

# 論文 供用期間を通じた RC 造建物の LGS 間仕切り画像モニタリングによるフラジリティ曲線更新と耐震修復費用評価

八百坂 僚祐\*1・高橋 典之\*2

**要旨：**建物の耐震修復費用において非構造部材要素の占める割合は大きく、地震損失に基づく修復性能評価において非構造部材の影響が相当大きい。本研究では非構造部材のうち LGS 間仕切り壁の地震損傷に着目し、供用期間中に複数回発生する地震シナリオに対する RC 造建物の非構造部材の耐震修復費用を算出して修復性能を評価する方法を検討した。特に、供用期間中に複数回発生する地震に対して、画像モニタリングにより非構造部材のフラジリティ曲線が逐次最適化される場合と、されない場合について、非線形時刻歴地震応答解析を通じた耐震修復費用の違いを分析した。

**キーワード：**修復費用, LGS 間仕切り, 画像モニタリング, 深層学習, ベイズ推定

## 1. はじめに

2000 年の改正建築基準法の施行を契機に建物の性能規定型の耐震設計が注目されるようになってから 20 年経ち、性能評価型設計法が一般に広く普及・適用されているとはまだ言い難いものの、研究面においては幅広い知見が蓄積されてきた。特に、大地震発生時に居住者の財産保護や建物機能の維持および事業継続の容易さをはかる目的で、地震後の建物の「継続使用性」を評価することの重要性が指摘されるようになってきた。

これと並行して、近年、建築分野においてセンシング技術やモニタリング技術を用いた様々な情報化技術が提案されるようになっており、前述のように地震後の継続使用性を適切かつ迅速に評価することが社会活動継続の観点からも重要であることを踏まえ、例えば構造躯体に対しセンシング技術を活用した地震後耐震性評価手法が開発される<sup>2)</sup>など、ダウンタイムの長短に影響する耐震性能評価の取り組みが進められてきた。特に、非構造部材の評価は、継続使用性だけでなく修復性能の観点から大きな影響を与えることが分かっており、非構造部材にセンサを取り付けてリアルタイムに危険度を判定する技術開発なども進められるようになってきた<sup>3)</sup>。

このような背景を踏まえ、既往の研究<sup>4),5)</sup>でも指摘されている非構造部材のフラジリティ曲線を建物ごとに適切に定めることの難しさについて、著しい進化を遂げている「深層学習」を用いて損傷検出を可能とする画像モニタリングを導入することにより、フラジリティ曲線の逐次更新が自動化され、上述した課題を解決できるのではないかと考えた。

そこで本研究では、鉄筋コンクリート建物の継続使用性評価および修復性能評価に資する情報提供を主な目的として、鉄筋コンクリート造建物に良く見られる建物用途

(マンションなど)で多用されがちな LGS (軽量鉄骨下地) 間仕切り (石膏ボード間仕切り) の損傷が修復費用に与える影響を検討する。特に、建物の供用期間中に複数回発生する地震による損傷が画像モニタリングされる状況を想定し、フラジリティ曲線を更新する場合としない場合とで修復費用に与える影響がどのようになるかを調べた。

## 2. 非構造部材が修復経費に与える影響

鉄筋コンクリート建物の耐震修復費用における非構造部材の割合は、既往の被害統計調査からその大きさが指摘されている。Miranda ら<sup>6)</sup>は、1994 年 Northridge 地震の被害調査結果から、用途別の修復費用構成割合を図-1 のように報告している。ホテル用途の建物では、高価な内装や装飾を用いるため非構造部材の被害額が全体の 70% と大きな割合を占めている。また、病院を用途とする建物では、特殊な医療機器・設備が多いため設備要素の被害額が全体の 44% を占めている。建物の用途によってその比率は変化するが、修復費用における非構造部材の占める割合が相当程度高いことは共通しており、国内の地震被害調査に基づく研究<sup>7)</sup>からも同様の傾向は明らかとなっている。

