偏心鉄筋コンクリート構造物の非線形変形モードに基づく地震応答推定手法

A METHOD OF ESTIMATING EARTHQUAKE RESPONSES OF
ASYMMETRIC REINFORCED CONCRETE STRUCTURES BASED
ON NONLINEAR DEFORMATION MODES

壁谷澤 寿一*, 壁谷澤 寿海**

Toshikazu KABEYASAWA and Toshimi KABEYASAWA

The paper presents a method of estimating earthquake responses of asymmetric reinforced concrete structures based on nonlinear deformation modes. Shaking table tests of one-third scale six-story eccentric reinforced concrete wall-frame specimens were conducted and analyzed with a nonlinear three-dimensional frame model. A fair correlation was observed between the test and the frame analysis. Several wall-frames were designed by varying the plan, location and stiffness of the walls from the specimen to simulate general cases of torsional responses, where the 2nd mode is dominant as well. The intensities of the earthquake motions for the simulation were also varied to simulate also wide range of structural responses from elastic to inelastic deformations. The dominant modes were derived from the nonlinear responses, in which general characteristics were discussed in terms of effective mass ratio. The value approaches a constant when the inelastic response is large. The constant could be derived from nonlinear pushover analysis considering the first mode and the second mode in the assumed load vectors. A new method of estimating nonlinear responses based on the deformation modes in the dynamic responses are proposed based on the general characteristics. The estimates are compared with the results of nonlinear dynamic frame analysis, where a better correlation was observed than those by past simple methods generally from elastic to inelastic responses.

Keywords : *Eccentric frames, Reinforced concrete, Shaking table test, Equivalent linearization, Nonlinear pushover analysis, Effective mass ratio, Mode superposition*

偏心構造物, 鉄筋コンクリート, 震動台実験, 等価線形化, 非線形漸増載荷解析, 有効質量比, モード重合

1. 研究目的

2000年6月に施行された建築基準法における限界耐力計算では設計地震動の線形応答スペクトルから等価線形系によって非線形地震応答を推定する方法が示されている。構造物の応答は等価1自由度系に縮約して代表変位の応答を求め、1次モードを基本にした静的漸増解析との併用により各部材の最大応答値を評価している。しかしながら、一般に偏心構造物の応答では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。構造物の形状によっていずれかのモード形が十分に支配的であれば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、限界耐力計算では偏心構造物への適用には制限が設けられている。

本研究では、多層偏心鉄筋コンクリート(RC)構造物を対象にして非線形地震偏心応答における支配的な変形モードの性状を明らかにするとともに、縮約系と等価線形化を基本にした応答推定手法を提案して検証する。解析で用いる骨組レベルの非線形地震応答解析手法は1/3スケール6層偏心RC構造物の震動実験結果を解析する

ことによって妥当性を検証している。偏心構造物のパラメータは耐震壁の配置や剛性によって変化させるが、予備解析に基づいて支配的なモード形および応答の比率が広い範囲で異なる組み合わせを選択的に想定して設定している。応答を推定する手法としては既往の手法を基本にしているが、変形モードの性質に基づいて、より一般性のある等価線形化手法を提案している。本研究の目的は、非線形偏心応答の一般的な性状を抽出して等価線形化による推定などに応用することであるが、長期的には耐震設計基準や耐震診断基準における割増し規定などの一般性を理論的に吟味することでもある。

2. 既往の研究と解析手法

2.1 NPAとMPA

偏心構造物の応答では1次モードのみが支配的な特殊な場合を除いて最低でも1次と2次のモードを考慮する必要がある。1次モード以外の影響も考慮して多層偏心RC骨組構造物非線形地震応答変形を簡略に推定可能な方法として、2つ以上のモードを重ね合わせた外力分布を設定して非線形漸増解析(Nonlinear Pushover Anal-

