

論文 地震被害を受けた RC 造建物の層レベルの被災度判定と将来の地震に対する応答推定

大竹 菜月*1・大野 歩美*1・易 卓然*2・前田 匡樹*3

要旨: 構造ヘルスマモニタリングによって、地震被害を受けた建物の応答推定・損傷評価や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建物の復元力特性の間に誤差が生じることが挙げられる。本研究では、解析モデルの各層の性能曲線を観測記録に基づいて補正することで、被災後の建物の被災度及び将来の地震に対する応答を層レベルで推定する方法を提案し、その妥当性を検討する。既往の RC 造 4 層架構縮小振動実験に適用したところ、被災度の判定は精度よく予測することができ、将来の地震に対する応答については観測された地震動に近い大きさの地震において精度よく推定することができた。

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, 被災度区分

1. はじめに

震災復旧において、被災建物の使用継続の可否や余震に対する安全性を迅速に判断することは極めて重要である。現在、建物の被災状況を評価する応急危険度判定¹⁾や被災度区分判定²⁾では、技術者が一棟ずつ目視で調査を行う必要があり、膨大な時間と労力を要する。また、簡単に立ち入ることが難しい建物が存在するという課題もある。このような課題に対して、目視による損傷確認を必要としない構造ヘルスマモニタリングシステムの利用が有効であると考えられる。

一般的に、構造設計で使用される解析モデルの復元力特性は、材料強度や設計式の余裕度などから実際の建物応答との間に誤差が生じる。大野ら³⁾は構造ヘルスマモニタリングの精度向上を目的として、解析モデルの性能曲線を等価 1 質点系に縮約し、建物内に設置された加速度計の観測記録に基づいて補正する手法を提案した。補正された性能曲線を用いることで、目視での調査をせずに建物全体の被災度判定及び応答推定を行った。

本研究では、大野ら³⁾の研究の手法を層レベルに展開するため、観測記録を用いて、目視での調査を行わずに各層の被災状況を判定すること、将来の地震に対する各層の応答を推定することを目的とする。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し、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^{4),5)}である。試験体は図-1 に示すような連層耐震壁を有する架構で、曲げ梁降伏型の全体崩壊系として設計された。その他、試験体に関する詳細は文献 4)を参考にされたい。



図-1 実験試験体

2.2 入力地震波・加振ケース

実験で入力された地震波は、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である。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 加振ケース

加振 No.	加速度 スペクトル	位相	入力倍率% (長辺方向)
Run.1	告示波 2 種地盤	JMA 神戸	20
Run.2			80
Run.3			160
Run.4			240
Run.5			260
Run.6			130
Run.7			220
Run.8			220
Run.9			260

*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 (学生会員)

*2 同済大学大学院 土木工学研究科 防災減災工学専攻 研究員 博士 (工学) (正会員)

*3 東北大学 グリーンクロステック研究センター/工学研究科都市・建築学専攻 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⁵⁾及び解析結果⁶⁾の性能曲線を示す。計測された加速度記録に総重量を乗じることで各層の水平力を算出した。層間変形は振動台に固定した計測フレームに取り付けたレーザー変位計で計測した各階床の変位の差とした。なお、実建物に適用する際は加速度記録を積分しフィルタをかける等、発散しないよう処理を施して変形を求める必要がある。観測曲線については Run.1~Run.5 と Run.9 の最大応答点を結んだ曲線とした (Run.6,7,8 は入力倍率が前の Run よりも小さいため割愛した)。

表-2 に各層の各 Run 終了時の耐震性能残存率 R 及び被災度を示す。各層の耐震性能残存率は、日本建築防災協会・被災度区分判定²⁾の耐震性能残存率 R の算定方法に基づいて式(1)によって部材を層ごとに分けて算出し、被災度を判定した。

$$R_i = \frac{\sum_{j=0}^5 B_j}{B_{org}} \quad (1)$$

Ri: i 層の耐震性能残存率
Bj: 損傷度 j の部材の基準化残存耐震性能
Borg: 被災前の基準化耐震性能

3. 復元力特性の補正方法

本研究では、大野らの研究³⁾で提案された、解析モデルの性能曲線を観測曲線に基づき縦横に拡大または縮小する補正方法を、多層建物に対して適用する。層せん断力 Q 方向の補正係数を α 、層間変形 d 方向の補正係数を β とし、観測曲線と解析曲線の距離の平均誤差が小さくなる補正係数の組み合わせを考える。この手法は、「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」^{7),8)}ことを前提としている。なお、平均誤差は観測曲線と解析曲線との最短距離 δ_i の二乗和を観測点の数で平均することで算出した³⁾。また、計算においては、Q 及び d ともに観測値で基準化して計算した。

