

免震層簡易風応答評価法への高減衰積層ゴムの適用

その1 提案法の概要と変位計算法

免震構造 高減衰積層ゴム 風応答
簡易評価法

1. はじめに

(一社)日本免震構造協会より免震建築物の耐風設計指針2023¹⁾（以下、指針2023）が発刊（改訂）され、免震建築物の風応答評価に用いられている。改訂点では風荷重の組合せ考慮などが追加されてやや複雑化したが、詳しい計算例の提示などにより理解を誘う内容である。また最大風荷重あるいは変動成分で免震部材が未降伏となるランクAまたはBで適用可能な簡易風応答評価法²⁾

（以下、簡易評価法）は、その適用条件を基本的な設計目標とした上で広く採用されている検証法といえよう。

一方、簡易評価法で扱う免震部材は、①線形ばね要素（天然積層ゴム）、②クリープ性のない弾塑性要素（鋼材ダンパー）、③クリープ性のある弾塑性要素（鉛ダンパーなど）で代表させているため、免震層を構成する部材をこれら三種に区分して適用する必要がある。例えば、鉛や錫プラグ入り積層ゴムでは積層ゴム部とプラグ部に分離することになる（歪み依存性など適宜考慮した上で）が、高減衰積層ゴムの適用についての言及がなく、これを含む場合の検討がやや実務上の障壁になっていると思われる。

本研究は簡易評価法に高減衰積層ゴムを適用する方法を提案し、簡易評価法の運用拡充を試みるものである。基本となる計算方針や考え方は簡易評価法を踏襲する（適用条件も同様にランクAまたはBである）。ただし、免震層変位について簡易評価法では降伏条件に応じた代数式を与えているが、提案法では後述する高減衰積層ゴムの復元力モデルを考慮するため、各免震部材の剛性を累加した全体剛性の収斂による反復処理で変位を求める。

その1では、提案法での計算概要（簡易評価法と多くは重複するが）を述べ、採用した計算法による免震層変位が指針2023に掲載のRSL免震の計算結果と十分一致することを示す。その2では、高減衰積層ゴムを簡易評価法に適用するための復元力モデルと適用方法を示し、ゴム種毎に結果を検証する。その3では実際の免震建築物のモデルに提案法を適用した計算結果を示して考察を加える。

なお、本研究目的より、取り扱う風荷重は水平荷重としての風方向の最大荷重（=平均成分+変動成分）、および風直交方向の最大荷重（=変動成分）を対象とし、ねじれによる検討は含めない。

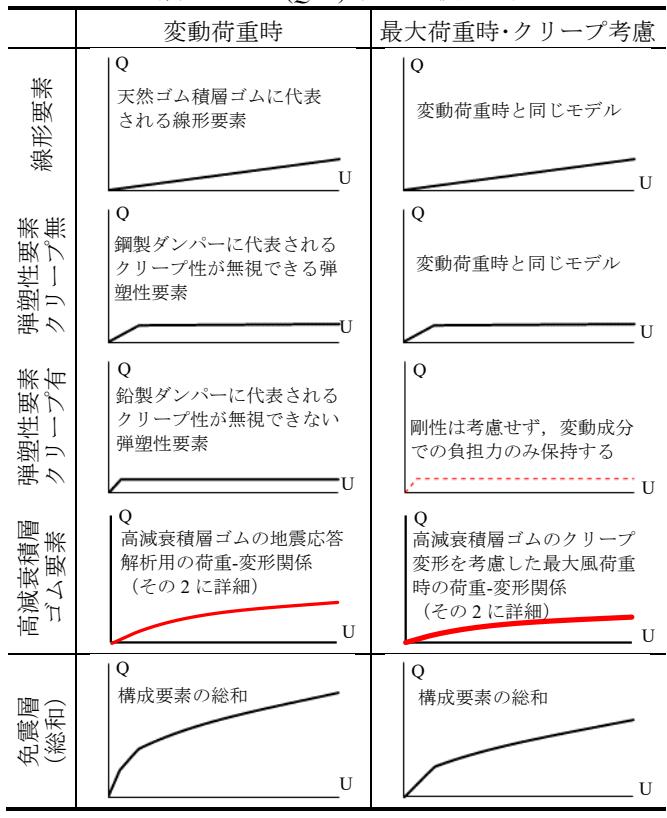
正会員 ○岩本 裕史*1 同 山崎 久雄*1
同 竹内 貞光*2 同 貝谷 淳一*3
同 河合 謙 *3

