

## 超高層中間階免震建築物の風応答性状に関する研究

## —その1 等価静的風荷重による風応答評価—

日大生産工 (学部) ○若林 美希 日大生産工 神田 亮 日大生産工(院) 杉本 耕作

## 1. はじめに

免震構造とは構造物と地盤とを力学的に絶縁し、地動加速度をなるべく上部構造に伝えず耐震性を向上させようとする構造形式である。中低層の免震建築物において耐風性はほとんど問題にならない。しかし、免震構造を高層建築物に適用すると免震層の剛性が極端に小さいことに加え、構造物の密度の低下と上部構造に直接作用する風外力の上昇があいまって免震建築物の耐風性が問題となるケースがある。

免震建築物は高層建築物を含めそのほとんどが基礎免震構造である。近年では、免震層を建築物の基礎部ではなく中間階に設ける中間階免震建築物が計画施工されるようになった。基礎免震建築物に対して中間階免震建築物のメリットは、免震部材の面圧や引抜力の低減が可能となることが挙げられる。その他に、大規模建築物への適用、上下で形状や用途の異なる建築物の免震化などがある<sup>1)</sup>。

中間階免震建築物は基礎免震建築物に対して未だ計画施工数からいえば少ないが、そのメリットを活かすためいくつかの研究が行われている。中間階免震建築物の耐震性に関する研究について、代表的なものとして、文献 1), 2), 3) が挙げられる。また、中間階免震建築物の耐風性に関する研究は文献 4), 5) が挙げられる。これらの研究は中間階免震建築物を設計する上で重要な基礎資料となるが、未だ不明瞭な点が多く残されている。それらの中でも中間階免震建築物の耐風性に関する問題が多い。

例えば、建築基準法告示に準拠して定めた設計用等価静的風荷重は、台風通過時のように風向変化が激しい場合、設計用荷重の過少評価となり危険側になる恐れがある<sup>5)</sup>。また、免震建築物に風外力が作用した場合、風外力の平均成分の影響により免震部材の変形が時間とともに増大するクリープ変形が生じることが報告されている<sup>6), 7), 8)</sup>。しかし、中間階免震建築物において、クリープ変形を考慮した風外力に対する挙動の評価は未だなされていない。

以上のことより、本論文の目的は高減衰ゴム系積層ゴム(以下、HDR)のクリープ変形を考慮した復元力モデルを用いて超高層中間階免震建築物の風応答性状に

ついて検討を行うことである。そこで、まず、その1では建築物荷重指針・同解説に基づいて算出した等価静的風荷重を用いて、超高層中間階免震建築物の風応答性状について検討を行う。

## 2. 解析モデルの概要

## 2.1 対象建築物

本論文の対象建築物は、Fig.1 に示すような建築物高さ 150m、アスペクト比 5 の 42 階建（階高は 1~2 階を 5.0m、3~42 階を 3.5m）の RC 純ラーメン架構とする<sup>9)</sup>。対象建築物の構造諸元を Table1 に示す。この対象建築物の基礎、3,6,9,15,21 層に免震層を設置し検討を行う。

