

### 【3.3.2 風応答シミュレーション】成果①

#### スタディ 1：二方向入力による小規模軽量免震建築物の風応答性状に関する研究

-風方向と風直角方向入力の場合-

下村祥一\*<sup>1</sup> 大熊武司\*<sup>2</sup> 松澤潔\*<sup>3</sup>

(\*<sup>1</sup> 神奈川大学工学部助手, \*<sup>2</sup> 神奈川大学工学部教授, \*<sup>3</sup> 研究当時神奈川大学工学部生)

#### 1 はじめに

木造や軽量鉄骨造などの戸建て住宅に対して、免震構造の適用例が増えている。しかし上部構造の軽い建築物では、比較的頻繁に起こる中小地震に対しても有効な免震構造を実現しようとする、アイソレータ群の水平剛性が極めて低くなる。そのような免震建物は、風による影響を受けやすく、居住性を大きく損なう恐れがある。そのため、免震部材を適正に設計し配置するためには、風に対する挙動を精度良く把握しなければならない。本研究は、小規模軽量な免震建物の風方向応答性状に関する研究<sup>1)</sup>に引き続き、風方向風力と風直角方向風力を同時に入力した場合の応答性状を検討したものである。本研究の成果は文献<sup>2)</sup>に公表されており、本稿はその概要を記す。

#### 2 対象建築物および解析モデル

##### 2.1 対象建築物および免震システム

対象建築物は、小規模軽量免震建築物の代表例として、最下層に免震層を有する2階建て木造住宅とする。免震層を除いた住宅部分(住宅単体と記す)を図1に示す。住宅単体の質量を24tonとする。

免震システムは、アイソレーター機能とダンパー機能を分離して考える。アイソレーター機能は線形バネでモデル化し、水平剛性はアイソレーター群の固有周期(2秒に設定)から求める。ダンパー機能は履歴減衰型とし、復元力特性は完全弾塑性型のNormal Bi-Linear型とする。その一次剛性は、降伏せん断力係数を0.05、降伏変位を1.5mmとして求める。免震層の減衰はアイソレーター群のみの寄与とし、減衰定数として3.2項に示す通り評価する。因に、 $k_f = 237\text{kN/m}$ 、 $k_y = 7845\text{kN/m}$ である。

##### 2.2 解析モデル

解析モデルは1質点2自由度スウェイモデルとし、免震層を1つのMSS(Multiple Shear Spring)モデル<sup>3)</sup>によりモデル化する。振動モデル、MSSモデルおよびその復元力特性を図2に示す。MSSモデルを用いると系としてのせん断力-変位関係は降伏点付近で円味を帯びるが、これの解析結果への影響を小さくするため、モデルの具体化では降伏点を元の降伏変位で決め、バネの本数も風向の影響の検証を含む試算に基づき定めている。MSSモデルにおける増分力と増分変位の関係は(1)式で表される。

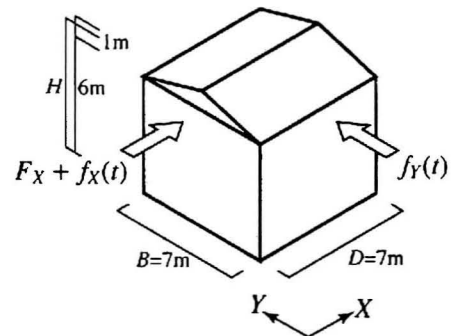


図1 住宅単体モデル

$$\begin{Bmatrix} \Delta f_X \\ \Delta f_Y \end{Bmatrix} = \sum_{i=1}^n k_i \begin{bmatrix} \cos^2 \theta_i & \cos \theta_i \cdot \sin \theta_i \\ \cos \theta_i \cdot \sin \theta_i & \sin^2 \theta_i \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{Bmatrix} \quad (1)$$

ここに、 $k_i$ ：各せん断バネの剛性、 $\Delta f_X, \Delta f_Y$ ：時間  $\Delta t$  の間に生じる増分力、 $\theta_i$ ：各せん断バネの  $X$  軸に対する角度、 $\Delta x, \Delta y$ ：時間  $\Delta t$  の間に生じる増分変位である。

