

論文

[2010] 主筋に丸鋼を用いた RC 柱の補修に関する研究

○正会員 田才 晃 (東京大学工学部)
 正会員 犬飼 瑞郎 (東京大学大学院)
 正会員 小谷 俊介 (東京大学工学部)
 正会員 青山 博之 (東京大学工学部)

1. はじめに

これまで、我が国で発生した比較的規模の大きな地震で、震度5以上だった地域では概ね一割程度の鉄筋コンクリート建物に中程度以上の被害を生じてきた。将来の地震においてもこの程度の被害が生じることは充分考えられるが、建物の集中する地域では被害棟数は相当な数になる懸念がある。このような被害建物全てを取壊すかあるいは適切な補強を施すことは必ずしも現実的とはいえない。簡便な方法で被害箇所を修復し、少なくとも被災前の構造物と同等以上の耐震性が得られるような補修方法を確立しておく必要がある。一方、旧基準で設計された比較的古い建物の中には主筋に丸鋼を用いたものがかなりあるものと考えられる。実際1968年十勝沖地震、1978年宮城県沖地震では丸鋼を使った建物の被害が少なくなかった。近年、補修補強に関する研究が行われるようになったにもかかわらず、丸鋼を使った部材の復旧技術に関してはほとんど検討されていない。

そこで本研究では、主筋に丸鋼を用いた曲げ破壊した柱の補修を取上げた。ここで扱う補修とは、部材の配筋、断面寸法・形状を変えない復旧方法とした。すなわち、特別な補強は行わず、損傷部分を修復するのみで、処女部材の力学的性状と同等以上の性能を得ることを目標にした。特に、異形鉄筋に比べ機械的な付着作用のない丸鋼の付着特性の劣化に着目し、補修後の部材の復元力特性に及ぼす影響と劣化した付着を回復させた場合の挙動を実験的に検討した。使用した補修材料は、過去に筆者らが行った実験で、異形鉄筋の付着破壊の回復に効果のあった⁽¹⁾樹脂系の材料を対象とした。

2. 実験方法

2.1 試験体

処女加力による破壊後の補修方法をパラメータとするために、断面を共通にして、せん断スパン比の異なる試験体 ($M/QD=1.5$ および 2.5) を短柱2体、長柱2体作製した。試験体名は、短柱をFR15-1、FR15-2、長柱をFR25-1、FR25-2とする。試験体の配筋を図1に示す。短柱2体、あるいは長柱2体はそれぞれ形状、配筋ともまったく同一とした。中間部分の試験区間の断面は共通で $b \times D = 25\text{cm} \times 25\text{cm}$ 、主筋は $6-13\phi$ (引張鉄筋比 $p_t = 0.64\%$)、せん断補強筋は $6\phi-0150$ (せん断補強筋比 0.149%) である。主筋にはスタップ内で鉄板を溶接して、スタップからの抜けだしを防いだ。試験区間の配筋は、1962年改訂のRC規準を満たしている。

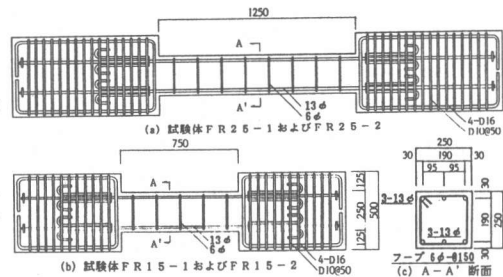


図1 試験体の配筋

2.2 加力方法

図2に示す加力装置内に試験体を水平に設置し、ピン・ローラー支承を介して中央の試験区間に逆対称曲げモーメントを生じさせる正負繰り返し加力を行った。軸力のレベルは全試験体共通で30ton（ほぼ0.2Fc）とした。加力履歴は、試験体FR15-1では降伏耐力の計算値の0.7倍で1回、部材角1/150radで3回、1/75radで3回、1/37.5radで2回繰り返した。また、試験体FR15-2、FR25-1およびFR25-2では共通の履歴とし、計算降伏耐力の0.7倍で1回、部材角1/100radで3回、1/50radで3回、1/30radで2回繰り返した。

