

# 論文 建物の地震観測記録を用いた等価一質点系応答補正法による将来の地震に対する被害予測

菊池 友介\*1・晉 沂雄\*2・前田 匡樹\*3

**要旨:** 既報により提案された RC 造建物における応答推定手法の妥当性の検証と適用範囲の把握を目的とし、設計慣行に基づく解析モデルから実建物を模擬した解析モデルの応答を推定するシミュレーション解析を行った。その結果、耐力・剛性や崩壊形等が実建物と異なる場合についても、等価一質点系において将来の地震動に対する応答を概ね推定できることを確認した。また、経験した地震動から等価粘性減衰定数評価式を逐次修正することにより応答を推定する手法を提案し、修正式を使用した推定がより有用であることを示した。  
**キーワード:** シミュレーション解析, 等価一質点系応答, 応答加速度記録

## 1. はじめに

近年、人口減少による新築建物需要の低下や地球環境問題などの背景から、建物の耐用年数の長期化が求められている。地震後、被災建物の復旧を合理的に実施するには、建物の損傷状態・残存耐震性能の適切な評価が不可欠である。

既報<sup>1)3)</sup>においては設計慣行に基づいて作成された解析モデルを用い、縮小 20 層 RC 造建物の震動実験における応答・損傷の推定と耐震性能評価手法の検討がなされた。特に既報<sup>2)</sup>において、現行の設計手法による解析モデルでは、実建物の耐力、剛性、重量のばらつき等の影響により、必ずしも建物の応答性状を精度よく表すことができない場合があることがわかっている。そこで、図-1 に示すように、設計モデルの荷重増分解析から算出した性能曲線を建物の応答加速度記録を動的縮約した一質点系応答の包絡線との誤差が最小となるように、縦・横方向それぞれに対し補正係数を乗じることで性能曲線を拡縮・修正することにより、未経験領域も含めた応答を推定する手法が提案された。結果として、梁曲げ降伏先行型の全体崩壊形の挙動を示す震動実験結果においては、小変形領域における観測記録を用いて解析モデルの性能曲線を修正することにより、大変形時の性能曲線を概ね推定可能であることが確認された。また、これにより被災建物の残存耐震性能及び被災度を概ね評価でき、将来起こり得る地震に対する被害予測を行える可能性が示された。しかし、この応答推定手法は縮小 20 層 RC 造建物の震動実験結果のみでしか検討を行っておらず、他の建物に適用した場合どの程度の範囲で推定が可能であるか等不明瞭な点が多く残るといのが現状である。

そこで本報では、後述するシミュレーション解析に

よる、既提案の応答推定手法の妥当性の検証と適用範囲の把握を目的とする。

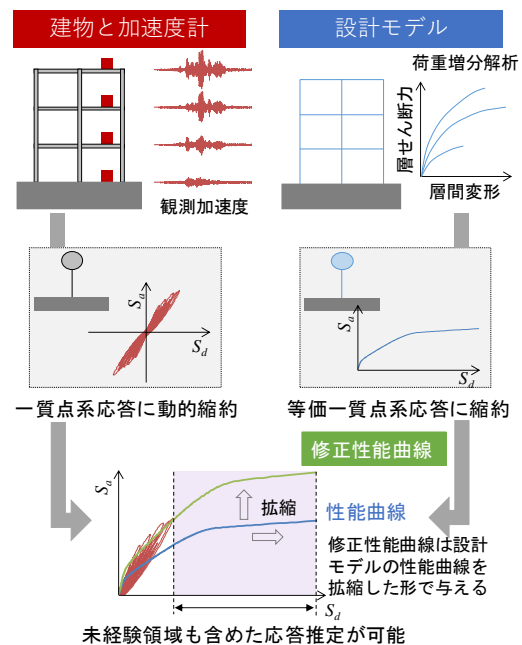


図-1 既報における応答推定手法の概要<sup>2)</sup>

## 2. シミュレーション解析の概要と解析モデルの設定

### 2.1 シミュレーション解析の概要

前述のように、設計慣行に基づく解析モデルでは、必ずしも建物の応答性状を精度よく表すことができない場合がある。そこで、本報ではまず、設計慣行における一般的な材料規格値や手法に基づいて設定した解析モデル（以下、設計モデル）と、実験結果の代わりに、建物の耐力・剛性等、建物における特性値のばらつきを想定し設定した解析モデル（以下、実解析モデル）を作成する。次に、設計モデルの性能曲線に既報<sup>2)</sup>

