

回転が生じる境界条件における鉛入積層ゴムの力学性能

中村佳也 佐々木聡
馮徳民^{*1}

概要

免震建物の適用範囲が拡大する中で、物流倉庫で杭頭免震の事例が増加している。杭上部に直接免震装置を設置する方法で、免震装置下部の剛性が小さいため、地震で地盤が水平変形した時に杭頭が回転し、免震装置にも回転が生じる。そのため、杭頭免震の設計では使用する免震装置の回転が生じる境界条件での特性を把握しておく必要がある。

本報は、弊社で開発している鉛入り積層ゴムについて、杭頭免震で回転が生じる境界条件での使用を想定して、①鉛入り積層ゴムの回転剛性および各種依存性の影響、②鉛直および水平方向力学特性への回転の影響、に関する実験を行った。

得られた結果は以下の通りである。

- (1) 回転剛性および各種依存性は設計式と良い対応が見られた。
- (2) 鉛直剛性と水平剛性は回転によって低下するが、回転角 1/100 の時でも 4～8%の低減であった。

Dynamic characteristics of Lead Rubber Bearing under rotation

Abstract

Usage of seismic base isolation systems for buildings is expanding. In particular, logistics warehouses are increasingly using seismic pile-top isolation system. It is a design that locates the seismic base isolation device directly on the pile tops. Since the design yields less rigidity than a traditional base isolation device, when the horizontal ground displacement occurs during an earthquake, the pile top rotates, and the movement is transferred to the seismic base isolation device. It means, when we use the pile-top isolation in a design, it is necessary to consider the dynamic characteristics of the seismic base isolation device under the boundary condition for the pile-top isolation to rotate.

In this paper, we studied the effects of rotation from the seismic pile-top isolation on the lead rubber bearing (LRB) which our company develops. More specifically, under the boundary condition for rotation of the seismic pile-top we conducted experiments with our LRB to measure its stiffness under rotation and the effects of rotation on vertical and horizontal dynamic characteristics of the LRB. We have obtained the results as follows:

- 1) The LRB's stiffness under rotation and its dependability correspond well with the design equation.
- 2) With respect to the effects of rotation on dynamic characteristics, stiffness of the LRB tends to decrease. Its degree of reduction is 4-8% with the angle of rotation being 1/100.

キーワード: 回転、杭頭免震、鉛入積層ゴム、
回転剛性、基本特性、依存性

*1 榊高環境エンジニアリング

§1. はじめに

免震建物の適用件数が増え、用途も拡大している。また、免震装置の設置場所は、一般的な基礎免震層の場合だけでなく、柱頭・柱脚、杭頭の場合などもある。その中で物流倉庫をはじめとして、杭頭免震の事例が増加している。杭頭部に直接免震装置を設置する方法で免震装置下部の大きなフーチングや基礎床の省略が可能である反面で、杭頭部(免震装置下部)の剛性が小さいため、地震時に地盤が水平変位した時に杭頭部が回転し、免震装置にその回転が生じてしまう。したがって、回転が免震装置の力学特性へ及ぼす影響を十分把握しておく必要がある。

本報は、弊社で開発している鉛入り積層ゴム¹⁾について、杭頭免震で回転が生じる境界条件での使用を想定して、①鉛入り積層ゴムの回転剛性の把握および各種依存性の影響、②鉛入り積層ゴムの鉛直および水平方向力学特性への回転の影響、に関する実験を行ったので、その結果を報告する。

§2. 試験項目および試験体概要

2.1 試験項目

鉛入積層ゴムの回転剛性およびその依存性を調べる試験と、積層ゴム一端に回転角を与えた場合の特性への影響を調べる試験を行った。

2.2 試験体概要

試験体は、ゴムシートと鋼板を積層し、中心に鉛プラグを挿入した鉛プラグ挿入型積層ゴム(LRB)である。試験体の諸元および断面図を表 1、図 1 に示す。ゴム直径は、600mm とその 1/2 縮小模型の 300mm の 2 種類とした。内部ゴムのせん断弾性率(G)は 0.392N/mm²で、2 次形状係数(S₂)は 5.0 とし、鉛径/ゴム外径(D_p/D)は 0.2 とした。

