

論文 繊維補強コンクリートパネルで被覆した鉄骨コンクリート柱の復元力特性に関する研究

柴山 豊^{*1}・倉本 洋^{*2}・永田 諭^{*1}・川崎 清彦^{*3}

要旨：CES 構造の施工性の改善を目的として，FRC プレキャストパネルで被覆した CES 柱の曲げせん断実験を行った。本論では，実験概要を述べるとともに，FRC プレキャストパネルの使用が CES 柱のひび割れ抑制に効果的であることを示す。また，ファイバーモデルによる曲げ解析を行い，実験結果のシミュレーションを行うとともに，カバーコンクリート，コアコンクリートおよび内蔵鉄骨の負担せん断力および負担軸力の推移性状の検討結果を示す。

キーワード：鉄骨コンクリート柱，繊維補強コンクリート，復元力特性，ファイバーモデル

1. はじめに

筆者等は鉄骨鉄筋コンクリート構造から鉄筋を省略したコンクリート - 鋼合成構造（以下，CES 構造）に関する研究を継続的に行っている^{1)~4)}。これまでの研究により，繊維補強コンクリートを用いることにより，軸力比 ($N/bD \cdot B$) で 0.6 という高軸力下においても安定した挙動を示すことが確認されている³⁾。しかし，打設の際に柱脚部にジャンカが生じ，施工性に若干の問題が残った。そこで，文献 4) では内蔵鉄骨を繊維補強モルタルパネルで被覆しその中に普通コンクリートを打設することにより，施工性の改善を試みた。しかし，大変形時にモルタルパネルとコンクリートが剥離し，一体性が問題となった。また，モルタルパネルに繊維を投入したことによるひび割れの抑制効果はあまり得られなかった。そこで，本研究では，これらの問題を解決するために，鉄骨を被覆するパネルを繊維補強コンクリートに変更し，また，繊維も文献 3) で良好な結果が得られたピニロンファイバー-RF4000 を使用するとともにパネルの接着面の形状も変更した。

本論では，作用軸力をパラメータとした繊維補強コンクリートパネルで被覆した CES 柱の実験の概要および構造性能に関する検討結果を述べる。さらに，ファイバーモデルを用いた繰り返し載荷の曲げ解析を行い，実験結果のシミュレーションを行うとともに各部材要素の負担せん断力および負担軸力の推移性状の検討結果を示す。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体の形状を図 - 1 に示す。試験体は柱部分の断面が $b \times D=400\text{mm} \times 400\text{mm}$ ，内法高さ $h=1,600\text{mm}$ （せん断スパン比 $M/QD=2$ ）である。試験体は繊維補強コンクリートパネルで鉄骨を被覆し，パネル同士をエポキシ系接着剤で接着した。パネル断面は文献 4) で使用した台形断面から長方形断面に変更した。試験体は 3 体作製し，一定軸力を載荷する試験体を 1 体（FCCES3），変動軸力を載荷する試験体を 2 体（FCCESV1 および FCCESV2）とした。

2.2 使用材料

繊維補強コンクリートパネルに使用した繊維は直径

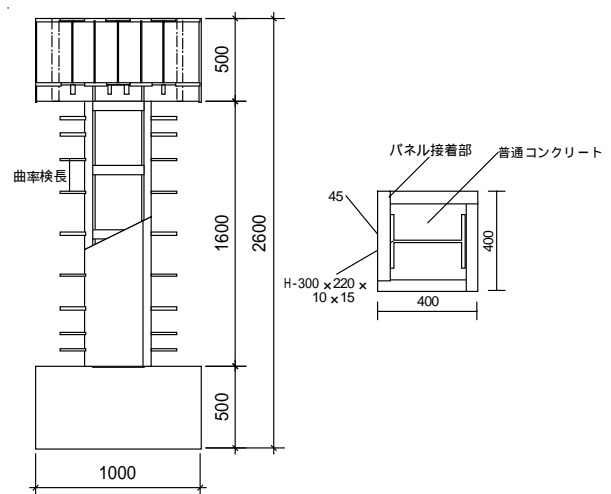


図 - 1 試験体形状

*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 工学部建設工学系 助教授 博士（工学）（正会員）

*3 株式会社フジミ工研滑川工場 技術担当部長（正会員）

表 - 1 繊維補強コンクリート調合表

水セメント比 W/C (%)	繊維混入量 Vf (%)	所要量				
		水 W (kg/m ³)	セメント C (kg/m ³)	細骨材 A (kg/m ³)	粗骨材 S (kg/m ³)	繊維 Vf (kg/m ³)
53	2.0	182	343	1282	536	26.0

