

# 論文 RC 造建物の構造健全性評価のための観測記録に基づく性能曲線の補正法と性能曲線を用いた被災度区分判定法の検討

大野 歩美\*1・易 卓然\*2・前田 匡樹\*3・鈴木 裕介\*4

**要旨：**構造ヘルスマモニタリングにより地震時の建物の応答推定・損傷評価を行い、さらに将来の地震動に対する安全性を評価するための課題として、構造解析モデルと実際の復元力特性の不一致により応答推定に誤差が生じることが挙げられる。そこで本研究では、構造解析モデルによる性能曲線を観測記録に基づき補正し、補正した性能曲線を用いて将来の地震動に対して応答推定、被災度予測を行う方法を提案し、その妥当性を検討する。応答推定については限界耐力計算法における減衰の修正について課題が残るものの、性能曲線の補正、被災度区分については今回検討対象とした実験において比較的精度良く行うことができた。

**キーワード：**構造ヘルスマモニタリング、観測記録、性能曲線の補正、応答推定、被災度区分

## 1. はじめに

地震発生後の復旧において、被災建物の継続使用の可否や余震に対する安全性を早急に判断することは重要である。しかしながら、現状建物の被災度を評価する方法である応急危険度判定<sup>1)</sup>や被災度区分判定<sup>2)</sup>では、技術者が一棟一棟建物の被災状況を目視で調査する必要があり、多大な労力と時間を要する。また、被災建物の中には簡単に立ち入ることのできない建物も存在するといった課題が挙げられる。

そこで本研究では、建物内に設置した加速度計の観測値と構造解析モデルによる復元力特性を用いて、目視での調査を行わずに建物の被災度を判定すること、将来の地震による建物の応答を推定することを目的としている。一般に構造設計で用いる建物の解析モデルによる復元力特性（以下、復元力特性を性能曲線と呼ぶ）は、材料強度や設計式の余裕度などから、実際の応答に対して誤差を有している。よって、本論文では構造ヘルスマモニタリングの精度を向上させるために、解析モデルによる建物の性能曲線を観測記録に基づいて補正し、補正した性能曲線を用いて被災度区分・応答推定を行う方法について提案する。また既往の RC 造 4 層架構縮小試験体の振動台実験の結果に適用することで、その妥当性を検討する。

## 2. 検討に用いる既往実験の概要

### 2.1 試験体概要

本研究で検討に用いるのは、2019 年に大林組・東北大学の共同実験として行われた、RC 造 4 層架構縮小試験体の振動台実験である。試験体は図-1 に示す連層耐震壁を有する架構で、梁曲げ降伏型の全体崩壊形を形成す

るように設計されている。その他、試験体の詳細については文献 3) を参考にされたい。

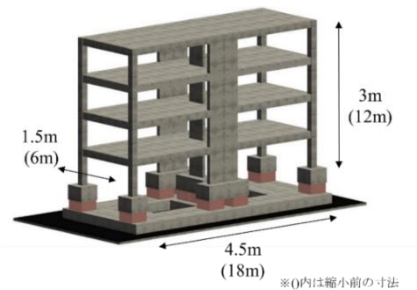


図-1 試験体モデル

### 2.2 入力地震波・加振ケース

入力地震動は、建築基準法限界耐力計算法告示の第 2 種地盤の応答スペクトル（減衰係数  $h=5\%$ 、位相 1995 年阪神淡路大震災の JMA 神戸記録）を有する人工地震動となっている。表-1 に示すように、目標応答変形を生じさせるよう入力倍率を漸増させ、Run.1~Run.9 の加振が行われた。

表-1 入力地震波・加振ケース

加振波	加速度スペクトル	位相	入力倍率(%)	
			長辺方向	短辺方向
Run.1	告示波 2 種地盤	JMA神戸	20	20
Run.2			80	60
Run.3			160	100
Run.4			240	150
Run.5			260	170
Run.6			130	100
Run.7			220	120
Run.8			220	—
Run.9			260	—

