

加力治具を用いた天然ゴム系積層ゴム及び弾性すべり支承の 圧縮変形挙動（クリープ）比較検証

Creep Test and Comparative Verification of Natural Rubber Bearings and Elastic Sliding Bearings Subjected to Compressive Load by Hydraulic Jacks and Frames

土屋 諒 恭
Ryosuke TSUCHIYA

三須 基 規
Motoki MISU

小林 公 樹
Hiroki KOBAYASHI

加藤 直 樹
Naoki KATO

免震構造に用いられる天然ゴム系積層ゴム等の免震部材は、主に水平方向性能の経年変化に関する研究が進んでいる。しかし免震部材の大型化に伴う検証や、ゴム総厚さが薄い弾性すべり支承の圧縮変形挙動（クリープ）に関する研究は少ない。そこでFEM解析を基に剛性が高く十分な測定精度が得られる加力治具を設計・製作して、積層ゴムや弾性すべり支承に圧縮荷重を与えて製品形状や気温がクリープに与える影響を検証した。その結果ゴムの熱膨張・収縮による変化を除いた長期的なクリープは小さかったので、実大サイズでも縮小試験体等による先行研究と同様の挙動を示すと推定された。

Seismic isolation products such as natural rubber bearing have been researched mainly on aged deterioration in horizontal performance. However, there are few studies on the verification of large-sized seismic isolation products and on vertical creep of elastic sliding bearings. Therefore, based on FEM analysis, we designed and manufactured a loading frame with high rigidity and sufficient measurement accuracy, and applied a compressive load to verify the effects of product shape and temperature on creep. As a result, long-term creep was small although changes due to thermal expansion and contraction of rubber occurred.

1. はじめに

免震構造には建物重量を支持しながら水平方向の地震動を許容できる積層ゴム等の支承材と呼ばれる製品が必要である。開発期には昭和電線製天然ゴム系積層ゴムφ500mmの圧縮破壊試験等が実施され、十分な安全性が確認されている^{1), 2)}。また同仕様の積層ゴムφ500mmに油圧ジャッキによる加力治具で面圧20N/mm²相当の荷重を20年以上与えて圧縮変形挙動（クリープ）を測定し、その変化は約0.5mmと小さいこと、気温変化によるゴムの膨張・収縮、形状係数の影響等が報告されている^{3), 4)}。一般に免震建物の地震時最大水平変形量（ゴムとしてのせん断変形）は数百mmで、鉛直変形量（ゴムとしての圧縮変形）は数mm程度なので、その変化が地震時の建物応答に与える影響は殆ど無いと考えられている。実際に積層ゴムφ500mmを用いた免震建物のクリープ量を測定したところ33年間で約2.4mm（クリープひずみ2.4%）との事例もある⁵⁾。また積層ゴムよりもゴム総厚さが薄い弾性すべり支承は圧縮変形を測定できる高精度の測定器が必要になる。そのためか従来は免震部材の経年変化は水平方向性能の検証⁶⁾が中心で、弾性すべり支承のクリープ測定結果が過去に報告され

た事例は殆ど見当たらない。

しかし近年は免震部材の大型化が進み、積層ゴムは様々な検証をφ800mmの実大サイズで実施するようになった。また大容量の油圧部品や高精度の測定器も入手できるようになった。

そこで従来よりもゴム直径が大きい実大サイズの積層ゴムφ800mm用の加力治具を設計・製作して、圧縮荷重を与えたときの圧縮変形変化量を測定する。また弾性すべり支承φ500mmも同様に圧縮変形変化量を測定して、ゴム直径やゴム総厚さやすべり材の有無、気温によるゴムの膨張・収縮が与える影響等を先行研究と比較できるようにする。

なお本論文は過去の経緯から積層ゴム→弾性すべり支承の順で述べているが、準備の都合等により実際の測定は弾性すべり支承⁷⁾→積層ゴムの順で実施している。

2. 試験体・測定方法

2.1 試験体仕様

先行研究に対する今回の試験体の位置づけを表1、仕様を表2～表3に示す。積層ゴムは先行研究よりゴム直径等が大きいφ800mmとしたが、先行事例の無い弾性すべり

支承はφ 500 mmとして、すべり材を『高摩擦』『中摩擦』の2種類にした。前者の材料は充てん剤入り PTFE で、より摩擦係数や面圧を高めたものである。後者の材質は純 PTFE で、一般に線膨張係数は $13.5 \times 10^{-5} [1/^\circ\text{C}]$ と前者 ($5.9 \times 10^{-5} [1/^\circ\text{C}]$) : いずれも $-30 \sim +30^\circ\text{C}$ の2倍以上なので、より熱膨張・収縮しやすいと推定される⁸⁾。

