

単層 1 軸偏心建物の非線形応答評価法に関する研究

A SIMPLIFIED NONLINEAR ANALYSIS PROCEDURE FOR SINGLE-STORY ASYMMETRIC BUILDINGS SUBJECTED TO STRONG GROUND MOTION

藤井 賢志¹⁾, 中埜 良昭²⁾, 真田 靖士³⁾

Kenji FUJII, Yoshiaki NAKANO and Yasushi SANADA

A simplified nonlinear analysis procedure to estimate the earthquake response of asymmetric structure is presented and its applicability is discussed. It consists of the nonlinear static analysis of idealized single-story model and the nonlinear time-history analysis of equivalent single-degree-of-freedom system. In this paper, the applicability of the procedure presented herein to single-story asymmetric structures is discussed. The result shows that the procedure presented herein can be applied to the structures when their first mode is governed by translational component, while it is difficult when it is governed by torsional component.

Keywords: asymmetric buildings, equivalent single-degree-of-freedom model, equivalent mass

偏心建物, 等価 1 自由度系, 等価 1 次質量

1 はじめに

想定した地震動に対する建物の非線形応答の評価は, 近年に開発された性能評価型の建物の耐震設計法や既存建物の耐震診断手法の重要な項目である。この実用的な方法として, 建物が強震時に代表的なモードで振動していると仮定して等価な 1 自由度系に置換して非線形応答を評価する方法が示されている^{1), 2), 3)}。

一方, 過去の地震で壁の偏在によるねじれ振動が原因で大きな被害を生じたと思われる例が報告されている⁴⁾。こうした偏心建物に前述の応答評価法を適用する場合, 多層平面骨組の場合と同様に代表的な振動モードを抽出する必要があるが, 偏心建物の場合には常にその応答が 1 つの振動モードに代表されるとは限らないためにこの方法が適用できない可能性がある。多層 1 軸偏心建物を対象にして前述の応答評価法による応答評価を試みた事例は存在するものの⁵⁾, 上記の問題に対する十分な検討はなされておらず, この応答評価法の適用範囲が明快な形では示されていない。

本論文では, 単層 1 軸偏心建物の等価 1 自由度系による応答評価法を示し, その適用性に関して検討を行った。

2 等価 1 自由度系による応答評価法

2.1 等価 1 自由度系による応答評価の流れ

等価 1 自由度系による応答評価法の流れを以下に示す。

STEP 1 立体建物モデルによる静的漸増解析を行い, 1 層層せん断力—最上階変位 (本研究では単層 1 軸偏心建物が対象のため 1 階変位である) の関係を求める。

STEP 2 STEP 1 の結果を用いて等価 1 自由度系の等価復元力—等価変位の関係を作成する。

STEP 3 等価 1 自由度系の最大応答変位を非線形時刻歴応答解析により求める。

STEP 4 等価 1 自由度系の最大応答変位に対応する最上階変位を目標変位として再び静的漸増解析を行い, 各構面および各部材の変形を求める。

なお, STEP 3 に関しては, 弾性応答スペクトル等を用いた等価線形化手法等を用いれば簡略化することができるが, 本研究では議論の対象外とする。

2.2 単層 1 軸偏心系の等価 1 自由度系への縮約

単層 1 軸偏心系の運動方程式は (式 1) で与えられる。

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

ここで,

$$[M] = \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \quad : \text{質量マトリクス}$$

$$[C] \quad : \text{減衰マトリクス}$$

$$\{d\} = \{y \quad \theta\}^T \quad : \text{重心における変位ベクトル}$$

1) 東京大学大学院工学系研究科建築学専攻 博士課程

Graduate Student, Dept. of Architecture, Univ. of Tokyo

2) 東京大学生産技術研究所 助教授 工学博士

Associate Professor, Institute of Industrial Science, Univ. of Tokyo, Dr. Eng

3) 東京大学生産技術研究所 助手 博士 (工学)

Research Associate, Institute of Industrial Science, Univ. of Tokyo, Dr. Eng

$\{R\} = \{V_y \quad T_z\}^T$: 復元力ベクトル
 (層せん断力とねじりモーメント)
 $\{\alpha\} = \{1 \quad 0\}^T$: 加震方向ベクトル

m : 質量, I : 回転慣性質量, a_g : 地動加速度
 である。

ここで, 系の振動が線形・非線形を問わず1次モードにより支配されると仮定し, 変位ベクトル $\{d\}$ を(式2)で表すものとする。

$$\{d\} = \beta_1 \{\phi_1\} \cdot D_1^* \quad (2)$$

ここで, D_1^* : 等価変位,

β_1 : 1次刺激係数, $\{\phi_1\}$ 1次モードベクトル

等価変位 D_1^* と重心の並進変位 y の関係は, 1次モードベクトル $\{\phi_1\}$ の加震方向成分を1になるように基準化すると(式3)で表される。

$$D_1^* = \frac{1}{\beta_1} \cdot y = \frac{\{\phi_1\}^T [M] \{\phi_1\}}{\{\phi_1\}^T [M] \{\alpha\}} \cdot y \quad (3)$$

(式2)を(式1)に代入し両辺の左側に $\beta_1 \{\phi_1\}^T$ をかけて整理すると, 等価1自由度系の運動方程式(式4)を得る。

$$\ddot{D}_1^* + \frac{C_1^*}{M_1^*} \dot{D}_1^* + \frac{R_1^*}{M_1^*} D_1^* = -a_g \quad (4)$$

ここで,

$$M_1^* = \beta_1^2 \{\phi_1\}^T [M] \{\phi_1\} = \beta_1 \{\phi_1\}^T [M] \{\alpha\} \quad (5)$$

: 1次等価質量

$$C_1^* = \beta_1^2 \{\phi_1\}^T [C] \{\phi_1\} \quad : 1次等価減衰係数$$

$$R_1^* = \beta_1 \{\phi_1\}^T \{R\} \quad : 等価復元力$$

3 解析諸元

3.1 解析モデル

解析建物モデルは, 図1に示されている4種類の平面形状の単層1軸偏心建物である。各々の建物モデルにおいて, 床の単位面積あたりの質量を 1.2ton/m^2 , 階高を 3.75m と仮定した。地震動は Y 方向からの1方向入力とし, 建物全体の降伏耐力は, 加震方向である Y 方向は $0.5W$ (W : 建物重量), 直交方向である X 方向は弾性とした。Y 方向各構面は, 図2で示した復元力特性を持つ純ラーメン要素および耐震壁要素により構成されるものとした。

建物モデルのパラメータは①平面形状, ②直交方向(X方向)構面の刚性, および③回転慣性質量の大きさの3つとした。各々のパラメータに関して以下に示す。

① 建物の平面形状

建物の平面形状は図1に示す4種類とした。各モデルの詳細を以下に示す。

Model-1-LE シリーズ (図1(a)) X方向 $4\text{m} \times 6$ スパン, Y方向 $8\text{m} \times 1$ スパンの長方形平面を持つ建物モデルで, Y方向各構面は, 構面(2)~(7)は図2(a)に示す純ラーメン要素が, 構面(1)には純ラーメン要素と図2(b)に示す耐震壁要素が配置されている。

