

積層ゴム支承の耐震性能実験

Seismic Resistance Performance Test of Rubber bearing

青山和嵩†, 青木徹彦††, 鈴木森晶††

Kazutaka AOYAMA, Tetsuhiko AOKI, Moriaki SUZUKI

Abstract : Natural rubber bearing (NR)isolator and lead rubber bearing (LRB) isolator had come to be widely used in order to raise the seismic resistance ability since the Hyogoken-Nambu Earthquake. However, the data refer to the complicated dynamics characteristic of laminated rubber bearings, are not still sufficiently served until now.

In this research, various kinds of experiments for rubber bearing isolator were conducted, taking advantage of equipment of the Seismic Resistance Experiment Center in Aichi Institute of Technology. Then the basic characteristics were clarified from the test results.

Keyword : natural rubber bearing lead rubber bearing

キーワード：水平力分散ゴム支承 鉛プラグ入り積層ゴム支承

1. 序論

今日まで橋梁等の積層ゴム支承として水平力分散ゴム沓(以下分散沓)や鉛プラグ入り積層ゴム支承(以下LRB)が一般的に使用されている。特に兵庫県南部地震以降橋梁の耐震安全性を向上させる手段として免震ゴム支承が広く使用されるようになった。免震ゴム支承は、上部構造の固有周期の長周期化をはかるとともに減衰性を高め、地震による作用力を軽減するために極めて有効な手段のひとつと考えられている¹⁾。

しかしながら今日まで積層ゴム支承の複雑な耐震力学特性を把握したデータを公表した例は少なく、この分野での実験研究の進展を妨げる一因となっている。

積層ゴム支承に関する実験を集大成した資料も存在するがゴム会社の技術資料や数少ない公表されたデータに基づいているために必ずしも信頼性が高いとはいえない²⁾。

積層ゴム支承には非線形特性があり、これを正しく把握できれば支承の合理的な設計、橋脚基礎部の低コスト化を行う上で役立てられる。

そのため、各種の実験を継続して行い、データを蓄

積する必要があるが、積層ゴム支承の実験のためには大規模な実験設備が必要で、莫大な費用がかかるため、大学等で実験はこれまでほとんど行われなかった。

本研究では分散沓とLRBに対して縮小供試体を使用して安定性能試験、耐久性能試験を行い、各種の性質を現すデータを収集し、特性を明らかにする。また、LRB実大寸法供試体に対しての基本特性試験を行う。

2. 実施計画

2.1 実験方法

実験の種類には安定性能試験として面圧依存性試験、周期依存性試験があり、耐久性能試験としてせん断疲労試験が、また基本特性試験として圧縮ばね定数・圧縮変位試験、圧縮せん断試験、せん断変形性能試験がある。これを表-1に示す。なお、実験方法については全て日本道路公団規格に準拠する³⁾。

2.2 供試体

安定性能試験、耐久性能試験には分散沓、LRBの縮小供試体を1体ずつ用いて行う。分散沓はせん断弾性係数G8(0.8N/mm²)の材料を用い、供試体寸法は平面形状□400mm×400mm、ゴム層の高さは9mm×6層=54mmである。式(1)、(2)に示す一次形状係数は11.1、二次

† 愛知工業大学 大学院 建設システム工学専攻

†† 愛知工業大学都市環境学科土木工学専攻(豊田市)

表-1 実験方法一覧

実験の分類	実験方法	使用供試体
安定性能試験	面圧依存性試験	単一の分散 沓、LRB縮小 供試体
	周期依存性試験	
耐久性能試験	せん断疲労試験	
基本特性試験	圧縮ばね定数・ 圧縮変位試験	LRBの同一の 実大寸法供 試体を3体使 用
	圧縮せん断試験	
	せん断変形性能試験	

形状係数は 7.4 である。

LRB はせん断弾性係数 G12 (1.2N/mm²)の平面形状□400mm×400mm、ゴム層の高さは 9mm×6層=54mm、一次形状係数は 10.3、二次形状係数は 7.4 である。

LRB の基本特性実験では、同一の実大寸法供試体 3 体を用いる。この供試体は、せん断弾性係数 G12(1.2N/mm²)の天然ゴム材料を用いる。供試体寸法は、平面形状□1300mm×1300mm×6層、ゴム層の高さは 30mm×4層=120mmである。一次形状係数は 13.7、二次形状係数は 10.8 である。

$$S_1 = \frac{B}{t} \quad (1) \quad S_2 = \frac{b}{h} \quad (2)$$

B: ゴム層の断面積(mm²)

t: ゴム 1 層の側面積(mm²)

b: ゴム層の 1 辺の長さ(mm)

h: 全ゴム層厚さ(mm)