* 東京大学工学系研究科建築学専攻
** 東京大学地震研究所 教授

Graduate Student, Dept. of Architecture, Fac. of Engineering, University of Tokyo
Prof., Earthquake Research Institute, University of Tokyo

ysis, NPA)を行い、縮約1自由度形による応答と非線形漸増解析による変形分布によって応答を推定する手法^{例2)ば1)}が提唱されている。第*i*次モードの固有変形モード形を $\{u\}_i = \{\phi_{dxi}, \phi_{dyi}, \phi_{oi}\}^T$ 、刺激係数を β_i とし、Nonlinear Pushover Analysisの外力ベクトル $\{F\}$ を以下のように定義している。

$$\{F\} = [M] \sum_i \beta_i \{u\}_i = [M] \sum_i \beta_i \{\phi_{dxi}, \phi_{dyi}, \phi_{oi}\}^T \quad (1)$$

$$\beta_i = \frac{\{\phi_{dxi} \phi_{dyi} \phi_{oi}\} [M] \{a\}}{\{\phi_{dxi} \phi_{dyi} \phi_{oi}\} [M] \{\phi_{dxi} \phi_{dyi} \phi_{oi}\}^T} \quad (2)$$

ϕ_{dxi} : 第*i*次モードのX方向並進変形成分

ϕ_{dyi} : 第*i*次モードのY方向並進変形成分

ϕ_{oi} : 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

$\{a\}$: $\{1, \dots, 1, \dots, 0, \dots\}^T$: 入力加速度作用方向ベクトル

いくつかの解析対象ではこの手法により非線形地震応答の最大値が概ね推定可能になることが経験的に検証されている。偏心構造物の実際の地震応答は、弾性あるいは大きく塑性化しない範囲であれば並進および回転のモードがそれぞれ等価な固有周期で独立して振動している。しかし、この手法では静的載荷において2つのモード外力を累加することで2つのモード振動を1つのモード形に置き換えている。すなわち、本手法は暗黙に1つの位相で非線形応答を表現できるという前提に基づいた手法になっているが、このような応答性状が明快に分析された上で適用されているわけではない。

2次モード変形の影響が無視できない偏心構造物の場合は、非線形地震応答解析による最大応答値とNPAを用いた応答推定値の誤差は応答の大小に応じて誤差の大きさが明らかに異なる傾向が現れる。この誤差の要因も十分に分析されていないので検討する必要があるが、誤差要因が等価線形化の問題でなく、偏心応答に依存する問題であるならば、この推定手法に対して適切な適用範囲を示すとともに、適用範囲外では異なる手法を示す必要がある。

一方、上記のNPAは経験的な応答性状にもとづく手法であるのに対して、あくまで弾性応答理論にもとづいて、2つのモード形を考慮した等価線形化手法として挙げられるのがModal Pushover Analysis (MPA)²⁾である。この手法は独立した(弾性)モード形に対して非線形漸増載荷解析から各モード推定応答値を求める。その変形の重ね合わせた値を応答推定値とする。この手法は独立したモード形の合成であるので、当然ながら弾性応答およびびり割れ後降伏前後の応答など、塑性化の程度が小さい場合については時刻歴レベルでも応答推定の精度は高い。また、最大応答に関してはSRSS法などを用いることで各次応答モードの同時性を考慮して最大応答を近似化することも可能である。しかし、大幅に塑性化したレベルの応答では2つの直交する固有モードが弾性時と同様に独立して振動すると仮定する根拠は自明ではなく、検証されたわけでもない。実際、この手法による推定値は塑性が進行すると徐々に応答推定精度は低くなるのが一般的な傾向として指摘されている²⁾。

2.2 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は有効質量比 M_i が用いられる。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。

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

M : 構造物の総質量

M_i : *i*次有効質量比

既往の研究³⁾から単層一軸振れ構造物の固有モードにおいて等価質量比が0.5より大きい場合、重心位置を挟んだ位置にある2構面の加震方向の並進変形成分は異符号となり、0.5より小さい場合、同符号となることが知られている。

この値は多自由度系(多層構造物)のモード振動が応答に与える影響を表す指標としても用いられ、文献⁴⁾では限界耐力設計法⁵⁾は層せん断力、変形成分のモード相関を検討し、1次モードが十分卓越する場合として1次有効質量比 M_1 が0.75以上の水平多層構造物に適用範囲を制限するとしている。

偏心構造物でも1次有効質量比によって1次モードのみで挙動が概ね表せる範囲が決定するとされており、単層振れ構造物の応答においても同様の検討が行われている⁶⁾。弾力半径比 J が大きい構造物は弾性時にも1次モードが応答に対して支配的であり、塑性化に応じて1次有効質量比が増大するため、1次有効質量比 M_1 が0.8以上になる場合には、応答が1次モード形で概ね推定できることを示している。

