

中心部に積層鋼板を有するゴム支承の耐震性能に関する実験的研究

Experimental study of the dynamic behavior of rubber bearing with piled steel plates

新木崇功*・中村太郎*・青木徹彦**・芝山繁宏***

Takanori ARAKI, Taro NAKAMURA, Tetsuhiko AOKI and Shigehiro SHIBAYAMA

* 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)

Rubber isolators have become increasingly popular for elevated bridges after Great Kobe Earthquake. Several issues have appeared, however, for using rubber bearings. For example, bridges with rubber bearings had come to cause vibration easily due to heavy vehicles, from which fatigue fracture had arose at the base of traffic sign poles and lighting poles as well as structural body. Vertical movement also caused low frequency vibration at the web plates of steel plate girders. As a device reducing the vertical vibration, new type rubber bearing with piled steel plates at the center of the bearing is developed. This rubber bearing supports vertical force by the piled steel plate and works as ordinal rubber bearing for the horizontal movement for big earthquake. In this paper, cyclic loading test and its seismic performance are described.

Keywords: rubber isolators, equivalent stiffness, equivalent damping constant, dynamic test, piled steel plate

キーワード: 免震ゴム, 等価剛性, 等価減衰定数, 耐震性能実験, 積層鋼板

1. はじめに

わが国では兵庫県南部地震以降, 免震ゴム支承の耐震安全性向上に対する有効性が認められ, 橋梁構造物に大量に使用されるようになった. しかし, その後約 10 年を経て, ゴム支承を用いることによる新たな問題も生じてきた. たとえば, 免震ゴム支承を有する橋梁では走行する大型自動車荷重により橋梁に振動が生じやすくなったことや, これにより標識柱や照明柱などの橋梁付属物の基部に疲労亀裂が発生し始めたこと, また鋼版桁橋では腹版の低周波振動も生じている. さらに橋梁の自重によるゴム支承の鉛直方向のクリープ変形による沈下に伴い, 橋桁端部の段差による新たな振動の発生が予測されている.

これに対し, 従来の鋼製支承に戻す動きや, 鋼製支承を用いながら, 水平方向のみ高減衰ゴム部品で抵抗させるといった機能分離型支承も出現している.

本研究では, 従来型ゴム支承の鉛直変位を抑えるために,

ゴム支承の中央部に穴を設け, その中に積層鋼板を挿入して鉛直荷重を受け持たせる新しいタイプのゴム支承を提案し, その耐震性能を実験的に明らかにしたものである. この支承では鉛直荷重は鋼板が支持するからクリープの問題はなく, 基本的に地震時のみゴム材料が水平力を分担する.

ところで, 従来から免震ゴム支承そのものに対する公表された研究成果は, 従来の鋼・コンクリート構造部材に比べ著しく少なく, 設計ではもっぱら企業内試験結果を集大成した資料を用いることが多い. 合理的な設計のためには学術的に行われた多くの実験データの公表が必要である. 本研究はそのひとつとなるものである.

免震ゴム支承に関連した既往の研究としては, 阿部ら¹⁾および吉田ら²⁾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³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾の免震橋の非線形地震応答特性についての研究がある. また著者⁷⁾らによる研究では, 最近開発された高減衰ゴム (HDR) の等価剛性, 等価減衰定数等の動的特性に

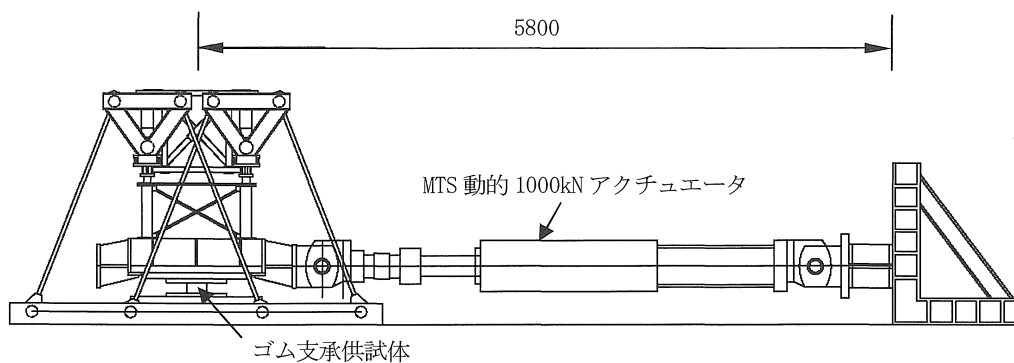


図-1 水平せん断繰り返し载荷試験装置概略図

関して、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）を実験的に明らかにしている。

本試験体のような新しいゴム材料と積層鋼板の複合的支承では、その耐震性能を明らかにする手段は実験的方法しかなく、また様々な現象に対する考察は现阶段では困難な場合が多い。本研究では研究の第一段階として、多くの実験的事実を社会に明らかにすることを目的とし、次の段階でこれらのより詳細な考察を加えるようにしたい。

2. 実験計画および実験方法

2.1 実験計画

本研究で使用する試験体は、せん断弾性係数 $G10 (1.0N/mm^2)$ のゴム材料を用いた超高減衰積層ゴム支承 (HDR-s) である。試験体寸法は、 $500mm \times 500mm \times$ (ゴム厚さ $20mm \times 6$ 層 = $120mm$)、および $400mm \times 400mm \times$ (ゴム厚さ $9mm \times 6$ 層 = $54mm$) の 2 種類であり、これらをそれぞれ Type-A, Type-B とする。

ゴムの中心部には $160 \times 160mm$ (type-A) , または $210 \times 160mm$ (type-B) の穴を設け、その中に積層鋼板を挿入してある。鋼板の寸法 $150 \times 150mm$ 、1 枚の厚さ $12mm$ (type-A)、または寸法 $200 \times 250mm$ 、一枚の厚さ $20mm$ (type-B) の鋼板 6 枚が挿入されている。積層鋼板には、二硫化モリブデンコート进行コーティングしてあり、鋼種は SM490A を用いる。Type-A には 2 種類あり、中央の穴に積層鋼板のみ挿入したものを Type-A1 とし、Type-A1 実験後、積層鋼板が内部ゴムを損傷させたため、これを改善するために積層鋼板を挿入した穴に生じる隙間を埋める対策を施したものを Type-A2 とする。対策に用い

