

天然ゴム系積層ゴムアイソレータのスケール効果と各種依存性

東京工業大学 小林 真帆

1. はじめに

近年、免震建物の高層化とともに免震部材の大型化が進んでおり、天然ゴム系積層ゴムについては、ゴム直径 $\phi 500 \sim 1800 \text{mm}$ の部材が実用に供している。一方、天然ゴム系積層ゴムの水平性能に関する既往の実験¹⁾⁻⁵⁾などでは、 $\phi 1000 \text{mm}$ 以上や、風荷重に対して想定されるせん断ひずみ10%以下の微小振幅領域を取り扱った実験がほとんど行われていない(図1)。

本研究では、2023年に竣工したE-Isolationを活用し、天然ゴム系積層ゴムの水平載荷実験を行い、微小振幅領域を含めた復元力特性を確認する。また、 $\phi 650$, $\phi 1100$, $\phi 1200$ の実大試験体と $\phi 300$ の縮小試験体の実験結果を比較し、各種依存性や終局特性に対して寸法の違いが及ぼす影響を検討する。なお、本論文では、せん断ひずみとして10%以下を微小振幅、10%~100%を小振幅、100%~200%を中振幅、200%以上を大振幅とする。

2. 実験計画

2.1 試験体の詳細

試験体の一覧と実験パラメータを表1に示す。試験体は、天然ゴム系積層ゴムであり、 $\phi 300$, $\phi 650$ を1体ずつ、 $\phi 1100$, $\phi 1200$ を2体ずつ、計6体を用意した。形状係数は表1に示す通り試験体ごとにそれぞれ異なる。試験体名称は、ゴム直径、二次形状係数の順に区別できるように設定している。

2.2 実験装置とパラメータ

実験装置を図2に示す。 $\phi 300-5.1$, $\phi 650-5.1$ では、微小振幅領域における繊細な制御を行うために図(a)に示す小型免震部材用実験装置を用い、 $\phi 1100-5.1$, $\phi 1100-4.37$, $\phi 1200-4.84$, $\phi 1200-6$ では図(b)に示すE-Isolationを用いて実験を行った。なお、 $\phi 300-5.1$ についてはE-Isolationでも実験を実施している。試験体のセットアップおよび計測計画の詳細は既往文献⁶⁾⁻⁸⁾を参照されたい。

実験パラメータは振幅 γ と面圧 σ である。ただし、E-Isolationでの実験における振幅は正弦波として与え、最大速度 v を1.5, 15, 25, 50kineの4段階に変化させている。E-Isolationでは、ゴム直径が大きい試験体に対しても基準面圧を超える面圧を付与した状態で水平方向の載荷を行うことが可能である。したがって、積層ゴムの振幅および面圧依存性を広く検討するため、図3に示す限界性能曲線を用いてパラメータを決定する。図の縦軸は面圧 σ

