

論文 コンクリート充填鋼管短柱の圧縮特性に及ぼす繊維補強効果に関する基礎的研究

山本 貴正*1・川口 淳*2・山田 和夫*3

要旨: CFT 柱の充填コンクリートの超高強度化に伴う靱性の低下を改善するため、従来から多くの研究成果が蓄積されている高靱性の繊維補強コンクリートに着目し、CFT 柱構造の耐力・靱性を表す指標となる CFT 短柱の圧縮特性に及ぼす高張力鋼繊維による補強の効果について、既往の研究成果も踏まえて実験的に考察した。その結果、i) 最大圧縮耐力に及ぼす繊維補強効果は認められない、ii) 最大耐力到達直後の変形性状に及ぼす繊維補強効果は、幅厚比が大きい、コンクリート強度レベルが高いほど、明確に認められない、iii) 最大圧縮耐力到達後の最小の圧縮耐力に及ぼす繊維補強効果は認められる、などの結論を得た。

キーワード: 高張力鋼繊維, 幅厚比, 最大圧縮耐力, 靱性, 拘束効果, コンクリート充填不良

1. はじめに

1.1 本研究の背景・目的

近年、超高層建築物にコンクリート充填鋼管（以下、CFT）柱構造が多く採用されている。これに伴い、CFT 柱に使用されるコンクリートの超高強度化が要求されている。一方で、充填コンクリートが高強度化するほど、CFT 柱の靱性が低下してしまう。

以上のことから、本研究では、CFT 柱の充填コンクリートの超高強度化に伴う靱性の低下を改善するため、従来から多くの研究成果が蓄積されている高靱性の繊維補強コンクリート（以下、FRC）に着目し、CFT 柱構造の耐力・靱性を表す指標となる CFT 短柱の圧縮特性に及ぼす高張力鋼繊維による補強の効果について、既往の研究成果も踏まえて実験的に考察している。圧縮特性は、最大圧縮耐力、最大圧縮耐力到達直後の変形性状（以下、圧縮軟化）および最大圧縮耐力到達後の最小の圧縮耐力（後掲図-1 参照）のそれぞれについて触れている。なお、高張力鋼繊維による補強を行った高強度 CFT 短柱の圧縮特性に関する研究報告については、筆者らが知る限り僅か数件^{1,2)}であり、十分な研究成果が得られていない。本論は、これらで得た成果をまとめている。

1.2 無補強 CFT 短柱の圧縮特性に関する既往の研究

角形 CFT 短柱の最大圧縮耐力は、AIJ-CFT 指針：2008³⁾（以下、CFT 指針）の幅厚比制限値 Λ 内であれば、次式の CFT 断面耐力 N_0 （CFT 指針式）で、予測できる。

$$N_0 = N_{sy} + N_{cp} \quad \text{ただし, } B/t < \Lambda \quad (1)$$

$$N_{sy} = A_s \cdot \sigma_y, \quad N_{cp} = A_c \cdot \sigma_B \cdot \psi$$

$$\Lambda = 23 / (\sigma_y / 1000)^{0.5} \cdot 1.5 \quad \sigma_y \text{ の単位: } \text{N/mm}^2$$

ここに、 N_{sy} 、 N_{cp} ：鋼管およびコンクリートそれぞれの断面耐力、 B ：鋼管の断面幅、 t ：鋼管の板厚、 A_s 、 A_c ：

鋼管およびコンクリートそれぞれの原断面積、 σ_y ：鋼管短柱または鋼管から採取した引張試験片の降伏応力度、 σ_B ：コンクリート標準試験体の圧縮強度（以下、標準強度）、 ψ ：コンクリートの寸法効果を考慮した補正係数
よって、角形 CFT 短柱の最大圧縮耐力に及ぼす CFT 特有の拘束効果はないと言われている。

円形 CFT 短柱の最大圧縮耐力は、拘束効果を加味した次式（CFT 指針式）で、予測できる³⁾。

$$N_u = (1 + \eta) N_{sy} + N_{cp}, \quad \eta = 0.27 \quad (2)$$

ここに、 N_u ：円形 CFT 短柱の最大圧縮耐力の計算値、 η ：最大耐力上昇係数

角形 CFT 短柱の圧縮耐力-圧縮ひずみ度関係における最大圧縮耐力到達後の最小の圧縮耐力（以下、最小圧縮耐力）は、図-1 に示すように、到達後、圧縮耐力がほぼ一定に収束する。従って、最小圧縮耐力は、角形 CFT 短柱の靱性の評価値となる。なお、角形 CFT 短柱の最大圧縮耐力に対する最小圧縮耐力（以下、耐力低下率）は、CFT 断面耐力に対する鋼管断面耐力（以下、鋼管断面耐力比）と正の相関があり⁴⁾、また鋼管断面耐力比が同一において、鋼管の降伏応力度が高いほど、低くなる傾向がある⁵⁾。

