

論文 鋼繊維混入超高強度鉄筋コンクリート柱部材の耐震性能に関する解析的研究

関口 雄平^{*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、曲げ耐力の向上や変形性能の向上、ひび割れの分散性が確認されている。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鋼繊維無混入のモデルより応力低下が緩やかなモデルを用いることで、鋼繊維混入による変形性能の向上や、ひび割れ分散効果を再現できた。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り、靱性が向上することを確認した。

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

1. はじめに

近年、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 を超える超高強度コンクリートが使用されている。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る場合がある。

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解明されていない。

吉澤ら¹⁾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、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した。本研究では、解析モデルの再検討及び繰返し載荷時での解析を行い、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 3 体で、木村ら²⁾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。図-1 に実験の載荷装置を、図-2 に試験体形状を、表-1 に材料特性を示す。

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 $p_g=2.44\%$ ）である。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 $p_w \cdot w \cdot \sigma_y=11.44\text{N/mm}^2$ ）と 4-U5.1@70（ $p_w=0.45\%$ 、 $p_w \cdot w \cdot \sigma_y=5.72\text{N/mm}^2$ ）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。

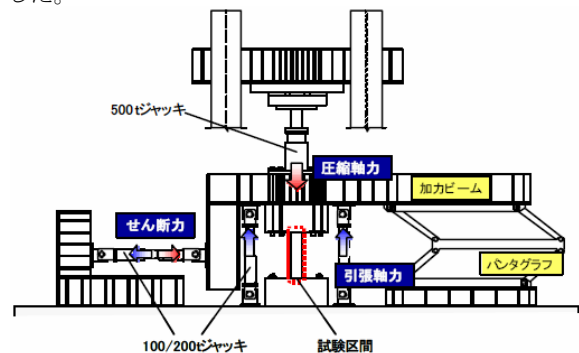


図-1 載荷装置

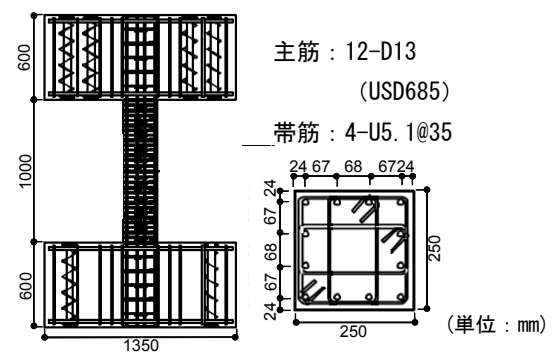


図-2 試験体形状

*1 東京都中央区役所（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）

表-1 実験材料特性

コンクリート強度				
試験体名称	SF混入量 [%]	横補強筋比 p_w [%]	圧縮強度 σ_B [N/mm ²]	弾性係数 $E_c (\times 10^4)$ [N/mm ²]
C00-35	0.0	0.90	157.9	4.30
C10-35	1.0	0.90	148.2	4.36
C10-70	1.0	0.45	148.2	4.36
鉄筋強度				
	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

表-2 解析材料特性

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
A-TS-35	0.90	白井式 (SF0%想定)
A-T0.3-35	0.90	森田・角モデル $c=0.3$ (SF1.0%想定)
A-T0.3-70	0.45	森田・角モデル $c=0.3$ (SF1.0%想定)

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

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³⁾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 節点線要素を用いた。コンクリートの破壊条件には、Willam-Warnke⁴⁾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⁵⁾を用い、圧縮軟化域は直線とした。収斂点は六車・渡邊モデル⁶⁾によって算出した。ひび割れモデルは回転ひび割れモデル、ひび割れ発生以降の圧縮強度低減には野口・飯塚式⁷⁾、ひび割れ方向のせん断伝達特性には前川モデル⁸⁾を用いた。鉄筋の応力-ひずみ関係は修正 Menegotto-Pinto モデル⁹⁾とした。鉄筋とコンクリート間の付着特性は、竹中工務店技術研究所により行なわれた超高強度コンクリートの鉄筋引抜き実験結果から導いた。付着特性を図-4 に示す。

表-2 に解析材料特性を示す。主な解析パラメータは、コンクリート引張強度以降の応力-ひずみ関係である。図-5 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。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¹⁰⁾を、SF を混入した試験体には、白井式よりも緩やかに応力が低下し

