

## スラリー充填繊維コンクリートの圧縮特性に及ぼす鋼繊維の種類の影響

## Influence of Types of Steel Fiber on Compressive Characteristics for Slurry Infiltrated Fiber Concrete

実積率 充填率 繊維混入率  
繊維長さ 圧縮強度 変形性

会員外 ○杉浦 丸太\* SUGIURA, Maruta  
同 鈴木 領馬\* SUZUKI, Ryoma  
正会員 山本 貴正\*\* YAMAMOTO, Takamasa  
同 山田 和夫\*\*\* YAMADA, Kazuo

## 1. はじめに

コンクリート充填鋼管 (CFT) 柱構造は、鋼管によるコンクリートの拘束効果、コンクリートによる鋼管の局部座屈抑制効果などのこれら相互作用で、優れた耐力・靱性を有していることは、数多くの研究を通じて知られている。これらに伴い、近年、建築物の構造形式として、CFT 柱構造が多く採用されている。

昨今、CFT 柱構造の作用地震力を小さくする、また美観性を高めるため、コンクリートを高強度化し、断面寸法を小さくした高強度 CFT 柱の研究また実施が増えている。しかし、充填コンクリートの高強度化に伴い、最大耐力到達後の変形性が低下するなどの低靱性化が生じてしまう。このようなことから、共著者らは、コンクリートの靱性向上が期待できる短繊維 (以下、繊維) による補強に注目し、充填コンクリートを繊維補強コンクリート (FRC) とした高強度 CFT 短柱の圧縮特性に及ぼす鋼繊維補強効果について検討した<sup>1)</sup>。結果、高強度 CFT 短柱の靱性に及ぼす鋼繊維補強効果は、FRC の作製可能な範囲内において、僅かであった。そこで、次に FRC と比較して、繊維混入率を高くすることが可能なスラリー充填繊維コンクリート (SIFCON)<sup>2)</sup>、注 1) に着目した。

本研究では、既報<sup>1)</sup> に引き続き、高強度 CFT 柱の低靱性を改善することを主目的として、まず CFT 柱の充填コンクリートに用いる予定の高強度の SIFCON の圧縮特性に及ぼす鋼繊維の種類の影響について検討した。本報は、これらで得た主な成果をまとめている。

## 2. 実験概要

## 2.1 検討項目

SIFCON の圧縮強度、圧縮強度到達後の変形性に及ぼす鋼繊維の長さや形状の影響、また使用繊維の実積率、グラウトの見掛けの充填率について検討した。

## 2.2 使用材料

グラウトの水は水道水、セメントはシリカフェウム

混合セメント (密度 3.04g/cm<sup>3</sup>, 比表面積 6690g/cm<sup>2</sup>)、混和剤は主成分がポリカルボン酸コポリマーの高性能減水剤 (密度 1.09g/cm<sup>3</sup>) を使用した。調合は、水粉体比 25%、内割で混和剤混入率 6.0% (セメント質量比) とし、設計空気量 4.0%±1.5% 設計ゼロ打フロー値 360±10% である。鋼繊維 (密度 7.85g/cm<sup>3</sup>) は表-1 に示す 4 種を用いている。

## 2.3 供試体作製

SIFCON の供試体は、鋼製円柱型枠 (内寸法: 径 100mm・高さ 200mm) に、繊維を詰め込んだ後、グラウトのセメントペーストを注入して流し混んで製造した。なお、グラウトの充填性を高めるために、プラスチックハンマーで型枠側面を叩きながら作業をしている。グラウトの混練には、容量 60l の二軸強制練ミキサーを使用した。養生は、CFT 柱と同一条件にするため、実験室内にて封緘養生とした。また、供試体との打設面の平滑を確保するため、端面を研磨した。なお、研磨した面に鋼繊維は現れていない。

## 2.4 試験・計測方法

SIFCON の圧縮応力度-圧縮ひずみ度関係を計測するため、JIS A 1105:2015 に準拠し圧縮試験を材齢 4 週目に実施した。圧縮変位は、圧縮強度到達までは、耐破壊型コンプレッソメータで計測、圧縮強度到達後は、試験機ヘッドストロークとした。圧縮試験機は、3,000kN 級耐圧試験機を使用し、圧縮試験を変位制御で実施している。同一試験条件の標本数は 3 である。

繊維の実積率は、鋼繊維を、SIFCON に使用する鋼製円柱型枠に、その突起が、型枠上面を超えない程度に

表-1 鋼繊維の種類

繊維長さ (mm)	20	30	40	30
直径 (mm)	0.5	0.8	0.8	0.38
アスペクト比	40	38	50	79
形状	立体波形		フック付き直線形	
引張強度	1.0kN/mm <sup>2</sup> 以上		2.0kN/mm <sup>2</sup> 以上	

\* 国立豊田工業高等専門学校建築学科 本科生

\*\* 国立豊田工業高等専門学校建築学科 准教授・博士 (工学)

\*\*\* 愛知工業大学工学部建築学科 教授・工博

Regular Student, Dept. of Architecture, Toyota National College of Technology  
Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Toyota National College of Technology, Dr. Eng.