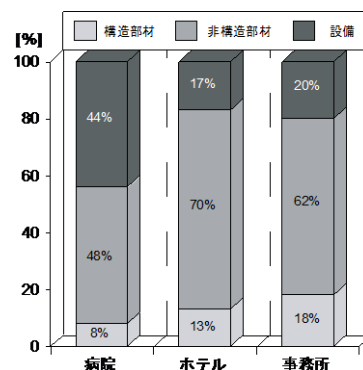


図-1 修復費用に占める建物構成要素別割合<sup>6)</sup>

\*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 准教授 博(工) (正会員)

### 3. 画像モニタリングとベイズ推定

#### 3.1 画像モニタリングによる損傷分類

梅林ら<sup>8)</sup>は、画像モニタリングに深層学習 (Classification 技術) を導入して損傷分類器を構築し、振動実験時に撮影した動画にこれを適用することで、画像モニタリングに基づく損傷 (LGS 間仕切りの Damage State : DS1~3) の自動分類について検討した。損傷分類器は亀裂 (DS2) ~ボード脱落 (DS3) レベルの損傷を精度良く検知したが、壁紙のしわ (DS1) の検知精度の低さが課題であった。

梅林らの研究では、写真-1のように比較的濃いしわの画像を学習データセットとしており、薄いしわの分類精度が低かったと考えられた。そこで筆者らは全学習画像 100 枚のうち 50 枚を写真-2のような薄いしわの画像に変更した。なお、濃いしわ、薄いしわの事前分類は目視によって行った。梅林らの研究<sup>8)</sup>で JMA KOBE 50%加振時に LGS 間仕切壁に生じた「しわ」の正答率は 68.0%だったが、学習データセットの改良により正答率が 100%まで向上した (図-2)。検知対象となるしわ画像に類似した画像が学習画像に含まれていると正答率が向上することは当然予想されることであるが、正答率の向上には結果的に似た学習画像の枚数をただ多くするよりも、様々な見え方の画像を混在させて学習させた方が良いことが分かる。

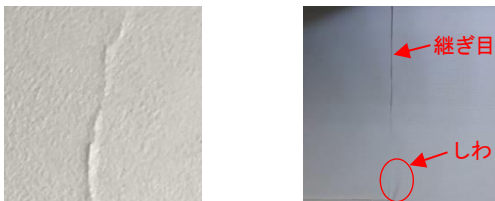


写真-1 梅林らが用いた 学習画像例      写真-2 本研究で用いた 学習画像例

	Crack	Fallen	Wall	Wrinkle
真のクラス	100			
		100		
			1	
				1762
	Crack	Fallen	Wall	Wrinkle
	予測されたクラス			

図-2 50%加振時しわの画像群分類結果

#### 3.2 フラジリティ曲線のベイズ更新

具体的な LGS 間仕切りのフラジリティ曲線パラメータ設定は 4 章に後述するとして、本節では、フラジリティ曲線のベイズ更新についての概要を紹介する。

まず、既往の研究<sup>9)</sup>に倣いフラジリティ曲線は対数正規分布関数に従うものとして扱う。一般に、対数正規分布に

従うフラジリティ曲線は、(1)式で表される。

$$F(X) = \phi\left(\frac{\ln(X)-\lambda}{\zeta}\right) \quad (1)$$

ここに、 $X$ : 入力強さの指標 (最大加速度, 最大速度等),  $F(X)$ : 入力強さ  $X$  における建物 (要素) の被害確率,  $\Phi(x)$ :  $x$  に関する標準正規分布の累積確率分布関数,  $\lambda$ :  $\ln(X)$  の平均値,  $\zeta$ :  $\ln(X)$  の標準偏差である。このとき、フラジリティ曲線の平均値は  $\exp(\lambda+\zeta^2/2)$ , 分散は  $\exp(2\lambda+2\zeta^2) - \exp(2\lambda+\zeta^2)$ , 中央値は  $\exp(\lambda)$  と表される。

ベイズ推定を用いたフラジリティ曲線の更新ではパラメータ  $\lambda, \zeta$  を確率変数と捉える。本論文では標準偏差  $\zeta$  を固定し、中央値  $\lambda$  の確率分布を推定する計算方法について述べる。ここで、ベイズの定理を(2)式に示す。

$$f(\theta|D) = \frac{L(D|\theta)f(\theta)}{\int_0^\infty L(D|\theta)f(\theta)d\theta} \quad (2)$$