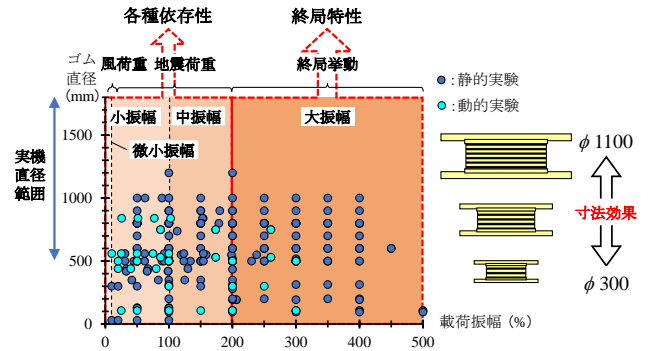


図1 天然ゴム系積層ゴムに関する既往実験の分布

表1 試験体の一覧と実験パラメータ

試験体	$\phi 300-5.1$	$\phi 650-5.1$	$\phi 1100-5.1$	$\phi 1100-4.37$	$\phi 1200-4.84$	$\phi 1200-6$
ゴム直径	300	650	1100	1100	1200	1200
中心孔径 [mm]	-	-	-	55	-	-
金ゴム層厚 [mm]	58.5	127.4	215.8	251.6	248	200
一次形状係数	33.3	33	35.3	35.8	35.8	35.8
二次形状係数	5.1	5.1	4.37	4.84	6	6
基準面圧 [MPa]	15	15	11.2	13.1	15	15
せん断弾性係数 [N/mm ²]	0.39					
鉛直剛性 [$\times 10^3 \text{kN/m}$]	1430	3060	5170	3600	4370	5420
水平剛性 [$\times 10^3 \text{kN/m}$]	0.47	1.02	1.73	1.48	1.78	2.21
総高さ [mm]	180	251.4	442.5	472.8	460	385.6
微小振幅 ($\gamma \leq 10\%$)	○	○	○	○	○	○
小振幅 ($10\% < \gamma \leq 100\%$)	○	○	○	○	○	○
中振幅 ($100\% < \gamma \leq 200\%$)	○	○	○	○	○	○
大振幅 ($200\% < \gamma$)	○	○	○	○	○	○

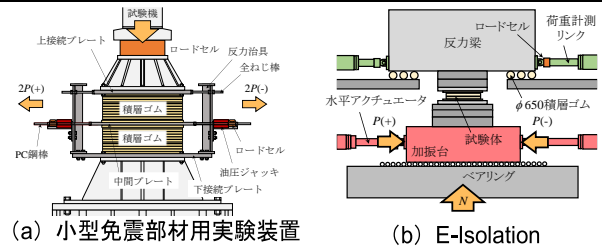


図2 実験装置の概要

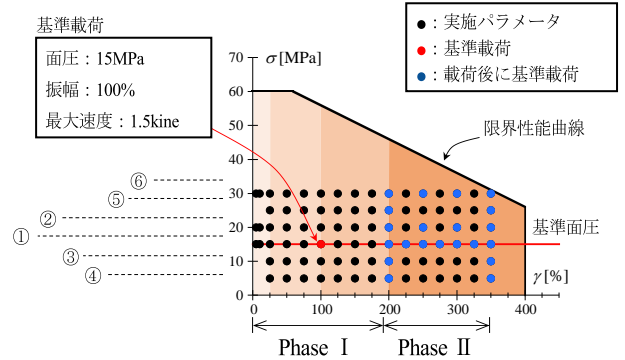


図3 振幅と面圧の組合せ

であり、横軸は振幅 γ である。限界性能曲線および基準面圧の一例をそれぞれ黒色と赤色の実線で示す。載荷は、まず面圧を基準面圧(図3中①)まで与えた状態で、 $0\% < \gamma \leq 200\%$ の範囲(以下、Phase I)の小さい振幅から順に与える(図中の●)。その後、面圧を図3中の②~⑥の順序で変化させ、それぞれの面圧下で同様に小さい振幅から順に与える。次いで、Phase IIとして $200\% < \gamma \leq 350\%$ の範囲で設定した振幅に対して、Phase Iと同様の順

序で振幅、面圧を変化させて载荷を行った。このとき、繰返し载荷による水平剛性の低下率を把握するため、図中の●で示すパラメータを実施した後に基準载荷（●）を行う。なお、基準载荷は基準面圧、振幅100%，最大速度1.5kineの条件で実施する。

3. 微小振幅領域から大振幅領域までの実験結果と考察

3.1 復元力特性

弾性領域における各種性能を把握するため、微小振幅領域から大振幅領域（振幅250%まで）の実験結果について考察する。実験から得られた復元力特性を図4(a)に示す。図の上段から振幅10%以下の微小振幅、振幅100%の小振幅、振幅200%の中振幅の結果を表している。図の縦軸は水平荷重 P であり、横軸は水平変形 δ_h である。復元力特性は、E-Isolationでの実験結果を黒色で、小型免震部材用実験装置での実験結果を青色で示している。図中には、最小二乗法による線形近似を用いて算出した水平剛性を破線で示している。また、図の右下には、水平剛性と線形近似に対する決定係数の値を示している。決定係数 R^2 が0.99以上であることから、縮小試験体と実大試験体ともに振幅10%以下の微小振幅から振幅200%の中振幅まで高い線形性を有することがわかる。ただし、縮小試験体の中振幅における履歴曲線（図4(a)3段目）は、小型免震部材用実験装置にて実験した場合に早期にハードニングが生じ、履歴曲線の面積が大きくなっている。これは、実験方法の違いや取付ボルト

