

論文 連続繊維シートによる耐震壁の補強に関する実験的研究

吉田徳雄*1・松崎育弘*2・福山 洋*3・林田則光*4

要旨:既存耐震壁の補強方法として施工性に優れた炭素繊維シート(以下,シートと略す)による補強方法を取り上げ,その適用性の検討を行った。本研究では5種類の補強方法を取り上げ,それらの方法で補強した耐震壁試験体と,無補強試験体1体の加力実験を行った。その結果,シート補強により耐力,初期剛性は増加し,さらにシートを定着したものおよびコンクリートの圧壊を防止したものについては変形性能の向上もみられた。また,シート補強した耐震壁の最大耐力は,既往の算定式を用い,シートに作用する実際の応力を考慮することで算定可能であることを示唆した。

キーワード:耐震壁,補修補強,炭素繊維シート,せん断耐力,シート有効係数

1. はじめに

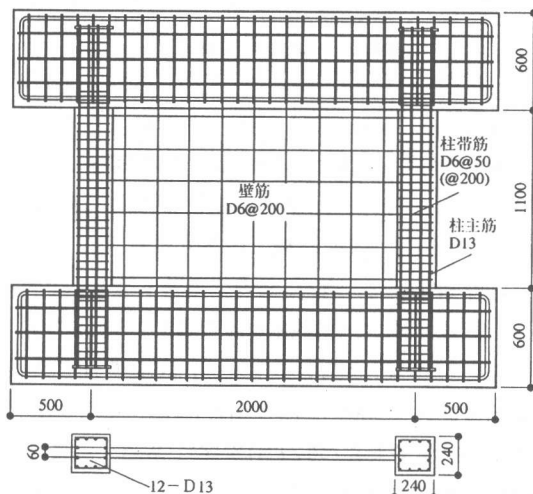
既存建物の耐震補強において従来は壁の増設,増打ちなどの方法が多用されているが,補強工事が大がかりになり建物を使用しながらの工事が困難などの問題点が挙げられる。そこで,既存耐震壁の補強方法として施工性に優れた炭素繊維シート(以下,シートと略す)による補強方法を取り上げ,その適用性の検討を行った。本報告は文献¹⁾に加え,シート補強した耐震壁の実験結果に基づき,その部材性状,補強効果,耐力について検討した。

2. 試験体

図1に試験体の形状および配筋図を示す。縮尺は実大の1/3を想定し,柱スパン2000mm,柱断面240×240mm,壁厚60mm,柱脚から上部スタブ中心(水平力加力位置)間距離を1400mmとした。全試験体共壁筋比は0.27%,柱主筋は12-D13とした。柱帯筋比は0.53, 0.13%の2種類とした。

表1に試験体種類を示す。RC-0試験体は無補強の試験体である。W1CF試験体は壁のせん断耐力上昇を目的として壁全面にシートを縦横

方向に各1層貼付けた。横方向シートのみ柱で折り返して貼付けた(図2(a)参照)。W2CF試験体は柱帯筋比を0.13%と小さくしたものである。この試験体は補強をしない場合,柱が壁に先行してせん断破壊するように計画し,補強により柱のせん断破壊を防止し壁全体のせん断耐力の上昇を期待した。壁両面全面に縦



註()内はW2CF試験体

図1 試験体形状および配筋図

*1 東急建設(株) 技術研究所 建築研究部建築構造研究室, 工修(正会員)

*2 東京理科大学教授 工学部建築学科, 工博(正会員)

*3 建設省建築研究所 国際地震工学部第一耐震工学室主任研究員, 工博(正会員)

*4 (株)熊谷組 技術研究所 建築構造グループ, 工修(正会員)

表1 試験体種類

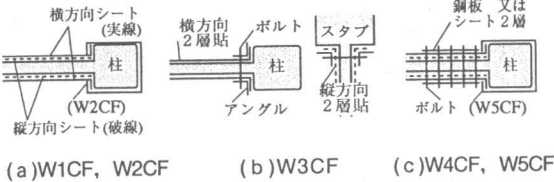
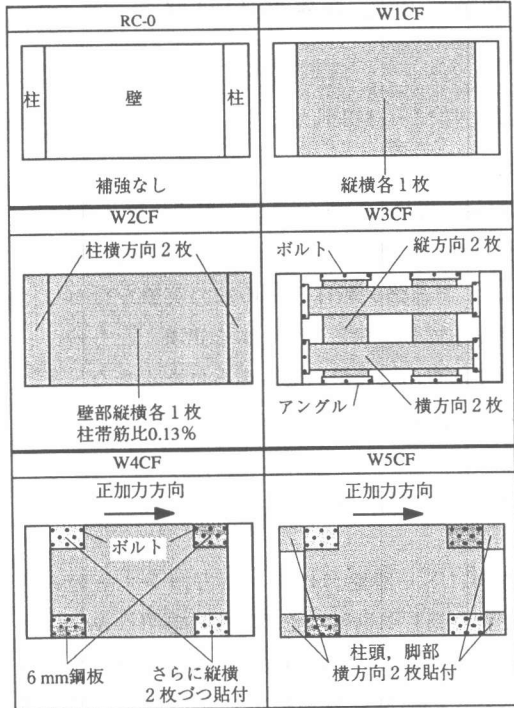


