

水平2方向地震入力を受ける単層偏心建物における 等価1自由度系モデル

藤井 賢志*1・中埜 良昭*2・真田 靖士*3

概要：水平2方向地震入力を受ける単層の1軸偏心および2軸偏心建物を対象として、直交する2方向に関する等価1自由度系モデルの非線形運動方程式を定式化する。次いで、本論文で定式化した等価1自由度系モデルを用いて等価線形化手法により各モードの最大応答を推定し、水平2方向入力の影響を考慮した外力分布による静的漸増載荷解析により各構面の最大応答変位を推定する。検討の結果、本論文で議論した手法により単層1軸偏心建物および単層2軸偏心建物の各構面の最大応答が概ね推定可能であることがわかった。

キーワード：水平2方向地震入力、単層偏心建物、等価1自由度系モデル、等価線形化法、静的漸増載荷解析

1. はじめに

想定された地震動に対する建物の非線形応答の推定は、近年に世界中で開発が進められている性能評価型耐震設計法および耐震診断手法における重要な項目である^{1)~3)}。このための簡便な方法として、FEMA273におけるNSP (Nonlinear Static Procedure)²⁾や日本の改正建築基準法における限界耐力計算法³⁾に代表されるように、主としてねじれを伴わない平面的に整形な建物を対象としてこれが強震時に単一のモードで振動すると仮定して多自由度系モデルを等価1自由度系モデルに縮約して時刻歴応答解析を行わずにその非線形応答を推定する手法が示されている^{4) 5)}。

一方で平面的に不整形な偏心建物に関しては、強震時に高次モード応答の影響が顕著となり単一の代表的なモードで振動しているとは見なせなくなる可能性のある事、多方向入力の影響が顕著となる可能性がある事、などからこれまでは上記の等価1自由度系モデルによる簡便な応答推定手法は適用の対象外とされてきた。また、近年これを多層偏心建物に適用しようとする試みがいくつかなされているものの^{6) 7)}、十分な検討が未だなされていないのが現状である。しかしながら、偏心建物に対しても上述の等価1自由度系モデルを用いた手法によりその非線形応答の推定が可能となれば、偏心建物の耐震性能を整形な建物と統一的に議論できるようになるため、実用性が高いと考えられる。ところで、近年の電子計算機

による解析技術の普及により多自由度系モデルの非線形時刻歴応答解析はもはや特殊な解析技術ではなくなってきている。しかしながら、これは特定の地震動に対する精解が得られるため設計上のツールとしては十分有用であるものの、この結果に地震動の個別性を排した設計規範として一般性を持たせるのは難しい。従って、設計用応答スペクトルを用いた等価1自由度系モデルによる非線形応答の推定手法は、地震動の個別性を排した建物の非線形応答の一般的性質を理論的にとらえる上で極めて有用であると思われる。

そこで著者らは、偏心建物を対象とした等価1自由度系モデルによる簡便な非線形応答推定手法をテーマに、その最も基本かつ重要である1方向地震入力を受ける単層1軸偏心建物および各階の回転半径が等しく重心が同一鉛直線上にあり、各階の剛性偏心距離・耐力偏心距離および弾性半径が等しいという条件を満足する多層1軸建物（以下では単純に多層1軸偏心建物と記す）を対象として各構面の最大応答変位に特に着目してその推定手法の提案およびその適用限界を論じてきた^{8)~14)}。そして、主としてせん断変形が卓越する低層建物を対象とし、多層1軸偏心建物が構面方向から1方向地震入力を受ける場合に限定してその非線形地震応答推定手法を提案した^{12)~14)}。しかし、現実には地震動は3次元での挙動でありかつ偏心建物の応答は立体振動であるため、偏心建物の応答の推定においては多方向からの地震入力の影響が重要な課題となる。文献15)、16)では、水平2方向地震

*1 東京理科大学助手 理工学部建築学科 博(工) (正会員) 〒278-8510 千葉県野田市山崎2641

*2 東京大学助教授 生産技術研究所 工博 (正会員) 〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1

*3 東京大学助手 地震研究所 博(工) (正会員) 〒113-0032 東京都文京区弥生1-1-1

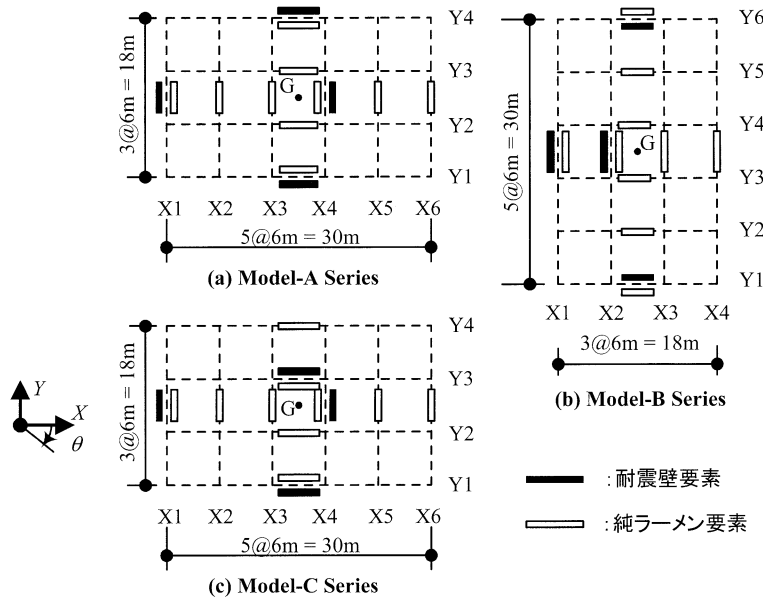


図-1 解析建物モデルの平面図

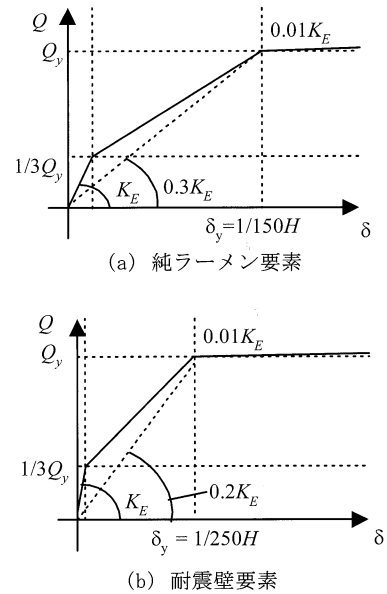


図-2 各要素の復元力特性

入力を受ける単層1軸偏心建物を対象として検討を行ったが、文献13)の手法をより一般的な建物に適用するためには、2軸偏心建物に対する検討が必要不可欠である。本論文では文献13)、14)の手法の拡張を目的として、水平2方向地震入力を受ける単層1軸偏心建物および単層2軸偏心建物を対象として、直交する水平2方向に関する2つの等価1自由度系モデルの非線形運動方程式を定式化する。次いで等価1自由度系モデルの最大応答を等価線形化法¹⁷⁾を用いて推定し、水平2方向地震入力の影響を考慮した外力分布による静的漸増载荷により各構面の最大応答変位の推定を試みる。

2. 解析諸元

2.1 解析建物モデル

解析対象は図-1に示す3種類の平面形状の単層建物モデルである。解析建物モデルの慣性質量 m および回転慣性質量 I は4層建物を文献13)に従って縮約した場合を想定してそれぞれ2160ton、 $2.203 \times 10^5 \text{ton} \cdot \text{m}^2$ とした。高さ H は、4層建物を想定してその等価高さとして10.8mとした。解析モデルの降伏耐力は図-1(a)~(c)の各モ

デルに対し以下に示す2種類、合計6種類を設定した。

- 1) W1 Series : 降伏耐力は X, Y 方向ともに等しく $0.72W$ ($W = mg$: 建物重量, g : 重力加速度 ($=9.8\text{m/s}^2$))とした。これは、建築基準法において水平力の大半を耐震壁にて負担する場合を想定して $Ds = 0.4$ とし、かつ偏心率 Re が0.3を上回る場合を想定して1.5倍に割増しを行ってさらに質量が均一でモード形が逆三角形である4層建物を等価単層系モデルに置換した場合における等価単層系モデルの等価質量と全質量の比 ($=0.833$) の逆数をかけて等価単層系モデルのベースシアに換算したものである。各要素の降伏耐力は純ラーメン要素では合計で $0.24W$ 、耐震壁要素では合計で $0.48W$ とした。
- 2) W2 Series : X方向の耐震壁要素の降伏耐力および弾性剛性を Model-W1 Series の2倍(降伏耐力は合計で $0.96W$)にする一方、X方向構面の純ラーメン要素およびY方向構面の各要素の耐力は Model-W1 Series と同じとする。これにより、Model-W2 Series のX方向の降伏耐力はY方向の降伏耐力の $5/3$ 倍 ($1.20W$)となる。

