

# 論文 超高強度鋼繊維補強コンクリートを用いた RC 造柱の曲げ性状に関する実験的研究

鈴木 彩夏\*1・増田 安彦\*2・吉田 理紗\*1・神代 泰道\*2

**要旨:** 超高強度鋼繊維補強コンクリートを用いた RC 柱部材の曲げせん断実験を実施した。鋼繊維コンクリートの施工性や経済性を考慮し、鋼繊維体積混入率をパラメーターとした結果、混入率が高いほど圧壊進展の抑制効果が高く靱性が向上する傾向が確認された。また、超高層建物の 1 階柱に使用されることを想定してシアスパン比を実状に近い値に設定し、圧壊による脆性的な耐力低下がなく十分な靱性が発揮されることを確認した。1 階柱と地下階の接合部を模して柱とスタブに強度差を設けたところ、柱頭・柱脚周辺のスタブコンクリート表面の浮き上がりや柱主筋がスタブから抜け出す現象が観察された。

**キーワード:** 超高強度コンクリート, 柱, 鋼繊維

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート造の超高層化に伴い、超高強度コンクリートの開発が進んでいる。設計基準強度  $F_c=100\text{N/mm}^2$  (以下、 $F_c100$  と略記、他強度も同様) を超える超高強度コンクリートを使用した柱部材については、既にいくつかの実験結果から、曲げ降伏先行型として設計した柱部材が、かぶりコンクリートの脆性的な圧壊により一時的に急激な耐力低下を起こす現象が確認されている<sup>1)</sup>。その改善方法として、鋼繊維補強コンクリートを使用し、かぶりの圧壊を防ぐとともに靱性を確保する方法が提案されている<sup>2)</sup>。そこで、施工性や経済性を考慮し、鋼繊維体積混入率をパラメーターとした RC 柱部材曲げせん断実験を実施した。また、超高層建物の 1 階柱に使用されることを想定し、シアスパン比を実状に近い値に設定して、曲げ性能が十分に発揮されることを確認した。本報では、これらの曲げせん断実験および検討結果について述べる。

## 2. 曲げせん断実験

### 2.1 実験概要

試験体諸元を表-1 に、試験体断面および配筋詳細を

図-1 に示す。使用材料の特性を表-2~表-4 に示す。

試験体はすべて曲げ降伏先行型である(各種耐力は文献 3)を参考に求めた)。なお、付着割裂破壊を避けるため、横補強筋比  $p_w$  ( $p_w=a_w/bx$ ,  $a_w$ : 1 組の横補強筋の断面積,  $x$ : 横補強筋の間隔) は実部材レベルより大きな値とした。実験変数は、鋼繊維混入率、シアスパン比(M/QD) および軸力比である。試験体は、鋼繊維の体積混入率を 1.0% (80kg/m<sup>3</sup>) とした 3 体 (F120-SF10-2c, F120-SF10-2cL, F120-SF10-4c), 0.5% (40kg/m<sup>3</sup>) とした 2 体 (F120-SF05-2c, F120-SF05-4c) の合計 5 体である。

M/QD=2 の基本的な曲げ性能を把握する試験体に加え、超高層建物の 1 階柱では反曲点が柱頭に近い位置、あるいはそれよりも高くなる傾向を踏まえ、M/QD=4 のキャンチレバー形試験体を計画した。軸力比は、M/QD=2 の試験体では、高軸力 ( $\eta=0.4$ ,  $\eta=N/bDF_c$ ,  $N$ : 軸力,  $b$ : 柱幅,  $D$ : 柱せい,  $F_c$ : コンクリート設計強度) および低軸力 ( $\eta=0.15$ ) とした。M/QD=4 の試験体では、加力治具の能力により軸力比  $\eta=0.15$  のみとした。

また、一般に 1 階柱が取り付く地下階の柱梁接合部は 1 階柱コンクリートより低強度であることから、スタブ部分のコンクリート強度は  $F_c80$  とし、スタブからの主

表-1 試験体諸元

試験体	F120-SF10-2c	F120-SF05-2c	F120-SF10-2cL	F120-SF10-4c	F120-SF05-4c
$F_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]	120				
$b \times D$ [mm]	350 × 350				
シアスパン比(M/QD)	2			4	
軸力比 $\eta$	0.4			0.15	
主筋	12-D19(SD490) ( $p_g=2.81\%$ )				
帯筋	目-D10@50 (SD785) ( $p_w=1.63\%$ )			目-D10@80 (SD785) ( $p_w=1.01\%$ )	
鋼繊維体積混入率[%]*	1.0	0.5	1.0	1.0	0.5

