損傷した RC 正方形断面柱の補修効果に関する基礎的研究†

平澤 征夫* 鈴木 信彦**
原 紀子*** 秋山 芳幸***

A Basic Study on the Repaired Effects of Damaged R/C Square Columns

by

Ikuo HIRASAWA *, Nobuhiko SUZUKI **, Noriko HARA ***
and Yoshiyuki AKIYAMA ***

This paper presents an estimating method for maximum responses of loads and displacements for repaired columns by degraded stiffness method. Proposed method is based on the correlated stiffness ratio between the column stiffness at the first yielding of longitudinal steels and that the estimated unloading stiffness of damaged last cycles. Degraded stiffness ratio 0.64 was obtained by the tests of R/C columns used in this paper. From comparisons between experimental results and analysis, it is shown that the proposed analytical method is applicable to estimating the load ~ displacement relationships of repaired columns.

Key words : Reinforced concrete column, Damage repair, Stiffness, Load, Displacement

1 緒 言

1995年1月17日午前5時46分、淡路島北部を震源とする兵庫県南部地震が起き、阪神地区一帯に壊滅的な被害を与えた。特に、阪神高速道路3号神戸線の道路橋の倒壊は、土木技術者に大きな衝撃を与えた。この他に、新幹線や在来線の鉄道橋などのうち古い設計基準（昭和46年以前）で建造されたものはほとんどが倒壊または損傷したが、新しい設計基準（昭和55年度以降）で建造されたものは、倒壊まで至らなかったものの、補修あるいは補強の必要があることが明らかとなった。復旧工事は「復旧仕様」¹⁾に基づき、その耐震設計の基本方針は「道路橋の復旧にあたっては、各構造部材の強度を向上させると同時に変形性能を高めて、橋全体系として地震に耐える構造を目指す」ことが示された。

具体的な復旧あるいは今後の補修・補強にあたっては、現在そこにある損傷した構造物の強度および変形性能がどの程度残存しているかを評価する必要がある。その結果に基づいて構造物の種類（基礎の種類、柱の寸法、荷重のかかり方）により、補修・補強の方法が選択される。そして、実際の工事が施工された後は、その構造物の耐力と変形性能が施工前のものより、どの程度高められたかを推定しておく必要がある。

本研究の目的は、動的および静的荷重により損傷させたRC柱モデルを補修し、その補修効果を実験とその解析によって定量的に明らかにしようとするものである。すなわち、本論文では、RC正方形断面柱モデルを作成し、それについて振動台試験、あるいは静的載荷試験を実施し、それぞれの試験で損傷した供試体の柱基部を補

修し、その後始めに損傷を与えたものと同じ試験方法で実験を行い、本研究で採用した補修方法による耐力の比較、補修方法の有効性および、応答変位の違いを明らかにした。また、損傷後に補修した柱の挙動解析を行い、実測値との比較検討を行った結果より、解析に用いる場合の、損傷した柱の剛性の低下率を明らかにするとともに、補修したことによる動的挙動の影響について示したものである。

本研究の特色は、従来の現場などでの補修実験では、実際にどの程度損傷したか正確にはわからないものを補修あるいは補強したものについて実験を行うか、あるいは、あらかじめ無補強の柱と補強柱を作成してその強度を比較する方法がとられているが、前者では、補強する柱の損傷程度を推定しなければならないこと、後者は、無補強の柱が全く損傷していないもので比較しなければならないという不合理な点がある。これに対して本研究では、あらかじめ実験によって損傷を与えておくことで、損傷程度の明らかな供試体を補修した実験を行った点であり、これにより、現実の柱に近い補修・補強の効果を明らかにすることが可能となっていることである。

2 実験方法

実験に用いた供試体の形状寸法をFig. 1に示す。柱の断面は、15×15cm、高さは144cm、軸方向鉄筋にD10を8本（軸方向鉄筋比2.54%）、帯鉄筋はφ6を用い、間隔は10cmと5cm（拘束鉄筋比0.86%、1.72%）の2種類とした。動的耐力は、Fig. 2に示す振動台試験法によって求めた。振動台試験法では、EL CENTRO地震のNS方向の加速度波形¹⁾を1/3倍（114gal）、2/3倍（228gal）、

† 原稿受理 平成10年10月30日 Received Oct. 30, 1998

* 正会員 中部大学工学部土木工学科 〒487-8501 春日井市松本町, Dept. of Civil Eng., Chubu Univ., Matsumoto-cho, Kasugai, 487-8501

** (株)ピー・エス 〒460-0002 名古屋市中区丸の内長銀ビル, P・S Corp., Naka-ku, Nagoya, 460-0002

*** 中部大学大学院 〒487-8501 春日井市松本町, Graduate Student, Chubu Univ., Matsumoto-cho, Kasugai, 487-8501

Fig. 1. Details of specimens.