補正方法は図-3 に示すように最適補正法と平均補正法の2種類を適用する。最適補正法では、観測曲線と補正曲線の平均誤差が最小となる α 及び β を補正係数とする。平均補正法では、平均誤差を小さくする補正係数 α 、 β の組み合わせのうち上位 3% を平均した値を補正係数とする。文献3)において、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、降伏以降の非弾性範囲の観測記録も用いて補正する場合には最適補正法を採用することで、比較的精度よく性能曲線を補正できると示された。よって、本研究では Run.1~3 の観測記録のみを使用する場合は平均補正法を、Run.4 以降の観測

記録も使用する場合は最適補正法を用いて性能曲線の補正を行うこととする。

表-3 に補正に使用する観測記録の範囲を変化させて補正したときの補正係数を示す。ここで、例えば Run.4 は、Run.4 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、Q, d 方向ともに 1/3~3 倍程度の差異があると仮定し、補正係数 α 及び β の検討範囲は 0.33 以上 3 以下で 0.01 刻みとした。

図-4 に、補正後の性能曲線を示す。観測記録を使用している範囲では精度よく補正できていることがわかる。

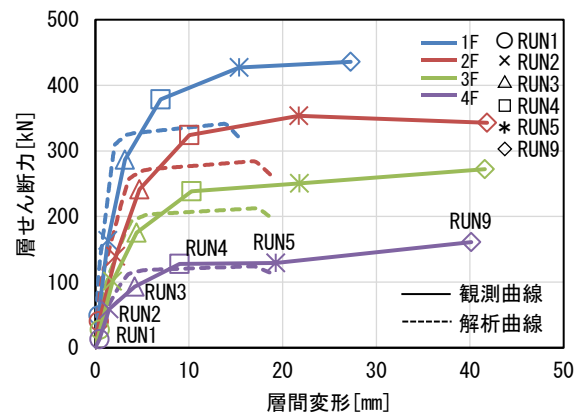


図-2 実験結果及び解析結果の性能曲線

表-2 実験結果の耐震性能残存率及び被災度

	RUN1	RUN2	RUN3	RUN4	RUN5	RUN9
1F	0.996	0.952	0.951	0.939	0.311	0.0854
2F	0.994	0.975	0.963	0.906	0.706	0.619
3F	0.994	0.988	0.988	0.875	0.794	0.556
4F	0.988	0.975	0.969	0.9	0.8	0.519

