

論文 偏心鉄筋コンクリート構造物の動的外力分布による応答推定手法

壁谷澤 寿一*1・壁谷澤 寿海*2

要旨：偏心構造物の応答は、並進変形と層回転変形の重ね合わせによって理解できるが、2次モードの影響が大きい場合、1自由度等価線形化による非線形応答の推定は難しくなる。この影響の大小は各次モードの有効質量比によって判定可能であるが、本研究では有効質量比が動的および静的載荷時にどのように推移しているかを検討し、構造物の条件に基づく一般的な傾向があることを明らかにした。この性質を利用して、動的応答モードに基づいた新しい等価線形手法を提案し、その推定精度を既往の手法による場合と比較した。

キーワード：等価線形応答, 有効質量比, モード解析, MPA, NPA

1. はじめに

偏心構造物の応答では構造物の形状によって最低でも並進が支配的なモード形と回転が支配的なモード形の2つのモード形を考慮する必要がある。いずれかのモード形が支配的であれば1次モードによる縮約でも非線形地震応答はある程度推定可能であるが、2次モードも支配的になる場合は精度に限界がある。そこで例えば限界耐力設計法では構造・平面上の制約を設けて、このような場合は適用範囲外としている。本研究では、多層偏心RC構造物の応答を推定する手法として提唱されている Nonlinear Pushover Analysis と骨組解析した動的応答結果を比較するとともに、上記の範囲外にも適用可能な等価線形化手法を提案してその妥当性を検討する。

2. 既往の応答推定手法

一般的に等価線形化手法では、等価減衰 h_e と等価周期 T_e を有する縮約1自由度系モデルの応答値を用いて構造物の非線形応答の推定する。1自由度等価線形化手法において高次モードの影響を考慮する手法として主に以下の2つが挙げられる。

1) Modal Pushover Analysis (MPA)

2) Nonlinear Pushover Analysis (NPA)

1)は各モード外力形で静的漸増載荷解析し、各モードについて等価減衰と等価周期から得られる応答値を刺激係数で重み付けして足し合わせる手法である。これに対して2)は各モードの外力分布形に刺激係数を重み付けして足し合わせ((1)(2)式)、この1+2次モード外力形{F}で静的漸増載荷解析し、その等価減衰と等価周期から応答推定値を求める手法である。多層偏心RC構造物の変形も同様にNPAによって応答を推定する手法が提唱されている(例えば1)。

$$\{F\} = [M] \sum_{i=1}^2 \beta_i \{u\}_i = [M] \sum_{i=1}^2 \beta_i (\{\phi_{dxi}\} \{\phi_{\theta i}\})^T \quad (1)$$

$$\beta_i = \frac{(\{\phi_{dxi}\} \{\phi_{\theta i}\}) [M] \{\alpha\}}{(\{\phi_{dxi}\} \{\phi_{\theta i}\}) [M] (\{\phi_{dxi}\} \{\phi_{\theta i}\})^T} \quad (2)$$

$\{\phi_{dxi}\}$: 第*i*次モードのX方向並進変形成分

$\{\phi_{\theta i}\}$: 第*i*次モードの層回転変形成分

β_i : 第*i*次モードの刺激係数

[M]: 質量マトリクス

$\{\alpha\}:(1, \dots, 0, \dots)^T$: 加速度作用方向ベクトル

3. 有効質量比

一般に第*i*次モードの応答に与える影響の大きさを表す指標として有効質量比 M_i が用いられ

*1 東京大学 工学系研究科建築学専攻 (正会員)

*2 東京大学 地震研究所教授 (正会員)

る。第 i 次有効質量比は式 (3) の形で表される値であり、各モード縮約系にかかる加速度あたりの外力の大きさを示している。

$$M_i = (\beta_i \{u\}_i [M] \{\alpha\}) / M \quad (3)$$

M : 構造物の総質量

M_i : i 次有効質量比

偏心構造物の線形応答で一次モードの挙動がほぼ支配的になる一次有効質量比の範囲が検討されており²⁾、これにもとづいて、限界耐力設計法の多層構造物での適用範囲は式 (3) による 1 次有効質量比 M_1 が 0.75 以上の場合に限定されている³⁾。また、非線形応答では偏心構造物の一次有効質量比が増加し、非線形化が進むにつれて一次モードが顕著になるが、単層一軸捩れ構造物を対象にした既往の研究⁴⁾では、有効質量比 0.6 以上の場合には 1 次モード外力とモード直和外力の静的漸増載荷解析の併用による応答評価が可能であるとしている。

