

神奈川県 23号館(免震棟)の風応答性状に関する研究
(その5 弾塑性応答解析による応答予測)

正会員 軽部英生^{*1} 同 大熊武司^{*2}
同 安井八紀^{*3} 同 下村祥一^{*4}

免震建物 層風力 地震応答解析
風応答解析 復元力モデル MSS モデル

1. はじめに

風応答のように免震層に継続して一定方向の変形が生じる場合、免震部材に生じるクリープ的な変形の影響が懸念される。文献1)では鉛プラグ入り積層ゴムにクリープ的な変形が生じることを示唆している。鉛は常温でも再結晶温度より高いため²⁾、鉛ダンパーにもクリープ的な変形が生じることが十分に考えられる。また、鉛ダンパーには降伏耐力の変位依存性が認められており³⁾、小振幅領域を対象とした応答の評価には、これら特性を考慮する必要がある。

本研究では、まず風洞実験に基づいた層風力の発生を試みる。続いて、前述の鉛ダンパーの特性を考慮した復元力モデルを提案する。最後に、その3,4)に示した観測記録と応答解析結果を比較し、解析法の妥当性について検討する。

2. 層風力のシミュレーション

2.1 風圧測定と層風力の特性 実験は泉創建エンジニアリング所有の室内回流式エッフェル型風洞(断面2.2m x 1.8m, 風路長さ20m)で実施した。対象建物単体と、半径400mの周辺地域を再現した場合について、それぞれ10度間隔で36風向測定した。モデルの縮尺は1/400とし、風圧は図1に示す3レベルに設けた測定孔72点で同時測定した。実験気流はベキ指数0.22の境界層乱流である。風圧測定は、サンプリング周波数1365.3Hz、ローパスフィルター350Hzで行い、データ数は8192個で8回測定した。

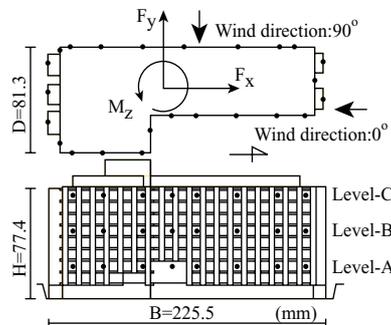


図1 風圧測定模型

層風力は各レベルの建物重心位置に作用する単位高さあたりの風力とし、各風圧測定孔の負担する幅を定め、測定点の風圧力が負担幅に様に作用するものとして、風圧力に負担幅を乗

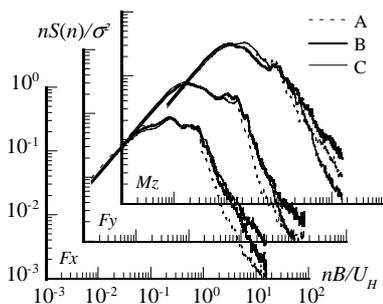


図2 層風力のパワースペクトル密度

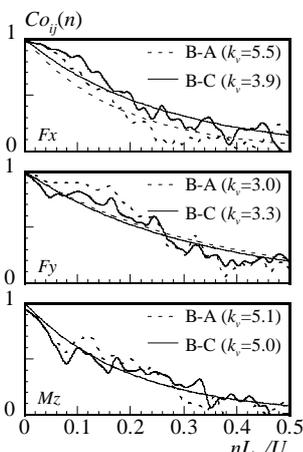


図3 コ・コヒーレンス

じ、足し合わせることで求めた。層風力はx方向、y方向および捻れの3成分Fx, Fy, Mzに分けて整理した。層風力のパワースペクトル密度およびコ・コヒーレンスの1例として、風向270度、周辺模型ありの場合について図2, 図3に示す。なお、スペクトルの推定にはFFTを用い、8192個のデータを1波として8回のアンサンブル平均で評価した。

2.2 多層同時層風力のシミュレーション 風洞実験から得られた確率統計的情報を基に各階に作用する3成分の同時層風力の発生を行った⁵⁾。層風力のシミュレーションを行う際には、実験結果を参考に以下の仮定をした。変動層風力の規準化パワースペクトル密度の形状は高さ方向に変わらないものとしてLevel-Bの形状で代表した。高さ方向に位相差は無いものとし、コ・コヒーレンスを(1)式でモデル化し⁶⁾、係数k_ijはB-AとB-Cの相関から求めた平均値とした。

$$C_{o_{ij}}(n) = \exp(-k_{ij} n L_{ij} / U_H) \quad \dots(1)$$

L_ij : i, j 層間の距離 U_H : 頂部の平均風速

3. 応答解析法

3.1 解析モデル 対象建物に剛床仮定を適用し、各階の重心位置に質点を設けた10質点せん断型の擬似立体モデルとする。質点ごとに並進2自由度および鉛直軸周りの自由度の3自由度をもつ。上部構造は弾性とし、免震層は各免震部材の復元力特性を各部材位置で評価し、座標変換によって層の剛性に評価する。その際、免震部材の2方向の相互影響を16本の要素バネをもつMSSモデル⁷⁾により考慮する。