Fig.2 のように建築物の構造軸に対して X 方向を風方

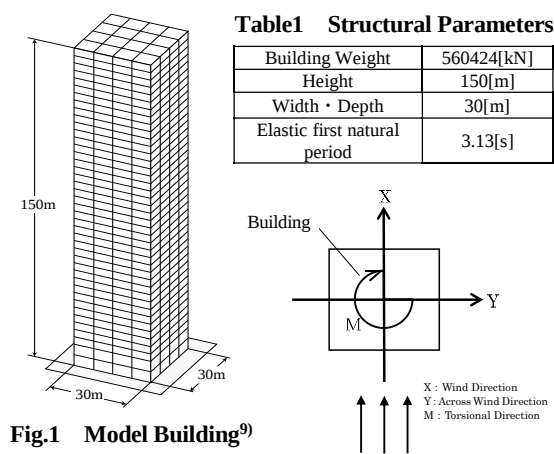
Fig.1 Model Building<sup>9)</sup>

Fig.2 Wind Direction and Structural axes

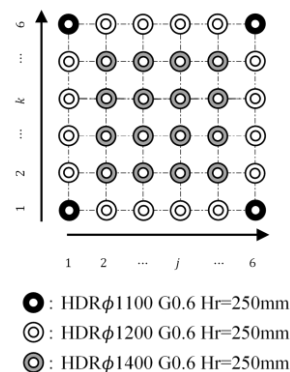


Fig.3 Arrangement of the Seismic Isolation

## Study on Wind Response Characteristic of Super High Rise Inter Story Isolated Buildings

## — Part 1 Evaluation by Equivalent Static Wind Loading —

Miki WAKABAYASHI, Makoto KANDA, and Kousaku SUGIMOTO

向, Y 方向を風直交方向, M 方向を捩れ方向とする。

## 2.2 免震層のパラメータの算出方法

基礎免震構造の免震部材の配置を Fig.3 に示す。免震部材の選定にあたって, 免震層のクリープ変形が顕著に表れる HDR のみを使用している。本論文では中間階免震建築物の風応答性状について検討するため, 免震層の位置によらず上部構造の重量に対して性能が等価になるように設定した。そこで, 免震層のパラメータである降伏せん断力係数 $\alpha$ と水平方向の弾性時・塑性時・等価剛性時の免震周期 $T$ , 上部構造の回転慣性に対する降伏耐力のモーメントの比率 $\alpha_\theta$  (以下, 降伏時の捩れモーメント係数), 捩れ方向の弾性時・塑性時・等価剛性時の免震周期 $T_\theta$ を, 全ての免震層位置の場合について一致させている。式(1)~(4)に免震層のパラメータの算出式を示す。

$$\alpha = \frac{\sum Q_y^{jk}}{mg} \quad (1)$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{\sum k^{jk}}} \quad (2)$$

$$\alpha_\theta = \frac{Q_y^{jk} \cdot L^{jk}}{I \cdot \omega^{jk}} \quad (3)$$

$$T_\theta = 2\pi \sqrt{\frac{I}{K_\theta}} \quad (4)$$

$Q_y^{jk}$ は降伏耐力[kN],  $m$ は免震層上部の質量[ton],  $g$ は重力加速度[m/s<sup>2</sup>],  $k^{jk}$ は各免震部材の弾性時では弾性剛性, 塑性時では塑性剛性, 等価時では等価剛性[kN/m],  $L^{jk}$ は各免震部材の重心からの距離[m],  $I$ は回転慣性[ton・m<sup>2</sup>],  $\omega^{jk}$ は各免震部材の角加速度[rad/s<sup>2</sup>],  $K_\theta$ は免震層の捩れ剛性[kN/m]を示す。ここで, 上付き文字の $jk$ は Fig.3 における免震部材の横, 縦の位置を示す。回転慣性は式(5)より, 各免震部材の角加速度は式(6)より, 免震層の捩れ剛性は式(7)よりを求める。

$$I = \frac{1}{12}m(B + D^2) \quad (5)$$

$$\omega^{jk} = \frac{g}{L^{jk}} \quad (6)$$

$$K_\theta = \sum (k_x^{jk} \times L_x^{jk^2} + k_y^{jk} \times L_y^{jk^2}) \quad (7)$$

$B$ は建築物の幅[m],  $D$ は建築物の奥行[m],  $k_x^{jk}$ および $k_y^{jk}$ は各免震部材の X 方向および Y 方向の弾性時では弾性剛性, 塑性時では塑性剛性, 等価時では等価剛性[kN/m],  $L_x^{jk}$ および $L_y^{jk}$ は各免震部材の X 方向および Y 方向の距離[m]を示す。

免震層の位置によらず全免震層に共通するパラメータを Table2 に示す。

**Table2 Parameters of the Seismic Isolation Layer**

|                                       |                      | Horizontal | Torsional |
|---------------------------------------|----------------------|------------|-----------|
| Yield Shear Force Coefficient         |                      | 0.023      |           |
| Torsional Moment Coefficient at Yield |                      |            |           |
| Seismic Isolation<br>Period [s]       | Elastic              | 1.81       | 1.62      |
|                                       | Plastic              | 5.73       | 5.11      |
|                                       | Equivalent Stiffness | 4.41       | 3.93      |

