T2R2 東京工業大学リサーチリポジトリ
Tokyo Tech Research Repository

# 論文 / 著書情報
# Article / Book Information

| | |
|---|---|
| 論題(和文) | 曲げ降伏型鉄筋コンクリート部材に対する補修後の構造性能の回復度の評価 |
| Title(English) | |
| 著者(和文) | 永井智基, 参川朗, 三浦 耕太, Alex Shegay, 前田匡樹, 関松太郎 |
| Authors(English) | Alex Shegay, masaki maeda |
| 出典(和文) | 日本地震工学会第17回年次大会梗概集, , , |
| Citation(English) | Proceedings of the 17th Annual Meeting of Japan Association for Earthquake Engineering, , , |
| 発行日 / Pub. date | 2022, 12 |

Powered by T2R2 (Tokyo Institute Research Repository)

# 曲げ降伏型鉄筋コンクリート部材に対する補修後の構造性能の回復度の評価

永井智基[1)]，参川朗[2)]，三浦耕太[3)]，

Alex Shegay[4)]，前田匡樹[5)]，関松太郎[6)]

1)　東北大学大学院工学研究科都市・建築学専攻，博士課程前期
E-mail: tomoki.nagai.t2@dc.tohoku.ac.jp
2)　東北大学大学院工学研究科都市・建築学専攻，博士課程前期
E-mail: tohokumikawaakira@gmail.com
3) 正会員　株式会社大林組，博士（工学）
E-mail: miura.kota@obayashi.co.jp
4) 正会員　東京工業大学科学技術創成研究院，助教　Ph.D.
E-mail: shegay.a.aa@m.titech.ac.jp
5) 正会員　東北大学大学院工学研究科都市・建築学専攻，教授　博士（工学）
E-mail: maeda@archi.tohoku.ac.jp
6) 正会員　建築研究所国際地震工学センター，特別客員研究員　工学博士
E-mail: sekimatsutaro@yahoo.co.jp

**要　約**

地震被害を受けたRC造建物に補修を施した際の，耐震性能の回復度合いは明確ではない．本研究では，縮小RC造部材（耐震壁・梁）に損傷レベルをパラメータとして事前に静的載荷実験を行った後，補修を施し，再度静的載荷実験を行った．得られた荷重変形関係から補修前後の耐震性能（剛性，耐力）の比較を行った．また，補修後部材モデルの構築を目指し，本実験と同様の結果が得られるか解析上で検討し，その再現性を評価した．

*キーワード：　鉄筋コンクリート，補修，曲げ降伏型部材，ファイバーモデル解析*

## 1. はじめに

持続可能な社会の実現のため，建設業界に対しては建物の長寿命化が求められている．地震被害を受けた鉄筋コンクリート造（以下，RC）建物では，継続使用するための復旧方法として一般的に補修や補強が選択される．そのうち補修については，日本建築防災協会の「震災建築物の被災度区分判定基準及び復旧技術指針」[1)]において，部材の種類（柱，壁，梁）や補修方法に応じた耐力回復係数φの目安が示されている．しかし，耐力回復係数は部材の耐力を一律で低減する指標であり，実験データも十分ではなく，安全側の値として定められている．

そこで，本研究では，曲げ降伏型のRC部材を対象に補修を施し静的載荷実験を行った．新設試験体に対する事前載荷の損傷度をパラメータとし，損傷状態に応じて補修を施し，養生後に再度静的載荷を実施した．実験から得られた荷重変形関係から，剛性や耐力の回復度合いを示す回復係数を比較し，補修

効果の評価を行った．

また，本研究では，部材や損傷に応じた補修後部材の回復係数を収集しデータベース化するとともに，補修による回復係数の正確な評価法の構築を最終目標としている．本実験結果や既往研究などからデータの収集を行うことができるが，全てのパラメータに対する回復係数を求めることは困難であると考えられる．よって，実施した部材実験における損傷と補修工事に関するデータに基づいて，エポキシ樹脂によるひび割れ補修やエポキシ樹脂モルタルによる断面補修で得られた効果を解析的に再現可能であるか試みた．本研究から，補修後の解析モデル作成法を構築し，実験範囲外の補修部材の回復性能を推定することが可能であるかどうか評価する．

