

ゴム鋼併用型耐震緩衝装置の開発 に関する研究

皆川勝¹・藤谷健²

¹正会員 工博 武蔵工業大学助教授 工学部土木工学科 (〒158-8557 東京都世田谷区玉堤1-28-1)

²正会員 修士(工学) (株)エバラ (〒144-8510 東京都大田区旭町11-1)

著者らは、緩衝材として鋼管を用いることに着目し、その基礎特性を実験及び解析によって検討した。その結果、鋼管はエネルギー吸収効果が大きく、緩衝材として期待できることがわかった。さらに、免震橋に直方体ゴム又は鋼管を緩衝材として設置する効果を確認するために非線形応答解析を行ったところ、鋼管を単独で緩衝材として用いると圧壊後の衝突力が急激に増大してしまう欠点を確認された。そこで、ゴムと鋼管を併用する緩衝材の基本特性を静的実験より検討した。そして、鋼管の外側にゴム管を巻く形式の緩衝材の有効性を示すと共に、その荷重-変位関係をゴム管及び鋼管の基本特性から推定するモデルを構築し、実験結果からその妥当性を検証した。

Key Words : shock absorber, rubber pipe, steel pipe, pounding of girders, base-isolated bridge

1. はじめに

兵庫県南部地震以降、橋梁に免震設計が積極的に採用されているが、これによって、橋桁の変位が大きくなるために桁と橋台間あるいは桁同士の間の変位を吸収するために大型の伸縮装置が必要となる。このような大型の伸縮装置を設置することはコスト増をまねき、メンテナンス費用も増す。したがって、免震橋であっても通常の伸縮装置を設置し、中小の地震による変形は伸縮装置に吸収させ、大規模地震に対しては、構造系の一部を破損させることを許容したほうが合理的といえる。ここで、破損は部分的に留め、地震後は速やかに復旧できるものとして緩衝装置が考えられる。ニュージーランドにおいては橋梁の免震設計をする際、橋台と橋桁間に緩衝装置を設置した例¹⁾があるが、わが国ではいまだ検討段階である。緩衝装置を実橋へ適用した場合の設置イメージ図を図-1に示す²⁾。

緩衝装置には、高いエネルギー吸収能力と耐衝撃性が求められ、そのような緩衝材の構造、材質等について様々な提案がなされている。例えば、庄司³⁾や伊津野⁴⁾は直方体型のゴム、また、運上⁵⁾は円筒型のゴム、上東^{6),7)}はハニカム型及びセル型のゴム、さらに西本⁸⁾は積層繊維補強ゴムの圧縮特性について、実験的あるいは解析的に検討し、その基礎的特性を明らかにしている。そして窪田⁹⁾は、様々な緩衝材の圧縮試験によって、荷重-変位関係を図-2に示すように5種類に分類しており、圧縮初期にある程度荷重が立ち上がり、その後荷重はほぼ一定の状態に変位のみ増加するも

のが良いものとしている。つまり、図-2の(4)が、エネルギー吸収効果が良いものとされている。これらの研究成果をまとめれば以下ようになる。

・直方体型

荷重-変位関係は(1)あるいは(3)のような荷重の立ち上がりを見せるため、上記の分類からすれば緩衝材として必ずしも良いとは言えない。しかし、復元特性が良好なため、複数回の衝突に抵抗できると考えられる。

・円筒型、ハニカム型、セル型

ハニカム型は(5)のような荷重-変位関係を示し、セル型及び円筒型は、初回載荷の荷重-変位関係は(4)のような曲線を示し、2,3回目は、降伏荷重が小さくなり(2)のような曲線を示す。

・積層繊維補強

荷重-変位関係は(4)あるいは(5)のような挙動を示す。初期降伏点までは弾性範囲であるので、中小規模の地震に対してはこの範囲内で対応し、大規模地震に対しては降伏点以降の埋設繊維の破断によって高いエネルギー吸収効果が得られるとしている。

さらにこれらのゴムの衝撃吸収効果を把握するために、庄司・川島¹⁰⁾、窪田¹¹⁾、得永¹²⁾は、振動台等を用いた衝突実験を行い、それぞれの緩衝材の衝突力の低減効果を明らかにした。また、川島・庄司^{13),14)}は、解析によって桁間に設置した緩衝材の桁間衝突の低減効果を明らかにしている。さらに、潤田¹⁵⁾は、直方体ゴム緩衝材の荷重-変位関係がMooney-Rivlinの応力-ひずみ関係を用いて予測できることを示した。

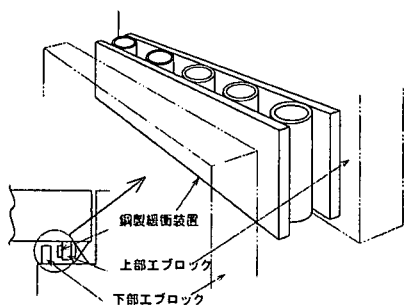


図-1 緩衝装置設置イメージ図²⁾

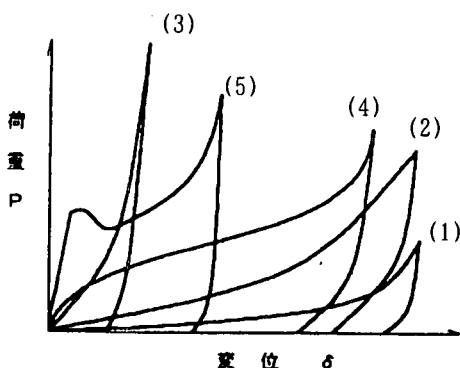


図-2 種々の緩衝材の荷重-変位関係³⁾

長嶋ら^{2),16)}は、ゴムに変わる緩衝材として、鋼管などの型鋼を使用した緩衝材を提案しており、実験及び解析によりその実用性・有効性を検討している。その結果得られた荷重-変位関係は(4)あるいは(5)のような挙動を示し、高いエネルギー吸収効果が期待できるほか、コスト面の比較からもゴム製に比べ有利と考えられるとしている。

