

## 論文 炭素繊維シートを用いた柱の耐震補強に関する実験的研究

鴨下直樹<sup>\*1</sup> 菊川和俊<sup>\*1</sup> 渡邊一弘<sup>\*1</sup> 新藤忠徳<sup>\*2</sup>

**要旨:** 本研究は、1970年以前の基準で設計したRC造および格子形SRC造の柱について、炭素繊維シートを用いてせん断補強した場合の効果について定量的に把握するためにシートの補強量を変数とした曲げせん断実験を行った。その結果、RC柱およびSRC柱において炭素繊維シートで補強することでせん断破壊を防止し、靱性能は向上することが確認できた。また、SRC柱において炭素繊維シートの補強量の増加にともなって、最大耐力以降の変形性能の向上が確認できた。

**キーワード:** 炭素繊維シート, 耐震補強, RC柱, 格子形SRC柱, 曲げせん断実験

## 1. はじめに

1970年以前の建築基準によって設計された鉄筋コンクリート（以下RC）造および鉄骨鉄筋コンクリート（以下SRC）造の建築物は阪神・淡路大震災で多くの被害を受けた。これらの建築物は現行の基準に比べ補強筋量が少ないことが原因によるせん断破壊が挙げられている。SRC造は、その当時鉄骨主材に山形鋼と帯板を用いた格子形の部材が多く用いられ、現行のH形鋼などを用いた充腹形SRC造に比べて耐震性能が乏しい。その耐震補強方法として炭素繊維シート（以下CFシート）を用いた工法が注目されている。RC柱のCFシートによる補強効果に関する研究は各研究機関で多くの実験が行われているが、格子形SRC柱のCFシートによる補強効果に関する研究はRC柱に比べ少ないのが現状である。

本研究は、格子形SRC柱のCFシートによるせん断補強効果を、定量的に把握することを目的に、CFシートの補強量を実験変数とした柱の曲げせん断実験を行った。また、SRC柱との比較のために、せん断補強筋の少ないRC柱についても同様に曲げせん断実験を行った。

## 2. 実験概要

表1に試験体一覧を、図1に試験体形状を示す。本実験は、RC造柱を対象とした「RCシリーズ」と非充腹鉄骨内蔵の格子形SRC柱を対象とした「SRCシリーズ」である。

## 2.1 試験体

「RCシリーズ」の試験体は、実大の約1/3縮小モデル2体である。断面形状は300mm×300mm、柱主筋は12-D13、せん断補強筋は2-D6@180、せん断スパン比は1.5である。軸力は0.2BDFcとした。柱隅角部はCFシート貼り付けを考慮して20mmの面取りを行い、CFシートの重ね長さを200mmとした。実験変数はCFシートの有無である。曲げ耐力<sup>1)</sup>を $Q_{mu}$ 、せん断耐力<sup>2)</sup>を $Q_{su}$ とし、せん断余裕度を $Q_{su}/Q_{mu}$ とするとA1試験体はCFシートによる補強無しで $Q_{su}/Q_{mu}=0.7$ 、A2試験体はCFシートを1層巻くことで $Q_{su}/Q_{mu}=1.0$ となるように計画した。

「SRCシリーズ」の試験体は、非充腹形の格子形SRC柱で実大の約1/2縮小モデル3体である。断面形状は400mm×400mm、主筋は4-D13+8-D10、せん断補強筋は2-D6@300、鉄骨主材は等辺山形鋼8L-40×40×3を組み合わせたクロス断面で、その断面せいは280mmである。帯板はP

\* 1 三菱建設（株）技術研究所 構造研究室（正会員）

\* 2 足利工業大学助教授 工学部建築学科 工博（正会員）

L-3.2\*60@300である。山形鋼と帯板の接合は2-M10でボルト接合した。軸力は0.28BDFcとした。実験変数はCFシートによる補強量である。SRC耐震診断基準<sup>3)</sup>による曲げ耐力 $Q_{mu}$ およびせん断耐力を $Q_{su}$ とすると、B1試験体は無補強で $Q_{su}/Q_{mu}=0.7$ 、B2試験体はCFシートを2層巻きで $Q_{su}/Q_{mu}=1.0$ 、B3試験体は4層巻き $Q_{su}/Q_{mu}=1.2$ となるように計画した。なお、CFシートが負担するせん断力は帯筋のせん断補強筋量に換算して計算した。換算する際のCFシートの引張強度は、メーカーの保証引張強度の3400MPaに有効係数2/3を乗じた値<sup>4)</sup>で評価した。