図2 シート貼付詳細

横方向に各1層貼付け、柱に横方向シートを1層巻き付けた(図2(a)参照)。W1CF試験体と同様、横方向シートのみ柱で折り返して貼付けた。W3CF試験体は施工性を考慮しシート貼付け面積を小さくしたものである。貼付けたシート量はW1CF試験体と同じとし、井型に集約して2層貼りとした。シートは縦横方向共に鋼製アングル材(L-70×70×5)およびボルトを用いて定着した(図2(b)参照)。W4CF試験体は耐力低下の原因となる壁コンクリートの圧壊とシートの面外へのはらみを防ぐ目的で、W1CF試験体の補強に加え壁隅部をさらに補強したものである。W1CF試験体と同様にシートを貼付けた後、正加力に対して圧縮ストラットが形成される対角方向の壁隅部に縦横方向各2

表2 コンクリートの材料特性

試験体	圧縮強度 [N/mm ²]	割裂強度 [N/mm ²]	弾性係数 [×10 ⁴ N/mm ²]	ポアソン比
RC-0	28.6	2.21	2.18	0.16
W1CF	27.2	2.22	2.04	0.12
W2CF	26.3	2.83	2.49	0.17
W3CF	27.0	3.12	2.72	0.19
W4CF	34.3	2.40	2.38	0.16
W5CF	31.9	2.12	2.36	0.19

表3 鉄筋の材料特性

部位	降伏強度 [N/mm ²]	引張強度 [N/mm ²]	弾性係数 ×10 ⁵ [N/mm ²]	伸び率 [%]	備考
柱主筋	384	541	2.07	27.4	RC-0, W1, 4, 5CF
筋	360	499	1.83	19.9	W2, 3CF
柱帯筋	335	631	2.01	23.5	RC-0, W1, 4, 5CF
壁筋	386	547	1.84	13	W2, 3CF

表4 シートの材料特性

種類	厚さ [cm]	目付量 [g/m ²]	破断強度 [N/mm ²]	弾性係数 [×10 ³ N/mm ²]	備考
TCS-300	0.017	300	3570	2.28	W1, 2, 3CF
30タイプ	0.017	300	3430	2.35	W4, 5CF

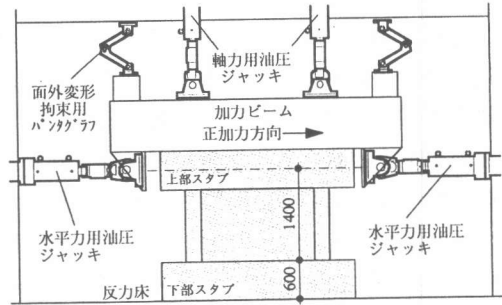


図3 加力装置

層のシート(幅340mm, 縦220mm)を貼付け、所定位置の貫通穴にM12ボルトを通し壁両側からナットで締め付けた(図2(c)参照)。負加力に対して圧縮ストラットが形成される対角方向の壁隅部は、厚さ6mmの鋼板(幅340mm, 縦220mm)を設置しM12ボルトで同様に固定した。正加力ではシートと通しボルトによる、負加力では鋼板と通しボルトによる補強効果が確認できるようにした。W5CF試験体はW4CF試験体と同様な補強を施した上、柱のせん断破壊を防ぐ目的で柱頭、脚部の1D(D:柱径)区間に横方向シートを2層貼付けた。

