

B-27

# 偏心建築物に対するダイナミック・マスを用いた応答制御手法の確立

## 2自由度を持つ多層モデルにおける応答制御手法の確立

### Establishment of the response control method using D.M. to the building which has eccentricity

### Establishment of the response control method for multi-story model which has two degree of freedom

弓削貴史<sup>3</sup>, 石丸辰治<sup>1</sup>, 古橋剛<sup>2</sup>, 土田堯章<sup>3</sup>

\*Takafumi Yuge<sup>3</sup>, Shinji Ishimaru<sup>1</sup>, Takeshi Furuhashi<sup>2</sup>, Takaaki Tsuchida<sup>3</sup>

This research proposes the method of controlling the twist response of the building that has eccentricity by using Dynamic Mass. Moreover, the formula which calculates the quantity of suitable Dynamic Mass was derived.

### 1. はじめに

現在の設計法では、偏心率に応じて必要保有水平耐力の割増しを行い、偏心建築物の安全性を確保している。しかしこれは静的な設計法であり、動的な挙動(ねじれ応答)に対する考慮が十分であるかは不明確である。予期せぬ地震動が入力した際に変位量に差が生じ、最悪の場合、建物が崩壊に至る危険性もある。そこで、本研究では、慣性質量効果を持つダイナミック・マス(以下 D.M.)を用いることで動的にねじれ応答を制御する。

### 2. 検討モデル概要

偏心建築物を Figure-1 に示すようにモデル化し、質点を結ぶ梁材は剛と仮定したものをを用いる。2つの質点系のうち、固有周期の短い方をA通り、長い方をB通りとする。剛梁に対して垂直方向から動的な外力を加えると、層ごとに2つの質点の重心Gの水平移動と、重心Gを中心とした回転運動が生じるようなモデルとなっている。このモデルにD.M.を付加し、ねじれ応答の制御を試みる。

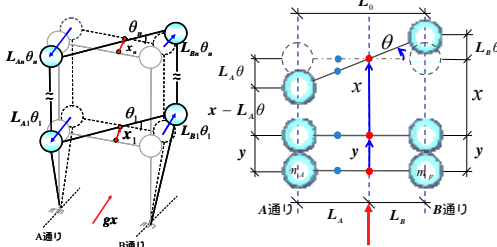
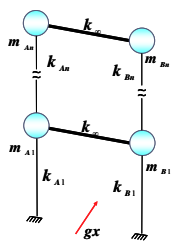


Figure-1 Model

Figure-2 Details of displacement

### 3. 振動方程式の誘導

先に示した検討モデルの振動方程式を誘導する。入力はい剛梁に対し垂直方向のみの1方向入力とする。各質点の変位量は Figure-2 に示す。各質点の重心 G を中心とした回転による変位量は、層ごとの質点からの重心までの距離 L\_A, L\_B を用いて(1)式のように表すことができる。

$$L_A\theta = \frac{m_B \times L_0}{(m_A + m') + m_B} \times \theta \quad L_B\theta = \frac{(m_A + m') \times L_0}{(m_A + m') + m_B} \times \theta \quad (1)$$

これより振動方程式は(2)式ようになる。尚、変位ベクトルの x は重心 G の併進変位を、は重心 G を中心とした回転角を表す。また m' は D.M.量を表し、外力項の は外乱の分配ベクトルである。

$$[M' + M_0] \begin{Bmatrix} \ddot{x}_n \\ \ddot{\theta}_n \\ \vdots \\ \ddot{x}_1 \\ \ddot{\theta}_1 \end{Bmatrix} + [C] \begin{Bmatrix} \dot{x}_n \\ \dot{\theta}_n \\ \vdots \\ \dot{x}_1 \\ \dot{\theta}_1 \end{Bmatrix} + [K] \begin{Bmatrix} x_n \\ \theta_n \\ \vdots \\ x_1 \\ \theta_1 \end{Bmatrix} = -[M' + M_0] \eta \ddot{x}_g \quad (2)$$