ここに、 $\theta$ : 推定する母数,  $f(\theta)$ : 推定する確率変数の事前分布,  $L(D|\theta)$ : 尤度関数,  $f(\theta|D)$ : 推定する確率変数の事後分布である。

中央値  $\lambda$  を母数  $\theta$  とし、事前分布を対数正規分布の確率密度関数で表すと以下の式(3)を得る。

$$f(\theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\beta\theta} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(\theta/\theta_m)}{\beta}\right)^2\right] \quad (3)$$

ここに、 $\theta_m$ : 事前分布の中央値,  $\beta$ : 対数標準偏差である。

後述するライフサイクル地震動 (供用期間中に発生する複数回の地震動シナリオ) において、 $n$ 回の地震動を経験し、各地震後の最大層間変形角が  $x_i$  であったときの尤度関数を式(4)に示す。

$$L(D|\theta) = \prod_{i=1}^n F_s(x_i)^{d_i} (1 - F_s(x_i))^{1-d_i} \quad (4)$$

ここに、 $d_i = 1$  (損傷あり),  $d_i = 0$  (損傷なし) である。

梅林ら<sup>8)</sup>が提案するフラジリティ曲線の逐次更新方法は、センシング技術と画像モニタリング技術を併用することで、供用期間中に発生する複数回地震動による損傷に対して、建物が経験した加速度などの物理量と、深層学習により自動分類された損傷カテゴリと損傷量との、組み合わせ情報が得られ、これらをベイズ推定に適用してフラジリティ曲線を更新する方法である。画像モニタリングしている間仕切壁に対してフラジリティの更新が供用期間を通じ適切に実施されれば、事前仮定フラジリティが不適切なままライフサイクル修復費用を算定してしまう不具合が解消される。

### 4. LGS 間仕切り壁のフラジリティの設定

#### 4.1 損傷レベル (DS) の分類

石膏ボードの損傷レベル分類を表-1に示す。非構造部

材の損傷レベル分類は一般に（損傷の規模そのものではなく）損傷に対して必要な補修内容／対応方法で分類される。

表-1 石膏ボードの損傷レベル分類

DS1	軽いひび割れあり。 再塗装、テーピングが必要。
DS2	顕著なひび割れ、つぶれ。 ボードの修復、取り換えが必要。
DS3	重度のひび割れ。 ボード、下地の交換が必要。

#### 4.2 フラジリティ曲線のパラメータ設定

非構造部材の耐震設計施工指針・同解説<sup>10)</sup>では、非構造部材の損傷は、主体構造との接合状態に応じて、主に床応答加速度に起因する損傷になるか、主に層間変形角に起因する損傷になるかで分類される。本論文で対象とするLGS間仕切り壁（ランナーに石膏ボードとスタッドを接合する下地完全接合タイプ）は、主に層間変形角に起因する損傷が表れる非構造部材になる。ただし、湿式工法（石膏ボード接着剤直貼り工法など）と異なり、接合状態が面ではなく複数点（複数箇所をビス止めしている状態）の乾式間仕切り壁は、ある層間変形角  $IDR_i$  を超えると無損傷だったものが急に大破するわけではなく、クリティカルな状態となったビスの部分の起点にするなどで、小破、中破、大破と損傷状態が遷移するものと考えられる。一般に、損傷状態の遷移回数を  $n$  回とすると描かれるフラジリティ曲線も  $n$  本になる。4.1 節の表-1 で定めた石膏ボードの損傷状態は最大で DS3 までの設定としているので3本のフラジリティ曲線が描かれる。

ここで FEMA<sup>11)</sup>が提案する表-2 の確率分布中央値および変動係数をフラジリティの更新前パラメータとして与えた。式(1)でパラメータ  $\lambda, \zeta$  が定まり、フラジリティ曲線を描くことができる。表-2 のフラジリティを定めるパラメータに基づき描いたフラジリティ曲線を図-3 に示す。本研究ではこのフラジリティ曲線が事前分布になる。

