

報告 CFシートを用いて補修したRC柱の耐力・剛性確認実験

伊藤 真由子*1 西田 哲也*2 小林 淳*3 星 道夫*4

要旨：試験体諸元及び加力実験による損傷状況がほぼ同じである2体のRC柱試験体に対し、エポキシ樹脂注入によるひび割れ補修と無収縮モルタルによるかぶりコンクリート欠損箇所の断面修復を行い、炭素繊維シート（CFシート）巻き付けの有無をパラメータとして、損傷を受けたRC柱の補修方法とその効果を検討した。その結果、エポキシ樹脂のみによる補修でも耐力・靱性の回復は期待できるものの、エポキシ樹脂注入後さらにCFシートを巻き付けた試験体で剛性回復率の改善が見られたことから、施工のばらつきや不確かさを補う目的でCFシート巻き付け工法を併用することは有効であると考えられる。

キーワード：RC柱、ひび割れ補修、CFシート、耐震補強、擬似動的実験

1. はじめに

鉄筋コンクリート柱に発生するひび割れなどの損傷に対する主な補修方法としては、モルタルやコンクリートを注入打設する方法、ひび割れ箇所に圧入材料としてエポキシ樹脂を注入する方法などが挙げられる。一方、耐震補強ではCFシート等を巻き付けてRC柱の靱性を改善する方法が用いられている。これらの補修・補強方法の効果に関しては、これまでに多くの実験的検討がなされている。ひび割れの発生している柱を補修し、かつ耐震補強する場合には、樹脂注入とCFシート巻き付け工法を併用して用いる方法が考えられるが、本報告では、これらの異なる補修・補強方法を組み合わせて用いる場合の補修効果について検討することとした。以上の観点から、別の研究目的のために使用されたRC柱の試験体2体を用い、CFシートの巻き付けの有無をパラメータとして、構造的観点からのひび割れ補修効果を実験的に検討した。

2. 実験概要

2.1 試験体

使用した試験体は、鉄筋コンクリート造の中層建物における変動軸力の少ない1階の中柱を想定

した、カンティレバー型の実大に近い試験体である。この試験体は、別の目的で実施された擬似動的実験（以下、先行実験と称す）に用いられたものである。試験体の断面は40×40cmの正方形（図-1）、加力点高さは100cm、せん断スパン比は2.5である。柱軸力は941kN（一定）とし、PC鋼棒と油圧ジャッキによって与えた。（図-2）先行実験時のコンクリート強度を用いて計算した軸力比（ $N/bD\sigma_B$ ）は0.25となる。

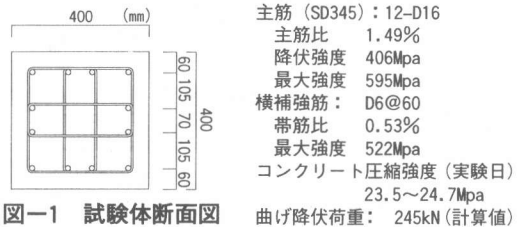


図-1 試験体断面図

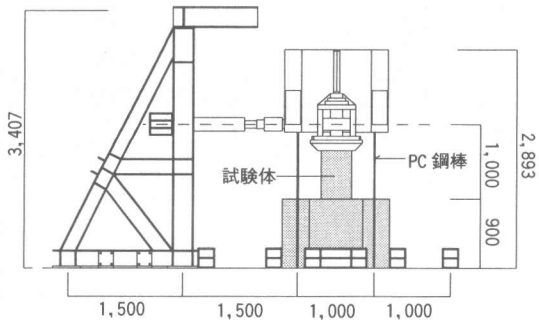


図-2 実験装置

*1 秋田県立大学助手 システム科学技術学部建築環境システム学科 工修 (正会員)
 *2 秋田県立大学講師 システム科学技術学部建築環境システム学科 工修 (正会員)
 *3 秋田県立大学教授 システム科学技術学部建築環境システム学科 工博 (正会員)
 *4 東北大学助手 大学院工学研究科災害制御研究センター地震工学研究分野

2.2 実験装置

実験装置¹⁾は、複動型油圧ジャッキ、油圧ポンプ、ジャッキ制御用コントローラ、デジタル多点測定装置、コンピュータ2台から成り立っている。コンピュータは、コントローラに加力目標値となる応答変位計算結果の値を送りこむなど実験全体のコントロールをするものと、変位計やひずみゲージなどのデータを取り込むためのものである。

