

## ゴム鋼併用型耐震緩衝装置の荷重-変位関係のモデル更新

## Improvement of load-displacement model of shock absorbers combining rubber with steel pipes

皆川 勝\*  
Masaru MINAGAWA

土井 雄司\*\*  
Yuji DOI

石黒 聡\*\*\*  
Akira ISHIKURO

**ABSTRACT** Minagawa proposed a new type of shock absorbers composed of steel pipes wrapped with rubber pipes. It was confirmed that this type of absorber possessed high-energy absorbing capacity, impact force reduction effect, and shock absorption function against repeated collision forces. Minagawa also constructed a load-displacement model applicable for specimens with limited dimensions of steel pipes. In this research, conducting new series of static loading tests for other specimens with various dimensions, the authors evaluated fundamental characteristic such as load distribution characteristic between steel pipes and rubber pipes based on the results of direct measurements of load distributions and reconstructed more accurate load-displacement model.

**Key Words:** 緩衝装置, 鋼管, ゴム管, 桁衝撃, 免震橋  
shock absorber, steel pipe, rubber pipe, pounding of girders, base-isolated bridge

## 1. はじめに

兵庫県南部地震の被害を受けて道路橋示方書が改訂され<sup>1)</sup>、それ以降、落橋を防ぐために桁かかり長、落橋防止構造、変位制限構造および段差防止構造からなる落橋防止システムが規定されている。特に、落橋防止構造と変位制限構造においては、落橋や損壊の原因となった衝突荷重の作用を緩和するための緩衝材を設けることが推奨されている。

兵庫県南部地震以後、緩衝材の材質としては、剛性が小さく可逆的な大変形が可能であるため、繰り返し衝突への対処が必要な場合にでも適用できるゴム材が用いられる機会が多くなっている<sup>2)</sup>。都築ら、長嶋らはゴム製の緩衝材と比較して低価格、省スペースでエネルギー吸収性に優れる市販の型鋼を緩衝材として用いることに着目して、その有効性を検討した<sup>3)</sup>。図-1 に鋼管を緩衝装置として橋梁に設置するイメージを示す。皆川ら<sup>5)</sup>は、これらの研究を参考に、種々の型鋼の中でエネルギー吸収性能が相対的に高い鋼管を緩衝材として用いることとし、緩衝装置を有する免震橋の動的解析によってその緩衝装置の有効性を立証した。

その結果、鋼管が緩衝材として優れていることが改めて示されたものの、鋼管が完全に圧壊した際に反力が上昇するという欠点が指摘された。この欠点を補うため、繰り返し衝突に対して安定した緩衝性・エネルギー吸収性があるゴム材を鋼管に巻く形式を考案した<sup>6)</sup>。

ゴム管の内部に剛性の高い鋼管を挿入すると、鋼管の降伏前及び鋼管の圧壊後に、ゴム管がエネルギー吸収材として働き、大きい衝突エネルギーに対しては、鋼管を降伏させてエネルギーを吸収させることができる。

開発の手順として、まず基礎特性の把握を目的として、静的載荷実験を行った。本来、衝撃的な荷重を受けた際の特性を把握する必要があるが、本実験においてもその基礎特性を把握するには十分であると考えた。皆川ら<sup>6)</sup>が行った緩衝装置の静的載荷実験では、種類の鋼管に対して、ゴム管の厚さのみを変化させて荷重-変位関係を測定し、その結果を用いて荷重-変位関係を推定できるモデルを構築した。本研究では、緩衝装置に用いるゴム管及び鋼管の寸法を変化させてパラメトリックに実験を行った。そして従来のモデルを用い

\*武蔵工業大学工学部都市基盤工学科 (〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1)

\*\*鹿島建設株式会社 (〒107-8388 東京都港区元赤坂 1-2-7)

\*\*\*武蔵工業大学大学院工学研究科修士課程都市基盤工学専攻 (同上)

て荷重-変位関係を推定したところ、予測精度は低いことが分った．そこで、種々の寸法の鋼管及びゴム管について荷重-変位関係を精度良く推定できるモデルを再構築した．その手段として、特にゴム管から鋼管に荷重が伝達される特性を感圧紙により測定した．そして、この測定結果に基づいたモデルの改良により推定精度を向上することができた．

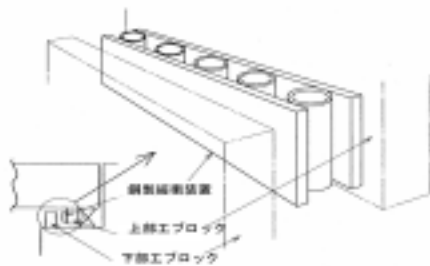


図-1 緩衝装置設置イメージ図<sup>3)</sup>

## 2. ゴム鋼併用型緩衝材の静的圧縮載荷試験

### (1) 実験方法

載荷装置の概要を図-2 に示す．静的圧縮試験には容量 300 kN の万能試験機を用いた．変位量は、基準距離 30mm、測定範囲±5mm のレーザー変位計によって測定した．測定時には、同図中に示したように、載荷板に取り付けた反射板を用いて水平変位を鉛直変位に変換した．また、載荷方法については準静的な変位制御として、載荷試験機の容量から荷重 250kN で載荷を中断した．そして荷重を完全に除荷した後、荷重 250kN まで再び載荷した．