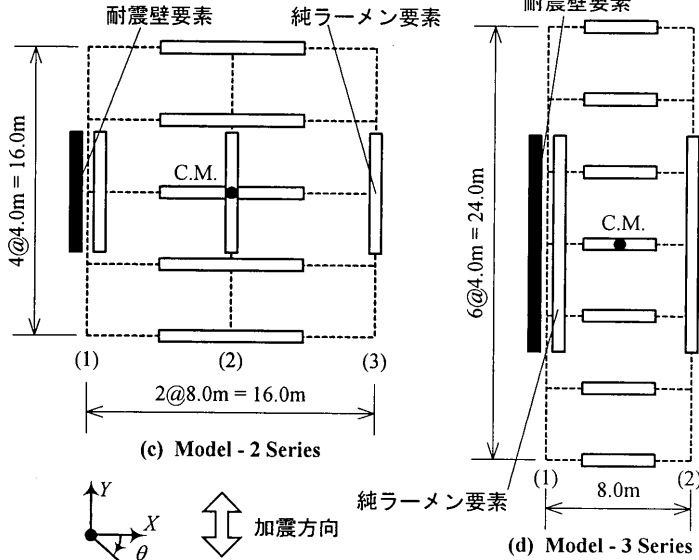
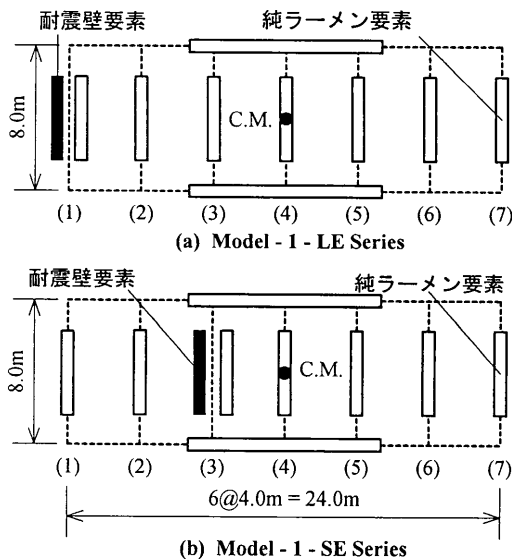


図1 解析モデル平面図

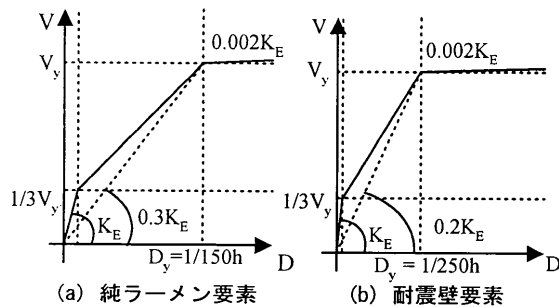


図2 各要素の復元力特性

表1 解析モデルの各要素の降伏耐力

	構面	各要素の降伏耐力		構面の降伏耐力
		純ラーメン	耐震壁	
Model-1-LE	(1)	0.050W	0.150W	0.200W
	(2)-(7)		0	0.050W
Model-1-SE	(3)	0.050W	0.150W	0.200W
	(1), (2), (4)-(7)		0	0.050W
Model-2	(1)	0.117W	0.150W	0.267W
	(2), (3)		0	0.117W
Model-3	(1)	0.175W	0.150W	0.325W
	(2)		0	0.175W

Model-1-SE シリーズ (図 1(b)) X 方向 4 m × 6 スパン, Y 方向 8 m × 1 スパンの長方形平面を持つ建物モデルで, Y 方向各構面は, 構面(1), (2)および構面(4)~(7)は純ラーメン要素が, 構面(3)には純ラーメン要素と耐震壁要素が配置されている。

Model-2 シリーズ (図 1(c)) X 方向 8 m × 2 スパン, Y 方向 4 m × 4 スパンの正方形平面を持つ建物モデルで, Y 方向各構面は, 構面(2)~(3)は純ラーメン要素が, 構面(1)には純ラーメン要素と耐震壁要素が配置されている。

Model-3 シリーズ (図 1(c)) X 方向 8 m × 1 スパン, Y 方向 4 m × 6 スパンの長方形平面を持つ建物モデルで, Y 方向各構面は, 構面(2)は純ラーメン要素が, 構面(1)には純ラーメン要素と耐震壁要素が配置されている。

なお, Model-1 シリーズと Model-3 シリーズでは建物質量, 各構面要素の弾性剛性の総和ならびに Y 方向各構面降伏耐力の総和は等しい。

② 直交方向構面の剛性

X 方向は各構面とも特性が等しいものとし, その剛性は 1) 建物全体の X 方向の剛性は建物全体の Y 方向の剛性と等しい (S シリーズ), 2) 建物全体の X 方向の剛性は Y 方向各構面における純ラーメン要素の剛性の総和に等しい (F シリーズ), の 2 つを設定する。

③ 回転慣性質量の大きさ

偏心建物のモード形の違いによる影響を見るため, 前述の S シリーズのモデルに対して, 解析モデル上建物質量 m および構面配置は

変更せずに回転慣性質量 I を 4 倍にしたモデル (I シリーズ) を設定する。

以上により, 解析建物モデルの数は合計で 12 となる。全ての建物モデルにおいて, 純ラーメン要素の降伏耐力は全体で $0.35W$, 耐震壁要素の降伏耐力は $0.15W$ である。それぞれの建物モデルにおける各要素の耐力を表 1 に示す。各要素の復元力モデルは, 全て曲げ破壊型を想定して Takeda モデル⁹⁾を用いた。

各モデルの弾性モード形を図 3 に示す。単層 1 軸偏心系の応答が等価 1 自由度系を用いて推定できるためには, 線形・非線形を問わず 1 次モード応答が支配的であるという前提条件がある。そこで,

(式 5) の 1 次等価質量 M_1^* に着目し, 表 2 に各モデルの偏心比 $E (=e/i, e: 剛性偏心距離, i: 回転半径)$, 弾力半径比 $J (=j/i, j: 重心まわりの弾力半径)$, 建築基準法による偏心率 Re^0 , および 1 次等価質量の建物質量に占める割合 M_1^*/m を示す。表 2 と図 3 より, M_1^*/m が大きいモデルの弾性 1 次モード形は並進振動の卓越するモード (以下並進卓越型と略記) になっている事, および M_1^*/m が小さいモデルでの弾性 1 次モード形は回転振動が卓越するモード (以下回転卓越型と略記) になっている事がわかる。また図 4 に, 偏心比 E を縦軸にとり弾力半径比 J を横軸にとり M_1^*/m のコンターラインを描き, 各モデルの M_1^*/m を示す。図 4 より, J が 1 より大きい領域では M_1^*/m が 0.5 以上となり, 逆に J が 1 より小さい領域では M_1^*/m が 0.5 を下回る事がわかる。

減衰は, 各モデルとも瞬間剛性比例型とし, 減衰定数は 1 次モー

	1次モード	2次モード		1次モード	2次モード		1次モード	2次モード
Model-1-LE-S			Model-1-LE-F			Model-1-LE-S-I		
	$T_1 = 0.269s$	$T_2 = 0.124s$		$T_1 = 0.277s$	$T_2 = 0.127s$		$T_1 = 0.368s$	$T_2 = 0.182s$
Model-1-SE-S			Model-1-SE-F			Model-1-SE-S-I		
	$T_1 = 0.238s$	$T_2 = 0.179s$		$T_1 = 0.253s$	$T_2 = 0.184s$		$T_1 = 0.423s$	$T_2 = 0.202s$
Model-2-S			Model-2-F			Model-2-S-I		
	$T_1 = 0.245s$	$T_2 = 0.134s$		$T_1 = 0.263s$	$T_2 = 0.144s$		$T_1 = 0.346s$	$T_2 = 0.190s$
Model-3-S			Model-3-F			Model-3-S-I		
	$T_1 = 0.219s$	$T_2 = 0.160s$		$T_1 = 0.253s$	$T_2 = 0.184s$		$T_1 = 0.348s$	$T_2 = 0.200s$

図 3 各モデルの固有モード

表 2 各モデルの偏心率・弾力半径比・偏心率・1次等価質量

	E	J	Re ⁽⁷⁾	M ₁ [*] /m
Model-1-LE-S	0.850	1.509	0.682	0.800
Model-1-LE-F	0.850	1.480	0.718	0.775
Model-1-LE-S-I	0.425	0.755	0.682	0.274
Model-1-SE-S	0.283	1.018	0.271	0.530
Model-1-SE-F	0.283	0.938	0.316	0.396
Model-1-SE-S-I	0.142	0.509	0.271	0.033
Model-2-S	0.634	1.418	0.500	0.811
Model-2-F	0.634	1.246	0.591	0.720
Model-2-S-I	0.317	0.709	0.500	0.191
Model-3-S	0.283	1.225	0.238	0.831
Model-3-F	0.283	0.938	0.317	0.396
Model-3-S-I	0.142	0.613	0.238	0.045

