

# 論文 エポキシ樹脂で補修した RC 部材の曲げせん断性状

伊東 康貴<sup>\*1</sup>・八十島 章<sup>\*2</sup>・加川 順一<sup>\*3</sup>・荒木 秀夫<sup>\*4</sup>

**要旨:** 今日, 地震被害を受けた鉄筋コンクリート構造物や劣化既存構造物の RC 柱に関してエポキシ樹脂を用いた注入補修が行われている。本論文はエポキシ樹脂注入をコンクリート内部または鉄筋位置から低圧をかけて行う内圧充填工法について, せん断破壊型および付着破壊型の鉄筋コンクリート柱試験体に対して繰り返し加力をおこない, その前後の復元力特性やひび割れ性状等の比較を行い, 同工法の補修効果について検証した。

**キーワード:** エポキシ樹脂, 注入補修, 内圧充填, せん断, 付着

## 1. はじめに

地震被害を受けた鉄筋コンクリート構造物の応急復旧や既存構造物の改修補修方法として, 自動式低圧樹脂注入工法が用いられる場合が多い。この工法はもともと外壁の補修・改修方法として提案されたものであり, コンクリート表面のひび割れ位置から樹脂を注入するため, 部材内部のひび割れに対する樹脂充填性に不確定な要素を含んでいる。現在, 鉄筋コンクリート部材内部のひび割れに対して確実に樹脂注入する方法として樹脂注入をコンクリート表面からではなく, コンクリート内部または鉄筋位置から低圧(0.06N/mm<sup>2</sup>)を掛けて行う方法がある。この工法によってエポキシ樹脂を部材内部のひび割れや鉄筋との付着面, 補修材としてのモルタルとコンクリートとの接合面に確実に浸透させ, 鉄筋コンクリート部材の強度回復・増進, 内部鉄筋の防錆, 補修材の剥落防止効果を期待する

ものである。本工法は既に実施施工されている一般的な工法ではあるが, その耐震性に関する検証は未だに行なわれておらず, 地震時における構造物の耐震性能を左右する部材の性能確認は急を要する。そこで本研究では構造物の主要部材である柱を用いて破壊実験を行い, その後破壊した試験体に本工法による補修を行った後に同様の加力を行うことによって補修の前後における耐力等の回復効果を検討する。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体

本研究では 3 体の試験体を作成した。試験体一覧を表-1 に示す。本研究では破壊形式に与える影響を検討するためにせん断破壊, 付着破壊となる試験体を設計した。なお, せん断破壊先行型では軸力による影響を検討するため, 同形状, 同配筋の 2 体の試験体を作製した。

表-1 試験体一覧

試験体名	主筋	帯筋	断面 $b \times D$ (mm)	軸力 (kN)	軸力比
IPH06-01	12-D19 (SD345)	2-6 $\phi$ @100 (SS400)	300 $\times$ 300	189	0.1
IPH06-02				0	0
IPH06-03	14-D19 (SD345)	2-D10@80 (SD390)		189	0.1

\*1 広島大学 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 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 工学研究科社会環境システム専攻 准教授 工博 (正会員)

表-2 設計耐力一覧

試験体名	終局せん断耐力(kN) (靱性保障型)	終局曲げ耐力(kN) (断面解析法)	付着耐力(kN) (終局強度型)	せん断 余裕度	付着 余裕度
IPH06-01	141.0	178.5	146.1	0.78	0.82
IPH06-02	141.0	165.5	146.1	0.85	0.88
IPH06-03	268.1	220.9	180.5	1.21	0.82

試験体の設計耐力一覧を表-2に示す。ここで終局曲げ耐力は、ファイバーモデルによる断面解析法、終局せん断耐力については靱性保証型設計指針<sup>1)</sup>、付着耐力については終局強度型設計指針<sup>2)</sup>より計算した。IPH06-01, IPH06-02の2体については、せん断破壊が先行するよう、IPH06-03については、付着破壊が先行するよう設計した。作成した試験体の配筋図を図-1に示す。試験体は、柱長さ1000mm、断面300×300mmの試験体で、IPH06-01,02については帯筋間隔100mm、IPH06-03については80mmとしている。また3試験体とも、固定用スタブを有するものである。