表-1 試験体寸法緒元

供試体	外形寸法(mm)	ゴム層構成	積層鋼板寸法(mm)
Type-A	$520 \times 520 \times 208$	20mm×6層	$(150 \times 150 \times 12) \times 6$ 層
Type-B	$420 \times 420 \times 134$	9mm×6層	$(200 \times 150 \times 20) \times 6$ 層

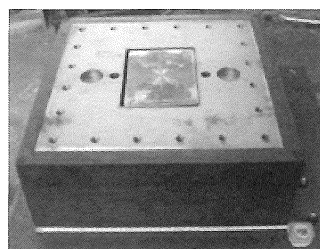


写真-1 実験供試体

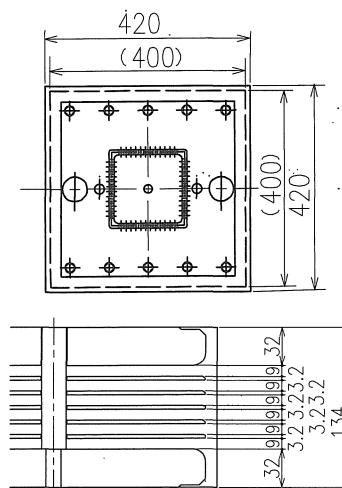


図-2 Type-A 試験体

た材料は、ピアノ線を芯とする $1mm \times 1mm \times$ 長さ $77mm$ のウレタン樹脂で、これを積層鋼板の周囲に配置した。試験体寸法緒元を表-1 に示す。

Type-A 試験体を写真-1 および寸法を図-2 に示す。

積層鋼板は上部鉛直荷重を直接受けるもので、基部鋼板に伝わって橋脚に直接伝達するものである。水平力が作用したとき、基本的には二硫化モリブデンコートにより摩擦を避け水平力に抵抗しない構造としている。

2.2 载荷装置

(1) 水平せん断繰り返し载荷試験装置

水平繰り返し载荷に用いた実験装置を図-1 および写真-1

2に示す。この装置については文献7)に記述されており、ここでは簡単に述べる。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載荷している。水平力はMTS社製1000kN動的アクチュエータ1本を使用した。鉛直方向は一定の鉛直荷重となるように荷重制御とし、水平方向の動的繰り返しは変位制御により載荷した。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おり、±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。

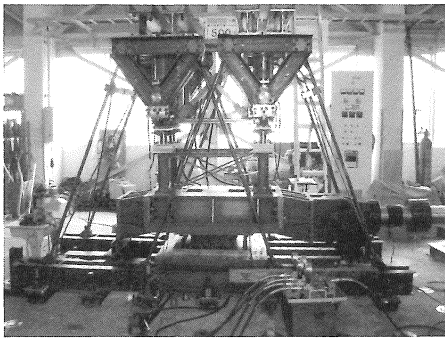


写真-2 水平せん断繰り返し載荷試験装置

(2) 鉛直繰り返し載荷試験装置

鉛直繰り返し載荷試験装置の概略図を図-3に示す。この装置は、鉛直荷重としてMTS社製1000kN動的アクチュエータを使用し、中央のピン部材により2倍の荷重2000kNを免震ゴム供試体に載荷することができる。水平力は1000kNアクチュエータを1基使用した。

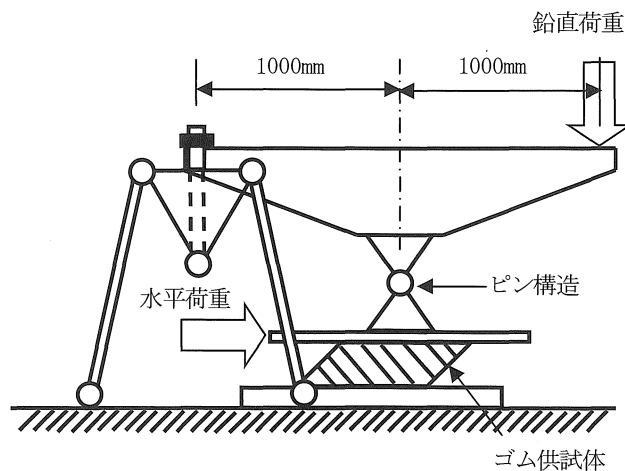


図-3 鉛直疲労繰り返し載荷試験装置

2.3 載荷方法

旧日本道路公団規格⁸⁾に基づき、前述の動的実験装置を用いて、せん断疲労耐久性試験、面圧依存性試験、周期依存性試験を行った。表-2に本研究で行ったすべての耐震性能試験の概要を示す。

(1) せん断断疲労耐久性試験

鉛直面圧を12.0N/mm²とし、水平方向にゴム純総厚の70%のSin波を与え、周期180秒として、5000回の水平繰り返し載荷を行う。試験体はType-A1およびA2を使用した。なお、初期及び1000回ごとに、特性試験としてせん断剛性試験と圧縮ばね定数試験を行う。

せん断剛性試験では、設計死荷重反力に相当する6.0N/mm²を一定として、周期2.0秒でせん断ひずみ175%に相当する変位の繰り返し実験を行う。繰り返し回数は11回である。圧縮ばね定数試験では、1.5N/mm²から設計最大反力に相当する12.5N/mm²までの圧縮載荷を3回行う。

(2) 鉛直疲労耐久性試験

ゴム試験体をせん断ひずみ70%に相当する変位で固定し、面圧5.5~12N/mm²の鉛直繰り返し載荷を200万回行う。試験体はType-A1およびA2を使用した。なお、初期および50万回ごとに、せん断疲労耐久性試験と同様の特性試験を行う。

(3) 面圧依存性試験

周期2.0秒のSin波を、振幅175%を一定として与え、面圧3.0, 6.0, 9.0, 12.0N/mm²ごとに11回の水平繰り返し載荷を行う。試験体はType-Bを使用した。

(4) 周期依存性試験

面圧6.0N/mm²を一定として、振幅175%に対する周期を1.0秒, 2.0秒, 3.0秒, 100秒としたSin波を使用し、高い周期から順に各11回の水平繰り返し載荷を行う。試験体はType-Bを使用した。

3. 実験結果

3.1 等価剛性、等価減衰定数および圧縮ばね定数の算出

実験で得られた履歴曲線をもとに、サイクルごとの等価剛性 K_B 、等価減衰定数 h_B および圧縮ばね定数を次式(1)、(2)、(3)により算出する⁹⁾。

$$K_B = \frac{F(u_{\max}) - F(u_{\min})}{u_{\max} - u_{\min}} \quad (1)$$

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

$$K_v = \frac{F(X_1) - F(X_2)}{X_1 - X_2} \quad (3)$$

ここで、 K_B : 等価剛性 (kN/mm), h_B : 等価減衰定数, K_v : 圧縮ばね定数 (kN/mm), $F(u_{max}), F(u_{min})$: 最大復元力, 最小復元力, u_{max}, u_{min} : 最大水平変位, 最小水平変位, W : 弾性ひずみエネルギー, ΔW : 履歴吸収エネルギー, $F(X_1), F(X_2)$: 最大鉛直荷重, 最小鉛直荷重, X_1, X_2 : 最大鉛直変位, 最小鉛直変位である (図-4, 図-5 参照).

