

# 論文 ポリエステル製繊維シートを用いた鉄筋コンクリート壁の耐震補強に関する研究

村瀬 正樹<sup>\*1</sup>・壁谷澤 寿海<sup>\*2</sup>・真田 靖士<sup>\*3</sup>・五十嵐 俊一<sup>\*4</sup>

**要旨**：せん断破壊先行型の鉄筋コンクリート造耐震壁を対象に、ポリエステル製繊維シートを用いた耐震補強を施し静的載荷実験によりその有効性を検証した。その結果、補強試験体では曲げ破壊型への移行による靱性の増大とともに安定した軸力保持能力が実証された。また、新しく開発した補強詳細によって極めて大きな靱性を確保しうることが確認された。

**キーワード**：RC, 耐震壁, 耐震補強, ポリエステル製繊維シート, 静的載荷実験

## 1. はじめに

過去の地震においていわゆる既存不適格の古い鉄筋コンクリート造建築物では鉛直荷重を保持できず崩壊するという被害が見られ、耐震補強が急務となっている。特に地震荷重を多く負担する耐震壁において軸力を安定して保持させて、靱性を向上させることは耐震的に非常に有益である。

現在、鉄筋コンクリート造壁に対する耐震補強の方法として、新たな鉄筋コンクリート造壁の増し打ち、炭素繊維補強、アラミド繊維補強などが提案、実施され、それぞれ一定の補強効果を発揮することが確かめられている。しかし、いずれの方法にも、材料あるいは施工コストが高価であること、施工が煩雑であること、躯体との一体性の確保が困難であること、せん断強度あるいは靱性の向上に対する効果も限定的なレベルに留まっていることなど、それぞれ改善すべき余地も多い。

そこで本研究では安価で施工性の良いポリエステル製繊維シート(以下 SRF シート)を用いて鉄筋コンクリート造壁を耐震補強し、その有効性について実験的に検証する。SRF シートは RC 柱の耐震補強に開発されたもので柱に対する十分な補強効果は多くの実験<sup>例えば 1)</sup>によって実証

済みであり、実際の耐震補強工事でも広く用いられつつあるが、本研究は同じ材料を耐震壁の補強に応用したものである。また、繊維の定着方法として従来の繊維補強などで用いられているものとは異なる新しい補強詳細を開発提案し、この補強詳細の効果も検証する。

## 2. 実験方法

### 2.1 試験体

図-1 に試験体立面図・配筋図を、表-1 に試験体名称を示す。試験体は実大の 1/3 スケールを想定した、1 層 1 スパン鉄筋コンクリート造耐震壁 3 体で、断面の寸法および配筋は全試験体共通である。また、1 体は無補強とし、他の 2 体にそれぞれ異なった方法で SRF シートによる補強を行った。表-2 に部材断面表を示す。配筋量は 1970 年以前の設計を想定しており、柱の横補強筋比は現在よりかなり小さくなっている。強度計算値を表-3 に、使用した材料の特性を表-4、表-5、表-6 に示す。試験体はせん断破壊が先行するよう計画した。

表-1 試験体名称

名称	補強方法
RC-M	無補強
SRF-A	従来の補強詳細
SRF-X	新しく開発した補強詳細

\*1 大成建設(株) (正会員)

\*2 東京大学 地震研究所地震火山災害部門教授 工博 (正会員)

\*3 東京大学 地震研究所地震火山災害部門助手 博(工) (正会員)

\*4 構造品質保証研究所(株) 工博 (正会員)