Fig. 2. Test setup of shaking table test.

Fig. 3. Test setup of static test.

1 倍 (342 gal), … 7/3 倍 (797 gal) と同一の供試体に対して, 1 方向載荷で 7 回入力した。一方, 静的耐力は, Fig. 3 に示す静的載荷試験法によって求めた。静的載荷試験法は振動台試験の各段階での入力加速度に対応して得られた柱頂部の正負の最大応答変位を 1 サイクルずつ静的に載荷するものとした。各試験に対して 1 体の供試体とし, Table I にそれらの名称を示す。また, その試験時のコンクリートおよび鉄筋の力学的性質を Table II に示す。

3 補 修 方 法

上記の方法で損傷させた供試体の柱基部を Fig. 4 のように厚さ 1mm の鉄板 (換算横方向鉄筋比: 3.18% [10cm ピッチ], : 4.04% [5cm ピッチ]) で囲み, その間を無

Table I. Names of specimens.

Kinds of test	Shaking table test		Static test	
	Pitch	10cm	5cm	10cm
Names of specimens	Original speci	ET-10	ET-05	ES-10
	Repaired speci	ET-R-10	ET-R-05	ES-R-10

Table II. Mechanical properties of materials.

Names of specimens		ES-10	ES-05	ET-10	ET-05
Concrete	Compressive strength	29.11	40.18	31.46	35.18
	Tensile strength	2.91	3.28	1.76	2.02
	Modulus of elasticity	2.73×10^4	2.86×10^4	2.73×10^4	2.88×10^4
Longitudinal steel	Numbers	8	8	8	8
	Diameter (mm)	10	10	10	10
	Ultimate strength	510	510	510	510
	Yield strength	364	364	364	364
	Modulus of elasticity	1.74×10^5	1.74×10^5	1.74×10^5	1.74×10^5
Ratio of longitudinal steel		2.54	2.54	2.54	2.54
Confining steel	Diameter (mm)	6	6	6	6
	Pitch (mm)	100	50	100	50

Names of specimens		ES-R-10	ES-R-05	ET-R-10	ET-R-05
Non-shrinkage mortar	Compressive strength	76.78	76.36	65.32	62.74
	Tensile strength	5.49	5.46	4.66	4.48
	Modulus of elasticity	2.40×10^4	2.71×10^4	2.28×10^4	0.48 PMO^4
Steel plate	Compressive strength	325	325	325	325
	Tensile strength	222	222	222	222
	Modulus of elasticity	1.85×10^5	1.85×10^5	1.85×10^5	1.85×10^5

(unit : N/mm²)

Fig. 4. Repair method.

収縮モルタルで充填する鉄板巻き立てによる補修を行った。ただし, 復旧仕様にある方法²⁾とは異なり底盤部へのアンカーは施工していない。充填に先立ちコンクリート表面に打水をした。充填後, 露出部分は載荷の前日まで常に湿潤状態を保つようにした。補強部分以外に見られた既存のひびわれに関しては特殊な樹脂などの注入による補修は行っていない。動的および静的な載荷試験は補修後約 1 週間で行った。

4 解 析 方 法

解析方法は柱の断面を Fig. 5 に示すように 225 個の要素に分割し, また Fig. 6 に示すように柱の長さ方向にも 12 個のセグメントに分割して行うものとし, 各荷重段階における変形の決定は繰返し計算による収れん法を用いた。耐力は頂部変位の計算値が発散するときの荷重とした。³⁾解析値に用いたコンクリートおよび鉄筋の応力~ひずみ曲線を Fig. 7 に示す。コンクリート強度はシリンダー圧縮強度の 0.85 倍を用い, 振動台試験結果の解析には, コンクリートおよび鉄筋の応力~ひずみ関係にひず

Fig. 5. Elements of section.

Fig. 6. Segments of specimen.

Fig. 7. Stress-strain curves of concrete and steel.

