

地震と風の両荷重を考慮した高層免震建物の 構造パラメータ推定に関する研究

日大生産工(学部) ○河上祐之 日大生産工(院) 扇谷匠己 榊大林組 小泉達也
日大生産工 神田 亮 日大生産工 丸田栄蔵

1. 序論

近年、建築技術の向上に伴い、免震装置を有する高層建物が計画され、さらには建設されるようになってきた。高層免震建物は基部を柔軟にしているために通常の高層建物よりも建物高さが低い場合においても地震荷重を風荷重が上回る可能性がある。ゆえに、地震荷重に加え風荷重も設計上考慮することがより求められる。

両荷重を考慮するにあたり、地震外力と風外力が構造物に与える挙動に相反する特性を有することに注意しなければならない。例えば、構造物に地動加速度の慣性力として作用する地震外力に対し、風外力は上部構造に直接作用するため、建物を軽量化することで地震荷重は低減することが出来るが、風荷重は増大することとなる。また、外力の卓越する周期が、一般的に地震外力は高層建物の固有周期より短い領域にあるのに対し、風外力は長い領域にある。そのため、免震建物は固有周期を長周期化することで地震の卓越周期から離れ地震外力による上部構造への入力エネルギーを低減することが出来る。その反面、風外力の卓越周期に近づいてしまうため風外力による入力エネルギーが増大してしまう恐れがあること等が挙げられる。

そこで、現行の免震建物の設計法では、建物の規模に関らず風荷重に対しては免震部材を弾性範囲内に留めるように行っている。しかし、建物高さが増すと風荷重が増大し、結果として免震層の降伏点を高く設定しなければならない。これは塑性化によるエネルギー吸収により、その耐震性を向上させんとする考えには反することとなる。また、風荷重の増大が著しい場合には、風荷重が地震荷重を上回り地震荷重による免震層の降伏は設計上望めないことにもなりかねない。このような事態を打開するために、著者らは風荷重に対しても免震層の降伏を許容することを前提に風外力に対する挙動に関する研究を実施してきた。

以上のことを踏まえて、本論文では構造物に与える挙動が相反する特性を有するような地震と風の両荷重に対して、高層免震建物の合理的な構造設計を行うための手法を提案することを目的とする。本手法は、地震外力と風外力に対する応答解析結果から、設定したクライテリアに対する超過確率を用いて評価する

ものである。

2. 推定手法

本論文で提案する推定手法は応答値のクライテリアに対する超過確率を求め最適パラメータを推定する手法である。図1に本手法のフローチャートを示す。本手法は解析モデルに対して応答値を求めクライテリアに対する超過確率を求める。応答値の算定に関してはいくつかの手法が提案されているが、今回の解

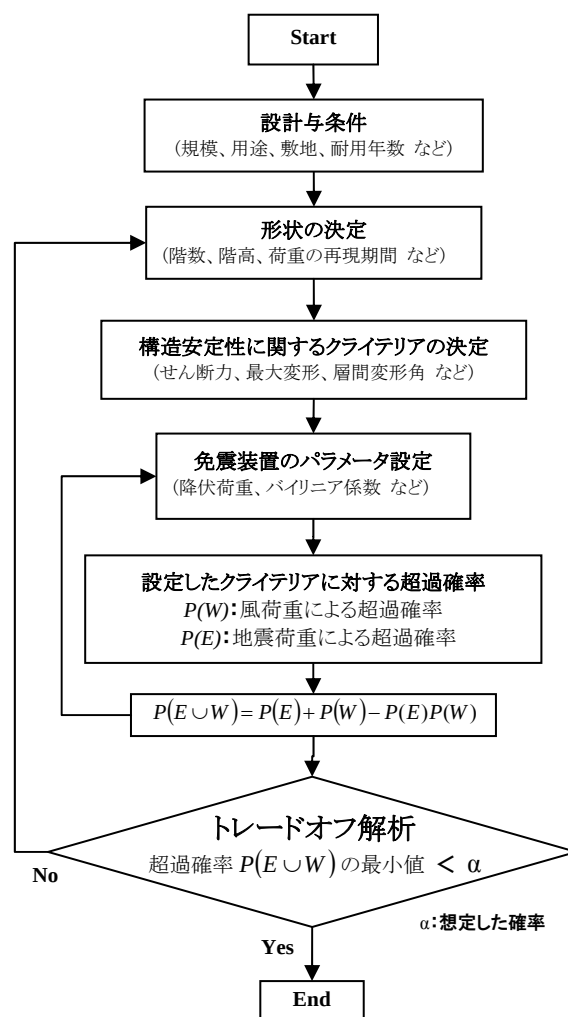


図1. 最適値推定のフローチャート

Study on Structural Parameter Estimation for Base-Isolated High-rise Buildings in Considering the Earthquake Loading and the Wind Loading

