

論文 被災した鉄筋コンクリート柱の耐震補強に関する実験的研究

植松工^{*1}・益尾潔^{*2}・平井義行^{*3}・加藤暢彦^{*4}

要旨：本研究は、地震により大きな損傷を受けた鉄筋コンクリート構造物が補修補強により復旧可能であるかの指標を得るためのものである。本実験では、せん断補強筋量の少ない長柱および短柱に与えた損傷程度と補修後の鋼板補強、炭素繊維補強の効果との関係を調べ、その結果損傷程度が大きい場合でも、十分な補修補強を行うことでほぼその最大耐力は回復し靱性も向上することを確認し、補修後のせん断補強が既往の式を用いて安全側に評価ができることを確認した。また、主筋の座屈に対して鋼板補強によって主筋の変形拘束することで矯正や鉄筋の取り替えにかわる可能性を見いだせた。

キーワード：震災復旧、耐震補強、炭素繊維補強、鋼板補強、主筋座屈

1. はじめに

兵庫県南部地震は多くの構造物に著しい被害を与えた。特に建築構造物では昭和46年以前の帯筋の少ないRC構造物の被害が甚大であった。損傷を受けていない建物では鋼板および炭素繊維による柱のせん断補強の効果が確認されているが、今回の震災における想像を超えたような大きな損傷を受けた部材に対してはその効果の確認が必要である。このため、損傷の著しい部材に対して、コンクリートの打ち換えによる補修や建物の解体が採用されていると考えられるが、社会的財産としての損失を考慮すると、この損失は非常に大きい。

このような観点から本実験を行い、筆者らはすでにその報告¹⁾²⁾を行った。本論文では、現在示されている震災復旧の補修および補強工法³⁾⁴⁾と本実験の比較を行い新たな震災復旧についての提案を行うものである。

2. 実験計画

本実験では、昭和46年以前に設計された中低層RC建物を想定し、約1/2縮小モデルの柱部材試験体について、事前載荷により表-1³⁾に示す損傷度(Ⅲ~Ⅴ)を与えた上で、各工法による補修補強を施し、再度載荷を行い、効果の確認を行った。

表-1 損傷度分類の基準³⁾

損傷度	損傷内容
Ⅲ	比較的大きなひび割れが生じているが、コンクリートの剥落は極くわずかである。(ひび割れ幅1.0~2.0mm)
Ⅳ	大きなひび割れ(2mmを超える)が多数生じ、コンクリートの剥落も激しく鉄筋がかなり露出している。
Ⅴ	鉄筋が曲がり、内部コンクリートも崩れ落ち、一見して柱の高さ方向の変形が生じていることがわかるもの。鉄筋の破断が生じている場合もある。

*1ショーボンド建設(株)建築事業部技術部(正会員)

*2(財)日本建築総合試験所、工博(正会員)

*3(財)日本建築総合試験所

*4ショーボンド建設(株)エンジニアリング本部西日本技術センター

2. 1 原試験体

原試験体は表-2に示すように短柱と長柱の2種類である。両形式とも原試験体の断面寸法および配筋は同一であり、そのせん断補強筋は135°フック形状に加工した外周筋のみとした。コンクリートの配合、圧縮強度試験結果、鉄筋、鋼板、および炭素繊維の材料試験結果を表-3~5に示す。

2. 2 試験体

試験体の種類を表-6, 7および図-1に示す。なお、損傷を与えた試験体の載荷後の補修補強は残留変形を戻した上で行った。

2. 3 載荷方法

実験の載荷方法は事前載荷および再載荷ともに建研式加力装置を用いて、一定軸力(N=70.7tf、軸力比0.22)を保持させた状態で、水平力の正負繰り返し載荷を行った。なお、事前載荷では損傷度Vを与える試験体をまず載荷し、その観察結果等を参考にして損傷度IIIないしIVの載荷を行った。