ドに対し3%と仮定した。

3.2 入力地震動

入力地震動は、El Centro 1940NS, Taft 1952NS, Hachinohe 1968EW, Tohoku Univ. 1978NS, JMA Kobe1995NS の5波とし、継続時間は25秒間とした。地震波の大きさは、無偏心のモデルで減衰を3%の瞬間剛性比例型と仮定して応答解析を行ったときの最大変位が階高の1/150と1/75になるような2段階を設定した。各地震波の原記録の最大加速度ならびに倍率を表3に、無偏心のモデルで最大変位が階高の1/75になるように係数倍したときの加速度応答スペクトルを図5に示す。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。

4 等価1自由度系による応答評価

4.1 単層1軸偏心系の応答のモード分解

等価1自由度系の応答解析に先立ち、単層1軸偏心系の応答のモード分解を行って、等価1自由度系への縮約の前提条件である「系の振動が線形・非線形を問わず1次モードにより支配される」という仮定を検証する。変位および復元力のモード分解を以下により行う。

- 1) 単層1軸偏心系の時刻歴応答解析を行う。

表 3 入力地震動

地震波	最大加速度 (m/s ²)	倍率	
		Level 1 (1/150)	Level 2 (1/75)
El Centro 1940NS (ELC)	3.417	0.860	1.300
Taft 1952NS(TAF)	1.572	1.760	2.940
Hachinohe 1968EW(HAC)	1.829	1.170	1.610
Tohoku Univ. 1978NS(TOH)	2.582	0.838	1.322
JMA Kobe 1995NS(JKB)	8.178	0.298	0.433

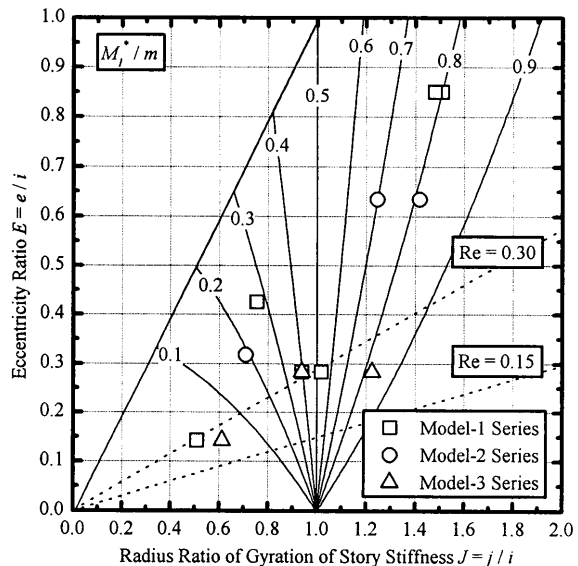


図 4 単層1軸偏心系での1次等価質量の占める割合

- 2) 時刻歴応答解析結果を用いて、各々のステップにおける各要素の等価剛性を求める。本論文において等価剛性は、簡便のため当該ステップまでの最大変形(正負両領域における絶対値の大きい方の変形)に対する割線剛性で評価した。
- 3) 各要素の等価剛性に基づき、当該ステップでのモード形 β_i (ϕ_i) ($i=1, 2$) を固有値解析により求める。
- 4) 各モードの等価質量 M_i^* 、等価変位 D_i^* 、等価加速度 A_i^* を(式6)~(式8)により定める。

$$M_i^* = \beta_i \{\phi_i\}^T [M] \{\alpha\} \quad (6)$$

$$D_i^* = \frac{\beta_i \{\phi_i\}^T [M] \{d\}}{M_i^*} \quad (7)$$

$$A_i^* = \frac{\beta_i \{\phi_i\}^T \{R\}}{M_i^*} \quad (8)$$

- 5) 各モードの変位 $\{d_i\}$ と復元力 $\{R_i\}$ を(式9)、(式10)により定める。

$$\{d_i\} = \beta_i \{\phi_i\} \cdot D_i^* \quad (9)$$

$$\{R_i\} = \beta_i [M] \{\phi_i\} \cdot A_i^* \quad (10)$$

図6および図7にモード分解した時刻歴を示す。対象としたモデルは、図6ではModel-1-LE-Sで、図7ではModel-2-S-Iである。入力地震動はHachinohe 1968EW波を1.610倍に拡大したものを用いた。

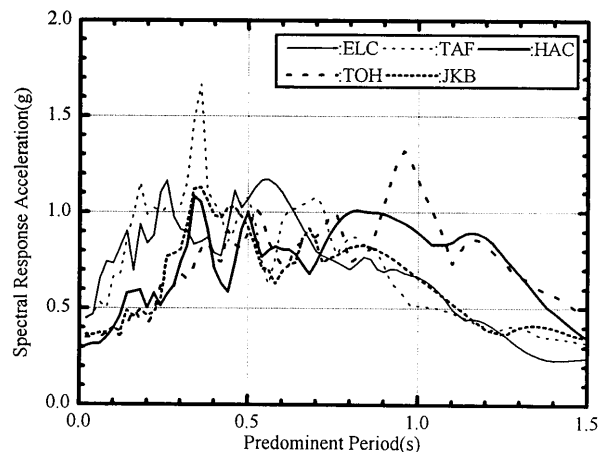


図 5 加速度応答スペクトル

図6より、Model-1-LE-Sにおいて、重心位置での並進変位 y および層せん断力 V_Y では1次モード成分がモード分解前の時刻歴とほぼ一致しており、2次モード成分は微小となっている。重心位置での回転角 θ では1次モード成分が支配的であるものの、並進変位 y および層せん断力 V_Y と比較して2次成分が大きくなっている。ねじりモーメント T_Z では上3者と比べて2次成分が最も大きくなっている。各モードの等価質量では、1次等価質量 M_1^* の占める割合が全応答時間を通じて大きく、 M_1^*/m の値はほぼ常に0.8を上回り3秒以降では0.9以上となっている。

一方、図7よりModel-2-S-Iにおいて、並進変位 y および回転角 θ では1次モードの影響が大きいものの2次モード成分の影響が図6の場合と比較して大きくなっている。層せん断力 V_Y およびねじりモーメント T_Z では、応答時間の始め3秒間において1次モード成分より2次モード成分の方が大きい。各モードの等価質量では、1次等価質量 M_1^* の占める割合は応答時間の始め3秒間では2次等価質量 M_2^* の占める割合を下回っている。 M_1^*/m の値は、応答時間の経過とともに増加して3.5秒前後で0.5を上回り、 M_2^*/m との大小関係が逆転している。

以上より、1次モードの影響は並進変位 y および層せん断力 V_Y の方が回転角 θ およびねじりモーメント T_Z よりも大きくなっている事、ならびに1次等価質量の占める割合 M_1^*/m が大きい場合には1次モード応答の影響が大きくなっている事がわかる。1次モード応答の影響の大小と1次等価質量の占める割合 M_1^*/m の関係は、応答量の代表として層せん断力 V_Y を取り上げると以下のように説明で

きる。

$$\{R\} = \beta_1 [M] \{\phi_1\} \cdot A_1^* + \beta_2 [M] \{\phi_2\} \cdot A_2^* \quad (11)$$

層せん断力 V_Y のモード分解は(式12)で表される。

$$\begin{aligned} V_Y &= \{R\}^T \{\alpha\} \\ &= \beta_1 \{\phi_1\}^T [M] \{\alpha\} \cdot A_1^* + \beta_2 \{\phi_2\}^T [M] \{\alpha\} \cdot A_2^* \\ &= M_1^* \cdot A_1^* + M_2^* \cdot A_2^* \end{aligned} \quad (12)$$

従って層せん断力係数 C_B は(式13)の形になる。

$$C_B = \frac{V_Y}{mg} = \frac{M_1^* \cdot A_1^*}{m \cdot g} + \frac{M_2^* \cdot A_2^*}{m \cdot g} \quad (13)$$

ここで、 g : 重力加速度

すなわち層せん断力係数 C_B は各モードの等価加速度 A_i^* に各モード等価質量の占める割合 M_i^*/m で重み付けをして加え合わせたものと見ることができる。従って、1次等価質量の占める割合 M_1^*/m が大きい場合には層せん断力 V_Y の応答は1次モード応答の影響が大きくなる。