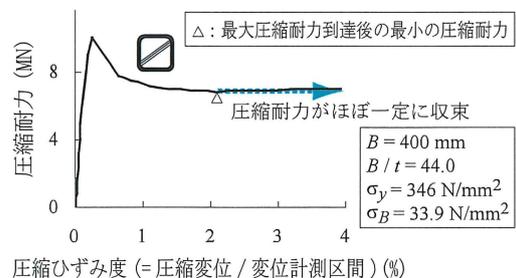


図-1 角形 CFT 短柱の圧縮耐力-圧縮ひずみ度関係の例^{5,6)}

*1 国立豊田工業高等専門学校建築学科 准教授 博士（工学）（正会員）

*2 三重大学大学院工学研究科建築学専攻 准教授 博士（工学）

*3 愛知工業大学工学部建築学科 教授 工学博士（正会員）

表-1 調査表

F_{con} (N/mm ²)	水粉体比 (%)	Air (%)	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	M_a (l/m ³)	V_s (%)	C_a/C (%)	V_f (vol.%)	材齢 (week)	備考
120	12	4.0	180	1501	150	211	1.1	4.5	4	川砂を使用, 公称幅厚比43の鋼管のみ充填
130	12	4.0	180	1556	156	487	1.5	3.0	4	川砂を使用, 公称幅厚比31の鋼管のみ充填
170	12	4.0	155	1409	141	250	1.5	3.0	16	山砂を使用

F_{con} :コンクリート強度レベル, Air :設計空気量, W :水, C :セメント, M_a :混和材, V_s :細骨材, C_a :混和剤, V_f :設計繊維混入率(外割)

表-2 鋼材の機械的性質

(a) 鋼管から採取した試験片の引張試験結果						(b) 鋼管短柱の圧縮試験結果					
断面 形状	公称 幅厚比	板厚 (mm)	降伏応力度 (N/mm ²)	降伏比	破断伸び率 (%)	断面 形状	公称 幅(径)厚比	断面幅(径) (mm)	板厚 (mm)	降伏応力度 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)
角形	31	3.22	413*	0.88	32.7	角形	31	100.0	3.22	421*	425
角形	43	2.11	353	0.75	31.0	角形	43	100.0	2.11	-	327
						円形	33	114.3	3.39	295*	346

*0.2%off-set

2. 実験概要

2.1 実施試験

FRCと繊維補強有無のCFT短柱の圧縮試験を実施した。なお、鋼管およびコンクリートの力学性状を把握するために、鋼管から採取した試験片の引張試験、鋼管短柱の圧縮試験およびコンクリート標準試験体の圧縮試験をそれぞれ実施した。

2.2 使用材料

鋼管は、STKR400の100×100×3.2mm(公称幅厚比31)および100×100×2.3mm(公称幅厚比43)ならびにSTK400の114.3×3.5mm(公称径厚比33)をそれぞれ用いた。

コンクリートの材料は、水は水道水、セメントはシリカフューム混合セメント(密度:3.04g/cm³)、細骨材は天竜川産川砂(表乾密度:2.64g/cm³, 吸水率:0.82%)または多治見産山砂(表乾密度:2.55g/cm³, 吸水率:1.78%)、混和材はシリカフューム(密度:2.22g/cm³)、混和剤は高性能減水剤(主成分:ポリカルボン酸系コポリマー)、鋼繊維は数個の繊維が水溶性接着剤で結合されているフック付ストレート(公称長さ:30mm, 公称直径:0.38mm, 引張強度最低保証値2610N/mm²)である。コンクリート標準試験体用の型枠は内径100mm・内高200mmの鋼製型枠を使用した。鋼管の公称高さは公称断面幅(径)の3倍である。

2.3 試験体作製

表-1に調査表一覧を示す。設計繊維混入率は外割の体積比率である。なお、繊維混入前のミキサ内のコンクリートを型枠と鋼管に打設した後、ミキサ内に繊維を混入した。コンクリートの混練には、容量60lの二軸強制練ミキサを使用した。