表 - 2 繊維補強コンクリート試験結果

試験体名	圧縮強度 (MPa)	材齢 (日)
FCCES3	26.1	56
FCCESV1	26.7	60
FCCESV2	27.7	63

表 - 3 普通コンクリート試験結果

試験体名	圧縮強度 (MPa)	材齢 (日)
FCCES3	35.0	34
FCCESV1	36.3	38
FCCESV2	34.9	41

表 - 4 鉄骨試験結果

	ヤング係数 (GPa)	降伏応力度 (MPa)	備考
H 300×220× 10×15	146.0	293.6	フランジ
	156.6	313.3	ウェブ

が 0.66mm, 長さが 30mm のビニロンファイバー (RF4000) であり, 体積混入率を 2.0%とした。水セメント比は 53%である。表 - 1 に繊維補強コンクリートの調合表を示す。また, 表 - 2, 3 および 4 にはそれぞれ繊維補強コンクリート, 普通コンクリートおよび鉄骨の材料試験結果を示す。

2.3 荷重方法

荷重は図 - 2 示す荷重装置を用いて行った。荷重は試験体 FCCES3 では 1,500kN (軸力比 (N/bD_B): 0.3) の一定軸力の下で, 試験体 FCCESV1 では -947kN ~ 2,776kN (軸力比: -0.16 ~ 0.56), および FCCESV2 では -1,662kN ~ 3,644kN (軸力比: -0.29 ~ 0.70) の変動軸力の下で, それぞれ正負逆対称曲げせん断加力を行った。変動軸力は, 試験体 FCCESV1 では 20 階相当, および試験体 FCCESV2 では 30 階相当の純フレーム建築物の下層部側柱を想定し, 軸力 N をそれぞれ式(1)および(2)に従って変動させた。

$$N=0.1N_0 \pm 3Q \quad (1)$$

$$N=0.1N_0 \pm 4.5Q \quad (2)$$

ここに, N₀: 全塑性軸力, Q: 作用せん断力
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 で与えられる相対部材角 R (= Δ/h) で, 0.005, 0.01, 0.015, 0.02, 0.03rad. および 0.04rad. を 2

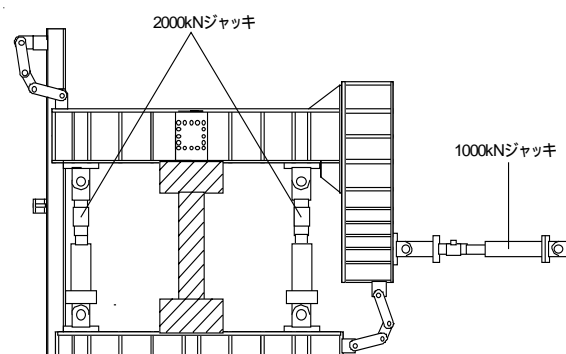


図 - 2 荷重装置

サイクルずつ繰り返した後, 0.05rad.まで荷重を行い, 実験を終了した。

3. 実験結果

3.1 破壊性状

試験体の R = 0.01rad.におけるひび割れ状況を図 - 3 および最終破壊状況を写真 - 1 示す。

試験体 FCCES3 では, R=0.005rad.で柱脚部に曲げひび割れが発生し, R=-0.005rad.で, 柱頭圧縮側に圧縮ひび割れが確認された。R=0.01rad.においてパネル接着部にひび割れが発生し, R=-0.01rad.では接着部の反対側に細かなせん断ひび割れが生じた。また R=0.015rad.のサイクルにおいてパネル接着部のひび割れが進行した。その後変形の進行に伴い, 損傷が大きくなり, R=0.04rad.においてパネルの一部が剥離した。

式(1)による変動軸力を作用させた試験体 FCCESV1 では, R=0.01rad.においてパネル接着部にひび割れが生じ, R=-0.01rad.では柱脚部に曲げひび割れが発生した。R=0.015rad.では軸力の増加によりすべての面のパネル接着部にひび割れが生じた。また, 接着部の反対側にせん断ひび割れが生じた。その後, 変形の進行に伴い, R=0.04rad.においてパネルが折れたが剥落は認められなかった。