以上の既往の研究から、有効質量比は各モードの動的な外力分布を特定するとともに、各モードが応答に与える影響を判断するために有効な指標となることがわかっている。

2.3 動的モードの抽出法

以下の検討では、動的応答次の支配的なモード形(基準モード)を応答の時刻歴 $f(t)$ に対して一定のモード形ベクトル $\{X\}$ と時刻関数 $q(t)$ によって近似する(4式)。質量マトリクス $[m]$ に関して直交性をもつという条件で基準モードは時刻歴 $f(t)$ から(5)(6)(7)式によって抽出することができる^{7,8)}。基準モード形は、(5)式による時刻歴 $f(t)$ との差の $[m]$ に関する2乗累積和 E が最小となるモード形で定義されるが、モード形 $\{X\}$ は式(7)に示される固有値問題の最大固有値に対応する固有ベクトル $\{u\}_{1d}$ (1次)となる。

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

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

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

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

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り求められる。

2.4 非線形漸増解析および地震応答解析の手法

本研究では次項に示す偏心RC構造物の震動実験⁹⁾および実験結果の解析を行い、解析手法および検討手法の妥当性を検証している。

部材レベルの非線形静的漸増載荷(NPA)解析および地震応答解析はCANNY99¹⁰⁾を用いた。柱梁にはOne-Component Modelを、

耐震壁にはTVLEモデル(Three Vertical Line Elements model)¹¹⁾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¹²⁾を用いた。各部材の曲げ復元力特性はTAKEDAモデル(除荷剛性低下指数0.5)とし、軸方向の復元力特性はAxial-Stiffness model¹³⁾とした。各部材のせん断剛性は弾性とし、せん断破壊はしないものとした。

なお、本解析では地震動は1方向入力としているが、以下の手法は地震動が1方向入力であれば2軸偏心構造物一般に対しても地震動の入力方向に対して構造物を解析すれば同様の手法が適用可能である。一方、地震動が2方向同時入力の場合は、偏心応答は地震動の性質に遡って別途議論する必要があるが、地震動が支配的な主軸方向で代表近似しうる場合には同様に1軸問題として扱うことが可能である。

震動実験を等価1自由度系に縮約する際には、震動実験結果から抽出した基準(1次)モードで、震動試験体を1自由度系に縮約する。その等価線形応答を非線形解析応答および実験応答と比較することにより、1次有効質量比の非常に大きな偏心構造物の挙動を等価線形応答によって概ね把握できることを示し、その推定精度を検討する。

また、1次モードのみ考慮した外力によるNPAとモードの重ね合わせ外力(1+2次モード外力分布)によるNPAを行い、有効質量比が載荷ステップの変形に対してどのように推移するかを検討した。非線形地震応答解析による応答結果から1次基準モードを抽出し、最大応答変形のレベルに対する1次有効質量比の推移をNPA結果と比較することで、変形モードを特定するためのNPA手法の妥当性を検証している。

3. 震動実験と解析対象

3.1 震動実験の試験体と解析対象試験体

震動実験の試験体は1/3スケール6層RC偏心構造物である。図1右上に示すように入力方向(X方向)に1スパン3フレーム、直交方向に2スパン2フレームあり、それぞれ1枚の耐震壁が偏心して配置されている。解析は震動実験の試験体を基本にした試験体2体の平面図を示す。この2体は1次モードによる応答推定が難しいとされる1次質量比が小さい場合を選択して示したものである。この2体以外の偏心多層構造物についても偏心率や1次有効質量比が広い範囲に分布するように設定して精度検証しているが、ややばらつきがあるものの同様の傾向を示す結果が得られている¹³⁾。

外力方向はX方向とした。表1に震動試験体の部材断面リスト、表2に震動および解析対象試験体の緒元を示す。解析対象試験体の各部材断面、1スパン区画の重量も震動試験体に基づき同一とした。