み速度の影響を考慮した解析とした。⁴⁾ ひずみ速度の影響としては、地震程度のひずみ速度 $\dot{\epsilon} = 0.1$ (mm/mm/s) におけるコンクリートの圧縮強度、および鉄筋の降伏点強度の上昇に関する小谷氏⁵⁾ や岩井氏⁶⁾ らの結果に基づ

(a) Concrete

(b) Steel

Fig. 8. Stress-strain curves of concrete and steel considering strain rate.

Fig. 9. Column stiffness of yield and ultimate states.

Table III. Kinds of analysis.

Kinds of analysis	Length of columns	Explanatory notes
Analysis A	131.5cm	_____
Analysis B	116.5cm	_____
Analysis C	131.5cm	Applied to γ
Analysis D	116.5cm	Applied to γ

ES-10. ET-10 $\gamma=63.8\%$ ES-05. ET-05 $\gamma=62.9\%$

いて、Fig. 8に示すように、コンクリート強度を1.25倍、鉄筋の降伏強度を1.15倍したものを用いた。

なお、拘束効果は、この程度の拘束鉄筋量では解析結果に大きな影響をあたえないこと（参考文献 4）で検討済み）、補修により、内部コンクリートの状態が不明であり、拘束効果が期待できないことから考慮していない。また、損傷・補修を考慮した解析値の区別を Table III に示す。解析値 A は、損傷がないものと仮定した場合である。一方、振動台試験を行った供試体のひび割れ状況を観察した結果、もとの柱と補修した部分の境界部に、ひび割れが集中する傾向がみられた。これは、動的載荷により剛性が急に变化する部分に、変形が集中したためと考えられる。実際に、鉄板で補修して剛性が高まった柱基部は、動的載荷の場合、フーチング部と一体化して動くことが観察された。この事実に基づいて、解析値 B, D は、柱の長さを鉄板で補修した部分だけ短くした 116.5

Table IV. Comparison between original and repaired specimens.

(a) Maximum load.

Shaking table test

Max acceleration	ET-10	ET-R-10	(ET-R-10)/(ET-10)
113.9gal	2.76	3.37	1.22
227.8gal	6.09	6.50	1.07
341.7gal	10.54	9.61	0.91
455.6gal	11.32	10.18	0.90
569.5gal	10.82	12.47	1.15
683.4gal	11.03	12.87	1.17
797.3gal	11.72	13.36	1.14

Static test

Max acceleration	ES-10	ES-R-10	(ES-R-10)/(ES-10)
113.9gal	2.05	2.88	1.41
227.8gal	4.50	5.54	1.23
341.7gal	7.64	8.11	1.06
455.6gal	7.71	8.85	1.15
569.5gal	8.23	9.87	1.20
683.4gal	8.80	9.85	1.12
797.3gal	8.65	10.06	1.16

(unit : kN)

(b) Maximum displacement.

Pitch of confining steel : 10cm

Max acceleration	ET-10	ET-R-10	(ET-R-10)/(ET-10)
113.9gal	2.9	8.1	2.84
227.8gal	8.8	16.0	1.82
341.7gal	20.3	23.7	1.16
455.6gal	30.1	29.0	0.96
569.5gal	34.8	42.8	1.23
683.4gal	50.6	61.5	1.21
797.3gal	78.5	91.0	1.16

Pitch of confining steel : 5cm

Max acceleration	ES-05	ES-R-05	(ES-R-05)/(ES-05)
113.9gal	3.8	9.2	2.45
227.8gal	13.4	19.0	1.42
341.7gal	19.5	24.8	1.27
455.6gal	30.7	35.0	1.14
569.5gal	37.2	53.1	1.43
683.4gal	56.5	78.1	1.38
797.3gal	83.6	94.8	1.13

(unit : mm)

Fig. 10. Comparison of load-displacement curves between original and repaired specimens.

cmを仮定して解析した値である。さらに、後述するように、補修した供試体の荷重～応答変位包絡線で、初期の剛性が低下する傾向がみられた。このことを考慮するために、解析値C、Dは柱の剛性をFig. 9に示すような、終局時の曲げ剛性を降伏時の曲げ剛性で除した剛性の低下率 γ を用いて解析した値である。

5 実験結果

5・1 補強効果の比較

Table IVに補修前、補修後の荷重と変位の関係を比較して示す。Table IV (a)より、振動台試験結果では、3回目、4回目の加振以外は、補修した供試体が、補修前の供試体より、各段階で10～15%程度最大応答荷重が上回る結果となっていることがわかった。これは、補修により柱基部の剛性が高まったこと、およびこのため、柱の見かけの有効長さが短くなったためと考えられる。静的載荷試験でも、補修した供試体が、補修前の供試体より、やはり各段階で10～20%程度最大応答荷重が上回る結果となった。また、Table IV (b)より、補修後の変位が補修前の変位よりも10～40%程度大きくなってい

