

SRF による柱の補強効果の検証実験

田村玲¹・田才晃²・Ousalem Hassane³・壁谷澤寿海⁴・五十嵐俊一⁵

¹横浜国立大学大学院 工学府 社会空間システム学専攻 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)

²工博 横浜国立大学助教授 工学研究院 システムの創作部門 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)

³東京大学大学院 地震研究所 (〒113-0032 東京都文京区弥生1-1-1)

⁴工博 東京大学教授 地震研究所 (〒113-0032 東京都文京区弥生1-1-1)

⁵工博 構造品質保証研究所(株) (〒102-8220 東京都千代田区九段北1-11-5)

An efficiency of a new strengthening method using polyester fiber sheets for brittle reinforced concrete columns was investigated experimentally. The method has already been demonstrated of its significant effectiveness for axial failure of columns. Shear failure, bond sprit failure along deformed main bars, and compressive failure of concrete due to bond slippage of round main bars were chosen as brittle failures of columns in the test. The hysteretic behaviors of columns strengthened by the method for a lateral force simulating earthquake input motion statically was improved remarkably. The method to evaluate the capacity of the strengthened columns by the method is proposed in this report.

Key Words : Polyester Fiber Sheet, SRF Strengthening, Shear Capacity, Ductility

1. はじめに

脆性的な破壊モードを有する鉄筋コンクリート造建物では、地震時の水平力による柱の破壊とほぼ同時に柱が鉛直荷重支持能力を失い、建物全体または一部が倒壊に至る。このような倒壊現象を防止するための新たな補強方法として、柱にポリエステル製繊維シート（以下シートと呼

ぶ）を巻きつける方法（以下 SRF と呼ぶ）が提案され、柱の軸力支持能力が飛躍的に改善されることが実験的に実証されている。^{1) 2)}

そこで本報では、脆性的な破壊モードの RC 造柱に対して SRF 補強を施した場合の、水平力に対する性能改善効果を定量的に把握することを目的として、せん断破壊、付着割裂破壊、および丸鋼

表-1 試験体一覧

試験体No	B×D (mm)	H (mm)	F _c (MPa)	Main bars	p _t (%)	Hoops	p _w (%)	Axial loading	Strengthening *				
1	300×300	600	24	12-D13 SD390	0.71	D6@50 SD295	0.43	0.25	N				
2									A-1				
3									A-2				
4									A-3				
5		750		12-D16 SD390	0.88	φ 4@100 SR295	0.083		N				
6									A-2				
7									N				
8									A-2				
9		900		12-φ 13 SR295	0.59				N				
10									B-4				

B×D：幅×せい，H：内法スパン，P_t：引張鉄筋比，P_w：せん断補強筋比

*N：無補強，A-1：A補強1層，A-2：A補強2層，A-3：A補強3層，B-4：B補強4層

主筋の抜け出しによる曲げ圧縮破壊の3つの破壊モードを対象とした構造実験の結果を報告し、シートの補強効果を考慮した耐力評価法を示す。

2. 実験概要

2.1. 試験体概要

試験体は無補強試験体4体、補強試験体6体の計10体である。試験体の配筋図を図-1に、試験体一覧を表-1に示す。主な諸元として、 $B \times D = 300 \times 300\text{mm}$ 、 $F_c = 24\text{Mpa}$ 、軸力比0.25は全試験体共通とした。内法高さ、主筋、せん断補強筋、補強量をパラメータとし、No.1～No.4試験体はせん断破壊型、No.5、No.6試験体は付着割裂破壊型、No.7、No.8試験体は丸鋼主筋の抜け出しによる曲げ圧縮破壊型となるように試験体を計画した。No.9、No.10試験体についてはNo.7、No.8試験体と柱部分の配筋は同一で袖壁付きとした。

2.2. 補強方法

補強方法は2種類とした。独立柱の試験体の補強方法をA補強、袖壁付き柱の試験体の補強方法をB補強と呼ぶ。

A補強は、試験体全面にエポキシウレタン系の接着剤を塗布した後、図-2のように幅44.5mm、厚さ4mmのベルト状のシート（以下シート1）を重ねないように、1周巻く間にシートの幅分だけずらして人力で引っ張りながら螺旋状に巻きつけた。また、2層目、3層目についても同様である。

B補強は、試験体の内法高さの幅に切った厚さ1.1mmのシート（以下シート2）を図に示すように試験体に貼り付ける方法で、No.10試験体に適用したシート層数は4層とした。

