

# 論文 震害を受けた部材の補修効果の評価に基づく RC 造曲げ破壊型 4 層耐震壁付きラーメン架構の耐震性能評価

参川 朗\*1・永井 智基\*2・Alex Shegay\*3・前田 匡樹\*4

**要旨：**震害を受けた後に補修を施した RC 部材の耐震性能の回復度について、日本建築防災協会<sup>1)</sup>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  $\phi$  が定義されているため、初期剛性、降伏剛性、減衰といった各性能の回復度は適切に評価できていない。本研究では、筆者らが実施した補修 RC 造部材静的載荷実験<sup>2)</sup>における各耐震性能の回復度と、鉄筋のひずみ時効の検討に基づき、補修縮小 4 層 RC 造曲げ破壊型耐震壁付きラーメン架構試験体の振動台実験<sup>3)</sup>の解析を行い、補修架構全体での各耐震性能を評価した。その結果初期剛性、降伏剛性、減衰性能の低下と最大耐力の上昇を精度良く評価することができた。

**キーワード：**補修、曲げ破壊型、部材実験、架構振動台実験、回復係数、耐震性能評価

## 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。補修後の各部材、損傷度、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」<sup>1)</sup>において、**図-1**に示すように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  $\phi$  が定義されているが、初期剛性、降伏剛性、減衰といった各性能の回復度は適切に評価できていない。そこで本研究では、補修した曲げ破壊先行型の部材から成る RC 造架構の耐震性能の正確な評価法の構築を目的として、筆者らが実施した補修 RC 造部材静的載荷実験<sup>2)</sup>の結果をもとに、各部材の初期剛性、降伏剛性、最大耐力、減衰性能の回復度を定義し、別途で行った既往の補修縮小 4 層 RC 造曲げ破壊型耐震壁付きラーメン架構試験体の振動台実験<sup>3)</sup>の挙動を精度良く再現可能かの検証を行った。

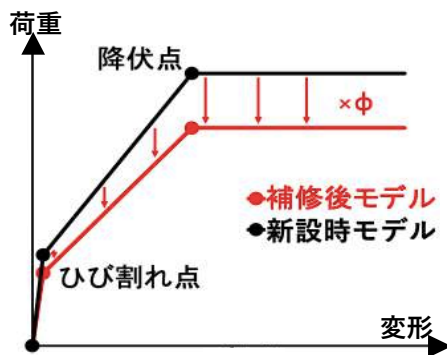


図-1 耐力回復係数  $\phi$  の概念図

## 2. 耐震性能評価法

### 2.1 復元力特性のトリリニアモデル

本論文では補修した部材及び架構における初期剛性、降伏剛性、最大耐力の回復度を個別に評価する目的で、各試験体の実験結果の荷重変形関係をトリリニアに置換する。**図-2**に示すように柱梁部材及び架構試験体では変形角 3%、壁部材では 2%を各試験体の実験結果包絡線の終局点とした。トリリニアの設定では部材実験ではひび割れ強度の点、架構試験体では最大耐力の 1/3 の点を第一折れ点とし、続いて第三勾配を 0 とした上で、等価面積かつ相違面積が最小となるような点を第二折れ点とした。

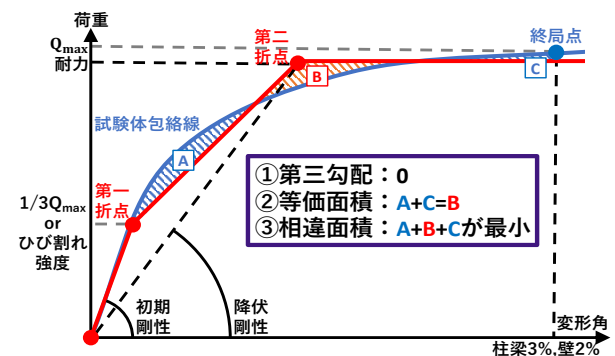


図-2 トリリニア化法概念図

### 2.2 構造性能の回復係数 $\phi_{si} \cdot \phi_{sy} \cdot \phi_q$

トリリニア置換を終えた新設、補修試験体の荷重変形関係をもとに、**図-3**に示すように初期剛性、降伏剛性、最大耐力の回復係数  $\phi_{si}$ 、 $\phi_{sy}$ 、 $\phi_q$  を定義する。

