

1 方向地震入力を受ける多層1軸偏心建物の各構面最大応答変位の推定手法

A SIMPLIFIED NONLINEAR ANALYSIS PROCEDURE FOR MULTI-STORY
ASYMMETRIC BUILDINGS

藤井賢志*, 中埜良昭**, 真田靖士***

Kenji FUJII, Yoshiaki NAKANO and Yasushi SANADA

A simplified nonlinear analysis procedure to predict earthquake responses of multi-story asymmetric buildings is presented and some examples are shown in this paper. In this procedure, their responses are predicted through a nonlinear static analysis of MDOF model and estimation of seismic demand of equivalent SDOF model, considering the change in the first mode shape at each nonlinear stage and the effect of the first and second mode contribution. The results show that the responses of multi-story asymmetric buildings can be satisfactorily predicted by the proposed procedure.

Keywords: asymmetric building, equivalent first modal mass ratio, equivalent SDOF model, equivalent linearization

偏心建物, 1次等価質量比, 等価1自由度系モデル, 等価線形化手法

1 はじめに

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^{1),2),3)}において, 想定した地震動に対する建物の非線形応答の推定は最も重要な項目の一つである. このための簡便な方法として, FEMA273ではNSP (Nonlinear Static Procedure)²⁾, 日本の改正建築基準法では限界耐力計算法³⁾に代表されるように, 主としてねじれを伴わない整形建物を対象として, 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ついては, 強震時に高次モード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がある事, 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前述の等価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地震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

偏心距離および弾力半径が等しいという条件を満足する多層1軸偏心建物(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)~13)}. 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の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),13)}. 文献12)にて著者らが示した手法の特徴は, 1)簡略化モデルとして等価単層1軸偏心系モデルを導入し, 多層1軸偏心系モデルを等価単層1軸偏心系モデルに縮約してから再度等価1自由度系モデルに縮約する, 2)各構面の塑性化の進展に伴うモード形の変動による影響を考慮して等価1自由度系モデルを作成する, 3)各構面の変位の推定において, 2種類の外力分布による静的漸増載荷解析を行いその結果を包絡することにより推定を行う, の3点である.

本論文では, 初めに文献12)で示した非線形地震応答推定手法の理論的背景について概説を行い, 特に偏心建物を縮約した等価1自由度系モデルと多層平面骨組を縮約した等価1自由度系モデルの関係に着目して議論を行う. 次いで, 既往の手法⁷⁾と文献12)で示した手法との応答推定精度の比較を行う.

2 等価単層1軸偏心系モデルと等価1自由度系モデルへの縮約

2.1 解析建物の仮定

本論文において扱う多層1軸偏心建物を図1に示す. 本論文で議論する非線形地震応答推定手法は以下の条件を満足する多層1軸偏心

* 東京工業大学 21世紀COE研究員・博士(工学)
** 東京大学生産技術研究所 助教授・工博
*** 東京大学地震研究所 助手・博士(工学)

Post-Doctoral Research Fellow, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.
Assoc. Prof., Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Dr. Eng.
Research Assoc., Earthquake Research Institute, University of Tokyo, Dr. Eng.

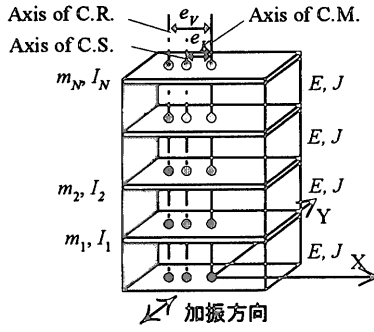


図1 多層せん断型1軸偏心系モデル

建物に適用するものとする。

- 1) 各階の平面形状が同一で回転半径 r が等しいと見なす事ができる。

$$r = \sqrt{I_1/m_1} = \sqrt{I_2/m_2} = \dots = \sqrt{I_N/m_N} \quad (1)$$

ここで、 m_i : 各階質量、 I_i : 各階回転慣性質量である。

- 2) 各階の重心が同一鉛直線上にある。
 3) 建物を構成する各構面が互いに直交する方向に配置されている。
 4) 各層の剛性偏心距離 e_x 、耐力偏心距離 e_y および重心に関する弾力半径 j が等しく、互いに直交する方向の剛性および耐力の比が等しい。
 5) 各層が概ね一様に塑性化するような耐力分布を有する。
 6) 式(2)で定義される1次等価質量比 m_1^* が十分に大きく、建物の応答において1次モード応答が支配的であると見なす事ができる。

$$m_1^* = M_1^* / \sum_{i=1}^N m_i = \beta_1^2 (\{\phi_1\}^T [M] \{\phi_1\}) / \sum_{i=1}^N m_i \quad (2)$$

ここで、 M_1^* は多層1軸偏心系モデルの1次等価質量、 $\beta_1 \{\phi_1\}$ は多層1軸偏心系モデルの1次モードの刺激関数、 $[M]$ は多層1軸偏心系モデルの質量マトリクス(式(3))である。

$$[M] = \begin{bmatrix} [m] & [0] \\ [0] & [I] \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$[m] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & m_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & m_N \end{bmatrix}, [I] = \begin{bmatrix} I_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & I_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & I_N \end{bmatrix} = r^2 \cdot [m] \quad (4)$$

本論文では、Y軸に対してのみ偏心を有する多層せん断型1軸偏心建物がY方向からの1方向地震入力を受ける場合を対象とする。

2.2 等価単層1軸偏心系モデルの非線形運動方程式⁹⁾

図1に示した多層せん断型1軸偏心系モデルの弾性固有円振動数 ω_k ・弾性固有モード $\{\phi_k\}$ はそれぞれ弾力半径比 $J (= j/r)$ 、偏心比 $E (= e_x/r)$ の等価単層1軸偏心系モデルの弾性固有円振動数 ω_n および弾性固有モード $\{\phi_n\}$ ($= \{\phi_{Tn}, \phi_{Zn}\}^T$) と、無偏心多層せん断系モデルの弾性固有円振動数 ω_{Sj} ・弾性固有モード $\{\phi_{Sj}\}$ の直積の形となる事が志賀により既に示されている¹⁴⁾ (式(5)~(8))。

$$\omega_k = \omega_n \cdot \omega_{Sj} \quad (5)$$

$$\{\phi_k\} = \{\phi_{Tn} \{\phi_{Sj}\}^T \quad \phi_{Zn} \{\phi_{Sj}\}^T\}^T \quad (6)$$

$$\begin{pmatrix} -\omega_n^2 \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & -E \\ -E & J^2 \end{bmatrix} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_{Tn} \\ \phi_{Zn} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (7)$$

$$(-\omega_{Sj}^2 [m] + [K_r]) \{\phi_{Sj}\} = \{0\} \quad (8)$$

ここで、等価単層1軸偏心系モデルの回転成分 Z について補足する。 z は回転角 θ に回転半径 r を乗じて基準化したものであり、固有モードの成分 ϕ_{Tzi} と ϕ_{Tzi} の関係は式(9)で表される。