表 1 試験体の寸法・径数値の諸元

	D (mm)	D _p (mm)	t _s (mm)	t _r (mm)	n	H _r (mm)	T _r (mm)	H _s (mm)
LRB300	300	60	2.3	2.0	30	60	17	160.7
LRB600	600	120	4.5	4.0	30	120	34	318.5

	S ₁	S ₂	G ₀ (N/mm ²)	P ₀ (kN)	G _{cr} (N/mm ²)
LRB300	37.5	5.0	15.0	1,060	61.9
LRB600	37.5	5.0	15.0	4,241	61.9

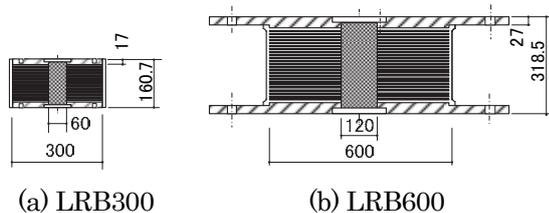


図 1 試験体断面図

§3. 回転剛性およびその依存性

3.1 試験装置と試験方法

試験装置図を図 2、写真 1 に示す。積層ゴム試験体を上下加力梁の間に設置し、鉛直方向に設置された 2 本の 200tonf ジャッキにより上側加力梁を介して積層ゴムに圧縮荷重および回転を与える。下側加力梁と門型フレームの柱の間に取り付く 50tonf ジャッキにより積層ゴムに水平オフセット変形を与える。上側加力梁と門型フレームの柱の間に設置したもう一つの 50tonf ジャッキは、上側加力梁の水平方向変位を拘束する。積層ゴム下の下側加力梁はリニアガイドで支持され、水平加力方向のみ移動可能としている。

計測項目は、各ジャッキに作用する荷重、各ジャッキの変位、鉛直方向相対変位(2ヶ所)、上側加力梁の水平方向絶対変位の計 11 点とした。試験は 4 本の油圧ジャッキを制御して静的に行った。制御方式は、鉛直荷重は 2 つの鉛直方向ジャッキの荷重制御(同期)、回転角は、2 つの鉛直方向ジャッキの変位制御(独立)、水平方向オフセット変形は、下側加力梁の水平方向ジャッキ No.1 の変位制御とした。なお、水平方向ジャッキ No.2 は、上側加力梁の水平方向絶対変位の計測値が常にゼロになるように変位制御した。

本試験での、モーメント M、回転角 θ 、オフセット変形 γ の算出式を式(1)~(3)に示す。また正負の定義を図 3 に示す。モーメントの算出位置は、図 3 に示すゴム最上層の上面中央部とし、モーメント計測値は、上側加力梁に作用する 3 本のジャッキによる荷重の大きさと向きから算出した。

$$M = P_{V1} \cdot \frac{L}{2} - P_{V2} \cdot \frac{L}{2} + P_{H2} \cdot H \quad \dots (1)$$

$$\theta = (\delta_{V1} - \delta_{V2}) / L \quad \dots (2)$$

$$\gamma = \delta_H / H_r \quad \dots (3)$$

ここで、

P_{V1}, P_{V2}, P_{H2} : 鉛直荷重 1&2、水平荷重 2

$\delta_{V1}, \delta_{V2}, \delta_H$: 鉛直変位 1&2、積層ゴム水平変位

L : 変位計設置間距離 [L=1000mm]

H : 上側加力梁の梁せい中央から積層ゴムのゴム最上層上面までの距離 [H=500/2+50+20+17=337mm]

H_r : 積層ゴムのゴム総厚さ[H_r=120mm]

3.2 回転剛性設計値

積層ゴムに鉛直荷重 P、せん断力 Q と曲げモーメントが作用したモデルを想定する²⁾。Haringx 理論³⁾に基づき、積層ゴム上下面の作用力に対する方程式は、水平剛性[K_H]、P- Δ 効果による付加曲げモーメントの影響を示す剛性項[K_P]および回転剛性[K_R]に分離して表現される。結果、回転剛性 K_r は式(4)で与えられる。

$$K_r = \frac{E_{rb} \cdot I_r}{n \cdot t_r} \cdot \left\{ 1 - \left(\frac{P}{P_{cr}} \right)^2 \right\} \cdot \phi_r \quad \dots (4)$$