本研究で用いる MSS モデルは、16 本のバネを等間隔 ( $180^\circ/n$ ,  $n$ :バネの本数) に配置することにより平面の力-変形関係を表現する。MSS モデルを構成するバネ 1 本あたりの復元力特性は Normal Bi-Linear 型とする。今の場合、(1) 式より各せん断バネの一次剛性は  $(k_f + k_s)/8$ 、二次剛性は  $k_s/8$  である。

また、弾性応答時の風方向最大変位に対する免震層の降伏変位  $\beta$  を (2) 式により定義する<sup>4)</sup>。 $\beta$  の値は解析パラメータとして後述する。

$$\beta = x_y / x_{e,max} \quad (2)$$

ここに、 $x_y$ ：降伏変位、 $x_{e,max}$ ： $\gamma = 0$  ( $\gamma$ ：風方向変動風力に対する風直角方向変動風力の比で 3.1 項で詳しく述べる) の場合の弾性応答時の風方向最大変位である。

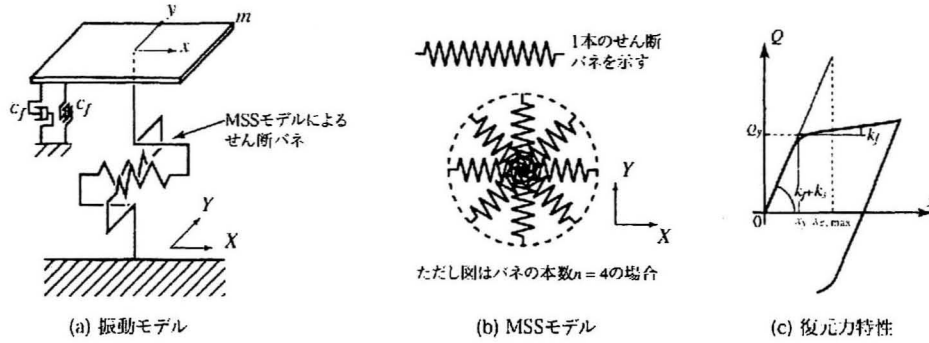


図2 解析モデル

### 3 風応答解析方法

#### 3.1 風力のシミュレーション

対象とする建築物が小規模であることから、風力を次のように仮定する。①風方向変動風力は風力は準定常仮定に従いかつ風速の変動に比例すると仮定する。②風の性質は平均成分、変動成分ともに高さ方向に一樣と仮定する。③風直角方向変動風力の性質は、小規模低層建築物に作用する風力特性の把握を目的とした風洞実験結果<sup>5)</sup>に留意した上で、二方向入力による応答性状の概要の把握という観点から、風方向変動風力の性質と同じ(ただし両者の相関性は小さい)と単純化する。以上の仮定より、風力は次の順に従って模擬する。

まず、風方向の変動風速  $u(t)$  を変動風速のパワースペクトル密度  $S_u(n)$ <sup>6)</sup> を満たすようシミュレートする。シミュレーションは、乱数を用いた三角級数の重ね合わせによる方法により行う。風方向風力は平均値成分  $F_X$  と変動成分  $f_X(t)$  の足し合わせで表され、 $F_X$  と  $f_X(t)$  は (3) 式により表される。

$$F_X = \frac{1}{2} \rho C_D B H U^2, \quad f_X(t) = \rho C_D B H U u(t) \quad (3)$$

ここに、 $\rho$ : 空気密度 ( $\rho = 1.23\text{kg/m}^3$ ),  $C_D$ : 風力係数で、簡単に  $C_D = 1.0$  とする,  $B$ : 建物見付幅 (7m),  $H$ : 建物基準高さ (6.5m) である。

次に、風直角方向の変動風力は以下の通り作成する。まず、変動風力データ  $\zeta(t)$  を  $f_X(t)$  と同じ方法、同じ条件で、乱数のみを変えることにより模擬する。そして、応答計算に用いる外力としての風直角方向風力  $f_Y(t)$  を  $\gamma \cdot \zeta(t)$  とする。 $\gamma$  の値は解析パラメータとして後述する。

以上の条件により作成した模擬風力の時系列波形を図3に示す。このシミュレートされた風方向変動風力と風直角方向変動風力の相関性について風洞実験結果と比較し、定性的に風洞実験結果に近いことを確認している。

