

エネルギーの釣合に基づく変動風力を受ける超高層免震建物の応答予測手法

東京理科大学大学院 鈴木悠也

1. 序論

近年、免震建物の高層化が進んでおり、風外力に対する弾塑性範囲における応答評価の必要性が高まっている。また、構造物の弾塑性応答を評価するためには、一般的には時刻歴応答解析が必要であるが、計算量が膨大になることから、実用的には、弾塑性風応答の確率統計的な応答予測手法の開発が必要となる。風外力に対する弾塑性応答予測手法については、吉江ら¹⁾が1質点系を用いたエネルギーの釣合に基づく応答予測手法を提案している。しかし、超高層免震建物のような免震層の塑性化の程度に応じて振動モード形状が著しく変化する構造物に関しては、1次のみでは十分でなく数次までを考慮した多質点弾塑性系応答予測法が必要になると考える。

本研究では、多質点系応答を考慮した超高層免震建物の弾塑性風応答予測法の開発を目的とする。そのため、多質点系超高層免震モデルを用いた応答解析によりその応答性状を分析し、その上で多質点系に展開するための検討を行う。

2. 超高層免震構造の多質点系モデルによる弾塑性応答解析

多質点系免震構造モデルの応答解析を行い、超高層免震建物の応答性状の考察をする。

解析モデルは、上部構造を1次モードが直線のモデル(図1)とし、その下に免震層を設定した11質点せん断型モデルとする。図2に対象モデルの概要を示す。上部構造の減衰定数は $h=2\%$ の剛性比例とし、免震層には内部粘性減衰を考慮しない。免震層の復元力特性を次式により求める。

$${}_a Q_y = ({}_u W + {}_b W) \cdot {}_s \alpha_y \quad (1)$$

$${}_a K_1 = {}_a Q_y / {}_b \delta_y \quad (2)$$

ただし、 ${}_a Q_y$ は免震層ダンパーの降伏耐力(kN)、 ${}_u W$ は免震層の重量(kN)、 ${}_b W$ は上部構造の全重量(kN)、 ${}_s \alpha_y$ はダンパーの降伏せん断力係数、 ${}_a K_1$ はダンパーの初期剛性(kN/m)、 ${}_b \delta_y$ はダンパーの降伏時せん断変形(=0.028m)とする。 ${}_s \alpha_y = 0.02 \sim 0.08$ としてダンパーの降伏耐力および剛性を変化させて解析を行う。

風外力は「建築物荷重指針・同解説」²⁾による風直交方向の変動風力のパワースペクトル密度をもとに、高さ方向の相関を考慮した三角級数モデルにより、多層の層風力の模擬風力波形をシミュレートした^{3,4)}。風速は再現期間500年に相当するレベル²⁾として、頂部風速 $U_H = 60.8$ (m/s)を設定した。模擬風力波形は1組につき上部構造10質点分の変動風力を0.01秒刻み95000ステップで30組作成した。エンベロープを前後50秒ずつ設け、300~900秒の10分間で応答を評価する。作成した風外力を上部構造の10質点に入力し、免震層を含めた11質点せん断型モデルの時刻歴応答解析を行い、応答値を求める。また、各応答値は30組の応答のアンサンブル平均により評価する。

図3に ${}_s \alpha_y = 0.03$ の場合の免震層(0F)の応答変位の時刻歴波形例を示す。応答変位時刻歴波形を準静的成分と共振成分に分離¹⁾した波形を合わせて示している。ここで、低振動成分と共振成分の境界となる振動数は、弾性時固有振動数の1/3の振動数としている。免震層の応答変位では準静的成分の振

動を中心として、共振成分の応答が振動していることがわかる。風直交方向振動にも関わらず準静的成分も大きく、広帯域性の応答の様子を示している。また、免震層においては準静的成分の応答変位のみで降伏時せん断変形 ${}_b \delta_y$ (=0.028m)を超えており、共振成分とは異なり、力の釣合による履歴吸収エネルギーを生じていると考えられ、応答変位を準静的成分と共振成分に分離して評価する必要があることを確認した。

