

ゴム材の圧縮変形を利用した反力分散装置の ハイブリッド地震応答実験

伊津野和行¹・児島孝之²・鈴木亮介³・和田教志⁴・吉野 伸⁵

¹正会員 工博 立命館大学助教授 理工学部土木工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

²フェロー 工博 立命館大学教授 理工学部土木工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

³正会員 トービー建設工業株式会社 大阪支店営業部 (〒530-0028 大阪市北区万歳町4-12)

⁴正会員 工修 トービー建設工業株式会社 設計部 (〒060-0001 札幌市中央区北一条西六丁目2)

⁵非会員 東京ファブリック工業株式会社 大阪支店 (〒532-0011 大阪市淀川区西中島3-9-13)

多径間連続橋の、地震時反力分散と大変形の抑制とをはかるため、ゴム材の圧縮変形を利用した反力分散装置の検討を行うことを目的に、静的載荷試験とハイブリッド地震応答実験を実施した。ハイブリッド地震応答実験からは、ゴム材に生じるハードニング現象によって過大な変位応答が抑えられるとともに、橋脚基部の曲げモーメントを、許容値以下に抑えられることを示した。また、反力分散装置に対してマルチリニア型の履歴復元力特性を仮定することにより、ハイブリッド実験結果を、数値シミュレーションにより精度よく再現することができた。さらに、温度変化による地震開始時における装置の初期変位は、橋脚の地震応答に与える影響が小さいことを数値解析により示した。

Key Words : *distribution of seismic lateral force, pseudo-dynamic earthquake response tests, rubber device with hardening effect, multi-span continuous girder bridge*

1. はじめに

橋梁を多径間連続化することにより、構造上の弱点である桁端部を減らすことや、走行性を改善することができる。しかし、固定支承の選定方法によっては、温度応力の問題と地震時の反力分散方法の問題が生じる。そこで様々な手段によって、多径間連続橋の試みが検討されている^{1), 2)}。反力分散装置として粘性ダンパーを用いた場合、常日頃からのメンテナンスの必要がある。また、ゴム材のせん断変形を利用したゴム支承を用いた場合、変位応答が大きくなるため、継手部の工夫やストッパーの検討が必要である。変位応答を簡単に抑制するためには、ゴム材の圧縮変形を用いることが有効だと考えられる。ただし、単なるストッパー的な使用方法では、橋脚に作用する地震力が瞬間的に過大となる可能性があり、剛性を調整したり、減衰性を増したりする等の工夫が必要となる。

1995年1月の阪神・淡路大震災以降、橋梁の地震時挙動を改善するため、ゴム材の利用によって衝撃的な動きを抑えることが、積極的に求められるようになった³⁾。しかし、ゴム材のもつ変形能力を超えた力を受けた場合、急激に剛性が高まるハードニング現

象が発生し、橋梁の地震応答に大きな影響を及ぼすことも考えられる。ハードニング現象が発生すれば、剛性が高くなって衝撃的な力が構造物に作用する可能性がある反面、変形が抑制されて過大な揺れを止めるストッパーとしての働きが期待できる利点もある。従来、地震時反力分散装置の設計にあたっては、ゴム沓を線形挙動をするバネとしてモデル化しており、ハードニング現象がおこる領域までの地震応答は考えていなかった。地震時におけるゴム材の正確な挙動を把握することは、橋梁の耐震安全性の向上に有効であると考えられる。

本研究では、ゴム材の圧縮変形を用いた地震時反力分散装置^{4), 5)}の有効性を検討するため、静的載荷試験とハイブリッド地震応答実験を行ない、その基礎的特性を検討した。

本研究で用いた地震時反力分散装置の概念図を図-1に示す。支承にはスライド沓等の可動沓を用いて、鉛直反力を受け持たせる。アンカーボルトには、従来より単純桁によく使用されているキャップ方式のアンカーバーを使用する。その際、アンカーバーとキャップを矩形断面として、橋軸直角方向には拘束固定とする。橋軸方向には、アンカーバーとキャップとの間にゴムを介在させ、ゴムの圧縮バネを利用

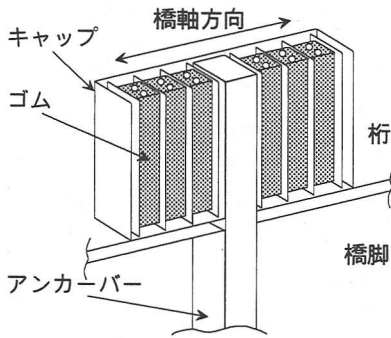


図-1 反力分散装置の概念図

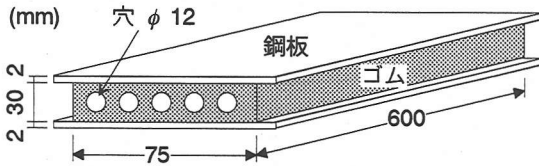


図-2 供試体形状

して各橋脚に反力を分散させようとするものである。ただし、板状のゴムをそのまま用いるとバネ定数が大きくなりすぎ、また圧縮変形に伴う側方への膨張が大きくなるため、数個の穴を空けて調節している。本反力分散装置では、ゴム材に死荷重は作用しない。従来の反力分散支承と比較して、疲労特性の面では有利である。

著者らはこれまでに、天然ゴムを素材とした本装置の片振幅静的荷重実験と、それに基づく反力分散装置を設置した連続橋の地震応答解析について報告した⁵⁾。その結果、1)微小変形に対しては剛性が低いが、ハードニングが発生すると急激に剛性が高まって非線形性が非常に強くなり、曲線的な変位-復元力曲線となること、2)天然ゴムを用いた装置の場合には、等価減衰定数は約2%であり、それほど大きな減衰効果は望めないこと、3)本反力分散装置の非線形履歴復元力特性をモデル化し、反力分散装置を設置した多径間連続橋の地震応答解析を行った結果、反力分散装置としては十分な特性を持っているが、応答波形には衝撃的なパルス波形が含まれる場合があること、が判明した。それを受けて、本研究では、両振幅荷重が可能な実験システムに改良するとともに、高減衰ゴムを素材とした反力分散装置の供試体も作成し、その特性を天然ゴムを素材とした装置と比較した。さらに、ハイブリッド地震応答実験により、地震応答特性を評価した。また、温度の影響に