2.3 先行実験の概要

先行実験では、PSD-R7に弾性域から大変形域まで入力波の倍率を段階的に変えながら6回に分けて加力を行った。PSD-R8には瞬間的に大きな入力をもたす直下型地震の特性を考慮して、初めから大きなレベルで2回の加力を行った。また、両試験体共に先行実験により部材角にして1/50rad程度までの加力が終了しており、試験体は降伏し、曲げ及びせん断ひび割れが発生している。先行実験の一覧を表-1に示す。

2.4 試験体の補修方法

ひび割れ補修には低粘度のエポキシ樹脂を使用し、注入器具による自動低圧注入工法を用いた。また、かぶりコンクリートなどの欠損箇所の補修

表-1 先行実験の概要

先行実験	RUN	入力地震波	最大加速度 (Gal)	最大変位 (mm)
PSD-R7	1	Sylmar模擬波 Level1	52.02	0.45
	2	Sylmar模擬波 Level2	101.50	-2.17
	3		154.28	4.23
	4		182.70	5.71
	5		223.30	7.59
	6		284.20	-15.88
PSD-R8	1	Sylmar模擬波 Level2	203.00	5.74
	2	Sylmar模擬波 Level2	284.20	-14.25

(PSD-R7)



(PSD-R8)

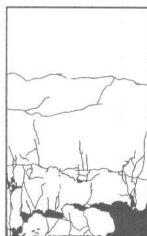


図-3 先行実験終了時の試験体 (S面)

にはセメント系の無収縮グラウト剤を使用した。先行実験終了時の試験体を図-3に示す。RF7試験体には、CFシート(目付量300g/m²)を部材軸直交方向に巻き付け、エポキシ樹脂によりCFRP化(Carbon Fiber Reinforced Plastic)させた。巻き付け回数は1回とし、ラップ長さを300mmとしてシート相互の定着をはかった。また、CFシート補強時におけるプライマー、含浸接着樹脂は共にエポキシ樹脂系であり、施工時期を考慮して低温時施工用のものを使用した。なお今回の実験では補修材料の品質試験は行わなかったため、メーカーによる品質試験結果を表-2に示す。

2.5 入力地震波

本実験では1994年Northridge地震Sylmar County Hospital NS成分(以下、Sylmar模擬波)を用いて模擬地震波を作成した。なお、模擬地震動作成時の目標応答スペクトルは、文献2)による水平動基準応答スペクトル(Level 1, Level 2)に適合させた。表-3に加力の手順を、図-4に入力波の加速度時刻歴³⁾を示す。

表-2 補修材料のメーカー試験結果

エポキシ樹脂			CFシート		
(冬期用)	試験結果	単位	項目	試験結果	単位
粘土	610	MPa·s	繊維目付	300	g/m ²
初期硬化性	9.31	N/mm ²	引張強度	3400	N/mm ²
粘着強さ	6.90	N/mm ²	引張弾性率	2.3×10 ⁵	N/mm ²
硬化収縮率	1.65	%	破断伸度	1.5	%
曲げ強さ	79.90	N/mm ²	単位幅当りCF断面積	1.67	cm ² /m

表-3 実験ケースと入力地震波

試験体	RUN	入力地震波	最大加速度 (Gal)	最大変位 (mm)	先行実験	補修法
RF7	1	Sylmar模擬波 Level2	203.00	8.69	PSD-R7	A
	2	Sylmar模擬波 Level2	284.20	14.61		
RF8	1	Sylmar模擬波 Level2	203.00	9.30	PSD-R8	B
	2	Sylmar模擬波 Level2	284.20	13.10		

補修A: エポキシ樹脂+モルタル+CFシート

補修B: エポキシ樹脂+モルタル

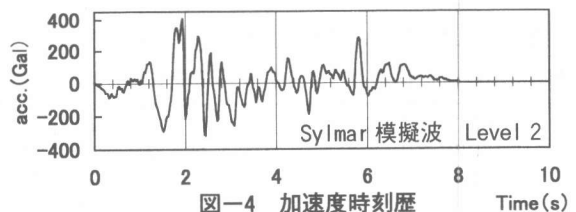


図-4 加速度時刻歴

3. 実験結果

3-1 荷重-変形関係

先行実験と本実験の荷重-変位関係を図-5～10に示す。両試験体とも 203Gal 入力に対して 7～

9 mm, 284Gal 入力に対して 10～14 mm 程度の応答値を示した。荷重変形関係のループは、RF7・RF8 ともによく似た履歴性状を示しており、この履歴ループからは両試験体に大きな違いは見られない。