## 3. 等価静的風荷重による解析

本論文では等価静的風荷重を建築物荷重指針・同解説に基づき, 風方向と風直交方向について算出を行った。今後, 文献 10)で用いられている台風通過時を模擬した風力波形について検討を行うため, 建設地は福岡県朝倉市, 地表面粗度区分Ⅱとする。免震層に作用する荷重は算出した等価静的風荷重の免震層上部の合力である。各免震層モデルの免震層に作用する等価静的風荷重を Table3 に示す。

**Table3 Wind Loading Acting on the Isolation Layer**

|                    | Wind Direction[kN] | Across Wind Direction[kN] |
|--------------------|--------------------|---------------------------|
| 21 Layer Isolation | 9569               | 13074                     |
| 15 Layer Isolation | 11963              | 15097                     |
| 9 Layer Isolation  | 14207              | 16458                     |
| 6 Layer Isolation  | 15255              | 16891                     |
| 3 Layer Isolation  | 16233              | 17159                     |
| Base Isolation     | 17070              | 17271                     |

### 3.1 風方向における免震層の最大変形の算出

風方向は, 風外力の平均成分の影響により免震層のクリープ変形を考慮する必要がある。本論文では免震層の変形を静的に評価するため, HDR の平均成分と変動成分を有する正弦波加振実験より得られた式(8)より免震層の水平クリープひずみ $\gamma_m$ を算出した<sup>11)</sup>。免震層の最大変形 $\delta$ [cm]は, 式(9)のように水平クリープひずみ $\gamma_m$ にゴム層厚 $h$ [mm]を乗じ算出した。

$$\begin{aligned} \gamma_m(\tau_s, \tau_d, t) &= \gamma_s + \gamma_d \\ &= C_1 t^{p_1} \tau_s^{q_1} + C_2 t^{p_2} \tau_s^{q_2} \tau_d^{r_2} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\delta = \gamma_m \cdot h \quad (9)$$

ここで、 $\tau_s$ は静的せん断応力[MPa]、 $\tau_d$ は動的せん断応力[MPa]、 $t$ は正弦波加振実験の加振継続時間[s]を示す。静的せん断応力 $\tau_s$ 、動的せん断応力 $\tau_d$ を求める際に、求めた等価静的風荷重 $W$ の平均成分と変動成分をガスト影響係数 $G_f$ で除して分離する。せん断応力は各成分の風荷重を免震部材の全断面積 $A$  [mm<sup>2</sup>]で除したものであり、静的せん断応力 $\tau_s$ 、動的せん断応力 $\tau_d$ は式(10)、(11)のように表せる。

$$\tau_s = \frac{W/G_f}{A} \quad (10)$$

$$\tau_d = \frac{W - W/G_f}{A} \quad (11)$$

この時、加振継続時間は 2～3 時間以上とされている。加振継続時間が 2～3 時間の正弦波加振において、変動成分は 1/2 の値を用いても安全性検証として妥当であるとされている<sup>12)</sup>。そのため、本論文では加振継続時間 $t$ を9000[s](2.5 時間)として検討を行った。また、式(8)の評価式に用いるパラメータ ( $C_1$ ,  $C_2$ ,  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $q_1$ ,  $q_2$ ,  $r_2$ ) は静的加力試験および動的加力試験の結果から決められたパラメータで Table4 に示す。

**Table4 Parameter in the Equation(10)<sup>11)</sup>**

| $C_1$ | $C_2$ | $p_1$  | $p_2$  | $q_1$ | $q_2$ | $r_2$ |
|-------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|
| 1.76  | 4.50  | 0.0831 | 0.0481 | 1.63  | 0.691 | 1.08  |

### 3.2 風直交方向における免震層の最大変形の算出

風直交方向は、風外力の変動成分のみが作用し、クリープ変形が生じない。そのため、地震時の復元力モデルとして文献 13)に示すひずみ依存性を有する修正バイリニアモデルを用いた。

本修正バイリニアの荷重－変位関係( $P - \delta$ )は式(12)で表される。等価剛性 $K_{eq}$ は式(13)より求められる。また、式(13)のせん断弾性率 $G_{eq}$ は式(14)から求められる。

$$P = K_{eq} \cdot \delta \quad (12)$$

$$K_{eq} = G_{eq} \cdot A/h \quad (13)$$

$$G_{eq} = G_0(2.855 - 3.878\gamma + 2.903\gamma^2 - 1.016\gamma^3 + 0.1364\gamma^4) \quad (14)$$