\*コンクリートの外割とする

\*1 大林組 技術研究所 工修 (正会員)

\*2 大林組 技術研究所 工博 (正会員)

筋の抜け出しについて着目することにした。

加力装置を図-2に示す。加力は表-1に示す一定軸力を作用させた状態で水平力を載荷する正負交番繰り返し載荷とし、部材角  $R = \pm 2.5, 5.0, 10, 20, 33, 50 \times 10^{-3} \text{rad}$  ( $R = \delta/h_0$ ,  $\delta$ : 水平変位,  $h_0$ : 内法高さ ( $M/QD=2$ ) または反曲点高さ ( $M/QD=4$ )) を各 2 回繰り返したあと、 $R = 100 \times 10^{-3} \text{rad}$  程度の大変形まで載荷した。

## 2.2 荷重-変形関係

図-3に各試験体の水平荷重  $Q$ -水平変位  $\delta$  関係を、図-4に  $M/QD$  ごとに鋼繊維混入率による  $Q$ - $\delta$  関係包絡線の比較を、表-5に実験結果一覧を示す。ここで、水平荷重  $Q$  は、軸力による  $P$ - $\Delta$  効果および鉛直アクチュエーターの傾きによる水平力を補正した値である。また、包絡線荷重が最大耐力の 80% まで低下したときの部材角  $R$  を限界変形角  $R_u$  [ $\times 10^{-3} \text{rad}$ ] とした。

### (1) 高軸力試験体 (F120-SF10-2c, F120-SF05-2c)

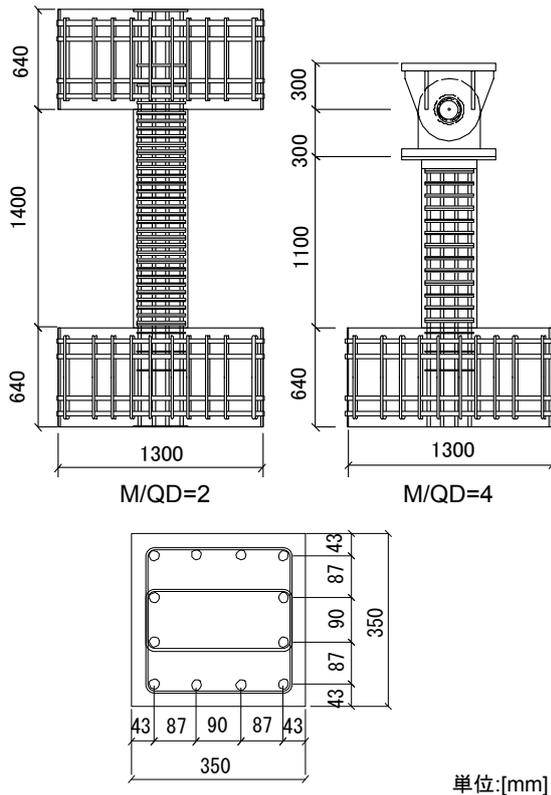


図-1 試験体断面および配筋詳細

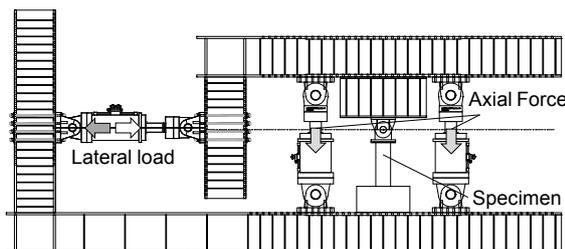


図-2 加力装置

$R = 2.5 \times 10^{-3} \text{rad}$  のサイクルで柱頭および柱脚に曲げひび割れ、 $R = 5.0 \times 10^{-3} \text{rad}$  のサイクルで圧縮側柱頭・柱脚に圧壊開始に伴うタテひび割れが発生した。 $R = 10 \times 10^{-3} \text{rad}$  のサイクルで主筋が圧縮降伏し、 $R = 20 \times 10^{-3} \text{rad}$  のサイクルで最大荷重に至った。このサイクルでは、せん断ひび割れに加えて、柱端部から 1D を除いた全区間にわたり中間主筋に沿って細かな斜めひび割れが連続して発生した。 $R = 50 \sim 100 \times 10^{-3} \text{rad}$  にかけて、危険断面から  $D/2$  程度の範囲で圧壊に伴うコンクリートの剥落が進展した。

