

長周期・長時間地震動を想定した実大天然ゴム系積層ゴムの繰返し変形試験

Check Test of Full-scale Natural Rubber Bearing for Long Period Earthquake Motion

清水美雪
Miyuki SHIMIZU

三須基規
Motoki MISU

秋葉拓也
Takuya AKIBA

高山峯夫*
Mineo TAKAYAMA

免震建物が長周期・長時間地震動を受けると、免震部材は長大な繰返し変形を起こすため、吸収エネルギー量の増大による内部温度の上昇によって性能が変化する可能性が指摘されている。そこで、実大の天然ゴム系積層ゴムに静的繰返し変形を与えて、荷重変位関係や温度変化の確認を行った結果、長時間繰返し変形が天然ゴム系積層ゴムの性能に与える影響は小さいことが確認された。

Even if base-isolation devices have a little capability of energy absorption, long-period ground motion may change the performance of devices because inner temperature is increased by accumulative deformation. This paper present result of check test to evaluate the variation of mechanical properties due to cyclic loading, and it is confirmed the safety of full-scale natural rubber bearing under this postulated earthquakes.

1. はじめに

関東平野、大阪平野、濃尾平野は厚い堆積層に覆われた堆積盆地構造である。これらの地域は将来発生すると想定されている南海トラフ沿いの巨大地震に襲われると特定の周期帯で揺れが大きくなり、10分近く揺れ続ける長周期地震動が生じることが指摘されている。2017年4月から時刻歴応答解析（地震動を与え、建築物の各階の応答を計算する方法）による検証を行う免震建物の設計では、南海トラフ沿いで発生するとされるM8～9の長周期成分を含む巨大地震を対象とすることが求められるようになった¹⁾。

免震建物が長周期・長時間地震動を受けると、免震部材は長大な繰返し変形を起こすため、吸収エネルギー量の増大による内部温度の上昇によって性能が変化する可能性が指摘されている²⁾。そのため時刻歴応答解析における免震建物の耐震安全性の検証で、繰返し変形による免震部材の性能変化を考慮することが要求されている。

本報では、減衰性能が小さいため性能変化も小さいとされている実大の天然ゴム系積層ゴムに静的繰返し変形を与えて、履歴特性や温度変化の確認および繰返し変形後の限界特性を確認した結果を報告する。

2. 試験体

表1は当社製品の指定建築材料認定MVBR-0405（以降、認定とする）で定めるゴム外径とゴム総厚の関係である。表1の網掛け部が今回の実験で用いた試験体であり、同じ累積変形でも繰返し変形回数が多くなり、より過酷な評価になるようゴム総厚が小さいφ1000mm（以下RB1000SL）と最大径のφ1500mm（以下RB1500NM）で評価している。

表1 認定のゴム総厚とゴム外径の関係（単位：mm）

ゴム外径	φ300	φ500	φ600	φ650	φ700	φ750
ゴム総厚 H _t	58.5	97.5	117.0	127.4	137.8	148.2
		112.5	135.0	147.0	159.0	159.6
		123.8	148.5	161.7	174.9	171.0
			162.0		201.4	188.1
ゴム外径			171.0			199.5
	φ800	φ850	φ900	φ950	φ1000	φ1100
	156.0	166.4	163.2	184.6	157.5	199.2
	162.0	192.0	176.8	198.8	195.0	215.8
	180.0	198.4	197.2		202.5	240.7
	198.0	211.2	204.0		225.0	249.0
ゴム総厚 H _t			210.8		240.0	273.9
					247.5	
					285.0	
	φ1200	φ1300	φ1400	φ1500		
	198.0	196.0	199.5	293.8		
ゴム総厚 H _t	234.0	254.8	273.0			
	270.0					
	297.0					

ゴム総厚 H_t = ゴム一層厚 T_x × ゴム層数 n

* 福岡大学

試験体の仕様を表 2、試験体の構造図を図 1、図 2 に示す。RB1000SL はゴム中心部に熱電対を挿入して繰返し変形時の積層ゴム中心部温度を測定した。また、RB1000SL、RB1500NM ともに放射温度計でゴム表面温度を測定した。

