

鉛プラグ型積層ゴムのクリープ性を考慮した高層免震建物の風応答評価

竹中康雄、飯塚真巨、鈴木雅靖、吉川和秀
(鹿島建設株式会社)

1. はじめに

阪神・淡路大震災以後、免震建物の普及にはめざましいものがある。免震構造の対地震安全性の有利さを最大限活用する形で多くの公共建物や病院医療施設等への適用が進むとともに、阪神・淡路大震災以前には殆ど実績のなかった個人用の戸建住宅や高さ 60m を超える高層建物への適用も確実に増加しつつある。軽量の戸建免震住宅や塔状比の大きい高層免震建物の出現は、構造設計者に免震建物の対風安全性や居住性の問題を改めて問いかけているものと考えられる。すなわち、免震構造の採用は地震荷重を大幅に低減できるため相対的に風荷重が大きくなり、上記のような免震建物では風荷重が地震荷重を上回ることにはないにしても、両荷重の大きさの差が相当小さくなることも予想される。その際、長時間継続する風荷重に対して免震装置・部材の疲労やクリープ現象を考慮すべき場合も考えられるが、疲労が地震時を想定した従来の研究成果の延長線で議論できるとされる一方、クリープ現象については風向方向の場合のように静的成分を多く含む風荷重が長時間作用した場合の実験や応答評価法の研究は皆無に近い。

本報告では、クリープ性の強い材料である純鉛を用いた免震装置の一つである鉛プラグ型積層ゴムに関して、風荷重の下でのクリープ変形の影響を実験的に把握するための、鉛プラグ型積層ゴム単体縮小試験体を用いた長時間動的加力実験を報告し、さらに実験結果で確かめられた鉛プラグ型積層ゴムのクリープ性を考慮するための実用的な風応答簡易評価法を提案する。

2. 積層ゴムの長時間動的加力実験

鉛プラグ型積層ゴムで支持された高層免震建物の近傍を大型の台風が通過するとの想定の下に風荷重を評価し、積層ゴム単体の加力実験を実施した(文献 1, 2)。想定した高層免震建物を図 1 に示す。東京地区の地表面粗度区分Ⅱの地域に建設される地上 25 階、高さ約 80m、アスペクト比約 3 の RC 建物で、46 台の直径 100cm の鉛プラグ型積層ゴム(ゴム層総厚さ 20cm、平均面圧 9.8N/mm^2)で支持されているとの想定である。これに対して継続時間 5 時間のうち最大風外力が 100 年および 1000 年再現期待値相当の建物各階に作用する風向方向風外力時刻歴を、台風の観測結果、風洞実験結果、日本建築学会建築物荷重指針・同解説などに基づいて評価し、さらにこれらの外力を入力して免震建物 26 質点せん断型モデルによる風応答予備解析を実施し、実験用の積層ゴムせん断力の時刻歴応答を得るものとした。実験の種類としては表 1 に示すように得られた時刻歴を載荷した動的加力実験、荷重のうち静的成分だけ取り出して載荷した静的成分加力実験ならびにクリープ性状の基礎的性質を得るための一定水平力加力実験で

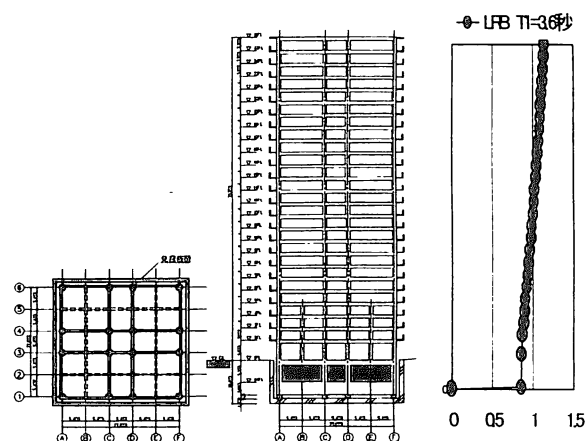
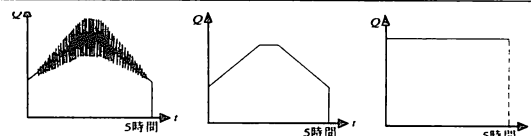


