

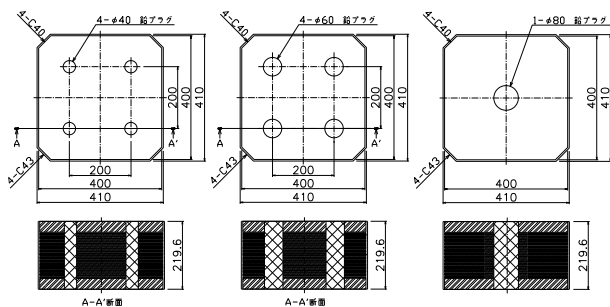
1. はじめに

近年、大規模・超高層免震建物の登場により、免震構造は耐震性能のみならず耐風性能に関する検討が重要視されている。主要な免震部材である鉛プラグ入り積層ゴム（以下、LRB）は、平均成分を有する風荷重を受ける場合、水平変形が漸増するクリープ変形を示すため、通常地震応答解析に用いられる復元力モデルを風応答解析に適用すると、最大変形を過小評価することが知られている¹⁾。LRBのクリープ変形を考慮可能な簡易解析手法²⁾が提案されているが、力のつり合い条件と変位の適合条件を満足せず、地震応答解析と風応答解析で異なる復元力モデルを用いる必要がある。また、風荷重は長時間繰り返し作用するため、LRBの性能変化を考慮した解析が必要であると考えられる。本研究では、LRBの水平二方向荷重下での力学特性を実験的に明らかにし、粘弾性モデル³⁾を用いた風及び地震応答解析を行う。

2. 風荷重加振実験

2.1 試験体

試験体の一辺が400 mmの角形LRBとした。風荷重に対する鉛プラグの発熱・放熱特性に着目するため、試験体は鉛プラグの諸元をパラメータとした。図1に試験体の形状を示す。試験体Aはプラグ径40 mm×4本、試験体Bはプラグ径60 mm×4本、試験体Cはプラグ径80 mm×1本である。試験体AとCは鉛プラグ総断面積が等しい。



(i) 試験体 A (ii) 試験体 B (iii) 試験体 C

図1 試験体の形状

2.2 実験方法

加振パターンは一方向、8の字、∞の字、楕円の4種類とする。加振周期は3秒を基本として、周期3または6秒の加振周期を直交方向に適用することで二方向のパターンを表現する。加振時間は2時間とし、周期3(または6秒)で2400(または1200)サイクルの繰り返し加振とする。図2に加振パターン、表1に加振ケースを示す。

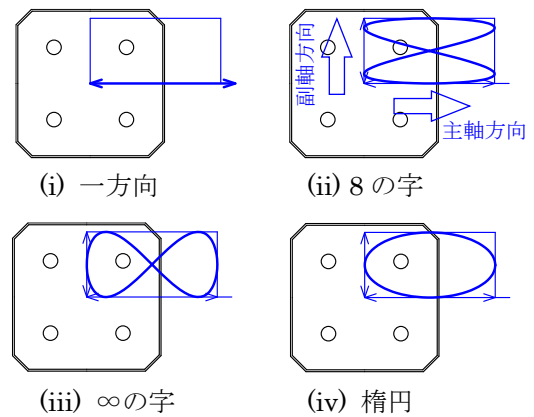


図2 加振パターン

表1 加振ケース

(i) 一方向加振

ケース	1	2	3
面圧 [MPa]	15	15	2.5
荷重 [Qd]	0.45±0.45	1.00±1.00	1.00±1.00
周期 [s]	6	6	3

(ii) 二方向加振

ケース	4	5	6
面圧 [MPa]	2.5	2.5	2.5
主軸荷重 [Qd]	0.90±0.90	0.90±0.90	0.90±0.90
副軸荷重 [Qd]	0.45±0.45	0.45±0.45	0.45±0.45
位相差	0° (8の字)	0° (∞の字)	90° (楕円)
主軸周期 [s]	3	6	3
副軸周期 [s]	6	3	3