ここで、

E_{rb} : 体積弾性率で補正されたゴムの曲げ弾性係数

$$E_{rb} = \frac{E_r \cdot E_b}{E_r + E_b}, \quad E_r = E_0 \cdot \left(1 + \frac{2}{3} \kappa S_1^2\right) \quad \dots (5), (6)$$

E_b, E_r, E_0, κ : ゴムの体積弾性率[=1960]、曲げ弾性係数、縦弾性係数[=1.44]、補正係数[=0.85]

I_r, t_r, n, S_1 : 積層ゴム断面 2 次モーメント、ゴム一層厚さ、ゴム層数、1 次形状係数

P_{cr}, P : 座屈荷重、鉛直荷重

ϕ_r : 水平変位依存性係数²⁾

$$\phi_r = \frac{4}{\pi} \left(\frac{1}{2} \theta_d + 2\theta_d \cos^2 \theta_d - \frac{13}{6} \sin^3 \theta_d \cos \theta_d - \frac{5}{2} \sin \theta_d \cos^3 \theta_d \right) \dots (7), (8)$$

$$\theta_d = \cos^{-1}(\delta/D)$$

3.3 試験内容

試験項目を表 2 に示す。評価項目は、積層ゴムの回転剛性で、試験のパラメータは、鉛直荷重(面圧)、水平オフセット変形(水平方向ゴムせん断ひずみ)、回転角振幅である。

表 2 試験項目

	試験項目	面圧 σ / σ_0	水平ひずみ γ (%)	回転角 θ p(rad)
A-1	基本(鉛直)	0.7~1.3	0	0
	基本(水平)	1.0	± 100	0
A-2	オフセット 水平変形	1.0	0,50,100, 150,200	$\pm 1/100$
A-3	回転角振幅	1.0	0	$\pm 1/200,$ $\pm 1/100, \pm 1/50$
A-4	面圧	0.19,0.5,1.0,1.5	0	$\pm 1/50$
		0.5,1.0,1.5	100	$\pm 1/100$

3.4 試験体

試験体は直径 300mm の鉛入積層ゴムとした。

3.5 試験結果(A-1:基本特性)

試験結果を表 3、図 4 に示す。2 次剛性がやや小さかつ

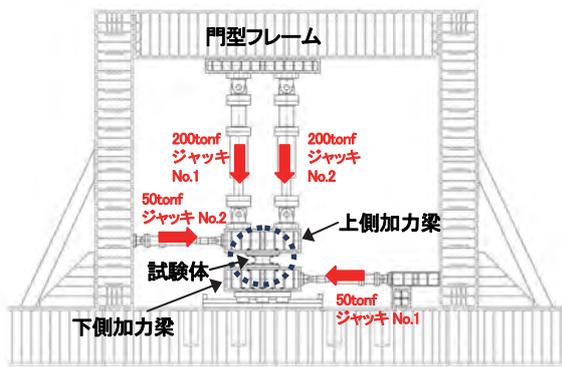


図 2 試験装置図



写真 1 試験風景

たが、設計値どおりの特性を示している。切片荷重が設計値よりも小さくなった原因については、静的実験で加力速度が遅かった(平均速度 0.17mm/s)ためと考えられる。

表 3 試験結果 (LRB300)

	設計値	実験結果
鉛直剛性(Kv) [kN/mm]	1089.0	1091.1
2 次剛性(Kd) [kN/mm]	0.465	0.408
切片荷重(Qd) [kN]	22.5	18.6

3.6 試験結果(A-4:回転剛性)

水平オフセット変形ゼロの状態、面圧を変化させて、回転角 $\pm 1/50$ 与える試験を行った。図 5 に、モーメント(M)ー回転角(θ)関係を示す。なお図中には、式(4)で求めた回転剛性設計値を赤色破線及び数値で、平面保持仮定に基づいて計算された端部引張降伏時(降伏応力度 $\sigma_y=1.0\text{N/mm}^2$)の降伏曲げモーメント及び降伏回転角⁴⁾を緑色丸印で示す。

これらの図から、実験結果の回転剛性と設計値は良く対応している。ただし面圧が大きくなると、実験結果は設計値よりもやや小さくなり、降伏回転角も計算結果よりも小さくなっていった。