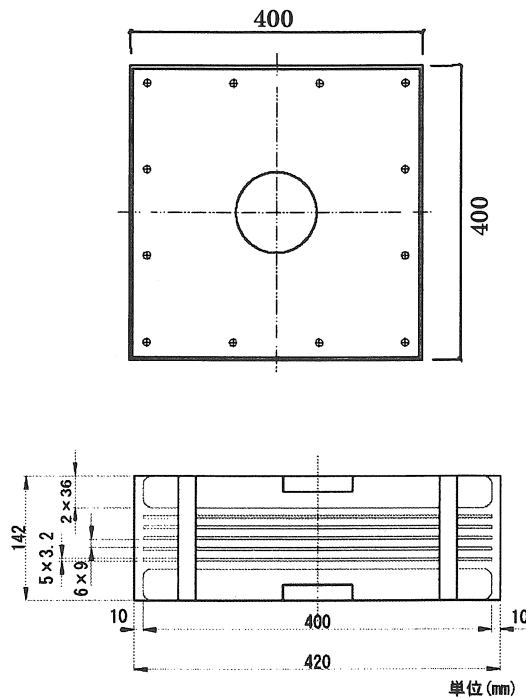


図- 1 水平力分散ゴム支承

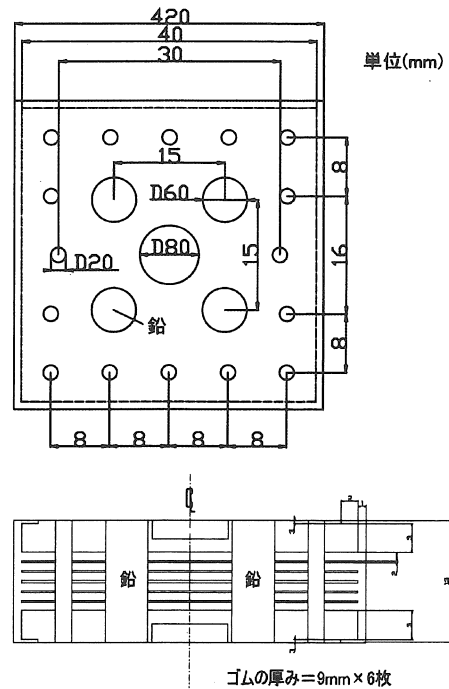


図-2 鉛プラグ入り積層ゴム支承

2.3 実験装置

安定性能試験、耐久性能試験に使用する実験装置の全体図を写真 1 に示す。過去に行われた実験ではベアリングを有するリニアールを用いた載荷装置が使用されていたが、動的実験において予期しない過大な荷重のためベアリングの破損が何度かあり、今回のような摩擦の非常に少ないシステムを採用した。鉛直方向力は 750kN 油圧ジャッキ 4 基をフレームの四隅に取り付け、これに三角形フレームを介して載荷している。

下部構造物は H 鋼、チャンネル鋼で製作した土台に関節部品を連結し、上部構造物との関節部品同士を PC 鋼棒で連結する。供試体はこの上部構造物と下部構造物との間に挟みこんでボルトで連結し、左右の三角形フレーム同士はバラバラの方向を向かないように L 鋼で連結した。

水平力は MTS 社製 1000kN 動的アクチュエータ 1 基を使用した。鉛直方向は荷重制御とし、水平方向の動的繰り返しは変位制御により載荷している。各部材交点のヒンジには摩擦の少ない市販のベアリングユニットが組み込まれている。

この実験装置の作動原理は、約半世紀前にアメリカ・リーハイ大学で開発された Gravity Simulator と呼ばれる周知の原理で特に目新しいものではなく、図 1 に示すように A 点に水平荷重が作用し A' 点に移動するとき、B 点は斜め下方に、C 点は斜め上方に移動し、メカニズムによって A-A' 点は水平に移動する。実際にはわずかに誤差がでるが、工学上無視しうる程度に押さえることができる。今回の装置では±300mm の水平

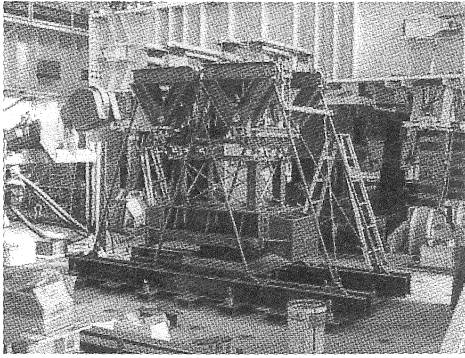


写真-1 実験装置全体図

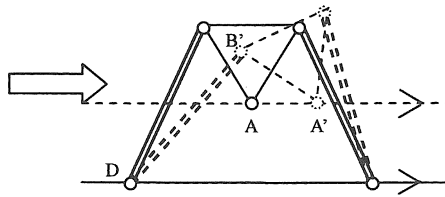


図-3 実験装置作動原理

移動に対して上下方向の誤差は0.2mm以下であるように設計されている⁴⁾。

また基本特性試験には耐震実験センターの門型フレームに4400kN油圧ジャッキを水平方向に左右2本ずつ計4本。鉛直方向に4本配置した荷重装置を使用する。

3. 実験方法

3.1 安定性性能試験

(1) 面圧依存性実験

支承に作用する鉛直反力の変動に対するせん断剛性、等価剛性、等価減衰定数の変化を確認する。sin波の周波数を0.5Hz一定として、94.8mm(せん断ひずみ±175%)振幅で面圧3.0、6.0、9.0、12.0N/mm²各11回の繰り返し荷重を行う。各面圧試験のインターバルは8時間とする。

表-2 面圧依存性試験一覧

荷重平均面圧	3.0、6.0、9.0、12.0(N/mm ²)
水平加振変位	±175%(±94.5mm)
水平加振周期	2.0秒
水平加振回数	3回(分散沓) 11回(LRB)
試験インターバル	各試験ごとに8時間程度以上
測定値	各面圧でのせん断剛性または等価剛性、等価減衰定数

(2) 周期依存性実験:

地震時の周期の違いによるせん断剛性、等価剛性、等価減衰定数を確認する。面圧を6N/mm²に一定として、

振幅94.5mm(せん断ひずみ±175%)で使用したsin波の周期は3.0、2.0、1.0、0.8秒で各11サイクル繰り返し荷重を行う。各周波数試験のインターバルは8時間とした。

