

論文 載荷履歴を受けた RC 柱の補修後性能に関する実験的研究

神谷 悠貴^{*1}・藤永 隆^{*2}・那良 幸太郎^{*3}・孫 玉平^{*4}

要旨: 本研究は、載荷履歴を受けた RC 柱の補修後性能を明らかにすることを目的としている。最初に健全な柱の繰り返し水平力載荷実験を行い(一次載荷)、載荷後に軽量ポリマーセメントモルタルによる断面成形、ひび割れへのエポキシ樹脂注入による補修を行った後、再度載荷実験を行った(二次載荷)。実験変数として、せん断スパン比と一次載荷時の変位振幅の大きさをとった。本実験により、エポキシ樹脂注入による効果が最大耐力に関して確認された。また、補修前の損傷レベルに関わらず初期剛性が低下し、最大耐力が上昇することが確認された。

キーワード: RC 柱, 曲げ破壊, ひび割れ, エポキシ樹脂注入, ポリマーセメントモルタル, せん断スパン比

1. はじめに

1995年1月に発生した兵庫県南部地震では多くの建物が被害を受けた¹⁾。その被害は倒壊から軽微なものまで様々であったが、復旧方法の多くは解体・新築によるものであった。これは補修・補強による耐震性能の回復に関する資料が少なく、性能の回復が定量的に評価できなかったためである。また、1995年12月に「建築物の耐震改修の促進に関する法律」が施行されており、それ以降、既存不適格建築物に対する耐震診断・耐震補強工事や、耐震補強に関する研究がなされているが、その多くは、既存不適格建築物を再現した健全な部材に対して、補強を施した試験体に基づく知見であり、載荷履歴(地震履歴)を受けた部材に関するものは少ない^{2)~9)}。

本研究では、補修による耐震性能の回復に関する基礎資料を得ることを目的として、せん断スパン比の異なる RC 柱に載荷履歴を与え、補修を施した後にどのような性能を示すか明らかにすることを目的としている。なお、様々な損傷状況における補修後性能を調べるために、損傷レベルを複数設定し、それぞれの変位振幅までの載荷(一次載荷)を行った。損傷状態に合わせた補修を行った後に、再度大変形域までの繰り返し載荷実験(二次載荷)を行い、その修復性能に関して検討を行った。

2. 実験概要

2.1 実験計画

一定軸力 N と繰り返し水平力 Q を受ける RC 柱の変形性能、補修後性能を調べるために、図-1 に示すような一端固定、他端自由の片持柱を想定し、曲げせん断実験を計画した。まず健全な部材を載荷し(一次載荷)、載荷後の破壊状況に合わせた補修を行った後、再度載荷実験を行った(二次載荷)。実験変数としてせん断スパン比を

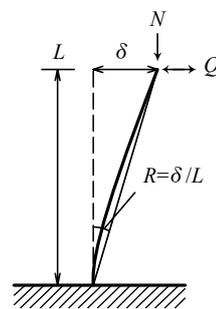


図-1 荷重条件

2種類 ($L/D = 3, 2$) 設定し、それぞれのせん断スパン比におい

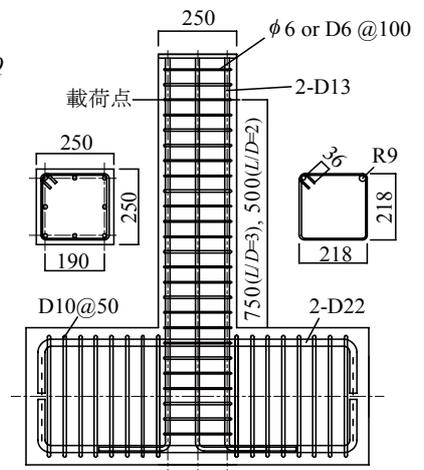


図-2 試験体形状および寸法

て一次載荷の損傷レベルを、1) 変形量小: 降伏荷重レベル, 2) 変形量中: 最大耐力レベル, 3) 変形量大: 最大耐力後降伏荷重まで低下レベル, の3段階に設定した。

