

ゴム鋼併用型耐震緩衝装置の開発

学生氏名 土井 雄司

指導教員名 皆川 勝

兵庫県南部地震ではその衝撃的なエネルギーにより桁間、桁と橋台間で衝突が生じ、落橋や橋梁の損壊の原因となった。このことを受けて道路橋示方書が改訂され、衝撃荷重の作用を緩和するための緩衝装置を設けることが推奨されている。そこで、皆川らはゴム管と鋼管を併用することによって、高いエネルギー吸収性能や衝撃荷重の低減効果、繰り返し衝突に対する安定した緩衝性が得られると考え、併用型装置を考案し、限定的な適用範囲ではあるが荷重-変位関係を予測できるモデルを構築した。そこで、本研究では、より広範囲に装置の寸法を変化させてパラメトリックに実験を実施し、ゴム管と鋼管の間の荷重伝達特性などの基本的特性を、より詳細な測定・分析に基づいて評価した。そして、全パラメータを考慮したより精度の高いモデルを再構築した。

Key Words: shock absorber, rubber pipe, steel pipe, bridge pounding, modeling of load-displacement catachrestic

1. はじめに

大地震時の隣接桁間・桁と橋台間の衝突においては高いレベルの衝撃荷重が作用する。そのことによって桁・橋台、さらには落橋防止構造までもが損壊して、落橋に至る危険性が高い。落橋に至った被害が兵庫県南部地震において多数見られ、そのことによって生じる人的被害や交通麻痺による復旧活動の遅延等その被害が甚大なものとなった。その結果、桁間、桁と橋台間で生じる衝突を緩和するシステムの開発が急務となっている¹⁾。

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、その中で落橋防止装置の見直しが行われた²⁾。そこでは、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提案されている。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撃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。しかし、従来使用されてきた落橋防止装置では落橋を完全に防止することが困難であるため、落橋防止装置の高性能化・高機能化が必要とされている。さらに、緩衝材は高架橋を構成する主要部材のひとつであるという認識のもとで、多数の研究・開発が行われている。

落橋防止構造や緩衝材に関する研究は2つのグループに大別することができる³⁾。すなわち、落橋防止構造および緩衝材の力学的挙動そのものに着目した研究と、橋梁を構成する一つの要素として落橋防止構造

を考え、大地震時に落橋防止構造が橋梁全体の損傷を低減する効果に着目した研究である。本研究は前者のグループに含まれる。緩衝材の力学挙動に着目している研究では、それぞれ以下のような部材を緩衝材として用いることを提唱している。すなわち、園田らのゴム緩衝ピン⁴⁾、潤田らの直方体ゴム⁵⁾、西本らの積層繊維ゴム⁶⁾、越峠らの円筒型ゴム⁷⁾、村田らの二段階ばね⁸⁾、野々村らのハニカム型^{9) 10)}や頭井らの鋼製ベローズ^{11) 12) 13) 14)}等である。これらの研究では、緩衝材に要求される性能として、衝撃荷重の低減効果と衝撃エネルギーの吸収性が挙げられており、各研究とも静的載荷・動的載荷・衝撃載荷等の試験によりその基本的な性能を把握し、緩衝材としての有効性を検討している。

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¹⁵⁾。都築ら、長嶋らはゴム製の緩衝材より低価格で、省スペースでより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、緩衝装置としての有効性を検討した^{16) 17)}。図-1に型鋼である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¹⁸⁾は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にし、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ている。その結果、鋼管が緩衝材として優れていることが示されたものの、鋼管が完全に破壊した際に反力が

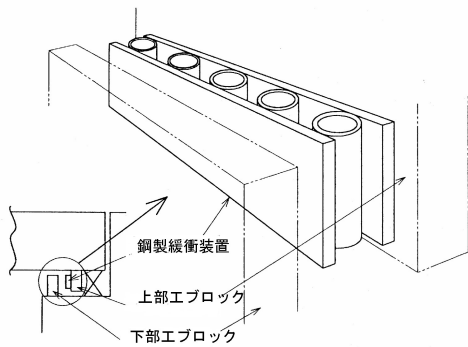


図-1 緩衝装置設置イメージ図¹⁶⁾

上昇してしまうという欠点が指摘された。これにより、繰り返し衝突が生じた際に緩衝効果が得られなくなってしまふ。この欠点を補うために、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のものを皆川ら¹⁹⁾は考案した。

ゴム管タイプの緩衝材としては、防舷材があげられる。防舷材は、船舶の衝突エネルギーが地震のエネルギーに対して小さいため、内部は空洞としているが、本研究ではゴム管の内部に剛性の高い鋼管を挿入することにより、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。このことから、中小の地震においてはゴム管だけで、大地震では鋼管も併用して地震エネルギーを吸収する二段階設計が可能となる。

開発の手順として、まずは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¹⁹⁾が行った緩衝装置の静的載荷実験では、一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ていた。本研究では緩衝装置をより柔軟に設計できるように、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。そしてこれまでのモデルを用いて荷重-変位関係を推定したところ、予測精度は著しく低下した。そこで、鋼管及びゴム管の寸法の変化を考慮して精度良く荷重-変位関係を推定できるモデルを再構築した。その手段として特に、感圧紙を用いて実験及び解析を行い、荷重の分布状況を厳密に測定し、ゴム管から鋼管に荷重が伝達される特性を改良した。これにより、緩衝装置が有するエネルギー吸収量、衝突力の低減効果や衝撃緩衝効果をあらかじめ把握でき、また、緩衝装置の衝撃緩和効果を動的解析で検証する際に緩衝材の荷重-変位関係を精巧に再現するこ