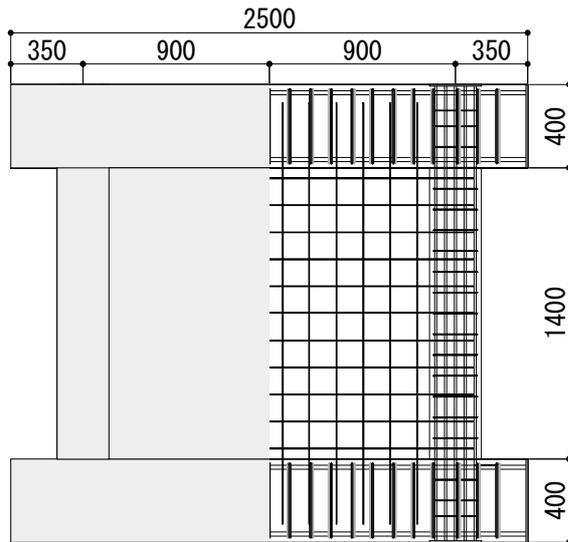


図-1 試験体立面図・配筋図

表-2 部材断面表

柱	断面	250mm × 250mm
	主筋	16-D10 (1.82%)
	横補強筋	D4@100 (0.1%)
壁	壁厚	80mm
	壁縦横筋	D4@130 ダブル (0.25%)

表-3 試験体強度計算値<sup>2)</sup>

	曲げ(kN)		せん断(kN)	
	ひび割れ	終局	ひび割れ	終局
RC-M	295	779	301	631
SRF-A	303	779	310	670
SRF-X	303	779	310	671

※計算には材料試験結果(表-4, 5)を使用

表-4 コンクリートの材料特性

	材齢 (日)	ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	降伏歪 (μ)	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
RC-M	41	2.47 × 10 <sup>4</sup>	22.40	1590	1.70
SRF-A	56	2.50 × 10 <sup>4</sup>	24.36	1723	1.99
SRF-X	59	2.49 × 10 <sup>4</sup>	24.38	1677	1.93

表-5 鉄筋の材料特性

	ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	降伏歪	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
D4	1.59 × 10 <sup>5</sup>	339.8	4.14 × 10 <sup>-3</sup>	560.2
D10	1.72 × 10 <sup>5</sup>	397.8	2.44 × 10 <sup>-3</sup>	557.0

表-6 SRF シートの材料特性

	幅 × 厚 (mm)	ヤング率 (N/mm <sup>2</sup> )※	引張強度 (kN)	破断時歪 (%)
SRF450	45.9 × 3.7	6183	88.23	12.9
SRF2100	103.6 × 2.8	5240	122.13	12.5

※1%歪時の引張強さ/シート断面積

## 2.2 補強方法

本実験では3体の試験体の内2体にSRFシートによる耐震補強を行った。シートは躯体に接着剤により定着させた。各試験体における補強後試験体図を図-2に、補強方法を以下に示す。

### (1) SRF-A

壁と側柱を一体として補強した。上部より水平にSRF2100シートを1層で巻いた。柱と壁の隅角部で変形に伴い発生するシートの剥がれ(浮き上がり)を防止するためL型補強用鉄アングルを両面隅角部に設置し、壁面を貫通させたハイテンションボルトで固定した。柱と壁の隅角部詳細図を図-3に示す。

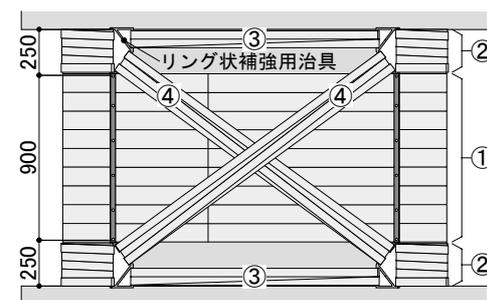
### (2) SRF-X

施工順に各部位の補強方法を示す。①中央部はSRF-Aと同様の補強方法とした。②側柱の頭部および脚部から250mmはSRF450を螺旋状に2層で巻いた。③壁の頭部および脚部はSRF450を螺旋状に2層巻いた。④せん断変形時の引張に抵抗するため壁の対角方向にSRF450を螺旋状に3層巻いた。この際壁面4隅に開口部を設けリング状の補強用治具(図-4)を挿入した。