2.3. 材料特性

使用材料特性を表-2、表-3、表-4に示す。シート1の特性値には材料試験値を、シート2の特性値には規格値を示してある。また、4φの鉄筋は降伏棚を明確に示さなかったため0.2

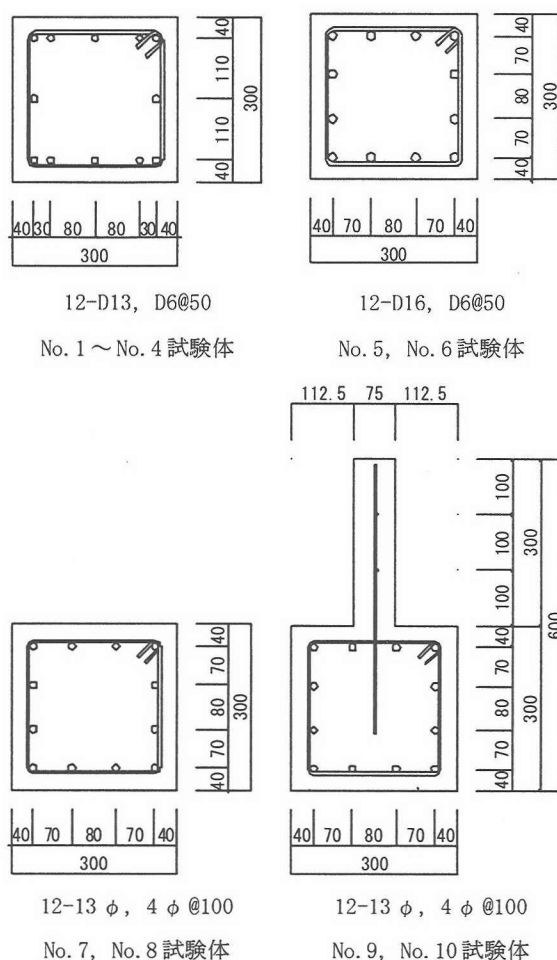


図-1 配筋図

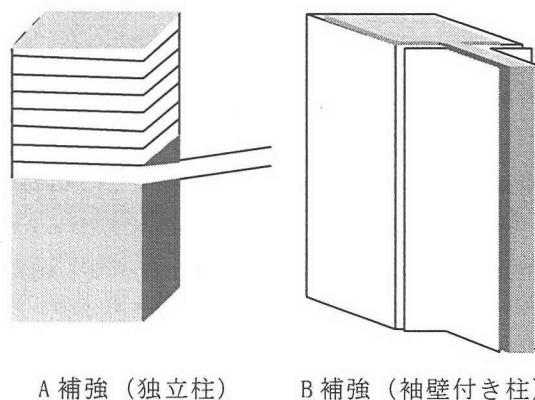


図-2 補強方法

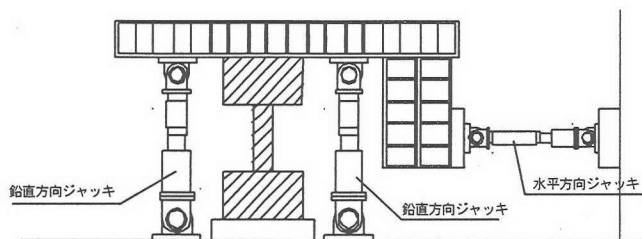


図-3 加力装置図

%オフセット値を用いた。

2.4 加力方法

加力は図-3に示す加力装置により行い、一定軸力下（軸力比0.25）での正負交番繰り返し載荷とした。部材角Rを400分の1, 2, 3, 4, 6, 8, 16, 24, 32, 48, 64, 96と制御し、試験体が軸力を保持できなくなるまで、または水平変位が水平ジャッキの限界に達するまで加力し、その後水平変位をゼロ付近まで戻し、軸圧縮を行った。また、シートの歪の計測には上危険断面から150mm, 300mm, 450mmの位置にそれぞれ5箇所づつ歪ゲージを貼り付けて計測した。

3. 実験結果

実験結果一覧を表-5に、またNo.1, No.2試験体の+8/400rad.の状況を写真-1に示す。

3.1 無補強試験体の破壊状況

無補強試験体であるNo.1試験体は±1/400rad.で曲げひび割れが発生し、±2/400rad.でせん断ひび割れが発生した。±3/400rad.のピークにおいて最大水平耐力に達し、その後、せん断ひび割れの進展に伴い、±6/400rad.で水平耐力が最大水平耐力の80%以下に低下した。-16/400rad.に向かう途中でせん断ひび割れが広がり、軸力および水平力を負担できなくなり、最

