

天然ゴム系積層ゴムの加振速度が製品性能に与える影響の検証

Test to Confirm the Effect of Loading Velocity on Product Performance of Natural Rubber Bearing

三 須 基 規
Motoki MISU

土 屋 諒 恭
Ryosuke TSUCHIYA

清 水 美 雪
Miyuki SHIMIZU

高 山 峯 夫 *
Mineo TAKAYAMA

森 田 慶 子 *
Keiko MORITA

天然ゴム系積層ゴムは減衰が小さい材料を用いており、試験機容量の制約もあったため、これまで地震動より遅い変形速度（静的加振）で限界変形性能を確認していた。そこで、地震動に近い変形速度（動的加振）で大サイズ製品の水平剛性や限界変形を測定した結果、加振速度が天然ゴム系積層ゴムの製品性能に与える影響は小さいことを確認した。したがって静的加振による過去の検証方法は妥当であった。

Due to the low damping material properties and the limited capacity of test machines, the critical deformation performance of natural rubber bearing had been conducted mainly by static loading, which had slower velocity than seismic motions. This dynamic loading test showed that the effect of loading velocity on the product performance was small, and the past verification by static loading tests were considered valid.

1. は じ め に

免震構造用積層ゴムは、大きな鉛直荷重を支持しながら水平方向に大変形して建物を地震動から守る製品である。そのため製品性能の検証には、鉛直荷重と水平変形を同時に加振できる圧縮せん断試験機を用いる必要がある。

天然ゴムは減衰特性が小さいので、変形速度による特性の変化（速度依存性）も小さい。そのため、これまで天然ゴム系積層ゴムの限界変形等は、主に静的加振と呼ばれる地震動より遅い速度で確認していた¹⁾。地震動に近い速度の動的加振で製品性能を測定する際は、試験機の制約から直径φ 300 mm等の小さい製品を用いており²⁾、大サイズの積層ゴムを動的加振する場合は、海外の試験機関を使う必要があった³⁾。

2023年に大サイズの積層ゴムを動的加振できる試験機E-Isolationが⁴⁾、一般財団法人免震研究推進機構によって兵庫県三木市に整備された⁴⁾。そこで直径φ 1000 mmの天然ゴム系積層ゴムを複数用意して、加振速度が製品性能に与える影響を比較した⁵⁾。

2. 試 験 方 法

2.1 試験機

E-Isolationの建物外観と、反力梁と加振台間に試験体を取り付けた状態を図1、当社35 MN試験機との比較を表1に示す。加振台がリニアガイド上を水平に摺動して、試験



(a) 建物外観

(b) 試験体の取付け状態

図1 免震試験機 E-Isolation

表1 試験機の概要

		鉛直方向		水平方向		
		最大荷重 [kN]	最大速度 [mm/s]	最大荷重 [kN]	最大変位 [mm]	最大速度 [mm/s]
当社 35MN 試験機	静的	35,000	2	8,000	± 800	5
	動的	30,000	70	6,500	± 1,300	800

* 福岡大学

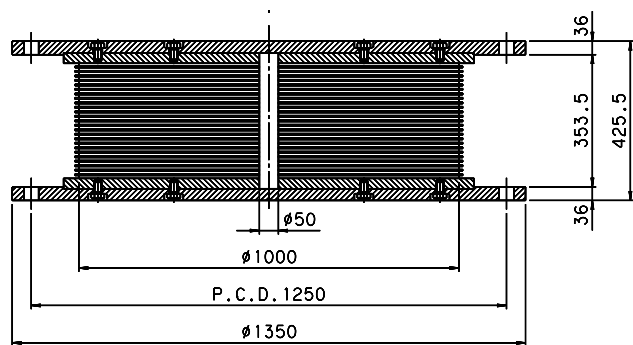


図2 試験体の形状

表2 試験体の仕様

ゴム材料	形状			出荷検査の加振条件		
	せん断 弾性率 [N/mm ²]	直径 × 厚さ [mm]	層数	形状 係数	基準面圧 [N/mm ²]	せん断 ひずみ γ 加振 速度 [mm/s]
0.39		φ1000 × 7.5	26	S ₁ =31.7 S ₂ = 5.1	15	±100% (せん断変形 = ±195mm) 5 三角波

体の下から圧縮せん断変形を与える構造である。水平荷重はアクチュエータ側のロードセルではなく反力梁から直接測定する。そのため慣性力やリニアガイドの摩擦力の影響を受けずに水平荷重を測定できる。