\*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 東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻 助教 博士(工学) (正会員)  
 \*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)

による応答推定手法を適用することで、実解析モデルの時刻歴応答解析による疑似応答(正解値)を推定し、これにより、応答推定手法の妥当性の検証と適用範囲の把握を行う。図-2に本検討におけるシミュレーション解析のフローを示す。

## 2.2 設計モデルの設定

設計モデルは梁曲げ降伏先行型の純ラーメン RC 造建物とする。図-3に示すように、スパンは 6.5m, 階高は 3.0m, 柱及び梁を材端弾塑性バネでモデル化した魚骨モデルとし、各階における柱及び梁の断面二次モーメント  $I$  はベースシア係数  $C_B$  が 0.2 となるときに最大層間変形角が  $1/500\text{rad}$  となるように定めた。ここで、梁の  $I$  はスラブの影響を考慮し柱の 2 倍とし、各階柱及び梁の  $I$  は  $A_i$  分布により定まる層せん断力の分布に比例させる。復元力特性は除荷時剛性低下指数  $\gamma=0.4$  の Takeda モデルとし、粘性減衰は瞬間剛性比例型、減衰定数を 5% と設定し解析を行った。また、降伏時剛性低下率  $\alpha_y=0.3$ , 降伏後剛性低下率  $\beta=0.005$ , ひび割れ時曲げモーメント  $M_{cr}=M_y/3$  ( $M_y$ : 曲げ降伏モーメント) と設定した。各部材の曲げ強度は  $A_i$  分布による静的弾性解析を行い、 $C_B$  が 0.3 となるときの梁の曲げモーメントを梁の曲げ強度とし、柱の曲げ強度は各階柱頭、柱脚の曲げモーメントの平均値に柱強度係数 2.0 を乗じ設定した(全体崩壊形を形成するため、1 階柱脚のみ柱強度係数を 0.8 とする)。

## 2.3 入力地震波

入力地震波には ElcentroNS 波(以下, Elc 波), TohokuNS 波(以下, Toh 波), BCJ-L1 波(以下, L1 波)の 3 波を用い、図-4に示すように、各入力波に対し Run.1 から Run.5 まで徐々に入力倍率を大きくした連続波を入力する。また、図-5に示すように、入力倍率は Run.2 時の最大層間変形角を約  $1/200\text{rad}$  に基準化し、各 Run において、表-1に示す入力倍率を設定し入力地震波を作成した。

## 3. 逐次等価粘性減衰定数評価式の修正による応答推定手法の改善

等価線形化法を適用するにあたり建物の減衰能力を評価する必要があるが、既報<sup>1)~3)</sup>で用いられたようなスリップ性状が卓越する建物に対しては、建築基準法告示の式では十分な精度で応答推定を行うことが難しい場合があることがわかっており、観測記録から大変形時の応答を推定するには等価粘性減衰定数の修正式が必要となる。そこで、本節では、設計モデル及び実解析モデルを用いた解析実施に先立ち、観測記録から等価粘性減衰定数評価式を修正する手法について提案する。提案手法の概要を図-6に示す。まず、実応答の