両試験体の変形性状は、 $R = 33 \times 10^{-3} \text{rad}$  に至るまで大きな差はなく、最大耐力もほぼ同じ値だった。その後、F120-SF05-2c のほうが F120-SF10-2c より耐力が低下した。これは、鋼繊維の体積混入率の違いが圧壊の進展状況に若干の影響を及ぼしたためだと考えられる。なお、いずれの試験体も鋼繊維無混入試験体で観察されるような激しい圧壊や急激な耐力低下はみられなかった。

### (2) 低軸力試験体 (F120-SF10-2cL)

$R = 2.5 \times 10^{-3} \text{rad}$  のサイクルで柱頭および柱脚に曲げひび割れが発生し、 $R = 10 \times 10^{-3} \text{rad}$  のサイクルで主筋が引張降伏した。 $R = 100 \times 10^{-3} \text{rad}$  に至るまで耐力低下はほとんどなく、最大耐力の 80% 以上を保持した。また、 $R = 33 \times 10^{-3} \text{rad}$  以降、スタブコンクリート表面に浮きが観察され、履歴曲線は若干スリップ性状を示した。

### (3) $M/QD=4$ の試験体 (F120-SF10-4c, F120-SF05-4c)

$R = 2.5 \times 10^{-3} \text{rad}$  のサイクルで柱脚に曲げひび割れが發

表-2 コンクリートの材料特性 (単位  $[\text{N}/\text{mm}^2]$ )

	$\sigma_B$ 圧縮 強度	$E_c$ ヤング 係数	$\sigma_t$ 引張 強度
F120-SF10-2c	158	$4.96 \times 10^4$	9.80
F120-SF05-2c	163	$4.50 \times 10^4$	8.56
F120-SF10-2cL	148	$4.95 \times 10^4$	10.5
F120-SF10-4c	155	$5.00 \times 10^4$	7.67
F120-SF05-4c	171	$5.06 \times 10^4$	10.4
スタブ	101	$4.57 \times 10^4$	—

表-3 鉄筋の材料特性 (単位  $[\text{N}/\text{mm}^2]$ )

鋼種	$\sigma_y$ 降伏強度	$\sigma_t$ 引張強度	$E_s$ ヤング係数
D19 (SD490)	524	692	$1.98 \times 10^5$
D10 (SD785)	858	1056	$2.15 \times 10^5$

表-4 鋼繊維の材料特性

	形状	径 [mm]	長さ [mm]	密度 [g/cm <sup>3</sup> ]	引張強度 [N/mm <sup>2</sup> ]
SF	フック型	0.62	30	7.85	1190

SF の形状:

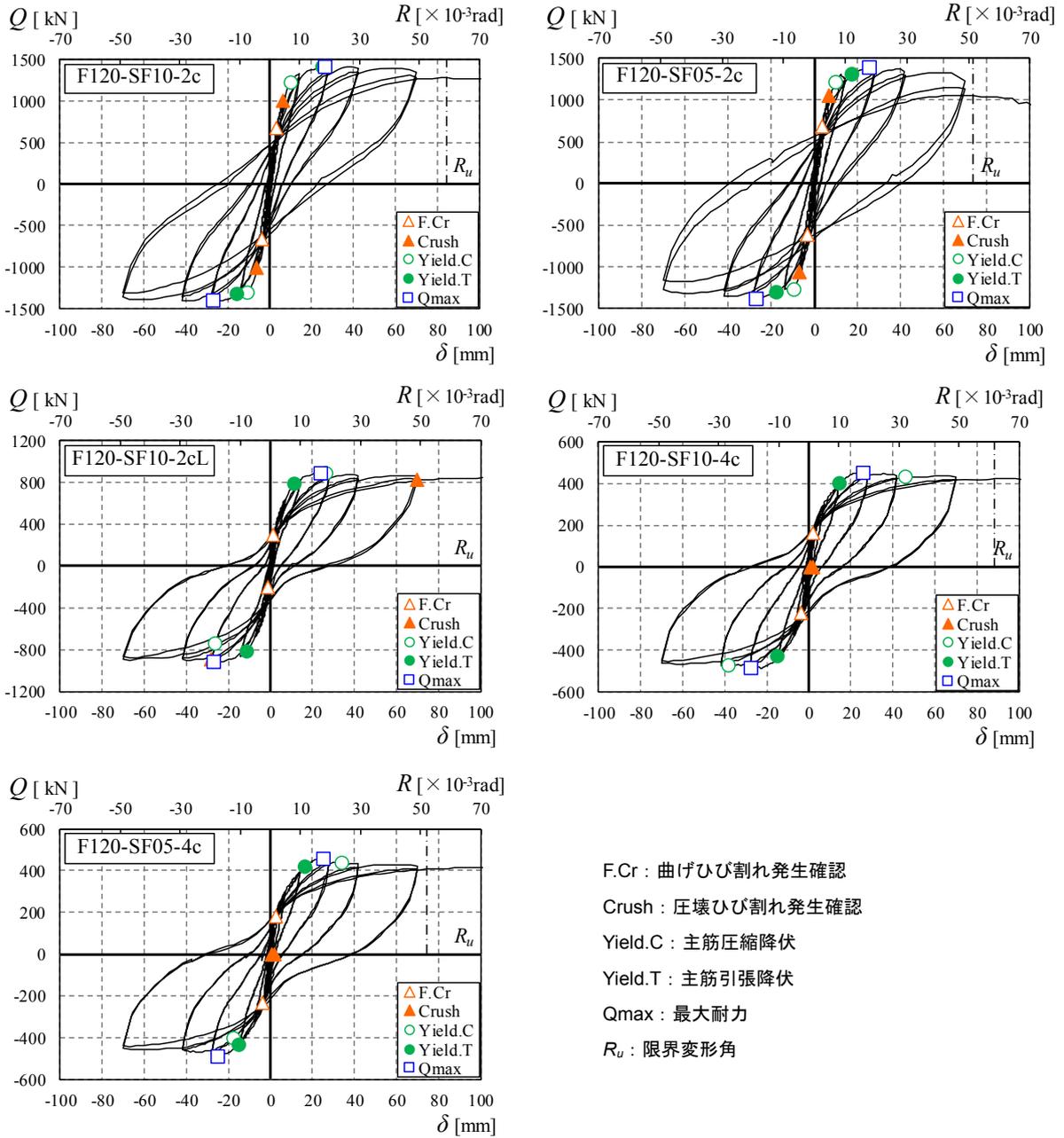


図-3 水平荷重  $Q$ —水平変位  $\delta$  関係

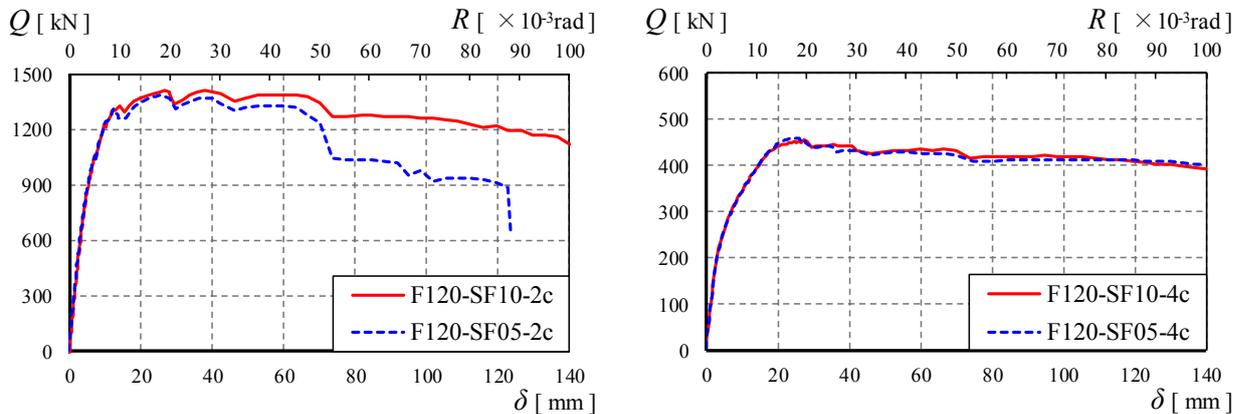


図-4 鋼繊維混入率による  $Q$ — $\delta$  関係包絡線の比較

生し、 $R=10 \times 10^{-3} \text{rad}$  のサイクルで主筋が引張降伏した。  
 $R=20 \times 10^{-3} \text{rad}$  のサイクルで最大耐力に至った。