軽微 小破 中破 大破

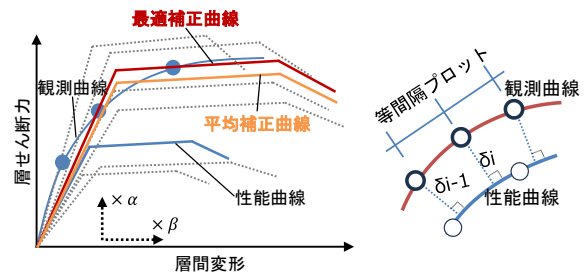


図-3 性能曲線の補正

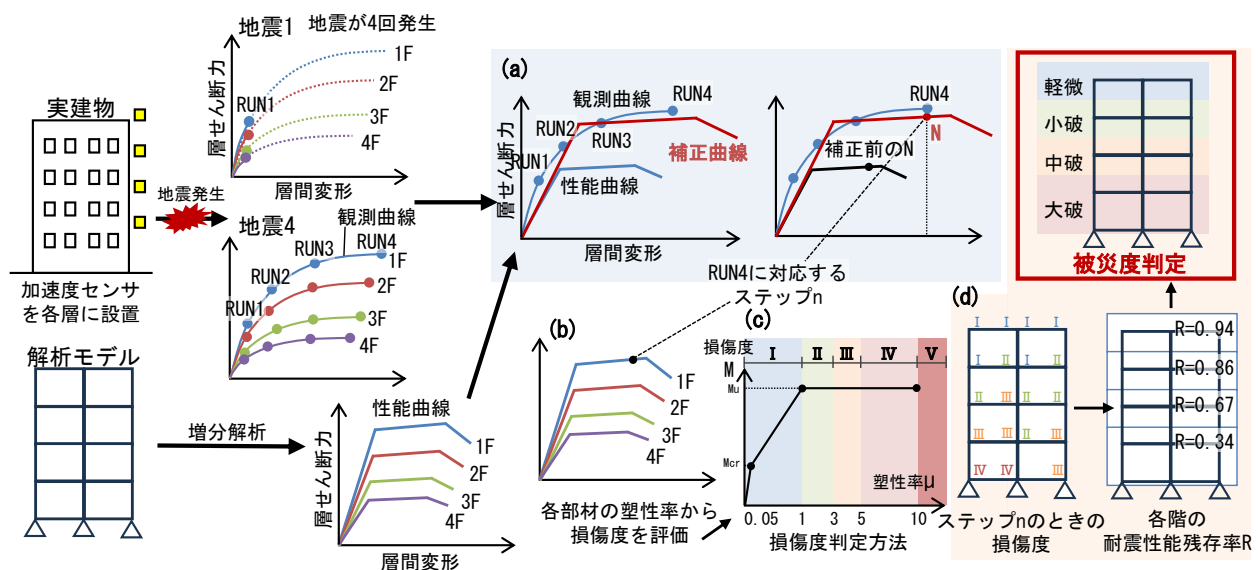
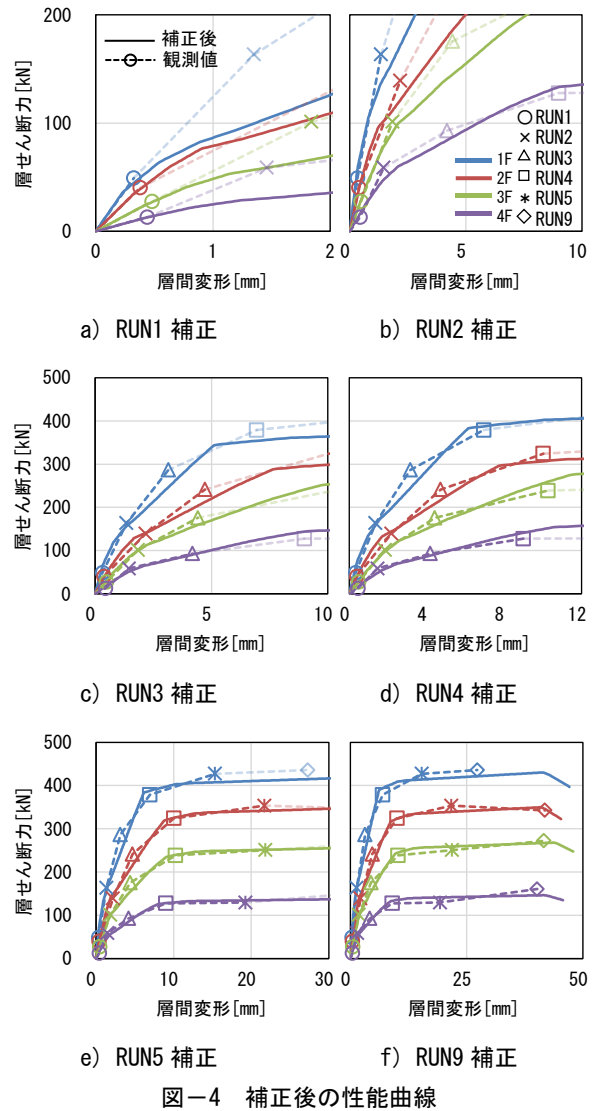
表-3 補正係数

