

論文 鋼繊維混入超高強度鉄筋コンクリート柱部材に関する解析的研究

吉澤 徳康^{*1}・柏崎 隆志^{*2}・野口 博^{*3}・高津 比呂人^{*4}

要旨：鋼繊維を混入した超高強度鉄筋コンクリート柱部材を対象として、3次元FEM解析を行った。実験ではコンクリートに鋼繊維を混入することで、曲げ耐力の向上や、ひび割れが低減することが確認されている。解析ではコンクリート引張応力-ひずみ関係の引張強度以降において応力を負担できるようにしたモデルを用いることで、鋼繊維混入による曲げ耐力の向上や、ひび割れ抑制効果を再現することができた。このことから、鉄筋コンクリート部材に鋼繊維を混入した場合、コンクリートの引張靱性が向上し、コンクリートも引張力を負担できるようになるため、曲げ耐力が上昇する可能性があることを確認した。

キーワード：柱、超高強度コンクリート、鋼繊維、曲げせん断、ひび割れ抑制、3次元FEM解析

1. はじめに

現在、超高層建物にも鉄筋コンクリート（以下、RC）造が用いられるようになり、大きな軸力が作用する下層階には、圧縮強度が 100N/mm^2 を超えるような超高強度コンクリートが使用される。しかし、コンクリート強度が高くなるにつれ、圧縮時の力学性状は脆性的になり、設計クライテリアを満足するような変形性能を確保するためには、多大な横補強筋量が必要となってしまう。

横補強筋量を低減するため、鋼繊維（以下、SF）を混入した超高強度コンクリート部材の開発が進められており、SF混入による強度上昇や靱性の向上、ひび割れ抑制の効果などが確認されているが、その耐力上昇機構は明確に解明されていない。

本研究では、鋼繊維を混入した混入超高強度鉄筋コンクリートを対象として3次元FEM解析を行い、解析結果からSF混入超高強度コンクリートの耐力上昇機構について検討を行った。

2. 解析概要

2.1 解析対象試験体

解析対象試験体は、木村ら¹⁾により実験が行われた、鋼繊維を混入した超高強度RC柱試験体とした。表-1に試験体一覧およびコンクリート材料特性を、表-2に鉄筋材料特性を、図-1に試験体形状を示す。コンクリ

ート設計基準強度は 150N/mm^2 (F_c150)、SF混入量（体積比混入率）は0%と1.0%の2通りである。柱断面は $250\text{mm} \times 250\text{mm}$ 、柱内法高さ $h=1000\text{mm}$ 、せん断スパン比は $M/QD=2.0$ とした。主筋には高強度鉄筋（USD685）を用い、配筋は12-D13（全主筋比 $p_g=2.44\%$ ）。横補強筋には超高強度異形PC鋼棒（SBPD1275/1420）の径5.1mmを用い、配筋は4-U5.1@35（横補強筋比 $p_w=0.90\%$ 、横補強筋量 $p_w \cdot \sigma_y = 11.44\text{N/mm}^2$ ）と4-U5.1@70（ $p_w=0.45\%$ 、 $p_w \cdot \sigma_y = 5.72\text{N/mm}^2$ ）の2通りとし、SFには長さ30mm、アスペクト比37.5で繊維の両端にフックが付いたものを使用した。

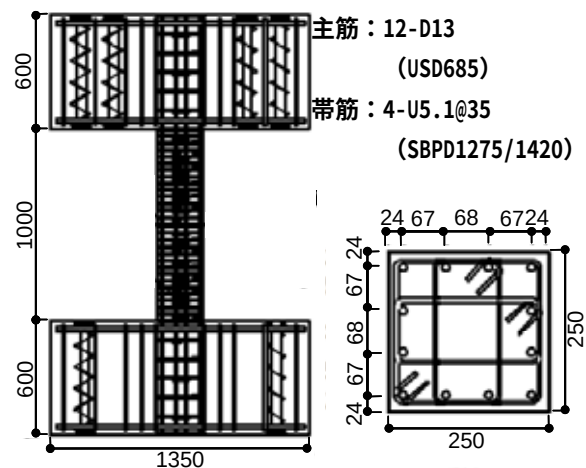


図-1 試験体形状

表-1 試験体一覧・コンクリート材料特性

実験試験体					解析試験体		
試験体名称	SF混入量 [%]	横補強筋比 p_w [%]	圧縮強度 σ_y [N/mm^2]	弾性係数 E_c ($\times 10^4$) [N/mm^2]	試験体名称	横補強筋比 p_w [%]	コンクリート引張応力-ひずみ関係引張強度以降
C00-35	0.0	0.90	157.9	4.30	A-CS-35	0.90	白井式
C10-35	1.0	0.90	148.2	4.36	A-C0.05-35	0.90	第2剛性 $E_{c2}=0.05 \times E_c$
					A-CS-70	0.45	白井式
					A-C0.05-70	0.45	第2剛性 $E_{c2}=0.05 \times E_c$
C10-70	1.0	0.45	148.2	4.36	A-C0.05-52.5	0.62	第2剛性 $E_{c2}=0.05 \times E_c$