実験は全く同一の試験体2体(試験体A、試験体B)に対して異なる地震動を入力して実施した。表3に震動実験における加震履歴を示す。入力による繰返し履歴が崩壊現象に与える影響を検討するために試験体Aは継続時間の長い海洋型の地震動を低い入力レベルから漸増させる加震計画とし、試験体Bは直下型の地震動を試験体が若干塑性化し始めてから1回で非常に大きなレベルの入力を行う加震計画とした。

表1 部材断面リスト

柱	B×D	200×200	梁	B×D	150×250
	主筋	12-D10		主筋	2-D10
	横補強筋	D4@50		横補強筋	D6@75
壁	壁厚	80	梁	B×D	240×250
	縦横筋	D6@100w	壁下	主筋	4-D10
各階重量		9.75 ton		横補強筋	D6@75

表2 構造物の緒元

	T1(s)	T2(s)	M1	M2	Re1	Re2
解析試験体 SP1	0.178	0.109	0.261	0.503	0.396	0.134
解析試験体 SP2	0.185	0.131	0.365	0.366	0.384	0.097
震動試験体	0.203	0.074	0.573	0.019	0.884	0.215

図1 解析対象例と震動試験体

表3 加震履歴

試験体 A			試験体 B		
run	地震記録	倍率	run	地震記録	倍率
1	TOHOKU	0.15	1	TAKATORI	0.06
2	TOHOKU	0.30	2	KOBE	0.10
3	TOHOKU	0.60	3	KOBE	0.20
4	CHILE	0.25	4	KOBE	0.20
5	CHILE	0.35	5	KOBE	0.60
6	CHILE	0.45	6	TAKATORI	1.10
7	CHILE	0.60			
8	CHILE	0.90			
9	CHILE	1.10			
10	CHILE	1.10			
11	CHILE	1.20			

TOHOKU: 1978 宮城県沖地震 東北大学 (NS)

CHILE : 1985 チリ地震

KOBE: 1995 兵庫県南部地震 神戸海洋気象台 (NS)

TAKATORI: 1995 兵庫県南部地震 JR 鷹取駅 (NS)

3.2 抽出モードの応答の比較

非線形地震応答解析結果と実験結果の変位と復元力の関係を図2に示す。このような多層偏心構造物では単純に例えば最上階の変位とベースシアの関係などを示す複雑な履歴形状を示す。そこで、同図では、(4)式～(7)式によるモード抽出を行い、抽出1次モードの復元力-変位の関係を示した。また、弾性1次モード外力分布で静的漸増载荷解析(NPA)した結果も同図に示した。なお、非線形地震応答解析は実験前に入力計画を特定するために予備解析として実施したもので、実験結果によって特に修正はしていない。

実験結果および非線形応答解析結果から抽出したモードの復元力-変位の関係は概ねよく近似しており、特に試験体Aでは最大変形、周期がよく整合している。これに対して、試験体Bではrun6において、実験の強度は解析の降伏強度を上回っている。これは、降伏前後の入力で試験体Aに比べて大きな速度、変形レベルを与える加震を行った試験体Bで歪み速度による影響が顕著に現れたこと、2試験体で抽出されたモード形が異なること、などによると考えられる。

図3(a)に各加震時の抽出した1次モードおよび2次モードの最大水平変形角の推移を示す。横軸は最上階重心位置の最大変形角である。2試験体の1次、2次の抽出モード最大変形の推移はほぼ等しく、塑性化後も抽出2次モード変形の絶対値は小さいことから試験体の応答では1次モードの変形成分が卓越していたことがわかる。

震動実験結果から抽出した変形モードについてモード最大変形に対する1次有効質量比の推移を図3(b)に示す。また、最上階の並進変形成分に対する回転変形成分の比の推移を図3(c)に示す(この数値の逆数が変形モードの最上階応答中心位置と重心間の距離に相当している)。2つの外力分布によるNPA結果はほぼ同一となった。静的解析結果は震動実験と変形モードの応答中心、有効質量比という点でよく近似しており、実験結果から抽出した変形モードは1次外力分布によるNPAにより十分に高い精度で再現しうることが示

