

(52) 材料特性の異なるFRCを用いた外付耐震補強工法におけるCES補強柱の構造性能

田口 孝¹・神谷 隆²・倉本 洋³

¹正会員 矢作建設工業 地震工学技術研究所 主席研究員 (〒480-1101 愛知郡長久手町熊張字茨ヶ廻間1533-74)

E-mail: t-taguchi@yahoo.co.jp, n-fukatsu@yahoo.co.jp

²正会員 矢作建設工業 地震工学技術研究所 副所長 (〒480-1101 愛知郡長久手町熊張字茨ヶ廻間1533-74)

E-mail: t-kamiya@yahoo.co.jp, n-fukatsu@yahoo.co.jp

³正会員 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 教授 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

E-mail: kuramoto@arch.eng.osaka-u.ac.jp

鉄骨コンクリート合成構造 (CES 構造) は、鉄骨と繊維補強コンクリート (FRC) のみからなる合成構造であり、従来の SRC 構造と同等以上の優れた構造性能を有することが知られている。そこで筆者らは、この CES 構造を既存 RC 建物の外付耐震補強工法に適用することを提案してきた。

これまでの研究により、RC 柱および RC フレームに CES 外付耐震補強を施すことで優れた耐震補強効果が得られることが確認されている。本研究では、CES 外付耐震補強における CES 補強柱で用いる FRC に関して、混入する繊維種の違いが FRC の材料特性に及ぼす影響について述べるとともに、CES 補強柱に採用した際の構造性能に及ぼす影響について検討を行う。

Key Words : CES, external seismic retrofit, CES column, fiber, FRC, seismic performance

1. はじめに

鉄骨コンクリート合成構造 (以下、CES構造) は、鉄骨とコンクリートのみからなる合成構造である¹⁾。これまでの研究によって、繊維補強コンクリートを使用した CES 構造は従来の SRC 構造と同等以上の復元力特性および損傷軽減効果が得られることが明らかにされ、その終局強度も一般化累加強度理論によって概ね評価できることが確認されている²⁾。

筆者らはこの CES 構造を既存 RC 建築物の耐震補強に適用することを計画し、図-1に示すように CES 部材の内蔵鉄骨をあと施工アンカーを介して既存建築物に取り付け、その周りに繊維補強コンクリートを打設する工法、すなわち、既存建築物に CES 補強柱を取付ける外付耐震補強工法を提案した³⁾。この工法のメリットとしては、居住者が生活しながらの施工が可能であるという従来の外付耐震補強の特徴に加え、鉄筋を配さないことにより施工性を向上させられること、工期を短縮できること、および CES 構造の優れた構造性能によりブレースを設置する必要がないことなどが挙げられる。すなわち、図-1

に示すようにブレースの無いフレーム型の補強が可能となるため、これまで遅々として進んでいなかった集合住宅や事務所建築物などの耐震補強に適した工法といえる。

これまでの研究により、既存 RC 柱および既存 RC フレームに CES 補強柱を取り付けて補強する CES 外付耐震補強を施すことで優れた耐震補強効果が得られることが確認されている⁴⁾。本研究では、その CES 補強柱で用いる繊維補強コンクリートに混入する繊維種の違いが、CES 補強柱の構造性能に及ぼす影響について検討を行う^{*}。

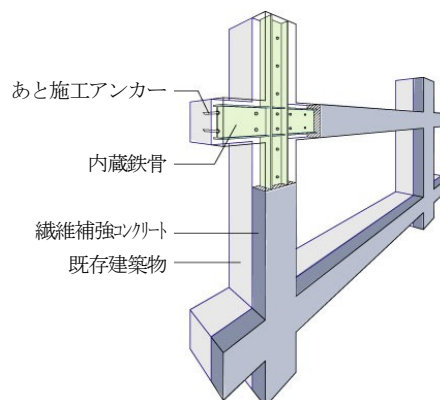


図-1 CES外付耐震補強の概要

* : 本論文の一部は、文献8)で発表したものである。

2. 繊維補強コンクリート

(1) 繊維の種類

既往の研究では、一種類の繊維材（ビニロン）のみを用いて繊維補強コンクリートを製作し、このコンクリートを用いて柱やフレームといった構造体を作成し、これに対して構造実験を行ってきた⁴⁵⁾。そこで今回、異なる種類の繊維を用いて繊維補強コンクリートを作成し、繊維の種類の違いがコンクリートの材料特性に及ぼす影響について確認することとした。

