

## 免震構造における上部建物の層間変形角の均等化について

正会員 ○鈴木光雄\*

免震構造 層間変形角 制御  
剛性

## 1. はじめに

免震構造は、地震被害軽減に最も有効な耐震形式といえる。免震構造では、一般に大地震においても上部構造は弾性状態であり、免震構造のグレードの評価として、層間変形角が用いられることが多い。

免震層が同じ性状であるとしても、上部構造の振動性状が異なれば上部構造の応答が変動する。地震の入力エネルギーが一定とすると、上部構造の各層が均等な変形角で振動することができれば、最大層間変形角を抑えながら、振動エネルギーと減衰吸収エネルギーを効率よく負担できるものと考えられる。上部構造の応答は、質量、剛性、減衰により決定されるが、層間変形に最も影響する因子は剛性である。上記考察をもとに、建物剛性を制御して、上部構造の層間変形角を均等にすることを試みる。この結果、層間変形角の均等化は、最大層間変形角の抑制に効果的であることを、解析例をもとに確認する。

## 2. 検討方法

## (1) 検討概要

$n$ 質点のせん断型モデルを考え、 $j$ 層の質量、せん断剛性を $m_j$ 、 $k_j$ とし、 $s$ 次の固有円振動数を $\omega^{(s)}$ 、モードベクトル成分を $u_j^{(s)}$ とする。減衰のない多自由度系の自由振動に関する固有値問題を考え、一次モードにおける各層の方程式を、 $k_j$ について整理すると下式の通り表される。

$$k_j = \left( \omega^{(1)2} \sum_{l=j}^n m_l u_l^{(1)} \right) / (u_j^{(1)} - u_{j-1}^{(1)}) \quad (1)$$

(1)式は、一次固有モード逆問題に対する閉形解表現である。文献1では、モーダルアナリシスの検討結果に基づいて設定された一次の固有周期と固有モード分布から剛性を算出し、目標とする応答値を実現する方法が示されている。

ただし、モーダルアナリシスと時刻歴解析の結果は、一次モードと高次モードの応答との同時性に大きく左右され、看過できないほどの差異が生じる場合がある。このため、本報告では時刻歴応答解析の結果に基づいたモード分布を用いる。地震動は設計実務で用いられている建設省告示第1461号の工学的基盤の地震動（以下、告示波）と、代表観測地震波のEl Centro1940(NS)、Taft1952(EW)、Hachinohe1968(NS)、およびBCJ-L2を0.815倍した

ものとする。告示波の位相はHachinohe1968(NS)、JMA-Kobe1995(NS)とする。なお、BCJ-L2の0.815倍は、速度応答スペクトルのレベルを告示波と同じ設定とし、告示波のランダム位相に準じるものとして設定した。

## (2) 剛性の制御方法

応答解析結果の各層の最大応答層間変位 $\Delta y_j$ を用い、一次モードの層間成分 $\Delta u_j^{(1)}$ を以下のように設定する。目標応答層間変位 $t_g \Delta y_j$ に対する各層変位 $\Delta y_j$ の比を $_{ay}p_j (= \Delta y_j / t_g \Delta y_j)$ とし、その逆数を $\Delta u_j^{(1)}$ にかける。更新された $_{upa} \Delta u_j^{(1)}$ は下式のようなになる。

$$_{upa} \Delta u_j^{(1)} = \Delta u_j^{(1)} / _{ay}p_j \quad (2)$$

この設定は文献1と同様であり、文献1ではモーダルアナリシスの結果を用いるのに対し、本検討では時刻歴応答解析結果を用いる点で異なっている。

以下に時刻歴応答解析結果をもとにした建物剛性による応答層間変形角の調整方法を示す。

**Step0** 建物諸元（質量、剛性、減衰）、建物固有周期および、目標とする層間変位を設定する。

**Step1** 固有値解析及び時刻歴応答解析を行う。

**Step2** 応答結果を用いた $_{upa} \Delta u_j^{(1)}$ から、(1)式で建物剛性を設定し、**Step1**に戻り、以降**Step1,2**を繰り返す。目標の応答に達した時点で計算を終了する。

なお、本検討では収束判定として、各層の $_{ay}p_j$ の平均値 $\overline{_{ay}p}$ と $_{ay}p_j$ が下記条件を満足した時とする。

