

論文 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

小泉 洋^{*1}・壁谷澤 寿海^{*2}・田才 晃^{*3}・五十嵐 俊一^{*4}

要旨:本研究では、大地震時にせん断補強筋量の少ない古い鉄筋コンクリート造建物の柱が大地震時に鉛直荷重支持能力を維持しうることを第一義的な目標として、新しく開発された簡易で経済的な合成繊維シート補強手法の有効性を検証した静的加力実験を行った。実験よりシート補強効果による靱性能の向上や耐力上昇などが確認され、ポリエステル製繊維シートによる補強の有効性が認められた。特に正方形断面では顕著な補強効果を発揮することが確認された。

キーワード:鉛直荷重保持, 合成繊維シート, 簡易補強, 靱性能, 断面形状

1. はじめに

建物の大地震に対する第一義的な基本性能は安全性すなわち人命保護であり、このために必要な部材の性能は地震後の柱の鉛直荷重支持能力である。古い鉄筋コンクリート(RC)造建物では、柱のせん断補強筋量が少なく、鉛直荷重を支持できなくなってパンケーキ状に崩壊する建物被害が世界中の地震被害で報告されている。これらの建物を対象として最小限軸力保持能力を確保するための経済的で簡易な補強方法の開発研究は極めて有意義であると考えられる。そこで、本研究ではポリエステル製の合成繊維シートを用いてRC造柱を補強し、建物の崩壊を防止する効果を検証する静的加力実験を行った。本報では、実験結果を報告するとともに、その有効性について検討した。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

試験体は逆対称曲げの繰返し载荷を行った柱試験体8体である。このほか、プリズム試験体により一軸中心圧縮実験も実施している。その詳細は別途報告するが、柱試験体と相似の断面形状(長方形7.5×21cm, 正方形15×15cm, 円形15cmφ 高さは全て20cm)のプリズムで、試験体と同じ

シート補強比率の場合を含んで、主に補強量をパラメータとしてコンクリートシリンダーと同様の圧縮試験を実施し、ここでも一部の結果を参照している。柱試験体一覧を表-1に、試験体形状と配筋詳細を図-1に示す。柱試験体は古い建物を想定して計画し、断面形状、シート補強の有無、補強方法、加力方法をパラメータとした。断面形状は、トルコ国での古い建物の慣用的な柱を想定した長方形のAタイプ(420×150mm, H=1260mm)、日本の1970年以前の設計を想定した正方形のBタイプ(300×300mm, H=900mm)の2種類とし、補強前の断面配筋はAタイプ5体、Bタイプ3体それぞれ同一である。シアスパン比はいずれも1.5となる。補強方法すなわちポリエステル製シートの巻きつけの形状は、図-2に示すように、試験体高さの幅でのり巻状(2層と4層重ね)にする方法と30cm幅のシートを試験体に斜めに包帯状に巻き付けていく方法(実質3層重ね)の2種類を試みた。いずれもポリエステル製繊維シートを人力で緊張しつつ巻きつけ、シート同士の一部をエポキシウレタン系接着剤で固着した。24時間程度の養生期間が必要であるが、施工は短時間で済み極めて容易である。大変形での破断防止と追従性確保のためシートと試験体はあえて接着させない点に

*1 東京大学大学院工学系研究科 建築学専攻 (正会員)

*2 東京大学地震研究所 教授 工博 (正会員)

*3 横浜国立大学 助教授 工博 (正会員)

*4 構造品質保証研究所株式会社, PhD (正会員)

表-1 試験体一覧

試験体	形状・寸法 (mm)	軸力N (kN)	pg (%)	pt (%)	pw (%)	補強		せん断前最大耐力		せん断後最大耐力		
						時期	量	方法	Q(kN)	δ (mm)	Q(kN)	δ (mm)
A-1	420*150 H=1260	334	0.9 (8-D10) (SD345)	0.49	5 ϕ @200 (SR295)	-	-	-	129.5	9.67	-	-
A-2						前	4層	のり巻き	132.0	11.5	101.3	184.2
A-3						後*	3層	包帯巻き	132.5	11.4	***	***
A-4						前	2層	のり巻き	132.6	11.9	***	***
A-5						後**	3層	包帯巻き	134.5	12.6	***	***
B-1	300*300 H=900	477	1.69 (12-D13) (SD345)	0.98	5 ϕ @160 (SR295)	-	-	-	175.3	3.30	-	-
B-2						前	4層	のり巻き	231.9	6.75	332.0	170.7
B-3						後*	3層	包帯巻き	215.5	5.97	259.5	138.5

pg: 主筋全断面積のコンクリート全断面積に対する比, pt: 引張鉄筋比, pw: せん断補強筋比, Q: 水平荷重,
 δ : 水平変位, *水平変位を原点に戻して補強, **残留水平変位で補強, ***顕著な向上なし