### (2) 試験体

試験体は図-3 に示す鋼管の外側にゴムを巻いた形式のもの 48 種類である．試験機の容量の関係で、試験体の奥行きは 100mm とした．鋼管の材質は入手が容易で、市販の型钢にある STKM13A (SS400 相当) とした．ゴムの材質はクロロプレンゴム(硬度 60±5)とした．緩衝材に用いるゴムとしては近年、天然ゴムが使用されている．しかし、著者らの研究によれば、かつて用いられていたクロロプレンゴムは、同程度あるいはそれ以上のエネルギー吸収能力と耐候性を兼ね備えていることが分っている．その他のゴム材及び、その成分等についてはなお、検討の必要がある．しかし、本研究では、鋼管併用の効果に着目しており、過去の著者らの研究と同様、クロロプレンゴムを用いることとした．

基礎的な力学特性を把握するためにゴム管及び鋼管の各々について管径方向の静的圧縮載荷試験を行った．

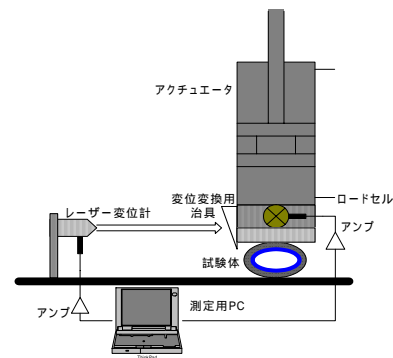
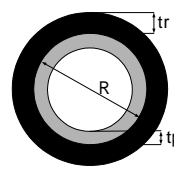


図-2 載荷装置概要



R	tp	tr
70	4,5,6,7	10,20,30,40
80	4,5,6,7	15,25,35,45
95	8,10	15,25,35,45
110	8,10	15,25,35,45

単位 (mm)

図-3 試験体の寸法及び形状



(a) 変形量 70mm

(b) 実験終了後

図-4 ゴム鋼タイプの緩衝材(R-95, tp10-tr45)の変位形状の推移

### (3) 実験結果

図-4 にゴム鋼併用タイプの緩衝装置 (R95, tp10-tr45) の変形形状の推移を示す．また、図-5 には主要部材である鋼管の荷重-変位関係の一部を示す．図-6 に鋼管外径 70mm、鋼管厚 6mm の鋼管を使用している試験体の荷重-変位関係を示す．なお、ゴム管を巻いた試験体についてのみ再載荷時の荷重-変位関係も示した．図-7 には代表的な緩衝材の荷重-エネルギー吸収量関係を示す．

図-6に示すように、ゴム鋼併用型耐震緩衝装置の変形は以下のように進行する<sup>6)</sup>．

Phase : 鋼管の降伏まではゴムのみが変形でき、剛性は低い．

Phase : 鋼管が塑性変形すると共にゴムの圧縮変形も進行する．鋼管降伏時の変位はゴム厚にほぼ比例し、降伏荷重はゴム厚が厚いほど上昇する．

Phase : 載荷及び除荷・再載荷の経路．ほぼ直方体形につぶれたゴムの圧縮変位の復元と再変形のみが生じる．

図 5~7 より鋼管にゴムを巻くと載荷初期段階から低剛性のままある程度のエネルギー吸収が可能となることが分かる。これにより衝撃的な荷重を緩和することが可能となり、また中小規模の地震においては鋼管を傷つけることなく地震力を吸収することが可能となる。逆に鋼管だけの場合には、降伏しない限りわずかなエネルギー吸収しか望めないため、上記の衝撃緩和効果は期待できない。ゴム厚の影響によって降伏後の荷重値の上昇をある程度抑制し、鋼管の圧壊後もゴムの粘弾性的性質によりある程度のエネルギー吸収性能と耐衝撃性を保有できることが分かる。

### 3. ゴム鋼併用型緩衝装置の荷重-変位関係のモデル化とその検証

#### (1) 荷重-変位関係に影響する要因

皆川らは、ゴム鋼併用型耐震緩衝装置の荷重-変位関係に影響を与える要因としては、以下の基本的特性を挙げている<sup>6)</sup>。

- ゴム管の圧縮変形特性
- ゴム管の曲げ変形特性
- 鋼管の曲げ変形特性
- ゴムから鋼管への力の伝達特性

本研究では、新たに鋼管の寸法を変化させて実験を行った。そして、皆川らが構築したモデルを用いて荷重-変位関係を推定したところ、推定精度が低下した。そのため鋼管の寸法の変化も考慮できるモデルを再構築することとした。ゴム管の曲げ変形特性、鋼管の曲げ変形特性に関しては若干の修正を行った。ゴムから鋼管への力の伝達特性は抜本的な見直しが必要となり、本研究では感圧紙を用いた測定と解析を行った。