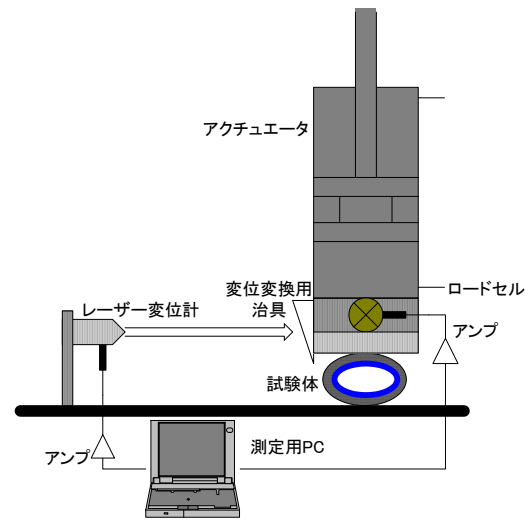


図-2 載荷装置概要

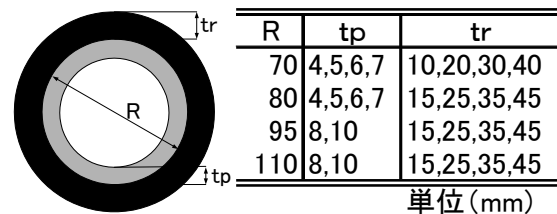


図-3 試験体の寸法及び形状

とが可能となる。

2. ゴム鋼併用型緩衝材の静的圧縮載荷試験

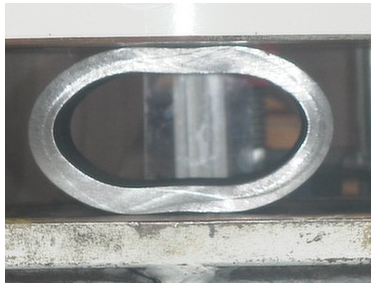
(1) 実験方法

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。

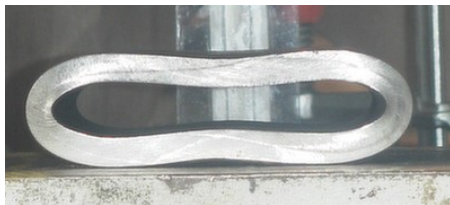
(2) 試験体

緩衝装置の試験体は図-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。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、ゴムの材質はクロロプレンゴム(硬度 60 ±5)とした。また、試験機の容量の関係で、試験体の奥行きは 100mm 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部材について静的圧縮載荷試験も行った。寸法については緩衝装置の試験体に順ずるものである。



(a) 変形量 30mm

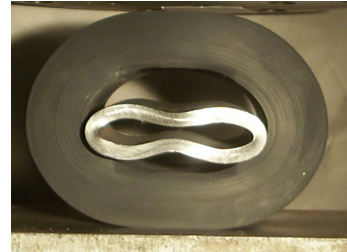


(b) 実験終了後

図-4 鋼管(R-95, tp10)の変位形状の推移



(a) 変形量 70mm



(b) 実験終了後

図-5 ゴム鋼タイプの緩衝材 (R95, tp10-tr4)の変位形状の推移

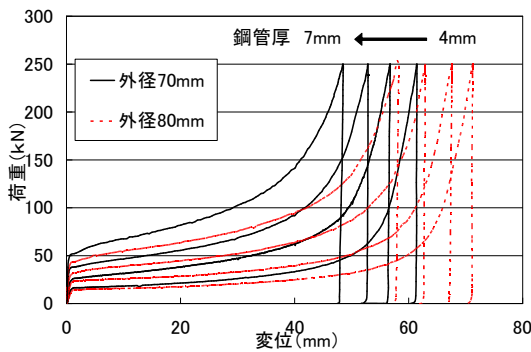


図-6 鋼管の荷重-変位関係図

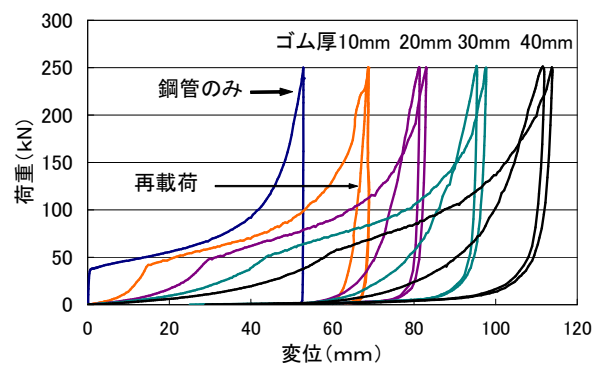


図-7 鋼管外径 70mm, 鋼管厚 6mm 使用時の
ゴム鋼併用耐震緩衝材の荷重-変位関係

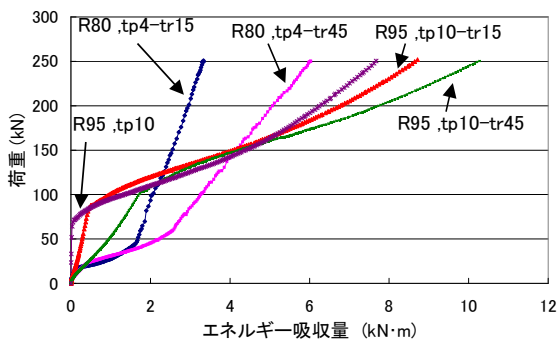


図-8 緩衝材の荷重-エネルギー吸収量関係図

(3) 実験結果

図-4, 図-5 に鋼管(R-95, tp10)及び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-6 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-7 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, ゴム管を巻いた形状の緩衝材についてのみ再載

荷時の荷重-変位関係も示した。図-8 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 より鋼管は載荷初期段階ではある程度の荷重まで高い剛性をもつ。その後降伏するために、一度剛性が急に低下するが図-4 のように楕円状につぶれて、側面の曲率が小さくなるとともにそこから剛性が徐々に上がるハードニングを示している。降伏荷重の値が大きくなるに従って、荷重-変位関係の勾配は大きくなる。また径が小さいほど鋼管厚が大きいほど降伏荷重は上昇していることが図-6 より分かる。