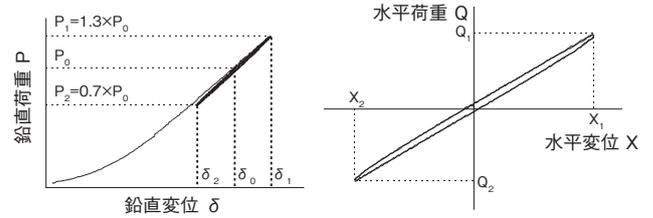
表 2 試験体仕様 (認定基準値)

試験体		RB1000SL	RB1500NM
ゴム外径 Do	[mm]	φ 1000	φ 1500
ゴム内径 Di	[mm]	φ 50	φ 75
ゴム総厚 H _t	[mm]	195.0	293.8
せん断弾性率 G	[N/mm ²]	0.34	0.39
S ₁ *1/S ₂ *2	—	31.7/5.1	31.5/5.1
基準面圧 σ	[N/mm ²]	12.5	15
規定ひずみ γ	[%]	±100	±100
鉛直剛性 Kv	[kN/mm]	3830±20%	5850±20%
水平剛性 Kh	[kN/mm]	1.38±15%	2.35±15%

$$*1 : S_1 = \frac{(D_o - D_i)}{4t} \quad *2 : S_2 = \frac{D_o}{H_t}$$

表 3 基本性能試験条件

試験体		RB1000SL		RB1500NM	
		鉛直剛性	水平剛性	鉛直剛性	水平剛性
鉛直方向面圧 σ	[N/mm ²]	12.5	12.5	15	15
せん断ひずみ γ	[%]	—	±100	—	±100
水平変位 δ	[mm]	—	±195	—	±294
三角波速度	[mm/s]	—	5	—	5
サイクル数	—	3	3	3	3



$$\text{鉛直剛性} : \frac{P_1 - P_2}{\delta_1 - \delta_2} \quad \text{水平剛性} : \frac{Q_1 - Q_2}{X_1 - X_2}$$

図 3 剛性の算出方法

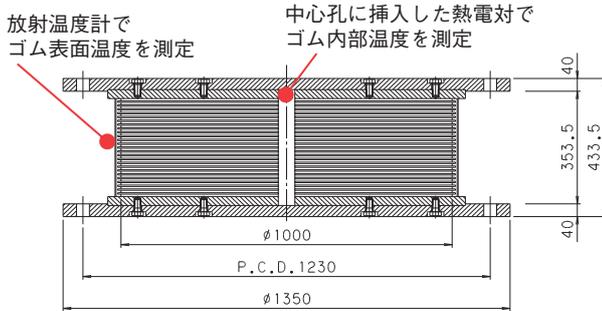


図 1 RB1000SL 構造図

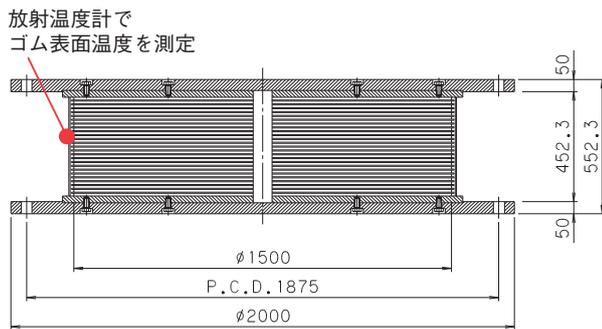


図 2 RB1500NM 構造図

3. 試験条件

試験は昭和電線保有の 35 MN 圧縮せん断試験機 (鉛直方向試験加力: 35000 kN, 水平方向試験加力: ±8000 kN) を用いて実施した。

3.1 基本性能試験

基本性能は表 3 に示す条件で実施し、荷重・変位の最大・最小値の傾きを剛性として算出し (図 3)、鉛直剛性、水平剛性が認定の基準値を満足していることを確認した。