図 1 想定免震建物

表 1 加力実験の種類

実験種類	内容	水平力の水準
動的加力実験	予備応答せん断力の時刻歴波形を作用させる。	100 年再現期待値 1000 年再現期待値
静的成分加力実験	予備応答せん断力の静的成分のみを作用させる	100 年再現期待値 1000 年再現期待値
一定水平力加力実験	一定の荷重を作用させる	3 水準



(a) 動的加力実験 (b) 静的成分実験 (c) 一定水平力実験

ある。

台風時の速度圧の時間変化を図 2 のように台形にてモデル化した。評価された風外力時刻歴の一例を図 3 に示す。最大風速時の頂部平均風速は、再現期間 100 年で 51.7m/s、1000 年で 63.6m/s である。この間風向変化しないものとした。風応答予備解析では、鉛プラグ型積層ゴムを地震応答用として一般に用いられている修正 Bi-linear モデルとしており、応答履歴曲線を図 4 に示す。100 年再現期待値においては降伏せん断力を超えない結果となった。一連の加力実験の積層ゴム試験体を、表 2 および図 5 に示すように想定実機の 1/2 縮小試験体（直径 50cm、ゴム総厚さ 10cm）とした。図 6 は実験前の製品検査として実施したゴムせん断歪 $\gamma = \pm 100\%$ で 3 サイクル加力した際の履歴ループである。動的加力実験では予備応答で得られた免震層せん断力時刻歴を縮小試験体 1 個分に低減し、かつ製品誤差および温度補正のため 1.2 倍した上で、荷重制御により実時間のまま 5 時間連続载荷した。実験中は面圧 9.8N/mm² になるよう一定鉛直力を载荷するものとした。全加力時間にわたる積層ゴム試験体に作用させた水平力と水平変位を図 7 に示す。実験結果最大水平変位を実機換算（2 倍）の上で予備応答解析結果と比較して表 3 に示す。最大水平変形付近の実験結果履歴ループを地震応答用スケルトンカーブと比較して図 8 に示す。また図 9 は 1000 年再現期待値時の载荷開始直後の履歴ループである。

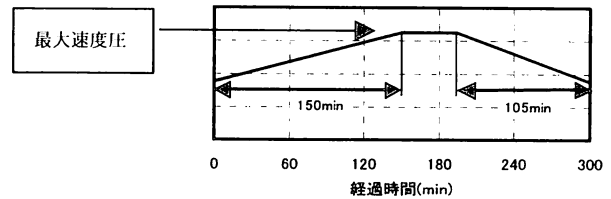


図 2 速度圧時間変化のモデル化

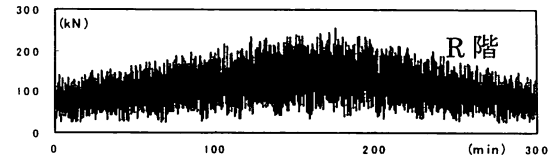


図 3 風外力の時刻歴波形の例

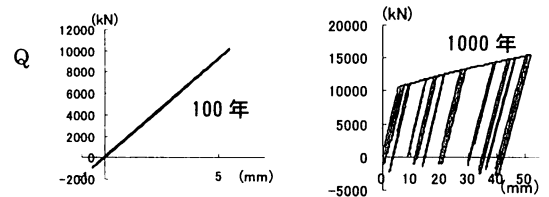


図 4 予備解析による免震層履歴曲線

表 2 積層ゴム想定実機と縮小試験体

	鉛プラグ型積層ゴム (LRB)	
	想定実機φ1000	縮小試験体φ500
ゴム材料	天然ゴム系 G4	
外径 (mm)	1000	504
鉛プラグ径 (mm)	180	91
ゴム厚 mm×層数	6.7×30(=201)	3.6×28(=101)
1 次形状係数 S1	37	35
2 次形状係数 S2	5.0	5.0