コンクリートの型枠および鋼管への充填方法は、それぞれ縦方向打設の落とし込みおよび突き棒による2層詰め、各層を突き棒で15回突き、その後、プラスチックハンマーで、突き棒によりできた穴がなくなるまで型枠側面を叩いた。なお、FRCを型枠および鋼管に充填する作

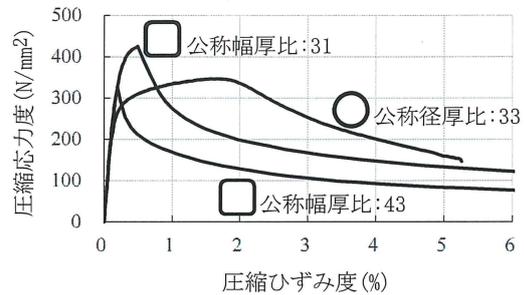


図-2 鋼管短柱の圧縮応力度-圧縮ひずみ度関係

業において、通常のハンドスコープと併用して、ハンドフォークを使用した。

コンクリート標準供試体の養生は、CFT試験体と同一条件にするため、その強度試験日まで実験室内にて封緘養生とした。

2.4 試験方法

コンクリート標準供試体の圧縮試験では、圧縮変位を、強度到達まではコンプレッソメータの変位計の計測値、圧縮強度到達後は試験機のクロスヘッドストロークの計測値とした。CFT短柱と鋼管短柱の圧縮試験では、上下端ともに固定とし、圧縮変位を、上下の支圧板間に設置した相対する2台の変位計の測定値とした。なお、各圧縮試験ともに、3000kN級耐圧試験機を使用して、コンクリートが弾性範囲内で応力度の増加が毎秒0.2-1.0N/mm²の範囲内になるように、変位制御で実施した。

3. 実験の結果・考察

3.1 鋼材・コンクリートの基本的力学性状

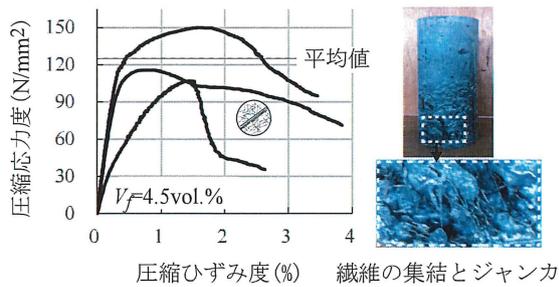
鋼管から採取した試験片の引張試験結果および鋼管短柱の圧縮試験結果を、表-2(a), (b)にそれぞれ示す。なお、鋼管短柱の圧縮応力度-圧縮ひずみ度関係が図-2に示してある。円形鋼管については、短柱の圧縮試験のみを実施した。以後、鋼管の降伏応力度は、公称幅厚比31と公称径厚比33は鋼管短柱の圧縮試験、公称幅厚比43は試験片の引張試験の値とする。

コンクリート標準試験体の圧縮試験結果を表-3に示す。同表より、設計繊維混入率4.5vol.%のFRCは、圧縮強度の標本変動係数が、レディミクストコンクリートにおいて良好な管理がなされているかの目安となる上限値10%を超えていることがわかる。これは、繊維混入率が高いため、作業性が悪化し、コンクリート充填不良でジャンカなどの欠陥が生じたためである(後掲図-3(a)参照)。なお、設計繊維混入率3.0%の各FRCの圧縮強度の平均値は、繊維補強無しと比較して、差異が認められない。これは、流動性を確保する観点から繊維混入率が低いFRCを対象としている既往の研究において多数、認められている。

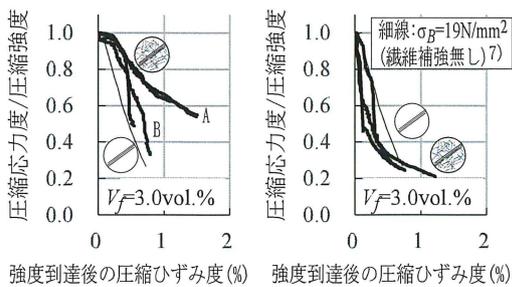
図-3(a)-(c)に、各コンクリート強度レベルのFRCの圧縮応力度-圧縮ひずみ度関係を示す。図(a)には、試験体の写真が掲載してある。図(b),(c)の縦軸は圧縮強度の平均値に対する圧縮応力度を、横軸は圧縮強度到達後の圧縮ひずみ度を、細線は、比較のために記す無補強の標準強度19N/mm²の実測値⁷⁾を表している。