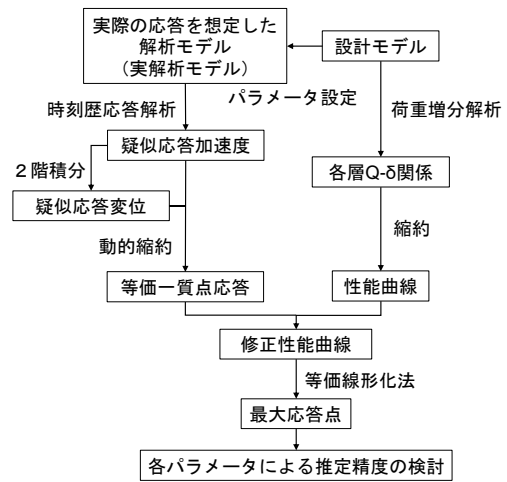


図-2 本研究の解析フロー

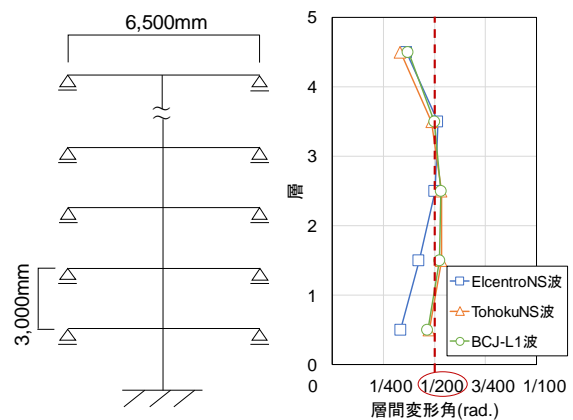


図-3 解析モデル 図-5 Run.2 時層間変形角

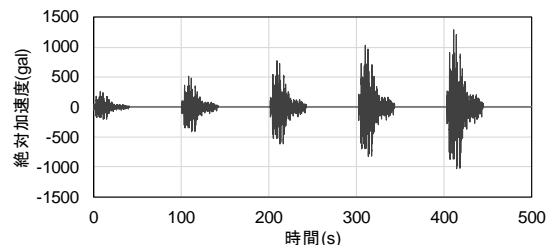


図-4 入力地震波: TohokuNS 波, Run.1-5 の例

表-1 入力地震波倍率

Run.1	Run.2	Run.3	Run.4	Run.5
50%	100%	200%	300%	400%

動的縮約から得られる最大応答時の履歴ループの 1 サイクルの面積と等価ポテンシャルエネルギーから等価粘性減衰定数を算出する。次に、実応答の性能曲線と最大応答により仮定の終局変位と降伏変位を定め、実応答における塑性率を算出することで式(1)により等価粘性減衰定数評価式の  $\alpha$  を算出した。

$$\alpha = (h_{eq} - h_e) \left( \frac{\sqrt{\mu}}{\sqrt{\mu} - 1} \right) \quad (1)$$

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

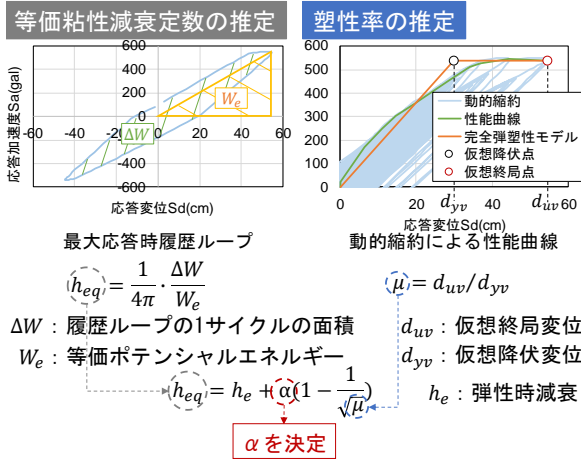


図-6 等価粘性減衰定数評価式の修正方法

その後、経験した地震動による  $\alpha$  の平均値により逐次  $\alpha$  を再設定し、告示式を修正したものを等価粘性減衰定数修正式とした。

図-7 に告示式、修正式における推定値と実解析モデルの応答値をプロットしたグラフを示す。なお本検討において、設計モデルの復元力特性は Takeda モデルとしたのに対し、実解析モデルを Takeda スリップモデル ( $\gamma=0.4, \lambda=0.5$ ) と設定し、層数は5層として検討を行った。変形応答は特に L1 波において大きな推定精度の向上がみられ、図-8 に示すように、L1 波では告示式に比した  $\alpha$  の低下による影響をよく捉えられているといえる。加速度応答については大きな推定精度への変化はみられないが、これは降伏後の耐力一定となる範囲内で減衰が変化しても加速度応答にほとんど影響がでないためと考えられる。以降の検討では本節で提案した修正式を用いて応答推定を行う。

#### 4. シミュレーション解析による応答推定手法の推定精度の検証

本章では、2章で述べたシミュレーション解析により、設計モデルと実建物（実解析モデル）の相違が既報<sup>2)</sup>の応答推定手法における推定精度へ及ぼす影響について検討する。