4. 解析方法

本研究では偏心 RC 構造物の部材レベルの非線形地震応答解析を行い、動的な捩れ応答の支配的なモード形について有効質量比を指標にして検討する。また、NPA を基本にした静的漸増解析によってこのモード形を特定することを試みる。

非線形静的漸増載荷解析および地震応答解析は CANNY99⁵⁾を用いた。柱梁は One - Component Model を用いてモデル化し、耐震壁は TVLE モデル⁶⁾を用いた。各部材の強度および剛性低下率は日本建築学会に基づく算定式⁷⁾を用いた。なお、筆者らは 6 層偏心鉄筋コンクリート建物の振動実験を行い、実験結果および実験の解析結果⁸⁾を報告しているが、本解析手法は柱が限界変形に達して耐力劣化が生じる直前の大変形域まで精度よく応答を模擬しうることを検証している。入力地震動は 1995 年兵庫県南部地震神戸海洋気象台 (KOBE)、1985 年チリ地震 (CHILE) の 2 波と日本建築センターの模擬波 (BCJL2) を係数倍して用いた。

5. 動的応答の定モード形抽出法

以下の検討では、動的応答時の支配的なモード形を応答波形の時刻歴 $f(t)$ に対して一定のモード形 $\{X\}$ と時刻関数 $q(t)$ によって近似する ((4) 式)。質量マトリックス $[m]$ に関して直交性をもつ基準モードとして (5) (6) (7) 式によって抽出することができる⁹⁾。基準モード形は、(5) 式による時刻歴応答との差の $[m]$ に関する 2 乗累積和 E が最小となるモードとすると、モード形 $\{X\}$ は式 (7) に示される固有値問題の最大固有値 λ に対応する固有ベクトル $\{u\}_{1d}$ (1 次) として抽出可能になる。また、2 次以上の基準モードも応答時刻歴から (1 次) 基準モードを取り除いた成分に対して同様の手順によって求める。

$$f(t) \sim \{X\} q(t) \quad (4)$$

$$E = \int_{t_2}^{t_1} [f(t) - \{X\} q(t)]^T [m] [f(t) - \{X\} q(t)] dt \quad (5)$$

$$[R] = \int_{t_2}^{t_1} \{f(t)\} \{f(t)\}^T dt \quad (6)$$

$$([m][R][m]) \{u\}_{1d} = \lambda_1 [m] \{u\}_{1d} \quad (7)$$

6. 解析対象試験体

解析対象は 1/3 スケール 6 層 RC 一軸偏心 RC 構造物 12 種類とした。平面は図 - 1 に示す 6 種類で、壁厚を 2 種類 (80mm の Sp a シリーズおよび 40mm の Sp b シリーズ) として、耐震壁構面の剛性、並進変形と回転変形の割合を変化させている。入力方向は X 方向 1 方向である。表 - 1 に部材断面リストを示す。各部材断面、各階重量は震動実験の解析と同様に定めた。

表 - 1 解析対象試験体の部材断面リスト

| 柱 | B × D | 200 × 200(mm) | 梁 | B × D | 150 × 250(mm) |
|---|-------|---------------|----|-------|---------------|
| | 主筋 | 12-D10 | | 主筋 | 2-D10 |
| | 横補強筋 | D4@50 | | 横補強筋 | D6@75 |
| | | | 壁梁 | B × D | 240 × 250(mm) |
| 壁 | 壁厚 | 80 or 40 (mm) | | 主筋 | 4-D10 |
| | 縦横筋 | D6@10 ダブル | | 横補強筋 | D6@75 |

各構造物の偏心に関わる諸元の計算値を表 - 2 に示す。本稿ではこれらの解析対象試験体の

中で、1次有効質量比の小さな試験体、すなわち、Sp4a, 4b, 5a, 5b について議論する。これらは1次モードのみによる応答推定が難しい解析対象であり、その他の場合の捩れ応答は1次モードを主体にして理解しやすい傾向があり、同様の結果が得られることを確認している。

