T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報 Article / Book Information

| 論題(和文) | 高摩擦弾性すべり支承を有する超高層免震建物の時刻歴風応答解析 その1 風洞実験気流特性および風力特性に関する検討 | | |
|---------------------|---|--|--|
| Title(English) | Time history wind-response analysis of high-rise baseisolated buildings with high-friction sliding bearing Part1.Performance of wind tunnel experiment airflow and wind force | | |
| 著者(和文) | 二村夏樹, 佐藤大樹, 稲井慎介, 石田琢志, 丸尾純也 | | |
| Authors(English) | Natsuki Futamura, Daiki Sato, Shinsuke Inai, Takushi Ishida, Junya Maruo | | |
| 出典 / Citation | | | |
| Citation(English) | , , рр. 305-308 | | |
| 発行日 / Pub. date | 2021, 3 | | |

高摩擦弾性すべり支承を有する超高層免震建物の時刻歴風応答解析

その1 風洞実験気流特性および風力特性に関する検討

構造-振動

超高層免震建物 高摩擦弾性すべり支承 風洞実験

1. はじめに

従来,中低層 RC 造建物に主として採用されてきた免 震構造は,技術的な発展とともに超高層建物にも積極的 に採用されるようになってきている。しかし,建物が高 層化すると地震外力に対して相対的に風外力が大きくな るのに加え,風外力は地震外力に比べて継続時間が長い という特徴があり,風外力に対する応答評価がこれまで 以上に重要となってくる。前述した特徴に加えて,風外 力には平均成分が存在する。そのため,風外力作用時の 免震部材のクリープ変形について検討する必要があると されている¹⁾。

風外力作用時の免震部材のクリープ変形に関する研究 は、これまでいくつか例がある。竹中らは、代表的な免 震装置のうち、クリープ性を顕著に有する鉛プラグ型積 層ゴムを対象に、クリープ性の影響を実験的に考察し、 その評価法について検討を行っている²⁾。しかし、すべ り支承などの通常にはクリープ性を有さない弾塑性ダン パーを含む免震システムを対象とした、風外力作用時の 免震建物の応答性状の把握は十分とは言えない。

すべり支承は通常にはクリープ性を有さない免震部材 であるが、滑動時の剛性がないことや軸力変動などによ り、摩擦力変動の影響を受けることが明らかになってい る。よって、風外力により滑動が生じる場合にはクリー プ性を有するものとみなされ、設計に注意が必要である ³⁾。そこで本報では、通常クリープ性を有さない免震部 材としてすべり支承を有する免震システムを対象に、風 応答性状を明らかにすることを目的とする。本報その1 では、風洞実験気流特性および風力特性について荷重指 針やとの比較を行い、風洞実験の妥当性を検討する。本 報その2では、天然ゴム系積層ゴム支承、高摩擦弾性す べり支承、オイルダンパーを有する超高層免震建物の風 応答性状を、風洞実験より得られた層風力データを用い た時刻歴応答解析により明らかにする。

| 正会員 | ○ 二村夏樹*1 | 正会員 | 佐藤大樹 |
|-----|-----------------------|-----|--------|
|]] | ^{*3} 稻井慎介 | 11 | 石田琢志*3 |
| // | 丸尾純也 | | |

2. 風洞実験概要

2.1 風洞諸元

本実験は、国立研究開発法人建築研究所の風雨実験棟 内にある乱流境界層風洞⁵⁾を用いて実施した。風洞の形式 は、密閉回流型(ゲッチンゲン型)である。風洞の基本仕 様を表1に示す。

表1 乱流境界層風洞の基本仕様⁵⁾

| 形式 | 閉回流型(ゲッチンゲン型) |
|---------|---------------------------|
| 測定部断面寸法 | 3000 mm (B) × 2500 mm (H) |
| 測定部長さ | 25000 mm |
| 縮流比 | 8:1 |
| 風速範囲 | 0.5~24.4 m/s |
| 乱れの強さ | 0.14 |
| 送風機出力 | 350 kw |
| 送風機口径 | 4000 mm |

2.2 対象建築物および実験条件

対象建築物の諸元を表 2 に示す。幅と奥行き B = D =50 m とし,高さ H = 150 m の Model 1 と,H = 200 m の Model 2 の,高さが異なる 2 種類とする。設計風速 U_H は 地表面粗度区分III,基準風速 $U_0 = 36$ m/s,再現期間 500 年とし,Model 1 は $U_H = 54.7$ m/s,Model 2 は $U_H = 57.9$ m/s である。模型縮尺は 1/500 とし,風向は建物に正対 する 1 方向のみとする。圧力測定点は図 1 に示すように 高さ方向に 7 点,計 196 点とする。また、風速の測定点 位置はターンテーブルの風上側先端とし、サンプリング 間隔は 1000 Hz,測定時間は 65.536 秒である。