式(2)による変動軸力を作用させた試験体 FCCESV2 では, 高軸力の影響により R=0.005rad.でパネル接着部にひび割れが発生した。R=0.01rad.で柱頭および柱脚部にせん断ひび割れおよび曲げひび割れが発生し, また

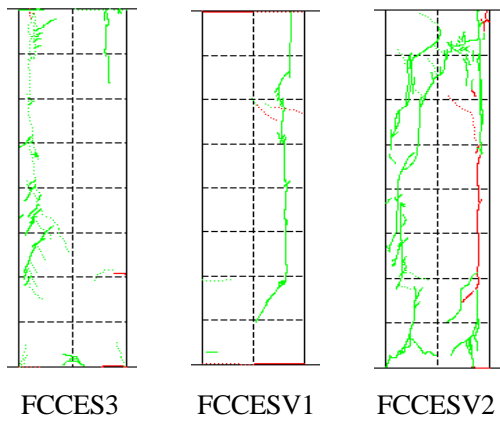


図 - 3 ひび割れ状況 (R=0.01rad.)

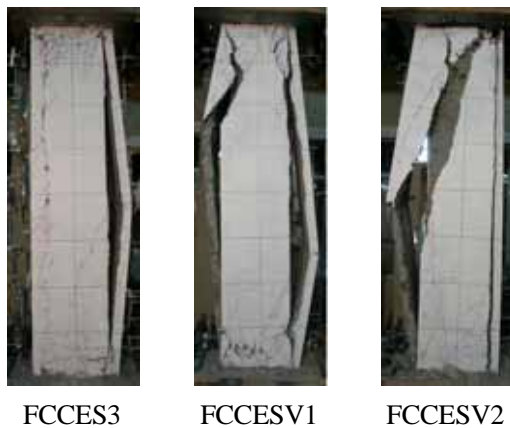


写真 - 1 最終破壊状況

柱頭部に圧壊も生じている。R=0.015rad.では柱脚部に細かいせん断ひび割れが多数発生した。その後、変位振幅の増加に伴いパネルの破壊が進行した。最終破壊状況では、載荷方向と直交する面のパネルが剥離している。特に軸力が高くなるにつれて損傷も激しくなっている。さらに、試験体 FCCESV2 では内蔵鉄骨の座屈も確認された。なお、外郭パネルはどの試験体も R=0.03 から R=0.04rad.で一体性が失われており、昨年度の試験体と比較しても、あまり改善は認められず、さらなる検討が必要である。

本実験では試験体の各変形、第1サイクルピーク除荷時におけるひび割れ幅をクラックスケールにより測定した。各試験体の最大残留せん断ひび割れ幅を図-4に、最大残留曲げひび割れ幅を図-5にそれぞれ示す。なお、比較のため文献4)の繊維補強モルタルパネルを用いた結果(図中の および)も併せて示す。なお、試験体 CES3S では軸力比0.3の一定軸力下、および試験体 CESVS では式(1)による変動軸力下で載荷を行っている。

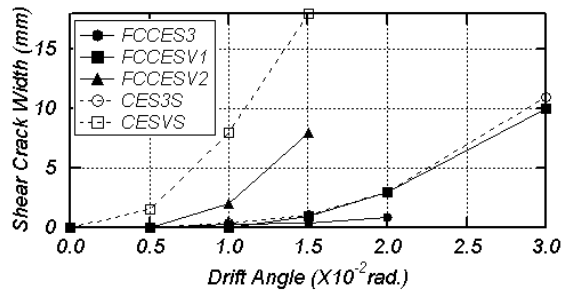


図 - 4 最大残留せん断ひび割れ幅

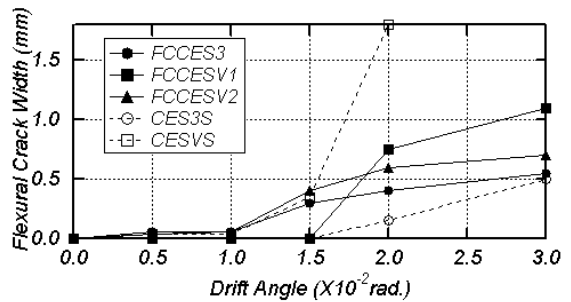


図 - 5 最大残留曲げひび割れ

せん断ひび割れは、昨年使用した繊維(繊維径0.1mm、長さ12mm)に比べて大きな抑制効果があったといえる。特に軸力が高くなるにつれてその効果は顕著に現れている。