表-2 解析対象試験体の諸元

| | T1(s) | T2(s) | M1 | M2 | Re1 | Re2 | BS 係数 |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Sp1a | 0.195 | 0.076 | 0.648 | 0.066 | 0.951 | 0.307 | 0.29 |
| Sp1b | 0.197 | 0.084 | 0.664 | 0.080 | 0.577 | 0.220 | 0.31 |
| Sp2a | 0.158 | 0.113 | 0.627 | 0.106 | 0.316 | 0.097 | 0.42 |
| Sp2b | 0.168 | 0.117 | 0.706 | 0.055 | 0.176 | 0.066 | 0.47 |
| Sp3a | 0.134 | 0.087 | 0.608 | 0.107 | 0.352 | 0.121 | 0.46 |
| Sp3b | 0.147 | 0.097 | 0.641 | 0.099 | 0.261 | 0.093 | 0.46 |
| Sp4a | 0.185 | 0.131 | 0.365 | 0.366 | 0.384 | 0.097 | 0.14 |
| Sp4b | 0.188 | 0.142 | 0.450 | 0.304 | 0.215 | 0.066 | 0.19 |
| Sp5a | 0.178 | 0.109 | 0.261 | 0.503 | 0.396 | 0.134 | 0.15 |
| Sp5b | 0.179 | 0.128 | 0.302 | 0.491 | 0.230 | 0.095 | 0.16 |
| Sp6a | 0.115 | 0.078 | 0.039 | 0.699 | 0.208 | 0.058 | 1.02 |
| Sp6b | 0.126 | 0.091 | 0.048 | 0.628 | 0.148 | 0.049 | 1.35 |

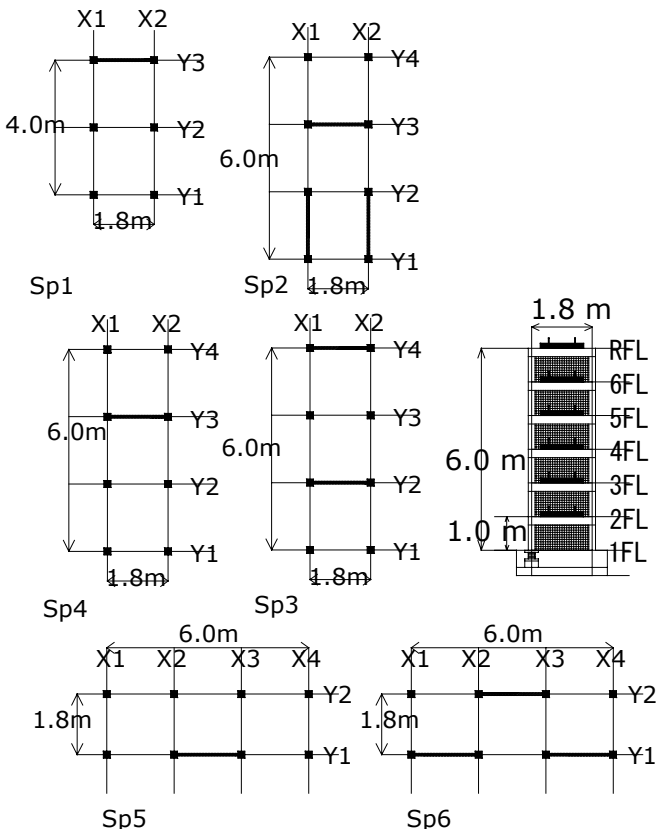


図-1 解析対象試験体図

7. 解析結果

構造物の塑性化の程度が異なる場合の捩れ応答を一般的に検討するために、原波の定数倍（BCJL2は0.5倍刻み、CHILE, KOBEは0.25倍刻み）で入力地震動の大きさを変化させて解析し、結果を整理した。静的漸増解析では異なる2つの外力モード形（1次；1次と2次の重ね合せ）による結果で比較検討した。

(4)式から(7)式により動的解析結果から抽出されたモード形の1次（基準）モード有効質量比 M_1 とこのモード形で縮約した最大応答変形との関係を図-2に破線と△, □, ○で示した。同様に上記の異なる2つの外力モードに対する静的解析結果で得られた変形モードに対応する有効質量比の推移を実線と点線で示した。