これら修正した基礎的特性によって再度モデル化し、その妥当性を検証した。

#### (2) ゴム管の圧縮変形特性

鋼管が降伏する前のゴム管の圧縮変形特性を得るために、それぞれの寸法に対応するゴム管の中に、鋼柱を挿入して、静的圧縮載荷試験を行った。測定された荷重  $P$  及び変位  $\Delta$  から無次元荷重及び無次元変位を次式より求めた。

$$\sigma_{r1} = \frac{P}{R_i H}, \varepsilon_{r1} = \frac{\Delta}{2t_r} \quad (1)$$

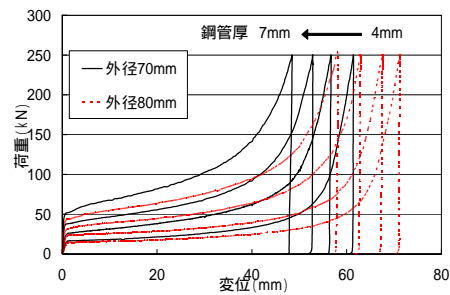


図-5 鋼管の荷重-変位関係図

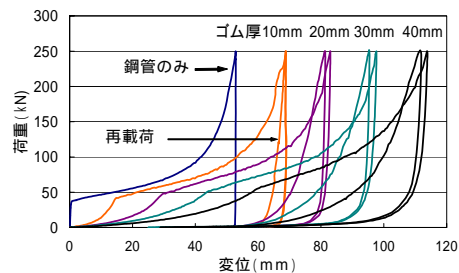


図-6 鋼管外径 70mm, 鋼管厚 6mm 使用時のゴム鋼併用耐震緩衝材の荷重-変位関係

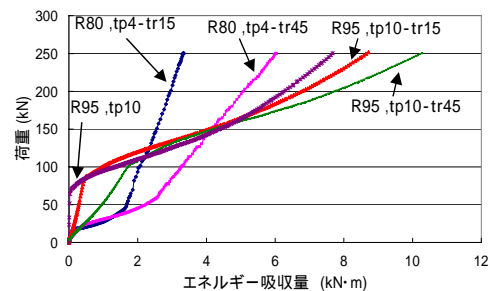


図-7 緩衝材の荷重-エネルギー吸収量関係図

ここで、 $R_i$  はゴム管の内径、 $t_r$  はゴム厚、 $H$  は長さである。荷重を  $R_i H$  で除して無次元荷重としたのは、ゴムの内径が大きいほど、圧縮力の分布幅が広まることを評価するためである。

得られた無次元荷重-無次元変位関係を図-8に示す。同図より、ゴム管の内径を用いた式(1)で整理すると、本実験の範囲ではゴム管の寸法の変化を考慮できることが分かる。そこで、この結果の載荷部分の関係を、ゴムに対してしばしば用いられる以下のMooney-Rivlinの応力-ひずみ関係式<sup>4)</sup>により表すものとした。

$$\sigma_{r1} = 2 \left( \lambda_{r1} - \frac{1}{\lambda_{r1}^2} \right) \left( a_{r1} + \frac{b_{r1}}{\lambda_{r1}} \right) \quad (2)$$

ここで、 $\lambda_{r1} = 1 - \varepsilon_{r1}$  であり、 $a_{r1}, b_{r1}$  は材料定数である。ゴム厚が最小で管としての曲げ抵抗がほとんどないと見られる内径110mm, ゴム厚15mm

の試験体の結果について、最小二乗近似を適用して、以下のパラメータを得た。

$$a_{r1} = 0.295, b_{r1} = -0.019 \quad (\text{kN}) \quad (3)$$

この関係式を先ほどの無次元荷重-無次元変位関係とともに図-8に併せて示す。実験結果をよく近似しており、従来のモデルの妥当性が検証された。

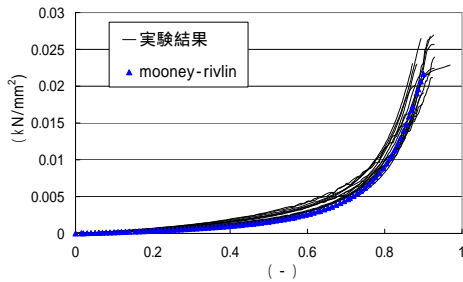


図-8 鋼柱を挿入したゴム管の無次元荷重-無次元変位関係

### (3) ゴム管の曲げ変形特性

ゴム管単体の変形性状としては、ゴム管内部がほぼ接触するまで若干の曲げ抵抗を示した後、ゴムは直方体に近い形となり、この圧縮変形に移行する。そこでゴム管内部がほぼ接触する変位までを対象として、ゴム管の曲げ変形特性を評価するため、管径方向の静的圧縮試験により測定された荷重  $P$  及び変位  $\Delta$  から無次元荷重及び無次元変位を次式より求めた。

$$\sigma_r = 1.91 \times \frac{PR_m}{t_p^2 H}, \quad \varepsilon_r = \frac{\Delta}{2R_i} \quad (4)$$

