力を若干高く評価しているが、荷重-たわみ曲線の挙動は実験結果とほぼ同様であり、解析結果は妥当な精度で実験結果を予測している。3角形パネルタイプのウェブ厚 40mm でもウェブ厚 20mm のケースと同様に実験結果よりもやや耐荷力が高く予測されているが荷重-たわみ曲線はほぼ一致しており、実験結果を再現できていると考えられる。このように、3角形パネルタイプではウェブ厚 20mm 、 40mm のどちらのケースに対しても解析によって、実験で得られた耐荷力、変形挙動を精度良く再現することができた。

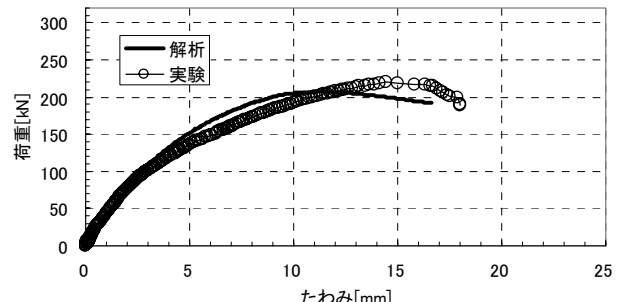
4角形パネルタイプでは、ウェブ厚 20mm のケースでは、解析から得られた耐荷力が実験値よりもやや低い結果となった。一方、荷重-たわみ曲線の形状は実験結果とほぼ同様の形を保っており、破壊モードにそれほど違いはないと考えられる。しかし、ウェブ厚 40mm のケースでは、解析における耐荷力が実験値を 100kN 近く上回っており、荷重-たわみ曲線の形状も実験結果と一致していない。このケース



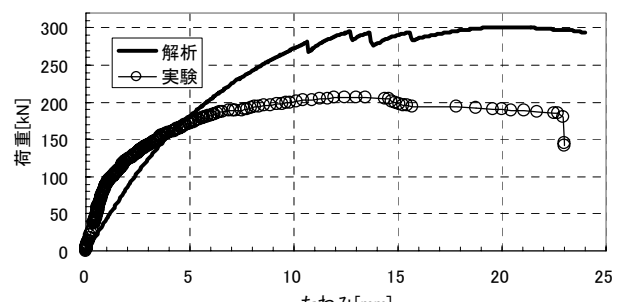
(a) 3角形パネルタイプ (ウェブ厚 20mm)



(b) 3角形パネルタイプ (ウェブ厚 40mm)



(c) 4角形パネルタイプ (ウェブ厚 20mm)



(d) 4角形パネルタイプ (ウェブ厚 40mm)

図-10 荷重-たわみ関係

では破壊モードが一致しなかったことが原因と考えられる。またこのケースでは先の3ケースと違い初期剛性も実験結果とは異なったが、これも載荷初期の段階から供試体内での力の流れが実験とは異なってしまったことによると思われる。このように4角形パネルタイプでは、ウェブ厚 20mm のケースでは解析によって実験と概ね同等の耐荷力、変形挙動を再現することができたが、ウェブ厚 40mm のケースでは十分に再現することができなかった。