表-2 鉄筋材料特性

	降伏強度 σ_y [N/mm^2]	弾性係数 E_s ($\times 10^5$) [N/mm^2]	引張強度 σ_t [N/mm^2]
D13	716	1.89	899
U5.1	1473	2.02	1488

*: 0.2%オフセット降伏点

*1 日鐵住金建材（株）（前千葉大学大学院工学研究科博士前期課程） 工修（正会員）

*2 千葉大学大学院 工学研究科建築・都市科学専攻助教 工修（正会員）

*3 千葉大学大学院 工学研究科建築・都市科学専攻教授 工博（正会員）

*4 （株）竹中工務店 技術研究所 建設技術研究部 研究員 工修（正会員）

載荷は、建研式加力装置を用いて、柱の中央高さ位置が反曲点となるように正負繰返しの水平力を作用させて行った。軸力は、高層 RC 建物の低層部内部柱を想定し、軸力比を ($\eta_0=0.3$) とした。

2.2 解析モデル

要素分割および境界条件を図-2に示す。本研究では、余・野口らにより開発され、洪により改良された3次元 FEM 解析プログラム²⁾を用いた。コンクリートには8節点ソリッド要素、鉄筋には2節点線材要素を用いた。コンクリートの破壊条件には、Willam-Warnke³⁾の5パラメータモデルを用いた。図-3に示すように、コンクリートの圧縮上昇曲線はFafitis-Shah式⁴⁾を用い、圧縮軟化域は直線とし、収斂点は六車・渡邊モデル⁵⁾によって算出した。ひび割れモデルは固定ひび割れモデル、ひび割れ発生以降の圧縮強度低減には野口・飯塚式⁶⁾、ひび割れ方向のせん断伝達特性にはAl-Mahaidiモデル⁷⁾を用いた。鉄筋の応力-ひずみ関係は、Bi-linearモデルとした。

図-4に本研究で用いたコンクリート引張応力-ひずみ関係を示す。コンクリートにSFを混入することで、コンクリート引張強度・曲げ引張靱性が向上することが考えられる⁸⁾。SFを混入していない試験体に対しては、引張強度以降は徐々に応力が低下する白井式⁹⁾を、SFを混入した試験体には、引張強度以降に第2剛性 E_{c2} を設定したBi-Linearモデルを用い、SF混入の影響を考慮した。 E_{c2} は α の値を変数とした解析を行い、白井式を用いた試験体に対するBi-Linearモデルを用いた試験体の最大耐力の比が、実験におけるSF無混入試験体に対するSF1.0%混入した試験体の最大耐力の比と同様になる値($\alpha=0.05$)とした。

表-1に解析試験体一覧と実験試験体との対応を示す。主な解析パラメータは、横補強筋比 p_w と、コンクリート引張強度以降の応力-ひずみ関係である。

3. 解析結果

3.1 せん断力-部材角関係

図-5(a)～(c)に各試験体のせん断力-部材角関係について実験と解析の比較を示す。いずれの試験体においても、最大耐力については、解析が実験を若干上回る結果となったが、概ね良好に対応している。解析の最大耐力が実験よりも若干大きくなるのは、実験は繰返し載荷であるのに対し、解析は単調載荷であることが原因のひとつであると考えられる。

$p_w=0.90\%$ の実験試験体C00-35、C10-35では、コンクリートの圧壊後に主筋が圧縮降伏し、その後、徐々に荷重が増加しながら変形が進み最大耐力に至っている。解析試験体A-CS-35、A-C0.05-35においても、カバーコン