ここで、 $R_m$  はゴム管の平均半径である。

式(4)は、リングの公式<sup>7)</sup>より求められる曲げモーメント ( $M=0.3183PR$ ) をゴムの断面係数 ( $W=t_p^2 \cdot H/6$ ) で除すことによって得られる曲げ応力として求めている。得られた結果を図-9に示す。同図より、それぞれの直線がほぼ同一直線上にあることから、式(5)のようにゴム管の曲げ変形特性をモデル化することとした。

$$\sigma_r = 3.2 \cdot \varepsilon_r \quad (5)$$

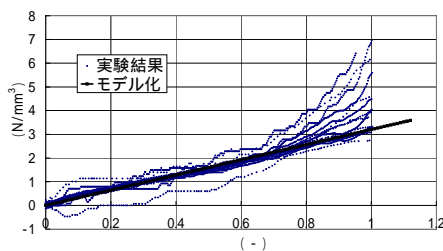


図-9 ゴム管単体の無次元荷重 - 無次元変位関係

### (4) 鋼管の曲げ変形特性

鋼管の管径方向の荷重-変位関係は、既に図-5に示した。文献6)では、用いた鋼管の寸法は全て同じであったこともあり、カーブフィッティングにより現象論的荷重-変位関係を求めた。しかし、本研究では力学モデルを構築するために、リングの公式<sup>7)</sup>より曲げ応力を算出し、測定された荷重  $P$  及び変位  $\Delta$  から無次元荷重-無次元変位を求めた。無次元荷重及び無次元変位の定義を以下に示す。

$$\sigma_s = \frac{1.91PR_{ms}}{\sigma_y t_p^2 H}, \quad \varepsilon_s = \frac{\Delta}{2R_{is}} \quad (6)$$

ここで、 $R_{ms}$  は鋼管の平均半径、 $\sigma_y$  は鋼管の降伏応力、 $t_p$  は鋼管厚、 $R_{is}$  は鋼管の内径である。得られた無次元荷重-無次元変位関係を図-10に示す。

降伏前の弾性挙動に関してはリングの公式<sup>7)</sup>を使用することとした。

$$\Delta = 0.149 \frac{PR_{ms}^3}{EI} \quad (7)$$

$E$  は弾性係数、 $I$  は断面二次モーメントである。

また降伏後の荷重増加分と塑性変形関係が、ゴムと同様の傾向を示していることから、Mooney-Rivlinの式を援用することとした。本来、ゴム材料に対して用いられている応力-ひずみ関係式であるが、図-10に示すように、実験結果を精度よく表現し得ることから、あえて用いることとしている。Mooney-Rivlinの式のパラメータは最小二乗近似により以下の通り求めた。

$$\sigma_s = 2 \left( \lambda_s - \frac{1}{\lambda_s^2} \right) \left( a_s + \frac{b_s}{\lambda_s} \right) \quad (8)$$

$$a_s = 59.2, b_s = -1.91 \quad (9)$$

ここで、 $\lambda_s = 1 - \varepsilon_s$  である。

図-10によれば、実験結果を一見良く近似できているように見える。しかし、図-11に示すように、鋼管の強度が高くなると降伏付近に違いが生じていることが分かる。同図はR:80,  $t_p$ :4 (強度が最も低い鋼管) とR:95,  $t_p$ :10 (強度が最も高い鋼管) の無次元荷重-無次元変位関係図の降伏付近を拡大して示しているものである。比較的低強度の鋼管については精度よくモデル化できているが、それ以