(2) 面圧依存性試験

4 種類の面圧 (3.0, 6.0, 9.0, 12.0 N/mm²) で鉛直荷重を載荷し, せん断変形 175%となる水平繰り返し载荷を行った. Type-B 試験体の履歴曲線を図-8(a)~(d)に示す. 面圧が大きくなるにつれて微小振動の振幅が大きくなり, これが履歴曲線上にも現れている. これは内部の積層鋼板の摩擦によるものと考えられる.

表-2 耐震性能試験概要

項目	目的	試験方法	実験供試体
せん断疲労	桁の伸縮による繰返しの水平変位に対する等価剛性, 等価減衰定数, 圧縮ばね定数の変化を確認	面圧 6N/mm ² を与え, せん断ひずみ±70%を 5000 回与える. 1000 回毎に, 基本特性試験 (±175%) を実施	Type-A1 Type-A2
圧縮疲労	活荷重などによる繰返しの鉛直荷重疲労に対する等価剛性, 等価減衰定数, 圧縮ばね定数の変化を確認	せん断ひずみ 70%, 面圧 5.5~12N/mm ² を 200 万回与える. 50 万回毎に, 基本特性試験 (±175%) を実施	Type-A2
面圧依存性	鉛直荷重変化に対する等価剛性, 等価減衰定数の変化を確認	面圧 (3, 6, 9, 12)N/mm ² における圧縮せん断試験 (±175%)	Type-B
周期依存性	固有周期の変化に対する等価剛性, 等価減衰定数の変化を確認	周期 (1.0, 2.0, 3.0, 100) 秒における圧縮せん断試験 (±175%)	Type-B

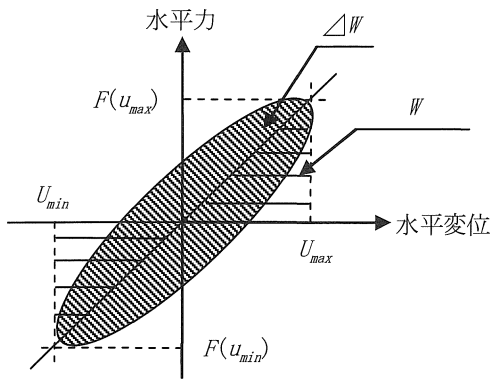


図-4 免震ゴム支承水平方向力学特性の定義

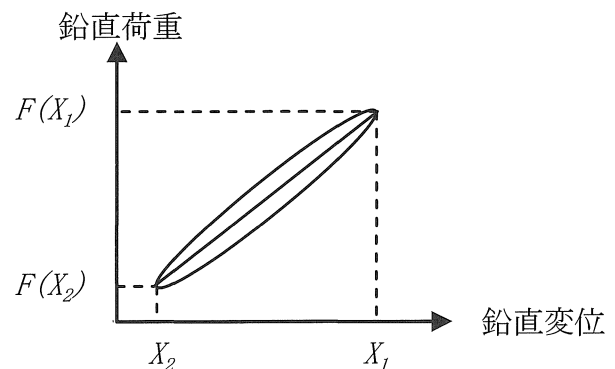


図-5 免震ゴム支承鉛直方向力学特性の定義

3.2 水平荷重-水平変位履歴曲線

各試験の水平繰り返し载荷試験により得られた, 水平荷重-水平変位履歴を以下の試験項目ごとに示す.

(1) せん断疲労耐久性試験(せん断剛性試験)

基本特性である等価剛性, 等価減衰定数を初期および 1000 回ごとに測定するために, 繰り返し载荷試験を行った. Type-A1 試験体の水平荷重-水平変位履歴曲線を図-6(a)~(f)に, Type-A2 試験体の水平荷重-水平変位履歴曲線を図-7(a)~(f)に示す.

(3) 周期依存性試験

面圧 6.0 N/mm²を一定とし, 4 種類の周期 (1.0 秒, 2.0 秒, 3.0 秒, 100 秒) で水平繰り返し载荷を行った. Type-B 試験体の履歴曲線を図-9(a)~(d)に示す. この履歴曲線も周期が小さく, 载荷速度が大きくなると微小振動が生じ, 履歴曲線上にもこれが現れている.