表-2 原試験体の概要

	短柱 (CS)	長柱 (CM)
B × D	300mm × 300mm	
内法高さ	h=700mm a/D=1.17	h=1500mm a/D=2.50
主筋	16-D13(SD295A) P _R =2.25% σ _{sv} =3320kgf/cm ²	
帯筋	2-D6@120mm P _w =0.18% σ _{wv} =3990kgf/cm ²	

表-3 コンクリートの配合

水セメント比 W/C (%)	細骨材率 S/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
		セメント	水	細骨材	粗骨材	混和剤
60.0	52.0	300	180	640	880	2.80

注) セメント: 早強*ホトランドセメント 混和剤: 高性能AE減水剤

表-4 コンクリートの材料試験結果

圧縮強度 σ _{CB} kgf/cm ²	圧縮強度時の 歪み度 ε _{co} × 10 ⁻³	ヤング係数 E _c × 10 ⁵ kgf/cm ²	引張強度 σ _{ct} kgf/cm ²
374	2.14	3.05	34.6

材令26~77日の6回の試験の平均値

材令による圧縮強度の差 最大46kgf/cm²

表-5 材料試験結果

材 料 名	降伏点 σ _y (kgf/cm ²)	引張強度 σ _u (kgf/cm ²)	伸び (%)	弾性係数 E _{cf} (× 10 ⁵ kgf/cm ²)
帯筋 (SD295A)	3990	5360	34	—
主筋 (SD295A)	3320	4870	29	—
補強鋼板 (SS400)	2970	4620	36	—
炭素繊維 (高強度447)	—	38670	1.6	2.4

表-6 短柱の試験体の概要

試験体	事前載荷による損傷度	補修	補強方法
CS-V-PW	V	有	鋼板補強(PL-3.2)
CS-IV-PW	IV	有	鋼板補強(PL-3.2)
CS-IV-C3	IV	有	炭素繊維補強(3層)
CS-IV-C1	IV	有	炭素繊維補強(1層)
CS-IV-EL	IV	有	無
CS-0-PW	0	無	鋼板補強(PL-3.2)
CS-0-C3	0	無	炭素繊維補強(3層)

炭素繊維1層あたり換算厚さ t = 0.0165cm

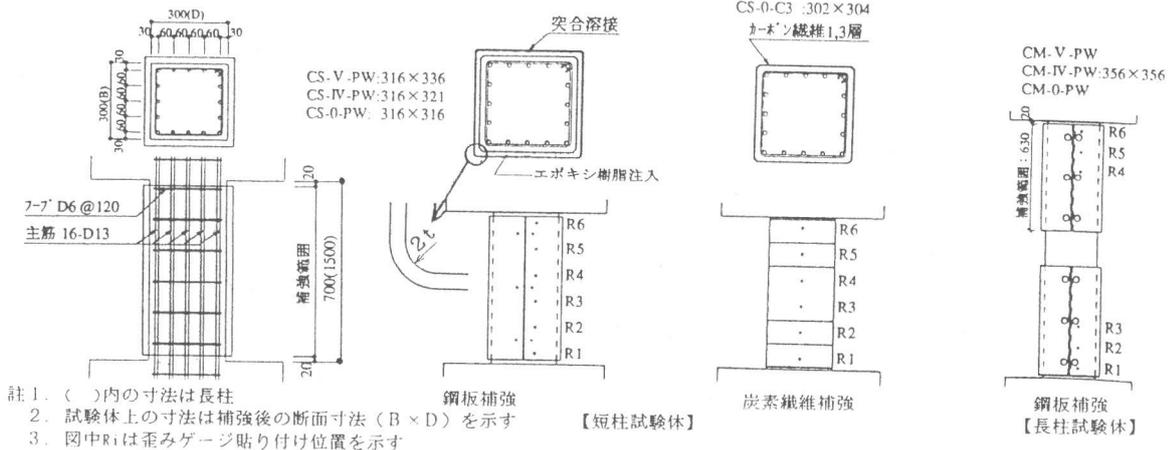


図-1 試験体の形状

表-7 長柱の試験体の概要

試験体	事前載荷による損傷度	補修	補強方法
CM-V-PW	V	有	鋼板補強(PL-3.2)
CM-IV-PW	IV	有	鋼板補強(PL-3.2)
CM-III-EL	III	有	無
CM-0-PW	0	無	鋼板補強(PL-3.2)