同図(a)より、コンクリート強度レベル120N/mm²は、圧縮応力度-圧縮ひずみ度関係の形状にバラツキが認められる。これは、繊維混入率が高く作業性が低下したため、写真に示すように、繊維の集結で生じたジャンカなどの欠陥が、影響していると考えられる。

同図(b)より、強度レベル130N/mm²は、i) 圧縮軟化は、無補強の標準強度19N/mm²と比較し、緩やかである、ii) 軟化挙動は、2つのパターンで生じていることがわかる。上述ii)の分類を、ここでは、緩やかな軟化を持続する曲線をパターンA、緩やかな軟化から激しい軟化



(a) $F_{con}=120\text{N/mm}^2$



(b) $F_{con}=130\text{N/mm}^2$ (c) $F_{con}=170\text{N/mm}^2$

図-3 FRCの圧縮応力度-圧縮ひずみ度関係

に移り変わる曲線をパターンBと称する。

同図(c)より、強度レベル170N/mm²の圧縮軟化は、無補強の標準強度19N/mm²と比較し、激しいことがわかる。

3.2 繊維混入率4.5%のCFT短柱の圧縮特性

図-4に、コンクリート強度レベル120N/mm²の角形CFT短柱の圧縮耐力-圧縮ひずみ度関係に及ぼす繊維補強効果を示す。図の縦軸は式(1)の寸法効果を無視($\psi=1.0$)したCFT断面耐力で除してある。なお、図中に示す写真は、繊維補強有りの下面と最終破壊形状である。

同図より、繊維補強有りの最大圧縮耐力が、その繊維補強無しと比較して低く、かつCFT断面耐力に達していないことがわかる。これらは、同図中の写真に示すように、コンクリート充填不良で、繊維が集結している個所で生じたジャンカなどの欠陥が原因で、充填コンクリートの圧縮強度が低下したためであると考えられる。しかし、圧縮軟化は、その繊維補強無しと比較して緩やかで、繊維補強効果が認められる。また、前掲図-3(a)に示すように、FRCは、繊維の終結で欠陥が生じていても、圧縮軟化が著しく激しくならないことがある。従って、欠陥で充填コンクリートの圧縮強度が低下しても、欠陥個所に繊維が集結していれば、その圧縮軟化に繊維補強効果が発揮される可能性がある。

以上を踏まえ、次節からの考察において、圧縮特性のバラツキが認められる繊維混入率4.5vol.%の角形CFT

表-3 コンクリート標準試験体の圧縮強度試験結果

F_{con} (N/mm ²)	V_f (vol.%)	標 本 数	圧縮強度		ヤング係数	ϵ_B
			平均値 (N/mm ²)	COV (%)	平均値 (kN/mm ²)	平均値 (%)
120	0	3	119	2.32	40.1	0.357
	4.5	3	126	18.08	-*	-*
130	0	6	128	0.44	36.0	0.388
	3.0	4	121	0.78	39.2	0.412
170	0	3	173	1.07	44.8	0.439
	3.0	3	163	0.58	49.0	0.419

COV: 標本変動係数, ϵ_B : 圧縮強度時の圧縮ひずみ度
*応力度-ひずみ度関係のバラツキが激しいため不記載

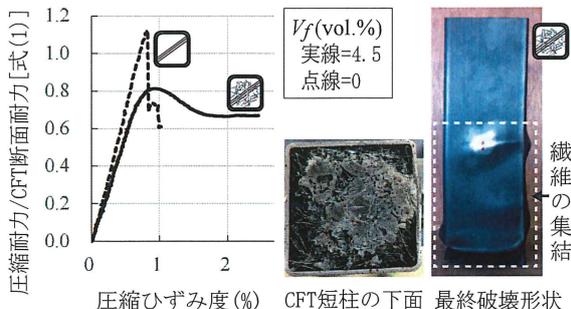


図-4 CFT短柱の圧縮耐力-圧縮ひずみ度関係に及ぼす繊維補強効果 ($F_{con}=120\text{N/mm}^2$)

短柱を対象から除外する。

3.3 繊維混入率3.0%のCFT短柱の圧縮特性

(1) 最終破壊形状

写真-1に、繊維補強有りがつコンクリート強度レベル170N/mm²のCFT短柱の最終破壊形状を示す。なお、最終破壊形状に及ぼす繊維補強効果および角形では幅厚比の影響はそれぞれほとんど認められなかった。

