

# 論文 地震で損傷した曲げ降伏型耐震壁に対する補修による耐震性能の回復度の評価

永井智基\*1・参川朗\*2・三浦耕太\*3・前田匡樹\*4

**要旨:** 地震で被害を受けた RC 造建物を補修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、縮小耐震壁試験体に目標の損傷度まで静的载荷を行った後、損傷した試験体に補修を施し、再度静的载荷を行った。損傷状態や荷重変形関係から耐震性能を比較し、補修の効果を評価した結果、エポキシ樹脂によるひび割れ補修（損傷度Ⅱ）では、初期剛性は完全には回復しないが、降伏点剛性、最大耐力・変形性能は、無損傷時と同程度まで概ね回復すること、断面欠損補修（損傷度Ⅳ）でも、降伏点剛性やエネルギー吸収能力は完全に回復しないが、最大耐力・変形能力は回復することがわかった。

**キーワード:** RC 造部材, 耐震壁, 補修, 被災度区分判定基準, 復旧技術

## 1. はじめに

現在、持続可能な社会の実現のため、建物の長寿命化が求められている。地震被害を受けたときに、建物を継続して使用するための復旧方法として、補修や補強といった方法が選択される。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」<sup>1)</sup>では、鉄筋コンクリート造建物について、部材の種類（柱、壁、梁）や補修方法に応じた耐力回復係数 $\phi$ の目安が示されている。しかし、耐力回復係数 $\phi$ は部材の耐力のみを低減する係数であり、剛性やエネルギー吸収能力がどの程度回復するのかが明確ではない。また、文献 2) に示されている縮小 RC 造 4 層架構の振動台実験では架構全体の耐震性能（剛性、耐力、エネルギー吸収能力）の回復係数は確認されたが、部材ごとの回復係数は不明瞭であった。

そこで、本研究では、前述の振動台実験の架構の長辺方向の曲げ降伏型の連層耐震壁をモデルとした 3 体の試験体を対象として、目標損傷度をパラメータとした静的载荷（新設試験体の载荷）を行い、補修を施した後に再度静的载荷を行った。破壊性状の違いや荷重変形関係を比較することで、補修による耐震性能の回復係数を求め、補修効果を評価した。

## 2. 新設試験体の静的载荷実験

### 2.1 試験体概要

試験体の断面図及び立面図を図-1 に、配筋の詳細を表-1 に示す。実大の 1/3 程度のスケールを想定し、文献 2) に示されている振動台実験の X 方向の架構における連層耐震壁 CW1 を再現する配筋とした。破壊形式は曲げ破壊が先行するような設計とした。曲げ強度は文献 3)

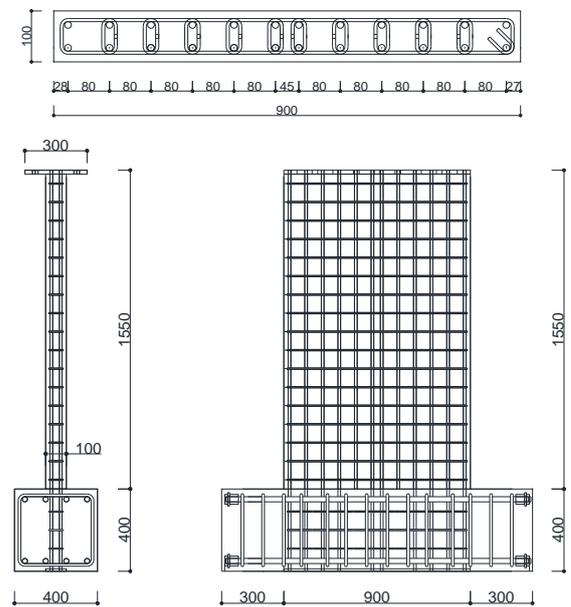


図-1 試験体断面図及び立面図 (mm)

表-1 試験体諸元

試験体	目標損傷度	備考	断面	配筋	せん断高さ
新設	W2	Ⅱ	100 × 900 (mm)	主筋: 24-D13 補強筋: □-D6@90 (mm)	1700 (mm)
	W4	Ⅳ			
	W5	Ⅴ			
補修	W2R	Ⅴ W2 補修			
	W4R	Ⅴ W4 補修			