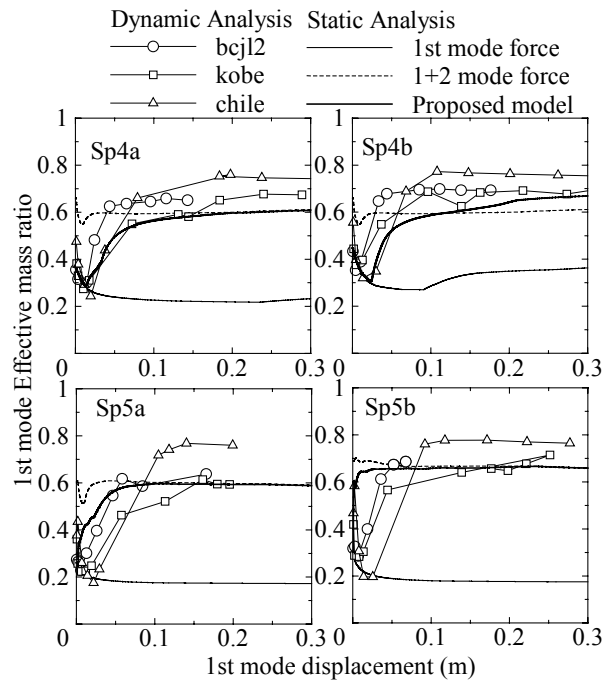


図-2 1次有効質量比の推移

動的応答の1次有効質量比は概ね2つの外力モード形によるNPAの有効質量比の中間にあり、1次モード外力から徐々に重ね合わせの外力による解析値に漸近し、ややこれを上回る値で定常化している。これらの傾向はいずれの試験体でも共通しているが、弾性1次モード形の有効質量比が大きいSp1a, 1b, 2a, 2b, 3a, 3bなどでは1次モードと1+2次モード外力形による静的解

析結果の差は小さく、外力モード形はあまり影響しない。

以上の結果は試験体が塑性化すると動的応答から抽出された変形モードが弾性1次モードから1+2次モードに近い形状に遷移する一般的な傾向を示している。また、遷移する変形区間は地震波によらずほぼ一定である。

動的応答において1次有効質量比が変化し始める変形は代表点の荷重変形関係における降伏変形付近であり、これは非線形化によってモード形の直交性が崩れるためであると考えられる。これに対して大きな非線形領域では、動的応答の変形モードは弾性1+2次モード形を重ねあわせた外力モード形に対応した分布になっている。これは弾性2次モードに対応する成分が1次モードと同じフェイズのモード形として1次モードに重なって抽出されていると推定される。

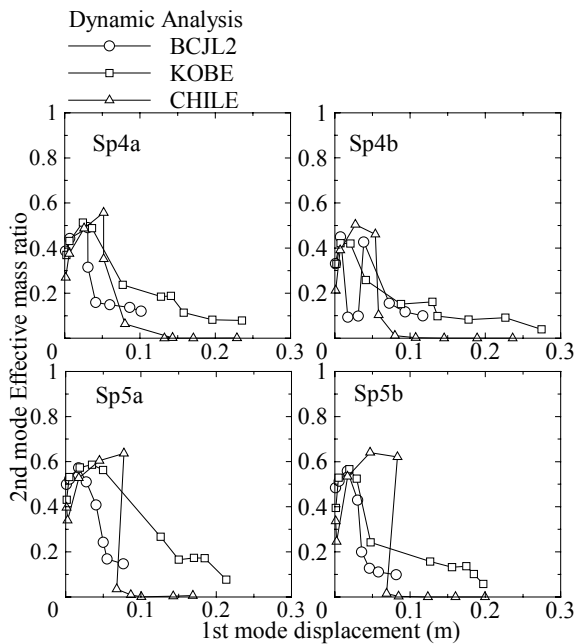


図-3 2次有効質量比の推移

同様の方法で動的解析結果から抽出された2次モード成分に対応する有効質量比 M_2 の最大応答変形レベル（1次）に対する推移を図-3に示す。2次の有効質量比 M_2 は徐々に減少し、0に漸近している。すなわち、動的な応答は抽出された1次基準モード外力で縮約した系で推定が可能になることを示唆している。

