

超高層免震建築物の風応答性状に関する研究

- その2 時刻歴風力波形による応答評価 -

日大生産工(院) ○杉本 耕作 日大生産工 神田 亮

1. はじめに

その1では等価静的風荷重を用いて超高層中間階免震建築物の風応答性状について検討を行った。

その2では、HDRのクリープ変形を考慮した復元力モデル(以下、風用モデル)を用いて超高層中間階免震建築物の風応答性状について検討を行う。さらに、クリープ変形が考慮されていない地震応答解析の復元力モデル(以下、地震用モデル)を用いて、HDRのクリープ変形が超高層中間階免震建築物の風応答性状に、どのような挙動を示すかについても検討を行う。

2. HDRの復元力モデルの概要

2.1 地震用モデル

本論文で扱うHDRの地震用モデルとして、一般的に地震応答解析に使用されるMulti Shear Spring(以下、MSS)モデルを用いた。MSSモデルは放射状(22.5度ピッチ、16等間隔)にせん断ばねを配置し、個々のばねには文献1)に示す、ひずみ依存性を有する修正バイリニアモデルを用いた。地震用モデルの特徴は、履歴面積が大きくエネルギー吸収率が高いことである。

2.2 風用モデル

本論文ではHDRのクリープ変形を考慮した復元力モデルに文献2)で提案されているDeformation History Integral type(以下、DHI)モデルの風用パラメータを適用し風用モデルとした。DHIにおける復元力の構成概念は、Fig.1に示すような非線形弾性ばねと非線形弾塑性ばねを組み合わせた変形履歴積分型の弾塑性構成則が基本となっている。風用モデルは地震用モデルに比べ剛性が低い。また、地震時のような変動成分のみを有する外力を加えた場合、履歴面積は小さく線形のような応答を示す。

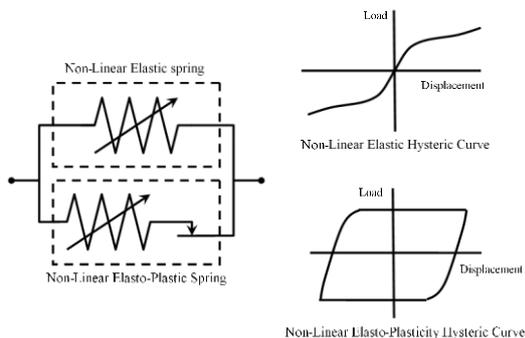


Fig.1 The Restoring Force Model in the DHI Model²⁾

3. 時刻歴応答解析による検討

3.1 風力の時刻歴波形

時刻歴応答解析を行うにあたり、静止風圧実験により得られた結果を基に、極めて稀に発生する暴風(再現期間500年)によって基準化された時刻歴風力波形(以下、Level2相当波形)を用いた。免震層を基礎部に設けた場合の免震層に作用する各層の風力および風力モーメントの合力をFig.2に示す。また、その1のFig.2に示すように構造軸に対し、X方向、Y方向、M方向と風方向、風直交方向、捩れ方向の関係は同様である。

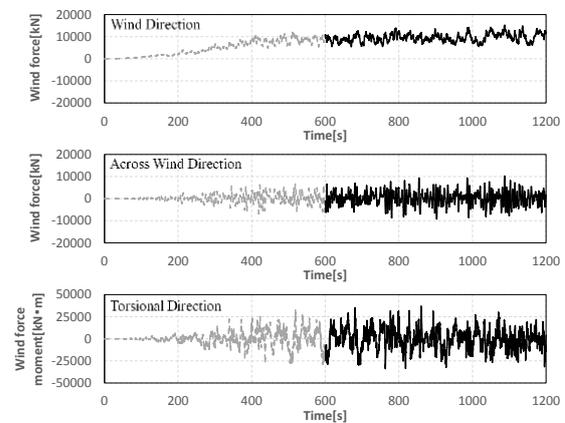


Fig.2 Wind Force on Time History

3.2 解析結果および考察

地震用モデルと風用モデルの最大応答層せん断力係数をFig.3, Fig.4に、最大応答加速度をFig.5, Fig.6に、最大応答層間変位をFig.7, Fig.8に示す。各図とも(a)は風方向、(b)は風直交方向の解析結果である。図上に示されているプロットは*i*層免震モデルの値を示したものである。なお、Fig.3, Fig.4, Fig.7, Fig.8にはその1で算出した等価静的風荷重より得られた結果を併記している(図中□)。いずれの図においても、解析結果より得られた応答値は重心位置での値を示す。

