

論文 被災した RC 造曲げ破壊型耐震壁の補修による補修前後のひび割れ性状に関する検討

参川 朗*1・永井 智基*2・Alex Shegay*3・前田 匡樹*4

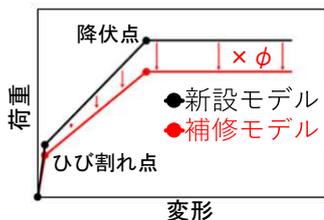
要旨：全3体のRC造曲げ破壊型耐震壁試験体に対して、異なる損傷度となるように静的載荷実験を行った後、補修をした試験体に対して再度加力を行うことで損傷度・補修方法に応じた耐震性能の回復度を評価した。さらに、詳細な損傷観察によって、初期剛性とひび割れ補修効果の関係性の評価を行なった。その結果、エポキシ樹脂によるひび割れ補修箇所の6～8割程度が再開し、初期剛性が55%程度の回復に留まることが分かった。また、補修前のひび割れ幅が大きい箇所において、エポキシ樹脂の充填率が高く、再開する率が低くなる、即ち相対的に補修効果が高くなることが分かった。

キーワード：RC造曲げ破壊型耐震壁、被災度区分判定及び復旧技術指針、ひび割れ補修、耐力回復係数

1. はじめに

RC造建物が地震被害を受け継続使用不可になった際、「補修」「補強」または「建替」が必要となる。しかしながら補修後の耐震性能の回復度合や、回復度合と損傷との関係については明らかになっていない部分も多い。筆者らは、補修した縮小4層RC造架構の振動台実験を行い、架構全体での補修による性能回復程度を確認した¹⁾。しかし、部材ごとの上記の各耐震性能の回復度合については、既往の研究では不明瞭な部分もあり、前述の架構試験体の実験結果を再現するような解析手法は確立されていない。各部材・各損傷度・各補修方法ごとの耐震性能の変化については（一財）日本建築防災協会の「震災建築物の被災度区分判定及び復旧技術指針」²⁾において、**図一1**に示す「耐力回復係数 ϕ 」によって、補修後の耐力の回復度合を評価する手法が示されているが、初期剛性や降伏点割線剛性等の各々の性能がどの程度回復するかについては明らかになっていない。

そこで、本研究では、RC造曲げ破壊型の耐震壁を対象に、各損傷度・補修方法ごとの初期剛性・降伏点割線剛性・耐力の回復係数を定義すること、及び、詳細な損傷観察によって、エポキシ樹脂注入補修効果を検討することを目的として、静的加力実験を行った。



図一1 耐力回復係数 ϕ の概念図

2. RC 造曲げ破壊型耐震壁の静的載荷実験

2.1 実験概要

本研究では、複数のRC造曲げ破壊型耐震壁の新設試験体に対して、異なる損傷度となるように静的載荷実験を行った後、補修をした試験体に対して再度加力を行った。補修前後の実験結果の比較に基づいて、各損傷度・補修方法ごとの各耐震性能と、エポキシ樹脂注入によるひび割れ補修効果の関係性について検討を行った。

2.2 試験体概要

本研究では、全5体の壁試験体(W2,W4,W5,W2R,W4R)を用意した。このうち新設試験体が全3体(W2,W4,W5)であり、全て同一の設計である。残りの補修試験体2体(W2R,W4R)はそれぞれW2,W4を補修した試験体である。新設試験体名の数字はそれぞれの試験体の最終的な損傷度を表す。損傷度の判定方法については文献2)を参照されたい。また、試験体のコンセプトとして、今回の部材実験により得られた知見を、将来的に補修後の架構試験体の解析に適用するため、文献1)で使用した**図一2**に示す1/4スケールの架構試験体X方向の曲げ破壊型耐震壁の1～2層部分を抜き出した試験体とした。反曲点高さ及びせん断余裕度を同程度とすることで、架構試験体と同じ破壊性状となるように設計し、**図一3**に示すような実大の1/3スケールとした。断面詳細を**図一4**に示す。使用材料は文献1)の架構試験体のコンクリート強度が53.1N/mm²と高かったため、コンクリートは呼び強度42、鉄筋はSD345及びSD295とした。コンクリート、鉄筋の材料試験結果をそれぞれ**表一1**、**表一2**に示す。コンクリート強度は約49N/mm²程度となり、架構試験体と同程度となった。また、補修試験体のW2R,W4Rのコン