ることがわかる。これは、補修部より上の部分にある既存のひびわれによる剛性低下の影響であると考えられる。

Fig. 10に補修前、補修後の荷重～応答変位包絡線の結果を示す。最大耐力についてはET-05を除いて、補修後の供試体が補修前の供試体を5～15%程度上回っている。以上より、補修効果に関して、補修後の終局耐力が補修前の値を上回っていることから基部鉄板による補修効果が認められたと言えよう。しかし、既存のひびわれのため、補修した柱の最大応答変位が大きくなることは、今後補修柱の変形を解析する上で、検討を要する。

5・2 鉄板ひずみ～載荷履歴関係

Fig. 11に補修した供試体の鉄板表面ひずみと載荷履歴の関係を示す。Fig. 11 (a)より、鉄板と底盤部の結合を行っていないので柱軸方向の引張ひずみ(引張応力)の最大値はそれほど大きく生じていない。ES-R-10のS側の残留圧縮ひずみが大きいのは、N側での付着が保たれ、S側での充填モルタルと鉄板の付着が切れ、柱部分のコンクリートと充填モルタルの付着が維持されたためと考えられる。次に、Fig. 11 (b)より、鉄板には水平方

(a) Vertical direction.

(b) Horizontal direction.

Fig. 11. Strain of steel plate-load hysteresis relationship.

Fig. 12. Comparison between measured and calculated load-displacement curves.

向（柱軸直角方向）に引張応力が生じており、鉄板による横拘束効果が認められる。

6 実験結果と解析結果の比較

Fig. 10 には、補修前の供試体の解析値も示した。この図より、補修前の供試体の実測値と解析値を比較すると、動的載荷試験については比較的適合しているが、静的載荷試験については、それほど良く適合しているとはいえない。しかし、本解析方法による静的載荷試験に対する適合性は、これまでに参考文献 4) で、その精度を確かめている。

Fig. 12 に補修した供試体の実測値と各解析値の比較を示す。ES-R-10 の実測値と解析値 A を比較すると最大耐力はほぼ一致するが、実測値は一度損傷を受けているために剛性が低下している。一度損傷を受けた後の柱の変形挙動解析を行うため、柱断面の剛性を低下させる解析を試みた。剛性の低下割合を 0.9 から 0.6 まで変化させて試算を行ったところ、最終的に剛性の低下は、解析方法で述べたように、補修前の供試体で得た終局時の曲げ剛性を降伏時の曲げ剛性で除した値を、曲げ剛性低下率 γ として算定するのが適当であることがわかった。す

なわち, Fig. 9 に示したように, ES-R-10 の場合は $\gamma = 0.638$ であり, このようにして求めた値を解析値 C として実測値と比べると, かなり一致していることがわかる.

ES-R-05 の実測値と解析値 A を比較すると, ES-R-10 と同じように実測値は剛性が低下しているために一致しないが, 剛性を低下させた解析値 C と比較すると, 柱頂部の応答変位が 30mm までの勾配が一致してくることがわかる.

ET-R-10 の実測値と解析値を比較すると, 柱の長さを鉄板で補修した部分だけ短くした (116.5cm) 場合の解析値 B が最大耐力では一致したが, 柱頂部の応答変位が 30mm までの勾配が一致しない. そこで, ES-R-10 と同様に, 剛性を 63.8% ($\gamma = 0.638$) に低下させた解析値 D と比較すると全体的に一致することがわかる.

ET-R-05 についても ET-R-10 と同様な解析を行って, 同様な結果を得た.

以上より, 次の 2 点が明らかとなった.

(1) 静的載荷試験では, 鉄板と底盤部の結合がないために柱は基部に変形が集中する傾向が見られた. そこで, 柱の長さをもとのままの長さ (131.5cm) と仮定し剛性のみを低下させた場合に, 解析値と実測値が一致することが明らかとなった.

(2) 振動台試験では, 柱は鉄板で補修 (補強) した部分の剛性が高まったため, 変形は補修した部分のすぐ上の未補修部分 (15cm) に集中した. そこで, 柱の長さを補修 (補強) 部分を除いた残りの長さ (116.5cm) と仮定し, さらにこの部分の剛性を低下させた場合に, 解析値と実測値がほぼ一致することが明らかとなった.