表-2 コンクリートの特性

柱試験体 材齢	呼び強度 (kN)	最大荷重 (kN)	σ_B (Mpa)	圧縮強度時歪 (%)
No.1~No.4 28日	24	217	27.52	0.28
No.5~No.8 29日	24	228	28.79	0.13
No.9, No.10 30日	24	204	25.98	0.25

表-3 鉄筋の特性

鉄筋種	ヤング係数 ($\times 10^5$ Mpa)	降伏強度 (Mpa)	降伏歪 (%)	引張強度 (Mpa)	破断歪 (%)
D16 (SD390)	1.85	431	0.32	605	11.60
D13 (SD390)	1.80	433	0.31	612	13.67
D6 (SD295)	2.06	405	0.28	535	16.68
13φ (SR235)	2.01	311	0.16	452	33.82
4φ (SR235)	1.85	435	0.45	460	4.83

表-4 シートの特性

	厚さ mm	幅 mm	引張強度 Mpa	引張強度時の歪度 %	弾性係数 Mpa
シート1	4.0	45	283	6.19	4581
シート2	1.1	—	250	10.00	1400

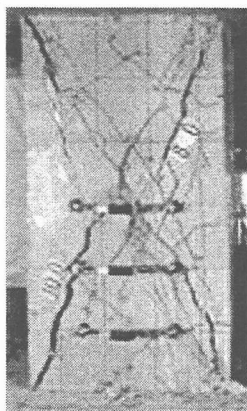
終破壊に至った。

No.5試験体は±1/400rad.で曲げひび割れが発生し、±2/400rad.でせん断ひび割れ、および主筋配列面に沿う付着ひび割れが発生した。±3/400rad.のピークにおいて最大水平耐力に達したが、付着ひび割れが増えるにしたがい、

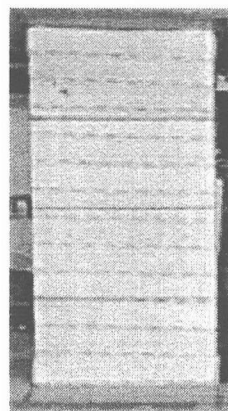
表-5 実験結果一覧

試験体	正負	Q_{max} (kN)	R_{max} (%) d_{max} (mm)	R_u (%)
No.1	正	329.0	0.74 4.46	1.0
	負	-345.0	-0.75 -4.51	-1.0
No.2	正	370.0	0.99 5.96	1.5
	負	-370.0	-1.00 -5.99	-1.5
No.3	正	391.5	1.50 9.01	2.0
	負	-385.4	-1.51 -9.08	-2.0
No.4	正	396.2	1.53 9.16	4.0
	負	-403.1	-1.51 -9.08	-2.0
No.5	正	326.6	0.75 5.59	1.0
	負	-317.3	-0.76 -5.73	-1.5
No.6	正	371.5	1.00 7.49	2.0
	負	-350.5	-1.52 -11.42	-2.0
No.7	正	225.9	0.50 4.49	2.0
	負	-220.0	-1.00 -9.01	-2.0
No.8	正	237.0	3.36 30.21	6.0
	負	-232.4	-1.52 -13.65	-6.0
No.9	正	208.7	0.50 4.49	2.0
	負	-207.7	-1.03 -9.26	-2.0
No.10	正	214.7	1.45 13.01	4.0
	負	-214.3	-0.92 -8.25	-2.0

Q_{max} : 最大水平耐力, R_{max} : 最大水平耐力時の部材角, d_{max} : 最大水平耐力時の変形,
 R_u : 終局部材角 (最大水平耐力の80%以下になった時の部材角)



No. 1 試験体



No. 2 試験体

写真 -1

+6/400rad., -8/400rad. で水平耐力が最大水平耐力の80%以下に低下した。+16/400rad. で付着ひび割れが広がり、カバーコンクリートが剥落し、-24/400rad. に向かう途中で軸力および水平力を負担できなくなり最終破壊に至った。

