

論文 エポキシ樹脂注入による既存 RC 梁の補修効果

永山 正幸*1・八十島 章*2・加川 順一*3・荒木 秀夫*4

要旨：地震によって被災した RC 構造物の応急復旧や劣化既存構造物の改修補修方法に関して、エポキシ樹脂注入による補修が行われている。また、既存建築物の中には低強度コンクリートで丸鋼が使われたものが多く存在し、異形鉄筋と抵抗機能も異なることが予想される。本研究はこのことに注目し、コンクリート強度および主筋種類（丸鋼、異形鉄筋）を変動させた梁実験を行った結果、低強度コンクリートで主筋が丸鋼の試験体に対してエポキシ樹脂を注入し補修することによって、付着性能が大幅に改善することを示した。

キーワード：エポキシ樹脂, 内圧充填接合, 補修効果, 曲げ破壊, 付着破壊

1. はじめに

地震によって被災した RC 構造物の応急復旧や既存構造物の改修補修方法として、エポキシ樹脂注入工法がいくつかある。その中で、コンクリート内部または鉄筋位置から 0.06MPa の低圧を掛けて行う内圧充填式工法がある。本工法によって RC 部材の内部ひび割れにまで確実に注入することが可能になる。その結果、微細なひび割れを有するコンクリートの強度上昇や鉄筋の付着力向上や防食・防錆などに有効であると考えられるが、その有効性について実証するとともに適切な使用範囲を明確にする必要がある。

異形鉄筋を用いた既往の研究^{1,2)}では、エポキシ樹脂による補修により耐力の上昇や破壊形式の改善は見られている。しかしながら、既存 RC 建築物では丸鋼の使用されている建物がいまだに多く存在し、しかもコンクリート強度が設計基準強度を下回り、低強度コンクリート³⁾となっているものも少なからずある。

本研究では、エポキシ樹脂注入で後の既存 RC 建築物の梁部材に対する本工法の有効性について検討するものである。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体一覧を表-1 に示す。また、試験体の配筋および注入位置を図-1 に示す。試験体は、内法スパン 900mm(せん断スパン比 2.0)、断面 150×225mm の 1/3 縮尺モデルの梁試験体である。変動因子は、コンクリート強度($F_c=10, 30\text{MPa}$)、主筋の種類(丸鋼 R, 異形鉄筋 D)とし、計 6 体の試験体を作製した。いずれの試験体も付着破壊先行型で設計しているが、エポキシ樹脂注入補修により主筋とコンクリートの付着改善などの補修効果によって、抵抗機構の改善により曲げ破壊型への移行の可能性についても検討する。

低強度コンクリートでエポキシ樹脂注入する RE-10R, RE-10D では、竣工後、長年月を経て中小地震を経験していることを想定し、変形角 1/200rad. で 1 回載荷した後、エポキシ樹脂注入を行うこととした。また、普通強度コンクリートでエポキシ樹脂注入する RE-30R, RE-30D では、竣工後、大地震により安全限界時の損傷を想定し、変形角 1/400rad. を 1 回、変形角 1/200, 1/100rad. を 2 回、1/50rad. を 1 回載荷した後、エポキシ樹脂注入を

表-1 試験体一覧

試験体名	断面 b×D (mm)	設計基準強度(MPa)	補修の有無	主筋	引張鉄筋比 (%)	肋筋	肋筋比 (%)
RE-10R	150×225	10	有	4-φ13	0.88	2-D6@105	0.40
RE-10D				4-D13	0.75		
NO-10R			無	4-φ13	0.88		
NO-10D				4-D13	0.75		
RE-30R	30	有	4-φ13	0.88			
RE-30D			4-D13	0.75			

*1 広島大学大学院 工学研究科 社会環境システム専攻 大学院生 (正会員)

*2 広島大学大学院 工学研究科 社会環境システム専攻 助教 博士(工学) (正会員)

*3 SG エンジニアリング (株) 代表取締役

*4 広島大学大学院 工学研究科 社会環境システム専攻 准教授 工博 (正会員)