表-1 PC 5 径間連続桁橋の設計条件

| | |
|--------------|--------------------------------|
| 下部構造形式 | 張出し式橋脚 |
| 死荷重反力合計 | 1,550t |
| 有効幅員 | 8.5m |
| 支間 | 20.9m |
| 橋脚高さ | 11.0m |
| 橋脚断面 | 3.0m×2.1m |
| 設計水平震度 | |
| ・地域別補正係数 | 地域区分A |
| ・地盤別補正係数 | II種地盤 |
| ・重要度別補正係数 | 重要度区分1級 |
| 基礎構造形式 | 直接基礎 |
| コンクリート設計基準強度 | 210kgf/cm ² (21MPa) |

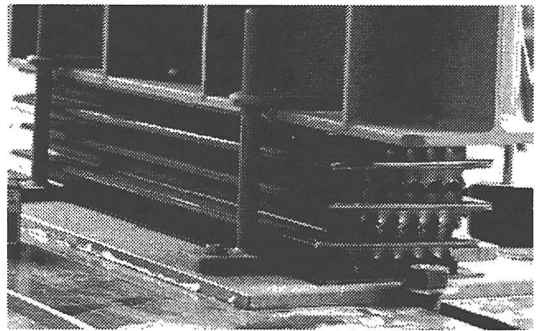


写真-1 荷重中の供試体

よる地震応答開始時における初期条件の差が、その後の地震応答挙動に与える影響についても検討した。

2. 実験概要

供試体は、ゴム材として天然ゴムを用いた供試体と、高減衰ゴムを用いた供試体の2種類である。ゴムは幅と長さが異なれば、剛性が異なるという性質を有している。本研究で用いた供試体は、プレテンション形式のPC 5 径間連続橋を表-1に示す条件で試設計し、その端部での反力分散装置に求められる剛性が得られるよう、ゴム材の形状と寸法を定めた。なお、表-1の条件は、平成2年度の道路橋示方書⁶⁾に基づいている。本装置の利用目的として、PC橋梁の多径間連続化が考えられるため、その基本的な適用例として、ここでは5径間連続橋を考えている。本供試体は、幅75mm、長さ600mm、厚さ30mmのゴム板を3層にしてあり、各層は厚さ2mmの鋼板で上下を挟んで加硫接着してある。各層の供試体形状の模式図を図-2に、荷重中の供試体の写真を写真-1に示す。

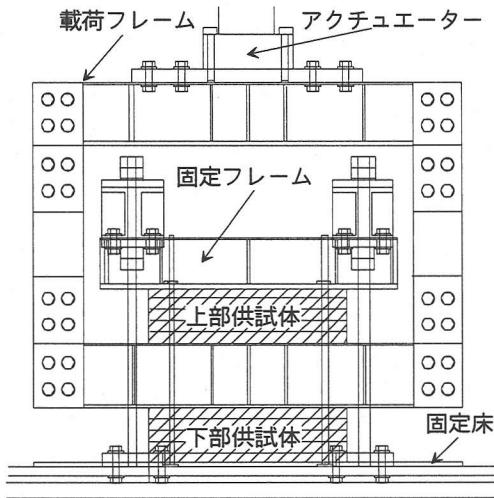


図-3 载荷装置

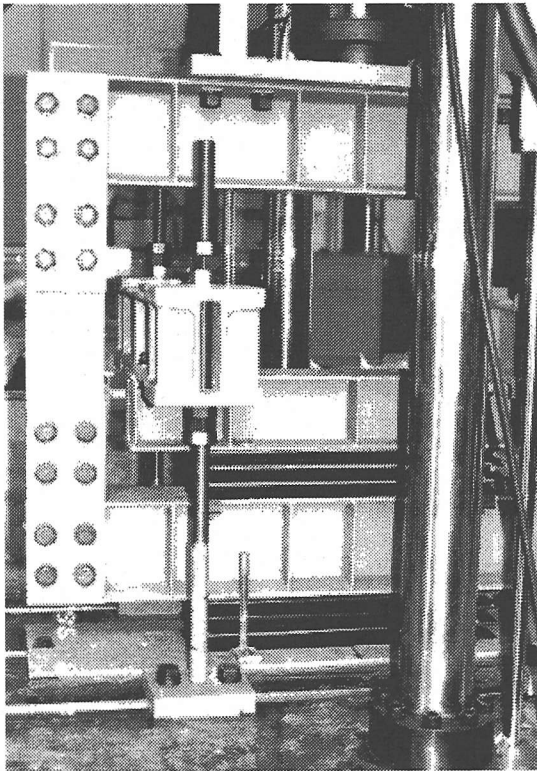


写真-2 载荷実験装置

次に、実験に用いた载荷システムを図-3、および写真-2に示す。「口」の字形の载荷フレーム下部の上下に、3層に重ねた供試体をそれぞれ設置した。油圧アクチュエーターの上下動によって両振幅の载荷

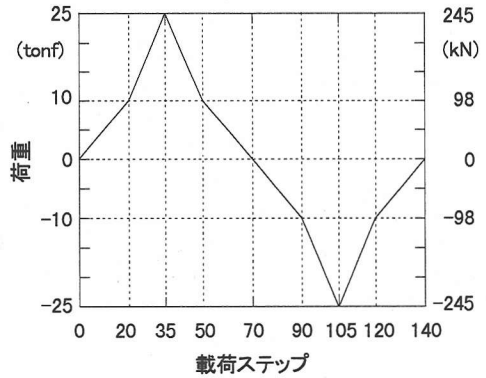


図-4 静的载荷パターン

実験が可能であり、実橋に本装置を設置したときの状況を実現している。実験は、実橋に設置した場合の状況を90°回転した形で実施された。つまり、地震による水平動によって、アンカーバーが水平に動く状況を、実験では载荷フレームの上下動によって模擬している。なお、ゴム供試体の基本的応答特性を検討することを主体に考えているため、アンカーバーを模擬する载荷フレームは実橋でのように片持ち梁とはせず、供試体全面に均等に力がかかりやすいようにしてある。