曲げひび割れにおいても、早期に発生したが除荷時にはひび割れは閉じており、R=0.01rad.まではひび割れ幅はほぼ0であった。一定軸力下では投入繊維による差はほとんど見られなかったが、高軸力下では昨年の繊維に比べてひび割れ幅は半分以下であり、抑制効果が認められる。また、ひび割れが細かく入ったことから、ひび割れの分散効果も確認された。

3.2 荷重 - 変形特性

実験結果一覧を表-5に、荷重 - 変形関係を図-6にそれぞれ示す。なお、内蔵鉄骨の柱頭および柱脚部に貼付したひずみゲージが降伏ひずみに達した時を部材降伏時(図-6中の)とした。また、図中の点線は累加強度理論⁵⁾による終局強度計算値を示している。

試験体 FCCES3 においては、安定した履歴ループを描いている。鉄骨は R=0.007rad.で降伏しているがその後も耐力は上昇し、R=0.015rad.で最大耐力716.0kNを記録した。その後も耐力はほとんど低下することはなかった。

式(1)による変動軸力を受ける試験体 FCCESV1 では、圧縮側では逆S字型、引張側では紡錘型の履歴ループ

表 - 5 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)
FCCES3	正負	0.0077	658.0	0.015	716.0
		-0.008	-699.5	-0.030	-720.0
FCCESV1	正負	0.0051	533.0	0.010	768.0
		-0.01	-393.5	-0.040	-485.5
FCCESV2	正負	0.0048	545.5	0.008	697.0
		-0.009	-318.0	-0.040	-425.0

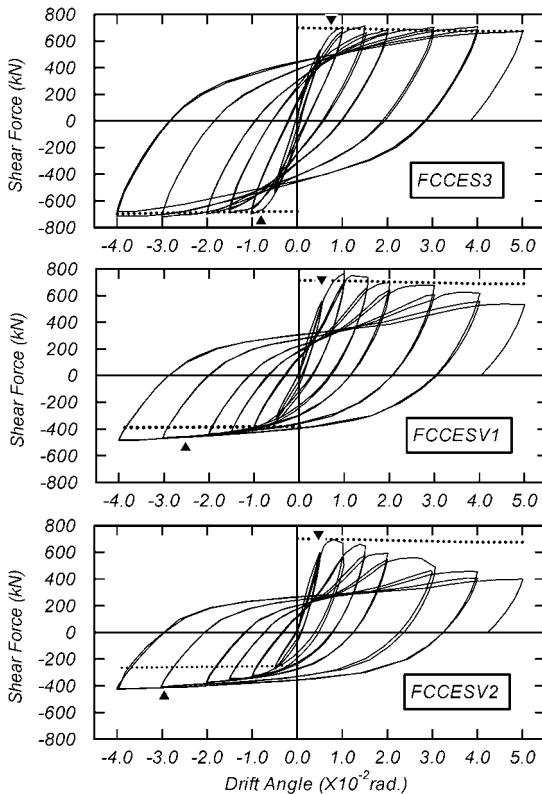


図 - 6 荷重 - 変形関係

を描いている。鉄骨は $R=0.005\text{rad.}$ で圧縮降伏し、 $R=0.01\text{rad.}$ で最大耐力 768.0kN を記録した。その後、変形の進行に伴い耐力が徐々に低下した。引張側では、ひずみ硬化の影響により $R=-0.04\text{rad.}$ まで耐力が上昇し、 -485.5kN を記録した。

式(2)による変動軸力を受ける試験体 FCCESV2 では、 $R=0.0048\text{rad.}$ で鉄骨が圧縮降伏し、 $R=0.008\text{rad.}$ で最大耐力 697.0kN を記録した。その後、高軸力の影響によりパネル接着部の反対側に多くのせん断ひび割れが生じ、その後変形の進行に伴い耐力が大きく低下した。しかしながら、引張軸力側では、 $R=-0.04\text{rad.}$ まで安定した挙動を示し、最大耐力 -425.0kN を記録した。