## 2. 実験概要と耐震性能の比較

### 2.1 実験計画の概要

試験体は東北大学・大林組共同研究による振動台実験[2)]のX方向の架構における連層耐震壁を1/3に縮小した壁試験体，及び，梁を1/2に縮小した梁試験体とした．試験体の配筋を図1に示す．試験体は曲げ破壊が先行するような設計とし，それぞれ同一の配筋とした．これは，本実験は事前載荷により与える損傷度[1)]のみをパラメータとするためである．つまり，基準試験体W5・G5は，事前載荷なしで本載荷を行ったのに対して，補修試験体W2R(壁)・G2R(梁)は損傷度II，補修試験体W4R・G4Rは損傷度IVを事前載荷で与えたのちに補修を施し，再度載荷を実施することで，補修の効果を調べる計画とした．載荷計画や材料試験など，試験体の詳細な情報は文献3)を参照されたい．

補修工事は，損傷に応じて一般的に用いられている工法とした．ひび割れにはエポキシ樹脂の注入，剥落箇所には，軽微な部分にはポリマーセメントモルタル，鉄筋が露出する程著しい箇所はエポキシ樹脂モルタルによる断面補修を行った．補修工事についての詳細も文献3)に述べられている．

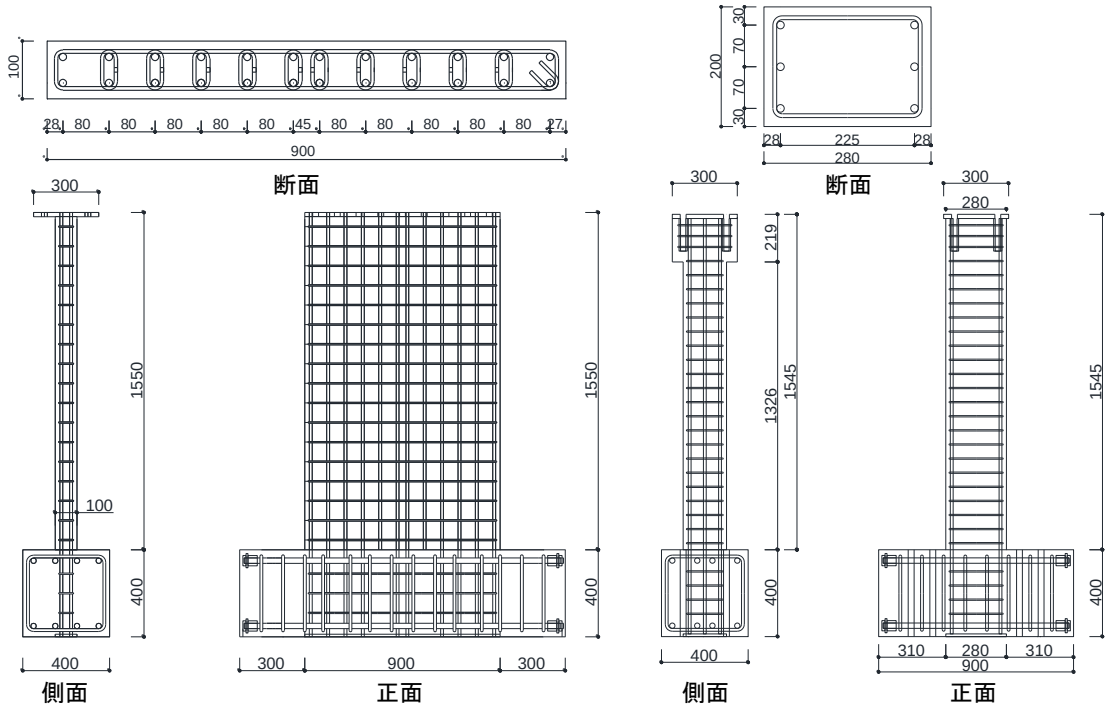
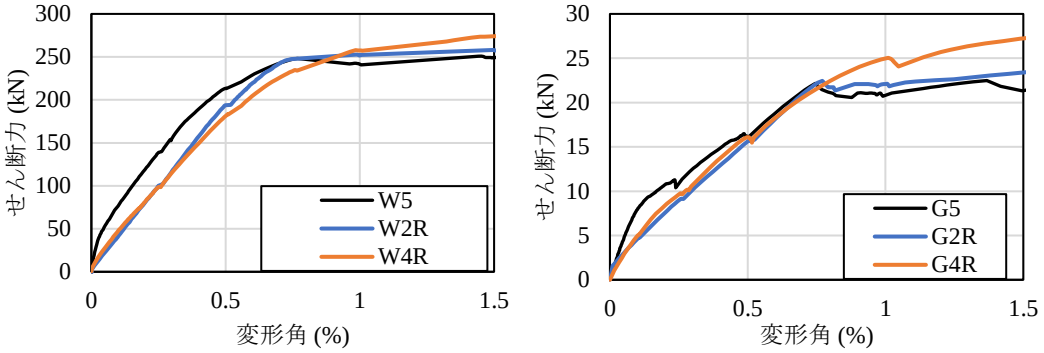