*1 東北大学大学院 工学研究科 (学生会員)

*2 東北大学 工学部建築社会環境工学科 (学生会員)

*3 東京工業大学 科学技術創生研究院助教 Ph.D (正会員)

*4 東北大学大学院 工学研究科教授 工博 (正会員)

クリート強度に材齢による強度の上昇は見られなかった。

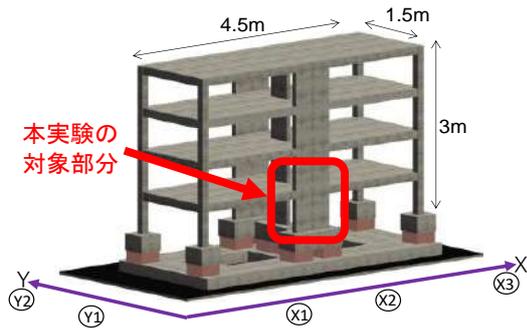


図-2 架構試験体図

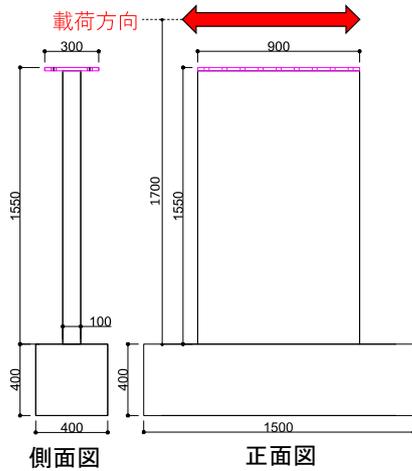


図-3 部材試験体

断面寸法	100×900
主筋	24-D13
帯筋	目-D6@90

図-4 断面詳細図

表-1 コンクリート材料試験結果

試験体	呼び強度 (N/mm ²)	材齢 (日)	弾性係数 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)
W2	42	47	3.28×10 ⁴	49.2	3.7
W4		38	3.41×10 ⁴	47.8	3.6
W5		52	3.26×10 ⁴	46.1	3.5
W2R		84	3.23×10 ⁴	49.3	3.6
W4R		95	3.29×10 ⁴	50.2	4.2

表-2 鉄筋材料試験結果

鉄筋	ヤング係数	降伏強度	引張強度
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
D-13(SD345)	1.87×10 ⁵	380.0	562.0
D-6(SD295)	1.76×10 ⁵	364.4	545.7

2.3 荷重方法

図-5 に示す正負交番繰り返し荷重で加力を行っており、各変形角で2サイクルの繰り返し加力とした。W2は損傷度Ⅱ、W4は損傷度Ⅳ、W5は損傷度Ⅴまで加力を行った。なお、補修試験体W2R及びW4Rは損傷度Ⅴまで加力を行った。