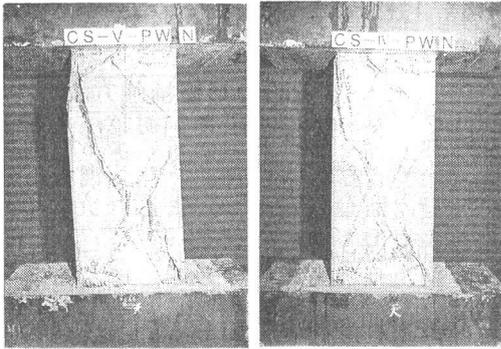
3. 実験結果および考察

3. 1 事前载荷による損傷

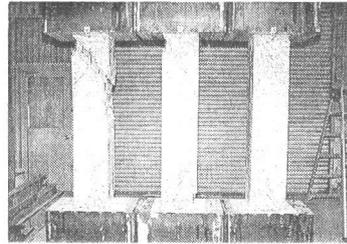
事前载荷によって与えた損傷状況を表-8および写真-1に示す。損傷度Vを与えた試験体では、主筋の座屈が認められたが、その状況を写真-2および図-2に示す。また、事前载荷時の履歴と損傷度の関係は図-3に示す概念図⁴⁾に概ね一致していた。

表-8 損傷状況

種別	損傷度	最大ひび割れ幅 (mm)		主筋状況	帯筋状況	軸力支持
		曲げ	せん断			
短柱	IV	0.2	6.0	—	降伏	不可
	V	0.4	15.0	座屈	破断	不可
長柱	III	2.5	0.3	降伏	—	可
	IV	3.5	5.0	降伏	降伏	不可
	V	4.0	10.0	座屈	破断	不可

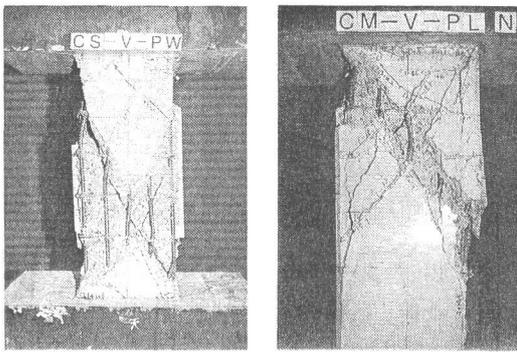


損傷度：V 損傷度：IV
(1) 短柱



左から損傷度V, IV, III
(2) 長柱

写真-1 事前载荷による損傷状況



(1) CS-V-PW (2) CM-V-PL/N
写真-2 主筋の座屈状況

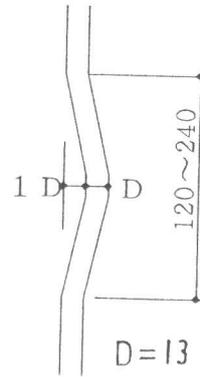
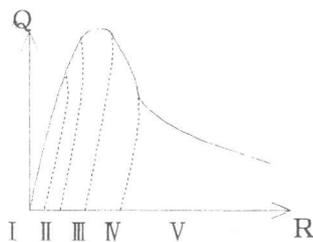
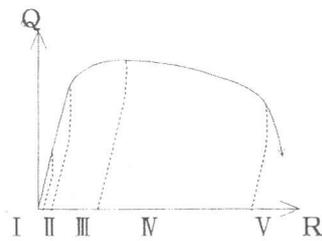