Yuji KAWAKAMI, Narumi OHGIYA, Tatsuya KOIZUMI, Makoto KANDA and Eizo MARUTA

析ではモンテカルロシミュレーション(以下、MCS)により超過確率を算定する。超過確率 $P(E \cup W)$ の算定に関しては式(1) をもとに求める。

$$P(E \cup W) = P(E) + P(W) - P(E)P(W) \quad \dots(1)$$

ここで、 E 、 W は地震外力および風外力により応答値がクライテリアを超える事象それぞれ表す。 $P(E)$ 、 $P(W)$ は E 、 W の発生確率をそれぞれ表す。

クライテリアは、地震、風外力の応答値に対して設定する。また、MCSに用いる地震外力、及び風外力は、本手法が確率を用いた評価手法であるため同一の再現期間における外力とする。

式(1)により求めた超過確率をもとにトレードオフ解析を行い最適な免震装置のパラメータを推定する。

3. 解析諸元

本章では2章に示したフローチャートをもとに解析を行った。以下に解析諸元を示す。解析モデルは免震装置を有する地上35階、建物高さ125mの構造物を36質点せん断バネマス系モデルに置換したものを、単位体積質量が異なるモデルを2つ作成した。モデル1は単位体積質量が約300 kg/m³、モデル2では約185 kg/m³とし免震層を含む弾性1次固有周期が等しくなるように各剛性を定めた。各解析モデルの詳細を表1に示す。免震装置の復元力モデルは図2に示すバイリニア型に置換した。今回の解析ではバイリニア係数(α)と降伏荷重(Q_y)が $Q_y/4627\text{kN}=\beta$ となるような降伏荷重比(β)をトレードオフ解析に用いる解析パラメータとし、 $\alpha=0.01, 0.03, 0.07, 0.10, 0.15, \beta=0.3, 0.5, 0.7, 1.0$ とした。

次にMCSに用いる外力モデルについて記す。MCSに用いる地震波は、振幅スペクトルと位相スペク

表1. 解析モデル

	モデル1	モデル2
高さ[m]	125	
幅[m]×奥行き[m]	25×25	
単位体積質量[kg/m ³]	300	185
1次固有周期	上部のみ	2.09
[sec]	免震層有	2.33
減衰定数	0.05	

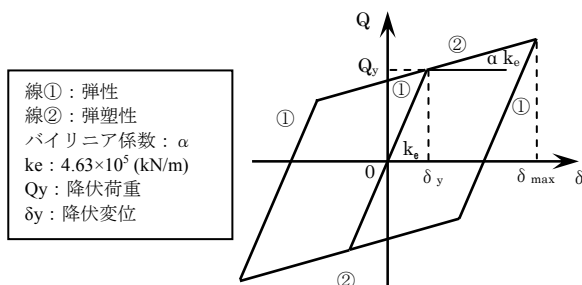


図2 免震装置の復元力特性（バイリニア型）

トルからなる模擬地震波を用いた。模擬地震波作成の際に用いた振幅スペクトルは、Clough-Penzienスペクトル²⁾、位相スペクトルは一様乱数とした。発生させた波形に包絡線関数を与え、模擬地震波とした。模擬地震波の継続時間は久田式³⁾により求め、包絡線関数はOhsakiモデル³⁾とした。図3にClough-Penzienスペクトルを図4に模擬地震波をそれぞれ示す。

次に、作成した模擬地震波を再現期間に見合った波形にするため、伝達関数を利用して波形の速度成分の基準化を行った。このとき基準化する値は文献4、5を参考に求めた平均値と標準偏差を持つ正規分布に従うように設定した。表2にN年最大値の平均値、標準偏差を示す。求めた速度値が工学的基盤上での値であるため増幅率をかけて基準化に用いる速度値とした。増幅率は簡便のため硬質地盤の平均的な増幅率2.5倍⁵⁾を用いた。模擬地震波のサンプリング間隔は0.01sec、サンプリング数は5100、継続時間は51secとした。

模擬風力波形の作成においては、文献6の方法を参考に相関性を持つ風直交方向の変動風圧波形を作成した。この際使用するパワースペクトル、コヒーレンス・フェイズ⁷⁾を図5,6に示す。パワースペクトルは地上13m地点のものをコヒーレンス・フェイズは高度差17.5mのものをそれぞれ示す。