2.2 試験体

試験体の形状を図2、仕様を表2に示す。数量は2体として、名称は試験体S、試験体Dとした。

2.3 加振条件

加振条件の概略を表3に示す。試験体に2体とも同様の圧縮せん断変形を与えた後、せん断ひずみ±400%加振のみ加振速度と加振波形を変えて、両者を比較した。

正弦波加振は開始直後と終了直前に速度が最大になる。そこで所定のサイクルの前後に、プレラン及びポストランと呼ばれる予備加振を実施した。そのため最初に目標変位へ到達するのは、図3のとおり三角波加振は水平荷重と水平変位が正（水平荷重－変位関係の第1象限）の時、正弦波加振時は水平荷重と水平変位が負（第3象限）の時となる。

なお表3に記載した以外にも、E-Isolationの動作確認等により、弾性変形範囲を中心に複数回の加振を実施した。そのため順序1と同じ加振条件を、順序3、順序8～9、順序12として、初期状態からの変化を確認しながら測定した。試験体Dの試験は2日間に跨ったので、順序8の後に試験機へ取り付けたままの状態では鉛直荷重を除荷して1日目を終えた。2日目は最初に順序9を実施して、時間経過が後述する水平剛性に与える影響を確認した。ただしE-Isolationは、振動数と振幅を組み合わせることで加振速度を制御するので、水平剛性測定時の加振速度は表2の出荷検査(5 mm/s)に最も近い4.7 mm/sとした。他の加振速度は、過去の試験結果と同様の3 mm/sや400 mm/s等として、後者を動的加振の基本条件とした。

水平剛性算出方法を図4に示す。せん断ひずみ±100%加振の3サイクル目の荷重と変位の最大・最小値の傾き（割線剛性）を、当社補正式で20℃値に換算した。試験温度は試験体付近の気温21～26℃ではなく、試験体付近に置いたゴムブロックの内部温度22～26℃とした。

試験機と試験体の相対位置を測るレーザー変位計と圧縮せん断変形状態を図5に示す。相対位置を測定したのは、もし加振中に試験機と試験体の間でスリップが発生しても、後から水平変位を補正できるようにするためである。

表3 加振条件の概略

順序	加振条件					試験体		水平剛性の 算出対象
	鉛直 面圧 [N/mm ²]	波形	せん断 ひずみ γ [%]	加振 速度 [mm/s]	サイ クル	S	D	
1	15	三角波	±100	4.7	3	実施	実施	初回
2		正弦波	±100 以下の 複数条件	400 以下の 複数条件		実施	実施	
3		三角波	±100	4.7		—※	実施	γ ±100%後
4		正弦波	±100	400 周期3秒		実施	実施	
5			±200	400等		実施	実施	
6			±250	400		実施	実施	
7				400等	1	実施	実施	
8	15	三角波	±100	4.7	3	実施	実施	γ ±250%後
9						—※	実施	γ ±250%後 約20hr経過
10		正弦波	±300	400	1	実施	実施	
11	30～3		±360	800		実施	実施	
12	15	三角波	±100	4.7	3	実施	実施	γ ±360%後
13		三角波	±400	3	1	実施	—※	
14		正弦波	±400	400	1	—※	実施	