径、フランジプレートの厚さの違いが影響しているものと考えられる。

3.2 水平剛性の振幅依存性

水平剛性の振幅依存性を図4(b)に示す。図の縦軸は水平剛性 K_h を振幅100%時の水平剛性 $K_{h(\gamma=100\%)}$ で除して基準化した値であり、横軸は振幅 γ である。実験結果は、二次形状係数が5.1の試験体を塗り潰しにて、それ以外を白抜きにて区別してプロットしている。振幅が大きくなるにつれて、水平剛性が低下する傾向にある。基準载荷時の水平剛性と比べて、振幅10%以下の微小振幅では最大約25%の上昇が、振幅250%の大振幅では最大約15%の低下が確認できる。つまり、微小振幅領域に比べ、大振幅領域における水平剛性の変化は小さいといえる。

3.3 水平剛性の面圧依存性

水平剛性の面圧依存性を図4(c)に示す。図の縦軸は水平剛性 K_h を面圧15MPa時の水平剛性 $K_{h(\sigma=15\text{MPa})}$ で除して基準化した値であり、横軸は面圧 σ である。いずれの振幅においても、面圧が高くなるにつれて水平剛性が低下する傾向にある。また、2.5MPa時に対する30MPa時の水平剛性の低下率は、微小振幅領域では約56%であるのに対して、中・大振幅では約34%となっている。つまり、微小振幅領域に比べ、中・大振幅領域における水平剛性に対する面圧の影響は小さいといえる。

3.4 水平剛性の速度依存性

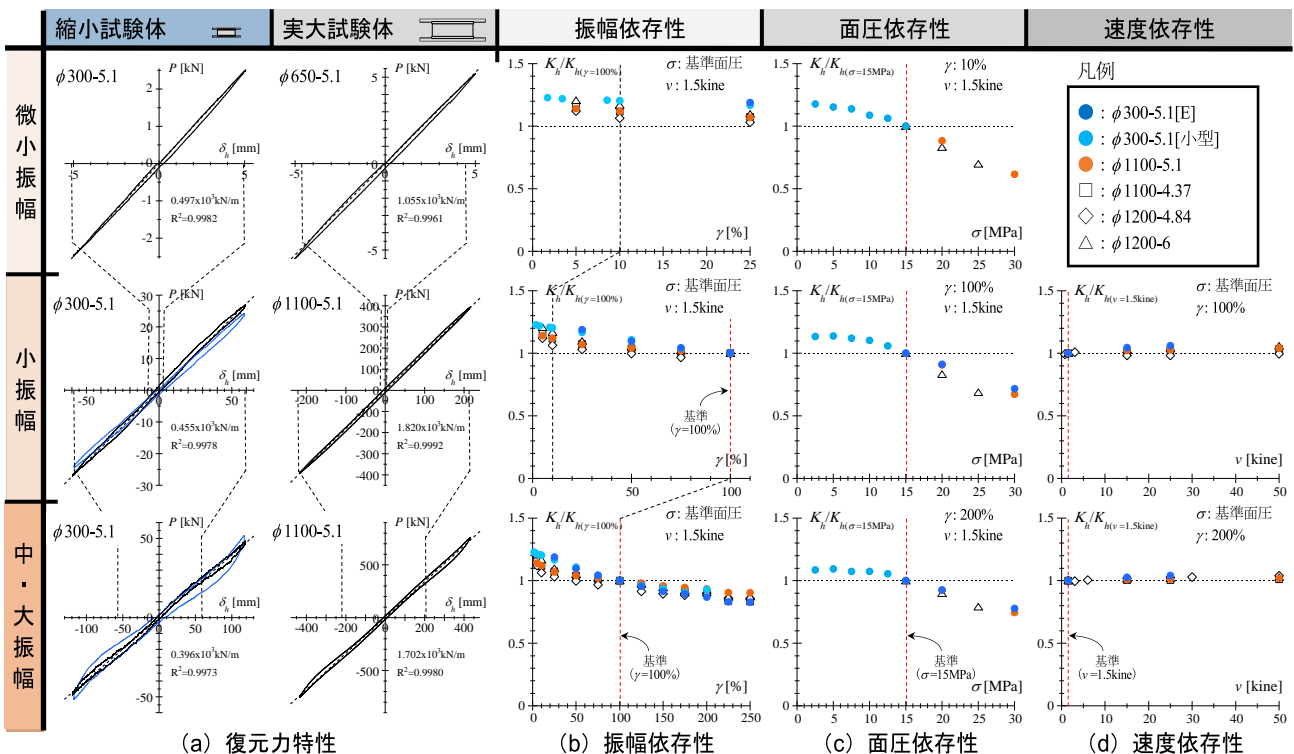


図4 微小振幅から中・大振幅領域までの復元力特性と各種依存性

水平剛性の速度依存性を図4(d)に示す。図の縦軸は水平剛性 K_h を最大速度1.5 $kine$ 時の水平剛性 $K_{h(v=1.5kine)}$ で除して基準化した値であり、横軸は最大速度 v である。小振幅、中・大振幅において、基準載荷時の水平剛性に対する上昇率は最大で約5%に収まっている。したがって、速度の影響は振幅や面圧に比べると小さいといえる。