本研究において使用した繊維はビニロン、ポリプロピレンおよびスチールの3種類であり、その混入量はすべて同じとし、体積混入率で1.0%とした。また、繊維を混入する前のコンクリート（以下、ベースコンクリート）の調合や繊維の混入方法に関しても同一条件とし、アジテータ車の受け入れ口から1m³に必要な繊維量を約80秒間で投入した。

使用した繊維一覧を表-1 および写真-1 に、繊維補強コンクリートの調合表を表-2 に示す。なお、本試験での繊維補強コンクリートは、後で示す2/3縮尺モデルでの構造試験体に用いることから、最大粒径15mmの粗骨材を用いた。



(a) ビニロン



(b) ポリプロピレン



(c) スチール

写真-1 使用した繊維

表-1 使用した繊維一覧

材質	密度 (mg/mm ³)	長さ (mm)	換算太さ (mm)	引張強度 (N/mm ²)	混入率 (vol%)
ビニロン	1.30	30	0.66	880	1.0
ポリプロピレン	0.91	30	0.53	500以上	1.0
スチール	7.85	30	0.60	1000以上	1.0

表-2 繊維補強コンクリートの調合表

水セメント比 W/C (%)	所要量						
	水 W(kg/m ³)	セメント C(kg/m ³)	細骨材 S(kg/m ³)	粗骨材 G(kg/m ³)	繊維 Vf(kg/m ³)	石灰石粉 (kg/m ³)	混和剤 (kg/m ³)
58	184	317	934	556	13	250	3.80

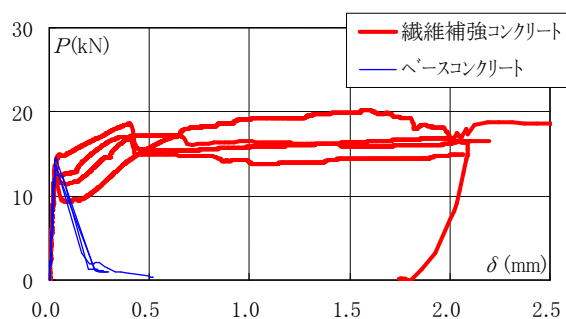
表-3 繊維補強コンクリートの材料試験結果

使用繊維	種類	スランブフロー またはスランブ (cm)	ヤング係数 (kN/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)	空気量 (%)	曲げ強度 (N/mm ²)	換算曲げ強度 (N/mm ²)	曲げタフネス (N・mm)
ビニロン	ベースコンクリート	59.5×57.0	25.5	33.3	2.2	4.2	3.99	0.26	1750.2
	繊維補強コンクリート	24.0	24.3	33.0	3.3	5.5	5.40	4.68	31625.2
ポリプロピレン	ベースコンクリート	54.5×52.0	22.9	30.3	2.1	3.1	3.94	0.27	1838.3
	繊維補強コンクリート	19.5	21.6	26.9	3.0	4.5	7.33	6.27	42317.2
スチール	ベースコンクリート	57.0×56.5	26.0	32.5	2.7	3.5	3.97	0.23	1530.2
	繊維補強コンクリート	25.0	24.9	32.5	3.4	4.8	7.21	6.02	40962.0