同写真に示すように、繊維補強有りの破壊形状は、i) 角形は、各幅厚比ともに、黒塗印で示す鋼管の螺旋かつ凸状の局部座屈と白抜印で示すコンクリートの局所的な破壊による鋼管要素の膨張、ii) 円形は、黒塗印で示す鋼管の凸状の局部座屈と白抜印で示すコンクリートの局所的な破壊による鋼管の膨張、である。なお、これらは通常のCFT短柱の最終破壊形状(例えば4)と差異はない。

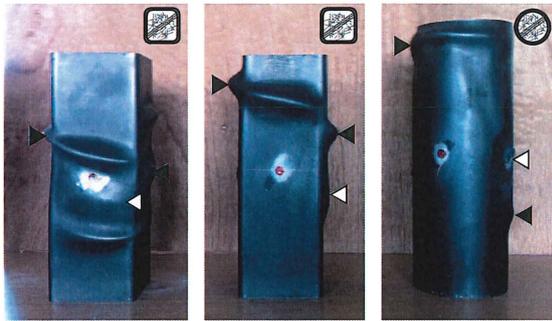
(2) 最大圧縮耐力

図-5(a),(b)に、繊維補強有無の角形および円形CFT短柱の最大圧縮耐力の実測値と計算値の比較をそれぞれ示す。なお、表-4に示す既往の超高強度CFT短柱の実験データも対象としている。角形および円形CFT短柱の計算値は、それぞれ式(1)および式(2)のCFT指針式から算出した。なお、補正係数 ψ は、次式を用いた⁴⁾。

$$\text{角形: } \psi = (B_c / D_0)^{-0.1} \quad (3)$$

$$\text{円形: } \psi = (D_c / D_0)^{-0.1} \quad (4)$$

ここに、 D_0 :コンクリート標準試験体の断面径、 B_c 、 D_c : 検討対象とする角形および円形CFT短柱それぞれの



角形(公称幅厚比=43) 角形(公称幅厚比=31) 円形(公称幅厚比=34)

▶:凸状の局部座屈, ▷:コンクリートの局所的な破壊による鋼管の膨張
写真-1 繊維補強有り($F_{con}=170\text{N/mm}^2$)のCFT短柱の最終破壊形状

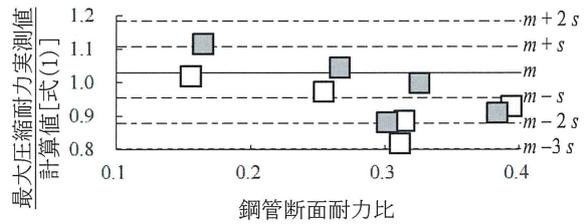
コンクリート部の断面幅および断面径

図の縦軸は、最大圧縮耐力の計算値に対する実測値を、横軸は鋼管断面耐力比である。図中の印は、繊維補強有無を、実線、破線、一点鎖線および点線は、それぞれ既往の研究^{3,5)}で得られている最大圧縮耐力の実測値/計算値の m (平均値)、 $m \pm 1.0s$ (s : 標本標準偏差)、 $m \pm 2.0s$ および $m \pm 3.0s$ を、表している。

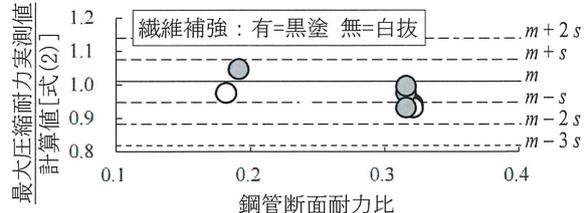
同図より、最大圧縮耐力の実測値/計算値は、i) 角形CFT短柱[図(a)]は、1体を除き、 $m \pm 2.0s$ 以内、ii) 円形CFT短柱[図(b)]はすべて、 $m \pm 2.0s$ 以内、に存在していることが認められる。従って、標準試験体の結果(前掲表-3参照)を踏まえ、繊維補強を行った角形および円形CFT短柱の最大圧縮耐力は、それぞれ繊維補強効果が発揮されず、CFT指針式で予測できると言える。