図１　試験体配筋図（単位：mm）

### 2.2 実験結果

図2に得られた荷重変形関係の包絡線を示す．損傷度II試験体（W2R，G2R）は，初期剛性は無補修試験体（W5，G5）よりも低下したが，補修前に未経験の変形に進展すると，荷重変形関係は無補修と同様になった．損傷度IV試験体も同様に初期剛性の低下が確認されたが，降伏点の遅れや耐力が上昇する結果となった．その他の詳細については文献4)を参照されたい．




(a) 耐震壁　　(b) 梁

図 2　荷重変形関係の包絡線

### 2.3 耐震性能の比較

文献5)では，耐震性能の回復度合いを表す指標として，新設試験体と補修試験体の荷重変形関係より4つの性能の回復係数（初期剛性，降伏点割線剛性，耐力，等価粘性減衰定数）を算出している．このうち初期剛性，降伏点割線剛性，耐力については，実験によって得られた荷重変形関係をトリリニアモデルに置換し，そのモデル曲線上において算出を行っている．本論文では，より実験データとトリリニア曲線がよい対応を示すように，トリリニアモデルの置換法を図3に示すように改善をした．以下にその算出方法を示す．なお，回復係数は基準試験体に対する補修試験体の性能の比とする．

最初に，最大耐力の1/3となる包絡線上の点を第一折れ点とする．その後，設計上の終局点と仮定した変位（壁：2.0%，梁：3.0%）までにおいて，包絡線とトリリニア曲線が囲む面積の絶対値和が最小かつ，正負を考慮した面積和が0になるように第二折れ点を設定する．これは包絡線とトリリニア曲線をエネルギー的に等価にするためである．以上から作成したトリリニアモデルにおいて，第一折れ点の割線剛性を初期剛性，第二折れ点の割線剛性を降伏点割線剛性，第三折れ線の荷重を耐力とした．

図4に算出した回復係数を示す．初期剛性回復係数は両部材とも損傷度によらず50～60%程度となった．ただし，この値は実験時のひび割れ点での回復係数ではなく，実際の初期剛性はさらに低下している可能性もあることに留意されたい．この理由として，ひび割れに対してエポキシ樹脂が完全には浸透，接着されずに，載荷中の早期にひび割れが再び開いたことが考えられる．降伏点割線剛性回復係数は壁・梁両試験体ともに損傷度IV（W4R，G4R）が損傷度II（W2R，G2R）よりも小さくなった．耐力回復係数は両部材とも損傷度II試験体では同程度，損傷度IV試験体ではおよそ1～2割程度上昇した．これらの原因として，端部の剥落補修に用いたエポキシ樹脂モルタルの圧縮強度がコンクリートよりも高いこと，鉄筋のひずみ硬化の進展などが挙げられる．また，降伏した鉄筋が時間経過とともに強度上昇を起こす現象である時効硬化[6)]も耐力上昇の一因として考えることができるが，本実験では経過時間が壁試験体では1か月半，梁試験体では3か月であり，実際に同現象が生じていたかは今後の検討課題である．