##### 4.1 耐力・剛性の相違による応答推定への影響の検討

図-9 に設計モデルから耐力・剛性の相違を想定した実解析モデルの復元力特性を示す。実解析モデルとして4種類の復元力特性を設定し、表-2 に示すパラメータにより、設計モデルと実解析モデルの耐力・剛性が異なった場合の推定精度について検討を行う。

図-10 に未経験領域塑性率/経験領域塑性率における全 Case、全波による推定精度を变形、加速度応答について示す。ここで、経験領域塑性率とは過去に受けた地震動による性能曲線と最大応答から完全弾塑性モデ

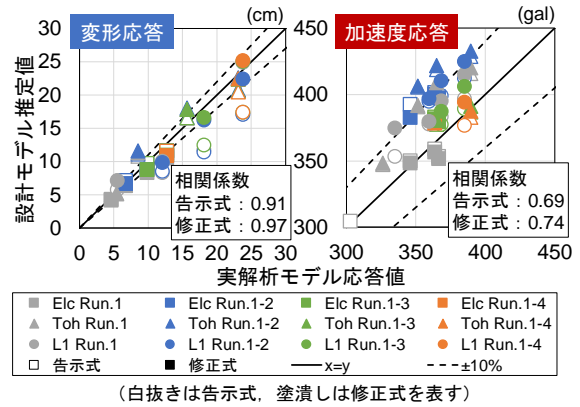


図-7 告示式と修正式による結果比較

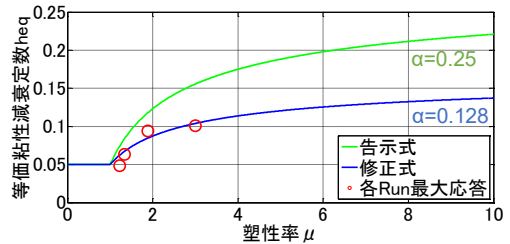


図-8 BCJ-L1 波、Run.1-4 による  $h_{eq}-\mu$  関係

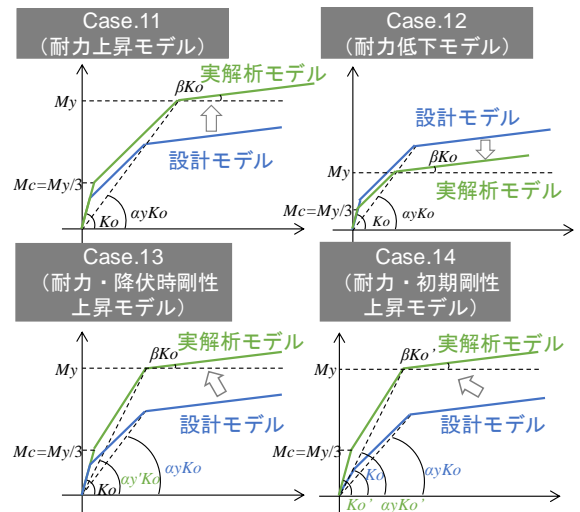


図-9 設計モデルと耐力・剛性の相違を想定した実解析モデルの復元力特性の設定

表-2 解析モデルパラメータの設定

	設計モデル	Case.11	Case.12	Case.13	Case.14
ベースシア係数 $C_B$	0.3	0.4	0.2	0.4	0.4
降伏時剛性低下率 $\alpha_y$	0.3	0.3	0.3	0.4	0.3
$C_B=0.2$ 時 最大層間変形角 (rad.)	1/500	1/500	1/500	1/500	1/1000

ルにより算出した塑性率（以下、 $\mu_p$ ）を、未経験領域塑性率とは既経験地震動に基づき拡張した設計モデルの修正性能曲線と将来の地震動による推定応答点から算出した塑性率（以下、 $\mu_f$ ）を表す。つまり、 $\mu_f/\mu_p$ は経験した地震動に対する将来の地震動による塑性率の離れ具合を意味する。また、推定精度は修正性能曲線による推定値を実解析モデルの応答値で除す形で与え