No. 7 試験体は±1/400rad. で曲げひび割れが発生し、±3/400rad. 以降、上下危険断面において圧壊によるひび割れが発生しだした。

±4/400rad. において最大耐力に達した後、±16/400で最大水平耐力の80%以下に低下した。+24/400rad. に向かう途中で柱中央に縦に大きなひび割れが発生し、軸力を保持できなくなった。

No. 9 試験体は No. 7 試験体とほぼ同様の破壊状況であった。

3.2 水平荷重 - 変形関係

図-4に水平荷重 - 変形関係の包絡線を示す。せん断破壊型である、No. 1～No. 4試験体では補強量が増すにいたが最大水平耐力が増加する傾向がみられ、また、終局部材角も大きくなる傾向がみられた。その他の破壊モードの試験体についても、無補強試験体と補強試験体を比べると、最大耐力、終局部材角ともに増加する傾向がみられた。以上のことから、破壊モードによらず、SRFによる補強は水平力に対する性能改善効果を示すことがわかる。また、B補強を施した試験体であるNo. 10試験体は、柱部分同配筋でA補強を施したNo. 8と比べると、最大

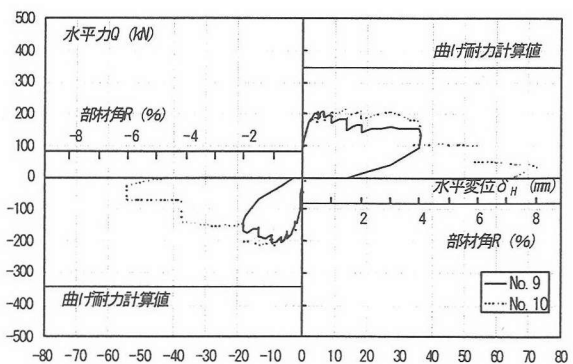
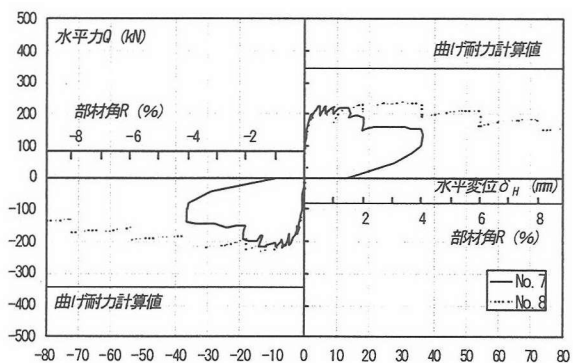
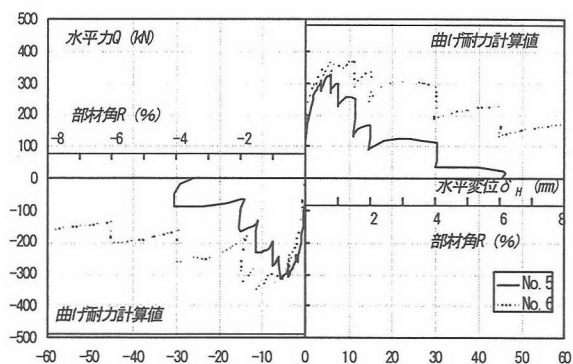
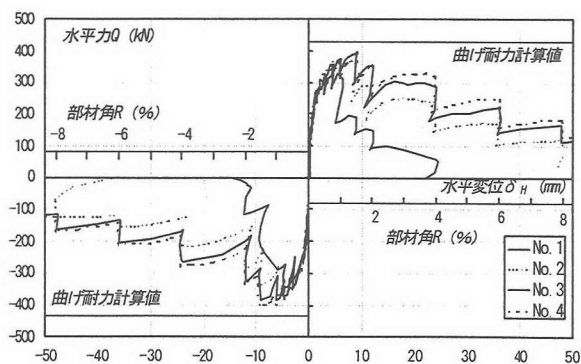


図-4 水平荷重 - 変形関係包絡線

耐力，終局部材角ともに増加の度合いは小さくなっている。これは，A 補強は周方向に完全に柱を拘束しているのに対して，B 補強は周方向に完全には柱を拘束していないためと考えられる。

3.3 軸力－軸方向変形関係

図-5 に No. 1, No. 2 試験体の軸力－軸方向変形関係を示す。無補強試験体である No. 1 試験体は軸変形 5mm 程度で定軸力を保持できなくなるのに対して，補強試験体である No. 2 試験体は水平ジャッキの限界である 128/400rad. まで安定して定軸力を保持することが可能であった。また，その他の試験体についても同様であった。