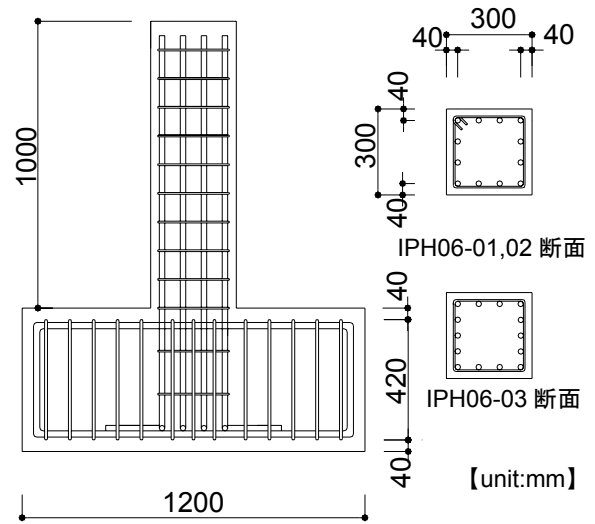


図-1 試験体配筋図

## 2.2 補修方法

破壊試験後の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。  
 ②注入ポイントに穿孔。孔径は7mm、深さ50mm。注入ポイントは200mm間隔で、ひび割れ位置及び主筋に沿った位置とする。  
 ③ポリマーセメントペーストをひび割れ部分に塗布。樹脂漏れ防止を行うとともに鉄筋の防錆効果及び中性化抑制を行なう。  
 ④ポリマーセメントモルタルで断面欠損部分を修復後24時間養生。  
 ⑤エポキシ樹脂を吐出圧0.06N/mm<sup>2</sup>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。また注入時は導入軸力を除荷している。

## 2.3 使用材料

試験体に使用した材料の強度を表-3および表-4に示す。また補修材の材料強度を表-5に示す。なお、コンクリートの設計基準強度は21(N/mm<sup>2</sup>)である。コンクリート強度は加力前試験体の28日材齢時のものである。

表-3 コンクリートの材料強度

試験体名	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
IPH06-01	21.4	2.49
IPH06-02	22.3	1.88
IPH06-03	27.5	2.08

表-4 鉄筋の材料強度

鉄筋種類	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
φ6(SS400)	690	779
D10(SD390)	482	613
D19(SD345)	376	537

表-5 補修剤の材料強度

補修材種類	曲げ強度 (N/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )
エポキシ樹脂	58.8	83.3
ポリマーモルタル	6.2	32.4

## 2.4 加力・計測方法

試験体に表-1に示す一定軸力を载荷した後に、柱高さ800mmの位置で水平ジャッキの変位制御による正負交番繰返し水平载荷を行った。

補修前の加力は、かぶり剥落後に用いる断面修復材使用量を抑制するためにIPH06-01とIPH06-02は1/50rad.まで、IPH06-03は1/25rad.まで加力した。载荷装置を図-2に示す。水平载荷では、同図中の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 $R=1/800rad.$ のサイクルから始めて、変形角を倍増させていき、それぞれ2回繰返しを行っている。载荷中の計測方法として、荷重はジャッキに取付けたロードセルにより検出し、制御用に加えて設置した変位計により柱各所の水平変位と鉛直変位を測定した。また、柱の主筋、帯筋にひずみゲージを貼付し、ひずみデータを計測している。

## 3. 実験結果

### 3.1 破壊状況

各試験体のひび割れ性状を写真-1、写真-2、写真-3に示す。IPH06-01、02については変形角1/50rad.時、IPH06-03については変形角1/25rad.時の写真である。IPH06-01の補修前は、大きなせん断ひび割れが入り、せん断破壊している。