表 1 先行研究に対する今回の試験体の位置づけ

製品分類	ゴム直径 [mm]	形状係数		備考	
		S ₁	S ₂		
先行研究	積層ゴム	φ 300	31.7	5.1	開発時からの試験体
		φ 500	33.3	5.1	圧縮限界試験実施済み クリープ長期測定中 ^{3), 4)}
		φ 800	31.7	5.1	FEM 解析による加力治具 強度確認も実施 (図 3)
本書	弾性すべり 支承	φ 500	23.8	16.7	すべり材は 2 種類 (表 3)

表 2 積層ゴム試験体仕様と数量

ゴムのせん断弾性率 [N/mm ²]	ゴム形状		鉛直方向		数量
	直径 [mm]	厚さ×層数=総厚 [mm]	基準 面圧 [N/mm ²]	荷重 [kN]	
0.39	φ 800	6 × 26 = 156	15	7520	2

表 3 弾性すべり支承試験体仕様と数量

ゴムの せん断 弾性率 [N/mm ²]	ゴム形状 直径 厚さ×層数 =総厚 [mm]	すべり材		直径 ×厚さ [mm]	鉛直方向		数量
		材質	摩擦 係数*		基準 面圧 [N/mm ²]	荷重 [kN]	
0.78	φ 500	充填剤 入り PTFE	0.094	φ 500 × 4	20	3920	1
	5 × 6 = 30	PTFE	0.081		15	2940	1

*摩擦係数は速度 400 mm/s 時の基準値

2.2 加力治具の設計・製作

積層ゴム用加力治具仕様を表 4、概略形状を図 1 に示す。加力治具は下プレート、土圧計、通しボルト、中プレート、積層ゴム、上プレートの順番に組み立ててから六角ナットで上下プレートを固定後、土圧計で積層ゴムを建物設置時に準じる基準面圧時荷重 7520 kN で圧縮する構造である。

プレートの形状・強度検証には FEM 解析を用いた。その結果の一部を図 3 に示す。応力解析ソルバーは ANSYS 社の ANSYS Mechanical を用い、以下の条件で最大応力と最大たわみを算出した。形状は全体の対称性から 16 分割要素とした。境界条件はプレートと積層ゴムの接触面を詳細な形状から φ 804 mm として面圧 15 N/mm² を与え、通しボルト・ナットのワッシャー部 φ 98 mm × 8 箇所を反力位置とした。このときワッシャー部分は位置固定の剛体としており、ワッシャー - プレート間の摩擦係数は 0.1 とした。これらの結果から、大荷重時でも各部の応力が SS400 鋼材の許容応力度⁹⁾ より小さくなるようにプレート厚さや形状等を決定した。積層ゴムは同じものを 2 体製造して重ねて同時に圧縮して圧縮変形変化量を n = 2 で測定

した。なお、概略形状を図 2 に示す弾性すべり支承用加力治具はすべり材接触面に実際の製品と同じステンレス製すべり板を追加した以外は同様の構造なので詳細は省略する。

表 4 加力治具仕様

	プレート		通しボルト		土圧計	重量	
	材質	許容応力度 ⁹⁾ [N/mm ²]	厚さ [mm]	材質	呼び	最大荷重 [kN]	[kg]
積層 ゴム	SS400	215	200	SCM435	M52	9000	6800
弾性 すべり 支承			100				