表-3 周期依存性試験一覧

荷重平均面圧	6.0(N/mm ²)
水平加振変位	±175%(±94.5mm)
水平加振周期	0.8、1.0、2.0、3.0秒
水平加振回数	3回(分散沓) 11回(LRB)
試験インターバル	各試験ごとに8時間程度以上
測定値	各面圧でのせん断剛性または等価剛性・等価減衰定数

3.2 耐久性能試験

(1) せん断疲労試験

常時の温度変化による桁伸縮の影響により繰り返されるせん断変形に対して、圧縮ばね定数、せん断剛性、等価剛性、等価減衰定数の安定性を検証する試験を行う。

せん断疲労試験条件として、鉛直面圧12N/mm²一定とする。水平加振変位は70%であり、水平加振周期は180秒である。また、水平加振回数は5000回で、初期及び1000回ごとに1.5N/mm²から設計最大反力相当の荷重までの鉛直荷重を3回行い、3回目の荷重から圧縮ばね定数を算出し、周波数0.5Hzで変位±175%の繰り返し実験を行い、せん断剛性、等価剛性、等価減衰定数を測定する。1000回ごとに行う試験後、せん断疲労を再開するまでの時間は8時間程度あけることとする。

表-4 せん断疲労試験一覧

荷重平均面圧	12.0(N/mm ²)
水平加振変位	±70.0%(±37.8mm)
水平加振周期	180秒
水平加振回数	5000回
測定値	初期及び1000回ごとに圧縮ばね定数、等価剛性、等価減衰定数を測定する。1000回ごとに行う測定の終了後は発熱の影響を避けるために8時間程度以上空けた後加振を再開する。

3.3 基本特性実験

(1) 圧縮ばね定数、圧縮変位試験

支承の圧縮ばね定数および設計反力に対する支承の鉛直変位量を確認する。

圧縮ばね定数試験は1.5N/mm²から設計最大反力相当の荷重まで圧縮荷重を3回行い、3回目の荷重から1.5N/mm²~6.0N/mm²での圧縮ばね定数K_{vd}を算定する。

圧縮変位試験は設計最大反力までの圧縮荷重を 3 回行い、面圧 0.5N/mm² 程度を圧縮変位の原点として、3 回目の照査荷重時の圧縮変位を測定する。

表-5 圧縮ばね定数試験一覧

载荷平均面圧	1.5~6.0 (N/mm ²)
鉛直加振回数	3回
測定値	1.5N/mm ² (2370kN)~6.0 N/mm ² (9460kN)での圧縮ばね定数

表-6 圧縮変位試験一覧

载荷平均面圧	0.5N/mm ² 程度の圧縮荷重の変位を原点とし、設計最大反力相当の圧縮荷重を載荷
鉛直加振回数	3回
測定値	面圧0.5N/mm ² 程度を圧縮変位の原点として、3回目の照査荷重時の圧縮変位

(2) 圧縮せん断実験

地震時における反力分散ゴム支承のせん断剛性及び免震支承の等価剛性、等価減衰定数を確認する試験を行う。

設計死荷重反力相当荷重一定として周波数 0.5Hz でせん断ひずみ±175%に相当する変位 210mm の繰り返し実験を行う。繰り返し回数は 11 回であり、2 回から 11 回までの 10 測定による平均値を等価剛性、および等価減衰定数を算出する。

表-7 圧縮せん断試験一覧

载荷平均面圧	設計死荷重反力相当
水平加振変位	±175%
水平加振周期	2.0秒
水平加振回数	11回
測定値	LRB : 2回から11回までの10測定による平均値を等価剛性・等価減衰定数とする

(3) せん断変形性能試験

ゴム支承の持つ、ゴム材料の伸び性能、ゴムと鋼板との接着性能等の限界を確認する。

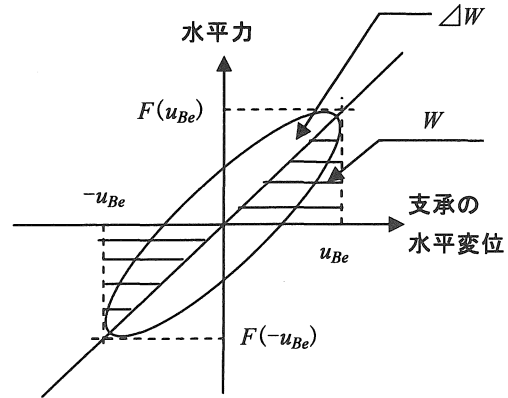
6.0 N/mm² 面圧相当荷重一定として、片押しで水平載荷する。せん断変形量はゴム支承の破断までの破断変位を確認し、その時の荷重を測定する。

表-8 せん断変形性能試験一覧

载荷平均面圧	設計死荷重反力相当
測定	せん断変形量及び水平力

3-4 各実験における値の算出

せん断剛性、等価剛性、等価減衰定数は図-4 に示す式(3)、(4)より算出する。せん断ばね定数については鉛直荷重の履歴曲線の 3 回目より以下の図-5 に示す式(5)より、圧縮変位量は図-6 より算出する。



$$K_B = \frac{F(u_{Be}) - F(-u_{Be})}{2u_{Be}} \quad (3) \quad h_B = \frac{\Delta W}{2\pi W} \quad (4)$$

K_B : 支承のせん断剛性または等価剛性 (kN/mm)