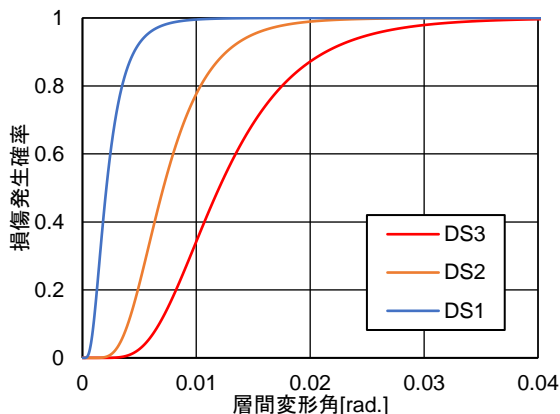


図-3 FEMA<sup>11)</sup>が提案するフラジリティ曲線

表-2 FEMA<sup>11)</sup>が提案するフラジリティ・パラメータ

損傷度	損傷状態	中央値 [rad.]	変動係数
DS1	小	0.0021	0.60
DS2	中	0.0071	0.45
DS3	大	0.0120	0.45

## 5. ライフサイクル耐震修復経費指標

### 5.1 耐震修復経費指標の算出方法

供用期間を通じた画像モニタリング併用型 LGS 間仕切りの耐震修復経費算出にあたり、高橋らの提案するライフサイクル耐震修復経費算出手法<sup>12)</sup>を採用した。以下、本論文で用いたライフサイクル耐震修復経費算出における各モデルについて簡単に説明する。

#### (1) 入力地震動のモデル

入力地震動シナリオを作成するにあたり、まず地震ハザード曲線を用意する。本論文では、宮城県仙台市仙台駅を対象地点として、防災科学技術研究所の地震ハザードステーション：J-SHIS<sup>13)</sup>で公開されている地震ハザードを用いることとした。

本論文で用いた地震ハザード曲線を図-4 に示す。地震ハザード曲線から供用期間を通じた地震の年非超過確率の組み合わせシナリオ（ライフサイクル地震動シナリオ）を定めるため、Hazen のプロットング・ポジション公式<sup>14)</sup>を参考に年非超過確率を推定する。ただし本論文で用いたプロットング・ポジション公式は、

$$F(x_i) = 1 - \frac{i - \alpha}{N + 1 - 2\alpha} \quad (5)$$

で表され、ここに、 $N$ ：観測値総数、 $i$ ：観測値を降順に並べ替えたときの順番、 $x_i$ ： $i$  番目の観測値、 $F(x_i)$ ：非超過確率、 $\alpha$ ：定数（Hazen 法では 0.5）である。

プロットング・ポジション公式の考え方に基づく年非超過確率をもつ地震動群について、地震動発生確率が定常更新過程であるポアソン過程に従うものと仮定し、

$$P(i) = 1 - \exp[-(1 - F(x_i))T] \quad (6)$$

の関係が満たされるものとする。ここに、 $P(i)$ ：降順  $i$  番目の観測値の  $T$  年超過確率である。このとき、(2)式と(3)式から  $\alpha$  を、

$$\alpha = \frac{(N + 1) \ln(1 - P(i)) + iT}{2 \ln(1 - P(i)) + T} \quad (7)$$

と計算する。これより、(2)式を用いて「降順  $i$  番目の観測値の  $T$  年超過確率が  $100P(i)\%$  (例えば  $P(i)=0.1$  の場合 10%) となる地震動を含む  $N$  個の地震年非超過確率群」すなわちライフサイクル地震動強さのシナリオを得ることができる。