## 2.2 使用材料

表-2, 3に使用材料の力学特性を示す。コンクリートの設計基準強度は21MPaで、実験時のコンクリート強度は、26.1MPa~26.7MPaの範囲で平均値は26.4MPaであった。鉄筋および鉄骨の降伏点は上降伏点の値である。CFシートは目付量300g/m<sup>2</sup>を使用し、積層枚数、1層および2層について、検長100mm、幅25mmの試験片の引張試験を行った。

## 2.3 実験方法

図-2に加力装置を示す。加力は、鉛直方向のアクチュエーターにより軸力を一定に保持させながら水平方向の油圧ジャッキにより正負交番繰り返し载荷を行った。加力履歴は、せん断破壊を想定したA1およびB1試験体は、曲げひび割れ以下の荷重で正負1回、その後は、部材角 $R=0.2\%$ から $0.1\%$ ごとの変位漸増正負繰り返し加力を行った。曲げ降伏を想定した試験体は、曲げひび割れ以下の荷重で正負1回、 $R=\pm 0.4\%$ 、 $\pm 0.8\%$ で各1回、 $R=\pm 1.0\%$ で2回、 $R=\pm 2.0\%$ 、 $\pm 3.0\%$ で各3回の正負交番繰り返し加力の後、5.0%までの加力を行った。

表-1 試験体一覧

シリーズ	RCシリーズ		SRCシリーズ		
	A1	A2	B1	B2	B3
断面	300*300		400*400		
主筋	12-D13		4-D13 + 8-D10		
帯筋	2-D6@180		2-D6@300		
鉄骨主材	—		SL-40*40*3		
帯板	—		PL-3.2*60@300		
シート	無	1層	無	2層	4層
軸力	0.2BDFc		0.28BDFc		

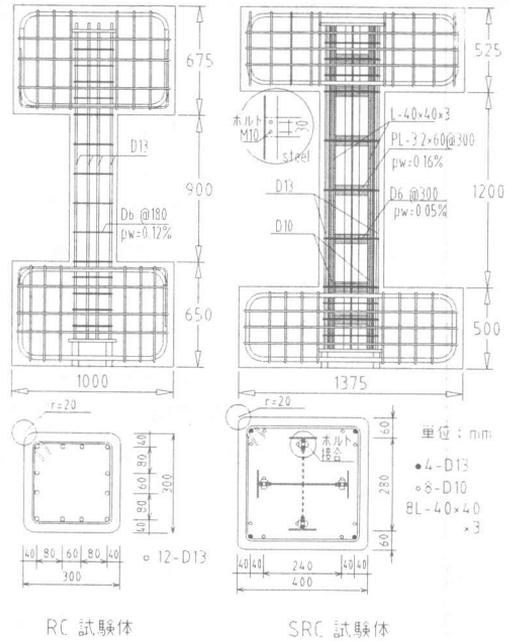


図-1 試験体形状

表-2 鋼材の力学特性

種類	降伏応力度 MPa	引張強度 MPa	降伏ひずみ $\mu$	ヤング係数	
				GPa	
主筋	D13	343	486	1910	180
	D10	354	486	2020	175
帯筋	D6	365	539	1910	191
鉄骨主材	L-40 *40*3	369	455	2060	180
帯板	PL-3.2	365	444	2020	181

表-3 CFシートの力学特性

	厚さ mm	平均引張強度 MPa	保証引張強度 MPa	弾性率 GPa
メーカーの カタログ値	0.167	4280	3400	230
1層	0.167	4570	—	260
2層	0.334	4480	—	256