$$\phi_{Tzi} = r \cdot \phi_{Tzi} \quad (9)$$

以下では無偏心多層せん断系モデルの弾性1次モード $\{\phi_{S1}\}$ は最上階成分が1.0となるように基準化し、等価単層偏心系モデルの弾性1次モード $\{\phi_{T1}\}$ はY方向成分が1.0となるように基準化するものとする。式(5)~(8)の関係より多層1軸偏心系モデルの弾性1次モード刺激係数 β_1 および1次等価質量比 m_1^* に関して式(10)、(11)の関係が得られる。

$$\beta_1 = \beta_{T1} \cdot \beta_{S1} \quad (10)$$

$$m_1^* = m_{T1}^* \cdot m_{S1}^* \quad (11)$$

ここで、 β_{S1} は無偏心多層せん断系モデルの弾性1次モード刺激係数、 β_{T1} は等価単層1軸偏心系モデルの弾性1次モード刺激係数、 m_{S1}^* は無偏心多層せん断系モデルの弾性1次等価質量比、 m_{T1}^* は等価単層偏心系モデルの弾性1次等価質量比であり、それぞれ式(12)~(14)で定義される。

$$\beta_{S1} = \frac{\{\phi_{S1}\}^T [m] \{1\}}{\{\phi_{S1}\}^T [m] \{\phi_{S1}\}}, \beta_{T1} = \frac{\phi_{T1}}{\phi_{T1}^2 + \phi_{Z1}^2} = \frac{\phi_{T1}}{\phi_{T1}^2 + (r \cdot \phi_{Tz1})^2} \quad (12)$$

$$m_{S1}^* = \frac{1}{\sum m} \cdot \beta_{S1} \{\phi_{S1}\}^T [m] \{1\} = \frac{1}{\sum m} \cdot \frac{(\{\phi_{S1}\}^T [m] \{1\})^2}{\{\phi_{S1}\}^T [m] \{\phi_{S1}\}} \quad (13)$$

$$m_{T1}^* = \beta_{T1} \cdot \phi_{T1} = \frac{\phi_{T1}^2}{\phi_{T1}^2 + (r \cdot \phi_{Tz1})^2} \quad (14)$$

既往の検討において、弾力半径比 J が1より大きい場合には m_{T1}^* が大きくなる⁹⁾。一方、7層以下で各階質量が等しく $\beta_{S1} \{\phi_{S1}\}$ が逆三角形となる場合には m_{S1}^* が0.8以上であり、層数による変動が小さい¹⁰⁾。従って、 m_1^* が大きくなるケースは J が大きい場合に対応する^{10), 13)}。

一方、1方向地震入力を受ける多層1軸偏心系モデルの非線形運動方程式は式(15)で表される。

$$\begin{bmatrix} [m] & [0] \\ [0] & [I] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{y\} \\ \{\phi\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C_{rr}] & [C_{r\theta}] \\ [C_{\theta r}] & [C_{\theta\theta}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{y\} \\ \{\phi\} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \{R_r\} \\ \{M_z\} \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} [m] & [0] \\ [0] & [I] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{1\} \\ \{0\} \end{Bmatrix} a_g \quad (15)$$

式(15)における変数は以下に示す通りである。

$$[C] = \begin{bmatrix} [C_{rr}] & [C_{r\theta}] \\ [C_{\theta r}] & [C_{\theta\theta}] \end{bmatrix} : \text{多層1軸偏心系モデルの減衰マトリクス}$$

$$\{R\} = \begin{Bmatrix} \{R_r\} \\ \{M_z\} \end{Bmatrix} : \text{多層1軸偏心系モデルの復元力ベクトル}$$

$$\{d\} = \begin{Bmatrix} \{y\} \\ \{\phi\} \end{Bmatrix} : \text{多層1軸偏心系モデルの変位ベクトル}$$

$$a_g : \text{地動加速度}$$

ここで、無偏心多層せん断系モデルの1次モード形 $\beta_{s1}\{\phi_{s1}\}$ は線形・非線形を問わず一定であると仮定し、変位ベクトル $\{d\}$ を式(6)より式(16)の形におく。

$$\{d\} = \begin{Bmatrix} \{y\} \\ \{\theta\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \beta_{s1}\{\phi_{s1}\} \\ \beta_{s1}\{\phi_{s1}\} \end{Bmatrix} \cdot Y_1^* \cdot \begin{Bmatrix} Y_1^* \\ \Theta_1^* \end{Bmatrix} \quad (16)$$

ここで、 Y_1^* 、 Θ_1^* はそれぞれ等価単層1軸偏心系モデルの等価重心変位、等価回転角である。式(16)を式(15)に代入する。

$$\begin{cases} [m]\beta_{s1}\{\phi_{s1}\} \cdot Y_1^* + [C_{rr}]\beta_{s1}\{\phi_{s1}\} \cdot Y_1^* + [C_{r\theta}]\beta_{s1}\{\phi_{s1}\} \cdot \Theta_1^* + \{R_r\} \\ = -[m]\{l\}a_g \\ [I]\beta_{s1}\{\phi_{s1}\} \cdot \Theta_1^* + [C_{\theta r}]\beta_{s1}\{\phi_{s1}\} \cdot Y_1^* + [C_{\theta\theta}]\beta_{s1}\{\phi_{s1}\} \cdot \Theta_1^* + \{M_z\} \\ = \{0\} \end{cases}$$

両辺の左側より $\beta_{s1}\{\phi_{s1}\}^T$ を掛けて整理すると、等価単層1軸偏心系モデルの非線形運動方程式(式(17))を得る。

$$\begin{bmatrix} M_{r1}^* & 0 \\ 0 & I_{r1}^* \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{Y}_1^* \\ \ddot{\Theta}_1^* \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{rr1}^* & C_{r\theta1}^* \\ C_{\theta r1}^* & C_{\theta\theta1}^* \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{Y}_1^* \\ \dot{\Theta}_1^* \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} V_r^* \\ T_z^* \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} M_{r1}^* & 0 \\ 0 & I_{r1}^* \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix} a_g \quad (17)$$

式(17)における変数は以下の通りである。

$$M_{r1}^* = \beta_{s1}\{\phi_{s1}\}^T [m] \{l\} \quad (18)$$

$$I_{r1}^* = \beta_{s1}\{\phi_{s1}\}^T [I] \{l\} = r^2 \cdot M_{r1}^* \quad (19)$$

$$\begin{bmatrix} C_{rr1}^* & C_{r\theta1}^* \\ C_{\theta r1}^* & C_{\theta\theta1}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta_{s1}^2\{\phi_{s1}\}^T [C_{rr}]\{\phi_{s1}\} & \beta_{s1}^2\{\phi_{s1}\}^T [C_{r\theta}]\{\phi_{s1}\} \\ \beta_{s1}^2\{\phi_{s1}\}^T [C_{\theta r}]\{\phi_{s1}\} & \beta_{s1}^2\{\phi_{s1}\}^T [C_{\theta\theta}]\{\phi_{s1}\} \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\begin{Bmatrix} Y_1^* \\ \Theta_1^* \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \beta_{s1}\{\phi_{s1}\}^T [m]\{y\}/M_{r1}^* \\ \beta_{s1}\{\phi_{s1}\}^T [I]\{\theta\}/I_{r1}^* \end{Bmatrix}, \begin{Bmatrix} V_r^* \\ T_z^* \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \beta_{s1}\{\phi_{s1}\}^T \{R_r\} \\ \beta_{s1}\{\phi_{s1}\}^T \{M_z\} \end{Bmatrix} \quad (21)$$