に示される略算式、せん断強度は靱性指針式<sup>4)</sup>で求め、曲げ強度とせん断強度の比（余裕度）を振動台実験の連層耐震壁と一致するように配筋や反曲点高さの設計を行った。使用材料は文献 2) に示される振動台実験の、新

\*1 東北大学 工学部 (学生会員)

\*2 東北大学大学院 工学研究科 (学生会員)

\*3 大林組技術研究所 博士 (工学) (正会員)

\*4 東北大学大学院 工学研究科 教授・博士 (工学) (正会員)

表-2 コンクリート材料特性

試験体	呼び強度 (N/mm <sup>2</sup> )	材齢 (日)	ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	割裂強度 (N/mm <sup>2</sup> )
W2	42	47	3.28×10 <sup>4</sup>	49.2	3.75
W4		38	3.41×10 <sup>4</sup>	47.8	3.60
W5		52	3.26×10 <sup>4</sup>	46.1	3.53
W2R		84	3.23×10 <sup>4</sup>	49.3	3.61
W4R		95	3.29×10 <sup>4</sup>	50.2	4.19

表-3 鉄筋材料特性

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

設試験体のコンクリート強度 (53.1 N/mm<sup>2</sup>) と同等になるように、呼び強度を 42 N/mm<sup>2</sup> として設定した。鉄筋は主筋に SD345、せん断補強筋に SD295 を使用した。材料試験結果を表-2、表-3 に示す。

2.2 荷重計画

図-2 に示すように、壁の上端に荷重用の鉄骨梁を載せ、その両端に水平ジャッキを接続し、正負交番繰り返し荷重とした。ただし、面外への変形（並進・ねじれ）に対する拘束は行っていない。荷重サイクルを図-3 に示す。本実験では、異なる損傷レベルに対して補修効果の違いを確認するのが目的であるため、表-1 に示すように新設試験体では損傷度が II (試験体名: W2), IV (W4), V (W5, 比較用基準試験体) の 3 種類のレベルになるように荷重を行った。なお、損傷度の判定は損傷状態（鉄筋の降伏、コンクリートの剥落）や荷重変形関係に基づいて荷重中に実施した。本試験体は曲げ破壊が先行するよう設計したため、判定基準は文献 1) の曲げ部材の損傷度を参考とし、ひび割れ発生点から主筋降伏点までを損傷度 I、主筋降伏点から最大耐力点までの範囲において、前半を損傷度 II、後半を損傷度 III、最大耐力点から終局点までを損傷度 IV、終局点以降を損傷度 V とした。損傷度と荷重変形関係、損傷状態の関係は図-4 に示す。

2.3 実験結果

W2, W4, W5 試験体について、図-5 に荷重終了時のひび割れ図（青：正荷重、赤：負荷重）を、図-6 に荷重変形関係を示す。W2 は変形角 R=0.50% サイクルにおいて主筋が降伏し、R=0.75% サイクルで損傷度 II に到達したと判断し荷重を終了した。W4 は R=1.5% で最大耐力、R=2.0% サイクルで荷重低下が確認され、主筋の露出などが顕著となったため、R=2.0% で損傷度 IV に到達したと判断し荷重を終了した。W5 は R=3.0% サイクルの 1 サイクル目まで繰り返し荷重を行った。W5 の R=3.0% の 2 サイクル目では、壁端部のコンクリートの圧壊、剥落により、壁の面外方向へのねじれや倒れによる変形が急激に進行し、耐力が低下した。また、主筋の座屈やコアコンクリートの圧壊が顕著となったため、損傷度 V に到達したと判断し、荷重を終了した。3 試験体とも概ね同じ履歴挙動を示し、目的の損傷度まで到達することができた。