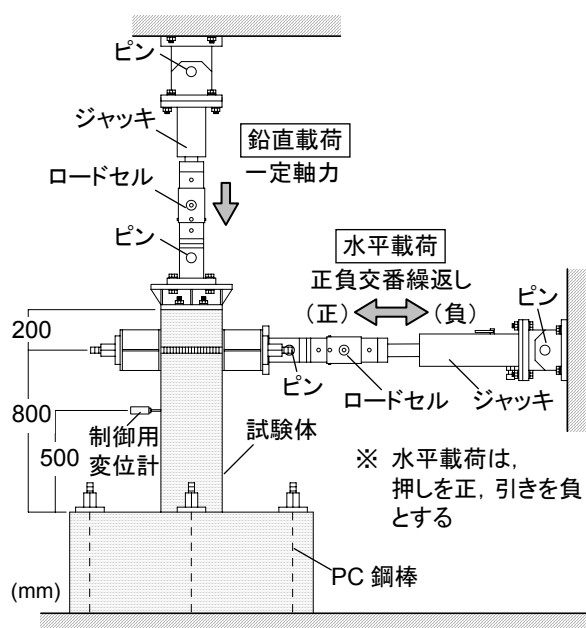


図-2 载荷装置

補修後については、補修前とは異なりせん断ひび割れが分散する傾向にあったが最終的には補修前と同じようにせん断破壊に至った。IPH06-02では、補修前後ともIPH06-01ほど大きなひび割れは見られずせん断破壊をおこした。IPH06-03については、補修前は変形角1/25rad.あたりに主筋に沿った付着ひび割れが見られたが、付着破壊には至らずせん断ひび割れが進展し、柱脚部が圧壊している。最終的には曲げ破壊を起こした。補修後については、補修前に見られた、付着ひび割れはほぼ見られなかったが最終的には同じように曲げ破壊に至った。いずれの試験体においても、補修後のひび割れ発生位置は補修位置ではなく補修位置近くの無補修の部分であった。

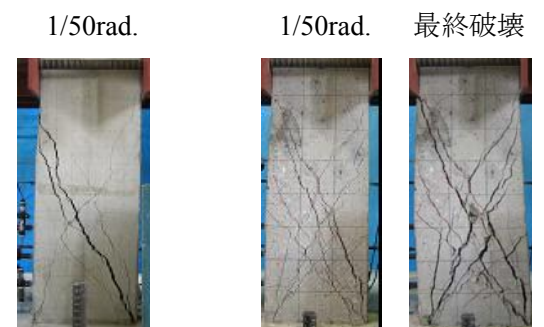


写真-1 IPH06-01(左:補修前, 右:補修後)

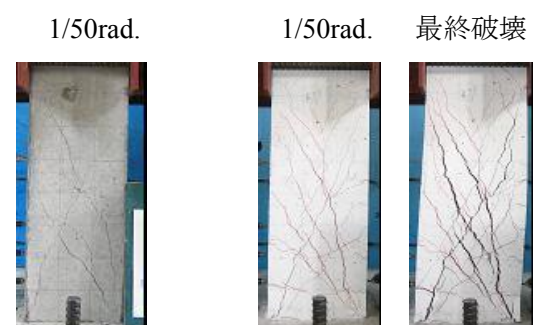


写真-2 IPH06-02(左:補修前, 右:補修後)

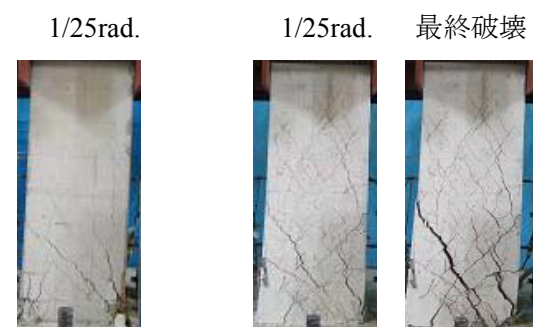


写真-3 IPH06-03(左:補修前, 右:補修後)

表-6 最大耐力一覧

試験体名		補修前最大耐力 (kN)	最大時変形 ( $\times 10^{-3}$ rad.)	補修後最大耐力 (kN)	最大時変形 ( $\times 10^{-3}$ rad.)	耐力上昇率 (%)	破壊形式
IPH06-01	正	184.3	15.8	184.6	20.1	0.2	せん断
	負	-190.7	-9.7	-185.8	-10.3	-2.6	
IPH06-02	正	177.5	19.6	185.0	15.4	4.2	せん断
	負	-186.3	-10.7	-193.0	-20.2	3.5	
IPH06-03	正	232.0	16.4	233.9	20.0	0.8	曲げ
	負	-233.9	-19.1	-248.9	-20.0	6.4	

### 3.2 最大耐力

補修前・補修後の最大耐力および最大耐力時の変形角を表-6に示す。IPH06-01試験体において、正側では最大耐力は補修前とほぼ同程度まで回復し、負側では補修前の耐力をわずかに下回っている。IPH06-02の試験体においては、正側、負側において補修後の最大耐力が補修前の耐力を上回っている。IPH06-03の試験体においても、正側負側両方で補修前の最大耐力をわずかに上回っている。全体的に平均してみると補修後の最大耐力は補修前と比べて約2%程度上昇している。