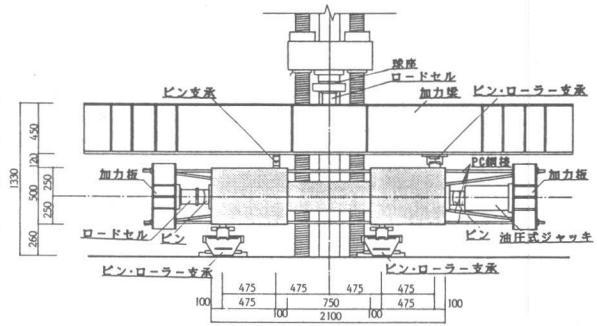


図2 加力方法

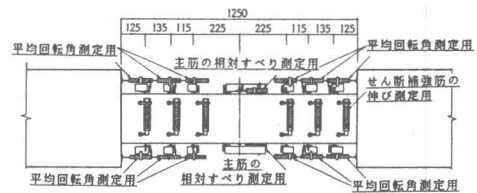


図3 計測方法例

2.3 計測方法

変形については、図3に示す変位計を組入れた計測装置によって柱の全体たわみ、両端危険

断面付近の平均回転角、柱中央部分でのコンクリートに対する主筋の相対すべり、軸方向変形などを測定した。主筋の歪は、歪ゲージにより15cm間隔で測定した。

2.4 補修方法

どの試験体も処女加力によって生じた主な損傷は、部材両端部危険断面付近のコンクリートの圧壊、剥落で、部材中間部にはひび割れも含めて外観からわかる損傷は生じなかった。このような損傷に対し、次の2通りの方針に基づく補修方法を採用した。1つは、外観からわかるコンクリートの損傷部分のみをより高強度の材料で修復する方法で、試験体FR15-1、FR25-1に適用した。もう1つは丸鋼主筋の付着劣化を補修によって回復させる方法で、試験体FR15-2、FR25-2に適用した。補修に際して、処女加力で生じた残留変形は、全ての試験体で修正した。

試験体FR15-1、FR25-1の補修

- ① 柱両端部のコンクリート圧壊部分を削岩機あるいはたがねとハンマーを用いてはつきり取った。
- ② 生じた空洞の周囲に元の断面寸法に合せてベニヤの型枠を設置した。
- ③ 主材と硬化材を適正配合で混練した高強度のエポキシ樹脂モルタルを、へらを使ってコンクリートの欠損部分に充填した。
- ④ 数日間養生したあと脱型し、表面仕上をした。

試験体FR15-2の補修

- ① 柱両端部のコンクリート圧壊部分および部材全長にわたる被りコンクリートを主筋全周が露出するように全てはつきり取った。
- ② 部材断面寸法に忠実にベニヤ製の型枠を設置した。
- ③ 乾燥した骨材をコンクリート欠損部分全体に詰め、空気抜きを設けて型枠を密閉した。型枠の継ぎ目は樹脂でシールした。
- ④ 適正配合で混練したポリマーセメントスラリーを、型枠の下方に設けた注入口より手動ポンプでゆっくりと注入した（こうしてできたコンクリートを、以後プレパックドコンクリートと呼ぶ）。
- ⑤ 数日養生した後、脱型し表面仕上をした。

本試験体で、主筋の付着の回復にプレパックドコンクリートを試用したのは、母材のポリマー

セメントスラリーで鋼板どうしを接着した場合の引張せん断強度が60kgf/cm²程度あり、またセメントコンクリートとの接着性も良好なことから、コンクリートを用いるより効果があるのではないかと考えたためである。