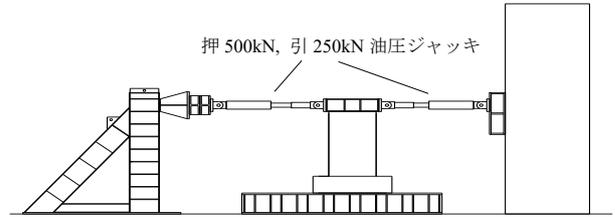


図-2 荷重装置図

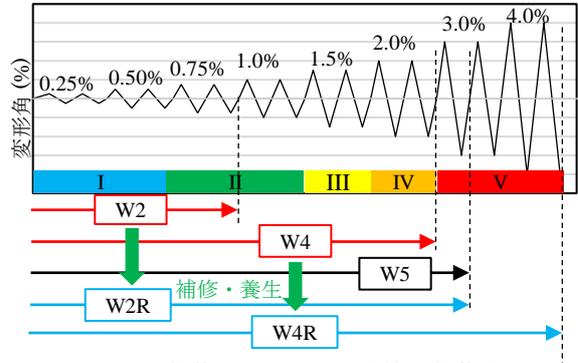


図-3 荷重サイクルと試験体の荷重計画

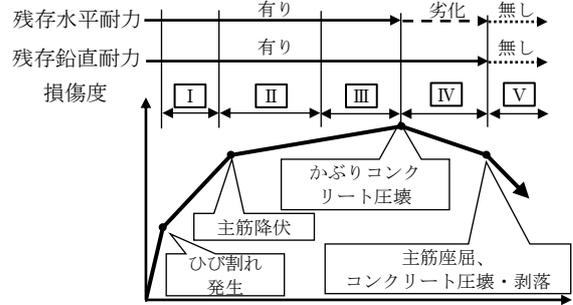


図-4 損傷度判定基準概念図

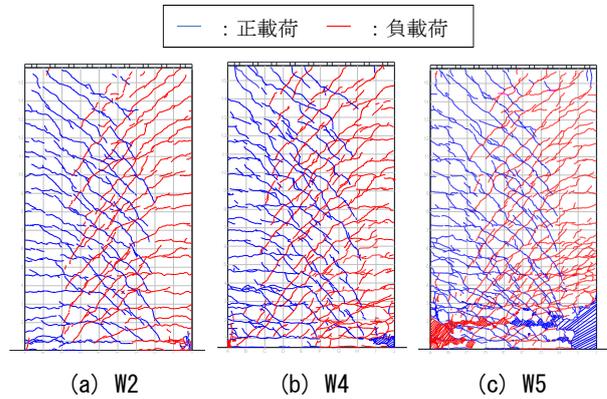


図-5 新設試験体の荷重終了時ひび割れ図

3. 補修試験体の静的荷重実験

3.1 補修方針

新設試験体は荷重終了に伴い、残留せん断力と残留変形角が概ねゼロに戻るよう調整を行った。この時、面外方向への倒れやねじれによる変形もゼロに修正をした。これは、実建物の復旧工事では、残留変形をゼロに戻さずに補修を行う場合もあると考えられるが、本実験の比較対象である文献 2) では補修工事の前に残留変形をゼロに戻す作業を行っていること、また、本実験（静的実験）における残留変形は実際の地震後よりも大きくなる

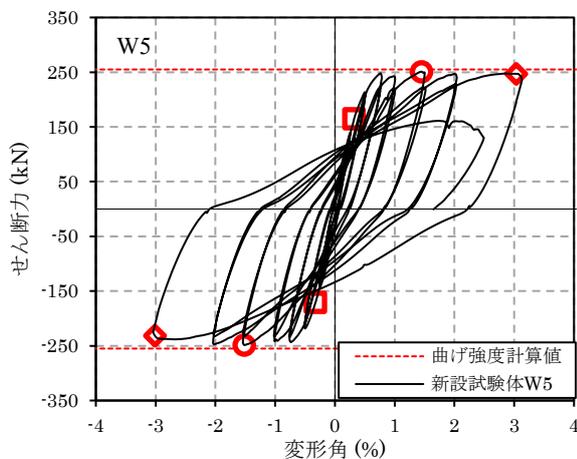
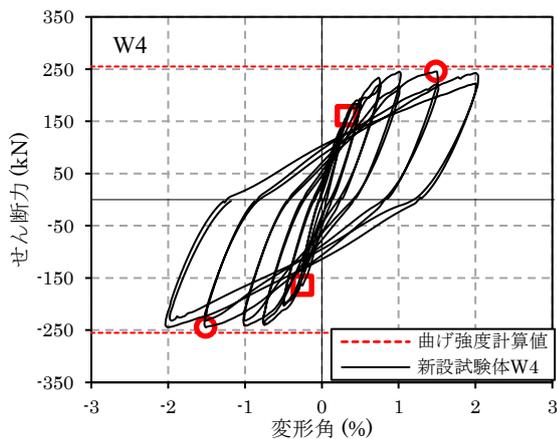
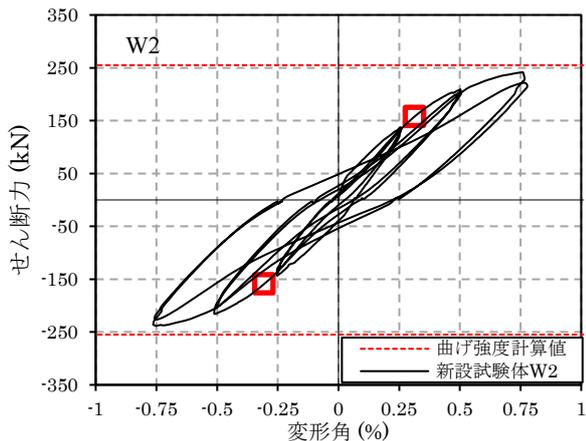


