

論文 ガラス繊維を用いて補強した RC 柱の耐震性能

黒河勝之^{*1}・菅野俊介^{*2}・荒木秀夫^{*3}・椋山健二^{*4}

要旨:鉄筋コンクリート柱のせん断破壊を防止し, 靱性能を増大させる補強方法として FRP (繊維補強プラスチック) がある。現在炭素繊維, アラミド繊維に関する研究は多くされているが, ガラス繊維に関する研究は少ない。そこで本研究ではガラス繊維を用いて補強した鉄筋コンクリート柱のせん断加力実験を行い, その有用性について検討した。さらに既往の炭素繊維, アラミド繊維の評価式に対する適用性についても検討している。

キーワード: GFRP, ガラス繊維補強材, 耐震補強, 鉄筋コンクリート部材, 靱性能

1. はじめに

鉄筋コンクリート柱のせん断破壊を防止し, 靱性能を増大させる補強方法として FRP (繊維補強プラスチック) ある。FRP に用いる繊維には炭素繊維, アラミド繊維, ガラス繊維などがあるが, これらのうち炭素繊維やアラミド繊維を用いた FRP による耐震補強についてはこれまで多くの研究がなされ, すでに実用化されている。一方, ガラス繊維についての研究例は日本においては少ない。そこで本研究では以下の2点を研究目的として, ガラス繊維補強材 (以下 GFRP=Glass Fiber Reinforced Plastic) で巻立て補強した鉄筋コンクリート柱の静的載荷実験を行った。

まず、(財)日本建築防災協会の評定を得た「ガラス繊維シートを用いた既存 RC 柱の耐震補強工法設計・施工マニュアル」¹⁾ ではその適用範囲は軸力比が 0.4 までとなっており, 高軸力を受ける柱に関するデータが少ない。そこで軸力をパラメーターとして試験体を作成し, その影響について検討した。次に, 炭素繊維やアラミド繊維を含む連続繊維補強の評価法²⁾ のガラス繊維に対する適用性を検討した。

2. 実験概要

2.1 材料特性

(1) GFRP

本研究で用いた GFRP は, 主補強方向の縦系にガラス繊維, 横系にガラス繊維とケブラー繊維を使って織られた複合繊維織物と含浸樹脂から構成されている。GFRP の主補強方向の 1 層に含まれるガラス繊維の厚さは 0.339mm であり, 繊維目付け量は 900g/m² 以上である。また含浸樹脂にはビスフェノール A 型エポキシ樹脂を主成分とする主剤と, 変性脂肪族ポリアミンを主成分とする硬化剤を, 3:1 (重量比) で配合したエポキシ系含浸接着樹脂を用いている。文献³⁾ に示された GFRP の設計用材料強度 σ_u , およびヤング係数 E_G を表-1 に示す。

表-1 GFRP の力学的特性

設計用材料強度 σ_u (N/mm ²)	1370
ヤング係数 E_G (kN/mm ²)	83.3

(2) 鉄筋

試験体柱部分の鉄筋には D10 と 4φ を用いた。引張試験から得られた降伏強度 σ_y , および最大強度 σ_U を表-2 にまとめる。

*1 広島大学大学院 工学研究科社会環境システム専攻 (正会員)
 *2 広島大学教授 工学研究科社会環境システム専攻 工博 (正会員)
 *3 広島大学助教授 工学研究科社会環境システム専攻 工博 (正会員)
 *4 広島大学助手 工学研究科社会環境システム専攻 博(工) (正会員)

表-2 鉄筋の力学的特性

種類	降伏強度 σ_Y (N/mm ²)	最大強度 σ_U (N/mm ²)
4φ	346.2	532.5
D10	399.1	545.2

(3) コンクリート

試験体に使用したコンクリートの設計基準強度は全て共通で $F_c=18\text{N/mm}^2$ としている。試験体と同時に作成したコンクリートシリンダの実験実施日における圧縮強度 σ_B , 引張強度 σ_t , およびヤング係数 E_c を表-3 に示す。

表-3 コンクリートの力学的特性

名称	圧縮強度 σ_B (N/mm ²)	引張強度 σ_t (N/mm ²)	ヤング係数 E_c (N/mm ²)
NR2	20.9	2.43	2.05×10^4
GF0	18.4	2.53	1.80×10^4
GF2	21.4	2.47	1.79×10^4
GF4	19.2	2.66	2.11×10^4
GF5	17.6	2.10	1.77×10^4
GF6	26.0	3.08	2.19×10^4