ここで、 M_{r1}^* 、 I_{r1}^* は等価単層1軸偏心系モデルの等価質量、等価回転慣性質量である。等価単層1軸偏心系モデルの各構面要素の等価復元力 V_{xi}^* 、 V_{ni}^* および等価変位 d_{xi}^* 、 d_{ni}^* と多層1軸偏心系モデルでの各構面の復元力ベクトル $\{R_{xi}\}$ 、 $\{R_{ni}\}$ および変位ベクトル $\{d_{xi}\}$ 、 $\{d_{ni}\}$ の関係はそれぞれ式(22)、(23)により表される。

$$V_{xi}^* = \beta_{s1}\{\phi_{s1}\}^T \cdot \{R_{xi}\}, V_{ni}^* = \beta_{s1}\{\phi_{s1}\}^T \cdot \{R_{ni}\} \quad (22)$$

$$d_{xi}^* = \beta_{s1}\{\phi_{s1}\}^T [m]\{d_{xi}\}/M_{r1}^*, d_{ni}^* = \beta_{s1}\{\phi_{s1}\}^T [m]\{d_{ni}\}/M_{r1}^* \quad (23)$$

等価単層1軸偏心系モデルの各構面要素の等価復元力一等価変位関係は、変位分布を $\beta_{s1}\{\phi_{s1}\}$ に仮定して各構面を独立に静的漸増荷荷解析を行い、その結果を式(22)、(23)により $\{R_{xi}\}$ 、 $\{R_{ni}\}$ 、 $\{d_{xi}\}$ 、 $\{d_{ni}\}$ を V_{xi}^* 、 V_{ni}^* 、 d_{xi}^* 、 d_{ni}^* に変換することによって得られる。

2.3 等価1自由度系モデルの非線形運動方程式

式(17)の等価単層1軸偏心系モデルの運動方程式において、等価単層1軸偏心系モデルの応答は線形・非線形を問わず1次モード応答が支配的であると仮定して等価単層1軸偏心系モデルの重心変位ベクトル $\{Y_1^*, \Theta_1^*\}^T$ と等価復元力ベクトル $\{V_r^*, T_z^*\}^T$ を式(24)の形におく。

$$\begin{Bmatrix} Y_1^* \\ \Theta_1^* \end{Bmatrix} = \beta_{r1} \begin{Bmatrix} \phi_{r1} \\ \phi_{\theta1} \end{Bmatrix} \cdot D_1^*, \begin{Bmatrix} V_r^* \\ T_z^* \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{r1}^* & 0 \\ 0 & I_{r1}^* \end{bmatrix} \beta_{r1} \begin{Bmatrix} \phi_{r1} \\ \phi_{\theta1} \end{Bmatrix} \cdot A_1^* \quad (24)$$

ここで、 D_1^* は等価1自由度系モデルの等価変位、 A_1^* は等価1自由度系モデルの等価加速度、 $\beta_{r1}\{\phi_{r1}\} = \beta_{r1}\{\phi_{r1}, \phi_{\theta1}\}^T$ は等価単層1軸偏心系モデルの1次モード形である。式(17)に式(24)を代入し、さらに両辺の左側より $\beta_{r1}\{\phi_{r1}\}^T$ を掛けて整理すると、等価1自由度系モデルの非線形運動方程式(式(25))を得る。

$$\ddot{D}_1^* + \frac{C_1^*}{M_1^*} \cdot \dot{D}_1^* + A_1^* = -a_g \quad (25)$$

ここで、 M_1^* は等価1自由度系モデルの1次等価質量、 C_1^* は等価1自由度系モデルの等価減衰係数であり、それぞれ式(26)、(27)で定義される。

$$M_1^* = \beta_{r1}^2 \begin{Bmatrix} \phi_{r1} \end{Bmatrix}^T \begin{bmatrix} M_{r1}^* & 0 \\ 0 & I_{r1}^* \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_{r1} \end{Bmatrix} \quad (26)$$

$$C_1^* = \beta_{r1}^2 \begin{Bmatrix} \phi_{r1} \end{Bmatrix}^T \begin{bmatrix} C_{rr1}^* & C_{r\theta1}^* \\ C_{\theta r1}^* & C_{\theta\theta1}^* \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_{r1} \end{Bmatrix} \quad (27)$$

以上の定式化は弾性1次モード形を用いて行ったが、等価単層1軸偏心系モデルが非線形領域で応答する際にはモード形が著しく変動する可能性がある。本研究においては等価単層1軸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まるものとし、式(24)~(27)での1次モード形 $\beta_{r1}\{\phi_{r1}\}$ は非線形領域では割線剛性により定まるモード形に読み替えるものとする。ここで、等価単層1軸偏心系モデルの静的漸増荷荷解析において各ステップの変位分布が非線形領域での1次モード形と相似であるとすると、等価加速度 A_1^* と等価変位 D_1^* および1次等価質量 M_1^* は式(28)~(30)より求まる。

$$A_1^* = \frac{1}{M_1^*} \beta_{r1}\{\phi_{r1}\}^T \begin{Bmatrix} V_r^* \\ T_z^* \end{Bmatrix} = \left\{ 1 + \left(\frac{\Theta_1^*}{Y_1^*} \right) \cdot \left(\frac{T_z^*}{V_r^*} \right) \right\} \frac{V_r^*}{M_{r1}^*} \quad (28)$$

$$D_1^* = \frac{1}{\beta_{r1}} \cdot Y_1^* = \left\{ 1 + \frac{I_{r1}^*}{M_{r1}^*} \cdot \left(\frac{\Theta_1^*}{Y_1^*} \right)^2 \right\} \cdot Y_1^* \quad (29)$$

$$M_1^* = \frac{1}{1 + (I_{r1}^*/M_{r1}^*) \cdot (\Theta_1^*/Y_1^*)^2} \cdot M_{r1}^* \quad (30)$$

ここで、式(28)~(30)は多層平面骨組に関して倉本らが示した式⁹⁾と等価なものであり、文献(11)に示す手法等を用いて非線形領域でのモード形の変動を考慮した等価単層1軸偏心系モデルの静的漸増荷荷解析により等価1自由度系モデルの $A_1^* - D_1^*$ 関係を得る事ができる。