以上より得られた波形を再現期間に見合う変動風圧波形にするため文献7と文献8を参考に頂部最大風速を求めて得られた最大速度圧をもとに基準化した。この波形にモデルの見付け面積を乗じて解析に用い

表2. N年最大値の平均値と標準偏差(工学的基盤上)

N年	平均値(m/sec)×10 ⁻²	標準偏差(m/sec)×10 ⁻²
100年	8.20	3.45
500年	16.5	3.65

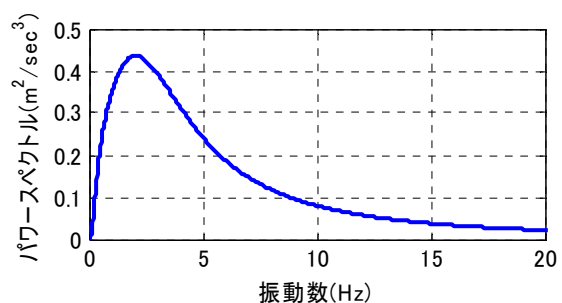


図3. パワースペクトル

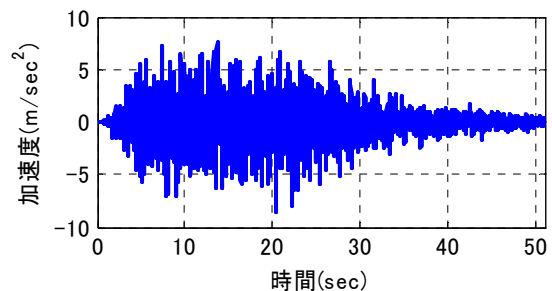


図4. 模擬地震動

る模擬風力波形とした。文献8を参考に求めた頂部最大風速のN年最大風速と標準誤差をそれぞれ表3に示す。また、頂部の模擬風力波形を図7に示す。模擬風力のサンプリング間隔は0.01sec、サンプリング数は81916、継続時間は約820secとし、内10分間(600sec)相当を評価した。

上記の手順によりそれぞれ模擬地震波と模擬風力波形を500波ずつ発生させ、各解析パラメータに対してMCSを行いクライテリアに対する超過確率を算定した。その結果からトレードオフ解析により最適値を推定した。本論では超過確率が最小となるパラメータを最適値とした。

4. 結果及び考察

本章では前章に述べた解析を行い、両モデルに対して推定した最適構造パラメータの結果を示す。解析結果の一例として、図8～11にモデル1の、図12～15にモデル2の応答解析結果をそれぞれ示す。示された図はモデル1では $\alpha=0.03$ 、 $\beta=0.5$ 、モデル2では $\alpha=0.03$ 、 $\beta=0.7$ の免震層の最大応答変位(図8,12)、各層の最大応答変位(図9,13)、1階柱の最大層せん断力(図10,14)、各層の最大層せん断力(図11,15)をそれぞれ示す。これより単位体積質量の大きいモデル1では地震外力による応答変位が風外力による応答変位を上回っているが、モデル2では風外力による応答変位は地震外力による応答変位を上回る傾向がある。これは1章で述べたような両外力の特性からなるものと考えられる。

次に、MCSにより求めた超過確率に対してトレードオフ解析を行った結果を示す。超過確率を求める際に設定したクライテリアを表4に、モデル1、モデル2の解析結果を図16,17にそれぞれに示す。図16よりモデル1の最適パラメータは超過確率が最小となる $\alpha=0.03$ 、 $\beta=0.5$ 、図17よりモデル2の最適パラメータは超過確率が最小となる $\alpha=0.03$ 、 $\beta=0.7$ と推定できる。本手法ではクライテリアの設定により最適値は異なってくる。今回は両モデルとも免震層部分のクリアランスを30cm程度であるとし、免震層のクライテリアを設定した。このように必要なクライテリアは設計と条件等によって異なり、それぞれの条件を考慮して最適なクライテリアを設定することが一番重要な問題である。

5. まとめ

以上、本手法を用いて高層免震建物における免震装置の最適パラメータを推定した。その結果、以下のような知見を得た。

- 1) 構造物に与える挙動に相反する特性を有する地震及び風外力に対して高層免震建物の構造パラメータを推定できる手法を提案した。
- 2) 本手法を用いることで設定したクライテリアに対する最適パラメータを推定することが出来る可能性を示した。
- 3) クライテリアの設定が最適パラメータ推定の大きな