固定フレームと固定床の間に設置された上部と下部の各供試体は、载荷フレームとは一体化されていないため、引張り力は受けない構造になっている。供試体の間にはさまれた载荷フレームの動きによって圧縮力のみを受ける。つまり、载荷フレームが上方に動くとき、载荷フレームと固定フレームにはさまれた上部供試体は圧縮力を受けるが、下部の供試体と载荷フレームとの間は開き、下部の供試体は引張り力を受けない。下方に動くときは逆に、下部の供試体のみ圧縮力を受け、上部の供試体は载荷フレームとともに降りて行くだけで、固定フレームとの間が開いて力を受けない。これは、圧縮耐力の方が引張り耐力よりもはるかに大きいため、安全側の仕様を考えて、供試体あるいは実橋に設置した本反力分散装置を、引張り領域で用いないためである。圧縮耐力は $1000\text{kgf/cm}^2=98\text{MPa}$ 程度が予測される¹⁾のに対し、引張り耐力は $50\text{kgf/cm}^2=4.9\text{MPa}$ 程度²⁾だと考えられる。本装置は、地震力に対して、ゴム部材の圧縮変形に対応するところに特徴がある。

なお、用いたアクチュエーターの能力は、静的载荷の場合 $\pm 40\text{tonf}$ (3.9MN)、動的载荷の場合 $\pm 30\text{tonf}$ (2.9MN)、ストロークは $\pm 150\text{mm}$ である。

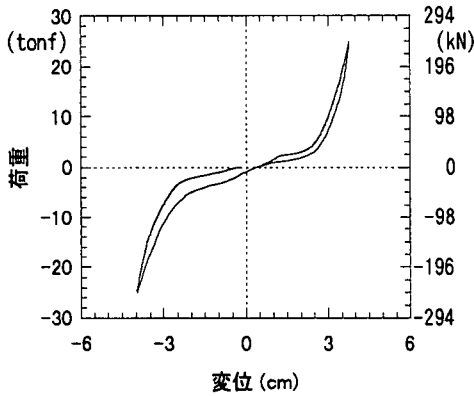


図-5 天然ゴム供試体の静的載荷履歴曲線

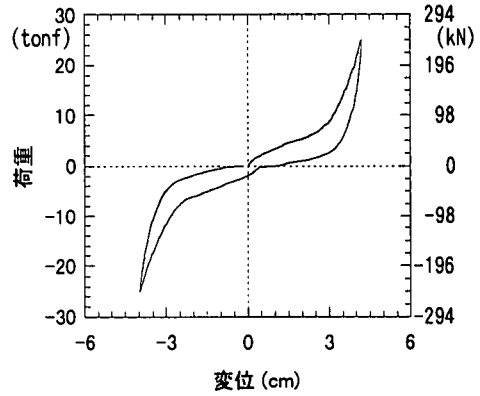


図-6 高減衰ゴム供試体の静的載荷履歴曲線

3. 静的載荷実験

静的載荷試験として、 $\pm 25\text{tonf}$ (2.5MN)の荷重制御による載荷を行った。静的載荷パターンを図-4に示す。 $\pm 10\text{tonf}$ (98kN)の領域では1ステップ 500kgf (4.9kN)ずつ増減載荷し、それ以外では1ステップ 1tonf (9.8kN)ずつの載荷とした。これは、本装置の特徴として、低荷重領域では剛性が低いために変形量が大きく、高荷重領域ではハードニング現象により変形量が小さくなることを考慮したものである。静的載荷実験結果の荷重-変位曲線(履歴曲線)を図-5と図-6に示す。図-5は天然ゴムを用いた供試体、図-6は高減衰ゴムを用いた供試体の、それぞれの荷重-変位曲線である。

本装置は、ゴムに穴を空けて小変形時の低剛性領域を広く取ることによって、剛性の調整をはかったものである。各図より、 $\pm 3\text{cm}$ の変形領域では、低剛性が保たれていることがわかる。変形量が約 3cm 以上になると、剛性が急激に高くなるハードニング現象が発生している。本装置では、ゴムの材料特性としてのハードニングよりも、穴がつぶれて剛性が変化することによるハードニングの影響の方が大きい。供試体に設けた $\phi 12$ の穴で生成される $\phi 12 \times 3$ 層 = 36mm の空隙がつぶれることにより、剛性が大きく変化している。逆に、穴の大きさを制御することで、応答変位の制御もある程度可能になると考えられる。ハードニングが起きると、荷重-変位特性は曲線的な関係を示す。

どちらの供試体も、ハードニング開始点や最大荷重 25tonf (2.5MN)載荷時の変形量は、ほぼ同じである。高減衰ゴムを用いた図-6のほうが、天然ゴムの図-5よりもふくらんだ形状になっている。荷重-変位曲線の囲む面積から求められる等価減衰定数は、

図-5の天然ゴムで2%、図-6の高減衰ゴムで6%であった。ゴムの圧縮変形を利用する本装置では、高減衰ゴムを用いても、せん断変形を利用する場合のように、十数%もの等価減衰定数は期待できない。しかし、天然ゴムに比べると大きな履歴減衰が得られるため、地震時応答はより小さなものになると考えられる。ただし、載荷履歴の影響等、材料特性の違いによる効果については、別途検討する必要がある⁹⁾。

圧縮変形を利用する本装置では、変形量に現実的な限界があり、また、せん断変形を利用した装置よりも構造的に破断がおこりにくいいため、ダンパストッパーや反力分散装置としての特性に優れていると考えられる。

本装置では、実橋ではアンカーフレームに相当する載荷フレームの両側に設置されたゴム部材に、圧縮力しかかからない構造になっている。引張りに対しては動きを拘束しておらず、常に片側の部材の圧縮で動きに抵抗する。そのため、履歴曲線が載荷時も除荷時も原点を通るという、原点指向型の特性を示している。地震後の残留変形に関しては、特に検討する必要はないものと考えられる。

本供試体は、常時および震度法レベルの地震時に対して、 120kgf/cm^2 (12MPa)以下の圧縮応力度になるよう設計されている。本供試体の破壊形式は圧縮による補強鋼板の破断が想定され、圧縮強度としては 1000kgf/cm^2 (98MPa)以上となる¹⁾。本供試体寸法では、圧縮力 500tonf (5MN)にも耐えられるものと予測され、本実験で見られる程度のハードニング現象が発生しても、十分安全性が確保されていると判断できる。