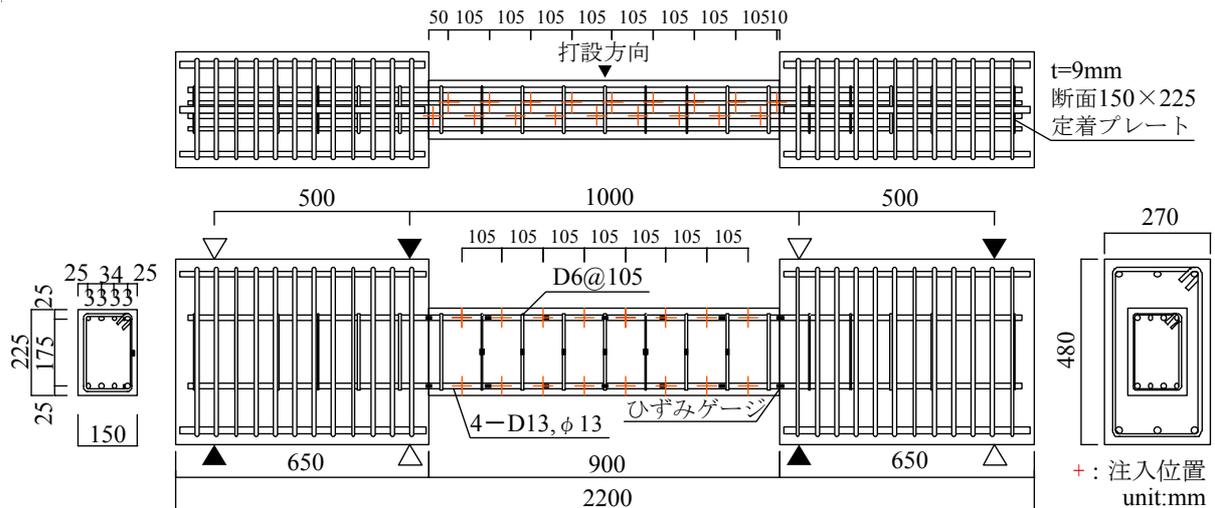


図-1 試験体配筋

表-2 調合計画

設計基準 強度(MPa)	水セメン ト比(%)	単位量(kg/m ³)					細骨材 率(%)	空気量 (%)	スランブ (mm)
		セメント	水	細骨材	粗骨材	混和剤			
10	140	154	215	941	881	2.31	53.0	4.5	178
30	52	356	185	849	900	4.45	48.9	4.0	170

行うこととした。なお、低強度コンクリートで補修無しのNO-10R、NO-10Dは基準試験体である。

2.2 補修方法

補修方法についての流れを示す。①試験体下地平滑仕上げをする。②注入ポイントに穿孔する。孔径は6.5mm、深さ50mm。なお、注入ポイントは、図-1に示すように梁試験体の上下表裏の全方向4面とし、主筋とあばら筋が交差する位置を避けて設定した約105mm間隔及びひび割れ発生位置に注入を行なった。③エポキシ樹脂を吐出圧0.06MPaで加圧注入し、加圧状態で72時間養生し硬化させる。注入加圧器具は注入圧の安定性確保からスプリング方式とした。

2.3 使用材料

コンクリートの調合計画を表-2に、試験体に使用した材料強度を表-3および表-4に示す。なお、コンクリートの設計基準強度は10MPaおよび30MPaである。コンクリート強度は試験体の加力前と試験体の加力後の平均値である。また、エポキシ樹脂の材料強度は、曲げ強度58.8MPa、圧縮強度88.2MPaである。

2.4 加力・計測方法

加力方法は図-1に示すように梁試験体の中心から1000mmの位置とそこからさらに500mmずつ離れた位置で変位制御による大野式の逆対称モーメントの正負交番繰返し载荷を行った。

補修後および補修無しの試験体では、制御用変位計の計測値をモニターしつつ、同位置における変形角 $R=1/400rad$ の1サイクルから始めて、変形角1/200, 1/100,

