

論文 繊維補強コンクリートを用いた鉄骨コンクリート合成構造柱の 構造性能に関する実験的研究

足立 智弘^{*1}・倉本 洋^{*2}・川崎 清彦^{*3}

要旨：本研究では、鉄骨鉄筋コンクリート構造の施工の合理化を目的として、鉄筋を省略した鉄骨とコンクリートのみからなる合成構造の開発を念頭に置いて、繊維補強コンクリートを用いた CES 合成構造柱の曲げせん断加力試験を実施した。実験では、投入繊維の違いによる柱の構造性能の差異を検討するとともに、前回の実験結果に見られた、高靱性型セメント系材料使用による乾燥収縮および剛性低下といった問題点に対して、骨材を投入することによる改善効果も併せて検討した。

キーワード：鉄骨コンクリート柱、繊維補強コンクリート、構造性能、ひび割れ幅

1. はじめに

鉄骨鉄筋コンクリート構造（以下、SRC 構造）は、鉄骨構造と鉄筋コンクリート構造を合成した構造システムであり、より高い耐力と変形性能が得られることが知られている。しかし、SRC 構造は、鉄骨工事および鉄筋工事の両方が必要であり、施工が複雑になるという短所がある。そこで筆者等は、SRC 構造の鉄筋を省略し、施工の簡略化、コスト低減が期待できる鉄骨コンクリート合成構造（以下、CES 構造）を検討してきた。既往の研究¹⁾では、CES 構造に高靱性型セメント系材料を用いることで、ひび割れや圧壊などの損傷が大変形時まで小さなレベルに留まることが確認できた。また、その復元力特性も SRC 構造と同程度のものではあった。しかし、骨材が入ってないことから、剛性の低下や乾燥収縮などの問題点が明らかになった。そこで、高靱性型セメント系材料に代わって繊維補強コンクリートを用いることを検討した。

以上のような背景のもと、本研究では、まず鉄骨とコンクリートからなる合成構造システムに用いる適切な繊維補強コンクリートを得るための調合実験を実施した。さらに、調合実験より選定した繊維補強コンクリートを用いて CES 構造の実用化を目的とした柱部材の曲げせん断加力実験を行い、その復元力特性について比較検討した。

2. 繊維補強コンクリートの調合実験

2.1 使用材料

ベースコンクリートには、普通ポルトランドセメント、埼玉県秩父郡両神産の細骨材、埼玉県秩父郡両神産の最大粒径 15mm の粗骨材および高性能 AE 減水剤（3%）を使用し、繊維径 0.66mm で繊維長 30mm のビニロンファイバー（以下、RF4000 と呼称）、繊維径 0.40mm で繊維長 24mm ビニロンファイバー（以下、RF1500 と呼称）およびドッグボーンタイプで換算径 0.6mm および繊維長 35mm のステンレスファイバー（以下、F430D と呼称）について検討した。また水セメント比を 50%とし、単位水量 172kg/m³ および細骨材率を 70%とした。写真-1 に F430D（上）および RF4000（下）をそれぞれ示す。

2.2 製造方法

上記の配合に基づいて 100 リットル強制 2 軸ミキサーを用い、1 バッチあたり 30 リットルの練り混ぜを行なった。繊維コンクリートは、細骨材、セメントおよび粗骨材の順に投入して空練りを 30 秒行なった後、あらかじめ混和剤を混入しておいた所定量の水を投入後 120 秒の練り混ぜ、繊維投入後 60 秒の練り混ぜという手順で製造した。ここで、繊維投入は分散性の確保のために手でほぐしながら行った。

*1 豊橋技術科学大学大学院 工学研究科建設工学専攻（正会員）

*2 豊橋技術科学大学助教授 工学教育国際協力研究センター 工博（正会員）

*3 株式会社フジミ工研滑川工場

2.3 フレッシュ性状

RF1500 を体積混入率で 1.0%用いて作製したコンクリートでは良好な施工性が得られたが、体積混入率が 2.0%のものは繊維と粗骨材が絡み、十分なコンクリートの流動性が得られなかった。

