

# 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

阿部雅人<sup>1</sup>・吉田純司<sup>2</sup>・藤野陽三<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 Ph.D. 東京大学助教授 大学院工学系研究科社会基盤工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

<sup>2</sup>正会員 博士(工) 日本学術振興会特別研究員 東京大学 大学院工学系研究科社会基盤工学専攻 (同上)

<sup>3</sup>フェロー会員 Ph.D. 東京大学教授 大学院工学系研究科社会基盤工学専攻 (同上)

積層ゴム支承は免震デバイスとして広く利用されているものの、その微小振幅載荷および多軸載荷下における復元力特性に関する研究例は極めて少ない。本研究では、積層ゴム支承の多軸復元力特性の現象論的モデルを構築している。まず、積層ゴム支承の 3 軸載荷実験を行い、支承の復元力特性を把握した。次いで水平 1 方向載荷実験結果を基に Ozdemir の 1 次元弾塑性モデルを拡張し、ハードニングおよび剛性低下を表現できるようにした水平 1 方向モデルを提案した。次に、Ozdemir の 3 次元弾塑性構成モデルをベースに水平 2 方向モデルを理論的に導出した。最後に水平 2 方向載荷実験結果ならびにハイブリッド実験結果と、水平 2 方向モデルによる解析結果とを比較しモデルを検証した。

**Key Words:** base-isolation, rubber bearings, bi-axial loading test, Ozdemir's model, bi-axial model, hybrid experiment

## 1. はじめに

1995 年兵庫県南部地震では、都市内高速の主要幹線の橋梁が甚大な被害を受けた。その後、橋梁の耐震設計が見直される中で、免震橋が注目されている。免震橋は、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、地震力を軽減することを目的としている。このように免震橋は動力学的効果を積極的に利用している構造であるため、精緻な性能評価には動的応答解析による応答予測が必要となる。また構造系全体の応答予測の精度は免震用積層ゴム支承の復元力モデルの精度によるところが大きい。

また免震橋では、交通荷重により積層ゴム支承に微小振動が励起されるため、環境振動につながる可能性があり、微小変形時の復元力特性が問題となっている。

これまで積層ゴム支承の力学的特性を載荷実験により把握している事例<sup>1), 2), 3)</sup>は多いものの、角型断面を有する一連の橋梁用積層ゴム支承について微小振幅域から大振幅域までの体系的な載荷実験は行われていない。また、既往のモデル<sup>4), 5), 6), 7), 11)</sup>ではせん断ひずみ 20% から 100% 程度の中振幅を対象としたものが主であり、実状況に対応した振幅域をモデル化できていない。また、支承が 1 方向のみに変形することを前提としているため 2 方向の地震入力への適用は困難となる。すでに建築構造物は、支承を効率的に利用するために 2 方向免震を採用しており、橋梁においても今後増加することが予想

される。

しかし、現段階では積層ゴム支承の 2 方向復元力特性についての研究例は希少であり、精緻に再現できるモデルは存在しない。そのため、バイリニアなどの簡単なモデルを 2 方向に独立に用いる<sup>10)</sup>、あるいは経験的に 2 方向に拡張したモデル<sup>8), 9)</sup>を用いて、応答予測を行っているのが現状である。

そこで本研究では、微小振幅から大振幅域において積層ゴム支承の水平 1 方向復元力特性を精緻に再現でき、かつ水平 2 方向にも拡張可能な復元力モデルの構築を目的とした。

現在、免震用積層ゴム支承として広く利用されている高減衰積層ゴム支承、天然積層ゴム支承および鉛プラグ入り積層ゴム支承の復元力特性を把握する目的で微小振幅載荷実験、水平 1 方向載荷実験ならびに水平 2 方向載荷実験を行った。

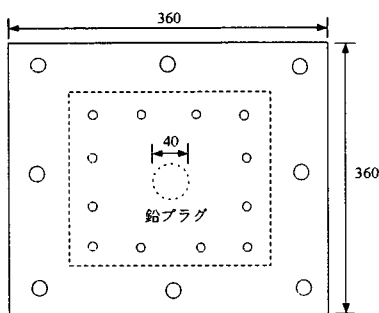
次に実験結果に基づいて、Ozdemir の弾塑性モデルを改良し、積層ゴム支承の水平 1 方向復元力特性を精緻に再現できる水平 1 方向モデルを提案した。

さらに Ozdemir の弾塑性モデルを拡張した 3 次元弾塑性構成則をベースとして、2 方向弾塑性モデルを理論的に導き、水平 1 方向の場合と同様に改良して積層ゴム支承の水平 2 方向モデルを構築した。また、提案したモデルの 2 方向変位経路に対する再現性を水平 2 方向載荷実験結果と比較して確認した。

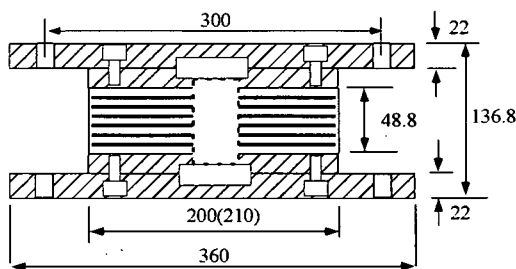
最後に、水平 2 方向地震応答ハイブリッド実験を行い、実験結果とモデルによる解析結果を比較することでモデルの地震応答予測性能を検証した。

表-1 載荷実験に用いた供試体の構造諸元

|                      | 高減衰積層ゴム支承 |       |       |       | 天然積層ゴム支承 |       | 鉛プラグ入り<br>積層ゴム支承: LRB |
|----------------------|-----------|-------|-------|-------|----------|-------|-----------------------|
|                      | HDR-A     | HDR-B | HDR-C | HDR-D | NRB-A    | NRB-B |                       |
| 平面寸法 [mm]            | 210×210   |       |       |       | 200×200  |       | 200×200               |
| せん断弾性係数 [MPa]        | 0.78      |       | 1.18  |       | 0.78     | 1.18  | 0.78                  |
| ゴム層数                 | 7         |       |       |       | 7        |       | 7                     |
| 1層のゴム層厚 [mm]         | 5.0       |       |       |       | 5.0      |       | 5.0                   |
| 内部補強鋼板数              | 6         |       |       |       | 6        |       | 6                     |
| 内部補強鋼板厚[mm]          | 2.3       |       |       |       | 2.3      |       | 2.3                   |
| 1次形状係数 <sup>6)</sup> | 10.5      |       |       |       | 10       |       | 10                    |
| 2次形状係数 <sup>6)</sup> | 6.00      |       |       |       | 5.7      |       | 5.7                   |
| 鉛プラグ直径[mm]           | —         |       |       |       | —        |       | 40                    |

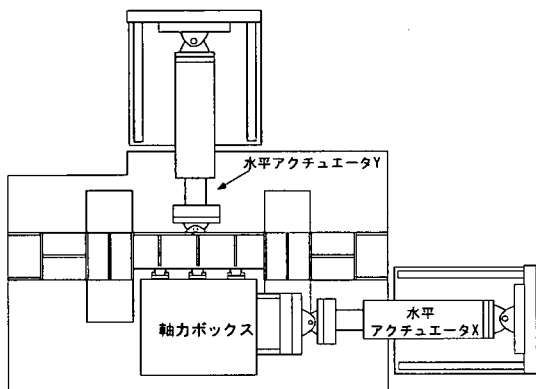


(a) 平面図

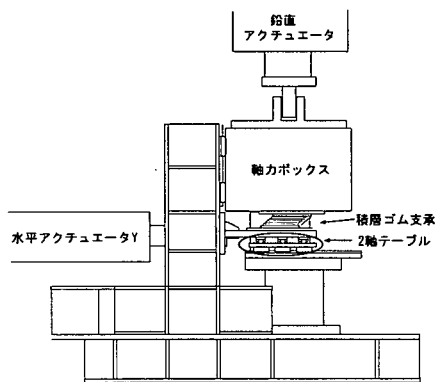


(b) 側面図

図-1 実験で使用した積層ゴム支承の寸法(単位 mm)



(a) 平面図



(b) 側面図

図-2 実験に利用した載荷装置の概略

## 2. 積層ゴム支承の多軸載荷実験

本載荷実験では、橋梁の免震支承として広く利用されている積層ゴム支承について

- 多軸載荷下における復元力特性を把握する。
- 多軸載荷に対応した復元力モデルを構築・検証するための実験データを得る。

ことを目的とした。以下では、実験内容について詳細に説明し、次いで得られた結果と考察を述べる。

### (1) 実験に使用した積層ゴム支承

実験に使用した積層ゴム支承は、図-1に示す角型形状の高減衰積層ゴム支承4体、鉛プラグ入り積層ゴム支承1体および天然ゴム支承2体である。ただし図-1の点線は、LRBに用いられている鉛プラグを示している。免震橋梁にせん断弾性係数  $G$  が 0.78 [MPa]、0.98 [MPa]および 1.18 [MPa]のゴム材料を用いた支承が使用されている。このことから本研究では、主として  $G$  の下限である 0.78 [MPa]のゴム材料を使用している積層ゴム支承を対象とし、せん断弾性係数の違いを把握するために  $G$  が 1.18 [MPa]のも

表-2 予備実験の載荷ケース

| 載荷方向   | 載荷順序 | 入力変位       | 載荷速度 [Hz] | 載荷振幅 <sup>*</sup> [%] | 鉛直面圧 [MPa] |
|--------|------|------------|-----------|-----------------------|------------|
| X 方向   | 1    | 3 サイクルの正弦波 | 0.01      | 50, 150, 250          | 7.84       |
| Y 方向   | 2    | 3 サイクルの正弦波 | 0.01      | 50, 150, 250          | 7.84       |
| 45 度方向 | 3    | 3 サイクルの正弦波 | 0.01      | 50, 100, 150          | 7.84       |

<sup>\*</sup>せん断ひずみで記述。ただしせん断ひずみとは、支承の水平せん断変位をゴム層の総厚で除した値。

表-3 微小振幅載荷実験の載荷ケース

| 予備せん断ひずみ (偏心量) [%] | 入力変位       | 載荷速度 [Hz] | 載荷振幅 [%]             | 鉛直面圧 [MPa] |
|--------------------|------------|-----------|----------------------|------------|
| 0                  | 3 サイクルの正弦波 | 0.01      | 0.5, 1, 2, 5, 10, 20 | 3.92, 7.84 |
| 30                 | 3 サイクルの正弦波 | 0.01      | 0.5, 1, 2, 5         | 3.92, 7.84 |

表-4 水平1方向ならびに水平2方向載荷実験の載荷ケース

| 実験項目    | 入力変位         | 載荷速度 [Hz] | 載荷振幅 [%]          | 鉛直面圧 [MPa] |
|---------|--------------|-----------|-------------------|------------|
| 水平1方向載荷 | 正弦波 3 サイクル   | 0.01      | 50, 100, 150, 200 | 3.92       |
| 水平2方向載荷 | 円経路 3 サイクル   | 0.01      | 円: 50, 100, 150   | 3.92       |
|         | 8の字経路 3 サイクル |           | 8の字: 50, 100, 150 |            |

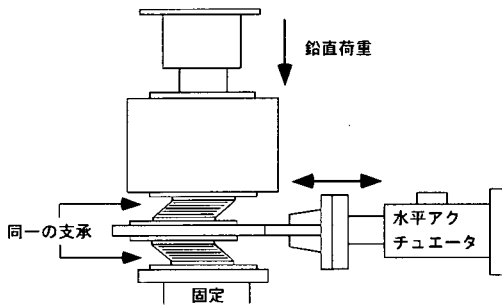


図-3 微小振幅載荷実験で利用した試験装置

## (2) 実験装置

図-2 に多軸載荷実験で使用した実験装置の概略を示す。この実験装置では、上下方向のみに移動できる軸力ボックスを介して供試体に鉛直荷重を載荷する。また、2軸スライドテーブルを用いることにより供試体にねじれ変形を生じさせることなく、水平2方向にせん断変形を与えられる構造になっている。また、加力装置として水平方向に荷重容量±500[kN]、ストローク±100[mm]の2本のアクチュエータを、鉛直方向には荷重容量±1000[kN]、最大ストローク±50[mm]を用いている。

## (3) 実験方法

橋梁用積層ゴム支承の設計面圧の許容値が7.84[MPa]であり、上部構造の死荷重のみを考慮すると許容値の半分程度だと推測される。本載荷実験では載荷面圧として上限値7.84[MPa]およびその半分の3.92[MPa]とした。