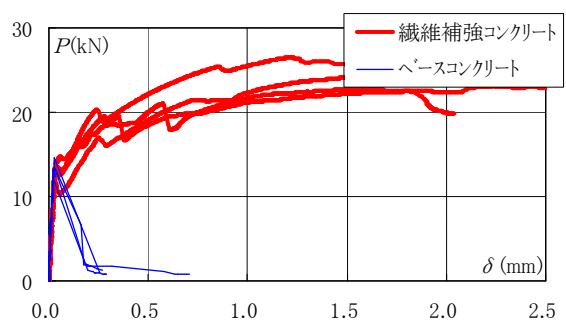
(2) 繊維補強コンクリートの性状

異なる繊維を用いた繊維補強コンクリートの材料試験結果⁶⁾を表-3に、曲げ試験の履歴特性を図-2に示す。ここで、換算曲げ強度、曲げタフネスの値は載荷点での変位データから求めている。

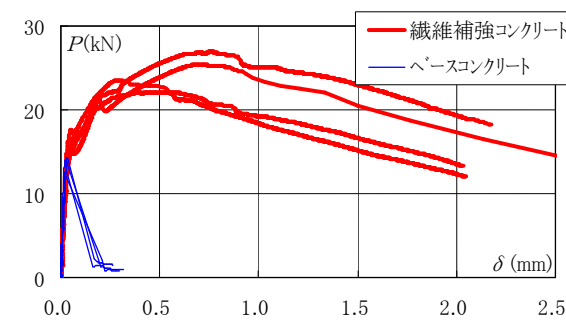
この結果、どの繊維種を用いたとしても60cm程度あったスランプフロー値が大幅に変化する傾向が確認された。ただし、繊維混入後においてもスランプとして19.5cmから25.0cmと、一般的な建築分野で用いるコンクリートとしては、十分施工が可能なコンクリートとなることが確認できた。また、繊維補強コンクリートとすることで、空気量が多少変化するとともに、ヤング係数は若干小さくなり、圧縮強度はビニロンおよびポリプロピレンの場合に小さくなることが確認できた。ただし、曲げ試験で得られた履歴特性からも分かるように、換算曲げ強度、曲げタフネスに関しては、繊維補強コンクリートとすることで、飛躍的に大きな値となることが確認できた。



(a) ビニロン



(b) ポリプロピレン



(c) スチール

図-2 繊維補強コンクリートの曲げ試験の履歴特性

3. 正負交番逆対称載荷実験

(1) 試験体概要

試験体一覧を表-4に、形状および寸法を図-3に示す。本研究における試験体は、CES外付耐震補強工法における補強部側の柱のみを対象としている。すなわち、実際の構造物では既存RC柱の外側にCES補強柱が取り付けいた形状となっているが、ここではそのCES補強柱のみについて検討を行っている。

試験体の形状は実物の約2/3の縮尺モデルであり、上下に加力スタブを有している。試験体の大きさとしては、柱部分は断面 $b \times D = 200\text{mm} \times 400\text{mm}$ 、内法高さ $h_0 = 1,200\text{mm}$ であり、H-300 $\times$ 130 $\times$ 6 $\times$ 9のH形鋼を内蔵したCES部材である。また、H形鋼のウェブ部分には、あと施工アンカーを貫通するためのアンカー用孔を設けている。さらに、全ての試験体ともにせん断破壊より曲げ降伏が先行して発生するように計画されている。

表-4 試験体一覧

試験体	R1	R2	R3
使用繊維	ビニロン	ポリプロピレン	スチール
柱内法高さ h_0 (mm)	1200		
せん断スパン比(M/QD)	1.5		
断面 $b \times D$ (mm)	200 $\times$ 400		
コンクリート種類	繊維補強コンクリート		
内蔵鉄骨断面(mm)	H-300 $\times$ 130 $\times$ 6 $\times$ 9(SS400)		
導入軸力(kN)	0		