両試験体の変形性状は、最終変位に至るまで大きな差はなかった。これは、シアスパン比や軸力比の条件で、圧壊の進展が少なく、鋼繊維による補強効果の違いが表れにくかったためだと考えられる。また、F120-SF10-2cLと同様に、 $R=33 \times 10^{-3} \text{rad}$  以降、スタブコンクリート表面に浮きが観察され、履歴曲線は  $M/QD=2$  の試験体と比較して若干スリップ性状を示した。

### 2.3 破壊性状

各試験体の  $R=10 \times 10^{-3} \text{rad}$  および  $R=50 \times 10^{-3} \text{rad}$  における破壊状況を図-5 に示す。

#### (1) 高軸力試験体 (F120-SF10-2c, F120-SF05-2c)

$R=10 \times 10^{-3} \text{rad}$  まで両試験体に大きな差は見られなかったが、その後は鋼繊維混入率が高いと圧壊によるかぶりコンクリートの剥落面積がやや小さい傾向が見られた。

#### (2) 低軸力試験体 (F120-SF10-2cL)

$R=50 \times 10^{-3} \text{rad}$  以降、曲げせん断ひび割れが多数見られた。圧壊に伴うかぶりコンクリートの剥落は、材端部で

わずかに見られた程度であった。

#### (3) $M/QD=4$ の試験体 (F120-SF10-4c, F120-SF05-4c)

$R=100 \times 10^{-3} \text{rad}$  まで両試験体に大きな差は見られなかった。いずれの試験体も曲げせん断ひび割れが多数見られ、柱脚部約  $D/2$  の範囲で圧壊に伴いかぶりコンクリートが剥落した。

## 3. 実験結果の検討

### 3.1 最大耐力

図-6 に鋼繊維引張強度  $\sigma_{y(SF)}$  ・体積混入率  $V_{SF}$  の積と最大耐力の実験値  $Q_{max.exp}$  / 計算値  $Q_{max.cal}$  の関係を示す。同図中には、コンクリート強度  $\sigma_B=115 \sim 160 \text{N/mm}^2$  における実験結果を参考値として示す<sup>2),4)~6)</sup>。論文に記載のない場合、コンクリートの引張強度  $\sigma_t$  は文献<sup>12)</sup>より算出し、圧縮強度時ひずみ度は  $3300 \times 10^{-6}$  とした。

計算値  $Q_{max.cal}$  は、ファイバーモデルによる断面解析で求めた。コアコンクリートの応力度-ひずみ度関係に、拘束効果を考慮した NewRC モデル<sup>7)</sup>、補強筋より外側の要素については、拘束効果なしとした修正 Ahmad モデ

表-5 実験結果一覧

試験体		F120-SF10-2c	F120-SF05-2c	F120-SF10-2cL	F120-SF10-4c	F120-SF05-4c
初期剛性 [kN/mm]	Exp	185	177	168	71.1	67.6
	Cal	169	170	169	73.4	74.2
	Exp/Cal	1.09	1.04	1.00	0.97	0.91
最大耐力 [kN]	Exp	1407   -1411	1383   -1378	894   -923	452   -485	461   -485
	Cal	1176	1181	782	397	407
	Exp/Cal	1.20	1.17	1.16	1.18	1.16
主筋圧縮降伏 [kN]	Exp	1214   -1307	1218   -1268	886   -737	427   -426	442   -398
	Cal	1092	1121	-	-	-
	Exp/Cal	1.15	1.11	-	-	-
主筋引張降伏 [kN]	Exp	1403   -1322	1311   -1305	786   -822	401   -429	420   -431
	Cal	1170	1175	667	337	335
	Exp/Cal	1.16	1.11	1.12	1.23	1.27
限界変形角 $R_u$ [%]	Exp	6.03	5.26	5.28	6.3	5.3

