

高減衰積層ゴム支承の動的特性に関する実験的研究

Experimental Study of the Dynamic Behavior of High Damping Rubber Bearing

袁涌*・青木徹彦**・山本吉久***

Yong YUAN, Tetsuhiko AOKI and Yoshihisa YAMAMOTO

* 工修 愛知工業大学大学院 (〒470-0392 愛知県豊田市八草町八草 124 番地 7)

** 工博 愛知工業大学 都市環境学科 (〒470-0392 愛知県豊田市八草町八草 1247 番地)

*** 東海ゴム工業(株) 免震デバイス事業室 技術課 (〒485-8550 小牧市東三丁目 1 番地)

High-damping rubber isolators (HDR isolators) have become to be generally used for bridges as effective devices to enhance the seismic resistance as well as lead rubber isolators (LRB). However, the dynamic characteristics of the HDR have not always been clarified so far because of its scatter nature and the lack of reliable test data. In this study, new type HDR isolators are tested dynamically in several different conditions. As a result, the relationship between the equivalent stiffness, damping constant and number of cycles as well as the magnitude of shear strain. The difference by the order of test giving the magnitude of shear strain is also discussed.

Keywords: rubber isolators, high damping, equivalent stiffness, equivalent damping constant, dynamic test

キーワード: 免震ゴム, 高減衰, 等価剛性, 等価減衰定数, 動的実験

1. はじめに

兵庫県南部地震以後、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導入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、地震力を軽減するために極めて有効な方法の1つと考えられている¹⁾。

従来行われた試験結果を基に免震ゴムの様々な特性を集大成したものに文献2)があり、現段階で全体的傾向を知る上で貴重な設計資料として役立てられている。しかしそこで述べられた免震ゴムの特性のほとんどは免震ゴム製作会社の技術資料に基づくものや、数少ない公表された論文によるデータに基づくもので、必ずしも信頼性が高いとはいえない。中には最近の実験結果と異なる危険側の記述もある。例えば高減衰ゴムでは水平終局特性は400%以上であるとしているが、土木構造物で用いられる大型の免震ゴム支承ではいくつかの実験で破断時せん断変形が350%を越えるものは稀である。したがって信頼性の高い設計資料とするためにはさらに多く

の実験データの蓄積が必要であるといえる。その他の現在までに提案された様々な各種依存性試験に基づく定数や、提案式等も実験条件等が明解な公表された研究成果に基づくものは少なく、できるだけ多くの信頼しうる実験結果を公表することが求められている。

免震ゴム支承に関連した他の既往の研究としては、吉田ら³⁾および藤野ら⁴⁾の免震積層ゴム支承の復元力特性についての研究、川島ら⁵⁾⁶⁾⁷⁾⁸⁾の免震橋の非線形地震応答特性についての研究、また家村ら⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾の鉛プラグ入り積層ゴム支承を有する橋梁モデルに対してサブストラクチャー・ハイブリッド実験などがある。

従来の構造材料であるコンクリート、鋼材料に比べると、免震ゴム支承の特性は個々の製品によってもかなりばらつくといわれている。これはゴム材料の主成分である天然ゴムが農産物であり、産地、気候等の変動を受けやすく、また加硫等の製造工程でも多くのばらつき要因が入るためと思われる。

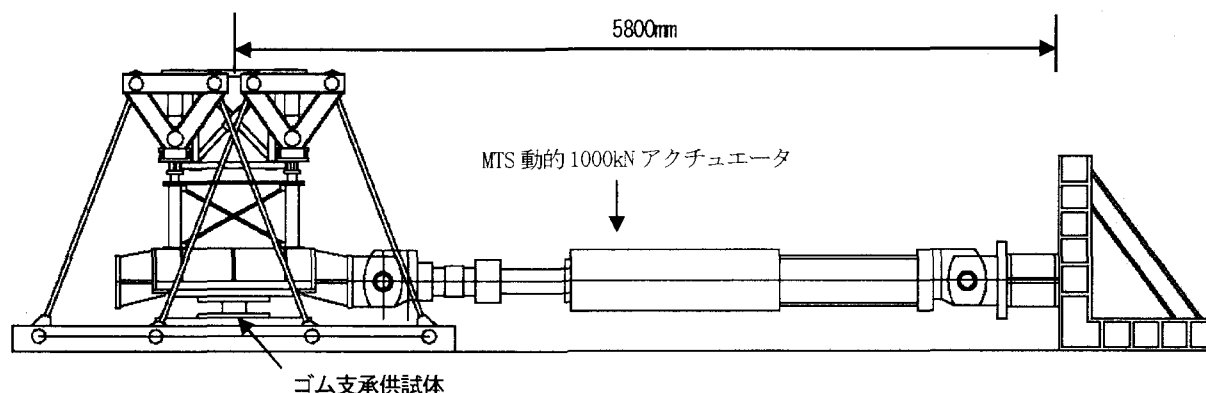


図1 実験装置概略図

また試験方法の違いによっても動的性能に変化が現れる。したがって免震ゴム支承を有する高速道路等の免震ゴム支承を用いた構造物の耐震安全性を向上させるためには、できるだけ多くの信頼しうるデータを蓄積し、これらの動的特性を様々な角度から調べておく必要がある。

本研究では最近市場に出始めた高減衰ゴム（HDR-s）を試験体を選び、その動的特性を明らかにする。HDR-sは近年開発された従来の高減衰ゴムより減衰力を高めたもので、超高減衰ゴムとも言われているが、高減衰ゴムの一種であるから、ここでは高減衰ゴムとして扱う。