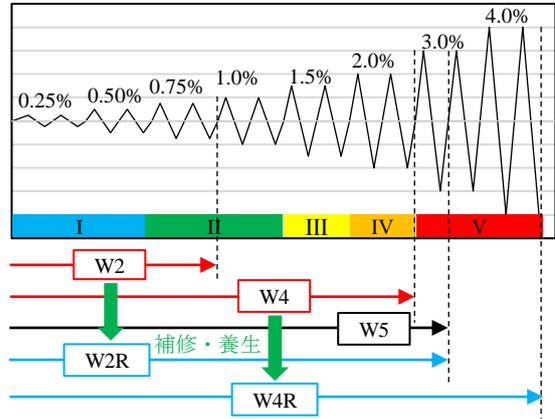


図-5 荷重サイクル

2.4 補修方法

2.4.1 補修方法の概要

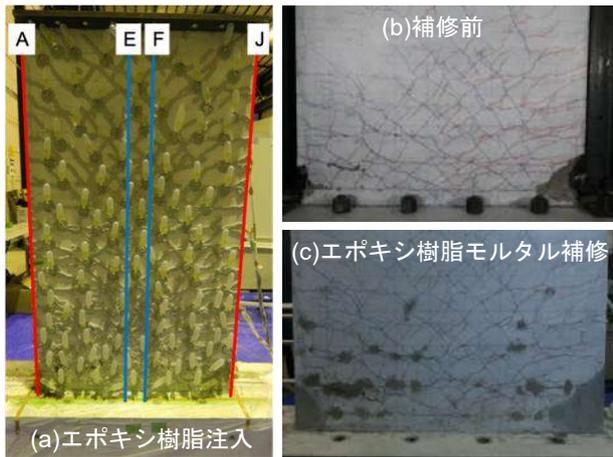
本研究では、補修後の耐震性能を評価するに当たっての社会還元性を考慮して、より一般的な補修方法を採用している。具体的には表-3 に示すように損傷度ごとに異なる補修方法としており、最大損傷度Ⅱの部材はひび割れ補修、最大損傷度Ⅳの部材はひび割れ補修に加えて、モルタルによる断面補修を施している。写真-1 にW4R試験体の補修前後の様子、補修材料試験結果を表-4 に示す。なお補修後の養生期間は1ヶ月程度とした。ポリマーセメントモルタルの特徴としては、コンクリートに比して剛性が2割程度低く、圧縮強度が同程度であった。エポキシ樹脂モルタルは、コンクリートに比して剛性が4割程度低く、圧縮強度が8割程度高かった。

表-3 損傷度と補修方法の対応関係

損傷状況	損傷度	補修方法
剥落なし	I	エポキシ樹脂注入
	II	
軽微な剥落	III	ポリマーセメントモルタル補修
大きな剥落	IV	エポキシ樹脂モルタル補修

表-4 補修材料試験結果

種類	弾性係数 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)
エポキシ樹脂	-	-
ポリマーセメント系断面修復材	2.71×10 ⁴	55.5
エポキシ系補修モルタル	1.88×10 ⁴	90.5



写真一 W4,W4R の補修前後の様子

2.4.2 エポキシ樹脂充填率

本研究では、エポキシ樹脂による補修効果の評価を行っている。そこで、エポキシ樹脂の充填が十分に行われたかを確認するため、ひび割れ総体積に対するエポキシ樹脂の総注入量、即ちエポキシ樹脂充填率を算出した。具体的には壁の表面上に 100x100 mm のグリッド線を引き、式(1)によって算出した。

$$V = \sum_{i=1}^N l_i \cdot b_i \cdot t \quad (1)$$

ここで、V：ひび割れ総体積、 l_i ：100x100 mm メッシュ領域 1 つ当たりのひび割れ総長さ、 b_i ：100x100 mm メッシュ領域の平均ひび割れ幅、t：試験体壁厚さ、N：100x100 mm 領域の個数を表す。幅と長さに関してはひび割れ損傷観察から、深さは耐震壁の厚さ=100mm としてひび割れ総体積を推定した。エポキシ樹脂使用量に関しては、補修時に使用するタンク残量を目視によって確認することで推定した。ひび割れ総体積、エポキシ使用量、エポキシ充填率を表一5 に示す。W2R,W4R で損傷度合が異なるため、W4R のエポキシ樹脂使用量は W2R の 6.4 倍となった。充填率に関しては共に 100% を超える結果となった。これは両推定量の誤差に加え、漏れ出してしまうエポキシ樹脂が存在するためと思われるが、補修工事が適切に完了したことを示すには十分であると考えられる。