図2 実験と解析の抽出1次モード復元力特性

図3 震動試験体の抽出1次変形モードの推移

された。すなわち、このような構造物では1次モード縮約系による応答推定が可能であることを示唆している。

3.3 実験、骨組解析、等価線形解析の比較

最上階の最大応答変形について、震動実験による計測値、非線形骨組解析による算定値および等価線形解析による推定値を図4で比較した。各加震時ごとに一般に最も変形の大きいY1構面と重心位置の加震方向の最大変形を図示した。等価線形応答は1次モード外力分布で縮約した場合と1次+2次モードの重ね合わせ外力によるNPA解析値で縮約した場合の2通りを比較して示した。等価線形応答の推定では、等価減衰 h_e および等価周期 T_e は実験結果の最大応答値から限界耐力設計法と同様に評価した。すなわち、原点から最大応答点への割線剛性により等価周期を算出し、等価減衰は略算式による値として、SDF時刻歴応答解析を行った。非線形解析値と実験結果は試験体Bのrun6を除けば概ね一致している。これは急激にせん断耐力が低下する試験体の挙動を解析モデルで考慮していないためであると考えられる。等価線形応答値と非線形応答値は非常に近似しており、その違いは実験値と非線形応答値の誤差に比べると小さかった。また、外力分布形による応答推定値の違いもほぼ無視できるものであった。以上により1次有効質量比がこの程度(0.57)に大きい偏心構造物では実際の応答は1次モードのみで縮約した等価線形応答によって十分推定可能であることが実験的にも解析的にも検証された。部材レベルの非線形地震応答は実験より縮約系による推定に近く、この場合は縮約法や等価線形化による誤差は小さく、復元力特性の設定など非線形地震応答解析の誤差がむしろ大きいことがわかる。

図4 最上階の最大応答と解析応答値の比較

図5 解析試験体の有効質量比と応答中心の推移

4. 多層偏心構造物の非線形地震応答の一般性状

4.1 動的解析による最大応答とモード形の抽出

偏心構造物の非線形地震応答解析には実験の入力に用いた兵庫県南部地震神戸海洋気象台の記録 (KOBE), チリ地震 (CHILE) の2波に加えて, 標準的な設計用地震動として日本建築センターの模擬波 (BCJL2) を用いた。また, 構造物の塑性化の程度が異なる場合を一般的に検討するために, 地震の大きさを原波の定数倍 (BCJL2では0.5倍刻み, CHILE, KOBEでは0.25倍刻み) で変化させて解析結果を整理した。静的漸増解析 (NPA) では異なる2つの外力分布形, すなわち, ①1次モード形, ②1次と2次の重ね合せ ((1)式, 以下, (1+2)次外力分布, という), ③後述する提案手法, を仮定して結果を比較している。

動的解析から抽出された変形モード形の1次有効質量比 M_1 と抽出モード最大応答変形の関係を図5(a)に実線と△, □, ○ (それぞれ, CHILE, KOBE, BCJL2入力) で示した。同様に異なる外力分布に対する静的解析における変形と変形実線 (②1次と2次の重ね合わせ) で示した。

動的応答時の1次有効質量比は概ね2つの外力分布形によるNPA結果の有効質量比の間にあり, 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。この傾向はいずれの入力およびこれ以外の試験体の場合でもほぼ共通している¹³⁾。

これ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次モードから重ねあわせ外力による変形モードに近い形状に遷移していることを示している。また, 1次有効質量比で代表されるモード形が遷移する変形のレベルは入力地震波に依存せず試験体ごとにほぼ同様である。

これは経験的に設定された手法 (1次と2次の重ね合わせによるNPAによる応答推定) に対応するものであるが, 次項で詳細に検討するように1次と2次モードの変形成分は塑性化により同位相で振

動するようになり, 非線形領域で一定のモード形として抽出されたためであると推察される。

図5(b)に動的解析時の1次基準モードの最大応答変形に対する抽出された2次モード有効質量比 M_2 の推移を示す。試験体の2次有効質量比は徐々に減少し, 0に漸近している。すなわち, 単位入力加速度あたりの2次変形に寄与する外力成分が0に漸近し, 動的応答は抽出された1次基準モードのみで縮約した系の応答で推定可能になることを示唆している。