2. 提案法の計算概要

2.1. 計算手順

提案法での計算手順は簡易評価法に準じる。すなわち、まず風最大荷重の変動成分（変動荷重） \mathbf{W}' に対する免震層変位（変動変位） \mathbf{U}' を求める。ベクトル表記は風方向と風直交方向の二成分を表す。変動荷重時で考慮する要素を表1（左欄）に示す。それぞれの復元力特性は地震応答解析でのモデルである。次に平均+変動成分である風最大荷重（最大荷重） \mathbf{W}_{max} に対する免震層変位（最大変位）について、クリープ性を無視したときの変位 $\mathbf{U}_{max,0}$ とクリープ性を考慮したときの変位 \mathbf{U}_{max} を求める。クリープ性無視時では変動荷重時と同じ復元力特性を用いる。クリープ性考慮時では、表1（右欄）のように弾塑性要素クリープ有は変動荷重時での負担力のみを考慮し、高減衰積層ゴムは次報で示す最大荷重時での復元力モデルとする。これら以外は変動荷重時と同じモデルである。

表1 提案法で考慮する免震層の構成要素
(荷重-変形 ($Q-U$) 関係の模式図)



風最大荷重の平均成分（平均荷重） \mathbf{W}_m （= $\mathbf{W}_{max}-\mathbf{W}'$ ）に対する免震層変位（平均変位） \mathbf{U}_m は $\mathbf{U}_{max}-\mathbf{U}'$ とし、クリープ変位 \mathbf{U}_c は $\mathbf{U}_{max}-\mathbf{U}_{max,0}$ とする。残留変位 \mathbf{U}_r は、簡易評価法では平均荷重時の $(\mathbf{U}_m, \mathbf{W}_m)$ 点から除荷剛性による荷重=0での変位としているが、高減衰積層ゴムについては次報で示す残留変位計算用のばねを加えて計算する。

2.2. 免震層変位の反復計算

簡易評価法では免震層変位 \mathbf{U} を要素の降伏状態に応じた算出式によって求めている。ただし、対象要素は前述(1.はじめに)の①②③である。提案法では、次報で示すように歪みに対して連続に変化する剛性を有する高減衰積層ゴムも考慮するため、仮定した \mathbf{U} に対する免震層のせん断力 \mathbf{Q} が、指定の風荷重 \mathbf{W} に十分一致するまで反復計算を実施して \mathbf{U} を求める。降伏状態が適用範囲内にあるかどうかは変位計算後に判明する。また各要素の計算では変位の二方向ベクトル成分 \bar{U} （= $|\mathbf{U}|$ ）に対して降伏有無を考慮した \bar{Q}_i を求め、それを各方向に分配して \mathbf{Q}_i とすることは簡易評価法と同様である。

図1に風荷重 \mathbf{W} における免震層の変位 \mathbf{U} を求めるための反復計算の概略フローを示す。初期仮定変位は $\mathbf{U}=\mathbf{0}$ から開始し、このとき要素のせん断力は $\mathbf{Q}_i=\mathbf{0}$ であるが剛性 $\mathbf{K}_{e,i}$ は初期剛性である。仮に全要素が弾性ならば次の変位候補値 $\mathbf{U}=\mathbf{W}/\mathbf{K}_e$ で終了する。