3.2 長時間繰返し変形試験

表 4 に長時間繰返し変形試験の条件を示す。基準面圧を載荷後、規定ひずみの 2 倍のひずみ (200%) で、累積変形が 50 m 以上になるように繰返し変形を実施し、長時間繰返し変形試験での水平剛性の低下およびゴムの温度上昇を確認した。なお、長時間繰返し変形試験の条件は、長周期地震動を用いた時刻歴応答解析での累積変形の最大値が 50 m 程度となることから設定している。

表 4 長時間繰返し変形試験条件

試験体		RB1000SL	RB1500NM
鉛直方向面圧 σ	[N/mm ²]	12.5	15
せん断ひずみ γ	[%]	±200	±200
水平変位 δ	[mm]	±390.0	±587.6
三角波速度	[mm/s]	5	5
サイクル数	—	50	25
累積変形	[m]	78.0	58.8

3.3 限界変形試験

表 5 に限界変形試験の条件を示す。表 4 に示す長時間繰返し変形を実施後、基準面圧を載荷し、せん断ひずみ 400% (限界ひずみ) まで変形し、座屈、破断等の異常が無いことを確認した。限界変形試験は試験機的能力の都合により RB1000SL のみ実施した。

表 5 限界変形試験条件

試験体		RB1000SL
鉛直方向面圧 σ	[N/mm ²]	12.5
せん断ひずみ γ	[%]	±400
水平変位 δ	[mm]	±780.0
三角波速度	[mm/s]	3
サイクル数	—	1

※速度は試験機能力の制約による

4. 試験結果

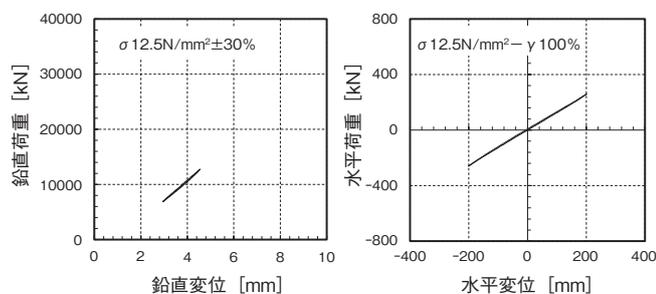
4.1 基本性能試験

表 6 に基本性能試験結果を示す。RB1000SL の履歴曲線 (3 サイクル目) を図 4, RB1500NM の履歴曲線 (3 サイクル目) を図 5 に示す。表 6 より鉛直剛性, 水平剛性はいずれも認定の基準値を満足していることを確認した。

表 6 基本性能試験結果

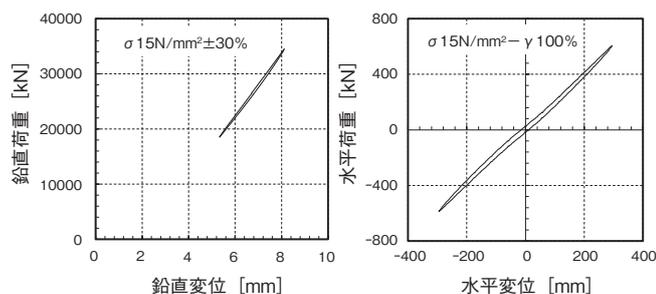
試験体		RB1000SL	RB1500NM
ゴム内部温度 [°C] (*)		15.1	20.3
鉛直剛性 [kN/mm]	設計値	3830	5850
	測定値	3690	5739
	温度補正後	3637	5744
	対設計値	-5.0%	-1.8%
水平剛性 [kN/mm]	設計値	1.38	2.35
	測定値	1.287	2.015
	温度補正後	1.267	2.017
	対設計値	-8.2%	-14.2%

(*) : 温度測定用積層ゴム $\phi 800$ の内部温度
 20°C 温度補正式…温度補正後剛性 = 実測値 - {設計値 $\times 2.85 \times 10^{-3} \times (20^\circ\text{C} - \text{ゴム内部温度})$ }