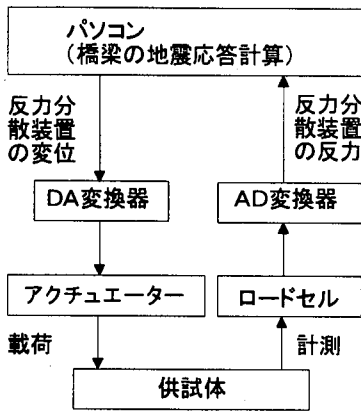


図-7 ハイブリッド地震応答実験のフロー

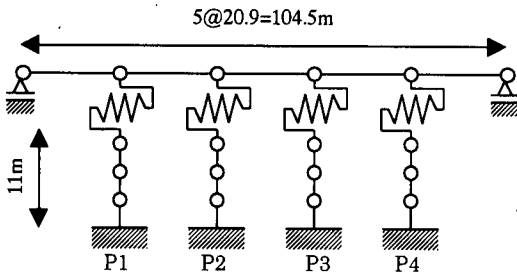


図-8 5径間連続橋の解析モデル

4. ハイブリッド地震応答実験

静的載荷実験より、本装置は大きな非線形履歴特性を示すことがわかった。線形応答計算を行ったのでは、実際とかなり異なった応答を予測してしまう可能性がある。ここでは、部材の非線形履歴復元力特性を仮定することなく、実験から直接求めつつコンピュータで地震応答計算を行うという、ハイブリッド地震応答実験（仮動的実験）を実施した結果を示す。ハイブリッド実験では、構造物の地震応答をコンピュータで解析し、各ステップにおける非線形部材の変形をその場で実験供試体に与え、実験から得られた復元力をコンピュータに取り込んで、次のステップの計算に進む。コンピュータとしては、パソコンを利用した。パソコンから、DA変換器を介して与えられた変位命令によって、アクチュエーターを変位制御で駆動する。アクチュエーターにつけられたロードセルからの復元力情報は、AD変換器を介しパソコンに入力される。この流れを図-7に示す。

構造物のモデルとしては、図-8に示すような、プレテンション方式PC5径間連続桁橋を用いた。各スパン21m、橋脚高さ11mとし、前章で供試体寸法を

表-2 ハイブリッド実験ケース

| ケース | 供試体 | 入力地震波 |
|------|-------|---------------|
| ケース1 | 天然ゴム | 震度法レベル |
| ケース2 | 高減衰ゴム | 震度法レベル |
| ケース3 | 高減衰ゴム | 地震時保有水平耐力法レベル |

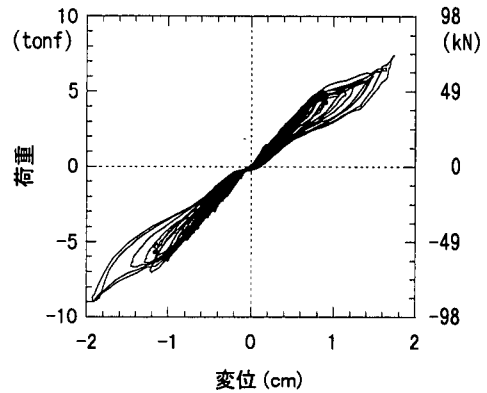


図-9 ケース1：天然ゴム供試体の震度法レベル波形に対する地震応答

決めたのと同じ表-1の条件で試設計を行って橋脚断面（3.0m×2.1mの長方形断面）等を仮定した。橋脚下端における降伏モーメントは2254tonf.m（22MJ）、終局モーメントは2680tonf.m（26MJ）となった。図-8のバネの形で描いた反力分散装置以外は線形梁部材とし、反力分散装置の履歴復元力特性は、ハイブリッド実験から直接求めることとした。利用できる実験施設の制限により、一度に1つの供試体しか実験できないため、4基の反力分散装置のうち、端部の1基だけを実験した。地震時反力の分散がある程度成り立つことを前提として、便宜的に他の3基は、実験供試体から得られた復元力を、当該部材の計算変位と実験部材に与える変位との比例配分によって与えることとした。また、モード減衰として、全モードに対して、5%減衰を仮定した。

入力地震波は、震度法レベルのII種地盤用標準地震波形⁹⁾、および、平成2年道路橋示方書の地震時保有水平耐力照査法レベルの、II種地盤用標準地震波形¹⁰⁾を用いた。

実験装置の制限（±30tonf=2.9MNまで）から、あまり大きな荷重を与えることができなかったため、高減衰ゴム供試体に対しては両波形を用いたが、天然ゴム供試体に対しては震度法レベルの波形のみを用いた。実験ケースを表-2に示す。

表-3 ハイブリッド地震応答実験による最大応答値

| ケース | 単位 | ケース1 | ケース2 | ケース3 |
|--------------|----------|--------|--------|---------------|
| 供試体 | | 天然ゴム | 高減衰ゴム | 高減衰ゴム |
| 入力地震波 | | 震度法レベル | 震度法レベル | 地震時保有水平耐力法レベル |
| 桁の加速度 | (gal) | 270 | 260 | 840 |
| 分散装置の変形量 | (cm) | 1.9 | 1.3 | 2.9 |
| 分散装置の復元力 | (tonf) | 9.0 | 9.2 | 30. |
| | (KN) | 88 | 90 | 290 |
| 橋脚上端の加速度 | (gal) | 290 | 440 | 1400 |
| 橋脚下端の曲げモーメント | (tonf.m) | 530 | 510 | 2000 |
| | (MJ) | 5.2 | 5.0 | 20. |