下段は材料試験結果平均値

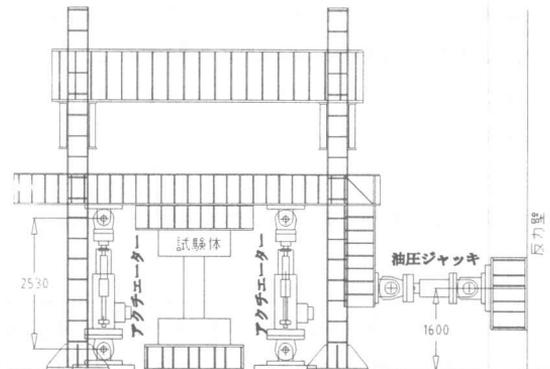


図-2 加力装置

### 3. 実験結果

#### 3.1 破壊状況

表-4に実験結果を、図-3に最終ひび割れ状況をそれぞれ示す。

「RCシリーズ」 A1試験体は、 $R=0.19\%$ で柱頭、柱脚に曲げひび割れが発生し、 $R=0.39\%$ でせん断ひび割れが発生した。その後、 $R=0.72\%$ で主筋が引張降伏し、 $R=0.76\%$ で対角線方向に柱頭から柱脚まで達するせん断ひび割れが発生し、耐力が急激に低下した。A2試験体は、 $R=0.66\%$ で主筋が柱頭、柱脚ともに引張降伏した後、 $R=1.53\%$ で最大耐力に達し、その後、 $R=1.78\%$ で帯筋が降伏した。CFシートは、 $R=2.0\%$ の変形時に、柱脚部に繊維方向の亀裂が発生し、その後、 $R=4.29\%$ で柱頭部のCFシートが破断し、耐力は低下した。実験後にCFシートを剥がし、コンクリート表面を観察したところ、ひび割れは全体に分散し、炭素繊維シートが破断した柱頭では、コンクリートの圧壊がみられた。

「SRCシリーズ」 B1試験体は、 $R=0.07\%$ で柱頭、柱脚に曲げひび割れが発生した後、 $R=0.29\%$ で柱頭および柱脚に斜めせん断ひび割れが発生し、試験体の高さ方向の中央部では軸鉄骨に沿うようにせん断ひび割れが発生した。B2試験体は、 $R=0.73\%$ で柱主筋が圧縮降伏した後、 $R=0.77\%$ で帯筋が降伏し、 $R=0.86\%$ で最大耐力となった。その後、鉄骨主材は、 $R=0.92\%$ で柱頭が圧縮降伏し、帯板は $R=1.42\%$ で降伏した。CFシートは、 $R=2.0\%$ の繰り返しで柱頭部および柱脚部で繊維方向に亀裂がみられた。その後、変形が進むにつれて亀裂は広がっていったが、最終変形 ( $R=-6.7\%$ ) 時まで破断すること

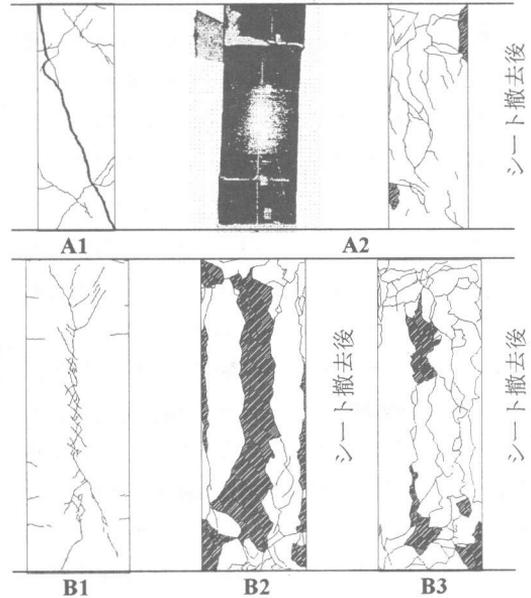


図-3 最終ひび割れ状況

はなかった。実験終了後にCFシートを剥がし観察してみると、柱端部でコンクリートが圧壊し、弱軸方向の鉄骨主材のかぶりコンクリートが剥離していた。B3試験体は、B2試験体とほぼ同様の力学的挙動を示したが、 $R=1.0\%$ 以降も耐力を保持し、 $R=1.98\%$ で最大耐力となった。CFシートは、 $R=1.0\%$ の繰り返しの変形から亀裂が発生し、その後、変形が進むにつれて亀裂が広がっていったが、B2試験体と同様に最終変形 ( $R=-5.2\%$ ) 時まで破断しなかった。

#### 3.2 荷重変形関係

図-4に各試験体の水平力(Q)一部材角(R)関係を示す。

「RCシリーズ」 A1試験体は、計算によるせん断耐力より大幅に強度が上昇し、 $R=0.76\%$ 、 $Q=261\text{kN}$ で最大耐力となったが、前述の通り、