図8および図9にModel-1-LE-SとModel-2-S-Iにおける偏心比および弾力半径比の変動を示す。図8、9において、偏心比 E および弾力半径比 J は各々のステップにおける割線剛性の値により評価した。図8および図9より、両者ともに塑性化が進展するにつれて J が増大して、 M_1^*/m の大きい側へシフトしていくことがわかる。特にModel-2-S-Iの場合には、図9より弾性時において弾力半径比 J が1以下の領域にあったものが、塑性化が進展するにつれて J が増大して J が1より大きい領域へシフトしていくことがわかる。

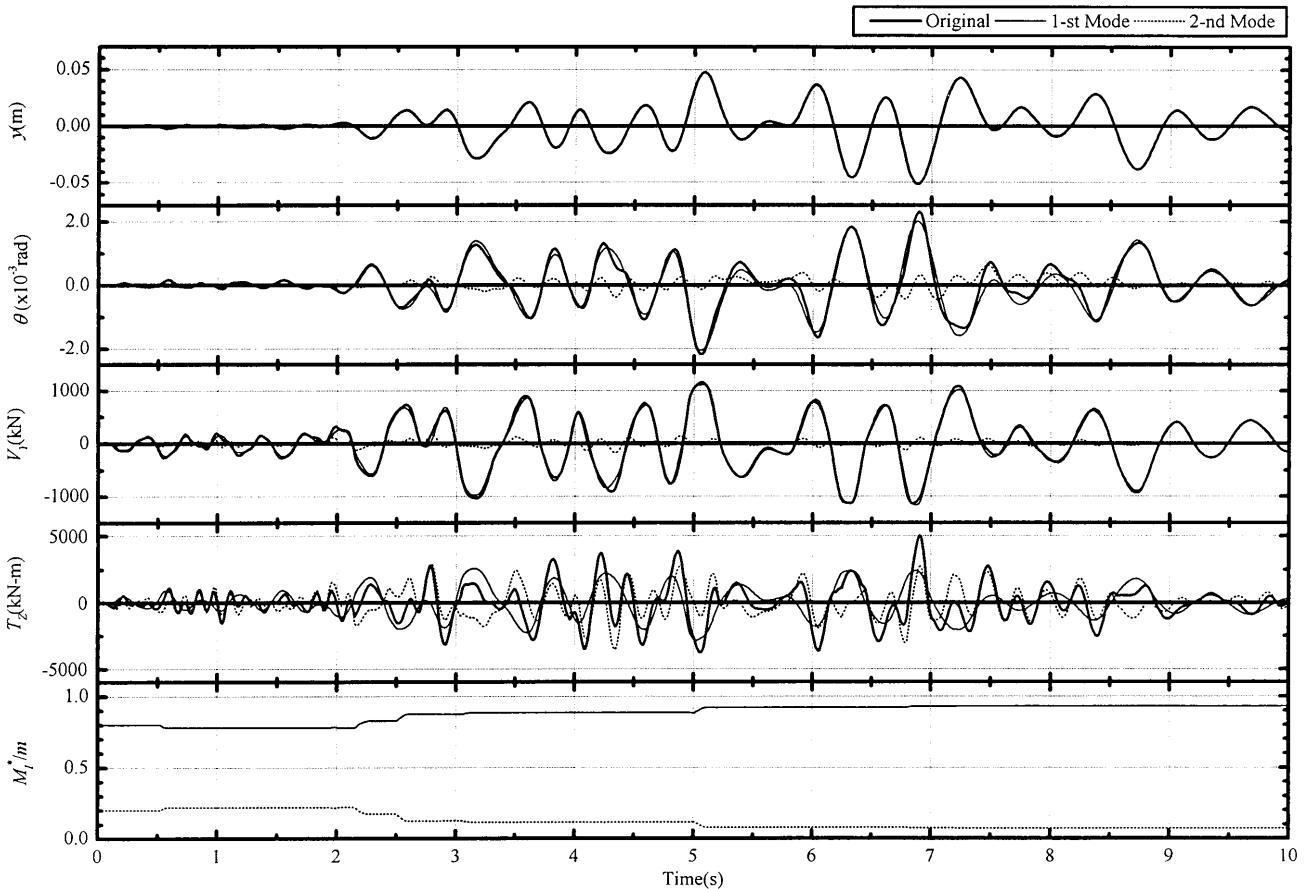


図6 応答時刻歴のモード分解 (Model-1-LE-S)

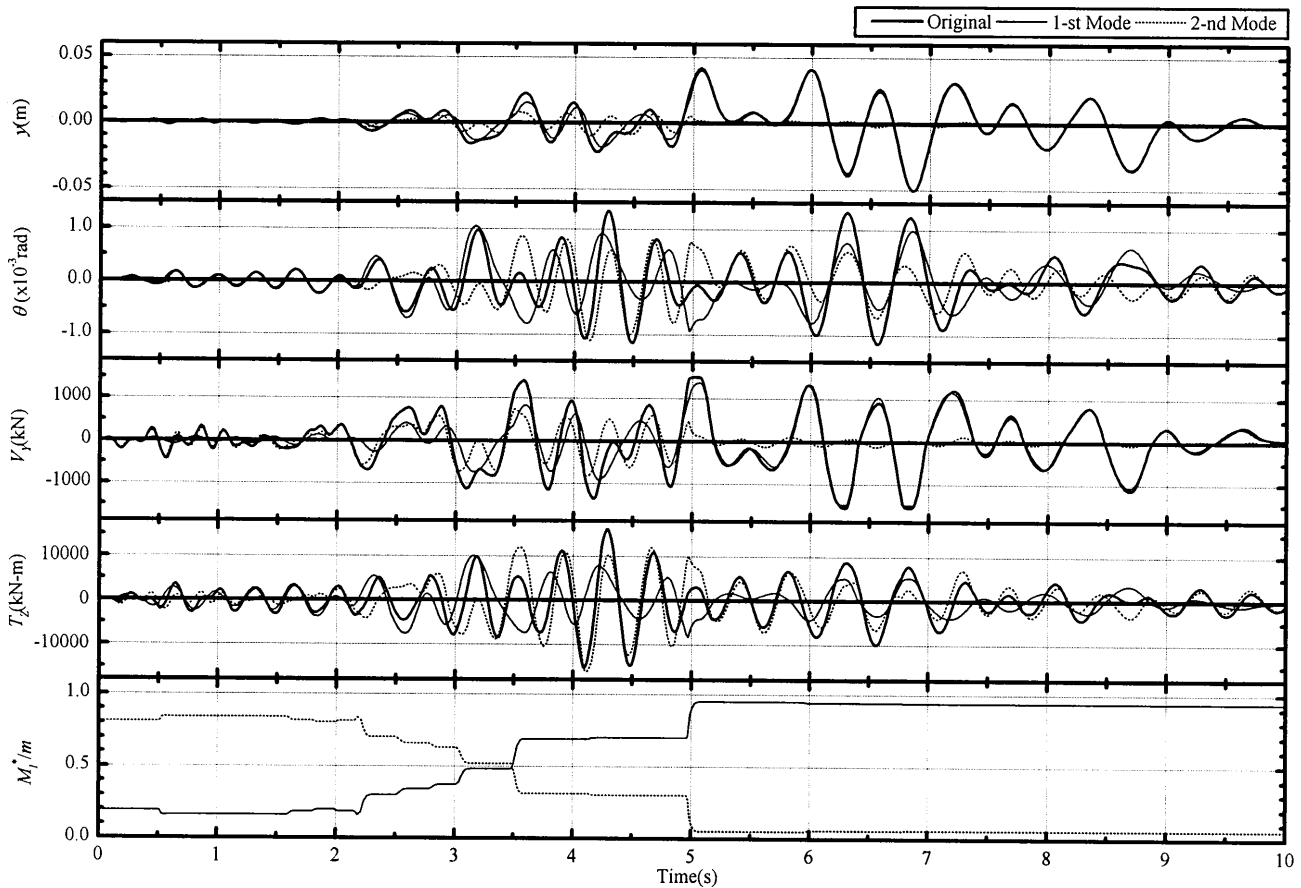


図 7 応答時刻歴のモード分解 (Model-2-S-I)