導入する軸力は、コンクリート断面に関する軸力比 $n^{\prime}=0.3$ ($L/D=3$)、および $n^{\prime}=0.2$ ($L/D=2$) とし、一定に保持した後に以下の載荷プログラムにより水平力を載荷した。正載荷・負載荷を1サイクルとして、柱の部材角 R ($=\delta/L$, δ : 柱頭載荷点の水平変位, L : 材長=750mm ($L/D=3$), 500mm ($L/D=2$)) を 0.0025rad. を初期値として 0.0025rad. 刻みで 0.01rad. まで増加させ、それ以降は 0.005rad. 刻みで増加させた。各変位振幅で 2 サイクルの繰り返し載荷をしている。一次載荷の損傷レベルについては、主筋のひずみが降伏ひずみに達した時点を降伏荷重レベル、水平耐力が最大に達した時点を最大耐力レベルとした。補修後の二次載荷では、軸力が保持できなくなる状態まで変位振幅を増加させた。

*1 神戸大学大学院 工学研究科建築学専攻 大学院生 (正会員)

*2 神戸大学 都市安全研究センター 准教授 博士 (工学) (正会員)

*3 神戸大学大学院 工学研究科建築学専攻 大学院生

*4 神戸大学大学院 工学研究科建築学専攻 教授 工博 (正会員)

2.2 試験体

試験体一覧を表-1に、試験体の形状および寸法を図-2に示す。断面せい・幅が250mmのRC柱試験体で、試験体下部には試験体を載荷床版に固定するため、断面せい400mm、幅300mmのスタブを設けている。主筋はD13を最外縁の主筋間距離190mmで8本、帯筋はφ6 (L/D=3)、D6 (L/D=2)を50mm間隔で設置した。主筋は上部のエンドプレートに溶接されており、エンドプレートにはコンクリートの充填孔(φ=90mm)を設けている。

2.3 材料特性

鉄筋、コンクリートそれぞれの材料特性を調べるため、鉄筋の引張試験およびコンクリートシリンダの圧縮試験、割裂試験を行った。引張試験は、JIS2号試験片により主筋と帯筋それぞれ3片ずつ行った。表-2に鉄筋の引張試験結果を示す。帯筋のφ6およびD6では明確な降伏棚が観察されなかったため、0.2%オフセット法により算出した降伏点応力を示している。コンクリートの材料試験は、載荷時材齢のコンクリートシリンダを各試験体で圧縮試験、割裂試験それぞれ3体ずつ行った。表-1にコンクリートおよび断面補修に用いたポリマーセメントモルタルの圧縮試験、割裂試験の結果を示す。コン

クリートの設計基準強度は18N/mm²、最大粗骨材粒径は15mm、スランブは18cm(実測値18.6cm (L/D=3)、16.4cm (L/D=2))である。また、ひびわれ補修に用いたエポキシ樹脂のシリンダ(φ50mm)を作成し、圧縮試験を行った。エポキシ樹脂の圧縮強度は83.5N/mm² (L/D=3)、64.9N/mm² (L/D=2)であった。ヤング係数は3.1×10³N/mm² (L/D=3)、2.5×10³N/mm² (L/D=2)であり、コンクリートのヤング係数の1割程度の値であった。

2.4 実験方法

載荷装置を図-3に示す。リニアスライダを介した1000kN油圧ジャッキによって所定の軸力を載荷した後、500kN油圧ジャッキにより水平力を加えた。試験体上部にはかまぼこ型球座を設置し、軸力と水平力の載荷点(水平力載荷治具ピン位置)が一致するようにしている。変位計取付位置を図-4に示す。柱頭の水平変位δを変位計No.1で、試験体の軸方向変位を変位計No.2~4で測定した。また、スタブの変位と回転量を確認するため変位計No.5~7を設置した(ただしL/D=2の試験体ではNo.2の測定を行っていない)。変位計No.1~4は試験体スタブ、No.5~7は載荷床版を基準点としている。各部のひずみを測定するため、試験体にひずみゲージを貼付した。