外の部分については今後の検討課題とする。

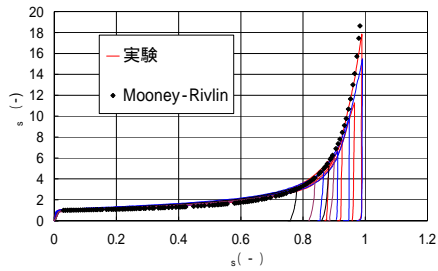


図-10 鋼管の無次元荷重-無次元変位関係

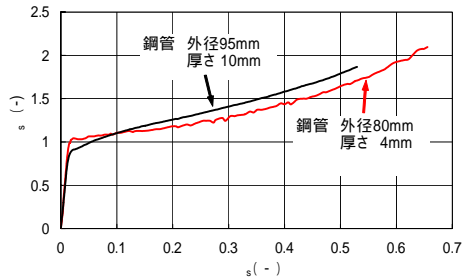


図-11 降伏現象の違い

(5) ゴムから鋼管への力の伝達特性

図-6で示したように、鋼管に巻くゴム管が厚くなるほど鋼管の降伏荷重が上昇している。この現象を把握することが本節の目的となる。鋼管に直接載荷した場合、載荷される荷重は線荷重となり、鋼管頂上部に集中して作用する。鋼管にゴム管を巻くことによって、外側のゴム管に載荷された荷重は内部の鋼管に分布荷重として伝達される。皆川ら<sup>9)</sup>は、この分布荷重を線形分布であると仮定してモデルを作成した。鋼管の寸法を変化させた緩衝材にそのモデルを適用したところ、推定精度が低下した。そのため、本研究では荷重の分布特性を実測により直接把握することとした。

a) 実験及び解析による荷重の分布特性の測定

荷重の分布特性を把握するために以下に示すような接触分布を測定する実験及び解析を行った。測定する項目は以下の二つである。

- ・ ゴム管と鋼管の接触幅（荷重分布幅）
- ・ 荷重の分布形状

載荷装置、荷重・変位測定装置は2.で示したものと同じである。ここでは、鋼管の降伏前の荷重分布を測定するため、ゴム管の中に鋼管の代用として鋼柱を挿入した。荷重分布の測定には、富士フィルム社の富士プレスケール超低圧用（測定可能圧力0.5～2.5Mpa）、低圧用(2.5～10Mpa)、中圧



図-12 感圧紙の実験結果  
上から中圧用、低圧用、超低圧用

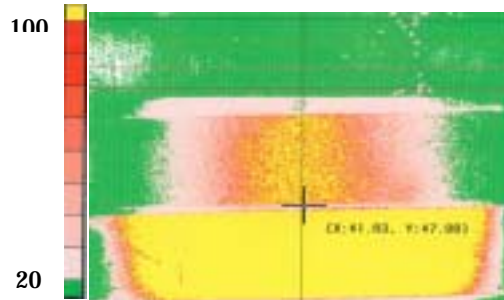


図-13 感圧紙の解析結果  
上から中圧用、低圧用、超低圧用

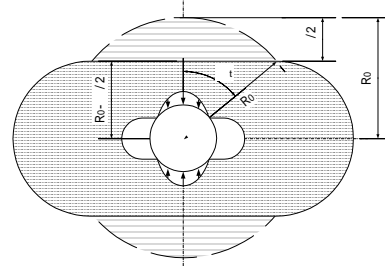


図-14 分布幅予測モデル

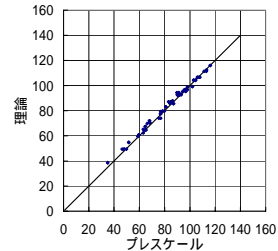


図-15 分布幅の相関図

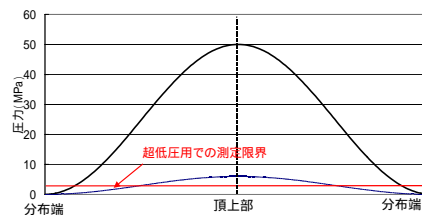


図-16 分布端での発色の違い

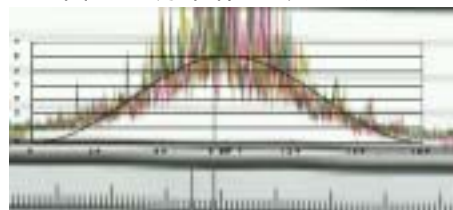


図-17 分布形状の比較

用(10~50Mpa)の三種類の感圧紙を使用した。これらの感圧紙は圧力の強さに応じて発色の濃さが変化するものである。解析システムとしては、富士フィルム社のFPD-901Eをブラックボックスとして使用した。本システムは感圧紙の発色を読み込み、定量的な値として圧力値を算出するものである。式(1)により定義したゴム管の無次元変位が0.6と0.8となる荷重状態での圧力分布を測定した。図-12に加圧実験した後の感圧紙の発色状況を示す。図-13には解析システムが感圧紙の発色を読み取った結果を示す。

分布幅を、感圧紙の発色状況から算出した。測定結果と、図-14に示す皆川<sup>6)</sup>らの分布幅予測モデルで算出される分布幅との相関図を図-15に示す。この比較から分布幅予測モデルの妥当性が検証された。本モデルは次式(10)により表すことができる。

$$\alpha_t = \cos^{-1} \frac{R_0 - \frac{\Delta}{2}}{R_0} \quad (10)$$

分布幅測定に用いたプレスケール紙は超低圧用のものを使用しており、最大圧力の2.5MPaで生じる発色を読み取っている。図-16に示すように頂上部での圧力の大小に関わらず分布端では同じ圧力でしか発色を示さない。つまり、頂上部で大きな圧力が作用する試験体と頂上部で小さな圧力しか示さない試験体では、分布端で示す発色による圧力の大きさの重要度が異なる。そこで、式(10)の伝達荷重分布角度 $\alpha_t$ を次式によって修正した。

$$\alpha' = \alpha_t \frac{0.6}{\varepsilon_{r1}} \quad (11)$$

ここで、 $\varepsilon_{r1}$ はゴムの無次元変位量である。本式は、無次元変位が大きくなると全体の圧力が高くなることを考慮し、分布幅を調整する式である。