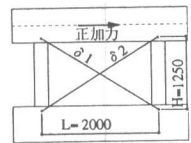


図4 せん断変形角の測定

表2にコンクリート、表3に鉄筋、表4に

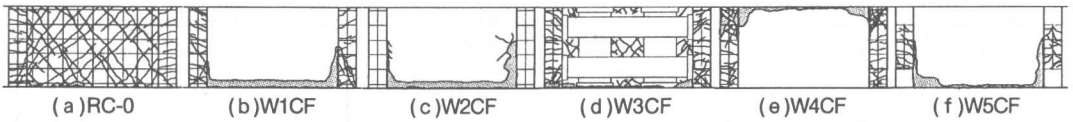


図5 最終破壊状況

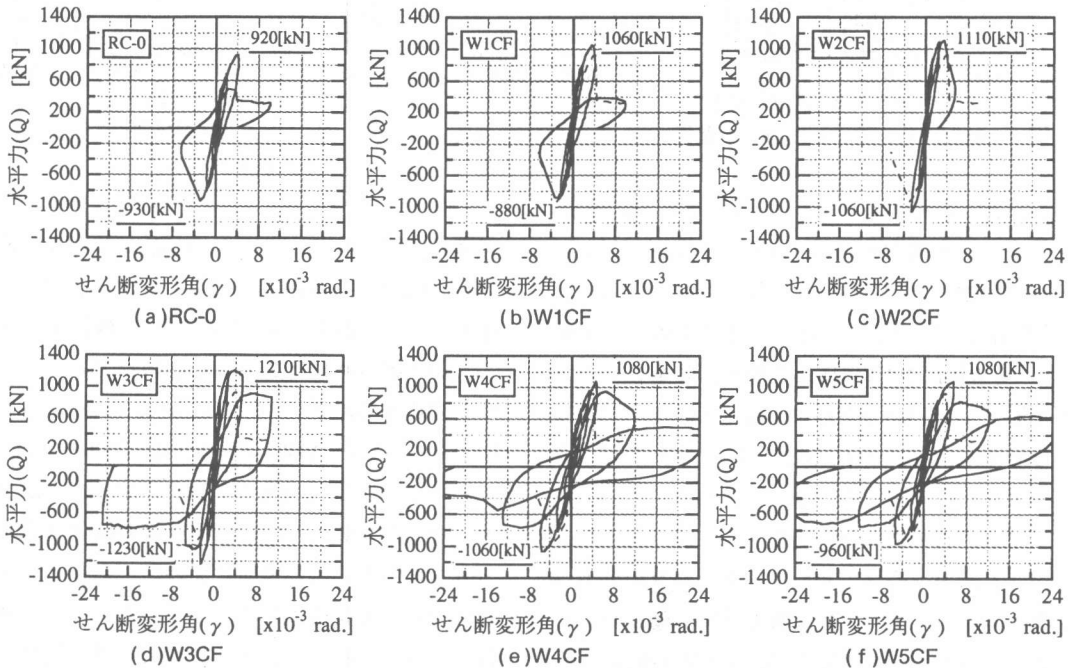


図6 Q-γ関係

シートの材料特性を示す。

3. 加力および測定方法

図3に加力装置図を示す。各柱上部に一定軸力($1/6BD\sigma_b$, B :柱幅, σ_b :コンクリート圧縮強度)を与えつつ、水平荷重(Q)を上部スタブ芯位置に加えた。変位は図4に示す対角間距離の変化量 δ_1 , δ_2 を測定し、式(1)によりせん断変形角(γ)を略算した。

$$\gamma = 0.5(\delta_1 + \delta_2) \sqrt{H^2 + L^2} / HL \quad (1)$$

4. 実験結果

4.1 破壊状況

図5(a)~(f)に各試験体の最終破壊状況を示す。シート補強した試験体はシートを剥がして破壊状況を観察した。RC-0試験体はせん断ひび割れの進展と共に、壁下部においてコンク

リートが圧壊しスリップ破壊した。W1CF試験体もRC-0試験体同様、壁下部においてコンクリートが圧壊し、シートが面外にはらみスリップ破壊した。W2CF試験体は柱脚部近傍の壁コンクリートが圧壊した。柱のせん断破壊は生じなかった。W3CF試験体は壁に損傷は生じず、最大耐力発生以降徐々に柱のコンクリートが圧壊した。シート定着用アングル材を設置した部分にコンクリートの圧壊は認められず、シート定着のみならずコンクリートの圧壊を防止する効果があったと推察される。W4CF試験体は最大耐力発生以降、壁上部シートの面外へのはらみが生じた。その後、柱頭部がせん断破壊した。W5CF試験体は最大耐力発生以降、壁下部シートの面外へのはらみが生じた。柱は健全であった。