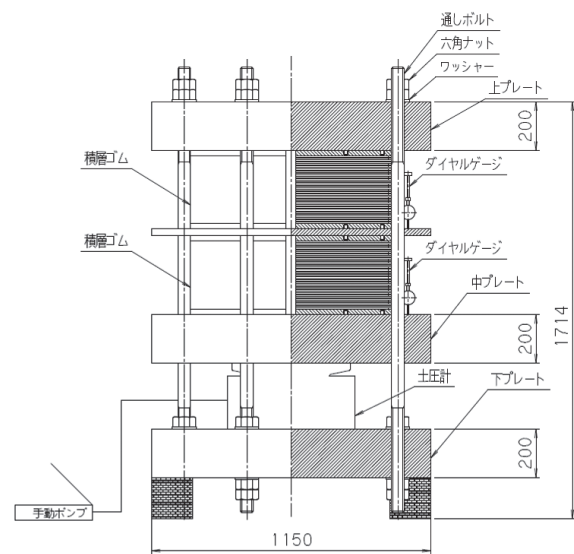


図 1 積層ゴム φ 800 mm 用加力治具の概略形状

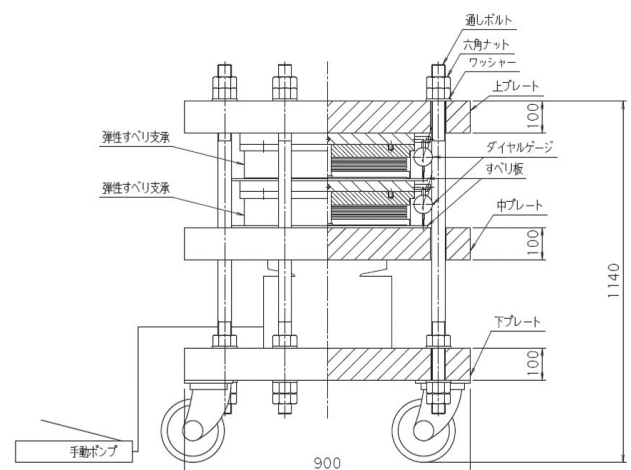


図 2 弾性すべり支承 φ 500 mm 用加力治具の概略形状

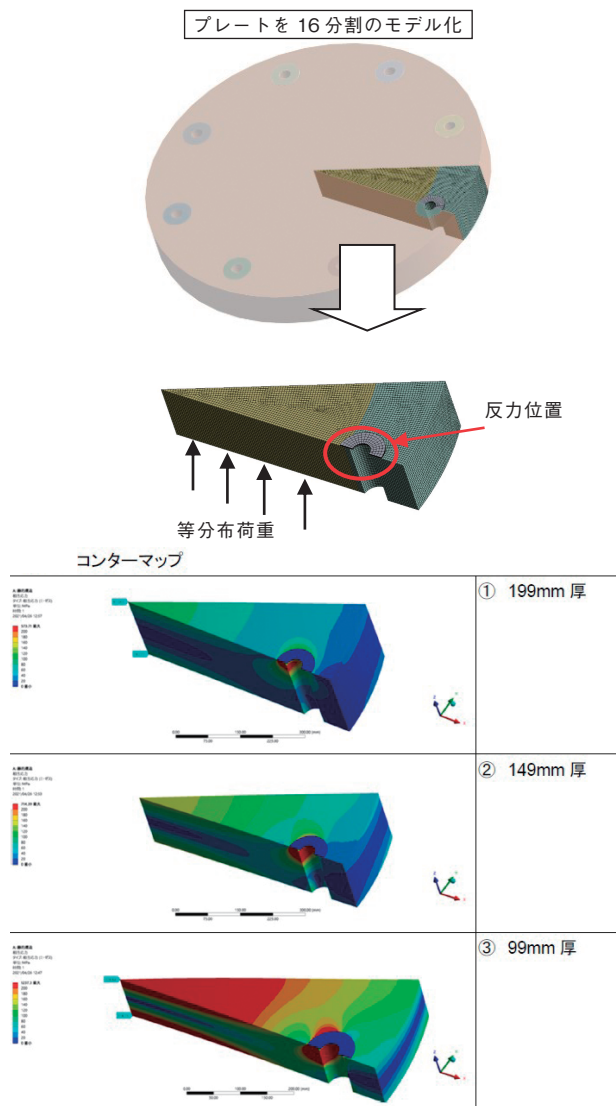


図3 FEM解析による上プレート厚さと応力分布の確認例
(赤：200 N/mm²以上，青：20 N/mm²以下)

2.3 加力治具の組み立てと測定手順

試験体は事前に高さ寸法等を測定して、その後の変化の基準値とした。積層ゴムは実際の製品と同様に保護ゴムを巻き、その上から免震部材の設置環境を模擬して直射日光を遮る発泡ポリエチレンシートを巻き付けた。積層ゴム用加力治具の外観を図4に示す。弾性すべり支承のゴム外周にも同様に発泡ポリエチレンシートを巻き付けた。ダイヤルゲージ(精度0.001 mm)はゴム外周の直交4か所に設置して、図5に示す無荷重時で一度ゼロ調整することで圧縮変形状態の確認ができるようにした。ダイヤルゲージは試験体の高さが低くなる方向を正として積層ゴムではマグネットスタンドで固定した。弾性すべり支承は試験体高さが低いと市販のマグネットスタンドがプレート間に入らないこと、僅かなガタが測定値に影響を与えることからダイヤルゲージは専用治具と六角ナット等で固定した。