$$[M'] = \begin{bmatrix} \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1M'_n & -1M'_n & & & & \\ -1M'_n & 1M'_n + 1M'_{n-1} & & & & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \\ \vdots & \vdots & 1M'_{3+1}M'_2 & -1M'_2 & & \\ \vdots & \vdots & -1M'_2 & 1M'_2 + 1M'_1 & & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \\ 2M'_n & -3M'_n & & & & \\ -2M'_n & 2M'_n + 2M'_{n-1} & & & & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \\ \vdots & \vdots & 2M'_{3+2}M'_2 & -3M'_2 & & \\ \vdots & \vdots & -2M'_2 & 2M'_2 + 2M'_1 & & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 4M'_n - 5M'_n & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 4M'_n + 4M'_{n-1} & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 4M'_{3+4}M'_2 & -5M'_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & -5M'_2 & 4M'_{3+4}M'_1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} 1M'_n &= m'_{An} + m'_{Bn} & 4M'_n &= m'_{An}L_{An}^2 + m'_{Bn}L_{Bn}^2 \\ 2M'_n &= -m'_{An}L_{An} + m'_{Bn}L_{Bn} & 5M'_n &= m'_{An}L_{An}L_{An-1} + m'_{Bn}L_{Bn}L_{Bn-1} \\ 3M'_n &= -m'_{An}L_{An-1} + m'_{Bn}L_{Bn-1} \end{aligned}$$

$$[M_0] = \begin{bmatrix} \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1M_n & & & & & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \\ \vdots & \vdots & 1M_1 & & & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 2M_1 & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 3M_1 & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \end{bmatrix} \begin{aligned} 1M_n &= m_{An} + m_{Bn} \\ 2M_n &= -m_{An}L_{An} + m_{Bn}L_{Bn} \\ 3M_n &= m_{An}L_{An}^2 + m_{Bn}L_{Bn}^2 \end{aligned}$$

$$[C] = \begin{bmatrix} \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1C_n & -1C_n & & & & \\ -1C_n & 1C_n + 1C_{n-1} & & & & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \\ \vdots & \vdots & 1C_{3+1}C_2 & -1C_2 & & \\ \vdots & \vdots & -1C_2 & 1C_2 + C_1 & & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \\ 2C_n & -3C_n & & & & \\ -2C_n & 2C_n + 2C_{n-1} & & & & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \\ \vdots & \vdots & 2C_{3+2}C_2 & -3C_2 & & \\ \vdots & \vdots & -2C_2 & 2C_2 + C_1 & & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 4C_n - 5C_n & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 4C_n + 4C_{n-1} & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 4C_{3+4}C_2 & -5C_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & -5C_2 & 4C_{3+4}C_1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} 1C_n &= c_{An} + c_{Bn} & 4C_n &= c_{An}L_{An}^2 + c_{Bn}L_{Bn}^2 \\ 2C_n &= -c_{An}L_{An} + c_{Bn}L_{Bn} & 5C_n &= c_{An}L_{An}L_{An-1} + c_{Bn}L_{Bn}L_{Bn-1} \\ 3C_n &= -c_{An}L_{An-1} + c_{Bn}L_{Bn-1} \end{aligned}$$

$$[K] = \begin{bmatrix} \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1K_n & -1K_n & & & & \\ -1K_n & 1K_n + 1K_{n-1} & & & & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \\ \vdots & \vdots & 1K_{3+1}K_2 & -1K_2 & & \\ \vdots & \vdots & -1K_2 & 1K_2 + K_1 & & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \\ 2K_n & -3K_n & & & & \\ -2K_n & 2K_n + 2K_{n-1} & & & & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \\ \vdots & \vdots & 2K_{3+2}K_2 & -3K_2 & & \\ \vdots & \vdots & -2K_2 & 2K_2 + K_1 & & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 4K_n - 5K_n & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 4K_n + 4K_{n-1} & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 4K_{3+4}K_2 & -5K_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & -5K_2 & 4K_{3+4}K_1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} 1K_n &= k_{An} + k_{Bn} & 4K_n &= k_{An}L_{An}^2 + k_{Bn}L_{Bn}^2 \\ 2K_n &= -k_{An}L_{An} + k_{Bn}L_{Bn} & 5K_n &= k_{An}L_{An}L_{An-1} + k_{Bn}L_{Bn}L_{Bn-1} \\ 3K_n &= -k_{An}L_{An-1} + k_{Bn}L_{Bn-1} \end{aligned}$$

$$\eta = [M' + M_0]^{-1}[M_0]$$

#### 4. 設計概要

1 層モデルの場合，A 通りが B 通りの周期に一致するよう D.M.を付加する事で両通りの変位差(以後ねじれ応答)を大幅に制御することが可能である．しかし，多層モデルの場合高次モードの影響が生じる為，1 次周期のみを一致させるだけではねじれ応答を制御しきれない場合がある．そこで本報はこの問題に対し，古橋・石丸らによる既往の研究である「完全モード制御」<sup>2)</sup>を使用する．