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Aichi Institute of Technology, Dr. Eng.

詰め込み計測した。この詰める過程において、突き棒による力やハンマーによる振動などは加えていない。同一試験条件の標本数は繊維の形状が立体波形は13、直線形は3である。

グラウトの見掛けの充填率(P)を、材齢4週の円柱供試体を用いて次式で算出した。

$$P = M_{gh} / M_g \quad (1.1)$$

$$M_g = C_f \cdot \rho_g \cdot (1.0 - V_f) \quad (1.2)$$

$$M_{gh} = M_f - C_f \cdot V_f \cdot \rho_s \quad (1.3)$$

ここに、 $C_f$ : 供試体のかさ体積、 $\rho_g$ : 繊維混入率( $V_f$ )0%のグラウトのかさ密度平均値、 $M_f$ : 供試体の質量、 $\rho_s$ : 鋼繊維の密度7.85g/cm<sup>3</sup>、 $V_f$ : 打設面研磨後の供試体のかさ体積に対する繊維混入量

### 3. 実験結果・考察

#### 3.1 鋼繊維の実積率

表-2に、鋼繊維の実積率一覧を示す。また図-1には、鋼繊維の実積率の平均値と繊維長さ・形状の関係が示してある。図中の括弧内は、実積率の標本変動係数を表している。

同図表より、立体波形の実積率の平均値は、i) 繊維が長いほど小さい注2)、ii) 直線形と比較して大きい、ことがわかる。前者は、骨材の実積率と同様に、壁効果が起因していると考えられる4)、注3)。後者は、試験用容器が角柱型枠の鋼繊維の実積率と同様の傾向がある5)。

上記より立体波形の充填分散性は、直線形より高いと推察される。なお、本実験の範囲内において、実積率の平均値と標本変動係数は無関係である。

表-2 鋼繊維の実積率一覧

繊維長さ (mm)	繊維形状	実積率				標本数
		平均値 (%)	vCOV (%)	最小値 (%)	最大値 (%)	
20	立体波形	14.7	4.21	14.0	16.1	13
30		13.0	7.40	10.9	14.1	
40		10.4	2.65	10.0	10.8	
30	直線形	4.40	4.50	4.16	4.56	3

vCOV: 実積率の平均値の標本変動係数

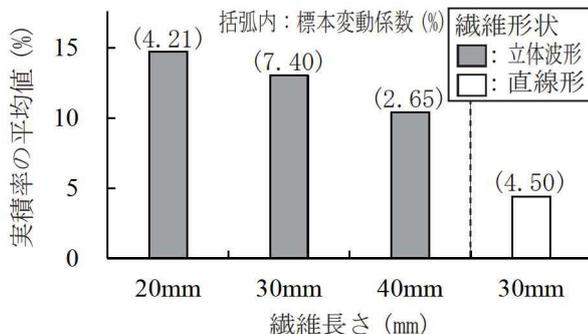


図-1 鋼繊維の実積率

#### 3.2 グラウトの見掛けの充填率

図-2に、各SIFCONのグラウトの充填率と繊維混入率の関係を併せて示す。図中の記号は鋼繊維の種類を、点線は、河野ら<sup>5)</sup>の研究を参考にして、グラウトが十分に充填できていると考えられる下限値98%を表している。相関係数は充填率98%以上のデータを対象として算出している。

同図より、98%以上の充填率と繊維混入率はほぼ相関がない、ことがわかる。これは、グラウトが十分に充填できているためと推測される。なお、充填率98%以下が存在する繊維長さ40mmは、変動も大きいことが認められる。これは、鋼繊維の実積率の変動は他と比較して、小さいことから(前述3.1節参照)、グラウト流し込みにおいて(前述2.3節参照)、型枠側面をハンマーで叩く回数などを定めていないため、この作業性が影響したためと考えられる。

