

論文 補修を施した曲げ降伏型鉄筋コンクリート部材のファイバーモデルによる再現解析

永井 智基*1・参川 朗*1・三浦 耕太*2・前田 匡樹*3

要旨: 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係数は、参川らによる研究でデータベース化が行われているが¹⁾、実験データ数が十分ではなく全てのパラメータを収集することは難しい。本研究では、未実験部材の補修効果の定量評価を目的とし、補修を施した曲げ降伏型 RC 造部材の静的載荷実験²⁾の再現解析を行った。補修方法を考慮したファイバーモデルおよび単軸せん断ばねでモデル化を行い、静的増分解析を行った結果、荷重変形関係は耐震壁で概ねよく再現でき、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と考えられる。

キーワード: RC 造部材, 補修, 再現解析, ファイバーモデル

1. はじめに

持続可能な社会の実現のため、建物の長寿命化や地震時の補修による早期の復旧性が求められている。地震被害を受けた鉄筋コンクリート造（以下、RC）建物を継続使用するための復旧方法として補修や補強が行われるが、これにより構造性能がどの程度回復するかについては、必ずしも十分には明らかにされていない。筆者らは、これまでに、縮小 4 層架構試験体の振動台実験²⁾や壁・梁部材の静的載荷実験³⁾により、損傷を補修した RC 部材の構造性能の回復度に着目した研究を行ってきた。参川

ら¹⁾の研究によって、部材の耐震性能を表す剛性や耐力、等価粘性減衰定数の回復係数について既往論文などからデータベース化が行われたが、実験データの数が限られており、破壊モード、損傷度などすべてのパラメータに対して回復係数を求めるには至っていない。

そこで本研究では、実験データがないケースでの補修効果の定量評価を最終目的とし、そのために必要となる、補修部材の各性能の回復度を精度良く予測可能な解析手法の構築を行った。文献³⁾に示される補修部材実験の解析モデルを作成し、その再現性について検討した。部材

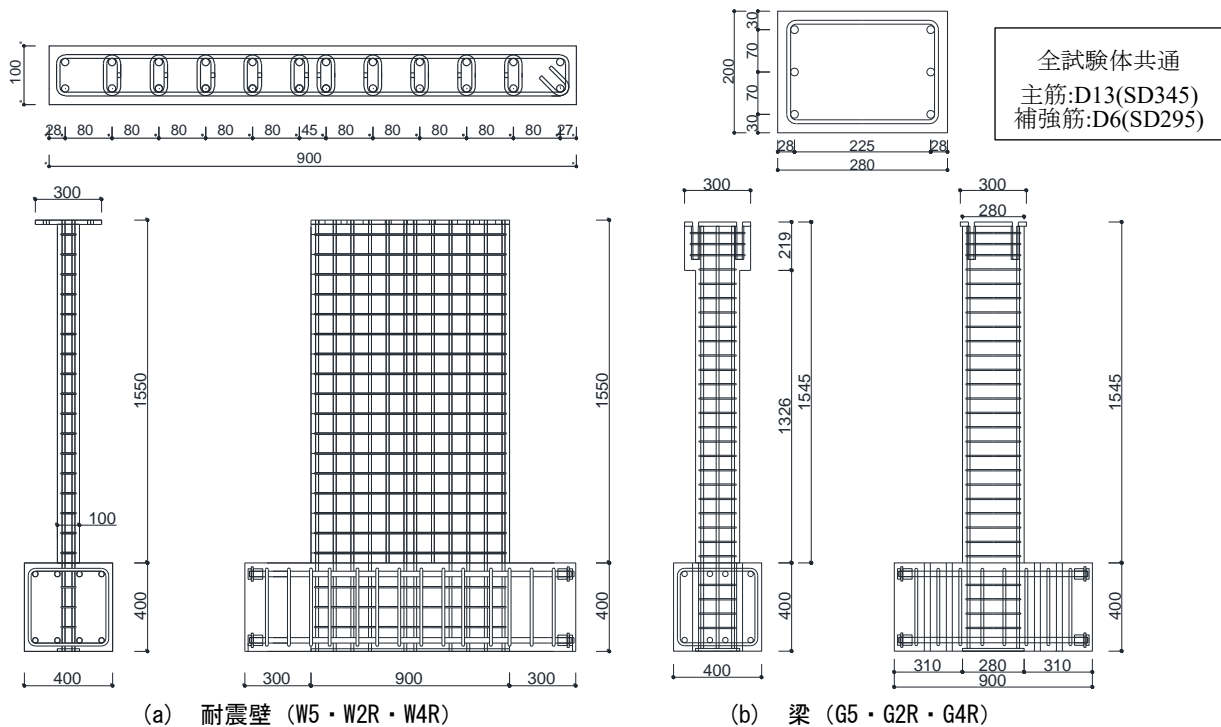


図-1 試験体断面図及び立面図 (mm)