一方、仮に鋼管が完全に圧壊した場合、ゴムの場合を超える衝突力が発生する可能性のあることが、著者ら¹⁷⁾の解析的検討により示されている。

そこで、本研究では、ゴムと鋼管を併用する緩衝材の基本特性を静的実験より検討した。そして、鋼管の外側にゴム管を巻く緩衝材を新たな形式として提案すると共に、その荷重-変位関係をゴム管及び鋼管の基本特性から推定するモデルを構築し、実験結果からその妥当性を検証した。

2. ゴム鋼管併用型緩衝材の静的圧縮試験

鋼管の過度の変形を抑制し、鋼管の圧壊近傍で過大な反力を生じさせないような新しい緩衝材を考案するために、鋼管とゴムを併用した緩衝材の静的圧縮試験を行った。そして、測定された荷重-変位関

係からエネルギー吸収特性を把握すると共に、それぞれの試験体の緩衝効果を比較した。

(1) 試験体

試験体は図-3に示す、鋼管の外側にゴムを巻いたもの4種類と、図-4に示す鋼管内にゴムを詰めたもの2種類である。鋼管の材質はSTKM13A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、試験体の奥行きは100mmである。また、比較のため、使用した鋼管の静的圧縮試験も行った。

(2) 実験方法

載荷装置の概要を図-5に示す。静的圧縮試験には容量300kN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鉛直変位を水平変位に変換した。また、外にゴムを巻いた試験体については、荷重を完全に除荷した後、除荷時の荷重まで再び載荷した。

(3) 実験結果

図-6に鋼管の変形形状の推移を、また、図-7に荷重-変位関係を示す。剛性が低下する不安定現象は現れず、降伏後の剛性は徐々に上昇している。また、変形形状は40kN程度で降伏後、楕円状につぶれていき、荷重値も変形に伴い上がっていった。鋼管中心部にくびれが発生し、そのくびれが接触した50mm付近で急激に荷重が上昇した。長嶋ら²⁾の実験によれば、鋼管の上下の溶接により載荷板を取り付けた場合は、降伏後に剛性が徐々に低下する現象が現れたが、そのような現象は現れていない。

O-10, 20, 30, 40, および鋼管の荷重-変位関係を図-7に示す。また、図-8にO-40の変形形状の推移を示す。降伏まではゴムのみが変形しており、剛性は低い(Phase I)。降伏時の変位はゴム厚にほぼ比例しているが、降伏荷重はゴム厚が厚いほど上昇している。鋼管の降伏後の剛性は徐々に上昇しているが、ここでは、鋼管が塑性変形すると共にゴムの圧縮変形も進行しているものと考えられる(Phase II)。試験機の容量の制約から荷重250kNで除荷した。この除荷と再載荷の経路では鋼管はすでに圧壊していた。したがって、これを越える荷重では、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と考えられる(Phase III)。

図-9にI-29, I-21.5の荷重-変位関係を示す。また、図-10にI-29の変形形状の推移を示す。これより、上下のゴムが接触した後、ゴムが両側面からはらみ出したが、そのまま一定の荷重値を保って変形し、ある時点から急激に剛性が上昇していることがわかる。一旦鋼管が塑性変形すると、それによって拘束されて、ゴムは変形することができない。これに対して、ゴムを外側に巻いた場合には、鋼管が圧壊した後も、ゴムの変形は鋼管によって抑制されることはない。

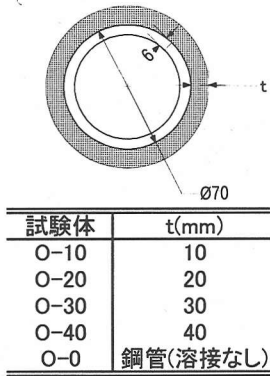


図-3 外にゴムを巻いた試験体の寸法・形状

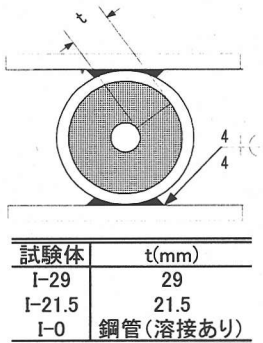


図-4 内部にゴムを挿入した試験体の寸法・形状

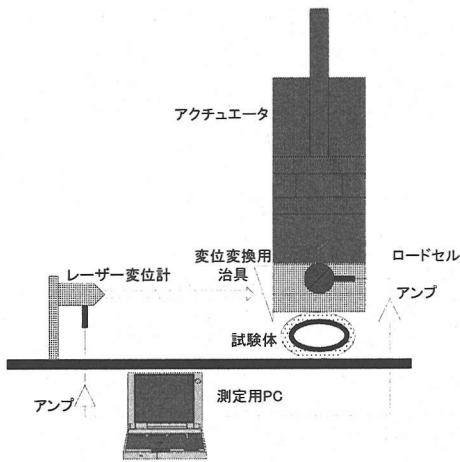
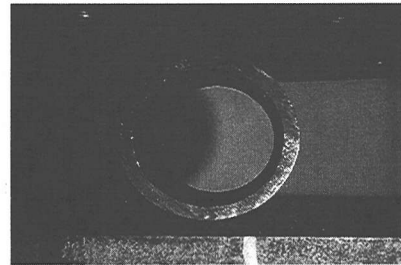
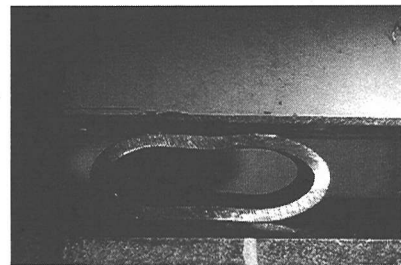


