

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	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
Title(English)	
著者(和文)	参川朗, 秋谷理穂, 永井智基, Alex Shegay, 三浦耕太, 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, 11



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

参川朗¹⁾，秋谷理穂²⁾，永井智基³⁾，Alex Shegay⁴⁾，
三浦耕太⁵⁾，前田匡樹⁶⁾，関松太郎⁷⁾

- 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: tohokumikawaakira@gmail.com
- 2) 東北大学 工学部建築社会環境工学科
E-mail: riho.akiya.t7@dc.tohoku.ac.jp
- 3) 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
- 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 株式会社大林組，博士（工学）
E-mail: miura.kota@obayashi.co.jp
- 6) 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
- 7) 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

震害を受けたRC部材の被災後や補修後の耐震性能の低下や回復度について，日本建築防災協会(2015)では耐震性能を耐力に代表させて係数を乗じる便宜的な方法で，耐力回復係数 ϕ が定義されているため，初期剛性，降伏剛性，減衰といった性能は適切に評価できていない．そこで一般的な補修工法を用いた既往の補修部材実験，全9論文全24試験体を対象に初期剛性，降伏剛性，耐力，減衰を個別に評価した．初期剛性は45%～75%程度，降伏剛性は80%程度，耐力は95～110%程度，減衰は損傷度が軽いほど，塑性率が增大するほど回復係数が増大する事が分かった．

キーワード： 鉄筋コンクリート，補修，部材実験，データベース

1. 初めに

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」が必要となるが，補修後の耐震性能の回復度合いについては明らかになっていない部分も多い．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、図1に示す耐力を一律に低減する考えの下、「耐力回復係数 ϕ 」によって、補修後の耐震性能の回復度合を評価する手法が示されている。しかしながら図2に示すように初期剛性 K_i や降伏剛性 K_y 、減衰性能といった各々の耐震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。筆者らは、補修した縮小4層RC造架構の振動台実験^{2),3),4)}、及びこの架構試験体の1層耐震壁及び梁を模した補修部材試験体の静的載荷実験^{5),6),7)}を行い、架構全体及び部材ごとの上記の各耐震性能の回復度合いを評価した。これらの実験では計5体の補修試験体を使用した。得られた回復度合いは限られたデータによる結果である。そこで本研究では上記2つの実験の5試験体に加えて、既往の補修部材実験7論文、全19試験体を加えた計24試験体について初期剛性・降伏剛性・耐力・減衰別に評価しデータベースを構築し、傾向を分析することを目的とする。

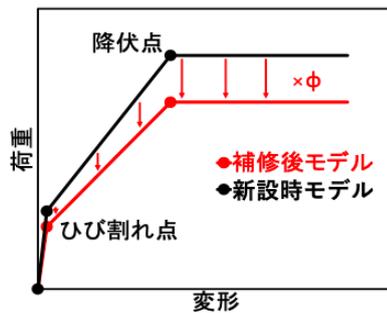


図1 耐力回復係数 ϕ の概念図

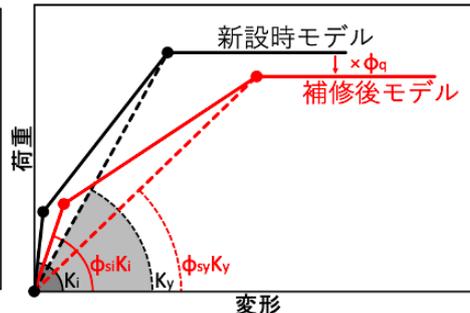


図2 耐震性能別評価法の概念図

2. 既往研究

対象としたRC造補修部材実験論文を表1に示す。表に記載の論文番号は、末尾の参考文献番号を表している。論文番号4の架構試験体を除き、単一の部材実験のみを対象とし、部分架構試験体や側柱付き壁、袖壁付き柱等の実験は除いている。またエポキシ樹脂によるひび割れ補修や、モルタルによる剥落補修といった一般的な補修工法を採用したもののみを対象とし、補強を施したものは含めていない。表1に記載の損傷度は、各補修試験体の補修前の損傷度を示す。また初期剛性、降伏剛性、減衰に関しては画質の影響で読み取れなかったものが存在する。図3にパラメータ別のデータベース分布を示す。