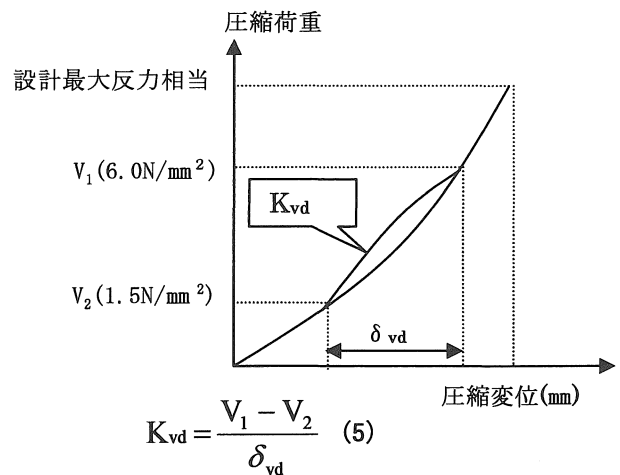
h_B : 支承の等価減衰定数

$F(u)$: 支承に水平変位 u を与えるのに必要な水平力 (kN)

W : 支承の弾性エネルギーで、図に示す三角形の面積 (kN・mm)

ΔW : 支承が吸収するエネルギーの合計で、上図に示す水平変位と水平荷重の履歴曲線の面積 (kN・mm)

図-4 せん断剛性、等価剛性、等価減衰定数の算出式



$$K_{vd} = \frac{V_1 - V_2}{\delta_{vd}} \quad (5)$$

図-5 圧縮ばね定数 K_{vd} の算出方法

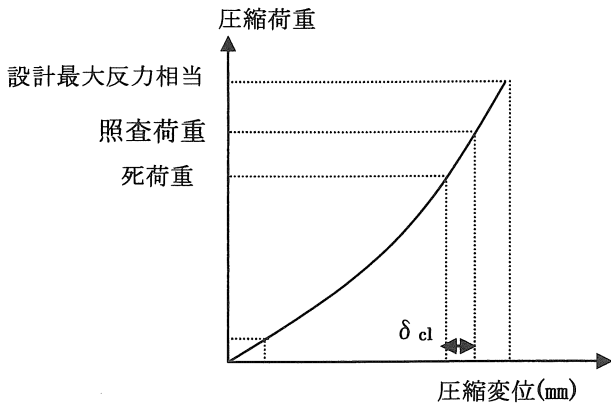
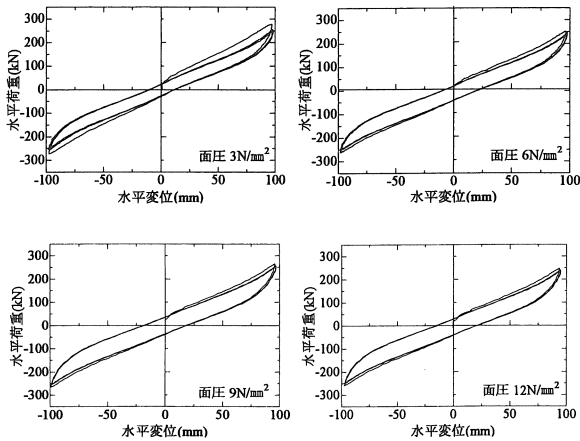


図-6 圧縮変位量 δ_{c1} の算出方法

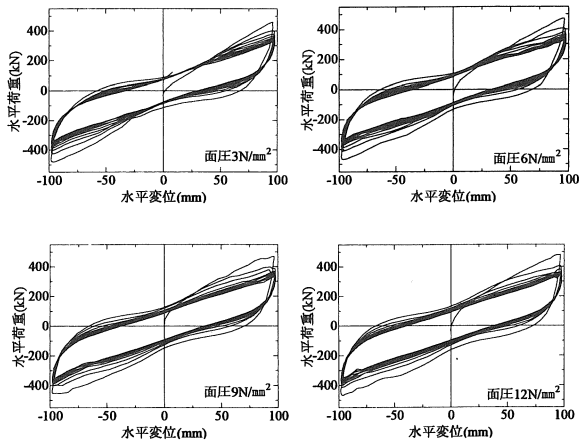
4. 実験結果

4.1 面圧依存性試験

分散沓、LRB に対する面圧依存性試験で得られた変位-荷重履歴曲線の例を図-7 に示す。



(a) 分散沓



(b) LRB

図-7 面圧依存性試験、変位-荷重履歴曲線

つぎに、図-7 に示した履歴曲線より、(a)の分散沓は3回目の値から、(b)のLRBは2回目~11回目の平均値より式(3)を用いて各面圧におけるせん断剛性および等価剛性を、また式(4)より等価減衰定数を算出する。面圧依存性試験から得られた結果を図-8、9 および表-9 に示す。

表-9 面圧依存試験における各値の算出結果

	平均載荷面圧 (N/mm ²)	3	6	9	12
分散沓	せん断剛性 (kN/mm)	2.63	2.53	2.61	2.54
	等価減衰定数 (%)	6.85	7.93	8.90	8.90
LRB	せん断剛性 (kN/mm)	3.57	3.51	3.59	3.62
	等価減衰定数 (%)	16.3	18.0	18.4	18.8