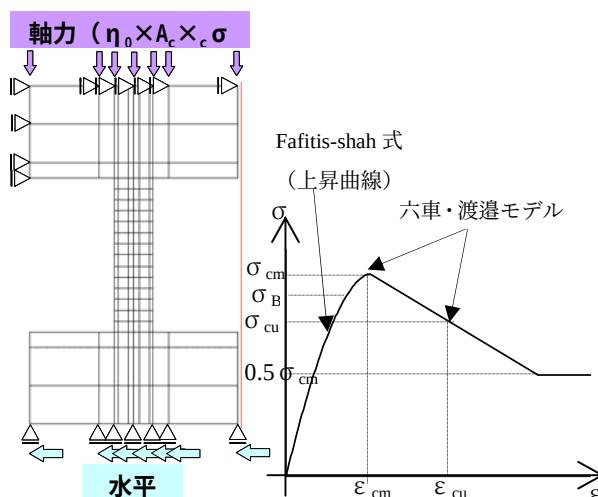


図-2 要素分割図 図-3 圧縮応力-ひずみ関係

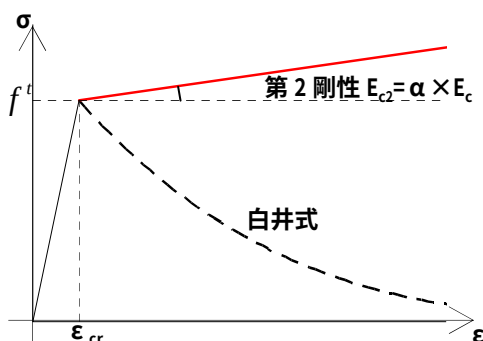


図-4 引張応力-ひずみ関係

クリートの圧壊後に主筋が圧縮降伏し、最大耐力に至っている。しかし、解析では、主筋圧縮降伏後すぐに最大耐力に達しており、最大耐力時部材角は実験よりも小さくなっている。また、実験では、最大耐力以降も急激な耐力低下はなく変形が進んでいる。解析においても、最大耐力以降の耐力低下は緩やかではあるが、実験よりも耐力低下の度合いは大きい。これは、解析において、危険断面位置での圧縮側主筋のひずみが局所的に大きくなっていたことから、圧縮側危険断面位置の要素の負担圧縮力を過大評価してしまい、実験よりも圧縮による破壊が進行しているためと考えられる。

$p_w=0.45\%$ の試験体においても、コンクリートの圧壊後に主筋が圧縮降伏し、最大耐力に至るという諸現象の発生順序は実験と解析で一致しているが、解析での最大耐力時部材角が実験よりも小さくなっており、 $p_w=0.90\%$ の試験体と同様の傾向になっている。最大耐力以降の耐力低下については、実験では、 $p_w=0.90\%$ の試験体C10-35よりも耐力低下が著しい。解析においても、 $p_w=0.90\%$ の試験体A-C0.05-35に比べると、耐力低下の度合いは大きくなっているが、実験試験体C10-70と比べると、その度合いは小さい。これは、解析モデルのコンクリート圧縮応力-ひずみ関係における、収斂点応力を圧縮強度の