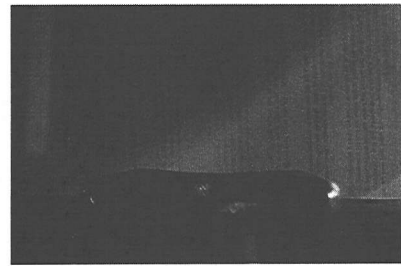
図-5 載荷装置概要



(a) 初期状態



(b) 変形量 30mm



(c) 実験終了後

図-6 鋼管 (O-0) の変形形状の推移

(4) エネルギー吸収性能

表-1に最大荷重時の吸収エネルギー量を示す。図-7に示した荷重-変位関係よりO-0とO-10, 20, 30, 40とを比較すると、ゴムの厚さが増すと、変形量が大きいためエネルギー吸収量が増している。その結果、O-0に比べ、O-10は1.15倍、O-20は1.2倍、O-30は1.35倍、O-40は1.55倍に吸収エネルギー量が増している。その一方、鋼管内にゴムを挿入したタイプでは降伏荷重が増加することでエネルギー吸収量が大きくなっているが、変形量が小さくなるため、緩衝材としては好ましくない特性である。

また、図-11にゴムを外に巻いたタイプの荷重-吸収エネルギー関係を示す。これより、鋼管のみの場合には、降伏しなければわずかなエネルギーも吸収することができないが、鋼管にゴムを巻い

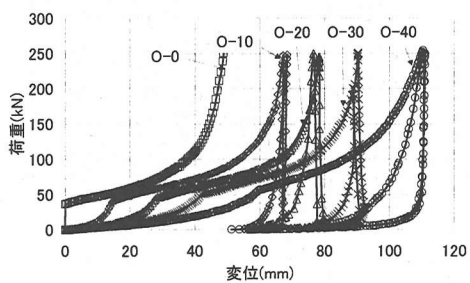


図-7 外巻きゴム緩衝材の荷重-変位関係

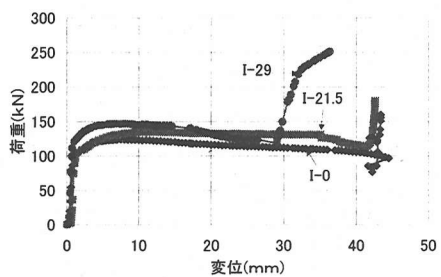
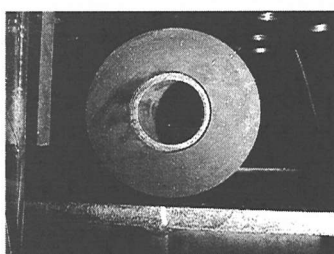
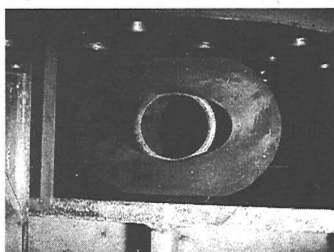


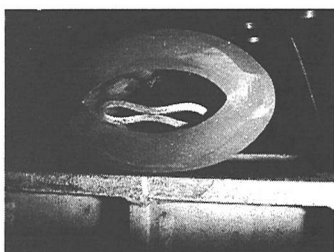
図-9 鋼管内にゴムを詰めた緩衝材の荷重-変位関係



(a) 初期状態

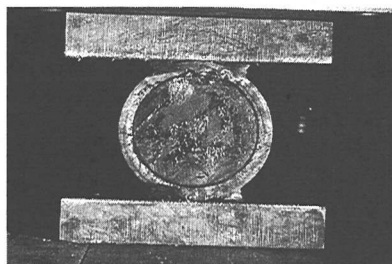


(b) 変形量 30mm

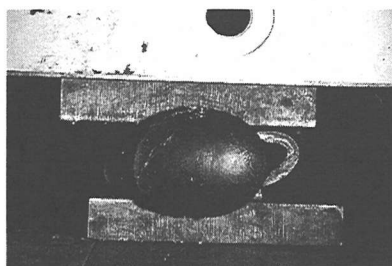


(c) 実験終了後

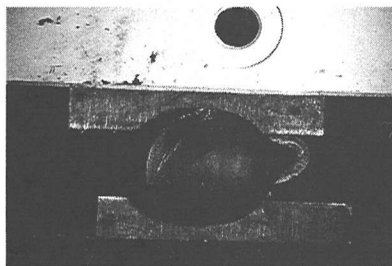
図-8 O-40の変形形状の推移



(a) 初期状態



(b) 変形量 20mm



(c) 実験終了後

図-10 I-29の変形形状の推移

表-1 吸収エネルギー量

試験体	吸収エネルギー(kN・m)
O-10-1	4.6
O-20-1	4.7
O-20-2	4.8
O-20-平均	4.8
O-30-1	5.2
O-30-2	5.5
O-30-平均	5.4
O-40-1	6.4
O-40-2	6
O-40-平均	6.2
O-0-1	3.9
O-0-2	4.1
O-0-平均	4
I-15-1	5.8
I-15-2	5.3
I-15-平均	5.6
I-0-1	4.9
I-0-2	5.4
I-0-平均	5.2