次に油圧ポンプで土圧計を操作して圧縮荷重を与えた。測定場所は当社相模原事業所の非空調空間で、気温変化に

伴うゴムの熱膨張や収縮により荷重が変動するため定期的に手動ジャッキを操作して、目標荷重に対して積層ゴムは±約50 kN、弾性すべり支承は±約200 kNで調整した。両者の値が異なるのはゴム総厚が薄く鉛直剛性の高い弾性すべり支承の方が熱膨張・収縮による荷重変化が大きいためである。

目標荷重到達後のダイヤルゲージは4か所とも同様の値を示しており、中プレートは傾斜せず試験体を均等に圧縮できていることを確認した。直後にゼロ調整して、その後圧縮変形変化量を計測した。ゴムの圧縮変形変化量は経過時間に対して自然対数的に変化すると予想されたため測定間隔は初日のみ細かく、2日目以降は気温によるゴムの体積変化が最も小さいと考えられる早朝を基本とした。

温度計は試験体の近くに設置して、測定場所から最も近い気象台『海老名』¹⁰⁾と比較した。

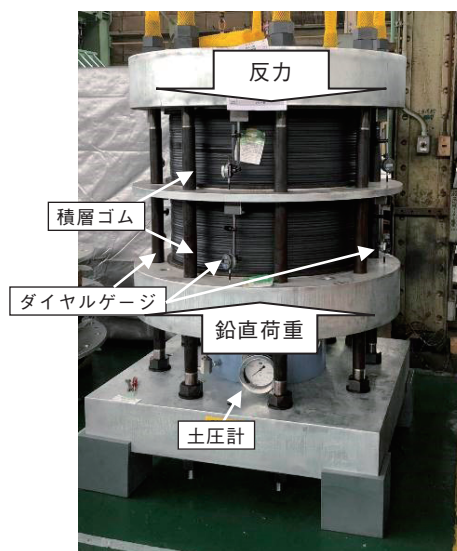


図4 加力治具組立後の測定状態
(積層ゴムの場合)

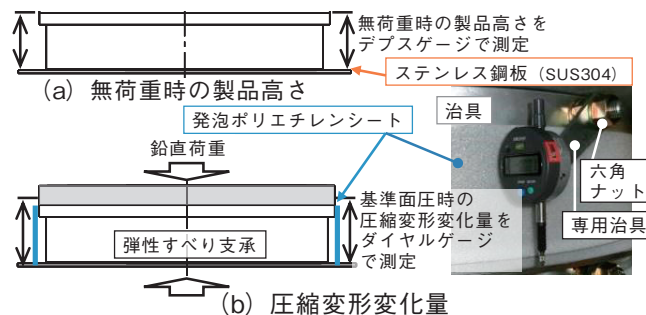


図5 無荷重時の製品高さや圧縮変形変化量の測定方法
(弾性すべり支承の場合)

3. 測定結果

3.1 積層ゴムの約 1000 時間圧縮変形変化量

積層ゴムの約 1000 時間経過後の圧縮変形変化量測定結果を図 6 に示す。まだ測定データは短いですが、当初予想された対数的な変化というより気温の増減に応じて変化していた。但し気温による影響を精度よく除くためには 1 年以上の測定データが必要と考えられる¹¹⁾。その詳細は次節で述べる。