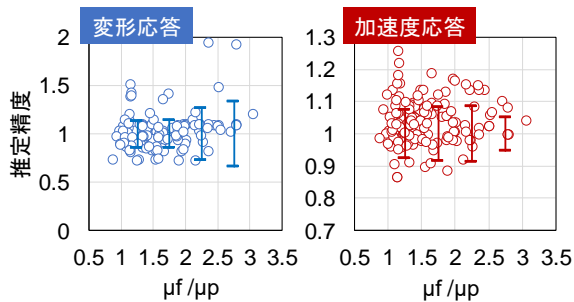


図-10 Case.11-14 における応答推定精度

た。変形応答の推定精度をみると、 $\mu_f/\mu_p$ が大きくなるほどばらつきが増大する傾向にある。一方、加速度応答については $\mu_f/\mu_p$ が大きくなるほどばらつきが多少減少する傾向にあるが、これは、変形が進展することで崩壊メカニズムが形成され、耐力が安定するためであると考えられる。

図-11, 12 に $\mu_f/\mu_p$ における推定精度の中央値、標準偏差を示す。ここで、本検討においては推定精度を中央値で評価しているが、これは図-13 (左図) の $\mu_f/\mu_p$ が 2.5 の範囲でみられるように推定精度の平均値が中央値と大きく乖離する点が生じてしまうためである。この主な原因としては、図-13 (右図) に示すように *Sa-Sd* 曲線の形状の影響により応答点を大きく過大評価してしまう場合があることによるものである。これについては減衰の推定精度のばらつきによる影響を大きく受けてしまうため、この影響の低減が今後の課題となる。変形、加速度応答ともに概ね応答を捉えられているが、変形応答に関しては $\mu_f/\mu_p$ が大きくなるほど応答を過大評価し、ばらつきも増大する傾向にある。

#### 4.2 崩壊形の相違による応答推定への影響の検討

現状までの性能曲線の補正方法は「解析の崩壊形が実際の崩壊形と同じである」という仮定の下に検討を行っているが、実際には解析結果と実被害が異なることは起こりうる。そこで本節では、設計モデルが全体崩壊形であると想定し、実建物も全体崩壊形である場合を比較対象として実建物が層崩壊形となる場合における推定精度への影響について検討する。ここで、想定した崩壊形を確実に形成するため柱の曲げ強度に対して乗じる係数を柱強度係数と定義し、図-14 に崩壊形の相違を想定した実解析モデルにおける柱強度係数のパラメータ設定を示す。層崩壊を想定する層の柱頭と柱脚の柱強度係数を低減することでそれぞれ異なる崩壊形となるよう設定した。

図-15, 16 に各 Case における推定精度の中央値、標準偏差を示す。等価一自由度系における変形、加速度応答ともに概ね推定可能ではあるが、Case.21~23 のように実解析モデルが層崩壊形になる場合の中央値と標

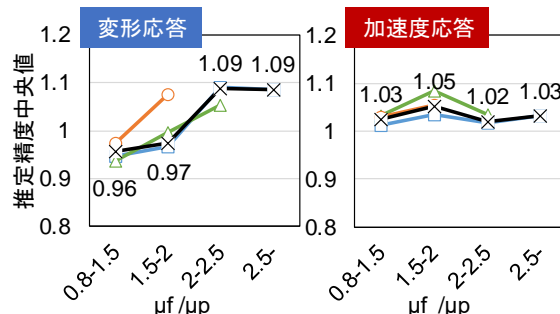


図-11 Case.11-14 における応答推定精度中央値

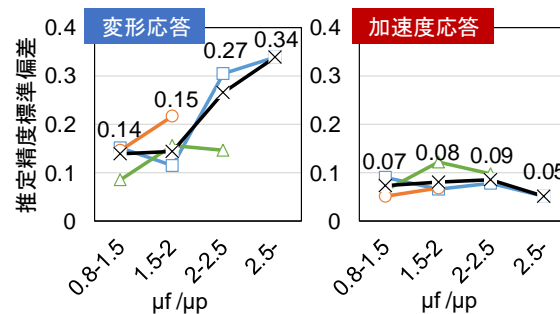


図-12 Case.11-14 における応答推定精度標準偏差

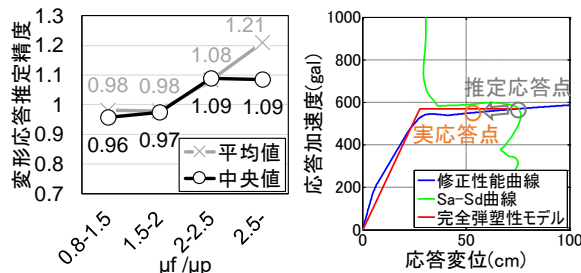


図-13 左図：Case.11-14 における変形応答推定精度  
右図：20 層、Elcentro 波、Run.1-3 による修正性能曲線を用いた Run.5 時応答推定の例