高減衰積層ゴム支承は、ばね機能とともに高いエネルギー吸収機能をあわせ持つ積層ゴム支承である。そのため、弾性・粘性・塑性などが絡み合った極めて複雑な水平力学特性を示す。今日までにこの複雑な水平力学特性を示す公表された実験データは極めて少ない。よって研究の第1の目的はこの新しい高減衰ゴムをいくつかの試験条件下で動的実験を行いこれらの実測データを示すことである。

第2に等価剛性、等価減衰定数等の動的特性を調べる。特に周波数依存性（载荷の周波数による免震性能の変化）、ひずみ依存性（载荷ひずみの違いによる性能変化）を明らかにする。免震ゴムにはひずみ依存性があることが知られており²⁾、実験は通常、ひずみの小さい方から順に動的実験を行う。しかし実地震では、免震ゴムに作用するひずみの作用順序はランダムである。もし、通常とは逆の順序でひずみの大きい方から実験を行った場合、その試験結果と従来の試験方法による等価剛性、等価減衰定数等との値に差が生じれば、従来の試験方法に注意が必要となる。

そこで本研究では、ひずみ依存性試験において、ひずみの小さい方からの順方向試験と、ひずみの大きい方からの逆方

向試験とを行い、両者の耐震性能の差を調べる。

免震ゴム支承の同一ひずみでの载荷試験においては通常5～11回程度の繰り返し試験が行われ、1回目を除いたこれらの平均を代表値としてとること¹³⁾が行われているが、繰り返しによる等価剛性、等価減衰定数の変化が定量的に明らかになれば、免震橋梁の実地震に対応した、地震応答を数値解析を調べる際により信頼度の高い結果が得られる。そこで本研究では最後に、繰り返し回数と定数の変化の関係を明らかにする。

2. 実験計画および実験方法

2.1 载荷装置

繰り返し载荷実験装置を図1に示す。この装置は供試体上部構造の軽量化と摩擦力の低減を計って今回開発されたものである。当初はボールベアリングを有するリニアレールを用いた载荷装置を別試験で用いていたが、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、今回のような摩擦が少なく衝撃に強いシステムを採用した。

鉛直方向力として750kN油圧ジャッキ4基をフレームの四隅に取り付け、これを三角フレームを介して免震ゴム試験体に载荷している。水平力はMTS社製1000kN動的アクチュエータ1本を使用した。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载荷している。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。

この载荷装置の作動原理は、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い。図2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AA'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。

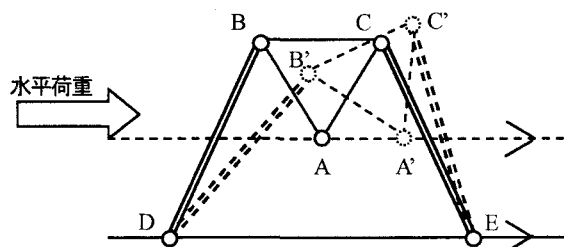


図2 水平移動载荷装置(Gravity simulator)の動作原理

2.2 試験体

本研究の実験供試体は、せん断弾性係数 G12 クラス(1.2 N/mm²)として配合設計された高減衰積層ゴム支承(HDR)である。供試体寸法は、平面形状□400mm×400mm×6層、ゴム層の高さは120mmである。

2.3 実験計画および载荷方法

ゴム支承供試体は4体用意し、すべて一定の鉛直荷重960kN(面圧6N/mm²)の下で、水平方向にsin波を変位制御により与える。この鉛直荷重の値は文献13)の規格の周期依存性試験に基づいて死荷重反力相当の荷重としたものである。周波数は0.1Hz、0.3Hz、0.5Hzを各1体ごとに与えた。これらの値も文献13)の周波数依存試験において、0.3Hz、0.5Hz、1.0Hz、1.25Hzとしているのを参考にし、実地震波による構造物の長周期化を考え、選んだものである。各周波数ごとに3種のせん断ひずみ100%、175%、250%を設定する。これらせん断ひずみの値は鉛直荷重と同様、同文献13)で基準値を175%としているのを採用し、その前後±75%を選んだものである。

同一のせん断ひずみごとに各6回繰り返し载荷を行った。それぞれのせん断ひずみ試験のインターバルは文献13)の基準では8時間程度以上置くこととなっているが、実験実施の都合上、24時間置くこととした。

つぎに新しい高減衰積層ゴム支承1体に、周期0.5Hzのsin波で、はじめに250%のひずみ試験の繰り返し载荷後、175%、100%と大きいひずみの順に試験を行う。これをここでは逆方