表-1 試験体一覧

試験体名	せん断スパン比	最大変形量 (rad.)	補修方法	軸力比 $n' = N / (c \cdot N_0)$ *	コンクリートシリンダ試験結果			
					ヤング係数 E_c ($\times 10^3$ N/mm ²)	圧縮強度 F_c (N/mm ²)	割裂強度 F_t (N/mm ²)	
一次載荷	RC3-Y	3	0.0075	-	0.3	23.4	21.6	2.13
	RC3-M		0.015	-	0.3	23.0	21.4	1.93
	RC3-B		0.025	-	0.3	23.7	22.4	2.38
二次載荷	RC3-Y-R		0.05	樹脂注入	0.3	23.8	21.8	2.07
	RC3-M-R		0.05	樹脂注入	0.3	22.6	22.3	1.95
	RC3-B-R		0.04	樹脂注入 断面補修	0.3	23.1 11.4**	22.4 26.8**	2.23 2.83**
一次載荷	RC2-Y	2	0.0075	-	0.2	23.4	22.3	2.23
	RC2-M		0.015	-	0.2	22.4	21.7	1.91
	RC2-B		0.035	-	0.2	22.4	22.0	2.26
二次載荷	RC2-Y-R		0.055	樹脂注入	0.2	21.5	22.2	2.10
	RC2-M-R		0.06	樹脂注入	0.2	21.3	22.5	2.06
	RC2-B-R		0.06	樹脂注入 断面補修	0.2	22.2 8.9**	21.8 20.7**	1.97 1.87**

* $N_0 = c \cdot A \cdot F_c$, **断面修復に用いたポリマーセメントモルタルの値

表-2 引張試験結果

試験体	せん断スパン比	ヤング係数 E_s ($\times 10^3$ N/mm ²)	降伏点応力 σ_y (N/mm ²)	降伏点ひずみ ε_y ($\times 10^{-2}$)	引張強さ σ_U (N/mm ²)	降伏比 σ_y / σ_U	破断伸び EL (%)
主筋D13	3	193	349	0.18	497	0.70	25.3
帯筋φ6		209	491*	0.24*	535	0.92	-
主筋D13	2	190	356	0.19	506	0.71	21.3
帯筋D6		169	368*	0.22*	589	0.62	31.8

*0.2%オフセット法による値。 $\varepsilon_y = \sigma_y / E_s$

3. 補修方法

一次載荷後の試験体の主たる補修方法は、ひび割れへのエポキシ樹脂注入である。試験体 RC3-B, 試験体 RC2-B に関しては損傷状況が激しく、かぶりコンクリートが剥落していたため、樹脂の注入前に軽量ポリマーセメントモルタルによる断面修復を行った。補修の手順を写真-1に示す。

コンクリートの脆弱部分を除去し、既存コンクリートとの接着性向上のため下地処理用プライマーを塗布した。その後、ポリマーセメントモルタルにより断面を整形し、4週間の養生を行った。

ひび割れへのエポキシ樹脂注入の方法は、膨らんだゴムチューブの内部圧力により、時間をかけてひび割れの深部まで樹脂を注入する工法を用いた。表面の塵埃を除去した後、ひび割れ幅が大きい場所あるいは2本のひび割れの交点に、樹脂注入用ゴムチューブを取付けるための座金を接着した。ひび割れ部をシーリングした後に、樹脂を充填したゴムチューブを座金に装着して注入を行った。樹脂が硬化するまで養生した後、表面の仕上げを行った。

4. 実験結果

4.1 荷重一部材角関係

図-5に荷重 Q - 部材角 R 関係を示す。図中○印は最大耐力点を示し、一次載荷の試験体には□印で主筋が初めて降伏ひずみに達した点を示している。また、図中青点線は鉄筋の降伏点応力とコンクリートの圧縮強度を用いて算定した塑性崩壊機構直線である。コンクリートの圧縮強度には強度低減係数 0.85 を考慮している。

$L/D=3$ の試験体, $L/D=2$ の試験体に共通して見られることとして、一次載荷の試験体に履歴の再現性が確認できる。一次載荷における損傷レベルの大きい試験体 RC3-B および試験体 RC2-B と、補修後の二次載荷の試験