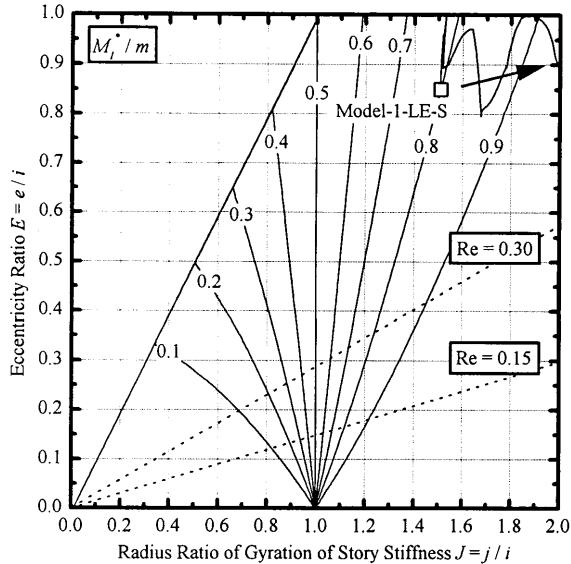


図 8 偏心比 E および弾力半径比 J の変動 (Model-1-LE-S)

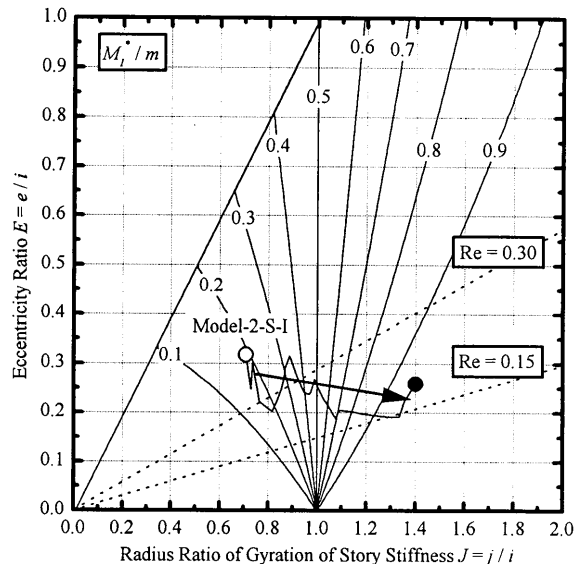


図 9 偏心比 E および弾力半径比 J の変動 (Model-2-S-I)

4.2 等価 1 自由度系による応答評価の妥当性の検証

前節の検討により、1 次等価質量の占める割合 M_1^*/m が大きい場合には 1 次モード応答の影響が大きくなり、等価 1 自由度系への縮約の仮定条件が満足される一方、 M_1^*/m が小さい場合には 1 次モード応答の影響が小さくなり、等価 1 自由度系への縮約の仮定条件が満足されないことがわかった。従って、 M_1^*/m が大きい Model-1-LE-S では等価 1 自由度系による応答評価法が適用可能となり、逆に M_1^*/m が小さい Model-2-S-I では等価 1 自由度系による応答評価法の適

用が困難になることが予想できる。そこで、2.2 節で示した等価 1 自由度系の応答解析を行い単層 1 軸偏心系の応答と比較することにより、等価 1 自由度系への縮約による応答評価の妥当性を検証する。

ここでは、等価 1 自由度系の応答解析に際して振動モード形の変動を考慮し、各ステップにおける 1 次モード $\beta_1 \{ \phi_1 \}$ は、当該ステップにおける各要素の割線剛性を用いて固有値解析により定め、1 次等価減衰係数 C_1^* および 1 次等価質量 M_1^* を順次定めて応答計算を行った。

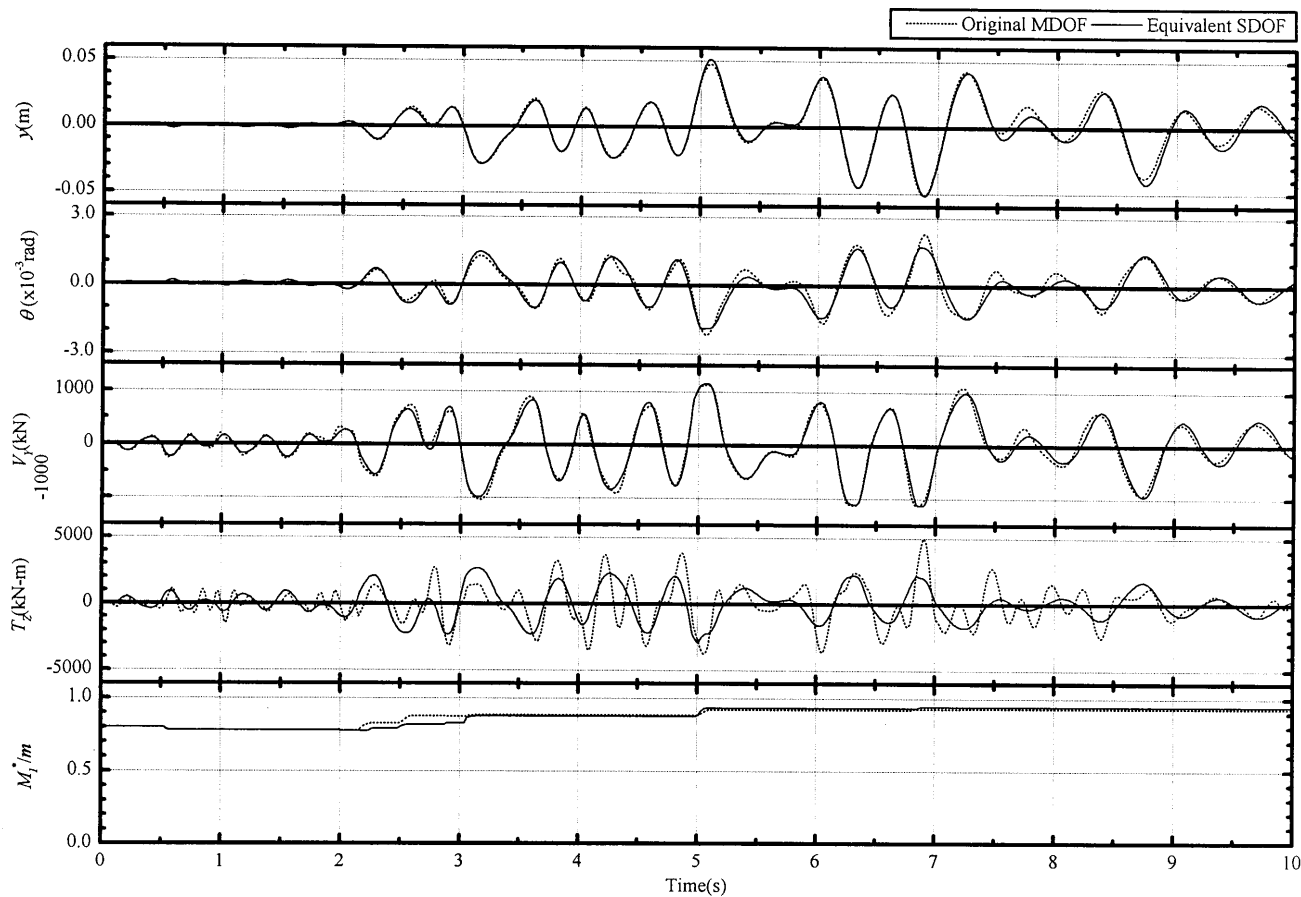


図 10 等価 1 自由度系の応答時刻歴 (Model-1-LE-S)