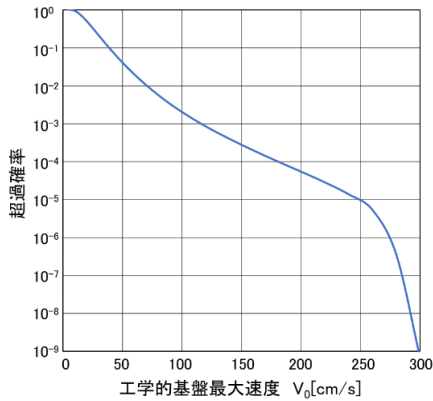


図-4 仙台駅前における地震ハザード曲線<sup>13)</sup>

ここで、供用期間を50年とした場合を想定し、(5)式と図-4のハザード曲線の組み合わせから、仙台駅の工学的基盤上の非超過確率群および最大速度群を算定した。その際、継続使用性を考慮するレベルの地震動群となるシナリオを想定し、「降順1番目の観測値のT年超過確率が100P(i)% (例えばP(i)=0.1の場合10%)となる地震動」として、50年超過確率50% (再現期間約72年)の地震動が最大地震動として含まれるような入力地震動シナリオとした。なお、観測値総数NをN=50と設定した。

本論文の以下の検討では、倍率を乗じる強震記録波形に2016年4月14日熊本地震で観測されたJMA熊本西区春日(NS)の地震波形を用いた。

#### (2) 構造物の地震応答モデル

建物を多質点等価せん断ばね系と見なし、各層の復元力特性にはTri-linear型を、履歴則にはTakedaモデルを用いた<sup>15)</sup>。建物の減衰は瞬間剛性比例型とし、減衰定数を一次固有周期に対して5%とした。各層とも降伏強度の1/3をひび割れ点強度とし、降伏時剛性低下率を0.3、降伏後の剛性を初期剛性の0.01倍とした。また、ひび割れ点を超えるが降伏変形に至らず次の地震動を受ける時は経験した最大変位を指向するように初期剛性が低下するものとし、降伏点を越えた場合は構造物の損傷を補修して元の性能に戻すものと仮定した。

#### (3) 応答-損傷関係のモデル

表-2および図-3に示したフラジリティ曲線を応答-損傷関係のモデルに用いた。

#### (4) 損傷-費用関係のモデル

耐震修復経費指標Rは石膏ボードの補修費用を新設費用で除して標準化した修復費用を指す指標である。本論文では(本来は施工者の価格設定でこの値は大きく異なるが)既往の研究から表-3のように数値を仮定することとした<sup>16)</sup>。ただし、構造物の応答が安全限界にいたる場合は、耐震修復経費指標Rは1になるものとした。前述の(2)項に記したように、構造部材の場合は損傷の累積(剛性の低下)を考

慮するが、石膏ボードの場合は目立つ地震損傷を放置することはないものとし、発生した損傷は全てその都度補修するシナリオとした。

表-3 標準化補修費用<sup>16)</sup>

損傷状態	DS1	DS2	DS3
耐震修復経費指標R	0.1	0.4	0.8

#### (5) 年耐震修復指標

供用期間を通じた耐震修復経費指標Rの総和をライフサイクル耐震修復経費指標とし、その値を供用期間年数50年で除したものを年耐震修復経費指標とする。

### 5.2 解析対象建物の概要

解析対象は地上7階建てのRC造事務所建物を想定し、各階層せん断力係数がAi分布に従うせん断ばねモデルに置換した。せん断ばねモデルについて、降伏時層せん断力と各層の終局塑性率との間にNewmarkのエネルギー一定則が成り立つものとして終局塑性率μとせん断力係数cとの関係を定め、強度型建物(μ=1.5)、標準型建物(μ=2)、靱性型建物(μ=4)の3タイプ検討した。なお、紙面の都合上、ここでは標準型建物(μ=2)の検討結果について詳述する。

Newmarkのエネルギー一定則は、

$$Q_{yi} = \frac{1}{\sqrt{2\mu-1}} Q_i \quad (8)$$

で表され、ここに、 $Q_{yi}$ :降伏せん断力、 $Q_i$ :弾性せん断力、 $\mu$ :塑性率である。標準型建物(μ=2)の層せん断力係数 $C_i$ 、降伏時層せん断力 $Q_{yi}$ 、降伏時線形剛性 $K_{yi}$ を表-4に示す。なお、各層重量 $m_i=500$ [tf]、各層階高 $h_i=3$ [m]、各層降伏点変位 $\delta_{ri}=1.5$ [cm]である。