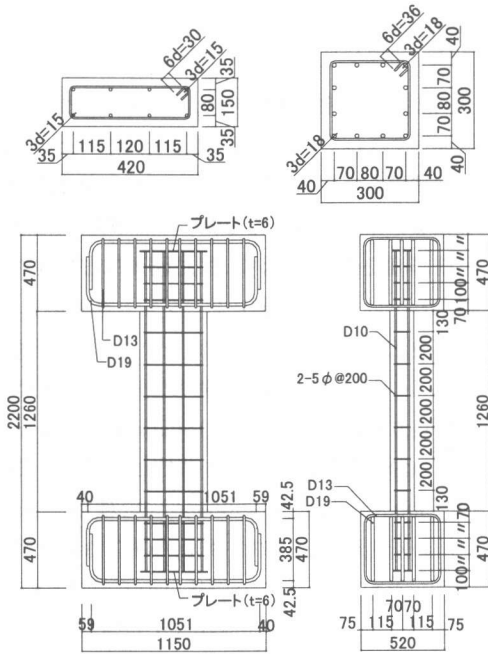


図-1 試験体の断面形状とAタイプ配筋詳細図

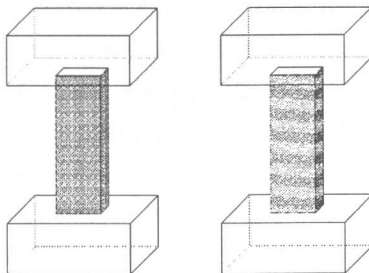


図-2 試験体の補強方法

従来の繊維補強とは異なる独自の特徴がある。補強試験体には、加力前に補強した試験体(A-2,4, B-2)とともに、被災後の応急補強での利用を想定して、無補強でせん断破壊させた後(被災度IV

表-2 コンクリートの性質

圧縮強度 σ_B (MPa)	圧縮強度時 歪 (μ)	ヤング係数 (MPa)
18.25	20.99	2.90 × 10 ⁴

ヤング係数は1/3 σ_B 時の割線剛性

表-3 使用鉄筋の機械的性質

鉄筋	鉄筋径	σ_y (MPa)	ϵ_y (μ)	E_s (MPa)
Aタイプ主筋	D10(SD345)	349.43	1930	1.81 × 10 ⁵
Bタイプ主筋	D13(SD345)	338.32	1818	1.87 × 10 ⁵
せん断補強筋	5 ϕ (SR295)	289.32	2811	1.03 × 10 ⁵

σ_y : 降伏応力度 ϵ_y : 降伏歪 E_s : ヤング係数

表-4 シートの材料特性

シート	厚さ (mm)	引張強度 (N/mm)	伸び率 (%)	重量 (g/m ²)
規格値	1.2	278	15	860
実験値	-	263	21	-

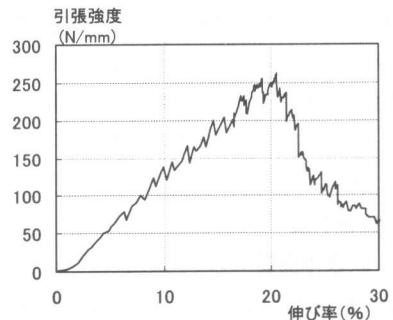


図-3 シートの引張試験結果

程度: せん断ひび割れが生じた直後で定軸力は保持している状態, その後の補強のために軸力は一旦解除する)で補強し, 再度加力した場合(A-3,5, B-3)も比較した。

2.2 使用材料

コンクリートは, 設計基準強度 $F_c=17.65$ MPa

(180kgf/cm²)の普通コンクリートを用いた。主筋(SD345)は、AタイプにD10, BタイプにD13を、せん断補強筋は共通に5φ(SR295)を用いた。コンクリートおよび鉄筋の材料試験結果を表-2, 3に示す。シートの規格値(引張強度278 N/mm)および引張試験結果を表-4および図-3に示す。