\*1 東北大学大学院 工学研究科都市建築学専攻 (学生会員)

\*2 東北大学大学院 工学研究科都市建築学専攻 (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 工学研究科都市建築学専攻 教授 工博 (正会員)

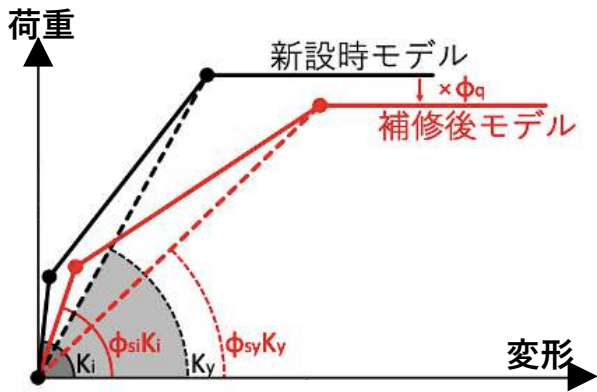


図-3 提案する回復係数  $\phi_{si}$ ・ $\phi_{sy}$ ・ $\phi_q$  の概念図

### 3. 新設及び補修 4 層架構の振動台実験

#### 3.1 架構試験体概要

試験体は図-4 に示す 1/4 スケール RC 造 4 層曲げ破壊型連層耐震壁付きラーメン架構試験体である。本研究では X 方向を研究対象とし、X 方向部材の名称は壁柱が CW1、梁が G1、柱が C1 である。形状・配筋などの詳細は文献 3) を参照されたい。

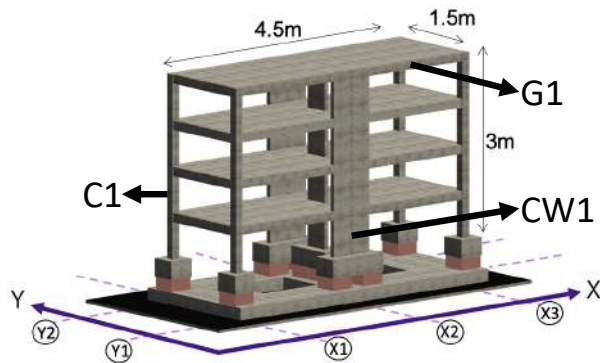


図-4 架構試験体概要図

#### 3.2 加振ケース

地震動は建設省 1457 号に示されている告示 2 種地盤加速度応答スペクトルに一致させた人工地震動で、位相は 1995 年兵庫県南部地震における JMA 神戸波とし、X 方向に NS 位相を用いている。小規模～大規模地震を想定し、表-1 に示す複数回の加振を行なった。

表-1 加振ケース

新設試験体	加振波名称	RUN1	RUN2	RUN3	RUN4	—
	入力倍率(%)	20	80	160	240	
補修試験体	加振波名称	RUN5	RUN6	RUN7	RUN8	RUN9
	入力倍率(%)	260	130	220	220	260
補修試験体	加振波名称	RUN1	RUN2	RUN3	RUN4	RUN4-2
	入力倍率(%)	20	80	120	180	240
	加振波名称	RUN5	RUN6	RUN7	RUN8	RUN9
	入力倍率(%)	260	220	280	300	300