表-4 実験結果

試験体	最大耐力		最大耐力80%低下		主筋降伏		帯筋降伏		鉄骨主材降伏		帯板降伏		破壊型式
	Qmax kN	Rmax %	Qm80% kN	Rm80% %	Qry kN	Rry %	Qwy kN	Rwy %	Qsy kN	Rsy %	Qty kN	Rty %	
A1	261	0.76	-----	-----	253	0.72	-----	-----	-----	-----	-----	-----	せん断破壊
A2	273	1.53	220	2.99	252	0.66	258	1.78	-----	-----	-----	-----	曲げ破壊
B1	365	0.29	-----	-----	-----	-----	365	0.29	-----	-----	-----	-----	せん断破壊
B2	508	0.86	405	2.90	470	0.73	493	0.77	476	0.92	457	1.42	曲げ破壊
B3	554	1.98	445	4.80	500	0.65	517	1.20	468	0.50	-450	-2.51	曲げ破壊

柱頭、柱脚の圧縮域を結ぶ1本の対角線状せん断ひび割れによる激しいせん断破壊が生じ、耐力は急激に低下した。A2試験体は、 $R=1.53\%$ 、 $Q=273\text{kN}$ で最大耐力となり、その後、徐々に耐力が低下し、最大耐力の80%まで耐力が低下したのは $R=3.0\%$ であった。 $R=4.29\%$ でCFシートが破断した。本試験体は、シート補強により曲げ降伏が先行したが、 $R=1.0\%$ の繰り返し载荷以降履歴ループが逆S字形となった。

「SRCシリーズ」 B1試験体は、 $R=0.29\%$ 、 $Q=365\text{kN}$ で最大耐力となり、その後、耐力は $R=0.6\%$ で最大耐力の88%まで低下した。B2試験体は、 $R=0.86\%$ 、 $Q=508\text{kN}$ で最大耐力となり、その後、耐力は徐々に低下し、 $R=2.90\%$ で最大耐力の79%となった。B3試験体は、曲げ降伏後変形を増大させていくにしたがい、耐力も徐々に増加し $R=2.0\%$ 、 $Q=554\text{kN}$ で最大耐力となった。曲げ降伏型のSRC試験体のB2、B3の両試験体は、RCのA2試験体に比べ、同一変位繰り返しにおける履歴ループの逆S字化は顕著ではなかった。

### 3.3 ひずみ性状

図-5に「RCシリーズ」の帯筋とCFシートのひずみ分布を示す。A1試験体の帯筋のひずみは、最大耐力時まで $1000\mu$ 程度であった。A2試験体の帯筋のひずみは最大耐力とほぼ同時に、中央部が降伏し、 $R=3.0\%$ で中央周辺も降伏した。CFシートのひずみは、 $R=2.0\%$ で帯筋と同様に中央部で最も大きく、 $4000\mu$ 程度であった。図-6に「SRCシリーズ」の帯筋と帯板とCFシートのひずみ分布を示す。B1試験体の帯筋のひずみは、最大耐力時の $R=0.3\%$ で中央部が降伏し、その後、 $R=0.40\%$ で中央部周辺も全て降伏した。帯板のひずみは、 $R=0.6\%$ で、 $800\mu$ 程度で降伏していなかった。B2試験体の帯筋のひずみは、最大耐力時に中央で降伏しており、 $R=2.0\%$ で中央部周辺も全て降伏していた。帯板も $R=2.0\%$ ですべて降伏していた。CFシートのひずみは、 $R=2.0\%$ で柱の中央部が最も大きく $3000\mu$ 程度であった。その後、変形が進むに