### a) 予備実験

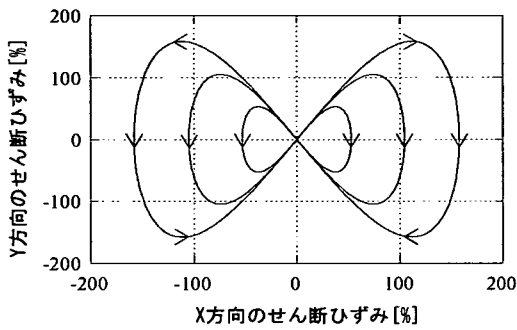
積層ゴム支承は処女載荷に対して、復元力が処女載荷後のものと比較して1.5~2倍程度の大きな値を示す。この特性は、積層ゴム支承が一度変形を経験してしまうと2度と現れず、安定した復元力特性を示すようになる<sup>5),6)</sup>。

そこで予備実験では積層ゴム支承の安定した復元力特性を得るために、あらかじめ大変形を経験させることを目的とした。また、ゴム層と鋼板との接着を併せて確認した。

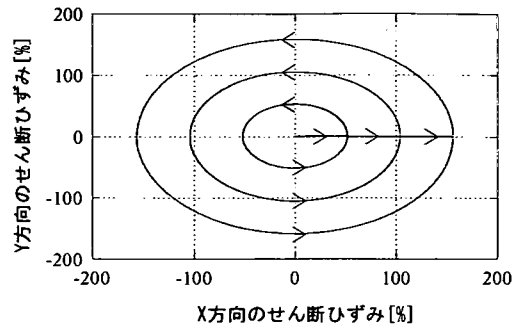
具体的には、工場にて一定の鉛直面圧下で水平1

のもを用いた。各支承の構造諸元を表-1に示す。表-1中において鉛プラグの径は、設計式に従い支承の減衰比が18%になるように決定した。本LRBにおいて、鉛プラグの断面積をゴムの有効支圧面積で除した値 $A_p/A_r$ は3.24[%]である。

以下では、簡単にするために、高減衰積層ゴム支承をHDR (High Damping Rubber bearing)、鉛プラグ入り積層ゴム支承をLRB(Lead Rubber Bearing)、天然積層ゴム支承をNRB (Natural Rubber Bearing)と呼ぶことにする。また、同種類の支承では、表-1に示すように-A、-Bなどを後に付けることで供試体を区別するものとする。4つのHDRのうち、HDR-A、HDR-BおよびHDR-Cは、混合する添加剤の種類により力学特性が異なる。HDR-Dは、添加剤がHDR-Cと同一であるものの、その配分量が異なる。同様にNRB-Aも混合する添加剤の種類がNRB-Bと同一であるものの、その配分量が異なる。

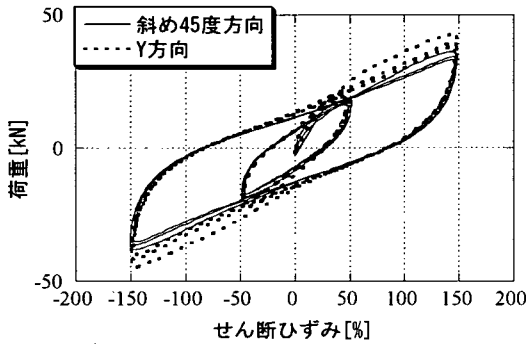


(a) 8の字経路

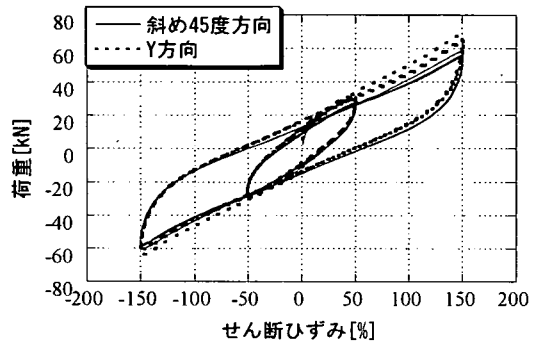


(b) 円経路

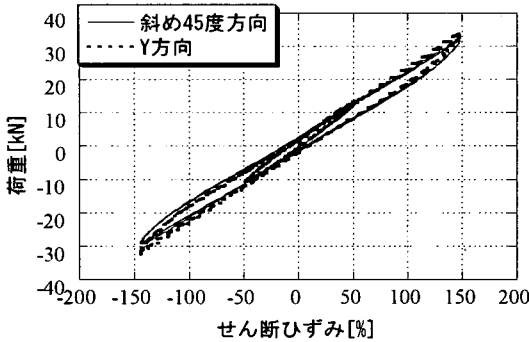
図4 水平2方向荷重実験で設定した荷重経路



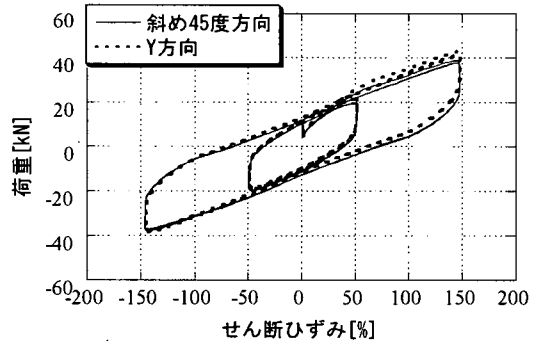
(a) HDR-A



(b) HDR-C



(d) NRB-A



(c) LRB

図5 斜め45度方向とY方向に荷重した場合の復元力特性の比較

方向にせん断ひずみ 50, 150, 250[%]の振幅を有する振動数 0.01[Hz]の正弦波により荷重した。この処女荷重を行った方向を X 方向と呼ぶ。ついで X 方向と直角をなす Y 方向に同様の条件で荷重を行った。さらにその後、積層ゴム支承断面の角部に向かう斜め 45 度方向に、せん断ひずみ 50, 100, 150[%]の振幅を有する振動数 0.01[Hz]の正弦波により荷重した。具体的な荷重ケースを表-2 にまとめて示す。

#### b) 微小振幅荷重実験

免震橋梁において、積層ゴム支承は交通振動により微小変形する。本実験では、このような常時の状

況を想定し、支承の微小変形時における剛性および減衰性能などの力学特性を明らかにすることを目的として行うものである。

本実験では、積層ゴム支承に荷重する水平方向の振幅が微小であり、想定される復元力の最大値が 1~10[kN]程度になる。この値は上述した 2 軸スライドテーブルの摩擦力 0.5[kN]と比較して無視できないものである。そこで本実験では、2 軸スライドテーブルの代わりに、図-3 に示すように同一の積層ゴム支承でアーム板を挟みこみアーム板に変位を与える装置を利用した。この試験装置を用いて、

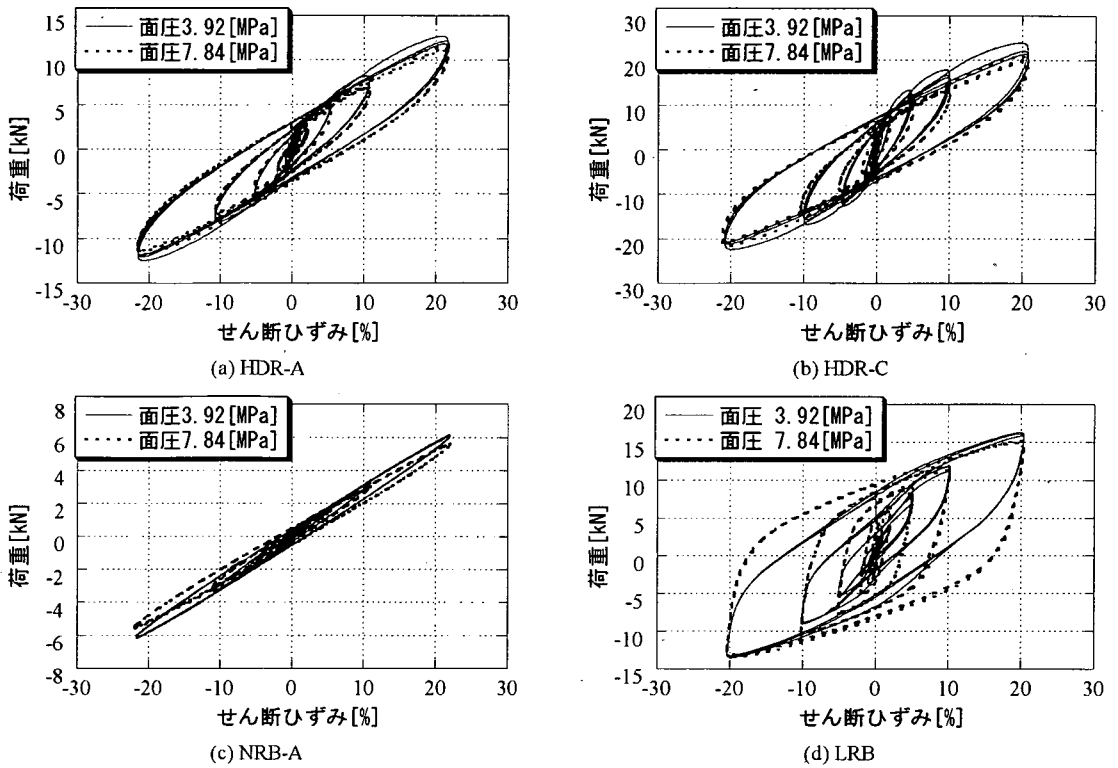


図-6 微小振幅領域における積層ゴム支承の復元力特性

一定の面圧下でアーム板にせん断ひずみ 0.5~20%の変位を与える微小振幅載荷実験を行った。

次いで上部構造の温度変化による伸縮を想定し支承にあらかじめせん断ひずみ 30%の変形を与え、一定面圧下でせん断ひずみ 0.5~5%の正弦波で載荷する偏心微小振幅載荷実験を行った。具体的な載荷ケースを表-3に示す。

c) 水平1方向載荷実験

各支承の水平1方向復元力特性を得るために、一定の面圧下で水平1方向に載荷する水平1方向載荷実験を行った。本実験の結果は、本文3節で示す水平1方向モデルを構築し、未知パラメータを同定するために利用する。具体的な水平1方向載荷実験の載荷ケースを表-4に示す。

d) 水平2方向載荷実験

一定の面圧下で水平2方向に正弦波を組み合わせた経路に沿って載荷する水平2方向載荷実験を行った。具体的には、図-4に示す円型および8の字型の水平変位経路を用いた。本実験で得られた各支承の復元力特性は、本文4節で示す水平2方向モデルを検証するために利用する。詳細な載荷ケースを表-4に示す。

なお、計測は積層ゴム支承の水平2方向および鉛

直方向の荷重と変位について行った。

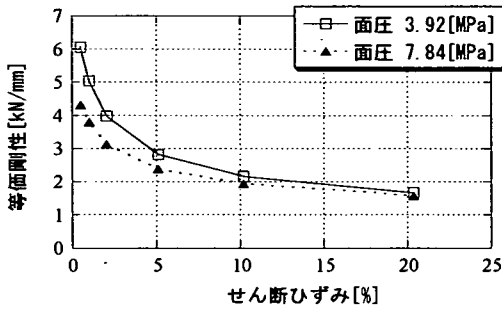
(4) 実験結果と考察

a) 予備実験

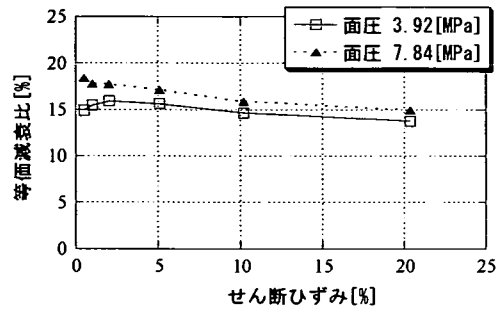
図-5の(a)から(d)に順にHDR-A, HDR-C, LRBおよびNRB-Aの斜め45度方向とY方向に向かって載荷した場合の比較を示す。図-5を見ると、斜め45度方向とY方向は概ね同一の復元力特性を有しており、矩形断面の積層ゴム支承が水平2方向に等方的に挙動することを確認できた。ただし図-5をみると斜め45度に載荷した場合の復元力が、Y方向における値より僅かながら小さくなっていることがわかる。この原因としてY方向での載荷では、最大経路ひずみがX方向に250%、Y方向に150%であるのに対し、斜め45度方向での載荷では両方向ともにせん断ひずみ250%であり処女載荷特性の影響が小さくなっていると考えている。

b) 微小振幅載荷実験

図-6の(a)から(d)に面圧3.92[MPa]の場合と、面圧7.84[MPa]の場合におけるHDR-A, HDR-C, NRB-AおよびLRBの復元力特性を示す。また、図-7, 図-8, 図-9および図-10にこれらの供試体の等価剛性と等価減衰比を示す。図-6から図-10をみると次のよう