表-1 各解析建物モデルのパラメータ

	偏心比		弾力半径比		偏心率		弾性時の等価質量比											
	E_x	E_y	J_x	J_y	Re_x	Re_y	m_{1x}^*	m_{1y}^*	m_{2x}^*	m_{2y}^*	m_{3x}^*	m_{3y}^*						
Model-A-W1	0.495	0.000	1.365		0.000	0.389	0.000	0.829	1.000	0.000	0.000	0.171						
Model-A-W2			1.174	1.589		0.328						0.919	0.081					
Model-B-W1			1.566			0.333						0.913	0.087					
Model-B-W2			1.530	2.071		0.246						0.979	0.021					
Model-C-W1			0.248	1.252		0.220						0.441	0.145	0.583	0.800	0.200	0.054	0.217
Model-C-W2			0.270	1.028	1.392	0.293						0.397	0.042	0.758	0.614	0.175	0.344	0.066

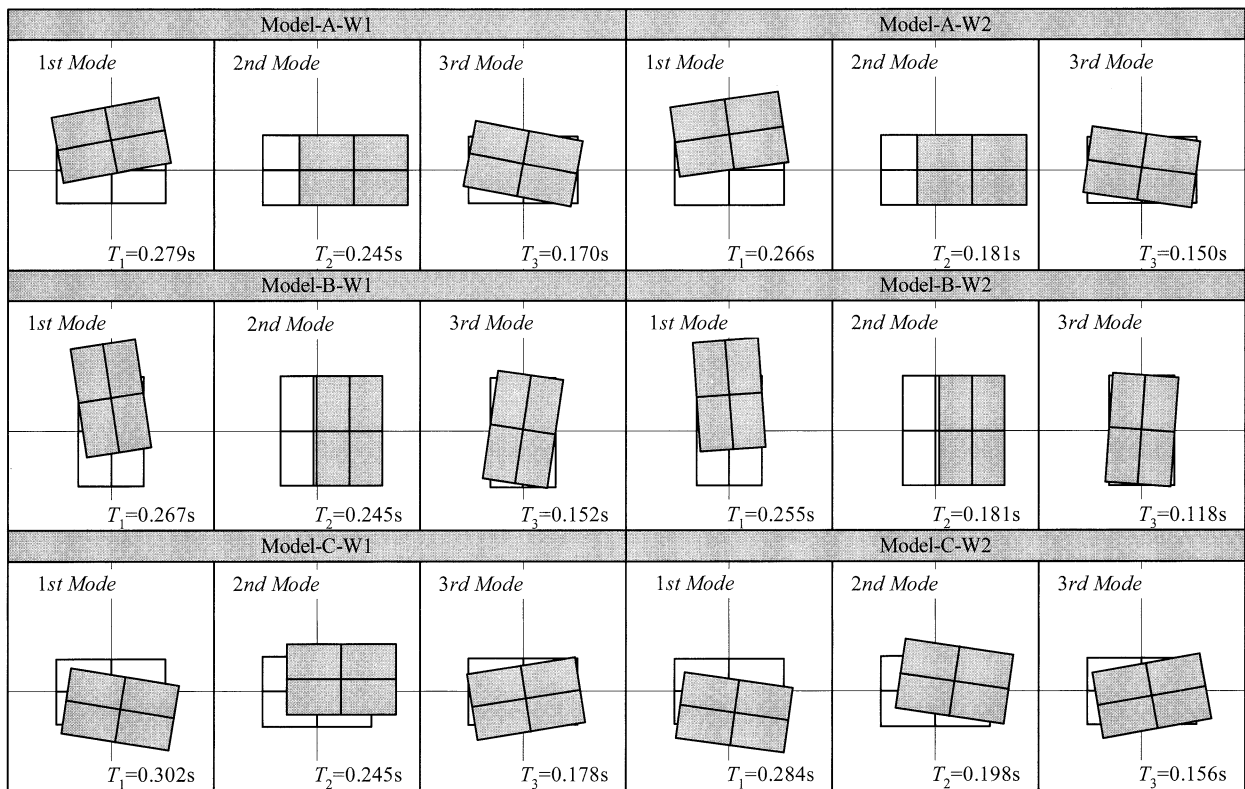


図-3 解析モデルの弾性モード形

各要素の復元力特性は図-2 のように仮定し、履歴特性としては曲げ破壊型の RC 造建物を想定して Takeda モデル (除荷剛性低下指数 0.4)¹⁸⁾とした。なお、各構面での部材のねじり剛性および 2 方向応力の相互作用の影響は本論文では解析等の簡略化のため無視した。

表-1 に各モデルの偏心比 E_X , E_Y ($= e_x/r$, e_y/r : e_x , e_y : 剛性偏心距離, r : 床の回転半径), 弾力半径比 J_X , J_Y ($= j_x/r$, j_y/r : j_x , j_y : 重心に関する弾力半径), 建築基準法における偏心率 Re_X , Re_Y および各モードの固有周期 T_i ($i=1\sim 3$) と 3 章で後述する X, Y 方向に関する等価質量比 m_{1x}^* , m_{1y}^* を, 図-3 に各解析建物モデルの弾性固有モードを示す。表-1 より明らかなように全てのモデルにおいて弾力半径比 J_X , J_Y の値は 1 を上回っている。また, Model-A-W1, Model-B-W1 および Model-A-W2, Model-B-W2 は X 軸に関して対称な 1 軸偏心であるため E_Y , Re_Y の値は 0 となり, かつ m_{1x}^* , m_{2y}^* の値は 0 となっている。この事は, 図-3 から明らかなようにこれらのモデルでは弾性 1 次モードは Y 方向の振動が支配的なモードで X 方向の振動には全く寄与せず, 一方の弾性 2 次モードでは X 方向への純並進振動となるモードで Y 方向の振動には全く寄与しないことを示している。一方で, Model-C-W1, Model-C-W2 では 2 軸偏心であり, m_{1x}^* , m_{1y}^* および m_{2x}^* , m_{2y}^* の値は 0 にはならない。この事は, これらのモデルでは 1 次モード, 2 次モードともに X, Y 方向の振動に寄与することを示している。また, 全てのモデルにおいて弾性 3 次モード形は回転振動が支配的なモードとなった。

表-2 模擬地震動の一覧

	最大加速度 A_0 (m/s ²)		最大速度 V_0 (m/s)	
	EW	NS	EW	NS
JCode-ELC	5.703	5.402	0.790	0.964
JCode-TOH	5.676	5.512	0.970	0.911
JCode-JKB	6.507	6.836	0.890	0.856

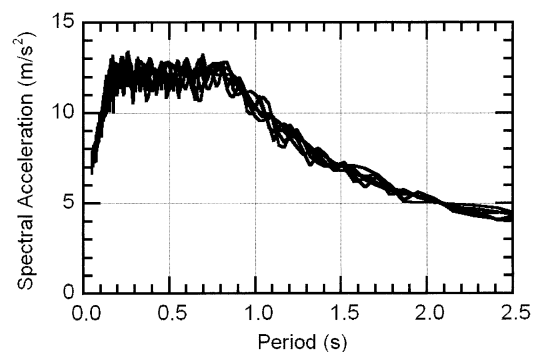


図-4 加速度応答スペクトル (減衰定数 5%)

2.2 入力地震動

入力地震動は X, Y 方向からの 2 方向入力とした。入力地震動は告示³⁾で規定された設計用応答スペクトルに適合するように作成した模擬地震動とした。作成する模擬地震動の入力レベルは極めて稀に生じる地震動とし, 地盤種別を第 2 種地盤として告示に示す地盤増幅を考慮した¹⁷⁾。模擬地震動の位相特性は El Centro 1940, Tohoku Univ. 1978, JMA Kobe 1995 の位相特性を用い

るものとし、X 方向成分では各々の EW 成分、Y 方向成分では各々の NS 成分の位相特性を用いた。表-2 に模擬地震動の一覧を、図-4 に各模擬地震動の弾性加速度応答スペクトル（減衰定数 5%）を示す。なお解析にあたっては、作成した地震動を X、Y 方向ともに 0.2 倍、0.6 倍および 1.0 倍に係数倍して入力した。

2.3 数値積分法

数値積分法は Newmark-β法（β = 1/4）を用い、積分時間刻みは 0.005 秒とした。減衰は瞬間剛性比例型とし、弾性 1 次モードに対して 3% と仮定した。