#### 5. 設計方針

まず，A 通りの目標とする B 通りの周期を 1 次だけに絞る為，B 通りに対して完全モード制御を行う．

次に A 通りの高次モードを制御しつつ B 通りの残った 1 次周期と一致させる A 通りの D.M.量を(3) (4)式を介して算出する．(3)式は D.M.により得られる入力低減効果  $\eta$  を代入することで各層の D.M.量を算出することが出来る式である．また (3)式に代入する  $\eta$  は(4)式より求める事が出来る．

$$\begin{pmatrix} m'_{A5} \\ m'_{A4} \\ m'_{A3} \\ m'_{A2} \\ m'_{A1} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} (\eta_5 - \eta_4) & & & & \\ -(\eta_5 - \eta_4) & (\eta_4 - \eta_3) & & & \\ & -(\eta_4 - \eta_3) & (\eta_3 - \eta_2) & & \\ & & -(\eta_3 - \eta_2) & (\eta_2 - \eta_1) & \\ & & & -(\eta_2 - \eta_1) & \eta_1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} m_5(1 - \eta_5) \\ m_4(1 - \eta_4) \\ m_3(1 - \eta_3) \\ m_2(1 - \eta_2) \\ m_1(1 - \eta_1) \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$(\eta_i - \eta_{i-1}) = \sum_{j=1}^n m_j \times \frac{1}{(\gamma \cdot k_i)} \quad (4)$$

$i$  : D.M. 量を求めたい層  
 $M_B$  : B通りの1次モードの有効質量  
 $K_B$  : B通りの1次モードの有効剛性

$$\gamma = \frac{M_B}{K_B} \quad \eta_0 = 0$$

ここで  $m_i \cdot k_i$  は A 通りの  $i$  層目のパラメータを表している以上の手順よりもとめた D.M.量を A 通りに付加する事で両通りの残った 1 次周期を一致させる．

#### 6. 固有値解析結果

Table-1 に非制震モデル，Table-2 に制震モデルの諸元を表す．また Table-3 に固有値解析結果を示す．

Table-1 Model parameter (非制震)

FL	A通り				B通り			
	質量 (ton)	剛性 (kN/m)	減衰係数 (kN·s/m)	D.M. (ton)	質量 (ton)	剛性 (kN/m)	減衰係数 (kN·s/m)	D.M. (ton)
5	1.00	2200.00	33.00	9.66	2.00	1600.00	24.00	0.00
4	2.00	2400.00	36.00	11.26	2.00	2000.00	30.00	1.25
3	3.00	2600.00	39.00	14.03	4.00	2400.00	36.00	4.65
2	4.00	2800.00	42.00	18.47	3.00	3000.00	45.00	9.61
1	4.00	3000.00	45.00	24.40	5.00	2500.00	37.50	13.52

Table-2 Model parameter (制震)

FL	A通り				B通り			
	質量 (ton)	剛性 (kN/m)	減衰係数 (kN·s/m)	D.M. (ton)	質量 (ton)	剛性 (kN/m)	減衰係数 (kN·s/m)	D.M. (ton)
5	1.00	2200.00	17.60	0.00	2.00	1600.00	12.80	0.00
4	2.00	2400.00	19.20	0.00	2.00	2000.00	16.00	0.00
3	3.00	2600.00	20.80	0.00	4.00	2400.00	19.20	0.00
2	4.00	2800.00	22.40	0.00	3.00	3000.00	24.00	0.00
1	4.00	3000.00	24.00	0.00	5.00	2500.00	20.00	0.00