2.3 実験結果

実験結果を代表して、図3に試験体A、Cの楕円加振に関する荷重変形関係、変位オービット、LRB内部温度を示す。位相差入力とした楕円加振は副軸の履歴ループがひし形に近い形状を示した。変位オービットは、加振開始直後に主軸方向へ変形した後、徐々に副軸方向へ変形し主軸変位と副軸変位の比が2:1の直線上を中心に履歴を描いた。周期差を与えた8の字（または∞の字）加振の荷重変形関係は、主軸（または副軸）方向に1サイクルのループを描く間に副軸（または主軸）は二重のループを描いた。最終的な変位振幅は試験体Aより試験体Cのほうが大きくなった。除荷後は原点方向に向かって変形が小さくなり、約1分で加振終了時の半分程度まで変形が戻った。鉛プラグ中心温度は試験体Aより試験体Cのほうが大きく、一方向加振（ケース3）で最大の約86°Cである。二方向加振の加振終了時の温度は25°C~50°C程度であり、地震応答と比較すると温度上昇は小さく緩やかである。しかし、加振時間が長く、鉛プラグの放熱の影響によりゴム中間・表面温度が上昇した。そのため、温度上昇によるゴムの性能変化の可能性が考えられる。

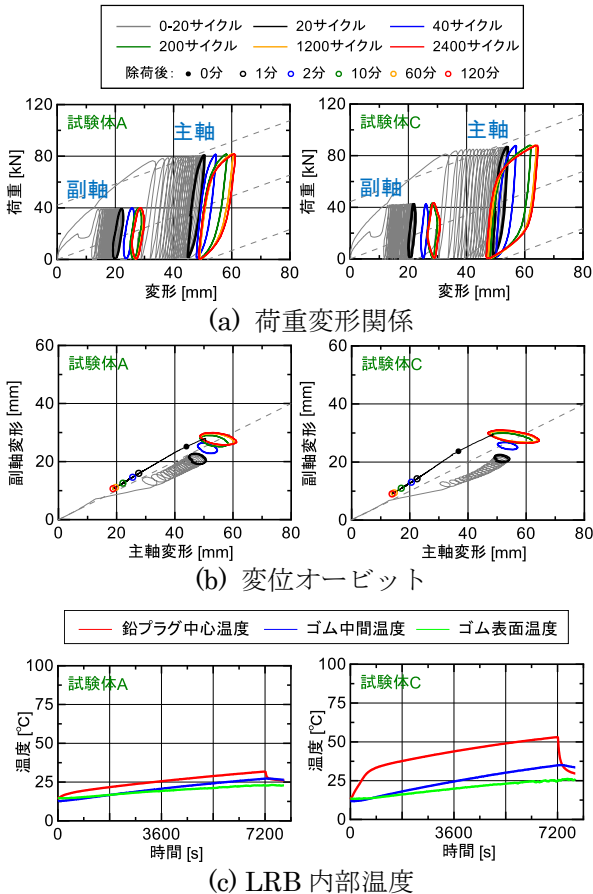


図3 実験結果（楕円加振）

2.4 クリープ変形の到達率

最終履歴の平均変位をクリープ変形とし、風荷重平均成分 Q がゴムのみ作用した場合の変形に対するクリープ変形の割合を到達率とする。各ケースの主軸、副軸方向の到達率を図4に示す。ゴムの変形 δ_{RB} は次式の温度依存性を考慮して算出した。

$$\delta_{RB} = Q / (K_r \times \exp \{-0.00271(T - 20)\})$$

ここで、 K_r はひずみ100%時のRB等価剛性[kN/mm]、 T はゴム中間温度[°C]である。一方向加振を行ったすべてのケースで到達率は概ね1となった。二方向加振を行ったケースでは∞の字加振（ケース5）の副軸の到達率が1.5程度と他のケースより大きくなるのが分かった。

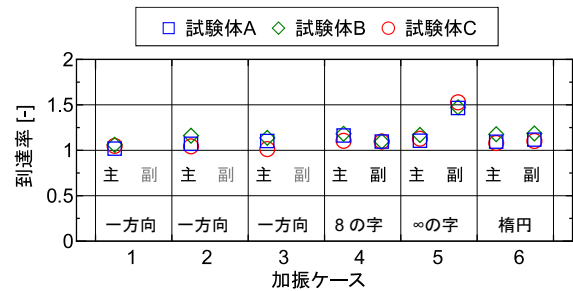


図4 クリープ変形の到達率

2.5 単位体積仕事率

LRBの風荷重に対する健全性は、単位鉛プラグ体積当たりの仕事率に基づいて評価される。表2にLRBの健全性評価基準を示す。各実験ケースの単位体積仕事率を図5に示す。荷重が大きく加振周期が短いケース3、シングルプラグである試験体5の仕事率が使用限界を超え、最も大きくなった。二方向加振（ケース4~6）はケースにより異なるが、仕事率はケース3より小さく、健全性の高い評価となった。全てのケースで、シングルプラグよりマルチプラグの仕事率が小さい結果となった。