なお、SRF-Xは側柱に直交壁が取り付くような場合の施工を念頭に置いた補強詳細である。



(a) SRF-A



(b) SRF-X

図-2 補強後試験体図

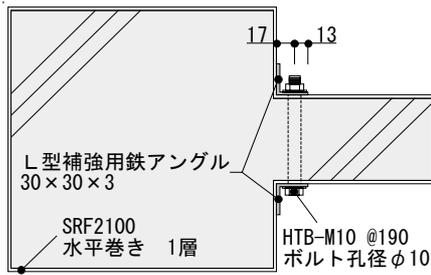


図-3 柱と壁の隅角部詳細図

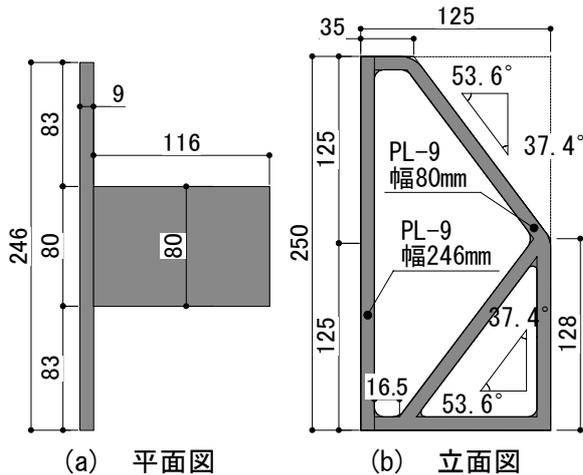


図-4 リング状補強用治具詳細図

### 2.3 荷重方法

実験には東京大学地震研究所内の実験施設を用いた。荷重装置を図-5に示す。加力には容量1000kN、ストローク±200mmの油圧式ジャッキ3台を使用した。水平方向には壁脚部から2000mmの高さにおいて、変位制御の正負繰り返し荷重を行った。鉛直方向には合計600kN(軸力比0.2)の一定軸力を加えたが、 $M/(Q \cdot lw)=1.0$ [ $lw$ :側柱芯間距離]を維持するため両鉛直ジャッキにより壁脚部に作用するモーメントを計測される水平力に比例させて制御した。

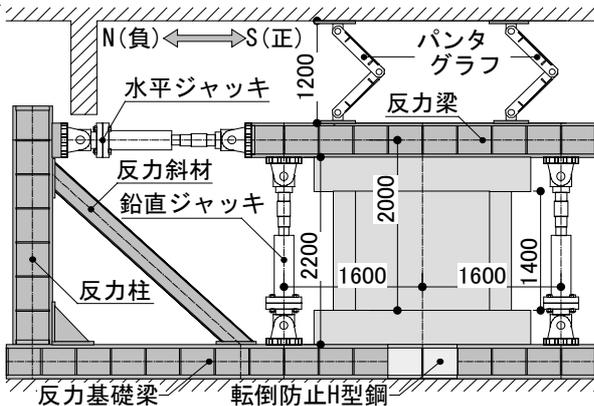


図-5 荷重装置図

### 2.4 荷重計画

荷重履歴は原則として部材変形角(=壁頂部変形/壁内法高さ)±1/400, ±1/300, ±1/200, ±1/150, ±1/100, ±1/75, ±1/50, ±1/33, +1/15radの順で各1回ずつである。しかし、破壊などによって変形が大幅に進行した場合には、進行後の到達点を超える未到達変形角を目標に荷重した。各試験体の荷重履歴は結果として表-7の通りである。尚、荷重は試験体がせん断破壊により軸力を保持できなくなるまで、またはせん断破壊後も軸力を保持していた試験体SRF-Aについては破壊後の1サイクルまで行った。

表-7 荷重履歴

	RC-M	SRF-A	SRF-X
部材変形角 (rad)	±1/400	±1/400	±1/400
	±1/300	±1/300	±1/300
	±1/200	±1/200	±1/200
		±1/150	±1/150
		+1/100	±1/100
		-1/33	±1/75
		+1/33	±1/50
		-1/33	±1/33
			+1/15