4.2 変形モードと相対加速度の位相相関

抽出変形モードが (1+2) 次外力分布による変形モードに漸近する一般性を検討するために, 復元力モデルのみが異なる2つの試験体の非線形応答を比較した。試験体1の復元力特性は全てRC(武田)モデル ($\alpha=0.5$), 試験体2の復元力特性は非線形弾性モデルとした。すなわち, 復元力特性の包絡線 (ひび割れ, 降伏点荷重および剛性低下率) は共通であるが除荷剛性のみが異なる。また, 弾性応答と弾塑性応答を比較するために入力はKOBE原波を0.1倍~3.5倍した。

図6に2試験体の抽出モードの相対加速度 (外力) 波形をそれぞれ破線 (弾性応答, 0.1倍) と薄線 (弾塑性応答, 3.5倍) で, 入力加速度波形を実線で示した。位相を比較するためいずれも振幅は最大値で基準化している。試験体1の弾性応答, 試験体2から抽出されるモード形は弾性, 弾塑性応答とも相対加速度波形と入力加速度波形の相関性は低くそれぞれ独立の応答波形を示す。しかし, 大きく塑性化した試験体1では入力加速度とほぼ逆位相の相対加速度が抽出されている。この傾向はRCモデルで塑性化が進行するほど明瞭になるが, 非線形弾性モデルでは生じない。

これは既往の研究⁹⁾でも指摘されている傾向であり, 非線形応答との誤差の累積二乗値を最小として抽出されたモードに特有の性質であるとも考えられるが, 非線形弾性ではみられないことから, 塑

性化そのものではなく、塑性化が進行して除化方向と载荷方向で剛性が異なる（分岐する）復元力特性の性質に依存して生じる現象であると推定される。

相対加速度が入力加速度と逆位相になるという性質は非線形応答波形の中でモード変形が進行する方向の相対加速度（外力）成分のみが抽出されており、モード外力を重ね合わせた静的解析結果で最大変形を推定しうる根拠を示している。

図6 2試験体の抽出相対加速度波形の比較

図7に入力の大きさを0.1~3.5倍に漸増させた時の抽出変形モードの有効質量比の変化を実線（1次）と破線（2次）で示した。RCモデルでは抽出1次変形モードの有効質量比は塑性化に応じて徐々に大きくなり、2次は徐々に減少するのに対して、非線形弾性モデルではこの傾向は見られなかった。これらの解析結果から、抽出変形モードが（1+2）次外力分布による変形モードに漸近する理由は変形に応じて抽出される相対加速度の位相が入力加速度の逆位相に近づくという一般的な傾向に基づくことが明らかになった。

5. 応答推定手法の提案

5.1 モード形の設定

動的応答において1次有効質量比が弾性1次モードの外力分布による静的解析値と異なり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る。これは非線形化によって弾性に近いモード形およびモードの直交性が崩れるためであると考えられる。

NPAでは通常外力分布は固定されるが、動的解析では外力分布は非線形化後も変化する。したがって、変形モードと外力モードが質量を介して対応する（固有モード）変形を静的解析から求めるのは困難である。そこで動的応答から抽出された1次変形モードが（1+2）次外力分布による変形モードに定常化する変形は弾性モード形を重ね合わせた一定の外力分布による静的解析の結果、変形モード形の応答中心点の変化が定常化する変形として算定する。

動的応答時の有効質量比の遷移から抽出された1次基準モードの最大変形の大きさに応じて動的応答時の外力状態は3つのステージ

図7 2試験体の有効質量比の推移

に区分することができる。第1段階は抽出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次モード外力分布と同値となり、応答変形は1次と2次モードの変形を重ね合わせたものになり、MPAによる推定が可能であると予想される。第2段階は抽出1次変形が降伏点から変形モードの応答中心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1次モード外力分布から（1+2）次モード外力分布に漸近する。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次モード外力分布による2次変形を加えた値となる。第3段階は抽出1次変形が変形モードの応答中心点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）次モード外力分布となり変形は1つの定モードのみによるNPAで縮約して推定することができると予想される。

そこで、本解析では動的解析時に抽出された定モード形に基づいた外力分布を用いて非線形応答を推定する手法を提案し、既往の推定手法による解析結果と推定精度を比較する。図8に提案する応答推定手法のフロー図を示す。

有効質量比は第2段階においてモード変形に対して比例的に漸近している。また振動方程式からこの値は縮約系にかかる外力の分布に対応することから静的解析における動的な外力状態は線形補間することで近似する。