※ 計画外または日程の都合等で試験を実施せず

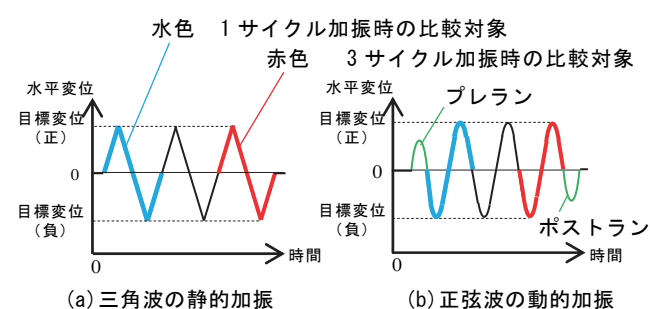


図3 水平変位波形と比較対象サイクル

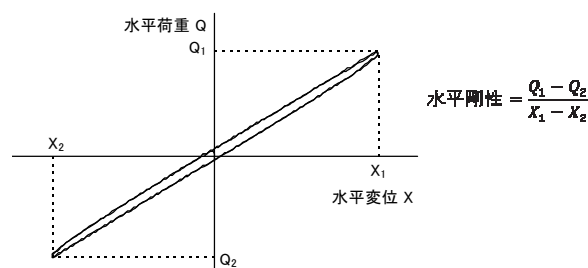


図4 水平剛性の算出方法

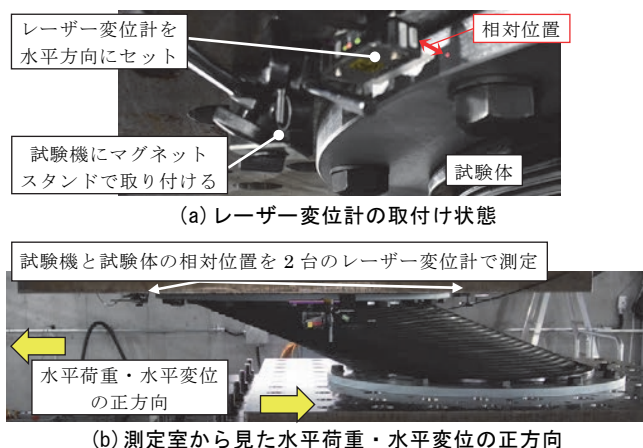


図5 圧縮せん断変形状態

2 台のレーザー変位計を水平方向に向かい合わせて取り付けただけで、片方の相対位置が増加すると、もう片方は減少する。

3. 試験結果

出荷検査相当の加振条件の水平荷重－変位関係を図 6、水平剛性測定値を表 4 に示す。いずれの試験体も基準値に対する差は小さく、試験体 D の順序 1 と 3 の水平荷重－変位関係は殆ど重なったので後者を例示した。

その他の水平荷重－変位関係を図 7～図 9 に例示する。図 7 (a) で、同じ加振条件の順序 1 より順序 12 の水平荷重が小さくなった。このようにせん断ひずみ $\pm 250\%$ 以上の変形を与えた後の水平荷重は若干低下した。また図 8 のように、同じせん断ひずみでも面圧が大きいと水平荷重が非線形に増加（ハードニング）した。これらは過去の静的

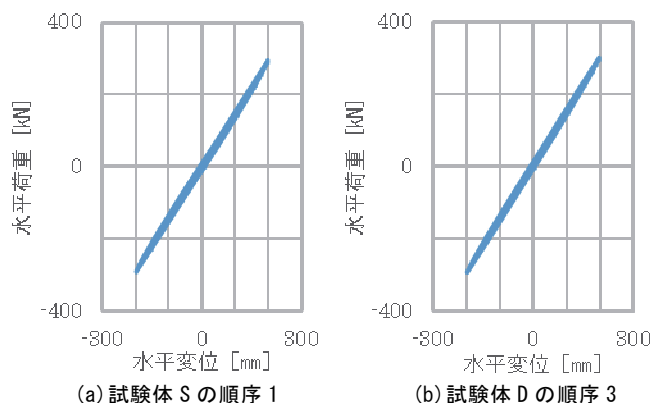


図 6 出荷検査相当加振条件の水平荷重－変位関係例
(面圧 15 N/mm^2 ，せん断ひずみ $\gamma \pm 100\%$ ，三角波 4.7 mm/s ，3 サイクル目)

表 4 水平剛性測定結果 (括弧内は対基準値)

温度 [°C]	水平剛性 [kN/mm]		
	基準値	測定値 20°C 補正	
		試験体 S	試験体 D
約 23	1.575	1.523 (-3%)	1.496 (-5%)

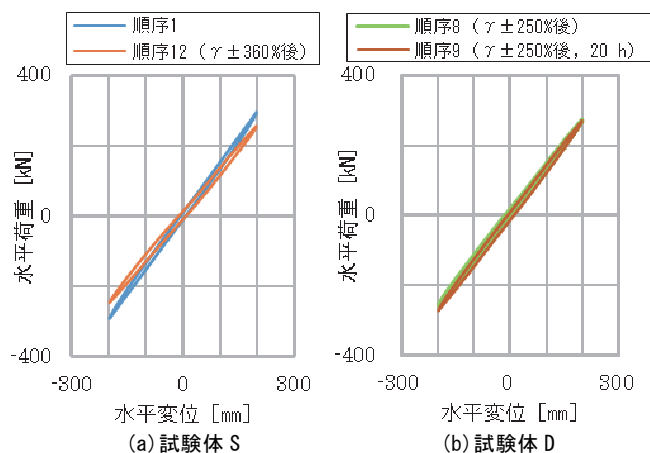


図 7 大変形を与えた前後の水平荷重－変位関係の比較例
(面圧 15 N/mm^2 ，せん断ひずみ $\gamma \pm 100\%$ ，三角波 4.7 mm/s ，3 サイクル目)