等価単層1軸偏心系モデルの1次モード形と等価1自由度系モデルの関係を図2に示す。図2(a)に示すように等価質量 M_{r1}^* 、等価回転慣性質量 I_{r1}^* となる等価単層1軸偏心系モデルの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2(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_1^* が集中し、点Oに非線形回転バネがついたモデルとなる。ここで、重心から質量 M_1^* までの距離を e_1 とすると、図2より式(31)の関係式が得られる。

$$\rho_1/(e_1 + \rho_1) = \beta_{T1}\phi_{T1} \quad (31)$$

ここで、 ρ_1 は重心から回転中心までの距離であり、式(32)により定義される。また、等価単層1軸偏心系モデルの刺激関数 $\beta_{T1}\{\phi_{T1}\}$ は、式(14)と式(32)より式(33)の形となる。式(33)を式(31)に代入して整理すると式(34)を得る。

$$\rho_1 = |\phi_{T1}/\phi_{Te1}| \quad (32)$$

$$\beta_{T1}\phi_{T1} = \frac{\phi_{T1}^2}{\phi_{T1}^2 + (r \cdot \phi_{Te1})^2} = \frac{1}{1 + (r \cdot \phi_{Te1}/\phi_{T1})^2} = \frac{1}{1 + (r/\rho_1)^2} \quad (33)$$

$$e_1 = r \cdot (r/\rho_1) \quad (34)$$

式(34)は、回転中心Oから重心までの距離 ρ_1 と重心から質量 M_1^* までの距離を 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($\rho_1 = \infty$)には重心から質量 M_1^* までの距離を e_1 は0となり質量 M_1^* の位置は重心と一致する。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。

式(34)は以下のようにしても得る事ができる。図2(a)において点Oに関するモーメント M_{Oa} は式(24)より式(35)で表される。また、図2(b)において点Oに関するモーメント M_{Ob} は式(36)で表される。

$$M_{Oa} = M_{T1}^* \cdot \beta_{T1}\phi_{T1} \cdot A_1^* \cdot \rho_1 + I_{T1}^* \cdot \beta_{T1}\phi_{Te1} \cdot A_1^* \quad (35)$$

$$M_{Ob} = M_1^* \cdot A_1^* \cdot (\rho_1 + e_1) \quad (36)$$

式(35)と式(36)を等しいとおき、さらに式(19)、(26)、(32)を用いて整理すると式(34)を得る。ここで、式(36)は回転中心Oに関するモーメントは1次等価質量 M_1^* と等価加速度 A_1^* の積、すなわちベースシアアの1次モード成分と回転中心Oから質量 M_1^* までの距離($\rho_1 + e_1$)の積である事を示している。一方で多層平面骨組の振動において、転倒モーメントの1次モード成分はベースシアアの1次モード成分と1次モードに関する等価高さ H_1^* の積で表される¹⁵⁾。従って、回転中心Oから質量 M_1^* までの距離($\rho_1 + e_1$)は多層平面骨組の振動における等価高さ H_1^* と力学的に等価である事がわかる。

3 等価1自由度系による非線形地震応答推定手法の流れ

3.1 本研究で提案する非線形地震応答推定手法

等価1自由度系による非線形地震応答推定手法の流れは以下に述べる。詳細は文献12)を参照されたい。

- STEP1** 各構面の静的漸増载荷解析と等価単層1軸偏心系モデルの作成
- STEP2** 等価単層1軸偏心系モデルの静的漸増载荷解析と等価1自由度系モデルの作成
- STEP3** 等価1自由度系モデルの非線形応答の推定
- STEP4** 等価単層1軸偏心系モデルの応答の推定
- STEP5** 各構面の層間変位の推定

ここで、STEP4での等価単層1軸偏心系モデルの応答の推定においては文献11)の知見に基づき、1次モードによる静的漸増载荷解析と簡略化したモード直和外力による静的漸増载荷解析を併用して各構面の等価変位を推定するものとする。なお、本論文ではSTEP3における等価1自由度系モデルの非線形応答の推定は時刻歴応答解析を行

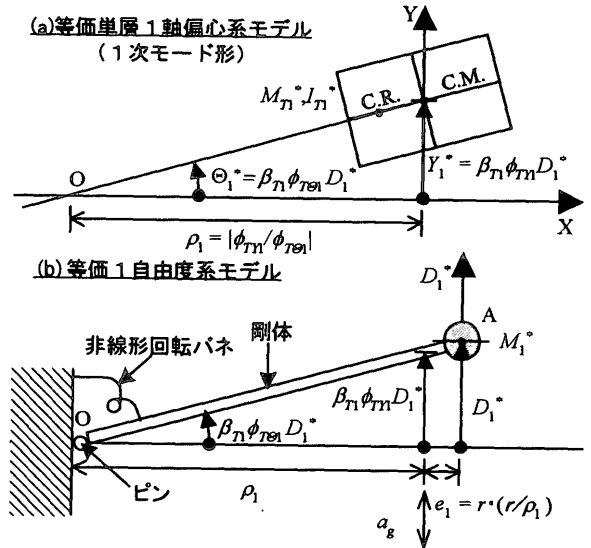


図2 等価1自由度系モデル

わず、文献16)に示されている等価線形化手法により行うものとする。本論文では、等価1自由度系モデルの等価加速度 A_1^* —等価変位 D_1^* 関係は、最上階での重心変位が建物高さの1/100の点において履歴吸収面積が等しくなるように完全弾塑性型に置換するものとし、等価1自由度系の等価減衰定数 h_{eq} は式(37)により定めるものとする。

$$h_{eq} = 0.25 \left(1 - 1/\sqrt{\mu_{SDOF}} \right) + h_0 \quad (37)^{16)}$$

ここで、 μ_{SDOF} は等価1自由度系モデルの塑性率であり、 A_1^* — D_1^* 関係を完全弾塑性型に置換した時の折れ点を降伏変位として求めた。 h_0 は弾性時における減衰定数である。ここでは、 h_0 は3%と設定した。なお、式(37)は曲げ破壊する鉄筋コンクリート造(以下RC造と表記)部材を想定して、ひび割れを無視した剛性低下型パイリニアールモデルを仮定して得られたものであり^{16),17)}、以下のRC造建物を想定した解析例で用いるのは妥当であると判断した。

3.2 N2 methodと本研究での提案する手法との比較

P. Fajfarらは多自由度系モデルの非線形地震応答を等価1自由度系モデルの非線形応答解析と多自由度系モデルの静的漸増载荷解析により推定するN2 method¹⁴⁾を提案した。ここでは、文献12)の手法とN2 methodの相違点を以下に列挙する。

第1の相違点は、多自由度系モデルの静的漸増载荷解析の方法である。すなわち、N2 methodでは多層立体モデルを直接用いて、単一かつ一定の外力分布を用いて静的漸増载荷解析を行うため、多層立体モデルの静的漸増载荷解析を必要とし、また塑性化の進展に伴うモード形の変動は考慮されない。N2 methodでは多層立体モデルの静的漸増载荷解析で用いられる外力分布{P}を式(38)で仮定する。

$$\{P\} = [M]\{\Phi\} = \begin{bmatrix} [M] & [0] \\ [0] & [I] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\Phi_r\} \\ \{\Phi_\theta\} \end{Bmatrix} \quad (38)$$

ここで $\{\Phi\}$ は仮定した変位分布である。ここで簡略化のため回転成分 $\{\Phi_\theta\}$ を無視して $\{0\}$ とおくと、 $\{P\}$ は式(39)により定まる。