まず1次モード外力分布と（1+2）次モード外力分布をそれぞれ降伏点外力と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した外力分布でNPAを行い、1次変形を求める。次に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次モード外力による2次変形を加えた値とする。

5.2 有効質量比の推移の比較

図5(a)に破線で提案した外力分布で静的解析を行った場合の有効質量比の推移を示す。提案する外力分布形で静的解析することによって有効質量比の推移は動的応答から抽出される変形モードの有効質量比に概ね対応することがわかる。

5.3 最上階応答中心の推移の比較

偏心構造物は並進変形と層回転変形の足し合わせにより最大変形が決定する。したがって、等価線形応答の変形モードは非線形応答

図8 提案する応答推定手法のフロー図

の1次基準変形モードにおける2つの変形成分の割合を再現する必要がある。

図9に動的解析および異なる3つの外力分布形による静的解析(①1次;②1, 2次の重ね合わせ;③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(重心と応答中心間の距離の逆数)の推移をそれぞれ点線, 実線, 破線で示す。抽出した1次変形モードの応答中心は変形に応じて1次モード外力分布による静的解析値から(1+2)次モード外力分布による解析値に近づく。提案した外力で静的解析した結果, 変形モードは応答中心が動的応答から抽出された1次変形モードの値に近似し, 応答中心という点でも1次変形モードを再現しうる。

図9 最上階の並進変形に対する層回転変形の比の推移

5.4 最大応答変形の比較

図10に既往のNPAを用いた場合(破線)と提案した推定手法(実線)を用いた場合の等価線形応答の最上階重心およびX1構面の加震方向の最大応答値(＃1)を比較した。グラフの横軸には非線形応答解析の最大応答値(＃2)とし縦軸には非線形応答値に対する等価線形応答値誤差の比((＃2-＃1)/(＃2))とした。提案する手法は2次変形を加えた値・引いた値のうち非線形応答に近似している値でプロットした。

図10 最上階重心およびX1構面の最大応答推定の推移

両試験体について重心・X1構面ともに最大水平変形角が1/33rad以上になる場合は既往の等価線形化手法(NPA)でも十分な精度で推定可能であった。すなわち弾性モードの1次有効質量比が小さくても応答変形が非常に大きな範囲では既往の等価線形化手法も有効であった。一方, 最大水平変形角が1/33rad以下の範囲の非線形応答値は概ね提案する手法によるMPA推定値の間にあり, 提案する手法により推定精度が若干向上した。各次応答モードの同時性を考慮した手法を用いることで推定値の誤差はさらに小さくなると推察される。

6. 既往の研究結果との比較

6.1 2軸偏心構造物

外力方向の変形に対する一軸偏心の構造物であっても, 振れモーメントによって生じるせん断力によって加震直交方向構面が剛性低下して層回転角が加震直交方向の耐力に依存する耐力偏心となり, 実質的な二軸偏心になりうる。

藤井はこれにより一次有効質量比が低下する可能性があることを指摘しており, さらに等価線形応答で推定可能な構造物の判定方法として1次モード外力で静的解析し, 変形モードの有効質量比の下限値をとることを提案している⁷⁾。

しかし, 本研究では非常に弾性1次モード有効質量比の小さい構造物においても抽出される変形モードが1つの変形モード形((1+2)次モード)に漸近し, 等価線形応答の推定精度は高くなりうることを示した。

NPA手法では3次元立体構造物としてモデル化しているので, 直交方向の剛性や偏心, 非線形化の影響は必然的に考慮される。2軸偏心構造物である震動試験体の静的解析では抽出変形モードの有効質量比は徐々に低下しており, 振れモーメントによる直交方向構面の剛性低下, 層回転変形の増大を示している。したがって2軸偏心などによって直交方向構面が剛性低下する場合の変形モードも(1+2)次モード外力分布によるNPAから推定可能であることが

確認された。

6.2 耐力偏心率との対応

偏心構造物の各構面が全て降伏した場合、起こりうる最大偏心モーメントは各部材の降伏耐力から求められる。この値に基づき非線形領域における偏心応答性状を表す指標に耐力偏心率があり、加震直交方向構面の塑性化を考慮しなければ非常に大きな変形領域において重心位置の最大層回転角に比例することが指摘されている¹⁴⁾。