図-2 主筋の座屈状況



(1) せん断破壊型



(2) 曲げ破壊型

図-3 損傷度と载荷履歴の概念図

3. 2 補修および補強方法

事前载荷による損傷に対して施した補修は、かぶりコンクリートの浮き部およびコンクリートの脆弱部に対して行った無収縮モルタルの左官による断面復旧とひび割れに対して行ったエポキシ樹脂注入である。エポキシ樹脂は、構造補修であることから、ひび割れ幅に関わらずJIS A 6024に規定される低粘度形の建築補修用注入エポキシ樹脂を用いた。また注入方法は幅5mmを超える大きなひび割れに対してはコンプレッサーを用いて1箇所から注入し、他のひび割れに対してはひび割れの交点を優先して200mmピッチ以内に設けた低圧注入器具により注入を行った。今回行った補修補強と指針等³⁾の比較を表-9に示す。特に今回の実験では、震災における補修補強を出来るだけ速やかに行うことを目的としているため、座屈した主筋の取り替えや矯正を行わなかった。

表-9 補修補強の実験と指針等との比較

部 材 等	指針等の補修補強方法	本実験の補修補強方法
損傷度IV以上の部材	通常コンクリートを打直す方法	ひび割れへのエポキシ樹脂注入および無収縮モルタルの塗布による断面復旧
主筋の座屈	補修、補強に係わらず、適切な方法によって矯正	主筋自体は未処理、ただし鋼板によるせん断補強と補修によるコンクリートの復旧で拘束させる
帯筋の破断	追加または取り替え	鋼板補強を鉄筋の追加と考える
鋼板補強の面外補強	面外変形を拘束するための適切な補剛材を溶接	補剛材は用いない

3. 3 破壊性状

各試験体のQ-R関係(包絡線)を図-4、5に、破壊状況写真-3、4に示した。以下に破壊性状を述べる。

(短柱)

短柱の損傷度Vを与えた事前载荷時の供試体および補修だけの供試体は、ともに最大耐力に達した後斜張力ひび割れ幅が増大し、帯筋が破断すると同時に急激な耐力低下を示した。この時、主筋は载荷終了時まで降伏ひずみ度に達しなかった。それに対し、損傷度にかかわらず炭素繊維3層および鋼板PL-3.2による補強を行った供試体は主筋が曲げ降伏後最大耐力に達し、材端部の曲げひび割れが増大し、徐々に耐力低下した。また、炭素繊維1層による補強を行った供試体は主筋が曲げ降伏後最大耐力に達し、その後炭素繊維が破断し急激に耐力が低下した。

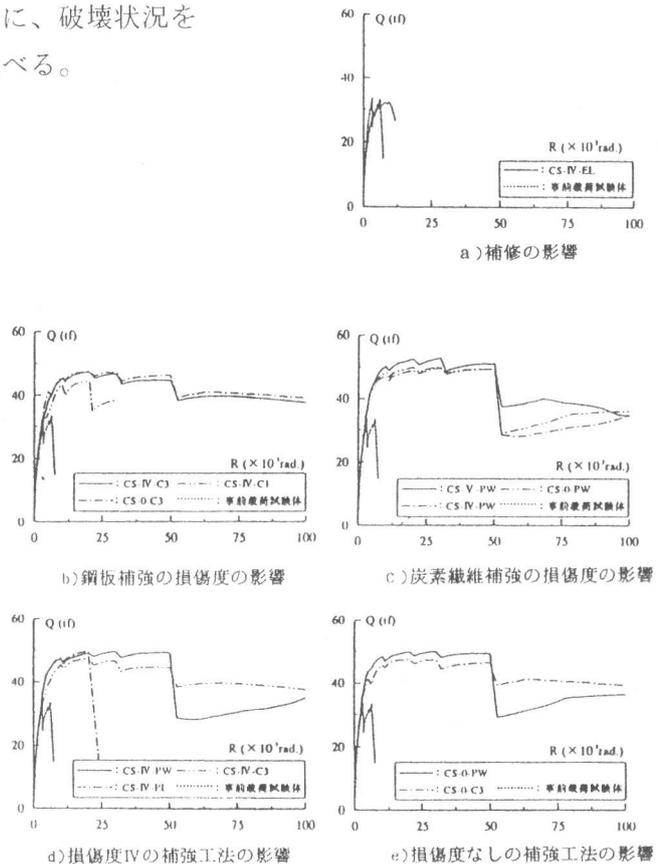


図-4 短柱Q-R関係(包絡線)