このように, 部分的に補修・補強した柱の補強後の挙動解析を行う場合には, 荷重の種類によって挙動が異なることが予想される. したがって, 補修・補強効果を評価する場合には, 地震荷重による振動挙動解析を行うとともに, 適当な剛性低下割合を仮定したもので判断する必要があると言えよう.

7 結 言

本研究は, まず 4 体の鉄筋コンクリート柱モデルを作成し, 2 体を振動台によって動的に塑性域まで破壊させ, 別の 2 体は, 静的に正負交番の漸増 1 回繰返し載荷により塑性域まで破壊させた. 次に, これらを 1 種類の鉄板巻き補強法により補修した. さらに, これらの補修した供試体を再び始めの載荷方法と同じ試験により破壊までの載荷を行って, その補修効果を実験的に調べたものである. また, この補修効果を定量的に示すために, 補修後の供試体における試験結果の解析を行い, 解析上必要な仮定に関する知見を得た. 本研究で得られた事柄を結論としてまとめると, 以下ようになる.

(1) 本研究で採用した補修方法では, 補修後の動的耐力は, 補修前のものよりも, 各載荷段階で 10 ~ 15% 程度上昇することがわかった. また, 静的耐力も 10 ~ 20% 程度上昇した. 一方, 補修後の柱供試体の柱頂部変位は, 補修前の変位よりも 10 ~ 40% 程度大きく現れた. これは, 補強部より上の部分の既存のひびわれによる剛性低

下の影響であると考えられる.

(2) 損傷を受けた柱を補修した後の柱について, 耐力と変形挙動解析を行い, 実験結果と比較した結果より, 次の 2 点が明らかになった.

(a) 静的載荷試験結果に対しては, 柱の長さをもとのままの長さとして仮定し, 曲げ剛性のみを 63.8% に低下させた場合に解析値と実測値が一致する. この曲げ剛性の低下率 γ は, 補修前の供試体で得た終局時の等価曲げ剛性を, 降伏時の等価曲げ剛性で除した値として得ることができる.

(b) 振動台試験 (動的載荷試験) 結果に対しては, 柱の振動部分の長さを, 補修 (補強) 部分を除いた長さとして仮定し, さらに柱の剛性を低下させた場合に, 解析値と実測値がほぼ一致する. このことは, 本研究で補修した部分は損傷した柱部分と比較して剛性が高まったために, 実際の振動にはあまり寄与していないで, 基部と一体とみなしてよいことを示している.

(3) 以上より, 一般に損傷後の柱を補修・補強した場合の効果の評価する場合は, 補修・補強の種類にも依存するが, もとの柱については, かなりの剛性低下を見込む必要があること, および今後の地震のような動的荷重に対しては, 補強した柱の振動挙動 (特に柱の見かけの有効長) が変化する可能性があることを考慮する必要があるものと考えられる.

今後の問題としては, 補修・補強の方法とそれにより機能がどの程度高まるかについて, より定量的に明らかにするという最重要課題がある. それには, 本研究のようなモデルによる実験と解析からはじまり, 実物大実験とそれに関するより詳しい解析が, しかも多くのケースについて必要となろう. 最終的には, 構造物の損傷度に応じた合理的補修・補強設計方法の確立が望まれている.

本研究は, 中部大学総合工学研究所平成 7・8 年度研究費による実験と, 中部大学ハイテクリサーチセンター構想に基づく先端技術センター・第 3 プロジェクトの平成 10 年度研究費による解析結果をとりまとめたものである. 実験には, 中部大学材料・構造実験施設の振動台およびアクチュエーターを使用した. 利用に際し, 施設技術員である帆山公郎・駒田尚一の両氏に大変お世話になった. ここに, 記して深謝いたします.

参 考 文 献

- 1) "STRONG MOTION EARTHQUAKE ACCELEROGRAMS", 71-50, EERL, CIT (1971).
- 2) 兵庫県南部地震道路橋震災対策委員会, "兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係わる仕様および復旧仕様の解説 (案)" (1995) 土木学会.
- 3) 岡田 清, "最新コンクリート工学", p.118 (1986) オーム社.
- 4) 平澤征夫, 加納昌男, 藤城正裕, 材料, **45**, 423, (1996).
- 5) 小谷俊介, コンクリート工学, **21**, No.11, 23, (1983).
- 6) 岩井 哲, "静的および動的荷重を受ける鉄筋コンクリート長柱の弾塑性に関する研究", 京都大学博士論文 (1984).