RF4000 を用いて作製した繊維混入率が 1.0%および 2.0%のコンクリートでは、両者ともセメントマトリクスとの付着性もよく、繊維および粗骨材ともに均一な分散性が得られた。施工性は混入量の増加に伴い若干劣る傾向があるものの、両者ともに実用上問題のないものであった。

F430D を用いて作製したコンクリートでは、繊維混入率 1.0%および 2.0%の両者ともに最も良好な施工性が得られた。

2.4 硬化性状

上記のコンクリートから採取した 100×200 の円柱供試体について圧縮試験および直接引張試験を、また、100×100×400mm の直方体供試体について曲げ試験をそれぞれ実施し、その力学特性を検討した。

2.4.1 圧縮強度

繊維混入量が 2.0%のコンクリートに対する圧縮試験結果を図-1 に示す。RF1500 を用いたコンクリートは、前述したように粗骨材と短繊維が絡み、打ち込みが不十分であったため他のコンクリートと比較し低い耐力となった。なお、最大強度以降のひずみ軟化性状は混入繊維の種類に関わらず同様の傾向を示した。

2.4.2 引張強度

直接引張試験結果を図-2 に示す。なお、試験方法は文献 2)によった。どのコンクリートも、100 μ 付近のひずみで最大引張強度を記録した。引張強度に関しては、繊維の種類および混入量の違いによる差異は見られなかった。これは、すべての供試体が、繊維の分布量の最も少ない断面で破壊したためと考えられる。なお、最大耐力以降の応力安定状態に達するまでのひずみは、短繊維混入量の増加に伴い、小さくなる傾向は認められる。

2.4.3 曲げ強度

各ケースについて 3 体の曲げ試験を行なった結

果を図-3 に示す。ビニロンファイバーを用いた供試体では、ひび割れ発生後から高い靱性を発揮した。ステンレスファイバーを用いた供試体では、ひび割れ発生までの耐力の増加が確認された。