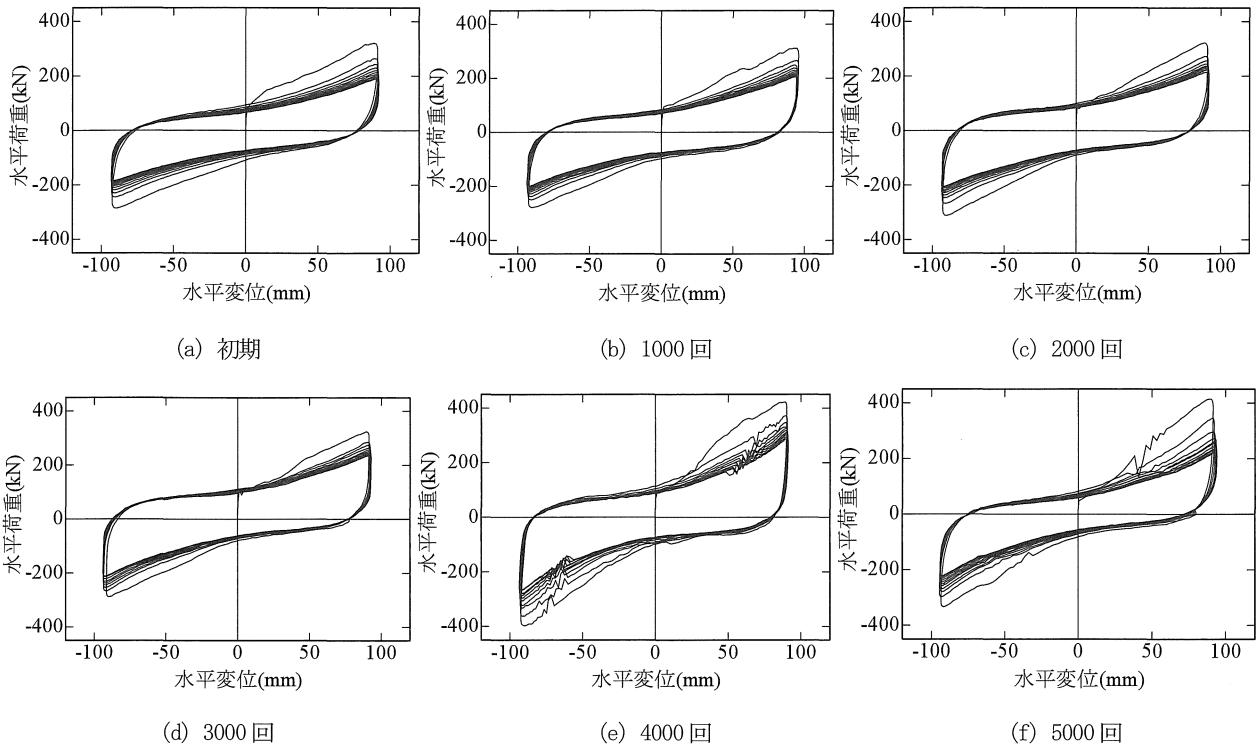
(4) 圧縮疲労耐久性試験(せん断剛性試験)

この試験は改良型の Type-A2 試験体についてのみ行った. 基本特性である等価剛性, 等価減衰定数を初期および 50 万回ごとに測定した. 水平荷重-水平変位履歴曲線を図-10(a)

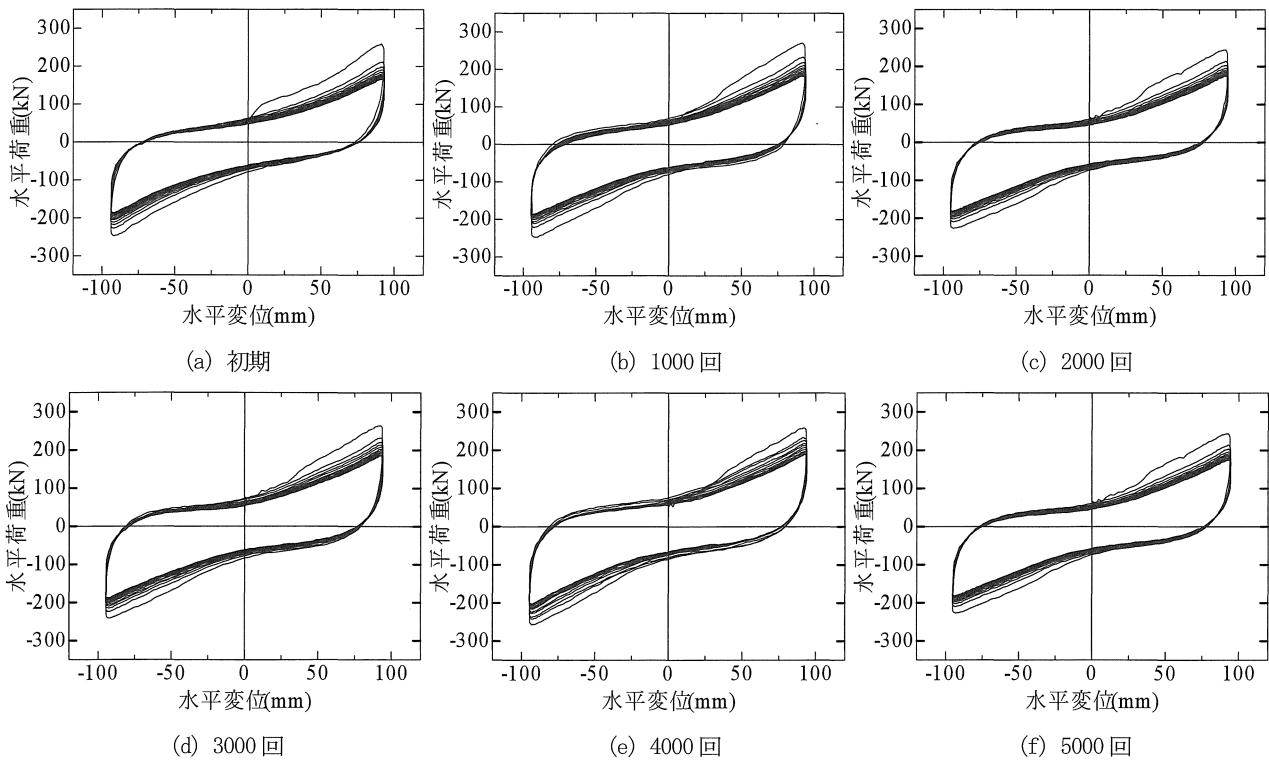
～(f)に示す。

3.3 鉛直荷重—鉛直変位履歴曲線

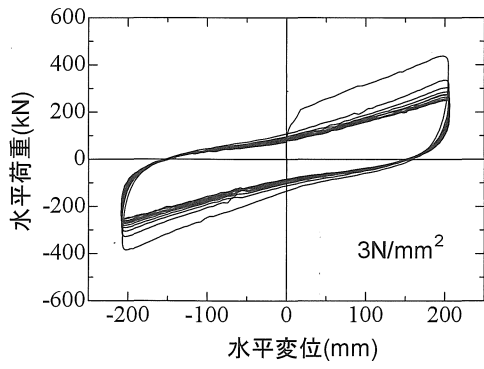
せん断疲労耐久性試験および鉛直疲労耐久性試験において、



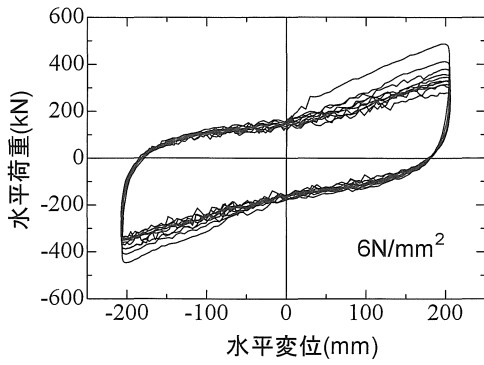
図—6 せん断繰返し試験(Type-A1)