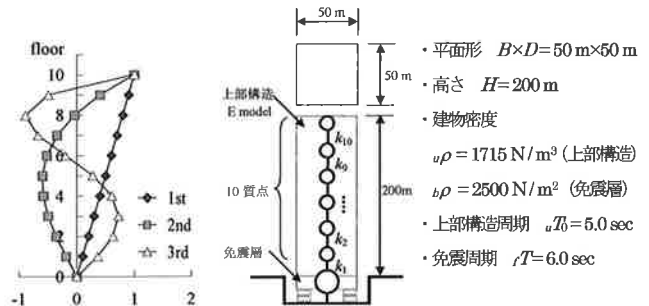


図1 上部構造モード分布 図2 弾塑性解析モデル概要

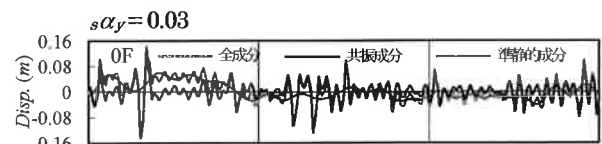


図3 応答変位時刻歴例

3. エネルギーの釣合に基づく多質点系弾塑性応答予測手法

本章では、吉江らの提案する応答予測手法¹⁾を参考に、多質点系応答を考慮した超高層免震建物の弾塑性風応答予測法を提案する。図4に多質点系弾塑性応答予測のフローを示す。塑性化による等価周期の変動が生じるため収れん計算を取り入れている。

ステップ0-1. 多質点系モデルから1質点系モデルへの置換

図2に示す11質点系多質点モデルを図5(a)に示す弾性2質点縮約系に置き換え、さらに固有値解析により、1次の一般化質量、減衰係数、剛性、固有周期(それぞれ ${}_1 m, {}_1 c, {}_1 k, T_0$ と記す)を求める。

ステップ0-2. 弾性時 ${}_R \nu_0$ の計算

変動風力のパワースペクトル密度 $S_F(f)$ に対して、構造特性の初期剛性と構造減衰から1質点系を用いたスペクトルモーダル解析により、共振成分の弾性時ゼロクロスング数 ${}_R \nu_0$ を求める¹⁾。

ステップ1. エネルギー入力計算

以下、等価周期 T_{eq} を仮定して、エネルギーの釣合をもとに弾塑性系の応答を求める。

与えられた $S_F(f)$ に対して、(3)式に等価線形系の速度の伝達関数 $\dot{H}(f)$ を用いてエネルギー入力 E_{input} を求める。

$$E[\dot{E}_{input}] = \int_0^\infty \text{Re}[H_v(f)] \cdot S_F(f) df \quad (3)$$

ただし、 f は振動数、 \dot{E}_{input} は単位時間当たりのエネルギー入力、 $S_F(f)$ は変動風力のパワースペクトル密度(片側スペクトル)、 $E[\]$ は期待値を、 $\text{Re}[\]$ は複素数の実部を示す。

ステップ2. エネルギーの釣合から免震層の応答変位の標準偏差を求める

2 質点系のエネルギーの釣合は (4) 式で表せる。

$$E_{input} = {}_{Ru}W_D({}_{Ru}\sigma_x) + {}_{Rb}W_P({}_{Rb}\sigma_x) \quad (4)$$

ただし、 ${}_{Ru}\sigma_x$ は上部構造の共振成分の応答速度の標準偏差、 ${}_{b}\sigma_x$ は免震層応答変位の標準偏差とする。ここで、 ${}_{Ru}W_D$ は次式により評価できる。

$${}_{Ru}W_D = c_0 \cdot (2\pi v' \cdot {}_{Ru}\sigma_x / ({}_{b}k_{eq}))^2 \quad (5)$$