直接引張試験の場合とは異なり、曲げ試験では短繊維混入率の違いによる靱性の差異が確認された。これは供試体作製時に振動台を用いたことに

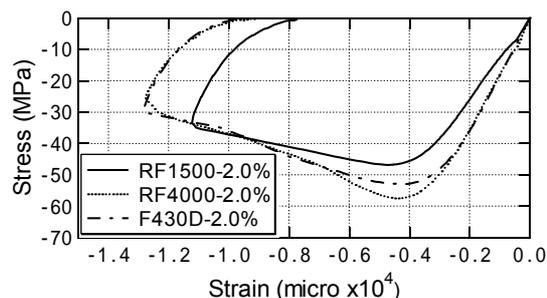


図-1 圧縮試験結果

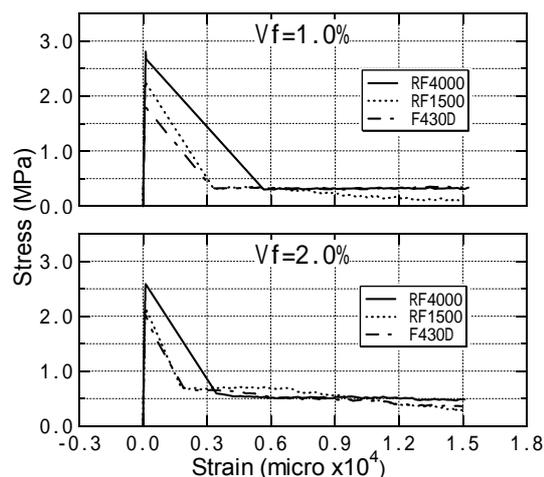


図-2 引張試験結果

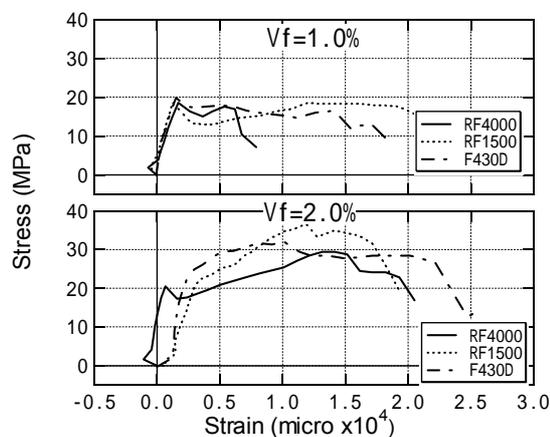


図-3 曲げ試験結果

より、短繊維の多くが水平方向に配向したためと推測される。すなわち、引張強度に関しても繊維の配向状態によって影響がでると言える。

3. 実験概要

3.1 試験体

調査実験結果に基づき構造実験では以下の3種類の繊維補強コンクリートを選定した。すなわち体積混入率で1.0%のRF4000を用いた試験体(以下、VF1試験体と呼称)、2.0%のRF4000を用いた試験体(以下、VF2試験体と呼称)および2.0%のF430Dを用いた試験体(以下、SF2試験体と呼称)である。なお、構造実験に用いた繊維補強コンクリートは、実機によって製造した。また、打設は縦方向に3回に分けて行い、繊維の配向は一様に分散しランダムな状態であった。

試験体形状を図-4に、試験体一覧を表-1にそれぞれ示す。試験体の柱部分は断面が $b \times D = 400\text{mm} \times 400\text{mm}$ 、内法高さが $h_0 = 1600\text{mm}$ (せん断スパン比 $M/QD=2$) であり、文献1)の実験結果との比較を意図して同形状のものとした。内蔵鉄骨には、2H 300×150×6.5×9の十字鉄骨を用いた。なお、文献1)の実験において普通コンクリートを用いたCES構造柱(以下、SC試験体と呼称)の性状は確認されているため、本実験では3体の試験体全てに繊維補強コンクリートを用いた。表-2に繊維補強コンクリートの特性を表-3に鉄骨の材料試験結果をそれぞれ示す。

表-1には部材強度計算値も併せて示している。なお、曲げ強度は平面保持を仮定した曲げ解析により、せん断強度は学会SRC規準の終局せん断耐

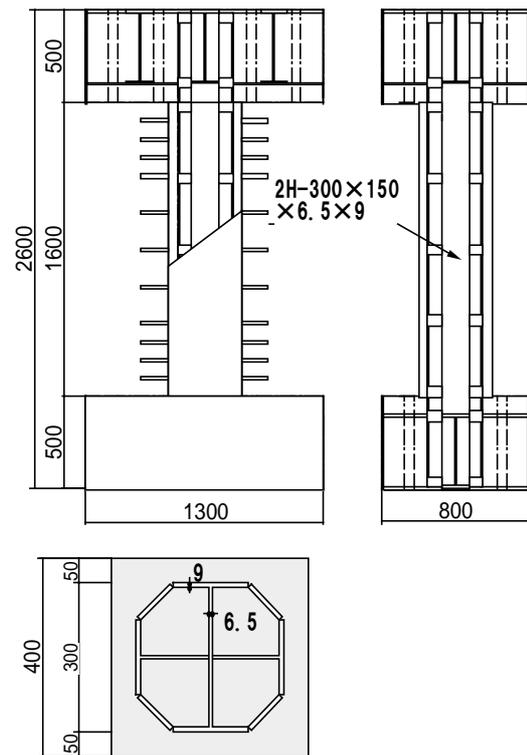


図-4 試験体形状

力式³⁾によりそれぞれ算定している。曲げ解析では、コンクリートの応力ひずみ関係はPark-Kentモデル(拘束効果を無視)を用い、引張応力は無視した。

3.2 荷重方法

荷重は、写真-2に示す荷重装置を用いて行なった。荷重は、1100kNの一定軸力(文献1)の実験と同軸力)の下で、正負逆対称曲げせん断交番荷重法によった。なお、軸力比 $(N/b \cdot D \cdot F_c)$ はVF1試験体では0.131、VF2試験体では0.124、SF2試験体では0.105となっている。水平力荷重は変形制御とし、柱上下端の相対水平変位と柱長さ h