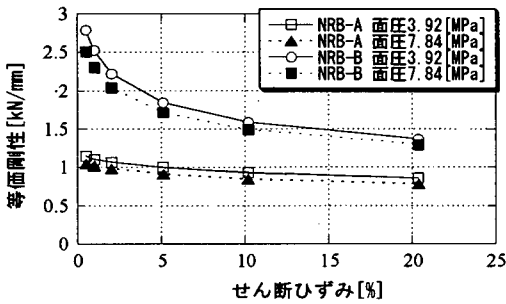


(a) 等価剛性

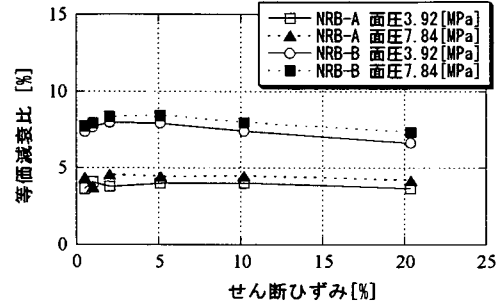


(b) 等価減衰比

図-7 HDR-Aの微小振幅領域における等価剛性と等価減衰比

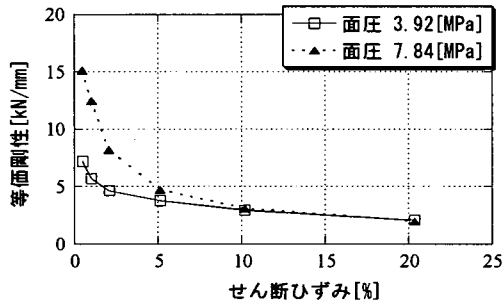


(a) 等価剛性

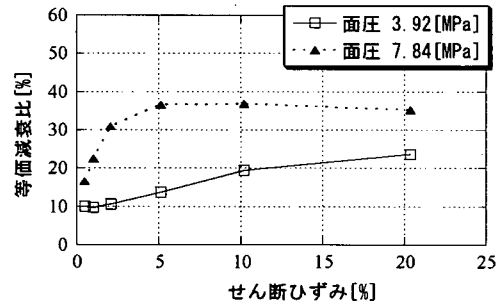


(b) 等価減衰比

図-8 NRBの微小振幅領域における等価剛性と等価減衰比



(a) 等価剛性



(b) 等価減衰比

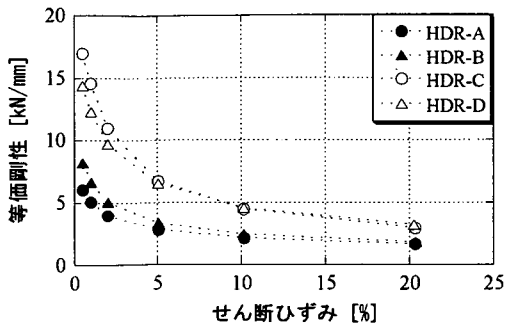
図-9 LRBの微小振幅領域における等価剛性と等価減衰比

なことがわかる。

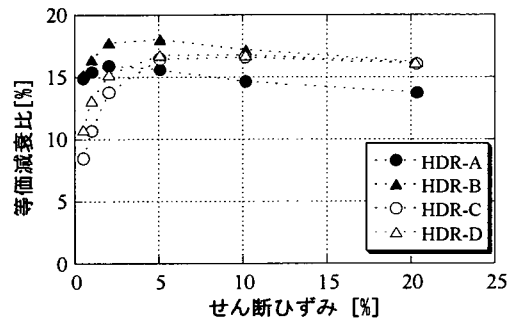
- 1) HDR-A, NRB-A および NRB-B は、高面圧時に僅かながら剛性が減少し、逆に減衰比は大きくなるものの両者の差は小さい。この傾向は HDR-B, HDR-C および HDR-D にも共通してみられた。
- 2) LRB の復元力特性は、面圧に大きく依存する。面圧が高い場合には、剛性が最大 2 倍、減衰比が最大 3 倍大きくなる。この現象の原因として、鉛プラグと積層ゴムの間にあるクリアランスの影響が考えられる。鉛プラグは面圧が作用することにより圧縮変形し、ポアソン効果のために側面方向に膨張する。そのため、高面圧下ではクリアランスが小さくなり、支承が微小にせん断変形した場

合でもそれが鉛プラグに伝達され、剛性、減衰比ともに鉛プラグの変形の影響が大きく現れると考えられる。

- 3) 図-8 より、NRB ではせん断弾性係数  $G$  が大きいと等価剛性のみならず、等価減衰比も増加している。一方、図-10 より、HDR-C と HDR-D はせん断弾性係数の違いが現れず、両者ともにほぼ等しい等価剛性、等価減衰比を有している。
- 4) 図-9、図-10 より 4 つの HDR および LRB は、5% 以下のせん断ひずみにおいて振幅の減少に伴い、剛性は増加し、減衰比は減少する。ただしせん断ひずみ 0.5% の微小な振幅においても減衰比 10% 程度の性能を有している。

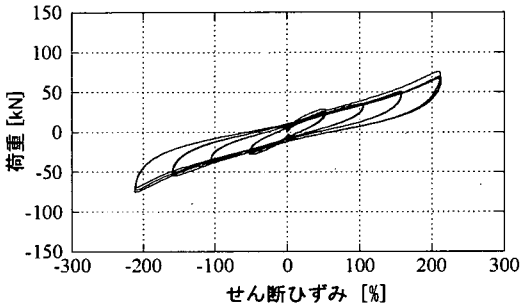


(a) 等価剛性

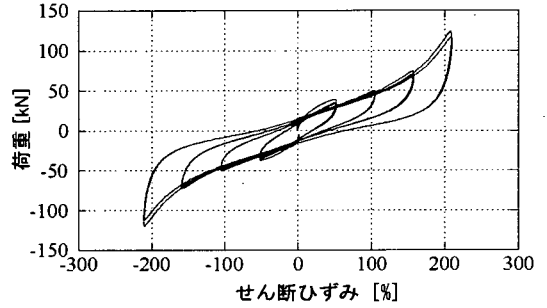


(b) 等価減衰比

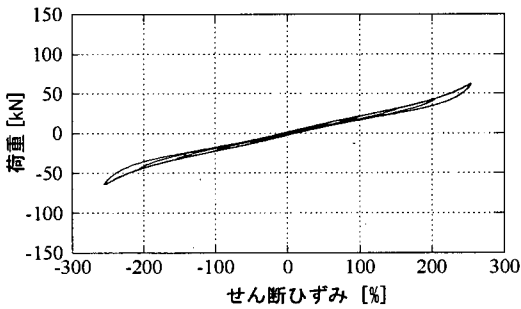
図-10 面圧 3.92[MPa]下での微小振幅領域における HDR の等価剛性と等価減衰比の比較



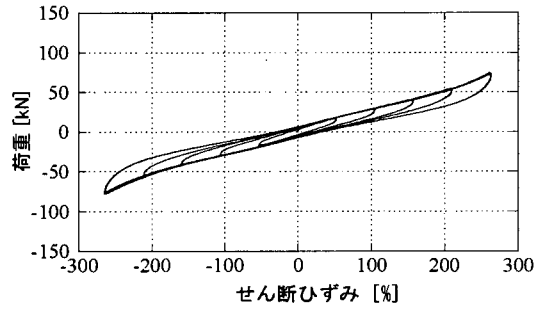
(a) HDR-A



(b) HDR-C



(c) NRB-A



(d) LRB

図-11 水平 1 方向载荷における復元力特性

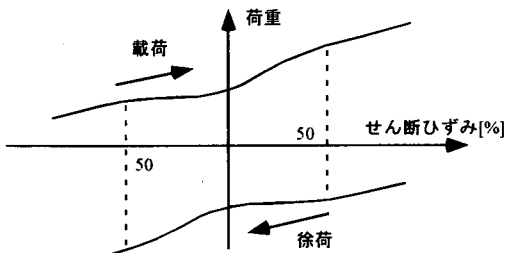


図-12 せん断ひずみが小さい領域での復元力特性

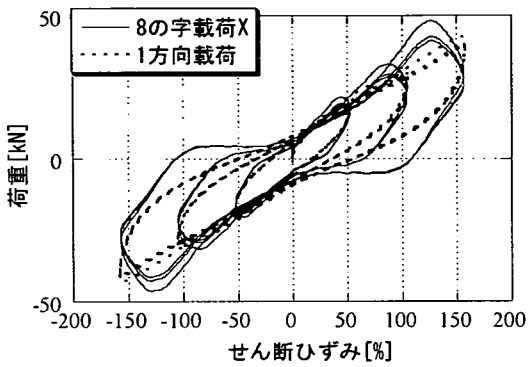
なお、紙面の制限から結果を省略するが、予備変形としてせん断ひずみ 30%を与えた場合<sup>17)</sup>にも、上述した 1)~3)の性質が各積層ゴム支承について同様にみられた。

### c) 水平 1 方向载荷試験

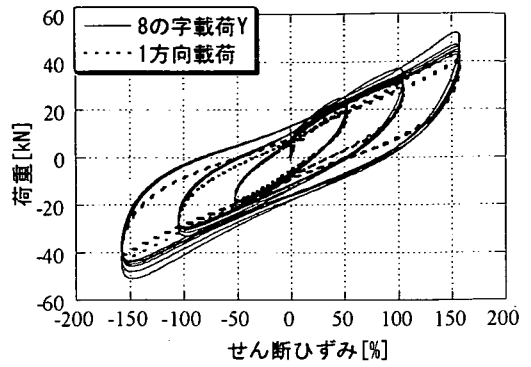
図-11 の(a)~(d)にそれぞれ HDR-A, HDR-C, NRB-A および LRB の水平 1 方向復元力特性を示す。図-11 より以下のことがわかる。

各支承の復元力特性より、個々の振幅において履歴ループの形状が異なっていることがわかる。このことからループ形状は、最大経験ひずみなどの過去に経験した量に関係すると推測される。

大振幅域において、復元力特性がハードニング現象を示す。ハードニングが開始するせん断ひずみは積層ゴム支承により異なり HDR-C では 150%前後であるのに対し、NRB-A では 220%前後である。また、ハードニングが始まると接線剛性が增大するとともに、履歴によるエネルギー吸収性能が増加して

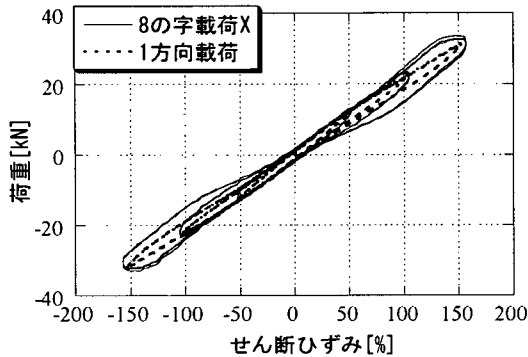


(a) X方向

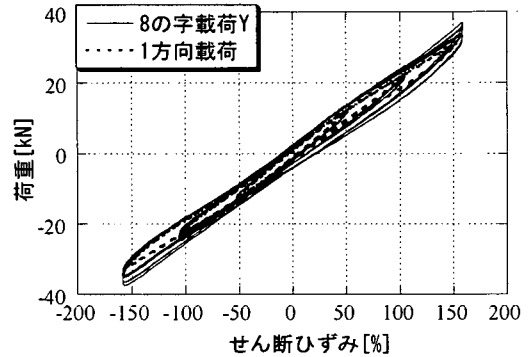


(b) Y方向

図-13 HDR-Aの8の字経路における復元力特性

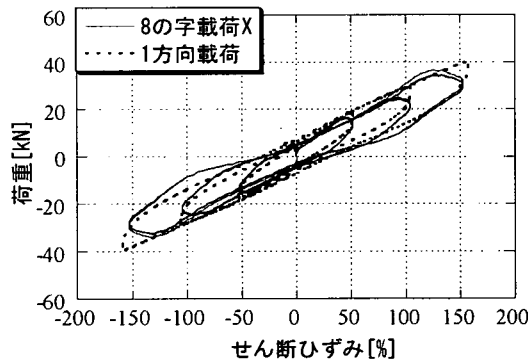


(a) X方向

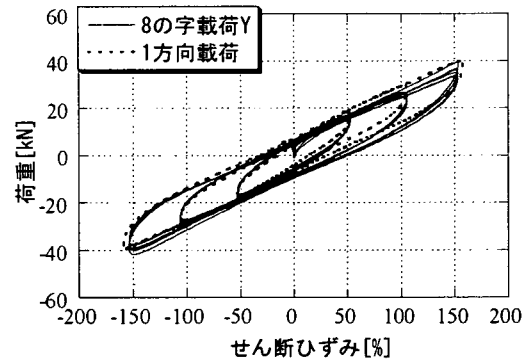


(b) Y方向

図-14 NRB-Aの8の字経路における復元力特性



(a) X方向



(b) Y方向

図-15 LRBの8の字経路における復元力特性

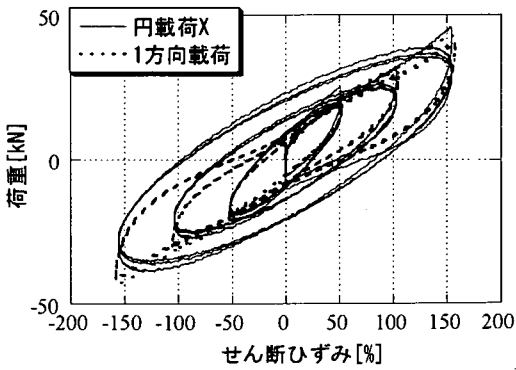
いる。

せん断ひずみが約50%以下の範囲において荷重がせん断ひずみに対し僅かではあるが非線形に変化している。具体的には、図-12に示すように荷重軸付近に向かって荷重の増加(減少)する割合が低下している。この性質は載荷時、除荷時ともに現れていることから、ひずみ量など限時刻において定義される量に関係していると推測される。