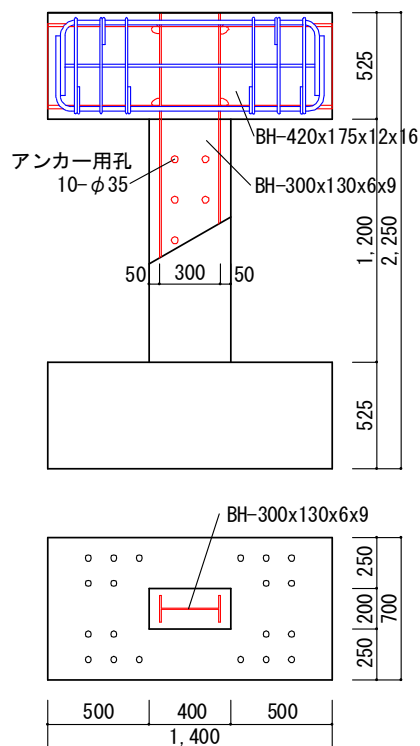


図-3 試験体の形状

(2) 使用材料

内蔵鉄骨の材料試験結果を表-5に示す。また、使用した繊維補強コンクリートは、2章で示した3種類の繊維種類によるものとし、材料特性は表-3による。

表-5 内蔵鉄骨の材料試験結果

試験片	鋼種	降伏応力度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	部位
PL-6	SN400B	256.9	428.9	185.9	ウェブ
PL-9	SN400B	296.1	450.3	205.3	フランジ

(3) 载荷概要

試験体への载荷は、図-4に示す载荷装置を用いて、静的正負交番逆対称曲げせん断加力とした。本来 CES 補強柱は後付けの補強部材であるため長期軸力は作用していない。ただし今回は、加力装置を安定させるために、2本の軸力用アクチュエーターにより軸力比 $N/(bD\sigma_B)$ で 0.02 に相当する一定圧縮軸力 (50kN) を負荷させた状態で载荷した。水平力の载荷は、柱内法高さ h_0 に対する柱上下端の相対水平変位 δ の比で与えられる部材角 $R (= \delta/h_0)$ による変位制御とした。载荷プログラムは、 $R=0.002$ および 0.004rad を正負 1 サイクル、 $R=0.0067, 0.01, 0.015, 0.02, 0.03$ および 0.04rad を正負 2 サイクルずつ行い、最後に $R=0.05\text{rad}$ を正側に半サイクル行うこととした。载荷状況を写真-2に示す。

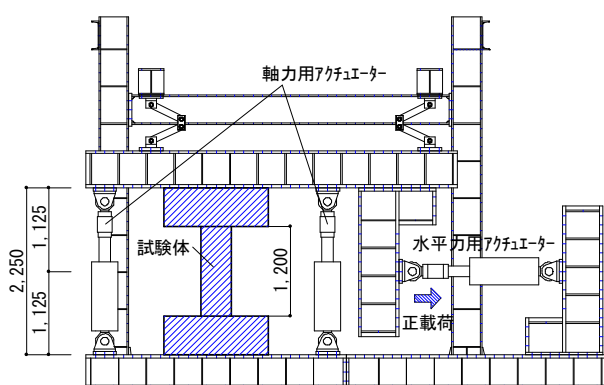


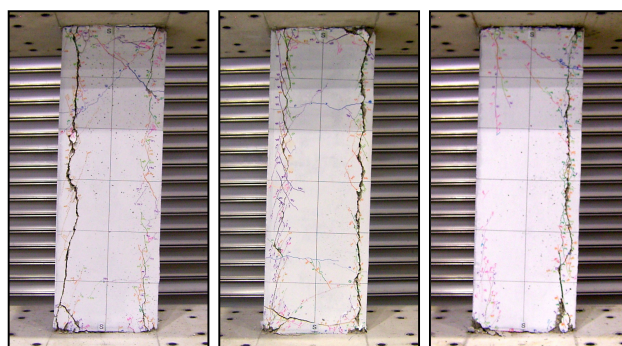
図-4 载荷装置



写真-2 载荷状況

(4) 破壊性状

各試験体の最終破壊状況 ($R=0.05\text{rad}$ 終了時) を写真-3に示す。全ての試験体とも、载荷初期段階においてスタブと柱の境界部に曲げひび割れが発生し、その後鉄骨フランジに沿ったひび割れが顕著に発生した。最終段階では、このフランジに沿ったひび割れが大きく拡幅する結果となったが、コンクリートの剥落はほとんど見られなかった。