3. 水平 2 方向地震入力を受ける単層 2 軸偏心系における等価 1 自由度系モデル

文献 15) では、互いに直交する構面方向からの 1 方向地震入力における応答に関して単一のモード応答が支配的であるという仮定の下、水平 2 方向地震入力を受ける単層 1 軸偏心系モデルに関して等価 1 自由度系モデルの定式化を行った。しかしながら、一般的な単層 2 軸偏心系モデルの場合には各々の構面方向の応答は複数のモードの影響を強く受ける可能性があるため、単純に文献 15) で定式化した等価 1 自由度系モデルを適用することはできない。そこで本章では、各モードの等価質量比に着目し、等価質量比が最大となる方向に関して議論を行う。次いで、水平 2 方向地震入力を受ける単層 2 軸偏心系モデルにおける等価 1 自由度系モデルの非線形運動方程式を定式化する。

3.1 各モードにおける等価質量比の最大方向

水平 2 方向地震入力を受ける単層偏心系モデルの非線形運動方程式は式(1)で表される。

$$[M]\{\ddot{d}\} + [C]\{\dot{d}\} + \{R\} = -[M]\{a_g\} \quad (1)$$

ここで、

$$[M] = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix}, [C] = \begin{bmatrix} C_{XX} & C_{XY} & C_{X\theta} \\ C_{YX} & C_{YY} & C_{Y\theta} \\ C_{\theta X} & C_{\theta Y} & C_{\theta\theta} \end{bmatrix}$$

：質量マトリクスおよび減衰マトリクス

$$\{d\} = \{x \ y \ \theta\}^T \quad \text{：変位ベクトル}$$

$$\{R\} = \{R_x \ R_y \ M_z\}^T \quad \text{：復元力ベクトル}$$

$$\{a_g\} = \{\alpha_x\} \cdot a_{gX} + \{\alpha_y\} \cdot a_{gY} \quad \text{：地動ベクトル}$$

$$a_{gX}, a_{gY} \quad \text{：地動加速度}$$

$$\{\alpha_x\} = \{1 \ 0 \ 0\}^T, \{\alpha_y\} = \{0 \ 1 \ 0\}^T$$

である。ここで、図-5 に示すように座標軸 X、Y に対して時計回りに角度 ψ で回転させた座標軸 U、V を定義する。この時、地動加速度ベクトル {a_g} は式(2)を用いて式(3)で表すことができる。

$$\begin{cases} \{\alpha_U\} = \{\cos\psi & -\sin\psi & 0\}^T \\ \{\alpha_V\} = \{\sin\psi & \cos\psi & 0\}^T \end{cases} \quad (2)$$

$$\{a_g\} = \{\alpha_U\} \cdot a_{gU} + \{\alpha_V\} \cdot a_{gV} \quad (3)$$

ここで、a_{gU}、a_{gV} はそれぞれ地動加速度の U、V 方向成分である。ここで、X、Y 方向に関する i 次等価質量比 m_{iX}^{*}、m_{iY}^{*} と、U、V 方向に関する i 次等価質量比 m_{iU}^{*}、m_{iV}^{*} の関係を導く。単層系モデルの i 次モードベクトルを {φ_i} = {φ_{Xi} φ_{Yi} φ_{θi}}^T とすると X、Y 方向に関する刺激係数 β_{iX}、β_{iY} と、U、V 方向に関する刺激係数 β_{iU}、β_{iV} はそれぞれ式(4)、(5)で表される。

$$\begin{cases} \beta_{iX} = \frac{\{\phi_i\}^T [M] \{\alpha_X\}}{\{\phi_i\}^T [M] \{\phi_i\}} = \frac{\phi_{Xi}}{\phi_{Xi}^2 + \phi_{Yi}^2 + (r \cdot \phi_{\theta i})^2} \\ \beta_{iY} = \frac{\{\phi_i\}^T [M] \{\alpha_Y\}}{\{\phi_i\}^T [M] \{\phi_i\}} = \frac{\phi_{Yi}}{\phi_{Xi}^2 + \phi_{Yi}^2 + (r \cdot \phi_{\theta i})^2} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \beta_{iU} = \frac{\{\phi_i\}^T [M] \{\alpha_U\}}{\{\phi_i\}^T [M] \{\phi_i\}} = \frac{\phi_{Xi} \cdot \cos\psi - \phi_{Yi} \cdot \sin\psi}{\phi_{Xi}^2 + \phi_{Yi}^2 + (r \cdot \phi_{\theta i})^2} \\ \beta_{iV} = \frac{\{\phi_i\}^T [M] \{\alpha_V\}}{\{\phi_i\}^T [M] \{\phi_i\}} = \frac{\phi_{Xi} \cdot \sin\psi + \phi_{Yi} \cdot \cos\psi}{\phi_{Xi}^2 + \phi_{Yi}^2 + (r \cdot \phi_{\theta i})^2} \end{cases} \quad (5)$$

式(4)、(5)より、X、Y 方向に関する i 次等価質量比 m_{iX}^{*}、m_{iY}^{*} と、U、V 方向に関する i 次等価質量比 m_{iU}^{*}、m_{iV}^{*} はそれぞれ式(6)、(7)で得られる。

$$\begin{cases} m_{iX}^* = \frac{\beta_{iX} \{\phi_i\}^T [M] \{\alpha_X\}}{m} = \frac{\phi_{Xi}^2}{\phi_{Xi}^2 + \phi_{Yi}^2 + (r \cdot \phi_{\theta i})^2} \\ m_{iY}^* = \frac{\beta_{iY} \{\phi_i\}^T [M] \{\alpha_Y\}}{m} = \frac{\phi_{Yi}^2}{\phi_{Xi}^2 + \phi_{Yi}^2 + (r \cdot \phi_{\theta i})^2} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} m_{iU}^* = \frac{\beta_{iU} \{\phi_i\}^T [M] \{\alpha_U\}}{m} \\ = \frac{\phi_{Xi}^2 \cos^2\psi - 2\phi_{Xi}\phi_{Yi} \cdot \cos\psi \sin\psi + \phi_{Yi}^2 \sin^2\psi}{\phi_{Xi}^2 + \phi_{Yi}^2 + (r \cdot \phi_{\theta i})^2} \\ m_{iV}^* = \frac{\beta_{iV} \{\phi_i\}^T [M] \{\alpha_V\}}{m} \\ = \frac{\phi_{Xi}^2 \sin^2\psi + 2\phi_{Xi}\phi_{Yi} \cdot \cos\psi \sin\psi + \phi_{Yi}^2 \cos^2\psi}{\phi_{Xi}^2 + \phi_{Yi}^2 + (r \cdot \phi_{\theta i})^2} \end{cases} \quad (7)$$

式(6)と式(7)より非常に興味深い関係（式(8)）が得ら

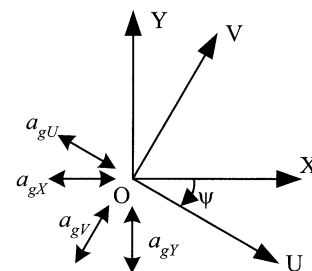


図-5 座標変換

れる。

$$m_{iX}^* + m_{iY}^* = m_{iU}^* + m_{iV}^* = \frac{\phi_{Xi}^2 + \phi_{Yi}^2}{\phi_{Xi}^2 + \phi_{Yi}^2 + (r \cdot \phi_{oi})^2} \quad (8)$$

すなわち、角度 ψ にかかわらずU、V方向に関する単層偏心系モデルの*i*次等価質量比 m_{iU}^* 、 m_{iV}^* の和は常に一定値となる。次に、 m_{iU}^* が最大・最小となる角度 ψ を求めるを試みる。 m_{iU}^* が極値を取るとききの ψ は式(7)を ψ で微分して0とおく事により得られる (式(9))。

$$\tan \psi = -\phi_{Yi} / \phi_{Xi} \cdot \phi_{Xi} / \phi_{Yi} \quad (9)$$

ここで、 $\tan \psi = -\phi_{Yi} / \phi_{Xi}$ の場合に m_{iU}^* の値は最大となり、一方で $\tan \psi = \phi_{Xi} / \phi_{Yi}$ の場合に m_{iU}^* の値は最小となる。また、式(9)より明らかなように m_{iU}^* が最大となる方向と最小となる方向とは互いに直交している。

m_{iU}^* の最大値および最小値は式(10)で得られる。

$$m_{iU}^*_{MAX} = \frac{\phi_{Xi}^2 + \phi_{Yi}^2}{\phi_{Xi}^2 + \phi_{Yi}^2 + (r \cdot \phi_{oi})^2}, m_{iU}^*_{MIN} = 0 \quad (10)$$