Fafitis-shah 式

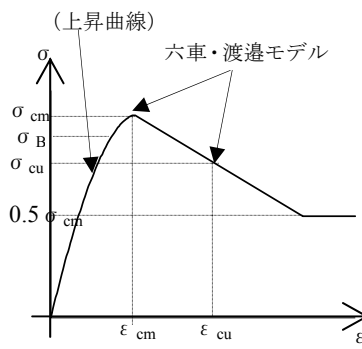


図-3 圧縮応力-ひずみ関係

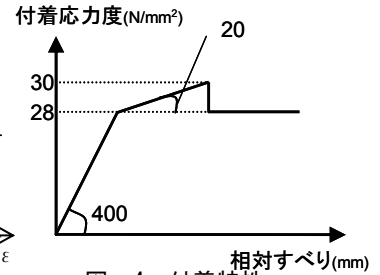


図-4 付着特性

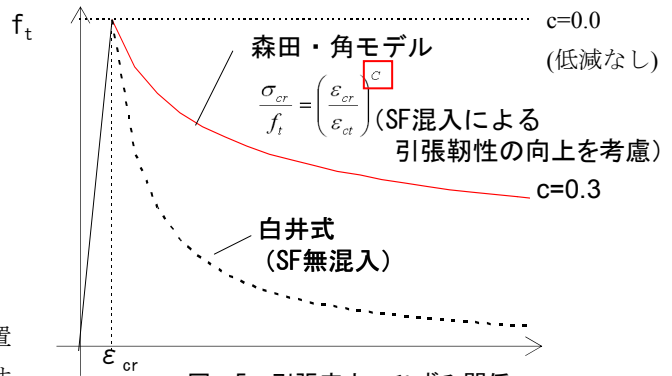


図-5 引張応力-ひずみ関係

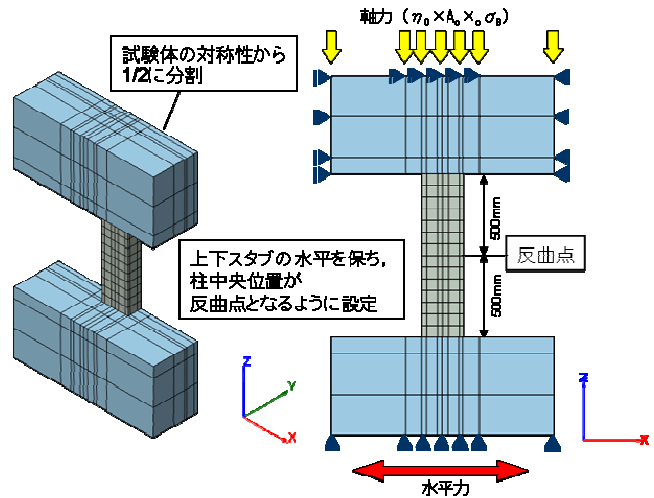


図-6 要素分割・境界条件

ていくモデル(森田・角モデル¹¹⁾のパラメータ c を 0.3 としたモデル)を用い、SF 混入の影響を考慮した。パラメータ $c=0.3$ は、竹中工務店技術研究所が行った SF 混入コンクリートの引張基礎実験の結果に基づいて決定した。

要素分割および境界条件を図-6 に示す。要素分割は試験体の対称性から Y 方向を 1/2 にし、切断面を Y 方向面ローラー支持とした。境界条件は軸力を与える際は下スタブ底面を XYZ 方向拘束、せん断力を与える際は上下のスタブの水平を保ち、柱の中央高さ位置が反曲点となるように設定し、下スタブ底面に変位制御で正負繰返し載荷した。