試験体FR25-2の補修

① 柱両端部のコンクリート圧壊部分をはつり、この部分は試験体FR15-2と全く同様にプレバックドコンクリートで置換する補修を行った。② それに加えて、図4に示すように、試験体中央部で材軸方向に15cm(材長の12%)の長さだけ被りコンクリートを主筋全周が露出するまではつり取り、この部分にエポキシ樹脂モルタルを充填した。付着補修長さを15cmとしたのは、樹脂モルタルの鋼板どうしの接着強度が100kgf/cm²程度であることからこの値を丸鋼との付着強度と仮定し、丸鋼の降伏強度を付着で負担できるきりのよい長さとして概算した。本試験体では、上記の補修を行なう前に、試験体の危険断面附近および中央部で主筋を露出させ、主筋とコンクリートの界面にエポキシ樹脂を注入する補修を試みたが、全く注入されていないことが確認されたので上記のような補修方法をとった。

これらの補修の際、露出させた鉄筋の歪ゲージは全て貼り換えた。補修後の試験体はRを付してRFR15-1、RFR15-2、RFR25-1およびRFR25-2と呼ぶ。

2.5 材料特性

コンクリート、鉄筋および補修に用いた材料の性質をまとめて表1に示す。また、コンクリート、エポキシ樹脂モルタルおよびプレバックドコンクリートの応力度-歪度関係を図5に示す。

3. 実験結果の検討

3.1 破壊状況

補修前の加力ではM/QDによらずどの試験体でも、両端部危険断面および危険断面から部材せいD以内の範囲に曲げないしは曲げせん断ひび割れを生じ、部材角1/50radの繰り返して危険領域のコンクリートの圧壊が始まり、最終サイクルで端部が圧壊した。どの試験体も部材中間部には最後までひび割れを認めなかった。補修後の加力ではどの試験体も危険断面に曲げひび割れを生じたが、端部圧壊部分をエポキシ樹脂モルタルで補修した試験体RFR15-1とRFR25-1では、部材内で樹脂モルタル層とコンクリートとの境界に沿ってひび割れを生じ、この境界に沿ったひび割れの幅は、危険断面のひび割れ幅より大きかった(図6(a))。これらの試験体の樹脂モルタル層は、処女加力で圧壊したコンクリートと異なり、加力の最終まで健全であった。これ

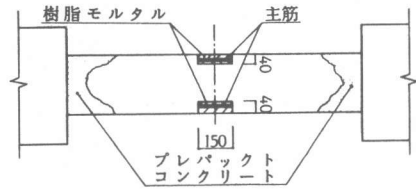


図4 試験体FR25-2の補修方法

表1 材料の性質	
(a)コンクリート 圧縮強度	
試験体 FR15-1, FR25-1	242 kgf/cm ²
試験体 FR15-2, FR25-2	251 kgf/cm ²
(b)鉄筋	
	φ13 φ6
降伏強度	3300 kgf/cm ² 4990 kgf/cm ²
降伏歪度	0.00168 0.00223
歪硬化開始歪	0.0269 --
(c)プレバックドコンクリート	
圧縮強度	295 kgf/cm ²
(d)エポキシ樹脂モルタル	
圧縮強度	793 kgf/cm ²
引張強度	315 kgf/cm ²
弾性係数	66100 kgf/cm ²

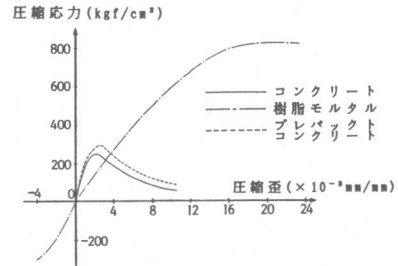
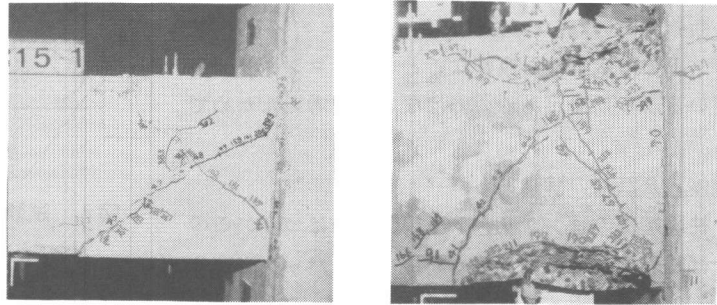