### 3.3 履歴曲線

各試験体のせん断力-変形角履歴曲線を図-

3に示す。なお、上段は補修前、下段は補修後の試験体を示している。IPH06-01試験体では、変形角  $1/200$ rad.の1サイクル目でせん断ひび割れが発生し、 $1/50$ rad.でせん断ひび割れが拡大すると共に耐力低下を起こしてせん断破壊した。補修後については、変形角  $1/100$ rad.でせん断ひび割れが発生し、その後は補修前とほぼ同じような履歴を描いた。主筋についても、補修前後でほぼ同じ位置で降伏している。なお、補修前の試験体では負側の変形角  $1/50$ rad.に向かう途中で耐力が大きく低下したためここで载荷を終了しているが、補修後は $1/50$ rad.でも耐力低下せずに耐力を維持して変形角  $1/25$ rad.で大きく耐力が低下している。

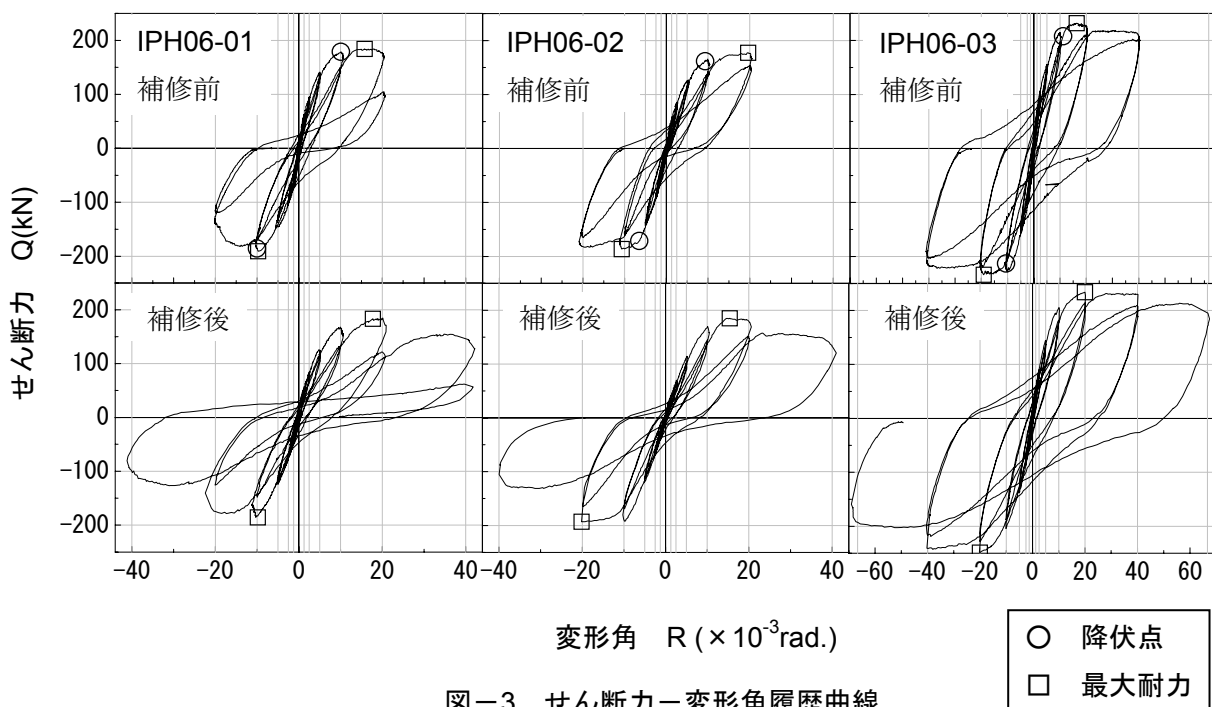


図-3 せん断力-変形角履歴曲線

IPH06-02 についてもほぼ同じような履歴を描き、主筋の降伏変位もほぼ同じである。なお、IPH06-02 において変形角 1/50rad.の時点で耐力の低下は見られなかったが、IPH06-01 と比較するため同じ変形角で载荷を行っている。IPH06-03 については、変形角 1/50rad.で付着ひび割れが見られ、同時に圧縮側柱脚部で圧壊が起こった。その後、変形角 1/25rad.でさらに圧壊が進展し曲げ破壊を起こしている。補修後については、付着ひび割れおよび圧壊はあまり見られなかったが、最終的に曲げ破壊を起こしている。各試験体を通して、補修前補修後ともに同じような履歴曲線を描いた。