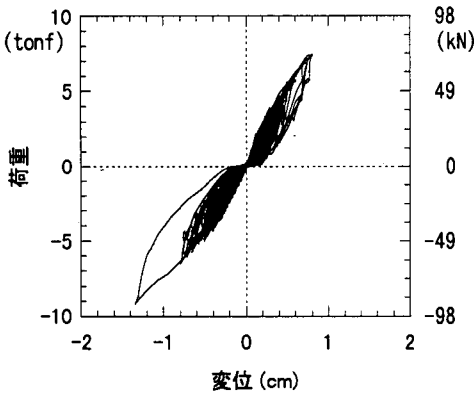


図-10 ケース2：高減衰供試体の震度法レベル波形に対する地震応答

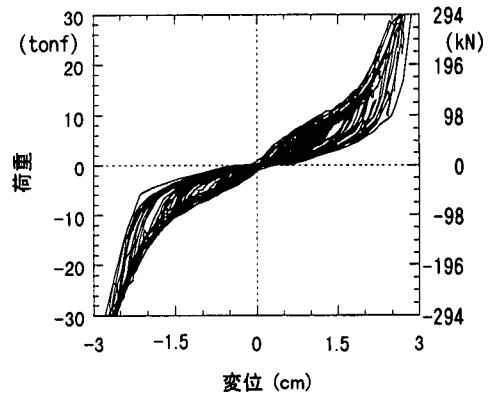


図-11 ケース3：高減衰供試体の地震時保有水平耐力照査法レベル波形に対する地震応答

ハイブリッド実験を行なったのは、前章で静的載荷実験結果を示したのと同じ供試体である。図-9～図-11に、ハイブリッド実験結果の履歴曲線を示す。図-9がケース1、図-10がケース2、図-11がケース3の履歴曲線である。

図-9と図-10の震度法レベルの実験では、用いた地震入力が比較的小さかったため、ハードニング現象は発生していない。これに対して図-11の地震時保有水平耐力照査法レベルの実験では、ハードニング現象が発生している。図-6の静的載荷実験よりも小さな変形でハードニングが発生したのは、繰り返し載荷における穴のつぶれ方の違いに一つの原因があると考えられる。繰り返し載荷中においては、穴がつぶれる際に、必ずしも圧縮方向だけにつぶれるとは限らず、わずかなせん断変形を生じつつつぶれる場合がある。その場合、穴がつぶれて接触した面が摩擦しながら変形するため、穴の外周面が接触せずに圧縮方向のみに変形する場合より、剛性が上がるこ

とになる。また、載荷速度が影響している可能性も考えられる。ハイブリッド実験では、実時間を約80倍に引き延ばしているが、それでも静的載荷実験よりは100倍程度速い載荷になっている。ゴムが定常位置に戻るまでに次の載荷が行われると、見かけ上、剛性が高くなることも考えられる。ハードニングが始まる変位が応答に及ぼす影響に関しては、実用化にあたって、さらに検討する必要がある。

最大応答値をまとめて、表-3に示す。桁の加速度応答は、震度法レベルの実験では天然ゴム供試体の場合で268gal、高減衰ゴム供試体の場合で258galと、ほぼ同じ最大応答加速度を示した。約5%高減衰ゴム供試体の最大加速度が小さいだけであった。しかし、変位応答では、図-9と図-10の履歴曲線より、ケース1の天然ゴム供試体が1.9cmに対し、ケース2の高減衰ゴム供試体は1.3cmと、30%小さな最大変位応答になっている。変位のRMS応答では、ケース1の0.6cmに対して、ケース2では0.3cmと、50%ほど小さい値

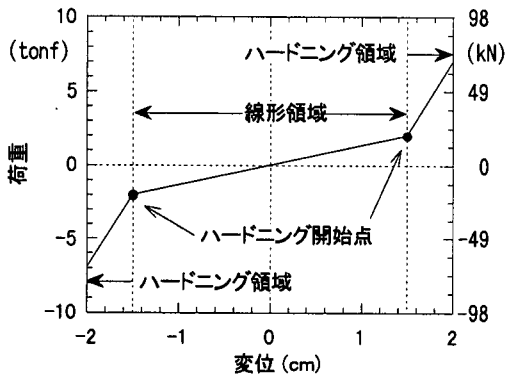


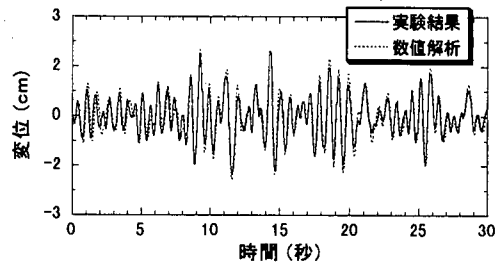
図-12 マルチリニア型履歴復元力特性

であった。最大応答のみならず、地震の継続時間中、全域において応答変位を抑えることができています。地震時保有水平耐力照査法レベルの実験では、加速度応答は800gal以上となっているが、こちらも変位応答は約3cmに抑えられている。なお、実際の橋梁に適用する際には、より大きな変形能が要求される場合も考えられるが、本装置では、ゴムを何層にするか、穴の大きさをどのように設定するかによって、変形能を制御することが可能である。

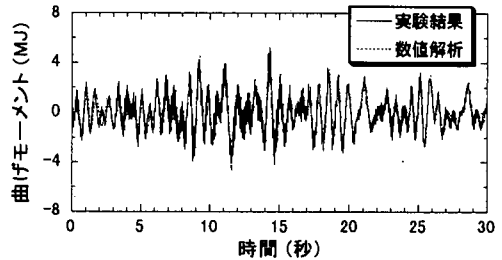
橋脚下端の曲げモーメント応答には、ケース3の場合、後述する図-15に示すようなパルス的な応答が見られたが、最大値は2000tonf.m(19.6MJ)であった。これは、表-1の条件に基づいて試設計した橋脚モデルの降伏モーメント2254tonf.m(22MJ)以下であり、橋脚は降伏していない。

5. 数値解析による実験の再現

ここでは、前章の実験結果を、数値解析によって再現することを試みる。ハードニング現象までを考慮した数値解析モデルとしては、バイリニア型モデルに三角形のハードニング領域を加えたモデル¹¹⁾や、指数型関数を仮定したモデル¹²⁾、バイリニア型モデルに多項式のハードニング領域を加えたモデル⁹⁾などが提案されている。しかし、本研究で天然ゴムと高減衰ゴムとを比較すると、図-5と図-6の履歴曲線から明らかなように、使用する材質によって、ハードニングの度合いや除荷時の傾きが異なることがわかる。材質や形状を変えるたびに、履歴復元力モデルの係数を多数変更しなければならないモデルは、実務設計の面では煩雑であり、より簡略なモデルで応答の概略を求めることも重要である。そこで、本