*1 東北大学大学院 工学研究科 (学生会員)

*2 大林組 博士 (工学) (正会員)

*3 東北大学大学院 工学研究科 教授・博士 (工学) (正会員)

の解析モデルはファイバーモデル及び単軸せん断ばねによりモデル化し、材料モデルは実験で得られた材料特性および補修方法に基づき設定した。

2. 検討対象の実験概要

文献3)に示す、東北大学と大林組の共同研究として行われた、補修を施した耐震壁及び梁への静的載荷実験を検討対象とした。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設計され、片持ち形式で載荷された。補修前の事前載荷により与える損傷度のみをパラメータとした3体ずつであり、基準試験体 W5・G5 (W:耐震壁, G:梁, 1~5:損傷度 I~V) は事前載荷なしで本載荷を行ったのに対し、補修試験体 W2R・G2R は損傷度 II, W4R・G4R は損傷度 IV となるように事前載荷を行った後に補修を施し、破壊するまで再度載荷された。

補修は、損傷に応じて一般的に用いられている工法で、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、鉄筋が露出するほど著しい箇所にはエポキシ樹脂モルタルを塗布する断面補修が施工された。コンクリート、鉄筋、補修材料の材料試験結果を表-1~3に示す。その他、実験の詳細は文献3)を参照されたい。

3. 解析方法

3.1 試験体解析モデルの作成方針

本検討では弾塑性解析ソフト SNAPver8 を用いた。モデルの概要を図-2に示す。検討対象は曲げ部材で、壁脚部、及び、梁端部の損傷が大きく、図-3のように樹脂モルタル充填による補修が施されているため、高さ方

表-1 コンクリート材料試験結果

	ヤング係数 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	圧縮強度時歪 (%)
W5	3.28×10 ⁴	46.1	0.218
W2R	3.23×10 ⁴	49.3	0.259
W4R	3.29×10 ⁴	50.2	0.229
G5	3.27×10 ⁴	49.3	0.227
G2R	3.34×10 ⁴	52.7	0.231
G4R	3.27×10 ⁴	53.2	0.238

表-2 鉄筋材料特性

鉄筋	ヤング係数 (N/mm ²)	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
D13(SD345)	1.87×10 ⁵	380	562
D6(SD295)	1.76×10 ⁵	364	546

表-3 補修材料特性

種類	試験体	材齢 (日)	ヤング係数 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)
エポキシ樹脂 モルタル	W4R	33	1.88×10 ⁴	90.5
	G4R	63	1.29×10 ⁴	71.1
			接着強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
エポキシ樹脂 (カタログ値)	全試験体 共通		10.4	48.2

向に中間節点を配置して分割した。この中間節点の位置は、実験の損傷状況を考慮し、耐震壁では断面せいDの0.2倍、梁で1.0倍の高さとした。

軸・曲げ変形挙動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単軸せん断ばねでモデル化を行った。ファイバーモデルの断面を図-4に示す。

ファイバー要素はコンクリートと主筋の2種類に分割し、主筋は1本ごとに断面積が等価になるように配置した。コンクリートの圧縮強度及びヤング係数、鉄筋の降伏強度及びヤング係数は表-1~3に示される材料試験値を、コンクリートの引張強度には以下に示される式(1)³⁾を材料特性として用いた。中間節点より下部には、コンクリート要素に加え、補修箇所該当する位置に、エポキシ樹脂モルタル要素を設けた。

$$\sigma_T = 0.33\sqrt{\sigma_B} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (1)$$