図-6 新設試験体の荷重-変形関係

と考えられることから、基準化のため、残留変形をゼロに戻す作業を行った。補修方法は、現在、一般的に使用されている補修方法と材料を用いることとし、4層架構の振動台実験<sup>2)</sup>と同様に行った。損傷の状態に応じて異なる補修方法を適用し、ひび割れにはエポキシ樹脂の注入工法、また、軽微な剥落箇所にはポリマーセメントモルタル、鉄筋が露出しているような著しい剥落箇所にはエポキシ樹脂モルタルをそれぞれ塗付する断面修復を行った。補修材料の材料試験結果を表-4、表-5に(ただ

表-4 ひび割れ注入材の材料特性(カタログ値)

適用箇所	材料種類	接着強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
ひび割れ	硬質系低粘度形エポキシ樹脂	10.4	48.2

表-5 コンクリート断面修復材の材料特性

適用箇所	材料種類	圧縮強度カタログ値 (N/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度試験値 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数試験値 (N/mm <sup>2</sup> )
軽微な剥落	ポリマーセメント系断面修復材	59.9	55.5	2.71×10 <sup>4</sup>
著しい剥落	エポキシ系補修モルタル	65.0	90.5	1.88×10 <sup>4</sup>

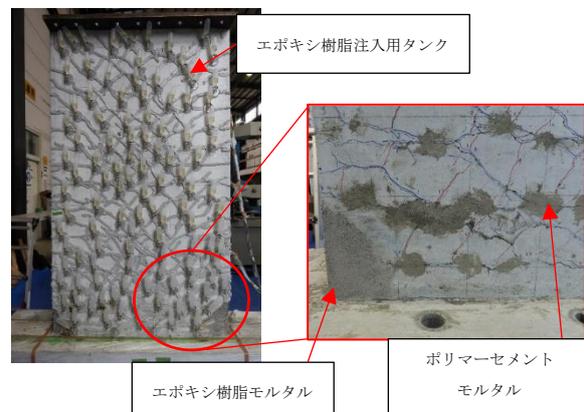


写真-1 補修工事の様子

し、エポキシ樹脂は材料試験を行っていないため、表-4はカタログ値を記載)、補修後の試験体の様子を写真-1に示す。コンクリート断面修復材においては、弾性係数がどちらもコンクリートよりも小さく、特にエポキシ樹脂モルタルではコンクリートの6割程度であった。また、強度は、ポリマーセメントモルタルはコンクリートと同程度、エポキシ樹脂モルタルはコンクリートよりも1.8倍程度高かった。工事終了後、1か月間養生を行った。

### 3.2 載荷計画

加力は新設試験体と同じ載荷サイクルとなるよう、図-3に示す載荷サイクルに従って加力を行った。

### 3.3 実験結果

図-7にW2R、W4Rの荷重変形関係を比較基準試験体であるW5とともに示す。W2RはW5と同様にR=3.0%の2サイクル目において、面外方向への急激な変形により荷重が低下したため載荷を終了した。損傷状態はW5と同様に進行した。また、W4RはR=3.0%まで耐力の上昇が確認され2サイクルの載荷を行うことができ、R=4.0%サイクルでは主筋の破断が発生し、2サイクル目において急激に耐荷重が低下したため載荷を終了した。