$$\left| 1.0 - \overline{_{ay}p} / _{ay}p_j \right| < 0.02 \quad (3)$$

## 3. 解析例

## (1) 建物概要

図1に示すような建物上部に鉄塔が取り付けられた免震構造を考える。建物が4層、鉄塔は14層で構成される鉄骨造である。重量、剛性は表1の通りであり、剛性は類似例の応答せん断力等をもとに初期設定として定めたもので、基礎固定時の固有周期は1.06秒である。免震層は、天然ゴム系積層ゴムアイソレーターと鉛プラグ入り積層ゴムアイソレーターで構成され、400mm変位時の等価周期は3.2秒である。減衰は、上部構造を剛性比例型で減衰定数1%、免震層は減衰を0としている。最大層間変形角の

目標値は建物本体を 1/300、鉄塔を 1/200 とする。

表 1 建物諸元

層	階高 (m)	重量 (kN)	剛性 (kN/mm)
18	2.9	70.0	7.0
17	2.9	100.0	15.0
16	2.9	150.0	20.0
15	2.9	120.0	25.0
14	2.9	150.0	28.0
13	2.9	120.0	30.0
12	2.9	120.0	32.0
11	2.9	120.0	34.0
10	2.9	140.0	36.0
9	2.9	160.0	38.0
8	2.9	160.0	40.0
7	2.9	160.0	44.0
6	2.9	160.0	56.0
5	4.5	300.0	100.0
4	5.5	17000.0	400.0
3	5.5	28000.0	800.0
2	5.5	20000.0	900.0
1	5.5	20000.0	1000.0
免震層	-	30000.0	-

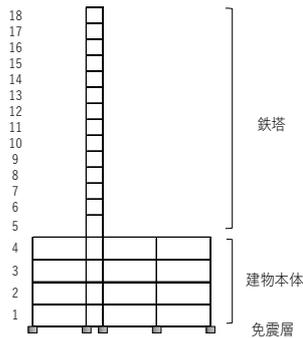


図 1 建物概念図

(2) 解析結果

地震応答解析結果を図 2(a)に示す(Original)。鉄塔部分の 7~10 層部分で目標値を満足していない。次に、目標層間変形角に対し、各層同じ応答余裕度を有するように剛性の制御を行う。ここでは、上部構造の固有周期を元と同じ 1.06 秒(Case1)とした。結果を図 2(b)に示す。次に上部構造の固有周期 1.15 秒(Case2)、1.2 秒(Case3)の結果を図 2(c),(d)に示す。層間変形角の目標値に対し、Case1 では全層で 10%程度下回り、Case2 ではほぼ目標値同等、Case3 では 10%程度上回り、固有周期が大きくなるほど上部の応答が増えていることがわかる。それぞれの建物の剛性を図 3 に示す。

----- Elc(NS)    - - - - Taft(EW)    ——— Hac(NS)    - - - - BC12(x0.815)    - - - - kokHac    - - - - kokkobe