鋼管の円周方向に遷移する圧力と $\sin^2$ の式をそれぞれの分布端で揃えて、比較した結果を図-17に示す。この結果より、分布形状は $\sin^2$ の式で表現できることが分かる。

以上の結果より、荷重分布幅と荷重分布形状を推定するモデルを作成することができた。

- b) ゴムから鋼管への力の伝達特性のモデル化  
 ゴムから鋼管へ伝達される荷重の分布特性は図

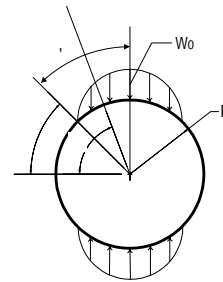


図-18 荷重が線形分布で伝達する場合

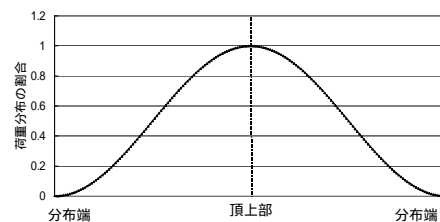


図-19 荷重の分布形状

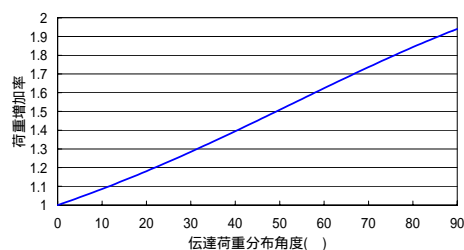


図-20 荷重増加率と伝達荷重分布角度

-18,19に示すように、角度  $\theta$  に関して $\sin^2$ 分布することが分かった。このとき、荷重分布式は次式となる。

$$w = w_0 \cdot \sin^2 \left[ (\theta - \alpha) \frac{\pi/2}{\pi/2 - \alpha} \right] \quad (12)$$

これを積分すると、荷重和が次式のように求まる。

$$P = \frac{2\pi^2 \cos \alpha}{(3\pi - 2\alpha)(\pi + 2\alpha)} \cdot w_0 \quad (13)$$

次に 相対する2点集中荷重が偏心して作用したときの任意の曲げモーメント<sup>7)</sup>から、図-18の頂点の曲げモーメントは次式のように求まる。

$$M_1 = 2A \left\{ \begin{aligned} &\frac{1}{128(\pi - \alpha)^2 \cdot \alpha^2} \times \\ &\left[ 2\alpha(-\pi^4 + \pi^3\alpha + 16\pi^2\alpha^2 - 32\pi\alpha^3 + 16\alpha^4) \right. \\ &\left. + 4\pi^2 \cdot (\pi - \alpha)\alpha^2 \cos 2\alpha + \pi^2 \cdot (\pi^2 - 10\pi\alpha + 10\alpha^2) \cdot \sin 2\alpha \right] \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

$$A = 0.3183 \cdot R^2 \cdot w_0$$

次に、相対する2点集中荷重が中央に作用したとき、頂点での曲げモーメント $M_2$ <sup>7)</sup>は、

$$M_2 = 0.3183PR \quad (15)$$

と表される．そこで、式(15)に式(13)を代入し、 $M_2$ と $M_1$ の比が以下のように求まる．

$$\frac{M_2}{M_1} = \frac{\frac{2\pi^2 \cos \alpha}{(3\pi - 2\alpha)(\pi + 2\alpha)}}{\left[ \frac{1}{128(\pi - \alpha)^2 \cdot a^2} \times \left\{ \begin{aligned} &2\alpha(-\pi^4 + \pi^3\alpha + 16\pi^2\alpha^2 - 32\pi\alpha^3 + 16\alpha^4) \\ &+ 4\pi^2 \cdot (\pi - \alpha)\alpha^2 \cos 2\alpha + \pi^2 \cdot (\pi^2 - 10\pi\alpha + 10\alpha^2) \cdot \sin 2\alpha \end{aligned} \right\} \right]} \quad (16)$$

ここで、ゴム管を巻くことによって同じ曲げモーメントを生ずるに要する荷重値が上昇する現象を表すために、荷重増加率  $\gamma$  を次式により定義する．

$$\gamma = \frac{M_2}{M_1} \quad (17)$$

式(17)より、横軸に伝達荷重分布角度  $\alpha' = 90 - \alpha$  をとり、縦軸に荷重増加率  $\gamma$  をとると、図-20に示す曲線が得られる．これは、伝達荷重分布角度が大きくなると鋼管に伝わる分布荷重により生じる曲げモーメントが小さくなることを表している．図-6の実験結果よりゴムの厚さが増すほど降伏荷重が増加していることは、このことより説明ができ、ゴムの厚さが増すほど、伝達荷重分布角度が大きくなり、その結果見かけ上鋼管の降伏荷重が増加したものと考えることができる．