図-7 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¹⁹⁾。

Phase I : 鋼管の降伏まではゴムのみが変形でき、剛性は低い。

Phase II : 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している。

Phase III： 载荷及び除荷・再载荷の経路。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ている。

ゴム鋼併用型耐震緩衝装置においても、鋼管単独の荷重-変位関係と同じく鋼管厚が増すと降伏荷重が増加する。そのため、圧壊点付近ではエネルギー吸収量は増加する。しかし圧壊までに至らない点においては、同じエネルギー吸収量における衝突力は、強度の低い鋼管の方が低く抑えられていることが分かる。

鋼管にゴムを巻くと载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を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ず、衝撃的な荷重が作用することも考えられる。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¹⁹⁾。

- 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

これらを用いて荷重-変位関係を精度よくモデル化できるとしている。

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。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、予測精度が低下した。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厳密な実験と解析を行った。

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。

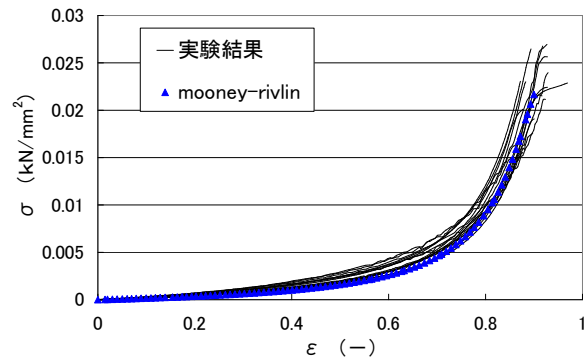


図-9 鋼管を挿入したゴム管の応力-ひずみ関係

(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、鋼管を挿入して、静的圧縮载荷試験を行った。測定された荷重 P 及び変位 Δ から応力及びひずみを次式より求めた。

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

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 $R_i H$ で除して応力としたのは、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。

得られた応力-ひずみ関係を図-9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ていることが分かる。そこで、この結果の载荷部分の関係を、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⁵⁾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応力-ひずみ関係とともに図-9に併せて示す。実験結果をよく近似しており、皆川らによるモデルの妥当性が検証された¹⁹⁾。

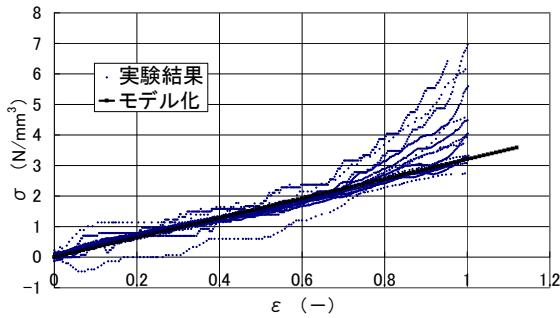


図-10 ゴム管単体の無次元荷重-ひずみ関係

(3) ゴム管の曲げ変形特性

皆川らは本特性を鋼管が降伏する点で荷重が増加する特性として扱っていたが、本研究ではゴムの変形性状から把握できるように修正した。載荷段階でゴム管側部が示す曲げ抵抗をゴム管の曲げ変形特性としている。本特性を評価するために、ゴム管単体の静的圧縮試験を行った。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、これの圧縮変形に移行する。本特性ではゴム管内部がほぼ接触する変位までを考えている。ゴム管の曲げ変形特性を評価するため、測定された荷重 P 及び変位 Δ から応力及びひずみを次式より求めた。

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

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²⁰⁾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 ($W=t^2 \cdot H/6$) 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-10に示す。但しひずみはゴム管内部がほぼ接触するまでの範囲としている。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。ここで、厚さの薄いゴムほどバラツキがあり、モデルの精度が悪く見える。これは、荷重値を測定する機器の分解能が粗く、剛性の低い試験体においてはバラツキが生じてしまうためである。

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

(4) 鋼管の曲げ変形特性

鋼管の管径方向の変形性状は図-7の荷重-変位関係をすでに示した。変形性状に起因する曲げ変形であるとしている。文献19)で用いた鋼管の寸法は全て同じであったが、今回は寸法が変化してもモデル化できることを証明するために、ゴムの曲げ変形特性と同様にリングの公式²⁰⁾より曲げ応力を算出し、測定された荷重 P 及び変位 Δ から無次元荷重-ひずみを求めた。ここ

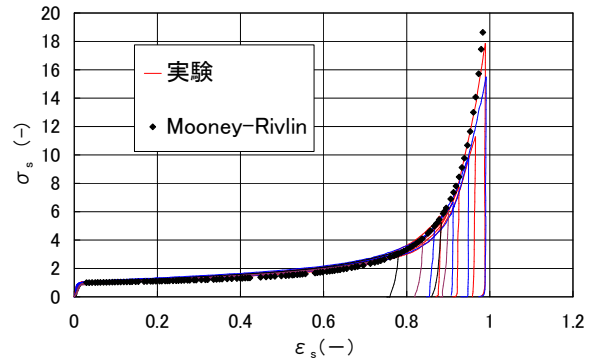


図-11 鋼管の無次元荷重-ひずみ関係

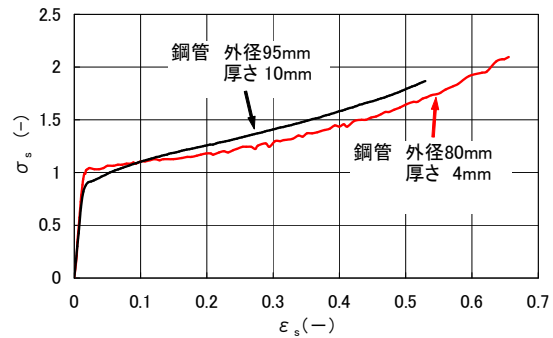


図-12 降伏現象の違い

で無次元荷重としているのは、鋼管は明確な降伏が生じることから、降伏応力で除しているためである。算定式を以下に示す。

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

ここで、 R_{ms} は鋼管の平均半径、 σ_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-ひずみ関係を図-11に示す。