(3) 圧縮軟化

図-6に、角形CFT短柱の圧縮耐力-圧縮ひずみ度関



(a) 角形CFT短柱



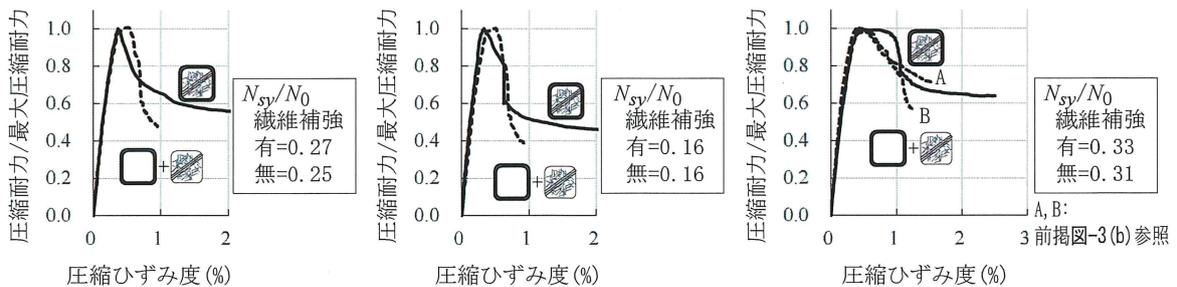
(b) 円形CFT短柱

図-5 CFT短柱の最大圧縮耐力の実測値と計算値の比較

表-4 本研究で検討対象とする既往の実験データ

文献番号	断面形状	幅(径)厚比	σ_y (N/mm ²)	σ_B (N/mm ²)	V_f (vol.%)
2)	角形	17, 22	462, 475	213, 222*	3.0(高張力鋼繊維)
1)	円形	23	332	143, 146*	3.0(高張力鋼繊維)

*繊維補強有り



(a) 公称幅厚比=31, $F_{con}=170\text{N/mm}^2$ (b) 公称幅厚比=43, $F_{con}=170\text{N/mm}^2$ (c) 公称幅厚比=31, $F_{con}=130\text{N/mm}^2$

図-6 角形CFT短柱の圧縮耐力-圧縮ひずみ度関係の実測値と累加値の比較(混入率3.0vol.%の高張力鋼繊維)