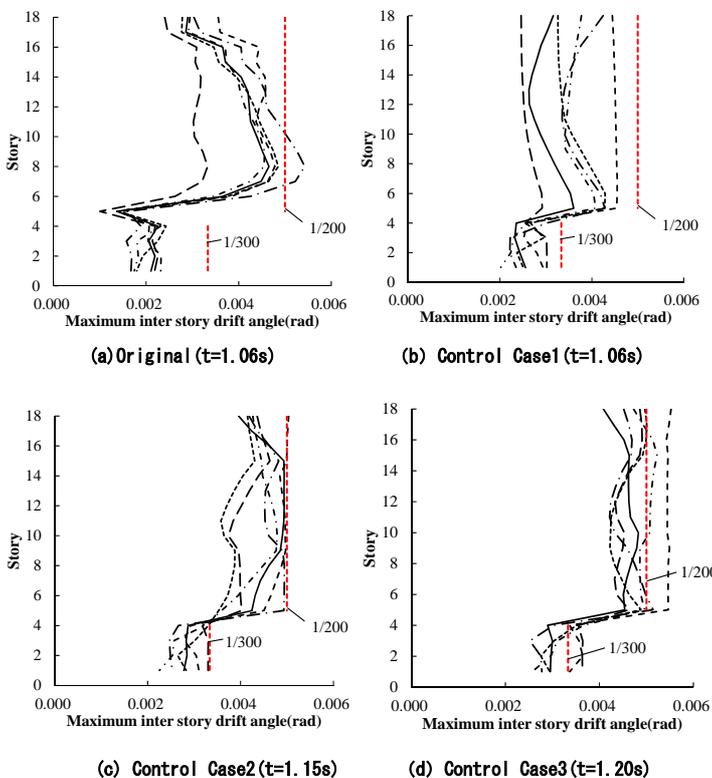


図 2 最大層間変形角

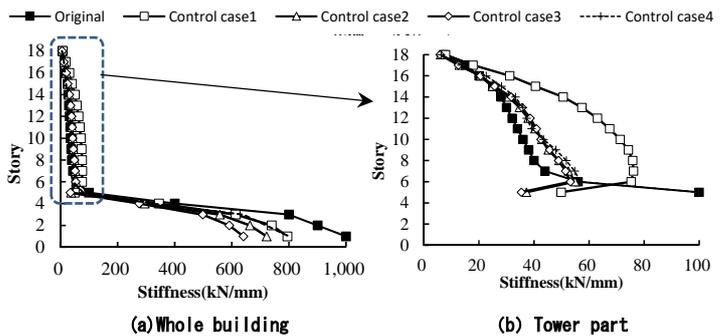


図 3 建物剛性

躯体コストの目安として、建物剛性の合計を図 4 に示す。元の建物の剛性が最も高く、制御ケースでは全剛性が低下するほど変形の余裕度が減ることがわかる。均等な層間変形角とする制御(Case1~2)は、より少ない総剛性で変形角の余裕度を確保できる結果となっている。

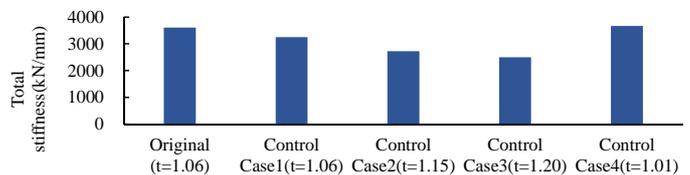


図 4 建物剛性の総計

元の建物の応答で層間変形角のクライテリアを満足していないのは鉄塔部分である。建物本体部分は様々な荷重条件や、建築、設備その他の計画の制約を受ける。このため、6 層目以上の鉄塔部分のみの層間変形角が均等となるように剛性の制御を行うことを考える(Case4)。概ねクライテリアの 1/200 となる時の結果を図 5 に示す。このときの上部構造の固有周期は、1.01 秒である。また、全層の剛性の合計を図 4 に示す。元の剛性を 2% 上回るがほぼ同等であり、効率的にクライテリアを満足できているものと考えられる。

図 5 最大層間変形角 (Case 4)  
(凡例は図 2 参照)

4. まとめ

免震構造の層間変形角が均等になるように剛性制御を行い、総剛性により評価を行った。本解析例では、上部構造の最大層間変形角を均等にする制御は、総剛性を低く抑えることができ、有効であることが確認された。

参考文献

1) Nakamura, Tsuneyoshi, and Takashi Yamane. "Optimum design and earthquake - response constrained design of elastic shear buildings." *Earthquake engineering & structural dynamics* 14.5 (1986): 797-815.