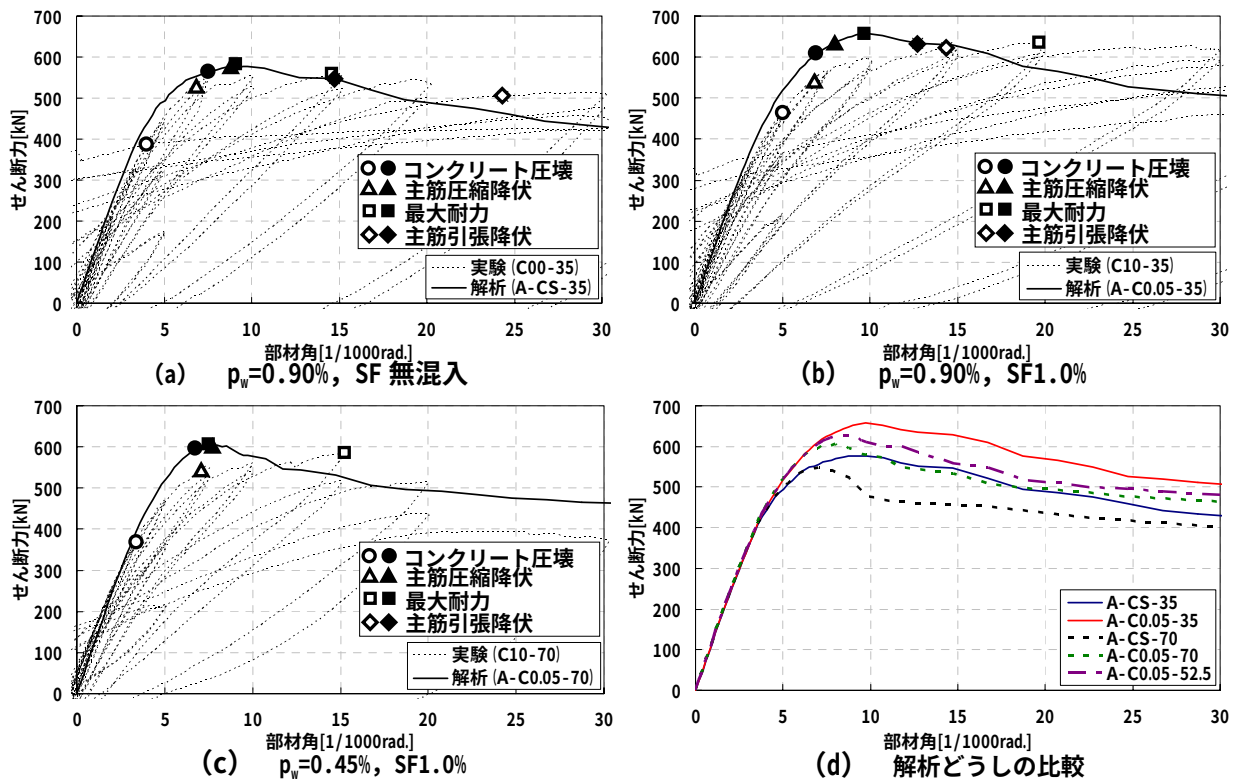


図-5 せん断力-部材角関係

0.5 倍と高めに設定していることが原因のひとつと考えられる。

図-4 (d) にせん断力-部材角関係について、各解析試験体どうしの比較を示す。 $p_w=0.90\%$ の2つの試験体を比較すると、コンクリート引張強度以降に第2剛性 ($E_{c2}=0.05E_c$) を設定した試験体 A-C0.05-35 に対して、最大耐力が 14%増加した。実験においても、SF 1.0%混入の試験体 C10-35 は、SF 無混入の試験体 C00-35 に対して、最大耐力が 14%増加しており同様の傾向となった。このことから、コンクリート引張強度以降に正の第2剛性を設定し、コンクリートの引張靱性を向上させることで、SF 混入による曲げ耐力の向上を再現することができると思われる。

$p_w=0.45\%$ の2つの試験体を比較すると、コンクリート引張強度以降に第2剛性 ($E_{c2}=0.05E_c$) を設定した試験体 A-C0.05-70 では、コンクリート引張強度以降を白井式とした試験体 A-CS-70 に対して、最大耐力が 11%増加している。 $p_w=0.45\%$ で SF 無混入の試験体は実験が行われていないが、 $p_w=0.45\%$ の場合、SF を 1.0%混入すると、SF 無混入に対して、耐力が 11%程度増加する可能性がある。

最大耐力以降の挙動について、実験と解析でやや対応していない点があり、解析モデルのより詳細な検討が必要である。以下では、比較的良好に対応した最大耐力までの挙動に関して検討を行う。

3.2 最大主ひずみ分布およびひび割れ幅

図-6 に $p_w=0.9\%$ でコンクリート引張強度以降に白井式を用いた試験体 A-CS-35 と、第2剛性 ($E_{c2}=0.05E_c$) を設定した試験体 A-C0.05-35 の最大主ひずみ分布を示す。A-CS-35 では、変形が進むと、ひずみの大きな領域が広範囲に広がっている。A-C0.05-35 では、初期の段階でも引張側の要素のひずみが A-CS-35 に比べて小さく、変形が進んでも、ひずみの大きな領域はあまり広がっていない。