2.2 試験体

補強対象とする試験体はせん断破壊先行型の柱とした。試験体は上下にスタブを有し、柱部分は断面 $b \times D = 200 \times 200\text{mm}$ (隅角部は $R=15\text{mm}$ で面取り), 内法スパン $h=400\text{mm}$ とし, せん断スパン比 $M/Qd=1$ とした。試験体作成時のコンクリートの打設は鋼製型枠を用い, 横打ちとした。試験体の形状を図-1 に示す。

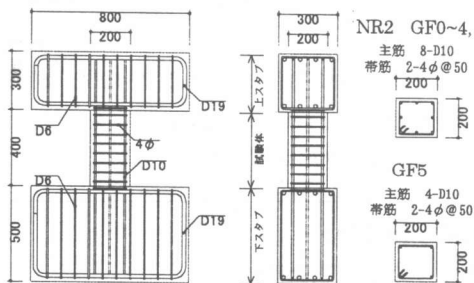


図-1 試験体形状および配筋

各試験体の, GFRP 巻数の算定は文献¹⁾に基づき, まず塑性率の関数として表現される靱性指標 F 値³⁾を設定し, 所定の曲げ変形に達した時の最大圧縮ひずみを求め, (1)式⁴⁾に示す Priestley らの提案するヒンジゾーンの軸圧縮ひずみと巻付け補強量との関係から必要体積比を求め, それによって決定される曲げ変形性能向上のための補強量と, 文献⁵⁾に準じて既存 RC 柱のせん断補強量に GFRP によるせん断補強量を累加する式(2)を用いてせん断強度確保のための補強量を求め, それらの最大値を補強量として用いた。本論文ではせん断破壊型柱を確実に曲げ破壊先行型にするために F 値を通常用いている上限に近い3に設定している。

$$\epsilon_{cm} = 0.004 + 1.25 \frac{\rho_s f_{yj} \cdot \epsilon_{yj}}{f'_{cc}} \quad (1)$$

$$\sum P_w \sigma_{wy} = r P_w \cdot r \sigma_{wy} + \alpha \cdot G P_w \cdot G \sigma_u \quad (2)$$

f'_{cc} : 拘束されたコンクリートの圧縮強度(=1.1 σ_B),
 f_{yj} : GFRP の設計強度(=1370Mpa), ρ_s : 必要体積比
 ϵ_{yj} : GFRP の応力度が f_{yj} の時のひずみ(=0.0165)

$r P_w$: せん断補強筋比, $r \sigma_{wy}$: せん断補強筋降伏強度,
 α : GFRP の有効係数(=0.2), $G P_w$: GFRP の補強筋比,
 $G \sigma_u$: GFRP の設計用材料強度

なおせん断強度に対する検討は, 曲げ降伏発生の前後に分けて2通り検討している。計算値から得られた巻数の小数点以下は切り上げた。また, GF5, 6については同様の設計方法により巻数を算定し, 破壊状況を確認するために, それよりも少ない補強量とした。GF5については終局曲げ耐力の違いを調べるために主筋本数を減らしている。また, 各試験体とも巻付け後5日以上経ってから実験を行った。各試験体の GFRP 補強量の算定結果と実際の巻数を表-4 に示す。

表-4 GFRP 補強量の算定

名称	軸力比	設計法①	設計法②	設計法③	GFRP巻数
NR2	0.2	-	-	-	0
GF0	0	2(1.05)	1(0.02)	1(0.30)	2
GF2	0.2	2(1.74)	4(3.18)	-	4
GF4	0.4	3(2.17)	-	-	3
GF5	0.5	3(2.34)	3(2.60)	-	2
GF6	0.6	3(2.42)	-	-	1

設計法①: 曲げ変形性能確保の為の補強設計法, ②: せん断強度確保の為の補強設計法, ③: 曲げ降伏後の変形性能確保の為の補強, -は「補強の必要なし」を示す, ()内の数字は, GFRP巻数の算定値

2.3 加力方法

試験体には、それぞれの軸力比に応じた一定軸力および水平方向に正負漸増繰り返し加力を作用させた。制御は水平変位を柱内法スパンで除した変形角 R で行い、 $1/800$, $1/400$, $1/200$, $1/100$, $1/50$, $1/25$ をそれぞれ2サイクルずつ繰り返し、その後耐力低下もしくは装置の限界点までの押し抜きを行っている。載荷装置図を図-2に示す。