主筋の露出や最大耐力点など、損傷状態は W5 よりも遅れて進行した。

#### 4. 補修による性能の比較

##### 4.1 荷重変形関係による比較

新設試験体と補修試験体の荷重変形関係を用いて、各試験体の性能の回復係数を求めた。求める性能は初期剛性、降伏点割線剛性、最大耐力、等価粘性減衰定数の4種類とした。なお、補修後の試験体 W2R, W4R との比較対象には基準試験体である W5 を用い、W5 に対する補修後試験体の性能値の比を回復係数とした。また検討対象は正載荷側とした。

各性能の算出方法を以下に示す。

##### (1) 初期剛性 $K_{si}$

補修後試験体でのひび割れ点を確認することが難しいため、新設・補修後の両試験体で、最大耐力の1/3となる点での割線剛性を初期剛性とする。なお、新設試験体において、目視によって確認したひび割れ強度は50kN程度であり、初期剛性算定点はひび割れ発生点を若干超えている可能性があることに留意されたい。

##### (2) 降伏点割線剛性 $K_{sy}$

図-8に示すように、限界耐力計算法<sup>5)</sup>に基づき、性能曲線に対し歪エネルギーが等価となる降伏変位を求め、降伏点を設定しその割線剛性を降伏点割線剛性とする。

##### (3) 最大耐力 $Q_{max}$

荷重が最大になる点を最大耐力とする。

##### (4) 等価粘性減衰定数 $h_{eq}$

等価粘性減衰定数を式(1)で算出する。ただし、 $\Delta W$ は各変形角の第2サイクルにおける履歴曲線の面積であり、 $W$ は弾性ひずみエネルギーである。ただし、補修の影響により正負で挙動が異なるため、 $W$ は正負で平均を取る。計算方法の概念図を図-9に示す。

$$h_{eq} = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W}{(W_{pos} + W_{neg})/2} \quad (1)$$

$W_{pos}, W_{neg}$  : 正、負それぞれの等価歪エネルギー

以下、結果の考察を行う。表-6に各点でのせん断力、

表-6 代表点における各性能値

試験体	$Q_{cr}$ (kN)	$\frac{1}{3}Q_{max}$ (kN)	$K_{si}$ (kN/mm)	$Q_y$ (kN)	$R_y$ (%)	$K_{sy}$ (kN/mm)	$Q_{max}$ (kN)	$R_{max}$ (%)
新設	W2	45.7	82.3	42.3	215	0.547	251	1.45
	W4	52.1	83.5	46.3	203	0.548	245	1.49
	W5	46.6	83.7	42.7	218	0.544	251	1.45
補修	W2R	-	85.8	23.6	245	0.714	259	1.49
	W4R	-	93.8	23.5	252	0.928	278	3.01