2.3 载荷及び測定方法

図-4に示す载荷試験装置で、試験体中央が反曲点になるような逆対称正負交番繰り返し载荷とした。軸力は全断面に対する軸力比($N/(BD\sigma_B)$), B,D:断面幅とせい, σ_B :表-2)がほぼ0.3となるような一定軸力(Aタイプ $N=333$ kN, Bタイプ $N=476$ kN)とし、部材角Rを $R=\pm 1/400$ (各1回), $\pm 2/400$ (以後、各2回), $\pm 3/400$, $\pm 4/400$, $\pm 5/400$, $\pm 6/400$, $\pm 8/400$, $\pm 16/400$, $\pm 24/400$, $\pm 32/400$, $\pm 48/400$, $\pm 64/400$ rad.と制御し、試験体が軸力を保持できなくなるまで、または鉛直ジャッキが限界に達するまで加力した。また、各サイクルのピーク時と除荷時に、高さ方向にAタイプ6ヶ所, Bタイプ5ヶ所(図-5)で、シートの上から巻尺で周長を計測した。

3. 実験結果及び考察

3.1 破壊状況

無補強試験体A-1とB-1の最終破壊状況を図-5に示す。A, B両タイプとも中央のせん断ひび割れ発生により軸力及び水平力を負担できなくなり最終破壊に至った。最終状態での中央のせん断ひび割れ幅はA-1が最大5.0mm, B-1が最大11.0mmに達した。以降軸変形が進行しても一定軸力を保持することはできなかった。補強試験体A-2とB-2の最終破壊状況を写真-1に示す。補強試験体では両試験体とも鉛直ジャッキが限界となる軸方向

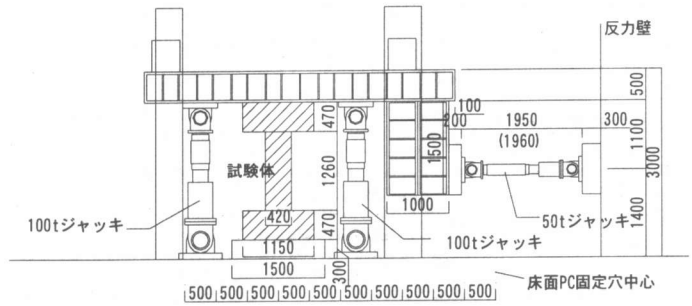


図-4 加力装置図(単位: mm)

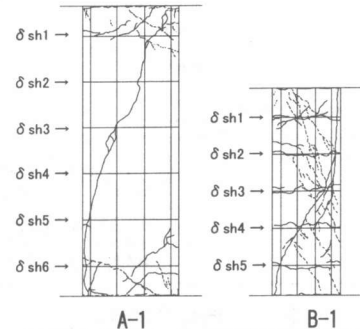
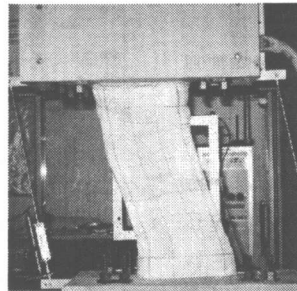
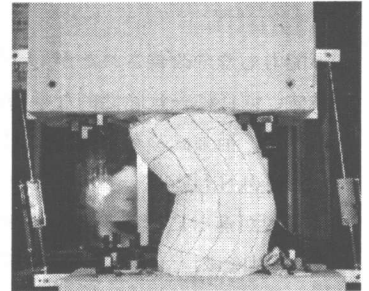


図-5 周長測定位置及び無補強試験体最終破壊状況



A-2



B-2

写真-1 補強試験体(A-2, B-2)の最終破壊状況

変形239mmまで進行し、A-2では軸方向変形が18%, B-2では27%まで補強効果を発現した。

3.2 せん断力-水平変位の関係

図-6に主な試験体のせん断力 Q -水平変位 δ の関係を示す。実験値はP- Δ 効果を考慮して図示している。Aタイプについて、A-1は $R=+4/400$ rad.(2回目)に達する直前、A-2は $R=+5/400$ rad.(1回目)で、Bタイプについて、B-1は $R=+4/400$ rad., B-2は $R=-3/400$ rad.に向かう途中のせん断ひび割れ発生に伴い水平耐力が急激に低下した。補強試験体ではせん断破壊がやや遅れて、せん断破壊時の耐力も