ここで、 m_{iU}^* の最小値 $m_{iU}^*_{MIN}$ が0になるという事は、この方向への加振に対しては*i*次モードの応答が生じないことを示している。表-3 に各モデルにおいてU方向に関する1次等価質量比が最大となるときの角度 ψ とそのときの1次、2次の等価質量比 m_{1U}^* 、 m_{2U}^* 、および直交する方向 (V方向) に関する1次、2次の等価質量比 m_{1V}^* 、 m_{2V}^* の値をそれぞれ示す。表-3 より、1軸偏心建物である Model-A-W1, Model-A-W2, Model-B-W1, Model-B-W2 ではU方向は当然ながらY方向と一致し、角度 ψ の値は-90度となる。また、等価質量比に関しても表-3 より明らかなように、 m_{1U}^* の値は全て0.7を上回っている一方で m_{2U}^* の値は非常に小さくなっている。また、 m_{1V}^* の値は全て0となる一方で m_{2V}^* の値は全て0.7を上回っている。従って、いずれのモデルにおいてもU方向の振動については1次モード応答が、V方向の振動については2次モード応答がそれぞれ支配的であることが推測される。

3.2 等価1自由度系モデルの非線形運動方程式

これまでの1方向地震入力を受ける1軸偏心系モデルに関する検討において、1次等価質量比が大きくなる場合においては等価1自由度系モデルにより応答推定が可能である事がわかっている^{8),10),12)}。ここでは、前節における議論をふまえて1次等価質量比の値が最大となる方向にU軸、これに直交する方向にV軸を取って等価1自由度系モデルの非線形運動方程式を定式化する。水平2方向地震入力を受ける単層偏心系モデルの非線形運動方程式 (式(1)) において、式(3)を代入して式(11)の形に書

表-3 1次等価質量比が最大となる角度と等価質量比

	ψ (度)	m_{1U}^*	m_{2U}^*	m_{1V}^*	m_{2V}^*
Model-A-W1	-90	0.829	0.000	0.000	1.000
Model-A-W2		0.919			
Model-B-W1		0.913			
Model-B-W2		0.979			
Model-C-W1	63	0.728	0.054		
Model-C-W2	77	0.800			

き改める。

$$[M]\{\ddot{d}\} + [C]\{\dot{d}\} + \{R\} = -[M]\{\{\alpha_U\} \cdot a_{gU} + \{\alpha_V\} \cdot a_{gV}\} \quad (11)$$

ここで、対象とする単層偏心系モデルが非線形領域で応答する場合においても変位ベクトル $\{d\}$ および復元力 $\{R\}$ を式(12)、(13)の形で表せると仮定する。

$$\{d\} = \sum_{i=1}^3 (\beta_{iU} \{\phi_i\} \cdot D_{iU}^* + \beta_{iV} \{\phi_i\} \cdot D_{iV}^*) \quad (12)$$

$$\{R\} = [M] \sum_{i=1}^3 (\beta_{iU} \{\phi_i\} \cdot A_{iU}^* + \beta_{iV} \{\phi_i\} \cdot A_{iV}^*) \quad (13)$$

ここで、 D_{iU}^* 、 D_{iV}^* は*i*次モードの等価変位、 A_{iU}^* 、 A_{iV}^* は*i*次モードの等価加速度であり、式(14)、(15)で定義する。

$$D_{iU}^* = \frac{\beta_{iU} \{\phi_i\}^T [M] \{d\}}{M_{iU}^*}, D_{iV}^* = \frac{\beta_{iV} \{\phi_i\}^T [M] \{d\}}{M_{iV}^*} \quad (14)$$

$$A_{iU}^* = \frac{\beta_{iU} \{\phi_i\}^T \{R\}}{M_{iU}^*}, A_{iV}^* = \frac{\beta_{iV} \{\phi_i\}^T \{R\}}{M_{iV}^*} \quad (15)$$

ここで、 M_{iU}^* 、 M_{iV}^* はそれぞれU、V方向に関する*i*次等価質量比であり、式(16)で定義される。

$$\begin{cases} M_{iU}^* = \beta_{iU} \{\phi_i\}^T [M] \{\alpha_U\} = \beta_{iU}^2 \left(\{\phi_i\}^T [M] \{\phi_i\} \right) \\ M_{iV}^* = \beta_{iV} \{\phi_i\}^T [M] \{\alpha_V\} = \beta_{iV}^2 \left(\{\phi_i\}^T [M] \{\phi_i\} \right) \end{cases} \quad (16)$$

式(16)より式(17)の関係が得られる。

$$\beta_{iU} / \beta_{iV} = \sqrt{M_{iU}^* / M_{iV}^*} = \sqrt{m_{iU}^* / m_{iV}^*} \quad (17)$$

ここで、対象とする単層偏心系モデルがU方向からの1方向入力を受ける場合には1次モードが常に卓越して振動する一方で、V方向からの1方向地震入力を受ける場合には2次モード応答が常に卓越して振動するものとする。この時、水平2方向地震入力を受ける場合には変位ベクトルおよび復元力ベクトルが式(18)、(19)で表されると仮定する。

$$\{d\} = (\beta_{1U}\{\phi_1\} \cdot D_{1U}^* + \beta_{2V}\{\phi_2\} \cdot D_{2V}^*) \quad (18)$$

$$\{R\} = [M]\{\beta_{1U}\{\phi_1\} \cdot A_{1U}^* + \beta_{2V}\{\phi_2\} \cdot A_{2V}^*\} \quad (19)$$

式(18), (19)を式(11)に代入し, さらに両辺の左側に $\beta_{1U}\{\phi_1\}^T$ を掛けてモードの直交性 (式(20)) を考慮して整理すると式(21)が得られる。

$$\{\phi_1\}^T [M] \{\phi_2\} = 0 \quad (20)$$

$$\ddot{D}_{1U}^* + \frac{C_{1U}^*}{M_{1U}^*} \dot{D}_{1U}^* + A_{1U}^* = -\left(a_{gU} + \sqrt{\frac{m_{1V}^*}{m_{1U}^*}} \cdot a_{gV} \right) \quad (21)$$

ここで, C_{1U}^* は 1 次モードに関する等価減衰係数であり, 式(22)で定義される。

$$C_{1U}^* = \beta_{1U}^2 (\{\phi_1\}^T [C] \{\phi_1\}) \quad (22)$$

式(21)の第 1 項は, 1 次モード応答に対する地動加速度の U 方向成分の寄与分, 第 2 項は V 方向成分の寄与分をそれぞれ表している。ここで, 前節で既に議論したように, 1 次等価質量比が最大になる方向を U 方向とすると, これに直交する V 方向における 1 次等価質量比 m_{1V}^* の値は 0 となる。そのため, 最終的には U 方向からの 1 方向地震入力を受ける場合と全く同じ形の式 (式(23)) を得る。

$$\ddot{D}_{1U}^* + \frac{C_{1U}^*}{M_{1U}^*} \dot{D}_{1U}^* + A_{1U}^* = -a_{gU} \quad (23)$$

同様に, 2 次モード応答に対して非線形領域で応答する場合でも m_{2U}^* が十分に小さいものとする式 (24)を得る。

$$\ddot{D}_{2V}^* + \frac{C_{2V}^*}{M_{2V}^*} \dot{D}_{2V}^* + A_{2V}^* = -a_{gV} \quad (24)$$

式(23)と式(24)が等価 1 自由度系モデルの非線形運動方程式である。単層偏心系モデルの 1 次モード形と等価 1 自由度系モデルの関係を図-6 に示す。図-6(a)に示すように慣性質量 m , 回転慣性質量 I の単層偏心系モデルの 1 次モード応答は点 O を回転の中心として回転振動しているものとする, これに対応する等価 1 自由度系モデルは図-6(b)に示すように点 O にてピンで接合された剛体の先端 A に質量 M_{1U}^* が集中し, 点 O に非線形回転バネがついたモデルとなっている。ここで, 重心から質量 M_{1U}^* までの距離を e_1 とすると図-6 より式(25)の関係が得られる。

$$\frac{\rho_1}{e_1 + \rho_1} = \beta_{1U} \phi_{U1} \quad (25)$$

ここで, $\beta_{1U} \phi_{U1}$ は単層偏心系モデルの固有モードの U 方向成分, ρ_1 は重心から回転中心 O までの距離でそれぞれ式(26), (27)で得られる。