3.7 試験結果(A-3:回転角振幅の影響)

水平オフセット変形ゼロ、基準面圧の状態、回転角の振幅を $\pm 1/200, \pm 1/100, \pm 1/50$ と変えたときの結果を図 6 に示す。写真 2 に試験時の代表写真を示す。

この図から、回転剛性(接線)の回転角振幅依存性はみられなかった。ただし、回転角が大きくなるとモーメントー回転角関係に非線形性状が現れることがわかった。

3.8 試験結果(A-2:水平オフセット変形の影響)

オフセット変形を 0~200%の範囲で変えて、回転角

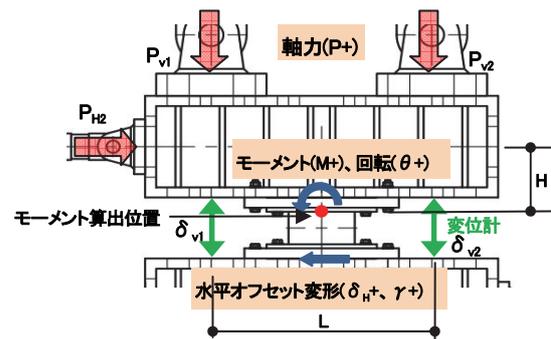
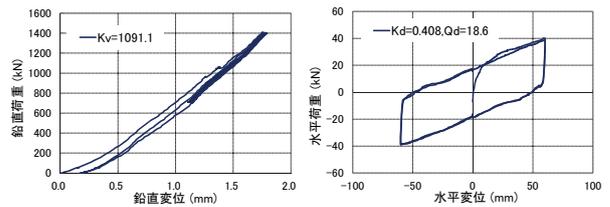


図 3 積層ゴムに作用する力、変位



(a) 鉛直試験

(b) 水平試験

図 4 基本試験結果 (LRB300)

$\pm 1/100$ を与える試験を行い、得られたモーメント-回転角関係から回転剛性(接線)を求めた。図 7 に、回転剛性-水平オフセット変形関係を示す。なお図中には、回転剛性計算値を赤色破線で示す。写真 3 に試験時の写真を示す。

この図から、実験結果はオフセット変形が大きくなると、回転剛性が徐々に低下する傾向にあり、設計式と良く対応している。ただし、オフセット変形が無い場合と大きい場合で、実験結果と設計式との差がみられた。

3.9 試験結果(A-4: 面圧の影響)

オフセット変形(0,100,200%)を与えた状態で、面圧を 2.8,7.5,15.0,22.5N/mm² ($\sigma/\sigma_0=0.19,0.5,1.0,1.5$)と変化させて、回転角 $\pm 1/100$ を与えてモーメント-回転角関係から回転剛性(接線)を求めた。図 8 に、回転剛性-面圧関係を示す。なお図中には、回転剛性計算値と面圧の関係を赤色破線で示す。

この図から、①回転剛性の実験結果は、面圧が大きくなるほど小さくなる傾向にあること、②面圧が 7.5N/mm² の状態で回転剛性が極大になること、がわかる。面圧依存性の傾

向は設計式と良い対応にあった。また、多少面圧が作用する状態で回転剛性が最大になることは、他の文献でも同様に見られる傾向である^{2),5)}。

3.10 まとめ

直径 300mm の鉛入り積層ゴム(LRB)について、回転を与える試験を行い、回転剛性(接線)の評価を行った結果、以下の知見が得られた。

- (1) 回転剛性および降伏回転角の実験結果は、設計値(Haringx 理論解から定義)とよく対応していた。
- (2) 回転剛性の回転角振幅依存性はなかった。ただし、モーメント-回転角関係は回転角が大きくなると非線形性状を示した。
- (3) 水平オフセット変形が大きくなると回転剛性は徐々に低下する傾向が見られた。この傾向は設計式とよい対応であった。
- (4) 面圧が大きくなると回転剛性は、一旦極大を示し、その後緩やかに低下する傾向が見られた。