\*1 東北大学 工学部建築・社会環境工学科 (学生会員)

\*2 東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻 博士課程後期 (学生会員)

\*3 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) (正会員)

\*4 大阪公立大学大学院 工学研究科 都市系専攻 准教授 博士(工学) (正会員)

### 2.3 実験結果と静的増分解析結果

本研究では、長辺方向についてのみ検討を行うこととする。図-2 に実験結果<sup>4)</sup>及び解析結果<sup>5)</sup>の性能曲線を示す。観測の性能曲線については Run.1~5 と Run.9 の最大応答点を結んだ曲線を、解析の性能曲線については文献<sup>5)</sup>による静的増分解析結果を等価 1 自由度系に縮約することによって求めた。

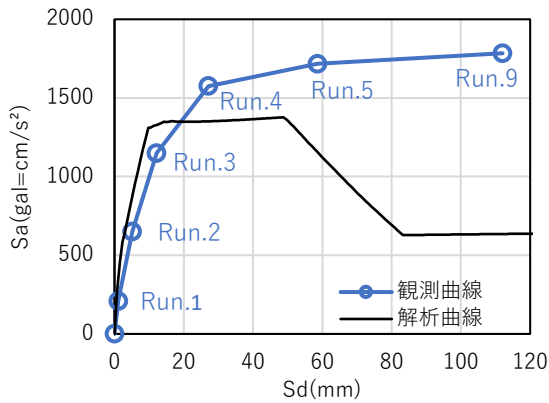


図-2 実験結果及び解析結果の性能曲線

実験では、Run.3 で一部の部材の曲げ降伏が生じ始め、Run.4 で概ね曲げ降伏型の崩壊形を形成した。その後、Run.5 において 1 層で耐震壁が曲げ破壊したが柱・梁架構は耐力を維持し、最終的に Run.9 で最大応答変形に達した。日本建築防災協会の被災度区分判定基準<sup>2)</sup>に基づいた実験時各 Run の被災度は、図-3 に示すとおりである。

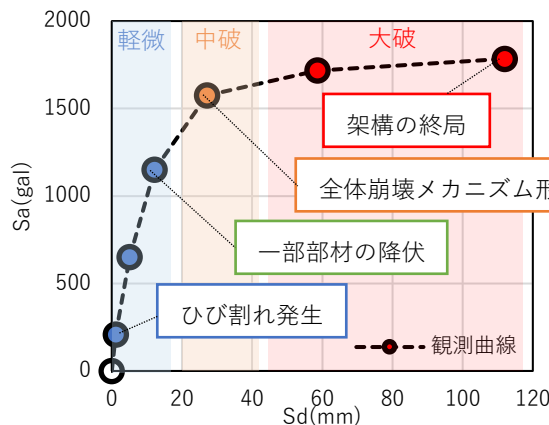


図-3 実験の被災度区分判定結果

### 3. 復元力特性の補正方法

本研究では、図-4 に示すような、解析モデルによる性能曲線を一律の係数により拡大・縮小する 2 種類の性能曲線の補正方法を提案する。これらの方法では、「建物の実際の性能曲線は解析モデルによる性能曲線と概ね相似形であり、縦横方向に拡張した形で与えられる」<sup>6),7)</sup>

とを前提としている。最大応答加速度  $S_a$  及び最大応答変位  $S_d$  の補正係数をそれぞれ  $\alpha$ 、 $\beta$  とし、観測曲線と解析曲線の平均誤差が小さくなる組み合わせを考える。図-5 に示すように、観測曲線と解析曲線の誤差はこれらの最短距離  $\delta_i$  とし、各観測点における  $\delta_i$  の 2 乗和を平均して、式(1)により平均誤差  $\Delta$  を求めた。なお、計算の際には、 $S_a$ 、 $S_d$  とともに観測値の最大値で基準化することとした。1 つ目の補正方法である最適補正法では、観測曲線と解析曲線の平均誤差  $\Delta$  が最小となる係数  $\alpha$ 、 $\beta$  で補正を行う。2 つ目の補正方法である平均補正法では、観測曲線と解析曲線の平均誤差  $\Delta$  が小さくなる係数  $\alpha$ 、 $\beta$  の組み合わせのうち上位数%を平均した値を用いて補正を行う。