### 3.2 振動方程式

1 質点 2 自由度系の振動方程式は (4) 式で表される。

$$m \begin{Bmatrix} \ddot{x}(t) \\ \ddot{y}(t) \end{Bmatrix} + c_f \begin{Bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{y}(t) \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} Q_X \\ Q_Y \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_X + f_X(t) \\ f_Y(t) \end{Bmatrix} \quad (4)$$

ここに、 $x(t)$ : 風方向応答変位,  $y(t)$ : 風直角方向応答変位,  $m$ : 質量,  $c_f$ : アイソレータ群の減衰係数で、 $c_f = 2h_f k_f / \omega_f$ ,  $\omega_f$ :  $k_f$  に基づく固有円振動数,  $Q_X, Q_Y$ : それぞれ復元力 (図2(c) 参照) の風方向, 風直角方向成分である。

### 3.3 解析パラメータ

前述の通り、弾性応答時の風方向最大変位に対する免震層の降伏変位の比  $\beta$  と風方向変動風力に対する風直角方向変動風力の比  $\gamma$  を解析パラメータとし、その値を表1に示す。

### 3.4 解析条件

応答の評価時間を 600 秒とし、解析は連続した 6200 秒間について行う。応答の評価は、計算結果を風力の漸増時間である 0~200 秒を除いた 6000 秒間を 10 パートに分割しそれぞれのパートで行う。平均風速は地表面粗度区分 III における再現期間 1 年程度の風速値<sup>7)</sup> を参考に 16m/s とする。また乱れ強さ  $I_u = 0.29$ , 乱れのスケール  $L_x = 46\text{m}$  とする<sup>6)</sup>。なお、前述の通り降伏点比  $\beta$  を解析パラメータとして変化させるため、風速値から (3) で求まる風力値は、降伏せん断力に対して相対的に変化することになる。

## 4 解析結果および考察

図4に  $\beta = 0.9$  および  $\beta = 0.3$  の場合の風方向平均変位の経時変化を示す。ただし図中に示す釣合い点距離とは、せん断力-変位関係において原点から釣合い点<sup>8)</sup> (平均せん断力と原点から伸ばした 2 次剛性との交点) までの風方向への距離を指す。 $\beta = 0.9$  の場合、平均変位は時間の経過に伴って増加し、その増加率は風直角方向風力が大きくなるにつれ大きくなる。これは、風直角方向風力により風直角方向変位が生じ、変位の絶対値 (風方向と風直角方向の変位の合成としての変位) が大きくなることにより免震層の塑性化が早まっているためと考えられる。一方、 $\beta = 0.3$  の場合、平均変位は第 1 パートから釣合い点付近の値を示す。また、その値は  $\gamma$  によらず概ね同じであり、風直角方向風力による影響は顕著に

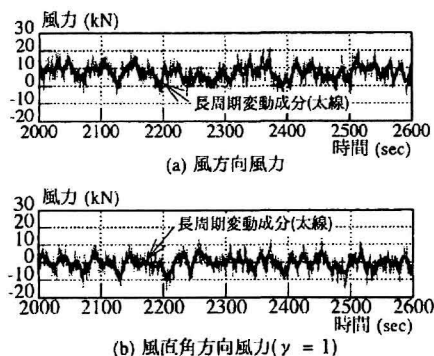


図3 模擬風力の時刻歴波形

表1 解析パラメータ

$\beta$	1	0.9	0.7	0.5	0.3
$\gamma$		0	0.5	1	

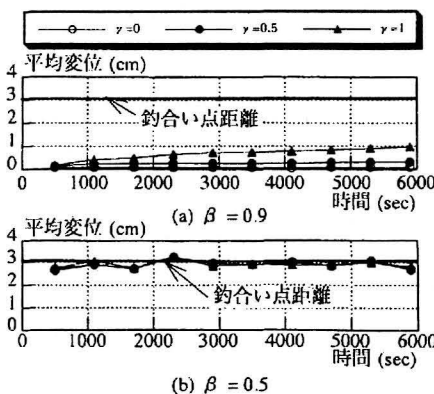


図4 平均変位の経時変化

現れていない。これは、 $\beta$ が小さい、すなわち降伏せん断力が小さいため、 $\gamma$ によらず漸増時間内に釣合い点距離まで達し、釣合い点を中心に履歴ループを描いているためと考えられる。

