

最下層柱中間部浮き上がり架構の簡易モデルによる地震応答
その2 簡易モデルの解析

正会員 ○小谷 直人*1 同 緑川 光正*2 同 岡崎 太一郎*3
同 麻里 哲広*4 同 石原 直*5 同 小豆畑 達哉*6

鉄骨構造 柱中間部浮き上がり 応答解析
簡易モデル 鋼材ダンパー ロッキング架構

1. はじめに

本報告その2ではその1に引き続き、CMU 架構の簡易モデルの地震応答を求め、架構モデルの応答と比較した。

2. 解析モデル

架構モデルを図1に示す1質点モデル、または2質点モデルに簡易化した。ダンパーを設置していない場合の1質点モデルにおける浮き上がり時の運動方程式は Meek¹⁾が導いた近似式(1)を採用し、2質点モデルでは式(2)とした。ただし \ddot{x} 、 g 、 M はそれぞれ地動加速度、重力加速度、質量である。建物幅 E' 及び鉛直方向の荷重 Mg は架構モデルと同じ値とした。

$$m \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & \frac{R^2}{H^2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u} \\ \ddot{z} \end{Bmatrix} + k \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ z \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} m\ddot{x} \\ m\ddot{x} \pm \frac{MgE'}{H} \end{Bmatrix} \dots (1)$$

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ z \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} m_1\ddot{x} \\ m_2\ddot{x} \end{Bmatrix} \dots (2)$$

1質点モデルの場合、1次固有周期及び1次等価質量が架構モデルと一致するように剛性及び質量を設定した。2質点モデルの場合、1次と2次の固有周期及び等価質量が架構モデルと一致するように剛性及び質量を設定した。また、1次モード刺激関数が1となる高さを架構モデルと一致させた。1質点モデルの場合、10層モデルでは浮き上がり時の3次固有周期、6層、4層モデルでは浮き上がり時の2次固有周期を架構モデルと一致させるように E を定めた(架構モデルの自由振動解析で卓越するモードを選択した)。2質点モデルの場合、層数に関わらず浮き上がり時の2次固有周期、3次固有周期が架構モデルと一致するように H_1 、 H_2 、 E を定めた。

上部構造はバイリニア型の履歴を描く弾塑性モデルを適用し、2質点モデルの2層のみ弾性とした。架構モデルにおける静的増分解析結果の降伏時のベースシアを簡易モデルの降伏時のベースシアとした。架構モデルの地震応答解析で得られた最大頂部水平変形の平均を求め、静的増分解析におけるその変形に達した時点の上部構造歪エネルギーが上部構造バイリニアの場合と一致するように二次剛性を設

定した。

3. 解析結果

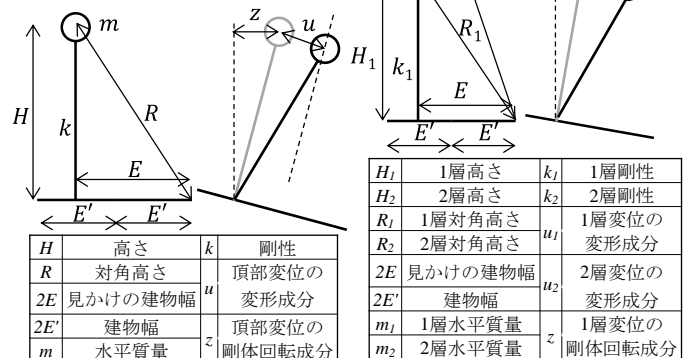
架構モデルと1質点モデルの最大頂部水平変位の比較を図2に示す。簡易モデルの結果は概ね良い対応を示す。

架構モデルと簡易モデルのダンパー履歴吸収エネルギーの比較を図3に示す。簡易モデルの結果はやや大きくなるが、架構モデルと概ね良い対応を示す。

架構モデルと1質点モデルそれぞれの塑性変形により蓄積される上部構造歪エネルギーの比較を図4(a)に示す。1質点モデルで上部構造が塑性化したケースは10層CMUモデルで34ケース中13ケース、10層CMU-NDモデルで34ケース中7ケースのみであった。1質点でモデル化した場合、上部構造歪エネルギーは小さくなる傾向があり、この傾向は特に10層モデルで顕著である。