3.2.1 最大応答層せん断力係数

Fig.3(a), Fig.4(a)より、風方向では地震用モデルと風用モデルともに免震層をどの層に設けても、概ね基礎免震モデルと同様な傾向を示している事が確認できる。

風直交方向においてFig.3(b)より、地震用モデルは免震層の設置位置によらず基礎免震モデルと同等の値となっている事がわかる。しかし、Fig.4(b)より、風用モ

Study on Wind Response Characteristic of Super High Rise Inter Story Isolated Buildings

- Part 2 Evaluation by Wind Force on Time History -

Kousaku SUGIMOTO, and Makoto KANDA

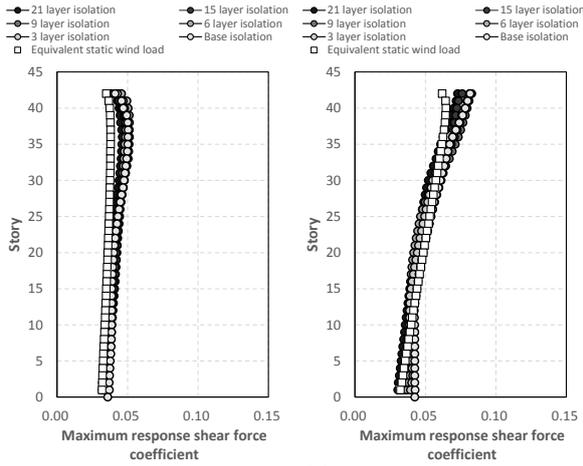


Fig.3 Maximum Response Shear Force Coefficient (Earthquake Model)

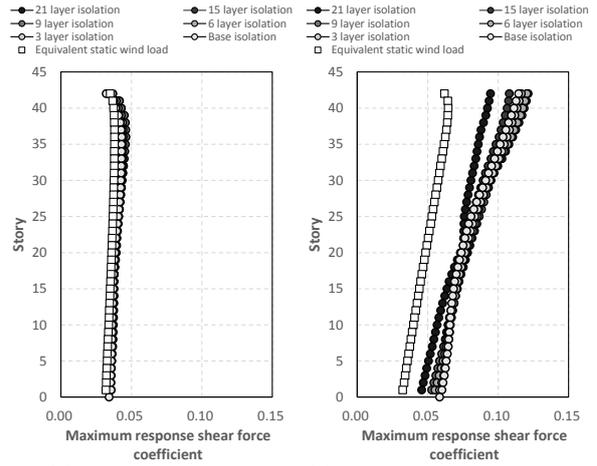


Fig.4 Maximum Response Shear Force Coefficient (Wind Model)

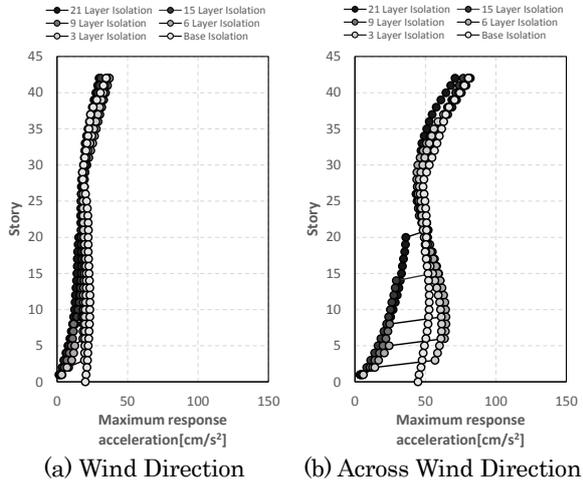


Fig.5 Maximum Response Acceleration (Earthquake Model)

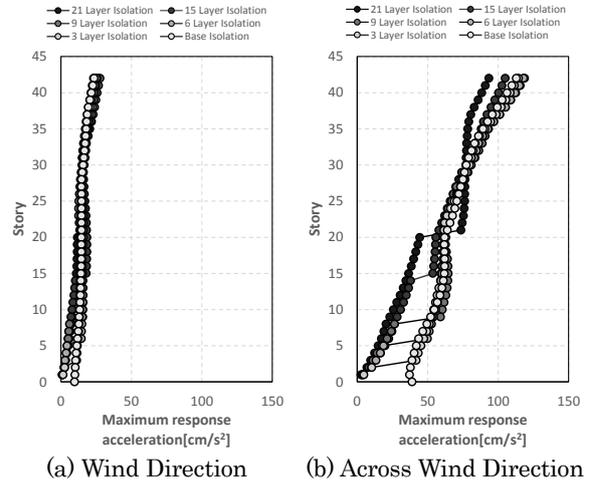


Fig.6 Maximum Response Acceleration (Wind Model)