3.4 柱の軸耐力

柱の水平載荷終了後に軸圧縮載荷を行った。図-6 に No. 2 試験体の軸圧縮試験結果を示す。軸力ジャッキの容量 (1960 k N) いっぱいまで加力しても最大軸耐力まで到達せず軸破壊は起こらなかった。この実験により確認された最大軸力比は 0.8 程度であった。

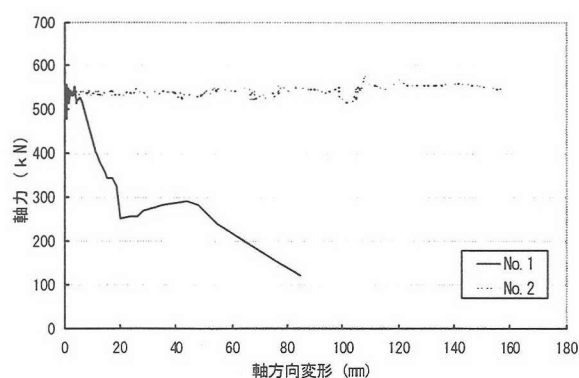


図-5 軸力－軸変形関係

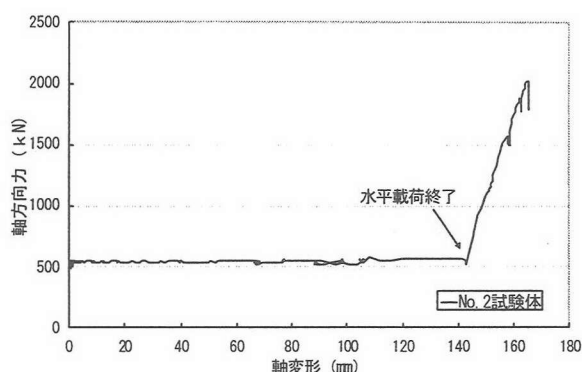


図-6 軸圧縮試験結果

4. 各耐力評価に関する検討

4.1 セン断補強量 $\Sigma(p_w \cdot \sigma_{wy})$

せん断耐力を算定するにあたり，せん断補強量 $\Sigma(p_w \cdot \sigma_{wy})$ を評価する必要がある。これまでに炭素繊維等の研究において，せん断補強量の評価にはいくつかの方法が提案されてるが，本研究ではシートの引張強度時歪と帯筋の降伏強度時歪の比によって評価する。以下にその根拠を示す。

図-7 に No. 2 ～ No. 4, No. 6 試験体の最大水平耐力時におけるシートの歪度を示す。歪は，柱の中央の高さの位置の，水平加力に対して平行な面に貼った 3 枚の歪ゲージの平均値とした。また，2 層以上補強した試験体に関しては，一番内側の層と，一番外側の層の歪ゲージ (計 6 枚) の平均値とした。せん断補強筋の降伏歪は 2.3 に示した通り 0.28% で，ほぼ最大水平耐力時のシートの歪と同等な値となる。したがって，最大耐力時にシートが負担する応力

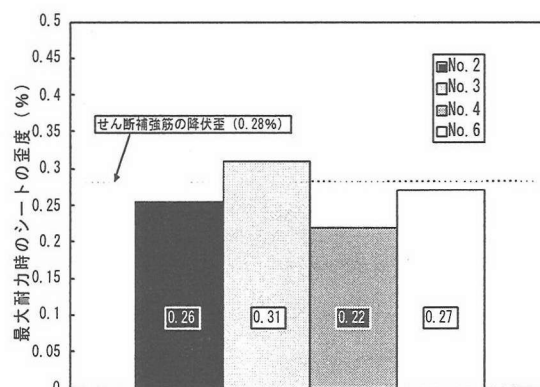


図-7 最大耐力時のシートの歪度

表-6 $\Sigma(p_w \cdot \sigma_{wy})$, Σp_w の計算値

	シート層数	$p_{ws} \cdot \sigma_{wys}$	$\Sigma(p_{ws} \cdot \sigma_{wys})$	p_{ws}	Σp_w
No. 1	—	1.73	—	0.0043	—
No. 2	1	1.73	2.08	0.0043	0.0055
No. 3	2	1.73	2.42	0.0043	0.0067
No. 4	3	1.73	2.74	0.0043	0.0078
No. 5	—	1.73	—	0.0043	—
No. 6	2	1.73	2.42	0.0043	0.0067