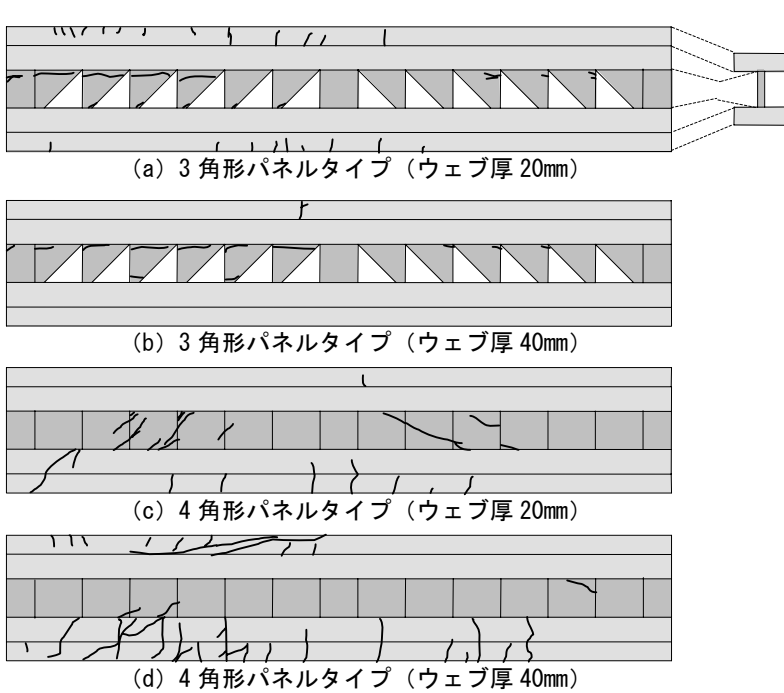


図-11 ひび割れ性状図（実験）

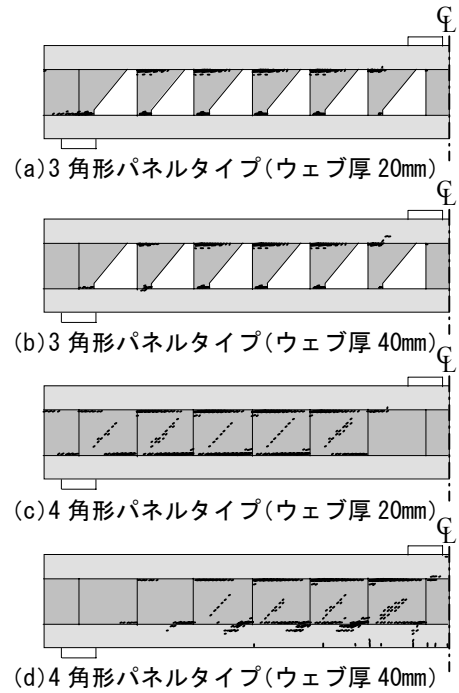


図-12 ひび割れ性状図（解析）

3.2 ひび割れから見る破壊性状

図-11 に実験後のひび割れ性状を、図-12 に解析によって得られた最大荷重時のひび割れ図を示す。これらを比較すると、3 角形パネルタイプのウェブ厚 20mm のケースでは、実験においては片側のせん断スパン内のほとんどのパネルにおいて、上フランジとの接合部付近に水平のひび割れが発生し、このひび割れがゆっくりと進展しながら破壊へとつながった。解析においても3 角形パネルの上部に水平なひび割れが発生しており、これが徐々に開いていくことで最大荷重を迎えた。このように、UFC の引張軟化曲線を組込むことで破壊モードを適切に再現できたといえる。しかし、実験では上フランジ、下フランジにも曲げひび割れが発生しているのに対し、解析では全く発生しておらず、このことが耐荷力の違いに影響を及ぼしたものと考えられる。3 角形パネルタイプのウェブ厚 40mm のケースでは、実験では片側のせん断スパン内の全てのパネルの上部に水平なひび割れが入り、これが開いていくことで破壊となった。解析でも同様の傾向となりウェブ厚 20mm のケースと同様に破壊モードをほぼ正確に再現できた。

4 角形パネルタイプのウェブ厚 20mm のケースでは、実験においてせん断スパンの中央のパネル数枚にわたって斜めひび割れが発生し、このひび割れが徐々に開いていくことで破壊に至った。解析においてもパネルに斜めひび割れが発生したが、それ以外にも各パネルの左上部と右下部に水平なひび割れが発生している。この3 種類のひび割れが開くことで実験における斜めひび割れの進展の状況をシミュレートし、図-10 (c) のようなほぼ同等の荷重-たわみ曲線が得られたものとする。なお、実験では下フランジにも損傷が見られるが、解析では見られず、このことが耐荷力の違いに影響したと思われる。4 角形パネルタイプのウェブ厚 40mm のケースでは実験では上フランジ、下フランジともに広範囲にわたってひび割れが発生しこれが破壊へとつながった。しかし解析ではウェブ厚 20mm のケースと同様にパネルのひび割れの進展により破壊に至り、フランジの損傷はごくわずかであった。これは2次元の解析では実験における3次元的な複雑な耐荷機構を再現することが困難であったためと考えられる。このことが図-10 (d) において荷重-たわみ曲線が一致しなかった原因と考えられる。