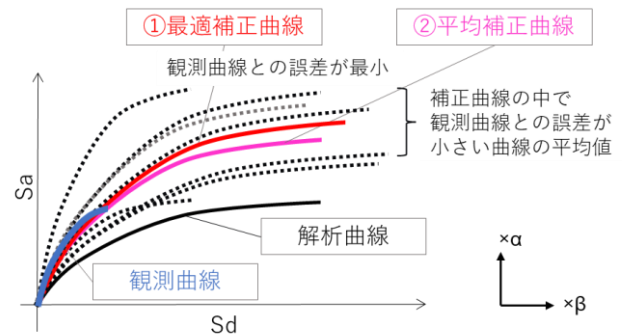


図-4 補正曲線

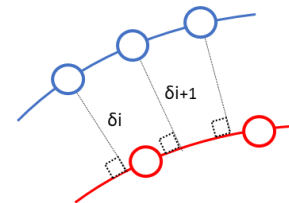


図-5 誤差の求め方

$$\text{平均誤差 } \Delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}{n}} \quad (1)$$

$n$ : 誤差を計算するデータ数

本研究では、構造ヘルスマモニタリングの観点から補正に使用する観測記録の範囲を弾性範囲から非弾性範囲まで変化させ、それぞれの手法の妥当性を検討する。

#### 3.1 最適補正法による補正結果

補正に使用する観測記録の範囲を変化させて最適補正法により補正した性能曲線を図-6 に示す。ここで、例えば図中の Run.3 は、Run.3 までの観測記録を使用したことを表す。今回の検討においては、 $S_a$ 、 $S_d$  方向ともに 1/3~3 倍程度の差異があることを想定し、補正係数  $\alpha$  及び  $\beta$  の検討範囲は 0.33 以上 3.00 以下で 0.01 刻みとした。

補正の結果、Run.9 までのすべての記録を使用した場合には補正により最大応答加速度をほぼ正確に再現することができた。しかし、降伏による剛性低下が始まる前

である Run.3 までの記録で補正すると、最大応答加速度を過小に評価する結果となった。また Run.1, Run.2 までの記録による補正は比較的観測曲線に近似するが、偶然の可能性を排除できず、弾性範囲 (Run.3 まで) の記録のみを使用する場合には、未経験領域の応答を十分な精度で推定することは難しいと考えられる。一方、降伏点付近 (Run.4) 以降の記録を使用すると、降伏点が観測値と一致することにより、最大応答加速度もある程度予測できることから、未経験領域を含む性能曲線全体を比較的精度良く補正することができた。

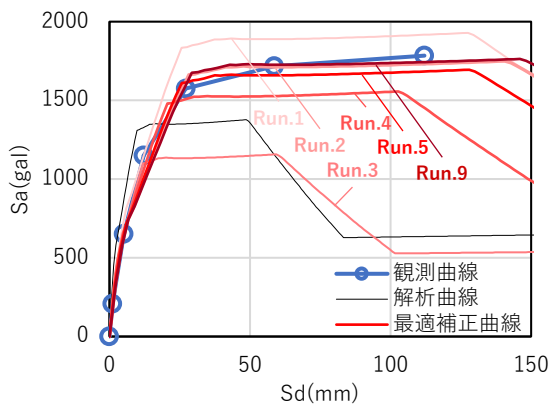


図-6 最適補正曲線

### 3.2 平均補正法による補正結果

平均補正法による各 Run 終了時点の観測記録による補正結果を図-7に示す。最適補正法と同様、補正係数  $\alpha$  及び  $\beta$  の検討範囲は0.33以上3.00以下で0.01刻みである。また今回対象とする実験では、誤差の小さい上位 3%を平均することで補正係数を求めた。