$Q_{cr}$  : ひび割れ発生点強度  $K_{si}$  : 初期剛性  $Q_y$  : 降伏点強度  $R_y$  : 降伏点変形角

$K_{sy}$  : 降伏点割線剛性  $Q_{max}$  : 最大耐力  $R_{max}$  : 最大耐力点変形角

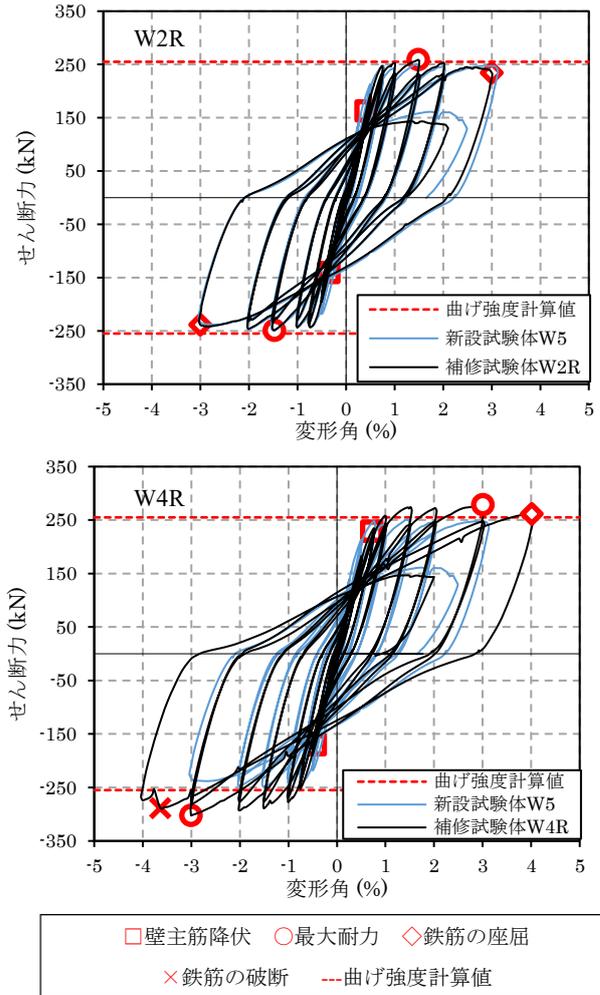


図-7 補修試験体の荷重-変形関係

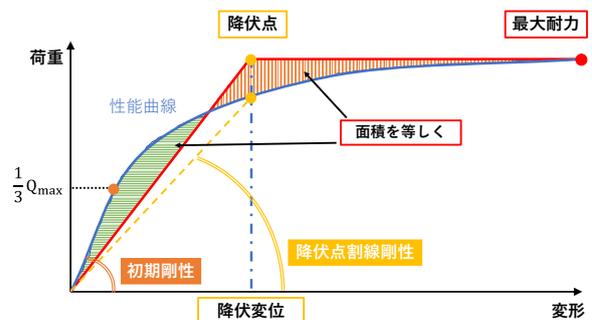


図-8 各剛性算出方針

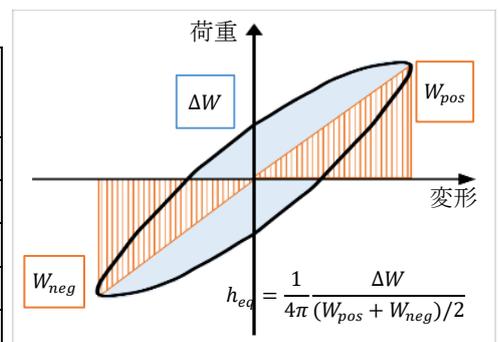


図-9 等価粘性減衰定数算出方針

変形，剛性の値を，図-10に初期剛性と降伏点割線剛性，耐力の回復係数を示す。

初期剛性は図-11の包絡線の比較図からもわかるように，両試験体とも5割程度の回復係数となった。ただし，実際のひび割れ点での回復係数ではなく，初期剛性はさらに低下している可能性もあるため注意が必要である。初期剛性が低下した原因には，ひび割れ補修に用いたエポキシ樹脂が完全には浸透し接着されず，载荷中にひび割れが開いてしまったことが考えられる。

W4Rでは降伏変形が大きくなり，W2Rよりも降伏点割線剛性の回復係数が小さくなった。また，最大耐力は，W2Rは新設試験体と同程度であり，W4Rでは10%程度上昇した。これらの原因として，鉄筋のひずみ硬化が損傷の進展に伴い進行したことが考えられる。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<sup>6)</sup>も耐力上昇の一因として考えることも出来るが，本実験では経過時間が1ヶ月半であるため，時効