3.3 圧縮主応力分布図と変形図

図-13 に解析から得られた最大荷重時の圧縮主応力分布図と変形図を示す。変形は 10 倍に拡大して示している。3 角形パネルタイプではウェブ厚 20mm, 40mm の両ケースともに 3 角パネルの斜辺部に圧縮応力が集中していることが確認できるが、UFC の圧縮強度である 200MPa には到達しておらず、圧縮には十分耐えられることがわかった。また、パネル上部の要素が大きく開いていることが確認でき、破壊がこの部分を中心に行っていることがわかる。

4 角形パネルタイプではウェブ厚 20mm のケースにおいて、各パネルに Z 字型に圧縮応力が分布していることが確認され、これに沿って図-12 のようにひび割れが発生したことがわかる。ウェブ厚 40mm のケースでは、等モーメント区間に圧縮応力が集中しているが、ウェブ厚 20mm のケースの解析結果と同様にパネル部分に圧縮応力が集中しており、フランジを中心にして破壊した実験結果とは異なった破壊モードになってしまった。また先の 3 ケースとは異なり、等モーメント区間の載荷板右下の上フランジ部のコンクリート要素に圧縮応力がほとんど発生していないことから、コンクリート上縁部が圧壊してしまっており、これにより図-10 (d) の解析結果に示されるように、荷重-たわみ曲線が最大荷重に近づくにつれて振動している理由が説明できる。またフランジのコンクリートが圧壊しているにもかかわらず荷重が大きく低下しなかったのは、等モーメント区間の 4 角形パネルが圧縮応力を受け持ち、曲げに抵抗していたものと予測される。

4. 結論

- (1) 2次元非線形有限要素解析により 3 角形パネルタイプのウェブ厚 20mm, 40mm の両ケースの荷重-たわみ曲線、ひび割れ性状を実験結果に近い形で予測することができた。
- (2) 4 角形パネルタイプのウェブ厚 20mm のケースではひび割れ性状がやや異なったものの、

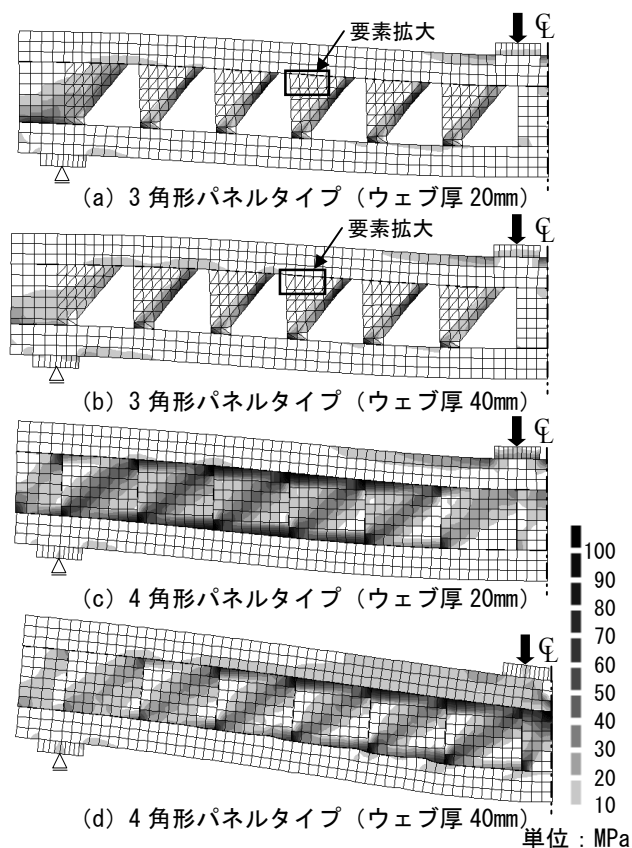


図-13 圧縮主応力図, 変形図

実験と同等の耐荷機構を再現し、荷重-たわみ曲線を予測することができた。

- (3) 2次元の解析では 4 角形パネルタイプのウェブ厚 40mm のケースにおける耐荷機構を再現することができなかった。
- (4) 圧縮主応力分布を求めることにより、実験での圧縮応力の流れを予測することができた。

参考文献

- 1) 佐川康貴, 松下博通, 鶴田浩章, 下山善秀: 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) 山谷 敦, 中村 光, 檜貝 勇: 回転ひび割れモデルによる RC はりのせん断挙動解析, 土木学会論文集, No.620, V-43, pp.187-199, 1999.5
- 3) 谷川恭雄, 畑中重光: 応力下降域における各種コンクリートの応力度-ひずみ度曲線の表示式, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.107-108, 1979.9