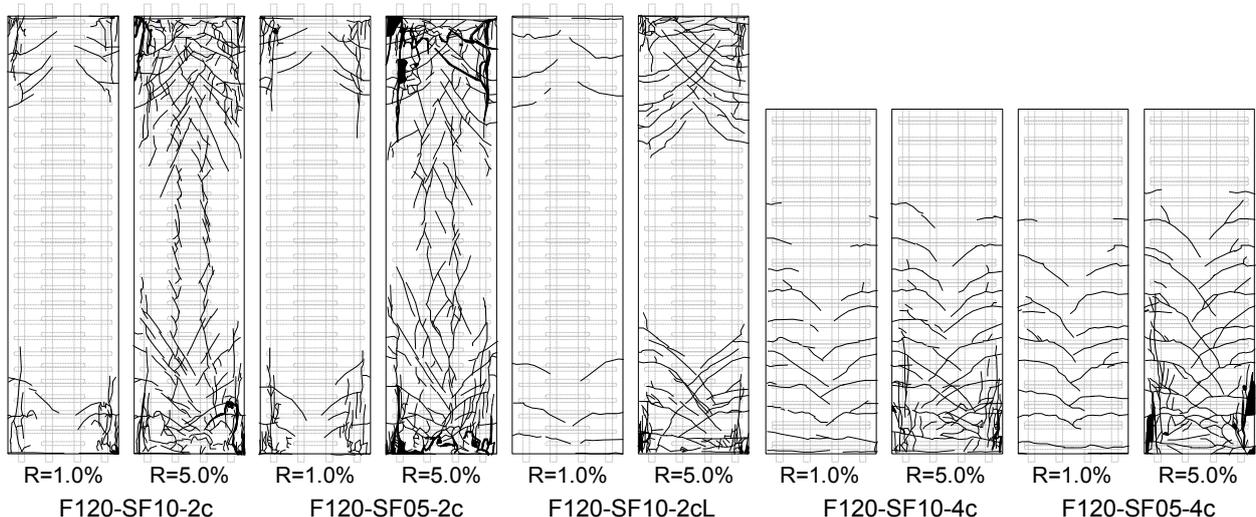


図-5 破壊状況

ル<sup>8)</sup>を使用し、引張強度以降は応力度を0とした。これは、鋼繊維補強コンクリートは、体積混入率の増大に応じて圧縮および引張強度以降の応力下降勾配が緩やかになることが予想されるものの、テストピースによる材料試験ではその確認が困難であったためである。鉄筋については、降伏後の剛性を初期剛性の1/100とするバイリニアモデルとした。

図-6の同一記号どうしを比較すると、最大耐力の実験値/計算値は、 $\sigma_{y(SF)} \cdot V_{SF}$ の増大に応じて大きくなる傾向が確認された。

### 3.2 限界変形角

文献9)では、限界変形角は、軸力比 $\eta$ の-0.5乗および横補強筋比 $p_w$ と降伏強度 $\sigma_{wy}$ の積に比例することが示されている。鋼繊維試験体では、繊維によりコンクリートの圧壊進展が抑制され、靱性が向上することが予測される。そこで、 $\alpha \cdot \sigma_{y(SF)} \cdot V_{SF}$ を新たな指標とし、 $p_w \cdot \sigma_{wy}$ に累加して、 $\eta$ の-0.5乗との積を求め、限界変形角 $R_u$ との関係を調べた結果を図-7に示す。補正係数 $\alpha$ は、プロットした点から近似式を導出する際の残差平方和が最小になるように求めた結果、 $\alpha=0.095$ となった。同図中には文献2), 4), 5)による値および近似式を併せて示す。限界変形角 $R_u$ は、 $(p_w \cdot \sigma_{wy} + \alpha \cdot \sigma_{y(SF)} \cdot V_{SF}) / \sqrt{\eta}$ の増大に応じて大きくなる傾向が得られた。

### 3.3 降伏点剛性低下率

文献10), 11)では、降伏点剛性低下率 $\alpha_y$ は、超高強度コンクリートでは普通コンクリートと比べて軸力比の影響をより大きく受けることが示されている。ここでは、コンクリート強度 $\sigma_B=55\sim 168\text{N/m}^2$ を対象に、既往式<sup>12)</sup>における軸力比 $\eta$ の項の係数を0.169から1.97に割増した式(1)を用い、実験値と良好に適合することが報告されている。そこで、本実験でも同式を用いて評価することとした。併せて、シアスパン比が2以上の場合においても、同様に降伏点剛性低下率 $\alpha_y$ が軸力比の影響を受けると仮定し、 $M/QD=2$ で式(1)と $\alpha_y$ の値が連続するように、

既往式<sup>12)</sup>の軸力比 $\eta$ の項の係数を0.33から2.32に割増し、式(2)を導出した。

・  $M/QD \leq 2$  の場合

$$\alpha_y = (-0.0836 + 0.159 \cdot (M/QD) + 1.97 \cdot \eta_o) \cdot (d/D)^2 \quad (1)$$

・  $M/QD \geq 2$  の場合

$$\alpha_y = (0.043 + 1.64np_i + 0.043 \cdot (M/QD) + 2.32 \cdot \eta_o) \cdot (d/D)^2 \quad (2)$$