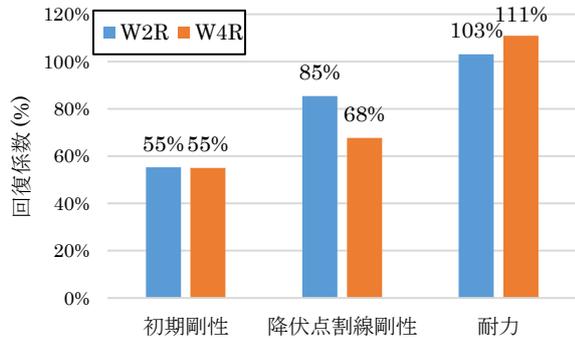


図-10 各性能値の回復係数

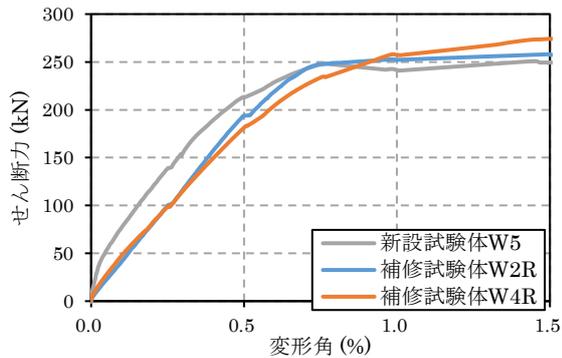


図-11 荷重変形関係包絡線の比較

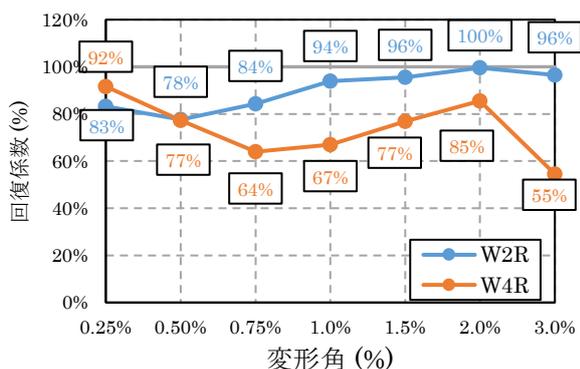


図-12 等価粘性減衰定数の回復係数推移

硬化が生じたかは今後の検討課題である。

図-12にエネルギー吸収能力を表す，等価粘性減衰定数の各変形角での回復係数の遷移を示す。両試験体とも，ひび割れが完全に補修されたわけではないため，等価粘性減衰定数は低下している。W2RはR=1.0%以降は未経験領域であるため，回復係数は100%近くに上昇している。W4Rも同様に未経験領域に近づくにつれ，回復係数が上昇していることがわかるが，100%まで回復していない要因として，ひび割れの本数が新設試験体より多く，スリップしていることや，繰返し加力による主筋の付着の劣化などが考えられる。

#### 4.2 計測区間ごとの各変形成分の比較

本実験では，図-13のように，接触型変位計を使用して曲げ変形及びせん断変形の両成分を計測した。本項目では，各計測区間における剛性の回復度に着目し，評価を行う。

図-14に，各計測区間での曲げ剛性の回復係数の分布を示す。ただし，R=0.75%以降は部材としての降伏点を迎えるため，R=0.50%までを対象とした。計測区間の分布は図-13のように3区間に縮約し，正載荷側で検討した。曲げ剛性の回復係数は計測区間によらず，概ね同程度であり，R=0.25%において60~80%程度の回復係数を示している。また，R=0.50%ではどの領域においてもおよそ100%近くまで回復していることがわかる。ただし，W4Rの最下段においては，コンクリートよりも剛性の小さいエポキシ樹脂モルタルによって補修を行ったため，圧縮側の剛性が小さくなり，曲げ剛性の回復係数は小さくなっている。

図-15に，各計測区間でのせん断剛性の回復係数の分布を示す。せん断剛性は計測区間によらず回復係数が同程度であったが，R=0.25%で50%程度と，曲げ剛性よりも回復度は小さい。この原因として，せん断ひび割れに