降伏前の弾性挙動に関してはリングの公式に示されている式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の式を採用することとした。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-11に示すように、極めて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。



図-13 感圧紙の実験結果
上から中圧用、低圧用、超低圧用

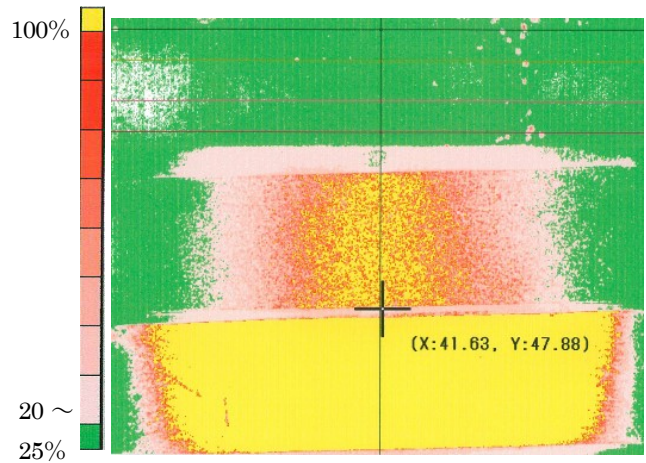


図-14 感圧紙の解析結果
上から中圧用、低圧用、超低圧用

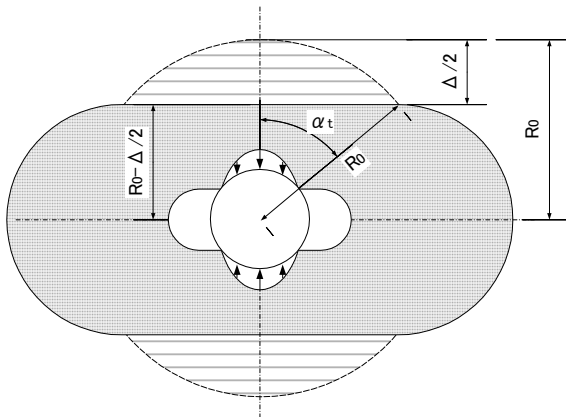


図-15 分布幅予測モデル

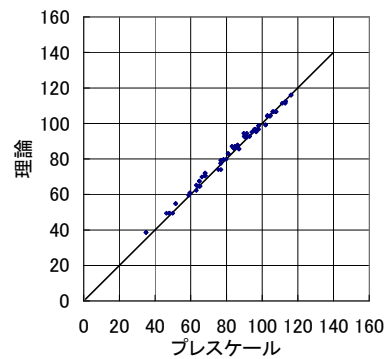


図-16 分布幅の相関図

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

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

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

図-11より実験結果を一見良く近似できていることがわかる。しかし、図-12に示すように、鋼管の強度が高くなり過ぎ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-ひずみ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ことが検証されたが、それ以外の部分については今後の検討課題といえる。

(5) ゴムから鋼管への力の伝達特性

図-7で示したように、鋼管に巻くゴム管が厚くなるほど降伏する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

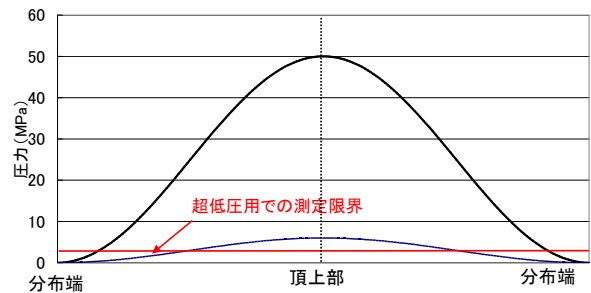


図-17 分布端での発色の違い

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が内部の鋼管に伝達される際に、鋼管に作用する荷重は分布荷重となる。そのことから鋼管の曲げ変形特性に影響が生じ、荷重 - 変位関係が変化したものだと考えられる。

このように鋼管には分布荷重が作用すると考えられるが、その分布特性は未知である。皆川ら¹⁹⁾は分布特性を線形荷重であると仮定してモデルを作成していた。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、精度が著しく低下した。そのため、本研究では荷重の分布特性を以下の実験及び解析によって厳密に測定し、本特性を再構築した。

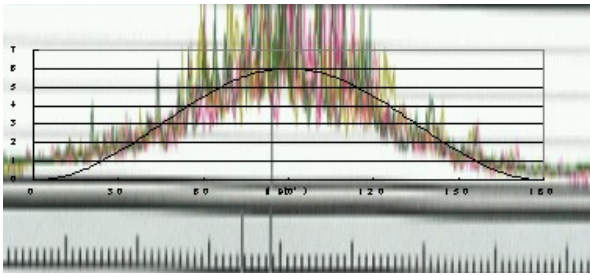


図-18 分布形状の比較

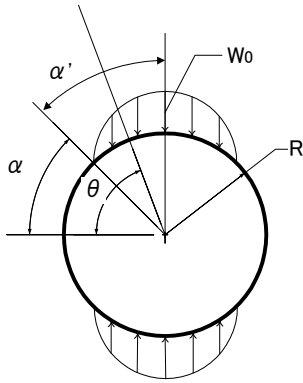


図-19 荷重が線形分布で伝達する場合

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。ゴム管と鋼管の接触分布を測定することにより、ゴムから鋼管へ伝達される荷重の分布状況が判断できる。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、実験ではゴム管の中に鋼柱を鋼管の代用として挿入した。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。解析システムは富士フィルムのFPD-901Eを使用した。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。ゴム管の圧縮ひずみが0.6と0.8となる変位量での圧力分布とした。図-13に加圧実験した後の感圧紙の発色状況を示す。中圧用、低圧用、超低圧用の設置状況も同図より分かる。図-14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-15に示す皆川¹⁹⁾らの分布幅予測モデルで算出