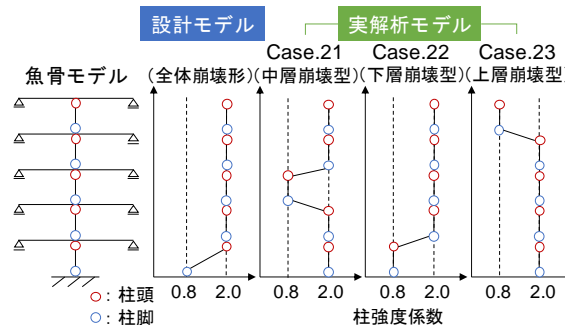


図-14 崩壊形 (柱強度係数) の設定

準偏差は、実解析モデルも全体崩壊形となる場合に比べ、応答を過大評価し、ばらつきが増大することで推定精度が低下する傾向にあることを示した。

#### 4.3 層数の変化による応答推定への影響の検討

層数の変化による周期の変化が及ぼす推定精度への影響についての検討として、2 層、5 層、10 層、20 層における応答推定を行う。なお、全 Case 共通で設計モ

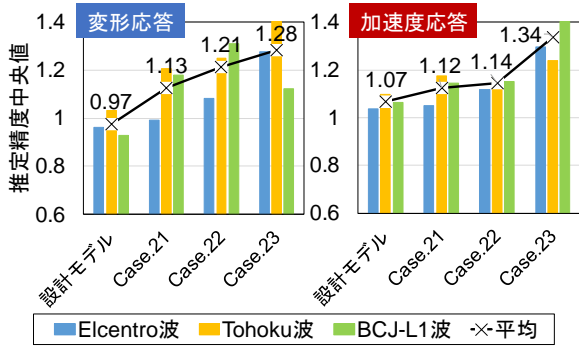


図-15 Case.21-23における応答推定精度中央値

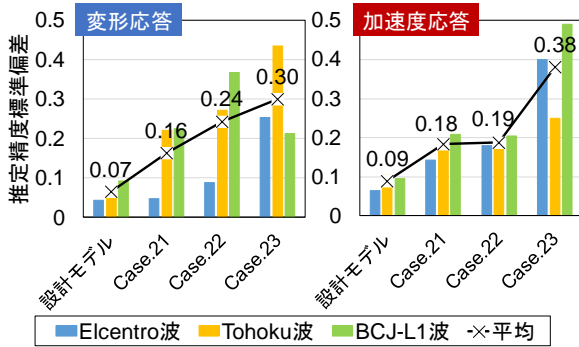


図-16 Case.21-23における応答推定精度標準偏差

モデルと実解析モデルの  $C_b$ ,  $\alpha_y$  を Case.13 と同様の相違として解析を行う。

図-17, 18 に各層数における推定精度の中央値, 標準偏差を示す。変形応答に関しては全層数, 全波において概ね応答を捉えられており, 標準偏差も 0.1 程度とばらつきが小さいが, 2層の Toh 波に限り, 応答, ばらつきともに過大となっている。これは図-19 に示すように応答推定において, 降伏点を過大評価していることに起因しており, 降伏点を過大評価することで推定塑性率が小さくなり, 減衰が小さくなったために応答が大きくなったものと考えられる。これは等価線形化法における応答推定の際に完全弾塑性モデルではなくバイリニアモデルに置換することにより推定精度が向上する可能性が考えられるが, この検討については今後の課題とする。また, 加速度応答については, 2層, 5層, 10層においては概ね応答を捉えることができているが, 20層については応答, ばらつきともに過大となっており, 高次モードの影響が一因として考えられる。

### 5. 等価一質点系応答から層レベルにおける応答推定への拡張

4章では等価一質点系における応答推定精度への影響を検討したが, 実際に建物の被災度を判定するには層レベルにおける応答が非常に重要となる。そこで, 特に層レベルの影響を顕著に受ける崩壊形の相違と層