$M/QD$ : シアスパン比  $\eta_o$ : 軸力比 (=  $N/bDF_c$ )  $N$ : 軸力  
 $n$ : ヤング係数比  $p_i$ : 引張鉄筋比

図-8に降伏点剛性低下率 $\alpha_y$ の実験値および計算値の比較を示す。図中には過去に実施した試験体<sup>1)</sup>(鋼繊維無、外殻プレキャストなど)の結果も示す。実験値は、主筋の引張または圧縮降伏のうち先に降伏した点を降伏点とし、その割線剛性とした。鋼繊維試験体については、シアスパン比に関わらず実験値と計算値は概ね一致し、提案式により良好に評価できた。一方、過去に実施した無混入の試験体ではやや過大評価であった。

### 3.4 柱主筋の抜け出し

柱とスタブにコンクリート強度差がある場合において、柱主筋がスタブから抜け出す現象を確認するため、スタブ浮き上がり変位 $\delta_s$ と柱脚目開き変位 $\delta_c$ について着目する。図-9に $\delta_s$ ,  $\delta_c$ の定義を示す。柱脚目開き変位 $\delta_c$ は、スタブ浮き上がり変位 $\delta_s$ と柱脚ひび割れ幅の和とした。図-10にスタブ浮き上がり変位 $\delta_s$ -水平変位 $\delta$ の関係を、図-11に柱脚目開き変位 $\delta_c$ -水平変位 $\delta$ の関係をそれぞれ示す。

図-10, 11より、 $\delta=40\text{mm}$ 以降において繊維混入率が高いほどスタブ浮き上がり変位や柱脚目開き変位が大きくなった。文献13)では、鋼繊維により付着強度が向上することが報告されている。すなわち、混入率に応じて柱内で主筋の付着性能が向上し、強度の低いスタブから柱主筋の抜け出しが顕著になる可能性がある。この現象が