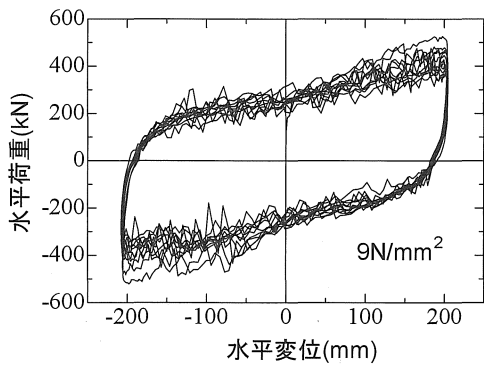
図—7 せん断繰返し試験(Type-A2)



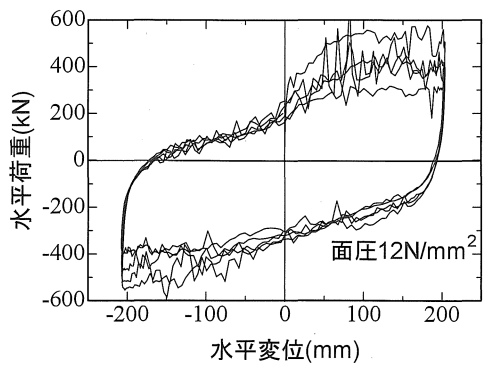
(a) 面压 3.0N/mm²



(b) 面压 6.0N/mm²

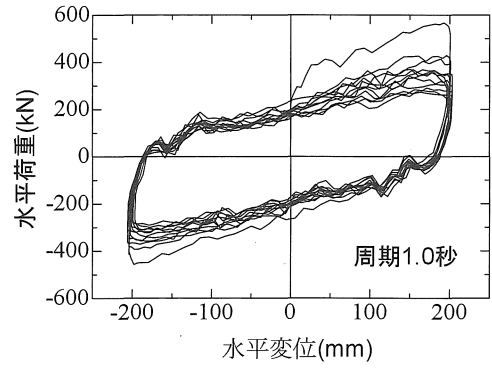


(c) 面压 9.0N/mm²

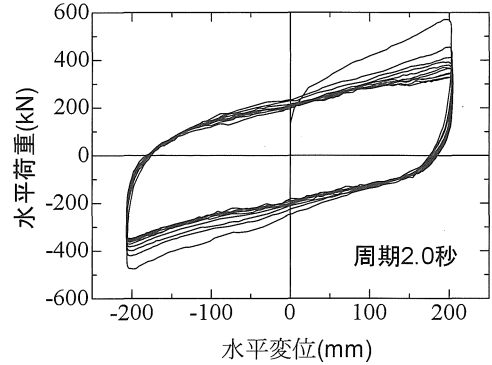


(d) 面压 12.0N/mm²

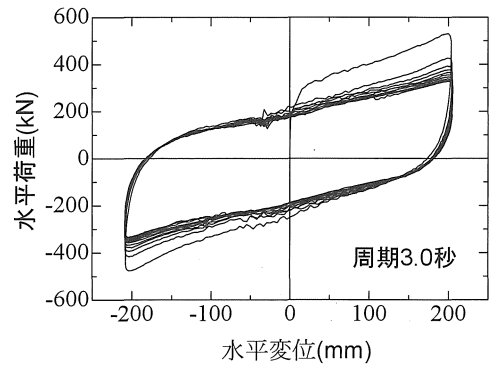
图—8 面压依存性試験



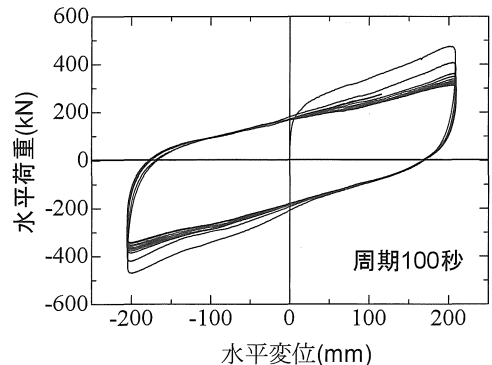
(a) 周期 1.0秒



(b) 周期 2.0秒



(c) 周期 3.0秒



(d) 周期 100秒

图—9 周期依存性試験

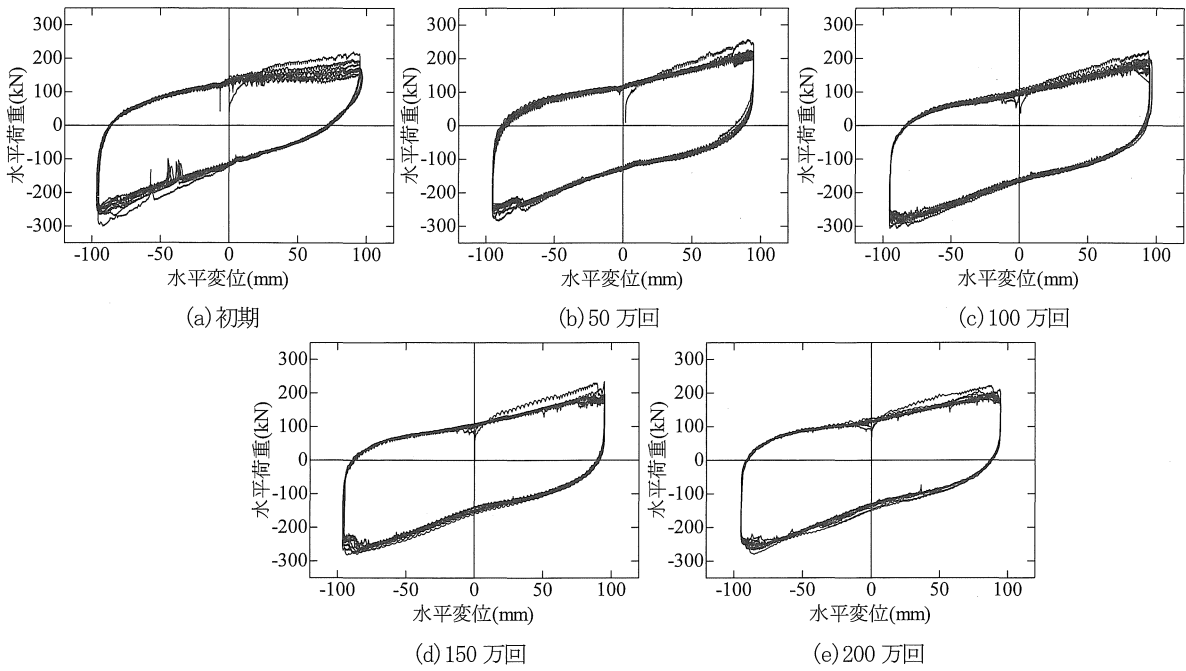


図-10 圧縮疲労耐久性試験 (Type-A2)