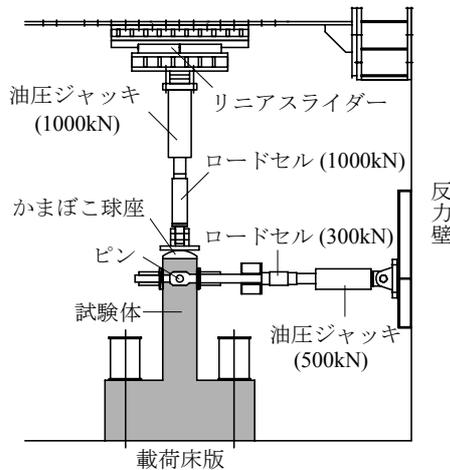


図-3 荷重装置

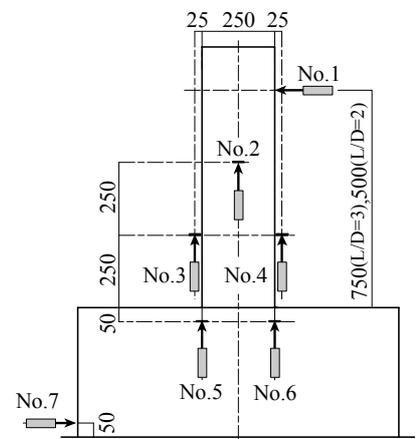


図-4 変位計取付位置



1) プライマー塗布 (下地処理)



2) ポリマーセメントモルタルで断面整形



3) ゴムチューブ取付用座金の接着



4) ひび割れ部のシーリング



5) ゴムチューブの内圧による樹脂注入



6) 表面仕上げ

写真-1 試験体補修手順

体を比較すると、いずれの試験体においても補修後の最大耐力の方が高い値を示しており（表-3参照）、最大耐力値の観点からは、ひび割れへの樹脂注入による補修により部材の性能を回復させることができていると言える。特に試験体 RC2-B-R においては、断面補修に用いたポリマーセメントモルタルの強度がコンクリートの強度よりも低いにも関わらず最大耐力が上昇している。これは一次載荷時の主筋のひずみ硬化あるいはひずみ時効等により降伏応力度が上昇していることが原因と考えられる。また、最大耐力時の部材角を比較すると、補修前の試験

体に比べ、補修後の試験体の方が最大耐力時の部材角が大きくなっている。この原因として、コンクリートの剛性低下と、注入したエポキシ樹脂の剛性が低いことが考えられる。最大耐力後の耐力の低下傾向は塑性崩壊機構直線に沿った挙動をしており、水平耐力の低下は $P-\delta$ 効果によるものが主たる要因であると判断できる。試験体 RC3-Y-R は、試験体 RC3-M-R および試験体 RC3-B-R と比べて正側最大耐力が小さいが、これは試験体 RC3-Y-R の一次載荷における損傷レベルが降伏荷重レベルであるために他の試験体に比べて損傷が少なく、一次載荷終了