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、試験体は主筋及びせん断補強筋を配筋しており、

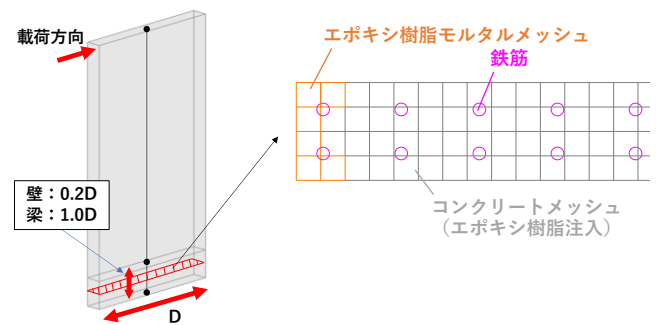


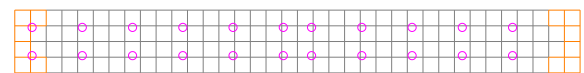
図-2 補修後解析モデル概要図



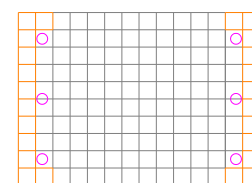
(a) W4R

(b) G4R

図-3 W4R・G4R 補修後脚部の様子



(a) 耐震壁



(b) 梁

図-4 ファイバーモデルの断面

壁柱とみなすことができるため、文献4)における柱部材の評価式を用いて、せん断ひび割れ強度及びせん断終局強度を算定した。

3.2 補修した部分の材料特性の解析への導入

補修した後の部材解析モデルの作成方針について説明する。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ただけであり、部材全体に占める体積割合はわずかであり、部材の構造性能に与える影響は比較的小さいと考えられるので考慮しな

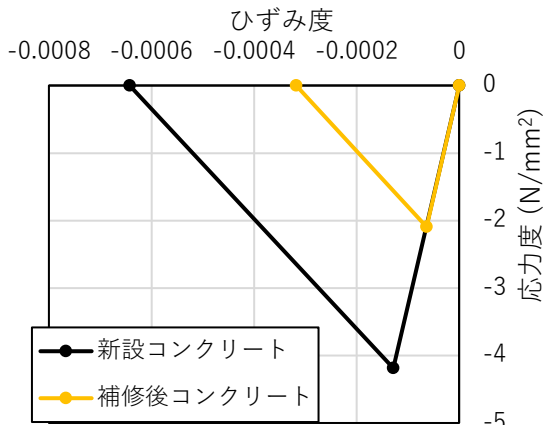
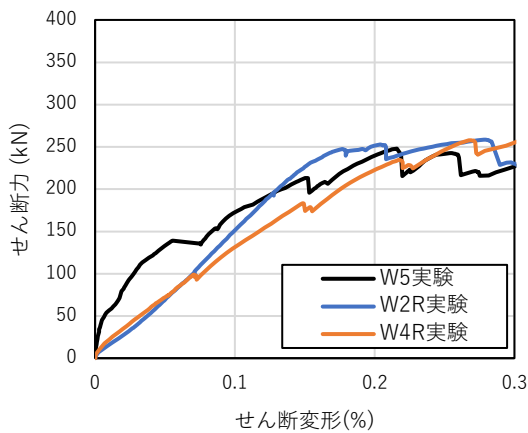
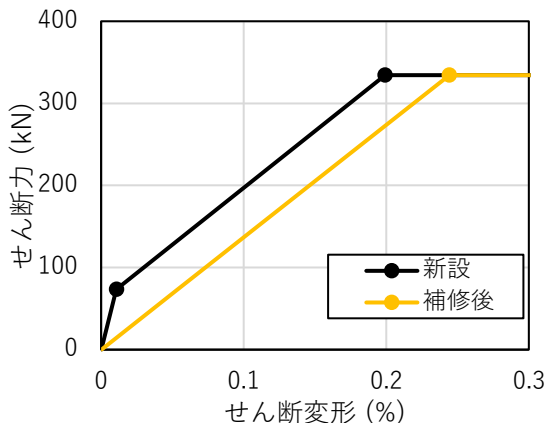


図-5 新設と補修後のコンクリート引張特性



(a) 荷重-せん断変形関係(耐震壁実験)



(b) せん断ばね復元力特性

図-6 せん断ばねの検討

い。本検討では、エポキシ樹脂によるひび割れ補修とエポキシ樹脂モルタル充填をコンクリートファイバーに、塑性変形の進展に伴うひずみ硬化を鉄筋について考慮し、補修後の性能を変化させた。