表一5 エポキシ樹脂充填率

	ひび割れ総体積(cm ³)	エポキシ使用量(cm ³)	エポキシ充填率(%)
W2R	174	258	148%
W4R	582	1649	283%

3. 実験結果

3.1 比較方針

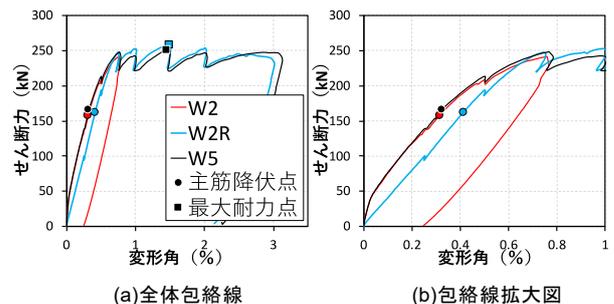
本研究では、基本的に補修前後の性能の比較を行う際に、W2 対 W2R、W4 対 W4R のように比較を行なってい

る。しかしながらこの場合、W2,W4 それぞれの未経験領域での比較が行えないことから、未経験領域の比較対象として W5 試験体を用意している。

3.2 荷重変形関係

図一6 に W2, W2R, W5 の正側の荷重—変形関係の包絡線を、図一7 に W4, W4R, W5 の正側の荷重—変形関係の包絡線を示す。また文献 1) に記載の方法で算出した W2R 及び W4R の初期剛性、降伏点割線剛性、最大耐力の回復率を表一6 に示す。この結果から W2R、即ち損傷度 II 程度の損傷を受けた RC 造耐震壁に対してひび割れ補修を施すと、初期剛性は 55%、降伏点割線剛性は 85% に低下し、最大耐力は変化がほとんどなかったと言える。初期剛性の低下の原因としては、初期剛性に支配的な影響を与えるコンクリートの引張抵抗が低下している、即ちエポキシ樹脂の剛性が低いこと、並びにひび割れ補修が完全ではなかったことが挙げられる。最大耐力に変化が見られなかったのは、曲げ耐力に支配的な影響を与える鉄筋が、W2 の場合はひずみ硬化領域に未達であったため、ほとんど変化が見られなかったからだと考えられる。

一方 W4R、即ち損傷度 IV 程度の損傷を受けた RC 造耐震壁にひび割れ補修及び断面補修を施すと、初期剛性は 55% 程度に回復、降伏点割線剛性は 7 割程度に回復し、最大耐力は 1 割上昇したことが分かる。初期剛性の低下は、ひび割れ補修が完全ではないこと、加えてエポキシ樹脂の剛性が低いためだと思われる。降伏点割線剛性の低下に関しては、壁主筋が一度降伏域を経験していたことにより生じる、図一8 に示すひずみ硬化及び歪時効硬化により、鉄筋の降伏応力が増大し、その影響で降伏変位も増大したためだと思われる。最大耐力が 1 割程度上昇した点については、同じく壁主筋の歪時効硬化によるものと思われる。この現象は文献 1) の補修架構試験体の振動台実験でも確認されており、この際は補修後の架構試験体の最大耐力が新設試験体に比べて 1.17 倍増加している。架構試験体では新設実験から補修実験までが約 1 年間あったのに対し、本実験では約 1 ヶ月であったために 1 割程度の上昇に留まったと考えられる。



図一6 W2,W2R,W5 荷重—変形関係

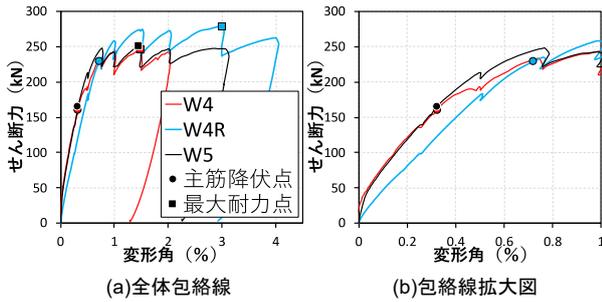


図-7 W4,W4R,W5 荷重—変形関係

表-6 耐震性能回復係数

	初期剛性	降伏点割線剛性	最大耐力
W2R	55%(対W2)	85%(対W5)	103%(対W5)
W4R	55%(対W4)	68%(対W4)	111%(対W4)