図-7 に解析試験体 A-CS-35 と A-C0.05-35 のひび割れ

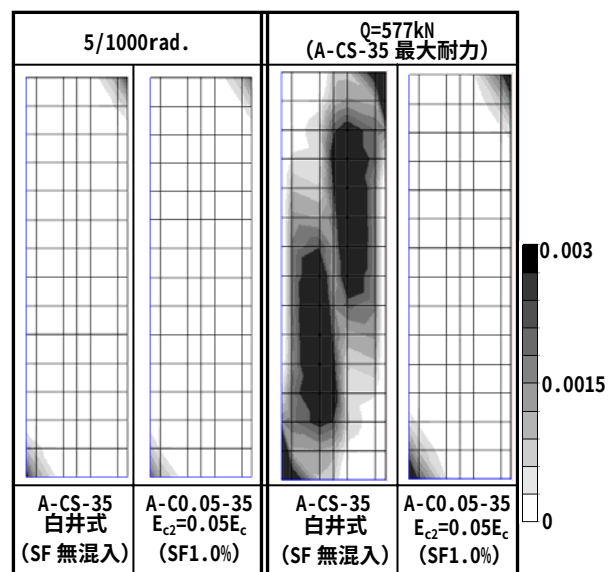


図-6 最大主ひずみ分布

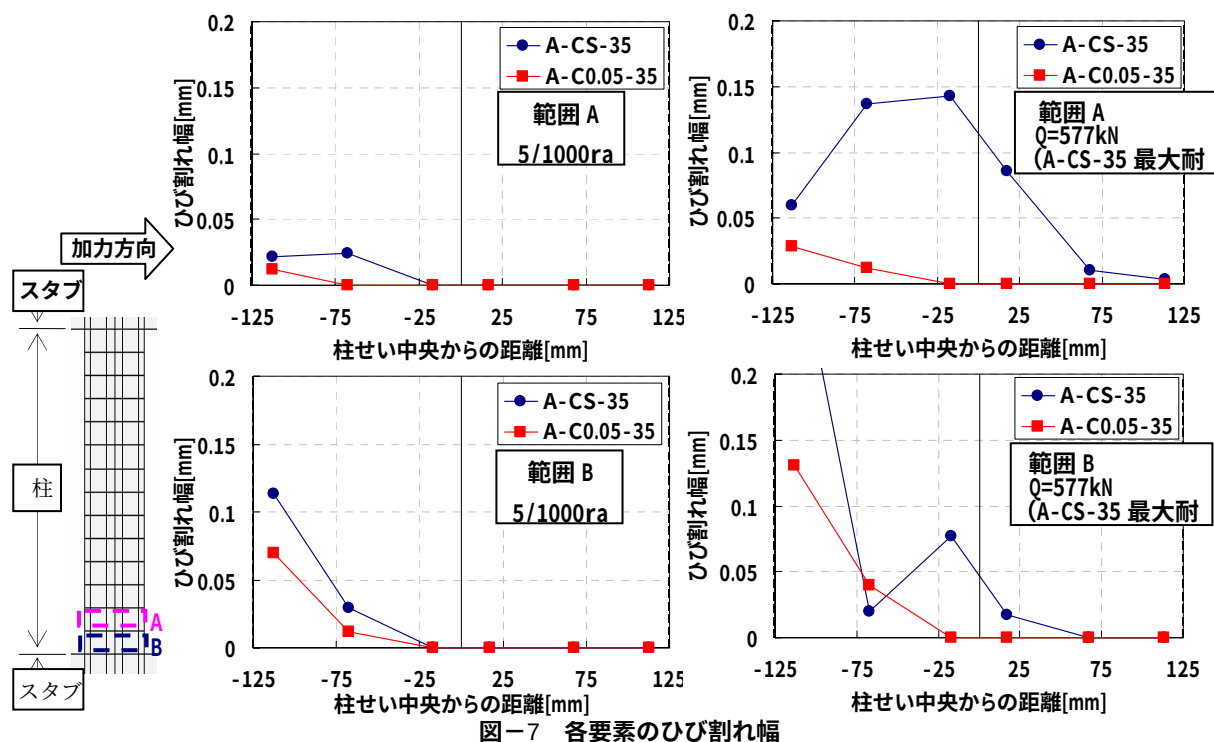


図-7 各要素のひび割れ幅

幅の比較を示す。柱脚最下部から1段目の要素(範囲A)と2段目の要素(範囲B)を示している。ひび割れ面に直交する引張ひずみが引張強度時ひずみを超えた場合にひび割れが発生したと仮定し、引張ひずみから引張強度時ひずみを引いた値をクラックひずみと定義し、ひび割れ幅の大きさを表現した。

A-CS-35では、変形が進むと、危険断面から1段目引張縁のひび割れ幅が特に大きくなっている。A-C0.05-35では、A-CS-35に比べて各要素のひび割れ幅は小さく、変形が進んでもA-CS-35のような局所的なひび割れ幅の拡大は見られない。写真-1の実験試験体のひび割れ状況からも、SF混入によりひび割れが低減されていることがわかる。このことから、コンクリート引張強度以降に正の第2剛性を設定し、引張強度以降も応力を負担できるようにすることで、引張ひずみの進展や、ひび割れの拡大が抑えられ、SF混入によるひび割れ抑制の効果を再現できたと考える。

3.3 柱の軸方向ひずみ

図-8に柱軸方向ひずみと部材角の関係を示す。実験における軸方向ひずみは、上下スタブ間の鉛直変位を柱内法高さ h で除して求めており、解析でも同様にして求めた。実験におけるSF無混入の試験体とSFを混入した試験体を比較すると、SFを混入したものの方が軸方向ひずみの進展が抑えられている様子がわかる。解析どうしを比較すると、コンクリート引張強度以降に白井式を用いたものより、第2剛性として $0.05E_c$ を与えた試験体の方が軸方向ひずみの進展が抑えられており、実験と同様

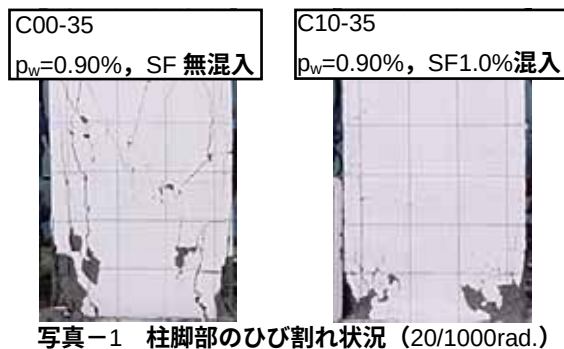


写真-1 柱脚部のひび割れ状況 (20/1000rad.)