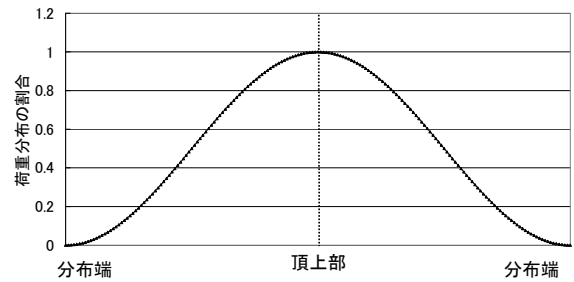


図-20 荷重の分布形状

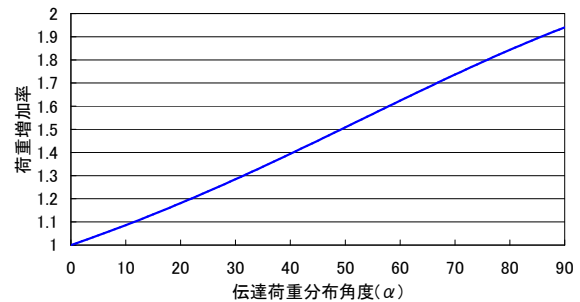


図-21 荷重増加率と伝達荷重分布角度

される分布幅との相関図を図-16に示す。実線で示されている部分が理想値となり、この比較から分布幅予測モデルの妥当性は検証された。本モデルは式(10)として表すことができる。

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

しかしここで、式(10)で得られる伝達荷重分布角度 α_t を修正する必要がある。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-17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ってしまう。そこで、式(10)の伝達荷重分布角度 α_t を次式によって修正した。

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

ここで、 ϵ はゴムのひずみ量である。本式は、ひずみ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。

図-18に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、照らし合わせることによ

って比較した結果を示す。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が作成できた。

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-19, 20に示すように、角度 θ に関して \sin^2 分布することが分かっている。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²⁰⁾から、図-19の頂点の曲げモーメントは次式のように求まる。

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

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

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 は²⁰⁾,

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

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。

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

ここで、 γ を、ゴム管を巻くことによって鋼管の荷重値が上昇するという現象を表せる荷重増加率として次式を定義する。

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

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 γ をとると、図-21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

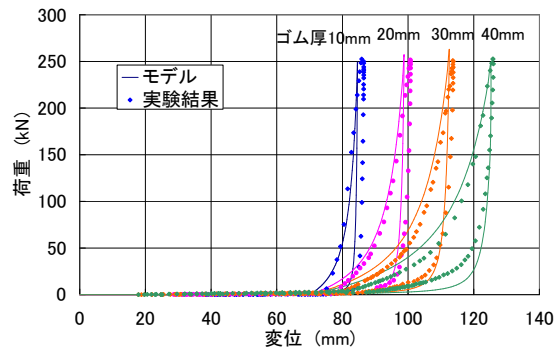


図-22 ゴム内径70mmの除荷時と再載荷時を予測した荷重-変位関係

が小さくなることを表している。図-7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付き、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られる。

(6) ほぼ直方体形状につぶれたゴムの圧縮変形特性

この節のモデル化の方法については文献19)と同じであるため、概説のみとする。

ゴム管単体の静的圧縮試験の結果から、鋼管が圧壊した後の除荷時及び再載荷時のゴムの変形特性を評価する。ゴム管の内径の93%~98%程度まで変形した時点を基準にして、モデル化を行った。得られた結果と実験結果の比較を行ったものの一部を図-22に示す。

(7) モデル化の精度

(2)~(5)の特性を用いて、ゴム鋼併用型耐震緩衝装置の載荷時の荷重-変位関係を作成した。作成した荷重-変位関係の一部を図-23に示す。鋼管の強度が低い順に並べており、図中の $S (= t_p^2/R)$ はその強度を表している。同図では、モデルの精度を確認できるように、実験結果の荷重-変位関係と併せて示してある。図-24には皆川ら¹⁹⁾が作成したモデルより作られる荷重-変位関係を示している。図-23, 24を比較と、全体的には再構築した荷重-変位モデルの精度が向上していることが分かる。

図-23に示すように、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-12で示したように、鋼管の曲げ変形特性のモデルに問題があるためであると考えられる。ここで、皆川ら¹⁹⁾が作成したモデルと比較してその精度が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てい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することとするため、式(18)を用いて誤差 E を算出した。