RUN	1F		2F		3F		4F	
	α	β	α	β	α	β	α	β
1	0.59	1.69	0.66	1.14	0.61	1.32	0.56	1.51
2	0.98	2.53	0.83	1.56	1.15	2.39	1.19	2.55
3	1.11	2.5	1.12	2.13	1.31	2.55	1.29	2.58
4	1.24	3	1.15	2.15	1.43	3	1.37	3
5	1.24	3	1.24	2.45	1.22	2.37	1.12	2.27
9	1.26	3	1.23	2.41	1.26	2.53	1.18	2.46

4. 被災後の各層の被災度区分判定

図-5 に被災した建物の各層の被災度区分を，補正された性能曲線から判定する方法を示す。補正曲線上において，観測値の最大層間変形と変位が一致する点を特定する(図-5(a))。この点に対応する補正前の性能曲線上の点を見つけ，静的増分解析によりその点での各部材の塑性率を算出する(図-5(b))。次に，これらの塑性率に基づき各部材の損傷度を評価する(図-5(c))。ここで，部材塑性率と損傷度の関係は，振動台実験の結果⁴⁾⁵⁾を参考に，終局時塑性率を10と仮定し，塑性率1~3を損傷度2，塑性率3~5を損傷度3，塑性率5~10を損傷度4とした。さらに，損傷度をもとに各層の耐震性能残存率Rを計算し各層の被災度区分を判定する(図-5(d))。

図-6 に各層の耐震性能残存率Rの観測記録と解析結果の比較を示す。観測値は，実験時に目視で調査した損傷度からRを算出した。解析値は，例えば図中のRun.4はRun.4までの観測記録を用いて補正した補正曲線に基づき図-5のフローによって算定したRun.4終了時の各層の耐震性能残存率である。Run.1~3では全層で軽微となり一致し，精度よく判定できている。試験体の塑性化が進行するRun.4以降では，損傷度の判定方法の違いから解析値において耐震性能残存率Rをやや過小評価する傾向があるものの，概ねよく推定できている。これに基づく被災度区分の推定結果はすべて完全に一致しているわけではないものの，全体的には良好な結果を示しており，一部の誤差が生じた箇所においても，安全側に被災度を判定していることが確認できる。



5. 将来の地震に対する応答推定

解析モデルを算出した補正係数 α , β に基づいて骨組解析モデルの各部材の復元力特性を補正し応答解析によって将来の地震に対する応答を推定する。図-7 に示すような手順で応答推定を行う。性能曲線の補正により算出された補正係数 α , β に基づいて解析モデルを補正し、各 Run に対応する時刻歴応答解析を行い層ごとの最大応答点を抽出する。解析モデルの補正方法は次節にて述べる。補正に用いた観測記録以降の応答点を実験値と比較することで本手法の妥当性を検証する。応答解析に用いる入力地震波は、実験時に独立基礎上に設置された計 5 つの加速度計で得られた加速度記録の平均値を用いた。

5.1 解析モデルの補正方法

解析モデルの補正は図-8 のように、各部材の復元力特性の耐力を α 倍、剛性を $\alpha\beta$ 倍することで補正する。

図-9 に各部材の復元力モデルを補正した解析モデルの静的増分解析結果と、3 章で用いた層レベルで補正した解析結果の層せん断力-層間変形関係の比較を示す。3 章の層レベルの補正曲線と 5 章の部材レベルの補正曲線との間に一部乖離がみられる箇所があるものの、概ね一致するので、本章の方法で補正した性能曲線を将来の地震応答推定に用いることとした。なお、解析モデルの補正には各層の部材にそれぞれの補正係数を乗じる方法を用いたが、性能曲線は各層の部材のみに起因するわけではないためこのような乖離がみられたことが考えられる。

5.2 減衰定数 h の補正

弾性時減衰定数 h は、実験による応答データを倉本ら⁹⁾により提案された動的 1 質点系縮約方法を用いて縮約した応答点と入力地震波の応答スペクトルが一致するときの h として推定した。本検討においては、Run.1 の振動データを用いたところ、図-10 に示すように応答点は $h=11\%$ の応答スペクトル上にあるので、弾性時減衰を 11% として以下の検討を行った。