### 2.5 計測方法

計測位置図を図-6に示す。計測点数は水平力1成分、軸力2成分、水平変形7成分、鉛直変形10成分、対角変形6成分、鉄筋の歪37成分の合計63成分である。荷重の計測にはロードセルを、変形の計測には歪式変位計を、鉄筋の歪の計測には歪ゲージを使用した。

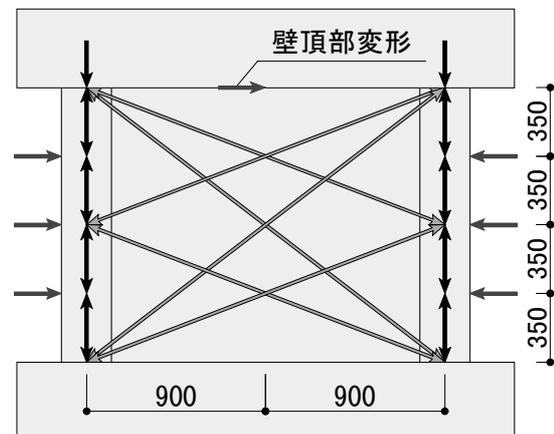


図-6 計測位置図

### 3. 実験結果

#### 3.1 破壊経過

RC-M の最終ひび割れ状態を図-7に、各試験体の最終破壊状態を写真-1に、各試験体における破壊経過を以下に示す。

##### (1) RC-M

[+1/400rad, -1/400rad]

壁頂部変形が正側で 1.1mm, 負側で-0.9mm に達したところでせん断ひび割れが発生した。負側ピーク時に引張側柱に曲げひび割れが発生した。正側ピーク時に壁筋が降伏した。

[+1/300rad]

引張側柱に曲げひび割れが発生すると共に、危険断面で外端主筋が降伏した。

[+1/200rad]

水平耐力が曲げ降伏強度を上回った。

[-1/200rad]

圧縮側柱脚の横補強筋が降伏した。ピークに到達し荷重を一旦停止していたが、変形が徐々に増加し壁頂部変形が-7.1mm に達したところでせん断破壊した。せん断破壊後、完全に軸力支持能力を失った。

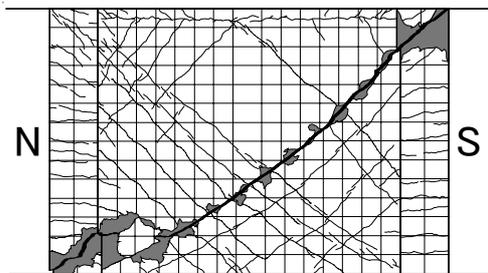


図-7 RC-M 最終ひび割れ状況

##### (2) SRF-A

[+1/400rad, -1/400rad]

正側では壁頂部変形 1.0mm, 負側では-0.9mm に達したところで剛性が大きく低下したことから、せん断ひび割れが発生したと考えられる。

[-1/300rad]

水平耐力が曲げ降伏強度を上回った。

[+1/200rad, -200rad]

正側ピーク時に引張側柱脚の危険断面で外端主筋が降伏し、負側ピーク時に引張側柱脚の外端主筋が降伏した。

[+1/150rad, -150rad]

正側ピーク時に引張側柱脚の横補強筋が降伏し、負側ピーク時に壁筋が降伏した。

[-1/100rad]

ピークで曲げ降伏後のせん断破壊に至った。破壊後に壁脚部の 1 部で圧壊によりシートが剥がれたが、柱と壁の隅角部の定着は維持され、シートの拘束効果により軸力は保持された。圧縮側柱脚で圧壊によりシートの膨張が視認された。引張側柱脚の横補強筋が降伏した。

[+1/33rad]

圧縮側柱脚で圧壊によりシートの膨張が視認された。

[-1/33rad]

両側の柱と壁の隅角部において下部より約 25cm の範囲でシートが剥がれ浮き上がった。荷重終了までシートが破断することはなかった。

##### (3) SRF-X

[+1/400rad, -1/400rad]