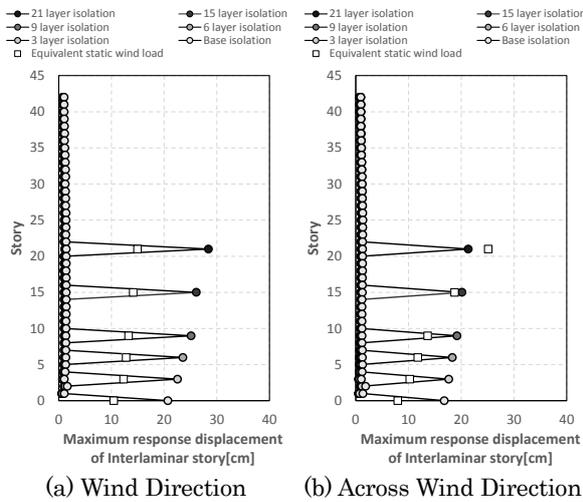


Fig.7 Maximum Response Displacement of Interlaminar Story (Earthquake Model)

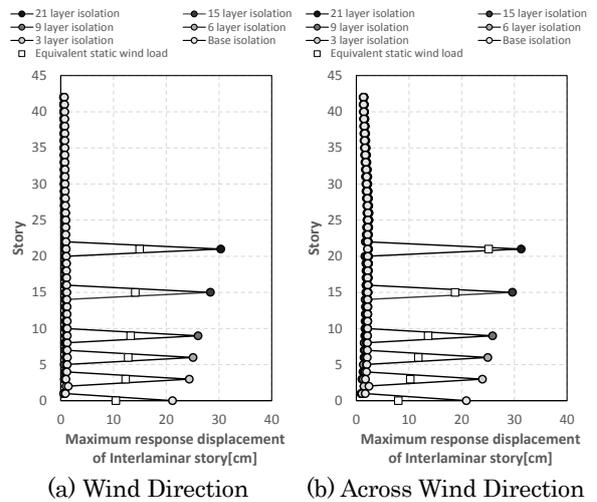


Fig.8 Maximum Response Displacement of Interlaminar Story (Wind Model)

デルでは基礎免震モデルに対し、15層や21層のように免震層を上層に設けたモデルほど、最大応答層せん断力係数が低減する傾向が確認できる。これは免震層を上層に設けたモデルほど、非免震構造に近似した応答となる。すなわち、下層部に免震層がある場合よりも上層部にある方が下層部の応答が小さくなり、免震層上部の応答も低減したと考えられる。

地震用モデルと風用モデルを比較すると風方向では、わずかに地震用モデルの方が大きい事が確認できる(Fig.3(a), Fig.4(a))。風用モデルでは風外力の平均成分に対してなだらかに復元力が上昇するクリープ変形が生じている。それに対して地震用モデルでは風外力に対して弾性挙動後、塑性挙動が生じる。クリープ変形と塑性挙動の剛性はほとんど差がないため、風用モデルに対して地震用モデルは弾性挙動分だけ免震層の復元力がわずかに大きくなったと考えられる。

Fig.3(b), Fig.4(b)より、風直交方向では風用モデルの方が地震用モデルよりも大きくなっている事がわかる。地震用モデルは履歴面積が大きくエネルギー吸収率が高い。しかし、風用モデルは地震用モデルに対し、エネルギー吸収率が低い。従って、風用モデルでは全体的に応答が大きくなり、最大応答層せん断力係数が地震用モデルよりも大きくなったと考えられる。

3.2.1 最大応答加速度

Fig.5, Fig.6より、最大応答加速度は地震用モデルと風用モデルともに、免震層を境に上部構造の最大応答値が極端に増大する傾向が見られる。この傾向は風方向と風直交方向の両方向に確認する事ができる。

地震用モデルの風方向(Fig.5(a))では、免震層を上層に設けたモデルほど、免震層における最大応答加速度の増加量は小さくなる傾向にある。Fig.5(b)の風直交方向は風方向よりその傾向が顕著である。これはFig.2の時刻歴風力波形でもわかるように、加速度に依存する変動成分が風方向より風直交方向の方が大きいためと考えられる。