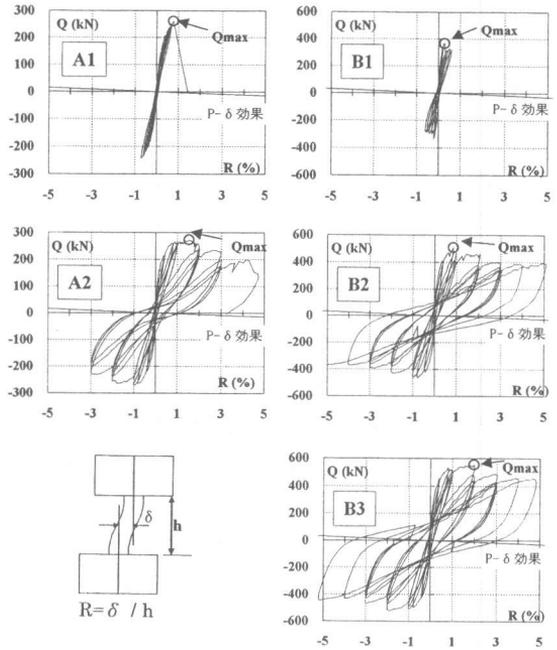


図-4 各試験体の水平力(Q)-部材角(R)関係

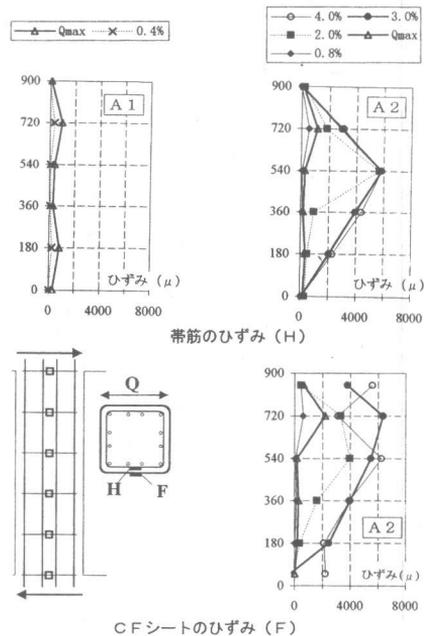


図-5 RCシリーズのひずみ

つれて、中央部ひずみが徐々に大きくなり、 $R=5.0\%$ で中央付近で $4200\mu$ 程度となった。B3試験体の帯筋のひずみは、最大耐力時に中央部周辺で降伏していた。帯板は、 $R=4.0\%$ ですべて降伏していた。CFシートのひずみは、最大耐

力時で、中央付近が最も大きく2000 $\mu$ 程度であった。その後、変形が進むにつれて、中央部から徐々に大きくなり、R=5.0%で中央付近で最も大きく3500 $\mu$ 程度となった。SRC試験体の場合、最大耐力以降に帯筋および帯板のひずみ度は、急激に増加するがCFシートのひずみ度は、最終時でも4000 $\mu$ 程度であった。

### 3. 4 実験値と計算値の比較

表-5, 6に「RCシリーズ」および「SRCシリーズ」の実験値と計算値の比較を示す。計算は耐震診断基準に準拠し、表下段に示した式を用いた。また、図-7に縦軸に実験荷重(Q<sub>ex</sub>)を計算曲げ耐力(Q<sub>mu</sub>)で除した値、横軸に層間部材角(R)をとり、各試験体の正荷重時の包絡線を示す。図中にはR<sub>y</sub>=1/150として塑性率 $\mu = R/R_y$ より計算される耐震診断におけるF値も併せて示す。図-7より曲げ耐力は略算による曲げ耐力の概ね1.2倍となっているが、せん断余裕度Q<sub>su</sub>/Q<sub>mu</sub>が1.0程度のA2, B2両試験体とも曲げ破壊している。また、Q<sub>su</sub>/Q<sub>mu</sub>=1.0程度のA2試験体とQ<sub>su</sub>/Q<sub>mu</sub>=1.2のB3試験体のQ<sub>ex</sub>/Q<sub>mu</sub>-R関係はほぼ類似しており、同じせん断余裕度であれば、RCよりもSRC部材の方が曲げ降伏後の耐力の低下が早く生じた。図-8に各試験体の補強要素に生じている実験時のせん断力と層間部材角の関係を示す。縦軸は柱中央部の帯筋、帯板、CFシートの実験時の測定ひずみとヤング係数より求めた応力度( $\sigma_{ex} = \epsilon_{ex} \cdot E$ )にせん断補強筋比(pw)を乗じ、それぞれの値を累加して補強材のせん断力の負担分を表したものである。なお、帯筋および帯板は降伏後は一定値とした。図中に最大耐力時の変形角と帯筋、帯板の降伏時を併せて示す。各試験体とも無補強試験体のせん断強度を越えると各補強要素に生じる力が大きくなる。また、最大耐力以降の耐力劣化域においても、補強要素に生じる力が大きくなっている。SRC試験体ではCFシートによる補強量を増すに従い、帯筋、帯板の降伏する部材角が大きくなっている。B2, B3試験体とも帯板の降伏は最大耐力時以降であり、