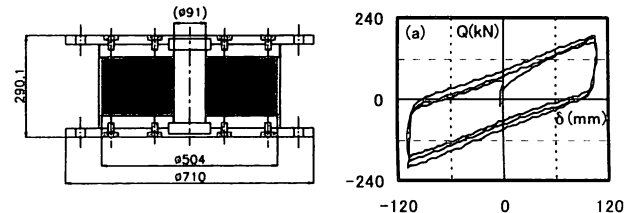


図 5 縮小試験体形状 図 6 試験体準静的加力結果

表 3 積層ゴム最大水平変形（実機換算）

項目	再現期待値 年数	鉛プラグ型積層ゴム	
		予備応答 解析	動的加力 実験結果
最大変形 (mm)	100 年	6	54
	1000 年	52	106

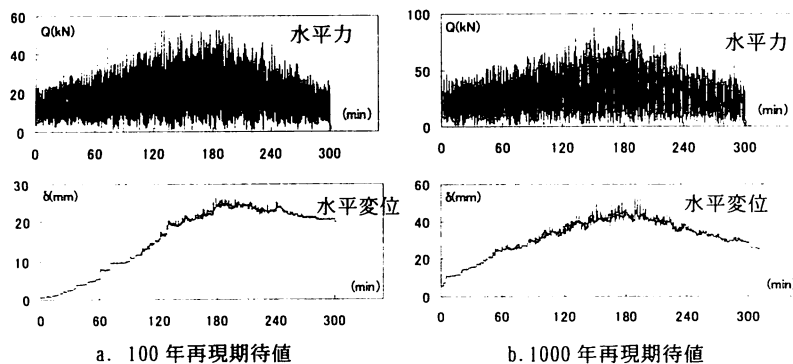


図 7 動的加力実験結果時刻歴

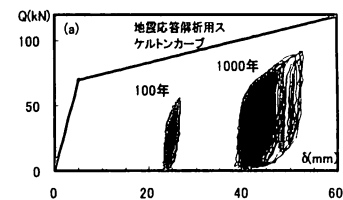


図 8 最大水平変形付近の履歴ループ

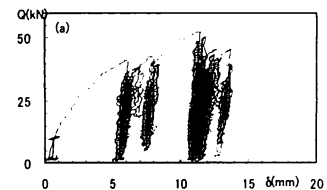


図 9 動的加力開始時履歴ループ
(1000 年再現期待値)

動的加力実験による積層ゴムの最大水平変形は 1000 年再現期待値の場合でも実機換算で 10cm ($\gamma=50\%$) 程度で過大ではないが、予備風応答解析結果の倍以上の変形となっている。この原因としては、予備応答解析の積層ゴム復元力特性に $\gamma=10\%$ 以下の微小変位振幅時の履歴特性が考慮されていないことがあげられるが、本質的にはクリープ変形の影響と考えられる。このことは純鉛が強いクリープ性を有していること、図 8 に示すように動的加力実験結果履歴ループと地震応答用積層ゴム履歴モデルスケルトンカーブに乖離が見られること、また図 10 に示す一定水平力加力実験 ($\phi 500$ 試験体に 20、40、80 kN の水平力 5 時間载荷) 結果からも明らかである。図 11 に 1000 年再現期待値の静的成分のみ取り出して 5 時間载荷した静的成分加力実験結果を動的加力実験結果と比較して示すが、これより静的成分のみによるクリープ変形だけでは動的加力実験を説明することが難しいことがわかる。また図 9 をみれば積層ゴムの変形増大が断続的に生じており、鉛の弾塑性特性や常温再結晶性などが複雑に関与した現象だと推測される。

3. クリープ性を考慮した積層ゴム挙動の簡易評価法

鉛プラグ型積層ゴムのクリープ性を考慮した風応答評価法として、最も風速の高い時間帯の応答をクリープ変形が十分進行した定常的な応答として簡便に扱う方法を提案する。積層ゴムに作用する静的成分を含む風荷重が与えられた場合、本方法では図 12 に示すように風荷重を静的成分と動的成分を分離した上で、次のような単純な仮定の下積層ゴムの変位応答が評価できるものとする。

- ① 風荷重静的成分に対して鉛プラグ部分は水平力を全く負担できず、ゴム部分のみの剛性から変形を評価できる。
- ② 動的成分に対してはゴムに加えて鉛プラグの弾塑性特性が地震時と同様に有効、すなわち地震応答解析用の復元力特性を用いて評価できる。
- ③ 全体の風荷重に対する水平変形は、①、②の仮定によりそれぞれ別個に評価された静的成分および動的成分の応答変位を単純和することによって評価できる。