風用モデルにおいて、Fig.6(a)の風方向では地震用モデルと異なり、最大応答加速度の増加量は免震層の位置によらずほぼ一定な値を示す。Fig.6(b)より、風直交方向は風方向と同様に最大応答加速度の増加量は免震層の位置によらずほぼ一定な値を示す。しかし、その絶対量は風方向より大きい。これは地震用モデルの風直交方向が風方向よりも大きくなった理由と同様に、加速度に依存する変動成分が風方向よりも風直交方向の方が大きいためと考えられる。

Fig.5(a)とFig.6(a)より地震用モデルと風用モデルを比較すると風方向では地震用モデルの方が大きな応答を示した。地震用モデルは風用モデルに比べ剛性が高い。そのため地震用モデルでは風用モデルよりも最大応答加速度が大きくなったと考えられる。

Fig.5(b)とFig.6(b)より風直交方向では風用モデルの方が大きな応答を示している事が確認できる。風用モデルは地震用モデルに対してエネルギー吸収率が低い。そのため風用モデルは最大応答加速度が大きくな

ったと考えられる。

以上のことから、免震層を境に上部構造の最大応答加速度が極端に増大する傾向を考慮すると、今後は耐風設計だけでなく加速度レベルで評価を行う居住性などの評価についても、十分な検討が必要であろう。

3.2.3 最大応答層間変位

Fig.7(a)より、地震用モデルの最大応答層間変位に関して風方向では免震層を上層に設けたモデルほど、免震層の最大変形は大きくなる事が確認できる。Fig.7(b)より風直交方向でも同様に免震層を上層に設けたモデルほど、免震層の最大変形が大きくなる傾向にあることがわかる。

Fig.7(a),(b)の風方向と風直交方向を比較すると、風方向の方が大きな応答を示している。風直交方向の風外力は変動成分のみである。しかし、風方向の風外力は変動成分に加え平均成分も有している。そのため風方向の最大応答層間変位が大きくなったと考える。

Fig.8(a)の風用モデルにおいて、風方向では免震層を上層に設けたモデルほど、免震層の最大変形が大きくなる事がわかる。Fig.8(b)より、風直交方向でも免震層を上層に設けたモデルほど免震層の最大変形が大きくなる傾向にある事が確認できる。

Fig.8(a),(b)より、風方向と風直交方向を比較すると、ほとんど同様な結果となった。風用モデルは履歴面積が小さくエネルギー吸収率が低い。そのため、風直交方向においても免震層の最大変形が大きくなったと考える。

地震用モデルと風用モデルを比較するとFig.7(a)とFig.8(a)より、風方向ではほとんど同様な傾向を示しているが、わずかに風用モデルの方が大きい事が確認できる。風用モデルでは風外力の平均成分に対してクリープ変形を起こすため、免震層の変形が地震用モデルに比べ大きくなったと考える。

Fig.7(b)とFig.8(b)を比較すると、風直交方向では風用モデルの方が大きな応答を示している事がわかる。また、免震層を上層に設けたモデルほどその差は大きくなる傾向にある事が確認できる。これは前述のように地震用モデルに比べ風用モデルはエネルギー吸収率が低いため、免震層の最大変形が大きく生じたものと考えられる。

4. 等価静的風荷重と時刻歴応答解析の比較

ここでは、その1の等価静的風荷重に基づいた応答評価と時刻歴応答解析による応答評価を比較し考察する。

4.1 最大応答層せん断力係数

等価静的風荷重による評価と地震用モデルによる評価を比較すると、Fig.3(a),(b)より風方向、風直交方向ともに近似した結果を得られた。しかし、建築物の上層では地震用モデルの方が大きな応答を示している事が確認できる。

等価静的風荷重による評価と風用モデルによる評価を比較すると、Fig.4(a)より風方向では地震用モデルと同様に近似した結果が得られた。Fig.4(b)より風直交方

向については、等価静的風荷重による評価よりも風用モデルの方が大きな応答を示している事がわかる。また、免震層を上層に設けたモデルほど、等価静的風荷重による評価に近似していく傾向にある。これは免震層を上層に設けることで、建築物全体の免震構造の部分が減少し、その挙動が非免震構造に近似していくためと考えられる。

以上のことから、風方向では復元力モデルの違いにかかわらず等価静的風荷重により得られた結果と近似した結果が得られた。しかし、風直交方向においては風用モデルが最も大きな応答を示す。そのため、風直交方向では等価静的風荷重と地震用モデルを用いて設計値を定めると、過小評価となる恐れがある。

4.2 最大応答層間変位

等価静的風荷重による評価と地震用モデルによる評価を比較すると、風方向では地震用モデルの方が大きな応答を示している(Fig.7(a))。Fig.7(b)より、風直交方向において免震層を下層部に設けたモデルでは、等価静的風荷重による評価よりも大きくなる事が確認できる。しかし、21層免震モデルでは等価静的風荷重による評価の方が大きな応答を示した。