向試験と呼び、前者を順方向試験と呼ぶことにする。この場合もそれぞれのせん断ひずみ試験のインターバルは24時間とした。

3. 実験結果とその考察

3.1 等価剛性及び等価減衰定数の算出

実験で得られた履歴曲線の各サイクルごとに、等価剛性 K_{eq} 、等価減衰定数 h_{eq} を次式(1)、(2)により算出する¹⁾。

また、せん断ひずみ γ は式(3)によって算出した。図3に免震ゴム支承の水平方向力学特性の定義を示す。

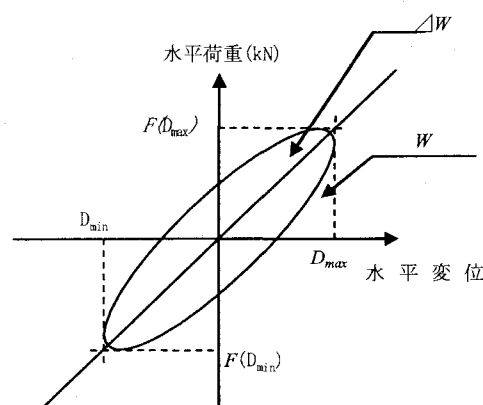


図3 免震ゴム支承水平方向力学特性の定義

$$K_{eq} = \frac{F_{(D_{max})} - F_{(D_{min})}}{D_{max} - D_{min}} \quad (1)$$

$$h_{eq} = \frac{\Delta W}{2\pi W} \quad (2)$$

$$\gamma = \frac{\text{水平変位}}{\text{ゴム総厚}} \times 100(\%) \quad (3)$$

K_{eq} : 等価剛性(kN/mm), h_{eq} : 等価減衰定数

γ : せん断ひずみ

$F_{D_{max}}, F_{D_{min}}$: 最大復元力、最小復元力

D_{max}, D_{min} : 最大変位、最小変位

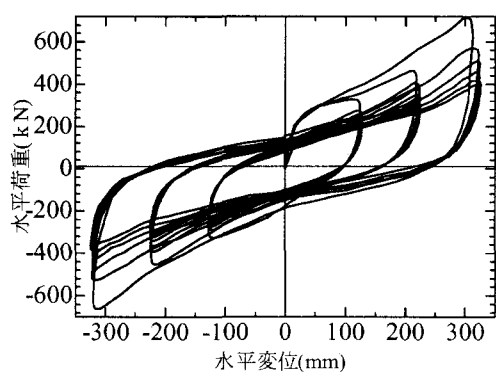
W : 弾性ひずみエネルギー

ΔW : 履歴吸収エネルギー

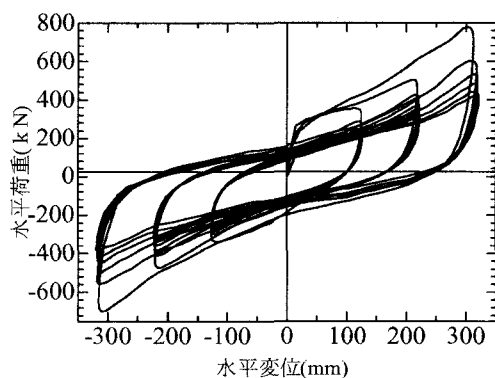
3.2 高減衰積層ゴム支承の载荷試験結果

実験により得られた水平荷重—水平変位の履歴曲線を各载荷周波数ごとに図4(a), (b), (c)に示す。

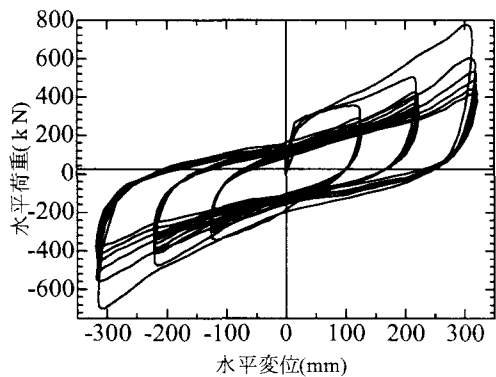
一般に高減衰積層ゴムは、ひずみ依存性を有し、低ひずみ領域では等価剛性が高く、高ひずみになるにつれて低くなるといわれている²⁾。等価減衰定数は等価剛性に比べ変化は小さい。高減衰積層ゴムは、周波数依存性も有し、周波数が高くなるほ



(a) 0.1Hz



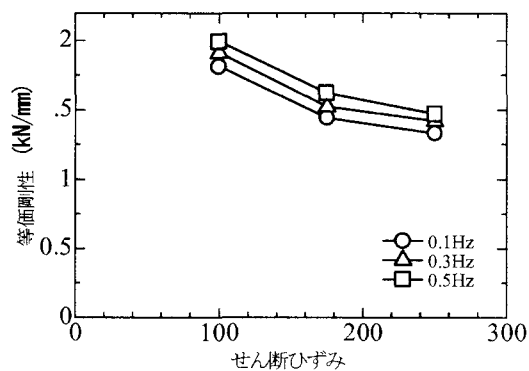
(c) 0.5Hz



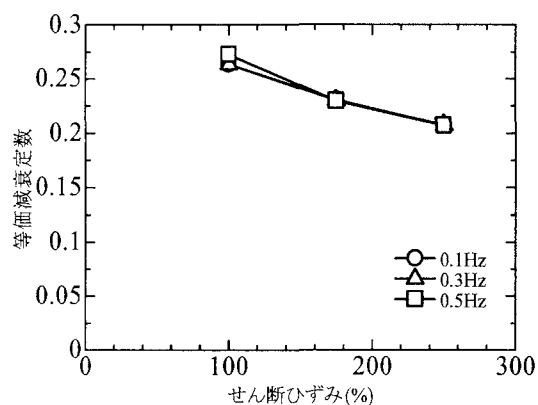
(b) 0.3Hz

図4 水平荷重—水平変位履歴曲線

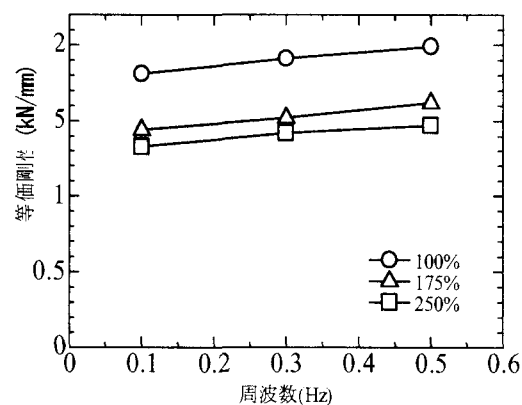
ど等価剛性、等価減衰定数とも増加する傾向にあるといわれている²⁾。ただし同文献で述べられている内容は、1つまたは1ロットの試験体から導き出された企業の技術資料に基づく結果であり、さらに同文献にも述べられているように、「これらの特性はゴム材料の配合や硬度によってその影響を受ける」とあり、必ずしも一般的な傾向を与えるものではない。