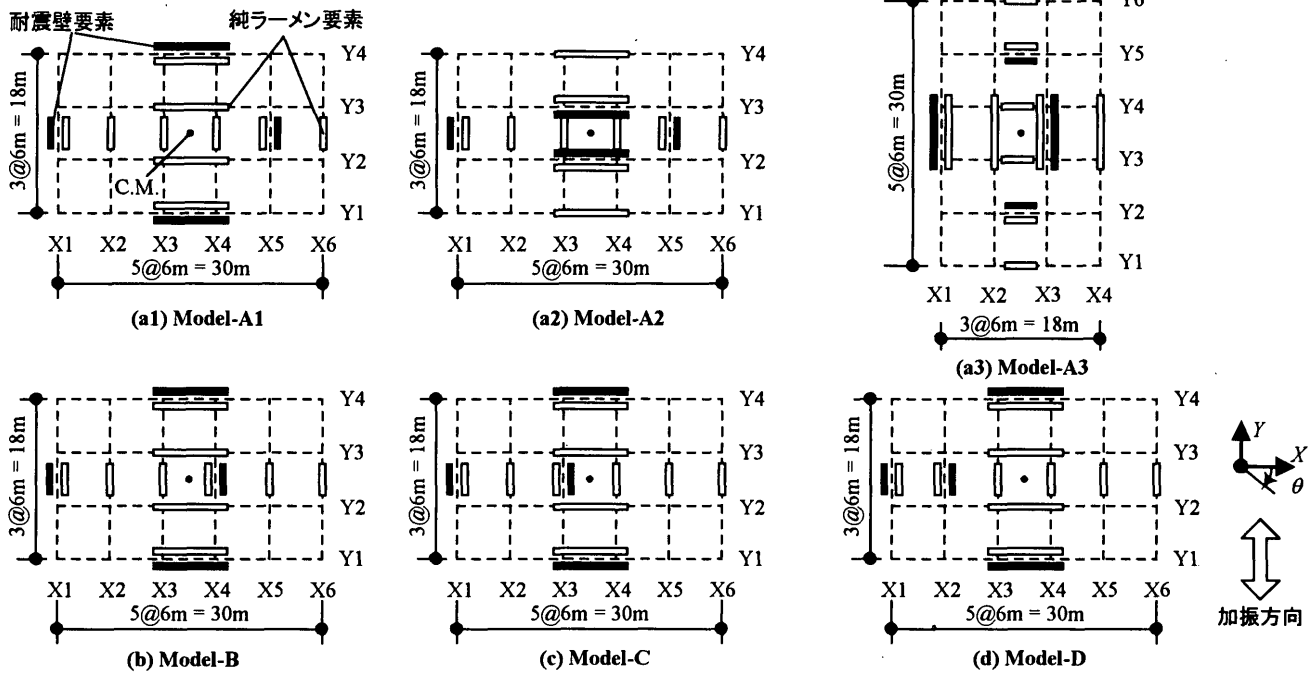


図 3 解析建物モデルの平面図

$$\{P\} = [M]\{\Phi\} = \begin{bmatrix} [M] & [0] \\ [0] & [I] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\Phi_r\} \\ \{\theta\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} [M]\{\Phi_r\} \\ \{\theta\} \end{Bmatrix} \quad (39)$$

式(39)は、外力としては重心に水平力のみを作用させる事を示している点に留意されたい。P. Fajfar ら⁷⁾は式(39)による外力分布を用いて静的漸増載荷解析を行っている。

第2の相違点は、N2 Methodにおいては等価1自由度系モデルの作成に際してモード形の変動を無視している点である。N2 Methodでは、等価1自由度系モデルの等価変位 D_1^* 、等価加速度 A_1^* は最上階重心変位 y_N 、ベースシア V_N と式(40)により関係づけられている。

$$D_1^* = y_N / \Gamma, A_1^* = V_N / (\Gamma m^*) \quad (40)$$

ここで、式(40)における Γ は刺激係数に、 Γm^* は等価質量に相当し、変位分布 $\{\Phi\}$ の回転成分 $\{\Phi_\theta\}$ を無視した場合は式(41)より定まる。

$$\Gamma = \frac{\{\Phi_r\}^T [m] \{1\}}{\{\Phi_r\}^T [m] \{\Phi_r\}}, \Gamma m^* = \frac{(\{\Phi_r\}^T [m] \{1\})^2}{\{\Phi_r\}^T [m] \{\Phi_r\}} \quad (41)$$

式(39)、(41)より、N2 Methodでは変位分布 $\{\Phi\}$ の仮定が応答推定精度に最も影響を与えることが推察される。

4 解析諸元

4.1 解析建物モデル

解析対象は図3に示す6種類の平面形状のせん断型多層1軸偏心建物モデルとした。平面形状は各階で同一とし、層数は低層建物を想定して4層とした。建物の階高は全て等しく3.60m、建物の各階の慣性質量 m と回転慣性質量 I は全ての階で等しく648ton、 $6.61 \times 10^4 \text{ton} \cdot \text{m}^2$ とした。建物の降伏ベースシア係数は、加振方向であるY方向、加振直交方向であるX方向ともに0.6とし、各構面に図4に示す復元力

特性を有する純ラーメン要素、耐震壁要素が配置されているものと仮定した。各層の降伏耐力 V_i は式(42)で定めた。

$$V_i = \frac{N+i}{N+1} \cdot 0.6 \cdot \left(\sum_{j=1}^N m \right) \cdot g \quad (42)$$

ここで、 N は層数、 i は対象層、 g は重力加速度($=9.8 \text{m/s}^2$)である。純ラーメン要素と耐震壁要素の降伏耐力は、X、Y方向ともに純ラーメン要素は合計で $1/3 V_i$ とし、耐震壁要素では合計で $2/3 V_i$ とした。各要素の復元力特性は曲げ破壊型のRC部材の挙動を想定してTakedaモデル¹⁸⁾を用いた。なお、全モデルにおいて全層で弾力半径比 J と偏心比 E の値は同一となり、偏心を無視した場合の1次モード形は逆三角形となる。表1に各モデルのパラメータとして、弾力半径比 J 、偏

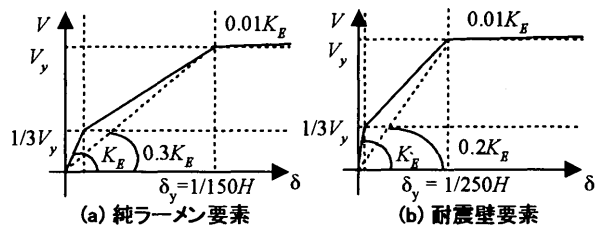


図 4 各要素の復元力特性

表 1 各モデルの各パラメータ

	J	E	$Re^{19)}$	$T_1(s)$	$T_2(s)$	m_1^*
Model-A1	1.469	0.248	0.171	0.252	0.165	0.800
Model-A2	1.252	0.248	0.202	0.258	0.190	0.731
Model-A3	1.129	0.248	0.225	0.266	0.206	0.619
Model-B	1.365	0.495	0.389	0.279	0.170	0.690
Model-C	1.365	0.743	0.649	0.324	0.162	0.626
Model-D	1.469	0.913	0.990	0.374	0.153	0.627

表 2 模擬地震動の一覧

実記録	模擬地震動	模擬地震動の 最大加速度 (m/s ²)	模擬地震動の 最大速度 (m/s)
ELC	JCode-ELC	5.703	0.790
TAF	JCode-TAF	6.064	0.728
HAC	JCode-HAC	5.210	0.647
TOH	JCode-TOH	5.676	0.970
JKB	JCode-JKB	6.507	0.890
FKI	JCode-FKI	5.892	0.953