表1 データベースに用いた既往研究一覧

論文番号	筆頭著者	試験体								加力 軸力比 %	補修 損傷度	補修方法				回復係数 ϕ			減衰読み取りの可否				
		部材種	破壊形式	名称	縮尺	アスペクト比	主筋		帯筋			残留変形	ひび割れ補修の有無	断面補修の有無	鉄筋入換の有無	初期剛性	降伏剛性	最大耐力					
							鋼種	鉄筋種	引張鉄筋比 %							剪断補強筋比 %	ϕ_{si} %	ϕ_{sy} %		ϕ_q %			
4	三浦耕太	架構	曲げ	架構試験体	1/4							なし	○	○	○	63%	80%	121%	○				
8	渡邊一悟	柱	曲げ	2,0-R-3	1/4	5.26	SD345	D13	0.45%	0.20%	1.1%	II	○			79%	86%	104%	○				
				III								○			81%	83%	107%	○					
				IV									○		83%	85%	104%	○					
				V									○		77%	80%	106%	○					
9	渡邊一悟	柱	曲げ	4,0-R-4	1/1	5.00	SD345	D22	0.38%	0.24%	1.6%	III	○			79%	76%	111%					
				III								○			70%	74%	106%						
10	平野勝哉			No.1R	1/1	1.25	SD345	D32	0.62%	0.25%	0.0%	V	なし	○	○	○	56%	56%	117%	○			
11	伊東康貴	剪断	IPH-06-01	不明	3.33	SD345	D19	1.27%	0.75%	10.0%	III	○	○			83%	96%						
											IPH-06-02	1.59%	0.59%	10.0%	III	なし	○	○		64%	87%	104%	
											IPH-06-03				III	○	○		70%	80%	104%		
12	田才晃	梁	曲げ	RB1	1/1	1.50	SD30	D16	0.47%	0.51%	0.0%	II	あり	○				116%					
7	三浦耕太	梁	曲げ	G2R	1/2	6.07	SD345	D13	0.68%	0.49%	0.0%	II	○			46%	97%	105%	○				
				G4R								IV	○	○		49%	92%	121%	○				
			曲げ	W2R	1/3	1.89	SD345	D13	1.78%	0.70%	0.0%	II	○			55%	86%	103%	○				
				W4R								IV	○	○		55%	74%	109%	○				
13	周小真			No.2	1/3	0.45	不明	D13	不明	0.42%	3.0%	V	あり	○	○	○	68%	122%	106%				
14	中山潤	壁	剪断	C-No.14	不明	1.39	SD685	D16	不明	0.44%	10.0%	IV	○	○		41%	77%	100%					
				C-No.15								IV	あり	○	○		31%	46%	70%				
				D-No.19								IV	○	○		25%	67%	71%					
				No.19								IV	○	○		52%	94%	107%	○				
15	窪田敏行	壁	剪断	No.20	不明	1.32	不明	D22	不明	0.64%	0.0%	IV	○	○		43%	90%	99%	○				
				No.22								IV	○	○		47%	95%	81%	○				
				No.23								IV	○	○		52%	91%	119%	○				
				No.23								IV	○	○		52%	91%	119%	○				

