

[205] 鋼繊維コンクリートで補修されたRC柱のせん断挙動に関する研究

正会員 ○ 横谷栄次 (関東学院大学工学部)  
 正会員 町田恭一 (毎日建設技術研究所)  
 郡嶋宏治 (ARC構造研究所)  
 萩原 勲 (三栄設計)

1. 緒言

鋼繊維で補強された鉄筋コンクリート柱 (SFRC柱) の剪断挙動において、荷重速度と鋼繊維混入率のそれと与える影響について調べるために、一連の動的水平加力実験を行った。<sup>1)2)3)</sup> この実験において、SFRC柱と比較するために、RC柱についても同様な実験を行った。ここで、大きな損傷を受けたRC柱に対して、損傷部分のコンクリートを除去し、新しく鋼繊維コンクリートで充填すると共に、損傷しない部分の周囲を鋼繊維コンクリートによってスキン補強を施した。この補修された柱に対して、補修前と同様な一連の動的水平加力実験を行い、補修前と補修後の剪断挙動に関して比較を行い、鋼繊維コンクリートによる補修効果を調べたので、その結果を以下に報告する。

2. 実験概要

2.1 補修前の試験体

試験体は、図1に示す様に、断面が15cm×15cm、クリアスパンが45cm (a/d=1.5) の柱と断面が15cm×20cm、ハーフクリアスパン45cmの梁が結合された半門形フレーム及び基礎スタブから構成されている。柱には、主筋 4-D13 (Pt=1.13%)、帯筋には3φ@45 (帯筋比 Pw=0.2%) を配筋した。作成した処女RC試験体は6体で、その一覧を表1に示す。使用材料は、セメント：普通ポルトランドセメント、粗骨材：碎石 (最大粒径15mm)、細骨材 (粒径 2.5mm) を用いた。調合は、水セメント比 w/c=55%、細骨材率 S/a=45%、スランプ =15cm、空気量 =5%の条件のもとに可傾式ミキサーを使用して行った。また使用した鉄筋の機械的性質を表2に示す。

2.2 補修方法

処女試験体は、動的水平加力によって剪断破壊を生じ、柱の中央部は剪断ひび割れとかぶりコンクリートの剝離によって、大きな損傷を受けたのに対し、柱の頭部及び脚部は、曲げひび割れ以外、損傷が小さかった。従って、図2に示すように、損傷の大きな柱の中央部のコンクリートを除去し、損傷の小さな頭部及び脚部はそのままにして、補修前より周囲が2.5cm厚くなるように新しく体積率 Vf=1.5%の鋼繊維コンクリートを打ち増した。この鋼繊維による補修により、柱の頭部及び脚部はスキン補強、中央の補強部は全体補強となっている。又、

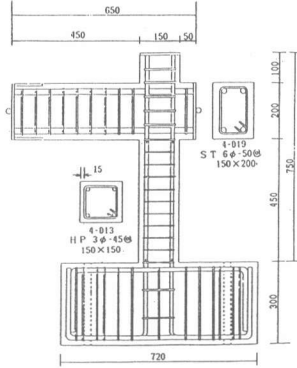


図1 試験体寸法と配筋詳細

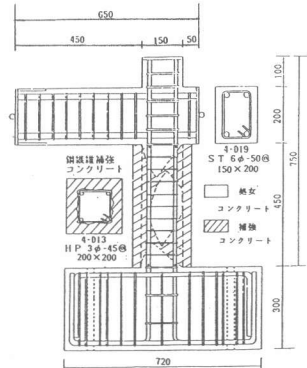
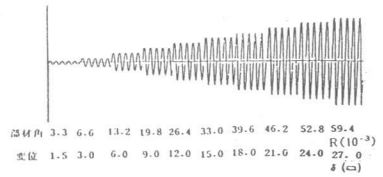
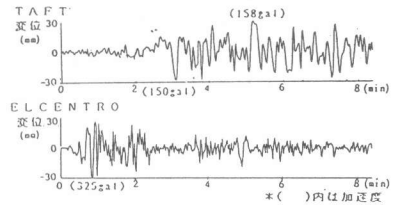


