

部分的に主筋の付着を除去した鉄筋コンクリート造梁の補修後の構造性能に関する研究

服部 翼* 前川利雄* 坂田弘安**

部分的に主筋の付着を除去した RC 梁の補修後の構造性能を把握することを目的として、変形角 1%以内の繰り返し載荷による損傷を与えた RC 梁試験体に対し、ひび割れ補修を行い、再度繰り返し載荷実験を行った。実験の結果、補修後においても主筋の付着除去による損傷抑制効果が確認された。また、補修により変形角 1.0%時の割線剛性、履歴吸収エネルギー量、および等価粘性減衰定数の回復効果を確認した。加えて、3次元有限要素解析による検討では、設定した解析条件によって実験結果を再現できることを確認し、また、ひび割れ補修の有無によって、再載荷時の初期剛性、および割線剛性の低下量に違いがあることを確認した。

キーワード：鉄筋コンクリート造梁、付着除去、損傷抑制、ひび割れ補修、3次元有限要素解析

1. はじめに

近年、建築物の長寿命化が求められており、建築物が大地震を経験した後においても継続的に使用できるよう、修復性の向上が期待される。しかしながら、鉄筋コンクリート（以下、RC）構造では、変形の増大に伴い、ひび割れが部材全体にわたって広範囲に生じるため、補修に要する期間および費用が過大となってしまう、継続使用性に問題が生じる可能性がある。そのため、地震による損傷の範囲を抑制し、修復しやすい RC 部材を実現することがレジリエンス性能に富んだ RC 造建築物の実現につながると考えられる。

筆者らはこれまで、RC 部材において主筋の付着を除去した場合、損傷範囲がヒンジ位置に集中すること^{1), 2)}に着目して、部分的に主筋の付着を除去した RC 梁の研究を進めてきた³⁾⁻⁵⁾。既往の研究³⁾⁻⁵⁾において、梁のひび割れ性状に与える影響が比較的大きいと考えられる梁四隅の主筋の付着を部分的に除去し、かつ梁スパン中央部に主筋を定着する区間を設けることで、通常の付着性状を有する従来型の RC 梁（以下、単に従来型 RC 梁）と同等の構造性能を保持しつつ、梁に生じる損傷範囲を抑制できることを確認した。

一方で、主筋の部分的な付着除去により、ヒンジ位置に生じるひび割れの幅は従来型 RC 梁よりも大きくなる。地震や経年劣化により損傷した RC 構造物の簡便な補修方法として用いられるエポキシ樹脂注入工法は、既往の研究⁶⁾などにより、補修を施すことで耐力、靱性能、エネルギー吸収能力といった構造性能が補修前とほぼ同程度まで回復することが確認されているが、主筋の付着を除去し、損傷を一部に集中させた RC 梁の補修後の構造性能は明らか

かではない。

そこで本研究では、レベル 2 地震動に対する設計クライテリアとして最大層間変形角 1%が一般的に用いられていることを踏まえ、変形角 1%以内の多数回繰り返し載荷実験を行った RC 梁試験体に対し、エポキシ樹脂注入工法による補修を施し、再び多数回繰り返し載荷実験を行うことで、部分的に主筋の付着を除去した RC 梁の補修後の構造性能を把握する。また、実験時の載荷履歴の内、ひび割れ補修を行わない場合の 3次元有限要素解析を実施し、ひび割れ補修の有無による構造性能の違いについて検討する。

2. 実大スケール RC 梁試験体を用いた実験

本章では、部分的に主筋の付着を除去した実大スケールの RC 梁試験体に対し、変形角 1%以内の多数回繰り返し載荷による損傷を与えた後、補修を施し、再度載荷実験を行うことで、部分的に主筋の付着を除去した RC 梁の補修後の構造性能を把握する。

2.1 実験概要

2.1.1 試験体概要

試験体諸元を Table 1 に、試験体概要を Fig. 1 に示す。また、試験体に用いたコンクリート、鉄筋、および補修に用いたエポキシ樹脂の材料特性を Table 2 に示す。試験体数は 1 体であり、試験体名末尾の Rep は補修であることを意味している。試験体は超高層 RC 建築物を想定した実大スケールの梁部材と加力および固定用のスタブから構成される。接合部内の損傷を抑制するという観点から、スタブ際から 750mm の位置において梁 2 段筋をカットオフし、ヒンジリロケーション梁⁷⁾とした。2 段筋カットオフ位置から中央定着部までの範囲において、梁断面四隅の主筋をシース管に通し、シース管端部をテープで塞ぐことで主筋の付着を除去した (Photo. 1 (a))。

* 技術本部 技術研究所 防災技術研究室
** 東京工業大学 環境・社会理工学院建築学系
教授・工博

中央定着部は梁スパン中央部から両側 310mm (計 620mm) の主筋の付着を除去しない区間であり、定着区間両端には上下の主筋をつなぐ鋼板 (以下、定着鋼板) を設置し、定着力を確保している。なお、定着鋼板は文献 8) を参考に設計した。定着鋼板は機械式定着具、および機械式継手を用いて挟み込み、エポキシ樹脂を注入することで固定した (Photo.1 (b))。

Table 1 試験体諸元

試験体名	補修前	DB-R-PA	
	補修後	DB-R-PA-Rep	
梁	幅×せい (mm)	550×900	
	部材長さ (mm)	5000	
	主筋	端部/引張鉄筋比	4+4-D38(SD490)/0.022
		中央部/引張鉄筋比	4-D38(SD490)/0.011
	あばら筋	端部/せん断補強筋比	4-D16@150(USD685)/0.0096
		中央部/せん断補強筋比	4-D16@200(USD685)/0.0072
	定着鋼板 幅×高さ×厚さ (mm)	100×804×25(SS400)	
せん断スパン比	3.31		
スタブ	幅×せい (mm)	1250×1750	
	全主筋	20-D32(SD390)	
	せん断補強筋	6-D13(SD295A)	
コンクリート設計基準強度 (N/mm ²)		50	

Table 2 材料特性

(a) コンクリート

試験体	材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	割裂引張強度 (N/mm ²)
DB-R-PA	40	61.8	34.7	3.92
DB-R-PA-Rep	159	69.1	34.2	3.64

(b) 鉄筋

試験体	鋼種	使用箇所	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
DB-R-PA	D38(SD490)	梁主筋	527	701	181
	D16(USD685)	梁せん断補強筋	725	888	195

(c) エポキシ樹脂

試験体	固体比重	引張強さ (N/mm ²)	曲げ強さ (N/mm ²)	圧縮降伏強さ (N/mm ²)	圧縮弾性率 (kN/mm ²)
DB-R-PA	1.15	40	59	70	1.8

2. 1. 2 試験体の設計

試験体は梁端から 750mm の位置をヒンジ想定位置として、梁端からヒンジ想定位置までの主筋を 4+4-D38 とし、ヒンジ想定位置で 2 段筋をカットオフすることで中央部の主筋を 4-D38 とした。この設計概念は主筋を全長にわたって 4+2-D38 とした梁と耐力が同等となるように設計することである。この設計概念の詳細は文献 9) を参照されたい。なお、2 段筋は端部に機械式定着具を設置するこ