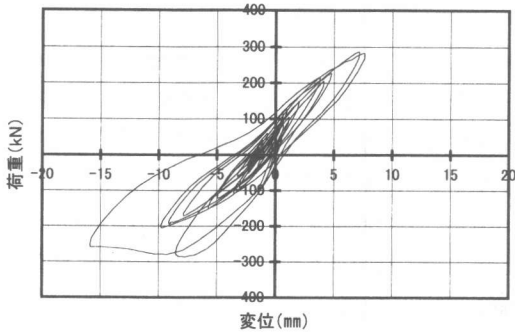


図-5 先行実験 PSD-R7 (RUN 6)

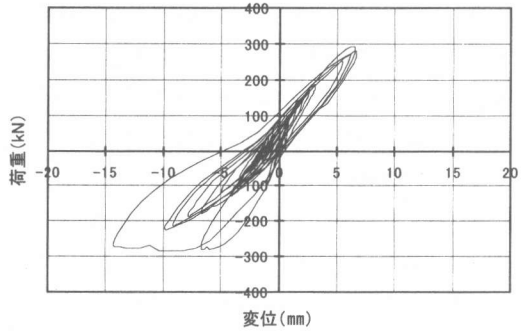


図-6 先行実験 PSD-R8 (RUN 2)

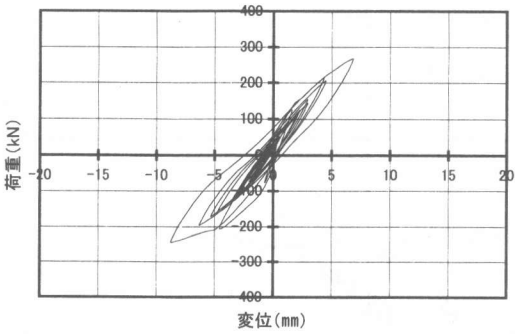


図-7 RF7 (RUN 1)

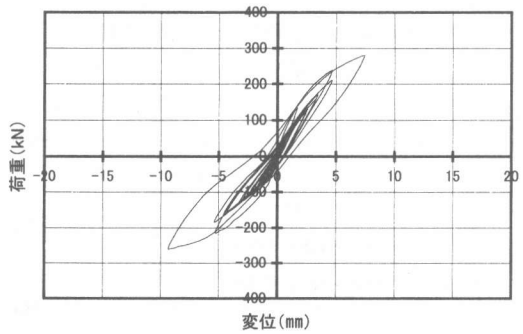


図-8 RF8 (RUN 1)

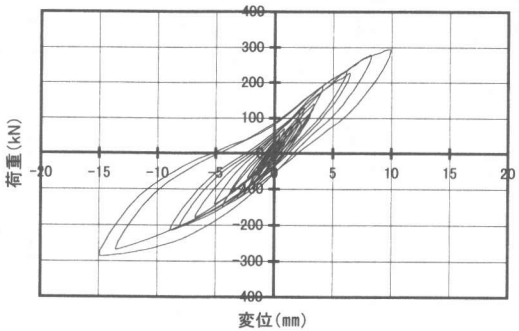


図-9 RF7 (RUN 2)

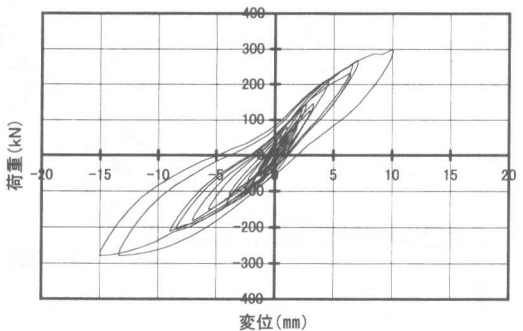


図-10 RF8 (RUN 2)