図5に $\beta = 0.9$ および $\beta = 0.3$ でかつ $\gamma = 1$ の場合の第4パートの応答変位のリサーチを示す。 $\beta = 0.9$ の場合、弾性振動のような周期の短い振動性状を示し、時間内においてトレンド成分はほとんど見られない。また、平均値を中心に変動し、変動の大きさはあまり大きくない。 $\beta = 0.3$ の場合、釣合い点を中心とした変位の大きなシフトと短い周期で振動する性状を足し合わせた性状を示す。この変位の大きなシフトは、風力の長周期の変動成分に追隨して生じている。また、変位が風方向成分だけでなく、全方向に対して大きくシフトしている。

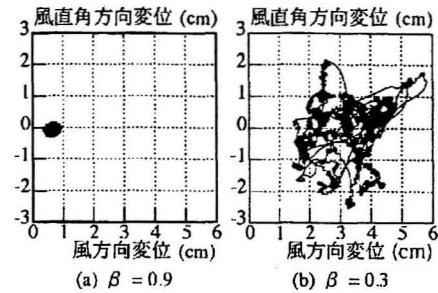


図5 応答変位のリサーチ

図6に、風方向および風直角方向における弾塑性応答時の標準偏差 $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ と弾性応答時の標準偏差 $\sigma_{xe}$ 、 $\sigma_{ye}$ の比(以降、標準偏差比と呼ぶ)を示す。風方向変位、風直角方向変位ともに $\beta$ が低下するに従い、標準偏差比が大きくなる性状を示す。また $\gamma$ の値が大きいほどその増大の割合が大きく、特に風直角方向変位にその傾向が強く現れている。

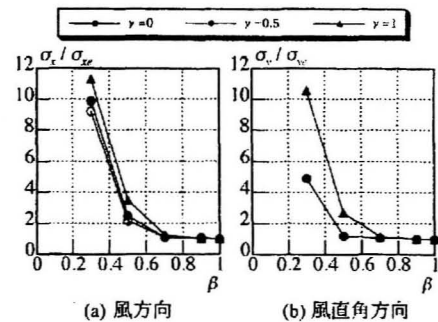


図6 応答変位の標準偏差比

## 5 まとめ

本研究は、小規模軽量免震建築物を対象に、弾性応答時の風方向最大変位に対する免震層の降伏点変位の比 $\beta$ と風方向変動風力に対する風直角方向変動風力の比 $\gamma$ を解析パラメータとして、風方向風力と風直角方向風力の二方向入力による弾塑性風応答解析を行った。得られた知見の要点を以下に示す。

風直角方向風力の存在により免震層の塑性化が早まり、風方向風力のみを考慮した場合に比べ応答が増大する傾向がある。また、その応答性状は $\beta$ に依存する。弾塑性応答時の標準偏差と弾性応答時の標準偏差の比では、風方向変位、風直角方向変位ともに $\beta$ が小さくなるにつれ増大し、 $\gamma$ が大きいほどその割合が大きい。

## 参考文献

- 1) 大熊, 下村, 池田: 履歴ダンパー型小規模軽量免震建築物の弾塑性風応答性状ならびにその解析に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No.533, pp.45-51, 2000.7.
- 2) 下村, 大熊, 松澤: 二方向入力による小規模軽量免震建築物の風応答性状に関する研究-風方向と風直角方向入力の場合-, 第17回風工学シンポジウム論文集, pp.439-444, 2002.12.
- 3) 和田, 木下: MSS モデルを用いた柱降伏型の建物の立体振動解析(その1)(その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.313-316, 1985.10.
- 4) 辻田, 早部, 大熊, 和田: 弾塑性構造物の風応答ならびにその予測に関する研究 その1 風直角方向振動の場合, 日本建築学会構造系論文集, No.481, pp.9-16, 1996.3.
- 5) 佐々木, 大熊, 下村: 小規模低層建築物に作用する風力の特性に関する風洞実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2002.8.
- 6) 日本建築学会, 建築物荷重指針同解説, 1993.6.
- 7) 日本建築学会, 建築物の振動に関する居住性能評価指針同解説, 1992.10.
- 8) 辻田, 早部, 大熊, 和田: 弾塑性構造物の風応答性状ならびにその予測に関する研究 その2 風方向振動の場合, 日本建築学会構造系論文集, No.485, pp.25-34, 1996.7.