たものはある程度のエネルギーは、ゴムで吸収することが出来る。そして、その後の吸収エネルギーの上昇にともない鋼管では、荷重値の上昇も急であるが、鋼管にゴムを巻いたものは、荷重値の上昇が抑制されていることが分かる。

ゴム管タイプの緩衝材としては、船舶同士あるいは船舶と岸壁の間に生ずる衝突力を減少させる防舷材があげられる。この場合には、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。これと同様のゴム管の内部に剛性の高い鋼管を挿入することにより、ゴム管は衝突の初期からエネルギー吸収材として働くことになる。また、それ以上の大きいエネルギーに対しては、鋼管を破損させてエネルギー吸収し、さらにその後もゴムがエネルギー吸収材として残るものである。

以上のことから、鋼管の高いエネルギー吸収性能を利用しつつ、載荷初期の鋼管の降伏や衝突力の増大を抑制し、更に、図-8(c)に示した変形図からも分かるように、鋼管の圧壊後の除荷・再載荷時にも、ゴム管の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新たな緩衝材として、鋼管の外にゴムを巻いた形式の緩衝材を提案する。

このような力学特性は緩衝材として望ましいことは既述の通りである。また、製作加工については比較的単純な形状の管の組み合わせであり、コスト的に実用性が低いとはいえない。なお、設置方法など、実用化するまでに解決すべき課題はあるが、これについては今後の課題としたい。

3. ゴム鋼併用型緩衝装置の荷重-変形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

ゴムを鋼管の外に巻いたゴム鋼併用緩衝材の荷重-変位関係に影響を与える要因としては、

- ・ 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
- ・ ゴムから鋼管へ伝わる力の分布特性

があげられる。
 ゴム管の圧縮変形とは、内部に鋼管が挿入されていることにより載荷板と鋼管により挟まれた状態でゴム管の管厚方向に生ずる圧縮変形である。ゴム管の曲げ変形とは、ゴム管単独で、管径方向に圧縮変位することにより生ずる曲げ変形である。鋼管の曲げ変形とは、鋼管単独で、管径方向に圧縮変位することにより生ずる曲げ変形である。ゴムから鋼管へ伝わる力の分布特性とは、外側に巻いたゴム管から、その内部に設置された鋼管へ力が分布して伝達すると、その力の分布により見かけ上鋼管が分担する荷重が増加することを考慮するための項である。

ここではこれらの基礎的特性より、提案した緩衝装置の荷重-変位関係をモデル化すると共に、その妥当性を検証する。

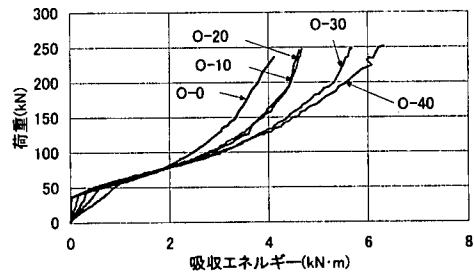


図-11 荷重-吸収エネルギー関係

(2) ゴム管の圧縮変形特性

鋼管が塑性変形する前のゴム管の圧縮変形特性を得るために、それぞれのゴム管の中に、ゴム管内径と同じ外径を持つ鋼柱を挿入して、静的圧縮試験を行った。その結果得られた荷重-変位関係を図-12に示す。そして荷重 P 及び変位 Δ から応力及びひずみを次式より求めた。

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

ここで、 R_i はゴム管の内径、 l_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。なお、ゴム管と鋼管の接触面積で除することも考えられるが、変形とともにこの面積は変化することから、これで除すること

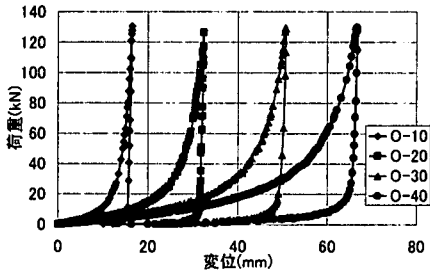


図-12 鋼柱を挿入したゴム管の荷重-変位関係

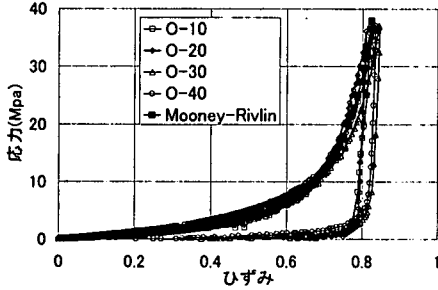


図-13 鋼柱を挿入したゴム管の応力-ひずみ関係

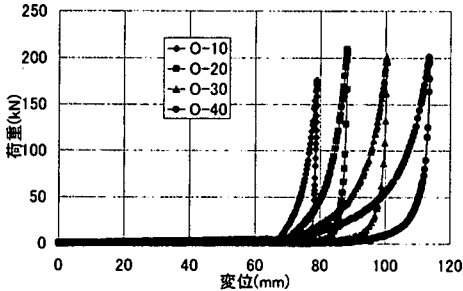


図-14 ゴム管単体の荷重-変位関係

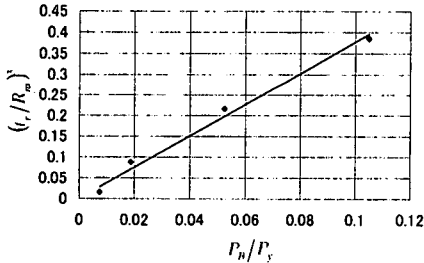


図-15 P_B/P_y と $(t_r/R_m)^3$ の関係

はモデルを複雑化し好ましくないと考えた。

得られた応力-ひずみ関係を図-13に示す。図より、ゴム管の内径を用いた式(1)で整理すると、本実験の範囲では実測結果を極めて良好にモデル化できることが分かった。そこで、この結果の載荷部分の