正側では壁頂部変形 0.7mm, 負側では-2.1mm に達したところで剛性が大きく低下したことから、せん断ひび割れが発生したと考えられる。

[+1/200rad, -1/200rad]

正側ピーク時に引張側柱脚の危険断面で外端主筋が降伏した。負側ピーク時に水平耐力が曲げ降伏強度を上回った。

[+1/150rad]

引張側柱脚の危険断面と壁面下部で曲げひび割れが発生した。

[-1/150rad]

引張側柱脚の危険断面に曲げひび割れが発生した。引張側柱脚の外端主筋と、圧縮側柱脚の横補強筋が降伏した。壁筋が降伏した。

[-1/100rad]

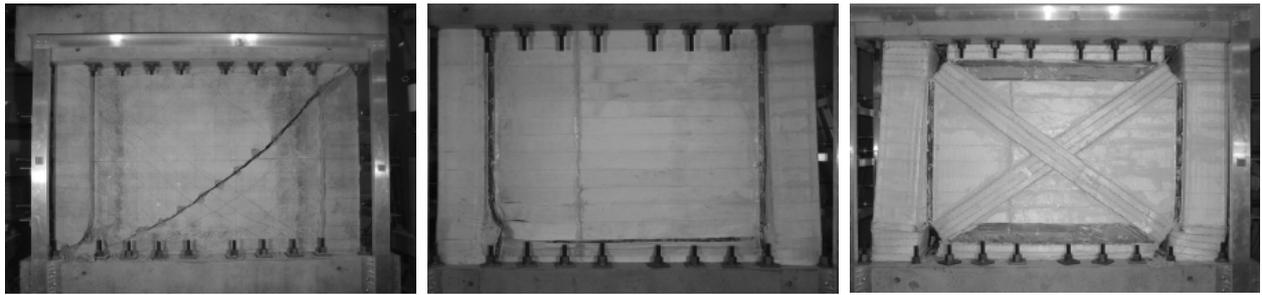
引張側柱脚の全主筋が降伏した。

[+1/75rad]

正側ピーク時に壁脚中央部で圧壊が確認された。圧縮側柱脚の横補強筋が降伏した。

[-1/75rad]

圧壊が拡大し壁脚中央部のシートが剥がれた。



(a) RC-M (b) SRF-A (c) SRF-X

写真-1 各試験体における最終破壊状態

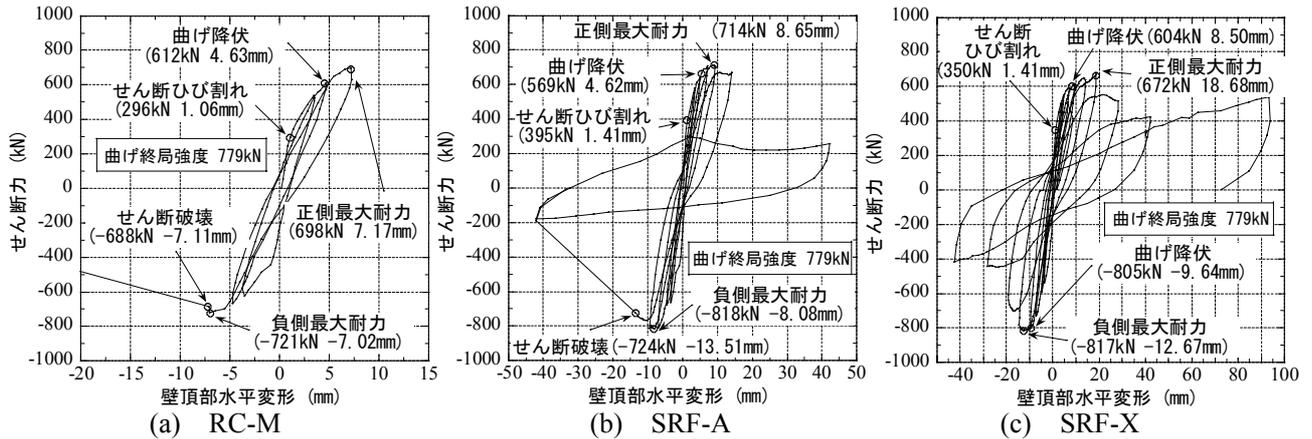


図-8 各試験体における復元力特性

[+1/33rad, -1/33rad]