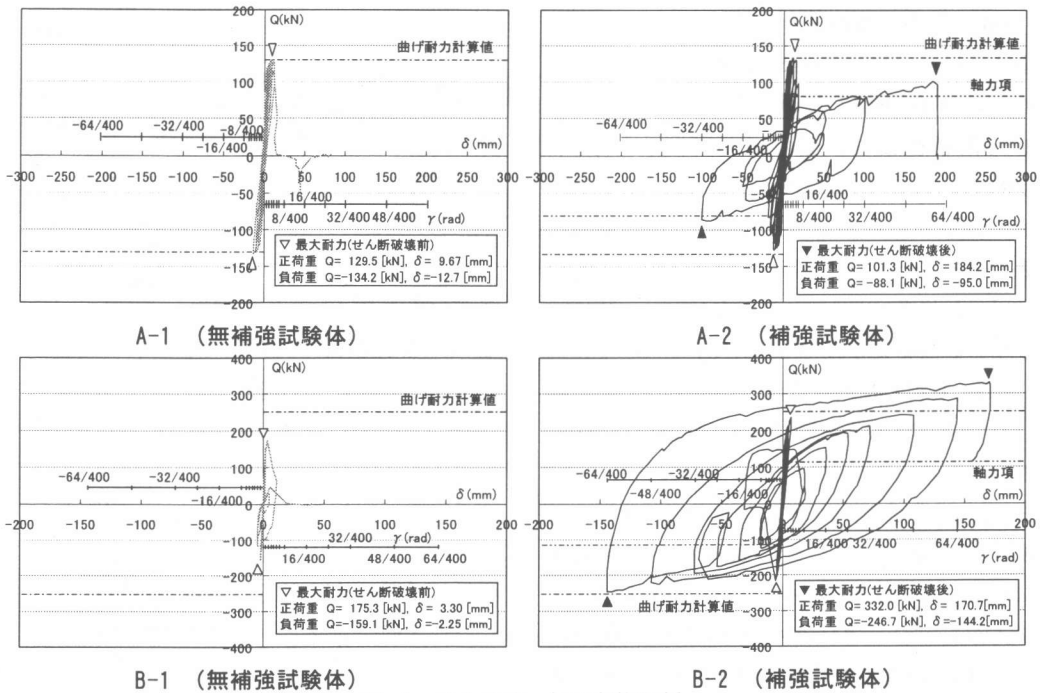


図-6 せん断力-水平変位関係

変形能力もやや改善されたが、大局的には無補強試験体と同様に一旦脆性的な挙動を示した。せん断破壊後、補強試験体はAタイプが50kN付近、Bタイプが80kN付近に一旦低下したが軸力は保持し、変形が進むに連れ徐々に水平耐力が回復した。それ以降は、徐々に軸方向変形が進行するものの、極めて大変形の多数回繰り返し加力に安定して耐えることが可能であり、最終的にはAタイプでは最大耐力は100kN、Bタイプでは300kNにまで達し、変形角約 $R=3/20\text{rad}$ の大変形まで、水平耐力および軸力比0.3の一定軸力を安定して保持することが可能であった。

3.3 軸力-軸方向変位関係

軸力-軸方向変位関係を図-7に示す。Aタイプに関しては、無補強試験体A-1も軸力を保持できなくなるまで加力したところ、軸方向変形が5%を超えた付近で一度軸力が上がり始めたが、軸耐力はせん断破壊前の一定軸力の50%程度までしか回復しなかった。それに対して補強試験体A-2は、せん断破壊による軸力低下も20%程度で、

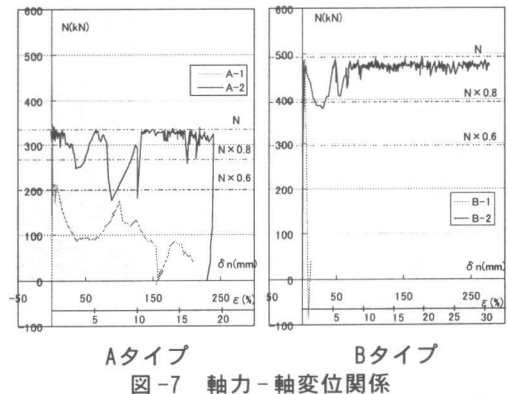


図-7 軸力-軸変位関係

その後、 $R=\pm 16/400\text{rad}$ に向かう途中(軸方向変形7%、10%程度)で、40%程度軸力が低下したが再び軸耐力を回復した。Bタイプに関しては、補強試験体B-2はせん断破壊によって20%程度軸力が低下した後、軸方向変形8%程度で軸力を回復し最後まで軸力を保持した。