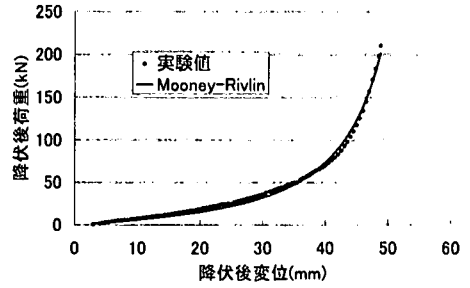


図-16 鋼管単体の降伏後荷重増分-変位関係

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¹⁵⁾により表すものとした。

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

ここで、 $\lambda_{r,1} = 1 + \epsilon_{r,1}$ であり、 $a_{r,1}, b_{r,1}$ 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O-10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。

$$a_{r,1} = 0.458, b_{r,1} = 0.0223 \text{ (MPa)} \quad (3)$$

この関係式は同図に示すように実験結果を良く近似している。

(3) ゴム管の曲げ変形特性

ゴム管の曲げ特性を得るために、ゴム管単体の静的圧縮試験を行った。得られた荷重-変位関係を図-14に示す。まず、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。ゴム管の曲げ特性を評価するため、ゴム鋼併用タイプにおける鋼管の降伏時の変位と同じ変位における荷重値を P_B として、 P_B/P_y と $(t_r/R_m)^3$ の関係を求めた。その結果を図-15に示す。ゴムの弾性の曲げ変形であるから当然ではあるが、これらには以下のような良好な比例関係が成立する。

$$\gamma_1 = 0.265 \left(\frac{t_r}{R_m} \right)^3 \quad (4)$$

ここで、 R_m はゴムの平均半径である。上式はゴム管の曲げ抵抗による見かけの荷重増加率を与える。

(4) 鋼管の曲げ変形特性

鋼管の管径方向の曲げ特性は図-7にすでに示した。

本研究では鋼管の形状、寸法は全て同じであるが、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。本研究では、鋼管の寸法はすべて同一となっているので、荷重と変位の関係を直接モデル化する方法も考えられる。しかし、他の寸法の鋼管に対しても汎用性のあるモデル化をすることは有意義である。ここでは、いくつかの式の適用を試みたが、結果的に近似度の高くなったMooney-Rivlinの式を援用することとした。同式はゴムの応力-ひずみ関係を表現するために用いられるモデルである。幾何的非線形性と材料非線形性の影響の結果として現れる鋼管の荷重-変位関係を表現するために用いられるものではないが、少なくとも本研究で使用した寸法の鋼管については極めてよく当てはまるため使用することとした。荷重 P 及び変位 Δ から無次元荷重 σ_s 及びひずみ ε_s を次式により求めた。

$$\sigma_s = \frac{(P - P_y)}{(P_b - P_y)} \varepsilon_s = \frac{\Delta}{2R_s} \quad (5)$$

ここで、 P_b は鋼管の圧壊荷重、 R_s は鋼管径である。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。

$$\sigma_s = 2 \left(\lambda_s - \frac{1}{\lambda_s^2} \right) \left(a_s + \frac{b_s}{\lambda_s} \right) \quad (6)$$

$$a_s = 0.031, b_s = 0.0058 \quad (7)$$

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

図-16にこの式と実験結果を共に示すが、良く近似できていることがわかる。

(5) ゴムから鋼管への力の伝達特性

ゴムから鋼管へ伝達される荷重を図-17(a)に示すように、角度 θ に関して線形分布すると仮定した。このとき、荷重式は次式となる。

$$w = \frac{w_0}{\frac{\pi}{2} - \alpha'} (\theta - \alpha') \quad (8)$$

ここで、水平方向の座標を x とし、これと角度 θ に関する $dx \doteq R d\theta \cdot \sin \theta$ の関係を用いて、式(8)を区間 $[-\alpha', \alpha']$ で積分すると、荷重和が次式のように求まる。

$$P = \frac{2w_0 R}{\frac{\pi}{2} - \alpha'} (1 - \sin \alpha') \quad (9)$$

次に、図-17(a)のように線形分布する荷重を受けた場合の、頂点での曲げモーメント M_1 は

$$M_1 = 2A \left[\frac{1}{4} - \frac{\pi}{8} \alpha' + \frac{1}{4} \alpha'^2 + \frac{1}{8} \alpha' \cdot \sin 2\alpha' + \frac{1}{4} \cos 2\alpha' \right] \quad (10)$$

$$A = \frac{1}{\frac{\pi}{2} - \alpha'} \times 0.3183 \cdot R^2 \cdot w_0$$

と表される¹⁸⁾。これは、鋼管からゴム管へ分布して力が伝達された場合の弾性範囲での最大曲げモーメントである。また、図-17(b)に示すように相対する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、

$$M_2 = 0.3183P \cdot R \quad (11)$$

と表される¹⁸⁾。これは、鋼管からゴム管へ一点集中で力が伝達された場合の弾性範囲での最大曲げモーメントである。そこで、式(11)に式(9)を代入し、 M_2 と M_1 の比が以下のように求まる。