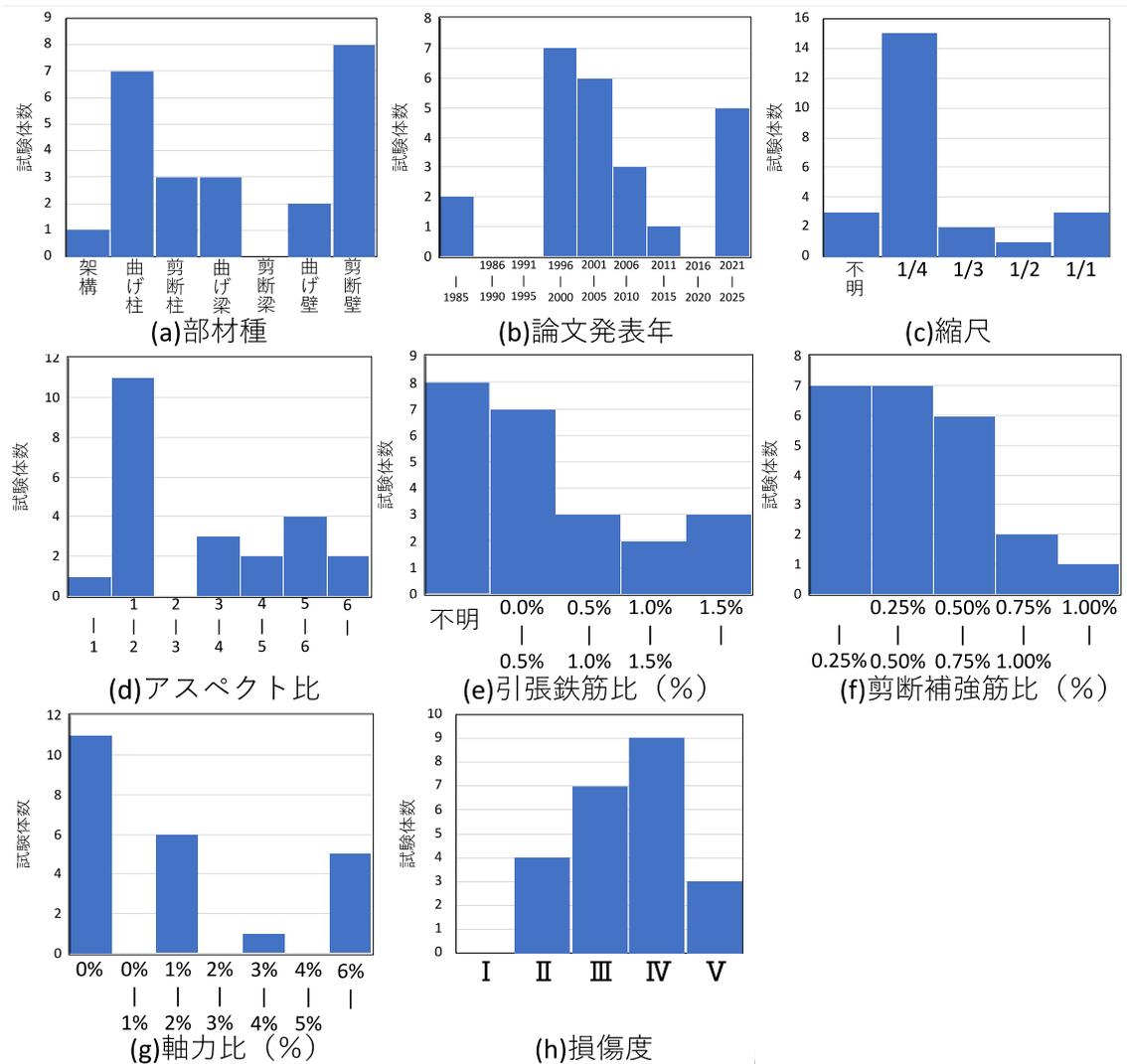


図3 データベースに含まれる試験体の各パラメータの分布

3. 耐震性能評価法

全試験体に対して同一の方法で初期剛性，降伏剛性，耐力を定義することを目的として図4に示すように，以下の手順で試験体包絡線のトリリニア化を行った．まず最大耐力点の8割に耐力低下した点を終局点とした．ただし，柱梁は変形角3%，壁は変形角2%の点を終局点の上限とした．次に最大耐力の1/3の点を第一折れ点とした．最後に第三勾配を0とした上で等価面積となるよう，かつ相違面積が最小となるように第二折れ点を設定し，トリリニアモデルを算定した．算定したトリリニアをもとに初期剛性，降伏剛性，最大耐力を算定後，図2に示すように新設時の性能を基準として，各耐震性能の回復係数 ϕ ， ϕ_{sy} ， ϕ_q を算出した．減衰の回復係数に関しては，論文に記載の履歴ループのグラフを読み取り，基準となる新設試験体と補修試験体の等価粘性減衰定数 h_{eq} を図5及び式(1)に準じて塑性率ごとにそれぞれ算出し，式(2)によって減衰の回復係数 ϕ_h を算出した．ここで h_{eq} ：基準新設試験体の等価粘性減衰定数， h_{eq}' ：補修試験体の等価粘性減衰定数を表す．尚塑性率 μ については式(3)によって算出した．ここで R ：基準新設試験体または補修試験体の変位， R_y ：基準新設試験体の降伏変位を表す．

$$h_{eq} = \Delta W / (4\pi \times W_e) \quad (1)$$

$$\phi_h = h_{eq}' / h_{eq} \quad (2)$$

$$\mu = R / R_y \quad (3)$$