4.2 Q-γ関係

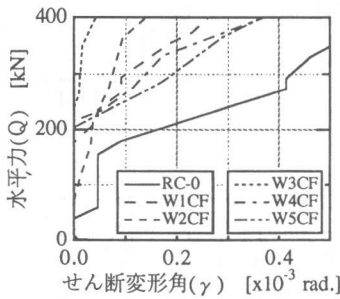
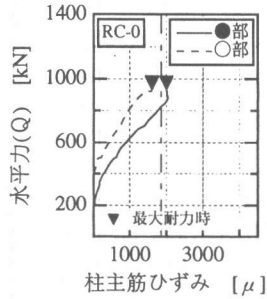
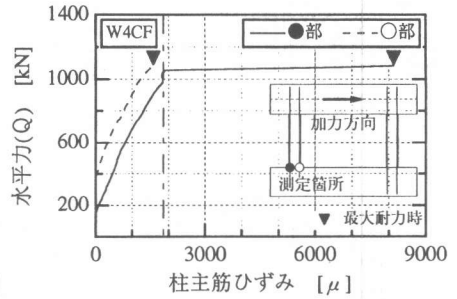


図7 初期剛性に着目したQ- γ 関係



(a)RC-0



(b)W4CF

図8 Q-柱主筋ひずみ関係

図6に各試験体のQ- γ 関係を示す。W1CF試験体はRC-0試験体に対し14%程度耐力が上昇した。最大耐力以降著しく耐力が低下した。W2CF試験体はRC-0試験体に対し19%程度耐力が上昇した。W1CF試験体同様最大耐力以降著しく耐力が低下した。W3CF試験体は他の試験体に比べ最も耐力が高く、RC-0試験体に対しおよそ32%耐力が上昇した。他の試験体と違い、シート全体が定着されたこと、定着された縦方向シートがせん断力へ寄与したのではないかと等の要因が考えられる。また、最大耐力以降も優れた変形性能を示した。W4CF試験体、W5CF試験体は共にRC-0試験体に対しおよそ16%耐力が上昇した。コンクリート圧壊防止により耐力上昇を期待したが、W1CF試験体とほぼ同程度の耐力となった。しかし、W3CF試験体同様優れた変形性能を示した。W4CF試験体は $\gamma = -0.014$ rad. 辺りで耐力が低下したが、これは柱頭部のせん断破壊によるものである。柱頭、脚部を補強したW5CF試験体ではこのような耐力の低下は認められない。また、正加力、負加力共に同様なQ- γ 関係となることから、鋼板、シートによる壁隅部の補強効果は同程度であると言える。

図7に初期剛性に着目したQ- γ 関係を示す。RC-0試験体はQがおおよそ50kNにおいて γ が急増しているのに対し、シート補強した試験体はおおよそ200kNで γ が急増しており、シート補強による初期剛性増加が確認できる。

4.3 柱主筋ひずみ

図8(a)、(b)に、Q-柱主筋ひずみ関係の実験

結果の一例を示す。図中一点鎖線は降伏ひずみ(1860 μ)を示す。図(a)によれば、RC-0試験体はQがおおよそ840kNにおいて外側主筋(●部)が降伏し、最大耐力時には2000 μ 程度のひずみが生じた。内側主筋(○部)の降伏は認められなかった。図(b)によれば、W4CF試験体はQがおおよそ980kNにおいて外側主筋が降伏し、その後ひずみが急増した。RC-0試験体同様内側主筋の降伏は認められなかった。この傾向は他のシート補強試験体についても確認できた。すなわち、シート補強により柱主筋のひずみを増加させ、せん断型の耐震壁を曲げ破壊型に移行できる可能性が確認できた。また、いずれの試験体も内側主筋の降伏は認められないことから、試験体は全てせん断破壊により耐力が決定したことが確認できた。

4.4 壁筋ひずみ

図9に各試験体の最大耐力時における壁横筋ひずみ分布の一例を示す。図によれば、RC-0試験体はひずみ分布に極端に突出した部分が見られる。他の測定位置においても同様な傾向が確認できた。これは壁部分にせん断ひび割れが発生し、その部分のひずみが局部的に増加したためであると考えられる。シート補強した試験体はひずみがほぼ均一に分布し、おおよそ2000 μ 程度、最大でもW4CF試験体の2700 μ 程度である。これは、シートが壁筋に生じる応力を負担したためであると推察される。