架構モデルと2質点モデルの塑性変形により蓄積される上部構造歪エネルギーの比較を図4(b)に示す。2質点10層CMUモデルでは34ケース中33ケースで上部構造が塑性化した。図4(a)同様やや簡易モデルの結果は小さくなる傾向があるものの、1質点モデルより良い対応を示す。

2質点モデルの固有モードを図5に示す。スケールは適宜調整した。モデルの層数に関わらず、自由振動解析で卓越する振動モードの z 成分が大きくなる。上部構造歪エネルギーについて、10層のみ1質点モデルと2質点モデルで大きく解析結果が異なった理由に、塔状比が大きい架構モデルでは浮き上がり開始時の速度及び変位のばらつきが大きくなる事、10層モデルでは卓越する



(a) 1質点モデル (b) 2質点モデル

図1 簡易モデル

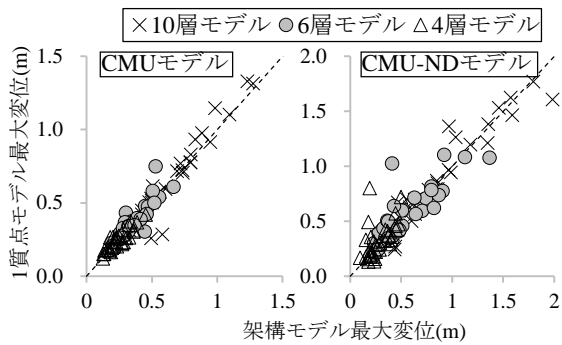


図2 頂部水平変位の比較

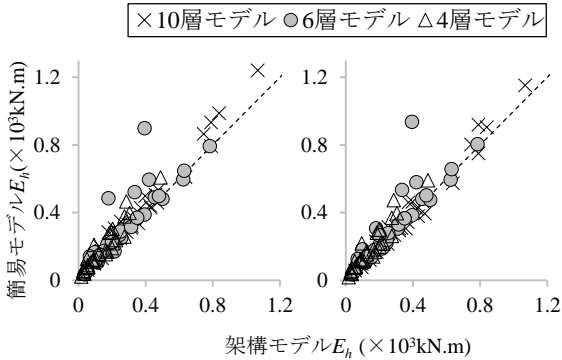


図3 ダンパー履歴吸収エネルギーの比較

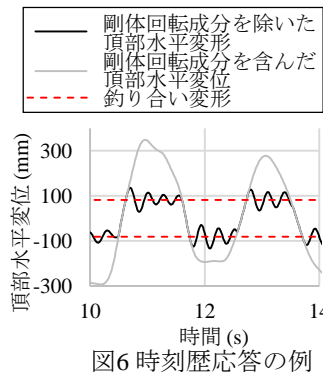
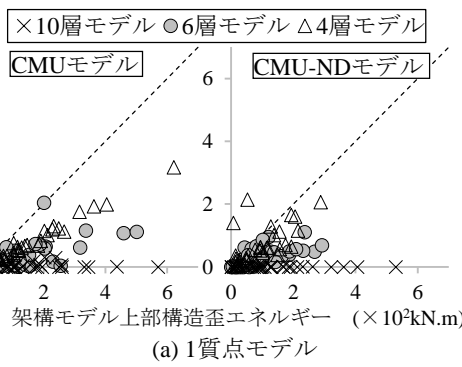


図6 時刻歴応答の例

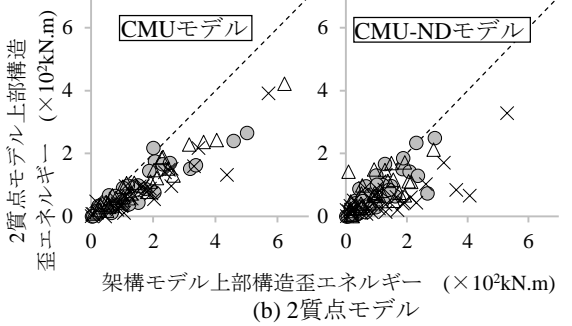
表1 簡易モデル
つりあい変形 (単位:mm)

		10層	6層	4層
1質点モデル	2次モード	u_1 -6.91	4.49	9.7
		u_2 7.03	42.7	33.8
		z -1.96	-16.8	-15.3
2質点モデル	3次モード	u_1 42.1	15.9	4.10
		u_2 85.3	12.0	1.00
		z -37.0	-6.07	-0.83
合計		u_1 35.2	20.4	13.8
		u_2 92.3	54.7	34.8
		z -38.9	-22.9	-16.2