ひび割れに注入したエポキシ樹脂は、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、便宜的に注入範囲のコンクリートの引張強度を新設状態に比べ低下させ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³⁾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度開いてしまっていることが確認されている。よって、その数値を参考に、図-5のように補修後の試験体のコンクリートファイバーは引張強度を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、圧縮特性については本検討では補修前後で同一とした。

なお、前述の研究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を行っており、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-せん断変形関係を確認すると、図-6(a)のように補修後のせん断初期剛性はおおむね新設時の20%程度まで低下しており、降伏点まではほぼ一定の剛性を示した。そこで、本検討では耐震壁モデルのせん断ばねについて、初期剛性を新設試験体に対し20%程度まで低下させた、パイリニア型のモデルを用いた(図-6(b))。なお、耐震壁試験体のせん断変形が全体変形に占める割合は、新設、補修と

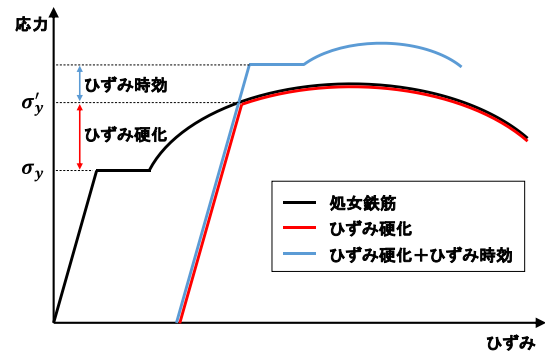


図-7 ひずみ硬化とひずみ時効概念図

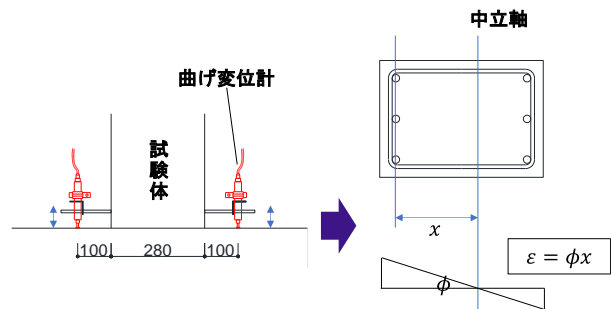


図-8 曲げ変位計から主筋のひずみの推定

表-4 主筋経験最大ひずみと降伏強度

	W5	W2R	W4R	G5	G2R	G4R
補修前 降伏強度 σ_y (N/mm ²)	380			380		
最外縁経験 最大ひずみ (%)		1.51	3.98		0.67	3.31
補修後 最外縁主筋 降伏強度 σ_y' (N/mm ²)		388	485		380	465

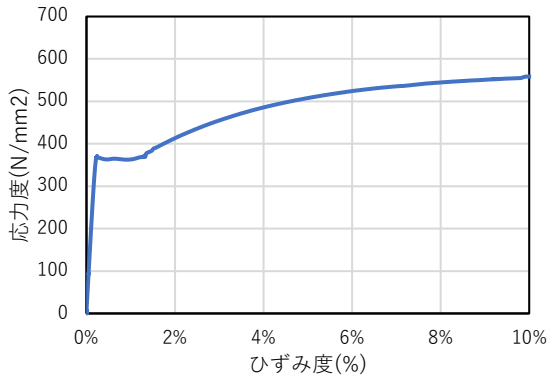
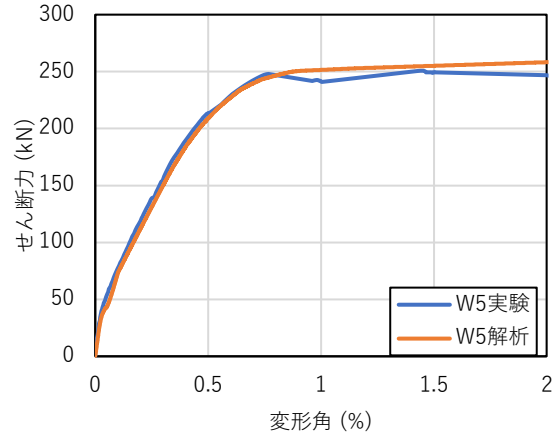