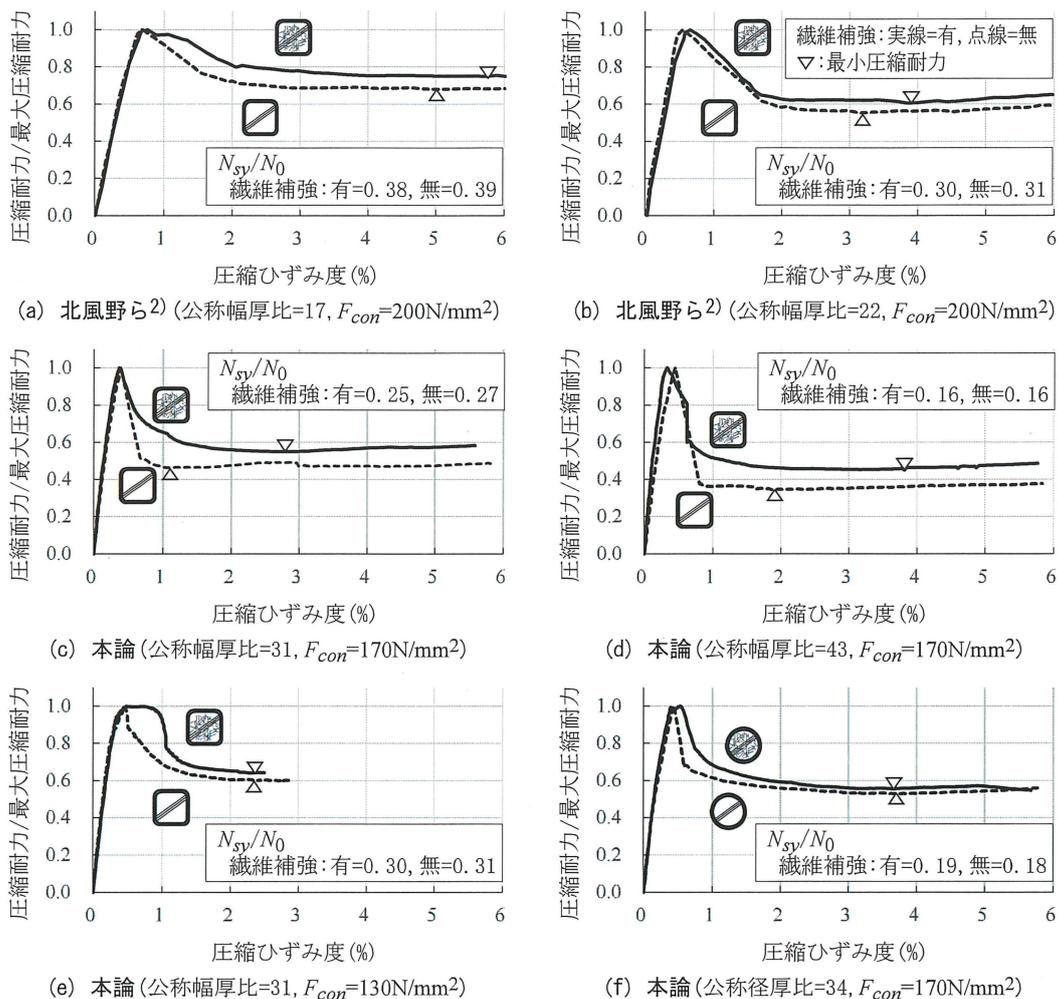


図-7 FRCの圧縮応力度-圧縮ひずみ度関係に及ぼす繊維補強効果(繊維混入率3.0%の高張力鋼繊維)

係を示す。図中の実線は繊維補強有りの実測値を、点線は鋼材の引張応力度-引張ひずみ度関係とFRCの圧縮応力度-圧縮ひずみ度関係の同一ひずみ度時の累加(以下、累加値)である。累加値は、FRCの圧縮変位の計測終了時までを表している。累加値のFRCのコンクリート強度レベル 130N/mm^2 は、前掲図-3(b)の曲線のパターンAおよびBをそれぞれ用いた。なお、累加値のFRCは破壊の局所化を考慮して⁸⁾、圧縮強度到達後の圧縮ひずみ度における変位計測区間を、角形CFT短柱の試験体高さとした。縦軸は、実測値および累加値の最大圧縮耐力でそれぞれ除してある。

繊維補強角形CFT短柱の圧縮軟化に及ぼす拘束効果は、同図(a),(b)より、コンクリート強度レベル 170N/mm^2 については、実測値と累加値の差異がなく、認められない、同図(c)より、コンクリート強度レベル 130N/mm^2 については、実測値が累加値のパターンAとBの分岐までは高く、認められる、ことがわかる。

図-7は、前掲図-6の点線を繊維補強無しのCFT短柱に置き換えている。なお、本論の円形と既往の北風野ら²⁾

の実験データも掲載している。図中の三角印は、最小圧縮耐力を表している。

角形CFT短柱の圧縮軟化に及ぼす繊維補強効果は、同図(a),(e)より、公称幅厚比17またはコンクリート強度レベル 130N/mm^2 については、それぞれ認められる、同図(b)-(d)より、公称幅厚比22以上かつコンクリート強度レベル 170N/mm^2 以上については、明確に認められない、ことがわかる。

上述より、角形CFT短柱は、幅厚比が大きいおよびコンクリート強度レベルが高いほど、繊維補強かつ拘束効果による圧縮軟化の抑制が小さくなると考えられる。

(4) 最小圧縮耐力

図-7(a)-(e)より、各角形CFT短柱について、i) 繊維補強有りの最小圧縮耐力は、繊維補強無しより高く、繊維補強効果が認められる、ii) 繊維補強有無ともに最小圧縮耐力到達後、また一部は最小圧縮耐力到達前も含み圧縮耐力が安定している、ことがわかる。なお、図-7(f)より、円形CFT短柱についても、最小圧縮耐力到達後、圧縮耐力が一定に収束していることが認められる。

図-8に、角形CFT短柱の耐力低下率と鋼管断面耐力比の関係に及ぼす繊維補強有無の影響を示す。繊維補強有りは繊維混入率3.0vol.%かつ高張力鋼繊維である。なお、本論および既往の北風野ら²⁾の実験データを対象としている。図中には、繊維補強有無それぞれの最小二乗法による線形近似直線と相関係数が示してある。

同図より、繊維補強角形CFT短柱の耐力低下率は、繊維補強無しと同様に、鋼管断面耐力比と正の相関があることがわかる。

図-9は、前掲図-8の縦軸を、繊維補強無しの耐力低下率に対するその繊維補強有り（以下、耐力低下上昇比）に置き換えている。なお、本論と既往の木村ら⁸⁾の円形CFT短柱の実験データも図に示してある。