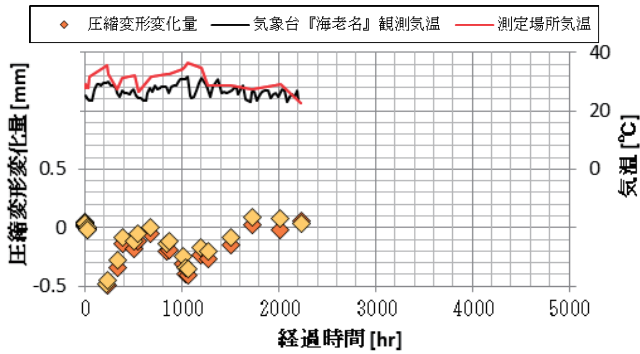


図 6 積層ゴムφ 800 mm の圧縮変形変化量測定結果

3.2 弾性すべり支承の 10000 時間以上圧縮変形変化量

弾性すべり支承の約 10000 時間以上経過後の圧縮変形変化量測定結果を図 7 に示す。

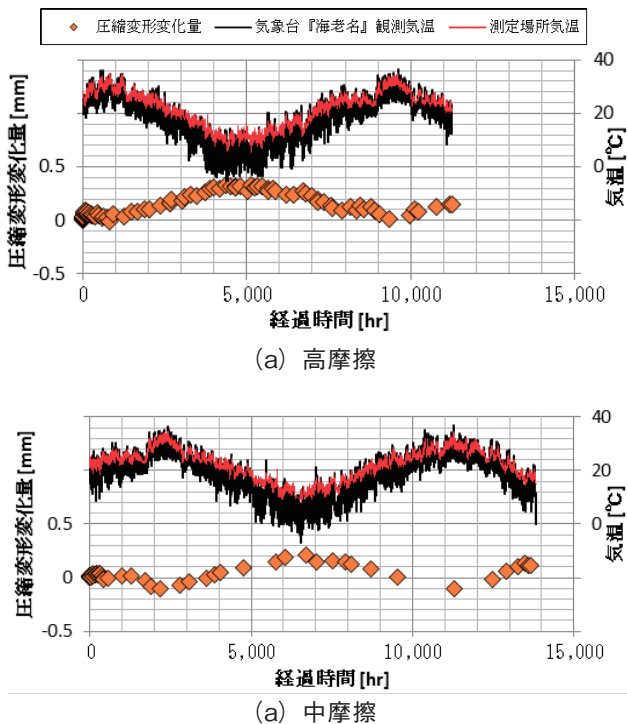


図 7 弾性すべり支承φ 500 mm 圧縮変形変化量測定結果

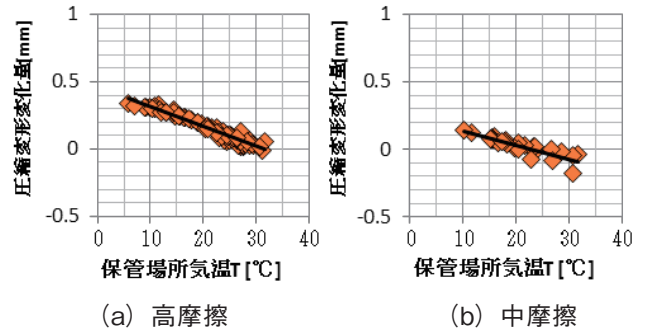


図 8 圧縮変形変化量と測定場所気温の関係

$$\text{高摩擦の } \gamma_{20^\circ\text{C}} = \frac{\{(y - y_0) + 0.0149T - 0.298\}}{n \cdot t_r} \quad (1)$$

$$\text{中摩擦の } \gamma_{20^\circ\text{C}} = \frac{\{(y - y_0) + 0.0103T - 0.206\}}{n \cdot t_r} \quad (2)$$

但し $\gamma_{20^\circ\text{C}}$: クリープひずみ 20°C 補正值

$y - y_0$: 圧縮変形変化量 [mm]

T : 測定場所気温 [°C]

$n \cdot t_r$: ゴム総厚 (ここでは 30 : 表 3) [mm]