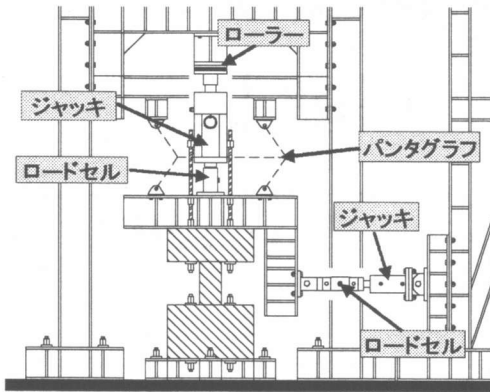


図-2 載荷装置

2.4 計測方法

荷重は図-2に示したように鉛直方向と水平方向の各ジャッキに設置したロードセルにより測定した。試験体各部の変形を変位計により測定し、主筋および帯筋の約60点にひずみゲージを貼付し、GFRPシート表面にも検長長さ60mmのポリエステルゲージを貼付し、それぞれのひずみの進展状況を計測している。

3. 実験結果と検討

3.1 履歴曲線

図-3に各試験体の水平荷重-水平変位履歴曲線を示す。ガラス繊維補強を行っていないNR2は変形角 $1/400$ 付近でせん断ひび割れが発生し、耐力低下を起こしせん断破壊した。GF2, GF4では変形が進むにつれて、圧縮部分のコンクリートの圧壊によりGFRPシートが膨らみ、亀裂が生じたが、破断には到らずジャッキストロークの限界

まで耐力を維持し続けた。高軸力を与えたGF5では、変形角 $1/50$ で試験体圧縮部分とコーナー一部でGFRPの膨らみと亀裂が確認されたが、載荷装置の限界までGFRPシートは破断せず顕著な耐力低下も見られなかった。GF6では変形角 $1/25$ 載荷途中に、GFRPシートが継ぎ手部分とコーナー一部から破断し耐力が低下した。

各試験体の降伏耐力 Q_y , 最大耐力 Q_E , 降伏変形角 R_y , 終局変形角 R_u を表-5に示す。なお降伏点とは主筋が引張もしくは圧縮で降伏した点であり、終局変形角 R_u に関しては、ジャッキ能力の限界により破断に到らなかった試験体では、実験終了時を終局変形角とした。

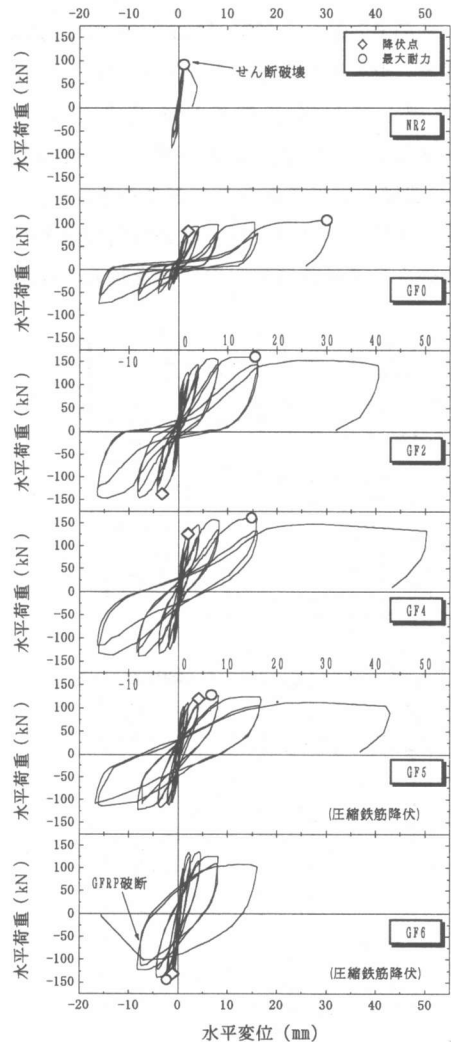


図-3 荷重-水平変位履歴曲線

表-5 実験結果一覧

名称	Qy (kN)	QE (kN)	Ry (×10 ⁻² rad.)	Ru (×10 ⁻² rad.)
NR2	-	91.1	-	0.31
GF0	83.6	107.7	0.50	7.54
GF2	137.3	159.4	0.80	10.12
GF4	124.5	160.6	0.50	12.61
GF5	131.7	144.2	0.26	10.52
GF6	119.4	127.3	1.05	3.80