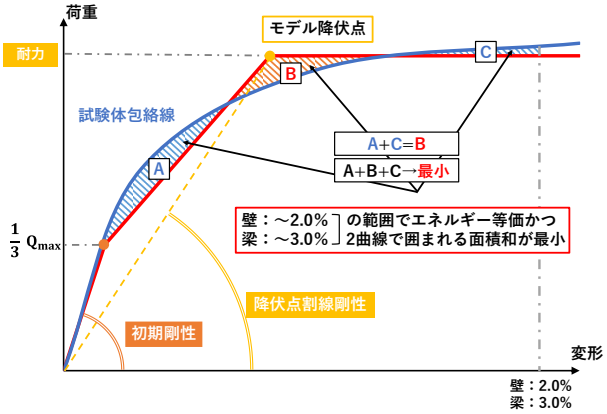
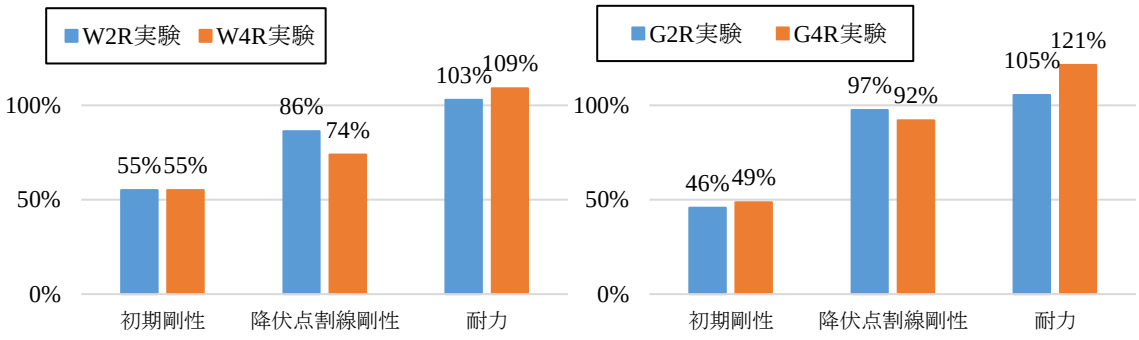



図 3　耐震性能算出方針




(a) 耐震壁　　(b) 梁

図 4　実験結果の回復係数

## 3. 補修実験の再現解析

本章では，第2章に示した試験体の補修の効果を解析的に再現し，実験を行っていないケースの補修効果の定量評価に繋げることを目的とし，ファイバーモデルによる補修部材の解析モデルを作成し検討を行う．その第一段階として本論では，耐震壁試験体を取り上げ補修前後の解析モデルを作成し，静的荷重増分解析により得られた荷重変形関係と実験データの比較を行う．

### 3.1 解析方法と補修モデル作成方針

本検討では弾塑性解析ソフトSNAPver8を用いた．最初に新設状態時のモデル（W5）について説明する．試験体を軸・曲げ変形成分に対してはファイバーモデル，せん断変形成分に対してはせん断ばねでモデル化を行った．ファイバーモデルにおける各メッシュ要素の材料特性は実験時の材料試験値を入力した．なお，図5に示すようにW4Rでは補修工事により脚部においてモルタルが充填されたため，モデル上の該当する箇所においてエポキシ樹脂モルタルの特性に置換する必要がある．そこで，図6のようにエポキシ樹脂モルタル充填範囲の最上部に中間節点を設け，モルタルとコンクリートによるメッシュ区間とコンクリートのみの区間に分割できるようにした．なお，実験では図6に示すようにエポキシ樹脂モルタルは底面から高さ170mm程度まで充填されていた．今後未実験の試験体の再現解析を行う上で充填される高さを基準化する必要があるため，本研究ではせいに対して耐震壁で0.2倍の高さまで充填されると仮定して解析モデルを作成した．せん断ばねの復元力特性については，図1に示したように，壁試験体は主筋及びせん断補強筋を配筋しており，壁柱とみなすことができる．よって，日本建築学会の「鉄筋コンクリート造建物の靭性保証型耐震設計指針・同解説」[7]を参考に，柱部材としてせん断ひび割れ強度およびせん断終局強度を算定した．

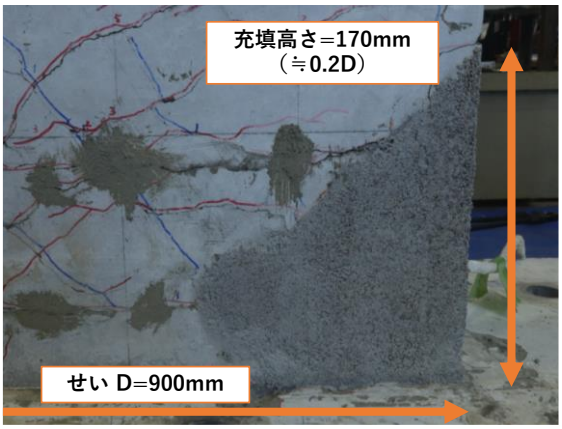



図 5　充填したエポキシ樹脂モルタル(W4R)