表-4 各建物モデルの設定

塑性率 $\mu_i$	階数	$C_i$	$Q_{yi}$ [kN]	$K_{yi}$ [kN/m]
2 (標準型)	7	0.58	2836	141805
	6	0.48	4670	233489
	5	0.42	6208	310410
	4	0.38	7519	375926
	3	0.35	8627	431337
	2	0.32	9546	477310
	1	0.30	10284	514243

### 6. ペイズ更新による年耐震修復経費指標値の変動

高橋らの研究<sup>17)</sup>では、ライフサイクル地震動の発生するシナリオ数(順列数)が年耐震修復経費指標評価に影響を与える支配的な地震動として供用期間中に発生する年最

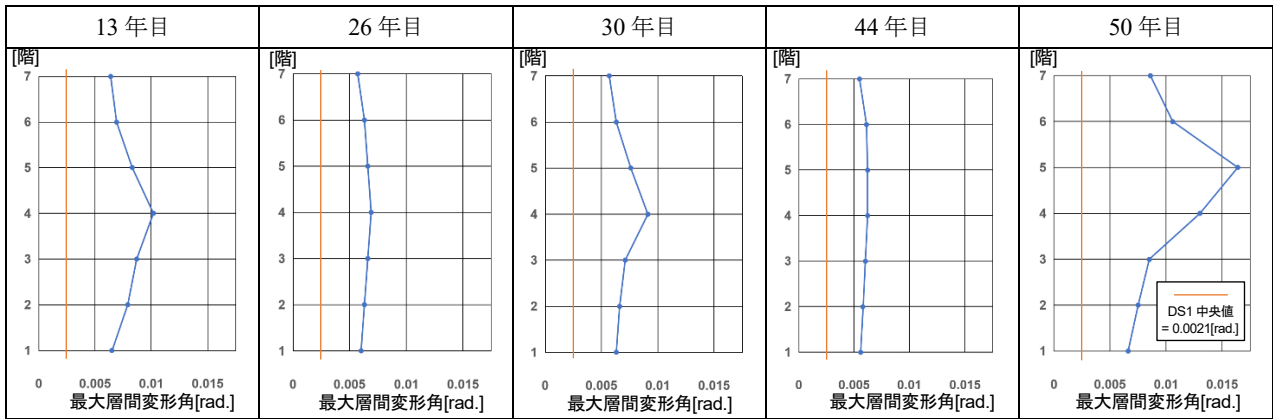


図-5 供用期間中に建物各階に生じる層間変形角

表-5 DS1 損傷の有無に関するシナリオ A~D および更新前後のフラジリティ曲線中央値（上段）と変動係数（下段）

ケース	フラジリティ 更新前 [上段：中央値] [下段：変動係数]	13年目 (期間2位の大地震) [上段：中央値] [下段：変動係数]		26年目 (期間4位の大地震) [上段：中央値] [下段：変動係数]		30年目 (期間3位の大地震) [上段：中央値] [下段：変動係数]		44年目 (期間5位の大地震) [上段：中央値] [下段：変動係数]		50年目 (期間1位の大地震) [上段：中央値] [下段：変動係数]	
		有		有		有		有		有	
A	0.0021	有	0.0021	有	0.0021	有	0.0021	有	0.0021	有	0.0021
	0.60		0.18		0.18		0.18		0.18		0.18
B	0.0021	有	0.0021	有	0.0021	有	0.0021	無	0.0048	有	0.0047
	0.60		0.18		0.18		0.18		0.28		0.27
C	0.0021	有	0.0021	無	0.0051	有	0.0047	無	0.0061	有	0.0059
	0.60		0.18		0.28		0.27		0.30		0.29
D	0.0021	有	0.0021	無	0.0051	無	0.068	無	0.0076	有	0.0070
	0.60		0.18		0.28		0.32		0.33		0.32