#### 3.3 新設試験体の最終損傷状況

図-5 に最終加振後の損傷度を示す。1 層耐震壁 CW1 は脚部曲げ破壊 (損傷度 V) し、梁曲げ降伏先行型の全体崩壊形機構を形成し、最終的には大破となった。

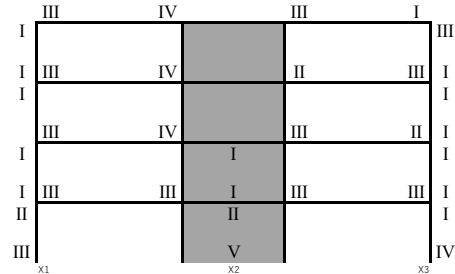


図-5 新設試験体最終損傷度

#### 3.4 補修方法

表-2 に示す損傷度に応じた一般的な補修方法を採用した。損傷度 V となった 1 層耐震壁 CW1 に対しては写真-1 に示すように、鉄筋入れ替え及びコンクリート再打設を行なった。またスラブ面に対しては各層全面に対し、エポキシ樹脂によるひび割れ補修を行なった。

表-2 補修方法

損傷の様子	損傷度	補修方法
ひび割れ	I	エポキシ樹脂注入によるひび割れ補修
	II	
剥落	III	ポリマーセメントモルタル断面補修
鉄筋露出	IV	エポキシ樹脂モルタル断面補修
鉄筋座屈	V	鉄筋入れ替え+コンクリート再打設

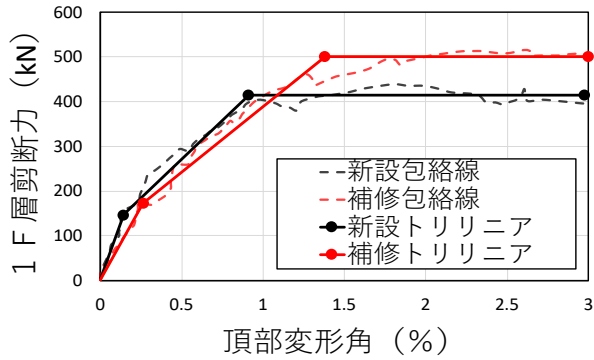


(a)補修前鉄筋切断後 (b)補修後

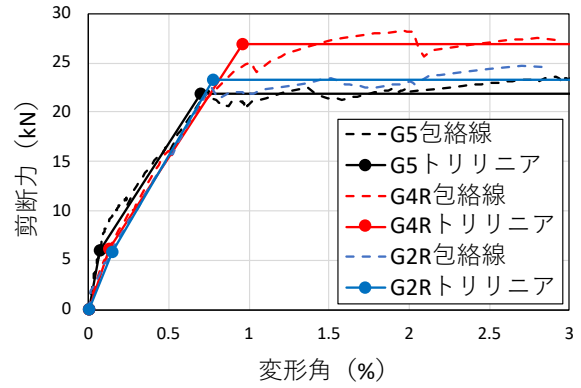
写真-1 1 階 CW1 鉄筋入替+コンクリート再打設

#### 3.5 新設・補修試験体の実験結果

図-6 に 1 層剪断力-頂部変形関係を示す。得られた実験結果包絡線に対し、2.1 節に記載の方法でトリリニア置換を行うと、新設試験体に対して初期剛性が 63%、降伏剛性は 80% に低下し、最大耐力は 21% 上昇した。以降の節では、この架構全体での回復係数の評価が解析によって可能かどうかを検証していく。



図一六 新設・補修実験結果



図一八 梁試験体実験結果

4. 壁及び梁部材の補修効果に関する静的載荷実験

4.1 部材試験体概要

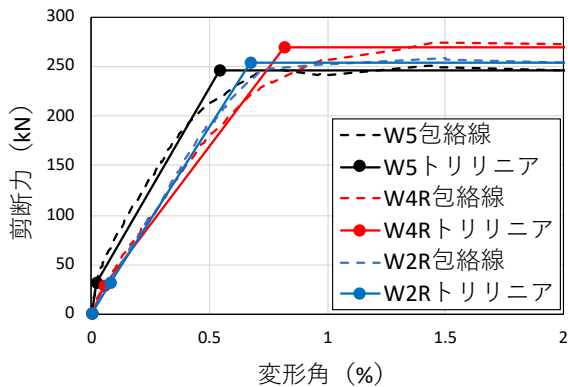
表一三に部材試験体概要を示す。試験体は、前述の4層試験体の耐震壁CW1を模したWシリーズ試験体、及び梁G1を切り出し片持ち形式としたGシリーズ試験体である。形状・配筋などの詳細は文献2)を参照されたい。