4.5 シートひずみ

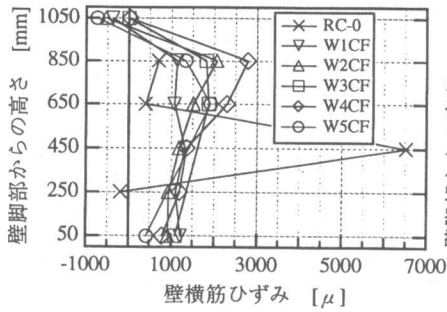


図9 壁横筋ひずみ分布

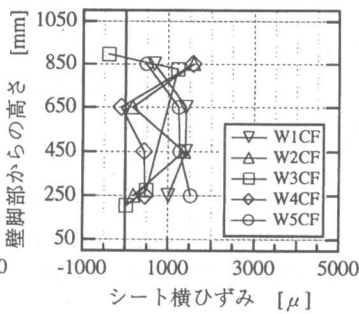


図10 シートひずみ分布

表5 シートひずみ最大値と実応力

	シートひずみ 最大値[μ]	実応力 [N/mm ²]
W1CF	1560	356
W2CF	1600	356
W3CF	1540	351
W4CF	1580	371
W5CF	2070	486

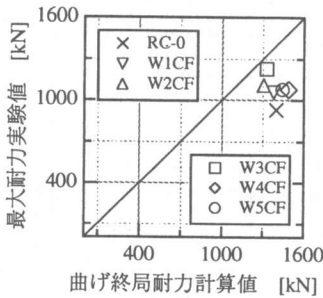


図11 曲げ耐力計算値と実験値の比較

図10に各試験体の最大耐力時における壁部分のシート横方向ひずみ分布の一例を示す。図によれば、いずれの試験体も最大耐力時において1500~2000 μ 程度のひずみが生じた。表5に各試験体の最大耐力時におけるシートひずみ最大値と、シートに生じた実応力を示す。

5. 耐力評価

図11に表6式(2)²⁾による曲げ終局強度計算値と最大耐力実験値の比較を示す。曲げ終局強度の計算にはシートの影響を考慮していない。図によれば、計算値は実験値を上回る。これは4.3でも示したが、いずれの試験体もせん断により耐力が決定したためと推察される。ゆえに、ここでは表6式(3)に示す壁横筋とシートを併用する壁のせん断補強指標を用いて、式(4)、(5)により安全側で評価できる α の値について検討した。W1CF試験体、W2CF試験体、W4CF試験体、W5CF試験体の最大耐力はシート定着方法、補強方法に拘らずほぼ等しく、これら4体の試験体の α は同程度であると考えられ

る。W3CF試験体の最大耐力は他の試験体に比べ大きく、 α は大きいと考えられる。

図12(a)、(b)に実験値と計算値の比較を示す。修正荒川式³⁾をもとにした式(4)ではせん断補強筋比の上限である1.2%を無視して算定した。終局強度型指針式⁴⁾をもとにした式(5)は指針式の補強量の上限に準じた。図中の耐力と補強指標の関係を示す2本の破線のうち、上側は各試験体のコンクリート強度、壁筋引張強度、シート引張強度の最大値を用いた場合、下側はそれら材料強度の最小値を用いた場合の計算値を示す。実線はそれら材料強度の平均値を用いた場合の計算値を示し、耐力評価は実線で示した計算値で行った。

図によれば、 $\alpha=1$ とした場合、式(4)は全ての試験体の耐力を危険側に評価する。式(5)はW3CF試験体を12%程度安全側に評価するが、その他の試験体は危険側の評価となる。

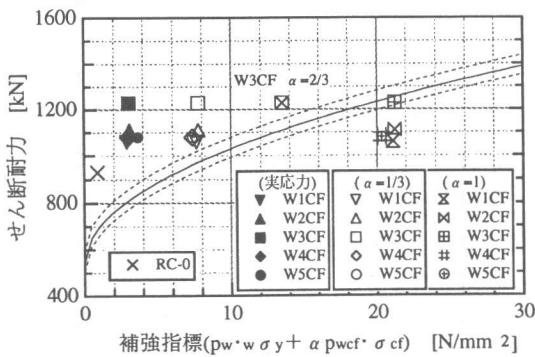
$\alpha=1/3$ とした場合、式(4)はW3CF試験体を13%程度、その他の試験体を11%程度安全側で評価する。式(5)はW3CF試験体を11%程度安全側に評価するが、他の試験体をやや危険側に評価する。