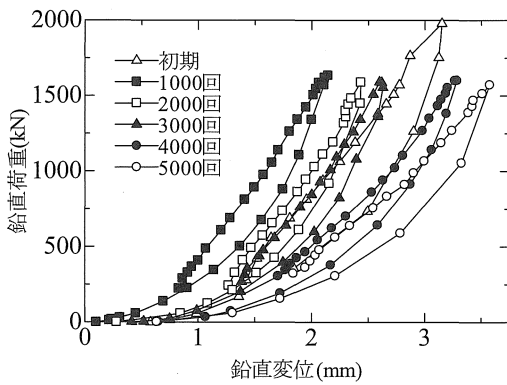


図-11 せん断疲労耐久性試験 (Type-A1)

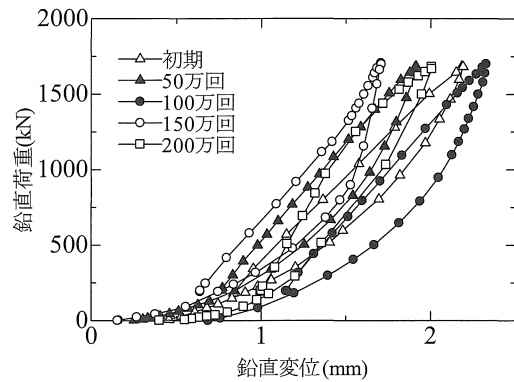


図-13 鉛直疲労耐久性試験 (Type-A2)

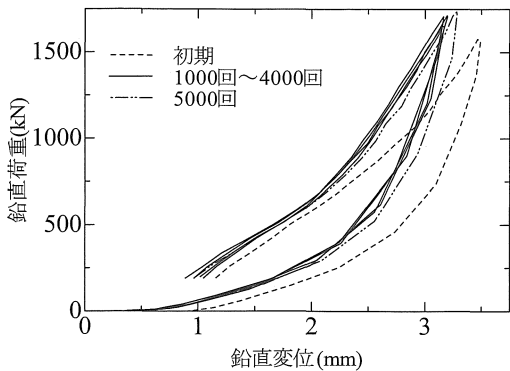


図-12 せん断疲労耐久性試験 (Type-A2)

基本特性である圧縮ばね定数を初期および 1000 回ごとに測定した。Type-A1 および Type-A2 試験体に対して得られた鉛直荷重-鉛直変位履歴曲線を図-11~図-13 に示す。なお、鉛

直疲労耐久性試験は Type-A2 試験体に対してのみ行った。

3.4 等価剛性, 等価減衰定数, 圧縮ばね定数

(1) せん断疲労耐久性試験

図-6, 図-7 に示した履歴曲線より, 式(1), 式(2)を用いて等価剛性, 等価減衰定数を算出した。また, 図-11, 図-12 に示した履歴曲線より, 式(3)を用いて圧縮ばね定数を算出した。

これらの数値と繰り返し回数との関係を図-14~図-16に示す。図-14, 図-15より, Type-A1試験体の等価剛性および等価減衰定数は繰り返し回数3000回までほぼ一定値を示したが, 等価剛性は3000回から4000回までの間に急に増加する傾向を示

した。これは4000回を越えたあたりからゴムに損傷がみられ、小さなゴム粒子が積層鋼板の間に入っていく、等価剛性は上昇、等価減衰定数は低下したと考えられる。一方、改良を施した Type-A2試験体では、ほぼ一定の等価剛性および等価減衰定数を示した。図-16より、Type-A1試験体の圧縮ばね定数は2000回まで増加していたが、それ以降、急速に低下した。一方、Type-A2試験体はほぼ一定の値を示した。これもゴム損傷の影響と考えられる。

以上のように、Type-A2試験体では、等価剛性、等価減衰定数、圧縮ばね定数は繰り返し回数に影響なく、ほぼ一定値を示した。

(2)鉛直疲労耐久性試験

図-10に示した履歴曲線より、式(1)、式(2)を用いて等価剛性、等価減衰定数を算出した。また、図-13に示した履歴曲線より、式(3)を用いて圧縮ばね定数を算出した。これらの諸数値と繰り返し回数との関係を図-17～図-19に示す。試験体は Type-A2試験体のみである。

図-17より、鉛直繰返し試験の等価剛性は、繰り返し回数50万回のみ平均値よりも約11%高い2.34kN/mmを示したが、それ以降は安定した等価剛性を示した。図-18より、鉛直繰返し試験の等価減衰定数は50万回から200万回までに約36%から44%へゆるやかに増加する傾向を示した。

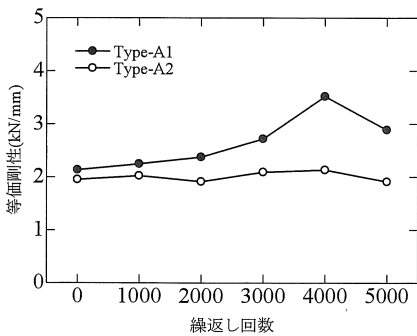


図-14 繰り返し回数と等価剛性の関係

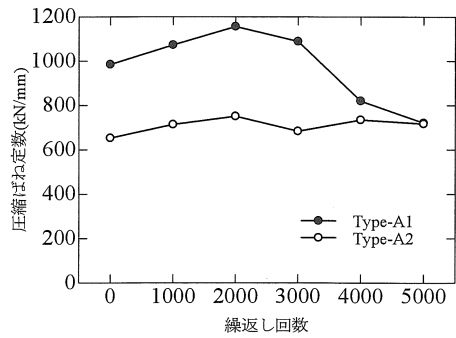


図-16 繰返し回数と圧縮ばね定数の関係

図-19より、鉛直繰返し試験の圧縮ばね定数は初期から200万回にかけて1105kN/mmから1474kN/mmへゆるやかに増加する傾向を示した。これは、鉛直繰返し回数および50万回ごとの特性試験により、中心部の積層鋼板の表面が徐々に損傷し、摩擦が増加したためと思われる。