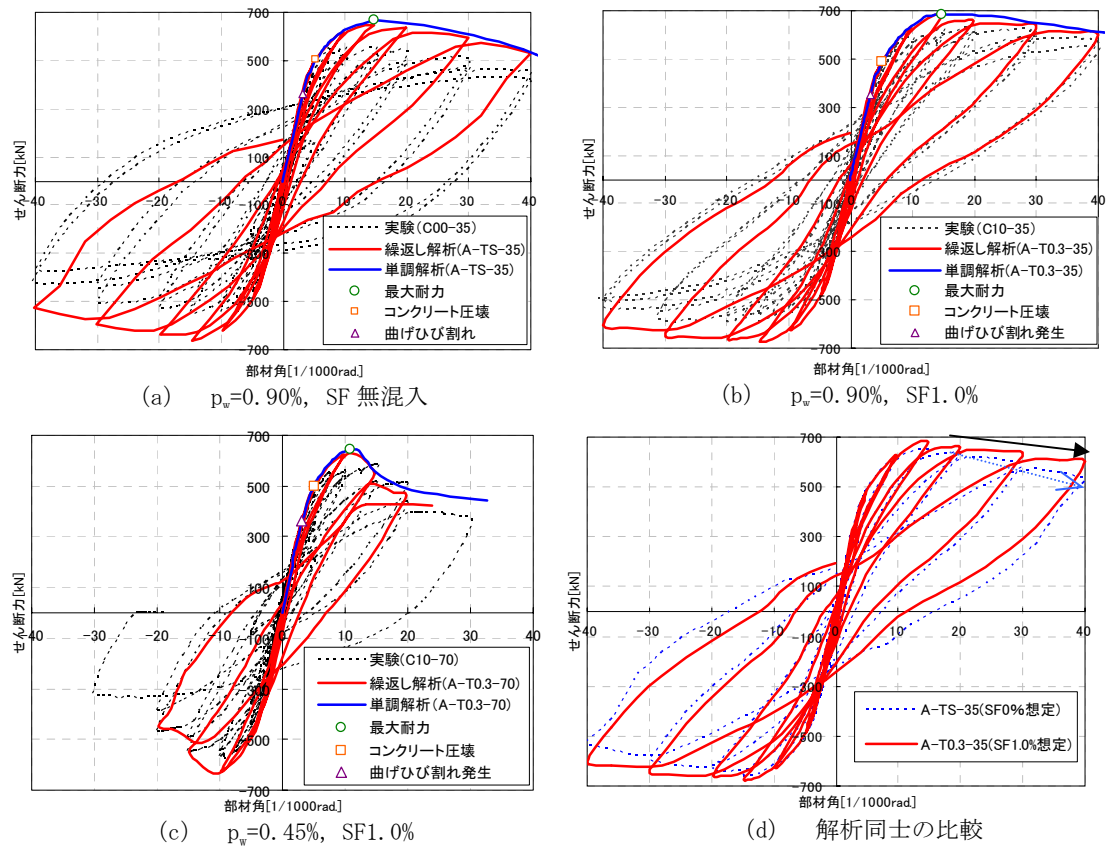


図-7 セン断力一部材角関係

3. 解析結果

3.1 セン断力一部材角関係

図-7 (a) ~ (c) に各試験体のせん断力一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、初期剛性は良好に対応しているが、最大耐力については、すべての試験体で解析が実験を上回る結果となった。解析の最大耐力が実験よりも大きくなるのは、実験は各部材角 2 サイクルの载荷を行っているが、解析では 1 サイクルの载荷としたことが原因のひとつと考えられる。

解析における $p_w=0.9\%$ の試験体 A-TS-35, A-T0.3-35 では、 $R=3/1000\text{rad}$ で柱頭・柱脚部に曲げひび割れが発生し、 $R=5/1000\text{rad}$ で被りコンクリートが圧壊、主筋が引張降伏後、 $R=15/1000\text{rad}$ 付近で最大耐力に至っている。最大耐力時における部材角と、最大耐力後の耐力低下の度合いも実験と良好に対応している。解析の $p_w=0.45\%$ の試験体 A-T0.3-70 は、曲げひび割れ発生後、コンクリート圧壊後に主筋が圧縮降伏し、最大耐力に至っている。解析では実験よりも早い $R=12/1000\text{rad}$ 付近で耐力低下している。また本解析では、柱脚部分被りコンクリートの材料特性をコアコンクリートと等しくしており、これが最大耐力において解析が実験結果を上回る原因と考えられる。