図5 補修材料の応力度-歪度関係

に対し、部材端をプレパ
ックドコンクリートで補
修したRFR15-2とRFR
R25-2では、部材角1/50
radの繰り返しで、圧壊
が始まり、最終破壊状況
は補修前と同様部材両端
部の圧壊であった（図6
(b)）。



(a) RFR15-1 (b) RFR25-2

図6 補修後の最終ひび割れ状況

3.2 復元力特性とエネルギー消費能 各試験体の

復元力特性を補修前後で比較して図7に示す。図中破線は補修前を、実線は補修後を示す。これらの関係の比較から、次の様な明確な特徴を読み取ることが出来る。まず、損傷に忠実に部材端部のみを補修した試験体RFR15-1とRFR25-1では、部材剛性が補修前に比べて著しく低く、同一振幅の履歴ループの面積も補修前より極めて小さい。これに対して、主筋の付着劣化の回復を意図した補修を行った試験体RFR15-2とRFR25-2

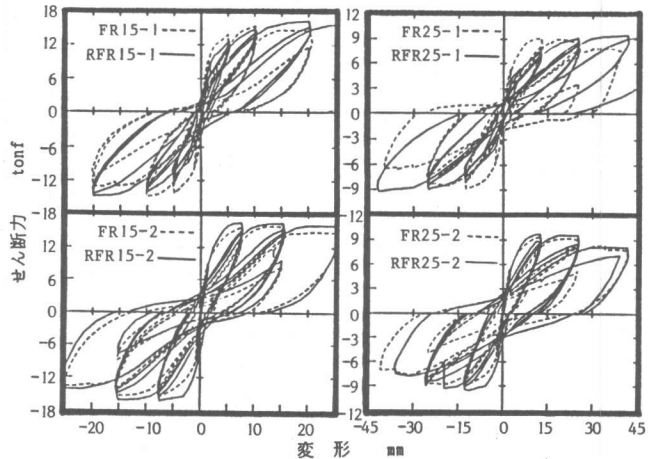


図7 復元力特性

では、剛性は完全に回復し、異形鉄筋を用いた部材の補修後に見られる降伏変形以後の耐力上昇⁽¹⁾がみられ、同一振幅の履歴面積はむしろ補修前より増大した。試験体RFR15-1とRFR25-1の剛性劣化の原因は、補修前の加力による付着劣化と部材端部の補修に用いた樹脂モルタルの剛性の低さが考えられるが、これについては次節で検討する。部材角1/50radを超える大変形では、部材端部を高強度の樹脂モルタルで補修した試験体RFR15-1とRFR25-1では耐力低下が生じなかったが、コンクリートとほぼ同様の材料特性をもつプレパックドコンクリートで補修した試験体RFR15-2とRFR25-2では補修前と同様の耐力低下が生じた。

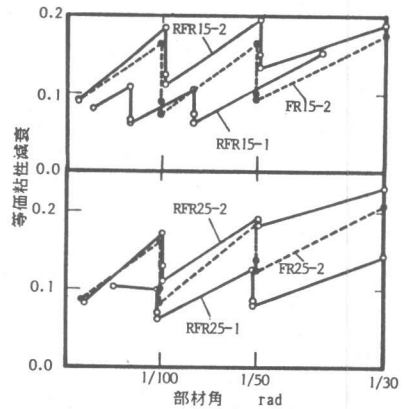


図8 等価粘性減衰

エネルギー消費の変化を等価粘性減衰の推移として図8に示す。部材端部のみを補修した試験体は長柱、短柱とも、どの変位振幅でも等価粘性減衰の値は補修前より小さく、ループ形状が劣