大地震動の大きい方から 4~5 程度の発生順を考慮すれば (4!~5!個の発生パターンを網羅すれば), 全地震動を考慮した場合と発生順序による変動が変わらなくなることが指摘されている。

そこで、ライフサイクル地震動の上位 5 つの地震動を取り出し (それ以下の地震動は発生順序が耐震修復経費に影響しないと考え), 各階最大層間変形角を図-5 に示す。なお, 本論で上位 5 つの地震動はランダム発生順とした 1 ケースのみを示しており, 発生順が異なった場合の費用への影響については今後検討する予定である。ここで, 事前分布として設定したフラジリティに従わず, 石膏ボードの DS1 レベルの損傷発生の有無が異なる場合 (ケース A~D) を想定する (表-5)。なお, 5 つの地震で各階に発生する最大層間変形角は石膏ボードの DS1 フラジリティ事前分布の中央値 (=0.0021[rad.]) を概ね上回り, 特定階に応答が集中しているわけではないので, 損傷発生の有無に関する場合分け (ケース A~D) は各階とも同じケースになっている状態を仮定した。また, DS1 レベルの損傷が発生しない場合, DS2, DS3 レベルの損傷も発生しないので, DS1 の損傷が発生しないと仮定した場合は, DS2, DS3 でも損傷は発生しないものとした。

表-6 更新前後の年耐震修復経費指標とその変動率

	更新前	A	B	C	D
年耐震修復 経費指標 と変動率	$1.5 \times 10^{-2}$ (---)	$1.6 \times 10^{-2}$ (+7.8%)	$5.9 \times 10^{-3}$ (-60.5%)	$4.2 \times 10^{-3}$ (-72.1%)	$3.1 \times 10^{-3}$ (-79.2%)

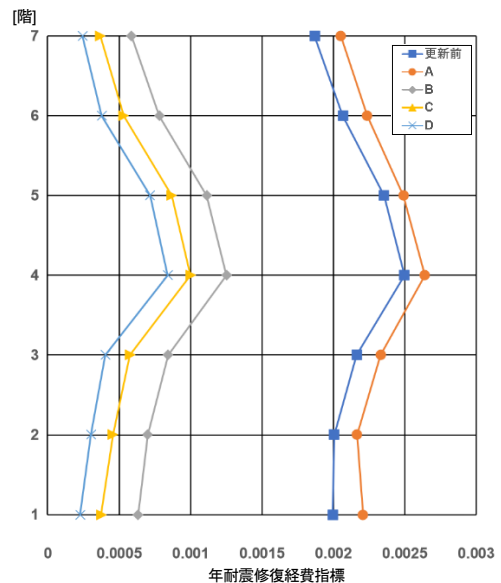


図-6 各ケースの年耐震修復経費指標

上記の仮定に基づき、損傷有無の各ケースごとにフラジリティ曲線を更新しながら、5章の流れに沿ってライフサイクル耐震修復経費指標を算出した。表-5に更新前後のフラジリティ曲線の中央値と変動係数を併記するとともに、表-6に各ケースに対する年耐震修復経費指標とその変動率を示す。また、図-6に各ケースの年耐震修復経費指標を各階ごとにグラフ化した。供用期間中上位5つの地震発生の度にDS1損傷が発生すると仮定した場合(A)、ベイズ更新しないフラジリティ曲線に基づく修復費用より7.8%修復費用算定値が増加した。また、ケースB、C、Dの順でDS1レベルの損傷発生が抑えられているほど、修復費用は-60.5%、-72.1%、-79.2%と軽減された。著者らの研究<sup>18)</sup>を踏まえた予備検討においてDS1レベルの損傷を抑えることが非構造部材のライフサイクル地震動耐震修復費用の低減に大きく影響する可能性が示唆されていたが、本検討においてこれを定量的に確認できた。