各試験体の解析の履歴ループ形状は、A-T0.3-35 では実験と良好な対応を示しているが、A-TS-35 は実験より

も、瘦せた履歴ループ形状となった。A-T0.3-70 は実験ではやや逆 S 字型のループ形状だが、解析では実験よりも若干膨らんだ形となった。

$p_w=0.90\%$ の試験体を比較すると、実験においては、SF1.0%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%増加している。図-7(d)に $p_w=0.9\%$ の解析試験体同士の比較について示す。コンクリート引張強度以降に森田・角モデルのパラメータ c を 0.3 とした試験体 A-T0.3-35 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-TS-35 に対して、最大耐力は 3%の増加だった。しかし最大耐力以降の耐力は、A-TS-35 に比べ A-T0.3-35 の方が緩やかに低下している。このことから、コンクリート引張強度以降に森田・角モデルのパラメータ c を 0.3 と設定することで引張靱性が向上し、耐力の低減を抑制できると考えられる。履歴ループ形状を比較すると、鋼繊維 1.0%混入の試験体は鋼繊維無混入の試験体に比べ瘦せたループ形状になっているが、これは鋼繊維を混入することで残留変形が小さくなることが原因と考えられる。解析においても鋼繊維無混入の A-TS-35 に比べ、1.0%混入想定 of A-T0.3-35 の履歴ループ形状が小さくなっており、実験の傾向を再現できていると考えられる。

3.2 最大主ひずみ分布およびひび割れ分布

図-8 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-TS-35 と、白井式よりも緩やかに応

力低下していくモデル(森田・角モデルのパラメータ $c=0.3$)を設定した試験体 A-T0.3-35 の最大主ひずみ分布を示す。A-TS-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-T0.3-35 では、初期の段階では A-TS-35 と違いはあまり見られないが、変形が進み、 $R=20/1000\text{rad.}$ になってもひずみの大きな領域はあまり広がっていない。

図-9 に A-TS-35 と A-T0.3-35 のひび割れ分布を、写真-1 に実験時の C-00-35 と C-10-35 の $R=10/1000\text{rad.}$ と $R=20/1000\text{rad.}$ におけるひび割れ状況を示す。

図-9 と写真-1 を比較すると、SF 無混入の試験体では、 $R=10/1000\text{rad.}$ で柱頭・柱脚部のひび割れが目立つ。 $R=20/1000\text{rad.}$ では、実験において柱頭・柱脚部のコンクリートの剥落が目立ち、柱中央部でも縦方向にひび割れが発生しているのがわかる。解析でも $R=20/1000\text{rad.}$ で柱頭・柱脚のクラックひずみが大きくなり、柱中央部までひび割れが進展しており、実験と良く対応しているといえる。SF1.0%混入の試験体は、実験では $R=20/1000\text{rad.}$ において柱頭・柱脚以外に目立ったひび割れは発生していない。解析においても柱中央部にはひび割れは発生しておらず、実験のひび割れ状況と良く対応している。

3.3 ひび割れ幅

図-10 に A-TS-35 と A-T0.3-35 の $R=5/1000\text{rad.}$ と $R=20/1000\text{rad.}$ における各要素のひび割れ幅を柱せい方向に表面側から中央に向かって A, B, C と分けて示す。

図-10 におけるグラフの奥行きは柱の高さ方向を示し、縦軸はひび割れ幅を表現している。ひび割れ幅は、引張ひずみと各要素の等価長さ（一つの要素の体積を球に置換したときの直径）の積とした。

$R=5/1000\text{rad.}$ では、A-TS-35, A-T0.3-35 で大きなひび割れ幅の差は見られないが、 $R=20/1000\text{rad.}$ において、A-TS-35 では、全体のひび割れ幅が進展している。一方 A-T0.3-35 では、柱脚・柱頭部のひび割れ幅のみが拡大している。A, B, C, の各層ごとのひび割れ幅についてみると、A-TS-35 では図中の丸で示した箇所で、被りコンクリートの A 層ではひび割れがあまり拡大していない箇所があるのに対し、コアコンクリートの B 層, C 層では、どの要素もひび割れが大きくなっている。A-T0.3-35 では A, B, C, 層の柱中央部において A-TS-35 のようなひび割れ幅の大きい箇所の偏りはみられない。このように、コンクリート引張強度以降に白井式を用いたモデルに比べ、森田・角モデルのパラメータ $c=0.3$ を