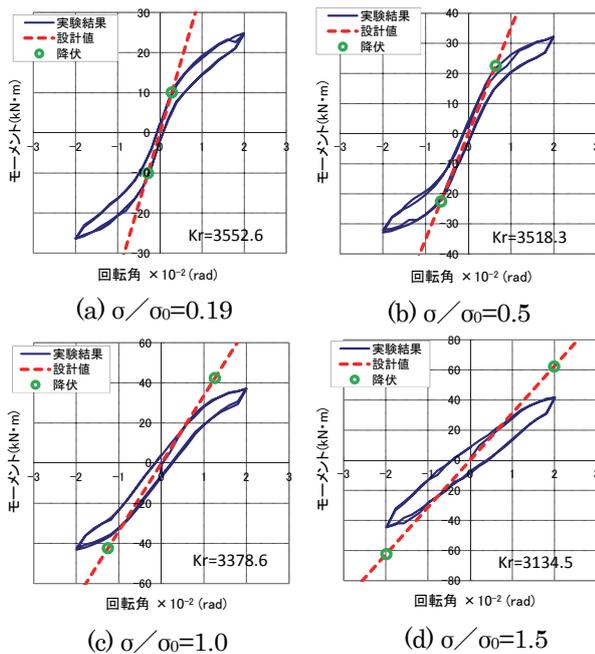


図 5 モーメント-回転角関係(オフセット変形無し)

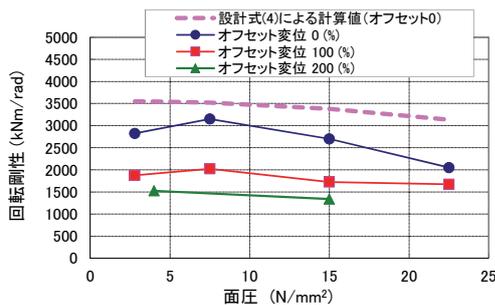


図 8 面圧の影響

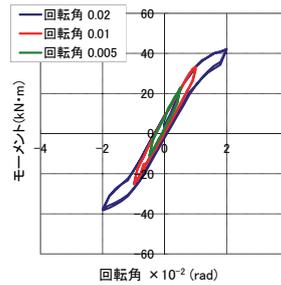


図 6 回転角振幅の影響 ($\sigma = 15\text{N/mm}^2$ 、オフセット変形無し)



(a) 回転 +1/50



(b) 回転 -1/50

写真 2 試験体変形状況

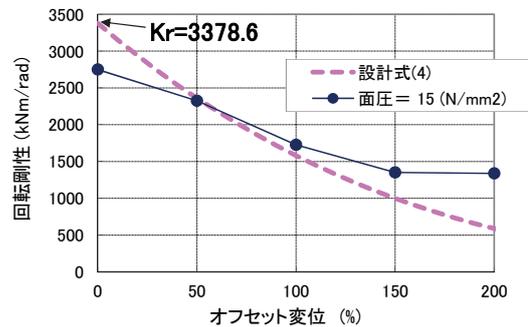
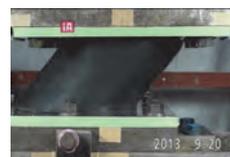


図 7 オフセット水平変形の影響



(a) 回転 +1/100



(b) 回転 -1/100

写真 3 試験体変形状況(オフセット水平変形 200%)

§4. 回転角が特性に及ぼす影響

4.1 試験内容

積層ゴム上部に回転が無い状態と有る状態で、鉛直剛性、2次剛性、切片荷重を評価する基本試験と依存性試験を行った。回転角は、0、1/100、1/50(LRB300のみ)の3種類とし、積層ゴム上部に傾斜 1/100、1/50 を有する鋼板を設置した。試験は、鉛直荷重最大 2000tonf、水平荷重最大 600tonf の 2 軸試験機を使用して行った(最大速度 10mm/s)。表 4、写真 4 に試験項目、試験風景を示す。

表 4 試験項目

	試験項目	面圧 σ/σ_0	水平ひずみ γ (%)	回転角 θ_p (rad)
B-1	基本(鉛直)	0.7~1.3	0	0,1/100, 1/50(LRB300)
	基本(水平)	1.0	±100	
B-2	面圧依存性	0.5,1.0,1.5,2.0	±100	0,1/100
B-3	ひずみ依存性	1.0	±50, ±100, ±150, ±200,	