R1

R2

R3

写真-3 最終破壊状況

(5) 水平荷重—水平変形関係

実験結果における水平荷重—水平変形関係を図-5に示す。また、軸力 $N=0\text{kN}$ の条件下における一般化累加強度理論から求めた曲げ終局強度の計算値を実験結果に加えて表-6に示す。なお、図中の○は貼付した歪ゲージから得られた内蔵鉄骨のフランジが最初に降伏した点を、△は内蔵鉄骨のウェブが最初に降伏した点を示している。また、◆は実験で得られた最大耐力点を示し、水平実線は計算による曲げ終局強度を示している。

全ての試験体とも、 $R=0.0036 \sim 0.0052\text{rad}$ で内蔵鉄骨のフランジが降伏し、その後計算値に達している。そして、内蔵鉄骨のウェブが降伏してから最大耐力を記録するが、その後も急激な耐力低下をすることなく、最終変形角まで安定した紡錘型の履歴ループを描いている。内蔵鉄骨のウェブ降伏変位や、最大耐力点の発生変位には多少の違いは見られるが、内蔵鉄骨のフランジ降伏点や履歴特性には、繊維の違いによる大きな差異は見られない。

さらに、全ての試験体とも内蔵鉄骨のフランジが降伏する曲げ破壊が発生しているとともに、実験結果が計算値を1.25～1.33の範囲で上回る結果となった。この結果から、繊維補強コンクリートに混入する繊維種については関係なく、曲げ終局強度は一般化累加強度理論に基づいて計算することで十分に評価できるものと考察できる。