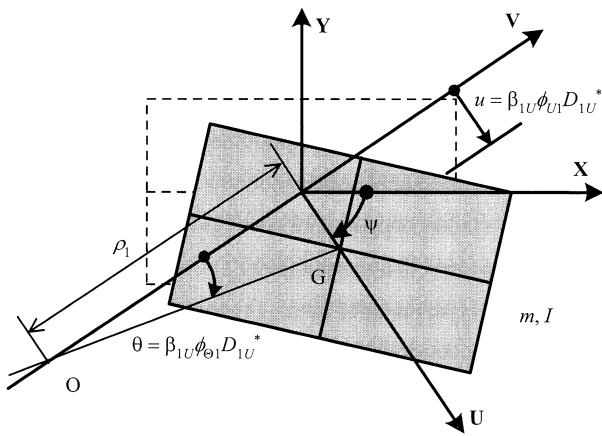
$$\beta_{1U} \phi_{U1} = \frac{(\phi_{X1} \cdot \cos \psi - \phi_{Y1} \cdot \sin \psi)^2}{\phi_{X1}^2 + \phi_{Y1}^2 + (r \cdot \phi_{\theta 1})^2} \quad (26)$$

$$\rho_1 = |\phi_{U1} / \phi_{\theta 1}| = |(\phi_{X1} \cdot \cos \psi - \phi_{Y1} \cdot \sin \psi) / \phi_{\theta 1}| \quad (27)$$

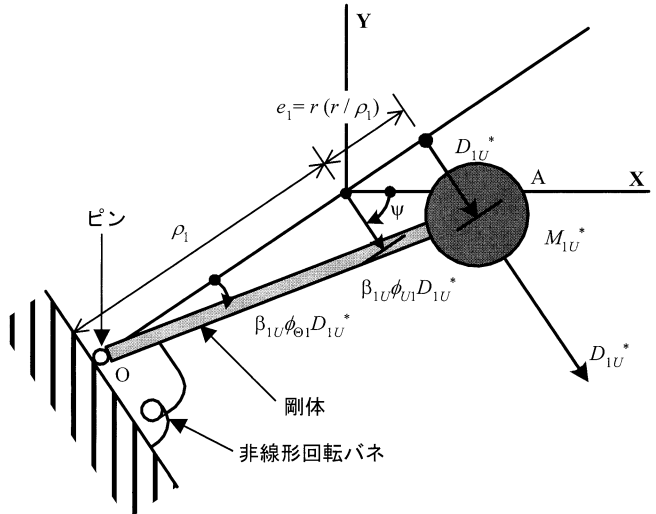
さらに, $\cos \psi$ および $\sin \psi$ は式(28)で与えられるため, 式(26)~(28)より式(29), (30)が得られる。

$$\cos \psi = \frac{\phi_{X1}}{\sqrt{\phi_{X1}^2 + \phi_{Y1}^2}}, \sin \psi = -\frac{\phi_{Y1}}{\sqrt{\phi_{X1}^2 + \phi_{Y1}^2}} \quad (28)$$

$$\beta_{1U} \phi_{U1} = \frac{\phi_{X1}^2 + \phi_{Y1}^2}{\phi_{X1}^2 + \phi_{Y1}^2 + (r \cdot \phi_{\theta 1})^2} \quad (29)$$



(a) 単層偏心系モデル (1 次モード形)



(b) 等価 1 自由度系モデル

図-6 等価 1 自由度系モデル

$$\rho_1 = |\phi_{U1}/\phi_{01}| = \left| \sqrt{\phi_{x1}^2 + \phi_{y1}^2} / \phi_{01} \right| \quad (30)$$

式(29)を式(25)に代入し、さらに式(30)を用いて整理すると式(31)を得る。

$$e_1 = r \cdot (r/\rho_1) \quad (31)$$

式(31)は、回転中心 O から単層偏心系モデルの重心までの距離 ρ_1 と単層偏心系モデルの重心から等価 1 自由度系モデルの質量 $M_1 v^*$ までの距離 e_1 とは逆比例の関係にあることを示している。すなわち、1 次モードが純並進振動である場合 ($\rho_1 = \infty$) には e_1 は 0 となり等価 1 自由度系モデルにおける質量 $M_1 v^*$ の位置は単層偏心系モデルの重心に一致する。また、1 次モードが純ねじれ振動 ($\rho_1 = 0$) の場合には $e_1 = \infty$ となる。以上のことは、本論文で議論する等価 1 自由度系モデルは文献 14) で示した 1 方向入力を受ける等価単層 1 軸偏心系モデルを対象とした場合に関する等価 1 自由度系モデルを 2 軸偏心系にも適用可能なように拡張したものであることを示している。

以上の定式化は線形領域でのモード形を用いて行ったが、単層系モデルが非線形領域で応答する場合にはモード形が著しく変動する可能性がある。本研究においては単層偏心系モデルにおける非線形領域での 1 次モード形は各要素の最大変形(正負両領域での大きい方の変形)に対する割線剛性により定め、これと直交するように 2 次モード形を定めるものとする (式(32), (33))。

$$\{\phi_2\} = \{\phi_{2e}\} - \left(\{\phi_1\}^T [M] \{\phi_{2e}\} / \{\phi_1\}^T [M] \{\phi_1\} \right) \cdot \{\phi_1\} \quad (32)$$

$$\beta_{2v} = \{\phi_2\}^T [M] \{\alpha_v\} / \{\phi_2\}^T [M] \{\phi_2\} \quad (33)$$

ここで、 $\{\phi_{2e}\}$ 、 $\{\phi_2\}$ はそれぞれ線形領域および非線形領域における 2 次モードベクトルである。本研究では、式(12)~(31)でのモード形 $\beta_{1v} \phi_1$ 、 $\beta_{2v} \phi_2$ は非線形領域では上記により定まるモード形に読み替えるものとする。なお、1 次モード形 $\beta_{1v} \phi_1$ の変化とともに 1 次等価質量比が最大となる方向は弾性時における方向から変動する可能性があるが、本論文ではこの変動は小さくて無視できる範囲を対象として、弾性時において 1 次等価質量比が最大となる方向に U 軸をとりこれに直交する方向に V 軸に取り、全応答時間を通じて固定するものとする。

4. 単層偏心系モデルの最大応答の推定

4.1 等価 1 自由度系モデルの非線形応答の推定

本節では、前章で定式化した等価 1 自由度系モデルの最大応答を等価線形化手法により推定し、単層偏心系モデルの応答時刻歴のモード分解により 1 次および 2 次モ

ードの等価変位 $D_1 v^*$ 、 $D_2 v^*$ および等価加速度 $A_1 v^*$ 、 $A_2 v^*$ の最大値 $D_1 v^*_{MAX}$ 、 $D_2 v^*_{MAX}$ および $A_1 v^*_{MAX}$ 、 $A_2 v^*_{MAX}$ を求めて比較を行う。

ここで、モード分解に用いるモード形は本来であれば時々刻々における各要素の等価剛性に対して固有値解析を行って定めるのが妥当であると考えられるが、本研究では文献 19) と同様に最大応答点に着目し、文献 11) で示した手法によりモード形の変動を考慮した静的漸増載荷解析を行い、その結果を用いてモード形を仮定するものとする。すなわち、非線形領域での 1 次モード形は上述のように U 方向に関する静的漸増載荷解析により定め、2 次モード形は 1 次モード形との直交性を満足するように定めるものとする。従って、厳密にはここで求める各モードの応答は真の固有モードの応答ではなく、モード形を仮定した参照モード系の応答である点に留意されたい。以下にその手順を示す。

- 1) モード形を $\beta_{1v} \phi_1$ と仮定し、式(14), (15)により $D_1 v^*$ 、 $A_1 v^*$ を求める。
- 2) $D_1 v^*_{MAX}$ に対応するステップを U 方向に関する静的漸増載荷解析結果より定め、当該ステップにおける変位分布を用いて新たなモード形 $\beta_{1v} \phi_1$ を仮定する。
- 3) 1) に戻って、再び $D_1 v^*$ 、 $A_1 v^*$ を求め、仮定したモード形が U 方向に関する静的漸増載荷解析において $D_1 v^*_{MAX}$ に対応するステップのモード形と等しくなるまで繰り返す。
- 4) 非線形領域における 2 次モード形 $\beta_{2v} \phi_2$ を式(32), (33)により定める。
- 5) 4) で定めた 2 次モード形 $\beta_{2v} \phi_2$ を用いて、 $D_2 v^*$ 、 $A_2 v^*$ を式(14), (15)により求める。