4.2 試験体

試験体は直径 300 と 600mm の鉛入り積層ゴムとした。

4.3 試験結果(B-1:基本特性)

基本特性試験結果を表 5、図 9 に示す。LRB300 の回転角 0 の結果は表 3 の回転剛性試験時の結果とほぼ同じであった。次に回転角の影響を調べるため、回転角 0 の結果で基準化した値を横軸に回転角を取って図 10 に示す。

表 5 試験結果 (LRB300&LRB600)

(a) LRB300	設計値	実験結果		
		回転 0	回転 1/100	回転 1/50
鉛直剛性 [kN/mm]	1089.0	1112.5	1058.6	966.5
2次剛性 [kN/mm]	0.465	0.400	0.375	0.325
切片荷重 [kN]	22.5	26.1	25.3	26.8

(b) LRB600	設計値	実験結果		
		回転 0	回転 1/100	回転 1/50
鉛直剛性 [kN/mm]	2943.1	2605.6	2658.8	-----
2次剛性 [kN/mm]	0.929	0.875	0.805	-----
切片荷重 [kN]	90.2	84.5	92.7	-----

これらの結果から、剛性には回転の影響が見られ、回転角の増大により剛性が低下する傾向にあった。1/100 の回転角で、鉛直剛性は 4~8%、水平剛性は 6~8%の低下、1/50 の回転角で、それぞれ 17%、16%の低下であった。一方、切片荷重には回転の影響はみられなかった。

4.4 試験結果(B-2:面圧依存性)

面圧を 7.5,15,22.5,30N/mm² の4段階に変化させて水平試験 ($\gamma=100\%$)を行った。試験結果(2次剛性 K_d 、切片荷重 Q_d)を図 11 に示す。図(a)は、基準面圧 15N/mm² 時の値に対する各面圧時の値の比を縦軸に、面圧を横軸にとって示す。図(b),(c)は面圧 7.5,30N/mm² 時の荷重—変位関係を、回転無し(点線)と有り(実線)で比較して示す。

これらの図から、面圧が大きくなると 2 次剛性が徐々に小さくなる面圧依存性の傾向は、回転角無しと有りではほぼ同じで、直径の違いの差は無かった。回転角 1/100 であれば、回転角の面圧依存性への影響は見られなかった。

4.5 試験結果(B-3:ひずみ依存性)

ゴムせん断ひずみを 50%,100%,150%,200%に変化させて水平試験を行った。試験結果を図 12 に示す。図(a)は、せん断ひずみ 100%時の値に対する各せん断ひずみ時の値の比を縦軸に、ひずみを横軸にとって示す。図中にはさらに、ひずみ依存の設計式も併せて示している。図(b),(c)はせん断ひずみ 50,200%時の荷重—変位関係を、回転無し(点線)と有り(実線)で比較して示す。

これらの図から、ひずみが大きくなると 2 次剛性が徐々に小さくなるひずみ依存性の傾向は、回転無しと有りではほぼ同じで、回転角 1/100 の影響は見られなかった。

4.6 まとめ

積層ゴム上部に 1/100 の回転が有る場合、鉛直剛性および水平剛性は約 4~8%の低下が見られた。しかし、切片剛性、依存性については影響がなかった。

§5. おわりに

回転が生じる境界条件での使用を想定して、鉛入り積層ゴムの回転剛性および回転の影響を調べた。その結果、回転剛性および各種依存性は設計式と良い対応をしていた。また、回転の力学特性への影響は剛性で低下傾向が見られたが、回転角 1/100 で 4~8%の低減とわずかであった。