図-9 鉄筋引張試験 応力-ひずみ関係

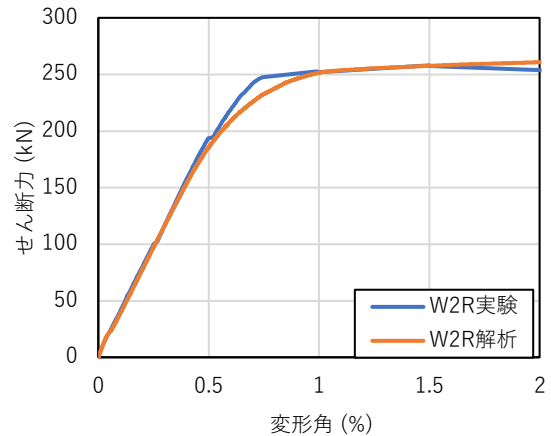
もに2割程度であった。また、梁試験体に関してはせん断ひび割れはほとんど見られなかったため、新設、補修でせん断ばねの特性は変化させていない。

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た。

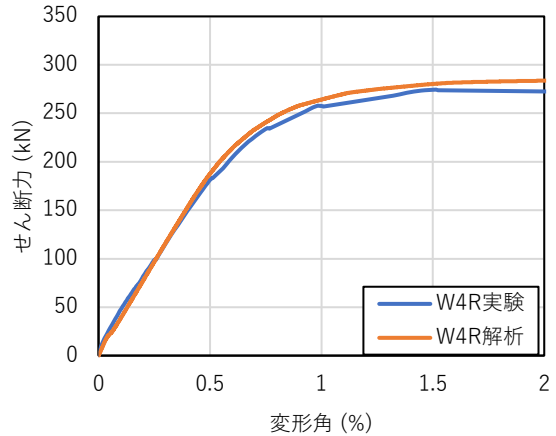
鉄筋については、補修試験体では鉄筋の強度上昇を加味して復元力特性を変化させている。これは図-7に示すように、鉄筋が降伏した後、さらに塑性変形が進むことで強度上昇を起こすひずみ硬化を考慮するためである。本実験では事前載荷時に主筋の降伏を確認しており、ひずみ硬化の領域まで主筋のひずみが進んでいると予測される。よって、実験結果のひずみゲージから主筋が経験した最大ひずみを読み取り、材料試験結果から補修後試験体の降伏強度 σ_y' を設定した。ただし、最大変形が大きく、ひずみゲージによって主筋の最大ひずみが計測できなかった W4R・G4R 試験体では、図-8に概念を示すように、試験体側面に取り付けた変位計から平均曲率を算定し、主筋のひずみを推定した。変化させた特性は降伏強度のみで、ヤング係数、降伏後剛性低下率などは変化させていない。降伏強度は断面の各主筋で最大ひずみを算出し、材料試験結果と対応させた降伏強度をそれぞれ入力している。代表として最外縁の主筋の最大経験ひずみと変更後の降伏強度を表-4に、主筋(D13・SD345)の応力-ひずみ関係を図-9に示す。なお、降伏した主筋を除荷した後、長時間経過させることで強度上昇を示