の傾向をとらえている。特に、 $p_w=0.45\%$ の試験体A-CS-70とA-C0.05-70を比較すると、その傾向は顕著に見られる。

実験と解析を比較すると、いずれの試験体においても、解析の方が早い段階から軸方向ひずみが進展している。特に、 $p_w=0.90\%$ でSF無混入の試験体C00-35と、コンクリート引張強度以降に白井式を用いた試験体A-CS-35を比較すると、その傾向が顕著である。このように、解析で圧縮ひずみが実験よりも早い段階で進行してしまうことが、前述のせん断力-部材角関係において、解析の最大耐力時部材角 Q_{max} が実験よりも小さいこと、最大耐力以降の耐力低下の度合いが実験よりも大きいことなどの一因と推察される。

3.4 危険断面のコンクリート応力度分布

図-9に解析から得られた最大耐力時におけるコンクリートの鉛直方向応力度分布を示す。コンクリート引張強度以降に白井式を用いた試験体A-CS-35では、引張側コンクリートは応力を負担していないが、コンクリート

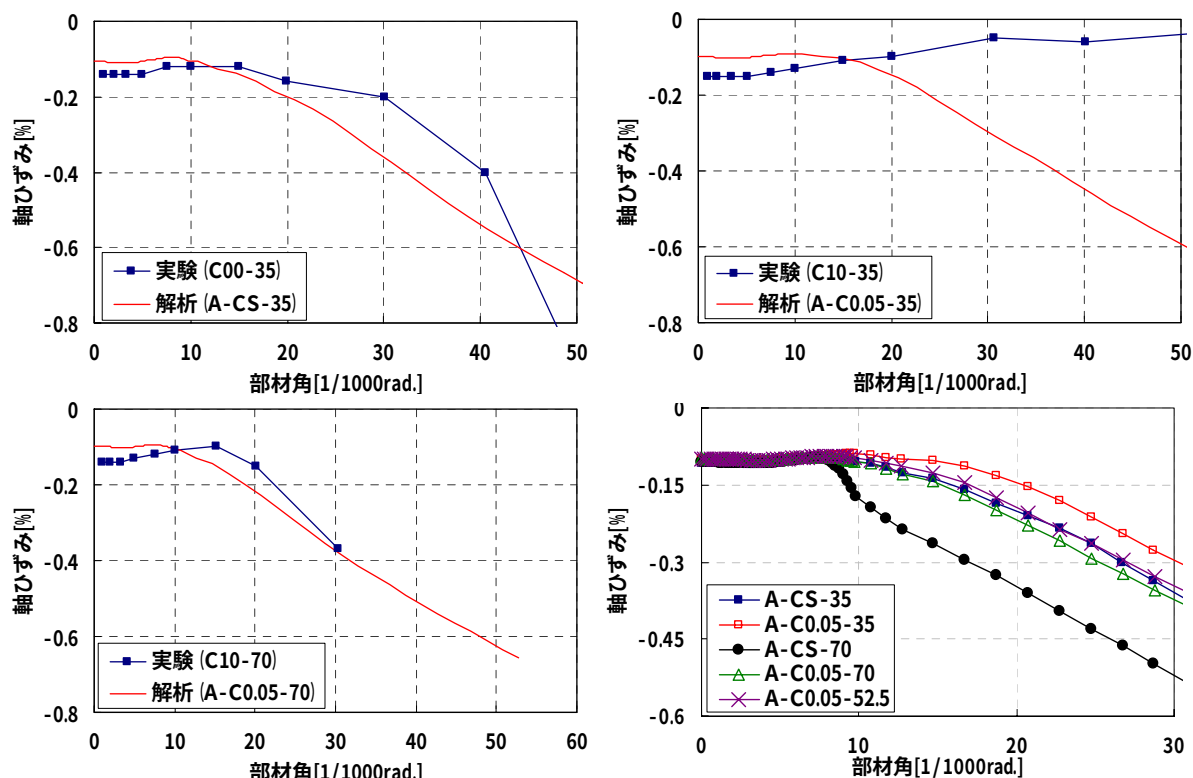


図-8 柱軸方向ひずみ-部材角関係

引張強度移行に第 2 剛性として $0.05E_c$ を与えた試験体 A-C0.05-35, A-C0.05-70 では、引張側コンクリートも応力を負担している。このように、最大耐力時でもコンクリートが引張応力を負担していることが、前述のせん断力-部材角関係において、A-C0.05-35, A-C0.05-70 の最大耐力が A-CS-35, A-CS-70 よりも上昇した要因であると考えられる。このことから、コンクリートに SF を混入することで見かけのコンクリート引張強度・曲げ引張靱性が向上し、ある程度変形が進んだ状態でも、コンクリートが引張力を負担することで、曲げ耐力が上昇するものと考えられる。

$p_w=0.90\%$ の A-C0.05-35 と $p_w=0.45\%$ の A-C0.05-70 を比較すると、A-C0.05-35 の方が引張側における応力負担が大きくなっている。このことから、木村らの研究¹⁾でも指摘されているように、SF 混入コンクリートの引張強度・靱性を評価する場合、SF 混入量だけでなく、横補強筋量も重要な要素のひとつであると考えられる。

3.5 最大耐力に関する検討