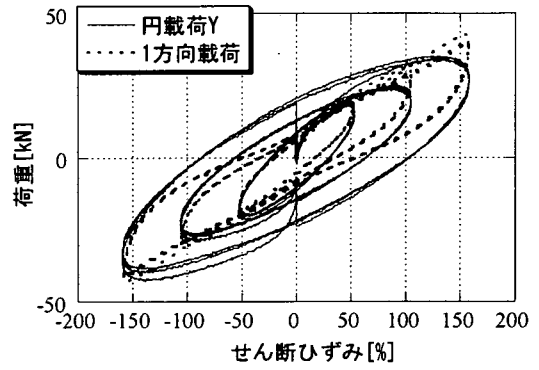
#### d) 水平2方向載荷実験

図-13、図-14および図-15にそれぞれHDR-A、NRB-AおよびLRBの8の字経路における復元力特性を示す。また、図-16、図-17および図-18にこれらの支承の円経路における復元力特性を示す。次いで、図-19～図-23に支承の等価剛性ならびに等価減衰比を示す。なお図-13から図-18中の点線は対応する支承の水平1方向復元力特性である。



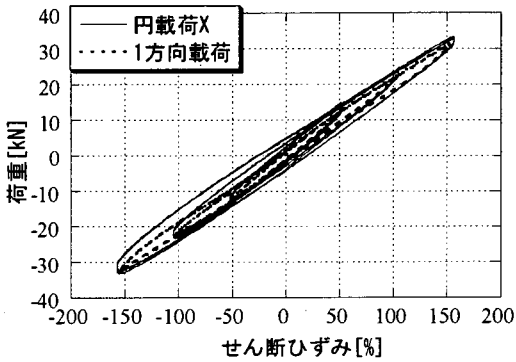


(a) X方向

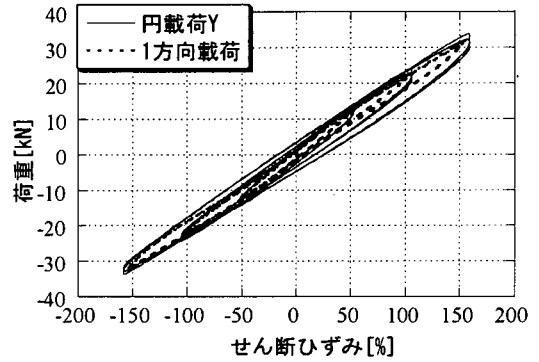


(b) Y方向

図-16 HDR-Aの円経路における復元力特性

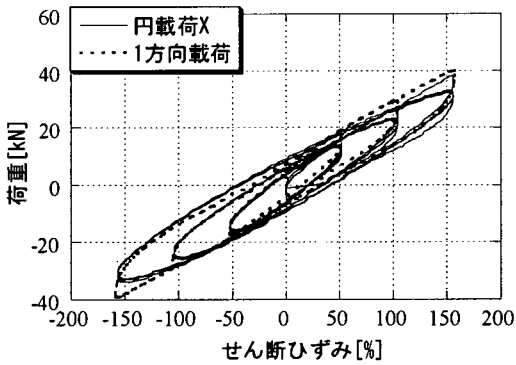


(a) X方向

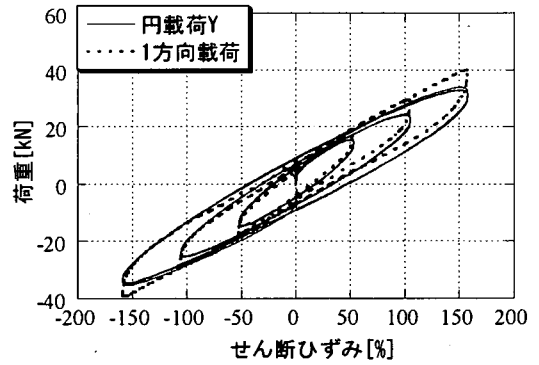


(b) Y方向

図-17 NRB-Aの円経路における復元力特性



(a) X方向



(b) Y方向

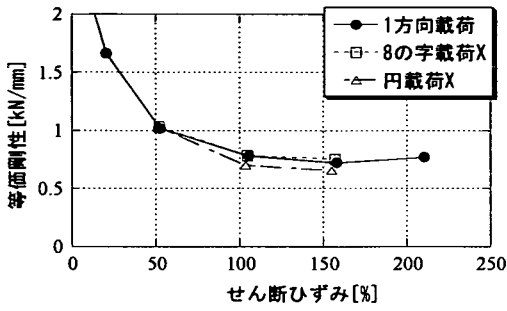
図-18 LRBの円経路における復元力特性

図-13から図-18をみるとHDR-A、NRB-AおよびLRBに共通して、2方向载荷による連成の影響がみられる。特に8の字経路では、各方向で変位が最大となる点において履歴ループの形状が急激に変化している。また、円経路では、履歴ループが丸みを帯びている。

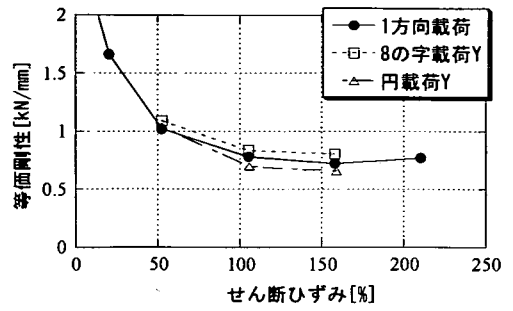
図-13、図-14および図-16、図-17をみるとHDR-AおよびNRB-Aは、8の字経路、円経路ともに水平2

方向復元力特性が水平1方向復元力特性を内包していることがわかる。このことは、HDR-AおよびNRB-Aが水平2方向に変形すると、復元力の連成のために減衰性能が増大することを意味する。この性質は、図-19および図-20の等価減衰比からもわかる。

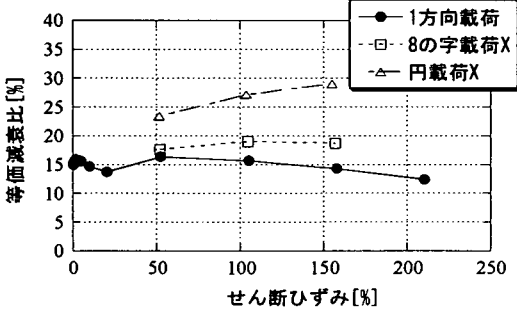
以上の性質は、HDR-B、HDR-C、HDR-DおよびNRB-Bにも同様にみられた。この連成効果は、ゴム材料のエネルギー吸収性能がひずみ量に依存して



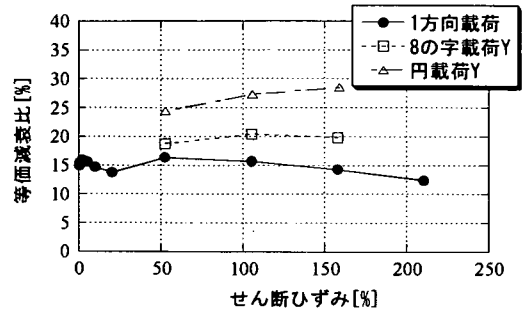
(a) X方向における等価剛性



(b) Y方向における等価剛性

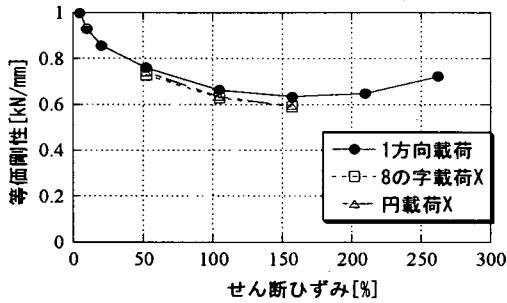


(c) X方向における等価減衰比

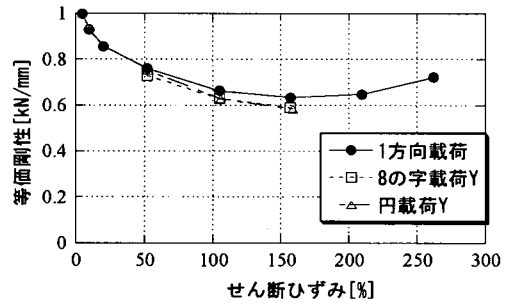


(d) Y方向における等価減衰比

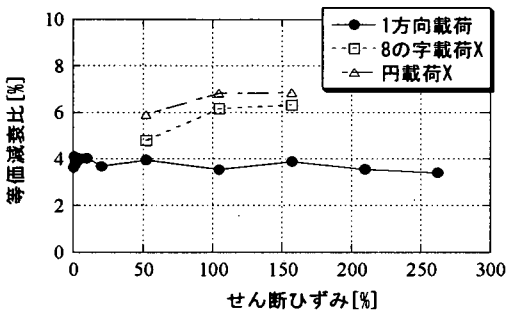
図-19 HDR-Aの等価剛性と等価減衰比



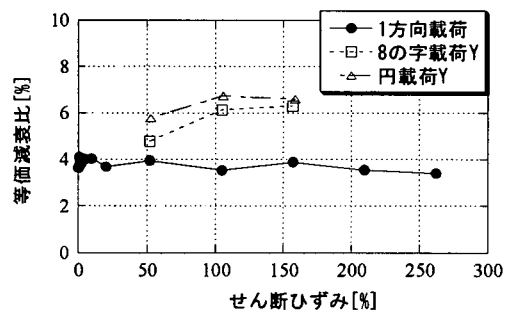
(a) X方向における等価剛性



(b) Y方向における等価剛性



(c) X方向における等価減衰比



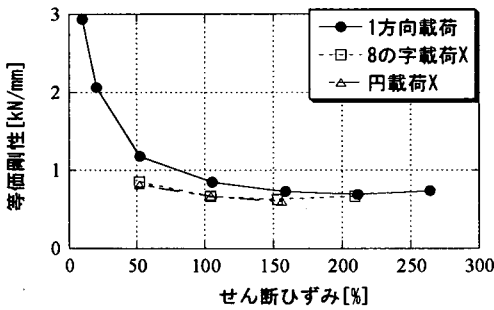
(d) Y方向における等価減衰比

図-20 NRB-Aの等価剛性と等価減衰比

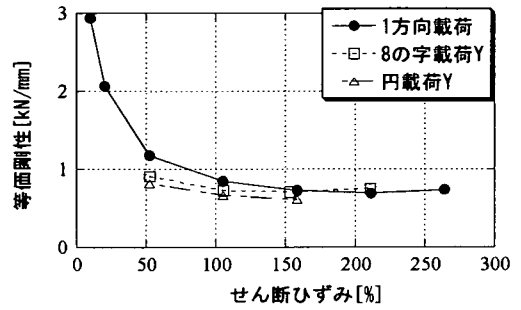
いるために生じたものと推測される。特に2方向  
 荷では、同一振幅において1方向荷の場合より変  
 位の絶対値が常に大きく、その結果エネルギー吸  
 収性能が水平1方向のものを上回ったものと考えられ

る。

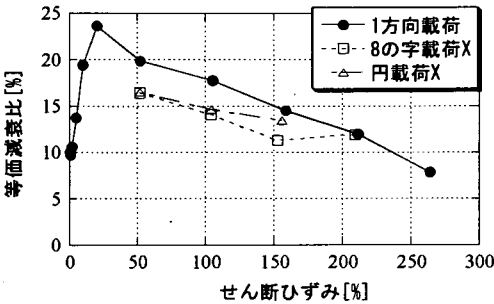
一方、図-15および図-18をみるとLRBは、水平1  
 方向復元力特性が水平2方向復元力特性を内包して  
 いることがわかる。このことはLRBが2方向に変