8. 提案する応答推定手法

以上の非線形振れ応答を静的漸増解析（MPA, NPA）を基本にして推定する方法を試みる。通常静的解析では一定の外力分布形を仮定するが、前述したように動的解析から抽出した1次モードは変形分布も外力分布も応答変形レベルに依存して一定ではない。したがって、どの変形レベルにも適用可能な一義的な外力分布を特定することは困難である。

動的応答時の有効質量比の遷移から抽出された1次変形の大きさに応じて動的応答のモード形は3つのステージに区分することができる。第1段階は1次変形が原点から降伏点変形までの変形となる場合である。動的な1次外力分布は弾性1次外力分布形と同値となり、応答変形は1次モードと2次モードそれぞれの変形を重ね合わせたものになり、MPAが適用可能である。第2段階は1次変形が降伏点からモードの応答中心点が定常化する変形までの変形となる場合である。動的1次外力分布は静的解析時の1次モードから1+2次モード外力形に漸近する。応答変形はその動的1次外力から静的解析によって求まる1次変形に降伏後徐々に小さくなる2次モード外力形による2次変形を加えた値となる。第3段階は1次変形がモードの応答中心点が定常化する変形以上の変形となる場合である。動的1次外力分布は1+2次モード外力形となり変形は1つのモードのみで縮約して推定することができる（NPA）。

第3段階の一定モードになる変形レベルは静的解析のみで以下のように近似する。弾性モード形を重ね合わせた固定外力形による静的解析の結果、変形の増加に対して変形モードが定モードを示し始める変形とする。これは、静的漸増载荷による変形モードの最上階応答中心点（見かけ上変形モードの水平変形成分が0となるY座標位置）の推移が変形に対して一定の傾きで変化する（定常化する）変形として算定する。

以上の方法を基本にして、静的解析に基づいて非線形応答を推定する手法を提案し、既往の

推定手法と解析結果を比較し、推定精度を検討する。図-4に提案する応答推定手法のフロー図を示す。まず1次モード外力形と重ね合わせ外力形によって変形モードの応答中心が定常化する変形における外力間で線形補間する外力によって1次変形を求める。1次変形の大小に応じて、第1段階ではMPAによって、第3段階ではNPAによって非線形応答を推定する。第2段階において2次モード変形は弾性範囲に留まるものとする。応答推定値は1次モード外力による1次変形に1次変形に応じて線形的に小さくなる2次変形を加えた値とする。

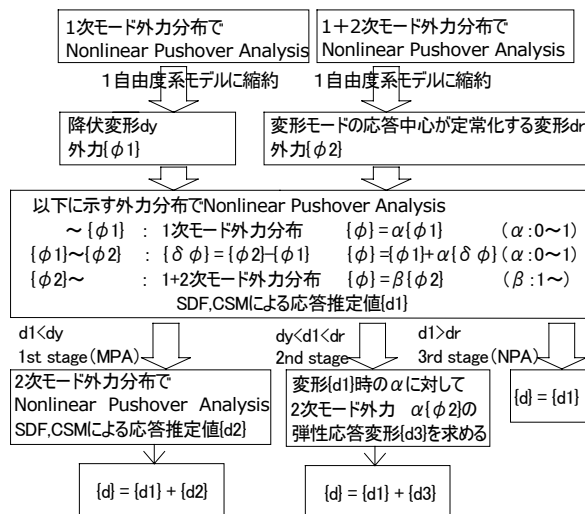


図-4 提案する推定手法のフロー図

9. 有効質量比および応答中心の比較

提案した外力で静的解析を行った場合の1次有効質量比の推移を図-2の中に太線に示した。提案する外力モードを用いることによって静的解析の1次有効質量比の推移は動的抽出モード形の値に概ね対応する。ただし、試験体 Sp6a,6b など、応答中心点が定常化する変形を過大評価したために有効質量比の推移が十分な精度で一致しない場合もあり、今後改良の余地がある。

動的解析および異なる3つの外力モード形による静的解析(1次;1次と2次の重ね合わせ;提案した外力)を行った場合の変形モードについて最上階の並進変形成分に対する回転変形成分の比(重心と応答中心間距離の逆数)の推移を