参考文献

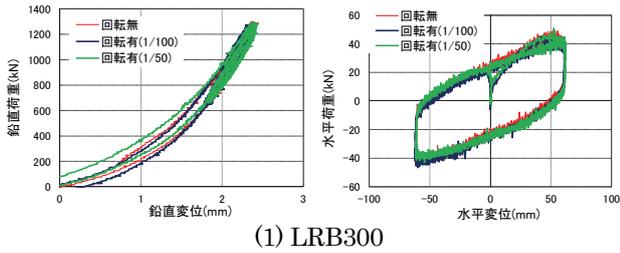
- 1) 中村佳也ほか: FUYO 式鉛プラグ挿入型積層ゴム支承の開発、フジタ技術研究報告、第 48 号、2012。
- 2) 三山剛史: 積層ゴムの上下面に回転角を与えた場合の力学性状に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第 556 号、pp.43-50、2002 年 6 月。
- 3) Haringx, J. A.: On highly compressible helical springs and rubber rods and their application for vibration-free mountings, I, II, III, Phillips Research Reports, Vol.3(1948), Vol.4(1949)。
- 4) 飯塚真臣: 積層ゴムの大変形挙動をシミュレーションする巨視的力学モデル、日本建築学会構造系論文集、第 568 号、pp.83-90、2003 年 6 月。
- 5) 石井建ほか: 積層ゴムにおける傾斜付加時の力学特性について(その 2) 回転特性試験結果、日本建築学会学術講演梗概集(中国)、pp.373-374、2008 年 9 月。

ひとこと

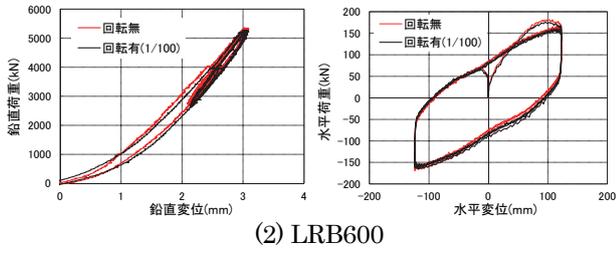
免震建物の用途が拡大し、これまででなかった条件で積層ゴムが使用されることも増えている。多様なニーズに応えられよう研究開発を進めていきたい。



中村 佳也



(1) LRB300



(2) LRB600

図9 基本特性試験結果(荷重-変形関係)



写真4 試験状況

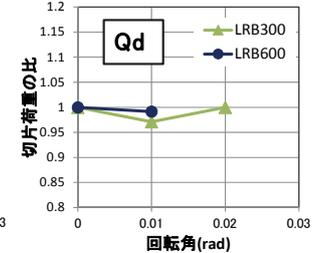
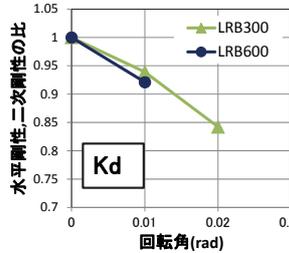
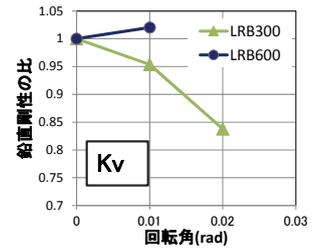
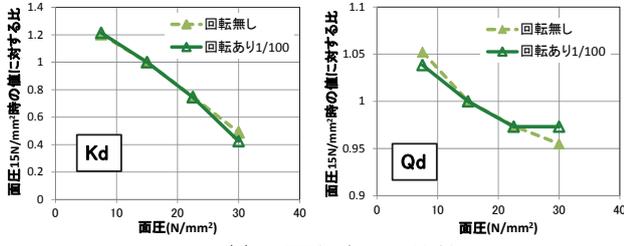
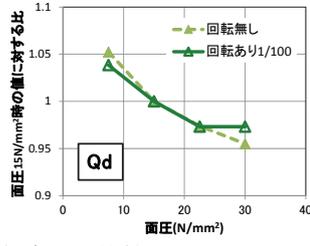


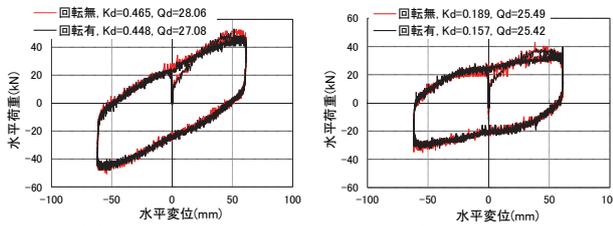
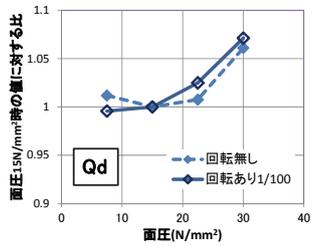
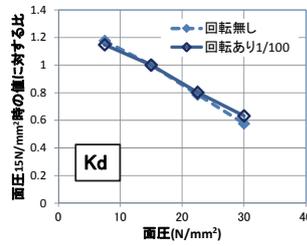
図10 基本特性試験結果(回転角の影響)