補修の効果を検討するために、先行実験及び本実験の荷重変位関係から求めた包絡線を図-11に、最大荷重・最大変位の一覧を表-4に示す。包絡線は、各試験体の荷重-変形ループにおける変位更新時の値として0.5~1.0 mm刻みとして求めた。図-5・6に示すように先行実験時の両試験体の最終状態は、+7~-15 mm程度の変形を経験している。先行実験では、PSD-R7はRUN1~6まで6回の繰り返し加力によって徐々に加力振幅を増大させたのに対し、PSD-R8はRUN1~2までの2回の加力で最終状態に到達させている。すなわち両試験体は加力の回数が違うものの、最終的な到達変位はほぼ同程度であり、図-11に示す包絡線からも先行実験時の両試験体の損傷状況はほぼ同じ程度だったと言える。補修後の再加力実験に関しては、図-11からCFシートを用いたRF7は、変位が約±7 mm程度までは、RF8よりも平均的に35%程高い荷重値を示したことがわかる。これはCFシートを巻くことで試験体表面がエポキシ樹脂により固

められ、それがエポキシ樹脂注入時の欠損や注入されない微小なひび割れに対して有効に作用したため、RF8よりも若干高い剛性を示したものと思われる。ただし、±7 mm以降はほぼ同じ荷重値を示している。さらに先行実験(PSD-R7・R8)では、-10 mm付近から荷重の低下が見られたものの、RF7・RF8では-10 mmを超えても荷重の低下は見られなかった。負側の大変形域における荷重値を比較すると、補修・補強を施したことにより、両試験体ともに靱性が向上している可能性が考えられるが、その差は小さく断定は出来ない。また、±2~3 mm程度の変形領域において両試験体の荷重値を比較してみると、RF7は先行実験のPSD-R7に比べて約8割となっており、変位が±1 mmの値では約9割となっている。これに対しCFシートを用いなかったRF8では、先行実験のPSD-R8に比べて約6割程度であることから、小さな変形領域においてはCFシートによる補修効果があるものと推定される。