3.2 鉛ダンパーの復元力モデル 復元力モデルはBi-linear型を基本とし、最大水平変位に依存して降伏耐力が変化するものである。最大水平変位と降伏耐力との関係は文献3)に示されている加振振幅δ(mm)と降伏耐力Q_y(tf)の関係式(2)式より表されるとする。

$$Q_y = 1.0885 \delta^{0.42832} \quad \dots(2)$$

まず、1方向の復元力特性をモデル化する。骨格曲線を図4に示すBi-linear型とし、勾配K_1, K_2, 折れ点Q_1で定義する。始め骨格曲線上を移動し、骨格曲線から逆方向へは勾配K_3で進み、折れ点Q_1と降伏耐力Q_yで定義される直線上へ移行する。Q_yはそれまで経験した最大変位X_mにより(3)式で定義する。なお、ここではK_3を初期剛性と呼ぶ。

$$Q_y = A X_m^B \quad \dots(3)$$

次に、この復元力モデルをn本の要素バネを持つMSSモデルへ拡張する⁸⁾。1本のバネの最大水平変位x_mと降伏耐力q_yの関係を(4)式とし、骨格曲線の勾配をk_1, k_2, 折れ点をq_1、初期剛性

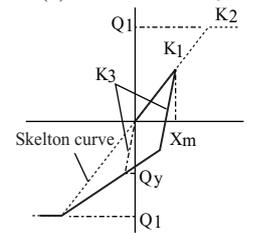


図4 鉛ダンパーモデル

k_3 とすると、各パラメーターは1方向モデルのパラメーターから(5)(6)式のように定まる。

$$q_y = a x_m^b \quad \dots(4)$$

$$k = K / \sum_{i=1}^n \sin^2 \theta_i, \quad q = Q / \sum_{i=1}^n \sin \theta_i \quad \dots(5)$$

$$a = A / \sum_{i=1}^n \sin^{b+1} \theta_i, \quad b = B \quad \dots(6)$$

各パラメーターを $K_1=0.65\text{kN/mm}$, $K_2=0$, $K_3=11.8\text{kN/mm}$, $Q_1=98\text{kN}$, $A=10.7$, $B=0.428$ とした場合の漸増解析結果を実験結果³⁾と比較して図5に示す。なお、各要素パネの最大水平変位 x_m が100mmを超えても $x_m=100\text{mm}$ (一定)としている。因みに、図における初期剛性は設計時に用いられた値に一致する。解析モデルは実験結果と良く一致している。

3.3 解析上の仮定および条件 上部構造の剛性、質量、重心などの構造特性は設計値⁹⁾に基づき定めた。鋼棒ダンパーはNormal Bi-linear型、積層ゴムは線形弾性としている。鉛ダンパーについては、小振幅時の特性を考慮した変位依存性型のBi-linear型モデルをモデル1、設計と同様のNormal Bi-linear型モデルをモデル2と呼ぶこととする。なお、鉛ダンパーおよび上部構造の微小変形時の剛性は、観測結果⁴⁾および文献¹⁰⁾から設計値より高いものと考えられるため、解析では初期剛性を常時微動記録から推定した値⁴⁾を用いた。減衰は上部構造には免震層固定時の1次振動数に対し2%¹¹⁾の剛性比例減衰を与え、免震層はダンパーの履歴減衰のみとした。

4. 解析結果

4.1 地震観測記録⁴⁾との比較 地震観測により得られた地下2階の加速度記録を2方向同時入力して得られた8階の絶対応答加速度と観測記録とを比較して図6に示す。応答加速度の評価位置は、その3⁴⁾図1に示すP1点である。

XおよびY方向共にモデル1の場合には観測値に良く一致している。一方、モデル2では、鉛ダンパーが降伏変位に至らず結果的に弾性解析となっているため、応答が過大に評価されている。微小変形時の応答を評価する場合にはモデル1が有効であり、解析法が妥当であることが確認された。