心比 E 、基準法における偏心率 $Re^{19)}$ と固有周期 T_1, T_2 、1 次等価質量比 m_1^* を示す。表 1 より明らかなように、各モデルの 1 次等価質量比 m_1^* は 0.619~0.800 の範囲となっており、2.1 で述べた条件 6) を満足して 1 次モード応答の寄与分が大きいモデルとなっている。

4.2 入力地震動

入力地震動は Y 方向からの 1 方向入力とした。入力地震動は告示で規定された設計用応答スペクトル (減衰定数 $h=5\%$) に適合するように作成した模擬地震動とした¹⁶⁾。入力レベルは極めて稀に生じる地震動とし、地盤を第 2 種地盤と仮定して告示に示す地盤増幅を G_s により考慮した。模擬地震動の位相特性は El Centro 1940NS (ELC), Taft 1952NS (TAF), Hachinohe 1968EW (HAC), Tohoku Univ. 1978NS (TOH), JMA Kobe 1995NS (JKB), Fukiiai 1995 N30E (FKI) の位相特性を用い、継続時間は 40.96s とした。作成した模擬地震動の一覧を表 3 に、加速度応答スペクトル (減衰定数 $h=5\%$) を図 5 に示す。

4.3 解析ケース

4.3.1 多層 1 軸偏心系モデルによる非線形時刻歴応答解析

数値積分法は Newmark- β 法 ($\beta=1/4$) 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。

4.3.2 簡便な手法による非線形応答の推定

等価 1 自由度系モデルによる非線形応答の推定は 3 種類の方法により行う。Case 1 は、P. Fajfar らによる N2 method である。Case 1 において仮定する変位分布 $\{\Phi\}$ ($=\{\{\Phi_Y\}^T, \{\Phi_\Theta\}^T\}^T$) は、 $\{\Phi_Y\}$ は逆三角形分布、 $\{\Phi_\Theta\}$ は $\{0\}$ と仮定した。次の Case 2 は、Case 1 と同様であるが、仮定する変位分布 $\{\Phi\}$ として弾性時の 1 次モード形を用いた。すなわ

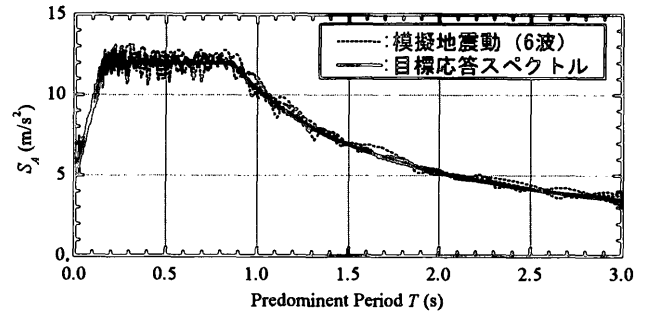


図 5 模擬地震動の加速度応答スペクトル

ち Case 2 では、 $\{\Phi\}$ の回転成分 $\{\Phi_\Theta\}$ は $\{0\}$ とはならないため、静的漸増荷重解析における外力分布 $\{P\}$ は式(39)より定める。また、式(40)における Γ および、 Γm^* は式(41)の代わりに式(43)より定めた。

$$\Gamma = \frac{\{\Phi_Y\}^T [m] \{1\}}{\{\Phi_Y\}^T [m] \{\Phi_Y\} + \{\Phi_\Theta\}^T [I] \{\Phi_\Theta\}}, \Gamma m^* = \frac{(\{\Phi_Y\}^T [m] \{1\})^2}{\{\Phi_Y\}^T [m] \{\Phi_Y\} + \{\Phi_\Theta\}^T [I] \{\Phi_\Theta\}} \quad (43)$$

最後の Case 3 は、本研究により提案する非線形応答推定手法である。なお、いずれの Case においても等価 1 自由度系モデルの非線形応答の推定は、3.1 で前述した等価線形化手法¹⁶⁾にて行った。

5 推定精度の比較

図 6 に多層 1 軸偏心系モデルによる時刻歴応答解析結果 (平均 μ , 標準偏差 σ) と各ケースにおける最上階での各構面の最大応答変位の推定結果を示す。図 6 より以下の点が指摘できる。まず Case 1 では、いずれのモデルにおいても Y 方向の構面では概ね時刻歴応答解析結果の平均を大きめに評価している一方で、X 方向の構面では 0.307~1.08 倍と過小評価となっている。次に Case 2 では、Model-A1 以外のモデルで Y 方向の剛側構面 (構面 X1) の変位を過小評価しており時刻歴応答解析結果の平均の 0.143~1.26 倍となる一方で、柔側構面 (Model-A3 では構面 X4, 他のモデルでは構面 X6) では 1.16~1.49 倍となっている。また、X 方向の構面では Model-A3 では 5.48 倍と著しく過大評価となっている一方で他のモデルでは 1.23~1.84 倍となっている。Case 2 において Y 方向剛側構面の変位を過小評価した要因は、文献 11) で既に指摘したように剛側構面では 2 次モード応答の影響が

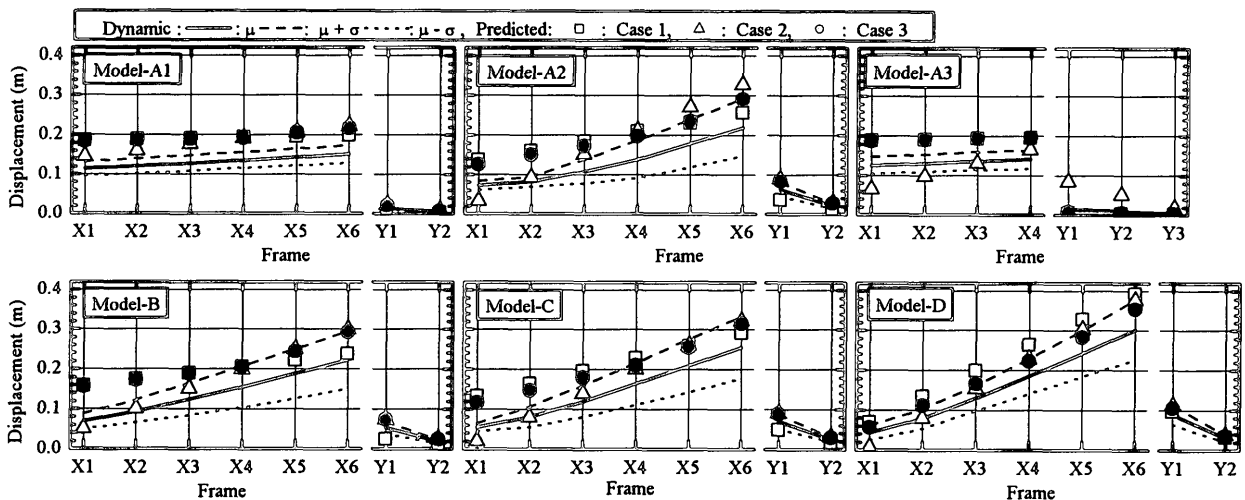


図 6 最上階での各構面の最大応答変位推定の結果

顕著となり、1次モード応答のみによる評価では過小評価となるためである。最後の Case 3 では、いずれのモデルにおいても Y 方向の剛側構面では時刻歴応答解析結果の平均の 1.32~2.26 倍と過大評価する傾向がある一方で、柔側構面では 1.17~1.43 倍となっている。一方で、加振直交方向である X 方向の構面では Model-A3 では 0.534 倍と過小評価となっているものの、他のモデルでは 1.17~1.67 倍となっている。以上により、3つの推定結果のうちで Case 3 が全ての構面において最も安定した精度の推定結果となった。