## 7. まとめ

はじめに、LGS間仕切壁のDS1レベル損傷の深層学習を用いた画像モニタリングにおいて、深層学習に用いる学習画像データセットに明瞭な「しわ」だけでなく「薄いしわ」を混在させることで、損傷分類精度が向上することが分かった。損傷分類精度が向上(損傷画像モニタリング精度が向上)すると、修復費用の見積誤差低減に寄与することが期待される。次に、ライフサイクル耐震修復費用の算定において、供用期間を通じた画像モニタリングにより非構造部材のフラジリティ曲線を逐次最適化すると、まったく更新しない場合と修復費用に差が生じた。地震動ごとに損傷検出があると修復費用算定値は増加し、損傷が検出されなかった場合が考慮されると修復費用算定値が低下した。そして、石膏ボードのDS1レベルの損傷を抑えることができれば修復費用の低減が見込まれることが分かった。

## 参考文献

- 1) 日本建築学会:「建物の健全性モニタリング評価技術の取り組みと今後の課題」シンポジウム資料, 2020.1
- 2) 日向大樹, 楠浩一, 服部勇樹, 田才晃: 残余耐震性能判定のための余震応答点推定の精度検証に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.2, pp.792-798, 2014.7
- 3) 日高和幸, 神崎喜和, 梶原浩一, 長江拓也, 高谷和樹, 岡崎太郎, 松宮智央, 御子柴正, 中澤博志: 地震被災建物の被害度即時評価・表示技術に関する振動台実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造II, pp.461-462, 2020.9
- 4) 千田紘之, 高橋典之: 深層学習を用いた地震被災木造住宅の画像診断システム構築に関する基礎的研究, 日

本建築学会構造系論文集, Vol.85, No.770, pp.529-538, 2020.4

- 5) 志水真央, 川北翔, 松田和浩, 山崎義弘, 坂田弘安: 木造戸建住宅における非構造体の損傷評価に関する調査研究 その2 累積分布関数による評価と考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造III, pp.539-540, 2020.9
- 6) Shahram Taghavi, Eduardo Miranda: Response Assessment of Nonstructural Buildings Elements, PEER Report 2003/05, Sep. 2003
- 7) 平川倫生, 神田順: 終局限界状態以前に発生する破壊時費用の評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造I, pp.69-70, 1997
- 8) 梅林舞, 八百坂僚祐, 高橋典之: モニタリング技術を用いた非構造部材のフラジリティ曲線逐次最適化に関する研究, (その2) 損傷画像分類およびフラジリティ曲線更新フローの提案, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp.765-766, 2022.9
- 9) 日本建築学会災害委員会: 地震動の特性と建築物の被害—経験と予測—兵庫県南部地震による被害率曲線, 日本建築学会大会(九州)パネルディスカッション資料, 1998.9
- 10) 日本建築学会: 非構造部材の耐震設計施工指針・同解説および耐震設計施工要領, 2003.1
- 11) FEMA: Background Document FEMA P-58/BD-3.9.2 Seismic Fragility of Building Interior Cold-Formed Steel Framed Gypsum Partition Walls, Jun. 2011
- 12) 高橋典之, 塩原等: RC建物の非構造部材を含めた耐震修復性能評価におけるライフサイクル地震動シナリオの影響, 構造工学論文集, Vol.51B, pp.91-96, 2005.3
- 13) 防災科学技術研究所: J-SHIS 地震ハザードステーション (<http://www.j-shis.bosai.go.jp/> 閲覧: 2022年1月)
- 14) A. Hazen: Flood Flows, A Study of Frequencies and Magnitudes, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1930
- 15) T. Takeda, M. A. Sozen, N. N. Nielsen: Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes, Journal of the Structure Division, ASCE, Vol. 96, No. ST12, pp.2557-2573, Dec. 1970
- 16) Abba Ma's ud Alfanda, Kaoshan Dai, Jianze Wang: Review of Seismic Fragility and Loss Quantification of Building-Like Industrial Facilities, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol.144, pp.060801-1~060801-14, Dec. 2022
- 17) 高橋典之ほか: RC構造物の長期的耐震修復性能評価における地震動発生順序に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造IV, pp.701-702, 2005.9
- 18) 八百坂僚祐, 梅林舞, 高橋典之: RC造建物に敷設された軽量鉄骨下地間仕切り壁の施工方法に応じた地震修復経費評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.44, No.2, pp.103-108, 2022.7