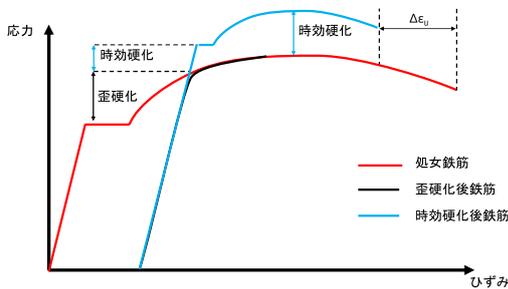


図-8 鉄筋のひずみ硬化と歪時効硬化の概念図

3.3 損傷の進展

表-7 に損傷の進展の様子を示す。W2,W4,W5 は新設試験体であり、異なる変形角を最終加力としているが、損傷の進展は同じであった。また設計コンセプトの通り、文献1)の架構試験体と同じ、曲げ破壊型の破壊性状となった。W2R では、損傷の進展は新設試験体とほぼ同様であった。W4R は、壁脚部のエポキシ樹脂モルタル補修の影響で（剛性がコンクリートの4割程度低く、また圧縮強度が1.9倍程度高いこと）、W4 が変形角2.0%で鉄筋の露出が見られる程の大きな剥落が生じたのに対し、W4R は2.0%でも剥落は生じず、3.0%で鉄筋の露出が見られた。

表-7 損傷の進展

変形角	W2,W4,W5		W2R		W4R	
	損傷度	性能曲線	損傷具合	性能曲線	損傷具合	性能曲線
0.25%	I		ひび割れ	I	ひび割れ	
0.50%	II		主筋降伏	II	主筋降伏	
0.75%	II					主筋降伏
1.0%	III		軽微剥落	III	軽微剥落	軽微剥落
1.5%		最大耐力		最大耐力		
2.0%	IV				III	
3.0%		耐力低下	鉄筋露出	耐力低下	鉄筋露出	鉄筋露出
4.0%	V		鉄筋座屈	V	最大耐力	鉄筋座屈

3.4 ひび割れ観察

3.4.1 ひび割れ定義

エポキシ樹脂の接着強度や引張強度はコンクリートに比して高いため、エポキシ樹脂の充填が十分であれば、補修箇所が開くのではなく、その近くで新たなひび割れ

が発生するはずである。そこで本研究では、補修試験体のひび割れ観察において、エポキシ樹脂によるひび割れ補修の有効性を確認するため、補修をしたが再度開いたひび割れ（以降「旧ひび割れ」とする）と、新たに生じたひび割れ（以降「新ひび割れ」とする）の区別をつけて損傷観察を行った。図-9 に示すように旧ひび割れは、補修試験体の加力前のひび割れ幅、即ち、エポキシ樹脂の充填幅を記録しておき、この値よりもひび割れ幅が大きくなった場合に、「旧ひび割れ発生」と定義した。故に、「旧ひび割れ幅」は式(2)によって算出した。

$$b1 = b2 - b3 \quad (2)$$

ここで、 $b1$: 旧ひび割れ幅、 $b2$: 目視観察幅、 $b3$: エポキシ樹脂幅を表す。また上記二つのひび割れに加えて、エポキシ樹脂モルタル補修部のひび割れを「樹脂モルタル補修部ひび割れ」として区別して取り扱った。故に、補修試験体のひび割れは「旧ひび割れ」「新ひび割れ」「樹脂モルタル補修部ひび割れ」の全3種に分類される。