表-3 に最大耐力実験値 Q_{exp}^* 、解析値 Q_{ana}^* と ACI 式による曲げ耐力計算値 Q_{ACI} の比較を示す。実験値と解析

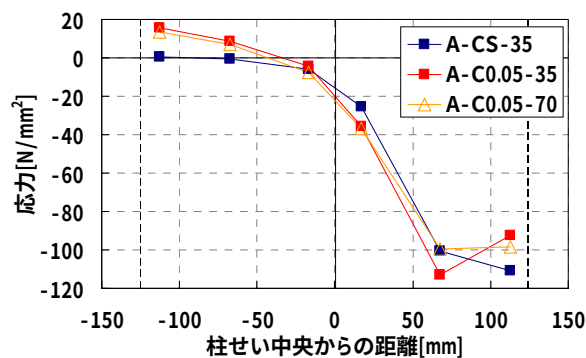


図-9 垂直応力度分布

値は P- Δ 効果を補正した値である。ACI318 規準では、等価ストレスブロックにおける圧縮縁コンクリートの終局ひずみ ϵ_{cu} を 0.003 としているが、超高強度コンクリートでは、シリンダー圧縮試験における圧縮強度時のひずみが 0.0045 程度になる。そこで、本研究では、超高強度コンクリートでの圧縮応力度分布を考慮するため、等価ストレスブロックにおける ϵ_{cu} を 0.0045 として計算した。SF 無混入の C00-35 では、やや危険側になるものの、計算値 Q_{ACI} は実験値 Q_{exp}^* に近い値になる。SF を混入した C10-35 では、実験値 Q_{exp}^* と計算値 Q_{ACI} の比が 1.21 となり、実験値を過小評価している。

表-3 実験値および解析値と計算値の比較

試験体名称	鋼繊維混入量 [%]	横補強筋比 [%]	コンクリート圧縮強度 [N/mm ²]	Q_{exp}^* [kN]	Q_{ana}^* [kN]	Q_{ACI} [kN]	Q_{exp}^*/Q_{ACI}	f_{cc} [kN]	f_{cc}^* [kN]	Q_{ACI}^* [kN]	Q_{exp}^*/Q_{ACI}^*	Q_{ACI}^{**} [kN]	Q_{exp}^*/Q_{ACI}^{**}
C00-35	0.0	0.90	157.9	602.00	603.89	614.11	0.98	165.7	165.7	634.20	0.95	634.20	0.95
C10-35	1.0		148.2	706.51	685.62	584.95	1.21	157.4	166.4	625.75	1.13	664.05	1.06

鋼繊維の混入により拘束コンクリートの圧縮強度増分が増加することが確認されており、文献 1)では、SF 混入による圧縮強度増分を考慮した拘束コンクリート強度 (f_{cc}^*) が示されている。SF 混入による拘束コンクリート強度上昇を考慮するため、 f_{cc}^* を用いて Q_{ACI}^* を算出した。実験値と計算値 Q_{ACI}^* の比は 1.13 となり、SF 混入による強度上昇を考慮した場合でも差がある。