4. 荷重 - 変形解析

4.1 解析概要

解析は、文献 3) に示すものと同じ方法によった。すなわち、コンクリートの引張応力を無視し、断面平面保持の仮定の下、断面要素分割法を用いた剛性マトリックスによる増分型解析法を使用した。解析断面は図 - 7 に示すように 40 分割している。なお断面は鉄骨要素とカバーコンクリート要素およびコアコンクリート要素から構成されるものとし、繊維補強コンクリートと普通コンクリートでは、それぞれ異なる材料特性を使用した。

鉄骨要素には、柴田による区分線形の tri-linear 型モデル⁶⁾を使用した(図 - 8 参照)。区間剛性 $ES1$ および $ES2$ と補助曲線の勾配 C をそれぞれ $ES1=2.0 \times 10^7\text{N/mm}^2$, $ES2=ES1/10$, および $C=-ES1/200$ とした。繊維補強コンクリートおよび普通コンクリート要素の履歴ループは図 - 9 に示すような区分線モデルとした。繊維補強コンクリートでは、 $EC1=1.6 \times \sigma_B / \varepsilon_0$, $EC2=EC1/10$, および $EC3=EC1/4$ とした。ただし、 ε_0 は最大強度時のひずみであり、 0.0022 とした。普通コンクリートでは、 $EC1=1.6 \times \sigma_B / \varepsilon_0$, $EC2=EC1/3$, および $EC3=EC1/4$ とした。材軸方向の曲率分布は曲げモーメント分布に比例するものとし、関係式 $\phi = 6 \cdot R/h$ (h : 柱内法高さ) を基本とし、試行錯誤的にせん断力 - 水平変形関係の実験値との適合性を検討し、最終的に $\phi = 3.0 \cdot R/h$ で評価した。なお、結果的には図 - 10 に示すような柱頭部および柱脚部の局所的な曲率の増加を考慮して、図中の一点鎖線のような曲率分布を仮定したことに相当する。

4.2 解析結果

図 - 11 に各試験体のせん断力 - 水平変形関係を示す。なお、解析結果は載荷装置の特性による P - 効果の影響を考慮している。

試験体 FCCES3 では初期剛性、最大耐力、最大耐力後の耐力の低下もほぼ一致しており、良好な結果が得られている。一方、変動軸力を作用させた試験体 FCCESV1 では最大耐力が若干低くなっている。また、 $R=0.05\text{rad.}$ で実験値との差が大きくなっている。試験体 FCCESV2 でも試験体 FCCESV1 と同様に最大耐力が若干低くなっているが、概ね変動軸力を受ける柱の挙動

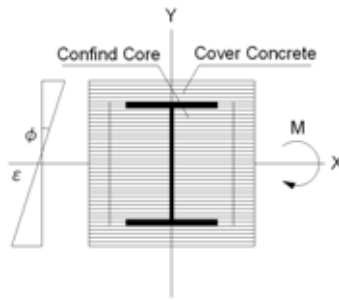


図 - 7 ファイバーモデル

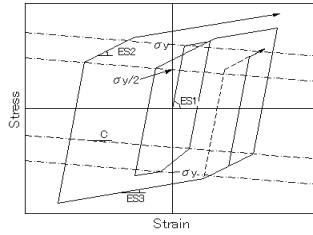


図 - 8 鉄骨モデル

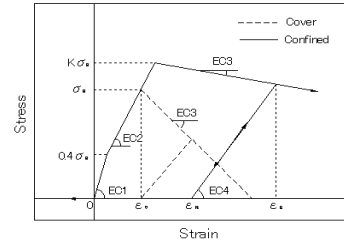


図 - 9 コンクリートモデル

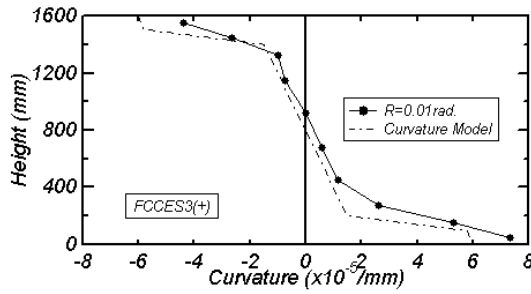


図 - 10 曲率分布

を解析によって評価できている。しかし、両試験体ともに $R=0.04\text{rad}$ 以降の大変形において圧縮軸力側での対応度合いが低下しており、外郭パネルの剥離により平面保持仮定が成り立たなくなった影響がでたものと推察される。