表2 健全性評価基準

判定基準	単位体積仕事率 [N/(mm ² ・s)]
使用限界	1.0 以下
安定範囲	0.4 以下

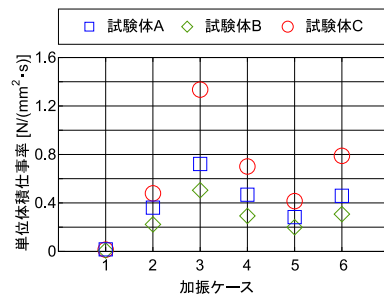


図5 LRBの単位体積仕事率（実験）

3. シミュレーション解析

3.1 解析モデル

LRBのクリープ特性を考慮するため、図6に示す粘弾性モデルを用いる。ゴム部分の復元力を示す弾性ばね(MSS)、鉛プラグ部分の復元力を示す弾塑性ばね(MSS)、クリープ変形を表現するためのダッシュポットからなる。このモデルは、石井ら³⁾により提案された粘弾性モデルを水平二方向に拡張したものである。ダッシュポットの減衰係数は、バイリニア型とし、初期勾配を $c_1 = 5 \times 10^8$ 、二次勾配を $c_2 = 3 \times 10^7$ とする。折れ点はLRBの切片荷重 Q_d とする。等方性を表現するため、MSSと同様に8本のダッシュポットを組み合わせるため、MSSと同様の剛性と荷重の修正係数を適用する。弾塑性ばねに熱・力学連成挙動を考慮するため、有限差分法⁴⁾(以下、FDM)と定熱流束解法⁵⁾(以下、CFS)の2種類を用いる。FDMはLRB内部の温度分布を詳細に解析する手法であり、CFSは簡易なモデルを用いる手法である。図7にFDMとCFSの熱伝導モデルを示す。

3.2 解析結果

解析結果を代表して、図8に試験体Cの楕円加振における荷重変形関係と変位オービットを示す。粘弾性モデルとしたことで、平均成分を持つ主軸方向にクリープ変形が生じた。また、サイクル数が増えるほど繰り返し加振により鉛プラグ温度の上昇により降伏荷重が低下し、変位振幅が増加した。FDMとCFSの結果はおおむね一致している。実験結果の定量的な再現性には課題が残るが、クリープ変形や振幅増大などの傾向が表現されている。