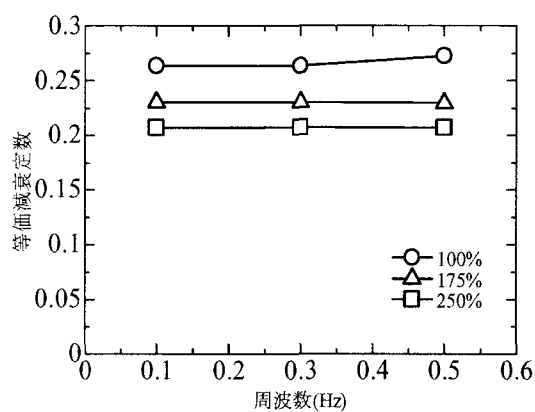
(a) 等価剛性—せん断ひずみ



(a) 減衰定数—せん断ひずみ



(b) 等価剛性—周波数関係



(b) 減衰定数—周波数関係

図5 等価剛性とせん断ひずみ、周波数関係

図6 等価減衰定数とせん断ひずみ、周波数関係

したがって後述の本研究結果も、文献 12) と同じ結果となるとはいえず、多くの実験データの集積によって今後より一般的特性が明らかになると思われる。今回の実験に対しては図 4 に示す履歴曲線より式(1)、(2)を用いて等価剛性及び等価減衰定数を算出し、第 2 回目から第 6 回目までの平均を求め、せん断ひずみおよび周波数との関係を求めた。結果は図 5 および図 6 に示すようになった。図 5(a) よりせん断ひずみが大きくなると等価剛性は低くなり、せん断ひずみ 175% で約 12.5% 低下し、175% から 250% の間では約 6% 低下した。同図 (b) より周波数が高くなると等価剛性は全体的にほぼ同じ割合で大きくなり、周波数 0.1Hz 増加するごとに平均 0.042 (kN/mm) 増加を示した。これらはいずれも前記の一般的傾向と同じであるが、ここではより明確に定量的性質を明らかにした。

図 6(a), (b) に等価減衰定数の変化を示す。同図(a)に示すように、せん断ひずみが大きくなると等価減衰定数は小さくなり、せん断変形量が 75% 増加するごとに約 11% 低下している。同図(b) より周波数が高くなっても等価減衰定数はほとんど変化せず 0.1~0.5Hz の間では、周波数依存性は少ないといえる。

3.3 高減衰積層ゴム支承の順方向と逆方向実験結果

順方向実験の履歴曲線は先に示した図 4(c) のものと同じデータで、比較のために図 7(a) に再掲する。逆方向実験の履歴曲線は図 7(b) に示すようになった。両者の履歴曲線の比較より、順方向試験結果は、明らかに第 1 回目のループが 2 回目以降のループより目立って大きな水平荷重を示している。これは最大変位をこのゴム材料がはじめに経験するため、処女材料的な効果を現わしているものと思われる。

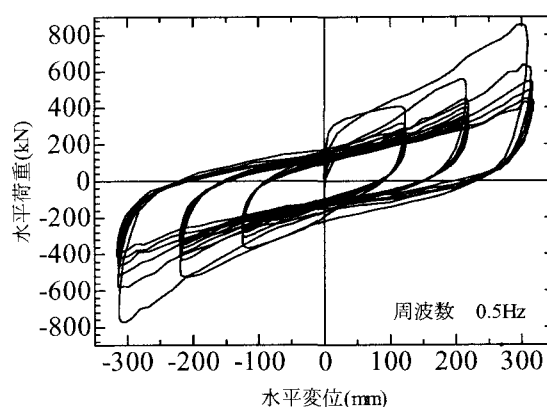
第 2 回目以降の平均値の比較は以下に述べる等価剛性と等価減衰定数により調べる。等価剛性と等価減衰定数は道路公団試験要項¹³⁾では第 2 回から 11 回までの動的繰り返し履歴曲線から求めた平均から計算するよう定められているが、ここでは後に図 9 で示すように、はじめの数回の繰り返しによる定数変化を見ることを主目的としているため、6 回の繰り返し試験を行い、はじめの 1 回を除いた 5 回目のデータから求めた値の平均から定数を定めた。これら定数の計算結果を図 8(a), (b) に示す。

図 8(a) の等価剛性のせん断ひずみ依存性結果では、順方向実験の方が逆方向試験結果より、100%, 175% 領域においてそれ

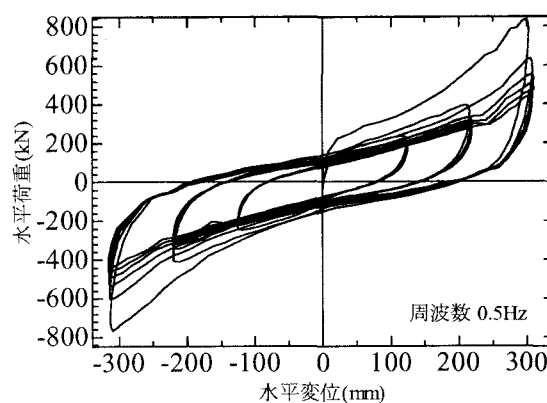
ぞれ約 25% および 19% 高い結果を示した。せん断ひずみ 250% 時では等価剛性はほぼ同じ値で、逆方向がわずかに高い。これは順方向試験では 250% に至るまでに多少ともひずみ履歴を経験しているが、逆方向試験ではそのような経験がなかったためと思われる。また逆方向試験で 175%, 100% せん断ひずみを与えた場合、すでにそれより大きな 250% ひずみを経験しているために等価剛性がかなり低下した結果を示しており、これらは予想された結果であった。