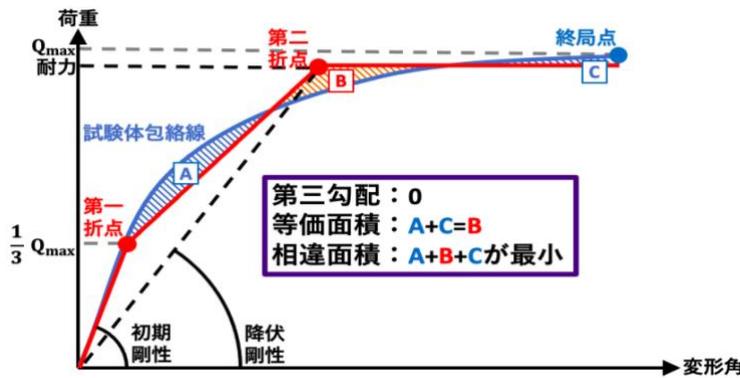


図4 トリリニア化概念図

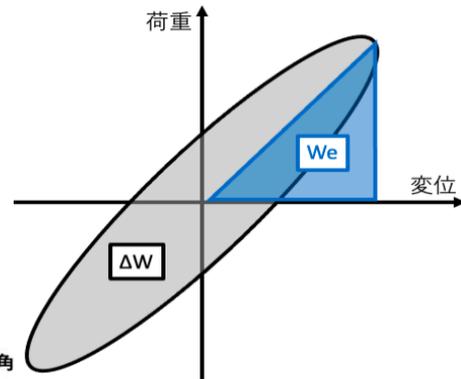


図5 等価粘性減衰定数 h_{eq}

4. データベースにおける耐震性能回復係数

4.1 初期剛性回復係数 ϕ_{si}

初期剛性の回復係数 ϕ_{si} を図6に示す。サンプル数が限られているため損傷度の違いによる傾向は見受けられないが、曲げ部材よりも剪断部材が、柱梁よりも壁の方が回復係数が低いことが分かる。これは剪断系部材の方がひび割れがより広範囲に渡って発生し、補修工事でエポキシ樹脂がひび割れに十分に充填されない場合が多いためと考えられる。各部材種ごとの回復係数の平均値は0.45~0.75と低い回復係数に留まった。要因としては、エポキシ樹脂の充填が不十分となったことに加えて、エポキシ樹脂の剛性がコンクリートに比して低いことが挙げられる。エポキシ樹脂の充填が不十分になった要因としては、図3に示すように対象とした試験体の多くが縮尺1/4スケールであり、ひび割れ幅が実建物に発生するものより小さかったことが原因である可能性も考えられる。

4.2 降伏剛性回復係数 ϕ_{sy}

降伏剛性の回復係数 ϕ_{sy} を図7に示す。損傷度の違い及び部材種による明確な傾向は見られないが、部材種ごとの平均値は概ね0.8程度で初期剛性よりも回復係数が高い。これは図8に示す鉄筋の歪み時効硬化の影響で鉄筋の降伏強度が上昇したことに起因して、降伏点耐力が上昇したためだと考えられる。歪み時効硬化は歪みを与えられた金属材料が室温で長時間放置された場合に硬化する現象である。詳しくは参考文献16)を参照されたい。