図2 補修方法



(a) 正弦波



(b) 地震波

図3 加力スケジュール

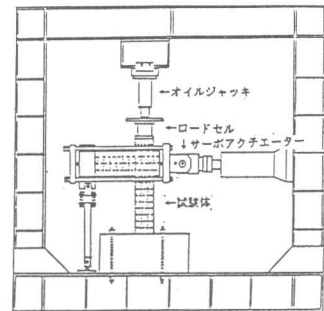


図4 加力装置の概要

スキン補強部とはり及び基礎スタブの接合は、通常の打ち継ぎの方法によった。尚、柱の主筋はそれぞれ端部において降伏し、また帯筋の多くは中央部で降伏していたが、主筋及び帯筋はそのまま残し、新しい補強筋は付加しなかった。補修用材料は、セメント：普通セメント、細骨材：川砂（粒径 2.5mm）、鋼繊維：ストレートタイプ（0.5×0.5×30mm、引張強度 =76.5kg/mm<sup>2</sup>、伸び =1.0%）を用いた。調合は、セメントと細骨材の比率を 1：2、水セメント比 w/c=55%とし、鋼繊維はコンクリート練り上がり後に混入した。

### 2. 3 加力及び測定方法

垂直方向には、定軸力（軸応力  $\sigma_0=45\text{kg/cm}^2$ ）を加え、水平方向には、ピストン型アクチュエータ（可振力：動的最大 10 t、変位：動的最大 ±30mm）によって、補修前の試験体と同様に繰り返し速度が 0.01（準静的）、0.05、0.1、1 cycle/sec の 4 タイプの正弦波と EL CENTRO と TAFT の 2 タイプの地震波を補修後の試験体にも与え、その応答を測定した。正弦波における変位振幅は、図 3 に示すように第一、第二を部材角で  $R1=3.3 \times 10^{-3}$ 、 $R2=6.6 \times 10^{-3}$  とし、それ以後は  $6.6 \times 10^{-3}$  づつ増分し、各 5 サイクルの変位振幅を与え、最大が  $R_{max}=59.4 \times 10^{-3}$  までの変位振幅について行った。また地震波における最大加速度は、EL CENTRO が 325gal、TAFT が 158gal である。荷重は、マイクロコンピュータのプログラムシステムによってアクチュエータを変位制御し、試験機に内蔵された荷重アンプより検出した。変位は、変位計と動ひずみアンプより検出し、双方を X-Y レコーダーに入力した。ひずみの測定は、ワイヤーストレインゲージと動ひずみアンプを用いてリニアコーダーによって出力を行い、柱の主筋、帯筋及びコンクリート面のひずみを求めた。加力方法の概要を図 4 に示す。

### 3. 実験結果と考察

正弦波及び地震波による動的水平加力実験によって得られたひび割れ強度、最大強度、最大荷重時変位、破壊モード等に関する補修前と補修後の実験結果を表 3 に示す。

#### 3. 1 最大剪断強度

本実験では、補修前のコンクリートと補修後の鋼繊維コンクリートの圧縮強度に差異があるが、補修後の最大剪断強度は、この圧縮強度以外にも、補修部分の占める比率及び施工性（補修コンクリートの密実性、繊維の配向や分散）等の要因に大きく左右される。従って、圧縮強度の影響度が明確でないこと、又補修前と補修後の柱の断面積が異なることより、圧縮強度によるパラメータによらずに、剪断応力度の形を用いて復元効果を調べるために、補修前及び補修後の最大剪断強度と最大荷重時速度との関係を図 5 にプロットした。

この図より、補修前の最大剪断強度は、最大荷重時速度が 1cm/sec 近傍でピーク値を示している。一方、補修後の最大剪断強度は最大荷重時速度が 0.1 及び 1cm/sec 近傍でピーク値を持ち、また、ほぼ 0.4 及び 2cm/sec でトローフ値を示している。補修後の最大剪断強度の補修前の最大剪断強度に対する比をみると、0.61~1.01 の間に存在する。本実験において、鋼繊維コンクリートの補修によって、おおよそ 60% まで、剪断強度の復元が可能であることが認められる。また、準静的荷重（0.01Hz）では、補修後の最大剪断強度が補修前の最大剪断強度より若干であるが増加しており、鋼繊維の補強効果が現れている。