#### 4. 実験結果の検討

##### 4.1 包絡線

各試験体のせん断力-変形角の履歴包絡線を比較して図-4 に示す。IPH06-01 試験体では、正側では、補修前と比較すると耐力は、ほぼ同程度まで回復している。負側では、補修前は変形角 1/50rad.手前で耐力が低下しているが、補修後では耐力低下が見られず、その次のサイクルで大きく耐力低下をおこしている。また補修前後でほぼ同じ変形で最大耐力に到達している。補修後に耐力の上昇が見られなかったのは、補修後の载荷において、補修された部分ではひび割れは発生しなかったが、そこを避けてひび割れが起こり補修前とほぼ同じ破壊をしたためだと考えられる。一方、軸力なしの IPH06-02 の試験体では、正側については、ほぼ同じ時期に最大耐力に到達し、補修後にわずかに耐力が上昇している。負側では補修後のほうが後に最大耐力に到達している。耐力も補修前と比べて上昇している。IPH06-01 および IPH06-02 の包絡線を見比べるとほぼ同じ形状を示していることから、軸力による影響はほぼ見られないと考えられる。IPH06-03 の試験体については、補修前後でほぼ同じ変位で最大耐力に到達していることがわかる。また耐力も補修前と比べ、ある程度上昇している。最大耐力到達後の耐力低下についても

正側、負側ともに補修前と比べると補修後のもののほうが緩やかである。また補修前の試験体で見られた主筋に沿った付着ひび割れが補修後には、ほとんど見られなかったことから、補修によってエポキシ樹脂が主筋回りに浸透して鉄筋の付着性能が向上したと考えられる。

##### 4.2 剛性

剛性については、IPH06-01, 02, 03 のいずれの試験体においても、全体的に補修前と比べると剛性は幾分低下しているものの、ほぼ同程度に回復していることがわかる。

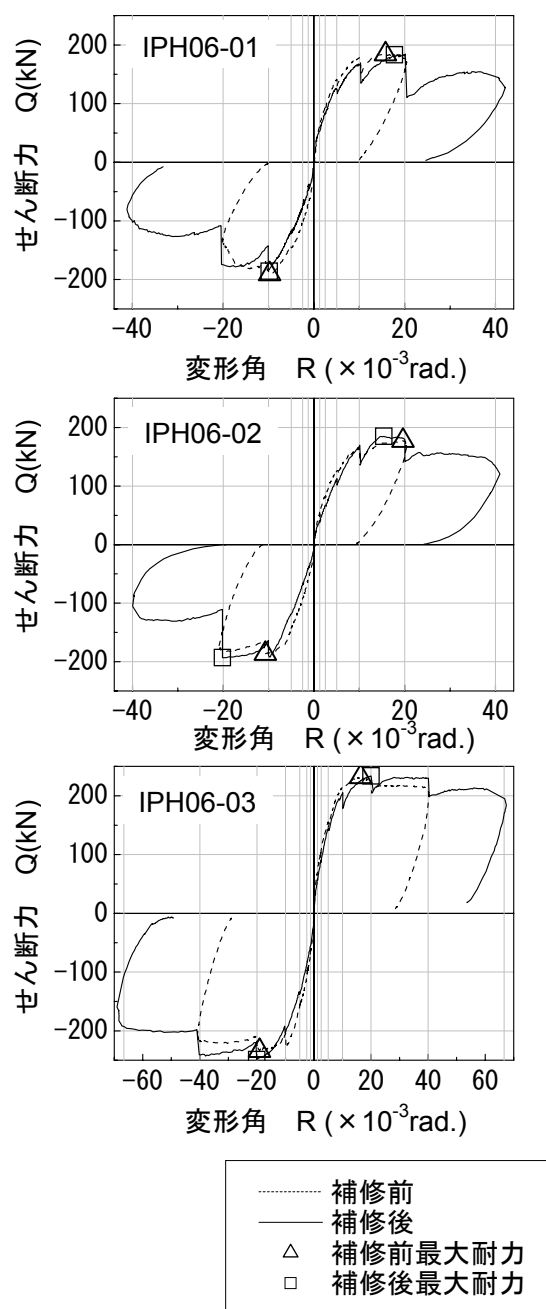


図-4 せん断力-変形角関係の包絡線

剛性が若干低下する理由としては、注入補修に使用したエポキシ樹脂の弾性係数がコンクリートの弾性係数と比べると小さいことや、スタブ中の定着筋回りへの樹脂注入が十分ではなかったため、抜け出し分の変形が大きくなったと推定される。