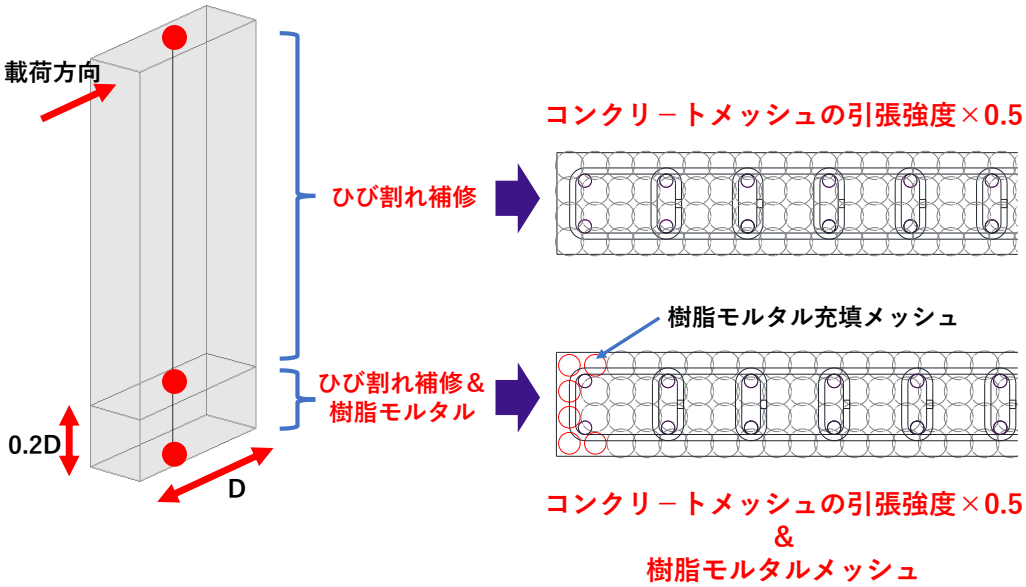



図 6　補修後解析モデルの概要図

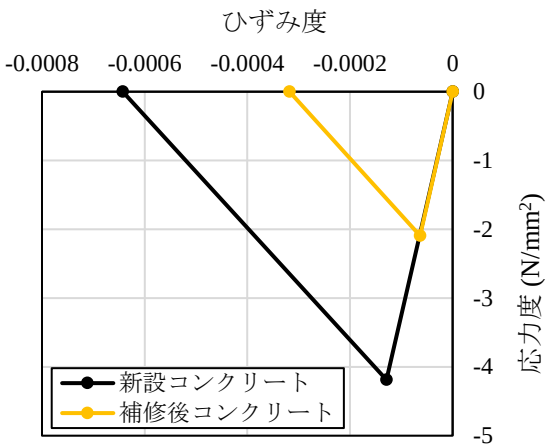
次に，補修後の解析モデルの作成方針について説明する．補修を施すことで部分的に材料特性が変化するため，解析モデルにおいても実際の試験体の変化に合わせ材料特性等を変化させることが望ましい．2章で述べた補修工事のうち，ポリマーセメントモルタルは試験体表面に塗布をしただけであり，部材全体に占める体積の割合はわずかであるため，部材の構造性能に与える影響は，エポキシ樹脂及びエポキシ樹脂モルタルと比較すると小さいと考えられる．そこで，本検討ではエポキシ樹脂とエポキシ樹脂モルタルの性能の2種類を解析モデルに反映させた．

ひび割れに注入したエポキシ樹脂については，個々の注入箇所を再現した解析モデルの作成が困難であるため，エポキシ樹脂を注入したコンクリートの引張強度を低下させる，即ち，無損傷状態の強度とひび割れ後の強度（=0）の中間とすることでその影響を考慮した．ここで，注入後のひび割れの挙動については，参川ら[8)]による研究によって，補修を施したひび割れの5割程度以上は部材が降伏に至るまでに再び開いてしまっていることが確認されており，エポキシ樹脂によりすべてのひび割れが補修されるわけではないことがわかる．よって，前述の数値を参考に，図7(a)のように引張強度を5割低下させることとし，ばらつきのある補修後ひび割れの挙動を簡略に再現することとした．なお，コンクリートの圧縮特性については，本検討では補修前後で同一とした．コンクリートの材料特性を図7(a)，(b)に示す．