図-7 に U 方向に関する静的漸増載荷解析から得られた各モデルの 1 次モードの等価加速度 $A_1 v^*$ - 等価変位 $D_1 v^*$ 曲線と応答値の対応関係を示す。図-7 より、1 軸偏心である Model-A Series と Model-B Series に関しては、Model-A-W1 では $D_1 v^*_{MAX}$ が大きくなるにつれて静的漸増載荷解析結果による $A_1 v^*$ - $D_1 v^*$ 曲線と応答値との差異が見られるものの、他のモデルにおいては全般的に両者が非常に良好に対応していることがわかる。一方で、2 軸偏心である Model-C Series では、Model-A-W1 と同様に $D_1 v^*_{MAX}$ が大きくなるにつれて $A_1 v^*$ - $D_1 v^*$ 曲線と応答値との差異が見られるものの、Model-A-W1 と比べて両者の差異は小さいことがわかる。

図-7 において U 方向に関する静的漸増載荷解析結果から得られた $A_1 v^*$ - $D_1 v^*$ 曲線と応答値に差異が見られた要因の 1 つとして、2 方向の応答の同時性による影響が考えられる。そこで静的漸増載荷解析により、2 方向の応答の同時性が 1 次モードの最大等価加速度 $A_1 v^*_{MAX}$ の推定精度に及ぼす影響を検討する。モード分解において仮定したモード形 $\beta_{1v} \phi_1$ 、 $\beta_{2v} \phi_2$ を用いて、式(34)により 2 方向の応答の同時性を考慮した外力分布 $\{P_U\}$ を定

める。

$$\{P_U\} = [M] \left(\beta_{1U} \{\phi_1\} \cdot A_{1U}^* \text{MAX} + \gamma \cdot \beta_{2V} \{\phi_2\} \cdot A_{2V}^* \text{MAX} \right) \quad (34)$$

ここで、 γ は 2 方向の応答の同時性を考慮するための係数であり、 $-1 \leq \gamma \leq 1$ とする。ここで、U 方向の応答が最大値となる時刻での V 方向の応答の寄与分を 0 と仮定する場合には $\gamma = 0$ で前述の図-7 におけるケースに相当し、一方で U 方向と V 方向の応答の最大値が同時に生じると仮定する場合は $\gamma = \pm 1$ となる。ここでは、 γ の値を -1.0 から 1.0 まで 0.1 刻みで変化させて、各モデルにつき 19 ケースの外力分布を設定して静的漸増載荷解析を行う。静的漸増載荷解析は、式(14)より得られる D_{1U}^* がモード分解により得られた $D_{1U}^* \text{MAX}$ に達する点までを行い、当該ステップでの復元力ベクトルから式(15)により 1 次モードの等価加速度 A_{1U}^* を求め、モード分解から得られた応答値 $A_{1U}^* \text{MAX}$ と比較する。ここでは、図-7 において Model-A-W1 において $A_{1U}^* - D_{1U}^*$ 曲線と応答値との差が顕著となった JCode-TOH 波 (1.0 倍) での応答について検討を行った。

図-8 に各モデルにおける γ と $A_{1U}^* \text{MAX}$ の静的漸増載荷による推定値と応答値との比の関係を示す。図-8(a) において、1 軸偏心である Model-A-W1 では静的漸増載荷による推定値は γ の値により大きく変動し、 γ が 0 の場合には応答値の 1.2 倍と過大評価となる一方で、 γ が ± 0.6 では応答値と最も近い値が得られた。一方で、X 方向の耐力が大きい Model-A-W2 では推定値の γ による変動は小さく、 $|\gamma| \leq 0.7$ の範囲で推定結果は応答値とほぼ等しくなっている。また、図-8(b) において、Model-B Series では推定値の γ による変動は小さく、 $|\gamma| \leq 0.7$ の範囲で推定値は応答値とほぼ等しくなっている。この事は、Model-A-W1 では 2 方向の応答の同時性による A_{1U}^* への影響が比較的顕著となる一方で、Model-A-W2 と Model-B-W1, Model-B-W2 では 2 方向の応答の同時性による A_{1U}^* への影響が小さく、図-7 で示したように U 方向の応答が最大値となる時刻での V 方向の応答の寄与分を無視した静的漸増載荷解析の結果から $A_{1U}^* - D_{1U}^*$ 曲線を良好に推定できることを示している。一方で、2 軸偏心の Model-C Series では図-8(c) より明らかなように 1 軸偏心である Model-A Series, Model-B Series (図-8(a), (b)) と異なり γ の正負で非対称となり、推定値の γ による変動は大きい。しかしながら、 $\gamma = 0$ における静的漸増載荷による推定値は Model-C-W1, Model-C-W2 とともに応答値の 1.1 倍程度であり、前述の Model-A-W1 の場合と比べて応答値により近い値となった。以上の事は、図-7 での結果と対応するものとなる。なお、図-8 より、全てのモデルで $\gamma = \pm 1$ とした場合は応答値を過小評価することがわかる。この事は、 $\gamma = \pm 1$ では 2 方向の応答の同時性による影響が過大評価となる

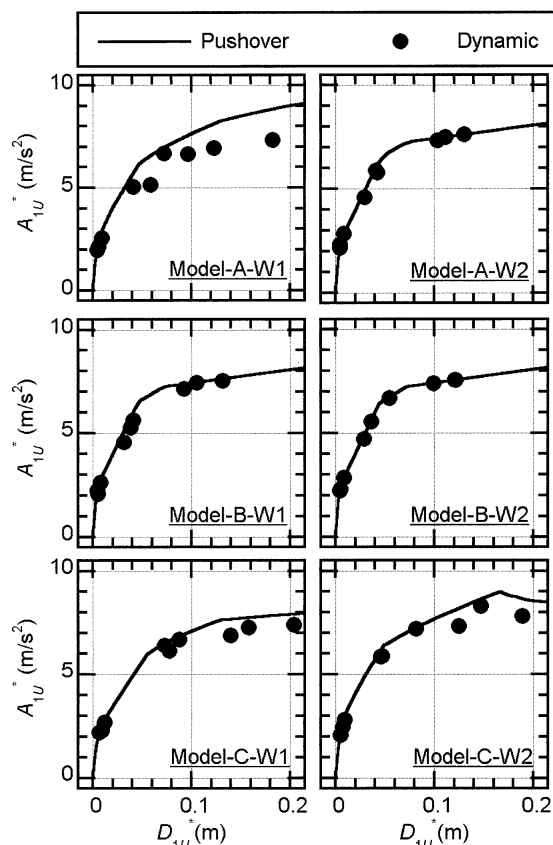


図-7 各モデルの 1 次モードの等価加速度—等価変位関係

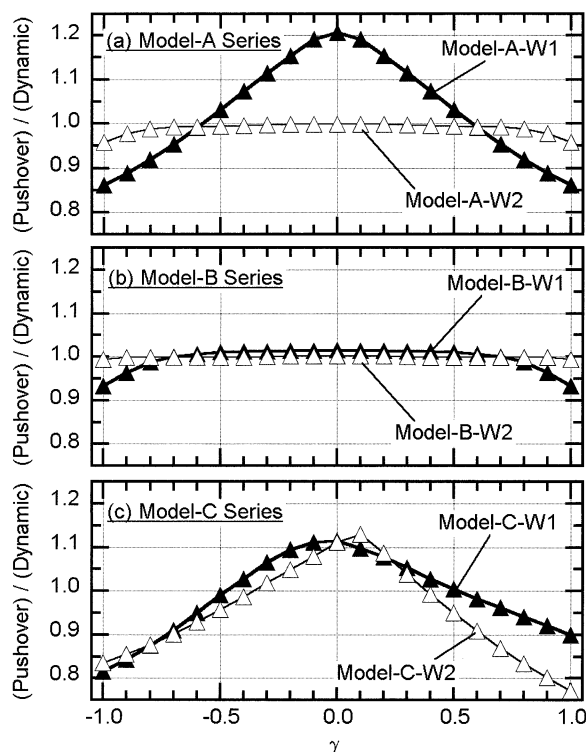


図-8 2 方向の応答の同時性による影響を考慮した静的漸増載荷解析による 1 次モードの最大等価加速度の推定事を示している。

次に、U 方向に関する静的漸増載荷解析により得られた $A_{1U}^* - D_{1U}^*$ 曲線を用いて文献 17) の等価線形化手法により等価 1 自由度系モデルの非線形応答の推定を行い、

モード分解により得られた最大等価変位 $D_{1U}^*_{MAX}$, $D_{2V}^*_{MAX}$ および最大等価加速度 $A_{1U}^*_{MAX}$, $A_{2V}^*_{MAX}$ との比較を行う。具体的な手順は以下の通りである。