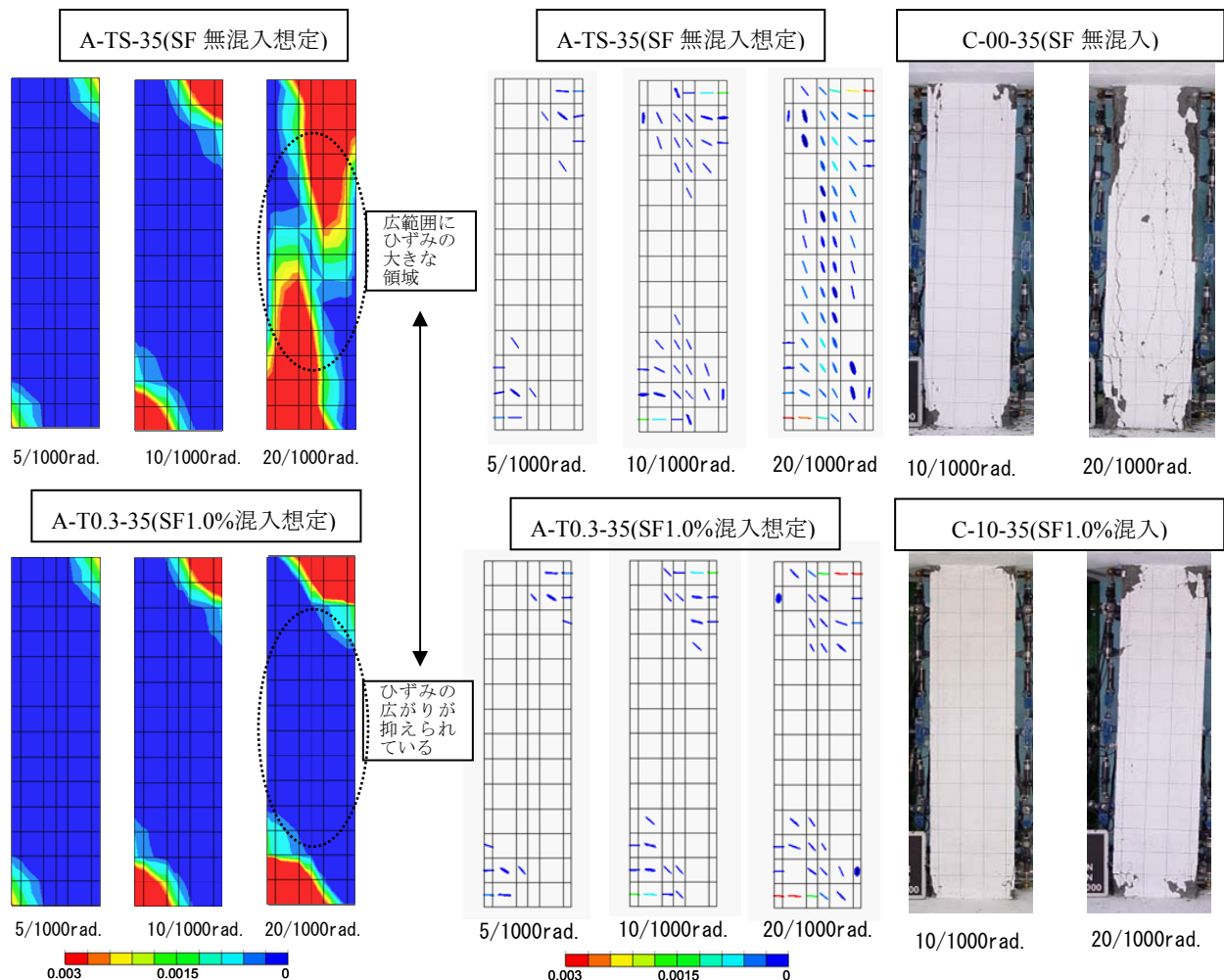


図-8 最大主ひずみ分布

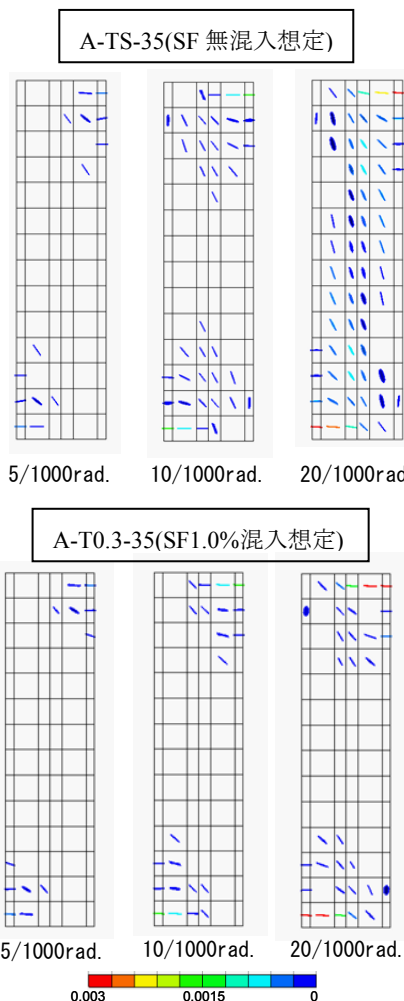


図-9 ひび割れ分布

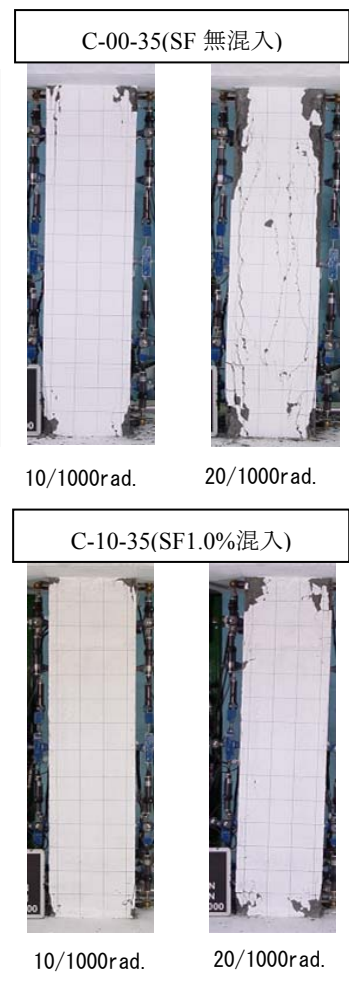
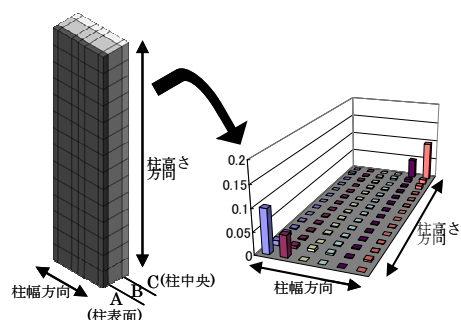


写真-1 ひび割れ状況

設定したモデルでは、A、B、C、の各層ごとのひび割れの偏りが抑えられていることがわかる。実験では、SF 混入によりひび割れ本数の低減や、ひび割れが局所化せず、分散して入ることが確認されている。このことから、解析においても、ひび割れ抑制の効果や、ひび割れの分散性を再現できたと考える。

3.4 柱の軸方向圧縮ひずみ

図-11 に柱軸方向圧縮ひずみと部材角の関係を示す。実験における軸方向圧縮ひずみは、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。実験結果を見ると、SF 混入試験体は SF 無混入のものより軸方向のひずみの進展が抑えられている様子がわかる。解析同士を比較すると、コンクリート引張強度以降に白井式を用いたものが $R=12/1000\text{rad}$ 付近から軸方向ひずみの進展が始まっているのに対し、森田・角モデルのパラメータ $c=0.3$ を設定したモデルは、軸方向ひずみの進展が抑えられており、実験と同様の傾向をとらえている。せん断力-部材角関係の解析同士の比較においても $R=12/1000\text{rad}$ 付近で A-TS-35 の耐力低下が始まり、同様の傾向がみられる。

実験と解析を比較すると、 $p_w=0.90\%$ で SF 無混入の試験体では、実験よりも解析の方が軸ひずみが抑えられている。これは、本解析では、被りコンクリートの材料特性をコアコンクリートと同じ値に設定しており、特に危険断面位置での主筋およびコンクリートの負担圧縮力を過小評価した為と考えられる。これについては、 $p_w=0.45\%$ で SF1.0%混入の試験体でも同様の傾向が見られる。