なお、STEP 3 において、等価線形化手法により推定された等価 1 自由度系モデルの応答は、別途行った等価 1 自由度系モデルの時刻歴応答解析結果を概ね大きめに評価する結果となった。従って、図 6 において大きめに評価される結果となったのは文献 16) の等価線形化手法による等価 1 自由度系の応答精度によるものであると思われる。

図 7 に全モデルでの剛側構面 (構面 X1)、柔側構面 (Model-A3 では構面 X4、それ以外のモデルでは構面 X6) および直交方向の構面 Y1 での最大層間変形角を示す。図 7 より明らかなように、時刻歴応答解析結果では Model-A1、Model-A3 を除いては柔側構面 (構面 X6) では剛側構面 (構面 X1) の 2 倍以上の変位が生じており、例えば Model-C では最下層の柔側構面の最大層間変形角が平均で 2.0% (純ラーメン要素で塑性率 3.03) 生じている一方、最下層の剛側構面の最大層間変形角が平均で 0.57% (純ラーメン要素で塑性率 0.85) 生じている。一方で、図 6 において最も対応の良好だった Case 3 による推定結果は時刻歴解析結果と大局的には対応したのとなっているものの、層による精度のばらつきは大きく、特に柔側構面の最上層、最下層で顕著である。なお、Model-C を用いて入力地震動の大きさを 0.7 倍にして

別途検討したところによると、構面 X6 の層間変形角は 1.13~1.37% (純ラーメンの塑性率は 1.70~2.06) であり層によるばらつきは小さく Case 3 によって全般的に精度良く推定することができた。従って、文献 12) での応答推定手法による層間変形角の推定精度のばらつきは非線形応答が増大するとともに増大する。

各ケースでの推定精度の違いを詳細に検討するため、最上階での重心変位・回転角に着目して議論を行う。図 8 に最上階での重心変位 y_4 と回転角 θ_4 について、等価 1 自由度系モデルによる推定結果と多層 1 軸偏心系モデルによる時刻歴応答解析結果 (平均値) の比を示す。図 8(a) において、重心変位の推定精度は Case 1 では 1.42~1.59 倍、Case 2 では 0.852~1.46 倍、Case 3 では 1.24~1.49 倍となっており、他と比べて Case 2 では幅があり、特に Model-A3 では推定値が時刻歴応答解析結果を下回っている。一方、図 8(b) に示した回転角の推定精度は各ケースで違いが著しく、Case 1 では 0.307~1.08 倍となり最も偏心の大きい Model-D を除いて全て過小評価となる一方で、Case 2 では Model-A3 で推定値は時刻歴応答解析結果の 5.48 倍と著しく過大評価しているのを除けば 1.24~1.84 倍となっている。最後に Case 3 では Model-A3 では 0.534 倍と過小評価となっているものの、他のモデルでは 1.17~1.66 倍となっており、3者のうちで最も精度が良くなっている。これは、Case 1 では静的漸増荷解析において重心に水平力のみしか作用させていないため、ねじれ応答を過小に見積もることになる一方で、Case 2 ではモード形の変動が著しいモデルでは塑性化後の応答を評価し得ないためである。図 9 に Model-A3 と Model-B での静的漸増荷解析結果による最上階重心変位と最上階回転角の関係を時刻歴応答解析結果と比較して示す。図 9 より明らかなように、Case 1

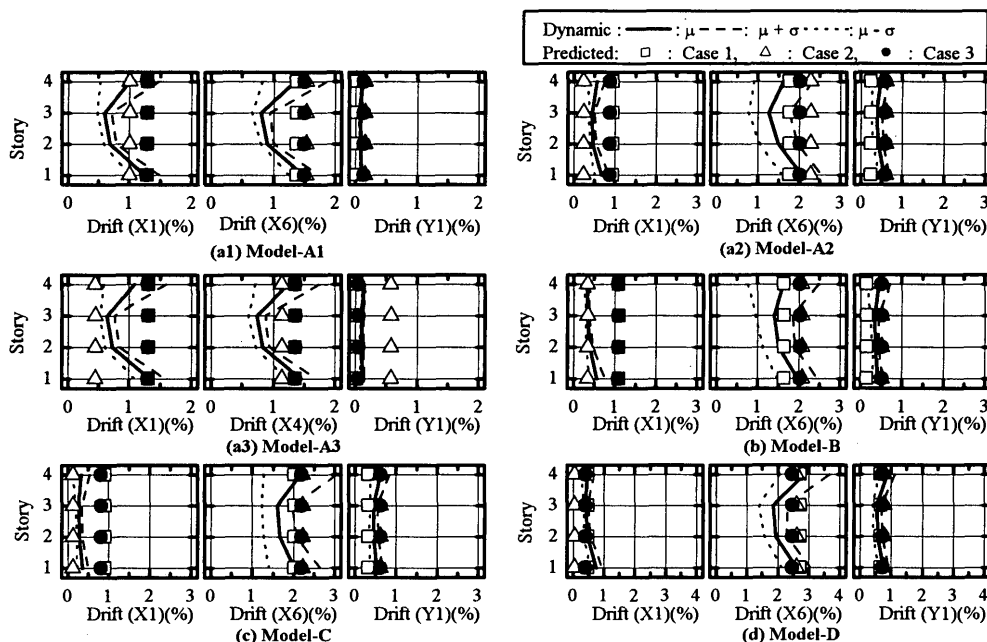


図 7 構面の最大層間変形角の推定結果

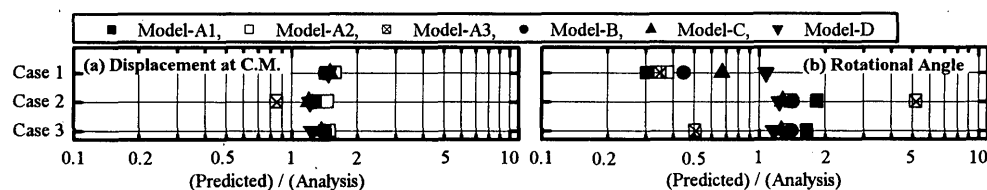


図 8 最上階重心変位・回転角の推定精度

は Model-A3、Model-B ともに時刻歴応答解析の結果を過小評価している。一方の Case 2 ではモード形の変動の著しい Model-A3 で大幅に過大評価する一方、Model-B では良好に対応していることがわかる。最後に Case 3 では、Model-A3 ではやや過小評価となっているものの Model-B では Case 2 と同様に良好な対応を示しており、3者のうちで安定して最も対応が良好となっていることがわかる。