3次モードの u_1 成分が大きい一方、6層及び4層モデルでは卓越する2次モードの u_1 成分が小さく2質点モデルでは1層しか降伏しない事が考えられる。図6に10層CMU-ND架構を1質点に簡易化した場合の時刻歴応答の例(JMA神戸、100kine)を示す。浮き上がり時は図6に示す重力とダンパー及び上部構造復元力によるつりあい変形 δ_{equ} をモード毎に算定できる²⁾。ダンパーによる復元力を無視した場合のつりあい変形を表1に示す。2質点モデルでは、層数が高くなるほど3次モードのつりあい変形が卓越する。10層モデルの1層では負の値をとる。これらは卓越する振動モードにおいて z 成分が大きくなることと対応している。なお、1質点モデルのつりあい変形 δ_{equ} は以下の式(3)で表現される。



(a) 1質点モデル



(b) 2質点モデル

図4 上部構造歪エネルギーの比較

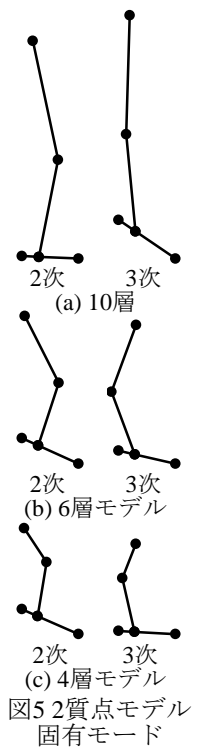


図5 2質点モデル固有モード

$$\delta_{equ} = \frac{H}{kR^2} E' Mg \dots (3)$$

また、例えば、 $H_1 = H_2 = H$ 、 $E = E'$ とした場合、2質点モデルのつりあい変形 δ_{equ} はモード刺激関数 $(U_1 \ U_2 \ z)^T$ を用いることで、以下の式(4)で表現される。

$$\delta_{equ} = Mg \frac{H}{(m_1 + m_2)E} \times \frac{2m_2(U_2 + 2Z) + m_1(U_1 + Z)}{U_1^2 k_1 + k_2(U_1 - U_2)^2} \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ Z \end{pmatrix} \dots (4)$$

式(3)、(4)から剛性が小さいこと、質量が大ききこと及びモード形の剛体回転成分が大ききことがつりあい変形の大きくなる条件であるといえる。その為自由振動において卓越する振動モードの剛体回転成分が大きくなっており、表1の結果と一致する。

3. まとめ

- 1)簡易モデルで求めた頂部水平変位及びダンパー履歴吸収エネルギーの応答は架構モデルと概ね良く対応する。
- 2)1質点モデルで求めた上部構造歪エネルギーは10層の場合に架構モデルと比べて過小評価の結果となるが、2質点モデルでは層数に関わらず架構モデルと概ね良く対応する。

【謝辞】本研究の一部は日本学術振興会科学研究費(25289177)の助成を得た。ここに謝意を表する。

【参考文献】

- 1) Meek, J. W: Effect of Foundation Tipping on Dynamic Response, J.Struct. Div., ASCE, Vol.101, No.ST7, pp. 1297-1311, 1975.7
- 2) 茂木良宏,岡山真之介:接地と浮き上がりを伴う自由振動系のモード分解とその振動特性,日本建築学会構造系論文集,第713号,pp.1013-1022, 2015.7

*1 一般財団法人ベターリビング (前 北海道大学大学院生)
 *2 北海道大学 名誉教授・工博 (建築研究所 客員研究員)
 *3 北海道大学 大学院工学研究院 准教授・Ph.D.
 *4 北海道大学 大学院工学研究院 助教・博士(工学)
 *5 建築研究所 主任研究員・博士(工学)
 *6 建築研究所 上席研究員・博士(学術)

*1 Tsukuba Building Research and Testing Laboratory Center for Better Living (Formerly Graduate Student of Hokkaido Univ.)
 *2 Prof. Emeritus., Hokkaido Univ., Dr. Eng.
 *3 Assoc. Prof., Faculty of Eng., Hokkaido Univ., Ph.D.
 *4 Asst. Prof., Faculty of Eng., Hokkaido Univ., Dr. Eng.
 *5 Senior Research Engineer, Building Research Institute, Dr. Eng.
 *6 Chief Research Engineer, Building Research Institute, Ph. D.