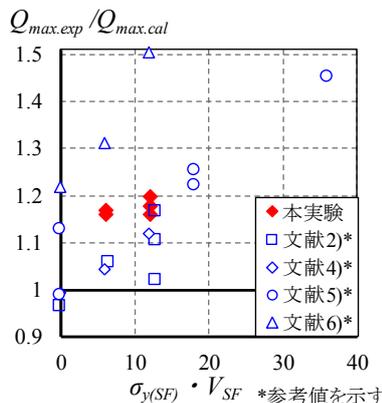


図-6 最大耐力

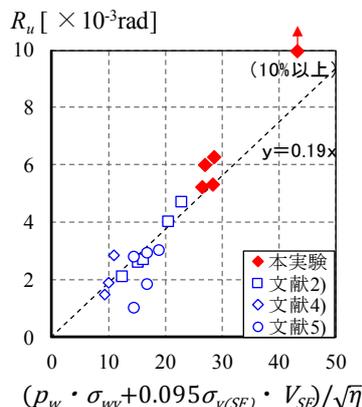


図-7 限界変形角

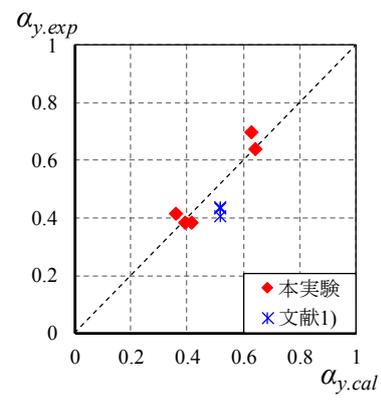


図-8 降伏点剛性低下率

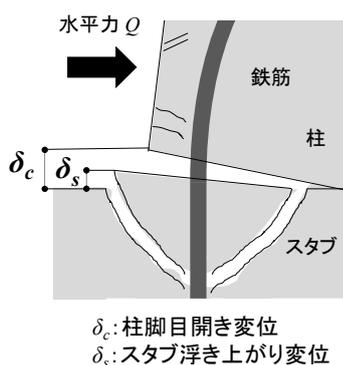


図-9 柱脚目開き変位の定義

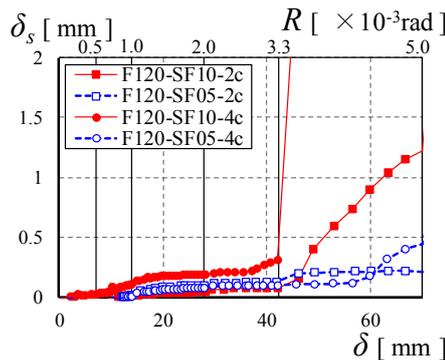


図-10 スタブ浮き上がり変位  $\delta_s$  の推移

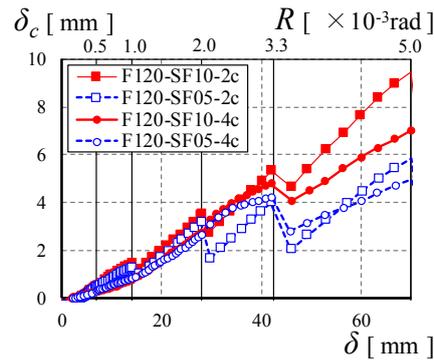


図-11 柱脚目開き変位  $\delta_c$  の推移

架構の履歴性状や柱梁接合部の損傷に影響を及ぼすことが懸念されるが、抜け出し量を定量的に把握するためには今後の更なる検討が必要である。

#### 4. まとめ

超高強度鋼繊維補強コンクリートを用いた RC 造柱部材の曲げせん断実験を行い、以下の知見を得た。

- 1)  $M/QD=2$  の場合、鋼繊維  $40\text{kg/m}^3$  を混入した試験体に対し  $80\text{kg/m}^3$  混入試験体は、圧壊進展の抑制効果が高く靱性が向上する傾向が確認された。 $M/QD=4$  の場合、鋼繊維混入量の違いによる靱性への影響は見られなかった。
- 2) 最大耐力の実験値/計算値は、鋼繊維引張強度  $\sigma_y(SF)$  と体積混入率  $V_{SF}$  の積の増大に応じて大きくなる傾向が確認された。
- 3) 限界変形角は、横補強筋比と降伏強度の積  $\rho_w \cdot \sigma_{wy}$  と  $\sigma_y(SF) \cdot V_{SF}$  の和が増大するほど大きくなる傾向が得られた。
- 4) 本実験における柱の降伏点剛性低下率は、既存式の軸力比の項の係数を割増することにより、評価可能であった。
- 5) 1 階柱と地下階の接合部を模して柱とスタブに強度差を設けたところ、スタブ表面コンクリートの浮き上がりや柱主筋がスタブから抜け出す現象が観察された。鋼繊維混入率が高いほど、柱脚目開き変位が大きい傾向が見られた。

#### 参考文献

- 1) 杉本訓洋, 増田安彦, 津田和明, 長沼一洋: 超高強度コンクリートを用いた RC 柱部材の曲げせん断実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.3, pp.541-546, 2007.7
- 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集, Vol.25, No.2, pp.235-240, 2003.7
- 3) 日本コンクリート工学会: 高強度コンクリート

構造物の構造性能研究委員会 報告書・論文集, 2006.7

- 4) 石川裕次ほか: 高強度 SFRC 柱の曲げ性能に関する実験的研究 その 1, その 2, 日本建築学会大会学術講演梗概集 pp.305-308, 2018.9
- 5) 木村秀樹, 石川裕次: 鋼繊維混入高強度コンクリート RC 柱の曲げせん断実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.3, pp.211-216, 2001.7
- 6) 澤口香織ほか: 鋼繊維や鋼板巻立てによって補強した超高強度 RC 柱 (Fc120) の曲げせん断実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.345-346, 2018.9
- 7) 崎野健治, 孫玉平: 直線型横補強材により拘束されたコンクリートの応力-ひずみ関係, 日本建築学会構造系論文集, No.461, p.95-104, 1994.7
- 8) 長沼一洋: 三軸圧縮下のコンクリートの応力-ひずみ関係, 日本建築学会構造系論文集, No.474, pp.163-170, 1995.8
- 9) 石川裕次, 木村秀樹: 高強度材料を用いた RC 柱部材の限界変形に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.16, No.1, pp.55-66, 2005.1
- 10) 熊澤啓輔ほか: 高強度材料を用いた RC 柱部材の構造性能に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.433-434, 2001.9
- 11) 奥田将人, 鹿野仁史, 中野克彦, 松崎育弘: 150MPa 級のコンクリートを用いた RC 柱部材の構造性能に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp.283-288, 2004.7
- 12) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 1998
- 13) 松林卓, 竹内秀聡, 原夏生, 三島徹也: 鋼繊維補強コンクリートによる鉄筋の付着性能向上に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.3, pp.607-612, 200