(長柱)

長柱の損傷度Vを与えた事前载荷時の供試体および無補強供試体の破壊性状は、ともに主筋が曲げ降伏後最大耐力に達し、その後材端の斜張力ひび割れ幅が増大し、帯筋が破断すると急激に耐力が低下した。それに対して、損傷度にかかわらず鋼板PL-3.2による補強を行った供試体は主筋が曲げ降伏後最大耐力に達し、材端部の曲げひび割れが増大し、徐々に耐力低下した。

以上の結果から、損傷の著しい柱に対しても、充分な補修後せん断補強を行うことで、靱性の向上を図れることが確認できた。

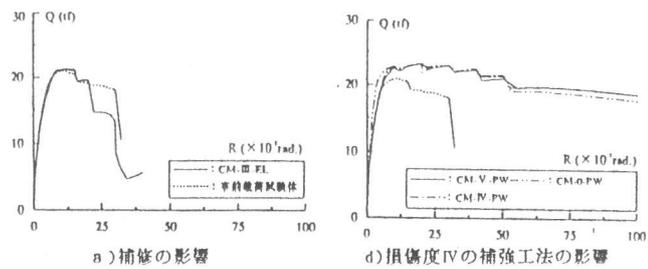


図-5 長柱Q-R関係(包絡線)

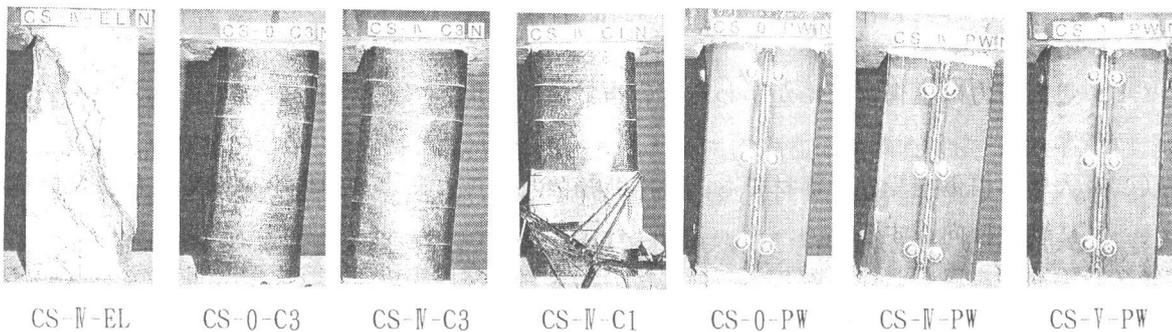


写真-3 短柱破壊状況

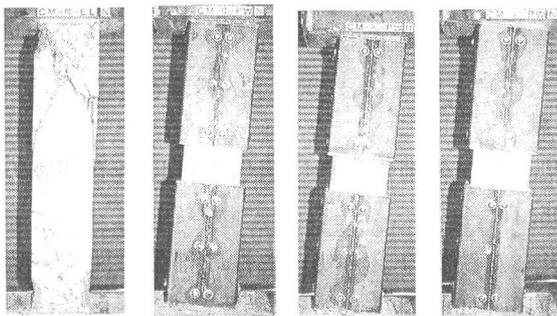


写真-4 長柱破壊状況

3.4 実験値と計算値の比較

今回の実験結果と指針⁵⁾による計算値の比較を、表-10に示す。既に材料試験結果からの計算値と実験値との比較を行ったが、今回表中に示すように鋼材および炭素繊維は設計強度用いて計算

を行った。なお、せん断耐力はせん断補強筋比に上限を設けずに、損傷を与え補強した試験体は既設帯筋を無視し、その他については既設帯筋を考慮した。また、補修補強後の断面の増加はないものとした。この結果より、指針⁵⁾に示された計算方法により、損傷の著しい柱に対して、コンクリートを打直さずに、充分な補修後のせん断補強が安全側に評価できることが確認できた。