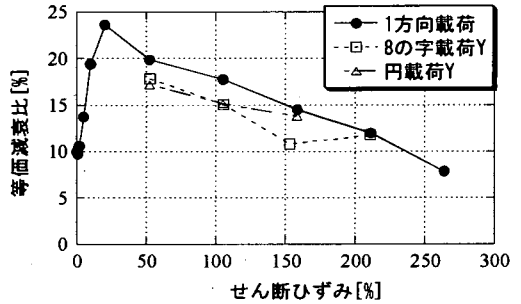
(a) X方向における等価剛性



(b) Y方向における等価剛性

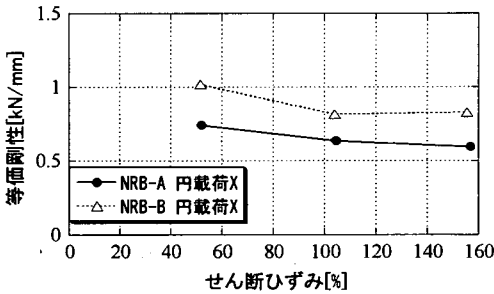


(c) X方向における等価減衰比

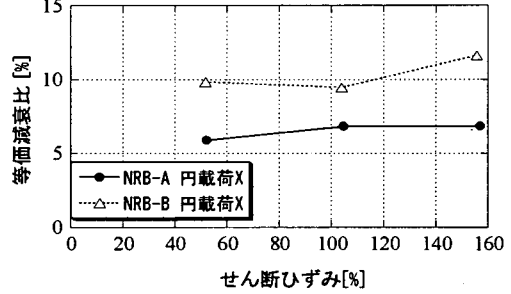


(d) Y方向における等価減衰比

図-21 LRBの等価剛性と等価減衰比



(a) 等価剛性



(b) 等価減衰比

図-22 円載荷におけるNRBの等価剛性と等価減衰比の比較 (X方向)

形を受ける場合には、図-21に示すように減衰性能が小さくなることを意味する。この性質は、LRB内に挿入されている鉛プラグが、振幅に依存しない完全弾塑性的な性質を有しており、それが支承の復元力特性に主として現れているためであると考えられる。このことからLRBを水平2方向の免震構造に利用する場合には、減衰性能すなわち鉛プラグのサイズに注意を要することが示唆される。

図-22よりNRBでは2方向載荷において、せん断弾性係数の差が現れ、NRB-Bの方がどちらも1.5倍程度の大きな値を示している。一方、図-23よりHDR-CとHDR-Dについては、剛性に差が現れているもの減衰比は、ほぼ同一の値を示している。また、せん断弾性係数Gが同一であるHDR-A、HDR-Bおよび

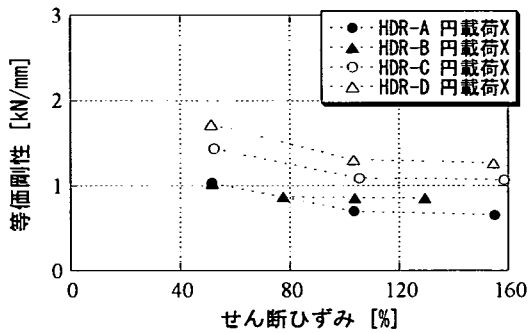
びHDR-Cを比較すると、各支承が有する振幅依存性のため、等価剛性、等価減衰ともにばらつきがみられる。

### 3. 水平1方向モデル

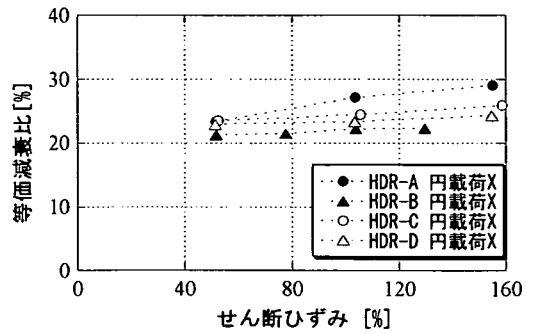
本文2節で示した水平1方向載荷実験結果をもとに積層ゴム支承の水平1方向モデルを構築する。

#### (1) Ozdemirの弾塑性モデル

H.Ozdemir<sup>13)</sup>は、金属系のエネルギー吸収デバイスの変位-復元力関係を表現するモデルとして、次のような微分方程式で記述される弾塑性モデルを提案している。



(a) 等価剛性



(b) 等価減衰比

図-23 円載荷におけるHDRの等価剛性と等価減衰比の比較(X方向)

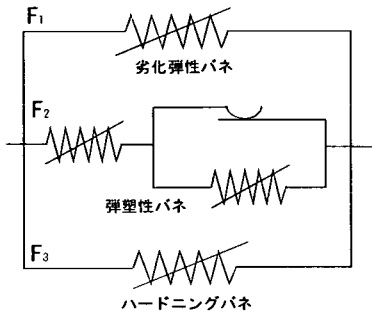


図-24 モデルの概念図

実験結果に基づき、その変位-復元力関係をモデル化するため、式(1)に以下の改良を加えた。

a) 弾性バネの導入

積層ゴム支承は、その復元力特性を弾塑性とみなすと移動硬化則に似通った性質を有している。この性質は、式(1b)の背荷重を用いて線形部分のみ再現することが可能である。しかし移動硬化則を用いる場合には、式(2)に示すように $Y_i$ 、 $U_i$ および $\alpha$ の3つが互いに連成している。そのため、非線形に拡張すること、およびパラメータを同定することが困難となる。そこで本研究では、復元力 $F_i$ が

$$F_i = K_i U_i + a [1 - \exp(-b|U_i|)] \operatorname{sgn}(U_i) \quad (3)$$

のように与えられる非線形弾性バネを弾塑性モデルに並列に付加し、この弾性バネに移動硬化則の役割を負担させる。ここに $K_i$ 、 $a$ および $b$ は未知パラメータである。式(3)の右辺第1項は、復元力特性の線形剛性を表し、第2項はせん断ひずみ50%以下で現れる非線形の剛性を再現する。

次いで式(1b)の移動硬化則を取り除くために $\alpha = 0$ とし、

$$F_2 = \frac{Y_i}{U_i} \left\{ \dot{U} - |U| \left| \frac{F_2}{Y_i} \right|^n \operatorname{sgn} \left( \frac{F_2}{Y_i} \right) \right\} \quad (4)$$

のような完全弾塑性バネを用いる。

b) ハードニングの導入

積層ゴム支承は、大振幅領域において載荷時および除荷時に剛性が硬化し、かつ履歴によるエネルギー吸収性能が増加する。このハードニング特性のうち履歴によるエネルギー吸収性能の増加をモデル化するために、以下のような降伏荷重の振幅依存性を導入する。

$$Y_i = Y_0 \left( 1 + \left| \frac{U}{U_H} \right|^p \right) \quad (5)$$

ここに $Y_0$ は初期降伏復元力であり $U_H$ および $p$ は未知パラメータである。

次いで、大振幅領域における剛性の硬化を再現するために、以下のような非線形の弾性バネを導入す

$$\frac{\dot{F}_i}{Y_i} = \frac{\dot{U}}{U_i} - \frac{|U|}{U_i} \left| \frac{F_i - S}{Y_i} \right|^n \operatorname{sgn} \left( \frac{F_i - S}{Y_i} \right) \quad (1a)$$

$$\frac{S}{Y_i} = \alpha \left( \frac{U}{U_i} - \frac{F_i}{Y_i} \right) \quad (1b)$$

ただし $F$ 、 $U$ および $S$ は、それぞれ復元力、変位および背荷重である。ここに背荷重とは、降伏曲面の移動すなわち移動硬化をモデル化するための値であり、塑性曲面の中心を示す。また $Y_i$ および $U_i$ はそれぞれ降伏荷重、降伏変位であり、 $\alpha$ および $n$ はそれぞれひずみ硬化に関するパラメータ、降伏挙動の滑らかさに関するパラメータである。 $n$ を0に近づけることで弾性域から塑性域への遷移を滑らかに再現することが可能である。このモデルの特徴は、式(1)の微分方程式を数値的に解くことで、載荷-除荷ならびに降伏の判定なしに、弾塑性の変位-復元力関係を容易に得ることができることである。

ここで弾性剛性を $K \equiv Y_i / U_i$ 、降伏後の剛性を $K_Y$ とすると $K$ 、 $K_Y$ および $\alpha$ の間には、

$$\frac{K_Y}{K} = \frac{\alpha}{1 + \alpha} \quad (2)$$

のような関係がある。

(2) Ozdemir モデルの改良

本文2節に示した積層ゴム支承の水平1方向載荷

表-5 水平1方向の復元力特性から同定したモデルのパラメータ

| 未知パラメータ       | HDR-A  | HDR-B  | HDR-C  | HDR-D  | NRB-A   | NRB-B  | LRB    |
|---------------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|
| $K_1$ [kN/mm] | 0.99   | 1.42   | 1.42   | 1.51   | 0.652   | 0.642  | 0.549  |
| $\alpha$ [mm] | 8.01   | 6.90   | 6.01   | 8.97   | 11.1    | 0.689  | 1.99   |
| $\beta$       | 0.300  | 0.246  | 0.252  | 0.301  | 0.778   | 0.957  | 0.700  |
| $a$ [kN]      | 4.87   | 7.19   | 9.90   | 9.50   | 2.25    | 5.98   | 7.93   |
| $b$ [/mm]     | 0.0600 | 0.0464 | 0.0750 | 0.0675 | 0.0900  | 0.0906 | 0.0501 |
| $n$           | 0.348  | 0.307  | 0.450  | 0.451  | 0.742   | 0.271  | 0.400  |
| $Y_0$ [kN]    | 9.00   | 8.59   | 12.4   | 1.37   | 1.47    | 3.72   | 6.37   |
| $U_H$ [mm]    | 50.5   | 45.4   | 50.2   | 52.1   | 50.0    | 53.5   | 61.2   |
| $p$           | 2.90   | 2.30   | 2.22   | 4.17   | 4.19    | 4.99   | 3.20   |
| $U_0$ [mm]    | 4.52   | 1.38   | 1.42   | 2.07   | 7.50    | 1.60   | 2.81   |
| $U_S$ [mm]    | 90.0   | 26.3   | 28.0   | 30.4   | 90.2    | 34.7   | 45.0   |
| $K_2$ [kN/mm] | 0.0398 | 0.102  | 0.245  | 0.210  | 0.00470 | 0.0581 | 0.0784 |
| $r$           | 3.03   | 1.81   | 2.50   | 1.73   | 4.14    | 3.08   | 1.80   |

る。以後このバネのことをハードニングバネと呼ぶことにする。

$$F_3 = K_2 \left[ \frac{U}{U_H} \right]^r U \quad (6)$$

ここに  $K_2$  および  $r$  は未知パラメータである。

### c) 最大経験変位依存性の導入

本文2節で示したように積層ゴム支承は、過去に経験した量に依存して剛性が低下する性質を有している。この性質をモデル化するために、弾性バネの剛性  $K_i$  ならびに降伏変位  $U_i$  を以下のように最大経験変位に依存する型に拡張する。

$$K_i = K_1 \left\{ \beta + (1 - \beta) \exp \left( - \frac{U_{\max}}{\alpha} \right) \right\} \quad (7a)$$

$$U_i = U_0 \left( 1 + \frac{U_{\max}}{U_S} \right) \quad (7b)$$

ここに  $U_{\max}$  は最大経験変位であり  $K_1$ ,  $U_0$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  および  $U_S$  は未知パラメータである。

### d) まとめ

以上のように改良したモデルの概念図を図-24に示す。また、具体的な数式を以下にまとめて示す。

$$F = F_1 + F_2 + F_3 \quad (8a)$$

$$F_1 = K_1 \left\{ \beta + (1 - \beta) \exp \left( - \frac{U_{\max}}{\alpha} \right) \right\} U + a [1 - \exp(-b|U|)] \operatorname{sgn}(U) \quad (8b)$$

$$\dot{F}_2 = \frac{Y_i}{U_i} \left\{ \dot{U} - \left| \dot{U} \right| \left[ \frac{F_2}{Y_i} \right]^n \operatorname{sgn} \left( \frac{F_2}{Y_i} \right) \right\} \quad (8c)$$

$$Y_i = Y_0 \left( 1 + \left| \frac{U}{U_H} \right|^p \right) \quad (8d)$$

$$U_i = U_0 \left( 1 + \frac{U_{\max}}{U_S} \right) \quad (8e)$$

$$F_3 = K_2 \left[ \frac{U}{U_H} \right]^r U \quad (8f)$$

ここで未知パラメータは、 $K_1$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $n$ ,  $Y_0$ ,  $U_H$ ,  $p$ ,  $U_0$ ,  $U_S$ ,  $K_2$  および  $r$  の13個であり、すべて非負の値である。