同図より、円形CFT短柱の耐力低下上昇比は、角形のそれより小さい傾向がある。よって、円形CFT短柱の耐力低下率に及ぼす繊維補強効果は、角形のそれより小さい可能性があると考えられる。

4. おわりに

CFT短柱の圧縮特性に及ぼす高張力鋼繊維による補強効果について、実験的に考察した。これらより得た主な結果を次に示す。

- 1) CFT短柱は、コンクリート充填不良による欠陥で充填コンクリートの圧縮強度が低下しても、欠陥個所に繊維が集結していれば、その圧縮軟化に繊維補強効果が発揮される可能性がある。
- 2) 繊維補強角形および円形CFT短柱の最大圧縮耐力は、それぞれ繊維補強効果が発揮されず、CFT指針式で予測できる。
- 3) 角形CFT短柱は、幅厚比が大きいおよびコンクリート強度レベルが高いほど、繊維補強かつ拘束効果による圧縮軟化の抑制が小さくなると考えられる。
- 4) 繊維混入率3.0vol.%の繊維補強角形CFT短柱の耐力低下率は、繊維補強無しと同様に、鋼管断面耐力比と正の相関がある。
- 5) 円形CFT短柱の耐力低下率に及ぼす繊維補強効果は、角形のそれより小さい可能性がある。

謝辞

本研究で使用した混和剤は竹本油脂株式会社より提供していただいた。また、本論の研究成果は、平成27年度科学研究費補助金・若手(B)研究課題番号26820240の支援による。付記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 木村秀樹, 高津比呂人: 鋼繊維を混入した超高強度コンクリート充填鋼管短柱の中心圧縮試験(その

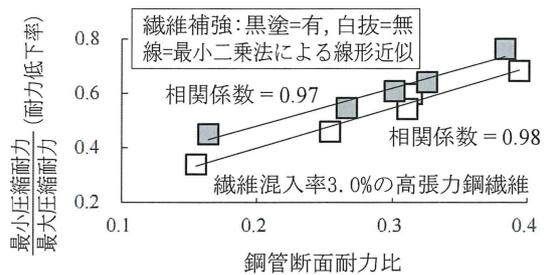


図-8 耐力低下率と鋼管断面耐力比の関係に及ぼす繊維補強効果

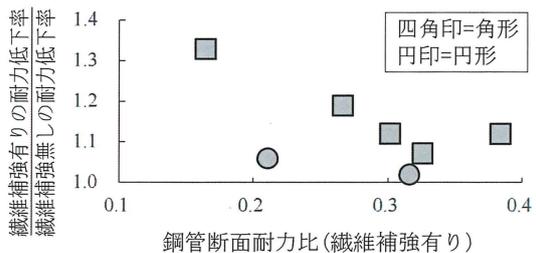


図-9 耐繊維補強による耐力低下率の上昇比

- 1), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 III, pp. 639-640, 2002. 8
- 2) 北風野歩, 菅野俊介, 木村秀樹, 片桐誠: 超々高強度コンクリートを用いた柱の圧縮特性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. 847-852, 2003. 7
- 3) 日本建築学会: コンクリート充填鋼管構造設計施工指針, 第2版, 2008. 10
- 4) 林信之, 田内敏昭, 福元敏之, 佐伯俊夫: 高強度材料を用いたコンクリート充填角形鋼管柱の軸圧縮性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 15, No. 2, pp. 977-982, 1993
- 5) 山本貴正, 川口淳, 小池狭千朗, 森野捷輔: コンクリート充填角形鋼管短柱の軸圧縮特性に及ぼす断面寸法・形状の影響に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, No. 685, pp. 597-605, 2013. 3
- 6) 山本貴正, 川口淳, 山田和夫: コンクリート充填角形鋼管短柱の安定した塑性変形を発揮する圧縮耐力, 日本建築学会構造系論文集, No. 712, pp. 951-959, 2015. 6
- 7) 谷川恭雄, 山田和夫: 各種コンクリートの応力度-ひずみ度曲線に対する Endochronic theory の適用性, コンクリート工学年次講演会講演論文集, Vol. 3, pp. 109-112, 1981
- 8) 下川博之, 金子佳生, 三橋博三: 繊維補強セメント系複合材料の圧縮軟化特性に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 26, No. 1, pp. 339-344, 2004