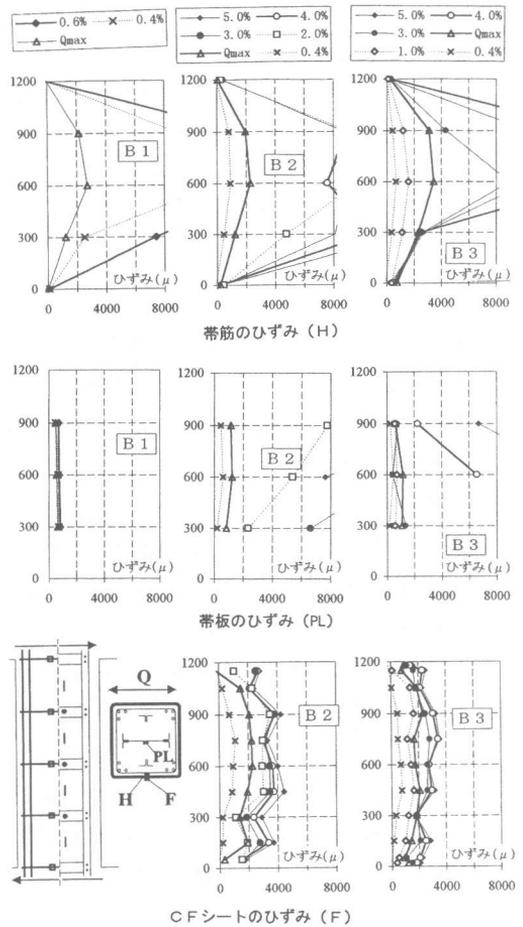


図-6 SRCシリーズのひずみ

表-5 「RCシリーズ」の計算値

試験体	Q <sub>max</sub> (kN)	計算値		せん断余裕度 Q <sub>su</sub> / Q <sub>mu</sub>	靱性 指標 F値*1	破壊*2 型式
		Q <sub>mu</sub> <sup>(1)</sup> (kN)	Q <sub>su</sub> <sup>(2)</sup> (kN)			
A1	261	219	149	0.68	1.0	S
A2	273	219	210	0.96	1.0	F

1) RC規準による曲げ終局強度の略算式

$$Q_{mu} = (0.8\alpha \cdot \sigma_y \cdot D + 0.5 \cdot N \cdot D(1 - N/b \cdot D \cdot F_c)) / (h/2)$$

2) 既存RCの耐震診断基準解説によるせん断耐力

$$Q_{su} = (0.053 \cdot (pt \cdot 0.23) \cdot (F_c + 180)) / (0.12 + M/Qd) + 2.7(\Sigma pw \cdot \sigma_{wy})^{0.5} + 0.1 \sigma_0 b_j$$

$$\Sigma pw = pw + \alpha \cdot pw_f \cdot (\sigma_{wf} / \sigma_{wy})$$

pw: 帯筋比,  $\sigma_{wy}$ : 帯筋の降伏強度,  $\alpha$ : 文献<sup>(4)</sup>によるCFシートの有効係数 (=2/3),  $\sigma_{wf}$ : CFシートの保証引張強度 (=3400MPa)  
h: 柱の内法高さ, その他の記号は文献<sup>(1), (2)</sup>を参照

\*1 2次, 3次耐震診断用の柱の靱性指標F値

\*2 S: せん断破壊, F: 曲げ破壊

最大耐力時に帯板に生じている力は概ね $0.5 \cdot pw \cdot \sigma_y$ であった。このことからSRC部材をCFシートでせん断補強した場合の補強後のせん断耐力

の評価にも帯板の負担項に $0.5 \cdot pw \cdot \sigma_y$ を用いることは妥当であると思われる。しかしながら、最大耐力時にCFシートのせん断の負担はB2試験体で1.0MPa, B3試験体で1.5MPaであり、データー数も少ないためCFシートの負担項の定量的な把握は今後の課題であるとする。