(a) 変位応答



(b) 橋脚下端の曲げモーメント応答

図-13 ケース1：天然ゴム供試体の震度法レベル波形に対する実験値と解析値の比較

研究では、履歴減衰が小さいことに着目して、マルチリニア型の履歴復元力特性を仮定し、等価粘性減衰を別途考慮することによって、応答の再現を試みることにする。

図-12に、仮定するマルチリニア型履歴復元力特性の模式図を示す。ハードニング開始点までと、ハードニング開始後の2つの直線の傾きで、復元力特性を表現している。また、原点に関して点対称とした。載荷時も除荷時も、これらの直線に沿って応答し、履歴応答によるエネルギー吸収は考えない。その代わり、本特性を有する部材に対しては、天然ゴムを用いた装置では2%、高減衰ゴムを用いた装置では6%の、等価粘性減衰をひずみ比例エネルギー法より精算して付加する。なお、この等価粘性減衰とは別に、モード減衰として、全振動モードに対して5%を与えた。

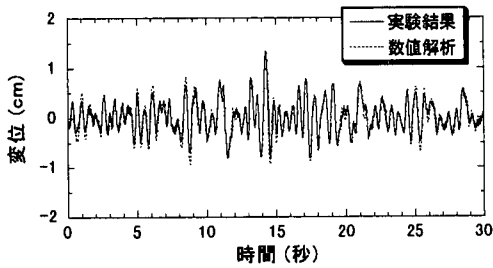
本手法によって実験の再現を試みた例を示す。ハードニング開始点の変位は、ハイブリッド実験ケース3の図-11を参考に、1.5cmと仮定した。図-13はケース1、図-14がケース2、図-15がケース3の比較であり、それぞれ(a)が端部の橋脚上にある反力分散装置の変位波形、(b)が端部の橋脚下端部における曲げモーメントの応答波形である。実線が実験結果、点線が数値解析結果を示している。いずれのケース

表-4 実験値と解析値の最大応答値の比較

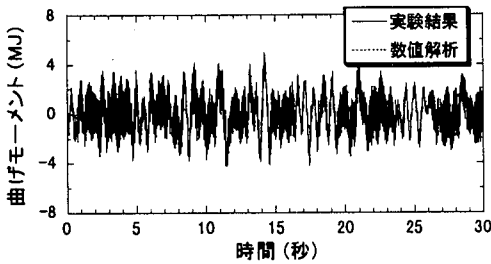
| | ケース1 | | ケース2 | | ケース3 | |
|-----------------|--------|-----|--------|-----|-------------------|-----|
| 供試体 | 天然ゴム | | 高減衰ゴム | | 高減衰ゴム | |
| 地震波 | 震度法レベル | | 震度法レベル | | 地震時保有水平 耐力法レベル | |
| | 実験 | 解析 | 実験 | 解析 | 実験 | 解析 |
| 装置変位(cm) | 1.9 | 2.0 | 1.3 | 1.3 | 2.8 | 2.7 |
| 橋脚下端曲げモーメント(MJ) | 5.2 | 5.4 | 5.0 | 4.8 | 20. | 18. |

表-5 温度を考慮した各ケースにおける装置の初期変位

| 装置の設置橋脚 | P1 | P2 | P3 | P4 |
|---------|------|------|------|------|
| 常温時 | 0mm | 0mm | 0mm | 0mm |
| 低温時 | 6mm | 2mm | -2mm | -6mm |
| 高温時 | -6mm | -2mm | 2mm | 6mm |

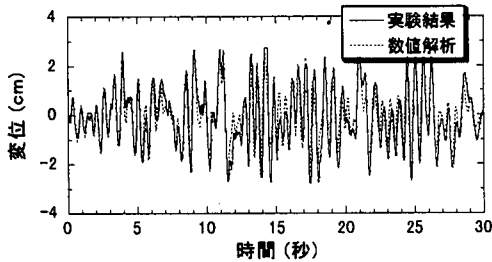


(a) 変位応答

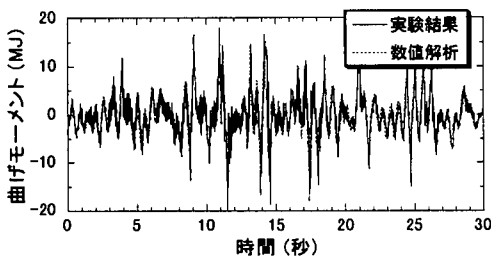


(b) 橋脚下端の曲げモーメント応答

図-14 ケース2：高減衰ゴム供試体の震度法レベル波形に対する実験値と解析値の比較



(a) 変位応答



(b) 橋脚下端の曲げモーメント応答

図-15 ケース3：高減衰ゴム供試体の地震時水平保有耐力法レベル波形に対する実験値と解析値の比較

も、波形の形状をほぼ再現でき、実験値を精度よく再現していることがわかる。

実験と解析から得られた最大応答値を、各ケースで比較したものを、表-4に示す。変位については5%以内、曲げモーメントについてはパルスの応答のため多少ばらつきが大きい、それでも10%程度の精度で、最大値を予測することができている。設計にあたっては、本計算例のように、マルチリニア型モデルを用いて、非線形特性を評価すればよいと考えられる。マルチリニア型モデルの係数は、ゴムの形状から初期剛性を決め、穴の直径をもとにハードニングが開始する変位を仮定する。第2剛性は初期剛性の数倍となる大きな剛性を与えればよいと考えられ、材質や形状の違いに対しても対応することが容易である。以上、ハードニング開始点と、ハードニング前後の剛性を設定するだけの簡易なモデルで、十分実用的な応答予測を行えることを示した。

6. 温度変化による初期変位の影響

本論文で取り扱っている反力分散装置は、常時の温度変化によって伸縮する。そのため、地震発生時の初期位置が、これまでの章で仮定してきたような中立位置にあるとは限らない。常温時に、アンカーバーの両側のゴム部材に圧縮力がかからないように設置されたとしても、その後の温度変化に追従して、すでに圧縮力が入った状態で地震力を受けるゴム部材もあると考えられる。そこで本章では、高温時あるいは低温時に、地震が発生した場合のシミュレー