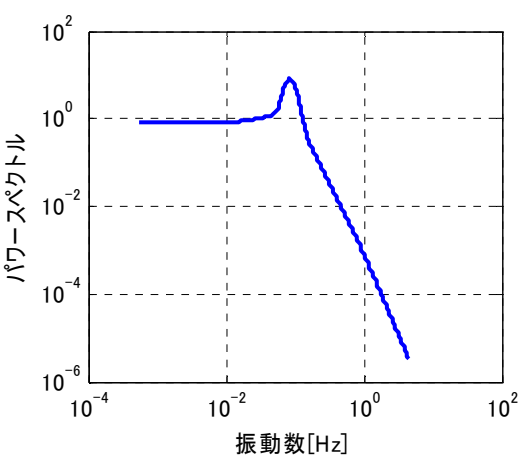


図5. 無次元パワースペクトル (地上13m)

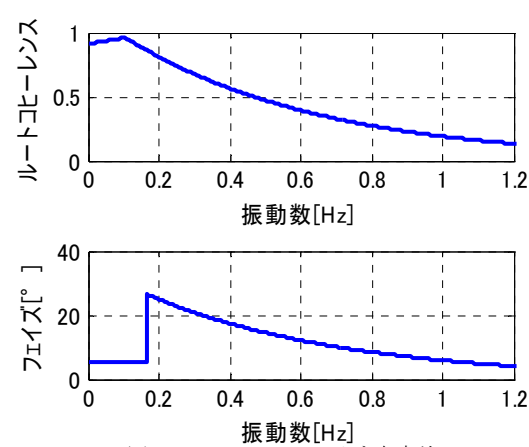


図6. コヒーレンス、フェイズ(高度差17.5m)

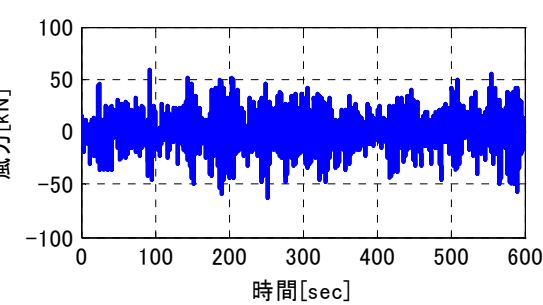


図7. 模擬風力波形(頂部)

表3. N年最大風速の平均値と標準誤差

N年	平均値(m/sec)	標準誤差(m/sec)
100年	47.4	2.33
500年	55.4	3.10

表4. クライテリア

クライテリア	モデル1	モデル2
免震層の最大変位(m)	0.250	0.250
最大層間変形角(rad)	1/900	1/300
1階の最大せん断力(kN)	11500	11500

要因となるため適切に定める必要がある。
 今後、更なる精度向上を目的とし、適切なクライテリアの設定やより多くのモデル、解析パラメータについて検証を行っていきたい。

参考文献

- 1) 神田ら: 免震装置を有する超高層建物の風応答に関する研究(その1～その6), 日本建築学会梗概集, 2003～2006
- 2) Clough, Penzien, Dynamics of Structures, McGRAW-HILL International Edition, 1986

- 3) 大崎順彦: 新・地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, 1994.5.
- 4) 壇一男他: 上下限値を有する極値分布を用いた地震危険度解析, 建築学会論文報告集, No.363, 1986
- 5) 日本建築学会: 地震荷重—地震動の予測と建築物の応答, 1992
- 6) 岩谷祥美, 任意のパワースペクトルとクロススペクトルをもつ多次元の風速変動のシミュレーション, 日本風工学研究会誌, 第11号, 昭和57年1月
- 7) 田村ら, 基本角柱模型の層風力に関する研究, 1996.2
- 8) 中原満雄, 年最大風速の再現期待値, 建築研究資料, No.26, 1981.3

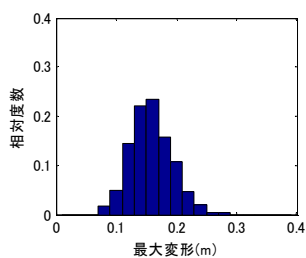


図8. 免震層の最大応答変位 ($\alpha=0.03$, $\beta=0.5$)

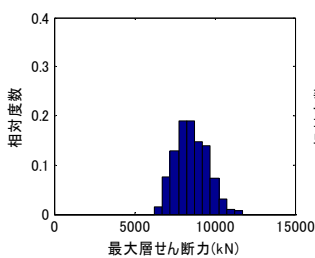


図10. 1階の最大層せん断力 ($\alpha=0.03$, $\beta=0.5$)