表一三 部材試験体概要

	CW1再現壁試験体					G1再現梁試験体				
	W5	W4	W4R	W2	W2R	G5	G4	G4R	G2	G2R
スケール	1/3					1/2				
新設or補修	新設	新設	補修	新設	補修	新設	新設	補修	新設	補修
補修対象			W4		W2			G4		G2
最終損傷度	V	IV	V	II	V	V	IV	V	II	V
最大変形角	3%	2%	3%	0.75%	4%	6%	5%	6%	1%	6%

4.2 構造的な回復に関する実験結果

壁試験体の荷重変形関係を図一七に、梁試験体の荷重変形関係を図一八に示す。得られた実験結果包絡線に対し、2.1節に記載の方法でトリリニア置換を行うと、架構実験と同様、初期剛性、降伏剛性が低下、最大耐力が上昇する結果となった。架構実験に比して最大耐力の上昇が小さいのは、部材実験の養生期間が1ヶ月と、架構実験の1年の養生期間に比して短いため、後述の鉄筋のひずみ時効の影響が小さかったためだと考えられる。



図一七 壁試験体実験結果

5. 架構試験体の動的解析による性能回復効果

3章で示した縮小架構について、4章の部材実験結果で得られた補修による構造的な回復係数を適用して、架構の構造解析モデルを設定し、架構全体の構造的な回復の再現を試みた。

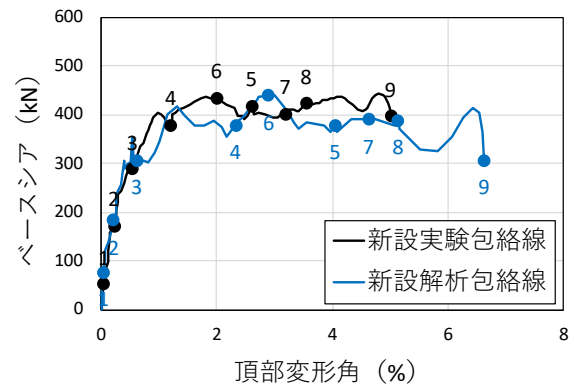
5.1 新設架構試験体の動的解析

(1) 解析概要

文献4)に記載の材端に曲げばね、中央に剪断ばねと軸ばねを挿入した単軸バネモデルから成る部材モデルによって、構成されるフレームモデルを用い、実験と同じ入力倍率を用いて動的解析を行なった。尚、減衰モデルについては柱梁部材は武田スリップモデル(解析プログラムSNAPマニュアル<sup>5)</sup>の剛性低減型Hモデル)を、壁部材は鉄鋼剛性低減型モデル(解析プログラムSNAPマニュアル<sup>5)</sup>の鉄鋼剛性低減型Fモデル)を採用した。

(2) 解析結果

解析結果を図一九に示す。初期剛性、降伏剛性、最大耐力ともに概ね適切に評価できており、荷重変形曲線の包絡線はおおむね一致しているが、塑性化が進展し応答変形が大きくなるにつれて、各加振(RUN)時の最大応答変位の誤差が大きくなっている。これは、解析で用いた履歴モデルと実験における履歴ループのエネルギー吸収能、すなわち、減衰性能の差によるものと考えられる。



図一九 新設実験・解析結果包絡線

## 5.2 補修架構試験体の解析

### (1) 補修による部材性能回復の設定

本論文では、新設部材モデルに挿入されている各トリリニアバネモデルに対し、表-4 に示す各回復係数を乗じて補修後の復元力モデルの特性点（ひび割れ点、降伏点）を設定した。採用した回復係数については、部材実験によりデータが得られた部材、損傷度については部材実験<sup>2)</sup>から得られた回復係数を採用した。実験データがない損傷度については損傷度Ⅰの回復係数には、補修方法が同じである損傷度Ⅱの回復係数を、ⅢとⅤには補修方法が近いⅣの回復係数を転用し、柱 C1 については梁 G1 の値を転用した。