表 2 対象建築物諸元

| | 幅 <i>B</i> | 奥行 D | 高さ <i>H</i> | 設計風速 U _н |
|---------|------------|------|-------------|---------------------|
| Model 1 | 50 m | 50 m | 150 m | 54.7 m/s |
| Model 2 | 50 m | 50 m | 200 m | 57.9 m/s |

Time history wind-response analysis of high-rise baseisolated buildings with high-friction sliding bearing Part1.Performance of wind tunnel experiment airflow and wind force

Natsuki Futamura, Daiki Sato, Shinsuke Inai, Takushi Ishida, Junya Maruo



2.3 実験気流

実験気流は, 建築物荷重指針・同解説(以下, 荷重指針) ⁴⁾の地表面粗度区分IIIの気流を目標に作成した。図2(a), (b)に実験気流の平均風速U, 乱れ強さ I_z の鉛直分布を示 す。図2中に示すZは, 風洞床面からの高さを表し, U(AIJ), I_u (AIJ)はZを用いて文献4)から算出する平均風速 および乱れ強さの鉛直分布, U(Exp.), I_u (Exp.)は風洞実験 における平均風速および乱れ強さの鉛直分布を表す。なお, 模型上の基準高さ(Model 1:300 mm, Model 2:400 mm) での平均風速は10.7 m/s, 11.5 m/s である。図2より, 実 験値と指針値は風洞床面からの高さが大きくなるほど誤 差が大きくなる傾向が見られるが,全体として精度よく一 致していることが確認できる。



図3に模型頂部高さでの変動風速の無次元化パワース ペクトル密度 (PSD) を示す。図3中の $S_u(f)$, σ_u は, 風速のパワースペクトル密度,標準偏差, L_x は模型頂部 高さでの乱れのスケールを表す。また,式(1)で表される カルマン型の無次元化パワースペクトル密度⁴⁾も併記し ている。

$$f S_u(f) / \sigma_u^2 = \frac{4(f L_x / U)}{\left\{1 + 71(f L_x / U)^2\right\}^{5/6}}$$
(1)

図3より,実験値(Exp.)が指針値(Von karman)と精 度よく一致していることが確認できる。



3. 実験結果

3.1 時刻歴層風力

層風力のデータを10分間区切りで9波作成した。なお, 本報では時刻歴風応答解析での過渡応答の影響を避ける ため,各波形の前後に50秒のエンベロープを設けている。 図4にModel1, Model2の風方向,風直交方向の頂部(7 層目)の時刻歴解析層風力の一例を示す。



3.2 風方向における各種値の荷重指針値との比較

荷重指針より算出される風力係数 C_{Di} ,風方向変動転倒 モーメントに関する係数 C'_g ,平均転倒モーメントに関す る係数 C_s ,風方向スペクトル係数 $F_D(f)$ と,風洞実験より 算出される C_{Di} , C'_g , C_s , $F_D(f)$ の比較を行う。なお, 荷重指針における C_{Di} の算出方法については,文献 4)を参 照されたい。

風洞実験より算出される *C'_g* および *C_g* は式(2), (3)で表 される^{4), 6)}。

$$C'_{g} = \frac{\sigma_{MDQ}}{q_{H} \cdot B \cdot H^{2} \cdot C_{H}}$$
(2)

$$C_{g} = \frac{\overline{M_{D}}}{q_{H} \cdot B \cdot H^{2} \cdot C_{H}}$$
(3)

ここで, $\sigma_{\scriptscriptstyle MDQ}$:風方向転倒モーメントの非共振成分の標準 偏差, $\overline{M_{\scriptscriptstyle D}}$:風方向転倒モーメントの平均値,B:見付幅,

 C_{H} :建物頂部における風力係数を表す。なお、 σ_{MDQ} は式 (4)で表される。

$$\sigma_{MDQ} = \sqrt{\int_0^\infty S_{MD}(f) df}$$
(4)

ここで、 $S_{MD}(f)$:風力として作用する風方向転倒モーメントのパワースペクトル密度を表す。

風洞実験結果より算出される風方向スペクトル係数 $F_p(f)$ は式(5)で表される^{4),6)}。

$$F_{D}(f) = \frac{f \cdot S_{MD}(f)}{\sigma_{MDO}^{2}}$$
(5)