本評価法の妥当性を検証するため、動的加力実験結果のシミュレーション解析を実施した。最大水平変形が生じた時刻付近の風荷重波形を取り出して静的成分と動的成分に分離し、動的成分に対する復元力モデルには筆者らによる微小振幅特性を考慮した修正 HD モデル (文献 3) を考慮するものとした。解析結果として図 13 に応答履歴曲線、図 14 に応答変位時刻歴の主要部分を示す。全般的にみて解析は実験結果にみられる変形状況を良く再現していることがわかる。静的成分に対する応答に着目すると 100 年、1000 年再現期待値実験の両者とも解析のほうが若干大きめ、すなわち安全側の評価となっている。動的成分に対する応答については 100 年、1000 年再現期待値実験とも実験結果変位振幅の方が大きい。これは実験時積層ゴム表面温度の室温を超える上昇が認められなかったものの内部の鉛プラグが長時間加力によりある程度温度上昇したためとの可能性も考えられる。以上から本簡易評価方法は現象を概ね再現し、且つ最大水平変形に対するクリープ性への影響については安全側の評価になっていることが確かめられた。

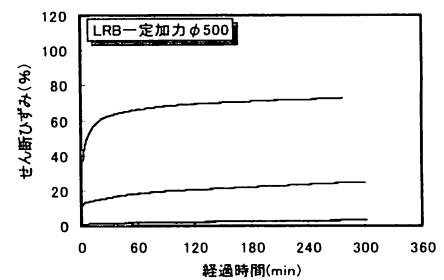


図 10 一定水平力加力実験結果

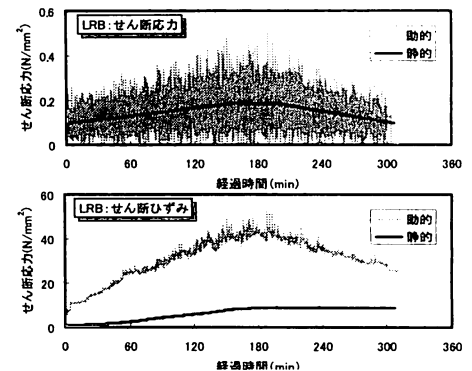


図 11 静的成分加力実験結果

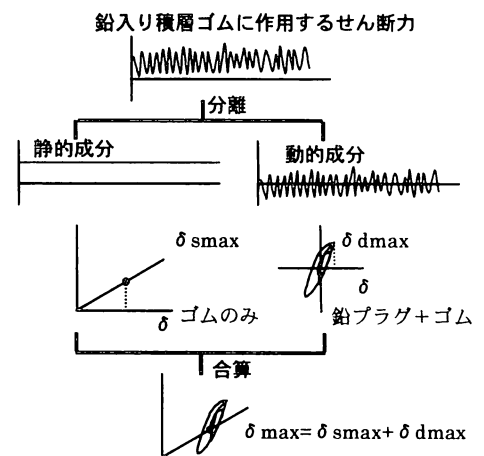


図 12 簡易応答評価法フロー

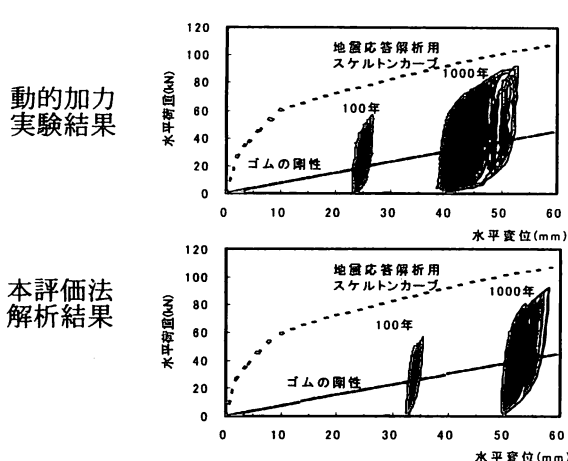


図 13 積層ゴム履歴曲線の比較

4. 高層免震建物風応答解析

提案した簡易評価法を適用して高層免震建物の風応答時刻歴解析を行い、クリープ性を考慮しない従来法による風応答と比較する。解析対象は前出の高層免震建物で、台風通過時を想定して評価した風外力時刻歴動的成分を入力して時刻歴応答解析を行った。免震層はシミュレーション解析と同じ修正 HD モデルとした。比較相手の従来法では静的成分含む全風外力を本モデルに入力して解析を行っている。