化していた。これに対して、付着の回復を図った補修を行なった場合は、ループ形状が補修前より良好であったことがわかる。

3.3 補修材料の剛性の影響

部材端部のみを補修した試験体にみられた剛性劣化が補修材料の剛性の影響か否かを長柱試験体を例に検討する。部材の累積変形と部材端の回転が全体変形に占める割合を長柱試験体FR25-1およびFR25-2の補修前後について図9に示す。図中実線の波形の縦軸の値は全体変形を示し、破線は部材両端D/2の領域の回転によって生じた全体変形を表す。補修前の両長柱試験体および付着の回復を図った試験体RFR25-2では、全体変形はほとんど部材両端D/2の領域の回転によって生じていたことがわかる。ところが、部材両端を樹脂モルタルで補修した試験体RFR25-1では部材両端D/2の領域の回転によって生じる変形は全体の半分程度で、部材端からD/2～Dの区間の回転が大きな割合を占めた。そこで、どちらの回転変形が部材の剛性劣化にかかわったかをみるために両区間のモーメントー回転角の関係を補修前後で比較して図10に示す。樹脂モルタルで置換された部材両端D/2の区間では、補修後の剛性劣化は見られず、樹脂モルタルの剛性は補修後の部材剛性の劣化に影響したとは考えられない(図10(a), (b))。これに対し、樹脂とコンクリートの境界、すなわちひび割れを含むD/2～Dの区間では、補修後はモーメントー回転角の関係に著しい剛性劣化を生じており(同図(d))、部材中間部からの主筋の抜けだしによる剛性低下を示唆している。

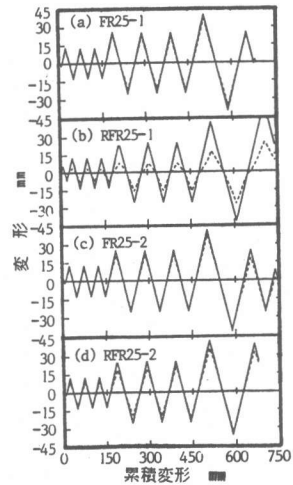


図9 変形成分

3.4 付着性状の回復性

付着性状の回復を意図した補修の効果をみるために、部材角1/100radの2回目の繰返しにおける部材中間部の主筋の応力度分布を図11に示す。部材中間部では、ほとんどの位置で降伏歪を大きく超えなかったため、歪から応力への変換はバイリニヤモデルによった。図中実線と破線は加力方向を区別している。図中(a)(b)は補修前の短柱と長柱の応力度分布で、ある程度の応力勾配が生じていたが、部材端部のみを補修した試験体では

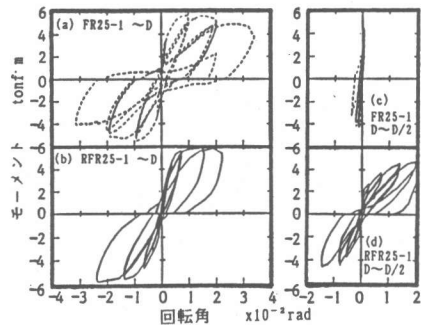


図10 モーメントー回転角関係

(同図(c), (d)) 応力勾配がほとんど生じておらず、加力のピークでは全長にわたって、引張応力が生じた。主筋全長をプレバックドコンクリートで被覆した補修では、同図(e)のようにコンクリートの場合より付着性状が良好であった。部材中央部の被りを局部的に樹脂モルタルで置換した場合は、同図(f)の網をかけた部分で示すように、この部分で主筋応力の急変がみられ、樹脂モルタルの付着に対する効果が表れている。ただし、このような主筋応力の急変で、樹脂モルタルを介してコンクリートに伝達される応力が局所的に大きくなることが考えられる。

部材中央部における主筋とコンクリートの付着応力ーすべり関係を図12に示す。補修前では加力が進むに従って付着破壊が進行した様子がわかる(同図(a), (b))。部材端部のみを補修した