風洞実験値を用いずに荷重指針より算出される *C*'_g, *C*_g は式(6), (7)で表される^{4,6}。

$$C'_{g} = 2I_{H} \frac{0.49 - 0.14\alpha}{1 + \left\{ 0.63 \left(\sqrt{B \cdot H} / L_{H} \right)^{0.56} / (H / B)^{0.07} \right\}}$$
(6)

$$C_{g} = \frac{1}{3+3\alpha} + \frac{1}{6}$$
(7)

ここで、 I_{H} 、 L_{H} :基準高さHにおける乱れ強さ、乱れの スケール、 α :風速の鉛直分布を表すパラメータを表す。 風洞実験値を用いずに荷重指針より算出される $F_{D}(f)$ は、 式(8)で表される^{4),6)}。

$$F_{D}(f) = \frac{I_{H}^{2} \cdot F(f) \cdot S_{D}(f) \cdot (0.57 - 0.35\alpha + 2R(f)\sqrt{0.053 - 0.042\alpha})}{C'_{g}}(8)$$
ここで、 $F(f) : 風速スペクトル係数, S_{D}(f) : 規模係数,$
 $R(f) : 風上面と風下面の風圧の相関を表す係数を表す。$
 $F(f), S_{D}(f), R(f) は式(9) \sim (11)$ より算出される。

$$F(f) = \frac{4 \cdot f \cdot L_H / U_H}{\left\{1 + 71 \left(f \cdot L_H / U_H\right)^2\right\}^{5/6}}$$
(9)

$$S_{D}(f) = \frac{0.9}{\left\{1 + 6\left(f \cdot L_{H} / U_{H}\right)^{3}\right\}^{0.5} \left\{1 + 3\left(f \cdot L_{H} / U_{H}\right)\right\}}$$
(10)

$$R(f) = \frac{1}{1 + 20(f \cdot B/U_H)} \tag{11}$$

ここに、 U_H :基準高さHにおける設計風速を表す。

図5に荷重指針値(AIJ)および風洞実験値(Exp.)の 風力係数 C_{Di} を比較した図を、表3に荷重指針値(AIJ) および風洞実験値(Exp.)の C'_g , C_g および C'_g/C_g を比 較したものを示す。図5より、特に Model 1 の最上層に おいて、風洞実験値(Exp.)が荷重指針値(AIJ)より小 さくなっているが、全体の傾向としては概ね一致してい ることが確認できる。一方で、表3より、 C'_g/C_g につい ては荷重指針値(AIJ)と風洞実験値(Exp.)の差異は約 15%以内に留まっており、概ね一致していることが確認 できる。

図 6 に荷重指針値 (AIJ) および風洞実験値 (Exp.)の風 方向スペクトル係数 $F_{D}(f)$ を比較したものを示す。なお, 図 6 中の横軸 f^{*} は,振動数を無次元化した値である ($f^{*}=fB/U_{H}$)。いずれのモデルでも、全体として概ね一 致していることが確認できる。



表 3 C'g, Cg および C'g / Cg の比較

| | Model 1 | | Mod | lel 2 |
|--------------|---------|------|-------|-------|
| | AIJ | Exp. | AIJ | Exp. |
| C'_{g} | 0.091 | 0.16 | 0.085 | 0.12 |
| C_{g} | 0.44 | 0.67 | 0.44 | 0.61 |
| C'_g / C_g | 0.20 | 0.24 | 0.19 | 0.20 |



3.3 風直交方向における各種値の荷重指針値との比較

風洞実験結果より算出される風直交方向変動転倒モー メント係数 C'_Lは,建築物がロッキングモードで振動する ことを仮定し,式(12)で表される^{4,6}。

$$C'_L = \frac{{}_1\sigma_L}{q_H \cdot B^2 \cdot H^2} \tag{12}$$

ここで、 $_{1}\sigma_{L}$:1次変動転倒モーメント $_{1}L(t)$ の標準偏差 を表す。 $_{1}L(t)$ および $_{1}\sigma_{L}$ は、1次モーダル風外力 $_{1}F(t)$ を用 いて式(13)、(14)で表される。

$${}_{1}L(t) = H \cdot {}_{1}F(t) = H \cdot \sum_{i=1}^{N} \phi_{i} \cdot F_{i}(t)$$
(13)

$${}_{\scriptscriptstyle 1}\sigma_{\scriptscriptstyle L} = H \cdot {}_{\scriptscriptstyle 1}\sigma_{\scriptscriptstyle F} \tag{14}$$