1/50, 1/33rad.でそれぞれ2回ずつ繰返し载荷を行い、1/20rad.を1回载荷して実験を終了している。計測項目は、ジャッキに取付けたロードセルによる全体荷重、全体変位、梁裏面に設置した変位計による曲げ変形とせん断変形とした。また、付着性状を把握するために図-1に示すように梁の主筋にひずみゲージを貼付した。

表-3 コンクリートの材料強度

呼び名	圧縮強度 (MPa)	割裂強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
Fc10	9.3	1.70	16.7
Fc30	27.0	2.99	27.0

表-4 鉄筋の材料強度

鉄筋種類	降伏 強度 (MPa)	弾性 係数 (GPa)	降伏 ひずみ (μ)	伸び率 (%)
D6(SD295A)	411*	184	4368	11.5
D13(SD295A)	345	187	1993	20.4
ϕ 13(SR295)	321	197	1754	26.6

*0.2%オフセット耐力

3. 実験結果

3.1 破壊状況

各試験体の変形角1/50rad.時におけるひび割れ性状を写真-1~写真-6に示す。低強度コンクリートで丸鋼の

RE-10R では、補修前荷時には変形角 1/200rad.で曲げひび割れが目視により観察された。補修後については、変形角 1/400rad.で曲げひび割れが入り、変形角 1/100rad.で曲げせん断ひび割れが入り、変形角 1/50rad.時に端部で圧壊を起こしながら耐力低下した。補修無し NO-10R については、補修後の試験体とほぼ同様のひび割れ性状であるが、曲げせん断ひび割れの発生領域が梁端部近辺に集中する傾向がある。また、補修後の RE-10R は、補修無しの NO-10R よりもひび割れが分散し幅が小さくなっており、最終状態でも破壊の程度が小さい。

低強度コンクリートで異形鉄筋を使用した RE-10D の補修前荷時には、変形角 1/200rad.で曲げひび割れと曲げせん断ひび割れが発生した。補修後については変形角 1/400rad.で曲げひび割れ、曲げせん断ひび割れが入った。変形角 1/200rad.で付着ひび割れが発生し、2 サイクル目でせん断ひび割れが発生した後に付着ひび割れが急激に進行し、最終破壊に至った。補修無し NO-10D については、補修後の試験体とほぼ同様のひび割れ性状であるが、**写真-2、写真-4**に見られるように破壊の程度は補修後で大きくなっている。

普通強度コンクリートで丸鋼を使用した RE-30R の補修前荷時には、変形角 1/400rad.で曲げひび割れ、

変形角 1/100rad.で付着ひび割れが入り、変形角 1/50rad.に梁端部に部分的な圧壊が生じるものの曲げひび割れの拡大が全体変形を支配している。補修後ではほぼ同様の破壊進行状況であるが、端部に曲げせん断ひび割れが発生するとともに梁端部で圧壊が発生した。

普通強度コンクリートで異形鉄筋を使用した RE-30D は、補修前荷で付着ひび割れとせん断ひび割れが発生し、補修後ではせん断ひび割れが多く入ったが、最終的には付着割裂破壊になった。

3.2 最大耐力

試験体の最大耐力および計算耐力⁴⁾の一覧を表-5に示す。破壊形式は、曲げひび割れ発生後に主筋のスリップで履歴性状が逆S型となり、圧縮側コンクリートの圧壊により耐力低下した試験体を付着破壊とし、引張主筋に沿って小さな斜めひび割れが発生し、部材中央までひび割れが拡大しかぶり部分が剥落することで耐力低下した異形鉄筋の試験体を付着割裂破壊とした。

低強度で丸鋼を使用した RE-10R、NO-10R については補修後の最大耐力が補修無し耐力の約 1.5 倍になっている。補修後の試験体の付着耐力計算値は、丸鋼が異形鉄筋に近づいていると思われるが、曲げ耐力計算値まで達していない。一方、低強度で異形鉄筋を使用した RE



写真-1 RE-10R(補修後)