(a) W5



(b) W2R



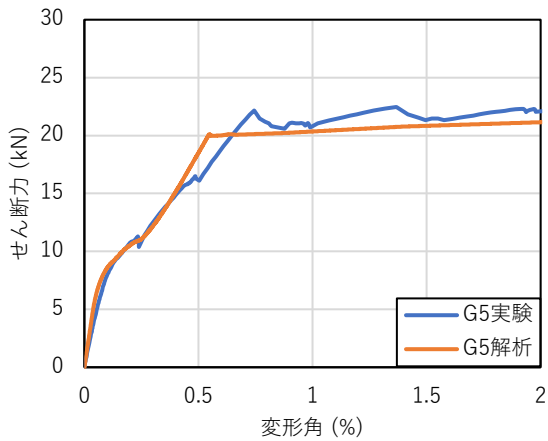
(c) W4R

図-10 解析結果と実験結果の荷重-変形関係

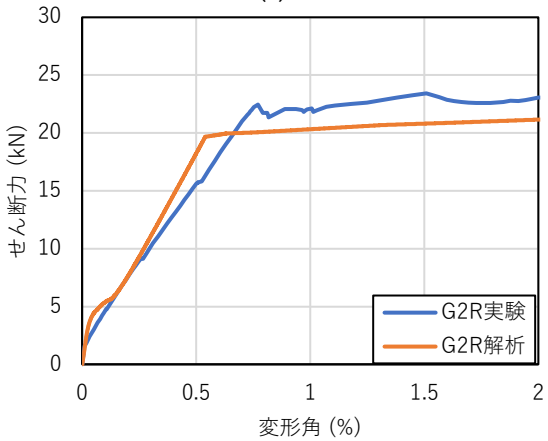
す現象であるひずみ時効も鉄筋の強度上昇に影響を与えると考えられるが、本実験は耐震壁で1か月、梁で2か月間の養生のみであり、どの程度上昇したかは不明瞭であるため、ひずみ時効は考慮していない。

4. 解析結果

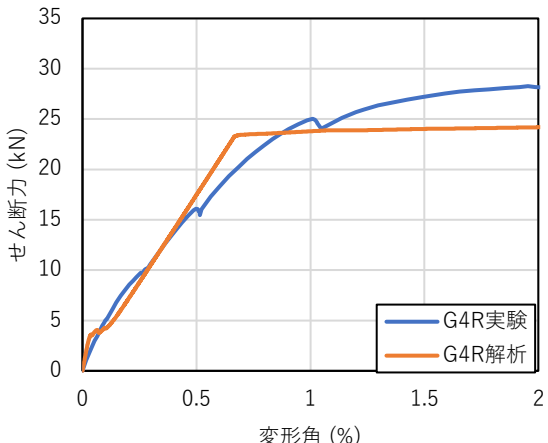
前章で作成した新設・補修モデルに対し静的増分解析を行った。図-10、11に荷重-変形関係を示す。耐震壁では、実験結果の包絡線とひび割れ点、降伏点、耐力と



(a) G5



(b) G2R



(c) G4R

図-11 解析結果と実験結果の荷重-変形関係

にもおおむね良い対応を示した。一方、梁ではひび割れ点付近ではおおむね良い対応を示したが、耐力については実験結果の方が高いことがわかる。

解析による、補修後の性能回復の評価精度を定量的に検証するため、参川らの研究¹⁾と同様に耐震性能の回復係数を算出した。耐震性能の算出方法を図-12に示す。耐震性能は論文¹⁾と同様に、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し、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

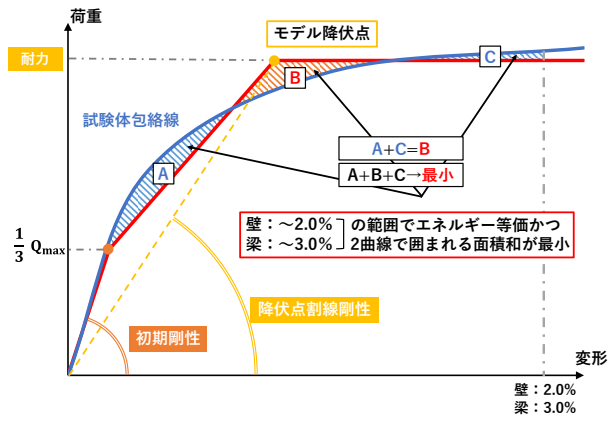
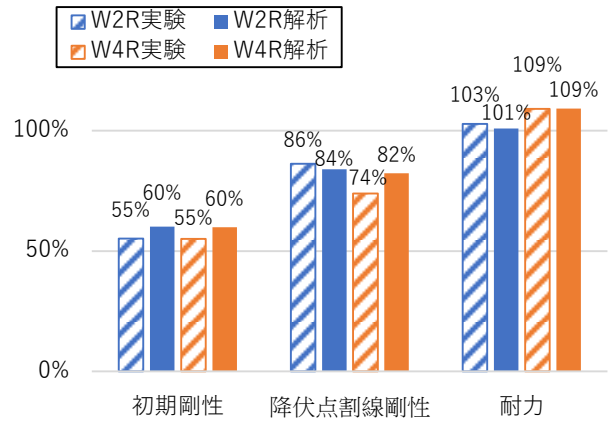
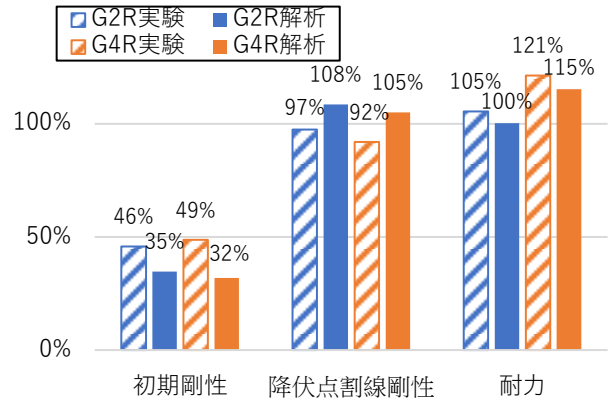