最大加速度、最大水平変位分布を従来法と比較して図 15, 16 に示す。免震層変形は、免震層にゴム部分のみ剛性を考慮した静的解析で得られた静的成分による変形が合算されているため、従来法に比べかなり大きな変形となっている。上部構造の最大加速度については、免震層による吸収エネルギーが増加しているため従来法より若干小さい傾向となっている。

5. おわりに

高層免震建物近傍を大型台風が通過するとの想定の下に実施した一連の鉛プラグ型積層ゴムの長時間加力実験を紹介し、実験結果にクリープ変形の影響が表れていることを報告した。本論文では、このようなクリープ変形の影響を考慮するための簡便な風応答評価法を提案し、その妥当性や免震建物風応答への影響を確かめた。本法は高層免震建物の対風設計上十分実用的と考えられる。

謝辞

本論文の一連の実験は（株）ブリヂストンと共同で実施したものです。また、神奈川大学大熊武司教授のご指導、貴重なご助言に感謝いたします。

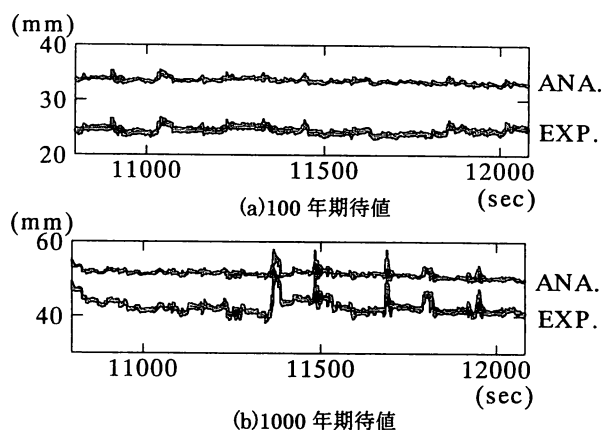


図 14 積層ゴム変形時刻歴の比較

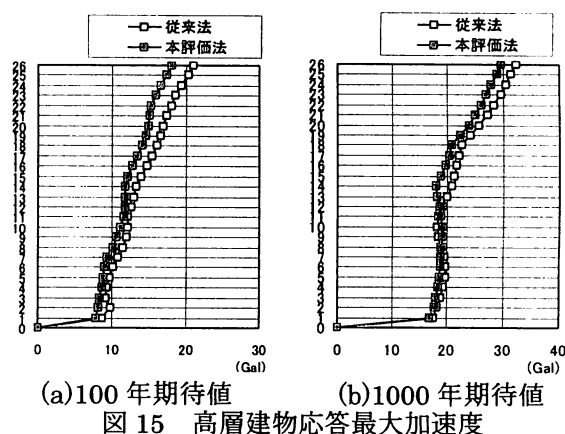


図 15 高層建物応答最大加速度

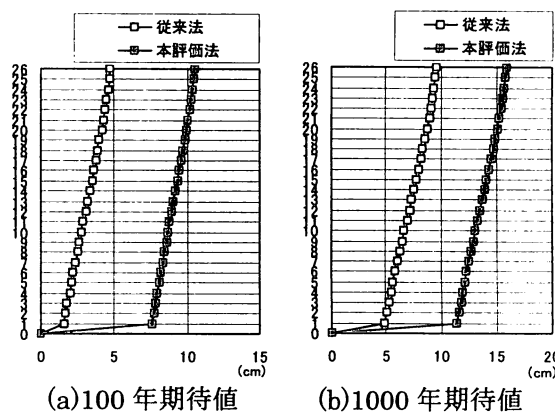


図 16 高層建物応答最大水平変位

参考文献

- 1) 鈴木雅靖、上野薫、竹中康雄、吉川和秀、鈴木重信：高層免震建物の台風時における免震装置に関する動的加力実験、第 16 回風工学シンポジウム、pp.417～422、2000.12、
- 2) 鈴木雅靖、飯塚真巨、竹中康雄、山田和彦、吉川和秀、二村有則、鈴木重信、菊地隆志：高層免震建物の風応答に関する研究（その 1）～（その 3）、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.675～680、2001.9、
- 3) 竹中康雄、山田和彦、吉川和秀：免震用積層ゴム支承の曲線型履歴復元力モデル：「修正 HD モデル」、日本建築学会技術報告集、第 14 号、pp.87～92、2001.12