写真-2 RE-10D(補修後)



写真-3 NO-10R(補修無)

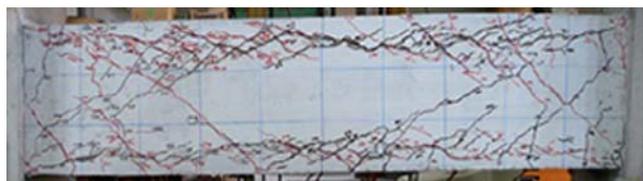


写真-4 NO-10D(補修無)

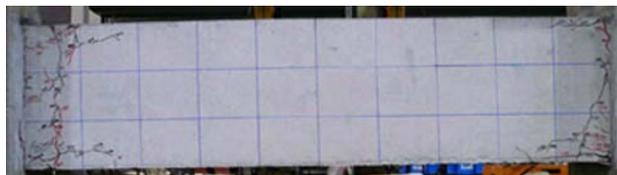


写真-5 RE-30R(左:補修無, 右:補修後)



写真-6 RE-30D(左:補修無, 右:補修後)

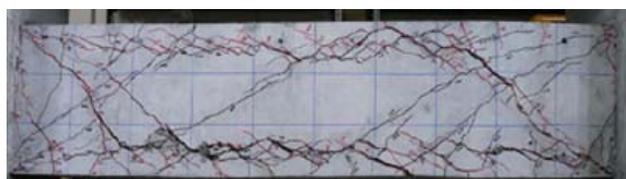


表-5 最大耐力一覧

試験体名	補修無し 最大耐力 時変形角 ($\times 10^{-3}$ rad)	補修無し 最大 耐力 (kN)	補修後最 大耐力時 変形角 ($\times 10^{-3}$ rad)	補修後 最大 耐力 (kN)	終局曲げ 耐力(kN) (断面 解析法)	付着耐力 (kN) (靱性 保証型)	限界 変形角 ($\times 10^{-3}$ rad)	破壊形式*
RE-10R	4.9	17.1	19.1	31.7	67.2	35.9	49.0	B
RE-10D	5.0	31.1	10.1	45.4	68.8	35.9	26.2	BS
NO-10R	19.2	21.6	/	/	67.2	35.9	79.3	B
NO-10D	18.1	43.7	/	/	68.7	35.9	28.0	BS
RE-30R	19.4	46.9	18.7	49.2	69.3	70.4	50.0	B
RE-30D	17.1	75.2	18.8	75.7	70.8	70.4	25.0	FB

* B: 付着破壊 BS: 付着割裂破壊 FB: 曲げ降伏後の付着割裂破壊

-10D, NO-10D については補修後のほうが 4%ほど最大耐力が大きくなっている。低強度コンクリートで異形鉄筋を使用した試験体は靱性保証型指針式で概ね評価できている。普通強度コンクリートの場合はいずれも変形角 1/50rad.以前に最大耐力に達しており、それらと比較すると、普通強度で丸鋼を使用した場合は補修無しよりも補修後のほうが 5%ほど最大耐力が大きくなっている。丸鋼を使用した場合は曲げ耐力計算値を確保できないことがわかる。

3.3 履歴ループ

各試験体のせん断力-変形角関係を図-2 に示す。RE-10R, RE-10D, RE-30R, RE-30D は補修後の履歴ループを示してある。RE-10R の補修後については、最大耐力以降の耐力低下が緩やかであり、1/20rad.で最大耐力の 81%の耐力を保持しており、大きな耐力低下は見られない。RE-10D の補修後については、1/20rad.で最

大耐力の 50%の耐力となり、丸鋼試験体に比べ耐力低下が大きい。補修無しの NO-10R については、早い段階から耐力が上昇せず、一定の耐力を保持しつつ変形のみが進行する性状となっており、補修後の RE-10R と比べて最大耐力が半分ほどである。NO-10D については、1/20rad.で最大耐力の 53%の耐力を保持した。普通強度の RE-30R の補修後については、最大耐力以降の耐力低下は低強度の丸鋼と同様に緩やかであり、1/20rad.で最大耐力の 83%の耐力を保持している。RE-30D の補修後については、最大耐力以降急激に低下し、1/50rad.で最大耐力の 69%まで低下し、さらに 1/20rad.で最大耐力の 41%までの耐力しか保持しなかった。