Qy: 降伏耐力, QE: 最大耐力(実験値),
Ry: 降伏変形角, Ru: 終局変形角

3.2 GFRP のひずみ分布性状

図-4 に試験体危険断面の柱脚部と中心部でのガラス繊維シートのひずみ分布性状を示す。ガラス繊維シートの設計最大ひずみは 1.65% であり、その 0.2 倍の 0.33% (3,300 μ) ひずみ時の強度を、せん断補強筋としての効果として設計に考慮している。巻き数の足りている GF2, GF4 は最終時に設計最大ひずみ付近に達し、0.2 倍の設定が妥当であることがわかる。一方、巻き数の足りていない GF5, GF6 は必要補強量の不足分を補うために最大設計ひずみを越えて荷重

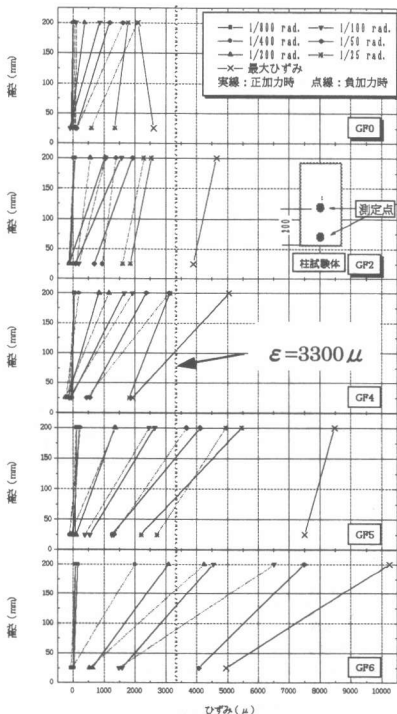


図-4 GFRP ひずみ分布図

を負担していることが考えられる。

3.3 変形性能

曲げ降伏後の変形性能の検証を行うために試験体の GFRP 巻数から逆算した、靱性指標 F 値と、塑性率 cal μ の計算値と、実験から得られた各試験体の F 値および塑性率 exp μ の比較を図-5, 6 に示す。また靱性指標 F 値は (3) 式³⁾で求めた。同図には前田ら⁶⁾の実験研究から得られたデータも参考のためにプロットしている。図からいずれの試験体においても、実験値は計算値を上回っており、十分な変形性能を有していることが確認できる。

$$F = \frac{\sqrt{2\mu - 1}}{0.75(1 + 0.05\mu)} \quad (3)$$

μ : 塑性率

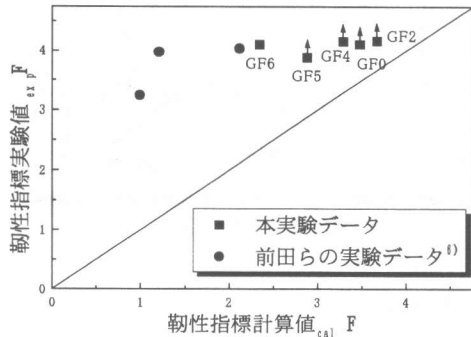


図-5 靱性指標 F 値の比較

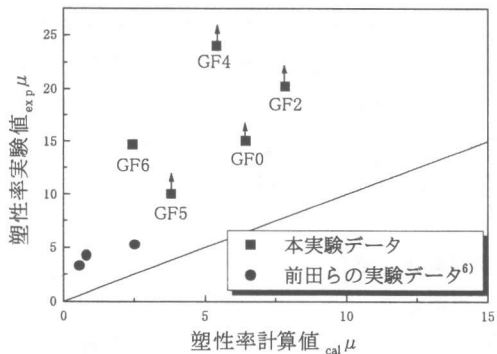


図-6 塑性率 μ の比較

3.4 軸方向変形

それぞれの水平変形角における鉛直変形の分布を比較し図-7 に示す。圧縮側を正、引張側を負とする。低軸力の試験体は、剛体変形をしていた

ので脚部が盛り上がり、また GF6 など高軸力の試験体では、変形性能は保持していたものの、高軸力により柱が圧縮され部材変形角 1/50 程度で、鉛直方向に約 1.0% 程度試験体が縮んでいた。