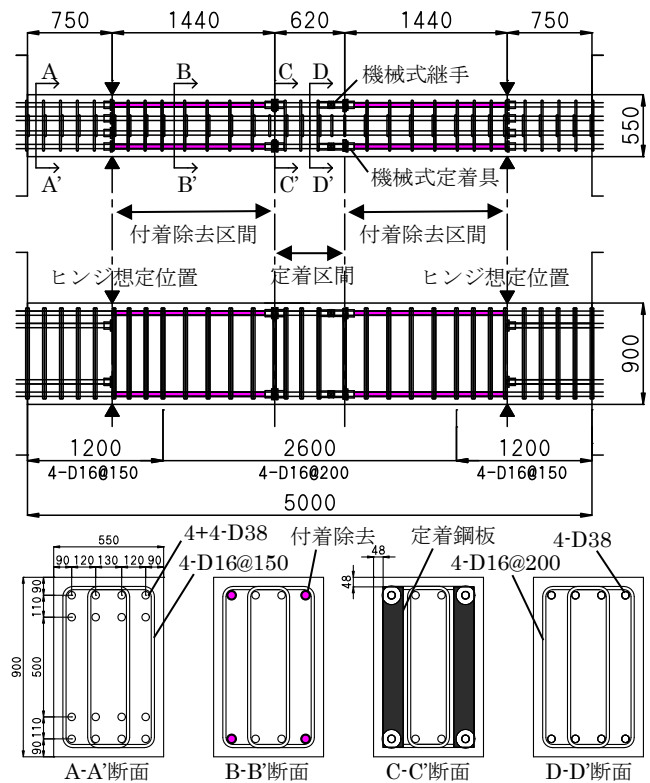


Fig. 1 試験体概要 (単位: mm)



(a) 主筋の付着除去の様子 (b) 中央定着部の様子

Photo. 1 試験体詳細

とで定着力を確保している。Table 3 に試験体の各強度算定値を示す。梁端の曲げ終局強度 bM_u 、およびヒンジ想定位置の曲げ終局強度 bM_k は文献 10) を用いて算定した。梁端の曲げ終局強度時せん断力 bV_u 、およびヒンジ想定位置の曲げ終局強度時せん断力 bV_k はそれぞれの位置から梁スパン中央までの長さで除すことで算定した。また、 bV_k に対する bV_u の比 (bV_u / bV_k) を梁端耐力余裕度とした。せん断終局強度 Q_{su} は文献 11) を用いて算定した。Table 3 に試験体のせん断余裕度 (Q_{su} / bV_k) を併せて示す。なお、強度算定時のコンクリートの圧縮強度、および鉄筋の降伏強度は材料試験値を用いた。また、中央定着区間の長さは、文献 10) に示される必要定着長さの算定式において、定着鋼板を信頼のできる機械式定着具として算定した。

Table 3 試験体の各強度算定値

bM_u (kNm)	bM_k (kNm)	bV_u (kN)	bV_k (kN)	bV_u / bV_k	Q_{su} (kN)	Q_{su} / bV_k
3268	1753	1307	1002	1.30	1451	1.45

2. 1. 3 載荷方法

載荷装置を Fig.2 に示す. 載荷は, 片方のスタブを架台に固定し, もう片方のスタブを加力梁を介して 2 本のジャッキにより鉛直方向に加力した. 2 本のジャッキを加力スタブの平行が維持されるように制御することで, 梁に逆対称曲げを作用させた. また, 加力梁にはパンタグラフを取付け, 面外方向の変形を拘束した.

載荷履歴を Fig.3 に示す. 載荷は両スタブの相対鉛直変位を部材長さで除すことで算出した変形角 R を用いた正負交番繰り返し漸増載荷とした. 補修前載荷では $R=0.0625\%$ を 1 回, $R=0.125, 0.25\%$ をそれぞれ 2 回繰り返した後, $R=0.5, 1.0\%$ をそれぞれ 10 回繰り返した. 補修前載荷終了後, ひび割れ補修を実施し, その後, 補修後載荷として, $R=0.0625\%$ を 1 回, $R=0.125, 0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0\%$ をそれぞれ 2 回繰り返した. なお, 補修前載荷における $R=0.5, 1.0\%$ の繰り返し回数 10 回は, 既往の研究¹²⁾において, 多数回繰り返し載荷を受けることで, 残留ひび割れ幅が大きくなったと報告されていることを踏まえて設定した.

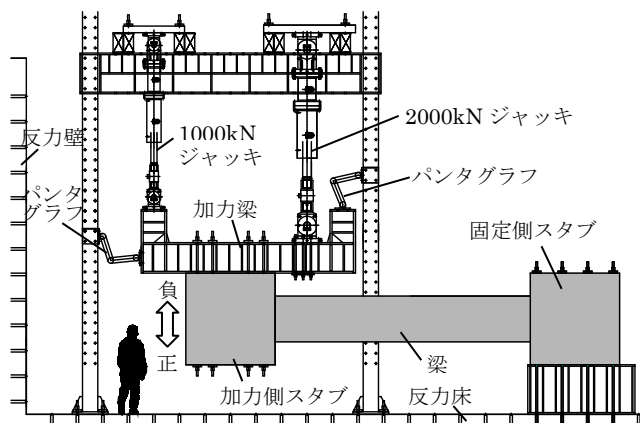


Fig.2 載荷装置図

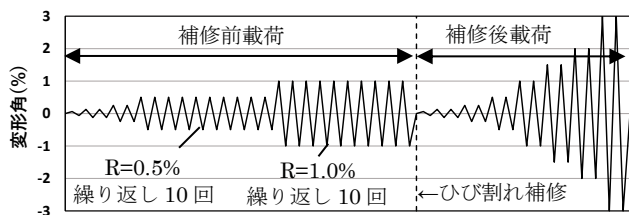


Fig.3 加力サイクル

2. 1. 4 補修概要

本研究では, $R=1.0\%$ 以内の多数回繰り返し載荷を行った梁試験体に対し, エポキシ樹脂を用いた自動低圧式樹脂注入工法による補修を行った. ここで, 文献¹³⁾に示される曲げ降伏先行型部材の復元力特性と限界状態 (損傷度) の関係の概念図を Fig.4 に示す. 本研究で想定する梁の損傷状態は修復限界 I であり, これは残留ひび割れ幅が 1mm を超えない程度の損傷で, 主筋は降伏するが, かぶりコンクリートの圧壊は生じていない状態である.