4. 実験結果の検討

4.1 包絡線

補修の有無について、各試験体の履歴包絡線の比較を

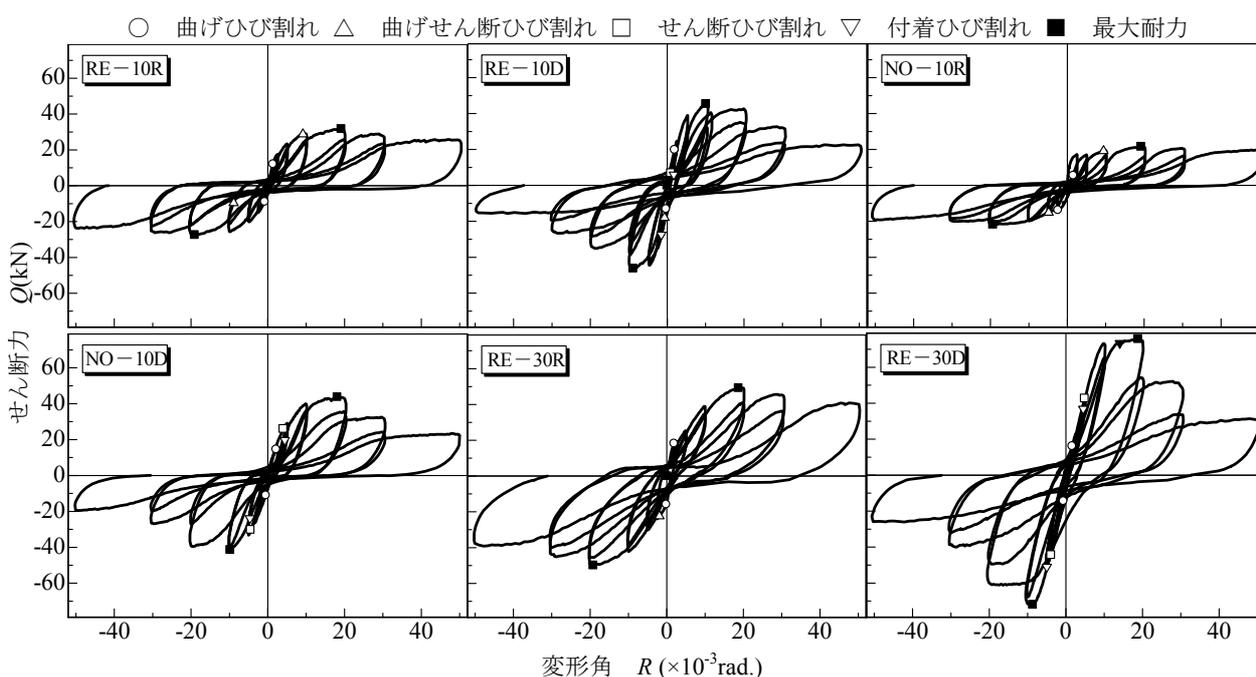


図-2 せん断力-変形角関係

図-3 に示す。低強度、丸鋼試験体について補修の有無を比較すると、ほぼ同じ変形で最大耐力に到達しているが、最大耐力は大幅に回復し、変形が進んでも回復の程度は落ちることはあまりない。

一方、低強度、異形鉄筋使用の試験体では補修試験体 RE-10D が最大耐力までは補修無しの NO-10D に比べ高い剛性を示しているが、最大耐力以降はほぼ同じような包絡線となっている。普通強度試験体では丸鋼、異形鉄筋使用に関わらず、エポキシ樹脂注入による包絡線の違いはあまりない。