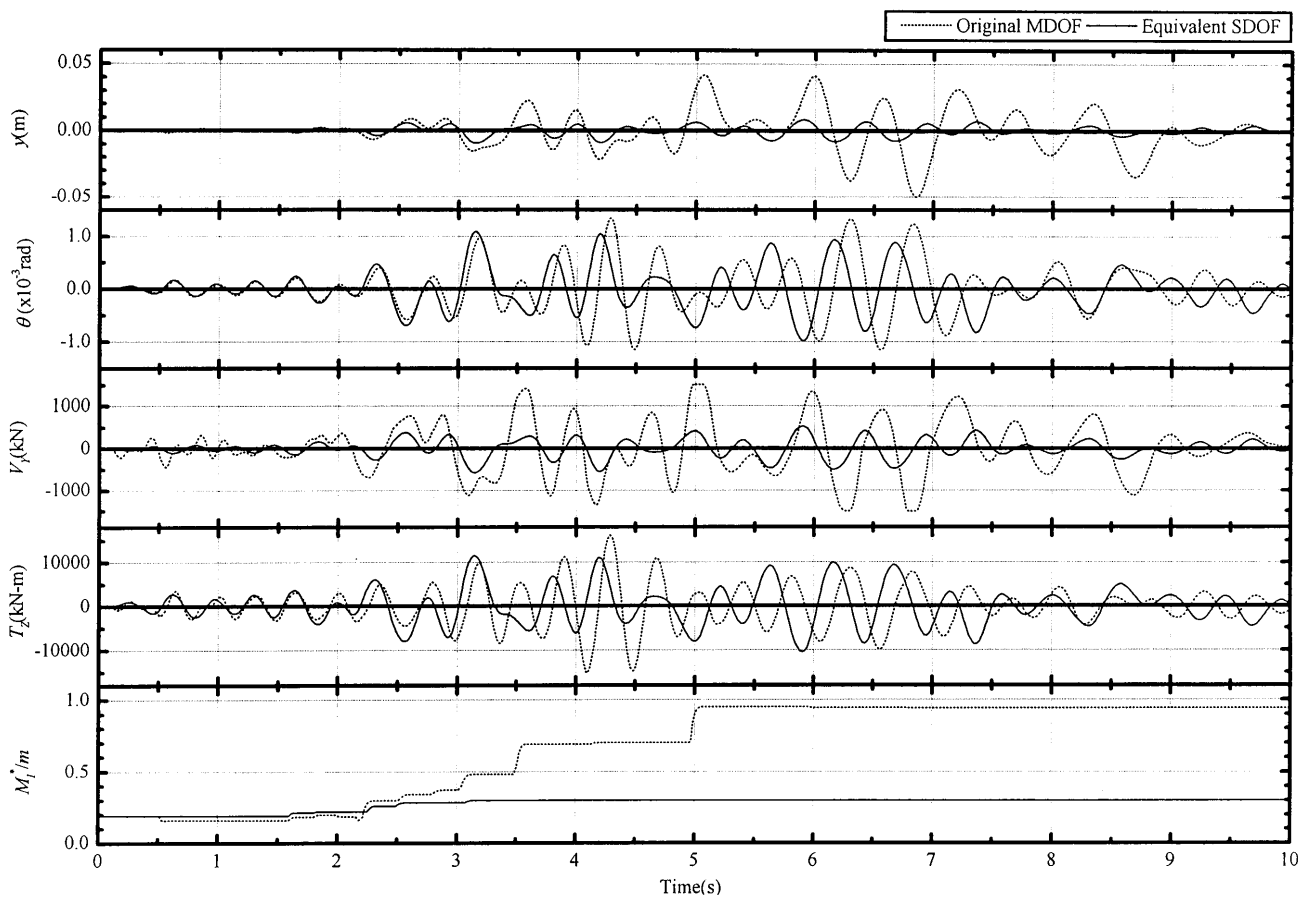


図 11 等価 1 自由度系の応答時刻歴 (Model-2-S-1)

図 10 および図 11 に等価 1 自由度系と単層 1 軸偏心系の応答時刻歴を示す。対象としたモデルは前節と同じく Model-1-LE-S (図 10) および Model-2-S-I (図 11) で、入力地震動は Hachinohe 1968EW 波を 1.610 倍に拡大したものである。

図 10 より、Model-1-LE-S はねじりモーメント T_2 の時刻歴を除いては等価 1 自由度系の応答は単層 1 軸偏心系の応答と良い対応を示している。すなわち、 M_1^*/m が大きい Model-1-LE-S の場合、等価 1 自由度系により応答が概ね評価可能であることになる。

一方、図 11 の Model-2-S-I では、等価 1 自由度系と単層 1 軸偏心系の応答の差は図 10 の場合と比較して著しく大きい。特に 1 次等価質量 M_1^* の差は応答時間の経過とともに増大している。これは、Model-2-S-I では弾性時において M_1^*/m が小さいため、等価 1 自由度系の場合は単層 1 軸偏心系と比べて応答層せん断力 V_f が小さくなり、結果として塑性化の進展が著しく異なってくるためである。すなわち、 M_1^*/m が小さい Model-2-S-I の場合、等価 1 自由度系により応答を評価することは困難である。

図 12 および図 13 に両者のモデルの層せん断力 V_f - 並進変位 y 関係を示す。図 12 の Model-1-LE-S では、等価 1 自由度系の履歴応答が単層 1 軸偏心系の応答と良好な対応を示しているのに対し、図 13 の Model-2-S-I では等価 1 自由度系と単層 1 軸偏心系の履歴応答が大きく異なり、等価 1 自由度系は単層 1 軸偏心系と比べて変位、層せん断力ともに著しく小さくなっていることがわかる。

図 14 に等価 1 自由度系と単層 1 軸偏心系の並進応答変位の最

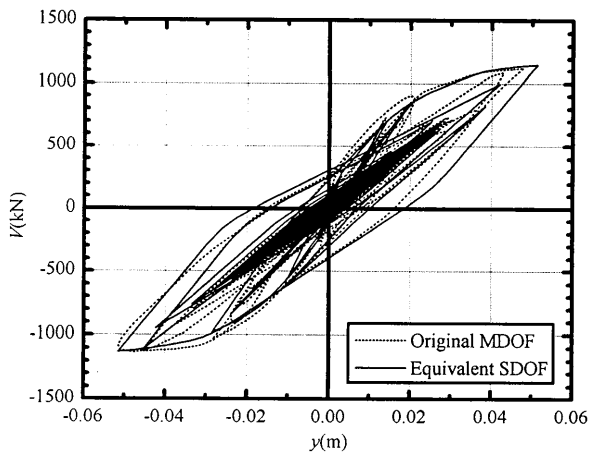


図 12 層せん断力-重心の並進変位関係 (Model-1-LE-S)

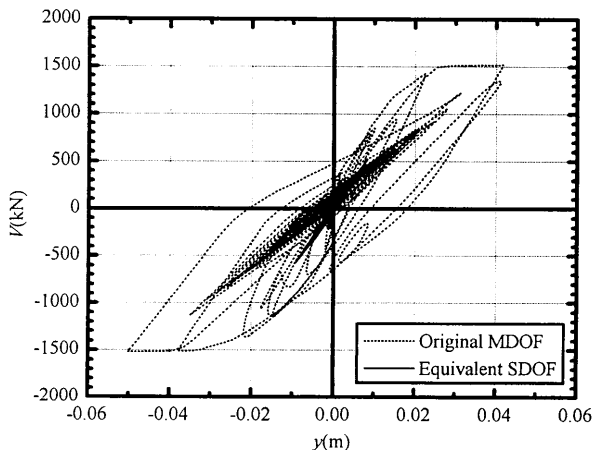


図 13 層せん断力-重心の並進変位関係 (Model-2-S-I)

大値を示す。図 14 より、弾性において 1 次等価質量の占める割合が大きい場合 ($M_1^* > M_2^*$) では両者の違いはほぼ 20% 以内に収まっており、良好な対応を示していることがわかる。一方、弾性 1 次等価質量の占める割合が小さい場合 ($M_1^* < M_2^*$) では両者の差は大きく、著しくばらついていることがわかる。また弾性時での 1 次等価質量の占める割合と、等価 1 自由度系による応答評価精度 (等価 1 自由