#### (6) モデルの精度

(2)～(5)の特性を用いて、作成したゴム鋼併用型耐震緩衝装置の荷重-変位関係の一部を図-21に、皆川ら<sup>6)</sup>が作成したモデルより得られる荷重-変位関係及び、実験結果の一部を図-22に示す．図-21の  $S (= t_p^2 / R)$  は、リングの公式における断面形状パラメータであり、これが大きい程強度は大となる．図-21,22を比較すると、全体的に再構築した荷重-変位モデルの精度が向上していることが分かる．しかし、強度の高い鋼管を有する緩衝装置では降伏後の挙動にズレが生じている．これは図-7で示したように、鋼管の曲げ変形特性に問題があるためであると考えられる．よって、鋼管の大変形を考慮したモデルを検討する必要がある．

ここで、皆川ら<sup>6)</sup>が作成したモデルと比較して精度がどの程度向上したかを定量的に評価する．比較の手段として、実験結果の荷重-変位関係との間に生じる誤差の大きさに着目する．各変位点における荷重値の差を考慮し、誤差  $E$  を定義した．

$$E = \frac{\int |P_i - P_m| d\Delta}{\int |P_i| d\Delta} \quad (18)$$

$P_i$ 、 $P_m$  はそれぞれ実験の荷重値、モデルの荷重値であり、変位  $\Delta$  で積分している．本論文では、ゴムから鋼管への力の伝達特性が荷重-変位関係に及ぼす影響について特に改良している．よって、本特性の影響が最も表れる鋼管降伏点までを積分区間としている．上式を用いて算出した誤差の一部を図-23～24に示す．縦軸を誤差  $E$ 、横軸を鋼管の厚さとし、ゴム厚の違いを積み上げて示している．これらの図より、改良されたモデルの誤差が相対的に小さくなっていることが分かる．

#### 4. 結論

本研究では、皆川らが提案したゴム鋼併用型耐震緩衝装置の基本的な特性を把握するために鋼管及びゴム管の寸法をパラメトリックに変化させ静的載荷実験を実施した．そして、寸法の変化を考慮できるように文献(6)で作成されたゴム鋼併用型耐震緩衝装置の荷重-変位モデルを再構築した．再構築の際に修正した特性は以下の通りである．

- ・ ゴムの曲げ変形特性：ゴムの変形性状から推定できるモデルとした．
- ・ 鋼管の曲げ変形特性：鋼管の寸法の変化を考慮できるものとした．
- ・ ゴムから鋼管への力の伝達特性：実測及び解析を行い、荷重の分布特性を測定した上で伝達特性をモデル化した．

修正した荷重-変位モデルの妥当性を検証したところ、鋼管が降伏するまでの精度がかなり上昇することが分かった．また、その後の挙動に関しても、鋼管の強度が比較的小さい試験体では、降伏変位の2倍の変位までは誤差を小さくできることが分かった．

以上のことから、再構築した荷重-変位モデルの妥当性は検証され、ゴム及び鋼管の基本特性から荷重-変位関係を推定できることが示された．

#### 参考文献

- 1) 日本道路協会：「道路橋示方書・同解説，V 耐震設計編」，2002.3.
- 2) 西本安志，園田佳巨，石川信隆，彦坂熙，西川信二郎：落橋防止用矩形形状ゴム緩衝材の設計法に関する一考察，土木学会論文集，No.689/ -57，pp.335-360，2001.10.

- 3) 都築昭夫, 長嶋文雄, 中田宏治, 金子修, 大竹省吾: 鋼製緩衝材の荷重変形特性に関する実験的検討, 鋼構造年次論文報告集, 第7巻, pp.9-14, 1999.11.
- 4) 潤田久也, 川島一彦, 庄司学, 須藤千秋: 高面圧を受ける直方体ゴム製耐震緩衝装置の圧縮特性の推定法に関する研究, 土木学会論文集, No.661/I-53, pp.71-83, 2000.10.

- 5) 皆川勝, 藤谷健, 高寄太一, 長嶋文雄: ゴム又は鋼管製緩衝装置を有する免震橋の地震時挙動に関する研究, 鋼構造年次論文報告集, 第8巻, pp.163-170, 2000.11.
- 6) 皆川勝, 藤谷健: ゴム鋼併用型耐震緩衝装置の開発に関する研究, 土木学会論文集, No.689/I-57, pp.343-353, 2001.10.
- 7) 土木学会: 構造力学公式集, 丸善, 1986.