補正の結果、最適補正曲線に比べて平均補正曲線は観測記録の範囲による変動が小さく、観測記録が弾性範囲のみの場合でも比較的安定して補正をすることができた。しかし、その場合には最大応答加速度をやや小さく評価する傾向があり、使用する観測記録の範囲が増えることで、より正確に最大応答加速度を捉えることができた。

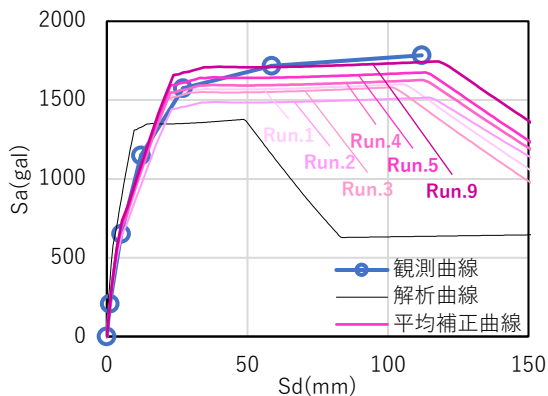
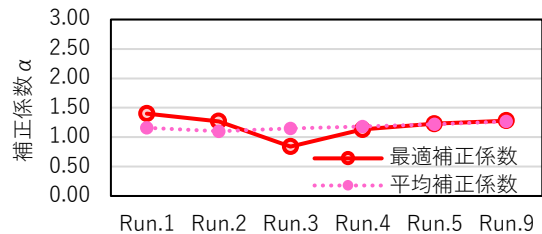


図-7 平均補正曲線

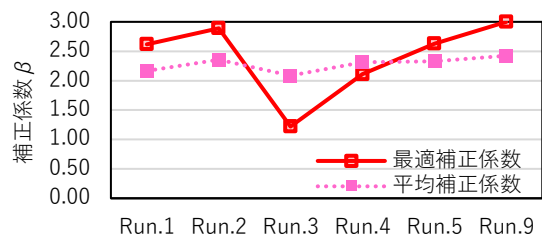
### 3.3 補正係数と補正精度の検討

#### (1) 補正係数の比較

最適補正法により求めた補正係数と、平均補正法により求めた補正係数の推移を図-8に示す。前述の通り、最適補正係数では特に弾性範囲 (Run.3 まで) の変動が大きいことがわかる。一方平均補正係数では、全体を通して比較的安定した値となっている。



a) 補正係数  $\alpha$



b) 補正係数  $\beta$

図-8 補正係数の推移

#### (2) 補正曲線の精度の検討

最適補正曲線、平均補正曲線の平均誤差  $\Delta$  の推移を図-9に示す。図中の破線は観測記録を使用して補正した範囲の平均誤差で、実線は観測記録のない未経験領域を含む性能曲線全体の平均誤差  $\Delta$  を示している。本研究で提案する補正法により、観測記録を使用した範囲では3%程度以下の誤差と、精度よく性能曲線を補正できることがわかる。一方補正のために参照する記録がない未経験領域まで含めると推定精度は悪化し、特に最適補正法では弾性範囲の変動が大きくなるが、平均補正法では弾性範囲の Run.1~3 の観測記録のみで補正しても10%程度以下の平均誤差で性能曲線を安定して推定できており、実用的な応答推定に使用することも可能と考えられる。