ひび割れ補修の状況を Photo.2 に示す. はじめに, ひ

び割れ上に注入器具を取付けるための台座を 200~300mm 間隔で取付け, ひび割れの表面に沿ってシーリング材を塗布した. 次に, シーリング材が硬化したことを確認し, 注入器具を台座に取付け, エポキシ樹脂を注入した. 最後に, 注入器具内のエポキシ樹脂量が変化しなくなったことを確認し, 注入器具を取外して表面の仕上げを行った. 本研究では, 補修前載荷終了後において, 幅が 0.1mm 以上のひび割れを補修の対象とし, 梁全面に対して補修を行った. なお, 補修は補修前載荷終了後, 残留変形をゼロに戻し, 試験体を加力装置から取り外した状態で実施した.

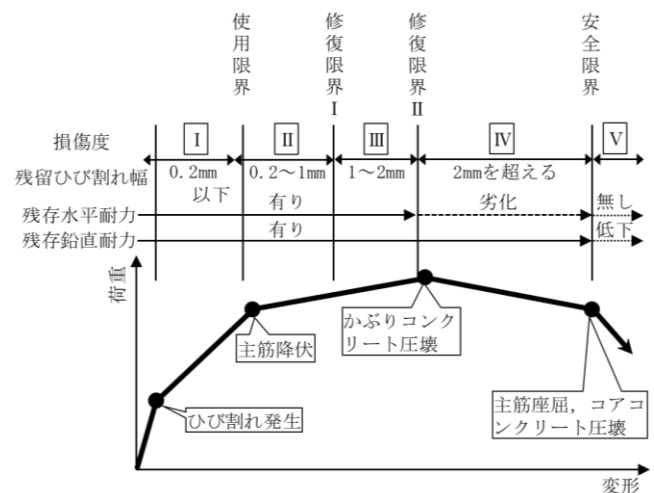


Fig.4 復元力特性と限界状態 (損傷度) の関係の概念図¹³⁾



Photo.2 補修状況

2. 2 実験結果

2. 2. 1 せん断力-変形角関係

せん断力-変形角関係を主筋の降伏状況と共に Fig.5 に示す. 図中にはヒンジ想定位置での曲げ終局強度時せん断力 V_k を赤破線で示している. また, 主筋の降伏状況は, 付着除去を施した外側主筋と, 付着除去を施していない内側主筋に分けて示している. なお, 補修前載荷終了時に残留変形をゼロに戻しているため, 補修後載荷開始時点において残留変形は生じていないものとした.

最大耐力は補修前載荷において正側 951kN, 負側-916kN, 補修後載荷において正側 1024kN, 負側-1049kN であり, $R=3.0\%$ の大変形域に至るまで安定した履歴ループを描い

た. また, 補修後載荷において最大耐力がヒンジ想定位置での曲げ終局強度時せん断力 bV_k を上回った. 加えて, 補修前載荷では付着除去を施していない内側主筋のみが降伏し, 付着除去を施した外側主筋は補修後載荷において降伏しており, 付着除去の有無によって降伏時の変形角に差異が生じた. この要因に関しては, 2.2.3 項において考察する.

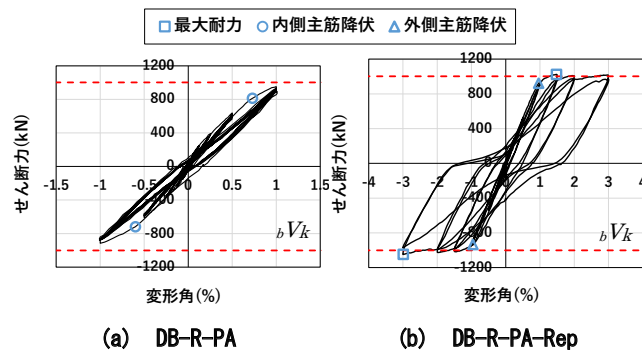


Fig. 5 せん断力-変形角関係

2.2.2 損傷性状

ひび割れ状況の観察, ひび割れ幅の計測は各変形角 1 サイクル目のピーク, および除荷時に行い, 加えて補修前載荷では, $R=0.5, 1.0\%$ の 10 サイクル目のピーク, および除荷時に行った. ひび割れ幅の計測は梁正面, および上面に対して行った. ひび割れに対して直行方向の幅をひび割れ幅と定義し, 梁縁部, および試験体表面に罫書いたグリッド線を横断する箇所のひび割れをクラックスケール (最小目盛 0.03mm) により計測した.

$R=1.0\%$, 10 サイクル目除荷時における DB-R-PA のひび割れ状況を Fig. 6(a) に, 補修の対象としたひび割れの分布を Fig. 6(b) に, $R=1.5\%$, 1 サイクル目除荷時における DB-R-PA-Rep のひび割れ状況を Fig. 6(c) にそれぞれ示す. 正載荷時のひび割れを青線, 負載荷時のひび割れを赤線で示している. また, 図中のひび割れは計測したひび割れ幅 w_{cr} により, 線の太さを分けて示している. なお, 補修前載荷で発生し, 補修を施したひび割れは, 補修後載荷開始時点においてひび割れが生じていないものと仮定した.

補修前載荷において, $R=0.0625\%$ で上面, 正面共に 2 段筋カットオフ位置付近に曲げひび割れが生じた. その後, 変形角が大きくなるにつれ, 梁端部, および梁スパン中央側へ損傷範囲が広がったものの, $R=1.0\%$ 除荷時において, 2 段筋カットオフ位置付近に生じたひび割れ以外は, 概ね 0.2mm 未満の幅となった. 従って, DB-R-PA は $R=1.0\%$ の変形を経験した後でも, 2 段筋カットオフ位置付近のひび割れのみを補修すれば良く, 補修コストを抑制できる可能性があると考えられる.

また, 補修後載荷では, 補修の対象としたひび割れの内, 幅 0.1~0.2mm 程度のひび割れは, エポキシ樹脂の充填性が悪く, 載荷初期から補修した箇所において再度ひ