表-1 試験体一覧

試験体名		VF1	VF2	SF2
補強繊維	種類	RF4000	RF4000	F430D
	混入量	1.0%	2.0%	2.0%
コンクリート	σ_B (MPa)	52.3	55.5	65.3
	E_c (GPa)	26.2	26.3	26.5
終局曲げ強度	Q_{mu} (kN) ¹⁾	664.4	649.1	710.5
せん断強度	Q_{su} (kN) ²⁾	536.1	540.0	553.7

1) 平面保持を仮定した曲げ解析 2) SRC 規準計算値

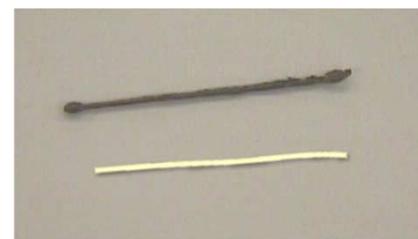


写真-1 使用繊維

表-2 繊維補強コンクリート特性表

	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 S/A (%)	繊維混入量 vf vol(%)	所要量					
				水 W (kg)	セメント C (kg)	細骨材 S (kg)	粗骨材 A (kg)	繊維 vf (kg)	混和剤 (g)
VF1	53	70	1.0	91	172	641	268	6.5	2.58
VF2			2.0					13.0	
SF2			40.0						

表-3 鉄骨の材料試験結果

種類	規格	ヤング係数 (GPa)	降伏応力度 (MPa)	備考
H-300x150 x6.5x9	SS400	207.6	336.8	フランジ
		214.8	363.6	ウェブ
PL-9	SS400	207.6	336.8	タイプレート

表-4 実験結果一覧

試験体	部材降伏時		最大耐力時	
	Ry (rad.)	Py (kN)	Rmax (rad.)	Pmax (kN)
VF1	0.0109	612.4	0.0154	689.4
VF2	0.0103	608.0	0.0151	703.2
SF2	0.0110	643.4	0.0204	737.5

で与えられる相対部材角 ($R = \delta/h$) で 0.005rad, 0.01rad, 0.02rad, 0.03rad および 0.04rad を 2 サイクルずつ繰返した後, 0.05rad まで載荷を行ない, 実験を終了した。

4. 実験結果

4.1 変形性状および破壊状況

実験結果一覧を表-4 に, また荷重 - 変形関係を図-5 にそれぞれ示す。なお, 部材降伏点は, フランジが降伏ひずみに達し, 部材の荷重 - 変形関係において剛性が低下した点 (図中の) とした。各試験体の最終破壊状況を写真-3 に示す。同写真には SC 試験体および文献 1) の実験で得られた高靱性型セメント系材料 (長さ 15mm, 直径 40.8 μ m のビニロン繊維を体積比で 1.5% 使用) を用いた



写真-2 載荷装置

CES 構造柱 (以下, SFC 試験体と呼称) の最終破壊状況も併せて示している。

VF1 試験体では, 高い構造性能を示すことが確認できた。初期曲げひび割れは相対部材角 $R=0.003$ rad 程度の時点から柱頭部と柱脚部で観察され, $R=0.0154$ rad で最大耐力に達した後, ゆるやかに耐力が低下した。変形の増大に伴い, 曲げせん断ひび割れ幅は拡大したが, せん断ひび割れについては分散する傾向が認められた。

VF2 試験体も VF1 と同様に高い構造性能を示した。荷重 - 変形関係の履歴ループ形状は VF1 とほぼ同様であったが, 最大耐力以降の靱性能が若干向上している。これは繊維量の増加により, 拘束効果が増大したことに起因すると考えられる。せん断ひび割れについては VF1 試験体よりもさらに分散性が増しており, 修復性の点についてもより有効な構造であることが確認された。

SF2 試験体は, 最大耐力およびそれに対応する部材角がともに他の 2 体に比して大きく, 極めて高い構造性能を示すことが確認された。コンクリート強度が他のコンクリートと比較して高いことを考慮すれば 粘りのある構造体であると言える。