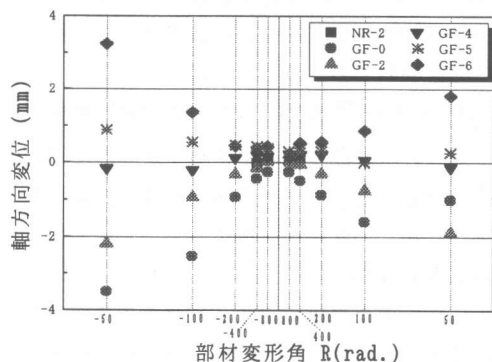


図-7 軸方向変位図

4. 既往の評価法に対する適用性

既往の炭素繊維、アラミド繊維を含む耐震補強

の評価はせん断余裕度に基づいて行われている。この評価法のガラス繊維への適用性を検討するために、文献²⁾に示されるせん断余裕度と限界変形による評価図に本実験による GFRP のデータを重ねることを試みた。終局せん断耐力は荒川式(荒川 min)、学会指針式(AIJ)より求め、曲げ終局耐力はストレスブロック法を用いた ACI の略算式により算出した。それぞれの結果ならびにせん断余裕度の一覧を表-6 に示す。

なお総せん断補強量 $\Sigma P_w \sigma_{wy}$ は (2) 式を用いて算出し、シートのひずみ量の影響を見るために、有効係数 α に関して GFRP シートの繊維補強量は設計最大ひずみ (1.65%) に対して、0.2 とした場合 ($\alpha=0.2$) と、各試験体のひずみの最大値から算定した場合 (α =実験値) の 2 つの値を用いた。

終局限界変形と荒川式による評価図を図-8 に、学会指針式による評価図を図-9 に示す。

表-6 水平耐力およびせん断余裕度一覧

名称	せん断耐力 Q_{su} (kN)				曲げ耐力 Q_{mu} (kN)	せん断余裕度 Q_{su}/Q_{mu}			
	$\alpha=0.2$		α : 実験値			$\alpha=0.2$		α : 実験値	
	荒川 min	AIJ	荒川 min	AIJ		荒川 min	AIJ	荒川 min	AIJ
NR2	90.4	93.5	91.9	92.2	142.8	0.63	0.65	0.64	0.65
GF0	87.2	153.3	91.5	144.6	92.7	0.94	1.65	0.99	1.56
GF2	120.5	194.7	135.1	202.4	144.5	0.83	1.35	0.93	1.40
GF4	121.4	172.3	137.3	184.0	151.1	0.80	1.14	0.91	1.22
GF5	107.1	149.6	139.8	167.2	117.8	0.91	1.27	1.19	1.42
GF6	136.7	142.2	159.2	195.1	146.2	0.93	0.97	1.09	1.33

終局せん断耐力

荒川 min 式:

$$Q_{su} = \left\{ \frac{0.053 P_t^{0.23} (F_c + 17.6)}{M/(Qd) + 0.12} + 0.845 \sqrt{\Sigma P_w \sigma_{wy}} + 0.1 \sigma_0 \right\} bj$$

AIJ 学会指針式:

$$Q_{su} = \Sigma P_w \sigma_{wy} bj \cot \phi + \tan \theta (1 - \beta) v_c \sigma_b b D / 2 \leq b j v_c \sigma_b / 2$$

終局曲げ耐力

ACI ストレスブロック法:

$$Q_{mu} = 2M_u / h$$

(圧縮鉄筋が弾性的の場合)

$$M_u = 0.85 b \cdot x_n \cdot f_c (D/2 - x_n/2) + a_{s1} E_s \epsilon_s (x_n - d_{s1}) / x_n (D/2 - d_{s1}) + a_{s2} \sigma_y (d_{s2} - D/2) + a_{s3} \sigma_y (d_{s3} - D/2)$$

(圧縮鉄筋が圧縮降伏した場合)

$$M_u = 0.85 b \cdot x_n \cdot f_c (D/2 - x_n/2) + a_{s1} \sigma_y (D/2 - d_{s1}) + a_{s2} \sigma_y (d_{s2} - D/2) + a_{s3} \sigma_y (d_{s3} - D/2)$$