(a) 鉛直方向履歴曲線 (b) 水平方向履歴曲線

図 4 RB1000SL 履歴曲線



(a) 鉛直方向履歴曲線 (b) 水平方向履歴曲線

図 5 RB1500NM 履歴曲線

4.2 長時間繰返し変形試験

表 7 に長時間繰返し変形試験結果を示す。図 6 に RB1000SL の繰返し変形試験 50 サイクルの全履歴曲線, 図 7 に RB1500NM の繰返し変形試験 25 サイクルの全履歴曲線を示す。図 8 に繰返し変形試験時の水平剛性の変化率を示す。

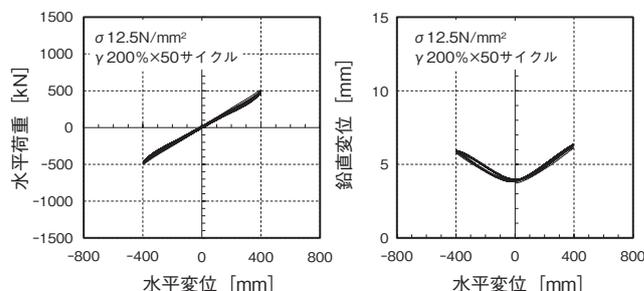
RB1000SL は累積変形 78 m (50 サイクル) での水平剛性の変化は 3% 程度, RB1500NM は累積変形 58.8 m (25 サイクル) での水平剛性の変化は 4% 程度で小さいことが確認できる。

図 9 に繰返し変形試験時のゴム内部温度, ゴム表面温度を示す。測定間隔は RB1000SL が 10 サイクル毎, RB1500NM が 5 サイクル毎を基本として, 一部のデータは測定できなかったものの, 累積変形 50 m 以上繰返し変形試験を実施してもゴム内部温度, ゴム表面温度の上昇は約 2°C であった。減衰の少ない天然ゴム系積層ゴムの鋼製の試験機に取付けて静的変形したため, 発熱量が少なく, 放熱もしやすかったためと推定される。

表 7 長時間繰返し変形試験結果

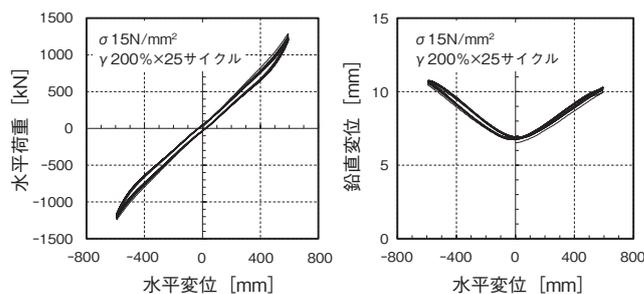
試験体		RB1000SL	RB1500NM
水平剛性 [kN/mm]	3 サイクル	1.22	2.08
	50 サイクル*	1.18	2.00
	50 サイクル* / 3 サイクル	0.97	0.96