(3)面圧依存性試験

図-8に示した履歴曲線より、式(1)、式(2)を用いて等価剛性、等価減衰定数を算出した。これらの値と面圧との関係を図-20および図-21に示す。試験体はType-Bのみである。

同図から、面圧の増加に従い、等価剛性および等価減衰定数が急速に増加していることがわかる。面圧 9N/mm²から12 N/mm²にかけて数値が突然低下したのは、ゴムの破損によるものと思われる。図中の破線は破損がないとしたときの予測

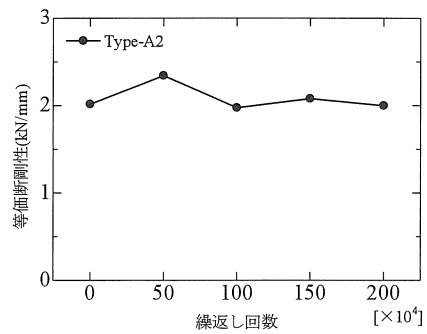


図-17 繰返し回数と等価剛性の関係

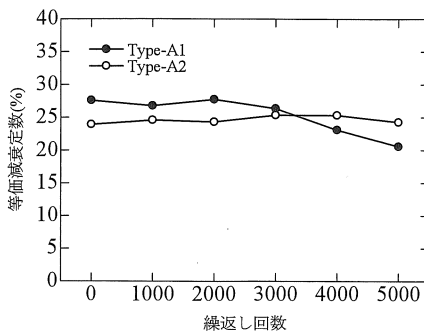


図-15 繰返し回数と等価減衰定数の関係

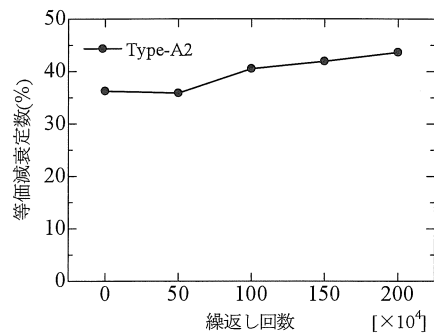


図-18 繰返し回数と等価減衰定数の関係

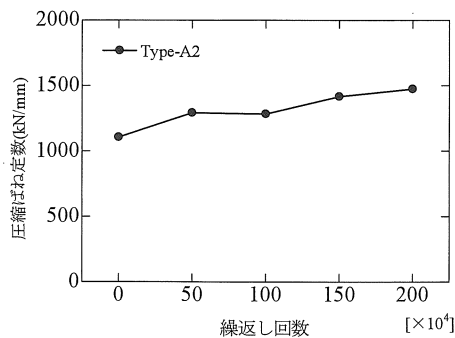


図-19 繰り返し回数と圧縮ばね定数の関係

である。Type-B 試験体も Type-A1 試験体と同様、内部ゴムの損傷を防ぐ対策は施されていない。

支承便覧によると、11, 11N/mm2 までは設計上問題ないとされているが、実験的事実は以上のものであった。

(4) 周期依存性試験

図-9 に示した履歴曲線より、式(1)、式(2)を用いた等価剛性、等価減衰定数を算出した。これらの値と周期との関係を図-21、図-22 に示す。各周期の試験は8時間の間を設けているが、長周期になるに従い、等価剛性、等価減衰定数ともに減少する傾向を示した。図中の破線は周期 100 秒における等価剛性、等価減衰定数である。

これらの値は本来履歴の影響をキャンセルすべく別試験体を用意して同周期で試験すべきであるが、参考までに同一試験体を利用したものである。

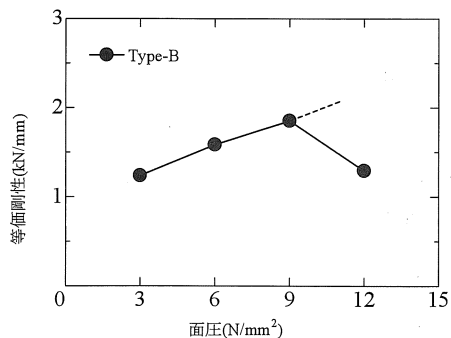


図-20 面圧と等価剛性の関係

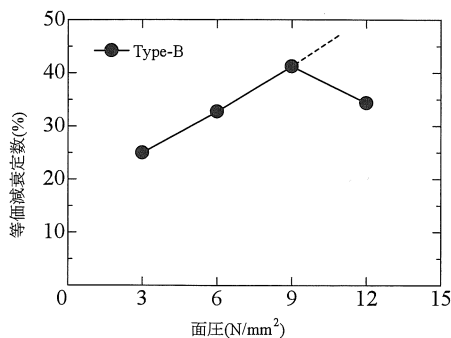


図-21 面圧と等価減衰定数の関係

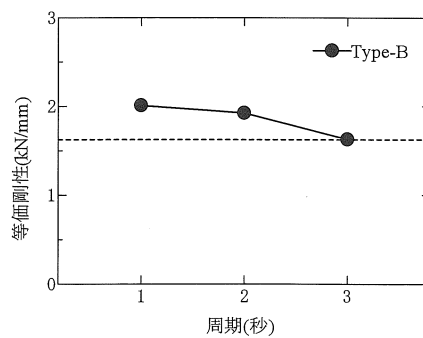


図-22 周期と等価剛性の関係

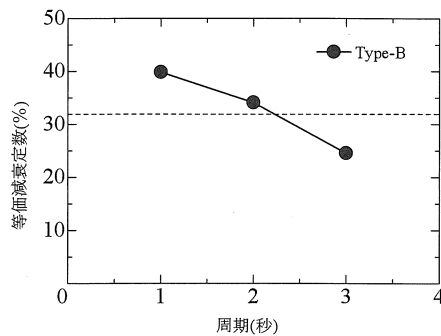


図-23 周期と等価減衰定数の関係

4. 履歴曲線の比較

本学で過去に行った外形寸法の等しいゴム支承の研究データ⁷⁾¹⁰⁾をもとに、Type-A2 試験体の耐震性能試験結果の比較を行う。

比較供試体は、水平力分散ゴム支承(NR)、鉛プラグ入り積層ゴム支承(LRB)、高減衰積層ゴム(HDR)である。これらは、中間部に積層鋼板が挿入されていない従来のゴム支承である。比較を容易にするため、水平荷重-水平変位履歴曲線のうち、せん断疲労耐久性試験の繰り返し回数 5000 回目の履歴曲線(11 ループ)から、履歴ループが安定する最終ループのみを示す。