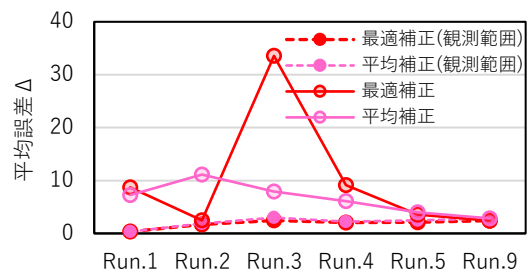


図-9 誤差の推移

### (3) 補正係数の分布

平均誤差 $\Delta$ の小さい上位の補正係数 $\alpha$ 、 $\beta$ の分布を図-10、図-11に示す。弾性範囲のみの記録を使用する場合と非弾性範囲の記録を使用する場合で大きく2つの傾向が見られた。よって、本論文では弾性範囲内であるRun.3までを使用した場合とすべての記録Run.9までを使用した場合の2つを例として示すこととする。

図-10より、降伏点に達していない弾性範囲の記録のみを使用する場合には、弾性剛性（グラフの傾き）が一致する組み合わせが精度の良いと判定され、 $\alpha$ と $\beta$ の比が一定である組み合わせが上位として直線上に広く検出されている。よってこの場合においては、最適補正係数が必ずしも未経験領域の曲線についても精度よく補正できるとは限らず、上位数%を考慮する平均補正係数の方が安定して補正できる結果になると考えられる。

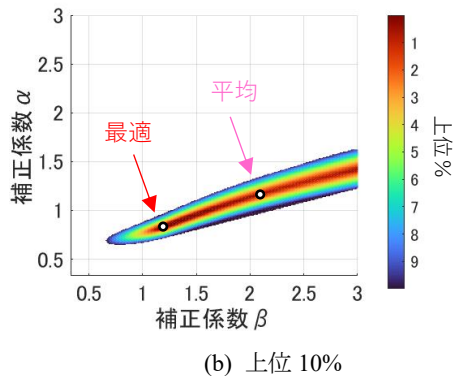
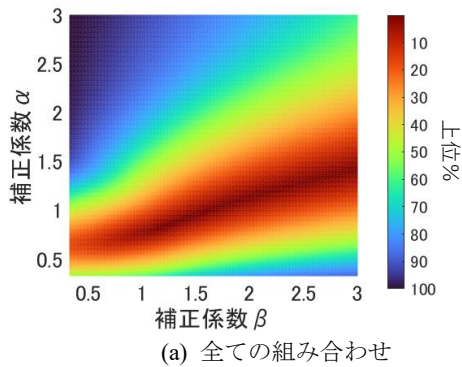


図-10 Run.3までの観測記録による補正係数の分布

図-11より、非弾性範囲の記録も使用する場合には降伏点があることで耐力が定まるため、 $\alpha$ の値はほぼ一つの値に収束する。一方で $\beta$ についてはややばらつきが見られるが、図-10に比べるとその範囲は小さいことから、非弾性範囲の記録が得られている場合には、最適補正係数で十分に精度良く補正できると考えられる。

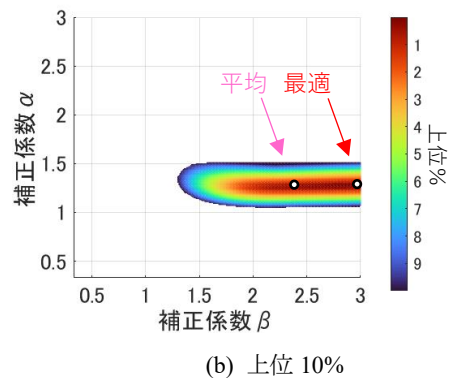
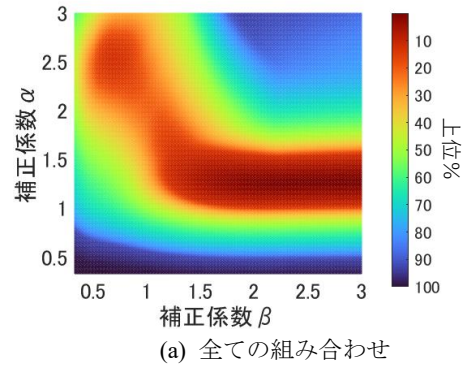