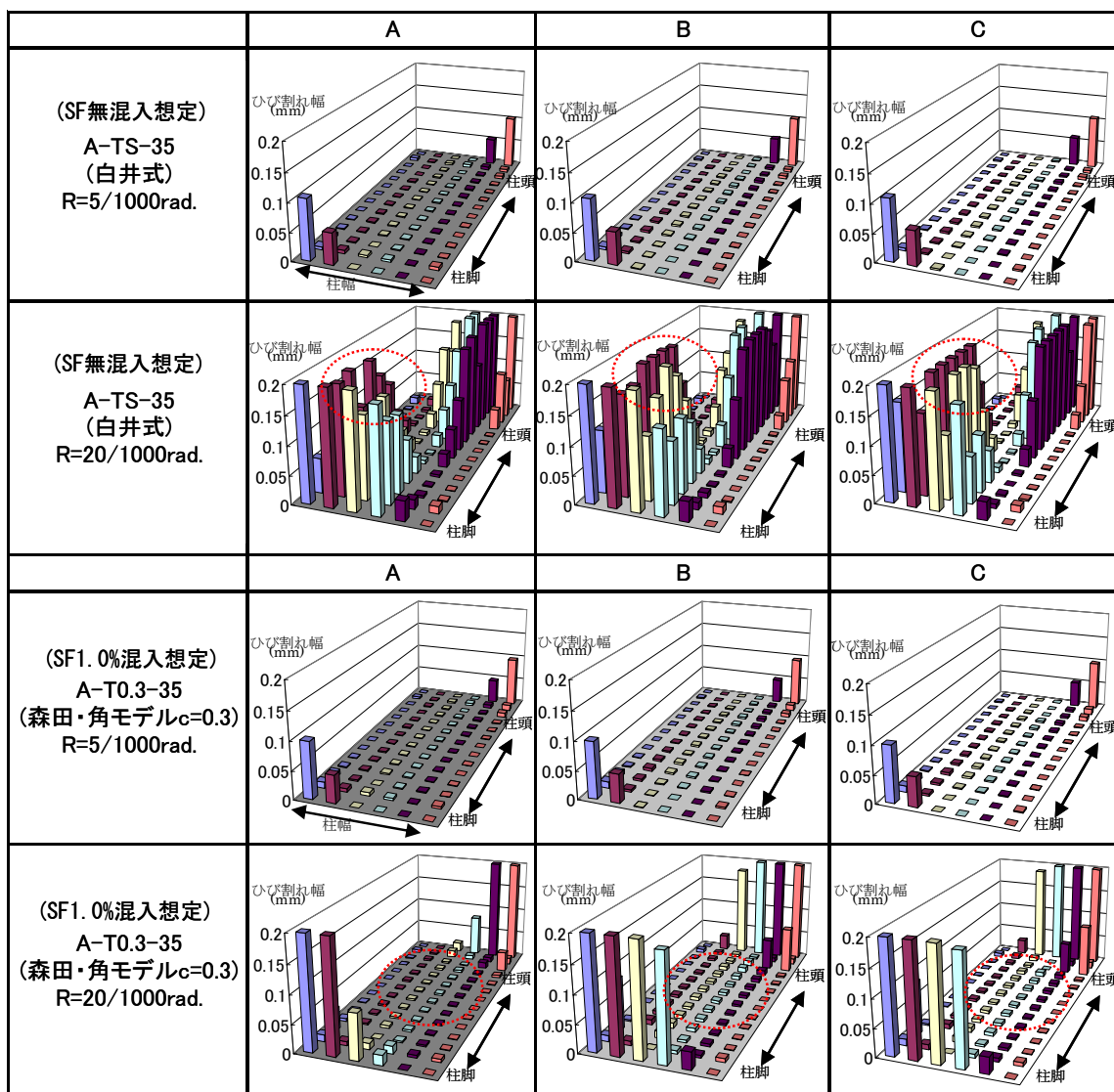


図-10 各要素ひび割れ幅

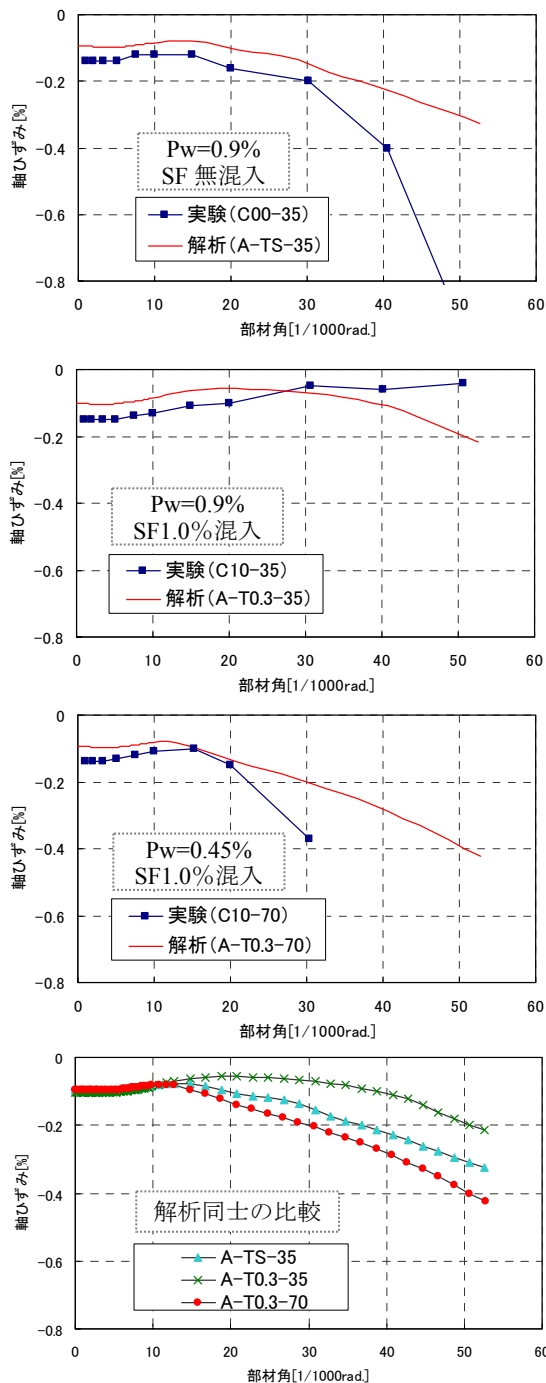


図-11 軸方向ひずみ-部材角関係

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白井式よりも応力低下が緩やかなモデルを設定することで、履歴ループ形状や柱の軸ひずみの進展抑制など、概ね実験と良好に対応した。

(2) 鋼繊維を混入することで引張ひずみの進展を抑え、ひび割れ幅の拡大抑制や、ひび割れの分散性を発揮することを解析でも確認した。

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、Ousaleem Hassane 氏、ト部藍女史には貴重な実験データの提供や多くのご助言を頂きました。ここに感謝の意を表します。

また、本研究の一部は、科学研究費補助金・基盤研究C(研究代表者：野口博)により行われた。

参考文献

- 1) 吉澤徳康, 柏崎隆志, 野口博, 高津比呂人: 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, コンクリート工学年次論文, Vol.31, No.2, pp.199-204, 2009
- 2) 木村秀樹, 高津比呂人, 石川裕次, 武田浩: 鋼繊維を混入した高強度コンクリート RC 柱に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.25, No.2, pp.235-240, 2003
- 3) 余勇, 柏崎隆志, 野口博: 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
- 4) 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, Proceeding, Vol.19, pp.1-31, 1975
- 5) Fafitis, F. and Shah, S. P.: Lateral Reinforcement for High Strength Concrete Columns, ACI Journal, pp.213-232, 1985
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 前川宏一, 福浦尚之: 疑似直交2方向ひび割れを有する平面 RC 要素の空間平均化構成モデルの再構築, 土木学会論文集, No.634/V-45, pp.157-176, 1999.11
- 9) Ciampi, V. and Paolo, E., "Analytical Model for Concrete Anchorages of Reinforcing Bars Under Generalized Excitations," Report No.UCB/EERC-82/23, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Nov.1982
- 10) 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
- 11) 森田司郎: 鉄筋コンクリート部材の引張試験による付着効果の研究, セメント技術年報, Vol.18, pp.426-430, 1963