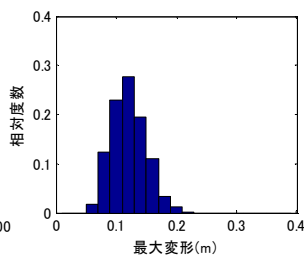


図12. 免震層の最大応答変位 ($\alpha=0.03$, $\beta=0.7$)

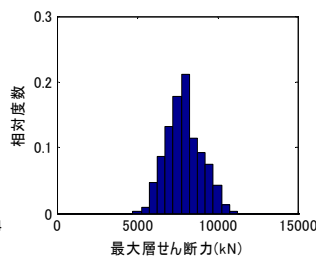


図14. 1階の最大層せん断力 ($\alpha=0.03$, $\beta=0.7$)

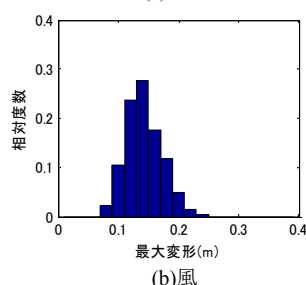


図9. 各層の最大応答変位 ($\alpha=0.03$, $\beta=0.5$)

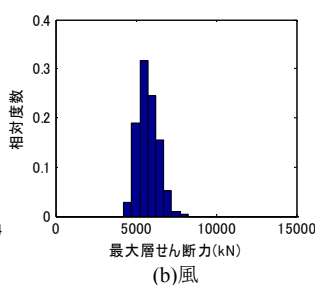


図11. 各層の最大層せん断力 ($\alpha=0.03$, $\beta=0.5$)

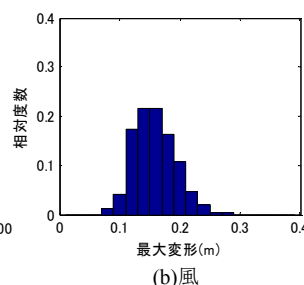


図13. 各層の最大応答変位 ($\alpha=0.03$, $\beta=0.7$)

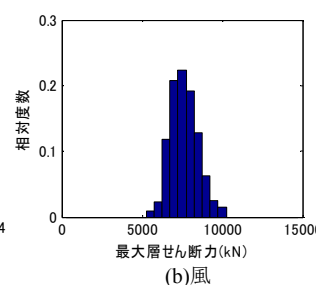


図15. 各層の最大層せん断力 ($\alpha=0.03$, $\beta=0.7$)

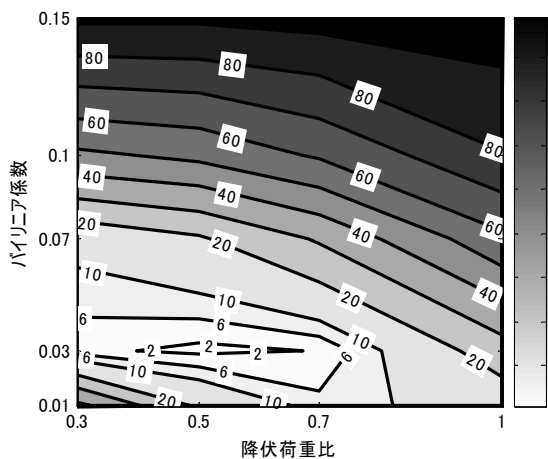


図16. 超過確率(モデル1)

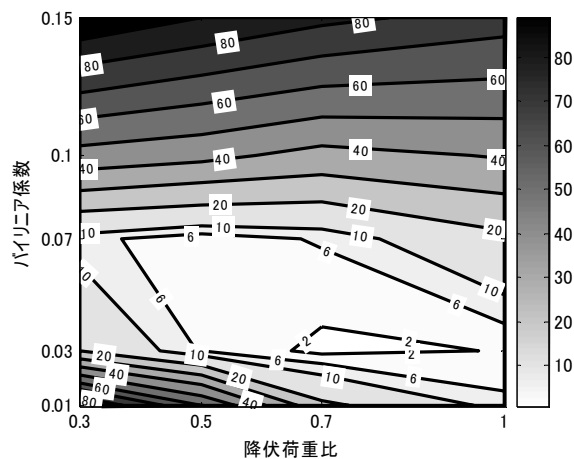


図17. 超過確率(モデル2)