写真で見られるように, 本実験で用いた 3 種類の繊維補強コンクリートによる CES 構造では, いずれも圧壊や大きなひび割れなどによるかぶりコンクリートの剥落は認められなかった。

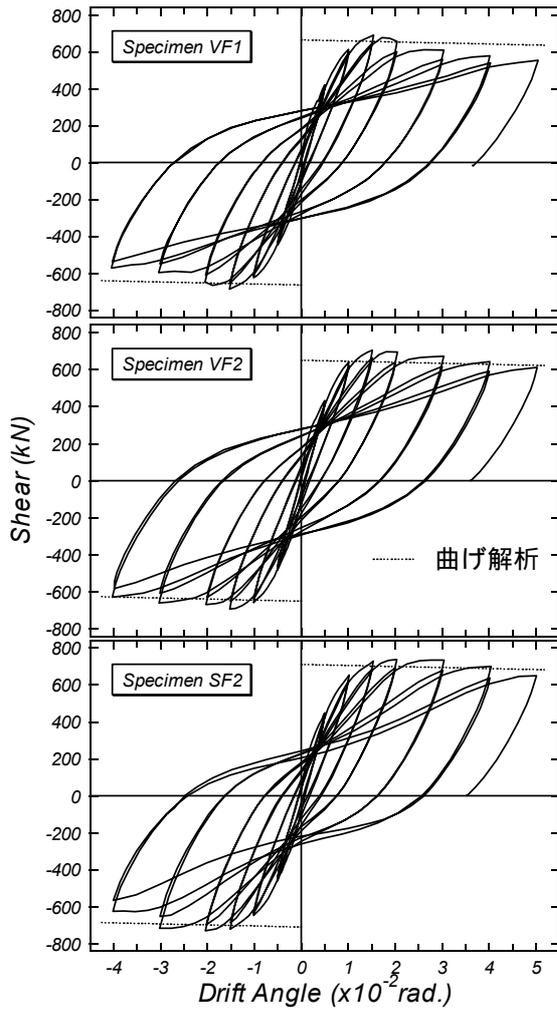


図-5 荷重 - 変形関係

4.2 剛性の比較

繊維補強コンクリート使用による CES 柱の構造性能改善効果を検討するために、本実験結果と前回の実験結果を荷重 - 変形関係の包絡線で比較したものを図-6 に示す。同図は VF1 試験体、VF2 試験体、SF2 試験体、SC 試験体および SFC 試験体の実験結果を比較している。繊維補強コンクリートを用いた柱ではいずれの場合も SFC 試験体で見られた初期剛性の低下は改善され、SC 試験体と同程度あるいはそれ以上の初期剛性が得られることが確認された。

また、ビニロンファイバーとステンレスファイバーには剛性の差が見られない。繊維補強コンクリートにおいて、短繊維は剛性にはほとんど影響を及ぼさないと考えられる。

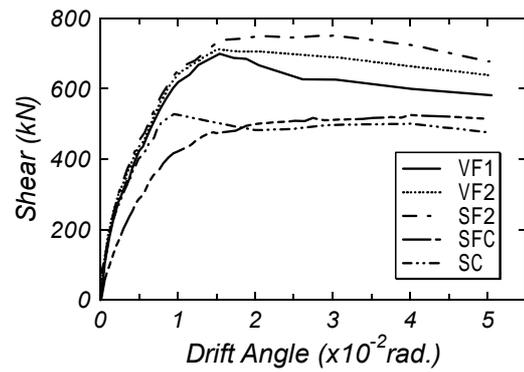


図-6 剛性比較



VF1 試験体

VF2 試験体

SF2 試験体

SC 試験体

SFC 試験体

写真-3 最終破壊状況

4.3 ひび割れ幅の測定

本実験ではデジタル画像を用いてひび割れ計測を行なった⁴⁾。VF1 試験体, VF2 試験体, SF2 試験体, SFC 試験体および SC 試験体の第一サイクルピーク後の除荷時における最大曲げひび割れ幅の推移を図-7 に, 最大せん断ひび割れ幅の推移を図-8 にそれぞれ示す。