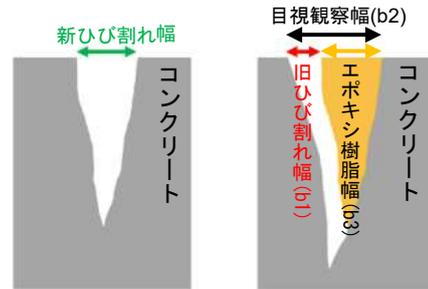


図-9 新旧ひび割れ定義

3.4.2 ひび割れ図

図-10 に0.75%Peak時のひび割れ図を示す。青線が新設時正加力、赤線が新設時負加力、ピンク線が補修後正加力、緑線が補修後負加力時に発生したひび割れである。新設時のひび割れが、曲げ・せん断ともに広く発生しているのに対して、補修後のひび割れは試験体脚部に部分的に発生するのみで、その本数も非常に少ない。これは補修をしたひび割れが再度開いているためだと思われる。

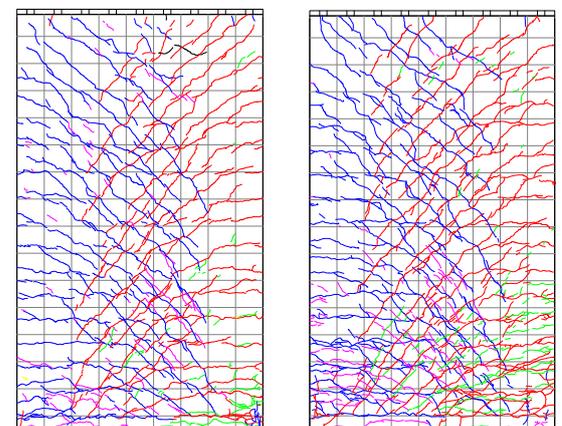


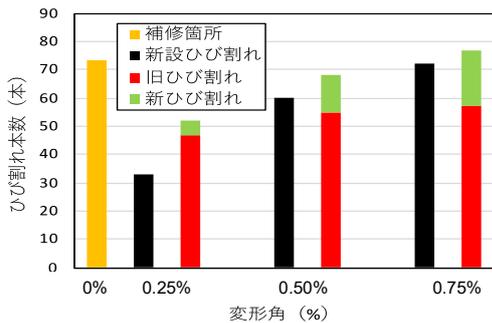
図-10 0.75%Peak時のひび割れ図

3.4.3 ひび割れ本数・幅計測箇所

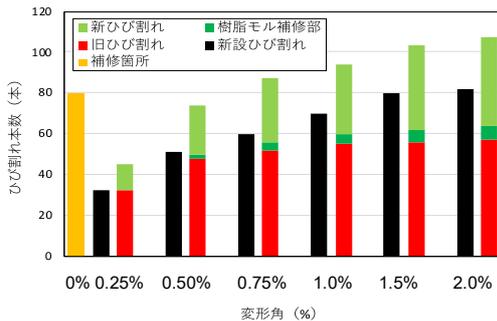
本研究では写真一1 に示す赤線を曲げひび割れとして、青線をせん断ひび割れとして計測している。また正載荷では A 列及び F 列を、負載荷では E 列及び J 列上を計測している。なお以降のひび割れ本数・幅の総計は、サンプル数を確保するため、正負合算の値を使用している。また、旧ひび割れの本数及び幅の傾向をより正確に掴むため、以降の本数・幅の総計は各変形角の Peak 時の値を使用している。