減衰性能の回復係数  $\phi_h$  に関しては、文献 7) に記載の図-10 に示す損傷度別の減衰性能の回復係数の一次近似式上、平均値を使用する目的で塑性率 2.5% の点を採用した。減衰の計算方法については文献 7) を参照されたい。

### (2) ひずみ時効による主筋の降伏強度の補正

損傷度Ⅴの壁柱 CW1 の  $\phi_q$  については、図-11 に示す鉄筋のひずみ時効の影響が大きいと考えられるため、個別に回復係数を決定した。ひずみ時効とは、歪を与えられた金属材料が室温で長時間存置された場合に硬化する現象であり、文献 6) によれば予歪と、図-11 中の式(1)で定義される鉄筋の降伏強度の上昇率との関係は図-12 に示す通りである。

$$R_y = \frac{\Delta\sigma_{yh} + \Delta\sigma_{ya}}{\sigma_y} \quad (1)$$

本研究ではこの図を元に、部材実験 W5 試験体の図-13 に示す部材の平均曲率を求めるために両側面に材軸に沿って設置した変位計から得られた主筋の平均歪、及び図-14 に示す歪ゲージ値を総合的に考慮し、W5 主筋の予歪、すなわち部材実験最大変形角 3% 時の歪値を推定することで、W5 に生じるひずみ時効による主筋の降伏強度上昇値を推定した。尚各歪ゲージの貼り付け位置を図-15 に示す。曲げ変位計では大変形時まで計測が行えたが、壁脚部の主筋の基礎スタブからの抜け出しの影響等も含まれひずみ度が歪ゲージの値より大きくなっている。これに比して歪ゲージの値は正確性が高いが、大変形時には計測ができていない。そこで図-16 に示すように、歪ゲージに準拠した主筋歪を真の値と仮定した上で、歪ゲージによる測定が可能であった最大変形角時の、両測定値の比率を維持したまま、真の歪値が増大していくものとして、式(2)によって W5 の最大歪を推定した。

$$S_{i3pre} = \frac{S_{in gauge}}{S_{in disp}} \cdot S_{i3 disp} \quad (2)$$

ここで  $S_{i3pre}$  : i 列の変形角 3% 時推定主筋歪,  $S_{in gauge}$  : i 列の変形角 n% 時の歪ゲージ準拠主筋歪 (n は i 列歪ゲージ計測最大変形角),  $S_{in disp}$  : i 列の変形角 n% 時曲げ変位計準拠主筋平均歪 (n は i 列歪ゲージ計測最大変形角),  $S_{i3 disp}$  : i 列目の変形角 3% 時曲げ変位計準拠主筋平均歪を表す。この予歪から得られた主筋の降伏強度上昇を考慮した上で、W5 について断面曲げ解析を行い、式(3)によって降伏強度上昇前の曲げ降伏強度に対する比として、損傷度Ⅴの CW1 の  $\phi_q$  を算定した。ただし、曲げ解析に際して鉄筋のひずみ時効による降伏強度の上昇率は a,c,e 列は式(1)から求めた予歪を元に、b,d 列は隣り合う列の歪値の平均値を採用し、他の列に関しては加振波の特性上、一方方向へのみ大変形が生じていることから、歪が小さく、ひずみ時効は発生していないと考え、上昇率は 0% としている。各列のひずみ時効による鉄筋の降伏強度上昇率の算定結果を表-5 に示す。

$$\Phi_{qCW1V} = \frac{Mu_{W5 before}}{Mu_{W5 after}} \quad (3)$$

ここで  $\phi_{qCW1V}$  : 損傷度Ⅴの CW1 に補修を施した時の耐力回復係数,  $Mu_{W5 before}$  : W5 処鉄筋材料試験結果降伏強度に基づく曲げ解析準拠最大曲げ耐力,  $Mu_{W5 after}$  : W5 ひずみ時効考慮後の鉄筋降伏強度に基づく曲げ解析準拠最大曲げ耐力を表す。