図-11 Run.9までの観測記録による補正係数の分布

以上(1)~(3)を踏まえて、観測記録が弾性範囲のみの場合には平均補正法、観測記録が非弾性範囲まで得られている場合には最適補正法・平均補正法を使用して補正することで、比較的精度良く解析曲線の補正ができると考えられる。

### 4. 復元力特性による被災度区分判定

補正した性能曲線を用いて被災度区分判定を行う方法として、本研究では性能曲線の特徴点（ひび割れ点、降伏点、最大耐力点など）に注目をする。特徴点においては、建物のひび割れや降伏による耐力低下など、構造性能の変化により剛性が変化するため、これらの点が被災度の変化にも直接対応すると考える。トリリニアモデルのような折れ線であれば剛性低下点も明確であるが、複数の部材から構成される架構の場合は、順次ひび割れや降伏が生じ緩やかに剛性が低下するため、特徴点を同定することが難しい。そこで本研究では、補正した性能曲線の特徴点を瞬間剛性の変化率が大きい点とする方法を提案する。瞬間剛性 $K$ 、瞬間剛性の変化率 $R_k$ の求め方は式(2)、(3)の通りとし、特徴点は変化率の大きい上位5つを選ぶこととする。

$$\text{瞬間剛性 } K = \frac{\Delta S_a}{\Delta S_d} \quad (2)$$

$$\text{瞬間剛性の変化率 } R_k = \left| \frac{\Delta K}{\Delta S_d} \right| \quad (3)$$

本論文ではすべての観測記録を使用した Run.9 最適補正曲線を用いて前述の被災度区分判定法の妥当性を検討した。補正曲線の瞬間剛性の変化率を図-12に示す。また、これより求めた特性点による被災度区分結果を図-13に示す。架構降伏点以前の Run.1~3 は軽微、降伏点直後の Run.4 は小破、塑性化が進行した Run.5~9 は大破と判定され、実験結果と概ね一致していることから、今後他の事例への適用性を検証することで、特性点に基づく被災度区分判定法を実用化できる可能性が確認できた。

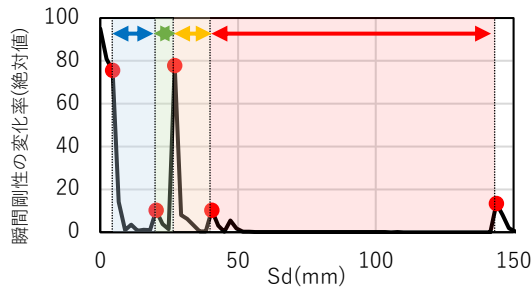


図-12 瞬間剛性の変化率

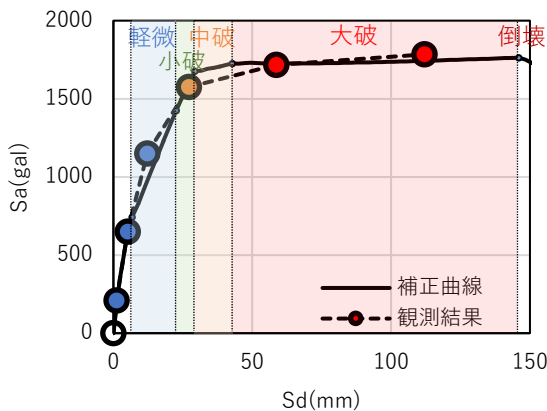


図-13 被災度区分結果

### 5. 限界耐力計算法を用いた応答推定

補正した性能曲線を用いて、限界耐力計算法<sup>8)</sup>に基づき各 Run の応答変位を予測する。限界耐力計算法を用いて正しく応答を推定するためには、正しい性能曲線が得られていることに加えて、等価粘性減衰定数  $h_{eq}$  が正しく評価できていることが重要である。実験時の各 Run の等価粘性減衰定数  $h_{eq}$  を限界耐力計算法に基づいて応答記録から逆算した値（観測値）と、建築基準法告示（限界耐力計算法）の等価粘性減衰定数  $h_{eq}$  の評価式(4)を図-14に示す。観測値と式(4)による  $h_{eq}$  には大きな誤差があることがわかる。

$$\text{告示式 } h_{eq} = h_e + 0.25 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{\mu}}\right) \quad (4)$$