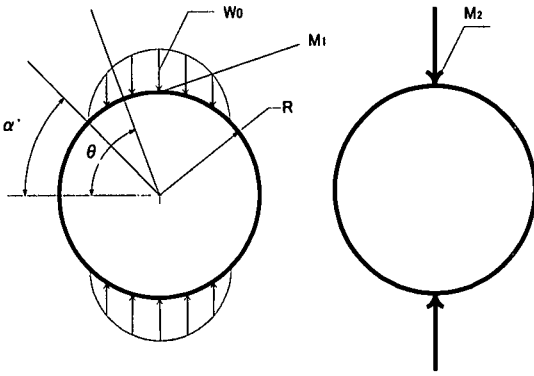
$$\frac{M_2}{M_1} = \frac{(1 - \sin \alpha')}{\left[\frac{1}{4} - \frac{\pi}{8} \alpha' + \frac{1}{4} \alpha'^2 + \frac{1}{8} \alpha' \cdot \sin 2\alpha' + \frac{1}{4} \cos 2\alpha' \right]} \quad (12)$$

ここで、 γ_2 を次式で定義する。

$$\gamma_2 = \frac{M_2}{M_1} - 1 \quad (13)$$

式(13)より、横軸に基本伝達荷重分布角度 $\alpha = 90 - \alpha'$ をとり、縦軸に伝達荷重増加係数 M_2/M_1 をとると、図-18に示す曲線が得られる。これは、基本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-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つき、ゴムの厚さが増すほど、基本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。

次に基本伝達荷重分布角度 α とゴムの変形量 Δ の関係について考察する。まず、ゴムが変形したときの基本伝達荷重分布角度 α を図-19のように仮定すると、基本伝達荷重分布角度 α は次式のように変位 Δ と関係づけられる。



(a) 線形分布で伝達する (b) 集中して伝達する場合

図-17 鋼管に伝わる力の分布

$$\alpha = \cos^{-1} \frac{R_0 - \frac{\Delta}{2}}{R_0} \quad (14)$$

次に、 α' に関する量として、ゴム管、鋼管の径厚比を用いて次式より α' を評価することとした。

$$\alpha' = 90 - \beta\alpha \quad (15)$$

β はゴムの厚さ t_r 、鋼管の厚さ t_p 、ゴム管の内径 R_i およびゴム管の外径 R_o の関数である。ここで、ゴム鋼管併用型緩衝材の降伏荷重が鋼管自体の降伏荷重より増加した要因が前述の γ_1 および本節の γ_2 であることから、降伏荷重の増加に対する γ_2 の寄与分を説明できる β を求めるため、 β と $(t_r R_i)/(t_p R_o)$ の関係をプロットした結果を図-20に示す。この関係から次式により、 β を評価するものとした。

$$\beta = \left(1 - 0.7 \frac{t_r R_i}{t_p R_o} \right) \times 0.9 \quad (16)$$

(6) ほぼ直方体形状につぶれたゴムの圧縮変形特性
 ゴム管単体の静的圧縮試験の結果から、鋼管が破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目安として、次式で応力とひずみを求めた。

$$\text{応力 } \sigma_{r2} = \frac{P}{\pi R_m H}, \quad \text{ひずみ } \varepsilon_{r2} = \frac{\Delta'}{2t_r} \quad (17)$$