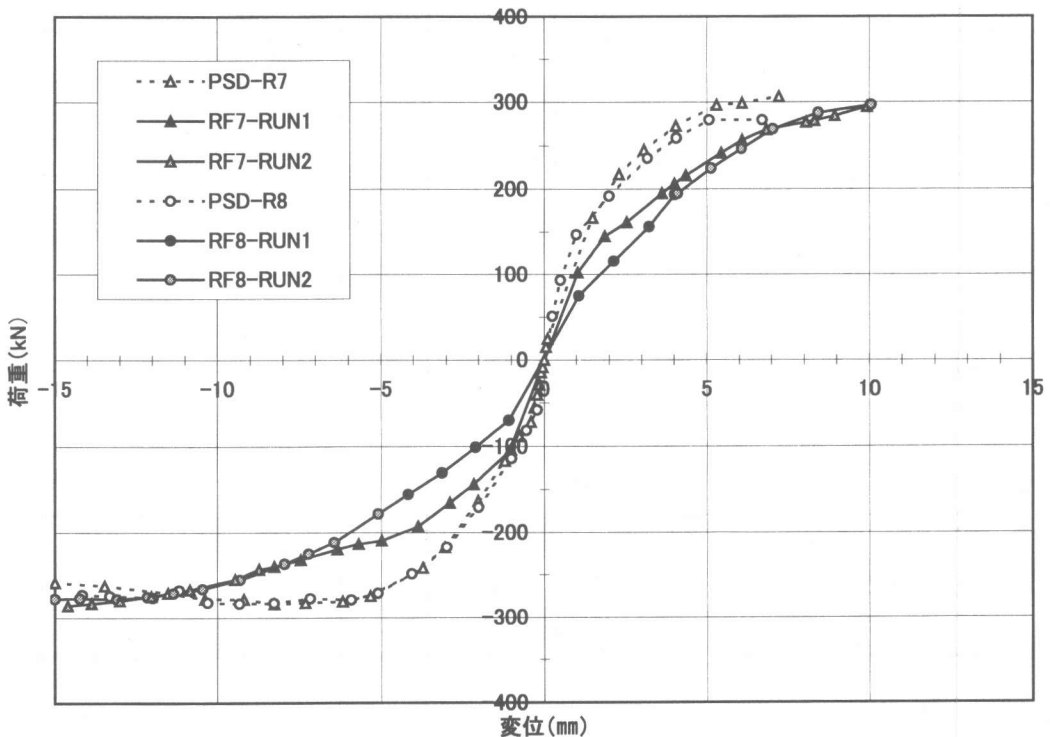


図-11 合成した包絡線

3-2 破壊性状

RF7 (補修 A) の RUN1 の最終状態は、NS・EW 面ともに柱脚部分に亀裂が生じ、CF シートのはらみ出しが確認された。RUN2 の最終状態では、CF シートの亀裂部分からコンクリートの圧壊した部分の破片が粉状になって落ち、シートの一部で樹脂が割れているのが確認された。

RF8 (補修 B) の S 面では、柱脚付近に圧壊に伴うひび割れと同時に剥落も目立ち、RUN2 の最終状態 (図-12) では、柱脚の隅角部はほとんど剥落した。W 面では、先行実験のひび割れに沿うような形で斜め方向にひび割れが入り、RUN1 の最終状態ではモルタルを充填して補修した柱脚部分が圧壊した。RUN2 の最終状態では、広い範囲で深い部分までひび割れ・圧壊・剥落が生じたが、RF7 ではこれ等の現象は顕著に現れていない。

3-3 剛性

ひび割れの発生した RC 部材に対してエポキシ樹脂注入を行うと耐力は回復するが剛性は低下する⁴⁾ことが知られている。一方、設計で想定する耐用年数中に数回発生する可能性のある地震動に対しては、地震後の建物の使用性をいかに確保するかが重要である。そのためには応答振幅を小さくする必要があり、建物の剛性も回復させておくことが望ましい。このような観点から補修による剛性の回復傾向をより詳細に検討するために、両試験体の割線剛性と変位振幅の関係を求め、変位

の進行と共に剛性がどの程度低下したかを図-13 に示している。

図-13 より、先行実験の PSD-R7 では、変位 1 mm 時と比較すると最終状態の割線剛性は、押し側 (+) で約 34%、引き側 (-) で約 17% まで低下した。また、PSD-R8 では、変位 1 mm 時の剛性と比べ、最終状態では押し側 (+) で約 28%、引き側 (-) で 17% にまで低下した。これより、両試験体の先行実験時における剛性低下の傾向はほぼ同じであったと考えられる。

補修後の試験体 RF8 における変位 1 mm 時の割線剛性は 70k N/mm であるのに対し、RF7 では、100 k N/mm である。これより CF シートの補修効果により RF7 の方が変位 1 mm の時点で約 30% 程高い剛性を示していることになる。また RF7 は押し側 (+) で約 4 mm、引き側 (-) で約 6 mm 程度まで CF シートを用いなかった RF8 よりも高い剛性を示していることが確認できた。この変形を変形角で表すと、4 mm で 1/150rad、6 mm で 1/100rad となり、一般の設計で考慮する地震時の応答量に相当し、剛性に対してより望ましい補修効果が得られていることになる。これは前述したように、CF シート巻きがエポキシ樹脂注入時の欠損や注入されない微小なひび割れに対して有効に作用したことによると思われ、剛性回復の面からエポキシ樹脂における施工のばらつきや不確実さ等を補う目的で CF シート巻き付け工法を併用することは有効な手段であると考えられる。

表-4 最大荷重一最大変位一覧

試験体名	入力レベル	符号	NS方向	
			最大荷重(kN)	最大変位(mm)
RF-7	RUN1	+	268.70	6.80
		-	244.87	8.69
	RUN2	+	294.69	9.94
		-	285.96	14.61
RF-8	RUN1	+	280.57	7.34
		-	260.37	9.30
	RUN2	+	297.73	9.86
		-	278.31	13.10

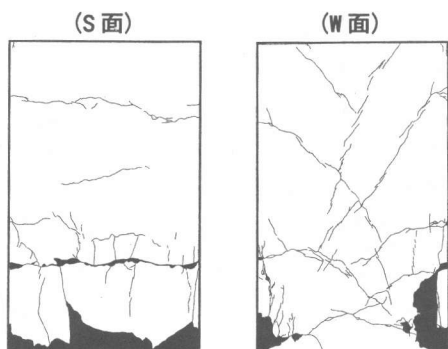


図-12 RF8 最終状態 (RUN2)