図-5に示す。提案する外力による静的解析の値は動的抽出モード形の値の推移と概ね対応している。すなわち、提案した外力による静的解析は有効質量比という指標だけでなく、応答中心という指標でも精度よく再現している。

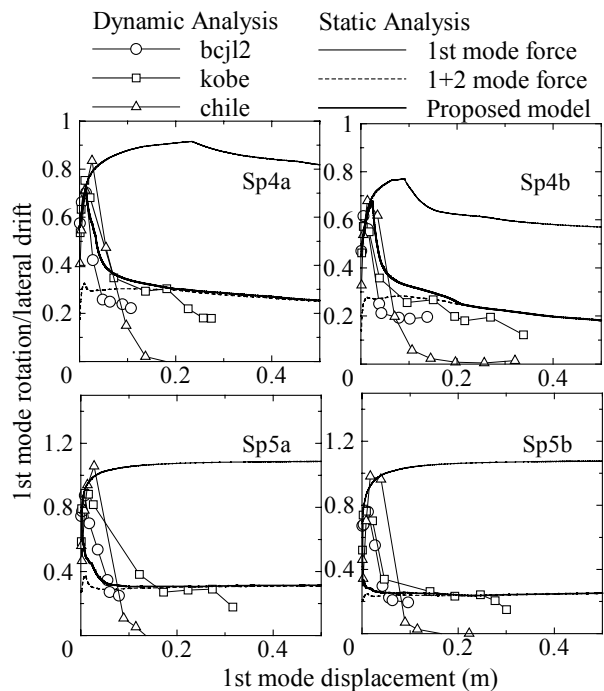


図-5 最上階の応答中心の推移

10. 最大応答値の比較

最上階および1層のY1構面についてX方向の最大応答変形について、非線形地震応答解析結果と提案した等価線形応答による推定値を比較して図-6に示す。等価線形応答における非定常応答を考慮した低減係数αは0.8とした。横軸には非線形応答の最大応答値(1次モード成分)とし、縦軸は推定誤差(応答推定値の非線形応答解析値に対する比)である。

推定値はMPAを用いる範囲では2次モード変形を加えた値・引いた値の2種類をプロットした。どの試験体についても最上階、1階ともに最大水平変形角が1/33以上の非線形応答は既往の等価線形化手法(NPA)を用いることで十分な精度で推定可能であった。また、弾性1次モード形の有効質量比が大きいSp1a, 1b, 2a, 2b, 3a, 3bでは1つのモード変形が支配的になるため対象とする変形範囲によらず精度の高い結果が得ら

れている。図の解析結果は弾性モード形の 1 次有効質量比による値が小さくても応答変形が大きな範囲では既往の等価線形化手法を用いて非線形応答を推定可能であることを示唆している。既往の手法と比較して提案する推定手法は、最大水平変形角が 1/33 以下の範囲で精度が向上しているものの、非線形応答値に比べると小さい値となった。これは 2 次モード変形および 1 次との重ね合わせが依然過少評価になっていることが原因であると考えられ、改良の余地がある。