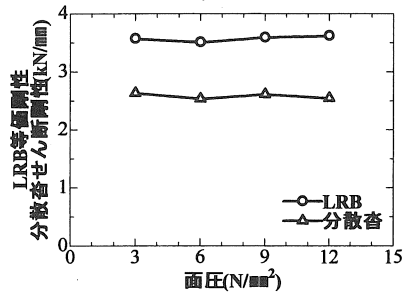


図-8 面圧-せん断剛性および等価剛性

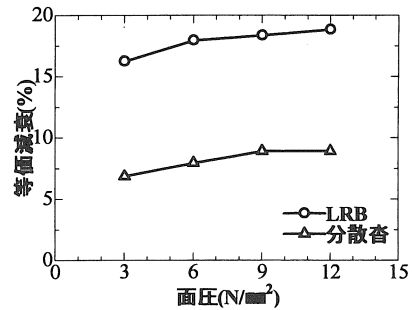
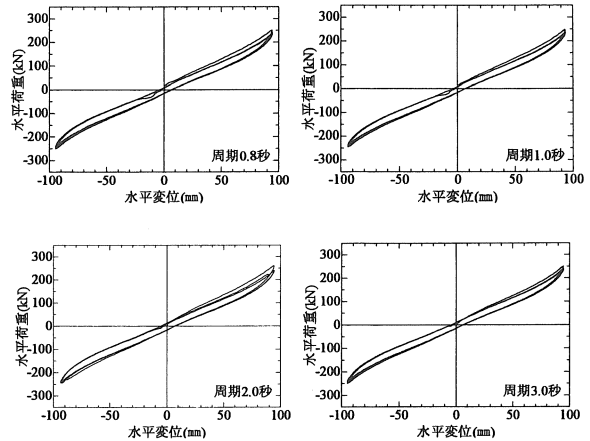
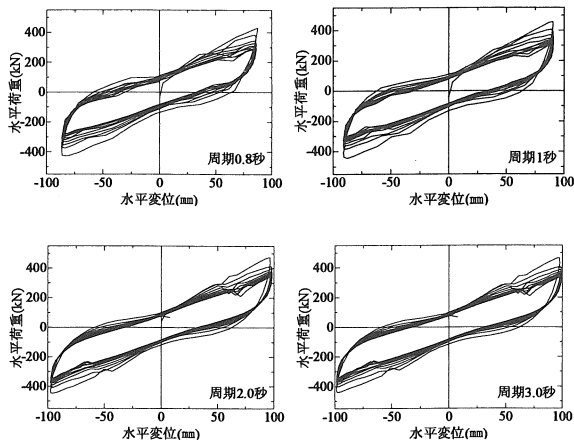


図-9 面圧-等価減衰定数



(a) 分散沓

図-10 周期依存試験 変位-荷重履歴曲線



(b) LRB

図-10 周期依存試験 変位-荷重履歴曲線

4.2 周期依存試験

以下に分散沓、LRB で各周期において水平加振変位 ±175% で周期依存性試験を行った結果、得られた履歴曲線の代表例を図-10 に示す。同図より各周期におけるせん断剛性および等価剛性、等価減衰定数を算出した。その結果を図-11、12 に、また一覧を表-10 に示す。

表-10 周期依存試験における各値の算出結果

	周期(秒)				
	0.8	1.0	2.0	3.0	
分散沓	せん断剛性(kN/mm)	2.52	2.50	2.55	2.51
	等価減衰定数(%)	3.30	3.40	3.60	3.50
LRB	せん断剛性(kN/mm)	3.57	3.59	3.64	3.54
	等価減衰定数(%)	20.1	18.8	16.9	16.9

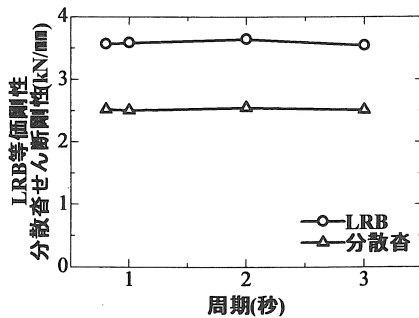


図-11 周期-せん断剛性および等価剛性

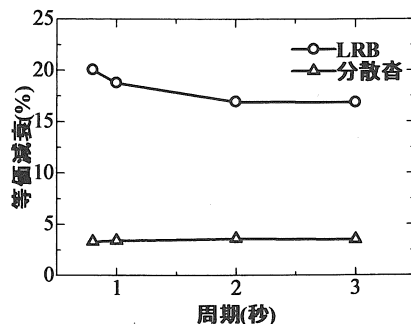
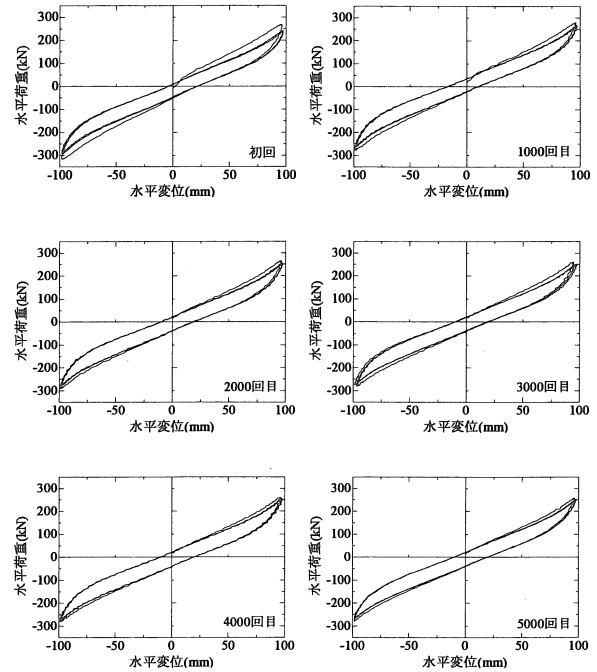