この指標は構造物の部材が全て降伏していることを前提としているため、部材の剛性が低下せず、各部材の剛性マトリクスを累加した全体剛性マトリクスが変化しない変形領域における偏心応答性状と対応する。本解析において動的応答の第3段階は変形モードと外力モードが質量を介して対応する(固有モード)、すなわち外力分布が一定であれば変形が定モードを示す変形領域と定義した。この変形領域は全体剛性マトリクスの変化がない変形領域とはほぼ一致し、耐力偏心率を定義する変形では変形モードが定まる。

したがって、耐力偏心率により偏心構造物が全体降伏機構を形成する応答変形を簡略的に評価することができる。すなわち、本研究は保有水平耐力に耐力偏心率を考慮することで、限界耐力設計と同様に偏心構造物の非線形応答性状を評価する理論的背景になりうる結果を示したことになる。

7. 結論

本研究では偏心 RC 構造物の震動実験および地震応答解析を行い、等価線形化による応答推定法に関して以下の点を明らかにした。(1) 震動実験の結果に等価線形化による応答推定手法を適用し、NPA 手法が妥当であることを確認した。(2) 1 次有効質量比が大きい構造物は 1 次モード変形が卓越するので 1 次モードのみ考慮した縮約で非線形応答を推定可能である。(3) 累積 2 乗誤差が最小となる非線形応答モード抽出法を適用し、有効質量比および応答中心点の推移により、振れ応答モードの性状を分析する手法を示した。(4) 1 次有効質量比が小さい場合でも、抽出される変形モードの有効質量比は塑性化が進むと弾性 1 次モードの値から 1 次と 2 次モードの重ねあわせ外力分布による NPA 解析値に漸近する傾向があることを示した。(5) この傾向は塑性化すると非線形応答から抽出される相対加速度の位相が入力加速度の逆位相に近づくという一般的な性質により生じることを明らかにした。また、この性質は RC 復元力モデルの除荷剛性への分岐に起因している可能性を示した。(6)

この傾向を利用して 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。(7) 塑性化の程度が非常に大きい場合は 1 次有効質量比が小さい場合でも既往の NPA 手法によっても非線形応答を高精度で推定可能である。(8) 提案した手法により有効質量比あるいは変形レベルによらず一般的な推定が可能になった。(9) 2 軸偏心の問題に関しても、震動実験で生じた有効質量比の推移は、3 次元の NPA 解析によって把握しうることを確認した。(10) 保有水平耐力に耐力偏心率を考慮して偏心構造物の非線形応答性状を簡易に評価する設計法が可能になる理論的背景を示した。

参考文献

- 1) Anil K. Chopra, Rakesh K. Goel: Modal Pushover Analysis symmetric and unsymmetric plans buildings, International Workshop on PBSD Concepts & Implementation, 2004.7
- 2) Anil K. Chopra, Rakesh K. Goel: A Modal Pushover Analysis Procedure to Estimate Seismic Demands for Buildings, A report on research conducted under grant no. CMS-9812531 from the National Science PEER Report, 2001.3
- 3) 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
- 4) 改正建築基準法法令集, 日本建築センター, 2000.7
- 5) 限界耐力計算法の計算例とその解説, 日本建築センター国土交通省建築研究所, 建築研究振興協会, 2002.7
- 6) 滝沢春男: 梁崩壊靱性架構の動的機構形成における定モード成分の抽出, 構造工学論文集, Vol. 36B, pp245-258, 1990.3
- 7) 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, 2003.2
- 8) 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告集 pp137-142, 1990.12
- 9) 壁谷澤寿海, 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第26巻, No. 2, pp1159-1164, 2004.7
- 10) 李 康 寧: 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
- 11) 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) 疑似動的解析第6回日本地震工学シンポジウム講演集, pp1161-1168, 1982.12
- 12) 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
- 13) 壁谷澤寿海: 偏心鉄筋コンクリート構造物の等価線形化に関する研究, 修士論文, 2005.3
- 14) 藤井賢志: セン断破壊を伴う単層鉄筋コンクリート造建物のねじれ地震応答性状, 修士論文, 2000.2

(2005年3月8日原稿受理, 2005年6月29日採用決定)