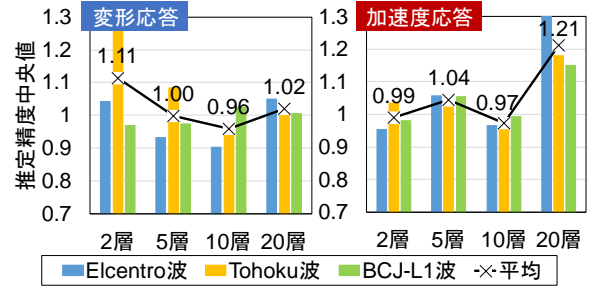


図-17 各層数における応答推定精度中央値

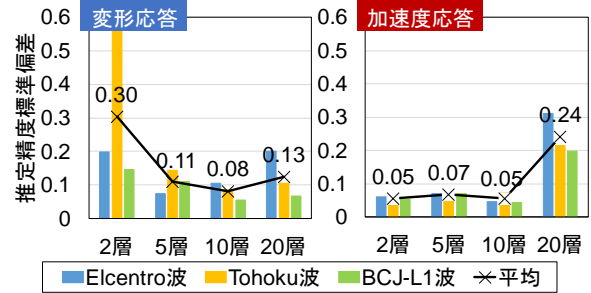


図-18 各層数における応答推定精度標準偏差

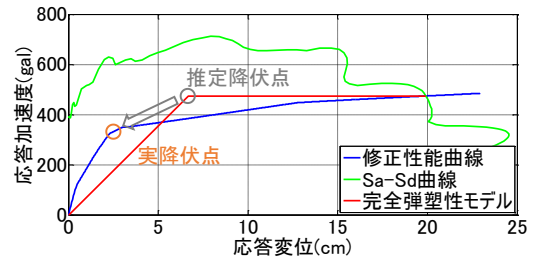


図-19 2層, Tohoku 波, Run.1 による修正性能曲線を用いた Run.5 時応答推定の例

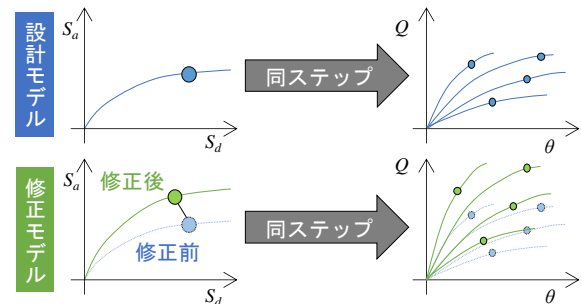


図-20 層レベル応答の推定方法

数の変化による影響について等価一質点系における応答を層レベルにおける応答に拡張し, 推定精度の検証を行う。層レベル応答の推定方法概要を図-20 に示す。通常層レベルの応答値を算出するには, 縮約前の荷重増分解析結果においても性能曲線で応答点が得られたステップの応答を用いて評価するが, 本検討においては設計モデルの性能曲線を比例倍した修正性能曲線を用いているため, 縮約前の荷重増分解析結果も同様に全層一様に比例倍した後の値を層レベルの応答として用いる。また, 層間変形角の推定誤差割合  $r_\theta$  を式(2)で

定義し、層レベルにおける推定精度の評価指標とする。

$$r_{\theta} = \left( \sum_{i=1}^l |(\theta_{rei} - \theta_{esi}) / \theta_{rei}| \right) / N_s \quad (2)$$

ここで、 $\theta_{rei}$  :  $i$  層における実解析モデル層間変形角応答値、 $\theta_{esi}$  :  $i$  層における修正性能曲線による層間変形角推定値、 $N_s$  : 層数

層せん断力の推定誤差割合についても式(2)と同様にして算出することで推定精度の評価指標とする。

図-21、22 に実解析モデルが全体崩壊形となる場合と比較対象とし、実解析モデルが層崩壊形となる場合を想定したパラメータによる層レベルの応答の推定誤差割合のグラフを示す。層レベルの応答の推定精度は層間変形角と層せん断力ともに、設計モデルと崩壊形が異なることで推定誤差割合が増大し、特に層間変形角において実応答と推定応答の差が大きくなる傾向がみられた。これにより、設計モデルと実建物の崩壊形が異なり、既報<sup>2)</sup>による損傷推定手法を層レベルで適用する場合については層崩壊形を検知し別途手法を適用する必要があると考えられる。