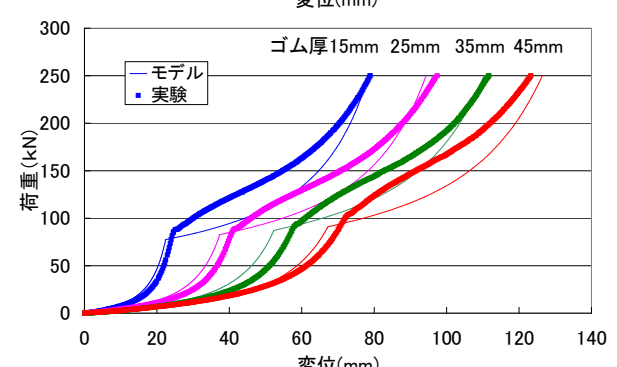
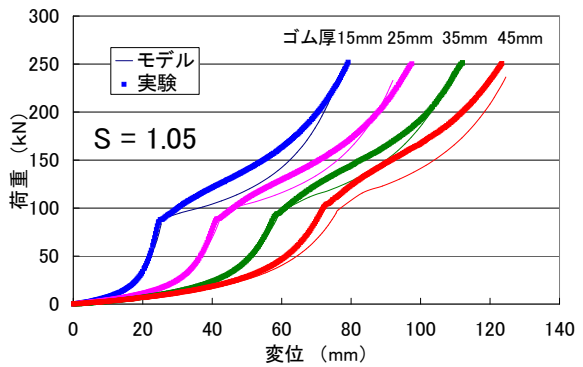
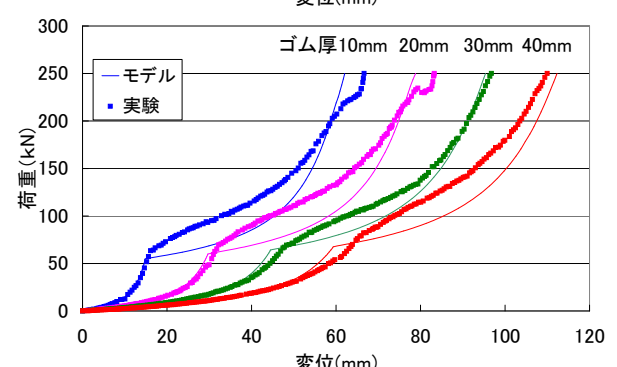
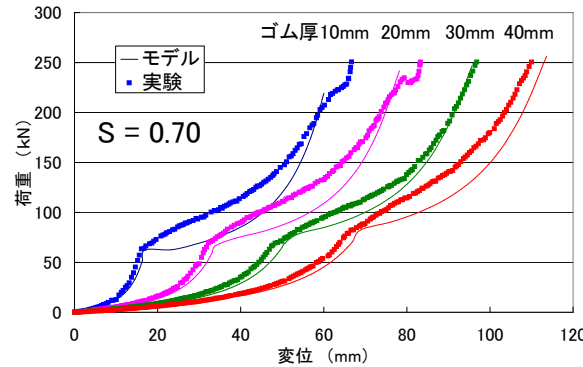
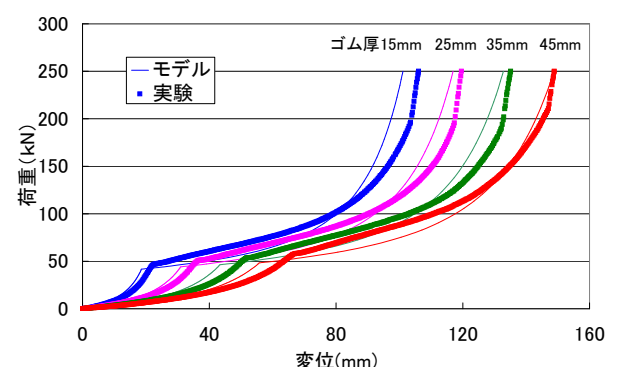
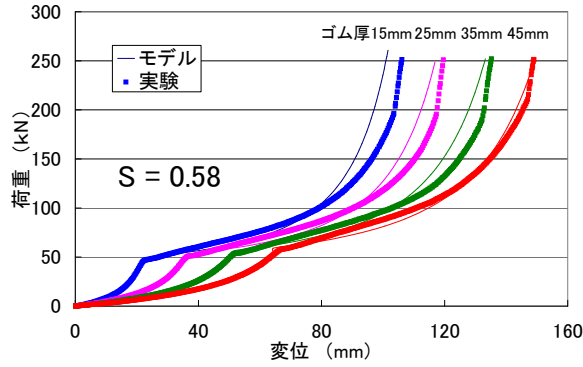
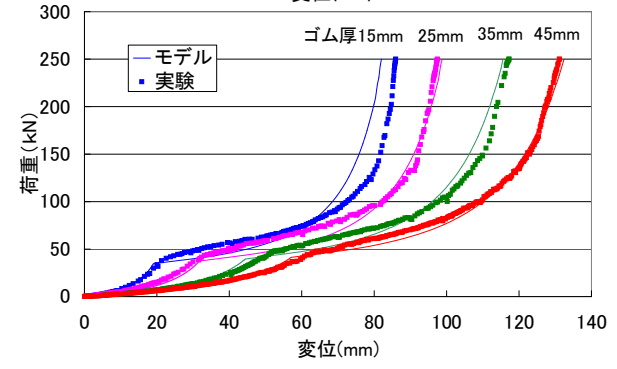
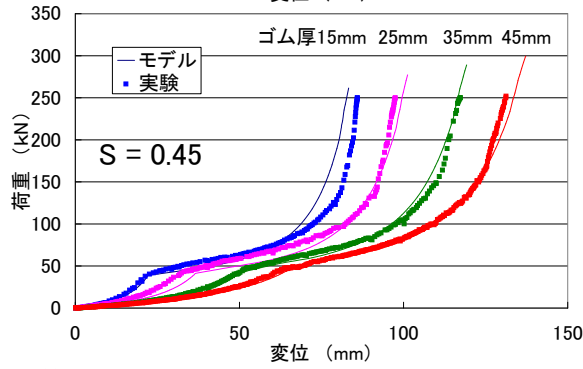
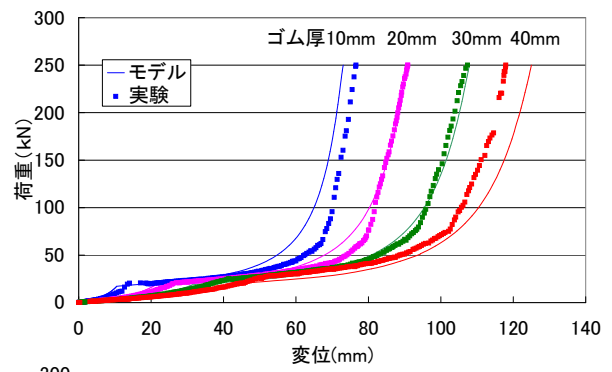
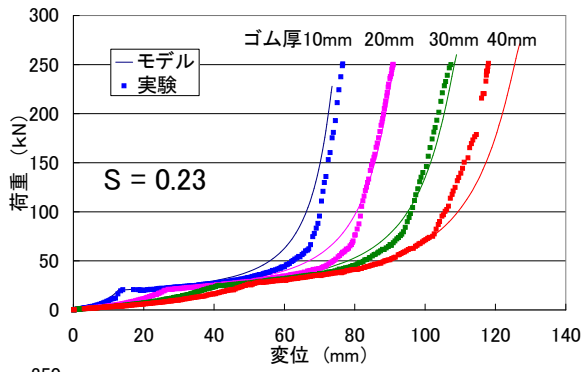