逆方向試験のように、はじめに大きなひずみ履歴を受けた場合、その後の小さなひずみ試験では、等価剛性が小さくなる場合があり、過去に受けた最大ひずみの影響は大きいといえる。実際の地震入力では、免震ゴムに入力されるひずみ大きさの順序は、順方向でも逆方向でもなくランダムであるから、諸定数は両者の中間に分布するものと思われる。

図 8(b) の等価減衰定数の比較では、250% ひずみ点を除いて等価減衰定数の差はあまり大きくない。せん断ひずみ 100% 点で逆方向実験の結果は順方向試験結果より約 8% 低下し、250% 点では同じく約 16% 低下している。

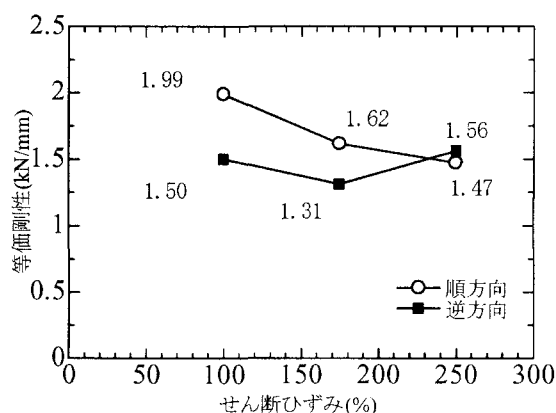


(a) 順方向実験の履歴曲線

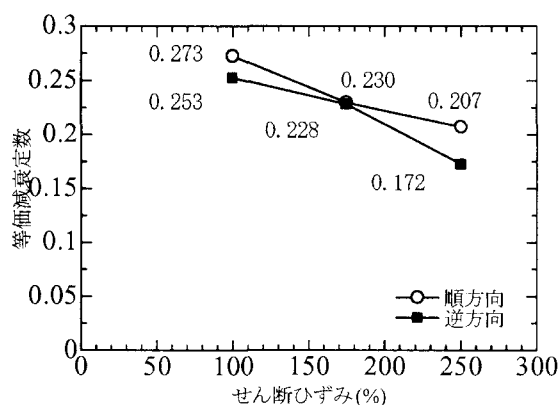


(b) 逆方向実験の履歴曲線

図 7 履歴曲線



(a) 等価剛性の比較



(b) 等価減衰定数の比較

図8 順方向と逆方向実験の等価剛性、等価減衰定数の比較

3.4 同一ひずみで繰り返し载荷したときの定数の変化

高減衰積層ゴムの水平履歴特性は、ゴム材料のひずみ履歴やエネルギー吸収による温度上昇等により大きく影響される。図4に示すように、同一ひずみで数回繰り返し载荷を行ったとき、履歴ループの幅が徐々に小さくなるのはこの現れである。以下では繰り返しによって等価剛性や等価減衰定数がどのように変化するかを図4(a)-(c)に示したデータを用いて調べる。はじめに各履歴ループの最大荷重値 $H_{\max}(i)$ を载荷回数 i ごとに図示すると図9(a)-(c)ようになった。

図9には明らかに規則性が見られ、縦軸の最大水平荷重の次のループとの差 S_H を順に対数でとると図10(a)-(c)に示すように、ほぼ直線関係が得られた。すなわち図9は等比級数の傾向を示し、図10の各点は等差級数の傾向を示している。図10に示したデータから最小自乗法により公比 r と初項 b を求めると、表1に示す結果となった。

図10から、各周波数ともせん断ひずみ250%ではすべての

点に直線性が見られるのに対し、175%、100%では第1回目の値が直線値よりやや大きな値となっており、せん断ひずみを経験するとゴム分子内になじみができて、規則性が表われるものと思われる。これは前述の図7の(a)と(b)の比較からも言える。

実地震波を用いた動的解析を行うとき、精度高い応答を得るために、はじめて経験する大きなひずみに対しては、平均値より大きな等価剛性と等価減衰定数を用いる必要がある。

第 n 回目の最大水平荷重は $H_{\max}(n)$ は以下式(5)、(6)から推定できる。

$$S_H(i) = H_{\max}(i) - H_{\max}(i+1) \quad (4)$$

$$H_{\max}(n) = H_{\max}(1) - b \times \left(\frac{1 - r^{(n-1)}}{1 - r} \right) \quad (n > 1) \quad (5)$$

$$b = H_{\max}(1) - H_{\max}(2) \quad (6)$$

免震ゴム支承に作用する実地震波の影響は、図4や図7に示したような一定せん断ひずみのもとでの繰り返しではなく、不規則であるから、式(4)が直接動的解析等に利用できるわけではない。動的解析に応用するためには、不規則波に対して水平荷重—変位関係を予測することが必要であるが、本研究結果はその初歩的段階として、免震ゴムの基本的性質を明らかにしたもので、このような基礎的研究の積み重ねによって次第に実用的に利用し得る研究成果が生まれるものと思われる。

図9、図11に繰り返し回数を無限回としたときの値を記号で示している。これは例えば図7に示したような水平荷重—変位繰り返し実験において、一定変位で繰り返した場合ループがどこまで小さくなるかの極限を示したもので、ループは限りなく小さくなるのではなく、等比級数的性質からある一定値に収束すること、その値は図9や図11に示した値となることを意味している。また式(6)を用いれば、6回程程度の繰り返し実験で、無限回繰り返し実験を行ったと同じ結果が予測でき、それを一つの基準値として利用できる可能性を示している。