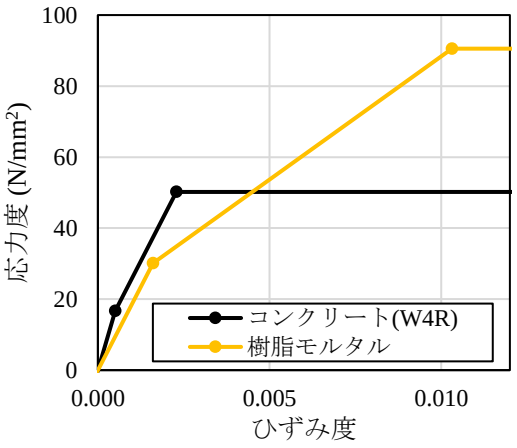
なお，前述の論文では耐震壁試験体に対し曲げひび割れとせん断ひび割れの2種類に分類をした検討も行っており，せん断ひび割れの多くはひび割れが再開していたことが報告されている．実験結果における荷重－せん断変形の関係（図7(c)）を確認すると，せん断初期剛性は概ね20%程度に低下していたことから，本研究ではせん断バネの初期剛性を新設試験体に対し20%まで低下させ，第2剛性低下率を1.0とした．なお，せん断変形が全体変形に占める割合は，新設、補修ともに概ね2割程度であった．入力したせん断ばねの復元力特性を補修前と併せて図7(d)に示す．

著しい剥落個所に充填したエポキシ樹脂モルタルについては，実験終了後の損傷の様子や補修工事などから実際に充填された範囲を読み取り，モデル上の該当するメッシュをコンクリートからエポキシ樹脂モルタルの特性に置換し解析を行った．材料特性をコンクリートと併せて図7(b)に示す．

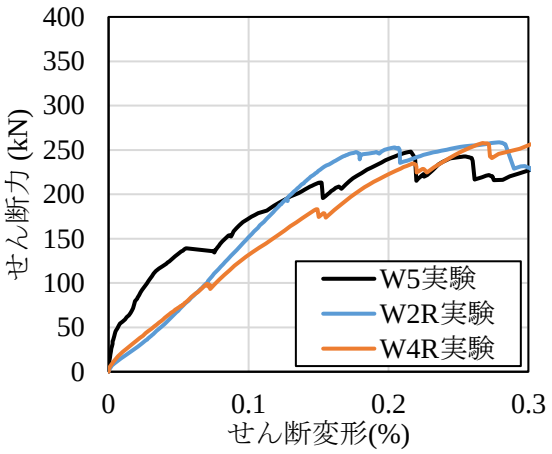
鉄筋については，本検討では補修前後で材料特性を同一とし，材料試験の結果で得られたヤング係数，降伏強度を入力した．図7(e)に鉄筋の材料特性を示す．



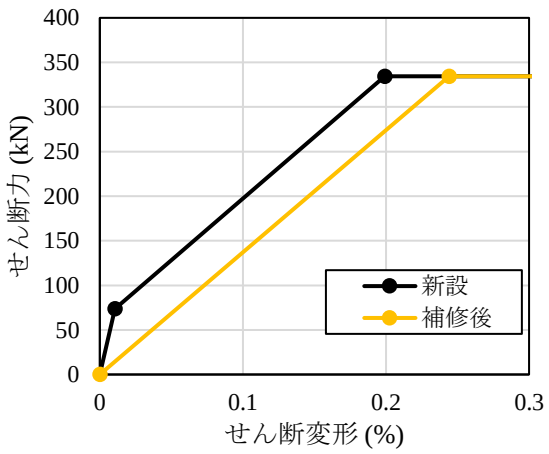

(a) 新設と補修後のコンクリート引張特性



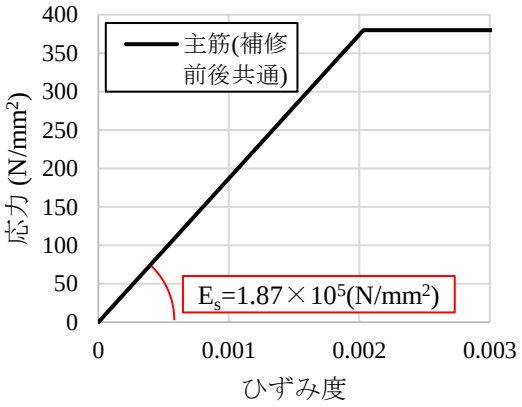

(b) コンクリートと樹脂モルタルの圧縮特性




(c) 荷重ーせん断変形関係(実験)




