

「免震装置を有する超高層建物の風応答に関する研究」

～ 高次モードが無視できない場合の等価一質点モデルの適用限界と me 法の有効性の検証 ～

日大生産工(院) 矢作 貴 (株)大林組 小泉達也
日大生産工 神田 亮 日大生産工 丸田榮藏

1. 序論

近年、優れた耐震性能を発揮する免震装置は、中低層建物を中心に普及し、現在では高層建物にも適用しようとする動きがある。しかし、建物の高層化に伴い、免震装置設計時の荷重は地震荷重と風荷重が拮抗することから、耐震性能のみならず、耐風性能に関する検討も必要となる。

現在、免震建物の免震装置は風荷重に対して弾性範囲に留めるように設計が行われている。その為、地震荷重よりも風荷重の方が卓越するような高層免震建物では、風荷重に対して免震層を弾性範囲に留めるように設計を行うと、地震荷重に対して免震層が十分に降伏せず、免震効果が発揮できない場合がある。

本研究では風荷重に対して免震層が降伏することを考慮し、地震荷重に対して免震装置のもつ耐震性能を損なわないような設計思想のもとに免震装置の設計を行うことを前提とする。また、風荷重に対して免震装置の降伏を許容した際の高層免震建物の弾塑性風応答性状を正確に把握することが必要であり、その現象を評価可能な応答解析手法を提案する事を目的とする。

今まで、超高層建物の風応答解析は、振動系を等価一質点モデルに置換し、その振動状態を持って超高層建物の振動現象としてきた。しかし、免震構造物のようにある特定の層に損傷が集中し、塑性化によるモード形状の変動が大きい場合（以下、損傷集中モデル）は、その振動現象を正確に評価出来ない可能性がある。

このようなモデルの応答を正確に追跡する方法として、陽的な積分法や不釣合い力の概念を用いた手法が考えられる。しかし、陽的な積分法は、陰的な積分法に比べて精度良く復元力を算定可能ではあるが、数値積分を行う際に厳しい解の安定条件により時間刻みの制約がある。従って、超高層建物のような多自由度モデルの解析を行う際には、時間刻みを微細にしなければならない。その為、オンライン実験などを行う際には制御機構の制御可能な時間刻みを超過する可能性がある。また、不釣合い力の概念を用いた手法では、変位、速度応答を正確に評価可能であるが、不釣合い力を収束することにより加速度応答が正確に評価出来ない傾向にあり、1step 内で収束計算を繰り返す為、高速に制御を行うようなオンライン実験には適用しにくい手法である。

本論文では、免震構造物のように非線形性の強い建物の耐風設計を行うに際し、等価線形化法による応答評価法の適用範囲を検証し、風荷重に対して非線形な挙動を示す高層免震建物の風応答を評価可能な手法を提案し、その手法の精度の検証を行う。

2. 等価線形化法の適用範囲の検討

損傷集中モデルの弾塑性風応答解析を行うにあたり、等価一質点モデルによる応答評価法でその振動現象を精度良く評価できるかを検証する。解析の対象としたモデルは、図 1 に示す高さ 50,100m の最下層に免震装置を有する構造物を

Study on Characteristics for Wind Response of Super-High-rise
Structures Having Base Isolation

Takashi YAHAGI , Tatsuya KOIZUMI , Makoto KANDA and Eizo MARUTA

水平一自由度の 16,28 質点に置換したものである。上部構造はそれぞれ弾性とし、免震層のみが図 2 に示すバイリニア型の復元力特性を有する。減衰は $h = 2\%$ とする初期剛性比例型とする。ここで、 x_y は降伏変位、 q_y は降伏荷重、 x_{max} は最大応答変位、初期剛性を k_e 、降伏後の剛性を αk_e とした場合のバイリニア係数 α_1, α_2 は 0.7, 0.07 である。バイリニア係数を α_2 とした時の、免震層が弾性時及び降伏後剛性時の剛性に対する固有ベクトルを図 3, 4 に示す。