### (3) 未知パラメータの同定

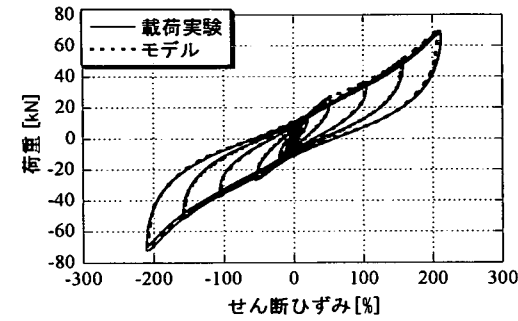
式(9)に含まれる13個のパラメータは、以下に定義した  $E$  が最小になるように、最小二乗法の1つであるシンプレックス法<sup>15)</sup>を用いて同定した。

$$E = \int_0^T \| F_{\exp} - F_{\text{cmp}} \|^2 |\dot{U}| dt \quad (9)$$

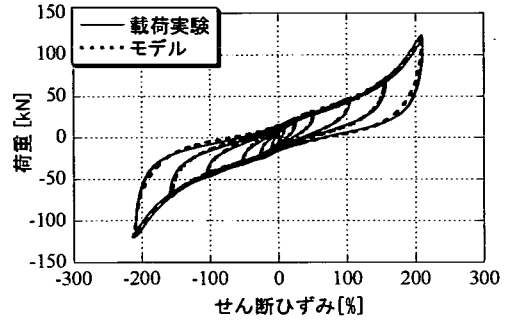
ここに  $F_{\exp}$  は水平1方向載荷実験で得られた積層ゴム支承の復元力特性、 $F_{\text{cmp}}$  は式(9)を計算して得られる復元力特性であり、 $\dot{U}$  は速度である。また、 $E$  は、実験ならびにモデルから得られる復元力特性が描く、履歴面積の差をあらわしている。

本研究では、上述したシンプレックス法により未知パラメータを同定した。各積層ゴム支承について、同定したパラメータ値を表-5に示す。

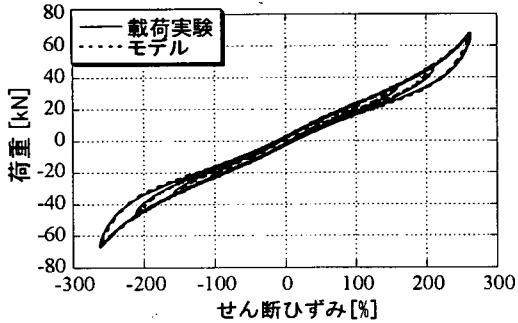
表-5に示したパラメータを用いたモデルによるシミュレーション結果と、水平1方向載荷実験結果の比較を各支承について図-25に示す。図-25をみるとHDR-A, HDR-C, NRB-A およびLRBともに、載荷実験結果にみられるハードニング特性や、履歴ループの振幅依存性を提案したモデルにより精度よく再現できていることがわかる。なお、紙面の関係上省略するがHDR-B, HDR-D およびNRB-Bについても表-5の同定したパラメータにより実験結果を精度よく再現できた。



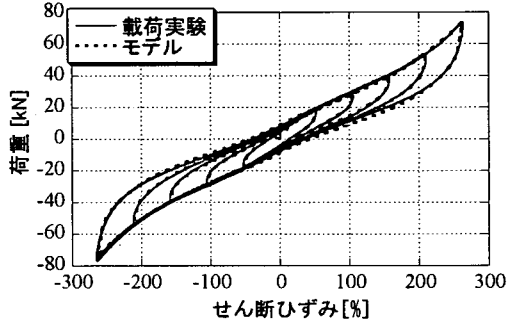
(a) HDR-A



(b) HDR-C



(c) NRB-A



(d) LRB

図-25 水平1方向載荷実験結果とモデルによるシミュレーション結果の比較

#### 4. 水平2方向モデル

##### (1) Graesser の構成モデル

E.J.Graesser および Cozzarelli<sup>14)</sup> は, 3. (1) で記載した Ozdemir モデルを 1次元の Cauchy 応力  $\sigma$  と微小ひずみ  $\varepsilon$  の関係に用いて, 次のように記述した.

$$\dot{\sigma} = E(\dot{\varepsilon} - \dot{\varepsilon}^p) \quad (10a)$$

$$\beta = \alpha E \varepsilon^p \quad (10b)$$

$$\dot{\varepsilon}^p = \left| \dot{\varepsilon} \left( \frac{|\sigma - \beta|}{\sigma_y} \right)^n \right| \text{sgn}(\sigma - \beta) \quad (10c)$$

ただし  $E$  はヤング率,  $\sigma_y$  は降伏応力であり,  $\alpha$  はひずみ硬化に関するパラメータである. また  $\beta$  は降伏曲面の中心を示す背応力である.

さらに非線形粘弾性論<sup>16)</sup>に基づき, 式(10)を以下に示す3次元の弾塑性構成則に拡張している.

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij}^e + \dot{\varepsilon}_{ij}^p \quad (11a)$$

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^e = \frac{1+\nu}{E} \dot{\sigma}_{ij} - \frac{\nu}{E} \dot{\sigma}_{kk} \delta_{ij} \quad (11b)$$

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^p = (3K_2)^{1/2} (3J_2^0)^{(n-1)/2} \Delta_{ij} \quad (11c)$$

$$b_{ij} = \frac{2}{3} E \alpha (3K_2)^{1/2} (3J_2^0)^{(n-1)/2} \Delta_{ij} \quad (11d)$$

ここに, 
$$S_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3} \sigma_{kk} \delta_{ij} \quad (12a)$$

$$b_{ij} = \beta_{ij} - \frac{1}{3} \beta_{kk} \delta_{ij} \quad (12b)$$

$$e_{ij} = \varepsilon_{ij} - \frac{1}{3} \varepsilon_{kk} \delta_{ij} \quad (12c)$$

$$J_2^0 = \frac{1}{2\sigma_y^2} (S_{ij} - b_{ij})(S_{ij} - b_{ij}) \quad (12d)$$

$$K_2 = \frac{1}{2} \dot{e}_{ij} \dot{e}_{ij} \quad (12e)$$

である. ただし  $\varepsilon_{ij}$ ,  $\sigma_{ij}$  および  $b_{ij}$  は, それぞれ微小ひずみテンソル, Cauchy 応力テンソルおよび背応力テンソルを表すものとする. また  $\nu$  はポアソン比である. 式(11)は古典塑性論という Mises 型の降伏条件と Prager の線形移動硬化則を有する.

##### (2) 構成モデルの縮退

式(12)を水平2方向に対応した型に縮退する. この縮退したものを以後縮退2軸モデルと呼ぶ. 縮退2軸モデルを導出するために, ポアソン比の影響を受けない2つのせん断成分のみが存在する場合を考え, 式(11)に代入する. 次に変形がせん断であることより, せん断降伏応力  $\tau_y$  およびせん断弾性係数  $G$  が

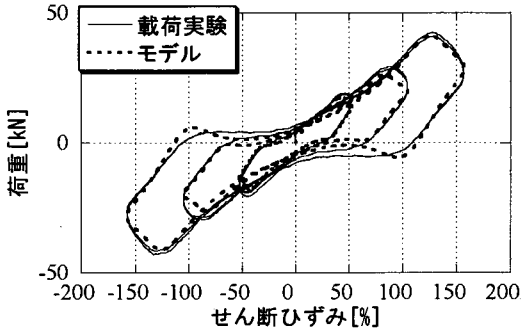
$$\tau_y = \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} \quad (13a)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (13b)$$

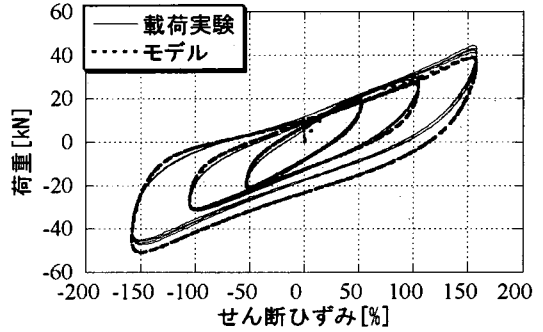
のように記述できることから  $\sigma_y$ ,  $E$  および  $\nu$  を消去する. さらに変位-復元力関係になおすために

表-6 1方向モデルと2方向モデルにおける復元力の対応

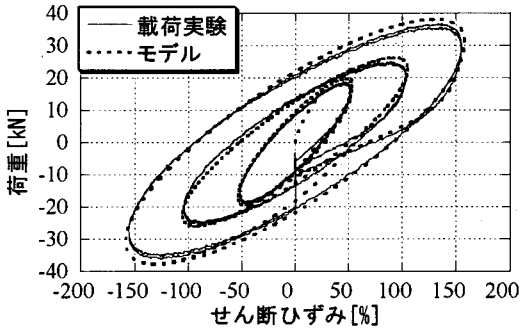
|      | 1方向モデル          | 2方向モデル                                      |
|------|-----------------|---|
| ベクトル | $F$             | $\mathbf{F} = \{F_x \ F_y\}^T$              |
| 絶対値  | $ F $           | $ \mathbf{F}  = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$       |
| 方向   | $\text{sgn}(F)$ | $\mathbf{n} \equiv \mathbf{F}/ \mathbf{F} $ |



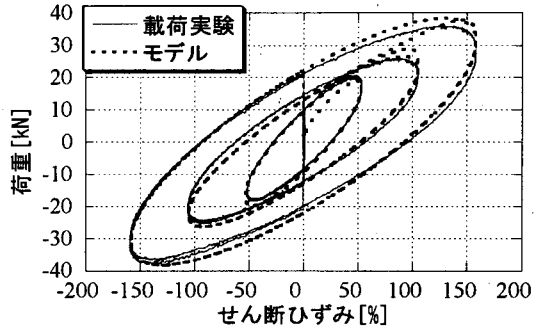
(a) 8の字経路でのX方向



(b) 8の字経路でのY方向



(c) 円経路でのX方向



(d) 円経路でのY方向

図-26 HDR-Aの水平2方向載荷実験結果とモデルによる解析結果の比較

$$\sigma_{12} = \sigma_{21} \rightarrow F_x, \quad \sigma_{13} = \sigma_{31} \rightarrow F_y \quad (14a)$$

$$b_{12} = b_{21} \rightarrow S_x, \quad b_{13} = b_{31} \rightarrow S_y \quad (14b)$$

$$\varepsilon_{12} = \varepsilon_{21} \rightarrow U_x, \quad \varepsilon_{13} = \varepsilon_{31} \rightarrow U_y \quad (14c)$$

$$G \rightarrow Y_i / U_i, \quad \tau_y \rightarrow Y_i \quad (14d)$$

のように置換すると次式の縮退2軸モデルを導くことができる。

$$\frac{\dot{\mathbf{F}}}{Y_i} = \frac{\dot{\mathbf{U}}}{U_i} - \frac{|\dot{\mathbf{U}}|}{U_i} \left| \frac{\mathbf{F} - \mathbf{S}}{Y_i} \right|^{n-1} \frac{\mathbf{F} - \mathbf{S}}{Y_i} \quad (15a)$$

$$\frac{\mathbf{S}}{Y_i} = \alpha \left( \frac{\mathbf{U}}{U_i} - \frac{\mathbf{F}}{Y_i} \right) \quad (15b)$$

ここに

$$\mathbf{F} = \{F_x \ F_y\}^T \quad (16a)$$

$$\mathbf{S} = \{S_x \ S_y\}^T \quad (16b)$$

$$\mathbf{U} = \{U_x \ U_y\}^T \quad (16c)$$

であり、それぞれ復元力ベクトル、背荷重ベクトルおよび変位ベクトルである。

式(15)をみると1方向から2方向に拡張した場合には、復元力ベクトル $\mathbf{F}$ を例にとると表-6のような対応があることがわかる。表-6のような関係は、変位ベクトル $\mathbf{U}$ にも同様に成立する。

### (3) 縮退2軸モデルの拡張

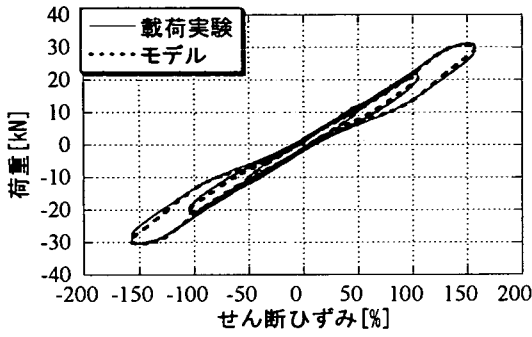
積層ゴム支承の水平2方向復元力特性を再現するために、式(15)で表される縮退2軸モデルを以下のように拡張し、水平2方向モデルを構築した。