(d) せん断ばね復元力特性



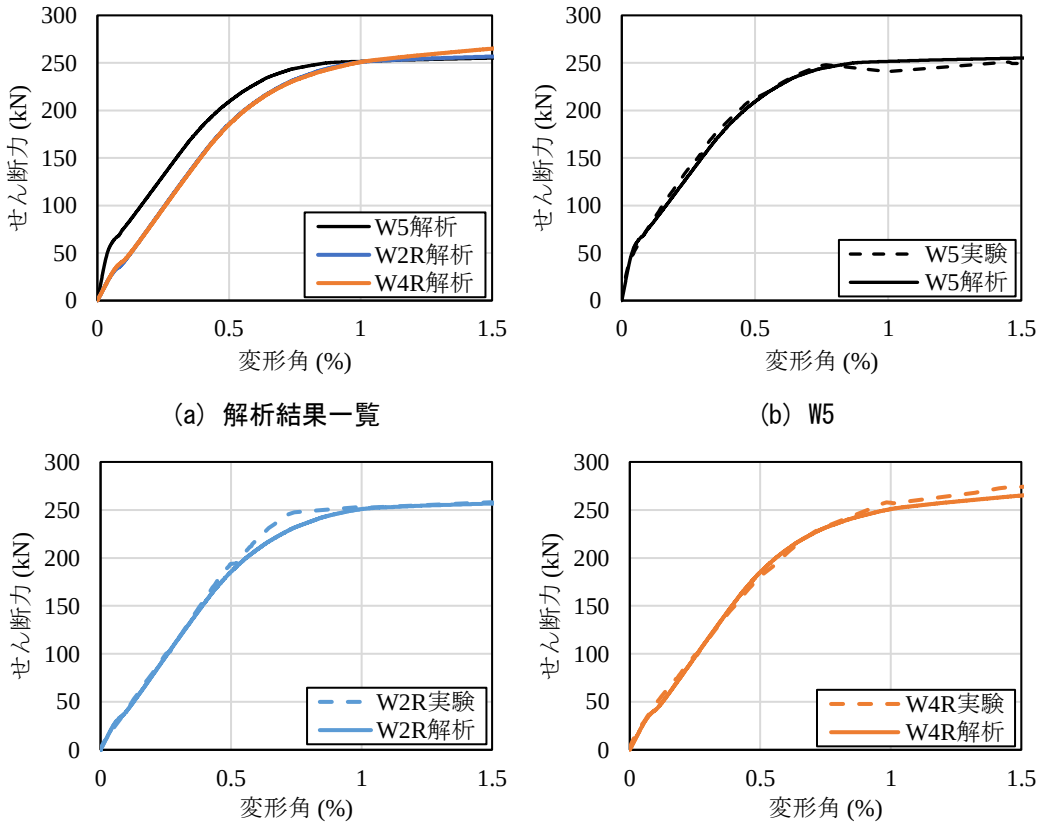

(e) 鉄筋の材料特性

図 7　解析モデル入力特性

### 3.2 解析結果

前節で作成したモデルに対し静的増分解析を行った．図8に荷重変形関係を実験結果と併せて示す．補修前後の3試験体で，実験結果の包絡線と初期剛性，降伏点，耐力ともに概ね良い対応を示した．

解析結果における荷重変形関係を2章と同様の方法でトリリニアモデルに置換をし，回復係数を算出した．図9に示すように，実験結果と概ね同様な傾向を得ることができたが，耐力についてはW4Rで実験結果の回復係数の方がやや大きくなっている．これは，本解析では鉄筋の特性を補修前後で変化させていないが，実験では2.3節で述べたように，コンクリートよりも圧縮強度の高いモルタルの充填により脚部に変形が集中し，主筋のひずみ硬化による強度上昇が発生したと考えられる．鉄筋の特性を実情に合わせて変化させて耐力上昇を再現することが可能であるかどうかは今後の検討課題である．