W3CF試験体に関しては、 $\alpha=2/3$ とした場合、式(4)を用い10%程度安全側で評価できる。

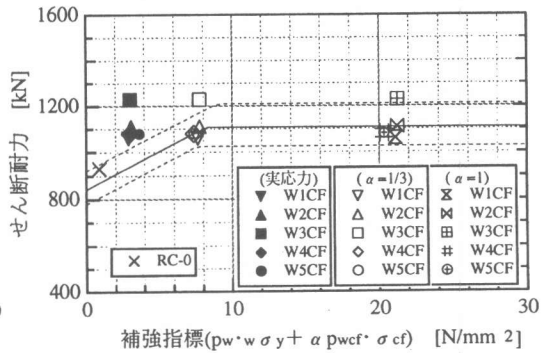
補強指標をシート実応力(表5参照)から求めた場合、式(4)はW3CF試験体を16%程度、その他の試験体を13%程度安全側で評価する。式(5)ではW3CF試験体を13%程度、その他の試験体を11%程度安全側で評価する。尚、シート実応力はシート破断強度のおよそ1/10であることから、

表6 耐力評価に用いた算定式

式(2)	$MQ_u = \left\{ 0.9a_t s f_y + 0.4a_w s f_{wy} + 0.5N \left(1 - \frac{N}{BLF_c} \right) \right\} \frac{L}{h_0}$	式中の記号
式(3)	$p_w w \sigma_y + \alpha p_{wcf} \cdot \sigma_{cf}$	p_w : 壁筋比 $w \sigma_y$: 壁筋降伏強度 α : シート有効係数 p_{wcf} : 壁厚に対するシート厚さの比
式(4)	$sQ_u = \left[\left\{ \frac{0.053 p_{te}^{0.23} (F_c + 180)}{\sqrt{h_0/L + 0.12}} \right\} + 2.7 \sqrt{p_{wh} w \sigma_y + \alpha p_{wcfh} \cdot \sigma_{cf} + 0.1 \sigma_0} \right] b_e j$	σ_{cf} : シート破断強度 p_{wcfh} : 壁有効厚に対するシート厚さの比
式(5)	$V_u = t_w L_{wb} (p_w w \sigma_y + \alpha p_{wcf} \cdot \sigma_{cf}) \cot \phi + \tan \theta (1 - \beta) t_w L_{wa} v F_c / 2$ $\tan \theta = \left(\sqrt{(h_w / L_{wa})^2 + 1} - h_w / L_{wa} \right)$ $\beta = (1 + \cot^2 \phi) (p_w w \sigma_y + \alpha p_{wcf} \cdot \sigma_{cf}) / (v F_c)$	その他式中の記号については文献 ^{2), 3), 4)} 参照 註)各式ともCGS単位で計算し, 算出結果をSI単位に換算する。



(a) 式(4)による比較



(b) 式(5)による比較

図12 最大耐力計算値と実験値の比較

α は 1/10 程度であるといえる。

以上より、シート補強した耐震壁のせん断耐力算定には、既往の算定式にシート補強の効果を取り入れることで可能であるといえる。

6. まとめ

本研究の結果、以下の知見が得られた。

- (1) 無補強に比べ、本研究で取り上げたシート補強方法により、14～32%程度耐力が上昇し、初期剛性も増加した。
- (2) 柱帯筋が少ない場合でも、柱をシート補強することにより柱のせん断破壊を防止し、壁全体のせん断耐力が上昇することを確認した。
- (3) シート端部を金物で固定し、或いは壁部のコンクリートを拘束し圧壊を防止することにより、耐震壁の変形性能は向上した。
- (4) シート補強により壁筋に作用する力を軽減

し、壁筋ひずみを小さくすることができた。

- (5) 壁部のシートひずみは 1500 μ 程度であった。
- (6) 本研究で得られた実験結果の範囲内であるが、シートに生じた実応力に基づきシート有効係数を 1/10 とすることで、式(4)、式(5)を用いシート補強した耐震壁の耐力を 11～16% 安全側で算定することができた。

謝辞：試験体製作に御協力頂いた、東邦レーヨン(株)、三菱化学(株)には記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 松崎育弘・福山洋ほか: 連続繊維シートによる耐震壁の補強に関する実験的研究(その1)～(その3), 日本建築学会大会学術講演梗概集 構造IV, pp.595-600, 1997. 9
- 2) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート終局強度設計に関する資料, 1991年
- 3) 日本建築防災協会: 既存鉄筋コンクリート建造物の耐震診断基準同解説, 1990年
- 4) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート建造物の終局強度型耐震設計指針・同解説, 1990年