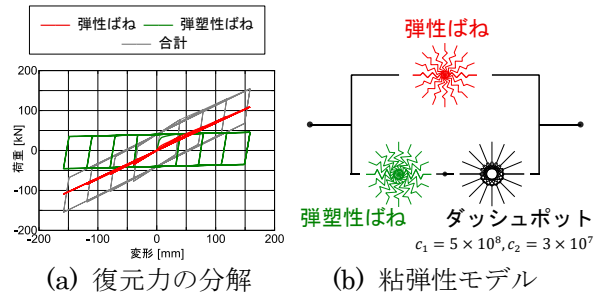


図6 LRBの粘弾性力学モデル

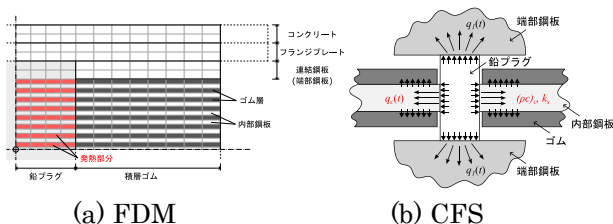


図7 熱伝導モデル

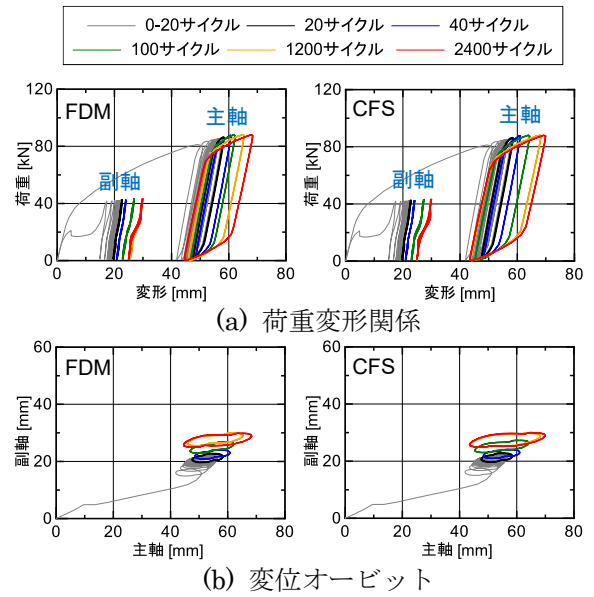


図8 シミュレーション解析結果(楕円加振)

4. 風応答解析

4.1 解析モデル

解析建物は35階建基礎免震建物とし、免震部材は一辺1500mm、プラグ径185mm×4本の角形LRB15基、低摩擦弾性すべり支承(以下、SSR)25基とした。図9に示すような上部構造を串団子モデルとし免震層を縮約しない擬似立体モデルとした。上部構造は線形で、水平二方向(X, Y)とねじれ方向(RZ)に自由度を持つ。上部構造は、免震層固定時の1次モードに対して2%の剛性比例型とする。解析ケースを表3に示す。LRBは粘弾性モデルと地震応答用モデルを用い、熱伝導解析は非考慮、FDM、CFSの3種類とする。入力風洞実験に基づく500年再現期間の風力波形とし、入力1倍と2倍のケースを設定する。X、Y、RZの三方向同時入力とし。継続時間は約3300秒である。

表3 風応答解析ケース

ケース	力学モデル	熱モデル	荷重倍率
1	地震応答用モデル	非考慮	x1, x2
2	粘弾性モデル	非考慮	x1, x2
3	粘弾性モデル	FDM	x1, x2
4	粘弾性モデル	CFS	x1, x2

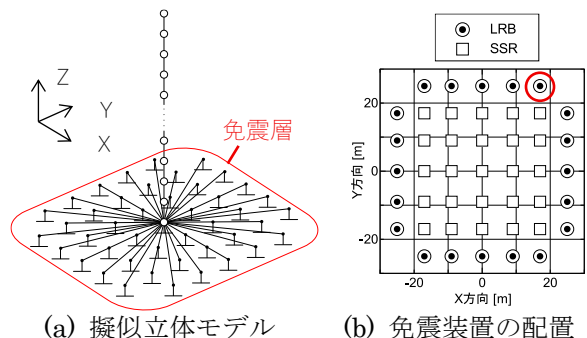


図9 35階建免震建物モデル

4.2 風応答解析結果

図 10 に LRB の荷重変形関係と最大応答値を示す。粘弾性モデルは平均成分を有する Y 方向荷重に対してクリープ変形が生じ、変形が大きくなった。地震応答用モデルはクリープ変形を考慮しないため粘弾性モデルより変形が小さい。粘弾性モデルの場合、免震層の回転角は大きくなったが、高層部にかけて回転角の増大が小さくなった。

図 11 に各解析ケースに対する LRB の単位体積仕事率を示す。入力風荷重を 2 倍にした場合でも仕事率は $0.04 \text{ N}/(\text{mm}^2 \cdot \text{s})$ 以下であり、表 2 の健全性評価基準の安定範囲に十分に収まっている。地震応答用モデルの結果と比較すると粘弾性モデルの仕事率は大きく、安全側の評価を与える。