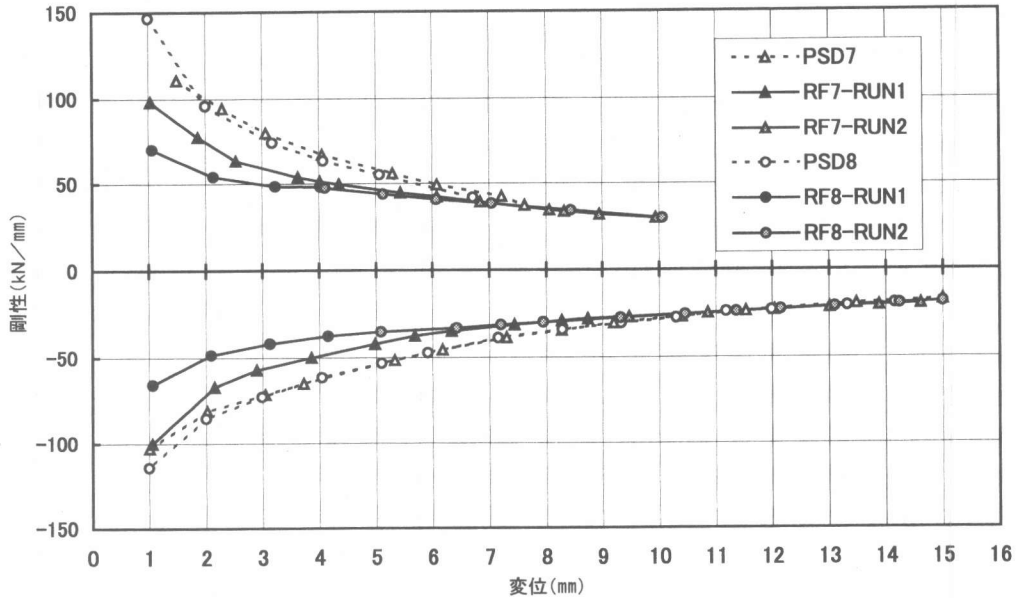


図-13 割線剛性

4. まとめ

本報告では、別の目的に使用された実大に近い RC 柱試験体の損傷部分に（注入材）エポキシ樹脂を注入して補修した試験体に CF シートの巻き付けの有無をパラメータとして、構造的な観点からのひび割れ補修効果を検討した。その結果以下のことを確認できた。

1. 地震被害を受けた柱部材のひび割れ補修方法としてエポキシ樹脂を注入すると、耐力・靱性ともほぼ回復するが、変形角 $1/100\text{rad}$ 程度までの剛性を完全に回復することは出来ない。補修後の部材剛性は、補修前に比べて 60~80% 程度である。
2. エポキシ樹脂のみで補修した試験体よりも、エポキシ樹脂注入後に、さらに CF シートを巻き付けた方が、剛性の回復率が高く、両者の差は、変形角 $1/150\text{rad}$ 程度まで生じている。これらのことから CF シートを巻き付けた場合、エポキシ樹脂補修の施工精度による剛性のばらつきを補うために有効な方法であると考えられる。

謝辞

本報告は、株式会社コンステックの協力により行われたものであり、関係の方々に謝意を表します。また、東北大学災害制御研究センターの皆様には、実験全般においてご協力を賜り、深く感謝致します。

参考文献

- 1) 奥山敦之, Carlos Cuadra, 星道夫, 小川淳二: 擬似動的実験による水平二方向地震動に対する RC 柱の挙動, コンクリート工学年次論文報告集, Vol20, No.3, pp.469-474, 1998.7
- 2) 建設省建築研究所, 日本建築センター設計用入力地震動作成手法技術指針(案), 設計用入力地震動研究委員会, 平成3年度成果報告書
- 3) 伊藤真由子, 堀則男, Carlos Cuadra, 井上範夫: 擬似動的加力実験による鉄筋コンクリート造柱の地震時応答性状の検討, 日本建築学会学術講演梗概集 B-2, pp.1091-1092, 1999.9
- 4) 小林淳 ほか, RC 躯体のひび割れ補修効果確認実験, 日本建築学会学術講演梗概集 C-2, pp.345-346, 1996.9