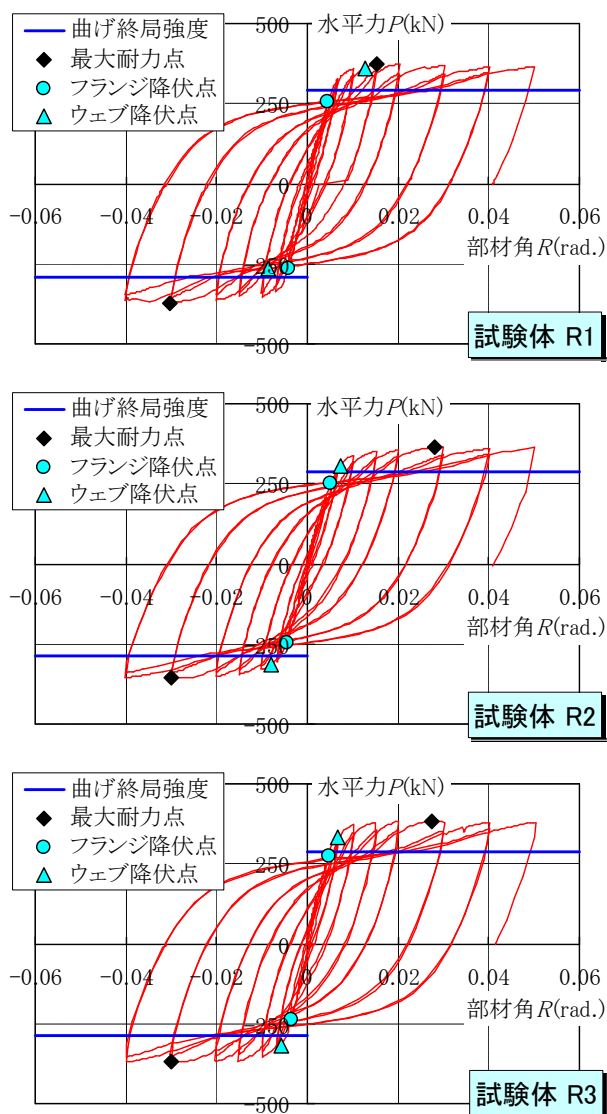


図-5 水平荷重—水平変形関係

(6) ひび割れ幅の推移

試験体の残留ひび割れ幅の推移状況を図-6に示す。ここで残留ひび割れ幅は、正載荷側の1サイクル目終了後の値を用いて示している。

この結果、全ての試験体とも内蔵鉄骨のフランジが降伏した以降に曲げひび割れが顕著に発生しており、試験

体R1では $R=0.01\text{rad.}$ で 2mm を超える結果（損傷度IV）⁷⁾となった。また、試験体は曲げ降伏が先行するように設計されていることから、大変形に至るまでせん断ひび割れは小さな値であった。

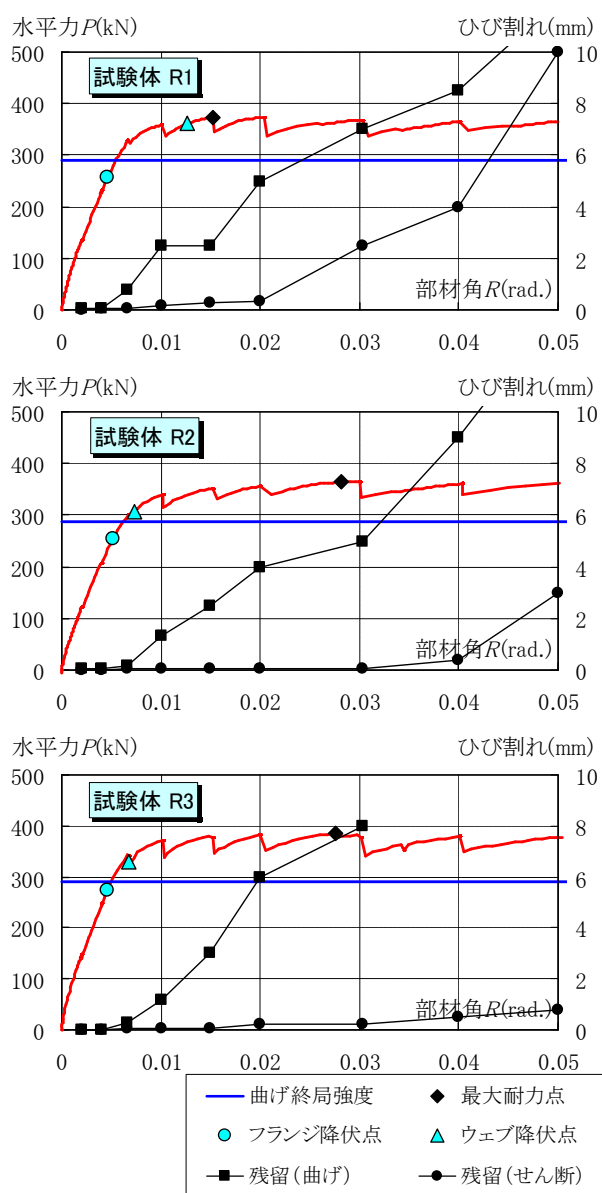


図-6 残留ひび割れ幅の推移

表-6 実験結果と計算値

試験体	載荷 方向	実験値						計算値	実験値 /計算値
		最大耐力点		フランジ降伏		ウェブ降伏		曲げ終局時せん断力	
		$E P_{max}$ (kN)	$E R_{max}$ (rad.)	P_y (kN)	R_y (rad.)	P_y (kN)	R_y (rad.)		
		$A P_{max}$ (kN)						$E P_{max} / A P_{max}$	
R1	正	373.22	0.015	257.78	0.005	360.57	0.013	289.8	1.29
	負	-373.22	-0.030	-263.31	-0.004	-264.10	-0.009		1.29
R2	正	364.52	0.028	253.03	0.005	306.01	0.007	286.7	1.27
	負	-357.41	-0.030	-248.29	-0.005	-313.92	-0.008		1.25
R3	正	384.29	0.028	272.80	0.005	330.52	0.007	289.5	1.33
	負	-370.06	-0.030	-238.01	-0.004	-321.03	-0.006		1.28