4.3 耐力回復係数 ϕ_q

耐力の回復係数 ϕ_q を図9に示す。剪断壁を除く試験体のほとんどで1以上の回復係数となっている。これは降伏剛性の考察と同様、図8に示す鉄筋の歪み時効硬化の影響で鉄筋の降伏強度が上昇したためだと考えられる。しかしながら剪断壁では、荷重に対しては主筋よりもコンクリートが支配的に抵抗し、コンクリートが剪断破壊によって失った剪断耐力をエポキシ樹脂によって十分に回復できていないため、十分な最大耐力を発揮できない場合があると考えられる。

4.4 ϕ_{si} , ϕ_{sy} , ϕ_q の比較

上記三つの回復係数の平均値を図10に示す。耐力、特に初期剛性に関しては部材種によって値が異なるが、上記三つの回復係数の大小関係は初期剛性の回復係数 ϕ_{si} が最も小さく、次いで降伏剛性の回復係数 ϕ_{sy} が0.8程度、耐力の回復係数 ϕ_q が1程度で最大となった。

4.5 減衰回復係数 ϕ_h

減衰の回復係数 ϕ_h を図11に示す。剪断壁については剪断ひび割れが広範囲に渡って発生し、エポキシ樹脂の充填が十分でないために回復係数が0.2~0.4と小さくなっている。その他の部材ではサンプルの偏りにより部材種ごとの比較が難しかったため、損傷度による比較を行うが、傾向としては損傷度が大きいほど、回復係数は低くなることが分かった。これは損傷度が大きいほどコンクリートの破壊が進んでおり、エネルギー吸収能力が低下するためであると考えられる。また塑性率ごとの回復係数の傾向としては、塑性率が增大するほど回復係数が高くなり、未経験領域（新設試験体の最大変形を超える領域）では回復係数が1に漸近する傾向が見られた。