3.4 シートの伸び率(周長方向)

図-8にA-2とB-2試験体の周長方向のシート伸び率と部材変形角の関係を示す(凡例の周長計測位置は図-5参照)。両タイプとも端部において

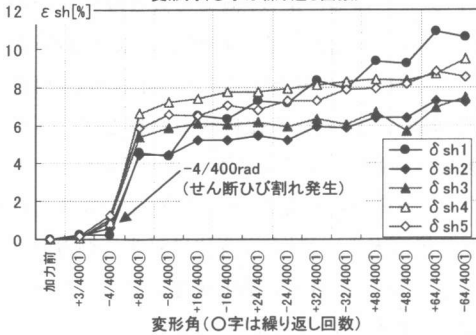
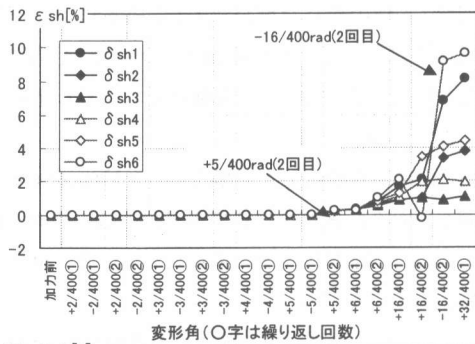


図-8 周長方向シート伸び率
(上段 A-2, 下段 B-2)

試験体が膨らむ傾向が見られ、特にAタイ°においてその傾向が顕著で、中央部付近ではシートの伸び率は2%以内に収まった。両試験体ともせん断ひび割れ発生後にシートの伸びが顕著になり、さらにA-2では端部の崩壊が進み、軸力が一時低下したR=-16/400rad.に向かうサイクルにおいて急激にシートの伸びが進行した。ただし、両試験体ともシートの伸び率は10%前後であり、本実験と同時に行ったシートの引張試験(図-3)では、伸び率21%において最大引張強度を計測しており、平均的にはまだシートには余裕があるが、上下のヒンジ領域で局部的に破壊が進行したと考えられる。

3.5 補強時期と補強量の影響

図-9にせん断破壊発生後にシート補強を行った試験体B-3のせん断耐力Q-水平変位δ関係を示す。B-2と同様にせん断破壊後補強することにより100kN程度に水平力を保持した後、軸方向変形の進展に伴い徐々に水平耐力が上昇する。またB-3は、包帯巻型の補強方法であり、補強量が

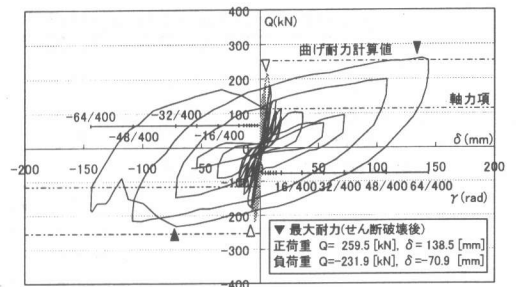


図-9 後補強試験体B-3のQ-δ関係

実質3層となっているが、4層補強のB-2と同様の補強効果を発揮して加力終了まで軸力を維持しており、十分な補強量であると推定される。

この他、試験体A-3は変形角R=16/400radまで、A-4は変形角R=8/400radまで軸力を保持して、安定的な履歴を示して一定の補強効果はあったものの、前述の試験体ほど圧倒的な補強効果を見せるには至らなかった。いずれも試験体上下端部での破壊(破断)が局部的に進行したこと、面外に大きく変形が生じたこと、等により不安定な挙動に至ったものであり、特に長方形断面の場合には、端部に関しては3~4層の十分な補強量が効果的であることを示唆している。試験体A-5に関しては、補強前の加力においてせん断破壊時における制御が十分でなく、かなり大きな損傷を生じさせた。その残留変形R=10/400rad.程度を残したまま補強を行って、再加力したため、補強後の加力では安定した挙動は得られなかった。