無限回繰り返し時の安定したループの最大水平荷重は以下の式(7)から推定できる。

$$H_{\max}(\infty) = H_{\max}(1) - \frac{b}{1 - r} \quad (7)$$

$H_{\max}(1)$: 同一ひずみで初回のループ最大水平荷重
 $H_{\max}(\infty)$: 同一ひずみで無限回繰り返し時のループの最大水平荷重、
 r : 等比級数の公比、 b : 初項、 i : 回数

表1 水平荷重の級数の公比 r 、初項 b の数値

周波数	級数の公比、初項	せん断ひずみ		
		100%	175%	250%
0.1Hz	公比 r	0.679	0.735	0.617
	初項 b	49.26	64.88	156.09
0.3Hz	公比 r	0.658	0.726	0.613
	初項 b	65.74	84.05	181.37
0.5Hz	公比 r	0.631	0.678	0.564
	初項 b	85.37	111.32	229.05

図 11 (a)～(c) に等価剛性と繰り返し回数との関係を示す。これは前述のように各ループの最大水平荷重とほぼ同じ傾向にある。図 11 には明らかに規則性が見られ、縦軸の等価剛性の次のループとの差 S_k を対数でとると、図 12 (a)～(c) に示すように、ほぼ直線関係となる。すなわち図 12 の各点はほぼ等差級数的傾向を示すため、図 11 は等比級数の傾向を示している。同図に示したデータから最小自乗法により公比 r と初項 b を求めると、表 2 に示す結果となった。

第 n 回目の等価剛性は $K(n)$ は以下式 (9)、(10) から、また無限回繰り返し時の安定したループに対する等価剛性は以下式 (11) から推定できる。

$$S_k(i) = K(i) - K(i+1) \tag{8}$$

$$K(n) = K(1) - b \times \left(\frac{1 - r^{(n-1)}}{1 - r} \right) \quad (n > 1) \tag{9}$$

$$b = K(2) - K(1) \tag{10}$$

$$K(\infty) = K(1) - \frac{b}{1 - r} \tag{11}$$

$K(1)$: 同一ひずみで初回のループ等価剛性
 $K(\infty)$: 同一ひずみで無限回繰り返し時のループの等価剛性
 r : 等比級数の公比、 b : 初項、 i : 回数

4. まとめ

本研究は高減衰積層ゴム (HDR-s) を対象に動的繰り返し載

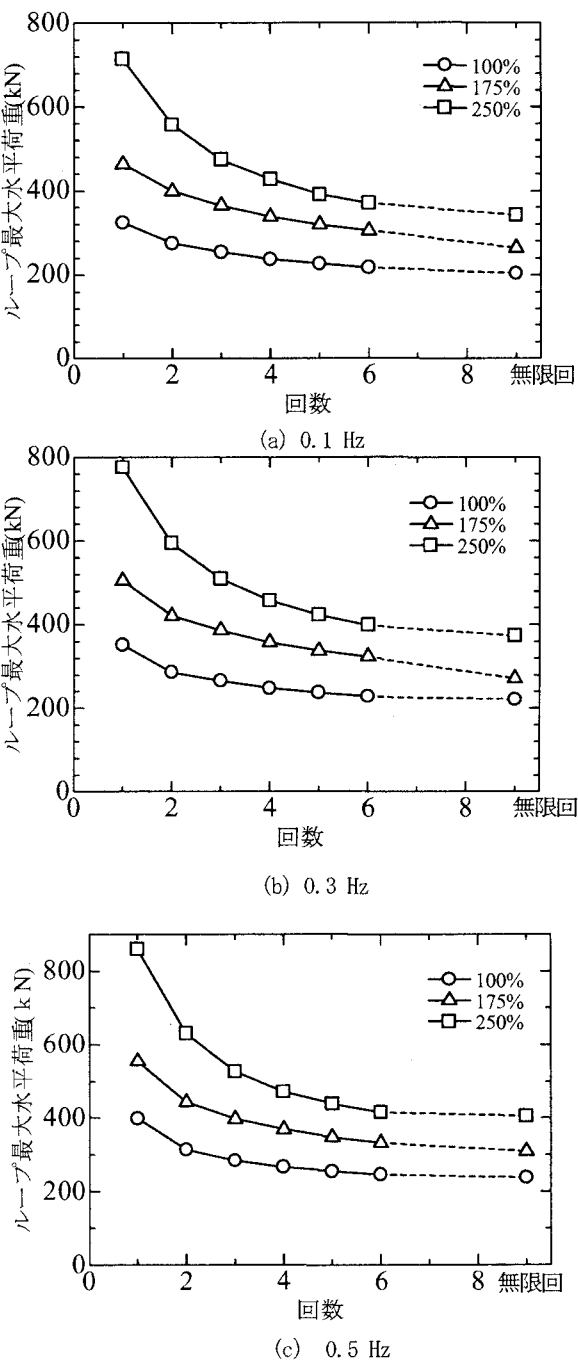
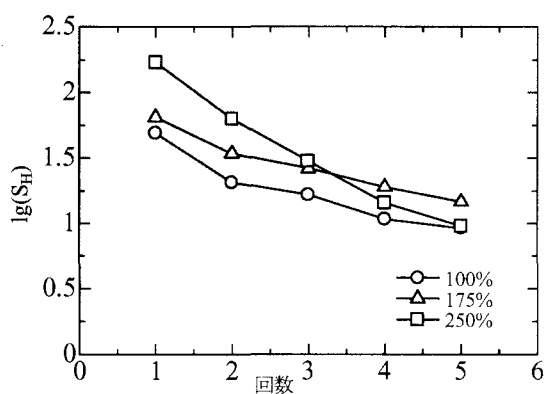