ここで、Model-A3 において Case 2 では他と比較して応答が小さめに推定された要因を検討する。図 10(a) に、Model-A3 での等価 1 自由度系モデルにおける等価質量比 $(\Gamma m^*/\Sigma m, m_1^*)$ と等価変位 D_1^* の関係を示す。図 10(a) より、モード形の変動を無視した Case 1, 2 では $\Gamma m^*/\Sigma m$ の値は一定となる一方、モード形の変動を考慮した Case 3 では変位の増大とともに m_1^* が急激に増大して Case 1 に漸近していることがわかる。その結果、図 10(b)

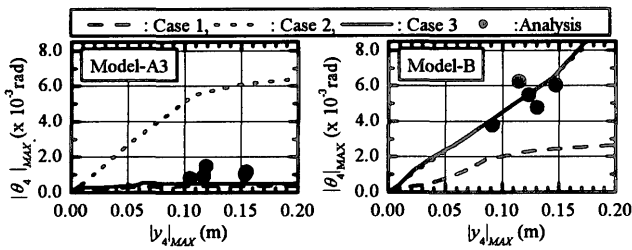


図9 最上階重心変位と回転角の関係

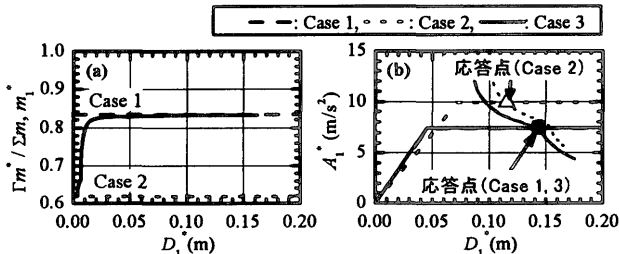


図10 等価1自由度系モデルによる応答推定例(Model-A3)

に示すように等価1自由度系モデルの $A_1^* - D_1^*$ 関係はCase 1とCase 3でほぼ同一となり、両者の推定結果は等しくなる。一方で、Case 2では塑性化の進展に伴う等価質量の増大が無視される結果 A_1^* が過大評価され、応答変位が過小評価される。

以上により、モード形の変動を無視したCase 1, Case 2と比較して、モード形の変動を考慮したCase 3が最も精度が高いことがわかる。

6 まとめ

本論文では、文献12)で示した等価1自由度系による非線形地震応答推定手法の理論的背景を概説し、特に1軸偏心建物を縮約した等価1自由度系モデルと多層平面骨組を縮約した等価1自由度系モデルの関係に着目して議論を行った。次いで、提案する手法と既往の手法との応答推定精度の比較を行った。結論を以下に記す。

- ①偏心建物を縮約した等価1自由度系モデルにおいて、回転中心から重心までの距離と、重心位置から等価質量の位置までの距離は逆比例の関係にあることを示した。また、偏心建物における回転中心から等価質量までの距離は、多層平面骨組における等価高さと力学的に等価であることを示した。
- ②偏心建物の応答を精度良く推定するためには、モード形の変動を考慮する必要がある。N2 methodでは、モード形の変動を無視し仮定する変位分布で回転成分を無視するため、回転成分の応答を過小評価する傾向にある。また、仮定する変位分布として弾性1次モード形を用いて回転成分を考慮する場合でも、モード形の変動の影響が著しい場合には応答変位を精度良く推定できない。
- ③文献12)にて筆者らが提案する応答推定手法ではモード形の変動の影響を考慮しているため、全モデルで安定して最も良好な推定結果となった。すなわち本論文において検討したモデルにおいては、弾性時での1次等価質量比の範囲は0.619~0.800であったが、全モデルで最上階での構面の変位を概ね良好に推定することができた。

本論文での検討結果より、文献12)で示した推定手法は1次等価質量比が0.6以上でせん断変形が卓越する立面的に整形な建物であれば概ね適用可能であるが、非線形応答が大きくなるにつれて層間変形角の推定精度のばらつきが大きくなる傾向がある。また、立面的に整形な建物であっても中層以上で連層耐震壁を含む建物の場合には、曲げ

変形の影響により各層で弾力半径比や偏心比が大きく異なるため2.1節の条件4)を厳密には満足しない場合も多い。しかし、連層耐震壁を含む4層程度の低層建物の場合にはその固有モードが式(5)~(8)により近似できる事が田村・荒川らにより示されている²⁰⁾。従ってこの場合には文献12)で提案した応答推定手法は適用可能であると思われる。一方で、ピロティ偏心建物のように特定層のみに偏心のあるような場合やセットバックを有する建物の場合には、等価単層1軸偏心系モデルへの縮約が困難となるため文献12)で提案した応答推定手法は適用困難である。この場合には多層1軸偏心系モデルから直接等価1自由度系モデルに縮約する必要があるが、今後の検討を要する。また、多方向地震入力の影響および2軸偏心建物等のより一般的な場合への拡張に関しては、稿を改めて発表する予定である。

謝辞：本研究の実施に当たっては、日本学術振興会・科学研究費補助金(基盤研究(B)(2)「平面計画上の構造非整形性を有するRC造建築物のねじれ応答制御に関する研究」、課題番号：12450221、研究代表者：中埜 良昭)の援助を受けた。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) Applied Technology Council : Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings(ATC-40), Report No. SCC96-01, 1996.11.
- 2) Federal Emergency Management Agency : NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, FEMA-273, 1997.10.
- 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) P. Fajfar, M. Fishingier : N2-A Method for Non-linear Seismic Analysis of Regular Buildings, Proceedings of 9th World Conference on Earthquake Engineering, Vol. V, pp. V-111-116, 1988. 8.
- 5) 倉本 洋, 勅使川原 正臣, 小鹿 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) A. S. Moghadam, W. K. Tso : Damage Assessment of Eccentric Multistory Buildings Using 3-D Pushover Analysis, Proceedings of 11th World Conference on Earthquake Engineering, CD-ROM, 1996. 6.
- 7) P. Fajfar, V. Kilar, D. Marusic, I. Perus, G. Magliulo : 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.173-182, 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, 中埜 良昭, 真田 靖士 : 一方向入力を受ける多層1軸偏心建物の非線形地震応答評価手法, コンクリート工学年次論文集, Vol. 25, No. 2, pp.7-12, 2003. 7.
- 13) 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.
- 14) 志賀 敏男 : 構造物の振動, 共立出版, 1976. 6.
- 15) 柴田 明徳 : 最新 耐震構造解析, 森北出版, 1981. 6.
- 16) 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.
- 17) Shibata, A., Sozen, M. A. : Substitute-structure method for seismic design in R/C, Journal of the Structural Division, Proceedings of the ASCE, Vol. 102 No. ST1, pp.1-18, 1976.1.
- 18) Takeda, T., Sozen, M. A. and Nielsen, N. N. : Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes, Journal of the Structural Division, Proceedings of the ASCE, Vol. 96, No. ST12, pp. 2557-2573, 1970.12.
- 19) 日本建築センター : 建築物の構造規定, 1997. 5.
- 20) 田村 充, 荒川 利治 : ねじれ振動を有する構造物の直積計算による固有値解析(連層耐震壁が偏在する耐震壁-フレーム連成構造), 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), B-2, pp. 413-414, 1999. 9.

(2004年3月15日原稿受理, 2004年5月18日採用決定)