- 1) U 方向に関する静的漸増荷解析を行い、式(14), (15)を用いて1次モードに関する等価1自由度系モデルの $A_{1U}^* - D_{1U}^*$ 曲線を求める。ここで、モード形 $\beta_{1U} \{ \phi_1 \}$ は各ステップでの変位分布を用いて仮定するものとする。
- 2) 文献 17) の等価線形化法により1次モードに関する等価1自由度系モデルの最大応答を推定する。等価1自由度系モデルの等価周期 T_{eq} , 等価粘性減衰定数 h_{eq} はそれぞれ式(35), (36)により定める。

$$T_{eq} = 2\pi \sqrt{D_{1U}^* / A_{1U}^*} \quad (35)$$

$$h_{eq} = \sum_i h_{eqi} \cdot W_i / \sum_i W_i \quad (36)$$

$$h_{eqi} = 0.25 \left(1 - 1/\sqrt{\mu_i} \right) + h_0 \quad (37)$$

ここで、 h_{eqi} は各構面要素の等価粘性減衰定数、 W_i は各構面要素のポテンシャルエネルギー、 μ_i は各構面要素の塑性率である。また、 h_0 は弾性時における減衰定数であり、ここでは3%と仮定した。なお、式(37)は曲げ破壊する RC 造部材を想定して剛性低下型バイリニアールモデルを仮定して得られたものであり²⁰⁾、Takeda モデルにおいてひび割れ点を無視して除荷剛性低下指数を0.5とした場合に相当する。また、等価粘性減衰定数による応答スペクトルの低減は式(38)¹⁷⁾で行うものとした。

$$F_h = 1.5 / (1 + 10 \cdot h_{eq}) \quad (38)$$

- 3) 非線形領域における2次モード形 $\beta_{2V} \{ \phi_2 \}$ を式(32), (33)により定める。次に $\beta_{2V} \{ \phi_2 \}$ に対応する外力分布を式(39)で定めて、一定の外力分布による静的漸増荷解析を行う。

$$\{ P_2 \} = [M] (\beta_{2V} \{ \phi_2 \}) \quad (39)$$

次に式(14), (15)を用いて2次モードに関する等価1自由度系モデルの $A_{2V}^* - D_{2V}^*$ 曲線を求める。

- 4) 2) と同様、等価線形化法により2次モードに関する等価1自由度系モデルの非線形応答の推定を行う。なお、2次モード応答の推定に際して、式(37)中の弾性時での減衰定数 h_0 はここでは簡便のため1次モードと同様3%と仮定した。

図-9 に等価1自由度系モデルの最大応答の推定結果をモード分解結果と比較して示す。図-9 より、全般的に最大等価変位 $D_{1U}^*_{MAX}$, $D_{2V}^*_{MAX}$ はやや安全側の評価となりかつばらつきが大きくなっているものの、全般的

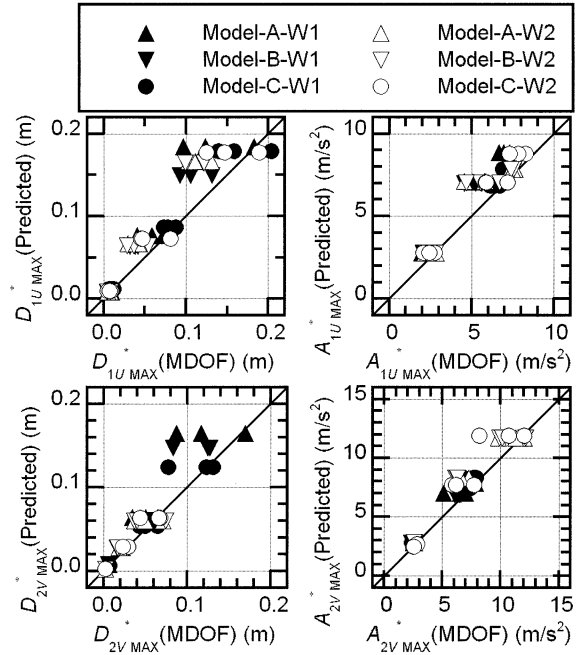


図-9 等価1自由度系モデルの最大応答の推定結果

に良好な推定結果となっていることがわかる。ここで、等価線形化手法は $D_{1U}^*_{MAX}$, $D_{2V}^*_{MAX}$ が全般的に安全側の評価となった要因としては、単層系モデルの時刻歴応答解析においては各要素の復元力特性としてひび割れ点を考慮した Tri-Linear 型の包絡線を設定しかつ Takeda モデルで除荷剛性低下係数を0.4とした一方で、式(37)ではひび割れ点を無視してさらに除荷剛性低下係数を0.5として各要素の等価粘性減衰 h_{eqi} を評価しているため、結果として h_{eq} を控えめに評価していること、および時刻歴応答解析では減衰を瞬間剛性比例型に仮定しているため2次モードの弾性時での減衰定数 h_0 は厳密には1次と2次の固有振動数に比例して3%より大きくなるものの等価線形化手法では簡便に1次モードと等しく3%としている点が挙げられる。

なお、図-7 に既に示したように、Model-A-W1 と Model-C-W1, Model-C-W2 ではU方向に関する静的漸増荷解析による $A_{1U}^* - D_{1U}^*$ 関係とモード分解結果との差異が生じている。加えて、2軸偏心系モデルの Model-C-W1, Model-C-W2 では、非線形領域での1次モード形の変動に伴い1次等価質量比が最大となる方向が弾性時から最大で9.5度、3.3度の変動している。しかしながら、上記の影響にもかかわらず Model-A-W1 および Model-C-W1, Model-C-W2 と他の1軸偏心系モデルと比較して応答推定精度に顕著な違いは見られない。従って、本論文で検討した範囲においては、上記の点が応答推定精度に及ぼす影響は小さいと考えられる。

4.2 単層偏心系モデルの各構面最大応答変位の推定

ここでは、水平2方向地震入力の影響を考慮した静的漸増荷解析により各構面最大応答変位の推定を行う。式(40), (41)により4種類の外力分布を定める。

$$\begin{cases} \{P_U\}^+ = [M] \left(\beta_{1U} \{\phi_1\} \cdot A_{1U}^* \text{MAX} + \gamma \cdot \beta_{2V} \{\phi_2\} \cdot A_{2V}^* \text{MAX} \right) \\ \{P_U\}^- = [M] \left(\beta_{1U} \{\phi_1\} \cdot A_{1U}^* \text{MAX} - \gamma \cdot \beta_{2V} \{\phi_2\} \cdot A_{2V}^* \text{MAX} \right) \end{cases} \quad (40)$$

$$\begin{cases} \{P_V\}^+ = [M] \left(\gamma \cdot \beta_{1U} \{\phi_1\} \cdot A_{1U}^* \text{MAX} + \beta_{2V} \{\phi_2\} \cdot A_{2V}^* \text{MAX} \right) \\ \{P_V\}^- = [M] \left(-\gamma \cdot \beta_{1U} \{\phi_1\} \cdot A_{1U}^* \text{MAX} + \beta_{2V} \{\phi_2\} \cdot A_{2V}^* \text{MAX} \right) \end{cases} \quad (41)$$

式(40), (41)の外力分布を用いた静的漸増載荷解析は, 式(40)の $\{P_U\}^+$, $\{P_U\}^-$ では式(42)における D_U^* が, 式(41)の $\{P_V\}^+$, $\{P_V\}^-$ では式(43)における D_V^* が, それぞれ前節の等価線形化手法により得られた $D_{1U}^* \text{MAX}$, $D_{2V}^* \text{MAX}$ に達するまで行う。

$$D_U^* = \beta_{1U} \{\phi_1\}^T [M] \{d\} / M_{1U}^* \quad (42)$$

$$D_V^* = \beta_{2V} \{\phi_2\}^T [M] \{d\} / M_{2V}^* \quad (43)$$

最後に, 4 種類の静的漸増載荷解析により求めた各構面変位で最も大きいものを推定結果とする。ここで, γ の値の仮定は各構面の最大応答変位を精度よく推定する上で重要な問題となる。文献 16)では, 単層 1 軸偏心系モデルが水平 2 方向地震入力を受ける場合を対象として, 2 方向の応答の同時性を無視した場合 ($\gamma = 0$) と U 方向と V 方向の応答の最大値が同時に生じると仮定する場合 ($\gamma = 1$) とこの中間として $\gamma = 0.5$ とした場合の 3 ケースで検討を行った。その結果, $\gamma = 0.5$ とした場合で全ての構面において最も妥当な推定結果が得られた。本論文ではこの検討結果をふまえて γ の値を全てのモデルで等しく 0.5 と仮定する。