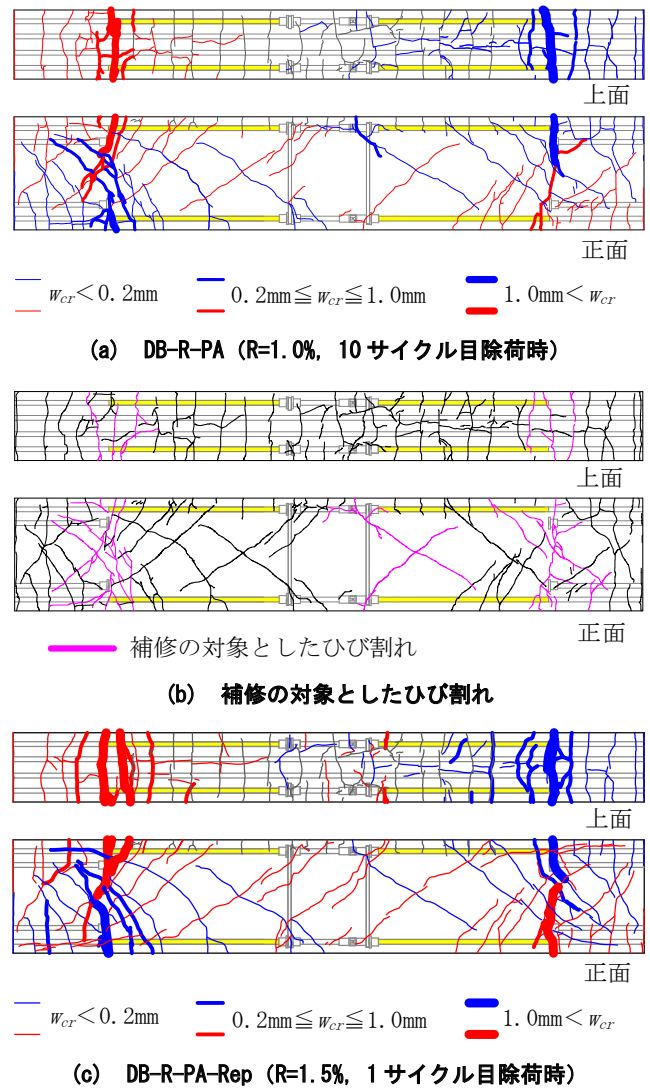


Fig. 6 ひび割れ状況

び割れが生じた. 一方, 2 段筋カットオフ位置付近に生じたひび割れは, エポキシ樹脂の引張強度がコンクリートの引張強度よりも大きいことに起因して, 補修したひび割れ近傍のコンクリート部分に新たに生じた. このことから, 2 段筋カットオフ位置におけるひび割れには十分にエポキシ樹脂が充填されていたと考えられる. また, $R=1.5\%$ 終了後において, 2 段筋カットオフ位置付近に生じたひび割れ以外は概ね 0.2mm 未満のひび割れであり, 補修後においても, 主筋の付着除去による損傷抑制効果を確認することができる.

次に, 各変形角 1 サイクル目ピーク, および除荷時における梁正面に生じた曲げひび割れの最大ひび割れ幅の補修前後における比較を Fig. 7 に示す. 図中には文献 13) に示される梁, 柱などの構造部材の損傷度 II : 修復限界状態 I (小規模な補修が必要), および損傷度 III : 修復限界状態 II (大規模な補修が必要) に相当する残留ひび割れ幅の指標を示している. 残留ひび割れ幅に関する指標を基にすれば, 補修前載荷の $R=1.0\%$, 1 サイクル目除荷時において損傷度 III と判断することができる. また,

補修前後の最大ひび割れ幅を比較すると、補修後の方が最大ひび割れ幅は小さくなっている。これは、2段筋カットオフ位置に生じた幅の大きなひび割れを補修したことで、エポキシ樹脂の弾性変形の影響によって、新たに近傍に生じたひび割れの幅が低減されたと考えられる。

続いて、梁を8つの領域(領域A~H)に分けた場合の、各領域における正載荷時の残留ひび割れ面積率の分布をFig. 8に示す。ひび割れ面積は連続的に変化する実際のひび割れを、[計測点におけるひび割れ幅×計測グリッドの間隔]の平行四辺形のひび割れに置換して算定した。残留ひび割れ面積率は各変形角除荷時に各領域に残留したひび割れの総面積を各領域の面積で除すことで算出した。Fig. 8より、梁正面、上面共に2段筋カットオフ位置を含む領域(領域B, G)に損傷が集中しており、梁中央部の損傷は小さいことが確認できる。補修前と補修後を比較すると、補修前よりも補修後の方が領域B, Gにおける残留ひび割れ面積率は小さくなっている。これは前述の通り、補修前よりも補修後で生じたひび割れの方が、エポキシ樹脂の弾性変形の影響により、幅が小さくなったことによるものだと考えられる。

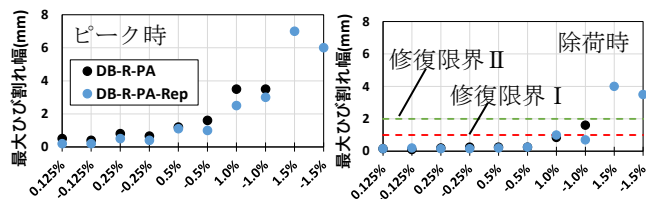


Fig. 7 最大ひび割れ幅の補修前後における比較 (梁正面)

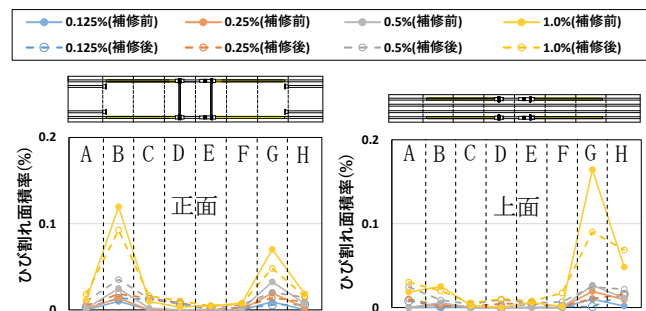


Fig. 8 残留ひび割れ面積率の分布 (正載荷時)

2. 2. 3 主筋のひずみ分布

各変形角サイクル正側ピーク時の上端主筋のひずみ分布を内側、外側主筋に分けて Fig. 9 に示す。図中にはひずみゲージ貼付位置、および主筋の降伏ひずみ(=2907 μ)を併せて示す。载荷中に計測不能となったひずみゲージはプロットを消去している。なお、補修後载荷は補修前载荷終了時点のひずみを引き継いで計測しており、また、補修後载荷における内側主筋のひずみ分布は、補修後载荷開始時点において既に降伏ひずみに達していたため記載を省略している。

補修前载荷において、内側主筋は $R=1.0\%$ で2段筋カットオフ位置において降伏しているが、外側主筋は降伏し

ていない。また、付着を除去した区間のひずみが一樣に分布していることがわかる。このことから、付着除去を施していない内側主筋は2段筋カットオフ位置で局所的にひずみが増大するのに対し、付着除去を施した外側主筋では付着除去区間に分散してひずみが生じるため、降伏ひずみに達するまでの梁の変形が大きくなったと考えられる。

また、補修後载荷において、 $R=1.0\%$ サイクルで外側主筋が付着除去区間の範囲にわたって降伏した。補修後においても、付着除去区間のひずみが一樣に分布していることから、エポキシ樹脂注入工法による補修を施した後においても、主筋の付着除去による効果を確認することができる。