図-9 の垂直応力度分布より、SF を混入した場合、コンクリートも引張力を負担すると考えられる。そこで、解析における最大耐力時の応力度分布から算出し、コンクリート負担引張力を考慮した場合の計算値 Q_{ACI}^{**} を算出した。なお、 Q_{ACI}^{**} の算出には、SF 混入による拘束コンクリート強度の上昇も考慮して、 f_{cc}^* を用いている。SF を混入した試験体 C10-35 の実験値と計算値 Q_{ACI}^{**} の比は、1.03 とより近い値になった。SF 混入コンクリートの曲げ耐力を評価する場合、SF 混入による拘束コンクリート強度の上昇と、コンクリートの引張力負担を考慮する必要があると考える。

4. 横補強筋比の影響

実験試験体の横補強筋比 p_w の変数は 0.45% と 0.90% の 2 通りだが、 $p_w=0.1\%$ から 2.7% までを変数とした解析によるパラメトリックスタディを行った。図-10 に p_w ごとの最大耐力の違いについて示す。ここで、コンクリート引張強度以降に白井式を用いた解析結果を SF 無混入、第 2 剛性 ($=0.05E_c$) を設定した解析結果を SF1.0% 混入と仮定する。どちらの場合も p_w が大きくなるにつれて最大耐力が増加している。SF を混入したと仮定した場合、SF 無混入の場合よりも少ない横補強筋量で耐力を発揮することができ、SF を混入することで、横補強筋量を低減することができると思う。

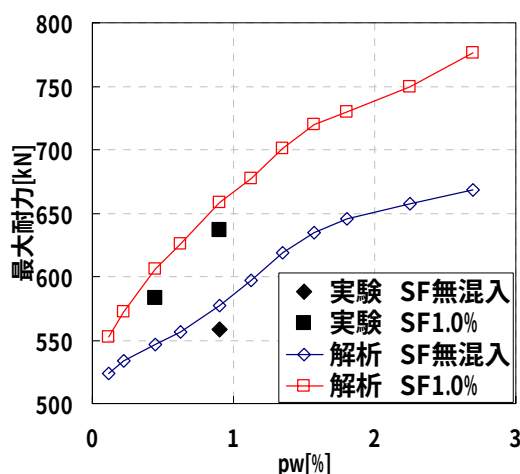


図-10 p_w ごとの最大耐力

4. まとめ

鋼繊維を混入した超高強度鉄筋コンクリート柱部材

の 3 次元 FEM 解析を行い、以下の知見を得た。

- (1) コンクリート引張応力-ひずみ関係における引張強度以降に正の第 2 剛性を設定することにより、鋼繊維混入による曲げ耐力の上昇、ひび割れ抑制効果を再現できた。
- (2) 鋼繊維を混入することにより、最大耐力時でもコンクリートが引張力を負担できるようになるために、曲げ耐力が上昇すると考えられる。

謝辞

本研究は、竹中工務店技術研究所との共同研究として行われた。竹中工務店・木村秀樹氏、上林厚志氏、Ousalem Hassane 氏、卜部藍女史には貴重な実験データの提供や多くのご指導を頂いた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 高津比呂人ほか：鋼繊維を混入した超高強度鉄筋コンクリート柱部材に関する実験的研究，竹中技術研究報告，No.58，2002
- 2) 余勇ほか：RC 構造部材の 3 次元繰返し載荷時の FEM 解析プログラムの開発（その 1，2），日本建築学会学術講演梗概集，C-2，pp.67-70，2004.8
- 3) Willam, K. J., and Warnke, E. P.: Constitutive Model for the Triaxial Behaviour of Concrete, IABSE Seminar on 'Concrete Structures subjected to Triaxial Stresses', Bergamo, Italy, 1974, Proceedings, Vol.19, pp1-31, 1975
- 4) Fafitis, F. and Shah, S. P.: Lateral Reinforcement for High Strength Concrete Columns, ACI Journal, pp.213-232, 1985
- 5) 渡辺史夫ほか：超高強度コンクリートを用いた RC 柱の曲げ強度と靱性，日本建築学会構造系論文報告集，No.446，pp.99-106，1993.4
- 6) 飯塚崇文ほか：正負交番載荷時の高強度鉄筋コンクリートの構成モデル，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.13，No.2，pp.49-54，1991.6
- 7) Al-Mahaidi, R. S. h.: Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Deep Members, Report No.79-1, Department of Structural Engineering, Cornell University, Jan.1979
- 8) 諏訪田晴彦ほか：高靱性セメント系複合材料を用いた構造要素のせん断破壊挙動に関する非線形 FEM 解析，日本建築学会構造系論文集，No.585，pp.147-154，2004.11
- 9) 佐藤稔雄ほか：鉄筋コンクリート造耐震壁の弾塑性性状に関する研究(その 6)，(その 7)，日本建築学会学術講演梗概集，pp.1615-1618，1978.9