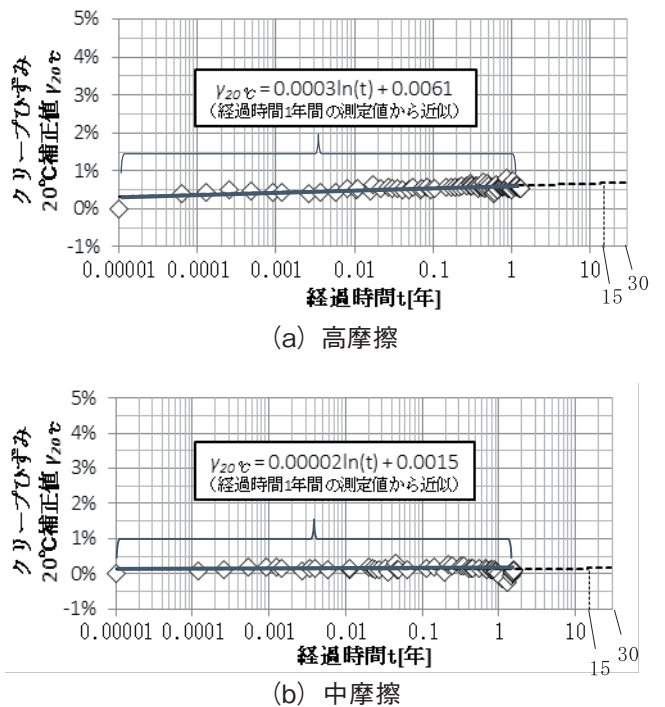


図 9 クリープひずみ 20°C 補正值

こちらも同様に圧縮変形変化量は、気象台観測値よりも変化が小さい測定場所気温に応じて変化した。これをゴムとすべり材の熱膨張・収縮と考えて最小二乗法 (図 8 黒色直線) で補正後にゴム総厚で除したクリープひずみ 20°C 補正值を式 (1)、式 (2)、図 9 に示す。

熱膨張・収縮の影響を除くとクリープひずみは小さく、外挿（図9 黒色破線）結果から10～30年経過しても1%未満と予測される。これは文献3等に示す先行研究と同様の傾向であった。一般にゴムは時間経過に従って酸化劣化が進行するが、積層ゴム、弾性すべり支承ともゴムの受圧面積に対して空気に触れる表面積の割合が少ない。そのため、この後の変化も小さいと推定される。

4. 結 論

実大サイズの免震部材の圧縮変形挙動（クリープ）を測定するため、FEM解析で剛性が高く十分な測定精度が得られる加力治具を設計・製作し、天然ゴム系積層ゴムφ800mm及び弾性すべり支承φ500mmに荷重を与えて圧縮変形の変化を測定した。圧縮直後からの変化をクリープ量とすると、積層ゴムも弾性すべり支承も先行研究と同様に気温変化に伴い増減した。

そこで測定データが多い弾性すべり支承の結果からゴムとすべり材の熱膨張・収縮の影響を除くと、時間経過によるクリープ量は極めて小さく、厚さに対する変化率のひずみに換算すると1%以下と推定された。先行研究での積層ゴムのクリープひずみは33年間で約2.4%⁹⁾であることから、同等のクリープ特性と考えられる。

積層ゴムφ800mmも同様の挙動を示すと考えられるので、ゴム形状やすべり材の有無が免震部材の圧縮変形挙動に大きな影響を与えないと推定できるように、今後も測定を実施して今回の検証を継続確認する予定である。

参 考 文 献

- 1) 福岡大学工学部建築学科多田研究室, 免震構造の実験的研究(1995)
- 2) 高山峯夫, 他:天然ゴム系積層ゴムアイソレータの圧縮限界耐力, 日本建築学会構造系論文集, 第482号, pp.43-51 (1996)
- 3) 森田慶子, 他:天然ゴム系積層ゴムの経年変化に関する研究(その2) クリープ特性について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅱ, pp.399-400 (2010)
- 4) 森田慶子, 他:免震構造用天然ゴム系積層ゴムアイソレータのクリープ実験, 日本建築学会九州支部研究報告, 第56号, pp.165-168 (2017)
- 5) 山上聡, 他:実建物で供用している積層ゴムの経年変化, 奥村組技術研究年報, No.46, pp.79-83 (2020)
- 6) 三須基規, 他:竣工後30年経過した免震建物と天然ゴム系積層ゴムの性能検証, 昭和電線レビュー, Vol.64, pp.13-17 (2018)
- 7) 土屋諒恭, 他:基準面圧時における弾性すべり支承のクリープ特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅱ, pp.711-712 (2020)
- 8) 社団法人日本ゴム協会免震ゴム利用技術特別委員会:免震用積層ゴムの利用技術に関する研究報告書(1992)
- 9) 日本建築学会:鋼構造許容応力度設計規準(2019)
- 10) 国土交通省気象庁 HP
- 11) 浜辺千佐子, 他:免震装置変位のリアルタイム遠隔監視システムの開発 その5.システムによる長期計測結果概要と積層ゴム支承の経年変化に関する分析(続報), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅱ, pp.917-918 (2018)

昭和電線ケーブルシステム(株)
土屋 諒恭 (つちや りょうすけ)
免震制振部 技術課
免震部材の設計・開発に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)
三須 基規 (みす もとき)
免震制振部 技術課
免震部材の設計・開発に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)
小林 公樹 (こばやし ひろき)
技術開発センター 分析・評価課
計算機を用いたシミュレーション業務に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)
加藤 直樹 (かとう なおき)
免震制振部 部長