繊維混入率 2.0%の VF2 試験体および SF2 試験体では, 曲げひび割れ幅およびせん断ひび割れ幅ともに, 変形の増加に伴う増加傾向は類似しており, 相対部材角 0.04rad.の大変形時においても 1mm 程度となっている。一方, 混入率 1.0%の VF1 試験体におけるひび割れ幅は, 他の 2 体に比べて大きく, 同一変形レベルで比較すると, 曲げひび割れおよびせん断ひび割れともに 1.5 倍程度となっている。すなわち, ひび割れ幅に対して繊維の種類及ばす影響は小さく, 繊維量が大きく影響する結果となっている。なお, 高靱性セメント系材料を用いた SFC 試験体と比較すると, 上記の 3 試験体では, 曲げひび割れ幅がかなり大きくなっているが, せん断ひび割れ幅は同程度のレベルにとどまっている。

以上示したように, 繊維補強コンクリートを用

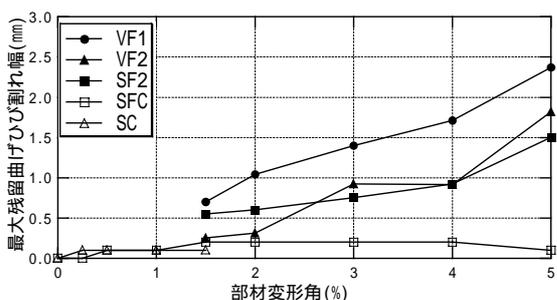


図-7 最大残留曲げせん断ひび割れ幅の推移

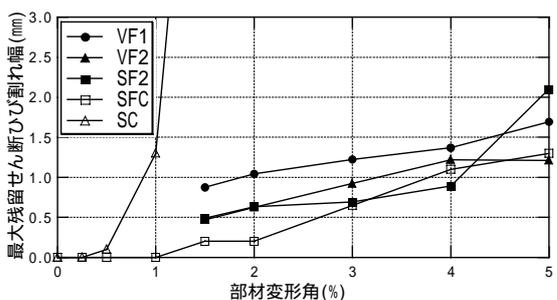


図-8 最大残留せん断ひび割れ幅の推移

いた試験体は高靱性セメント系材料を用いたものと比較すると曲げひび割れによる損傷の進展は明らかであるが, 大変形時までその損傷は比較的容易に修復できる範囲にあり十分実用に耐え得る構造であることが確認できた。

5. まとめ

繊維補強コンクリートを用いた CES 構造の柱部材の比較実験を行った。その結果, SRC 構造と同程度の優れた耐力・履歴性状が得られた。ひび割れや圧壊などの損傷は大変形時まで小さなレベルに押さえられ, 修復性にも優れていることが確認できた。また, 高靱性型セメント系材料を用いた CES 構造で見られた初期剛性の低下や, 乾燥収縮といった弱点も骨材の投入により大幅に改善され, 普通コンクリート - 鋼合成柱構造と同程度以上の初期剛性が得られた。

本実験に用いた繊維補強コンクリートは実機によって製造されたものであり, 構造性能のみならず施工性に関する問題もないことが確認された。

謝辞

(株)大林組技術研究所・山田守氏並びに武田篤史氏には画像解析に関して, また, 国土交通省国土技術政策総合研究所・諏訪田晴彦氏にはコンクリートの材料試験に関して, それぞれご指導・ご協力を賜った。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 高橋宏行, 前田匡樹, 倉本洋: 高靱性型セメント系材料を用いた鉄骨コンクリート構造柱の復元力特性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.21, No.3, pp.1075-1080, 2000.7
- 2) 佐藤幸博, 福山洋, 諏訪田晴彦: 高靱性型セメント系材料の一軸引張 - 圧縮繰り返し試験方法の提案, 日本建築学会構造系論文集, No.539, pp.7-12, 2001.1
- 3) 日本建築学会: 鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 1987
- 4) 武田篤史, 山田守, 大内一, 橋本周司: RC 構造物のデジタル画像を用いたひび割れ計測, 第 2 回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集, pp.29-34, 2001.3