#### 3.3 圧縮強度

表-3に、圧縮強度一覧を示す。また図-3(a)(b)には、それぞれ各SIFCONの圧縮強度とグラウトの充填率および繊維混入率の関係が併せて示してある。図中の破線と点線は、それぞれ繊維混入率0%(以下、繊維無混入)の圧縮強度の平均値とグラウトの充填率98%(前述3.2節参照)である。

同図表より、次の知見が得られる。

圧縮強度の標本変動係数は、繊維長さ40mm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

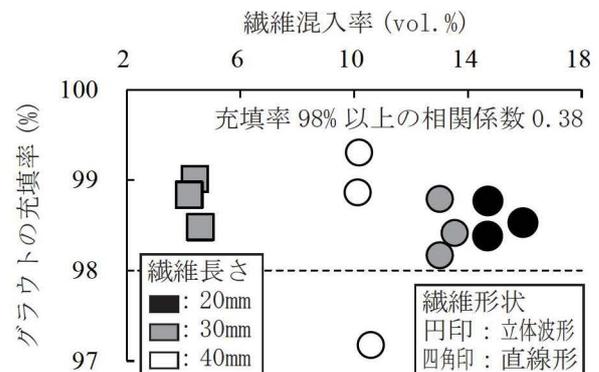


図-2 グラウトの充填率

表-3 圧縮強度一覧

繊維長さ (mm)	繊維形状	圧縮強度				標本数
		平均値 (N/mm <sup>2</sup> )	vCOV (%)	最小値 (N/mm <sup>2</sup> )	最大値 (N/mm <sup>2</sup> )	
(繊維無混入)						
20		122	1.29	120	123	
30	立体波形	93.2	2.72	90.6	95.6	3
40		93.7	10.9	82.3	102	
30	直線形	124	3.69	120	129	

vCOV: 圧縮強度の平均値の標本変動係数

いるかの目安となる上限値 10% を超えている。これは、グラウトの充填が不十分な充填率 98% 以下が存在しているためと考えられる。

繊維長さ 40mm を除き、各繊維ともに、圧縮強度と充填率は無関係である。これは、充填率 98% 以上であることが起因していると考えられる。なお、充填率 98% 以下の繊維長さ 40mm の圧縮強度は、他と比較して小さい。これは、グラウトの充填が不十分な箇所の欠陥が影響していると考えられる。

立体波形の圧縮強度は、繊維無混入と比較し、i) 繊維

長さ 20mm は高い。ii) 繊維長さ 30mm と 40mm は低い。前者は、既往の SIFCON と FRC の圧縮特性に関する研究を参考にすると<sup>5,6)</sup>、他と比較し繊維高含有かつ繊維が短く、微細なひび割れから拘束効果が発揮されるためと推察される。後者は、既往の研究においても同様の結果が得られており<sup>7)</sup>、これは繊維が長いため、繊維の方向が供試体の軸方向に偏みきやすいためと考えられている。なお、既往の SIFCON の研究において<sup>8)</sup>、繊維配向が軸方向では、圧縮強度に及ぼす拘束効果が認められない実験結果が得られている。