#### 3. 2 荷重-変位性状

表 1 試験体一覧

試験体名	寸法 (cm) × (cm)	変位波形	練り上げ時圧縮強度 (C/S)	コンクリート圧縮強度 (kg/cm <sup>2</sup> )
DRC-1	15 × 15	正弦波	1.00	366
DRC-10			0.10	243
DRC-20			0.05	285
DRC-100			0.01	354
DRC-E		ELCENTRO	—	303
DRC-T	TAFT	—	328	
DRC-1W	20 × 20	正弦波	1.00	484
DRC-10W			0.10	437
DRC-20W			0.05	311
DRC-100W			0.01	538
DRC-EW		ELCENTRO	—	468
DRC-TW	TAFT	—	468	

表 2 鉄筋の機械的性質

鉄筋の種類	降伏点応力度 (kg/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (kg/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)	ヤング係数 (×10 <sup>5</sup> )
D13	36.6	55.7	22.8	2.13
3.2φ	26.7	40.7	28.5	2.45

表 3 実験結果一覧

試験体名	ひび割れ強度		最大強度		最大荷重時変位 R (×10 <sup>-3</sup> )	破壊モード	
	Q <sub>cr</sub> (t)	f <sub>cr</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	Q <sub>u</sub> (t)	f <sub>u</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )			
補修前	DRC-10	2.9	17.4	6.3	37.7	8.1	B S
	DRC-100	5.8	34.0	8.8	51.6	18.5	B S
	DRC-20	3.5	21.1	7.0	42.2	10.4	B S
	DRC-1000	5.0	29.7	6.9	41.0	9.6	B S
補修後	DRC-E	5.9	30.1	6.5	39.8	5.1	B S
	DRC-T	3.0	18.0	8.1	48.6	10.3	B S
補修後	DRC-1W	6.8	24.5	9.0	33.9	17.8	S
	DRC-10W	5.5	20.9	8.2	31.2	12.6	S
	DRC-20W	3.5	12.5	8.6	30.7	7.4	S
	DRC-100W	6.3	23.7	11.0	41.4	28.1	S
後	DRC-EV	5.1	19.2	8.0	30.1	24.8	S
	DRC-TV	6.5	24.7	11.0	41.8	12.4	S

※ B S : 付着部破壊, S : セン断破壊

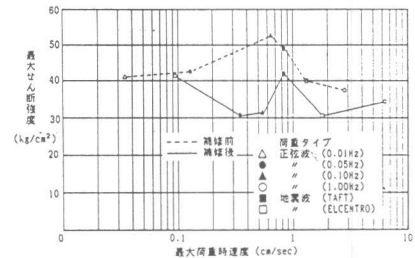


図 5 補修前及び補修後のせん断応力度と最大荷重時速度の関係

補修前及び補修後の各試験体の荷重-水平変位に関する履歴曲線を図6(a)~(f)に描いた。これらの図において補修後の水平荷重は、補修前の水平荷重より大きな応答を示しているが、これは、補修後の柱断面が補修前の断面より大きくなっているためである。

定振幅多段繰返し荷重を受けた場合、補修前と補修後の履歴曲線と比較すると、補修後の柱の最大荷重は、DRC-20タイプの柱を除いて、補修前の柱より大きな水平変位で発現し、また、最大荷重到達後、補修後の柱は、補修前の柱に比して、耐力の劣下も少なく、特にDRC-1Wはその性状が顕著であることがわかる。DRC-20Wについては、補修に対する施工性が余り良くないために、補修後の柱の履歴曲線は他の試験体のような鋼繊維コンクリートによる靱性の向上を殆ど示していない。一方、地震波の様なランダムな荷重を受けた場合、補修前及び補修後のDRC-T及びDRC-Eの両タイプの柱とも、最大荷重到達後、次のサイクルで大きな変位を受けるため、大きなループ面積をもつ荷重-変位性状を示している。補修後の柱は補修前の柱と同様に、最大荷重到達後、著しい劣化を示し、定振幅多段繰返し荷重を受けた柱ほど顕著な靱性の向上が見受けられない。定振幅多段繰返し荷重を受けたDRC-1タイプと地震波のようなランダムな荷重を受けたDRC-Tタイプの補修前と補修後の包絡線を図7に示す。両図を比較すると、DRC-1Wの最大荷重後の著しい靱性の向上による補修効果が認められる。