ただし、 v' はステップ 0 で求めた v_0 に対して、塑性化の影響を加味し、次式のように修正したゼロクロッシング数。

$${}_R v' = {}_R v_0 \cdot \sqrt{{}_1 k_{eq} / {}_1 k} \quad (6)$$

ただし、 ${}_1 k_{eq}$ は ${}_{Rb}\sigma_x$ から得た免震層の等価剛性¹⁾、 ${}_b k_{eq}({}_{b}\sigma_x)$ を用いた弾塑性時の 2 質点縮約系 (図 5 (b)) を固有値解析した 1 次一般化剛性とする。

ここで、(7) 式を用いて、 ${}_{Ru}\sigma_x$ は免震層の共振成分の応答速度の標準偏差 ${}_{Rb}\sigma_x$ の関数として評価できるので、(5) 式の ${}_{Ru}W_D$ は ${}_{Rb}\sigma_x$ の関数となり、 ${}_{Rb}W_P$ は ${}_{Rb}\sigma_x$ を用いて評価できるので (4) 式は (9) 式で表せる。

$${}_{u}\sigma_x = {}_{b}\sigma_x \cdot u / {}_b u({}_{b}\sigma_x) \quad (7)$$

ただし、振動モードの比 $u / {}_b u({}_{b}\sigma_x)$ は、図 5 (b) に示す 2 質点縮約系を用いて次式より評価する。

$$u / {}_b u({}_{b}\sigma_x) = \frac{(\alpha + \alpha\beta - \beta) + \sqrt{(\alpha + \alpha\beta - \beta)^2 - 4\alpha\beta}}{2\alpha\beta} \quad (8)$$

ここで、 $\alpha = {}_u m / {}_b m$ 、 $\beta = {}_u k_1 / {}_b k_{eq}({}_{b}\sigma_x)$ とする。

$$E_{input} = {}_{Ru}W_D({}_{Ru}\sigma_x) + {}_{Rb}W_P({}_{Rb}\sigma_x) \quad (9)$$

(9) 式のエネルギー入力釣合式から単位時間あたりについて、エネルギー入力 E_{input} と上部構造の粘性減衰エネルギー ${}_{Ru}W_D$ 、免震層の履歴吸収エネルギー ${}_{Rb}W_P$ の和が釣り合う免震層の共振成分の応答変位の標準偏差 ${}_{Rb}\sigma_x$ を求める。

ステップ 3. 応答変位に対応する等価周期の計算

2 質点縮約系の等価固有円振動数 ${}_R \omega_{eq}$ を次式より評価し、求めた ${}_{Rb}\sigma_x$ に対応する等価周期 $T'_{eq} = 2\pi / {}_R \omega_{eq}$ をステップ 0-1 と同様に 2 質点縮約系を用いて求める。

$${}_R \omega_{eq}^2 = \frac{(\alpha + \alpha\beta + \beta) - \sqrt{(\alpha + \alpha\beta + \beta)^2 - 4\alpha\beta}}{2\alpha} \cdot \frac{{}_b k_{eq}}{{}_b m} \quad (10)$$

ステップ 4. 応答変位に対応する等価周期の計算

ステップ 1 で仮定した T_{eq} とステップ 3 で求めた T'_{eq} がほぼ等しければ仮定したエネルギー入力が妥当であることになり、塑性化に伴う固有周期の変化を考慮した上で、エネルギー入力と弾塑性系の吸収エネルギーが釣り合ったと判断できるので収束は終了となる。そうでなければ次のステップへ進む。

ステップ 5. 等価線形系の修正

ステップ 3 で求めた T'_{eq} と次式で修正した等価減衰定数 C_{eq} を用いて、等価線形系を修正¹⁾して、ステップ 1 に戻る。

$$C_{eq} = E_{input} / {}_{Ru}\sigma_x \quad (11)$$

図 6 に免震層および上部構造等価高さ付近 (7F) の共振成分の応答変位の標準偏差 ${}_{R}\sigma_x$ 、免震層および上部構造等価高さ付近の共振成分の応答速度の標準偏差 ${}_{Ru}\sigma_x$ の比較を示す。塑性化が大きい $\alpha_y = 0.02$ (表 1) を除いては予測値はどのケースも概ね時刻歴応答解析結果とよく対応している。