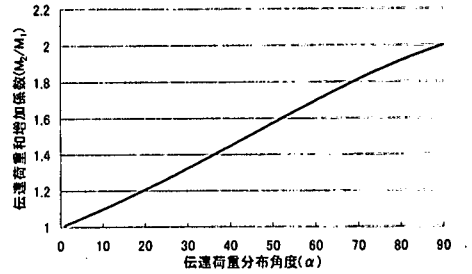


図-18 伝達荷重増加係数

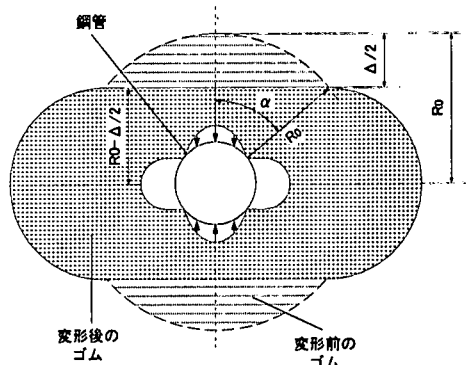


図-19 ゴムの変形と伝わる伝達荷重分布

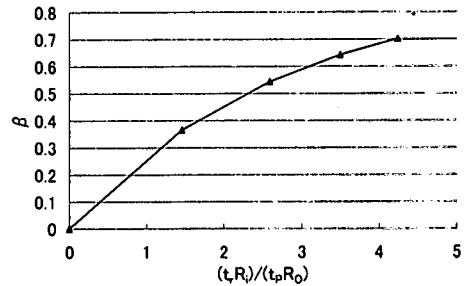


図-20 β と $\frac{t_r R_i}{t_p R_o}$ の関係

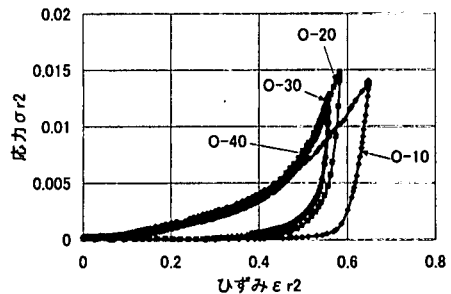


図-21 ゴム管単体の応力-ひずみ関係

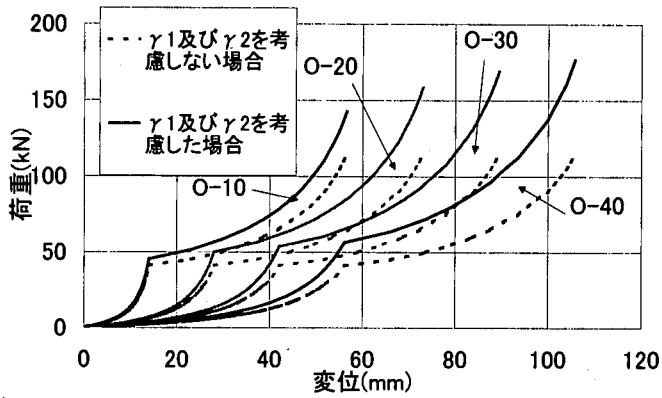


図-22 γ_1 及び γ_2 を考慮した場合としない場合の荷重-変位関係

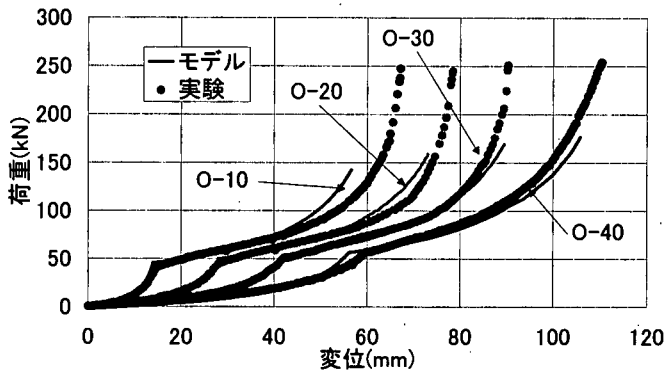


図-23 γ_1 及び γ_2 を考慮した場合と実測結果の荷重-変位関係

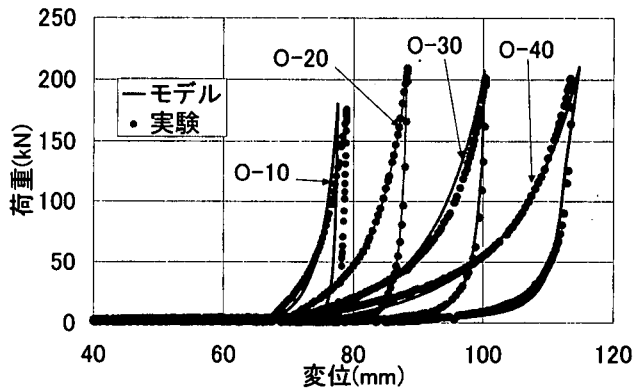


図-24 除荷時と再載荷時の荷重-変位関係

ここで、 Δ' はゴムの内径分がほぼつぶれた時点からの変位である。また R_m はゴムの平均半径である。荷重を $\pi R_m H$ で除して応力としたのは、変形後の形状を板厚 $2t$ の直方体と仮定したことによる。図-21に得られた応力-ひずみ関係を示す。

除荷時の応力-ひずみ関係は、ほぼ次式で表現できる。

$$\sigma_{r2} = a_{r2} \left(\exp \frac{b_{r2}}{\epsilon_0 - \epsilon} - 1.0 \right) \quad (18)$$

ここで、

$$\epsilon_0 = \epsilon_{r,2}^* + 0.12$$

$$b_{r,2} = 0.7$$

$$a_{r,2} = 4.112 \times 10^{-5}$$

$\epsilon_{r,2}^*$ は除荷時のひずみ $\epsilon_{r,2}$ である。これらのパラメータは試行錯誤により求めた。

次に、再載荷時の荷重-変位関係については $\sigma_{r,2}$ と $\epsilon_{r,2}$ の関係を Mooney-Rivlin 式で表すものとした。結果が他と異なる O-10 以外の実験データから最小二乗法により、パラメータを以下のように求めた。

$$a_{r,2} = -0.330, b_{r,2} = 0.712 \text{ (MPa)} \quad (19)$$

(7) 荷重-変位関係の評価手順

2.(3)で述べたように、提案した緩衝材の荷重-変位関係は以下の3つのPhaseからなる。

Phase I: 鋼管は弾性変形のみで、ゴムのみが主要な変形をする。鋼管が降伏するまでつづく。

Phase II: 鋼管が塑性変形するとともに、ゴム管の変形も進行する。鋼管が圧壊するまでつづく。

Phase III: 鋼管が圧壊し、その後の載荷あるいは除荷・再載荷時にはゴム管がほぼ直方体形につぶれた状態で変形しつづける。

Phase Iでの荷重-変位関係は、ゴム管の圧縮変形特性として求められる荷重-変位関係に対して荷重増加率 γ_1 および γ_2 を適用して変位に対応する荷重値を増加させることによって求められる。

Phase IIでの荷重-変位関係については、ゴム管の圧縮変形に更に鋼管の曲げ変形が加わった量が変位となる。そして、二つの荷重増加率 γ_1 および γ_2 を適用して変位に対応する荷重値を増加させることで、荷重-変位関係が求められる。