ただし、式(14)の $G_0$ は $\gamma=100\%$ 時におけるせん断弾性率を表し、 $G_0=0.620$ [MPa]である。

復元力 $P$ と等価静的風荷重 $W$ が等しいと仮定し、式(12)に式(13)を代入すると式(15)になる。

$$W = \frac{G_{eq} \cdot A}{h} \delta \quad (15)$$

式(15)に式(14)を代入し、 $\delta/h$ をひずみ $\gamma$ に置き換えると式(16)のようになる。

$$W = G_0(2.855 - 3.878\gamma + 2.903 - 1.016\gamma^3 + 0.1364\gamma^4) \cdot A \cdot \gamma \quad (16)$$

式(16)の高次方程式より免震層ひずみ $\gamma$ を解き、求められた $\gamma$ に式(17)のようにゴム層厚 $h$ [mm]を乗じて免震層の最大変形を算出する。

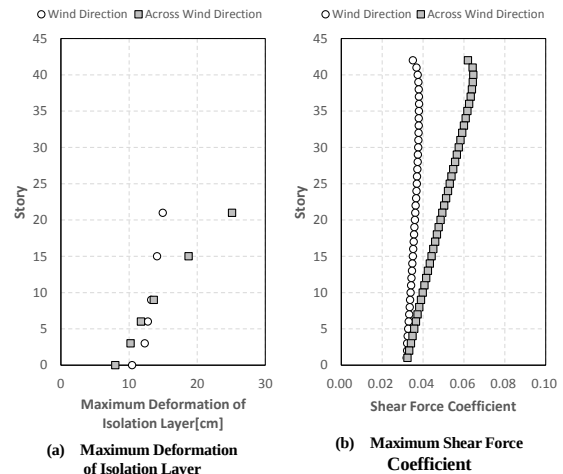
$$\delta = \gamma \cdot h \quad (17)$$

ここで、算出した風方向と風直交方向の等価静的風荷重を各層の建築物重量で除し、風外力作用時の最大層せん断力係数とする。

### 3.3 解析結果および考察

Fig.4 に等価静的風荷重による評価を(a)に免震層の最大変形、(b)に最大層せん断力係数を示す。

Fig.4(a)より、風方向では免震層の設置位置が上層になるにつれ免震層の最大変形が大きくなることが確認できる。風直交方向も同様に免震層の設置位置が上層になるにつれ免震層の最大変形が大きくなることが分かる。加えて、風直交方向では免震層の最大変形の増大する傾向が地震時の場合と似た傾向を示す。本論文では免震層の設置位置によらず免震層のパラメータを等価に設定している。そのため、免震層が上層になるほど剛性が低くなる。また、それに対して免震層に作用する等価静的風荷重は相対的に大きくなる。よって、



**Fig.4 Evaluation by Equivalent Static Wind Loading**

免震層を上層に設けたモデルほど免震層の最大変形が大きくなったと考える。

風方向と風直交方向を比較すると、下層部では風方向の方が大きく、上層部では風直交方向の方が大きくなることが確認できた。下層部では、風方向と風直交方向の免震層に作用する等価静的風荷重に大きな差はない。風方向では、風外力の平均成分によるクリープ変形を考慮している。そのため、風直交方向より免震層の最大変形が大きくなったと考える。しかし、上層部では Table3 より、例えば 21 層免震モデルを見ると免震層に作用する等価静的風荷重は、風方向に比べ風直交方向の方が 1.4 倍程度大きい。そのため、風方向でクリープ変形を考慮して免震層の最大変形を算出しているが、風直交方向の方が大きくなったと考える。

Fig.4(b)より、風方向は建築物が高層になるにつれ最大層せん断力係数が大きくなっていることが確認できる。風直交方向も同様に建築物が高層になるにつれ最大層せん断力係数が大きくなるのが分かる。これは、建築物が高層になるにつれ各層に作用する等価静的風荷重が大きくなるためである。