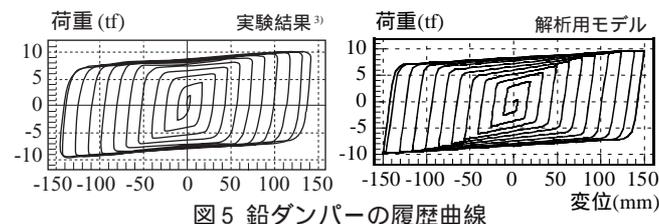


図5 鉛ダンパーの履歴曲線

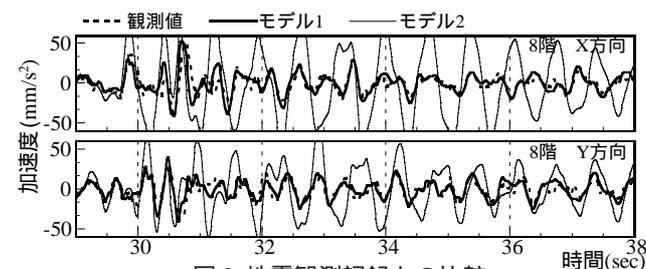


図6 地震観測記録との比較

4.2 風観測記録⁴⁾との比較 10分間の平均風向が $0^\circ \pm 45^\circ$ ならびに $90^\circ \pm 45^\circ$ の時の観測記録と、風向 0° および 90° とした時の解析結果を図7に示す。ここでの上部構造および鉛ダンパーの初期剛性は、常時微動記録から推定した剛性および設計値である。応答加速度の評価成分は、XおよびY方向共に並進成分である。なお、鉛ダンパーのモデルはモデル1で、クリープ的な変形を考慮し、平均風力に対して鉛ダンパーが抵抗しないこととした¹²⁾。

妥当な評価を行うためには、高風速域での観測記録が少ないが、風向および方向によらず、常時微動記録から推定した初期剛性を用いた解析結果は、標準偏差および最大値共に観測記録と良く対応している。一方、設計時の剛性を用いた場合には、応答が過大に評価される傾向にある。小振幅時の応答を推定するためには、初期剛性の評価が重要である。

5. おわりに

神奈川大学23号館を対象として解析的に風応答ならびに地震応答を予測し、観測記録との比較を行った。風応答観測および地震応答観測で得られた比較的応答の小さい範囲においては、解析結果は概ね観測記録に一致し、解析法が妥当であることが確認された。また、鉛ダンパーの復元力モデルに変位依存性を考慮することによって、より精度の高い予測値が得られることがわかった。

参考文献

- 1) 鈴木他; 高層免震建物の風応答に関する研究, 日本建築学会大会梗概集, 2001
- 2) 日本鉛垂鉛需要研究会; 鉛ハンドブック改訂版, 1992
- 3) 森田他; U型鉛ダンパーの降伏耐力に関する考察, 日本建築学会大会梗概集, 1996
- 4) 大熊他; 神奈川大学23号館(免震棟)の風応答性状に関する研究(その3, その4), 日本建築学会大会梗概集, 2002
- 5) 丸川他; 動的天秤データを利用した高層建築物の時刻歴風力シミュレーションに関する研究, 第12回風工学シンポジウム, 1992
- 6) 大熊他; 動的天秤データを利用した高層建築物の時刻歴風力シミュレーションに用いる時空相関モデル, 第13回風工学シンポジウム, 1994
- 7) 和田他; MSSモデルを用いた柱降伏型の建物の立体振動解析, 日本建築学会大会梗概集, 1985
- 8) 瀬戸他; 修正Bi-linearモデルで表される免震装置特性の2軸非線形モデルへの拡張, 日本建築学会大会梗概集, 1996
- 9) 吉田和彦他; 神奈川大学23号館(免震棟)および新1号館の振動実験, 日本建築学会大会梗概集, 2001
- 10) 三菱マテリアル(株); U180型鉛ダンパー資料, 1985
- 11) 日本建築学会; 建築物の減衰, 2000
- 12) 竹中康雄; 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評価, 神奈川大学TEDCOMシンポジウム, 制振・免震構造と実挙動観測 -, 2002.3

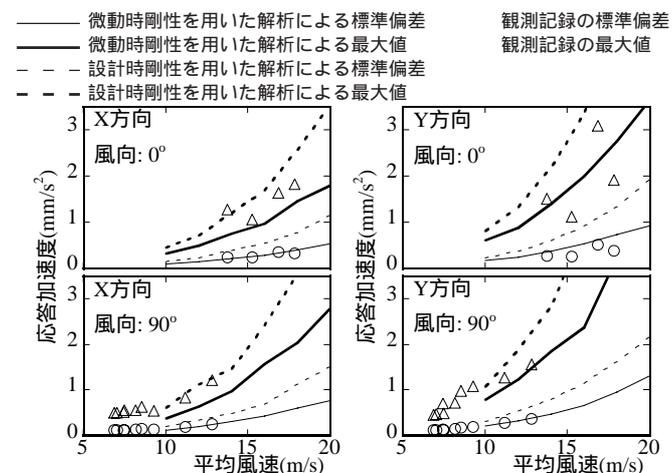


図7 風観測記録との比較

*1(株)日総建 構造設計室(当時神奈川大学大学院生)
 *2 神奈川大学工学部建築学科 教授・工博
 *3(株)泉創建エンジニアリング(神奈川大学大学院生)
 *4 神奈川大学工学部建築学科 助手

Structural Design Division, Nissoken
 Professor, Dept. of Arch., Faculty of Eng., Kanagawa Univ., Dr. Eng.
 Chief Research Engineer, Urban Environment Research Center, ISEC
 Research Associate, Dept. of Arch., Faculty of Eng., Kanagawa Univ.