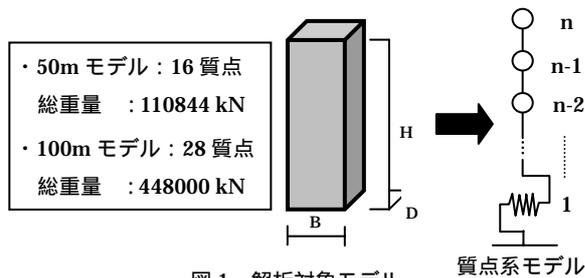


図 1 解析対象モデル

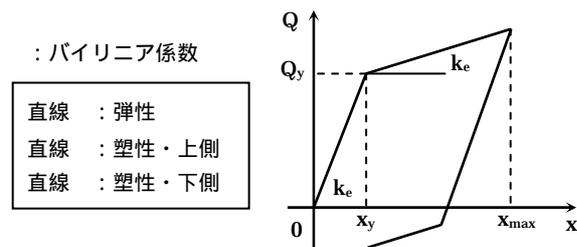


図 2 免震層の復元力特性

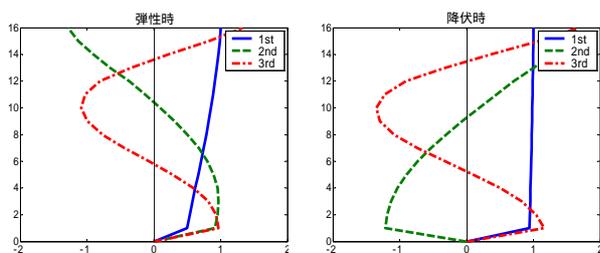


図 3 モードベクトル (50m モデル)

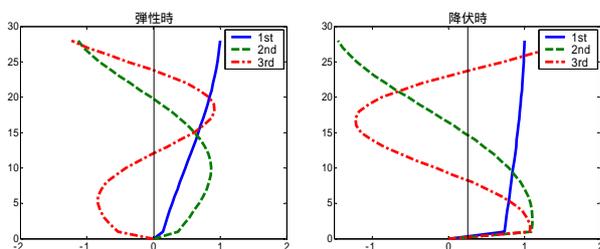


図 4 モードベクトル (100m モデル)

外力は、正方形角柱の風圧実験により得られた正方形平面の外壁面に正対する風向からの風直交方向風力とする。

応答解析は積分時間刻み $t=0.0015\text{sec}$ 、継続時間 20 分間相当とし、はじめの 10 分は弾性範囲内で振動させて、その応答を初期値として後の 10 分間を応答値として評価した。 $t=0.0015\text{sec}$ とした時の、解の安定条件を表す最高次の t は、50,100m で 0.21, 0.17 となり全モードに対して解の安定条件を満足する。

手法の妥当性の検討を行うに際し、非線形挙動を示す復元力に対して精度良くその履歴を追跡可能な陽な Newmark 法により算出された解を基準解とし、基準解と等価 1 質点モデルによる応答結果と比較することで検討を行う。図 5~8 に、復元力特性、変位の基準解に対する比較、変位の基準解を等価剛性 k_{eq} に対する基準座標系に変換したモーダル応答を示す。

図 5, 7 より、免震層の塑性化による剛性の変動が小さい場合には、等価一質点モデルによる応答評価法で算出した解は、基準解と概ね一致する。しかし、図 6, 8 よりバイリニア係数が小さく、非線形性が強いこと、また 2 次モード以上の応答が無視出来ない場合は、基準解に対して精度よく解を近似できない。特に建物高さが高くなる程、高次モードの応答成分が多く含まれることから近似解を導くことが困難であることが示された。これより、免震構造物のように損傷が集中し、かつ高次モードの影響が無視出来ない場合には、等価一質点モデルによる応答評価法は精度良く応答を再現できない場合があることが判った。

3.me 法を用いた風応答解析

著者らの提案した modal explicit 法¹⁾(以下 me 法と称する)は、陽的な積分法を基盤とした手法でありながら、無条件安定と同等な条件を有する手法である。これは、仮想剛性 k^f についてモーダルアナリシスを適用し、全応答に寄与する応答成分のみを計算することで、解の安定条件に対する制約を大幅に緩和させようとしたものである。また、非線形な挙動を示す復元力特性に対しても、精度良くその履歴を追跡可能である。