※RB1500NM は 25 サイクルの水平剛性



(a) 水平方向履歴曲線 (b) 鉛直方向履歴曲線

図 6 RB1000SL 繰返し変形試験履歴曲線



(a) 水平方向履歴曲線 (b) 鉛直方向履歴曲線

図 7 RB1500NM 繰返し変形試験履歴曲線

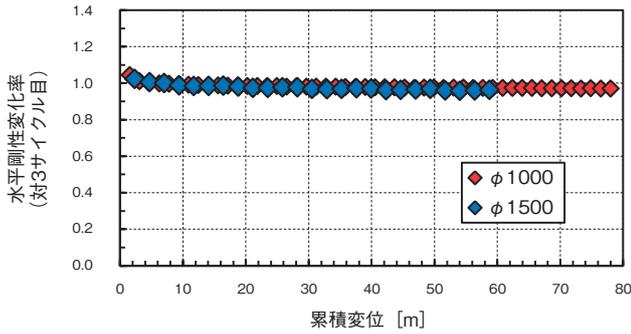


図8 繰返し変形試験時の水平剛性の変化

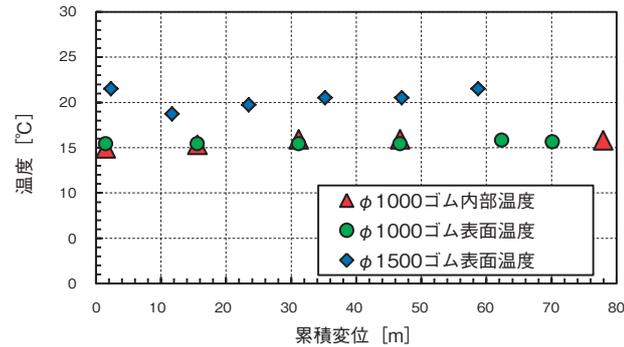


図9 繰返し変形試験時の温度変化

4.3 限界変形試験

RB1000SL について、繰返し変形後の限界変形試験で得られたせん断ひずみ γ 400% 変形時の履歴曲線を図10に示す。せん断ひずみ γ 400% 変形後の外観に異常は無く破断や座屈も起きなかったため、累積変形 78 m の繰返し変形を受けても限界変形性能 400% は維持されていることが確認できた。

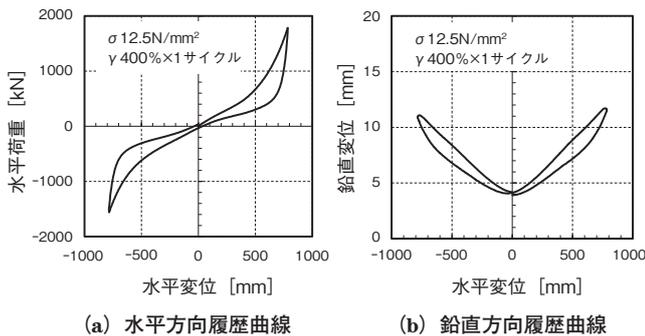


図10 RB1000SL 限界変形試験の履歴曲線

5. まとめ

天然ゴム系積層ゴムの実大試験体 RB1000SL, RB1500NM に長時間繰返し変形試験を与えてから限界変形試験を実施した結果を以下に示す。

1) 累積変形 50 m 以上の長時間繰返し変形試験を実施して

も水平剛性の変化は小さく、ゴム内部温度の上昇も小さい。

2) 繰返し変形を受けても限界変形性能 400% は維持されている。

このことから、長時間繰返し変形試験が天然ゴム系積層ゴムの性能に与える影響は小さいことが確認された。

また、せん断弾性率 ($G0.34 \text{ N/mm}^2$, $G0.39 \text{ N/mm}^2$) とゴム外径 ($\phi 1000 \text{ mm}$, $\phi 1500 \text{ mm}$) が異なる試験体で試験を実施しているが、試験結果に差が認められなかったため、減衰機能が無い天然ゴム系積層ゴムの、その他のせん断弾性率やサイズでも同様の傾向になると考えられる。

参考文献

- 1) 国立研究開発法人建築研究所: 長周期地震動対策に関わる技術資料・データ公開特設ページ
<http://www.kenken.go.jp/japanese/contents/topics/lpe/index.html>, 2017.6.29
- 2) 飯場正紀他: 免震部材の多数回繰返し特性と免震建築物の地震応答性状への影響に関する研究, 国立研究開発法人建築研究所資料, 2016.4
- 3) 秋葉拓也, 清水美雪, 三須基規, 高山峯夫: 長周期・長時間地震動を想定した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 (2017)

昭和電線ケーブルシステム(株)

清水 美雪 (しみず みゆき)

デバイスユニット 免制震部 技術・品質保証課 主査

免震部材の研究・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)

デバイスユニット 免制震部 技術・品質保証課 主査

免震部材の研究・開発に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)

秋葉 拓也 (あきば たくや)

デバイスユニット 免制震部 技術・品質保証課

免震部材の研究・開発に従事

福岡大学

高山 峯夫 (たかやま みねお)

工学博士

工学部 建築学科 教授