3.4.4 ひび割れ本数推移

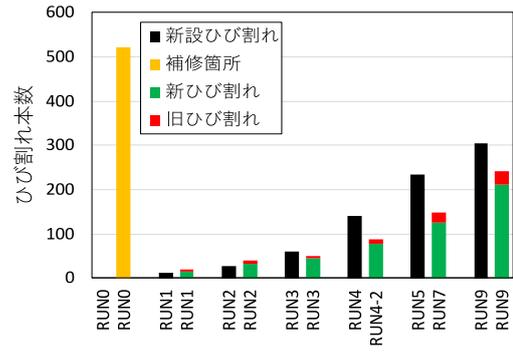
W2 及び W2R, W4 及び W4R のひび割れ本数の推移をそれぞれ図一11, 図一12 に示す。また、図一13 に文献1)におけるひび割れ本数の推移を示す。W2R,W4R 共に降伏に至る前の 0.75%の段階で旧ひび割れが多く発生している。補修箇所数に対する旧ひび割れ発生数の率は降伏前の 0.75%時で W2R では 80%程度, W4R では 65%程度となっており、ひび割れ補修の効果が完全ではないことが分かる。W4R の方が旧ひび割れの発生が抑えられている原因としては、後述の 3.4.6 に記載の通り、補修前のひび割れ幅が大きいほど、エポキシ樹脂の充填率が高まるためだと思われる。また、文献1)では、新設試験体と補修試験体のひび割れ本数の差を、加振終了時には閉じていたために肉眼で捉えきれなかった旧ひび割れであると推定していたが、この推定は正しいと考えられる。文献1)では振動台実験であったためひび割れ幅を Peak 時に計測することができなかったが、本研究では静的載荷実験であり Peak 時の計測が可能となったために、より正確に補修をしたひび割れの性能を観察することができたと言える。



図一11 W2,W2R ひび割れ本数推移



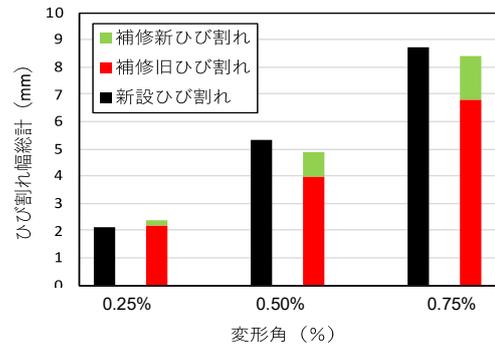
図一12 W2,W2R ひび割れ本数推移



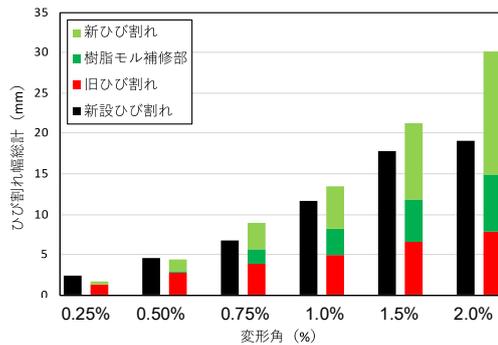
図一13 架構試験体ひび割れ本数推移

3.4.5 ひび割れ幅の総計推移

W2 及び W2R, W4 及び W4R のひび割れ幅の総計の推移をそれぞれ図一14, 図一15 に示す。新設実験時のひび割れ幅の総計に対する旧ひび割れ幅の総計は、降伏前の変形角 0.75%時で、W2R では 75%程度, W4R では 60%程度となっており、本数の傾向と同様にひび割れ補修の効果が完全ではないことが分かる。



図一14 W2,W2R 総計ひび割れ幅推移



図一15 W4,W4R 総計ひび割れ幅

3.4.6 補修前後ひび割れ幅分布

W2R 及び W4R における、ひび割れ補修を施した箇所の補修前後のひび割れ幅の分布を図一16 に示す。縦軸は補修後の加力時 (W2R : 0.75%, W4R : 2.0%) に再度開いた旧ひび割れ幅である。横軸は補修前、即ち新設試験体実験時に経験した最大ひび割れ幅 (W2 : 0.75%, W4 : 2.0%) である。まず全体的な傾向について述べる。図一16 は縦軸が補修後、横軸が補修前のひび割れ幅であるから、仮に補修を全くしない場合には全てのひび割れ幅が補修前