表-10 実験結果と計算値の概要

試験体	計算値			実験値	
	$P_w \cdot \sigma_v$ kgf/cm ²	Q_{Mu} tf	Q_{Su} tf	Q_{fu} tf	
短	基準試験体	5.4	37.5	25.3	33.5
	CS-III-EL	5.4	37.5	25.3	32.3
	CS-O-PW	56.5	37.5	35.4	50.0
	CS-III-PW	51.1	37.5	34.7	52.7
	CS-V-PW	51.1	37.5	34.7	49.6
柱	CS-O-C3	71.4	37.5	37.3	47.4
	CS-III-C3	66.0	37.5	36.6	47.2
	CS-III-C1	22.0	37.5	29.9	44.3
長	基準試験体	5.4	17.5	17.6	20.9
	CM-III-EL	5.4	17.5	17.6	21.3
	CM-O-PW	56.5	17.5	27.7	23.1
柱	CM-III-PW	51.1	17.5	27.0	23.3
	CM-V-PW	51.1	17.5	27.0	23.2

鉄筋: $\sigma_v = 3000$ kgf/cm², コンクリート: $F_c = 370$ kgf/cm²
鋼板: $\sigma_v = 2400$ kgf/cm², 炭素繊維: $\sigma_v = 20000$ kgf/cm²

3 5 主筋座屈に対する検討

本実験では、損傷度Ⅴの試験体は短柱および長柱とも主筋が座屈していた。また、損傷度Ⅳの試験体の事前載荷後の断面寸法を計測した結果、柱頭部または柱脚部が載荷方向にはらみだしており、主筋の変形が考えられた。指針³⁾では、座屈した主筋の矯正や取り替えを行わなければ、著しく耐力低下する事が明記されている。しかし、本実験ではせん断補強の鋼板または炭素繊維と補修されたコンクリートにより主筋座屈部を拘束し、変形の進行を阻止する事が期待できたため、主筋の矯正や取り替えを施さなかった。実験結果より、この程度の座屈ならば最大耐力および変形性能は、損傷のないものに補強を行ったものと同等の効果があった。本実験で用いた方法が採用できるなら、今後復旧技術として多くの構造物に適用できると考えられるが、今後座屈の程度、補強量、およびコンクリート強度等を定量的に示す検討が必要であると考えられる。

4. まとめ

本実験の結果、損傷の著しい柱部材に対して、補修後の鋼板および炭素繊維を用いたせん断補強について以下の結論を得た。

- (1) 最大耐力は損傷程度にかかわらず、指針の式を用いて安全側に評価できることを確認した。
- (2) 大きな損傷を受けた部材でも、せん断補強することにより損傷を受けていない部材同様に靱性は向上する。
- (3) 主筋の座屈した柱に対して、補修後の鋼板および炭素繊維によるせん断補強を行えば、鉄筋の矯正や取り替えを行わくともよいものと考えられるが、これは、補修済みコンクリートや、せん断補強材が主筋の座屈部の変形を拘束することによるものと考えられるが、今後さらに検討が必要である。

参考文献

- 1) 平井義行、益尾潔、植松工：被災鉄筋コンクリート柱の補強実験（損傷程度による補強方法の影響）、G B R C、pp11～24、No. 80、1995. 10
- 2) 加藤暢彦、植松工、益尾潔：地震によって被災した鉄筋コンクリート柱の補強に関する実験的研究、構造工学論文集、Vol. 42A、pp901～910、1996. 3
- 3) (財)日本建築防災協会：震災建築物等の被災度判定基準および復旧技術指針（鉄筋コンクリート造編、1990
- 4) 建設省：建築物の震災復旧技術マニュアル（案）
- 5) (財)日本建築防災協会：既存鉄筋コンクリート造建物の耐震診断技術・改修設計指針同解説、1986