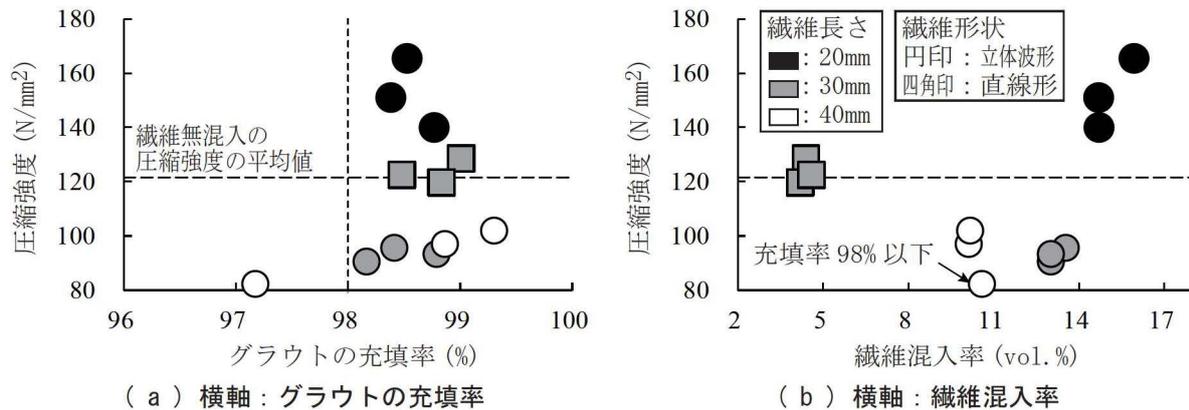


図-3 SIFCON の圧縮強度

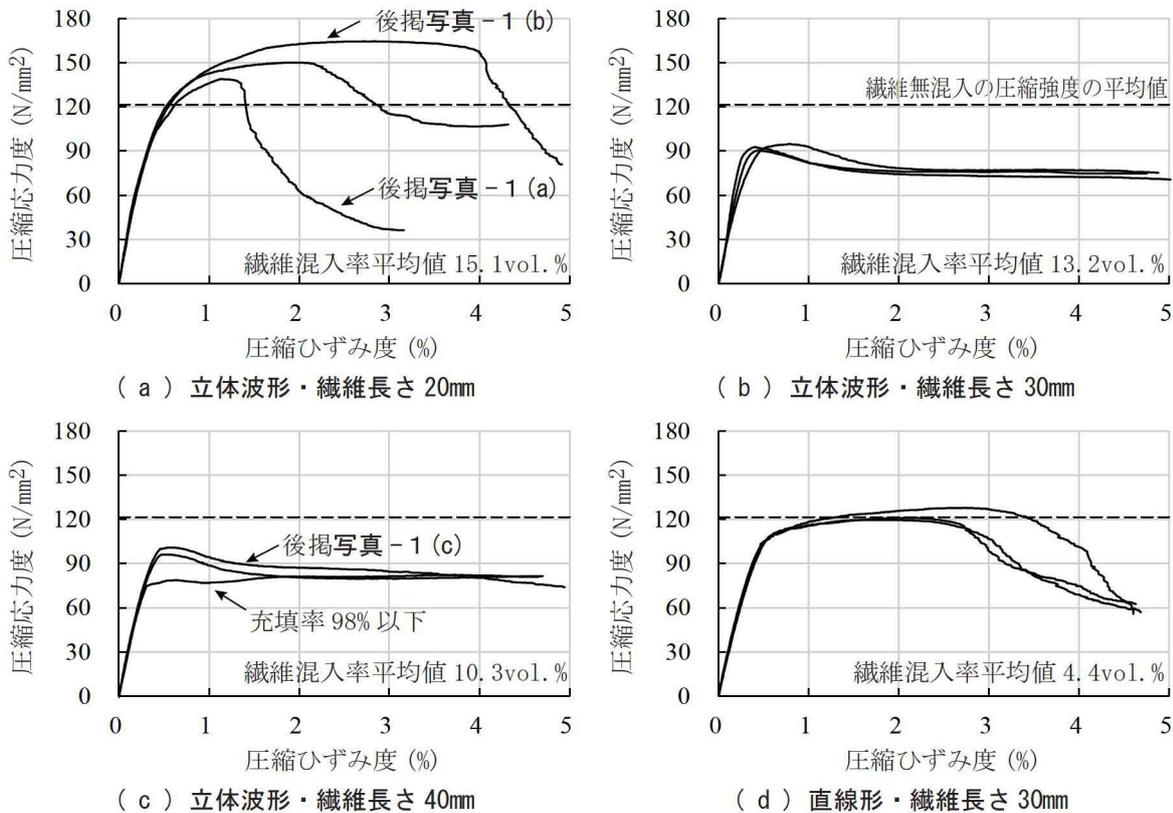


図-4 SIFCON の圧縮応力度 - 圧縮ひずみ度関係

繊維混入率が立体波形と比較して低い直線形の圧縮強度は、繊維無混入と同程度である。上述の立体波形の結果も踏まえ、繊維低含有であり、かつ繊維配向が供試体の軸方向に偏むかなければ、圧縮強度に及ぼす繊維混入の影響はないと考えられる。

### 3. 4 圧縮応力度 - 圧縮ひずみ度関係

図4 (a)-(d) に、各鋼繊維のSIFCONの圧縮応力度 - 圧縮ひずみ度関係を示す。図中の破線は、繊維無混入の圧縮強度である。

同図より、i) 立体波形の繊維長さ20mmは、他の繊維と異なり、標本3体の圧縮強度時ひずみ度と圧縮強度到達後の変形性の変動が大きく、その変形性が低い軟化型を示す供試体もある、ii) 立体波形の繊維長さ30mmと40mmの圧縮強度到達後の変形性は、グラウトの充填率98%以下も高い塑性型である、iii) 直線形の繊維長さ30mmは、同じ繊維長さの立体波形と比較して、圧縮強度時ひずみ度は高いが、圧縮強度到達後の変形性が低い軟化型である、ことがわかる。