Phase IIIでの荷重-変位関係は、直方体形につぶれたゴム管の圧縮変形特性をそのまま用いる。

なお、本研究では、Phase IあるいはPhase IIから除荷が生じる場合については、実験対象から除外しており、モデルでもその点については考慮していない。

(8) モデル化の精度

図-22に、 γ_1 及び γ_2 を考慮した場合としない場合の荷重-変位関係を示す。この図より、 γ_1 及び γ_2 を考慮することにより、同じ変位での荷重値は最大で60%以上増加していることがわかる。図-23には、 γ_1 及び γ_2 を考慮したモデルにより得られた荷重-変位関係と実測結果を比較して示す。鋼管がつぶれていく過程でのゴムの大変形を無視しているにもかかわらず、

モデルは実験結果を良く表現し得ていることがわかる。図-24には、ゴム管単体の荷重-変位関係を式(17)及び(18)から評価した結果を実測結果と共に示す。ゴム厚の小さい場合に若干誤差は大きいですが、全体的には良好に両者は一致している。

4. 結論

本研究では、新しいタイプの緩衝材としてエネルギー吸収性能の高い鋼管と過度の反力を生じないようにゴムを併用した緩衝材を考案し、静的圧縮試験によってその基礎特性について検討し、さらに、その荷重-変位関係をモデル化する方法を考案した。得られた結論を以下に示す。

・ゴムを鋼管内に入れると、ゴムの変形が鋼管によって抑制されるため、緩衝材として望ましくない荷重-変位関係を示す。

・ゴムを鋼管外側に巻くことで衝突力を低減しつつ、高いエネルギー吸収性能を発揮させることができることから、新たな形式の緩衝材として提案した。

・ここで提案した緩衝材の荷重-変位関係を Mooney-Rivlin 式等をもとにしたモデルで精度良く予測することが可能であることを示した。

謝辞：実験実施にあたり、武蔵工業大学の仲宗根茂技士、佐藤安雄技士、高野太一氏、米広誠氏にご協力頂きました。本論文は以上の皆様方の絶大なご支援、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) 川島一彦, 後藤洋三: 道路橋の免震設計とノックオフ機能付き橋台の開発, 土木施工, 32-3, pp.87-94, 1991.3.
- 2) 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.
- 3) 庄司学, 川島一彦, 渡辺学歩, 河野哲也: 高面圧下におけるゴム製緩衝装置の地震時繰り返し圧縮特性, 土木学会第53回年次学術講演会, pp.320-321, 1998.10.
- 4) 伊津野和行, 児島孝之, 鈴木亮介, 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に関する基礎的検討, 土木学会第51回年次学術講演会, pp.618-619, 1996.9.
- 5) 越峠雅博, 運上茂樹, 足立幸郎, 長屋和弘: 弾塑性特性を有する緩衝材の衝撃吸収効果に関する実験的検討, 土木学会第54回年次学術講演会, pp.422-423, 1999.9.
- 6) 野島昭二, 上東泰: 緩衝材を併用した落橋防止システムの検討, 土木学会第53回年次学術講演会, I部門, pp.318-319, 1998.9.
- 7) 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.
- 8) 西本安志, 梶田幸秀, 石川信隆, 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.
- 9) 窪田賢司, 菅野匡, 上東泰, 石田博: 落橋防止装置に用いる緩衝材の実験的研究, 土木学会第 51 回年次学術講演会, pp.614-615, 1996.9.
- 10) 庄司学, 川島一彦: ゴム製緩衝装置による隣接桁間連結効果, 土木学会第 54 回年次学術講演会, pp.420-421, 1999.9.
- 11) 窪田賢司, 菅野匡, 上東泰, 石田博: 緩衝効果を有する落橋防止装置の衝突実験及び効果の検証, 土木学会第 54 回年次学術講演会, pp.422-423, 1999.9.
- 12) 得永健, 西本安志, 梶田幸秀, 石川信隆: 桁間衝突の再現実験とゴム製緩衝材の緩衝効果に関する研究, 第 27 回関東支部技術研究発表会 pp.98-99, 2000.3.
- 13) 川島一彦, 庄司学: 衝突緩衝用落橋防止システムによる桁間衝突の影響の低減効果, 土木学会論文集, Vol.612/I-46, pp.129-142, 1999.1.
- 14) 川島一彦, 庄司学: ゴム製緩衝装置による桁間衝突の低減効果, 土木学会第 53 回年次学術講演会, I 部門, pp.322-323, 1998.10.
- 15) 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.
- 16) 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.
- 17) 皆川勝, 藤谷健, 高峯太一, 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.
- 18) 土木学会編: 構造力学公式集, p.408, 丸善, 1986.6. (2001.3.5受付)

DEVELOPMENT OF SHOCK ABSORBER COMPOSED OF RUBBER AND STEEL PIPES

Masaru MINAGAWA and Takeshi TOYA

Paying attention to using as a material for shock absorbers, load-displacement characteristic of steel pipes was examined experimentally by one of the authors and some researchers. As the result, it was confirmed that steel pipes have sufficient energy absorbing capacity and can be used for shock absorbers. Then, a non-line dynamic analyses of base-isolated bridges attached with shock absorbers composed of rectangular rubbers or steel pipes were carried out. From the analytic result, it was found that the collision force acting between adjacent bridge girders increase rapidly after the failure of the steel pipes.

The author proposed a new type of shock absorber composed of steel pipes wrapped with rubber pipes. And static loading tests were conducted to confirm the superiority of that type of shock absorber. A model to estimate load-displacement characteristic of the shock absorber proposed in this paper was constructed and its validity was proved by comparing with experimental results.