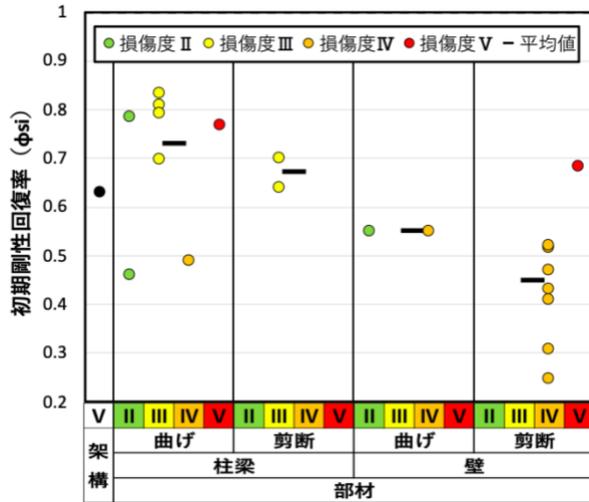


図6 初期剛性回復係数 ϕ_{si}

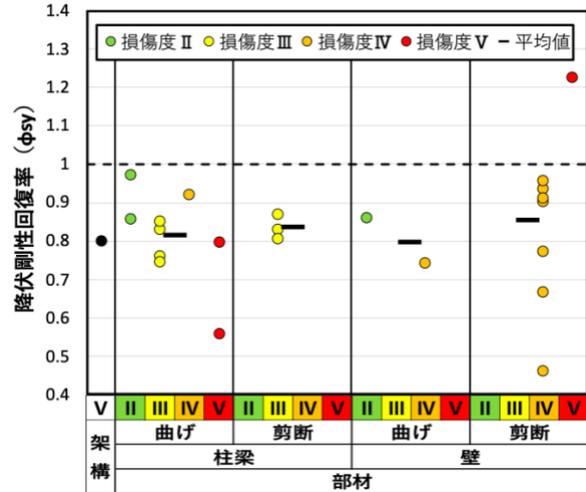


図7 降伏剛性回復係数 ϕ_{sy}

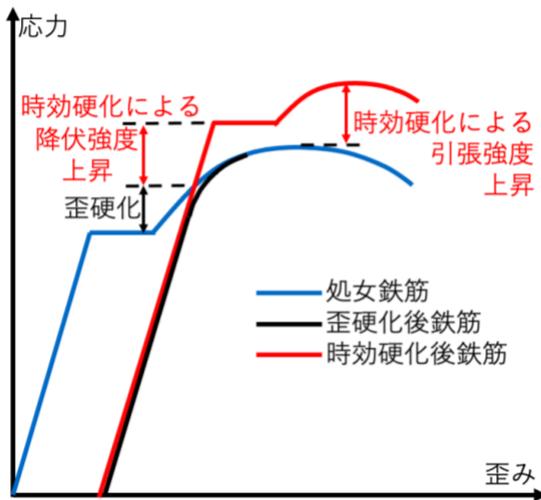


図8 歪み硬化及び歪み時効硬化概念図

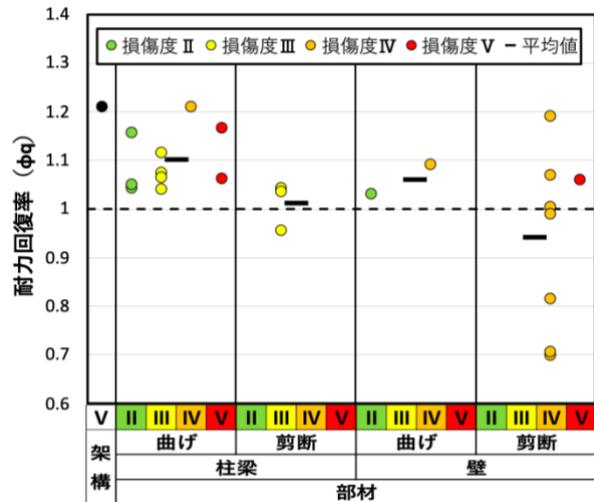


図9 耐力回復係数 ϕ_q

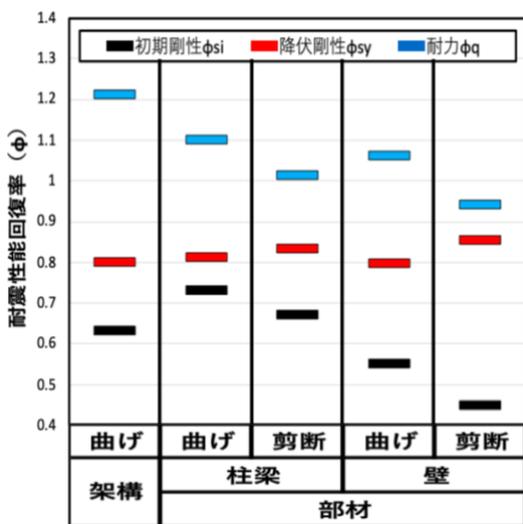


図10 各耐震性能回復係数の平均値

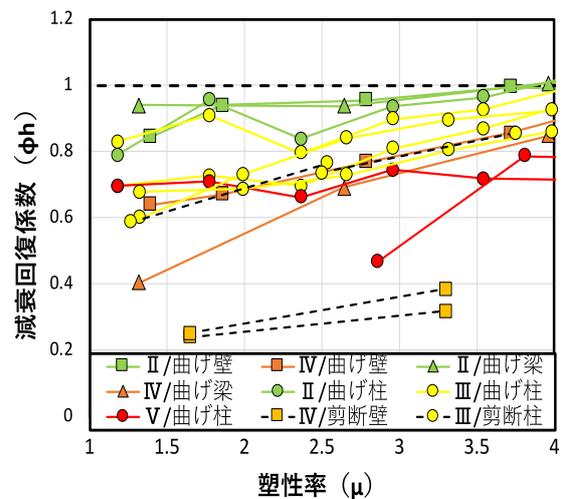


図11 減衰回復係数 ϕ_h の推移

5. 結論

一般的な補修工法を用いたRC造補修部材実験試験体全24試験体に対して、初期剛性、降伏剛性、耐力、減衰別に評価を行い、それぞれの回復係数の概ねの傾向は以下の通りとなった。