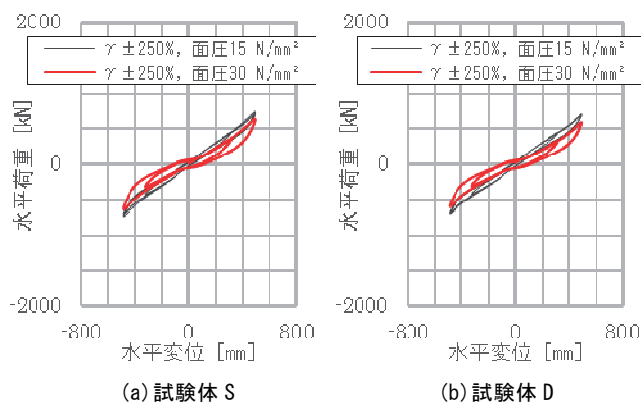


図 8 面圧変量時の水平荷重－変位関係の比較
(順序 6 と 7: せん断ひずみ $\gamma \pm 250\%$ ，予備加振を含む正弦波 400 mm/s ，)

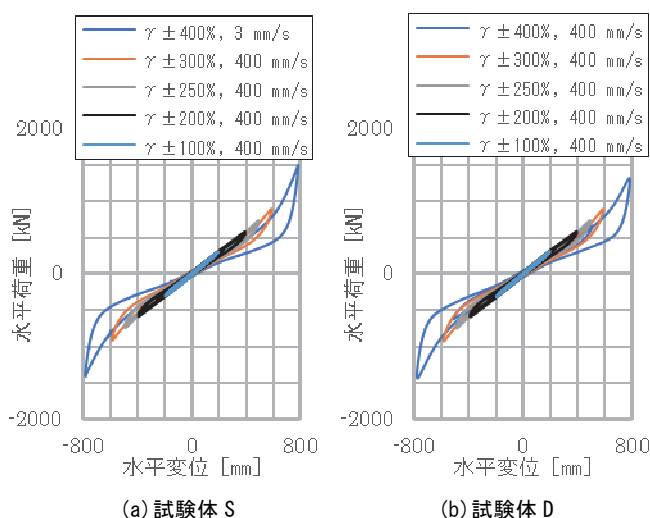
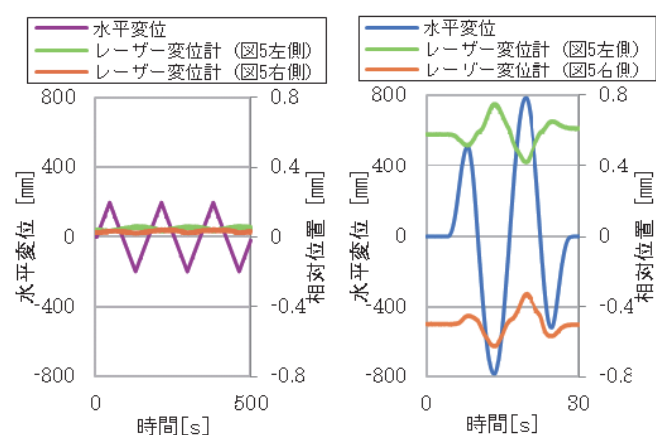


図 9 せん断ひずみ変量時の水平荷重－変位関係の比較
(面圧 15 N/mm^2 ，せん断ひずみ $\gamma \pm 100 \sim 400\%$ ，予備加振を含む正弦波 400 mm/s とせん断ひずみ $\gamma \pm 400\%$ ，三角波 3 mm/s)

加振結果⁶⁾と同様であった。せん断ひずみ $\pm 400\%$ 加振時の水平荷重は三角波 3 mm/s で水平変位 +800 mm 付近(第1象限)、正弦波 400 mm/s では水平変位 -800 mm 付近(第3象限)で最大になった。

ここで試験機と試験体 S の相対位置を図 10 に例示する。ゼロ調整は最初の順序 1 の前のみ実施したため、最後の順序 14 では原点から約 0.5 mm の位置を中心に、加振に応じた変動をした。試験中の異音や試験後の試験体外観にスリップ痕は無かったので、レーザー変位計のマグネットスタンドが加振によって僅かな弾性変形や残留変形を起こした可能性がある。

この相対位置の変化は 1 mm 未満で、試験結果に与える影響は小さい。そのため水平変位は補正せず試験機検出値をそのまま採用した。



(a) 順序 1: 三角波 4.7 mm/s (b) 順序 14: 正弦波 400 mm/s

図 10 試験機と試験体 D の相対位置

4. 考 察

三角波加振と正弦波加振で最初にせん断ひずみ $\pm 400\%$ に到達した時のせん断応力を図 11 に示す。正弦波加振は 2.3 節のとおり、応力とひずみの正負を反転させたものである。三角波加振は目標変位まで一定の速度を維持するが、