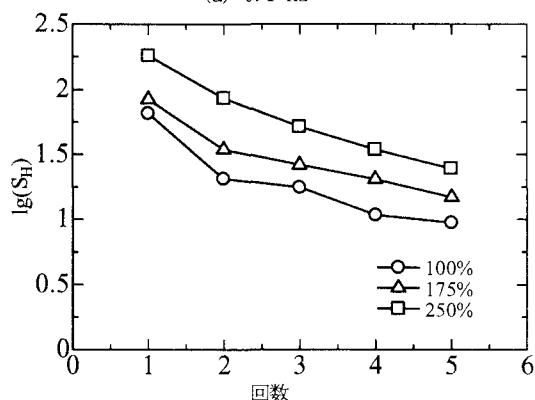
図 9 ループ最大水平荷重と繰り返し回数の関係

表2 等価剛性の級数の公比 r 、初項 b の数値

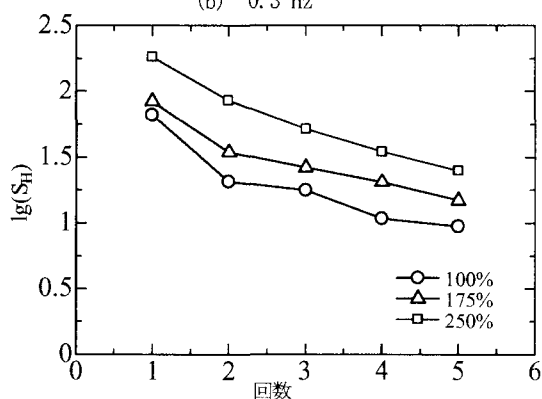
周波数	級数の公比、初項	せん断ひずみ		
		100%	175%	250%
0.1Hz	公比 r	0.670	0.712	0.617
	初項 b	0.41	0.30	0.52
0.3Hz	公比 r	0.636	0.671	0.613
	初項 b	0.54	0.40	0.60
0.5Hz	公比 r	0.584	0.629	0.564
	初項 b	0.71	0.53	0.76



(a) 0.1 Hz

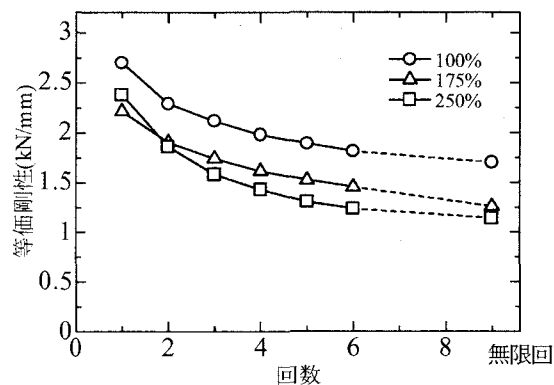


(b) 0.3 Hz

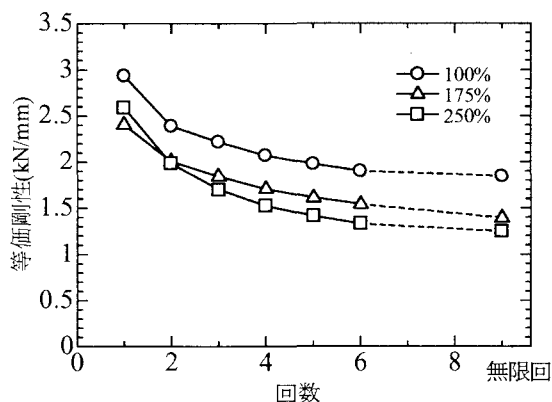


(c) 0.5 Hz

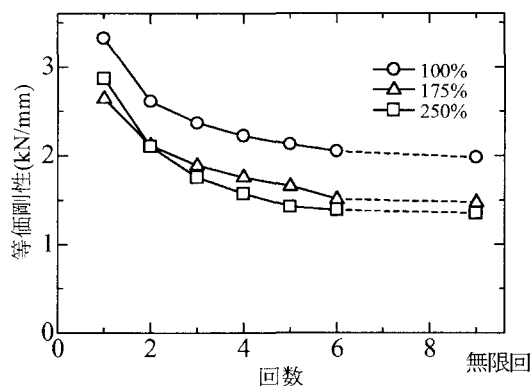
図10 最大水平荷重の差の対数と繰り返し回数との関係



(a) 0.1 Hz



(b) 0.3 Hz



(c) 0.5 Hz

図11 等価剛性と繰り返し回数の関係

荷重実験を行い、ひずみ依存性、周波数依存性などの特性の変化を明らかにした。今回の実験供試体は1つのロットから作られたものであり、さらに本論はじめにも述べたように、ゴム材料には鋼材料に比べ、比較的大きなばらつきを有するため、ここで述べた結論は必ずしも一般的性質を表すものではないが、このような研究の積み重ねによって、より信頼度の高い一般的性質と動的解析のための基礎資料が得られるものと思われる。

研究で得られた結論を以下にまとめる。

- (1) 等価剛性にはひずみ依存性がみられ、ひずみが100%から175%、250%へと大きくなると10~6%の低下を示した。また、周波数0.1Hzが増加すると剛性はほぼ一様に0.04kN/mm増加した。等価剛性は1.4から2.0kN/mmの間で変化した。
- (2) 等価減衰定数にもひずみ依存性がみられ、100%ひずみから75%増加することにはほぼ11%低下した。周波数依存性は見られなかった。等価減衰定数は0.20~0.27の間にあった。