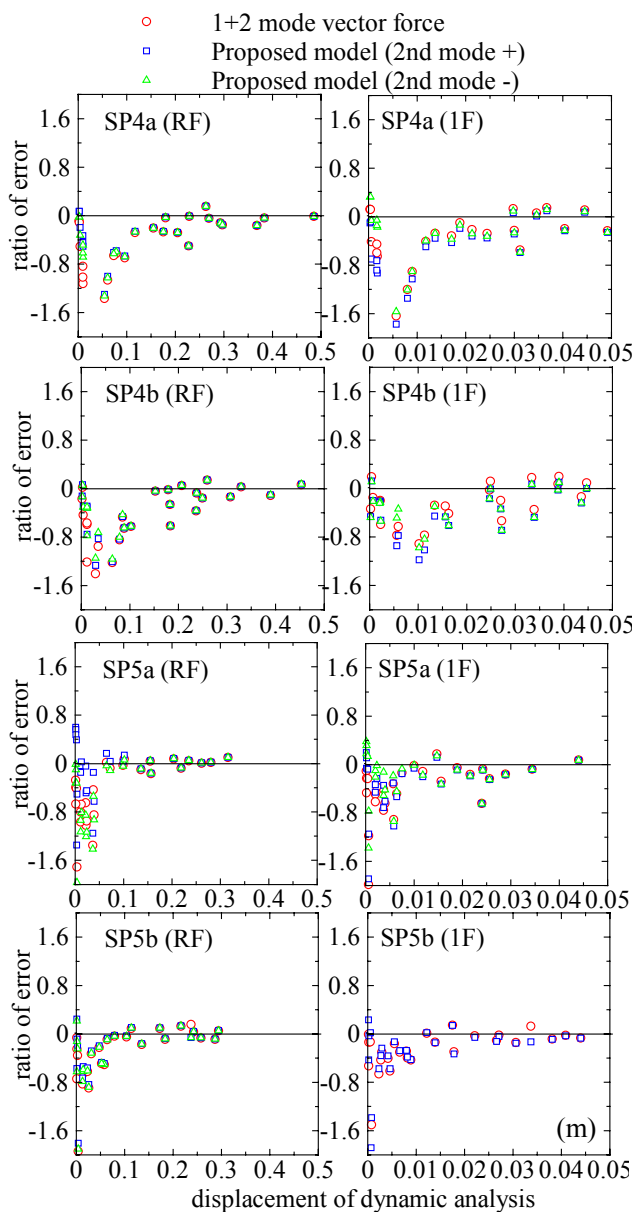


図-6 最大応答推定誤差の推移

以上の推定では、応答変形レベルに応じて推移する振れモードの特徴にもとづいて、静的漸

増解析によってモードを近似特定する方法を示し、定モード縮約系と等価線形化による推定との精度を検証した。しかし、非線形時刻歴解析を実用的に前提にする場合には、簡易推定手法としての意義は薄れ、むしろ個別解析による非線形振れ応答の性状を一般的に理解するために有意義になると考えられる。

11. 結論

本研究では偏心 RC 多層構造物において動的応答モードの 1 次有効質量比 M_1 が弾性 1 次モードの値から 1,2 次モード重ねあわせ外力形による NPA 値に漸近する一般的な傾向があることを明らかにした。この性質を利用して、NPA,MPA を組み合わせた動的応答に基づくモード形で非線形応答を推定する手法を提案した。構造物の最大変形と応答推定値を比較した結果、弾性モード形の 1 次有効質量比による値が小さくても、最大水平変形角が 1/33 以上の大きな変形では NPA によって非線形応答を非常に高い精度で推定可能であった。また提案した手法によって既往の手法に比べて降伏変形前後で比較的精度の高い推定結果が得られた。

参考文献

- 1) Anil K.Chopra,Rakesh K.Goel:Modal Pushover Analysis symmetric and unsymmetric plan buildings, International Workshop on PBSD Concepts & Implementation, 2004.7
- 2) 大網浩一, 村上雅也:単層一軸偏心線形系の地震応答における動的ねじれ効果の指標, 日本建築学会構造系論文報告集, 1999. 7
- 3) 改正建築基準法法令集, 日本建築センター, 2000. 7
- 4) 藤井賢志:多層一軸偏心建物の非線形地震応答評価手法に関する研究, 博士論文, 2002. 12.
- 5) 李康寧, 壁谷澤寿海:鉄筋コンクリート造立体骨組の弾塑性地震応答に関する研究, 博士論文, 1988. 12
- 6) 壁谷澤寿海, 塩原等, 小谷俊介, 青山博之:鉄筋コンクリート造実大 7 層試験体の耐震性に関する研究 (その 3) 擬似動的解析,第 6 回日本地震工学シンポジウム講演集,pp1161-1168,1982.12
- 7) 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説日本建築学会編, 1999. 7
- 8) 壁谷澤寿一, 村瀬正樹, 壁谷澤寿海, 松森泰造:異なる地震動を受ける偏心鉄筋コンクリート壁フレーム構造の震動実験, コンクリート工学年次論文報告集, 第 26 巻, No. 2, pp1159-1164, 2004. 7
- 9) 渡辺明紀, 壁谷澤寿海:鉄筋コンクリート純フレーム構造の地震応答変形量に関する研究, コンクリート工学年次論文報, No. 2021, pp137-142, 1990. 12. 2