上記の傾向について、既往のFRCの曲げ特性に関する研究を参考にすると<sup>9)</sup>、i) は、過度な繊維高含有が原因で発生しやすい不規則な繊維の配列の箇所において、ひび割れ幅の進展を抑制できなくなり、破壊が局所化するため、ii) は、繊維架橋効果の程度を支配する繊維の配列が規則正しく、各要素でひび割れ幅の進展を抑制できているので、グラウトの充填が不十分な個所の欠陥で圧縮強度が低下しても、破壊が局所化しないため、iii) は、繊維低含有であり、ひび割れに架橋する繊維数が少なく、繊維が急激に引き抜け、ひび割れ幅の進展を抑制できなくなり、破壊が局所化したため、であると考えられる。

### 3. 5 最終破壊形状

写真-1に圧縮試験後の破壊形状の例を示す。

圧縮強度後の各SIFCONを比較すると、前掲図-4の応力度 - ひずみ度関係が、圧縮強度到達直後に軟化型を示したSIFCON[写真(a)]は、他の塑性型[例えば写真(b)(c)]と比較し、斜めひび割れに伴う繊維の露出幅が狭い傾向がある。

## 4. おわりに

SIFCONの圧縮特性を把握することを目的として、その鋼繊維の種類の影響について実験的に検討した。今後は、本報の成果を踏まえ、充填コンクリートをSIFCONとしたCFT柱の力学性状について実験的に検討する予定である。

### 謝辞

本稿の研究成果は、平成26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。また本実験を遂行するにあたり、平成28年度国立豊田高専建築学科山本研究室の卒研究生、竹本



左から (a) 繊維長さ20mm[図-4(a):軟化型]  
(b) 繊維長さ20mm[図-4(a):塑性型+軟化型]  
(c) 繊維長さ40mm[図-4(c):塑性型]

### 写真-1 圧縮試験後のSIFCON(繊維形状:立体波形)

油脂株式会社のご助力を得た。付記して謝意を表します。

### 参考文献

- 1) 山本貴正, 川口淳, 山田和夫: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.2, pp.1171-1176, 2016
- 2) David R. Lankard: Slurry Infiltrated Fiber Concrete (SIFCON), Concrete International, Vol.6, No.12, pp.44-47, 1984.12
- 3) 佐々木亘, 谷口秀明, 樋口正典, 宮川豊彰: 短繊維のかさ容積による高強度繊維補強コンクリートの流動性の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.437, No.1, pp.307-312, 2015
- 4) 竹内輝典, 寺西浩司: 骨材粒度が実積率およびフレッシュ性状に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.1131-1136, 2004
- 5) 河野克哉, 石田征男, 高橋英孝, 田中敏嗣: 鋼繊維を多量混入したセメント系材料の開発と力学特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.227-232, 2011
- 6) 堀口至, 佐伯昇, 市坪誠, 竹村和夫: ハイブリッド繊維補強コンクリートのコンシステンシーおよび力学特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.371-376, 2006
- 7) 新村亮, 平井友紀, 青木茂, 原田暁: 繊維高含有SIFCONの基礎性状に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.19, No.1, pp.1207-1212, 1997
- 8) 伊藤司, 三木朋広: 多量繊維補強したセメント系材料の圧縮破壊挙動評価, 土木学会関西支部年次学術講演会, 第V部門, pp.17-18, 2011
- 9) 松原功明, 大野俊夫, 坂井吾郎, 山田真人: 超高強度繊維補強コンクリートの諸特性に及ぼす鋼繊維の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1253-1258, 2006

### 注

- 1) SIFCONは、型枠内に繊維を詰め込んだ後、グラウトを注入して製造する。よって、FRCと異なり流動性を確保する必要がない。
- 2) 直線形の繊維は、アスペクト比が大きいくほど、実積率が小さくなる結果が得られている<sup>3)</sup>。なお、本実験では、主に立体波形の繊維を対象としているため、今後、実積率や波形などを考慮したアスペクト比の関係を、検討する必要がある。
- 3) 実積率試験用容器に対して骨材粒径が相対的に大きいくほど、容器内面近傍で骨材が充填されにくい壁効果で、骨材の実積率が小さくなる解析結果が得られている。