表-4 補修架構試験体解析モデル回復係数採用値

部材	回復係数	損傷度				
		I	II	III	IV	V
CW1	$\phi_{si}$	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55
	$\phi_{sv}$	0.86	0.86	0.74	0.74	0.74
	$\phi_a$	1.03	1.03	1.09	1.09	1.48
	$\phi_h$	1	0.95	0.8	0.7	0.65
G1	$\phi_{si}$	0.42	0.42	0.49	0.49	
	$\phi_{sv}$	0.97	0.97	0.92	0.92	
	$\phi_a$	1.05	1.05	1.21	1.21	
	$\phi_h$	1	0.95	0.8	0.7	
C1	$\phi_{si}$	0.42	0.42	0.49	0.49	
	$\phi_{sv}$	0.97	0.97	0.92	0.92	
	$\phi_a$	1.05	1.05	1.21	1.21	
	$\phi_h$	1	0.95	0.8	0.7	

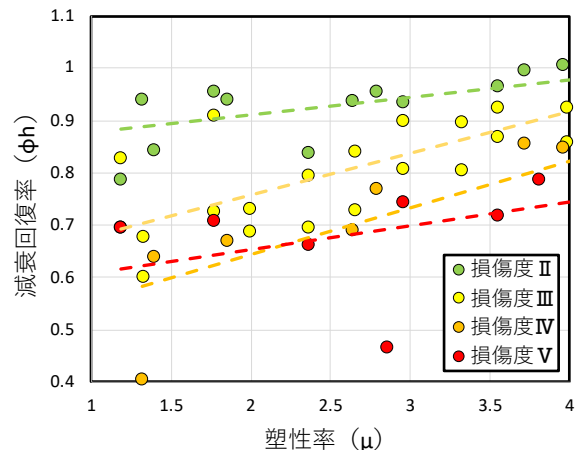
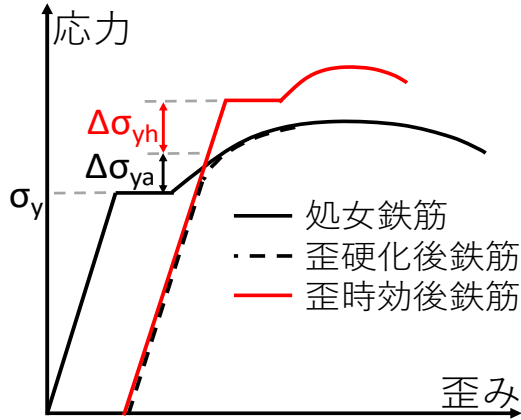
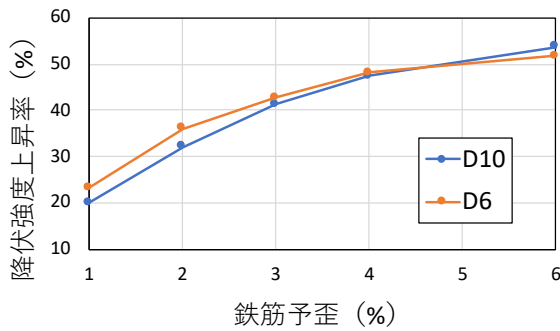