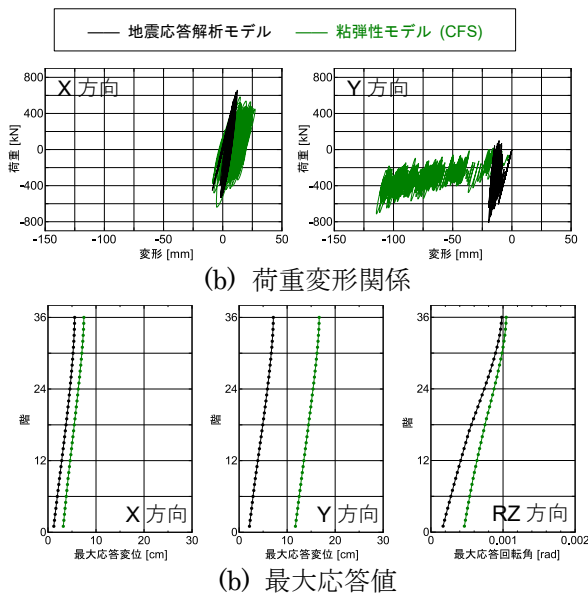


図 10 風応答解析結果

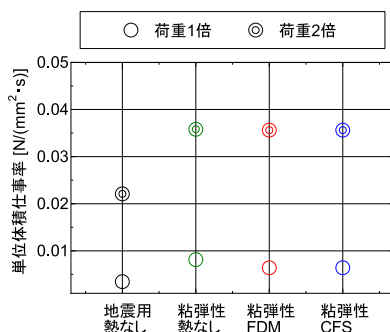


図 11 LRB の単位体積仕事率 (風応答解析)

5. 粘弾性モデルを用いた地震応答解析

風応答解析に用いた建物モデルと LRB の粘弾性モデルを用いて地震応答解析を行う。比較のため、地震応答解析用の復元力モデルでも解析を行う。入力波は長周期地震動である CH1 とする。

地震応答解析結果として図 12 に荷重変形関係、最大応答変位、最大応答加速度を示す。粘弾性モデルは地震応答解析モデルと同じように鉛プラグの発熱による降伏荷重の低下を表現している。また、最大応答値は両モデルで概ね一致しており、粘弾性モデルが免震建物の地震応答に与える影響は限定的であることが分かった。

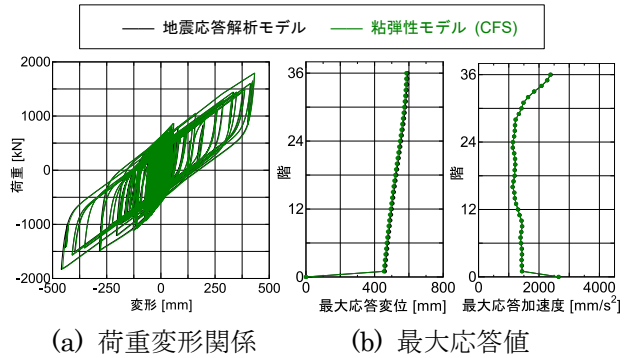


図 12 地震応答解析結果

6. まとめ

本研究では LRB の水平二方向風荷重加振実験から力学特性の分析を行った。また、粘弾性モデルを用いた風応答解析および地震応答解析を行った。その結果、一方向加振とは異なるクリープ特性を示すことが分かった。マルチプラグ LRB は、風荷重条件下においても鉛プラグ温度の上昇を抑制できることが確認できた。粘弾性モデルはクリープ特性と鉛プラグの発熱の定性的な再現が可能である。免震建物の風応答解析から、粘弾性モデルはクリープ変形を考慮できることを確認した。同様の粘弾性モデルを地震応答解析に適用しても地震応答用の復元力モデルと同等の結果が得られることが確認できた。

参考文献

- 1) 鈴木雅靖ほか: 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) 竹中康雄ほか: 鉛プラグ入り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簡易評価法, 日本建築学会構造系論文集, No.561, pp.69-94, 2002.11
- 3) 石井建ほか: 角形鉛プラグ入り積層ゴムの風荷重加振実験 (その 3), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿), 構造 II, pp.611-612 2023.9
- 4) 黒嶋洋平ほか: 鉛プラグ入り積層ゴムの熱・力学連成挙動を考慮した免震建物の地震応答解析, 構造工学論文集, Vol.63B, pp.231-239, 2017.3
- 5) Ioannis V. Kalpakidis and Michael C. Constantinou: Effects of Heating on the Behavior of Lead-Rubber Bearings. I: Theory, Journal of Structural Engineering, pp.1440-1449, 2009.1