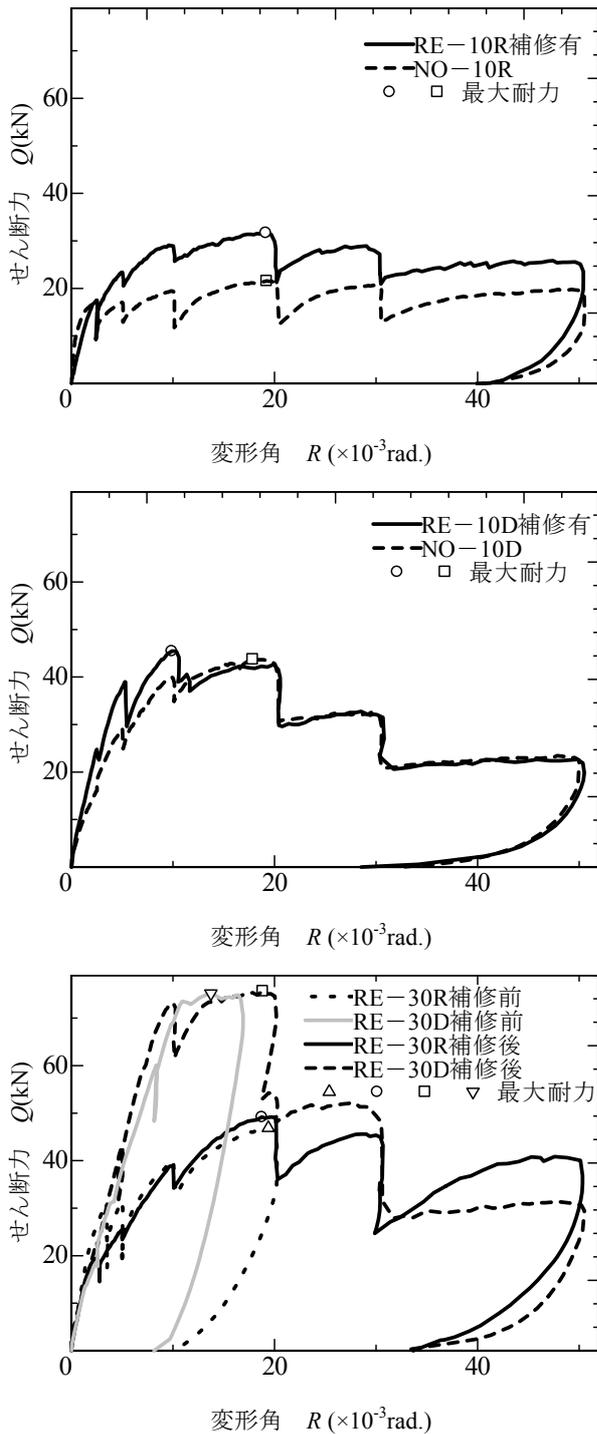


図-3 包絡線

4.2 等価粘性減衰定数

履歴によるエネルギー吸収能力を比較するために、各サイクルの等価粘性減衰定数を算出した。等価粘性減衰定数と変形角の関係を図-4 に示す。低強度、丸鋼試験体について比較すると、補修後の試験体は補修なしに比べ、変形の大きさに関わらず、高いエネルギー吸収能力があることがわかる。この関係は第2ループに関しても同じである。低強度で異形鉄筋を使用した試験体も補修試験体のほうが高いエネルギー吸収能力があることがわかる。また、丸鋼と異形鉄筋使用の試験体で等価粘性減衰定数についてはほぼ15%~20%で推移し、大きな相