4. 水平耐力の検討

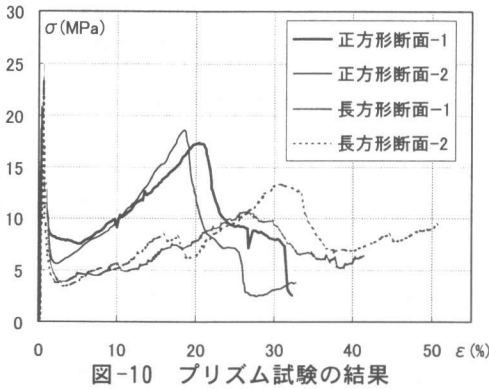
表-5に曲げ耐力およびせん断耐力(無補強)の設計式による計算値を示す。図-6および図-9の復元力特性にも曲げ耐力の計算値とその軸力負担項分を图示した。

A, B両タイ°ともせん断耐力の計算値は曲げ耐力の計算値よりも低いが、無補強の試験体は、Aタイ°では曲げ降伏以後に、Bタイ°は曲げ降伏以前にせん断破壊した。せん断耐力のレベルは両タイ°ともいずれの方法による計算値も上回っている。せん断破壊以後の復元力特性は別途行ったプリズム要素の一軸圧縮試験結果による応力歪関係

表-5 曲げ耐力とせん断耐力の計算値

	Aタイプ	Bタイプ
せん断(A法) ¹⁾	87.2	104
せん断(荒川式) ²⁾	117	173
曲げ ²⁾	133	252
曲げ(軸力項)	80.5	115

(単位:kN)



(図-10)を参照して以下のように解釈することができる。初期のせん断破壊後、コンクリートの有効圧縮強度が低下して水平強度は低下する。軸方向変形と周歪が増大することによってコンクリートの有効圧縮強度が回復する。軸方向変形が安定するとともにシートがせん断抵抗機構に対しても有効に作用する。今回の試験体は均等なせん断応力に対しては十分な補強量があるので、水平抵抗力は曲げできる。Aタイプでは主筋が座屈してあまり有効に働かないこと、面外変形や不均等な拘束効果により圧縮コンクリート断面が中央に広がることなどの効果により、結果としてほぼ軸力Nの寄与分 ($\Delta My=0.4ND, D:$ 断面せい)をやや上回る程度の水平抵抗力しか期待できない。それに対してBタイプでは主筋が太くてより有効に働くこと、コンクリートの拘束効果が高いこと、面外変形に対しても安定していることなどにより、概ね計算値に近い曲げ強度まで回復することが期待できる。計算値以上の耐力になる一因は軸方向変形によりシアスパンが小さくなるためである。

5. まとめ

既存鉄筋コンクリート造建物の柱をポリエステル製合成繊維シートによって耐震補強する方法を

開発し、柱の部材実験により、この手法は軸圧縮破壊を防止するための経済的かつ実用的な方法となりうることを示した。実験結果により以下のことが明らかになった。

- 1) シートで補強した試験体は、無補強試験体と同様にせん断破壊を生じて水平耐力は一時的に低下するが、軸方向変形の進行に伴い、水平耐力も軸耐力も回復する。
 - 2) シート補強により、極めて大きな靱性能の向上が見られた。水平方向に関しては長方形・正方形の両タイプの試験体ともに $R=64/400rad$ 付近まで、軸力比0.3という比較的高い軸力レベルを最後まで保持することが可能であった。
 - 3) 正方形の断面では、扁平な断面の場合より補強効果は大きい。軸方向変位に対する軸力の回復も早く、水平耐力も無補強状態の曲げ耐力以上の安定した水平耐力が期待できる。
 - 4) のり巻と包帯巻の補強方法の違いによる補強効果の差は少なく、いずれも有効である。また、被災程度、残留変形が大きくない場合、被災後の補強は被災前の補強と同等の効果を発揮する。
 - 5) 補強試験体が破壊に至る場合(A-4など)はヒンジ領域での局部的な破壊によるので、端部への補強が効果的であると推定され、端部のみを割増して補強する新しい補強詳細も考えられる。
- 既存柱のパラメータ、プリズム試験結果と目標性能などにもとづいて必要補強量を合理的に算定する方法、補強構造物の全体挙動に関する実験的・解析的検証などは、今後の検討課題である。

【謝辞】

実験および実験データの整理は、大杉泰子(東京大学大学院)、田辺大地、田村玲(横浜国立大学大学院)各氏と共同で実施した。

【参考文献】

- 1) 日本建築学会:鉄筋コンクリート構造物の終局強度型耐震設計指針・同解説日本建築学会, 1990
- 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, 1987