壁面下部のリング状補強用治具の斜材部は完全に座屈し、除荷過程で溶接部が破断した。柱脚部で圧壊によりシートが膨張した。正側ピーク時に引張側柱脚の危険断面で全主筋が降伏した。

[+1/15rad]

載荷終了まで軸力を保持した。柱と壁の隅角部でシートが剥がれ浮き上がることはなかった。

### 3.2 復元力特性

各試験体における復元力特性を図-8に示す。RC-Mに比べて SRF-A および SRF-X では耐力および靱性能の向上が確認され、耐震壁における SRF シート補強の有効性が確かめられた。SRF-A はせん断破壊を生じたが、その変形(-1/100rad)は RC-M のせん断破壊点(-1/200rad)と比べ約 2 倍となっている。これはシートによる拘束が耐震壁のせん断ひび割れの拡大に対して効果的に作用したためと考えられる。また、せん断破壊後急激に水平耐力が減少したが軸力の保持は可能であった。SRF-X は SRF-A と同様曲げ降伏したが、SRF-A の様な曲げ降伏後のせん断破壊による急激な水平耐力の低下を生じることはなかった。

その結果、載荷終了(最大+1/15rad)まで水平力と軸力を安定して保持した履歴ループを描くことが可能であり、エネルギー吸収の点で SRF-A よりも優れた補強方法であると判断される。最大耐力は曲げ耐力に達しているため補強詳細によらずほぼ同等であった。なお、SRF-X の正方向の耐力がやや低いのは、試験体の設置誤差により加力軸が壁芯からずれ、試験体におじれ変形が生じたためと考えられる。

### 3.3 軸方向変形-壁頂部水平変形関係

各試験体の軸方向変形と壁頂部水平変形の間係を図-9に示す。RC-M はせん断破壊直後に軸力支持能力を完全に失った。SRF-A はせん断破壊後 RC-M と同様に軸方向変形が急増しているが、シートの拘束効果により軸力は保持された。また変形量も約 5.4mm に留まっており、ある程度の補強効果を持つことが確かめられた。しかし、一方で破壊後の 1/33rad サイクル時における軸方向変形の増加幅は同変形時の SRF-X と比べると約 4 倍大きく、曲げ破壊によって安定した軸方向変形を維持した SRF-X の方が耐震補強の方法として有効であるといえる。