P_t : 主筋比(%), a : 引張鉄筋断面積, σ_0 : 軸応力度, b, D, j : 断面の幅, せい, 応力中心間距離, F_c : コンクリート強度, M/Qd : シアスパン比, v_c : コンクリート強度の有効係数, $\cot \phi$: トラス作用のコンクリート圧縮ストラットの傾き, $\tan \theta$: アーチ作用のコンクリート圧縮ストラットの傾き, x_n : 中立軸位置, E_s : 主筋のヤング係数, σ_y : 主筋の降伏点強度, d_{s1}, d_{s2}, d_{s3} : 圧縮筋, 中央筋, 引張筋の圧縮縁からの距離, a_{s1}, a_{s2}, a_{s3} : 圧縮筋, 中央筋, 引張筋の断面積

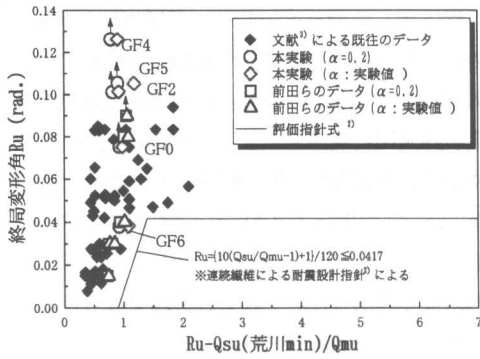


図-8 せん断余裕度(荒川min)-終局変形角関係

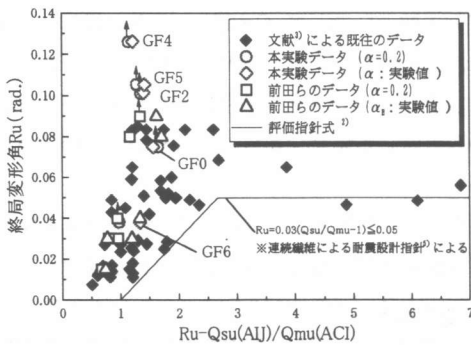


図-9 せん断余裕度(AIJ)-終局変形角関係

同図には連続繊維による改修設計指針の評価式、ならびに文献³⁾のGFRPの実験データも示す。

その結果、どちらの図においてもGFRPのデータは評価指針式に対して安全側に分布していることが確認できる。荒川式によると既往のデータのせん断余裕度は0.0から2.0の間に集まっており、値が大きくなるにつれて、終局変形角が増加するという傾向がある。GFRPシートにより繊維補強した柱ではせん断余裕度が1.0付近で、0.04~0.13rad.の間に分布していた。また、計算値と実験値のひずみの違いによる分布では、有意な差は見られなかったが、有効係数 α の影響については今後さらに検討が必要であろう。

5. まとめ

ガラス繊維を用いて既往の設計法に従って補強したRC柱のせん断加力実験を行い、軸力の影響と既往の繊維補強材の評価法に対するGFRPの

適用性について検討した。その結果以下のことが分かった。

- 1) 既往の工法に準じて巻立て補強した結果、適用範囲外である、軸力比0.6の試験体ではGFRPシートが破断したが、補強算定結果よりも少ない補強量で変形角1/50まで耐力を保持したことを確認した。
- 2) 既往の補強評価法に対するGFRPの適用性について、設計値と実験値に基づきGFRPの有効係数 α を考慮した2通りの方法により比較を行なったが、いずれの試験体においても有意な差は見られなかった。

よって、ガラス繊維による補強効果を詳細に検討するためにも、GFRPシートの有効係数をいかに評価するかという点については今後検討が必要であろう。

謝辞：本実験では昭和高分子(株)の協力を得た。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献：

- 1) TYFO工法研究会：TYFO工法設計・施工マニュアル GFRPによる既存鉄筋コンクリート柱の耐震補強工法，1999
- 2) 日本コンクリート工学協会：耐震補強の評価に関する研究委員会 報告書・論文集，2000，6
- 3) 日本建築防災協会：改訂版 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準 同解説，1989，12
- 4) M.J.N.Priestley, F.Scible, G.M.Calvi 著，島一彦訳「SEISMIC DESIGN RETROFIT OF BRIDGES」技報堂出版 1998，4
- 5) 日本建築学会「鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型設計指針・同解説」1999，8
- 6) 前田匡樹他：ガラス繊維を用いた既存RC造柱部材の耐震補強法に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集 Vol.20，No.3，pp1213~1218，1998
- 7) 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」1990，11