Table-3 Comparison of eigenvalue  
a 非制震 b 制震

FL	MODE	a 非制震					b 制震				
		1次	2次	3次	4次	5次	1次	2次	3次	4次	5次
5	併進 x	0.10	1.28	-0.07	-0.40	-0.06	1.44	0.81	0.71	0.58	0.51
	回転 L <sub>0</sub>	0.37	-0.29	-0.25	-0.15	0.37	-0.02	0.84	0.00	0.01	0.00
4	併進 x	0.03	1.23	0.00	-0.17	-0.12	0.07	0.06	0.00	-0.02	0.00
	回転 L <sub>0</sub>	0.34	-0.34	-0.13	0.15	0.06	-0.02	0.80	0.00	0.01	0.00
3	併進 x	0.05	1.02	0.02	0.10	-0.05	0.06	0.02	0.00	-0.01	0.00
	回転 L <sub>0</sub>	0.29	-0.34	0.04	0.25	-0.27	-0.01	0.72	0.00	0.00	0.00
2	併進 x	0.00	0.77	0.01	0.22	0.11	0.06	-0.01	0.55	0.00	0.00
	回転 L <sub>0</sub>	0.21	-0.28	0.15	-0.11	-0.06	0.04	-0.04	0.00	0.01	0.00
1	併進 x	0.02	0.41	0.03	0.17	0.14	0.00	0.33	0.00	0.00	0.00
	回転 L <sub>0</sub>	0.12	-0.11	0.15	-0.24	0.22	0.03	0.03	0.00	-0.01	0.00

Table-3-a から各モードにおいて併進とねじれが連成している事が確認出来る．また刺激関数の大小関係より 1 次は回転主体と 2 次は併進主体のモードとそれぞれ主体のモードが交互に生じる．

それに対し Table-3-b に示す制震モデルでは，2 次モードの併進成分以外の刺激関数がほぼ 0 である事が分かる．3 次モード以降は完全モード制御により，1 次モードと 2 次モードの回転成分は周期を一致させた事による効果である．

次節より実際に地震波を入力し，非制震モデルと制震モデルの応答解析結果の比較を行う．

#### 7. 時刻歴応答解析

BCJ L2 波を用い両モデルの比較を行う．Figure-3 に重心，B 通り，A 通りの最大変位，Figure-4 に層間変形角を示す．

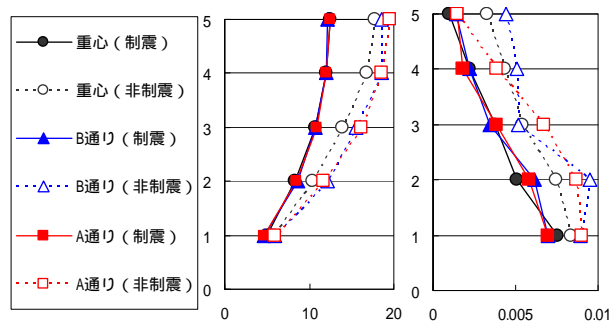


Figure-3 Maximum response(cm) Figure-4 Story drift

Figure-3, 4 から非制震時に比べ制震時の両通りの応答が重心の応答と近い値となっている事が分かる．また応答自体も入力低減効果により減少している．

次に最大変位が最も生じている 5 層目のねじれ成分のみ取り出した時刻歴変位応答を Figure-5 に示す．

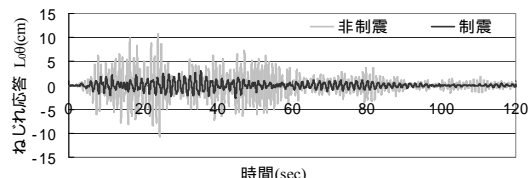


Figure-5 Time history response( displacement of L<sub>0</sub> )

Figure-5 から大幅にねじれ応答を低減しており，最大応答は 80%低減している．その他の地震動に対しても同様な効果が確認され，偏心を有していても D.M.を適切に付加するのみでねじれ応答制御は十分可能であると確認出来た．

#### 8. まとめ

D.M.を用い 2 次モードの併進成分以外のモードをほぼ 0 にする事で動的なねじれ応答の制御を可能とした．また，応答解析結果を通し，本手法による D.M.を用いたねじれ応答の制御が十分に有効であることを示した．

#### 参考文献

- 古橋剛，石丸辰治：慣性接続要素によるモード分離，日本建築学会構造系論文集 第 576 号，pp. 5-62，2004
- 古橋剛，石丸辰治：慣性接続要素に多質点振動系の応答制御，日本建築学会構造系論文集第 601 号，pp. 83-90，2006