最後に、各種依存性を示した図4(b)~(d)にてゴム直径の違いを考察する。いずれの依存性についても、二次形状係数が5.1と等しい試験体 (ϕ 300-5.1, ϕ 1100-5.1) はほぼ同様の結果を示している。すなわち、同じ形状係数を有する場合、水平剛性の各種依存性に対する寸法の違いによる影響は小さいといえる。

4. 大振幅領域の実験結果と考察

4.1 繰返し載荷による水平剛性の低下

大振幅領域の実験結果について考察する。基準載荷における水平剛性の推移を図5に示す。図の縦軸は基準載荷における水平剛性 K_h を初期の基準載荷時の水平剛性 $K_{h_{per}}$ で除して基準化した値であり、横軸は累積変形量 $\Sigma\gamma$ である。 ϕ 300-5.1の結果を●で、 ϕ 1100-5.1の結果を○で示す。いずれも累積変形量の増加に対して水平剛性がほぼ直線的に低下しており、累積変形量が損傷の指標となり得ることを示唆している。また、両試験体の低下の程度は概ね同様であることから、損傷の蓄積に対する寸法の違いによる影響は小さいといえる。

4.2 ハードニングにおける面圧と寸法の影響

面圧がハードニングに及ぼす影響を考察する。各面圧における包絡曲線の比較を図6(a)に示す。図の縦軸は水平荷重 P であり、横軸は振幅 γ である。面圧5~30MPaの結果を面圧の高い順に濃い色で示している。なお、前述した通り振幅200%以降のPhase IIでは、繰返し載荷による影響が大きい。そのため、Phase IIにて得られた履歴曲線は、荷重を各面圧の振幅200%時に対する水平剛性の低下率で割り戻している。面圧が増加するとともに水平荷重が低下しており、その傾向は高面圧になるほど

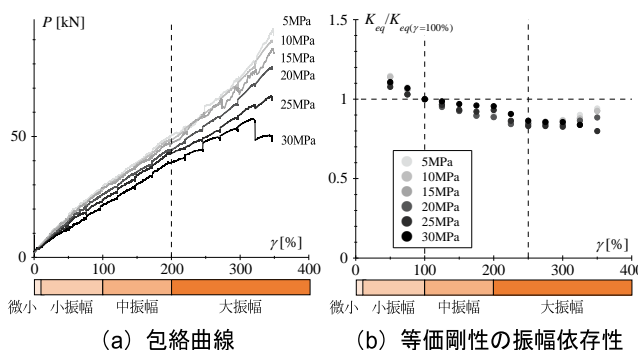


図6 面圧がハードニングに及ぼす影響

顕著になっている。

ここで、等価剛性の振幅依存性を図6(b)に示す。図の縦軸は等価剛性 K_{eq} を振幅100%時の等価剛性 $K_{eq(\gamma=100\%)}$ で除して基準化した値であり、横軸は振幅 g である。振幅250%までは3.2節で述べたように等価剛性は振幅に対してほぼ直線的に増減している。一方、振幅250%以上では等価剛性の上昇がみられ、その傾向は低面圧になるほど顕著である。これはハードニングによるものであり、ハードニングは振幅250%以上で表れるといえる。

次に、試験体の違いによる影響を考察する。形状係数が等しく、ゴム直径が異なる試験体の基準面圧下における包絡曲線の比較を図7(a)に示す。図の縦軸は水平荷重 P を振幅250%時の水平荷重 $P_{(\gamma=250\%)}$ で除して基準化した値であり、横軸は振幅 γ である。縮小試験体 ϕ 300-5.1と実大試験体 ϕ 1100-5.1の包絡曲線に大きな違いはみられない。ここで、振幅250%の割線剛性を K_1 、振幅250%から350%程度の割線剛性を K_2 とし、両者の比 K_2/K_1 を面圧 σ との関係として図7(b)に示す。本実験の結果を白抜きで、既往実験^{1)~5)}の結果を塗りつぶしで示している。既往実験と比較して本実験の K_2/K_1 は低くなっており、これは繰返し載荷の影響であると考えられる。したがって、ハードニング領域においては、それまでの累積変形量が影響するといえる。