後で概ね等しくなり、全てのプロットが破線の対角線付近に位置するはずである。しかしながら、補修の効果によりそのような比例関係の傾向は読み取れない。全体的な傾向として、補修前幅が 0.2mm 以下の範囲では補修後の幅が大きく、0.2mm 以上では補修後の幅が小さい傾向が読み取れる。また個々の凡例による傾向の違いについては、W2R と W4R、曲げひび割れとせん断ひび割れで違いは見られなかった。続いて図-17 について述べる。図-16 において、縦軸及び横軸 0.2mm 以下の箇所に関しては明確な傾向が見られないことや、一部前述の傾向に従わないプロット(横軸 0.8mm 付近)が存在する。そこで図-16 の縦軸を横軸で除することで基準化したグラフが図-17 である。このグラフでは、補修前幅が 0.2mm 以下の範囲では 1 を超えるプロットが多く存在するのに対し、0.2mm 以上では全てのプロットが 1 以下となっている。以上の結果から、ひび割れ補修では補修前のひび割れが大きいほどエポキシ樹脂の充填率が高まり、反対に補修前のひび割れ幅が狭い時はエポキシ樹脂の充填率が下がり、ひび割れ補修効果が十分に得られない傾向があると言える。

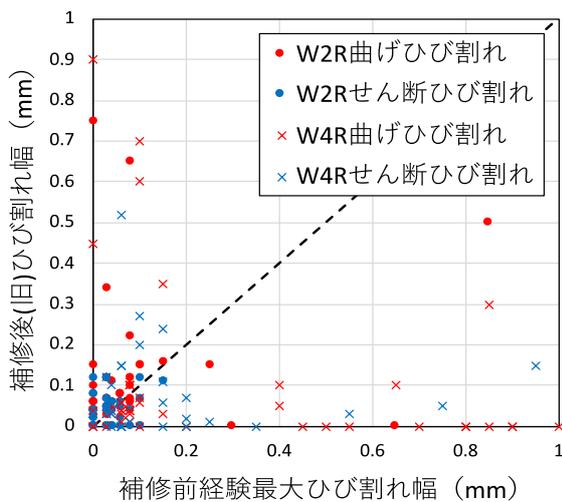


図-16 補修前後ひび割れ幅分布

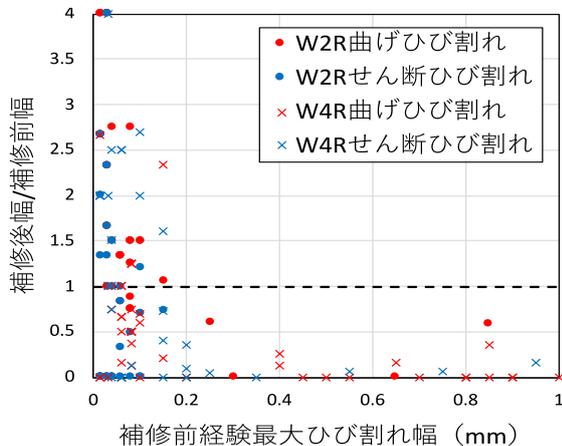


図-17 ひび割れ幅分布(対補修前比)

4. 結論

RC 造耐震壁に対して損傷度 II、損傷度 IV 程度まで静的載荷実験を行なった後、補修を施し、再度加力を行なった結果、以下の結論が得られた。

- (1) 損傷度 II 及び IV 程度に至った後にひび割れ補修を行った試験体は、初期剛性が新設試験体は 55% に回復した。
- (2) 補修箇所数に対する旧ひび割れ発生数の率は W2R では 80%程度、W4R では 65%程度であった。初期剛性の大幅な低下の原因として、エポキシ樹脂の剛性が低いことに加え、ひび割れ補修箇所の一部が降伏前に再度開いてしまうことが挙げられる。
- (3) ひび割れ補修に関して、補修前のひび割れ幅が小さい箇所においては、エポキシ樹脂による充填が十分ではないが、反対に補修前のひび割れ幅が比較的大きい箇所では充填率が高まり、相対的に補修効果が高くなる傾向がある。

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。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・東京工業大学准教授)による支援を受けた。

実験の実施、試験体の設計、計画、試験体の製作、補修工事などでは、三浦耕太氏、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、建築研究所・関松太郎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表する。

参考文献

- 1) 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
- 2) 日本建築防災協会: 2015 年改訂版 再使用の可能性を判定し、復旧するための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