(a) 解析結果一覧　(b) W5

(a) W2R　(b) W4R

図 8　増分解析結果と実験結果包絡線

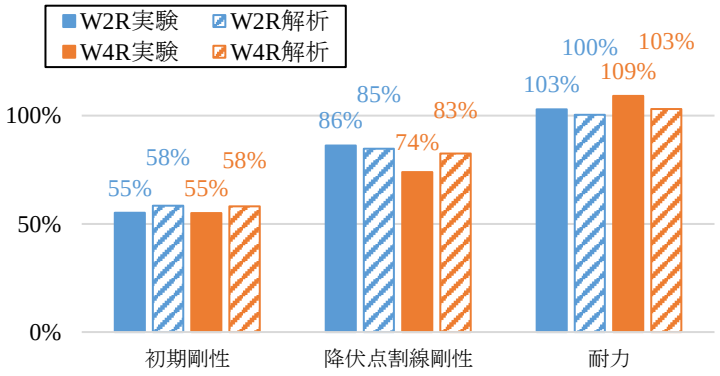



図 9　回復係数の比較

## 4. まとめ

本研究では，補修による耐震性能の評価を目的とし，曲げ降伏型部材に損傷度をパラメータとして静

的載荷をした後，補修を施し，再度静的載荷を実施した．この結果，概ね降伏点近傍まで変形した試験体（損傷度II）では，ひび割れ補修により初期剛性は完全には回復しないが，経験していない大変形領域の性能（耐力，変形性能）は新設試験体と同程度まで回復した．また，主筋が座屈する直前まで載荷した試験体（損傷度IV）では，ひび割れ及びコンクリート断面補修により，初期剛性は完全には回復しないが，耐力は新設試験体よりも上昇した．

本実験の再現を目的として，補修前後の解析モデルを作成し，静的増分解析を行った．モデルは部材を中間節点で区切り，ファイバーモデル及びせん断ばねでモデル化をした．

ひび割れ補修のみを施した試験体(W2R)は，コンクリートの引張強度を0.5倍に，せん断ばねの材料特性を初期剛性が新設に対して0.2倍であるバイリニアモデルに変更した復元力特性で簡易にモデル化することで，実験の荷重変形関係を概ね再現することができた．

ひび割れ補修とエポキシ樹脂モルタルを用いた断面補修を施した試験体(W4R)は，W2Rの復元力特性に加え，ファイバーモデル内のコンクリート要素を実験時の補修範囲を考慮したエポキシ樹脂モルタル要素に置換することで，W2Rと同様に荷重変形関係を概ね再現することができた．

以上から，補修方法を考慮した比較的簡易なモデルで，補修による耐震性能の回復係数を推定することが可能であり，未実験の部材や補修方法に対しても回復係数を取得できると考えられる．ただし，補修後のひび割れ強度の低下率やせん断ばねの復元力特性，鉄筋の材料特性には更に改良の余地があるため今後の課題としたい．

## 謝辞

本研究は，東北大学前田研究室と大林組技術研究所の共同研究として実施されたものです．また，実験費用の 一部は，科学技術振興機構・産学共創プラネットフォーム共同研究推進プログラム（JPMJOP1723）「大規模都市建築における日常から災害時まで安心して社会活動が継続できる技術の創出」（領域統括：吉敷祥一・東京工業大学教授）による支援を賜りました．

実験計画の立案，試験体の設計，載荷計画，補修工事などでは，穴吹拓也氏，水越一晃氏，米澤健次氏，増田安彦氏，諏訪仁氏，栗田康平氏，中村充氏を始めとする大林組技術研究所の方々に多大なるご支援，ご協力をいただきました．

ここに記して謝意を示します．

## 参考文献

1） 日本建築防災協会：2015 年改訂版　震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針，2017.3
2） 参川朗，Alex Shegay，三浦耕太，前田匡樹：縮小 4 層 RC 造架構の振動台実験による補修効果の評価，コンクリート工学会年次論文集，第 43 巻，第 2 号，pp.829-834，2021.5
3） 三浦耕太，永井智基，参川朗，Alex Shegay，穴吹拓也，張政，前田匡樹，米澤健次：RC 造曲げ降伏型部材の補修後の構造性能と損傷性状に関する静的載荷実験　その 1　実験計画，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.425-426，2022.9
4） Alex Shegay，参川朗，永井智基，前田匡樹，穴吹拓也，三浦耕太，張政，関松太郎：RC 造曲げ降伏型部材の補修後の構造性能と損傷性状に関する静的載荷実験　その 2　実験結果，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.427-428，2022.9
5） 永井智基，参川朗，三浦耕太，Alex Shegay，張政，穴吹拓也，前田匡樹，関松太郎：RC 造曲げ降伏型部材の補修後の構造性能と損傷性状に関する静的載荷実験　その 3　耐震性能の比較，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.429-430，2022.9
6） G. Loporcaro, S. Pampanin and M.V. Kral : Investigating the relationship between hardness and plastic strain in reinforcing steel bars, Proceedings of the New Zealand Society of Earthquake Engineering Conference. Paper P22. 2014
7） 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靭性保証型耐震設計指針・同解説，1999.8
8） 参川朗，永井智基，三浦耕太，Alex Shegay，穴吹拓也，張政，前田匡樹，関松太郎：RC 造曲げ降伏型部材の補修後の構造性能と損傷性状に関する静的載荷実験　その 4　目視観察によるひび割れ性状の比較，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.431-432，2022.9