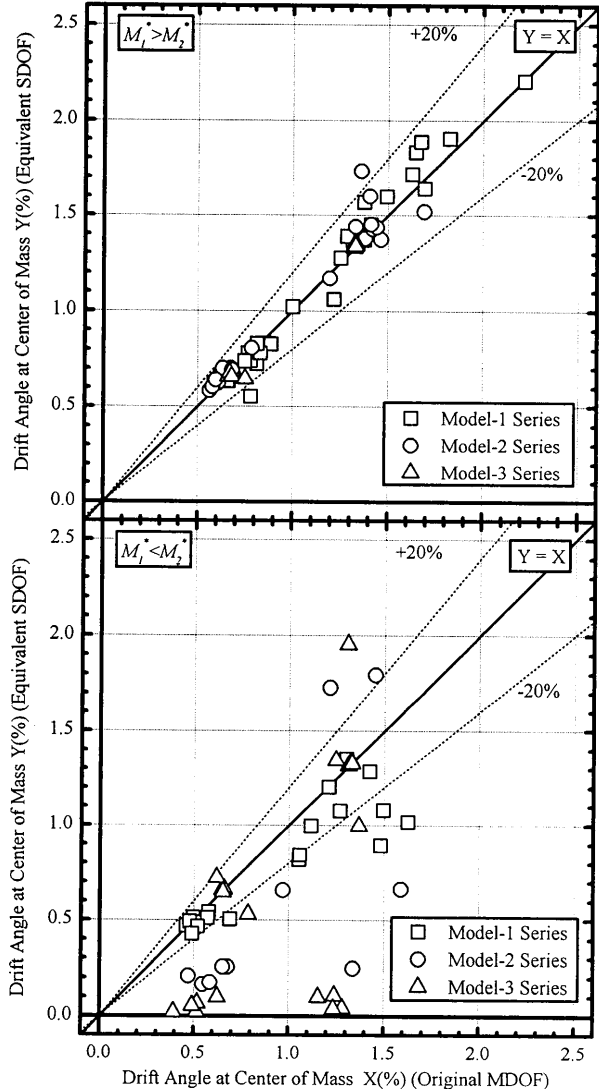


図 14 等価 1 自由度系と単層 1 軸偏心系の最大応答

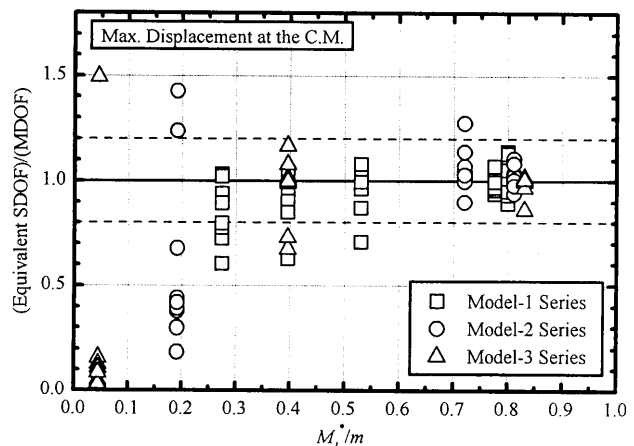


図 15 弾性時での等価 1 次質量の占める割合と応答評価精度

度系による重心位置での最大変位／単層1軸偏心系による重心位置での最大変位)の関係を示したのが図15である。弾性時における1次等価質量の占める割合が小さくなるに従って両者の対応が悪くなっていることがわかる。

以上により、2次モードの影響が大きい場合には等価1自由度系による単層1軸偏心系の応答の評価は困難であること、ならびに単層1軸偏心系の等価1自由度系による応答評価の適用可否は平面形状にかかわらず1次等価質量の大小により判断できることがわかる。

4.3 簡略化した等価1自由度系による応答評価

前節により、単層1軸偏心系の応答は、1次等価質量の占める割合が大きい場合には等価1自由度系の応答により評価できることがわかった。そこで本節では、弾性において1次等価質量の占める割合が大きいモデル ($M_1^* > M_2^*$) を対象に2.1節に示した等価1自由度系による応答評価を試みる。検討対象のモデルは、Model-1-LE-S, Model-1-LE-F, Model-1-SE-S, Model-2-S, Model-2-F, Model-3-Sの6種類である。

まずSTEP1として立体建物モデルを用いて静的漸増解析を行う。静的漸増解析は文献8)で著者らが示した塑性化の進展に伴うモード形の変化を考慮した方法による。

次にSTEP2として、STEP1で得られた結果より等価1自由度系を作成する。等価1自由度系の等価加速度(等価復元力/等価質量)

一等価変位の関係を3折れ線に近似する(図16)。ここでは、塑性率2程度(重心での変形角が1/75)での消費エネルギーが等価となるように留意して、以下の方法により等価加速度-等価変位の関係を3折れ線に近似した。

- 1) 第1折れ線の傾きは弾性時の値とする。
- 2) 第3折れ線の傾きは第1折れ線の傾きの0.002倍とする。
- 3) 第1折れ点での等価加速度の値は第2折れ点での等価加速度の1/3倍とする。
- 4) 重心位置での並進変位が階高の1/75になるときの点で、元の曲線による等価加速度および履歴吸収面積が3折れ線と

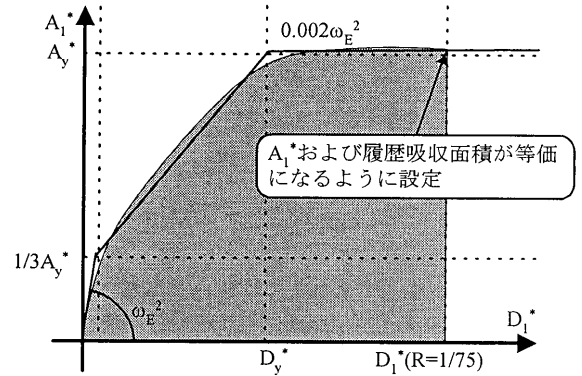


図16 等価変位-等価加速度関係の3折れ線への近似方法

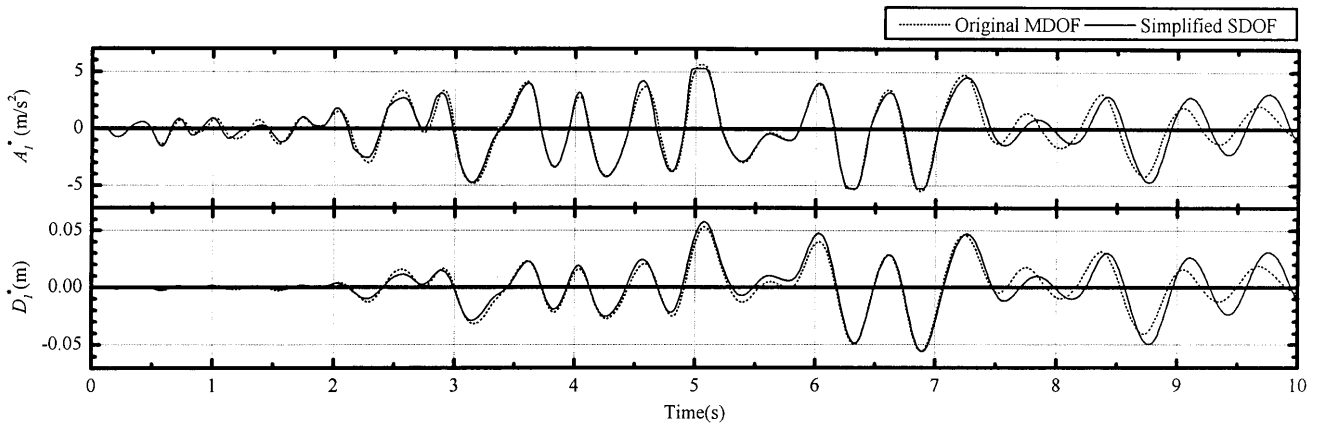


図17 等価1自由度系の応答時刻歴 (Model-1-LE-S)