### 3. 3びび割れ・破壊性状

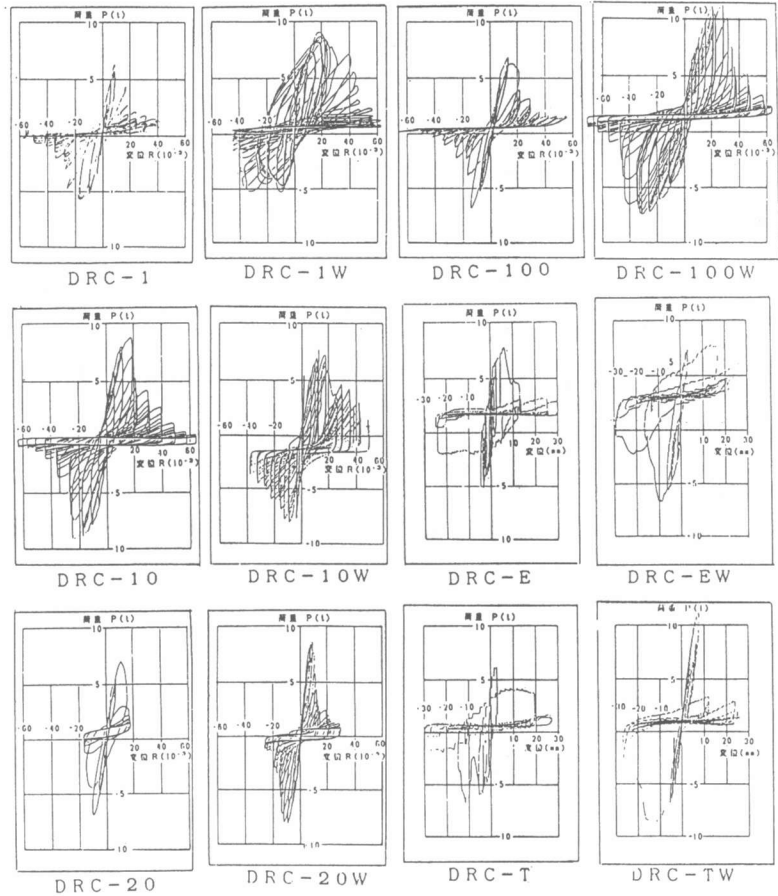


図6 荷重-水平変位履歴曲線

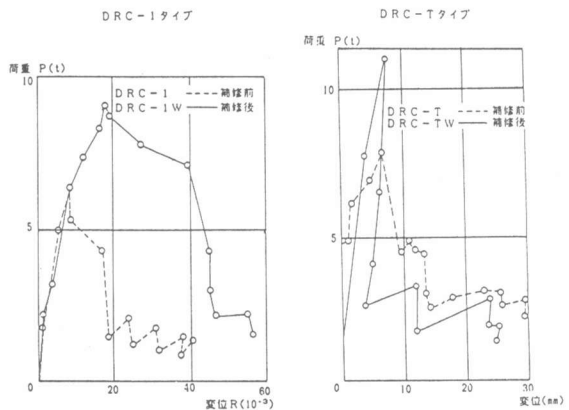


図7 包絡線

両図を比較すると、DRC-1Wの最大荷重後の著しい靱性の向上による補修効果が認められる。

補修後の柱の最大荷重時ひび割れ状況と最終破壊性状を、DRC-EW、DRC-1W、DRC-20Wの試験体についてスケッチによって図8に示す。ひび割れ状況については、剪断ひび割れが最初に発生し、これが大きく進展する傾向を示す。最終破壊では、(a)最大荷重時より多数のひび割れが発生して、斜め剪断ひび割れが他のひび割れよりやや進展した程度で破壊に至る。(DRC-EW) (b)斜め剪断ひび割れのみが発生し、これが大きなひび割れ幅に発達し、破壊に至る。(DRC-1W) (c)斜め剪断ひび割れが集中的に進展し、かぶりコンクリートが大きく剝離する。(DRC-20W)の破壊程度の差異による3つのタイプに分類できる。最終破壊に差異が生じたのは、荷重速度の影響も考えられるが、処女試験体の破壊状況によって、補修部分の占める比率が異なったり、密実な鋼繊維補強コンクリートが打設できたかどうか等の要因に帰する所が大であると思われる。