はせん断補強筋の降伏時歪におけるシートの応力となる。以上の事より、(1)式のように $\Sigma(p_w \cdot \sigma_{wy})$ を求めること、また、付着割裂強度時のせん断強度を算定するために(2)式のように Σp_w を求めることを提案する。(1)、(2)により計算した各試験体の $\Sigma(p_w \cdot \sigma_{wy})$ 、 Σp_w を表-6に示す。

$$\Sigma(p_w \cdot \sigma_{wy}) = p_{ws} \cdot \sigma_{wys} + \frac{\epsilon_{ys}}{\epsilon_f} \cdot p_{wf} \cdot \sigma_{wf} \quad (1)$$

$$\Sigma p_w = p_{ws} + \frac{\epsilon_{ys}}{\epsilon_f} \cdot p_{wf} \quad (2)$$

p_{ws} : 帯筋のせん断補強筋比
 p_{wf} : シートのせん断補強筋比
 σ_{wys} : 帯筋の降伏強度
 σ_{wf} : シートの引張強度
 ϵ_{ys} : 帯筋の降伏強度時歪
 ϵ_f : シートの引張強度時歪
 $p_{wf} = \frac{2t_f}{b + 2t_f}$
 t_f : シートの厚さ

4.2 計算値と実験値の比較

せん断耐力 Q_{su} の評価式として(3)式の終局強度型耐震設計指針式⁴⁾を、付着割裂強度時のせん断強度 Q_{sub} の評価式として文献3)による(4)式を用いて、実験値との適合性を検討する。

$$Q_{su} = b \cdot j_t \cdot \Sigma(p_w \cdot \sigma_{wy}) \cdot \cot \theta + \tan \theta \cdot (1 - \beta) \cdot b \cdot D \cdot v \cdot \sigma_B / 2 \quad (3)$$

$$Q_{sub} = \tau_{bu} \cdot \Sigma \phi \cdot j_t + \tan \theta \cdot (1 - \beta_b) \cdot b \cdot D \cdot v \cdot \sigma_B / 2 \quad (4)$$

図-8、図-9に各耐力の計算値と実験値の比較を示す。なお、図中には本実験の結果とともに、文献2)においてせん断破壊、および付着割裂破壊した試験体の結果も同時に示している。両破壊モードとも計算値は実験値によく対応していて、概ね安全側に評価している。よって、ここで提案した(1)式、(2)式を用いることで、SRF補強した試験体のせん断耐力および付着割裂強度時のせん断強度を安全側に評価できる。

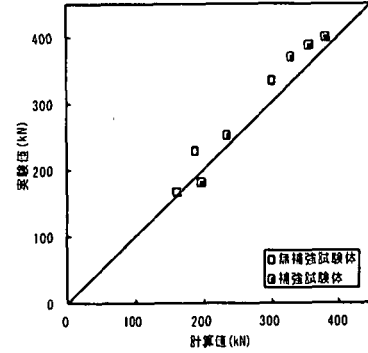


図-8 (3)式による計算値と実験値の比較

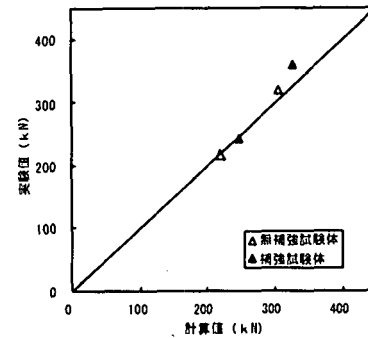


図-9 (4)式による計算値と実験値の比較

5. まとめ

既存RC柱に対してSRF補強を施し、加力実験を行った結果、以下のことが明らかになった。

- 1) どの破壊モードに対しても、SRF補強により顕著な補強効果を示した。
- 2) (1)式、(2)式によりシートの効果を考慮すれば、従来のRC部材と同様に評価できる。

【参考文献】

- 1) 小泉 洋・壁谷澤 寿海ほか：コンクリート柱の地震時軸圧縮破壊に対するシート補強に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.23，No.1，pp937-942，2001
- 2) 田村 玲・田才 晃ほか：RC柱の地震時軸圧縮破壊に対するポリエステル製シートによる補強，コンクリート工学年次論文報告集
- 3) 日本建築学会：連続繊維補強コンクリート系構造設計施工指針案，2002
- 4) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説