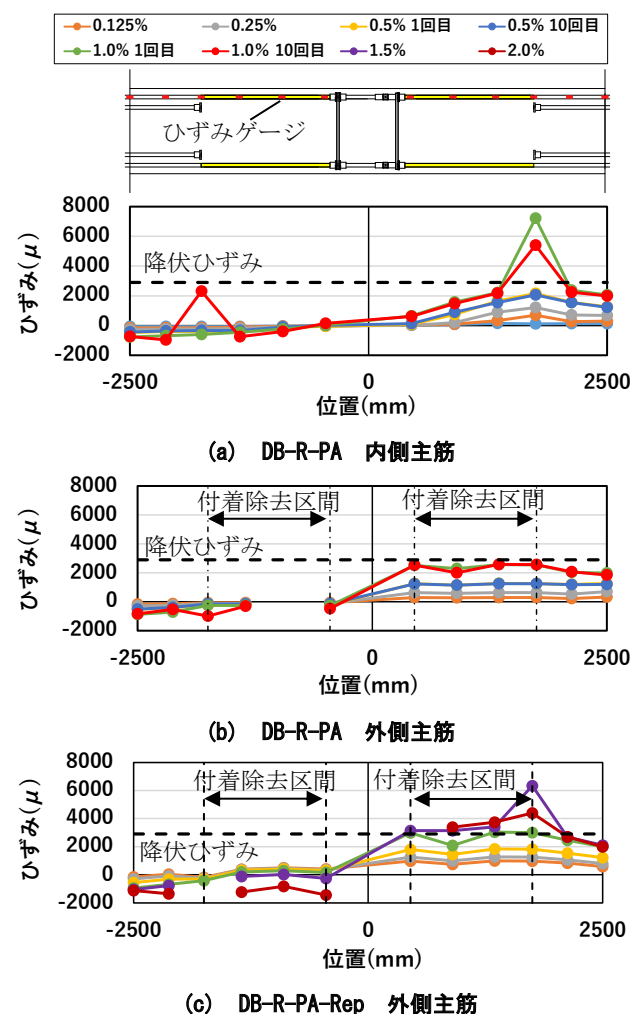


Fig. 9 主筋のひずみ分布 (上端主筋, 正載荷時)

2. 2. 4 補修前後の構造性能の比較

せん断力-変形角関係の正載荷側包絡線における補修前後の比較を Fig. 10 に示す。また、補修前後の初期剛性、および $R=1.0\%$ の各繰り返し回数における割線剛性の一覧を Table 4 に示す。初期剛性は载荷開始点から $R=0.03125\%$ 時点をつなぐ直線の傾きとし、割線剛性は $R=1.0\%$ 各サイクルピーク点と原点をつなぐ直線の傾きとした。

補修前後の初期剛性に関して、補修前の初期剛性に対

する補修後の初期剛性の比率は 0.57 であった。これは、補修に用いたエポキシ樹脂の弾性係数がコンクリートに比べて小さいこと、および樹脂注入を施すことができない微細なひび割れが残存していたことにより、補修後の初期剛性が補修前に比べ大きく低下したと考えられる。一方、 $R=1.0\%$ 各サイクル時の割線剛性に関して、補修前載荷では繰り返し回数が増えるにつれ徐々に割線剛性の値が減少し、10 サイクル目において1 サイクル目から6%程度低下したのに対し、補修後の1 サイクル目では補修前の1 サイクル目と同程度まで割線剛性が回復した。このことから、補修前載荷において、繰り返し回数の増加に伴って徐々にひび割れは伸展するが、補修を施すことによって、補修後載荷の $R=0.5\%$ サイクル終了時の損傷状態が、補修前載荷における $R=0.5\%$ サイクル終了時の損傷状態と同程度まで回復していたと考えられる。

次に、各変形角サイクルにおける履歴吸収エネルギー量、および等価粘性減衰定数の推移の補修前後における比較を Fig. 11 に示す。履歴吸収エネルギー量はせん断力-変形関係における1 サイクルの面積から算出した。履歴吸収エネルギー量、および等価粘性減衰定数に関して、 $R=0.5, 1.0\%$ サイクルにおいて、補修前載荷の最終サイクルよりも、補修後載荷の1 サイクル目の方が大きく、補修による回復効果が確認できる。

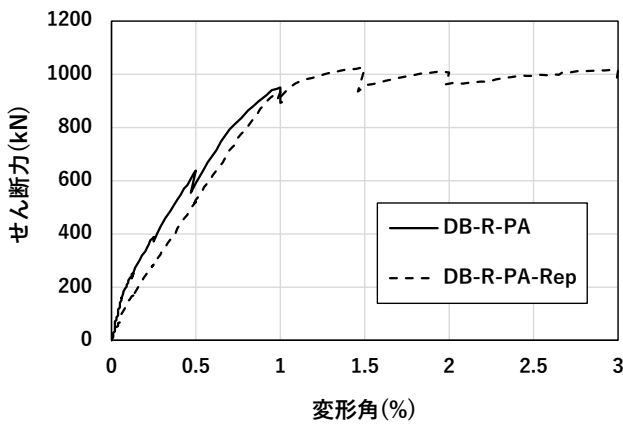


Fig. 10 補修前後における包絡線の比較 (正載荷時)

Table 4 初期剛性、および $R=1.0\%$ サイクルの割線剛性の一覧

試験体	初期剛性 (kN/mm)	割線剛性 (kN/mm)										比率(10回目 / 1回目)
		R=1.0%繰り返し回数										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
DB-R-PA	57.1	18.9	18.5	18.4	18.1	18.2	18.2	18.2	18.3	17.9	17.8	0.94
DB-R-PA-Rep	32.3	18.7	18.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
比率 (補修後/補修前)	0.57	0.99	0.99	-	-	-	-	-	-	-	-	-

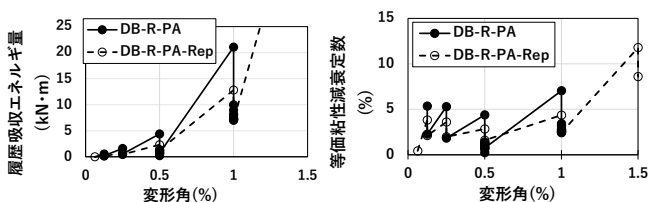


Fig. 11 履歴吸収エネルギー量、等価粘性減衰定数の比較

3. 有限要素解析による検討

本章では、実験時の載荷履歴の内、ひび割れ補修を行わない場合の3次元有限要素解析を実施し、実験結果の再現性を確認した上で、ひび割れ補修の有無による構造性能の違いについて検討する。

3.1 解析概要

3.1.1 解析モデル

解析には汎用有限要素法プログラム“DIANA Ver. 10.5”を用い、解析モデルは実験試験体を再現した。解析モデルの概要を Fig. 12 に、梁主筋の詳細を Fig. 13 に示す。解析モデルは形状、および載荷の対称性を考慮し、梁幅方向の半分をモデル化した。コンクリート、鋼板は立体要素を、鉄筋はトラス要素を用いてモデル化した。梁の主筋-コンクリート間には付着特性を考慮し、その他の鉄筋-コンクリート間は完全付着とした。また、梁主筋と端部鋼板、中央定着鋼板が交差する節点、および2段筋カットオフ位置の節点には十分な定着剛性を与えた。