表-6 温度変化を考慮した場合の各橋脚に関する最大応答結果

| ケース | 常温時 | | | | 低温時 | | | | 高温時 | | | |
|-----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | P1 | P2 | P3 | P4 | P1 | P2 | P3 | P4 | P1 | P2 | P3 | P4 |
| 橋脚番号 | P1 | P2 | P3 | P4 | P1 | P2 | P3 | P4 | P1 | P2 | P3 | P4 |
| 桁の加速度 (gal) | 1120 | 1120 | 1120 | 1120 | 1140 | 1140 | 1140 | 1140 | 1100 | 1100 | 1100 | 1100 |
| 反力分散装置の変形量 (cm) | 4.8 | 4.8 | 4.8 | 4.8 | 5.2 | 4.9 | 4.6 | 4.2 | 4.2 | 4.6 | 4.9 | 5.2 |
| 反力分散装置の復元力 (tonf) | 52 | 52 | 52 | 52 | 50 | 52 | 52 | 53 | 53 | 52 | 52 | 50 |
| の復元力 (MN) | 5.1 | 5.1 | 5.1 | 5.1 | 4.9 | 5.1 | 5.1 | 5.2 | 5.2 | 5.1 | 5.1 | 4.9 |
| 橋脚天端の加速度 (gal) | 1640 | 1640 | 1640 | 1640 | 1580 | 1620 | 1650 | 1700 | 1700 | 1650 | 1620 | 1580 |
| 橋脚天端の変位 (cm) | 21.4 | 21.4 | 21.4 | 21.4 | 20.7 | 21.1 | 21.7 | 22.1 | 22.1 | 21.7 | 21.1 | 20.7 |
| 橋脚の塑性率 | 5.5 | 5.5 | 5.5 | 5.5 | 5.3 | 5.4 | 5.6 | 5.7 | 5.7 | 5.6 | 5.4 | 5.3 |
| 橋脚下端の曲げモーメント (tonf.m) | 2680 | 2680 | 2680 | 2680 | 2680 | 2680 | 2680 | 2680 | 2680 | 2680 | 2680 | 2680 |
| (MJ) | 26 | 26 | 26 | 26 | 26 | 26 | 26 | 26 | 26 | 26 | 26 | 26 |

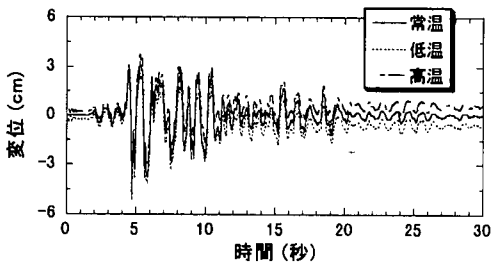


図-16 温度による初期変位の差を考慮した反力分散装置の変位応答波形の比較

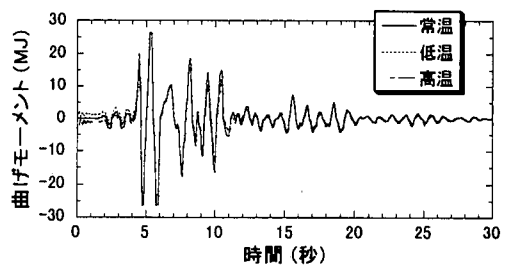


図-17 温度による初期変位の差を考慮した橋脚下端部曲げモーメント応答波形の比較

ションを行うこととした。反力分散装置としては、天然ゴムを用いた装置の特性を用いた。前章で仮定した5径間連続桁橋の各橋脚上の反力分散装置の、設計で考慮する $\pm 20^{\circ}\text{C}$ の温度変化による変位を初期変位として与えた。以下、標準温度 15°C を常温時と表記し、 $+20^{\circ}\text{C}$ の 35°C を高温時、 -20°C の -5°C を低温時と表記する。設計で考慮する温度変化による変形は、端部の装置では6mm、中央部の装置では2mmである。高温時の解析として、これらの変位を橋梁端部方向に与え、逆に低温時の解析として、これらの変位を橋梁中央方向に与えた。比較のため、中立位置を初期変位と仮定した場合を、常温時の解析とした。図-8の5径間連続桁橋の各橋脚を左からP1, P2, P3, P4とし、それぞれのケースにおける反力分散装置の初期変位を表-5に示す。表中の値は、P1橋脚からP4橋脚方向への変位を正とした。

入力地震波としては、初期変位の影響が大きく現れるよう、強い地震動を与えることとし、1995年兵庫県南部地震時の神戸海洋気象台NS記録を用いた。反力分散装置に対しては、前章で提案したマルチリ

ニア型の復元力特性を仮定し、橋脚に対しては、完全弾塑性型の骨格曲線を持ったClough型の履歴特性を仮定して計算を行った。

表-6に最大応答値の比較を示す。桁の最大応答加速度は、各ケースとも2%程度しか異ならず、初期条件の影響をほとんど受けていない。

装置に生じる変形は、温度変化によって $\pm 10\%$ の差が生じることがわかる。また、常温時は各橋脚変位がほぼ等しいが、低温時や高温時には、最大6%程度の差が生じる。例として、図-16に、各ケースにおけるP1橋脚に設置された反力分散装置の変位応答波形を示す。初期変位6mmがそのままその後の応答にも影響を与えている様子が分かる。また、ここで用いた波形は、平成8年度の道路橋示方書¹⁾で規定された、地震時保有水平耐力照査法レベルのタイプ2地震にほぼ相当する地震波形であるが、この場合にも最大応答変位は約5cmに抑えられていることがわかる。

しかし、橋脚下端部の最大曲げモーメントは、初期変位の影響を受けていない。図-17に、P1橋脚下端

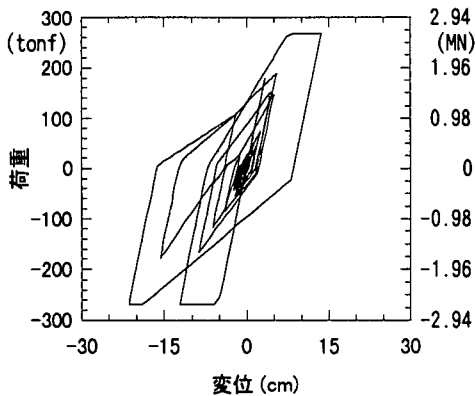


図-18 常温時ケースのP1橋脚下端部の履歴曲線

部における曲げモーメントの応答波形を示す。応答の初期においては、初期変位の影響が見られるが、最大応答時以降には、ほぼ同じ波形となっている。また、橋脚の履歴復元力特性に対して、完全弾塑性型の骨格曲線を仮定したため、最大曲げモーメントがどのケースでも同じ値になっている。橋脚の断面力設計に関しては、初期変位の影響を考慮せずに設計してもよいと考えられる。