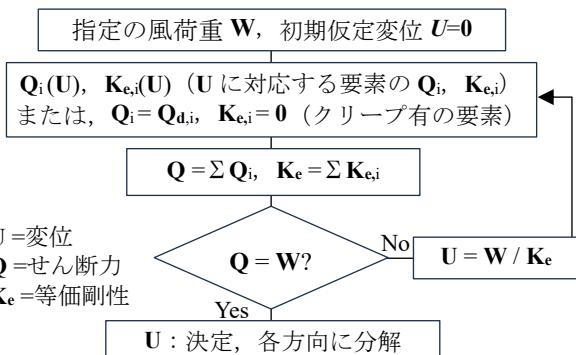


図1 反復計算の概略フロー（最大荷重時の場合）

3. 変位計算法の検証（指針2023例題との結果比較）

提案法で用いる変位計算法の結果を検証するために、指針2023に掲載されている計算例の中から7つを対象に、同条件で免震層変位を計算した。表2と表3に、計算例「状態(1)」から「状態(5)」での提案法による結果を、表4に「荷重指針500年期待値で風荷重の組合せ考慮時」での同じく結果を示す。これらの中には簡易評価法の適用条件を超えるような降伏状態となるケースもあるが、すべてにおいて掲載値と一致または1/100mmの桁で丸め誤差が生じる程度であり、本計算法の妥当性が確認できた。

表2 例題（状態(1)-(2)）の計算結果

	状態(1)-1	状態(1)-2	状態(2)
最大変位 (mm)	13.42	22.37	35.18
平均成分変位 (mm)	10.35	17.24	28.00
変動成分変位 (mm)	3.08	5.13	7.18

状態(1)は未降伏

状態(2)は鋼材ダンパーが最大荷重時で降伏

表3 例題（状態(3)-(5)）の計算結果

	状態(3)	状態(4)	状態(5)
最大変位 (mm)	28.97	53.05	175.10
平均成分変位 (mm)	19.31	40.64	141.04
変動成分変位 (mm)	9.66	12.41	34.07

状態(3)は鉛ダンパーが変動荷重時と最大荷重時で降伏
状態(4)は鋼材ダンパーが最大荷重で、鉛ダンパーが変動荷重時と最大荷重時で降伏

状態(5)は鋼材ダンパーおよび鉛ダンパーが変動荷重時と最大荷重時でいずれも降伏

表4 例題（500年期待値・組合せ考慮）の計算結果

	風方向	直交方向
最大変位クリープ考慮 (mm)	28.85	4.87
最大変位クリープ無視 (mm)	17.15	4.95
平均成分変位 (mm)	19.90	0.17
変動成分変位 (mm)	8.95	4.70
クリープ変位 (mm)	11.71	0.00
残留変位 (mm)	12.56	0.15
鋼材ダンパーが最大荷重時で降伏、それ以外は弾性		

4. まとめ

その1では、簡易評価法への高減衰積層ゴムの導入を前提に、風荷重時の応答変位を反復計算で求める方法を示した。また、指針2023に記載のRSL免震による計算結果と比較し、両者の一致度から本計算法の妥当性を示した。

その2では、簡易評価法へ高減衰積層ゴムを導入するための復元力特性モデルを示す。

謝辞

本研究において、日本免震構造協会・設計支援ソフト小委員会（會田裕昌委員長：構造計画研究所）より協力をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本免震構造協会：免震建築物の耐風設計指針、2023.3
- 2) 安井八紀、吉江慶祐、佐藤大樹、大熊武司、島岡俊輔：風荷重の組合せを考慮した免震建築物の簡易風応答評価方法、日本建築学会技術報告集 第71号、2023.2

*1 ユニオンシステム

*2 ブリヂストン

*3 能勢建築構造研究所

*1 UNION SYSTEM Inc.

*2 Bridgestone Corporation

*3 Nose Structural Engineering