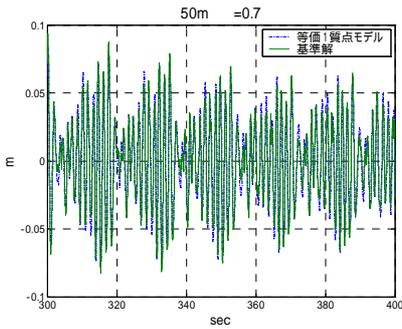


図 5-1 変位応答 (50m, =0.7)

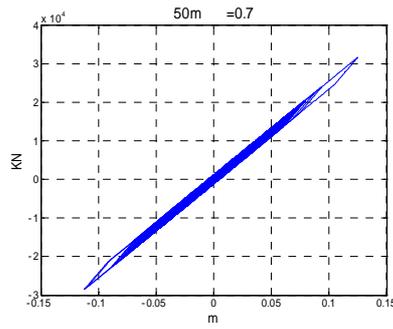


図 5-2 復元力特性 (50m, =0.7)

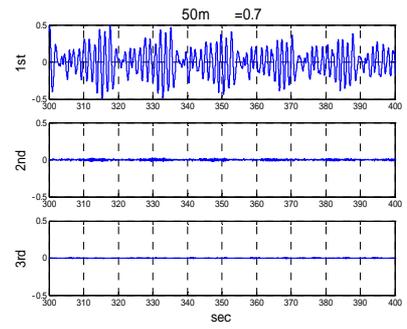


図 5-3 モーダル応答 (50m, =0.7)

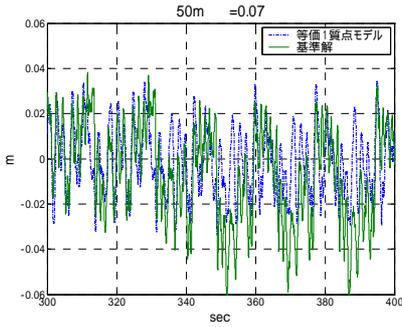


図 6-1 変位応答 (50m, =0.07)

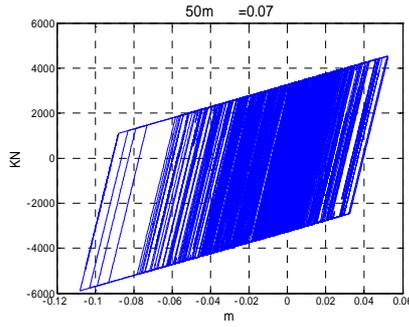


図 6-2 復元力特性 (50m, =0.07)

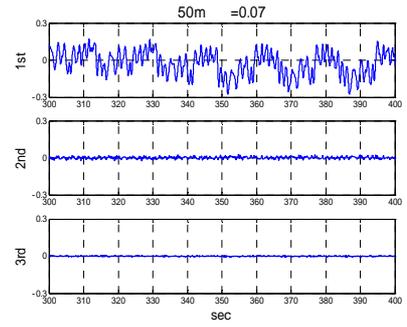


図 6-3 モーダル応答 (50m, =0.07)

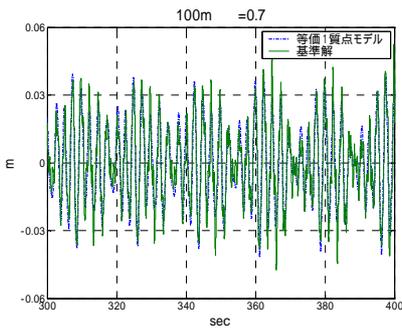


図 7-1 変位応答 (100m, =0.7)