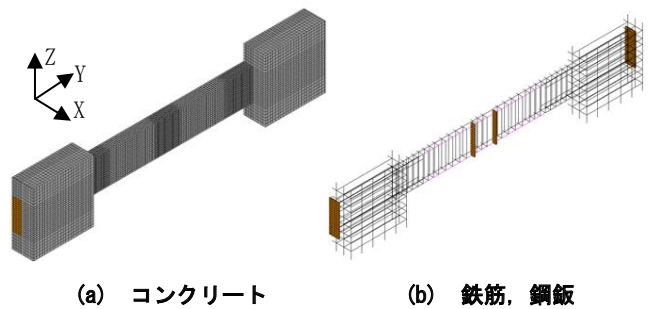


Fig. 12 解析モデル

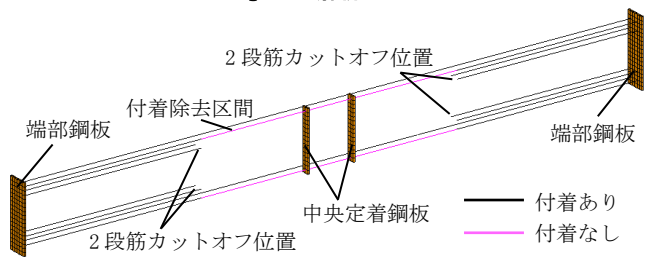


Fig. 13 梁主筋の詳細

3.1.2 材料構成則

コンクリートの応力度 σ -ひずみ度 ϵ 関係を Fig. 14 に示す。圧縮側は圧縮破壊エネルギー G_c をパラメータとする parabolic 曲線を用いた。引張側は引張強度までを線形とし、引張強度後は引張破壊エネルギー G_f をパラメータとする Hordijk らによる引張軟化曲線を用いた。なお、スタブのコンクリートは弾性とした。梁主筋、せん断補強筋は材料試験結果に基づいたバイリニア型とし、降伏後の剛性は弾性剛性の1/100倍とした。スタブ主筋、スタブせん断補強筋、および鋼板は弾性とし、弾性剛性は 205kN/mm^2 とした。梁主筋-コンクリート間の付着応力度 τ -付着すべり量 S 関係を Fig. 15 に示す。付着強度 τ_u

は文献 14) に示される付着信頼強度とし、付着応力度の低下が始まるすべり量 S_1 は 0.1mm と仮定した。付着除去区間の付着特性は弾性とし、弾性剛性を十分小さくすることでせん断方向に力を極力伝達しないモデルとした。

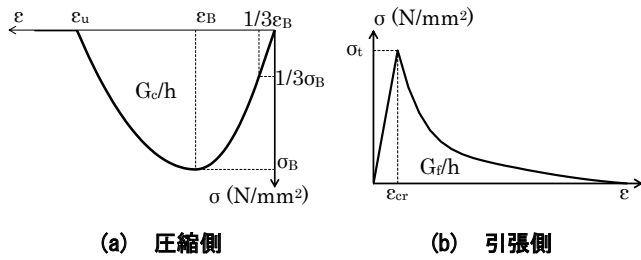


Fig. 14 コンクリートの応力度 σ -ひずみ度 ϵ 関係

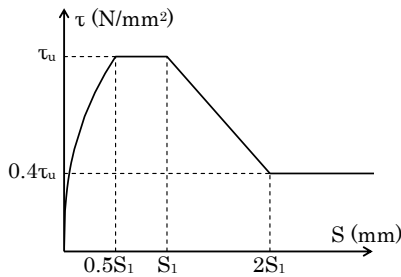


Fig. 15 付着応力度 τ -すべり量 S 関係

3. 1. 3 境界・荷条件

境界・荷条件を Fig. 16 に示す。固定側スタブ上下面の全節点 (X - Y 平面上) の Z 方向変位を拘束し、加力側スタブの外 (左) 端の全節点 (X - Z 平面上) の Y 方向変位を拘束することで、梁に軸力を生じさせずに逆対称曲げを作用させた。また、対称面の全節点 (Y - Z 平面上) は X 方向変位を拘束した。荷は、加力側スタブ中央の X 軸上の全節点に強制変位を与えた。荷履歴は実験時の荷履歴と概ね同様であるが、補修前荷 (1 次荷) における変形角を繰り返した後、ひび割れ補修は再現せずに補修後荷 (2 次荷) における $R=3.0\%$ を除く変形角を繰り返した。なお、1 次荷は $R=1.0\%$ 、10 回目のサイクルが終了した後、荷点の変形がゼロになるまで行い、2 次荷は 1 次荷終了点から開始した。

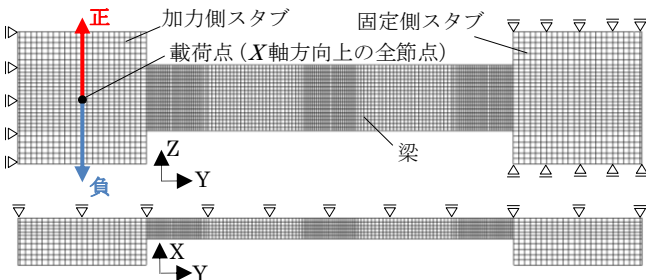


Fig. 16 境界・荷条件

3. 2 解析結果

3. 2. 1 せん断力-変形角関係

せん断力-変形角関係における実験結果と解析結果の

比較を Fig. 17 に示す。Fig. 17(a) は 1 次荷の実験結果と解析結果の比較を、Fig. 17(b) は 2 次荷の実験結果と解析結果の比較を示している。また、せん断力-変形角関係における正荷側包絡線の実験結果と解析結果の比較を Fig. 18 に、実験結果と解析結果における初期剛性、および $R=1.0\%$ 各繰り返し時の割線剛性の一覧を Table 5 に示す。

1 次荷に関して、解析結果は剛性、および各変形角ピーク時の耐力において実験結果と概ね一致した。一方、2 次荷に関して、解析における 1 次荷の初期剛性に対する 2 次荷の初期剛性の比率は 0.44 であり、ひび割れ補修を施した実験に比べ、初期剛性の低下がやや大きいことが確認できる。また、 $R=1.0\%$ 時の割線剛性に関して、ひび割れ補修を施した実験では、2 次荷の 1 サイクル目の割線剛性が 1 次荷の 1 サイクル目の割線剛性と同程度まで回復したのに対し、ひび割れ補修を再現していない解析では、2 次荷の 1 サイクル目の割線剛性は 1 次荷の 10 サイクル目の割線剛性と同程度であった。以上のことから、エポキシ樹脂注入によるひび割れ補修は、部分的に主筋の付着を除去した RC 梁に対して、初期剛性、および割線剛性の回復に効果があると考えられる。