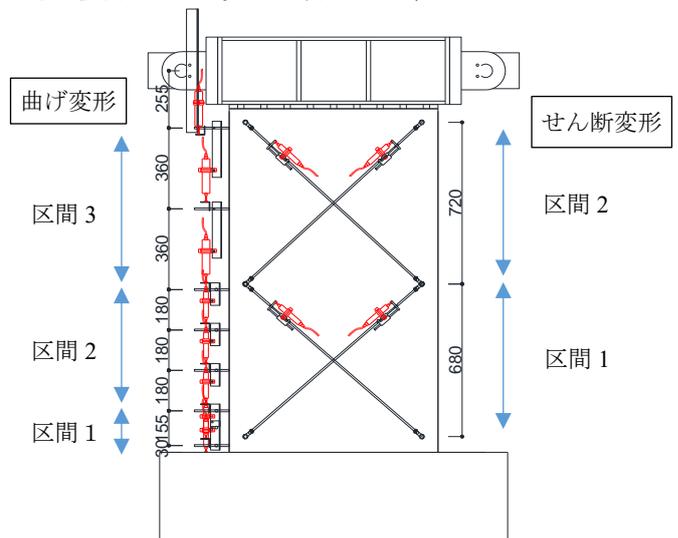


図-13 各変形の計測計画

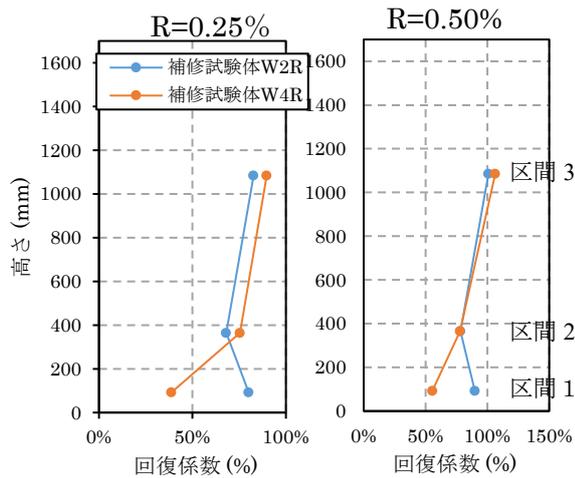


図-14 曲げ剛性回復係数分布

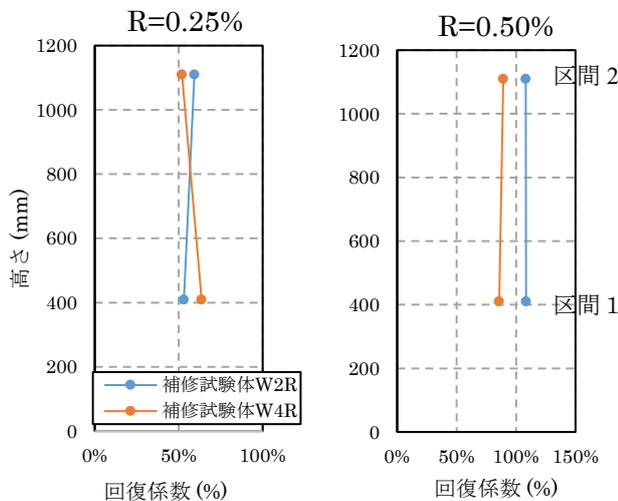


図-15 せん断剛性回復係数分布

については、補修をした箇所が、加力中に再度開いてしまう傾向があることが考えられる。

## 5. 結論

本研究では、補修による耐震性能の評価を目的として、曲げ降伏型耐震壁の新設試験体に、目標の損傷度 (II, IV) に達するまで静的載荷を行い、損傷部分の補修を行った後、再度、補修試験体の静的載荷を行った。本研究により得られた知見を以下に示す。

- (1) 補修試験体の静的載荷実験を行った結果、初期剛性は 55%、降伏点割線剛性は 60~80%程度に回復し、耐力は損傷度 II の試験体では新設試験体と同程度、損傷度 IV の試験体では 10%程度上昇した。また、等価粘性減衰定数は、損傷度 II 試験体では 80%以上、損傷度 IV 試験体では 60%以上に回復した。
- (2) 曲げ剛性、せん断剛性それぞれの回復係数を評価したところ、変形の小さな領域においては、曲げ剛性の回復度がせん断剛性の回復度よりも大きくなることがわかった。
- (3) 本実験結果から、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、エネルギー吸収能) は新設試験体と同程度まで回復することがわかった。また、主筋が座屈する直前まで載荷した試験体 (損傷度 IV) には、ひび割れ及びコンクリート断面補修により、初期剛性とエネルギー吸収能は完全には回復しないが、最大耐力、変形性能は新設試験体よりも上昇することがわかった。

## 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。また、実験費用の一部は、科学技術振興機構・産学共創プラ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) による支援を受けた。

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、東北大学学術研究員・張政氏に多大なるご支援、ご協力をいただいた。

ここに記して謝意を示す。

## 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, 2016.3
- 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) 建築行政情報センター, 日本建築防災協会: 2020年版建築物の構造関係技術基準解説書, 2020.11
- 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
- 5) 建設省告示第1457号: 損傷限界変位, Td, Bdi, 層間変位, 安全限界変位, Ts, Bsi, Fh 及び Gs を計算する方法並びに屋根ふき材等及び外壁などの構造耐力上の安全を確かめるための構造計算の基準を定める件, 2000
- 6) G. Loporcaro, S. Pampanin and M.V. Kral: Investigating the relationship between hardness and plastic strain in reinforcing steel bars, New Zealand Society of Earthquake Engineering, 2014