4.3 各要素のせん断力負担推移

図 - 12 および図 - 13 に試験体 FCCES3 および試験体 FCCESV1 のカバーコンクリート、コアコンクリートおよび鉄骨の負担せん断力の推移性状を示す。これは、解析断面要素内のカバーコンクリート、コアコンクリートおよび内蔵鉄骨のそれぞれが負担するせん断力を求めたものである。

試験体 FCCES3 では変形の初期段階においてカバーコンクリートの負担量が多いことが分かる。しかし、変形が進むにつれ徐々に負担量が減り、逆にコアコンクリートの負担量が増えている。また、カバーコンクリートおよびコアコンクリートともに原点指向型の履歴を示しており、エネルギー吸収量が小さいことがわかる。鉄骨はエネルギー吸収量の大きな履歴ループを描いており、せん断力の約半分を負担していることが認められる。

4.4 各要素の軸力負担推移

図 - 14 に試験体 FCCES3 および FCCESV1 における正載荷および負載荷時の各構成要素が負担している軸力の推移性状を示す。試験体 FCCES3 では、カバーコン

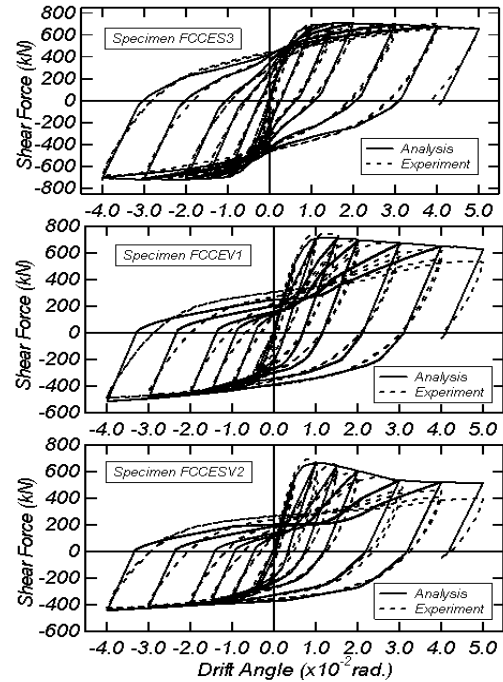


図 - 11 解析結果

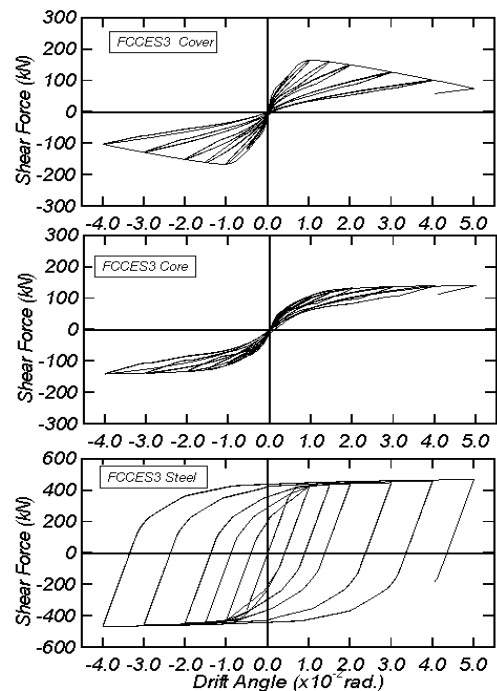


図 - 12 試験体 FCCES3 せん断力推移

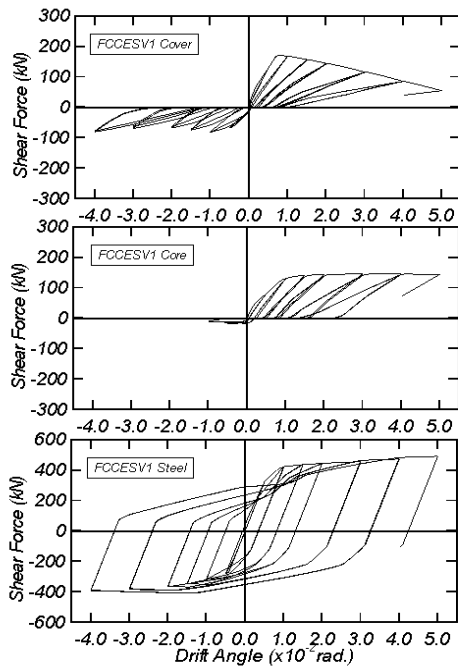


図 - 13 試験体 FCCESV1 のせん断力負担推移

クリートは $R=0.01\text{rad}$. 付近まで負担軸力が増加していき、その後変形の進行に伴い徐々に負担量が減少している。それに対して、コアコンクリートでは変形の進行に伴い負担量が増加していることが分かる。また、鉄骨は引張軸力を負担している。

試験体 FCCESV1 においては、変動軸力を載荷しているがカバーコンクリートの負担量は試験体 FCCES3 とほとんど変わらず、コアコンクリートの負担量が増加している。また、試験体 FCCES3 では鉄骨は引張軸力を受けているが、試験体 FCCESV1 では高軸力により圧縮軸力を受けている。引張軸力側ではカバーコンクリートに若干の圧縮軸力が作用し、コアコンクリートはほとんど軸力を負担しないことが分かる。圧縮軸力においては、大部分をコンクリートが負担していることが示されている。

5. まとめ