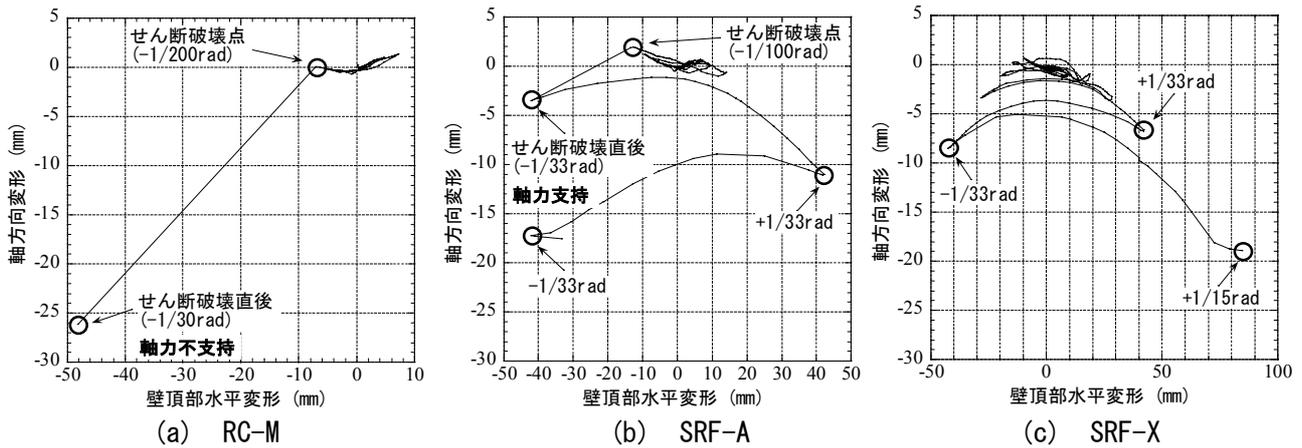


図-9 軸方向変形-壁頂部水平関係

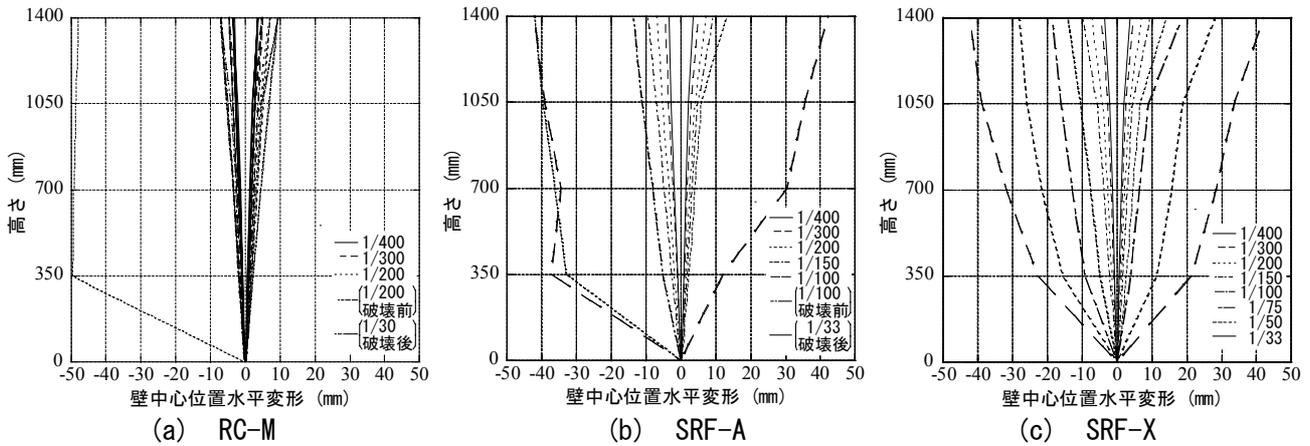


図-10 ピーク時における高さ別の水平変形分布

### 3.4 水平変形分布

各試験体のピーク時における高さ別の水平変形分布を図-10に示す。RC-MとSRF-Aはせん断破壊直前まではほぼ直線的な分布を示し、せん断破壊後に脚部が大きく変形するという同じ傾向が得られた。一方、SRF-Xは大変形時において、他の試験体でみられる脚部への極端な変形集中がかなり抑制されている。

## 4. 結論

- (1) ポリエステル製繊維シートにより補強された鉄筋コンクリート造壁は無補強に比べて耐力および靱性能が向上するため、柱だけでなく壁においてもSRFシート補強は適用可能である。また、新しく開発した補強詳細は従来の補強詳細に比べて極めて大きな靱性を確保しうる。本実験では以下のような結果となった。

- ・無補強試験体 RC-M は 1/200rad でせん断破壊し軸力支持能力を失った。
- ・従来の補強詳細試験体 SRF-A は 1/100rad でせん断破壊したが軸力は保持された。
- ・新しく開発した補強詳細試験体 SRF-X はせん断破壊することなく 1/15rad まで安定した耐力と軸力を保持した。

- (2) 新しく開発した補強詳細試験体 SRF-Xは側柱脚部に十分な補強が可能であったため、大変形時において脚部への極端な変形集中がかなり抑制された。

## 参考文献

- 1) 小泉洋, 壁谷澤寿海, 田才晃, 五十嵐俊一: 鉄筋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, コンクリート工学論文集, vol23, No.1, pp.937-942, 2001
- 2) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 1999