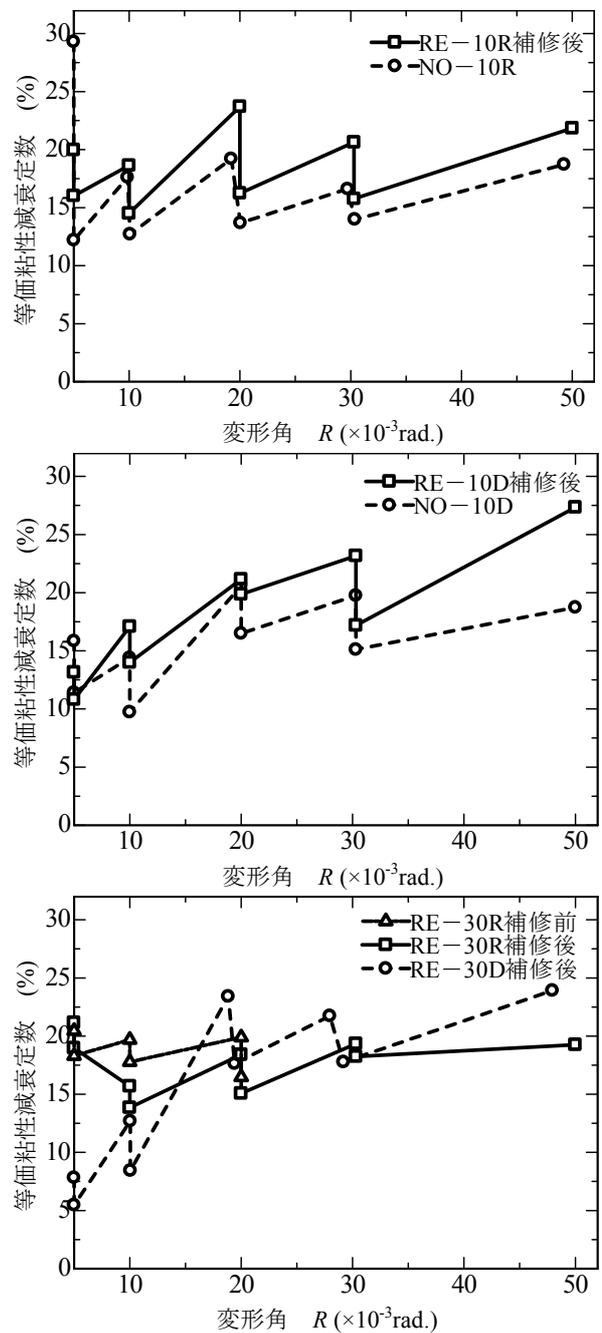


図-4 等価粘性減衰定数の推移

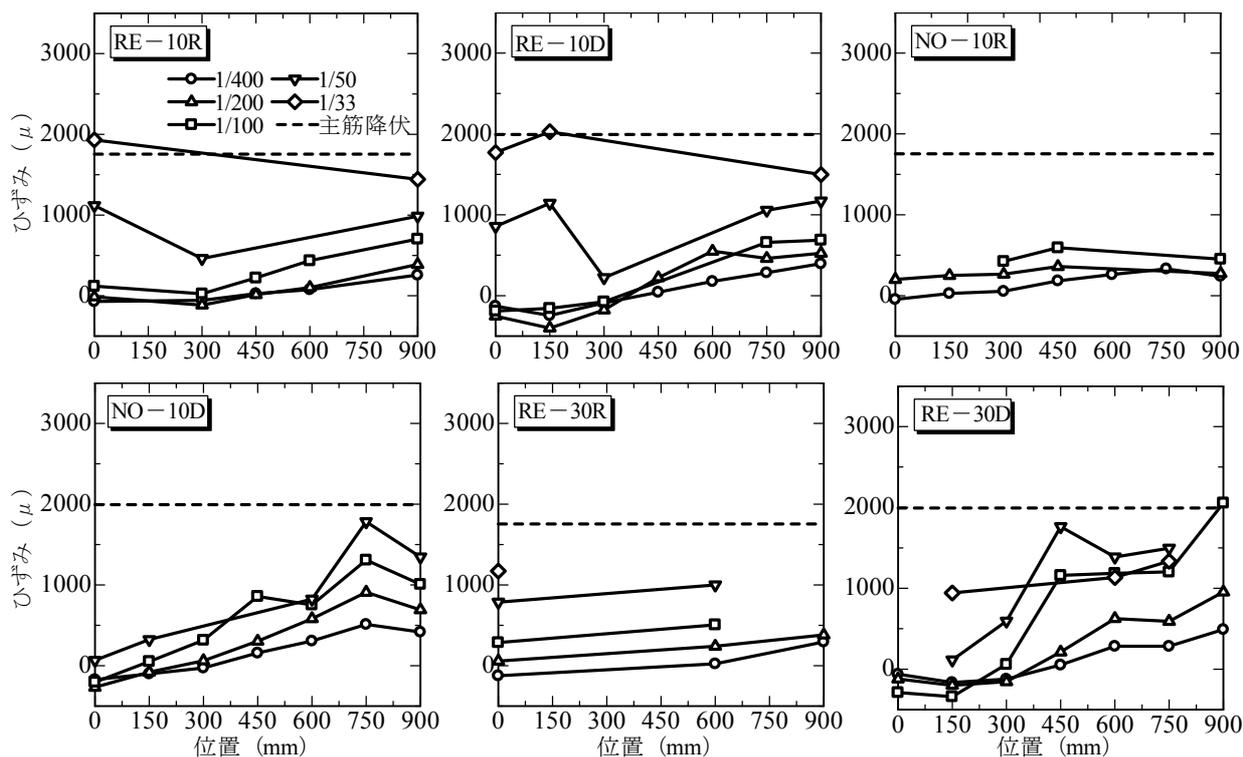


図-5 下端筋のひずみ分布

違は無い。普通強度試験体については、丸鋼は補修無しのものが高くなっている。丸鋼と異形鉄筋使用では異形鉄筋使用のエネルギー吸収能力が高くなっている。

4.3 ひずみ分布

付着力の検討のために、下端筋のひずみ分布を図-5に示す。ひずみゲージは図-1に示すように梁の左端部から150mm間隔で貼付している。なお、RE-10R、RE-10D、RE-30R、RE-30Dは補修後のひずみ分布である。低強度で丸鋼使用のRE-10Rは最終変形角1/33radで主筋が降伏している。低強度、異形鉄筋使用試験体RE-10D、NO-10Dはいずれも降伏ひずみに近くに達している。普通強度で丸鋼使用試験体RE-30は、付着破壊先行のためひずみはあまり大きくなっていない。一方、異形鉄筋使用試験体は1/100radから主筋が降伏している。以上のことから低強度コンクリートに対してはエポキシ樹脂が付着性能を改善させていることがわかる。

5. まとめ

既存RC建物を想定して載荷履歴を経験したRC梁に対して、エポキシ樹脂注入工法の効果を確認するために、付着破壊先行型の試験体を用いた曲げせん断実験を通じて以下の知見を得た。