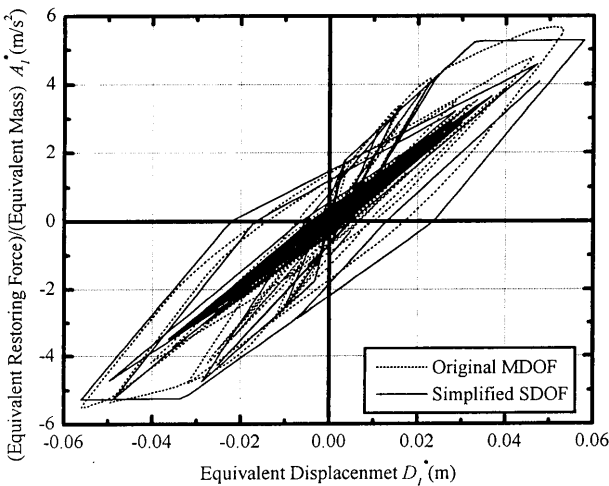


図18 等価1自由度系の履歴応答 (Model-1-LE-S)

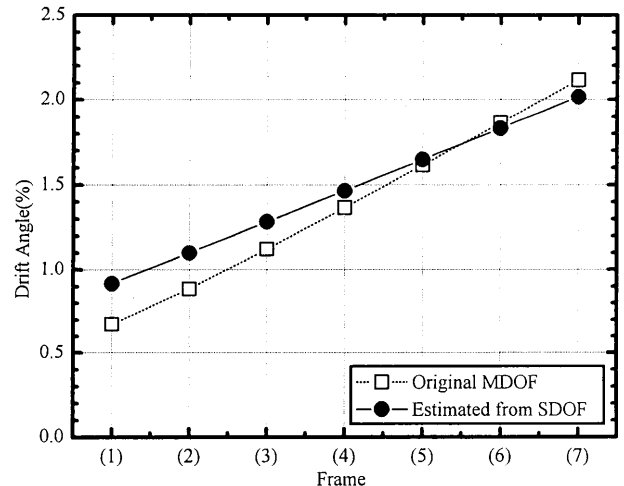


図19 各構面の最大応答変位 (Model-1-LE-S)

等価になるとし、第2折れ点での等価加速度を未知数として方程式を立てる。

5) 4) で立てた方程式を解き、第1・第2折れ点を決定する。

次にSTEP 3で等価1自由度系の非線形時刻歴応答解析を行い、等価1自由度系の最大応答変位を求める。

最後にSTEP 4で等価1自由度系の最大応答変位に対応する重心位置での並進変位を目標変位として再度静的漸増解析を行い、得られた各構面の最大変位を推定値とする。

図17に等価1自由度系の応答時刻歴、図18に等価1自由度系の履歴応答、図19に等価1自由度系を用いて推定した各構面最大変形と単層1軸偏心系の各構面最大変形を示す。ここで用いた建物モデルはModel-1-LE-Sで、入力地震波はHachinohe 1968EW波を1.610倍に拡大したものである。図17~19より、両者は良好に対応していることがわかる。

図20に等価1自由度系により推定した各モデルの構面の最大変形(剛側構面、重心位置、柔側構面)と単層1軸偏心系による最大変形の関係を示す。図20より、Model-1~3のいずれにおいても両者は良好に対応している事がわかる。

以上により、単層1軸偏心系の応答は、平面形状に関わらず1次等価質量の占める割合が大きい場合には等価1自由度系により評価が可能であると言う事ができる。

5 まとめ

単層1軸偏心建物を対象として、等価1自由度系による非線形応答評価法を示し、その適用性に関して検討を行った。結論を以下に示す。

- ① 重心まわりの弾力半径比が1より大きい単層1軸偏心建物の場合には、1次モード形が並進卓越型となり弾性1次等価質量の占める割合が大きくなる。一方、弾力半径比が1よりも小さい単層1軸偏心建物の場合には、1次モード形が回転卓越型となり弾性1次等価質量の占める割合が小さくなる。
- ② 弾性1次等価質量の占める割合が大きい単層1軸偏心建物の場合には、等価1自由度系による応答評価が可能である一方、弾性1次等価質量の占める割合が小さい単層1軸偏心建物の場合には、等価1自由度系による応答評価は困難である。

なお、本研究の結論は、対象を単層1軸偏心建物として、かつ地震動が1方向入力直交方向構面が弾性挙動すると仮定した場合の結論である。現在、本論文で示した知見に基づいて多層偏心建物の非線形応答評価法に関する検討を行っており、その結果は機会を改めて報告させていただく予定である。

参考文献

- 1) NHERP Guideline for the Seismic Rehabilitation of Buildings (FEMA 273), Federal Emergency Management Agency, Oct. 1997
- 2) Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings, ATC-40, Report No. SSC96-01, Applied Technology Council, Nov. 1996
- 3) 多層建築物の等価1自由度系縮約法と地震応答制度, 倉本 洋, 勅使河原正臣, 小鹿 紀英, 五十田 博, 日本建築学会構造系論文集, 第546号, pp. 79-85, 2001年8月
- 4) 1968年十勝沖地震による八戸市立図書館の被害に関する考察, 岡田 恒男,
- 5) Damage Assessment of Eccentric Multistorey Buildings using 3-D Pushover Analysis, A.S. Moghadam and W. K. Tso, Proceedings of 11th World Conference of Earthquake Engineering, CD-ROM, 1996
- 6) Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes, T. Takeda, M. A. Sozen, N. N. Nielsen, Journal of ASCE, pp. 2557-2573, Dec. 1970
- 7) 建築物の構造規定, 日本建築センター, 1995年7月
- 8) 単層偏心建物のPushover解析, 藤井 賢志, 中埜 良昭, 日本建築学会大会学術講演集(関東), CD-ROM, 2001年9月

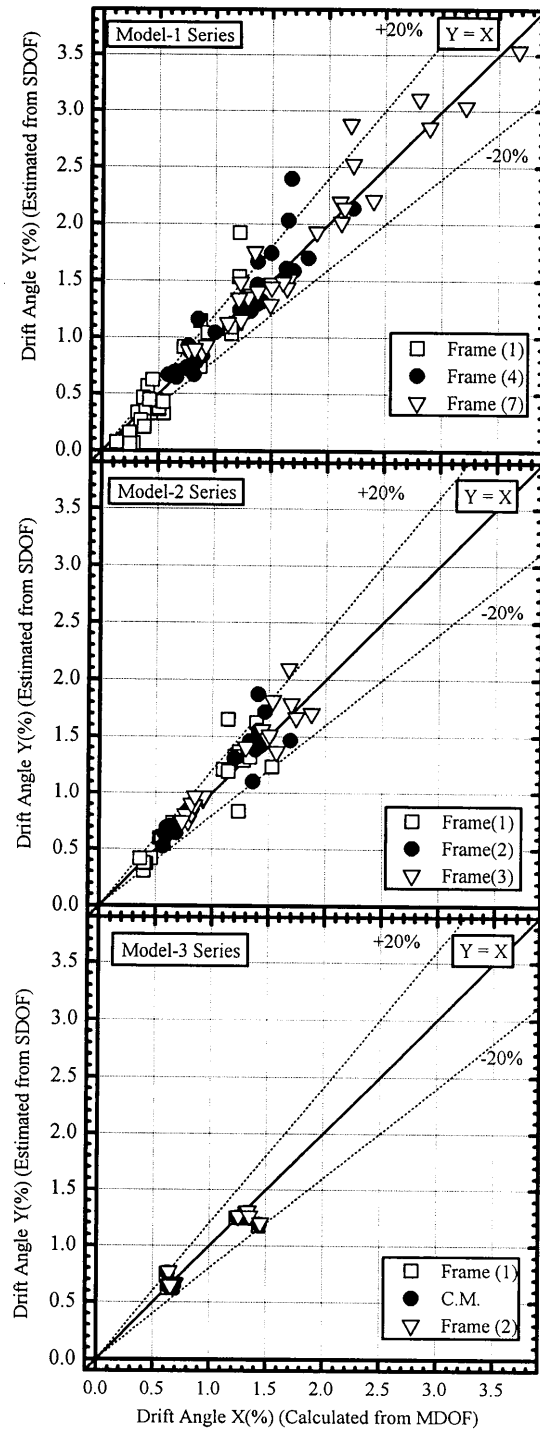


図20 構面の最大応答変位の比較

村上 雅也, 西川 孝夫, 大沢 伸, 田中 尚, 日本建築学会論文報告集, 第167号, pp.47-58, 1970年1月