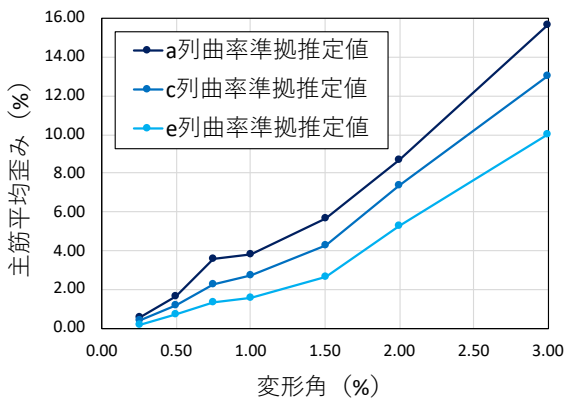
図-10 損傷度別減衰回復係数



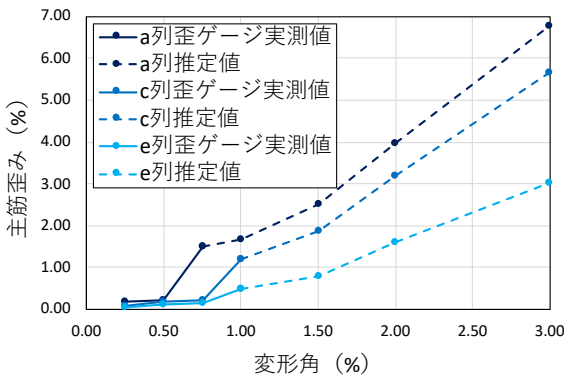
図一11 ひずみ時効概念図



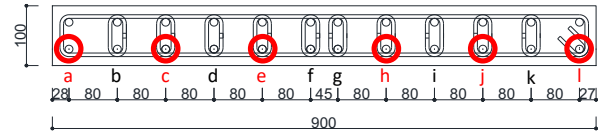
図一12 ひずみ時効による鉄筋の降伏強度上昇率<sup>6)</sup>



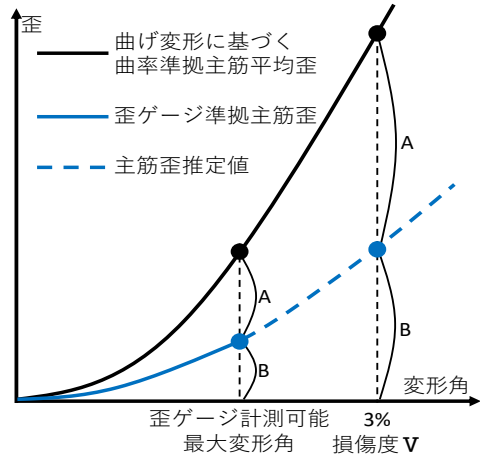
図一13 曲げ変位計に基づく曲率準拠 W5 主筋平均歪



図一14 W5 主筋歪ゲージ実測値及び推定値



図一15 壁試験体断面図・歪ゲージ位置



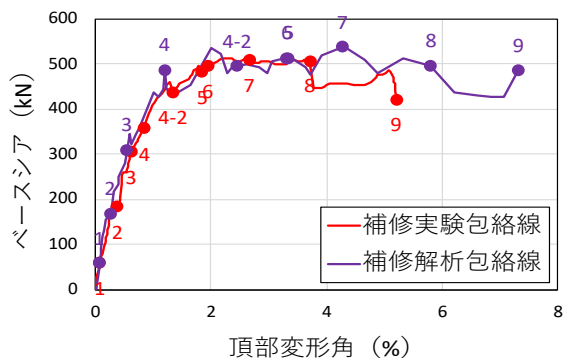
図一16 主筋歪推定方法の概念図

表一5 各列主筋の降伏強度上昇率推定値

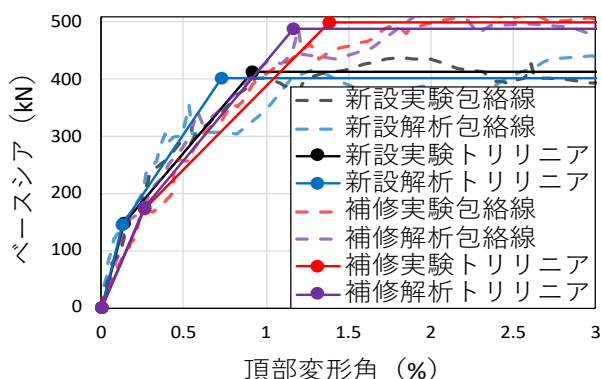
降伏強度 上昇率 (%)	列					
	a	b	c	d	e	f
	54.2	53.7	53.2	47.1	41.1	0
	g	h	i	j	k	l
	0	0	0	0	0	0