風方向と風直交方向を比較すると、最大層せん断力係数は基礎部ではほぼ同等の値を示していることが分かる。35～40 層付近では風直交方向は風方向に対して 1.7 倍程度大きい。本論文ではアスペクト比 5、辺長比 1 のモデルを用いて解析を行っている。そのため、建築物荷重指針・同解説を用いて等価静的風荷重を算出すると、風直交方向の方が大きくなる。よって、最大層せん断力係数も風直交方向の方が大きくなった。

#### 4. まとめ

その 1 では、等価静的風荷重を用いて超高層中間階免震建築物の風応答性状について検討を行った。免震層の最大変形の算出の際には、風方向では免震層のクリープ変形を考慮し、風直交方向ではひずみ依存性を有する HDR の修正バイリニアモデルを適用し算出した。その結果、以下のような知見が得られた。

- ・免震層の最大変形について、風方向、風直交方向ともに免震層を上層に設けたモデルほど、免震層の最大変形が増大する傾向にある。また風方向では二次関数のように、風直交方向では反比例のように増大する傾向が確認できた。また、免震層を低層に設けたでは風方向の方が大きく、中層に設けた場合では風直交方向の方が大きくなる。風直交方向の増大する傾向は地震外力作用時と似た傾向となる。
- ・最大層せん断力係数について、風方向、風直交方向ともに上層になるほど大きくなる傾向にある。今回の解析では対象建築物の形状はアスペクト比 5、辺長比 1 のモデルであった。そのため等価静的風荷重

は風直交方向の方が大きくなり、最大層せん断力係数も風直交方向の方が大きくなる結果となった。

#### 「参考文献」

- 1) 山下忠道, 伊藤真二, 向井洋一, 井上豊: 中間階に免震装置を設置した建物における免震層の上部—下部構造の応答の連成と制御に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 591 号, pp35-42, 2005.5
- 2) 小林正人, 洪忠憲: 中間層免震構造の地震応答予測と耐震性能, 日本建築学会構造系論文集, 第 558 号, pp109-116, 2002.8
- 3) 小倉桂治, 高橋正春, 辻田修, 木村雄一, 和田章: 中間階免震建物の地震応答, 日本建築学会構造系論文集, 第 516 号, pp99-104, 1999.2
- 4) 竹内貞光, 杉本耕作, 山下忠道, 神田亮: 中間階に免震層を有する超高層建物の風応答性状に関する研究 その 1 等価静的風荷重およびレベル 2 相当波形による応答評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2014.9
- 5) 杉本耕作, 竹内貞光, 山下忠道, 神田亮: 中間階に免震層を有する超高層建物の風応答性状に関する研究 その 2 台風通過時を模擬した風力波形による応答評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2014.9
- 6) 菊地隆志, 鈴木重信, 竹中康雄, 鈴木雅靖, 山田和彦, 二村有則: 高層免震建物の風応答に関する研究 その 3 積層ゴムの静的成分および一定水平力加力実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2001.9
- 7) 竹中康雄, 飯塚真巨, 鈴木雅靖, 吉川和秀, 山田和彦: 鉛プラグ型積層ゴムのクリープ性を考慮した高層免震建物の風応答簡易評価法, 日本建築学会構造系論文集, 第 561 号, pp89-94, 2002.11
- 8) 安井八紀, 大熊武司, 丸川比佐夫: クリープ変形を伴う免震建物の風応答性状に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 619 号, pp41-48, 2007.9
- 9) 免震構造設計指針, 日本建築学会, pp393-402, 2013.10
- 10) 扇谷匠己, 神田亮, 山下忠道, 梁川幸盛, 佐藤大樹, 田原浩之, 中村太郎: 台風通過時に高層免震建築物に作用する風外乱の作成とその応答に関する研究, 構造工学論文集, Vol.59B, pp427-433, 2013.3
- 11) 森隆治, 加藤秀章, 竹内貞光, 菊池隆志, 室田伸夫: 風荷重の動的成分が高減衰系積層ゴムの応答特性に与える影響に関する実験的研究及びその解析モデルの検討, 日本建築学会構造系論文集 第 676 号, pp823-832, 2012.6
- 12) 免震建築物の耐風設計指針, 日本建築学会, 2012
- 13) 「高減衰ゴム系積層ゴム(X0.6R タイプ)技術資料」, (株)ブリヂストン, 2011.5