図-18に、常温時のケースにおける、P1橋脚の変位-復元力履歴曲線を示す。降伏変位3.9cmに対して、最大応答変位は21~22cmであり、最大塑性率は5.3~5.7である。橋脚の塑性変形能に対する温度の影響は、設計時に検討する必要があるが、それほど大きな差は見られなかった。

図-17の応答波形にパルス的な波形が見られないのは、橋脚が非線形領域に入っているためである。反力分散装置がハードニング領域に入るような大きな地震入力に対しては、橋脚が塑性域に入って剛性軟化型の応答を示すことにより、橋脚と桁とが一体となって応答をすることになる。その結果、パルス的な応答が見られなくなったものと考えられる。十分塑性域に入って抵抗できるような橋脚であれば、橋脚の塑性応答を許容することによって、橋脚が線形応答を示した場合のような、パルス的な断面力応答は問題にならないということになる。

7. おわりに

本研究では、ゴム材の圧縮変形を利用した反力分散装置の地震時挙動に関して、両振幅静的載荷実験とハイブリッド地震応答実験を行なった。今後、本装置の適用条件や設計法など、実橋への適用を考慮

した検討を、さらに進めていくことが必要である。本研究で得られた主な結論は、以下の通りである。

- 1) 天然ゴムを用いた場合と、高減衰ゴムを用いた場合について、反力分散装置の両振幅静的載荷実験を行なった。低剛性域の後、層厚合計の30%を越える圧縮をうけるとハードニング現象が発生した。天然ゴムを用いた場合には、等価減衰定数は2%であったが、高減衰ゴムを用いると6%になり、減衰性の向上が確認された。
- 2) プレテンション方式PC5径間連続橋のフレームモデルを用いて、反力分散装置のハイブリッド地震応答実験を実施した。震度法レベルの地震入力に対しては、ハードニング現象は発生しなかった。地震時保有水平耐力照査法レベルの地震入力に対しては、ハードニングが発生し、変位応答を小さく抑えることができた。橋脚下端の曲げモーメント応答はパルス的な波形となったが、仮定した橋脚断面は降伏域に達しなかった。
- 3) 反力分散装置の履歴復元力特性を、マルチリア型でモデル化し、等価減衰定数を付加することによって、ハイブリッド実験の結果を数値解析で模擬することを試みた。ハードニング開始点と、ハードニング前後の剛性を設定するだけの簡易なモデルで、十分実用的な応答予測を行うことができた。
- 4) 温度変化による反力分散装置の初期変位の、中立位置からのずれを考慮した数値シミュレーションを行った。反力分散装置の応答値には±10%程度の影響が見られたが、橋脚の断面力応答にはほとんど影響しなかった。また、大きな地震入力によって橋脚が非線形領域に入る場合には、線形応答を仮定した場合のようなパルス的な断面力応答波形は見られなかった。

謝辞：供試体の載荷実験にあたっては、立命館大学理工学部土木工学科の高木宣章助教授、および研究当時立命館大学大学院生であった松尾真紀氏、恵川智史氏、川村弘昌氏、桑尚輔氏にお世話になった。また、糸山謙治氏、浜田英比古氏、田村和久氏をはじめとする東京ファブリック工業株式会社の方々との多大な協力を得た。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 久保明英, 河村幸夫, 熊井三見, 佐藤正明: ゴム支承による地震力の多脚分散を図った北明橋の動的性能, 第22回地震工学研究発表会, 土木学会, pp. 791-794, 1993年7月。
- 2) 後藤洋三, 菊池敏男, 伊奈義直: 超多径間連続免震橋の

- 最適固有周期に関する考察, 第22回地震工学研究発表会, 土木学会, pp. 811-814, 1993年7月.
- 3) 日本道路協会: 「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係わる仕様」の準則に関する参考資料(案), 1995年6月.
- 4) 鈴木亮介: 連続桁構造物の水平反力分散方法, 日本国特許庁公開特許公報, 昭63-114705, 1988年5月.
- 5) 伊津野和行, 児島孝之, 鈴木亮介, 和田教志, 濱田譲, 吉野伸: ゴム材の圧縮変形を利用した地震時反力分散装置の開発, 土木学会論文集, No.563/I-39, pp.71-78, 1997年4月.
- 6) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, V耐震設計編, 1990年2月.
- 7) 東京ファブリック工業株式会社: コンクリート桁用ゴムシューの静的・動的試験(抜粋), ST研資, 第59号, 1983年6月.
- 8) ゴム支承協会, 日本支承協会: 積層ゴム支承の引張りせん断同時載荷特性の確認試験結果速報, 1995年8月.
- 9) R.I.スキナー, W.H.ロビンソン, G.H.マックベリー: 免震設計入門, 川島一彦, 北川良和監訳, 鹿島出版会, p.85, 1996年11月.
- 10) 土木研究センター: 道路橋の免震設計マニュアル(案), 1992年3月.
- 11) 山田善一, 家村浩和, 渡辺典男: 高減衰積層ゴム支承の履歴モデルと地震応答に関する研究, 平成4年度土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集, I-45, 1992年5月.
- 12) Kikuchi, M. and Aiken, I.D.: An analytical hysteresis model for elastomeric seismic isolation bearings, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 26, pp. 215-231, August 1997.
- 13) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, V耐震設計編, 1996年12月.

(1997.9.5 受付)

HYBRID TESTS ON EARTHQUAKE RESPONSE OF SEISMIC LATERAL FORCE DISTRIBUTORS

Kazuyuki IZUNO, Takayuki KOJIMA, Ryosuke SUZUKI, Takashi WADA
and Shin YOSHINO

The earthquake response of the rubber devices to distribute the seismic lateral force for the multi-span continuous girder bridge to substructures was studied using the hybrid (pseudo-dynamic) testing technique. First, the force-displacement relationships of the two types of rubber devices; the natural rubber device and the high-damping rubber device, were compared from the loading tests of the specimens. Then, the earthquake responses of the multi-span continuous girder bridges with the rubber devices were obtained from the hybrid tests. The results showed the highly nonlinear responses with hardening phenomena of rubber material, however, they showed good agreement with the numerical simulations using the multi-linear hysteretic models for the rubber devices.