水平2方向モデルの復元力ベクトル $\mathbf{F}$ のX方向成分 $F_x$ およびY方向成分 $F_y$ は、弾性バネ、弾塑性バネおよびハードニングバネの3つが並列に付加されていることから、それぞれの復元力ベクトル $\mathbf{F}^{(1)}$ 、 $\mathbf{F}^{(2)}$ および $\mathbf{F}^{(3)}$ の和として次のように記述できる。

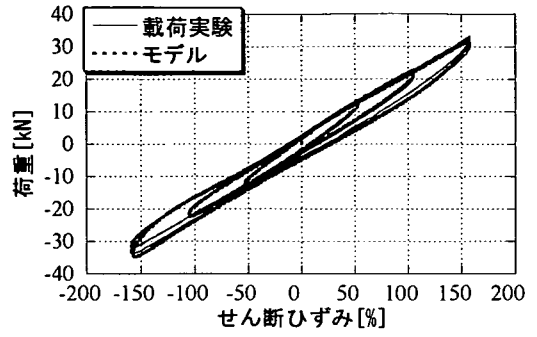
$$\mathbf{F} = \begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \end{Bmatrix} = \mathbf{F}^{(1)} + \mathbf{F}^{(2)} + \mathbf{F}^{(3)} \quad (17)$$

以下では上述した3つの復元力ベクトルの具体的な式について説明する。

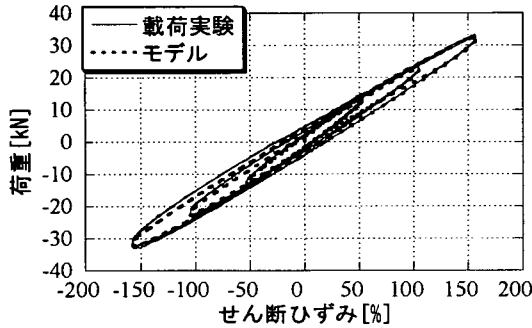
まず、式(8b)で表される弾性バネを2方向に拡張



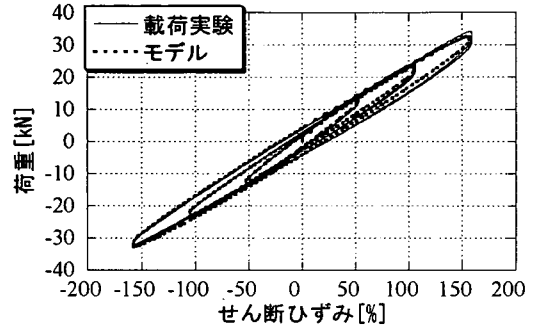
(a) 8の字経路でのX方向



(b) 8の字経路でのY方向



(c) 円経路でのX方向



(d) 円経路でのY方向

図-27 NRB-Aの水平2方向荷重実験結果とモデルによる解析結果の比較

する。式(8b)の  $U_{\max}$  は、 $|U|$  が過去に経験した最大値であることを考慮して、表-6の対応により

$$\mathbf{F}^{(1)} = K_1 \left\{ \beta + (1 - \beta) \exp\left(-\frac{\tilde{U}_{\max}}{\alpha}\right) \right\} \mathbf{U} + a \{1 - \exp(-b|U|)\} \frac{\mathbf{U}}{|U|} \quad (18a)$$

$$\mathbf{U} = \{U_x \ U_y\}^T \quad (18b)$$

を得る。ただし  $\mathbf{U}$  は変位ベクトルであり  $\tilde{U}_{\max}$  は  $|U|$  が過去に経験した最大の値である。ここで独立変数として時刻  $t$  を用いると  $\tilde{U}_{\max}$  は

$$\tilde{U}_{\max}(t) = \max_{0 < s \leq t} \{ |U(s)| \} \quad (19)$$

のように記述することができる。

次いで式(15)の縮退2軸モデルを1方向モデルの場合と同様に拡張する。まず、完全弾塑性モデルにするために  $\alpha = 0$  とおくと式(15)は

$$\frac{\mathbf{F}^{(2)}}{Y_i} = \frac{\dot{\mathbf{U}}}{U_i} - \frac{|\dot{\mathbf{U}}|}{U_i} \left( \frac{\mathbf{F}^{(2)}}{Y_i} \right)^{n-1} \frac{\mathbf{F}^{(2)}}{Y_i} \quad (20)$$

となる。また、表-6を参照してハードニング特性をモデル化している式(8d)を2方向に拡張すると、

$$Y_i = Y_0 \left\{ 1 + \left( \frac{|U|}{U_H} \right)^p \right\} \quad (21)$$

を得る。さらに降伏変位  $U_i$  の最大経験ひずみ依存性を表す式(8e)は、式(19)の  $\tilde{U}_{\max}$  を用いて

$$U_i = U_0 \left( 1 + \frac{\tilde{U}_{\max}}{U_S} \right) \quad (22)$$

のように拡張できる。

一方、ハードニングバネは表-6の拡張方法により、

$$\mathbf{F}^{(3)} = K_2 \left( \frac{|U|}{U_H} \right)^r \mathbf{U} \quad (23)$$

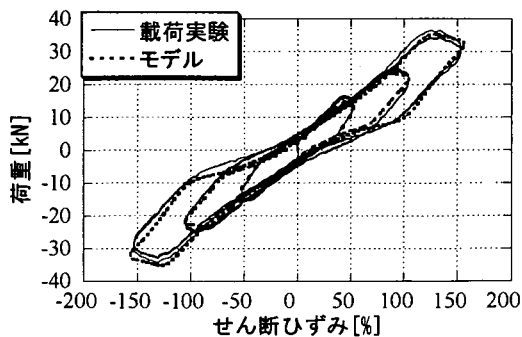
を得る。ただし  $K_1$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $a$ 、 $b$ 、 $n$ 、 $Y_0$ 、 $U_H$ 、 $p$ 、 $U_0$ 、 $U_S$ 、 $K_2$  および  $r$  は、水平1方向モデルの場合と同一の値である。そのため、水平1方向荷重実験結果から同定した値をそのまま利用できる。

#### (4) 水平2方向荷重実験結果との比較

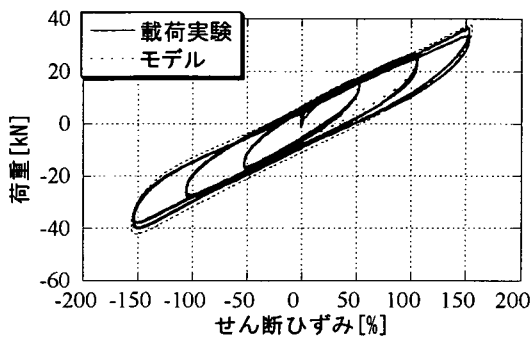
提案した水平2方向モデルの、基本的な水平2方向変位経路に対する再現性を検証するために水平2方向荷重実験結果と、モデルによる解析結果の比較を行った。

図-26にHDR-Aの水平2方向荷重実験結果と、表-5のパラメータを式(17)~(23)に適用したモデルによる解析結果との比較を示す。図-26をみるとHDRに特有の2方向の連成によるエネルギー吸収性能の増加や、履歴ループの形状の変化を本モデルにより再現できていることがわかる。

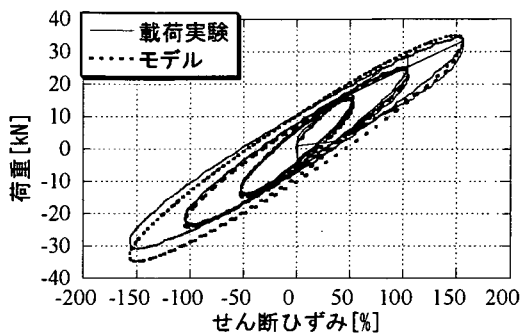




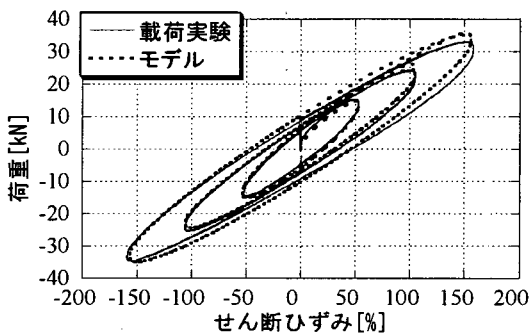
(a) 8の字経路でのX方向



(b) 8の字経路でのY方向



(c) 円経路でのX方向



(d) 円経路でのY方向

図-28 LRBの水平2方向載荷実験結果とモデルの比較

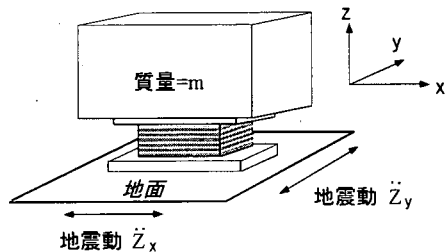


図-29 ハイブリッド実験に用いた構造系の概念図

次に図-27 および図-28 にそれぞれ NRB-A および LRB の水平2方向載荷実験結果と解析結果の比較を示す。図-27 および図-28 をみると NRB-A, LRB ともに載荷実験結果とモデルがよく一致していることがわかる。また、本モデルを LRB に適用した場合には、2方向の連成によるエネルギー吸収性能の増加が現れていないことがわかる。

なお、図は省略するが HDR-B, HDR-C, HDR-D および NRB-B についても、提案したモデルにより実験結果を精度良く再現することができた。

以上より HDR, NRB および LRB いずれも水平2方向に正弦波を組み合わせた簡便な変位経路における復元力特性を、提案したモデルにより再現することがわかった。

## 5. 復元力モデルの地震応答予測性能の検証

ここでは、本文4節で提案した水平2方向モデルの地震応答予測性能を、ハイブリッド地震応答実験結果と比較することで検討する。

### (1) ハイブリッド地震応答実験

ハイブリッド地震応答実験<sup>10)</sup>は、任意の構造系に地震動を加えた場合において、構造系の一部の力学特性を載荷実験により求め、それをオンラインで利用することで応答解析を行う、実験と数値計算を融合した手法である。

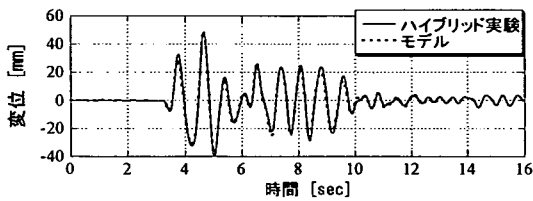
実験では図-29 に示すように、積層ゴム支承に支持された1質点系の構造系を想定し、この構造系が水平2方向に地震動を受けた場合の応答を算出する。

この構造系の運動方程式は、構造減衰が小さいと仮定すると

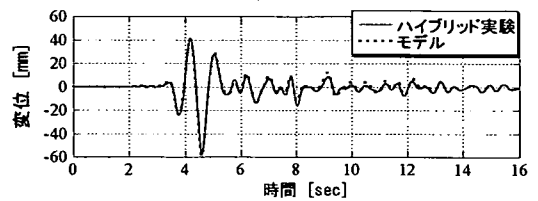
$$m \ddot{u}_x + f_x = -m \ddot{z}_x \quad (24a)$$

$$m \ddot{u}_y + f_y = -m \ddot{z}_y \quad (24b)$$

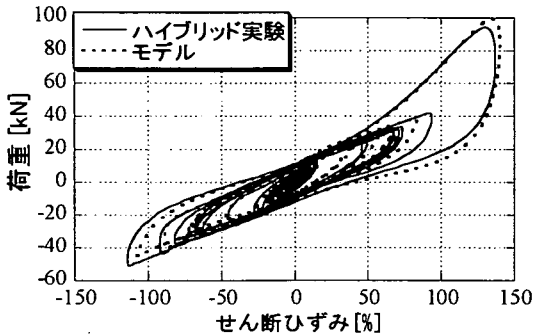
となる。ここに、 $m$  は質点の質量、 $u_x$  および  $u_y$  は  $x$  方向ならびに  $y$  方向の変位応答、 $f_x$  および  $f_y$  は  $x$  方向ならびに  $y$  方向における支承の復元力、 $\ddot{z}_x$  および  $\ddot{z}_y$  は  $x$  方向ならびに  $y$  方向の地震加速度である。ただし、時刻  $t_n$  における応答  $\{u_x(n), u_y(n)\}$  の算出に