図-23 に示した履歴曲線の比較により、Type-A2 試験体のループ面積が大きく、減衰性能が高いことがわかる。NR に対する Type-A2 試験体の履歴曲線の面積比(Type-A2/NR)は 2.2 であった。すなわち、今回の供試体のエネルギー吸収能力は、NR の約 2.2 倍である。

図-24 に示した履歴曲線の比較により、LRB は Type-A2 試験体に比べてループの傾きがかなり大きいことがわかる。LRB に対する Type-A2 試験体の履歴曲線の面積比(Type-A2/LRB)は 0.88 であった。したがって、ここで提案した積層鋼板入りゴムは LRB より等価減衰定数は若干低下しているが、LRB に近い値といえる。また、LRB は鉛プラグがゴム

に圧入されているため高い剛性を示したが、Type-A2 試験体は中心部の積層鋼板がすべることにより剛性が抑えられていることがわかる。

各ゴム支承の等価剛性、等価減衰定数の値をまとめて図-25 および図-26 に示す。これらは、ほぼ同一サイズのゴム支承で、特性の違いはゴム支承の材質、構造の違いによるものである。図-25 から、Type-A2 試験体の等価剛性はHDR とほぼ等しく、ついでNR、LRB の順で大きい。図-26 から、等価減衰定数は Type-A2 試験体、HDR が 23~27% と大きく、LRB はその半分、NR は 1/4 程度である。ただし、LRB は内部の鉛の断面寸法を増加させれば、さらに大きな等価減衰定数が得られると思われる。以上の比較から、今回開発した免震ゴム支承が高減衰ゴムと同等の優れた耐震性能を有することがわかる。

5. まとめ

本研究の目的は、従来型ゴム支承の鉛直変位を抑えるために考案された中間部に積層鋼板を有する高減衰積層ゴム支承の耐震性能を実験的に明らかにし、履歴曲線などのデータを提

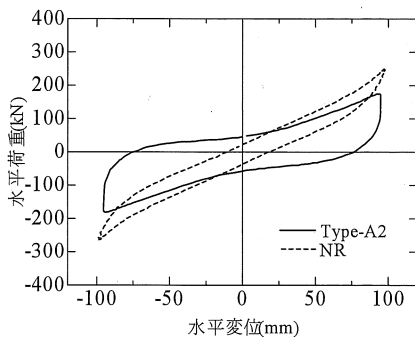


図-23 Type-A2 と NR の比較

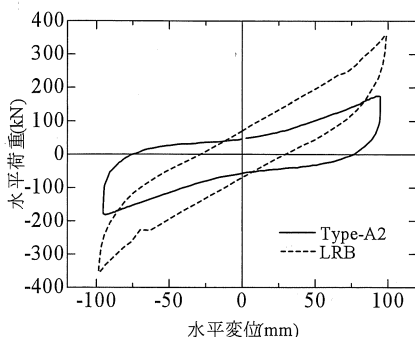


図-24 Type-A2 と LRB の比較

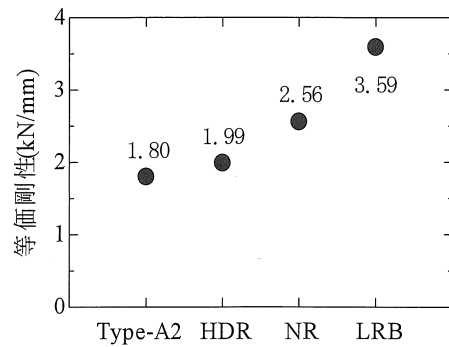


図-25 各ゴム支承の等価剛性

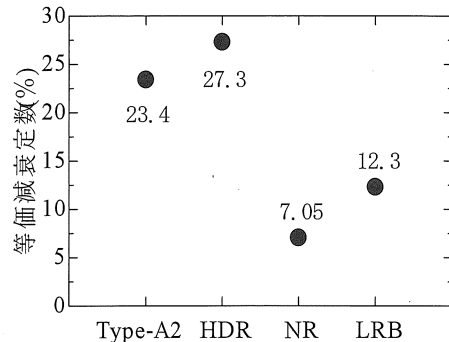


図-26 各ゴム支承の等価減衰定数

供することである。研究により得られた結果は以下のようにまとめられる。

(1) Type-A1 試験体のせん断疲労耐久性試験や Type-B 試験体の面圧および周期依存性試験では、ゴムの内側に損傷を生じたため、等価剛性、等価減衰定数が不安定な値を示した。これを改良した Type-A2 試験体では繰り返し回数に影響されず、安定した性能を示すことが確認された。

(2) 圧縮疲労耐久性試験で行った Type-A2 試験体の圧縮ばね定数試験において、最大面圧 12.5N/mm² での鉛直変位は供試体高さ (134mm) の約 1.5% とわずかであり、問題とされる鉛直変位の増大を抑制する結果が得られた。

(3) 今回の試験では中心部の穴に積層鋼板を挿入した機能集中型ゴム支承のため、面圧や周期に若干依存性がみられるが、従来のゴム支承と同様の耐震性能を備えているといえる。

今後の課題として、データ個数を増やし、信頼性の高い耐震性能や特性を定めていく必要がある。

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、実験の際には大学院生の中村太郎君をはじめ多くの学部生の協力を得た。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 川島一彦, 庄司学, 斎藤淳: ハイブリット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
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 袁涌, 青木徹彦, 山本吉久: 高減衰積層ゴム支承の動的特性に関する実験的研究, 構造工学論文集 Vol. 51A, pp. 603-612, 2005. 3
- 8) 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)
- 9) 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
- 10) 青山嵩和, 青木徹彦, 鈴木森晶: 積層ゴム支承の耐震性能実験, 愛知工業大学研究報告, 第41号B, 平成18年 (2008年9月18日受付)