図-23 荷重-変位モデルの精度

図-24 文献19)の荷重-変位モデルの精度

それぞれ、上から R70・ t_p 4、R80・ t_p 6、R110・ t_p 8、R70・ t_p 7、R95・ t_p 10

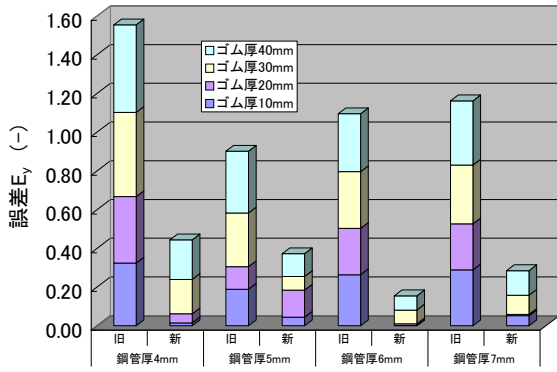


図-25 荷重 - 変位モデル 70mm
降伏点までの誤差の比較

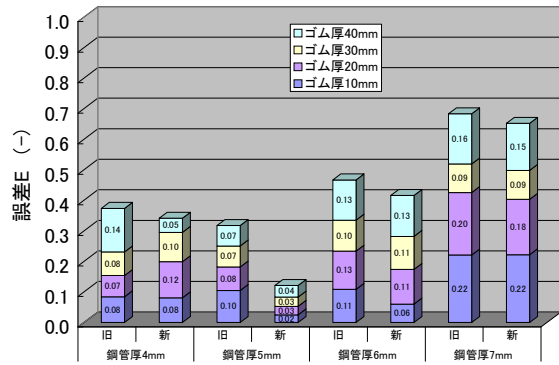


図-28 荷重 - 変位モデル R70mm の誤差の比較
降伏変位の 2 倍の変位量

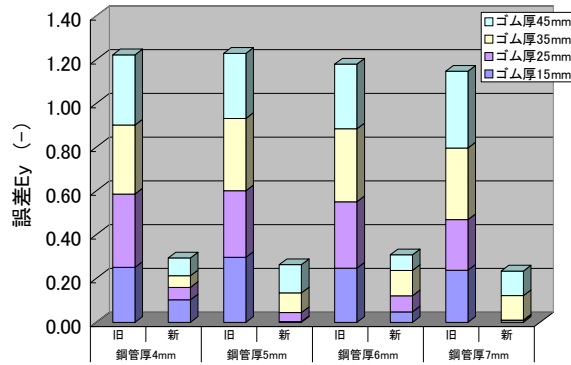


図-26 荷重 - 変位モデル R80mm
降伏点までの誤差の比較

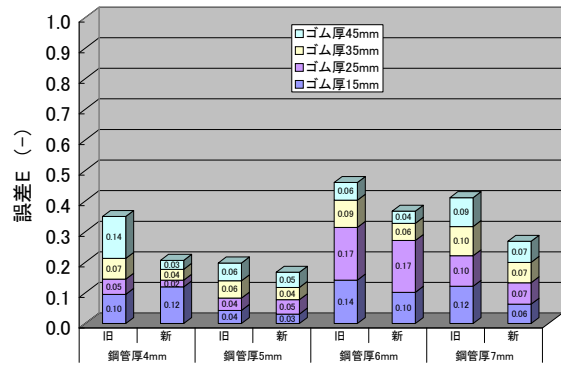


図-29 荷重 - 変位モデル R80mm の誤差の比較
降伏変位の 2 倍の変位量

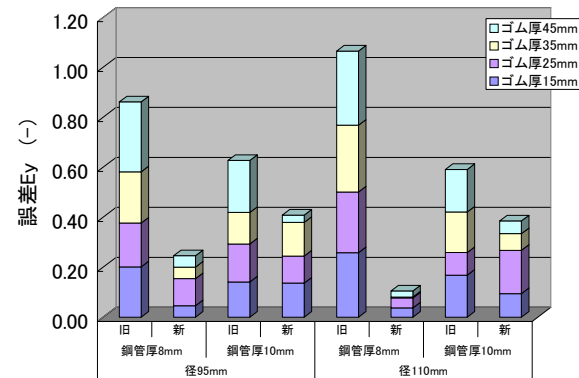


図-27 荷重 - 変位モデル R95, 110mm
降伏点までの誤差の比較

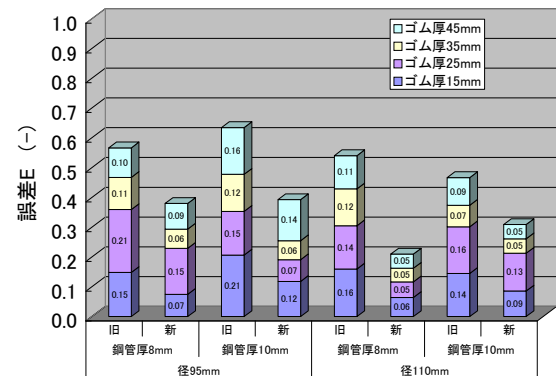


図-30 荷重 - 変位モデル R95, 110mm の誤差の比較
降伏変位の 2 倍の変位量

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

P_t 、 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 Δ で積分している。積分する範囲は、鋼管が降伏するまでの点としている。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ためである。本特性の影響が最も表れるのが、鋼管が降伏する点までである。