図-12 耐震性能算出方針



(a) 耐震壁



(b) 梁

図-13 解析結果と実験結果の回復係数

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した。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。

算出結果を図-13に示す。耐震壁では、回復係数が、実験結果とほぼ同様の値を示した。一方、梁では初期剛性の回復係数において解析値が実験結果より低い傾向を示した。初期剛性自体を比較すると、基準試験体のG5に

において実験結果と解析結果の誤差が大きく、この誤差によって回復係数にも誤差が生じている可能性がある。初期剛性の誤差の要因として、初期ひび割れなどにより、試験体の初期剛性が理論値より低下していることが考えられる。また、耐力の回復係数についても実験結果よりも低い値を示した。この要因として、梁試験体ではひび割れ本数が少なく、特に G4R ではエポキシ樹脂モルタルを充填しており、ひび割れが発生しづらく、コンクリートとモルタル境界面にひずみが集中し強度上昇を起こしたことが考えられる。実際に、G4R ではほかの梁試験体では発生しなかった主筋の破断が実験終局点よりも手前で発生している。また、本検討では考慮しなかった、降伏した鉄筋が時間経過を経て強度上昇を引き起こすひずみ時効による影響も考えられる。

5. まとめ

本研究では、補修による耐震性能の回復度合の評価を目的として、補修部材の静的載荷実験における試験体をファイバー要素及び単軸せん断ばねでモデル化し、静的増分解析を行った。ひび割れ補修を施した試験体では、ファイバーモデルにおけるコンクリート要素の引張強度を 0.5 倍にし、更に、耐震壁ではせん断ばねの復元力特性を初期剛性が 0.2 倍に低下したバイリニアモデルとした。また、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には、コンクリートのファイバー要素をエポキシ樹脂モルタルに置換をすることでモデル化を行った。また、主筋についてもひずみ硬化を考慮し、降伏強度を変更した。本研究により得られた知見を以下に示す。

- (1) 解析と実験結果の荷重-変形関係を比較すると、耐震壁では概ね精度よく再現できた一方、梁については補修モデルにおいて耐力に誤差が見られた。
- (2) 解析により得られた荷重-変形関係より回復係数を算出した。耐震壁では実験結果と同様な傾向を得ることができた。梁については初期剛性、耐力にやや誤差が生じる結果となった。この誤差の原因は、初期剛性に関しては初期ひび割れなどによる載荷開始前の剛性低下、耐力に関しては、補修前の主筋の最大ひずみの推定誤差、ひずみ硬化による強度上昇の違いによると考えられる。

- (3) 以上から、補修方法を考慮した比較的簡易なモデルで、補修部材の再現を解析上で概ね精度よく行うことができた。ただし、本検討で仮定したひび割れ強度の低下率やせん断ばねの復元力特性などにはさらに改良の余地があるため、今後の検討課題としたい。

謝辞

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ました。また、科学研究費補助金・国際共同研究強化(B)・「構造性能・修復費用・経済損失を統合した修復指標の開発と次世代耐震性能設計への展開」(課題番号・JP21KK0074, 研究代表者・前田匡樹)の助成を受けました。

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及び、建築研究所・関松太郎氏、東京工業大学助教・Alex Shegay 氏に多大なるご支援、ご協力を賜りました。

ここに記して謝意を示します。

参考文献

- 1) 参川朗, 他: 震害を受けた鉄筋コンクリート造部材実験のデータベースによる剛性・耐力・履歴減衰の補修による回復度評価, 日本地震工学会第 17 回年次大会梗概集, 2022.12
- 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, 他: 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~その 5, 日本建築学会学術講演梗概集, 構造 IV, pp.425-434, 2022.9
- 4) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 1999.8