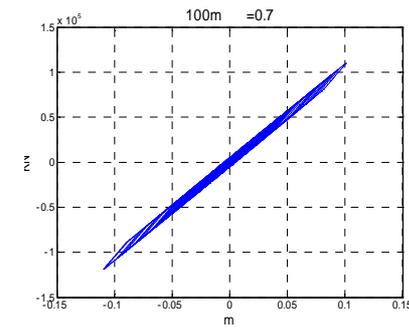


図 7-2 復元力特性 (100m, =0.7)

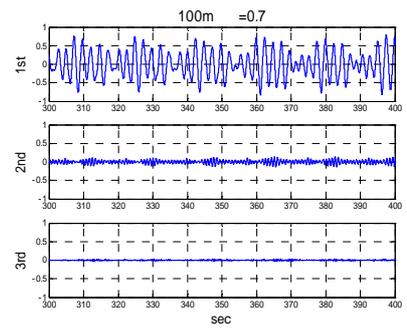


図 7-3 モーダル応答 (100m, =0.7)

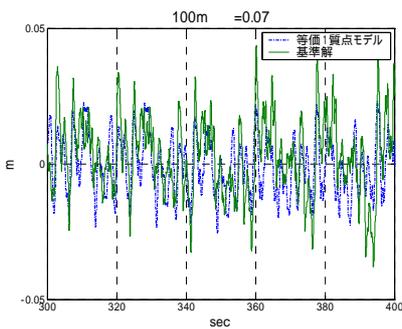


図 8-1 変位応答 (100m, =0.07)

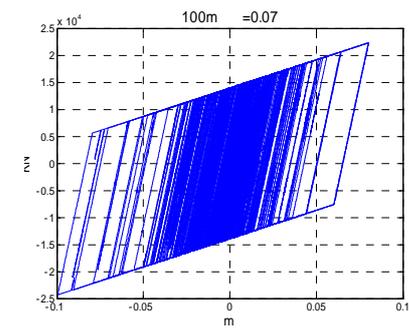


図 8-2 復元力特性 (100m, =0.07)

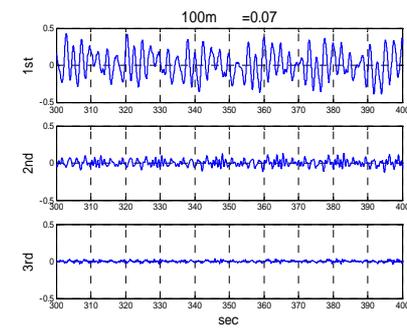


図 8-3 モーダル応答 (100m, =0.07)

me法を用いて免震装置を有する高層建物の風弾塑性解析を行い、me法が、陽的な積分法のように安定条件に対する制約を受けることなく、損傷集中モデルの非線形挙動に対してもその挙動を追跡可能であるかの検証を行う。

解析モデル及び解析条件は、前章と同様のモデルとし、バイリニア係数は0.07とする。me法でモーダルアナリシスを行う際に用いる仮想剛性 k^i は、基準解の復元力特性より算出された等価剛性 k_{eq} とし、減衰は等価剛性 k_{eq} に対して

$h=1\%$ とする剛性比例型とした。外力は前章の解析で使用した風直交方向風力とするが、me法に対してはサンプリングタイム 0.03sec, 基準解に対してはそれに線形補間を行ない、サンプリング間隔を 1/20 とした 0.0015sec の外力を作用させることとする。

me法の妥当性の検討は、陽な Newmark 法により算出された解を基準解とし、基準解とme法によるモデルによる応答結果と比較することで行う。基準解の積分時間刻みに対して安定条件を表す t は 50m, 100m モデルで 0.21, 0.17 であることから、全モードに対して安定条件を満足している。これに対し、me法では 50m, で 8 次モード、100m で 16 次モード以上の応答成分が安定条件を満足しないことから、それぞれ 7 次モード、15 次モードまでの応答成分を用いて応答解析を行う事とする。図 9,10 に、加速度、変位の時刻歴、復元力特性の比較を示す。

図 9,10 より、me法は、安定条件を満足しない積分時間刻みに対しても、解が発散することなく解を算定可能であり、免震構造物のように損傷集中するモデルに対しても精度良くその履歴を追