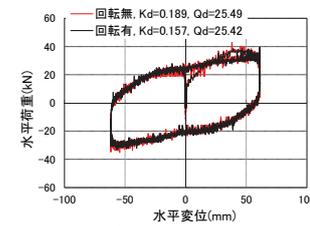
(a) 面圧依存性の比較



(a) 面圧依存性の比較

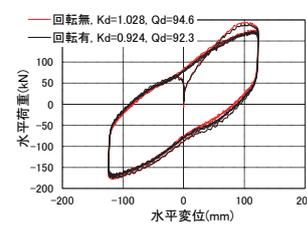


(b) $\sigma=7.5\text{N/mm}^2$

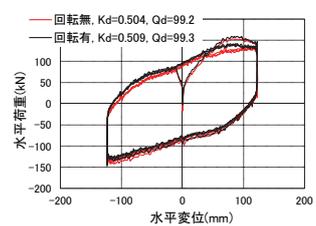


(c) $\sigma=30\text{N/mm}^2$

(1) LRB300



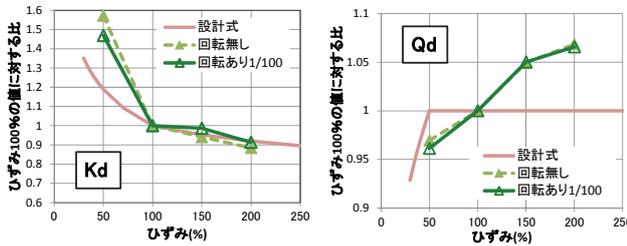
(b) $\sigma=7.5\text{N/mm}^2$



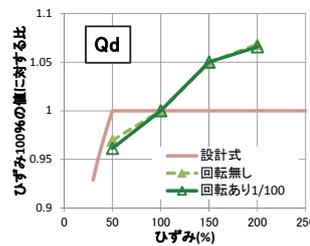
(c) $\sigma=30\text{N/mm}^2$

(2) LRB600

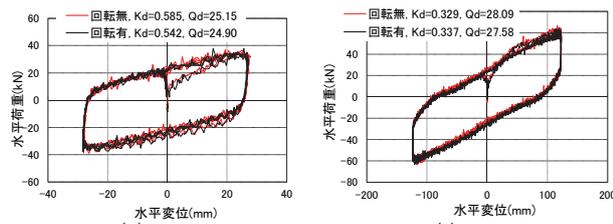
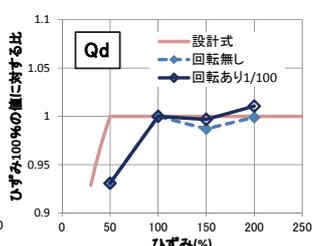
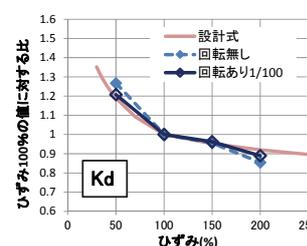
図11 面圧依存性試験結果



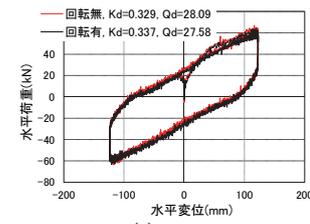
(a) ひずみ依存性の比較



(a) ひずみ依存性の比較

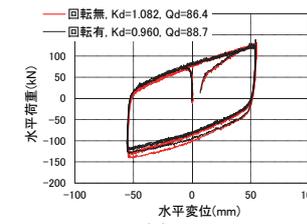


(b) $\gamma=50\%$

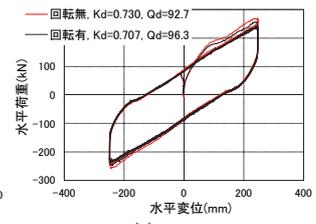


(c) $\gamma=200\%$

(1) LRB300



(b) $\gamma=50\%$



(c) $\gamma=200\%$

(2) LRB600

図12 ひずみ依存性試験結果