また、図-23 に層数の変化による推定誤差割合のグラフを示す。グラフから層数が大きくなるにつれて推定誤差割合が増大する結果となり、建物が高層になる場合には高次モードの影響を考慮する等さらなる検討の必要性があることが示された。

## 6. まとめ

設計モデルから実建物を模擬した実解析モデルの応答を推定するシミュレーション解析を行うことで、既報<sup>2)</sup>による応答推定手法に関して以下の知見を得た。

- 1) 経験した地震動から等価粘性減衰定数評価式を逐次設定することにより応答を推定する手法を提案し、本修正式を使用した推定が告示式を使用した推定に比べ有用な場合があることを示した。
- 2) 設計モデルにおいて、実建物と耐力・剛性が異なる場合、将来の地震動による塑性率が既に経験した地震動に対して大きくなるほど変形応答の推定値を過大評価し、ばらつきも増大する傾向にあることを示した。
- 3) 設計モデルにおいて、実建物と崩壊形が異なる場合、等価一質点系応答についてはある程度推定が可能であるが、層レベル応答の推定値については設計モデルと大きな差異を生じ、層崩壊の検知等手法拡張の必要性があることを示した。
- 4) 層レベルの応答の推定精度については、層数が増加するにつれ、推定精度が低下する傾向を示した。

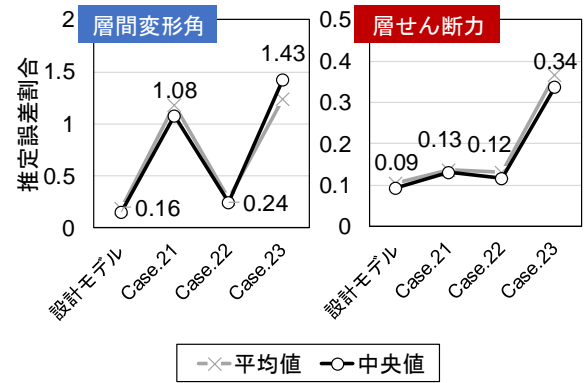


図-21 Case.21-23における推定誤差割合

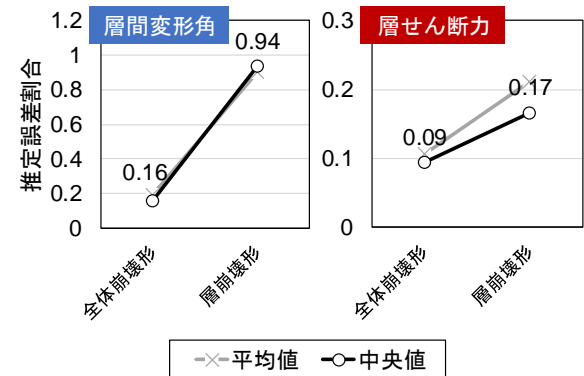


図-22 各崩壊形における推定誤差割合

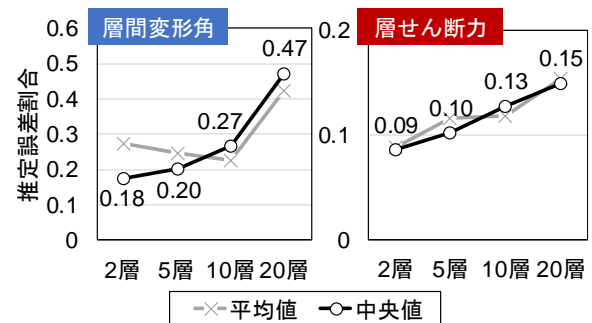


図-23 各層数における推定誤差割合

## 参考文献

- 1) 梨本優也, 前田匡樹 ほか: 縮小 20 層 RC 造架構の震動実験を用いた損傷推定手法の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No. 2, pp. 259-264, 2014.7
- 2) 梨本優也, 前田匡樹 ほか: 中小地震観測データを用いた RC 造建物の即時損傷推定と耐震性能評価手法の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.2, pp.679-684, 2015.7
- 3) 菊池友介, 梨本優也 ほか: 高層 RC 造建物における少数加速度センサによる非観測層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, vol.38, No.2, 2016.7