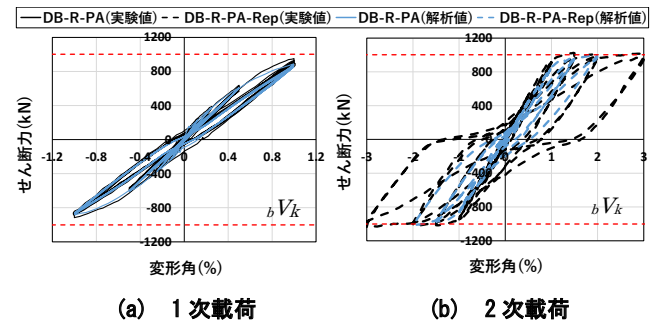


Fig. 17 せん断力-変形角関係の実験結果と解析結果の比較

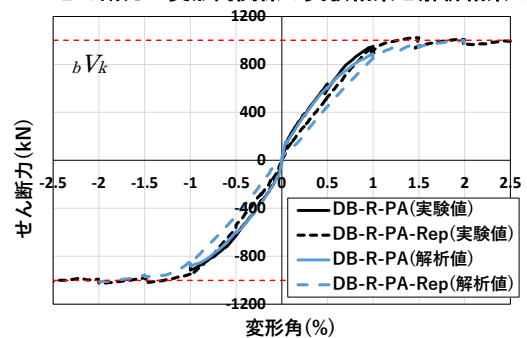


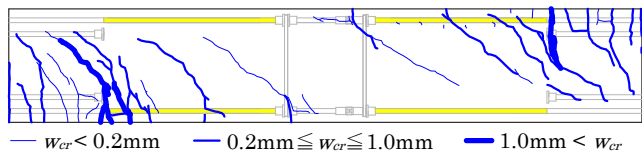
Fig. 18 実験結果と解析結果の正荷側包絡線の比較

Table 5 初期剛性、 $R=1.0\%$ 時割線剛性の一覧

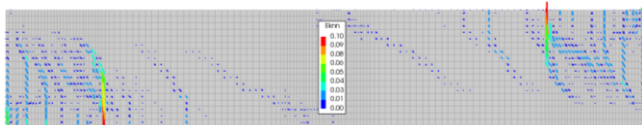
試験体	初期剛性 (kN/mm)	割線剛性 (kN/mm)										比率(10回目 /1回目)	
		R=1.0%繰り返し回数											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
実験	1次荷	57.1	18.9	18.5	18.4	18.1	18.2	18.2	18.2	18.3	17.9	17.8	0.94
	2次荷 (補修あり)	32.3	18.7	18.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	比率(2次荷 /1次荷)	0.57	0.99	0.99	-	-	-	-	-	-	-	-	-
解析	1次荷	82.0	17.8	17.5	17.3	17.3	17.2	17.2	17.2	17.1	17.1	17.1	0.96
	2次荷 (補修なし)	36.0	17.1	17.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	比率(2次荷 /1次荷)	0.44	0.96	0.98	-	-	-	-	-	-	-	-	-

3. 2. 2 損傷状況

1次载荷の正側 $R=1.0\%$, 1サイクル目ピーク時におけるひび割れ状況の実験結果と解析結果の比較を Fig. 19 に、2次载荷の正側 $R=1.5\%$, 1サイクル目ピーク時におけるひび割れ状況の実験結果と解析結果の比較を Fig. 20 にそれぞれ示す。なお、解析結果におけるひび割れ状況は、クラックひずみベクトルの分布を示しており、クラックひずみとは、コンクリート要素が引張強度に達した後のひずみ度を示している。1次载荷における $R=+1.0\%$ 時の解析結果のひび割れ状況は概ね実験結果と同様であり、解析においても2段筋カットオフ位置に損傷が集中して生じ、付着除去区間の損傷が抑制されていることが確認できる。また、2次载荷における $R=+1.5\%$ のひび割れ状況に関して、実験では2.2.2節で述べた様に、2段筋カットオフ位置付近に生じたひび割れは、補修したひび割れ近傍のコンクリート部分に新たに生じたのに対し、解析では補修を再現していないことから、1次载荷で生じたひび割れが2次载荷において拡幅および伸展した。

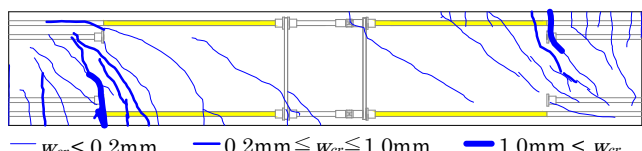


(a) ひび割れ状況 (実験結果, 正面)

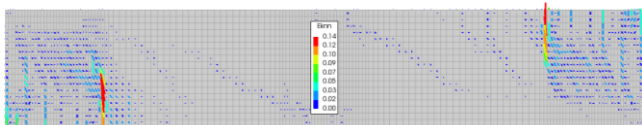


(b) クラックひずみベクトルの分布 (解析結果, 正面)

Fig. 19 ひび割れ状況の比較 (1次载荷, 正側 $R=1.0\%$ ピーク時)



(a) ひび割れ状況 (実験結果, 正面)



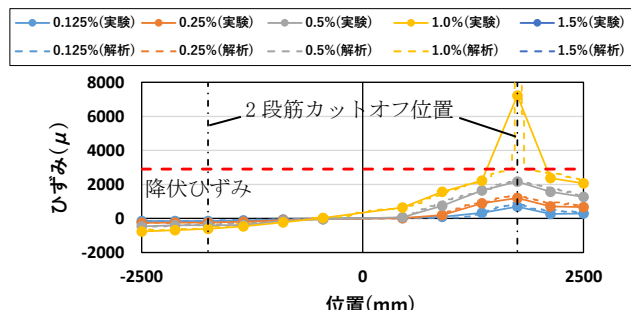
(b) クラックひずみベクトルの分布 (解析結果, 正面)

Fig. 20 ひび割れ状況の比較 (2次载荷, 正側 $R=1.5\%$ ピーク時)

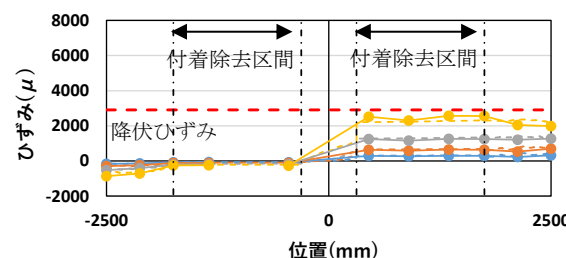
3. 2. 3 主筋のひずみ分布

正载荷側各変形角ピーク時における、上端主筋のひずみ分布の実験結果と解析結果の比較を Fig. 21 に示す。主筋のひずみ分布に関しても、1次载荷において解析結果は実験結果に概ね一致した。解析においても主筋の付着を除去した区間でひずみが一樣に分布しており、設定した付着特性によって付着除去による影響を考慮することができたと考えられる。一方、2次载荷時の主筋のひずみ分布に関して、補修を再現していない解析では、実験に比