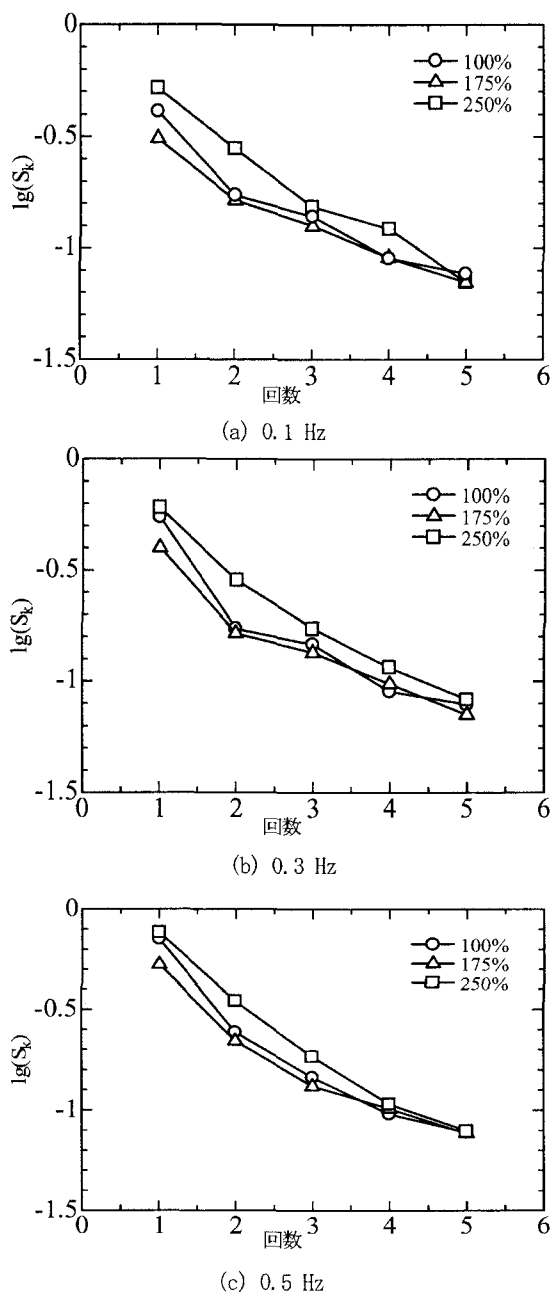


図 12 等価剛性の差の対数と回数

3) せん断ひずみを 100%から 250%まで増加させる順方向試験と逆にはじめに大きなひずみを経験させる逆方向試験を行ったところ、等価剛性では逆方向試験の方が 25%～19%低い値を示した。またはじめの 250%ひずみでの剛性値が最も大きな値を示し、順方向試験とは逆の傾向を示した。等価減衰定数は逆方向試験で 8～16%低下した。このように、はじめに大きなひずみ履歴を経験したゴム材料では、ひずみが少しずつ増加する状態とは定数に比較的大きな相違がみられた。

4) 同一ひずみで繰り返し载荷を行うが、繰り返し回数とルー

プ最大荷重および等価剛性との関係を調べた。これらの値は、等比級数的傾向がある事がわかった。そこで第 n 回目の値を近似的に求める式を提案した。動的解析においてこれらの予測値を使えばより実際に近い応答計算が可能になると思われる。

謝辞 本研究は愛知工業大学耐震実験センターで行った。実験供試体は東海ゴム工業(株)から、実験の際には本学大学院生青山和高君、学部生松田暁憲君の協力を得た。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 道路橋示方書・同解説の耐震設計編 (平成 14 年度改定)
日本道路協会
- 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, 2000 年 1 月, PP142-169
- 3) 阿部雅人, 吉田純司, 藤野陽三: 免震用積層ゴム支承の水平 2 方向を含む復元力特性とそのモデル化, 土木学会論文集 No. 696/I-58, pp. 125-144, 2002. 1
- 4) 吉田淳司, 阿部雅人, 藤野陽三: 高減衰ゴム材料の構成則, 土木学会論文集 No. 710/I-60, pp. 209-224, 2002. 7
- 5) 川島一彦, 庄司学, 斎藤淳: ハイブリットと実験による免震橋の非線形地震応答特性に関する検討, 土木学会論文集 No. 689/I-57, pp. 65-84, 2001. 10
- 6) 川島一彦, 永井政伸: 免震橋の荷重低減係数に及ぼすじん性率の設定方, 土木学会論文集 No. 483/I-55, pp. 235-250, 2001. 4
- 7) 川島一彦, 庄司学, 榊原泰造: 矩形断面鉄筋コンクリート橋脚の塑性ヒンジ長に関する実験的検討, 構造工学論文集, 土木学会, Vol. 46A, pp. 767-776, 2000. 3
- 8) 板橋美保, 川島一彦, 庄司学: 橋脚系塑性率と全体系塑性率の違いが設定地震力の算定に及ぼす影響, 土木学会論文集 No. , 619/I-47, pp. 131-144, 1999. 4
- 9) 家村浩和, 山田善一, 伊津野和行, 南荘淳, 野村武司, 渡邊典男: 強震下における免震橋のサブストラクチャー・ハイブリッド実験, 第 22 回地震工学研究発表会講演概要集, 土木学会, pp. 807-810, 1993. 5
- 10) 家村浩和, 五十嵐晃: 曲げ・変動軸力载荷条件下における免震支承の復元力特性, 第 1 回免震・制震コロキウム講演論

文集, pp305-312, 1996

- 11) 家村浩和: 性能設計に基づく損傷度制御免震・制震構造の開発, 研究成果報告書, 2002
- 12) 五十嵐晃, 家村浩和: 免震支承の 3 成分載荷試験, 橋梁と地下構造物の免震・制震, pp. 115-118, 1999 年 5 月
- 13) 日本道路公団試験方法 — ゴム支承の特性に関する試験方法 JHS 418 (2004 年)