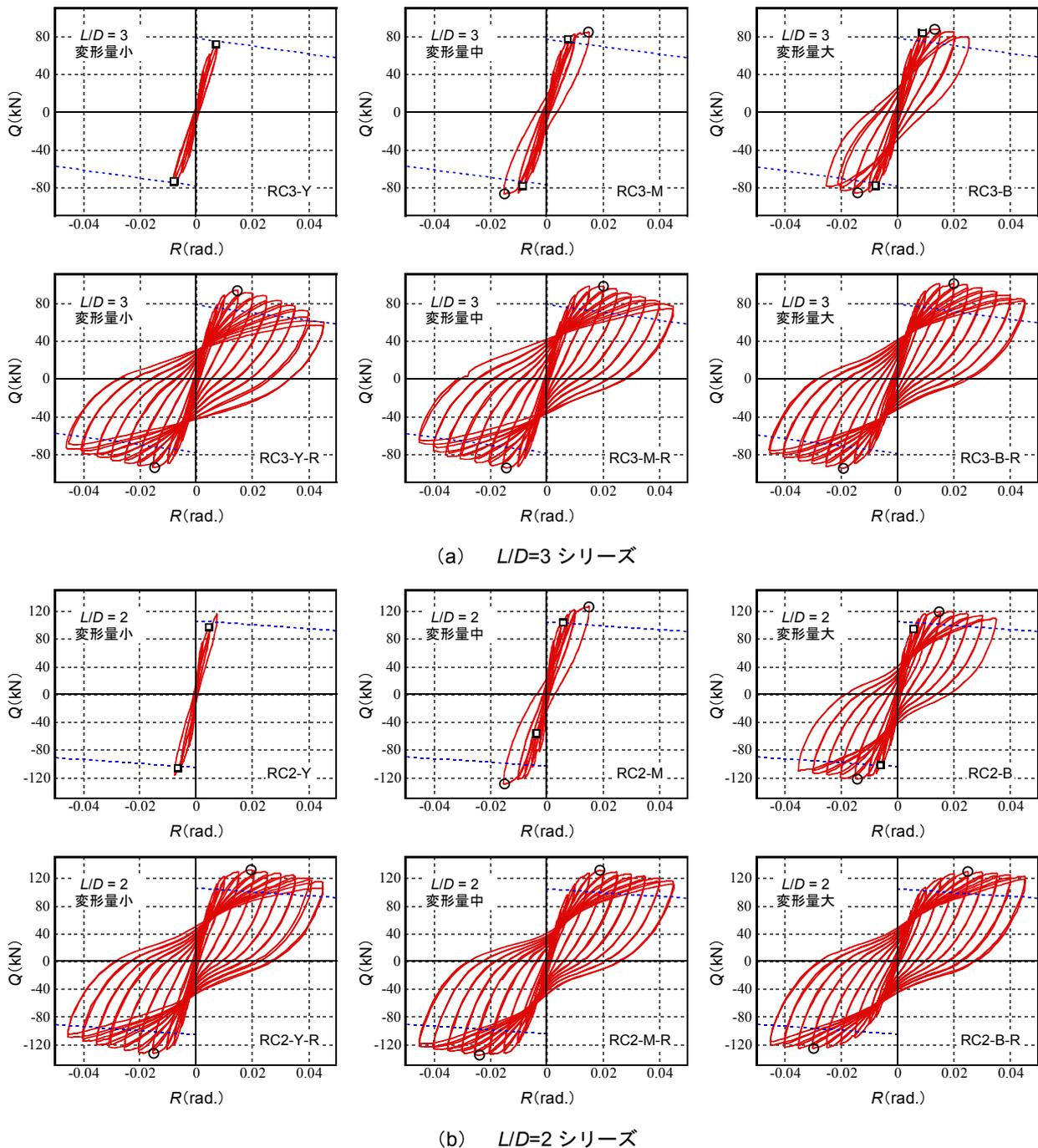


図-5 荷重-部材角関係

時の表面ひび割れが 0.1mm（実施工では表面ひび割れ幅が 0.2mm 以上必要）と小さかったことから、内部ひび割れへの樹脂注入が不十分であったことが原因であると推察される。また主筋が塑性変形をあまり受けておらず、耐力上昇の要因であるひずみ時効やひずみ硬化が少なかったことも原因と考えられる。

初期剛性に関しては、 $L/D=3$ 、 $L/D=2$ の試験体ともに一次載荷における損傷レベルの大小に関わらず、補修後の試験体では低下している（表-3 参照）。これは、注入したエポキシ樹脂の剛性がコンクリートの剛性より小さいことが原因であると推察される。一次載荷時の損傷レベルが大きかった試験体 RC3-B-R および試験体 RC2-B-R

に関しては、断面修復材のポリマーセメントモルタルのヤング係数がコンクリートと比較して小さいことも剛性低下の要因であると考えられる。

$L/D=2$ の試験体は、RC 規準の曲げ耐力式¹⁰⁾と修正大野・荒川 min 式¹¹⁾による計算ではせん断破壊型であったが、実際の破壊モードは曲げ破壊であった。そのため、 $L/D=3$ シリーズと同様の曲げ破壊型の柱の知見しか得られなかった。