ここで、 $N: 層数, \, _{i}\phi_{i}: i 層の1 次固有振動モード, F_{i}(t): i 層の風外力時刻歴, \, _{i}\sigma_{F}: _{i}F(t)の標準偏差を表す。$

風洞実験結果より算出される風直交方向スペクトル係数 $F_{L}(f)$ は、建築物がロッキングモードで振動することを仮定し、式(15)で表される 4,6 。

$$F_{L}(f) = \frac{f \cdot S_{ML}(f)}{{}_{1}\sigma_{L}^{2}}$$
(15)

ここで、 $S_{ML}(f)$:振動数fにおける1次変動転倒モーメント,L(t)のパワースペクトル密度を表す。

風洞実験値を用いずに荷重指針より算出される*C*_Lは式 (16)で表される^{4),0}。

$$C'_{L} = 0.0082 \left(\frac{D}{B}\right)^{3} - 0.071 \left(\frac{D}{B}\right)^{2} + 0.22 \left(\frac{D}{B}\right)$$
 (16)

同じく荷重指針より算出される F₁(f)は,式(17)~(23)で 表される^{4),0}。

$$F_{L}(f) = \sum_{j=1}^{m} \frac{4\kappa_{j} \left(1+0.6\beta_{j}\right)\beta_{j}}{\pi} \cdot \frac{\left(f/f_{sj}\right)^{2}}{\left\{1-\left(f/f_{sj}\right)^{2}\right\}^{2}+4\beta_{j}^{2} \left(f/f_{sj}\right)^{2}}$$
(17)

$$m = \begin{cases} 1 \ (D/B < 3) \\ 2 \ (D/B \ge 3) \end{cases}$$
(18)

$$\kappa_1 = 0.85, \kappa_2 = 0.02$$
 (19)

$$\beta_{1} = \frac{\left(\frac{D}{B}\right)^{4} + 2.3\left(\frac{D}{B}\right)^{2}}{2.4\left(\frac{D}{B}\right)^{4} - 9.2\left(\frac{D}{B}\right)^{3} + 18\left(\frac{D}{B}\right)^{2} + 9.5\left(\frac{D}{B}\right) - 0.15} + \frac{0.12}{\left(\frac{D}{B}\right)}$$
(20)

$$\beta_2 = \frac{0.28}{\left(\frac{D}{B}\right)^{0.34}}$$
(21)

$$f_{s1} = \frac{0.12}{\left\{1 + 0.38 \left(\frac{D}{B}\right)^2\right\}^{0.89}} \cdot \frac{U_H}{\left(\frac{D}{B}\right)}$$
(22)

$$f_{s2} = \frac{0.56}{\left(\frac{D}{B}\right)^{0.85}} \cdot \frac{U_H}{B}$$
(23)

表 4 に荷重指針値(AIJ)および風洞実験値(Exp.)の C_L を比較したものを示す。いずれのモデルでも、精度よ く一致していることが確認できる。

図7に荷重指針値 (AIJ) および風洞実験値 (Exp.)の風 直交方向スペクトル係数 $F_{L}(f)$ を比較したものを示す。な お、図7中の横軸f*は、振動数を無次元化した値である ($f^{*}=fB/U_{H}$)。いずれのモデルでも、f*が 0.1 以下の 低振動数領域において、荷重指針値が風洞実験値よりも小 さくなっているが、ピークおよびf*が 0.1 以上の領域にお いては概ね一致していることが確認できる。

表4 変動転倒モーメント係数の比較

| Mod | lel 1 | Model 2 | | |
|------|-------|---------|------|--|
| AIJ | Exp. | AIJ | Exp. | |
| 0.16 | 0.15 | 0.16 | 0.16 | |



4. まとめ

高さの異なる2つの超高層免震建物を対象に,風洞実験 を行った。また,風洞実験気流特性および風力特性につい て,荷重指針値との比較を行い,風洞実験の妥当性を示し た。その2では,天然ゴム系積層ゴム支承,高摩擦弾性す べり支承,オイルダンパーを有する超高層免震建物の風応 答性状を,その1で示した風洞実験より得られた風力を用 いた弾塑性時刻歴応答解析により明らかにする。

謝辞,参考文献

その2にまとめて示す。

*1 東京工業大学環境・社会理工学院 大学院生 *2 東京工業大学未来産業研究所 准教授・博士(工学) *3 戸田建設株式会社 技術開発センター Graduate Student, School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology Associate Prof., FIRST, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng. Research and Development Center, TODA Corporation