(1) 低強度コンクリートで丸鋼使用の場合にはエポキシ樹脂注入によって耐力上昇、エネルギー吸収能力向上に対しては有効である。

- (2) 低強度で異形鉄筋使用の場合は初期剛性向上、エネルギー吸収能力向上に有効であるが、最大耐力は回復する程度で補修による大幅な向上はしない。
- (3) 普通強度コンクリート場合には丸鋼および異形鉄筋を使用すると、補修の前後で耐力と靱性能においてほぼ同等の性能回復が可能となる。

謝辞

本実験において、広島大学工学部耐震工学研究室大学院生伊東康貴君および学生に協力を得た。ここに感謝の意を示す。

参考文献

- 1) 田才晃, 小谷俊介, 青山博之, 境有紀: 付着割裂破壊を対象とした補修に関する実験的研究(その1), 日本建築学会大会梗概集, pp.595~596, 1986.7
- 2) 田才晃, 小谷俊介, 青山博之, 境有紀: 付着割裂破壊を対象とした補修に関する実験的研究(その2: 補修効果と耐力上昇の要因), 日本建築学会大会梗概集, pp.505~506, 1987.8
- 3) 既存鉄筋コンクリート造建築物のコンクリート強度に関する研究(その1)設計基準強度の変遷および圧縮強度の分布, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), pp.801~802, 2001.9
- 4) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 1990.11