等価静的風荷重による評価と風用モデルによる評価を比較すると、Fig.8(a)より、風方向では地震用モデルと同様に風用モデルの方が大きな応答を示す。Fig.8(b)より、風直交方向においても等価静的風荷重による評価よりも大きな応答を示した。そのため、風方向では等価静的風荷重による評価よりも時刻歴応答解析による評価の方が応答を示す。ここで復元力モデルによる差はほとんど見られない。風直交方向では時刻歴応答解析の方が大きな応答を示す。免震層を上層に設けたモデルほど等価静的風荷重による評価との差は減少していく傾向にある。

よって、免震層の変形を算出する際にも等価静的風荷重に基づき設計値を定めると、過小評価となる恐れがある。また、時刻歴応答解析を行う際には、解析に適した免震部材の復元力モデルを選定する必要があると考える。

5. まとめ

時刻歴風力波形(Level2相当波形)を用いて、超高層中間階免震建築物の風応答性状について検討を行った。また、その1の等価静的風荷重による評価とも比較、検討を行った。時刻歴応答解析ではHDRの地震用モデルと風用モデルを復元力特性に適用し、その違いについて検討した。その結果、以下のような知見が得られた。

- ・最大応答層せん断力係数について、地震用モデルを用いた場合は等価静的風荷重により得られた設計値と近似した結果を得る事が出来た。しかし、風用モデルを用いた場合、風直交方向において等価静的風荷重により得られた設計値を上回る結果となった。そのため、中間階免震建築物において耐風設計を行い場合、等価静的風荷重や地震用モデルを用いると設計値の過小評価となる恐れがある。荷重の種類に

よって復元力特性の異なる免震部材には、荷重に対して適切な復元力モデルを用いる必要がある。

- ・最大応答加速度については、風用モデルと地震用モデルにかかわらず、風方向と風直交方向ともに免震層を境に上部構造の最大応答加速度が極端に増大する傾向となる。またこの傾向は、風外力の変動成分の影響を大きく受ける風直交方向で顕著に見られた。これは地震外力に対する傾向とはまったく逆の傾向である³⁾。
- ・最大応答層間変位について、免震層を上層に設けていくほど免震層の最大変形は増大する傾向にある。風荷重に対して特有な挙動であるクリープ変形の影響は、最大応答層間変位のみならず最大応答層せん断力係数にも若干の差が見られた程度であった。風直交方向においては風用モデルが地震用モデルよりも大きな応答を示した。また、地震用モデルと風用モデルともに等価静的風荷重により得られた設計値を上回る結果となった。そのため、最大応答層間変位からも最大応答層せん断力係数と同様に、荷重の種類によって復元力特性の異なる免震部材には、荷重に対して適切な復元力モデルを用いる必要があることがいえる。

今回のモデルは高さ150m、アスペクト比5、辺長比1のモデルであった。今後はまず基本的な事項として、アスペクト比や辺長比など対象建築物の形状が異なる場合について検討を行い、その傾向を明らかにする必要があるであろう。またLevel2相当波形について風の入射角が0°の場合だけでなく、角度を有する場合や台風通過時のように時刻とともに風向風速が変化する場合についても検討を行う必要がある。さらに、免震部材の面圧や引抜力の低減が行いやすい中間階免震建築物において、地震力と風外力の相反性⁴⁾⁵⁾を以下に緩和するかについて研究を進めていきたい。

「参考文献」

- 1) 「高減衰ゴム系積層ゴム(X0.6Rタイプ)技術資料」, (株)ブリヂストン, 2011.5
- 2) 竹内貞光, 山下忠道, 神田亮, 森隆浩, 加藤秀章, 扇谷匠己, 梁川幸盛: 高減衰ゴム系積層ゴムの適用した超高層免震建物のXY方向風応答シミュレーション, 構造工学論文集, Vol.60B, pp495-506, 2014.3
- 3) 山下忠道, 向井洋一, 井上豊: 中間階に免震装置を設置した建物における免震層の上部一下部構造の応答の連成と制御に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第591号, pp35-42, 2005.5
- 4) 免震構造設計指針, 日本建築学会, pp393-402, 2013.10
- 5) 扇谷匠己, 神田亮, 河上裕之, 丸田榮藏: 確率論に基づいた高層免震建築物の構造パラメータ推定に関する研究 地震外乱に対する検討, 日本建築学会構造系論文集, 第658号, pp2105-2113, 2010.12