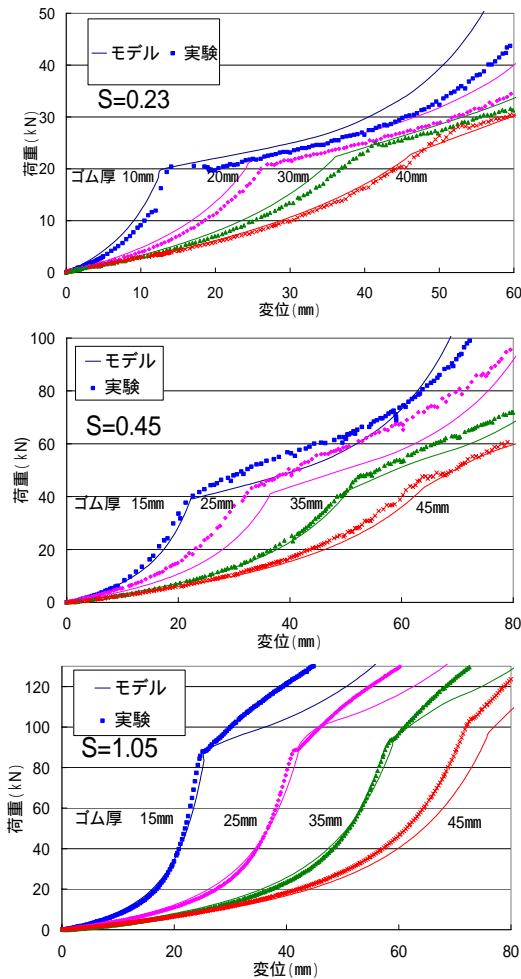


図-21 荷重-変位モデルの精度

それぞれ、上から  $R70 \cdot t_p4$ ,  $R80 \cdot t_p6$ ,  $R95 \cdot t_p10$

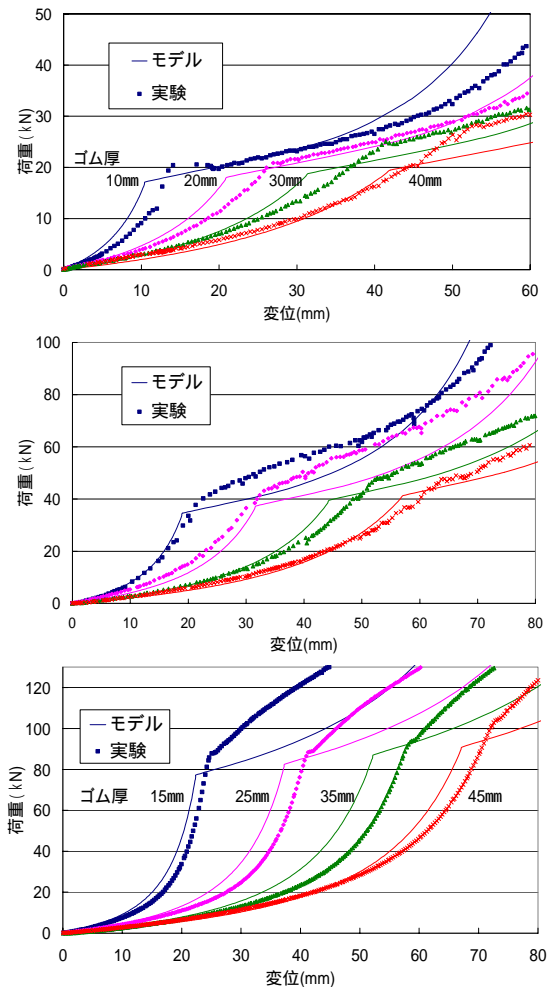


図-22 文献6)の荷重-変位モデルの精度

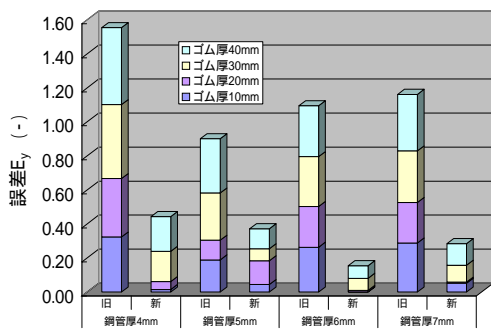


図-23 荷重 変位モデル R70mm

降伏点までの誤差の比較

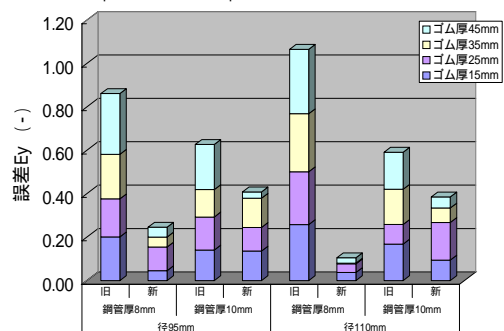


図-24 荷重 変位モデル R95, 110mm

降伏点までの誤差の比較