跡できることが確認できた。

4.まとめ

免震構造物のような損傷集中モデルの風弾塑性解析を、等価一質点モデルと me法で行った。その結果、等価一質点モデルによる応答評価法では、バイリニア係数が小さく、非線形挙動が強い場合、また高次モードの応答成分が無視できない場合には、精度良く応答を再現できない場合があることが判った。また me法では、安定条件を満足しない積分時間刻みを用いても、解が発散することなく解を算定可能で、精度良くその履歴を追跡できることが確認できた。

以上より、me法は非線形挙動を考慮したオンライン実験等にも適用可能な数値積分法であり、今後、本手法を Hybrid 振動法に適用し、免震構造物に作用する振動依存風力を測定する。

5.参考文献

- ・扇谷匠己、矢作貴、神田亮、丸田榮藏：ハイブリッド振動法の制御アルゴリズムに関する研究、日本大学生産工学部研究報告A (投稿中)

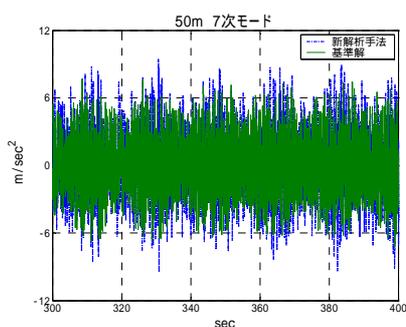


図 9-1 加速度応答 (50m, $\beta=0.07$)

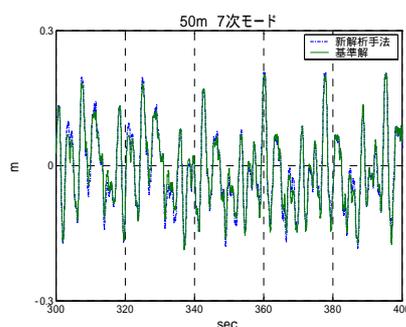


図 9-2 変位応答 (50m, $\beta=0.07$)

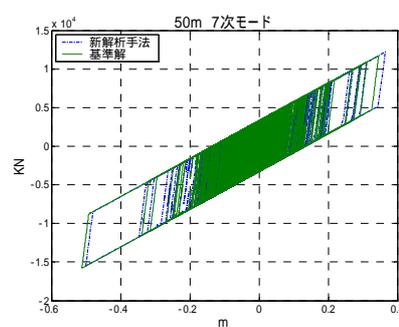


図 9-3 復元力特性 (50m, $\beta=0.07$)

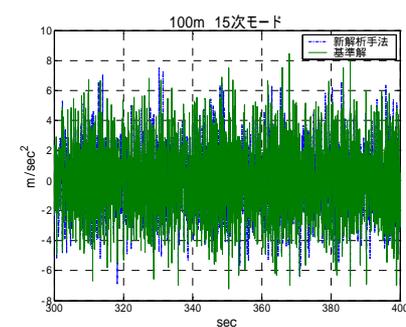


図 10-1 加速度応答 (100m, $\beta=0.07$)

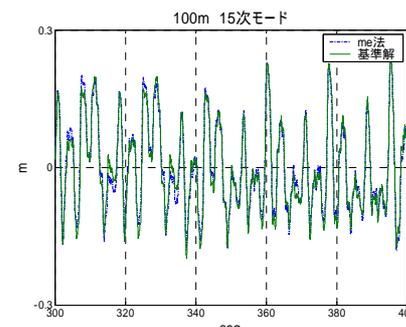


図 10-2 変位応答 (100m, $\beta=0.07$)

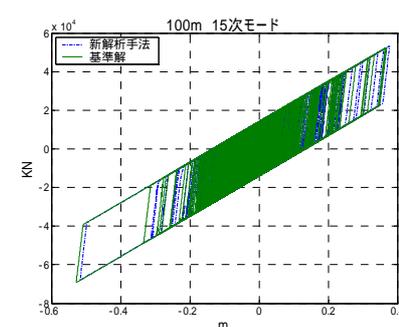


図 10-3 復元力特性 (100m, $\beta=0.07$)