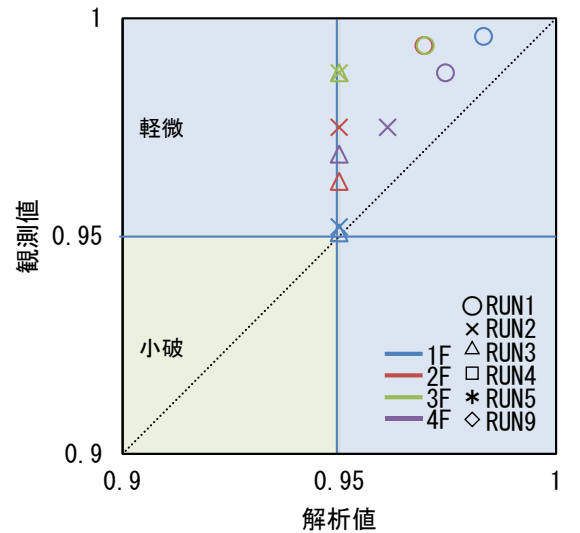
5.3 応答解析結果

図-11 に Run.3 までの観測記録で補正した解析モデルで Run.4 の応答推定を行った結果、及び、Run.4 までの観測記録で Run.5 の応答推定を行った結果を示す。

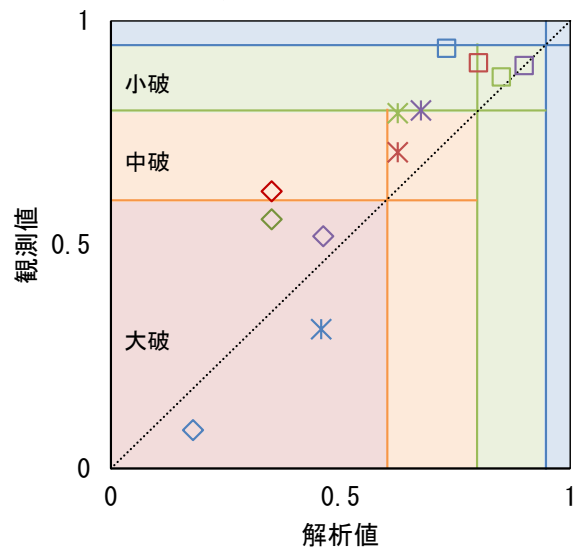
一部の部材の降伏が始まった段階の Run.3 の補正による Run.4 の推定結果と比較して、部材の降伏が進行し概ね降伏機構が形成された Run.4 の補正による Run.5 推定は、層せん断力、層間変形のいずれにおいても精度よく推定できている結果となった。

図-11 の結果も含めて、Run.1~Run.5 のデータを用いて補正し、次の Run 応答を推定した結果を図-12 に示す。Run.5 までの推定結果を見ると、使用した観測記録に近い加振については正確に推定できていることが確認

できる。層せん断力は、いずれの Run でも比較的一致している。層間変形については、Run.4 まではやや過大評価（すなわち、被災度判定では安全側）、Run.5 では概ね一致した。Run.9 の応答推定では層間変形での観測値との乖離が大きく、推定精度が低い結果となった。原因としては履歴ループによるエネルギー損失である履歴減衰の補正を行っていないことが考えられる。