### (3) 解析結果

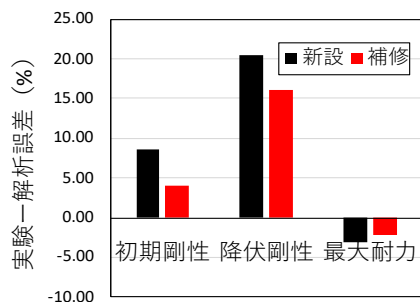
図一17に解析結果を、図一18に新設実験、新設解析、補修実験、補修解析4つの包絡線から得られたトリリニアモデルを示す。このトリリニアから実験と解析の初期剛性、降伏剛性、最大耐力の誤差を算定したものが図一19である。いずれの耐震性能ともに、新設の実験と解析の誤差と同程度以下の誤差となっており、補修後の耐震性能評価が概ね適切に評価できていることが分かる。減衰性能の誤差については、各 RUN の最大変位の誤差によって評価することとし、結果を図一20に示す。新設時よりも誤差は増大しているものの、概ね適切に評価できていると言える。また表一6に示す通り、新設、補修の両試験体の各回復係数を比較すると、解析結果と実験結果はよく整合していることが分かる。以上から今回の評価法を用いた場合、新設の解析モデルの精度に依存するが、補修後の耐震性能を精度良く評価することが可能であると言える。



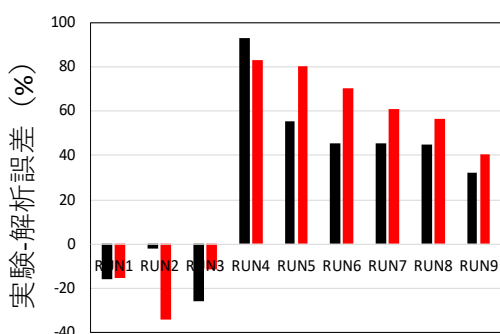
図一17 補修実験・解析結果包絡線



図一18 新設・補修/実験・解析トリリニアモデル



図一19 実験-解析各耐震性能誤差



図一20 実験-解析最大変位誤差

表一6 実験と解析の各回復係数

	初期剛性	降伏剛性	最大耐力
	$\phi_{si}$	$\phi_{sy}$	$\phi_q$
実験	63	80	121
解析	61	77	122

## 6. 結論

補修部材の静的載荷実験から得られた初期剛性、降伏剛性、最大耐力別の評価を元に、補修架構試験体のフレーム解析を行なった結果、架構全体での回復係数は概ね一致し、包絡線は精度良く評価できた。大変形時の応答については、新設解析の精度に依存するため過大評価となったが、新設と同程度の精度で挙動を再現できた。

## 謝辞

本研究は、東北大学一大林組技術研究所の共同研究、及び、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)の助成を受けたものです。実験及び研究計画では、大林組・三浦耕太博士、建築研究所・関松太郎博士ほか、関係各位に助言、指導いただいた。ここに帰して謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 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
- 2) 三浦耕太ほか：RC造曲げ降伏型部材の静的載荷実験による補修効果の検討その1実験計画，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-2分冊，pp.425-426，2022.9
- 3) 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
- 4) 三浦耕太ほか：連層耐震壁を有するRC造4層建物縮小試験体の振動台実験による破壊形式と安全限界の評価，日本建築学会構造系論文集，第86巻，第780号，pp.247-257，2021.2
- 5) 株式会社構造システム：SNAP Ver.8 テクニカルマニュアル，株式会社構造システム，2020.11
- 6) Shegay, A. et al. : CHARACTERISTICS OF STRAIN AGEING IN SD345 REINFORCEMENT AND ITS EFFECTS ON REPAIRED STRUCTURES, 日本地震工学会第17回年次大会梗概集，Dec.2022
- 7) 参川朗ほか：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，2022.1