図-10 に各モデルにおける各構面最大応答変位の推定結果を時刻歴応答解析結果と比較して示す。図-10 より, 各モデルとも各構面最大応答変位が全般的に安全側となりかつばらつきがあるものの概ね良好な推定結果が得られていることがわかる。ここで, 各構面最大応答変位が全般的に安全側の結果となった要因としては, 前節で既に述べたように最大等価変位 $D_{1U}^* \text{MAX}$, $D_{2V}^* \text{MAX}$ が等価線形化手法では安全側に評価されていることが挙げられる。

5. まとめ

本論文では, 文献 13), 14)の手法の拡張を目的として, 水平 2 方向地震入力を受ける単層 1 軸偏心系建物および単層 2 軸偏心系建物の非線形地震応答の推定を試みた。本論文で得られた知見を以下に記す。

- 1) 2 軸偏心を有する単層偏心系モデルの各次モードの等価質量に関して, 互いに直交する方向に関する等価質量の和が一定値となること, および各次モードの等価質量が最大となる方向と最小となる方向が直

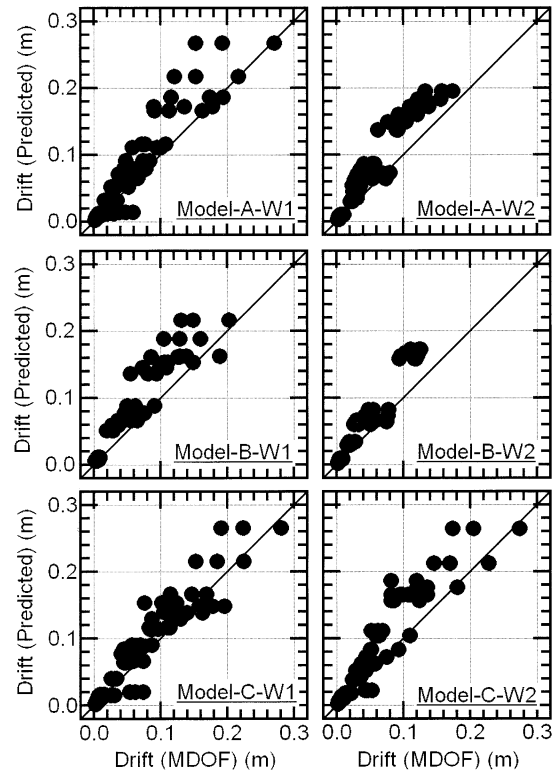


図-10 各モデルの各構面最大応答変位の推定

交していることを示した。次いで 1 次モードの等価質量が最大となる方向とこれに直交する方向に関して等価 1 自由度系モデルの非線形運動方程式を定式化した。本論文で定式化した等価 1 自由度系モデルは, 文献 14)で構面方向からの 1 方向地震入力を受ける 1 軸偏心系モデルを対象とした等価 1 自由度系モデルを拡張したものである。

- 2) 本論文で定式化した等価 1 自由度系モデルの最大応答を等価線形化法により求め, 単層偏心系モデルの各モード成分との比較を行った。その結果, 全般的に最大等価変位はやや安全側の評価となりかつばらつきが大きくなっているものの, 良好な推定結果が得られた。
- 3) 水平 2 方向地震入力の影響を考慮した静的漸増載荷解析による各構面最大応答変位の推定手法を示し, その妥当性を検証した。その結果として, 水平 2 方向入力における応答の同時性に関しては検討の余地を残しているものの, 本論文で示した手法により水平 2 方向地震入力を受ける単層 2 軸偏心系建物の最大応答変位を概ね推定可能であることを示した。

なお, 本論文では 1 次等価質量比が最大となる方向の変動は小さくて無視できると判断される範囲を対象として, 弾性時において 1 次等価質量比が最大となる方向に U 軸をとりこれに直交する方向に V 軸に取り, 全応答時間を通じて固定するものと仮定したが, 非線形領域での応答でこの変動が大きく前述の仮定が成立しない場合には本論文での応答推定手法の精度が著しく低下する可能

性がある。従って、1次等価質量比が最大となる方向が非線形領域で著しく変動する場合における応答推定精度に関しては今後の検討を要する。

参 考 文 献

- 1) Applied Technology Council: Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings (ATC-40), Report No. SCC96-01, Nov. 1996
- 2) Federal Emergency Management Agency: NHERP Guideline for the Seismic Rehabilitation of Buildings, FEMA-273, Oct. 1997
- 3) 建設省住宅局建築指導課：改正建築基準法法令集，2000.7
- 4) Fajfar, P., Fischinger, M.: N2-A Method for Non-Linear Seismic Analysis of Regular Buildings, Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering, Vol. V, pp. V-111-116, Aug. 1988
- 5) 倉本 洋，勅使川原 正臣，牡鹿 紀秀，五十田 博：多層建築物の等価1自由度系縮約法と地震応答予測精度，日本建築学会構造系論文集，第546号，pp.79-85，2001.8
- 6) Moghadam, A. S., Tso, W. K.: Damage Assessment of Eccentric Multistorey Building Using 3-D Pushover Analysis, Proceedings of Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, CD-ROM, Jul., 1996
- 7) Fajfar, P., Kilar, V., Marusic, D., Perus, I., Magliulo, G.: The Extension of the N2 Method to Asymmetric Buildings, Proceedings of the Fourth Forum on Implications of Recent Earthquakes on Seismic Risk, pp.291-308, 2002. 5.
- 8) 藤井 賢志，中埜 良昭，真田 靖士：単層1軸偏心建物の非線形応答評価法に関する研究，構造工学論文集，Vol.48B，pp.173-182，2002.3.
- 9) 藤井 賢志，中埜 良昭，真田 靖士：多層1軸偏心建物の非線形地震応答評価法に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 24，No. 2，pp.7-12，2002. 6.
- 10) 藤井 賢志，中埜 良昭，真田 靖士：多層1軸偏心建物の等価1自由度系への縮約，第11回日本地震工学シンポジウムCD-ROM論文集，Paper Ref. 378，2002. 11.
- 11) 藤井 賢志，中埜 良昭，真田 靖士：単層1軸偏心建物の非線形応答評価における直交方向構面の剛性低下の影響，構造工学論文集，Vol.49B，pp.221-234，2003.3.
- 12) 藤井 賢志：多層1軸偏心建物の非線形地震応答評価手法に関する研究，東京大学博士論文，2002. 12
- 13) 藤井 賢志，中埜 良昭，真田 靖士：一方向地震入力を受ける多層1軸偏心建物の非線形応答評価手法，コンクリート工学年次論文集，Vol. 25，pp. 7-12，2003. 7
- 14) Fujii, K., Nakano, Y. and Sanada, Y.: Simplified Nonlinear Analysis Procedure for Asymmetric Buildings, Proceedings of Thirteenth World Conference on Earthquake Engineering, Paper Ref. 149, Aug. 2004
- 15) 藤井 賢志，中埜 良昭，真田 靖士：水平2方向地震入力を受ける単層1軸偏心建物の各構面最大応答変位分布の推定，コンクリート工学年次論文集，Vol. 26，pp. 7-12，2004. 7
- 16) Fujii, K., Nakano, Y. and Sanada, Y.: Simplified Nonlinear Analysis Procedure for Asymmetric Buildings Subjected to Bi-Directional Ground Motion, Proceedings of the First International Conference on Urban Earthquake Engineering, CUEE, Tokyo Institute of Technology, pp. 97-104, March 2004
- 17) 国土交通省住宅局建築指導課：2001年度限界耐力計算法の計算例とその解説，2001. 3
- 18) Takeda, T., Sozen, M. P. and Nielsen, N. N.: Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes, Journal of Structural Division, Proceedings of the ASCE, pp. 2557-2573, Dec. 1970.
- 19) 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. 1
- 20) 柴田 明德：最新 耐震構造解析，森北出版，1981.6

(原稿受理日：2004年9月6日)

Equivalent SDOF Model for Asymmetric Buildings Subjected to Bi-Directional Ground Motion

By Kenji Fujii, Yoshiaki Nakano and Yasushi Sanada

Concrete Research and Technology, Vol. 16, No. 2, May 2005

Synopsis: A simplified procedure for single-story asymmetric building subjected to bi-directional ground motion is proposed. In this procedure, their responses are predicted through a nonlinear static analysis of MDOF model considering the effect of bi-directional excitations and an estimation of the nonlinear response of equivalent SDOF model. The results obtained by the proposed procedure are compared with the results obtained by the nonlinear dynamic analysis performed for simultaneous bi-directional ground motions. Their results are compared with the nonlinear dynamic analysis results, and satisfactory prediction can be found in nonlinear response of single-story asymmetric buildings.

Keywords: Bi-Directional Excitation, Single-Story Asymmetric Building, Equivalent SDOF Model, Equivalent Linearization Procedure, Pushover Analysis