4.3 高面圧・大振幅領域の復元力特性

次に、面圧5, 15, 25MPaにおける振幅350%時の復元力特性を図8(a)に示す。図の縦軸は水平荷重 P を振幅350%時の水平荷重 $P_{(\gamma=350\%)}$ で除して基準化

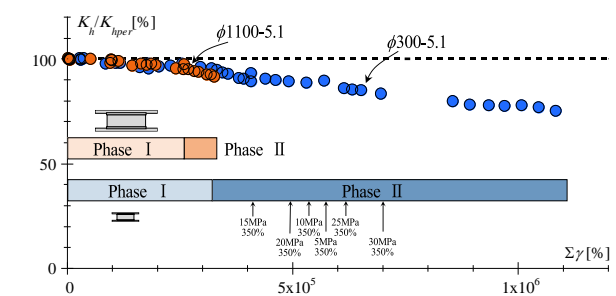


図5 基準載荷における水平剛性の推移

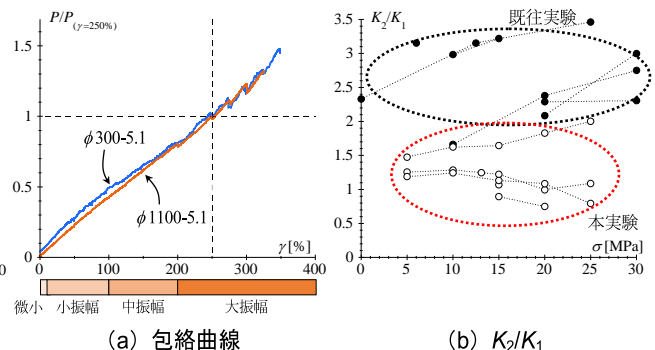


図7 既往実験との比較

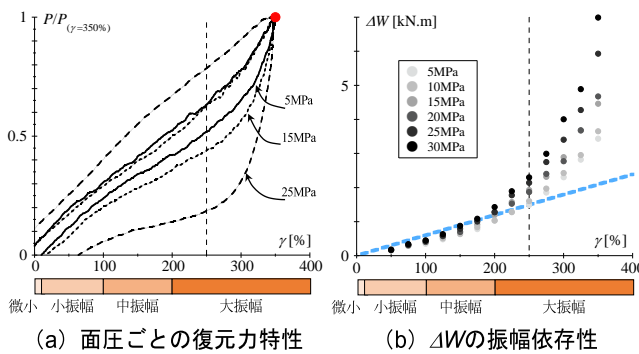


図8 高面圧・大振幅領域の復元力特性

した値であり、横軸は振幅 γ である。面圧が高くなるにつれて、履歴面積が大きくなっている。ここで、各振幅の1サイクルあたりの履歴吸収エネルギー ΔW の推移を図8(b)に示す。ほぼ線形弾性挙動を示す振幅250%程度以下では、振幅に対して ΔW は概ね比例的に増加している(図の青色破線)。一方、振幅250%程度以上では ΔW が急増しており、その傾向は高面圧になるほど顕著である。したがって、天然ゴム系積層ゴムはハードニング領域では高面圧になるほど荷重上昇は緩やかとなるが、履歴曲線は大きく膨らむ性質を有しているといえる。

4.4 大振幅領域のひずみ

最後に、各振幅における最大ひずみの推移を図9に示す。図9(a)の縦軸はフランジプレートのひずみ ε 、図9(b)の縦軸は取付ボルトのひずみから求めた軸力 P_B であり、横軸を振幅 γ である。フランジプレートのひずみは、両試験体とも振幅の増加とともに大きくなる傾向にあり、大きな違いはない。一方、ボルト軸力は、実大試験体 $\phi 1100-5.1$ では振幅350%時に約90kNが生じているのに対して、縮小試験体 $\phi 300-5.1$ では振幅350%までボルト軸力がほとんど生じていない。ここで、ゴム直径が異なる積層ゴムの寸法の比較を図10に示す。図の縦軸は $\phi 1100$ の部材寸法に対する比率であり、横軸はゴム直径である。図10より、縮小試験体では取付ボルトが実大試験体に比べて相対的に太くなっていることがわかる。したがって、取付ボルト径の違いにより、 $\phi 300-5.1$ の取付ボルトには導入張力以上の応力が生じなかったものと考えられる。