以上のように提案した予測手法により変動風力を受ける弾塑性系の共振成分の応答予測が可能であることを示した。特に、風荷重により想定される塑性化の範囲では各応答について十分な予測精度を有していることを確認した。

4. 結論

本研究では、多質点系応答を考慮した超高層免震建物の弾塑性風応答予測法の開発を目的とし、多質点系超高層免震モデルを用いた応答解析によりその応答性状を分析した上で多質点系に展開するための検討を行い、その上でエネルギーの釣合に基づく多質点系弾塑性応答の予測手法を提案し、予測値を時刻歴応答解析結果と比較することにより、時刻歴応答解析を用いずに超高層免震建物の弾塑性応答を評価することが可能であることを示した。

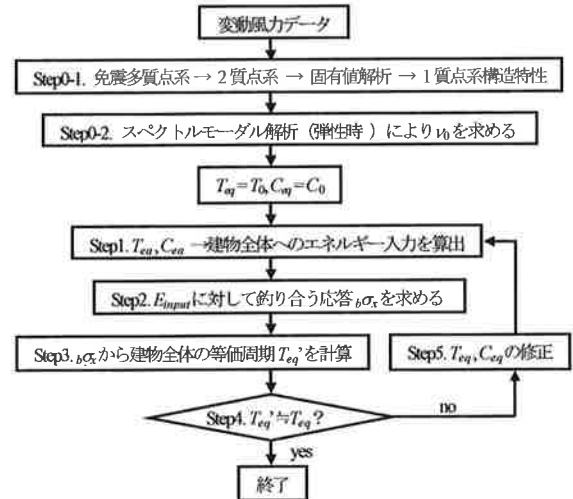


図 4 変動風力に対する多質点系弾塑性応答予測フロー

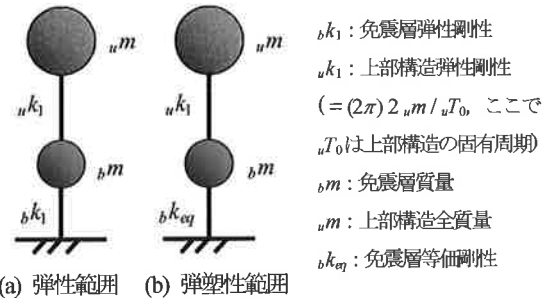


図 5 2 質点モデル概要

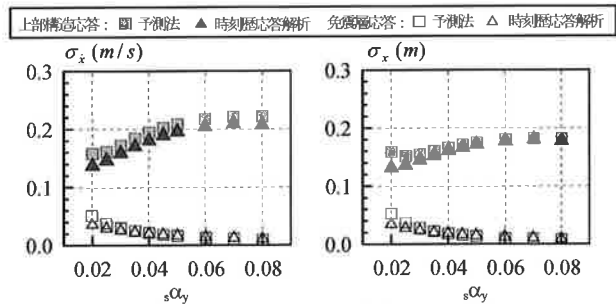


図 6 応答の予測値と時刻歴応答解析結果の比較

謝辞

本研究は、神奈川大学大熊武司教授、(株) 泉館エンジニアリング、(株) 日建設計、東京理科大学による新耐風設計法研究会の成果の一部です。特に、本研究を進めるにあたり、(株) 日建設計の吉江慶祐博士からご指導を賜りました。ここに記して、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 吉江慶祐、北村春幸、大熊武司、和田章: エネルギーの釣合に基づく平均成分を有する広帯域性変動風力を受ける弾塑性構造物の応答予測手法、日本建築学会構造系論文集第 608 号, pp.21-28, 2006. 10
- 2) 日本建築学会: 建物荷重指針・同解説(2004), 2004
- 3) 星谷 勝: 確率論手法による構造解析, 鹿島出版会, 1973 年
- 4) 大熊武司、丸川比佐夫、丹羽秀聡、寺本隆幸、北村春幸、吉江慶祐: 動的天秤データを利用した高層建物の風時刻歴応答解析, 第 12 回風工学シンポジウム論文集, pp.207-212, 1992. 12