### 3. 4エネルギー吸収能力

補修前及び補修後の履歴曲線より得られた累積吸収エネルギーと部材角との関係を示し、定振幅多段繰返し荷重を受けた試験体DRC-1、DRC-10、DRC-20、DRC-100タイプについて図9にプロットした。この図より補修前と補修後の柱の累積エネルギーを比較すると、DRC-10タイプではほとんど変わらないが、DRC-1、DRC-20、DRC-100タイプの柱は部材角が $20 \times 10^{-3}$  radを越えると、補修後の累積エネルギー吸収量が補修前に比して急激に増大する事が観察される。これより、鋼繊維補強コンクリートによる大きな靱性の寄与が認められる。また、部材角が $20 \times 10^{-3}$  radを越えると、荷重の繰返し速度の増加と共に、累積エネルギー吸収量も増加する傾向を示している。

### 4. 結論

鋼繊維コンクリートで補修されたRC柱の剪断挙動は、次の事柄が示唆される。

- (1). 補修後の最大剪断強度の補修前の最大剪断強度に対する比は、0.61~1.01の間に存在する。
- (2). 補修後の定振幅多段繰返し荷重を受けた柱は、最大荷重後耐力の劣化が小さく、顕著な靱性の向上がみられるが、地震波のようなランダムな荷重を受けた場合、前者ほどの補修効果は認められない。
- (3). 補修後の破壊性状は、(a). 多数ひび割れの分散的発生、(b). 剪断ひび割れの集中、(c). ひび割れの集中とかぶりコンクリートの剝離の3つのタイプに分類される。
- (4). 補修後の柱の累積エネルギー吸収量は、DRC-10タイプを除き、部材角が $20 \times 10^{-3}$  radを越えると、急激に増大する。また、荷重の繰返し速度の増加と共に、エネルギー吸収量も増加する傾向を示す。

今回の鋼繊維コンクリート補修方法は、最もシンプルな施工方法を用いたが、更に工夫を加えれば、補修効果は高まるものと考えられる。

本研究は、鋼材倶楽部から日本建築学会への委託研究”スチールファイバーの実用化に関する研究調査(委員長小倉弘一郎)”の一部として行ったものである。

参考文献 1. 日本建築学会スチールファイバーの実用化に関する調査委員会調査研究報告書、1983~1986

2. 槇谷栄次他、”SFRCC柱の剪断挙動に関する動的効果”、日本コンクリート工学協会第7回工学年次講演会論文集、1985年6月

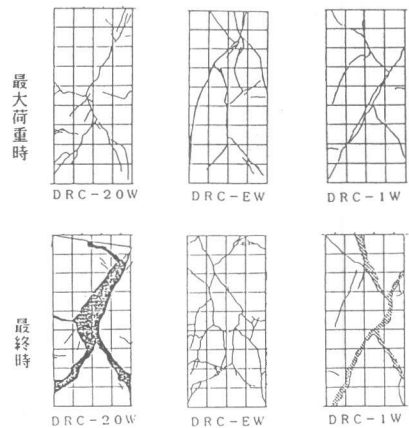


図8 破壊性状

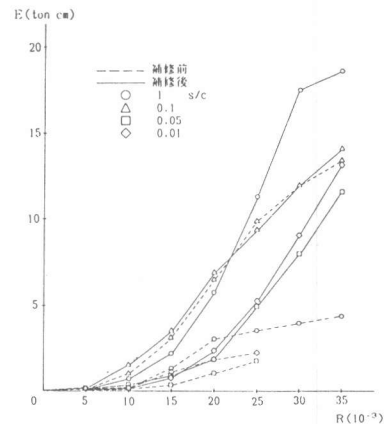


図9 累積吸収エネルギーと部材角の関係