上式を用いて算出した誤差を図 - 25~27 に示す。皆川らの¹⁹⁾モデルの誤差を”旧”、修正したモデルを”新”として示している。縦軸を誤差 E、横軸を鋼管の厚さとし、ゴム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。ほぼ全ての寸法について誤差がかなり小さくなっていることが分かる。

改良を判断する基準として、点変位量が降伏変位の 2 倍の量についても比較することとした。比較を行う方法を式 (18) で行った方法とほぼ同じである。上式を

用いた結果を図-28~30に示す。しかし、図-12で示した様に、鋼管の強度が高い（R70・tr7、R95・tr8、R95・tr10、R110・tr10）試験体に関しては誤差Eが大きな値を示している。その他の試験体については、降伏変位の2倍の変位までのモデルの精度が確認できる。

4. 結論

本研究ではゴム鋼併用型耐震緩衝装置をより柔軟に設計可能とするため、鋼管及びゴム管の寸法をパラメトリックに変化させ、基本的な特性を把握するために静的載荷実験を施した。そして、寸法の変化を考慮できるように文献19)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：厳密な実験及び解析を行い、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したことが分かった。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に限り、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。

謝辞：実験及び解析実施にあたり、仲宗根茂技士、佐藤安雄技士、佐藤貴之氏、高嵩太一氏、鏑田直希氏、渡邊淳司氏、石黒聡氏、村田昌祥氏、横内良昭氏、岩崎充氏にご協力頂きました。本論文は以上の皆様方の絶大なるご支援、ご協力なくしては、成り立つことはできませんでした。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会関西支部：緩衝型落橋防止システムに関する調査研究，土木学会関西支部講習会テキスト，2001.7.
- 2) 日本道路協会：「道路橋示方書・同解説，V 耐震設計編」，1996.12.
- 3) 梶田幸秀，杉浦邦征，渡邊英一：緩衝型桁間連結ケーブルを用いた高架橋の地震応答性状，土木学会論文集，No.710/I-60，pp.297-310，2002.7.
- 4) 園田佳巨，衛藤芳昭，石川信隆，生駒信康，彦坂熙：ゴム緩衝ピンを用いた落橋防止連結板の静的および動的応答特性に関する実験的考察，土木学会論文集，No.598/I-44，pp.333-346，1998.7.
- 5) 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.
- 6) 西本安志，梶田幸秀，石川信孝，西川信二郎：落橋防止システム用緩衝材としての積層繊維補強ゴムの動的特性に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.46A，pp.1865-1874，2000.3.
- 7) 越峠雅博，運上茂樹，足立幸郎，長屋和宏：弾塑性型特性を有する円筒型ゴム製緩衝装置の衝撃緩衝効果に関する実験研究，土木学会論文集，No.689/I-55，pp.99-112，2001.4.
- 8) 村田清満，高山智弘，後藤貴士，山田正人，生駒信康，浮島徹：エネルギー吸収機能を有する落橋防止装置による耐震補強効果，土木学会論文集，No.689/I-57，pp.275-288，2001.10.
- 9) 野々村千里，鎌田賢，上東泰，野島昭二：落橋防止装置用熱可塑性エラストマー緩衝材の圧縮変形挙動，土木学会第53回年次学術講演会，I部門，pp.316-317，1998.10.
- 10) 野島昭二，石田博，上東泰，野々村千里：緩衝材を併用した落橋防止装置システムの検討，土木学会第53回年次学術講演会，I部門，pp.318-319，1998.10.
- 11) 頭井洋，中野将志，大谷修，岡本安広：単純鋼桁・橋脚系のエネルギー吸収型落橋防止構造に関する一検討，鋼構造論文集，第6巻第24号，pp.55-64，1999.12.
- 12) 頭井洋，中野将志，大谷修，岡本安広：単純鋼桁・橋脚系のエネルギー吸収型落橋防止構造の等価線形化法に関する設計法，鋼構造論文集，第7巻第28号，pp.33-44，2000.12.
- 13) 頭井洋，濱野涼子，大谷修，岡本安広：エネルギー吸収型桁連結装置の鋼連続桁橋への適用，鋼構造論文集，第8巻第31号，pp.107-117，2001.9.
- 14) 頭井洋，大谷修，岡本安広：エネルギー吸収型桁連結装置としての鋼製ペローズの力学特性，鋼構造論文集，第9巻第24号，pp.77-86，2002.6.
- 15) 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/I-57，

- pp.335-360, 2001.10.
- 16) 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.
- 17) 長嶋文雄, 皆川勝, 島田泰至, 寺尾圭史, 佐藤豪: 鋼製緩衝材の荷重変形特性に関する解析的検討, 鋼構造年次論文報告集, 第7巻, pp.15-22, 1999.11.
- 18) 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.
- 19) 皆川勝, 藤谷健: ゴム鋼併用型耐震緩衝措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.
- 20) 土木学会: 構造力学公式集, 1986

DEVELOPMENT OF SHOCK ABSORBER COMPOSED OF RUBBER AND STEEL PIPES

Yuji DOI supervised by Masaru MINAGAWA

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 author 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.