そこで本論文では、性能曲線と同様、減衰を観測記録に基づき修正した上で応答を推定することとする。観測

記録に基づく修正式を(5)、(6)に示す。修正式は、建築基準法告示の評価式(4)における第2項の係数(0.25)を縦軸方向の平均誤差が最小となるように修正するとともに、弾性時減衰  $h_e$  については一定と考える場合（修正方法 A、式(5)）と、線形近似と考える場合（修正方法 B、式(6)）を検討する。性能曲線については Run.9 最適補正曲線を用いることとする。

$$\text{A } h_{eq} = 0.11475 + 0.089 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{\mu}}\right) \quad (5)$$

$$\text{B } h_{eq} = 0.1737 + 0.001 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{\mu}}\right) \quad (6)$$

$h_{eq}$ : 等価粘性減衰定数  $h_e$ : 弾性時減衰  $\mu$ : 塑性率

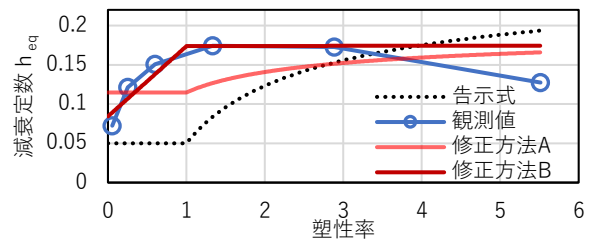
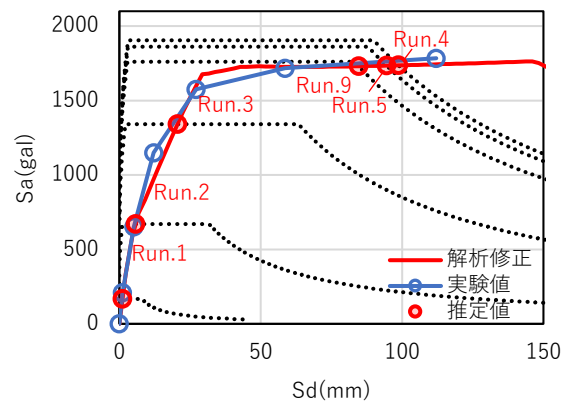


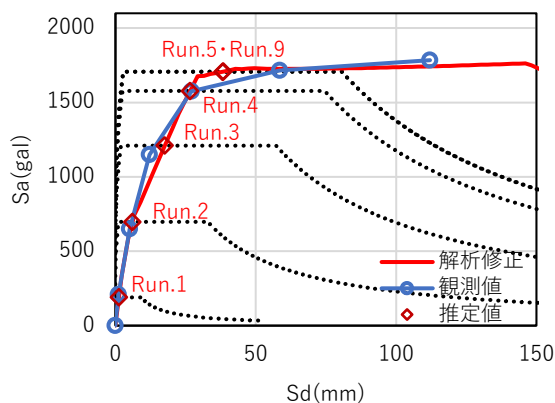
図-14 等価粘性減衰定数  $h_{eq}$

応答スペクトルと性能曲線の交点より求めた各 Run 応答推定結果を図-15に示す。また観測値と比較した推定誤差を図-16に示す。どちらの等価粘性減衰定数の修正方法でも、最大応答加速度については精度よく推定することができた。しかし応答変位については、Run.5 までは比較的精度の良い修正方法 B においても、Run.9 で60%ほどの誤差が生じている。これは建物の剛性が低くなる非弾性範囲では、応答スペクトルの大きさの変化による推定変位への影響が弾性範囲に比べて大きくなることが要因として考えられる。したがって、等価粘性減衰定数をより良い精度で修正することが必要であると考えられ、この点については今後の検討課題としたい。