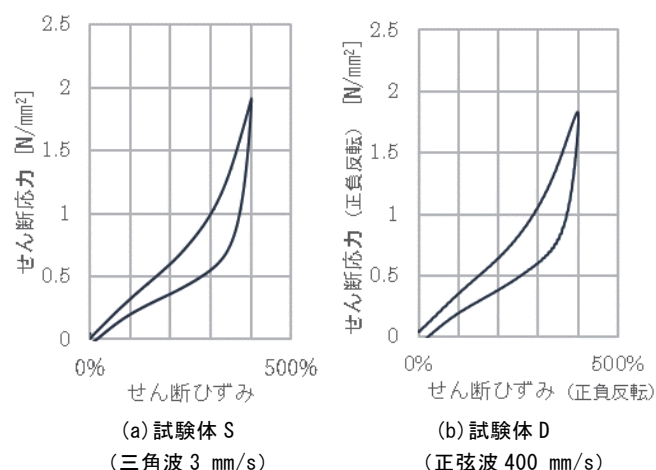


図 11 せん断ひずみ $\gamma \pm 400\%$ 加振時のせん断応力

正弦波加振は変位原点で速度が最大になった後、目標変位に向かって減速する。これらの相違点があるものの、加振速度や加振波形が、天然ゴム系積層ゴムの大変形時の挙動に与える影響は小さいと考えられる。

水平剛性の基準値に対する変化を図 12 に示す。こちらも過去の静的加振結果⁶⁾と同様に、せん断ひずみ $\pm 250\%$ 以上の変形後に水平剛性が低下して、翌日になってからもほぼ変わらなかった。この変化は基準値に対して -20% 以内に留まった。

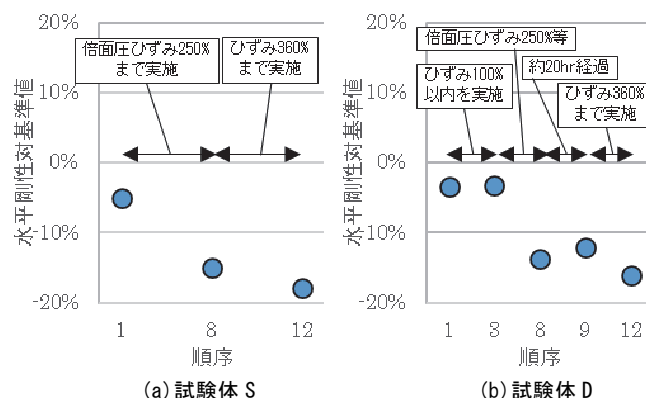


図 12 水平剛性対基準値の変化

5. ま と め

2 体の天然ゴム系積層ゴム $\phi 1000$ mm で動的加振時と静的加振時の限界変形性能等を比較した結果、加振速度による影響は小さいことを確認した。したがって従来の静的加振で製品性能を確認する方法は妥当と考える。

また大変形を与えた後に、静的加振時と同様に水平剛性は若干低下する傾向が確認された。今後も社内外でデータを増やして、これらの検証を継続する予定である。

謝 辞

一般財団法人 免震研究推進機構と、元 SWCC (株) 加藤直樹氏には多大なご協力を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会: 免震構造設計指針 (第 4 版), pp. 275-277, (2013)
- 2) 足立拓朗, 他: TMD に用いる天然ゴム系積層ゴムの繰返し加振試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 II, pp. 857-858 (2017)
- 3) NISHI T., et al.: International investigation of shear displacement capacity of various elastomeric seismic-protection isolators for buildings, Journal of Rubber Research, Vol. 22, 33-41 (2019)
- 4) 和田章, 他: 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 1 ~ 17), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 II, pp. 497-530 (2023)
- 5) 三須基規, 他: 天然ゴム系積層ゴムの加振速度が限界変形等に与える影響の検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 II, pp. 751-752 (2024)

- 6) 永井正弘, 他: 天然ゴム系積層ゴムの性能に関する実験的研究 (その4~5), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅱ, pp.523-526 (1997)

SWCC (株)
三須 基規 (みす もとき)
免震制振部 技術課
免震制振製品の設計・開発に従事

SWCC (株)
土屋 諒恭 (つちや りょうすけ)
免震制振部 技術課
免震制振製品の設計・開発に従事

SWCC (株)
清水 美雪 (しみず みゆき)
免震制振部 技術課
課長
免震制振製品の設計・開発に従事

福岡大学
高山 峯夫 (たかやま みねお)
工学部 建築学科
教授
工学博士

福岡大学
森田 慶子 (もりた けいこ)
工学部 建築学科
助教
博士 (工学)