a) Run. 1~3 補正



b) Run. 4~5, 9 補正

図-6 耐震性能残存率 R と被災度区分の推定結果

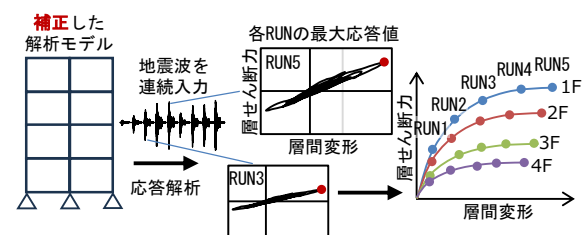


図-7 応答解析フロー

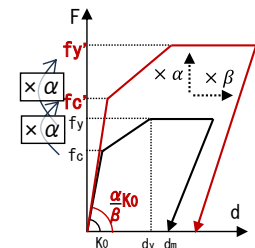


図-8 解析モデルの補正方法

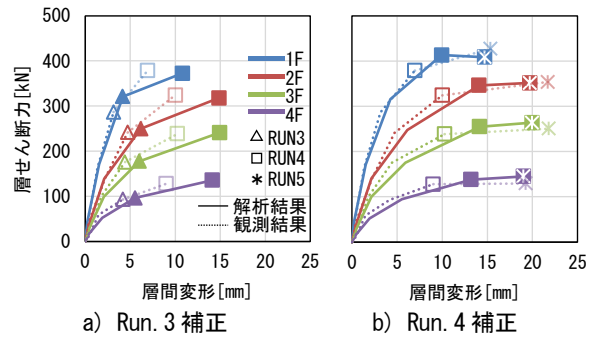


図-11 応答解析結果

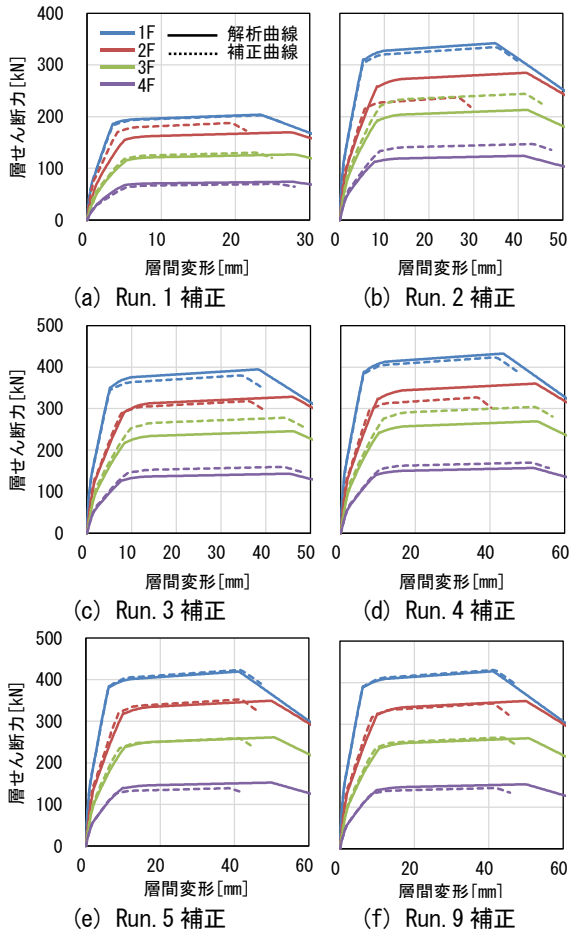


図-9 補正した解析モデルの性能曲線

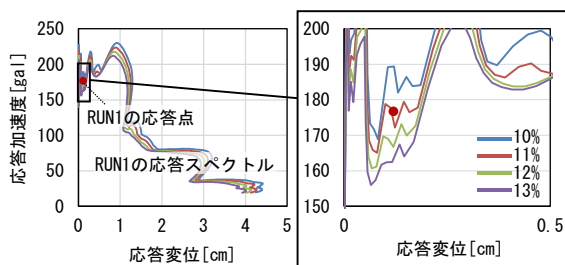


図-10 減衰定数算出方法

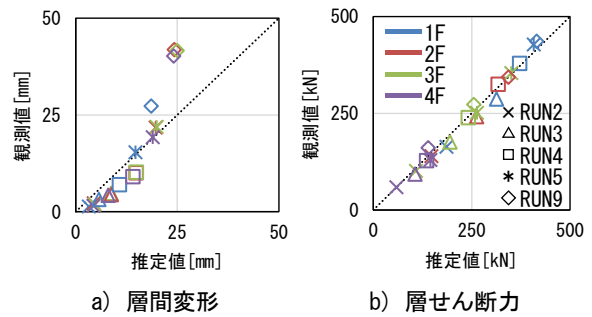


図-12 次のRunに対する応答推定結果

図-13に、各Runまでのデータで補正した応答変位の推定値と観測値の比較を示す。前掲の図-4に示したように、弾性範囲の応答のRun.1,2では、降伏後の塑性化領域の復元力特性を精度よく補正することはできていないので、推定結果の精度は悪い。なお、Run.1の観測記録を用いて補正した解析モデルは実建物よりも耐力及び剛性が低いためRun.4以降の応答推定では層間変形が1/10を超えたため応答解析を中止した。一方、降伏点が含まれる、あるいは、降伏機構が形成された後のデータ(Run.3:△, Run.4:□, Run.5:*)を用いた推定は、比較的精度は良い。補正に使用する観測記録が部材の降伏以降であれば精度よく推定できていることがわかる。