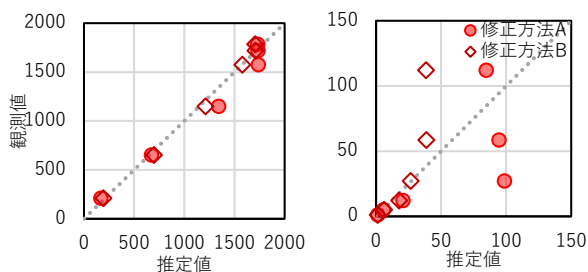
a) 修正方法 A

図-15 応答推定



b) 修正方法 B

図-15 応答推定



a) 応答加速度 (gal)

b) 応答変位 (mm)

図-16 推定精度

## 6. まとめ・結論

・弾性範囲のみの観測記録で補正する場合には平均補正法、降伏点以降である非弾性範囲の観測記録も使用して補正する場合には最適補正法を用いることで、比較的精度よく性能曲線を補正することができた。

・性能曲線より特性点を検出し、特性点を基準に被災度を区分すると、今回の検討対象の実験については実験結果と比較的近い結果が得られ、提案手法の実用化の可能性が確認できた。

・限界耐力計算法による応答推定では、減衰の値を観測記録により修正することで、告示式を使用する場合に比べて精度を上げて推定を行うことができた。しかし、非弾性範囲の応答推定については変位の推定誤差が大きい結果となり、引き続き検討を行う必要がある。

## 謝辞

本研究は、英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業「建屋応答モニタリングと損傷イメージング技術を活用したハイブリッド型の原子炉建屋長期健全性評価法の開発研究」(課題番号: JPJA21P21458909, 研究代

表者・前田匡樹)の助成を受けたものです。また、建築研究所 関松太郎氏には多大なるご支援、ご協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 日本建築防災協会：被災建築物応急危険度判定マニュアル，1998.1
- 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
- 3) 前田 匡樹，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被災度評価と応答予測 その 1 研究の位置づけと実験計画の概要，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.441-442，2020.9
- 4) Alex Shegay，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被災度評価と応答予測 その 2 実験結果概要，日本建築学会学術講演梗概集，pp.443-444，2020.9
- 5) 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架構の破壊形式と安全限界の評価，日本建築学会構造系論文集，pp.247-257，2021.2
- 6) 田畑 佑，藤田 起章，三浦 耕太，前田 匡樹：加速度センサ記録に基づいた解析モデルの修正による RC 造建物の応答推定手法に関する検討，コンクリート工学年次論文集，第 42 巻第 2 号，pp.679-684，2020.7
- 7) 梨本優也，菊池友介，鈴木裕介，前田匡樹：地震時応答観測データのフィードバックによる逐次修正解析モデルを用いた RC 造建物の即時被災度判定，日本建築学会技術報告集，第 23 巻第 54 号，pp.497-500，2017.6
- 8) 一般財団法人日本建築センター，ひとりで学べる RC 造建築物の構造計算演習帳 限界耐力計算編，2015.1
- 9) 大野歩美，ほか：加速度センサによる観測記録に基づく鉄筋コンクリート建築の応答予測と被害推定 その 1 性能曲線の修正方法についての検討，日本地震工学会大会 2022，Paper No. TS 20220148
- 10) Zhuoran YI，ほか：加速度センサによる観測記録に基づく鉄筋コンクリート建物の応答予測と被害推定 その 2 Response prediction and damage evaluation of a reinforced concrete structure，日本地震工学会大会 2022，Paper No. TS 20220166