- ①初期剛性回復係数 ϕ_{si} : 部材によって値が異なり、0.45~0.75の回復係数
- ②降伏剛性回復係数 ϕ_{sy} : 概ね0.8程度で初期剛性よりも回復係数が高い
- ③耐力回復係数 ϕ_q : 剪断壁を除き1.0を超え、損傷前の耐力が回復する
- ④減衰回復係数 ϕ_h : 損傷度が軽いほど、塑性率が增大するほど回復係数が增大

本研究の結果は、構築したデータベースの限られた実験データに基づくものであり、部材種と損傷度の組み合わせごとの傾向を掴むには至らなかった。今後は鉄筋の歪み時効硬化の影響等も考慮した検討を行う予定である。

謝 辞

本研究では、東北大学前田研究室と大林組技術研究所の共同研究によるものであり、穴吹拓也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及び復旧技術指針，2016.3
- 2) 三浦耕太，Alex Shegay，参川朗，藤田起章，前田匡樹，穴吹拓也，増田安彦，栗田康平，関松太郎：RC造4層縮小架構の振動台実験による補修補強建物の性能評価 その1 実験計画の概要と常時微動測定による補修補強効果の確認，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.463-464，2021.9.
- 3) 参川朗，Alex Shegay，藤田起章，前田匡樹，米澤健次，諏訪仁，三浦耕太，関松太郎：RC造4層縮小架構の振動台実験による補修補強建物の性能評価 その2 X方向の実験結果概要，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.465-466，2021.9.
- 4) Alex Shegay，参川朗，藤田起章，前田匡樹，米澤健次，諏訪仁，三浦耕太，関松太郎：RC造4層縮小架構の振動台実験による補修補強建物の性能評価 その3 補修によるX方向の架構全体の耐震性能回復の検討，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.467-468，2021.9.
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 渡邊一悟，畑山朗，岸徳光，長谷川正：正負交番載荷を行った壁式RC橋脚の補修効果に関する実験的研究，コンクリート工学年次大会論文集，第25巻第2号，pp.1903-1908，2003
- 9) 渡邊一悟，池田憲二，岸徳光，長谷川正：エポキシ樹脂注入補修を施したRC橋脚の補修効果に関する実験的研究，コンクリート工学年次大会論文集，第26巻第2号，pp.1723-1728，2004
- 10) 平野勝識，笹谷輝勝，牧剛史，後藤隆臣：地震により損傷した壁部材の補修後の力学性状に関する実験的研究，コンクリート工学年次大会論文集，第37巻第2号，pp.1249-1254，2015
- 11) 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大会論文集，第29巻第3号，pp.1579-1584，2007
- 12) 田才晃，北山和宏，小谷俊介，青山博之：エポキシ樹脂で補修された鉄筋コンクリート梁の曲げ性状，コンクリート工学年次大会論文集，第6巻，pp.625-628，1984
- 13) 周小真，東洋一，遠藤利根穂，清水泰：大変形後の鉄筋コンクリート造開口壁の補修に関する実験研究，コンクリート工学年次大会論文集，第5巻，pp.265-268，1983

- 14) 桑田裕次, 植松工, 中澤淳, 南宏一: せん断破壊した RC 造壁柱に対するエポキシ樹脂注入補修効果, コンクリート工学年次大会論文集, 第 18 巻第 2 号, pp.185-190, 1996
- 15) 窪田敏行, 中谷佳恵, 福田幹夫, 三浦憲一: せん断破壊した RC 造壁柱のエポキシ補修効果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.321-322, 1996.9
- 16) 武田武信, 白鳥英亮, 池上皓三, 熊倉重典, 那須康雄: 時効を施した軟鋼の塑性変形挙動, 日本機械学会論文集 (A 編), 47 巻 418 号, pp.665-675, 1981.6