#### 4. まとめ

実験を終了して、以下のことが確認された。

1. SRC柱およびRC柱において、CFシートで補強することでせん断破壊を防止し、耐力と変形性能は向上した。
2. SRC柱をCFシートによりせん断補強し、耐震診断基準によるせん断余裕度が1.0と1.2の試験体を比較すると、1.0とした試験体は、 $R=1.0\%$ 以前に最大耐力に達するのに対し、1.2の試験体は、 $R=2.0\%$ まで耐力が上昇した。せん断補強量の増加にともなって変形性能は向上した。
3. CFシートでせん断補強し、耐震診断基準によるせん断余裕度が1.0程度ならばRC柱およびSRC柱においても曲げ破壊となった。

謝辞：本研究を行うにあたり、足利工業大学園部泰寿教授には多大なご指導・ご協力を戴きました。また、三菱化学株式会社にはCFシートの提供して戴きました。ここに、深く謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，1991
- 2) 日本建築防災協会：既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準同解説，1990
- 3) 日本建築防災協会：既存鉄骨鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準同解説，1997
- 4) 小島克朗ほか：炭素繊維の巻き付けによる既存鉄筋コンクリート部材の耐震補強，コンクリート工学年次論文集，Vol.11, No.1, pp861-866, 1989

表-6 「SRCシリーズ」の計算値

試験体	Qmax (kN)	耐力計算値		せん断余裕度 Qsu Qmu	靱性 指標 F値	破壊 型式
		Qmu <sup>3)</sup> (kN)	Qsu <sup>3)</sup> (kN)			
B1	365	449	308	0.69	1.0	S
B2	508	449	454	1.01	1.27	F
B3	554	449	538	1.20	2.02	F
共通事項	鉄骨の曲げ強度比		$sM_0/M_0=0.24$			
	柱の地震時軸力比		$ns=0.32$			

3) 既存SRCの耐震診断基準同解説による計算

a) 終局曲げ強度(格子形)

$$Q_{mu} = [0.8a_1 \cdot r \cdot \sigma_y \cdot D + a_1 \cdot \sigma_y \cdot j + 0.5 \cdot D(N + a_1 \cdot \sigma_y)] \times (1 - (N + a_1 \cdot \sigma_y) / (b \cdot D \cdot F_c)) \cdot (h/2)$$

b) 終局せん断強度(格子形)

$$Q_{su} = (0.053 \cdot (pt \cdot 0.23) \cdot (F_c + 180) / (0.12 + M/Qd) + 2.7 \cdot (\sum pw \cdot \sigma_w y + 0.5 \cdot pw \cdot \sigma_y)) \cdot 0.5 \cdot 0.1 \cdot \sigma \cdot b \cdot j$$

$$\sum pw = pw + \alpha \cdot pwf \cdot (\sigma_w / \sigma_y) \quad (\alpha = 2/3)$$

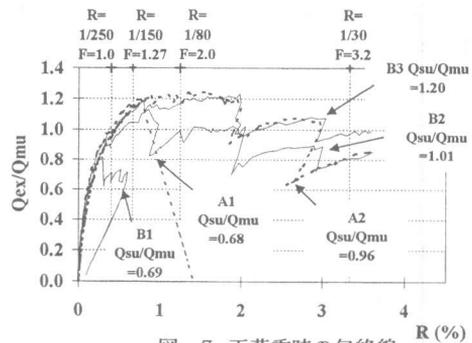


図-7 正荷重時の包絡線

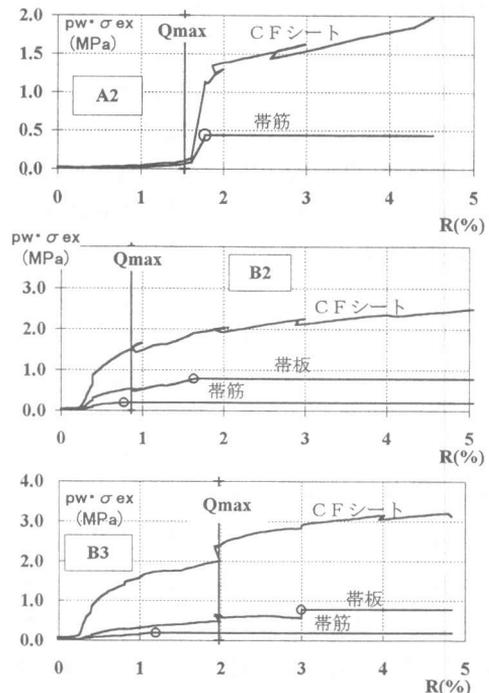


図-8 各補強要素実験時負担せん断力