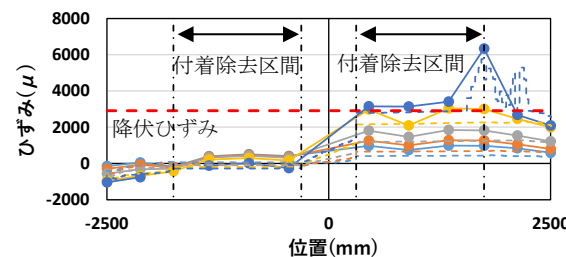
べ、引張側のひずみが小さい値を示した。これは、解析において1次载荷時の $R=1.0\%$ の除荷剛性が実験に比べて小さく、2次载荷開始時の初期ひずみが実験に比べて小さくなったことが原因だと考えられる。除荷時の履歴モデルについては、今後、検討を深めていく。



(a) 1次载荷の実験結果と解析結果の比較 (内側主筋)



(b) 1次载荷の実験結果と解析結果の比較 (外側主筋)



(c) 2次载荷の実験結果と解析結果の比較 (外側主筋)

Fig. 21 主筋のひずみ分布における実験結果と解析結果の比較

4. まとめ

本研究では、部分的に主筋の付着を除去したRC梁の補修後の構造性能を把握することを目的として、変形角1%以内の多数回繰り返し载荷により損傷を与えたRC梁試験体に対し、ひび割れ補修を行い、再度繰り返し载荷実験を実施した。また、3次元有限要素解析を行い、実験結果の再現性を確認した上で、ひび割れ補修の有無による構造性能の違いについて検討した。以下に得られた知見を示す。

- (1) 補修後载荷において、部分的に主筋の付着を除去したRC梁は付着除去区間の損傷が抑制されており、エポキシ樹脂注入による補修を施した後においても、主筋の付着除去による損傷範囲の抑制効果が確認できた。
- (2) 補修後の初期剛性は補修前に比べ大きく低下したも

の、 $R=1.0\%$ 時の割線剛性、履歴吸収エネルギー量、および等価粘性減衰定数に関しては、補修による回復効果が見られた。

- (3) 本検討において設定した解析条件により、実験時のせん断力-変形角関係、損傷状況、および主筋のひずみ分布を概ね再現できることを確認した。また、実験時の载荷履歴の内、ひび割れ補修を再現しない解析と実験結果との比較により、エポキシ樹脂注入によるひび割れ補修は、部分的に主筋の付着を除去したRC梁に対して、初期剛性、および割線剛性の回復に効果があることを確認した。

なお、本論文では限られた試験体での検討に留まっているため、スパン中央部の定着方法や、付着除去区間、ならびに中央定着区間の長さが部材の復元力特性や損傷、および補修後の構造性能に与える影響について、今後も実験や解析により検討を進めていく所存である。

謝辞

本研究成果の一部は、JST 産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラム (JPMJOP1723) により得られたものです。また、試験体に用いた鉄筋は東京鉄鋼株式会社から提供していただきました。本研究の実施にあたっては、元東京工業大学、毎田悠承助教 (現東京大学准教授) に数々の有益なご助言を頂きました。また、実験実施の際には東京工業大学、坂田研究室の学生の皆様にご協力をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 滝口克己, 岡田謙二, 塚政博: 付着のある RC 部材と付着のない RC 部材の変形特性, 日本建築学会論文報告集, 第 249 号, pp. 1-11, 1976. 11
- 2) 滝口克己: 付着のある RC 部材と付着のない RC 部材の変形特性・

- II, 日本建築学会論文報告集, 第 262 号, pp. 53-59, 1977. 12
- 3) 毎田悠承, 益田一毅, 佐藤裕貴, 坂田弘安, 前川利雄, 服部翼: ヒンジ位置保証型 RC 梁の力学挙動に主筋の付着除去が与える影響, 日本建築学会技術報告集, 第 27 巻, 第 65 号, pp. 231-236, 2021. 2
- 4) 毎田悠承, 佐藤裕樹, 坂田弘安, 前川利雄, 服部翼: 座屈拘束ブレース付きヒンジ位置保証型 RC 骨組の力学挙動に梁主筋の付着除去が与える影響, 日本建築学会構造系論文集, 第 86 巻, 第 783 号, pp. 815-826, 2021. 5
- 5) 毎田悠承, 益田一毅, 坂田弘安, 前川利雄, 服部翼: 逆対称曲げを受けるヒンジ位置保証型 RC 梁の力学挙動に主筋の付着除去とそのスパン中央部定着が与える影響, 日本地震工学会論文集, 第 21 巻, 第 5 号, pp. 58-78, 2021. 11
- 6) 伊東康貴, 八十島章, 加川順一, 荒木秀夫: エポキシ樹脂で補修した RC 部材の曲げせん断性状, コンクリート工学年次論文集, Vol. 29, No. 3, pp. 1579-1584, 2007
- 7) 石川裕次, 平林聖尊, 川野翔平, 麻生直木, 中根一臣: 鉄筋コンクリート造ヒンジロケーション接合部の耐震性能, 構造工學論文集, Vol. 61B, pp. 59-69, 2015. 3
- 8) 竹内崇, 藤永隆, 吉森裕樹, 孫玉平: 付着強度の低い超高強度鉄筋を用いた RC 柱の耐震性向上およびその評価手法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 38, No. 2, pp. 163-168, 2016
- 9) 毎田悠承, 吉敷祥一, 曲哲, 前川利雄, 濱田真, 坂田弘安: 座屈拘束ブレース接合部を有する損傷位置保証型 RC 梁の力学挙動, 日本建築学会構造系論文集, 第 82 巻, 第 737 号, pp. 1091-1101, 2017. 7
- 10) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 2018, pp. 158-169, 2018
- 11) 国土交通省住宅局建築指導課ほか監修: 2020 年版建築物の構造関係技術基準解説書, pp. 656-661, 2020
- 12) 岩淵一徳ほか: 多数回繰り返し载荷を受ける RC 梁部材の修復性に関する実験的研究 (その 2) 実験結果と考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 259-260, 2012. 9
- 13) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建築物の耐震性能評価指針 (案)・同解説, pp. 69-78, 2004
- 14) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建築物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, pp. 175-192, 1999

Study on Structural Performance of Repaired Reinforced Concrete Beams with Partially De-bonded Longitudinal Rebars

Tsubasa HATTORI, Toshio MAEGAWA and Hiroyasu SAKATA

Abstract

To understand the structural performance of repaired reinforced concrete (RC) beams with partially de-bonded longitudinal rebars, we subjected RC beam specimens to cyclic loading tests. At first, we subjected the specimens to damage of 1% or less in terms of deformation angle. And then repairing the cracks formed, we performed additional cyclic loading tests. The results of the tests showed that de-bonding of longitudinal rebars is effective in reducing damage range even after repairs. We also confirmed that the repairs restored secant stiffness when the deformation angle was 1.0%, hysteretic energy absorption, and equivalent viscous damping coefficient. In addition, our study using three-dimensional finite element analysis confirmed that the tests results can be reproduced with the set analysis conditions. We also confirmed that presence or absence of repairs affect initial stiffness and secant stiffness at reloading.

Key words: RC Beam, De-bonding, Damage Suppression, Crack Repair, Three-Dimensional Finite Element Analysis