5. まとめ

本論文では、微小振幅領域から大振幅領域における天然ゴム系積層ゴムアイソレータの各種性能に及ぼす影響について検討した。水平剛性に対する振幅・面圧依存性は、大振幅領域に比べて微小振幅領域での増減が大きくなるが、振幅250%以上ではハードニングの影響が表れた。このハードニングによる荷重上昇は高面圧になるほど緩やかと

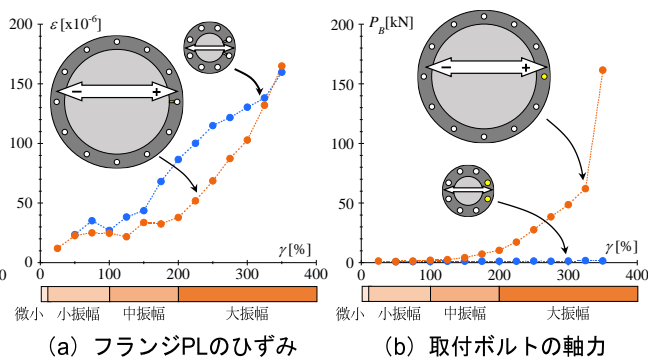


図9 ひずみの振幅依存性

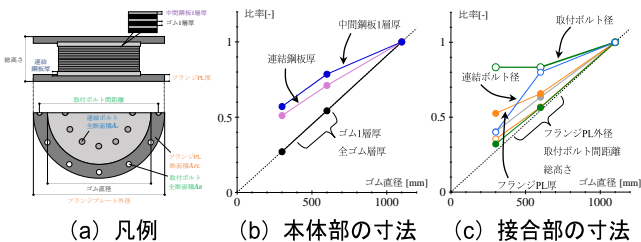


図10 ゴム直径が異なる積層ゴムの寸法の比較

なるが、履歴吸収エネルギーの増加は高面圧になるほど顕著であった。一方、縮小試験体と実大試験体における取付ボルト径の違いにより、ハードニング時には局所的な差異が生じた。縮小試験体と実大試験体は、取付ボルトなどの周辺部材や中間鋼板厚において寸法が比例していないため、積層ゴム本体部および接合部の部材寸法に着目した追加の検討が必要である。

【参考文献】

- 高山峯夫：免震構造用天然ゴム系積層ゴムアイソレータの限界性能，日本建築学会技術報告集，第1号，pp.160-165，1995.12
- 矢花修一，大島靖樹，平田和太，安井健治，松田泰治：積層ゴム免震要素の線形限界に関する検討（その1 線形限界の定義と試験方法），日本建築学会学術講演梗概集，pp.691-692，1996.9
- 安井健治，矢花修一，大島靖樹，平田和太，松田泰治：積層ゴム免震要素の線形限界に関する検討（その2 試験結果），日本建築学会学術講演梗概集，pp.693-694，1996.9
- 鈴木政美，瓜生満，高山峯夫：高面圧下における積層ゴムアイソレータの実大実験（その4 800 ϕ 積層ゴムの基本性能とその評価），日本建築学会学術講演梗概集，pp.703-704，1996.9
- 瓜生満，中山一彦，高山峯夫：高面圧下における積層ゴムアイソレータの実大実験（その5 800 ϕ 積層ゴムの限界性能とその評価），日本建築学会学術講演梗概集，pp.705-706，1996.9
- 小林真帆，酒井一至，黒澤未来，吉数祥一：E-Isolationを活用した天然ゴム系積層ゴムの実験研究，日本地震工学シンポジウム，Day2-G416-09，2023.11
- 小林真帆，酒井一至，黒澤未来，吉数祥一，東山孝治，味野朋裕：高鉛直荷重下の水平荷重測定において摩擦力と慣性力から解放された実大動的免震実験装置の開発と実現 その13：積層ゴムの微小変形下における挙動，日本建築学会学術講演梗概集，pp.521-522，2023.9
- 小林真帆，黒澤未来，吉数祥一：小振幅下における天然ゴム系積層ゴムの各種依存性，日本建築学会関東支部研究報告集，pp.489-492，2023.2