6. まとめ

本研究では、観測記録により各層の性能曲線を補正することで、被災後の建物の被災度判定及び将来の地震に対する応答推定を層レベルで行う方法を提案し、その妥当性を検証した。その結果、以下の知見を得た。

- (1)補正係数による性能曲線の補正は、層レベルにおいても適用することが可能であり、それにより今回の検討対象の実験については実際の被害を解析モデルから予測することができた。
- (2)補正に用いる観測記録に近いRunにおいては精度よく推定することができ、将来の地震に対する応答の予測が可能であることが確認された。
- (3)大きい変形を要する地震波の応答推定は比較的精度

が低く、その原因については引き続き検討を行う必要がある。

本論文では、特定の実験データを対象に手法の有効性を検討したため、今後は様々な種類や規模の建物に本手法を適用し、その適用範囲や信頼性を詳細に検討する必要がある。これにより、本手法を実建物の構造ヘルスマニタリングにおいて実用的かつ効果的に活用できる方法へと発展させることを目指している。

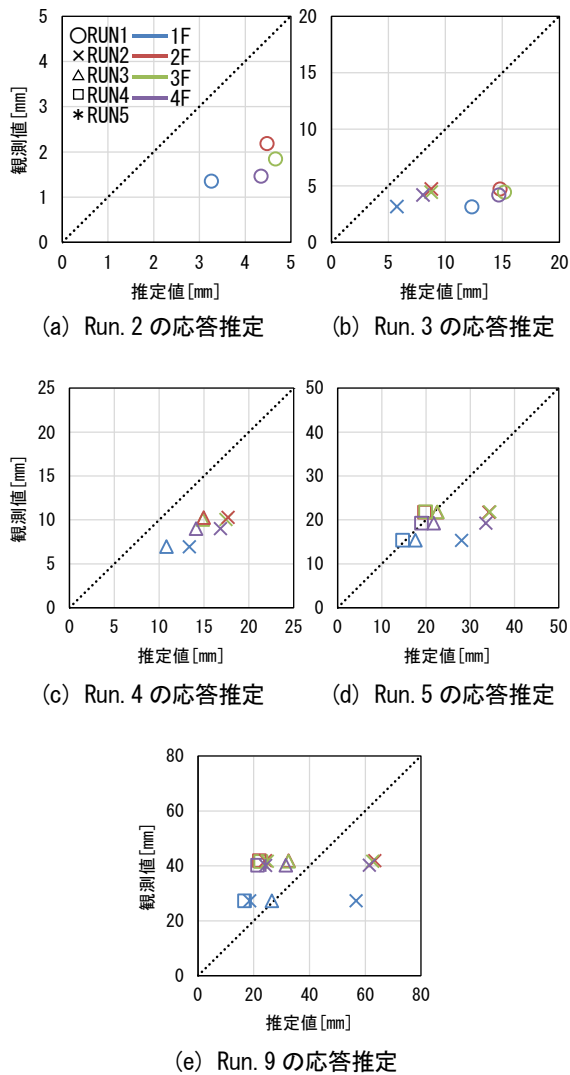


図-13 実験結果と応答解析結果の比較

謝辞

研究を進めるにあたり、建築研究所 関松太郎氏には多大なるご支援・ご協力を賜りました。ここに記して謝意を示します。

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区分判定基準および復旧技術指針，2016.3
- 3) 大野歩美，易 卓然，前田匡樹，鈴木裕介：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区分判定法の検討，コンクリート工学年次論文集，第45巻第2号，pp.223-228，2023
- 4) 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 C-2，構造4，pp.441-442，2020.9
- 5) 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，日本建築学会大会学術講演梗概集 C-2，構造4，pp.443-444，2020.9
- 6) 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.
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 倉本 洋：多層建築物における等価1自由度系の地震応答特性と高次モード応答の予測，日本建築学会構造系論文集，第580号，pp.61-68，2004.6