4.2 損傷状況

図-6 に各試験体の損傷状況を示す。図中、黒く塗りつぶしている部分はコンクリートが圧壊または剥落した部分を示している。一次載荷と二次載荷を比較すると、

表-3 実験結果一覧

試験体一覧	初期剛性 (kN/mm)	剛性低下率 (%)	最大耐力 (kN)		最大耐力時部材角 (rad.)		各部材角での耐力（正側）		
			正側	負側	正側	負側	0.005rad.	0.01rad.	0.02rad.
							(kN)	(kN)	(kN)
RC3-Y	24.2	-	(72.3)	(-76.7)	(0.0074)	(-0.0076)	61.7	-	-
RC3-M	22.8	-	84.5	-86.7	0.0148	-0.0149	64.5	82.6	-
RC3-B	26.4	-	87.6	-85.7	0.0143	-0.0141	66.8	85.7	80.2
RC3-Y-R	20.1	83.1	93.3	-94.2	0.0147	-0.0147	62.4	88.7	91.1
RC3-M-R	21.6	94.7	98.1	-94.5	0.0202	-0.0142	59.8	88.3	97.7
RC3-B-R	18.8	71.2	100.5	-94.9	0.0200	-0.0191	65.1	92.8	100.5
RC2-Y	59.9	-	114.7	-117.1	(0.0075)	(-0.0075)	97.8	-	-
RC2-M	61.6	-	125.8	-129.5	0.0150	-0.0150	101.6	121.4	-
RC2-B	57.3	-	119.0	-122.7	0.0148	-0.0142	91.4	115.5	118.8
RC2-Y-R	44.5	74.3	131.7	-132.8	0.0197	-0.0149	86.2	121.5	129.3
RC2-M-R	40.0	64.9	131.1	-135.3	0.0188	-0.0246	73.5	111.0	130.6
RC2-B-R	29.4	51.3	129.8	-126.1	0.0251	-0.0298	72.4	106.3	126.3