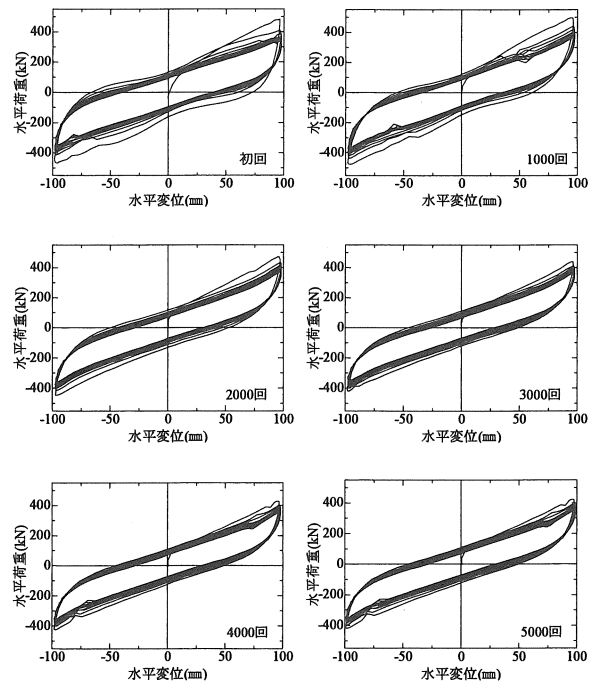
図-12 周期-等価減衰定数

4.3 せん断疲労試験

せん断疲労試験は供試体を 5000 回まで加振した。1000 回ごとに行う ±175%、周期 2 秒での履歴曲線を図-13 に示し、圧縮ばね定数を求めるために行った圧縮载荷の 3 回目の変位-荷重曲線を図-14 に示す。

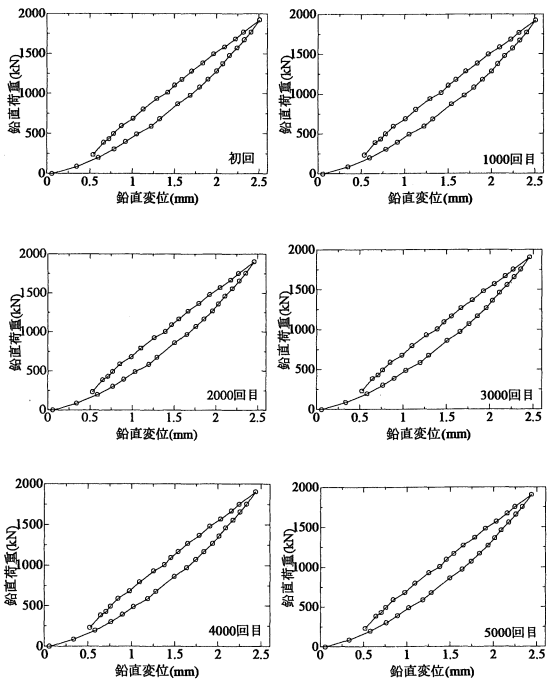


(a) 分散沓

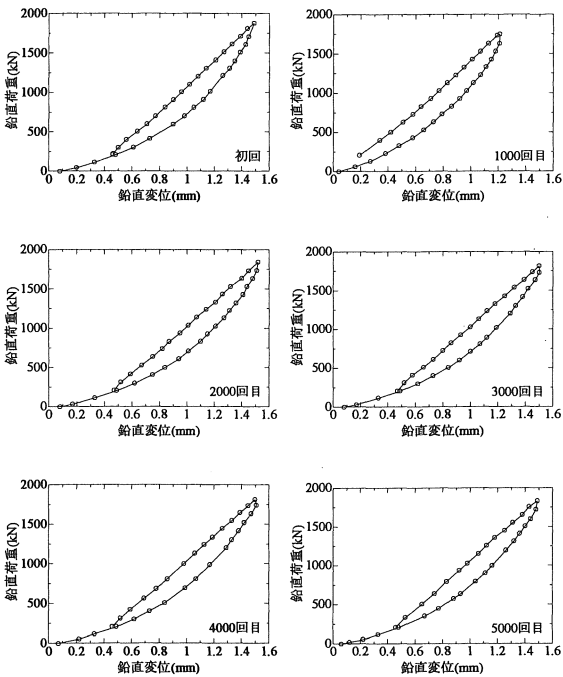


(b) LRB

図-13 せん断疲労試験、変位-荷重履歴曲線



(a) 分散沓



(b) LRB

図-14 せん断疲労試験、鉛直変位—鉛直荷重

図-13 に示した各履歴曲線 3 回目の数値と 2 回目～11 回目の平均より式(1)を用い、1000 回ごとのせん断剛性、等価剛性、等価減衰定数を算出した。また、図-14 の鉛直変位—鉛直荷重関係のグラフより、圧縮ばね定数を算出した。その結果を図-15、16、17 および表-11 に示す。