CES 柱の構造性能の改善を目的として、FRC プレキャストパネルで鉄骨を被覆した CES 柱の曲げせん断実験を行った。その結果、大変形時まで、安定した履歴を示した。さらに、ピニロンファイバー RF4000 を使用することにより、ひび割れの進展を抑えることが出来た。しかし、パネルの使用による一体性の問題は今後

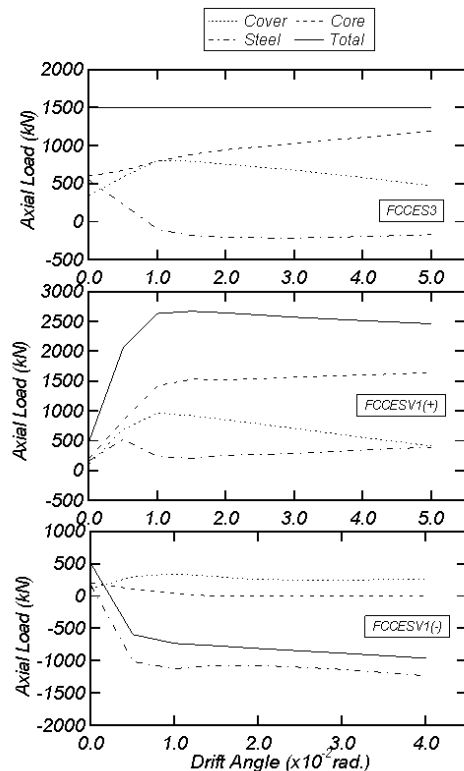


図 - 14 軸力負担量推移

も検討が必要である。ファイバーモデルによる曲げ解析を実施し、CES 柱の荷重 - 変形関係を概ねシミュレートすることができることを示した。また、CES 柱の構成要素であるカバーコンクリート、コアコンクリートおよび内蔵鉄骨のそれぞれにおけるせん断力および軸力の負担推移性状を把握した。

謝辞

試験体に用いた鉄骨は(社)鉄鋼連盟より供給された。関係各位に記して謝意を表する次第である。

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集, Vol.21, No.3, pp.1075-1080, 2000.7
- 2) 足立智弘, 倉本洋, 川崎清彦: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.271-276, 2002.7
- 3) 足立智弘, 倉本洋, 川崎清彦, 柴山豊: 高軸力を受ける繊維補強コンクリート - 鋼合成構造の構造性能に関する研究, コンクリート工学年次論文集, vol.25, No.2, pp.289-294, 2003.7
- 4) 柴山豊, 倉本洋, 川崎清彦, Fauzan: 繊維補強コンクリートパネルで被覆した CES 構造柱の構造性能に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp.157-162, 2004.7
- 5) 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年
- 6) Shibata M.: Analysis of Elastic-Plastic Behavior of a Steel Brace Subjected to Repeated Axial Force, International Journal of Solids and Structures, Vol.18, No.3, 1982.3, pp. 217-228