4. まとめ

本研究では、混入する繊維種をパラメータとした繊維補強コンクリート（FRC）の材料特性について示すとともに、CES 補強柱の静的加力実験を実施し、繊維種の違いが破壊状況、復元力特性、終局強度、ひび割れ幅に及ぼす影響について検討を行った。

その結果、実験で用いた繊維種であれば、体積混入率 1.0% の繊維補強コンクリートを製造したとしても、実務段階で施工が可能な性状を有していることが確認された。また、ベースとなるコンクリートに繊維を混入することによって換算曲げ強度、曲げタフネスは飛躍的に大きな値となるが、ビニロン、ポリプロピレンといった繊維の場合には圧縮強度が低下する傾向があることが確認された。

さらに、それらの繊維種を用いた繊維補強コンクリートによる CES 補強柱の構造実験によって、その繊維種に関係なく破壊性状、ひび割れ幅の推移には大きな違いは見られず、CES 補強柱は安定した復元力特性を示すとともに、大変形時までコンクリートの剥落等のない破壊性状を示すことが確認された。さらに、CES 補強柱の曲げ終局強度も、繊維種に関係なく軸力 $N=0\text{kN}$ の条件下における一般化累加強度理論に基づいて計算することで十分に評価できることを示した。

謝辞：試験体の製作にあたり、宇部日東化成(株)、(株)ブリヂストンの協力を得ました。ここに深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 倉本洋：今伝えたいトピックス CES 合成構造システム，建築雑誌，Vol.120，No.1535，pp.34-35，2005.7
- 2) 田口孝，永田諭，松井智哉，倉本洋：H 型鉄骨を内蔵した CES 柱の構造特性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.28，No.2，pp.1273-1278，2006.7.
- 3) 田口孝：CES の既存建物の耐震補強への適用，日本建築学会大会（関東）構造部門（SCCS）パネルディスカッション資料，pp.41-44，2006.9
- 4) 佐藤美郷，倉本洋，芳賀亮祐，松井智哉，田口孝，鈴木峰里：CES 外付耐震補強を施した RC 柱の耐力と変形性能，第 7 回複合構造の活用に関するシンポジウム講演集，土木学会・日本建築学会，pp.36.1-36.8，2007.11
- 5) 倉本洋，芳賀亮介，松井智哉，田口孝：CES 外付耐震補強 RC フレームの動的載荷実験，日本建築学会構造系論文集，日本建築学会，Vol.73，No.630，pp.1265-1272，2008.8
- 6) 日本コンクリート工学協会：繊維補強コンクリートの試験方法に関する規準，1984
- 7) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造物の耐震性能評価指針（案）・同解説，2004
- 8) 田口孝，倉本洋：CES 外付耐震補強工法における補強柱の構造性能に及ぼす FRC 混入繊維種の影響，日本地震工学会大会梗概集，第 6 回，pp.166-167，2008.11

STRUCTURAL PERFORMANCE OF EXTERNALLY RETROFITTED CES COLUMNS USING FRC WITH DIFFERENT MATERIAL PROPERTIES

Takashi TAGUCHI, Takashi KAMIYA and Hiroshi KURAMOTO

An external seismic retrofitting method utilizing CES frames which consist of steel and fiber reinforced concrete have been proposed to apply for the retrofitting and strengthening of relatively large-scale buildings such as apartment houses, office buildings and commercial buildings. An advantage of this method is to make possible the use of external pure frames without braces, which permit to maintain open spaces and open view in the existing buildings without changing the planning. The purpose of this study is to investigate the seismic performance of external retrofitting CES columns. The material test of three types of fibers used for CES columns and the static loading test on three CES columns were conducted. This paper outlines the material and structural tests.