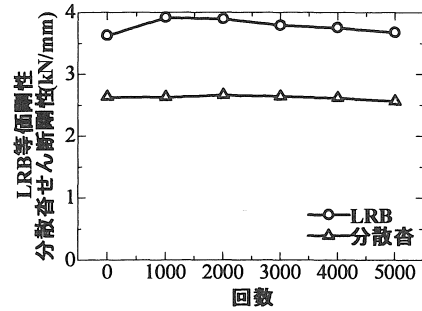


図-15 加振回数—せん断剛性および等価剛性

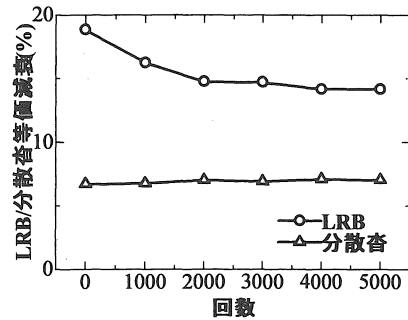


図-16 加振回数—等価減衰定数

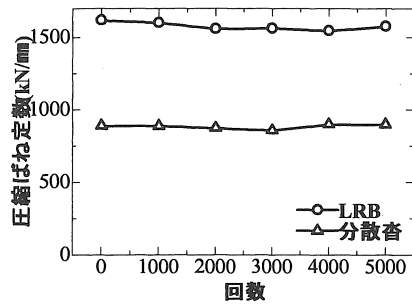


図-17 せん断疲労試験、加振回数—圧縮ばね定数

5. LRB 実大寸法供試体を使用した基本特性試験

5.1 圧縮ばね定数、圧縮変位試験

圧縮ばね定数実験では、鉛直力 12000kN までの 3 回繰り返し载荷を行った。その履歴曲線を図-18 に示す。第 3 回目の履歴曲線から圧縮ばね定数を算出し、その結果を図-19 および表-12 に示す。照査荷重から死荷重の間での圧縮変位量を表-13 に示す。

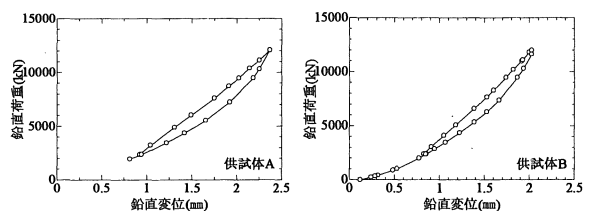


図-18 圧縮ばね定数試験、鉛直変位—鉛直荷重

表-11 せん断疲労試験における各値の算出結果

	回数	初期	1000 回	2000 回	3000 回	4000 回	5000 回
分散沓	せん断剛性(kN/mm)	2.63	2.63	2.66	2.64	2.61	2.56
	等価減衰定数(%)	6.72	6.78	7.03	6.93	7.11	7.05
	圧縮ばね定数(kN/mm)	889	886	872	857	899	897
LRB	等価剛性(kN/mm)	3.62	3.91	3.89	3.79	3.75	3.68
	等価減衰定数(%)	18.8	16.2	14.8	14.7	14.2	14.2
	圧縮ばね定数(kN/mm)	1618	1600	1558	1562	1545	1576

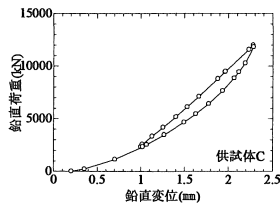


図-18 圧縮ばね定数試験、鉛直変位—鉛直荷重

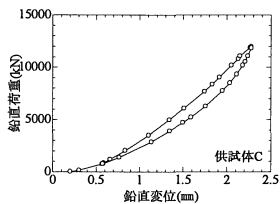
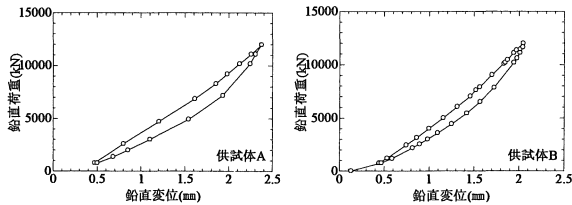


図-19 圧縮変位試験 鉛直変位—鉛直荷重

表-12 圧縮ばね定数一覧

	試験体A	試験体B	試験体C
圧縮ばね定数(kN/mm)	6446	7869	7395

表-13 圧縮変位試験による圧縮変位量

	試験体A	試験体B	試験体C
圧縮変位量(mm)	0.15	0.095	0.098

5.2 圧縮せん断試験

実大試験体に面圧 6N/mm² で鉛直荷重を載荷し、さらに設計有効水平変形ひずみ 175% 振幅でせん断変形させた。そこから得られた履歴曲線の代表例を図-20 に示し、等価剛性・等価減衰定数を表-14 に示す。

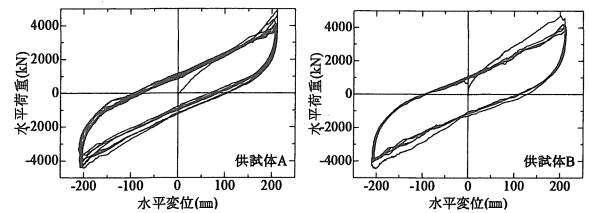


図-20 圧縮せん断試験、水平変位—水平荷重

表-14 等価剛性・等価減衰定数

	供試体A	供試体B	供試体C
等価剛性(kN/mm)	18.8	18.1	17.1
等価減衰定数(%)	17.1	18.2	19.2

5.3 せん断変形性能試験

水平破断試験装置に取り付けた実大試験体に面圧 6kN/mm² で鉛直荷重を載荷し、水平破断実験を行った。なお、実験は供試体 3 体の内、1 体目は水平変位 ±175% で一周加振してから破断実験に移り、2 体目 3 体目においては最初の ±175% での加振を省略し、直接破断試験を行った。そこから得られた履歴曲線を図-21 に示し、破断時の水平力、せん断ひずみを表-15 に示す。