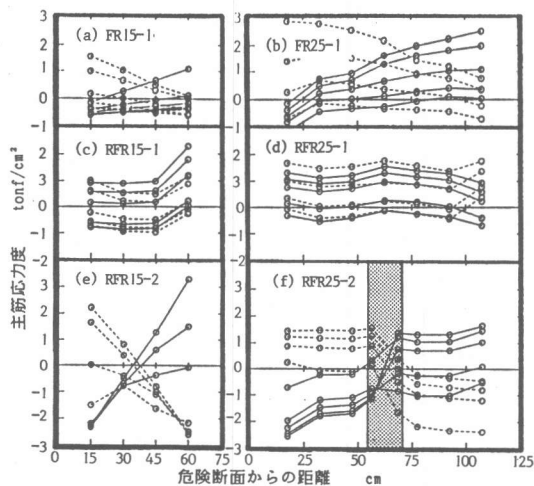


図 1 1 主筋応力度分布

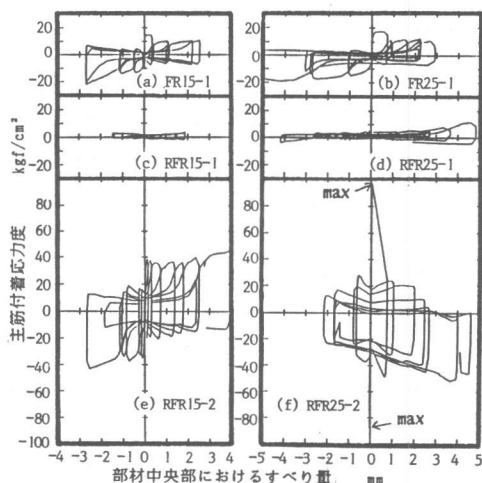


図 1 2 主筋の付着応力-すべり関係

試験体では付着応力はほとんど生じず、主筋が部材中でただ滑っていただけであったことがわかる（同図(c), (d)）。プレバッドコンクリートによる補修を行なった試験体では、付着耐力はコンクリートの場合の約2倍であった（同図(e)）。また、樹脂モルタルによる局部的な付着補修を行なった試験体の結果（同図(f)）から、樹脂モルタルの丸鋼に対する付着強度は90kg/cm²程度であった。

4. まとめ

主筋に丸鋼を用いた柱の曲げ破壊を効果的に修復する補修方法について、実験的に検討し、次の点が明らかとなった。

(1) 損傷の集中する部材端部のみを高強度材料を用いて補修しても、部材中の主筋の付着劣化が回復されないために、補修後部材の復元力特性は補修前に比べ劣化し、エネルギー消費能が低下した。しかし、補修前にコンクリートの圧壊を生じた大変形時では、補修樹脂材料の圧壊が生じにくく、部材の耐力が維持された。これらの傾向は、短柱、長柱とも同様にみられた。

(2) 丸鋼の付着破壊は外観には損傷として現われないが、これを積極的に補修することにより、元の部材と同等以上の性能を得ることが出来た。短柱試験体では、主筋全長にわたって、丸鋼に対する付着耐力が通常のコンクリートよりも高いプレバッドコンクリートで置換する補修によって良好な性状を得た。主筋全長にわたって補修を行なうのは現実的でないと考えられる長柱試験体では、鋼材との接着強度が高い樹脂モルタルで部材中間部の被りコンクリートの一部を置換することによって、付着劣化によるエネルギー消費能の低下を防ぐことが出来た。

(3) 付着破壊した丸鋼とコンクリートの周囲に樹脂を注入する補修は、異形鉄筋の付着割裂破壊の場合と異なり、可能性がない。

謝辞： 実験実施に際して御協力戴いた東京大学建築学科青山研究室の方々、ならびに補修技術と材料を提供して戴いたショーボンド建設（株）技術研究所の方々に感謝致します。

参考文献

- 1) 田才晃、境有紀、小谷俊介、青山博之：付着割裂破壊を対象とした補修に関する実験的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集C、1987、pp.505-506