#### 4.3 エネルギー吸収能力

履歴によるエネルギー吸収能力を比較するために、各サイクルの履歴曲線毎に等価粘性減衰定数を算出した。その値を変形角との関係として図-5に示す。IPH06-01について、等価粘性減衰定数は、変形角  $1/100\text{rad}$  までは補修前とほぼ同等の値を示していることがわかる。IPH06-02については、変形角  $1/200\text{rad}$  までは補修前後でほぼ同じ値を示しているが、変形角  $1/100\text{rad}$  でエネルギー吸収能力に大きな差が開いていることがわかる。これは補修後の試験体の降伏が変形角  $1/100\text{rad}$  より後で発生するためである。IPH06-03については、変形角  $1/50\text{rad}$  で差が開いている。これもIPH06-02と同じで主筋の降伏発生時の伸びに起因すると考えられる。全体的にみて補修後のほうがエネルギー吸収量が若干低下している原因として、履歴曲線を見比べると3試験体とも補修後にわずかにスリップ型となっており、等価粘性減衰定数に差が出たと考えられる。履歴曲線がスリップ型を描いた原因としては、樹脂注入が鉄筋周りの極微細なひび割れにまで十分に行われなかったことが原因であると推察できる。

#### 5. まとめ

載荷履歴を受けたRC柱に対して、本実験における、補修工法の効果を確認するために、せん断破壊、付着破壊先行型の試験体を用いた載荷実験を通じて以下の知見を得た。

- ・本実験の範囲において、この補修を行うことで耐力、靱性能、エネルギー吸収能力が補修前とほぼ同じまで回復することが確認できた。
- ・せん断破壊試験体において、補修効果に対する軸力の影響は見られない。

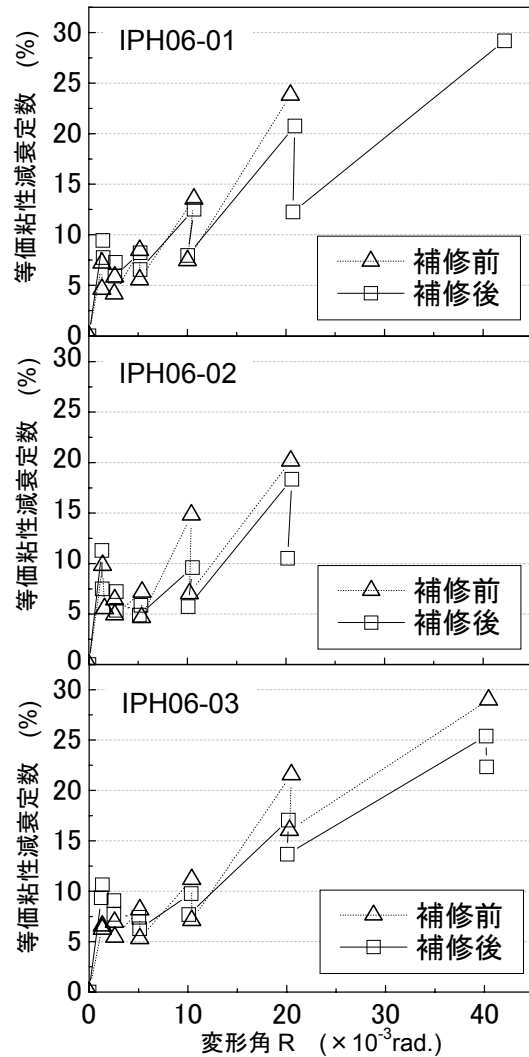


図-5 等価粘性減衰定数の推移

- ・付着型試験体において、付着ひび割れの発生が抑えられる傾向がある。
- ・今後、曲げ破壊型の試験体や、被災度や注入量の違いによる補修効果の変化についても検討していく必要がある。

#### 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) 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
- 2) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造物の終局強度型耐震設計指針・同解説, 1990.11