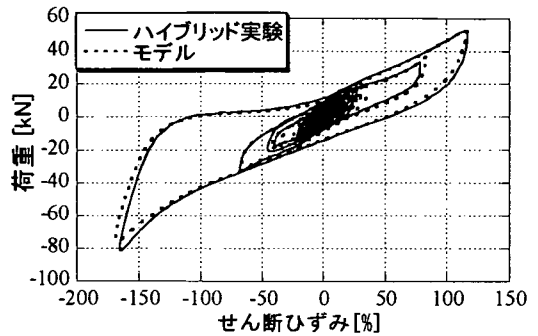
(a) X方向での変位応答の比較



(b) Y方向での変位応答の比較

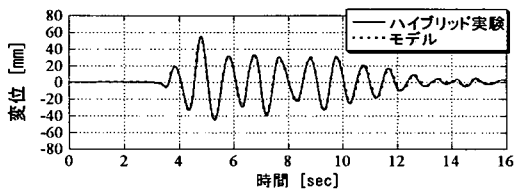


(c) X方向での変位-荷重関係

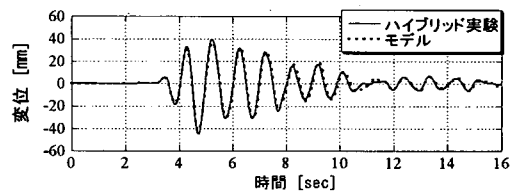


(d) Y方向での変位-荷重関係

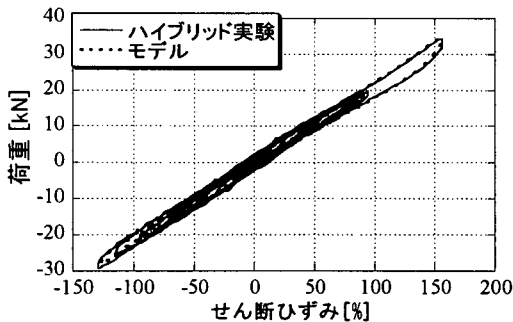
図-30 HDR-Cのハイブリッド実験における復元力特性と水平2方向モデルによる解析結果の比較



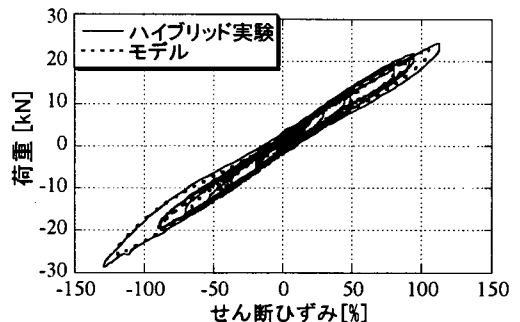
(a) X方向での変位応答の比較



(b) Y方向での変位応答の比較



(c) X方向での変位-荷重関係



(d) Y方向での変位-荷重関係

図-31 NRB-Aのハイブリッド実験における復元力特性と水平2方向モデルによる解析結果の比較

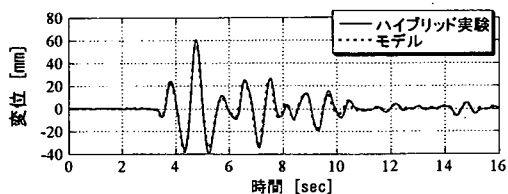
必要な積層ゴム支承の復元力 $\{f_x(n-1), f_y(n-1)\}$ は、時刻 $t_{n-1}$ での変位応答 $\{u_x(n-1), u_y(n-1)\}$ を積層ゴム支承に載荷し得られたものをコンピュータにフィードバックして用いている。

運動方程式(24)は、コンピュータ内で中央差分法<sup>12)</sup>により数値積分した。ただし、入力地震動は、変位応答の最大値が積層ゴム支承のせん断ひずみ150%前後となるように兵庫県南部地震時に観測された実地震記録

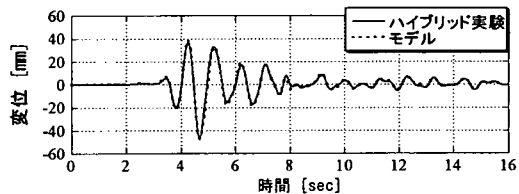
をスケールして用いた。なお載荷は、実時間の20倍のスケールで行った。

## (2) モデルによる解析結果との比較

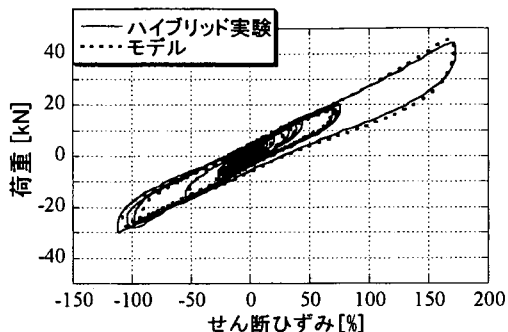
図-30、図-31 および図-32 にそれぞれ HDR-C、NRB-A および LRB のハイブリッド地震応答実験結果と、水平2方向モデルによる解析結果との比較を示す。



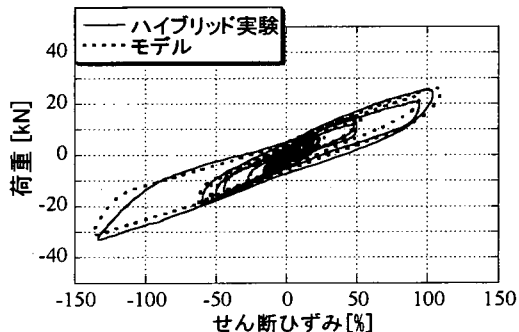
(a) X方向での変位応答の比較



(b) Y方向での変位応答の比較



(c) X方向での変位-荷重関係



(d) Y方向での変位-荷重関係

図-32 LRBのハイブリッド実験における復元力特性と水平2方向モデルによる解析結果の比較

図-30 から図-32 の変位応答の比較みると各積層ゴム支承について解析による応答が実験結果を精度よく近似できていることがわかる。また、応答の最大値は、誤差 2%前後に収まっており、本モデルにより精度よく予測できた。以上より提案した水平 2 方向モデルの地震応答予測性能を検証できた。

ただし、HDR-A および HDR-B については、ハイブリッド実験を行ったときの温度が、パラメータ同定時に用いた水平 1 方向載荷実験の場合の値と大きく異なっていた。そのためこれら 2 つの高減衰積層ゴム支承については実験結果にゴムの温度・速度依存性が顕著に現れ、本モデルの地震応答予測性能を確認することができなかった。

## 6. まとめ

本研究では、広く利用されている積層ゴム支承について載荷実験を行い、その結果に基づき水平 2 方向載荷を含む復元力特性のモデルを構築・検証した。本研究で対象とした積層ゴム支承について以下の知見が得られた。

- 1) 微小振幅載荷実験の結果から、HDR および NRB の復元力特性は、わずかながら面圧依存性を有しており、面圧が低い場合には剛性が増加し、減衰比は、減少する。一方、LRB は、面圧による復元力特性の差が顕著に表れ、面圧が高いほど剛性、減衰比ともに最大で 2 倍程度大きくなる。
- 2) 水平 2 方向載荷実験の結果から、2 方向の変形が連成することにより、HDR ならびに NRB は減衰性能が増大し、逆に LRB は減衰性能が若干減少

する。

- 3) 水平 1 方向復元力特性を広い振幅領域において精緻に再現できる水平 1 方向モデルを提案した。
- 4) 3 次元弾塑性構成モデルをベースとし、2 方向の載荷を受ける支承の復元力特性に対応した水平 2 方向モデルを理論的に導出した。また、簡便な変位経路に対するモデルの再現性を実験結果と比較することで検証した。
- 5) 水平 2 方向ハイブリッド地震応答載荷実験の結果を、モデルを用いた解析結果と比較し、モデルの地震応答予測性能を検討した。その結果、1 質点系の 2 方向地震応答を、提案したモデルにより精度よく予測できることがわかった。

なお、本モデルでは、積層ゴム支承が有する温度依存性、速度依存性、および両者が連成した場合の力学特性の変化を考慮していない。実際に支承が利用されている環境を考慮すると、より精緻な検討のためには、それらをモデルに取り入れることが必要である。

**謝辞：**積層ゴムの載荷実験で用いた供試体の設計・製作および予備実験において、川口金属工業(株)の比志島康久氏および鶴野慎史氏、(株)ブリヂストンの水津洋二氏および須藤千秋氏、オイレ工業(株)の伊関治郎氏、下田郁夫氏および横川英彰氏、横浜ゴム(株)の遠藤和夫氏および山根義洋氏、東洋ゴム(株)の数田史郎氏に多大な協力を賜った。

モデルの構築では、(株)JR 東日本の武貞聡氏に補助して頂いた。また、載荷実験を行うにあたっては、上野助手(現在高知工科大学)および東京大学橋梁研

研究室技官の大竹完治氏ならびに学生一同に協力して頂いた。ここに記して謝意を表する。

#### 参考文献

- 1) 藤田隆史, 藤田聡, 鈴木重信, 芳沢利和: 建物免震用の積層ゴムに関する実験的研究(第1報, 50トン用積層ゴムの静的加力実験), 日本機械学会論文集(C編), 53巻485号, pp.71-76, 1987.
- 2) 藤田隆史, 藤田聡, 鈴木重信, 芳沢利和: 建物免震用の積層ゴムに関する実験的研究(第2報, 100トン用積層ゴムの静的加力実験), 日本機械学会論文集(C編), 53巻485号, pp.77-81, 1987.
- 3) 水津洋二, 須藤千秋, 鈴木重信, 福森建至: 高減衰ゴム支承の微小変形領域特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.906-907, 1993.
- 4) 菊池優, 猿田正明, 田村和夫: 建築免震用積層ゴムの復元力特性に関する研究, 構造工学論文集, 日本建築学会, Vol.40B, pp.177-188, 1994.
- 5) 大鳥靖樹, 松田泰治, 石田勝彦: 高減衰積層ゴムの動的な基本特性に関する実験的研究, 第9回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.1753-1758, 1994.
- 6) 大鳥靖樹, 松田泰治, 石田勝彦: 仮動的実験による高減衰積層ゴムの載荷速度依存性に関する検討, 日本建築学会構造系論文集, Vol.41B, 1994.
- 7) 八坂厚彦: 免震建築用積層ゴムの動特性に関する研究, 学位論文, 東京大学工学部建築学科, 1995.
- 8) 八坂厚彦, 飯塚真巨, 竹中康雄, 藤本信夫, 前田祥三: 建築の免震防振構法の開発(その12 弾塑性ダンパー及び高減衰積層ゴムの水平2方向加力実験), 日本建築学会学術講演梗概集, pp.395-396, 1987.
- 9) 八坂厚彦, 飯塚真巨, 竹中康雄, 藤本信夫, 前田祥三: 建築の免震防振構法の開発(その13 水平2軸加力実験のシミュレーション解析), 日本建築学会学術講演梗概集, pp.397-398, 1987.
- 10) 岩田秀治, 家村浩和, 青木利昭, 杉山公一, 鶴野禎史: 大規模自由通路橋の2方向免震支承のハイブリッド地震応答載荷実験, 第25回地震工学研究発表会講演論文集, 土木学会, 1998.
- 11) Huang, W.H., Fenves, G.L., Whittaker, A.S. and Mahin, S.A.: Characterization of Seismic Isolation Bearings for Bridges from Bi-directional Testing, Paper No.2047, 12WCEE, 2000.
- 12) 柴田明徳: 最新建築学シリーズ9 最新耐震構造解析, 森北出版, 1981.
- 13) Ozdemir, H.: Nonlinear transient dynamic analysis of yielding structure, Ph.D Dissertation, University of California, Berkeley, 1973.
- 14) Graesser, E.J. and Cozzarelli, F.A.: A Multi-dimensional Hysteretic Model for Energy Absorbing Devices, Technical Report NCEER-91-0006, State University of New York at Buffalo, 1991.
- 15) 佐藤郁郎: 最小2乗法その理論と実際 観測データの非線形解析, 山海堂, 1997.
- 16) Shames, H.A. and Cozzarelli, F.A.: *Elastic and Inelastic Stress Analysis*, Taylor & Francis, 1997.
- 17) 藤野陽三, 阿部雅人, 吉田純司: 微小振幅領域における高減衰積層ゴム支承の復元力特性, 土木学会第54回年次学術講演会講演概要集 I-B, pp.486-487, 1999.

(2001.2.5 受付)

## UNIAXIAL AND BIAXIAL PROPERTY OF BASE-ISOLATION BEARINGS AND ITS MODELING

Masato ABE, Junji YOSHIDA and Yozo FUJINO

In this study, based on the results of the experiments, a model for the laminated rubber bearings is proposed. At first, to understand the mechanical property of rubber bearings, uni-axial and bi-axial loading experiments are done over a wide range of shear strain. Then the Ozdemir's elasto-plastic model is extended to accommodate the experimental results by adding a nonlinear spring, isotropic hardening and stiffness degradation. A simulation by this model can reproduce the load-displacement relation of the uni-axial and bi-axial experiments well. The performance of this model for predicting the seismic response is verified by comparing the simulation with the results of hybrid seismic response experiment of the rubber bearings.