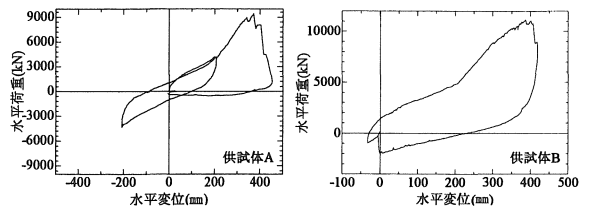


図-21 せん断変形性能試験 水平変位—水平荷重

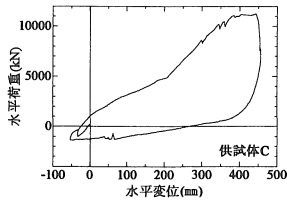


図-21 せん断変形性能試験 水平変位－水平荷重

表-15 破断時における水平力とせん断ひずみ

	試験体A	試験体B	試験体C
破断時水平力(kN)	9432	10803	11270
せん断ひずみ(%)	310	324	368

6. 結論

今回の実験は本学に大規模な実験設備があって可能となった。実験によって積層ゴム支承の特性に関する種々の貴重なデータを得ることが出来た。これらのデータは免震ゴム支承を有する構造物の地震時応答数値解析利用することが出来る。以下にその結果をまとめる。

(1) 面圧依存性試験

面圧依存性試験でのせん断剛性および等価剛性、等価減衰定数は分散率がそれぞれ平均 2.6kN/mm、8.1%で、LRB はそれぞれの平均が 3.6kN/mm、18%となった。

せん断剛性及び等価剛性は面圧が増加してもあまり変化せず、等価減衰定数は面圧が増加するとやや増加する傾向を示した(図-8、9)。

(2) 周期依存性試験

周期依存性試験でのせん断剛性および等価剛性・等価減衰定数は分散率が平均 2.5kN/mm、3.5%。LRB はそれぞれの平均がそれぞれ 3.6kN/mm、18%となった。

せん断剛性及び等価剛性は周期が大きくなってもほとんど変化していない(図-11、12)。等価減衰定数は分散率についてはほとんど変化が見られないが、LRB は周期が大きくなるにつれて減少傾向を示した。

(3) せん断疲労試験

せん断疲労試験で 1000 回ごとに計測したせん断剛性および等価剛性、等価減衰定数、圧縮ばね定数の平均は分散率がそれぞれ 2.6kN/mm、6.9%、880kN/mmであった。また LRB ではそれぞれ 3.8kN/mm、15%、1580kN/mmとなった。

せん断剛性および等価剛性と圧縮ばね定数については加振回数が増えてもほとんど変化が見られなかったが、LRB の等価減衰定数については加振回数が増えると減少傾向を示すことが確認された(図 15、16、17)。

(4) 圧縮ばね定数実験、圧縮変位実験

供試体 A、B、C における圧縮ばね定数はそれぞれ 6446kN/mm、7869kN/mm、7395kN/mm となり設計値 7172kN/mm \pm 30%以内であった。

圧縮変位の相対変形量それぞれ 0.15mm、0.095mm、0.098mm で、設計値 \pm 1mm 以内という規準値内であった。

(5) 圧縮せん断実験

供試体 A、B、C に対し履歴曲線から等価剛性および等価減衰定数の平均値を求めたところ、それぞれ 18.8kN/mm、18.4kN/mm、17.2kN/mm であり、等価剛性の規準値(設計値 17.66kN/mm \pm 10%以内)を満たしていた。等価減衰定数はそれぞれ 17.1%、18.2%、19.2%となり、規準値(設計値 15.7%以上)をみたしていた。

(6) せん断変形性能試験

供試体 A、B、C は実験履歴曲線から、破断せん断ひずみはいずれもおおむねせん断ひずみ 175%程度まで線形的に変化し、その後ハードニング現象が現れ、それぞれ 310%、334%、368%で破断した。これは規準値(設計値 300%以上)を満たしていた。なお、破断時水平力はそれぞれ 9432kN、10803kN、11270kN であった。

以上より安定性能試験、耐久性能試験においてはせん断剛性および等価剛性は面圧や周期、加振回数に対してほとんど影響を受けず、等価減衰定数はこれらに対して一定の影響を受けることが確認できた。また分散率と LRB の等価減衰定数を比較すると、LRB の平均値はそれぞれ 18%、18%、15%となるのに対し分散率はそれぞれ 8.1%、3.5%、6.9%と、倍以上の値を示していることから LRB 内部の鉛は高い減衰性能を有していることが確認できた。

また実大寸法供試体を使用しての基本特性試験においてはいずれの実験でも実験値は設計規準値の範囲内であることが確認できた。

今後、これらの実験値は積層ゴム支承の解析作業や設計においてより有効なものとするには実験値の信頼性を高める必要があり、更なる実験の継続とデータの蓄積が求められるものとする。

謝辞

本実験は愛知工業大学耐震実験センターで行われた。また、実験は愛知工業大学大学院博士課程の袁涌氏、愛知工業大学耐震実験センター技術指導員の鈴木博氏、愛知工業大学工学部土木工学科学生の荒木崇功君、清原雅俊君の多大な協力を得ることにより成り立った。その事をここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 道路橋示方書・動解説Ⅴ、耐震設計編 社団法人日本道路協会 平成 14 年 3 月
- 2) 免震用積層ゴムハンドブック 日本ゴム協会 理工図書株式会社 平成 14 年 1 月
- 3) 日本道路公団試験方法 ゴム支承の特性に関する実験方法 JHS418
- 4) 袁涌、青木徹彦 高減衰積層ゴム支承の動的特性に関する研究 愛知工業大学研究報 No40 pp197-pp206 平成 17 年

(受理 平成 18 年 3 月 18 日)