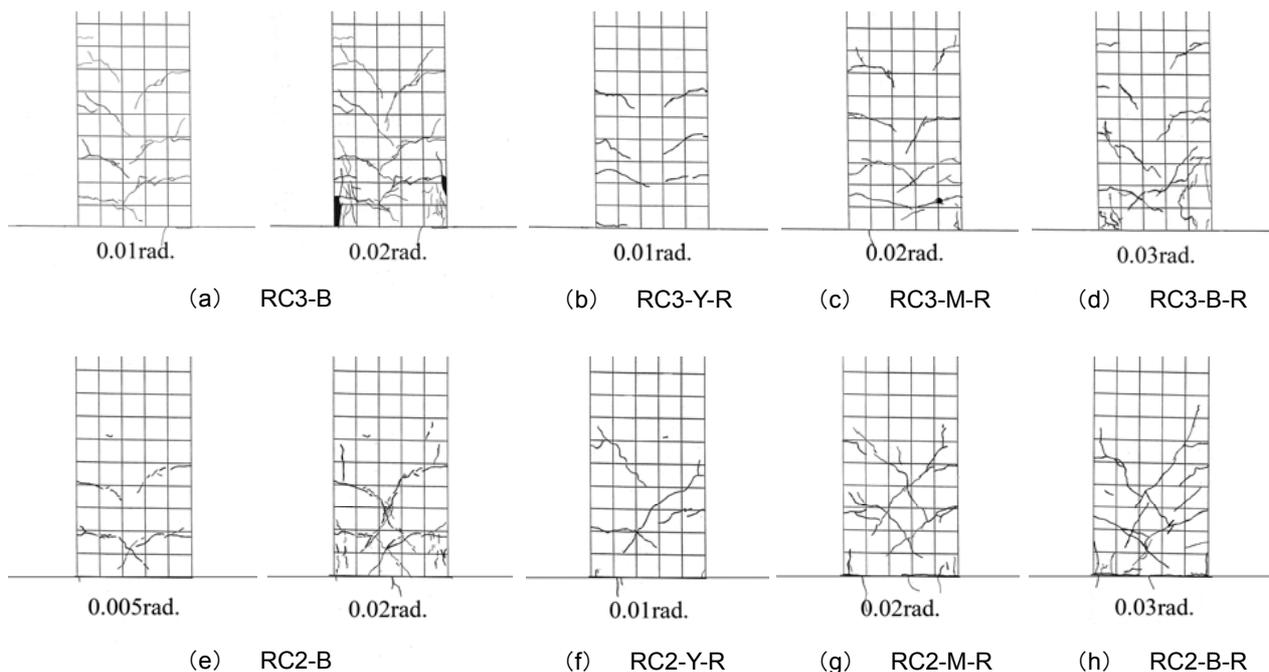


図-6 損傷状況

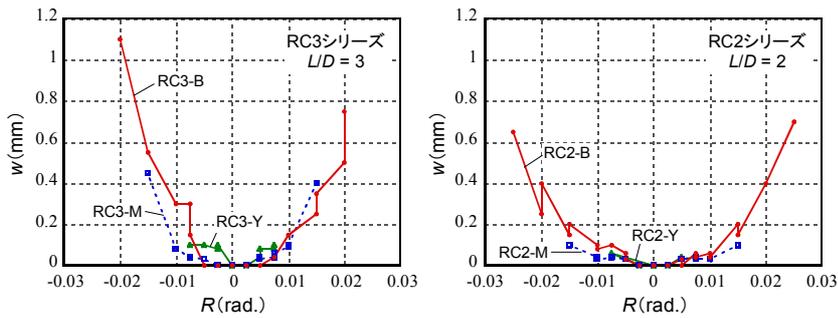


図-7 最大曲げひび割れ幅の推移（一次載荷）

二次載荷によるひび割れは一次載荷によるひび割れとは違う位置に発生していたことから、エポキシ樹脂による補修効果は十分であると判断できる。全ての試験体について、破壊モードは曲げ降伏先行の曲げ破壊であった。

図-7 に一次載荷での水平力除荷時における最大曲げひび割れ幅の推移を示す。補修後の二次載荷試験体は、表面状態が悪く微小なひび割れを観察するのが困難であった。 $L/D=3$ の試験体では、最大耐力到達以降、残留する曲げひび割れの幅が急激に増加するが、 $L/D=2$ の試験体では、斜めのひび割れが進展するため、曲げひび割れ幅は $L/D=3$ の試験体と比較して小さい。

5. まとめ

せん断スパン比の異なる RC 柱について、3 段階に設定した損傷レベルの載荷をした後に補修し、再度載荷を大変形域まで行った。今回得られた知見をまとめて本論のまとめとする。

- 1) 本論の試験体は $L/D=3$ および $L/D=2$ ともに曲げ破壊が先行し、補修後は、補修前の損傷状況に関わらず剛性が低下することが確認された。
- 2) 補修前の損傷状況に関わらず最大耐力が上昇することが確認され、ひび割れ注入のみの補修でも効果が十分であると判断される。また、二次載荷時のひび割れは一次載荷時のひび割れとは違う位置に発生しており、今回採用したエポキシ樹脂ひび割れ注入工法は有効な補修方法であったと言える。

謝辞

本実験は文部科学省科学研究費補助金（若手研究(B)）「載荷履歴を受けた RC・SRC 部材の補修後性能に関する研究」（研究代表者：藤永隆）の援助を受けて行った。ここに記して感謝の意を申し上げます。

参考文献

- 1) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：阪神・淡路大震災調査報告／建築編-2，1998 年 8 月
- 2) 石橋忠良・津吉毅・小林薫・小林将志：大変形正負交番載荷を受ける RC 柱の損傷状況及び補修効果に関する実験的研究，土木学会論文集，No.648/V-47，pp.55-69，2000 年 5 月
- 3) 稲熊弘・関雅樹：被災した鉄道高架橋柱の残存耐力に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.2，pp.1219-1224，2006 年
- 4) 藤永隆・三谷勲：載荷履歴を受けた SRC 部材の補修後の性能に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），pp.1163-1164，2006 年 9 月
- 5) 立花正彦ら：非充腹型 SRC 及び RC 柱部材の力学特性と耐震補強・補修に関する実験的研究（その 1～その 16），日本建築学会大会学術講演梗概集，1997 年 9 月～2000 年 9 月
- 6) 鈴木計夫・松崎育弘・松谷輝雄・藤井睦・材寄勉・荒金勝・溝口茂・栗原慎介：PRC 梁 RC 柱接合部の補修後の耐震性能に関する基礎実験，日本建築学会大会学術講演梗概集（中国），pp.1059-1060，1999 年 9 月
- 7) 藤永隆，那良幸太郎，神谷悠貴，孫玉平：載荷履歴を受けた格子型 SRC 柱の補修後性能に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.57B，2011 年 3 月
- 8) 神谷悠貴，藤永隆，孫玉平，那良幸太郎：載荷履歴を受けたラチス型鉄骨を内蔵する SRC 柱の補修後性能に関する実験的研究，神戸大学都市安全研究センター研究報告，第 14 号，pp.113-122，2010 年 3 月
- 9) 那良幸太郎・藤永隆・孫玉平・清水直也：載荷履歴を受けた RC 柱の補修後性能に関する実験的研究，神戸大学都市安全研究センター研究報告，第 14 号，pp.103-112，2010 年 3 月
- 10) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，2010 年 2 月
- 11) 広沢雅也ら：軸力をうける鉄筋コンクリート部材の強度とねばり，日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿），pp.817-820，1971 年 11 月