

ゴム鋼併用型耐震緩衝装置の開発 に関する研究

学生氏名 藤谷 健
指導教員 皆川 勝

本研究では、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優位性を示すと共に、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理論を構築し、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での相対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、川島²⁾や伊津野³⁾は直方体型のゴム、また、運上⁴⁾らは円筒型のゴム、上東^{5),6)}らは図-1、図-2に示すようなハニカム型及びセル型のゴム、さらに石川⁷⁾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。そして上東⁸⁾は、様々な緩衝材の圧縮試験によって、荷重-変位関係を図-3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-3の④が、エネルギー吸収効果が良いものとさ

れる。これらの研究成果をまとめれば以下のようになる。

・直方体型

荷重-変位関係は①あるいは③のような急激な荷重の立ち上がりを見せているため、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、川島⁹⁾、上東¹⁰⁾、石川¹¹⁾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、川島ら^{12),13)}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、潤田ら¹⁴⁾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。

長嶋ら¹⁵⁾は、ゴムに変わる緩衝材として、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。

しかし、著者らの解析的検討によれば、例えば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も示された。

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理論を構築し、実験結果からその妥当性を検証した。

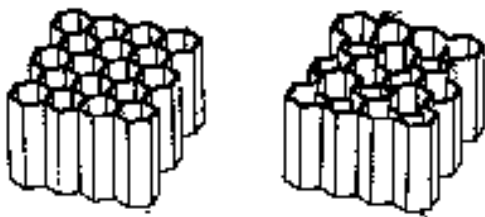


図-1 ハニカム型ゴム緩衝材⁶⁾



図-2 セル型ゴム緩衝材⁶⁾

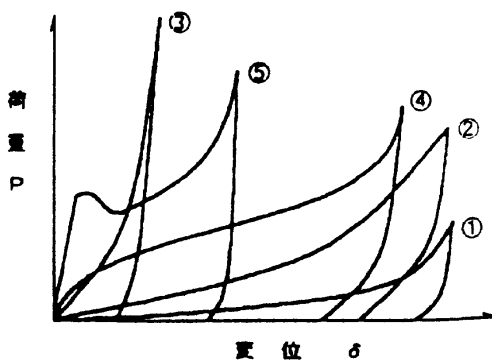


図-3 種々の緩衝材の荷重-変位関係⁸⁾

2. ゴム又は鋼管製緩衝材の破壊解析

緩衝材の特性としては、荷重-変位関係において荷重がほとんど不変で塑性化による変形だけが増してエネルギーが増大する形態が望ましいが、ゴムの荷重-変位関係はそのようではない。そのため、

鋼管製緩衝材の可能性を探るため、既往の実験及び著者が実施した解析の結果により、その基礎的な特性を把握し、鋼管の有効性について検討した。

(1) 解析方法

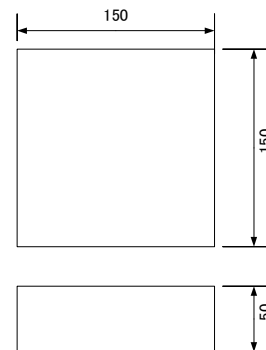
応答解析には、PC/LS-DYNA3D^{16), 17)} (以下LS-DYNA) を使用した。LS-DYNAは有限要素による空間の離散化と、中心差分に基づく陽的時間積分法を用いた非線形問題解析用の汎用システムである。

(2) 解析対象

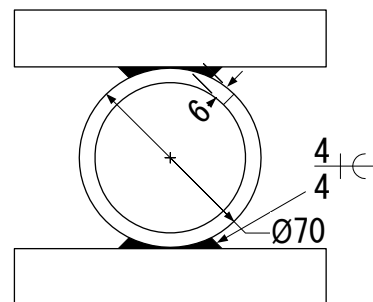
解析対象を図-4に示す。これは、文献24)において検討された緩衝材であり、この実験結果と比較できるように同一の寸法とした。また、鋼材の奥行きはすべて180mmである。材質はそれぞれクロロブレンゴム及びSS400である。

(3) 解析条件

材料定数を表-1, 2に示す。鋼管の応力-塑性ひずみ関係としては図-5に示すようにトリリニアモデルを用い、関連流れ則、等方硬化則を用いた。ゴムの応力-ひずみ関係としてはMooney-Rivlinの応力-ひずみ関係を用い、パラメータは実験データから最小二乗法によって定めた。境界条件としては、下部の板を完全固定し、上部の板に強制変位を与えた。



直方体ゴム緩衝材



鋼管緩衝材

図-4 解析対象(単位: mm)

表-1 鋼管の材料定数

質量密度	kg/mm	7.85×10^{-9}
弾性係数	N/mm ²	2.06×10^5
ポアソン比	-	0.3
降伏応力	N/mm ²	321

表-2 ゴムの材料定数

質量密度	N/mm ³	1.25×10^{-9}
ポアソン比		0.495

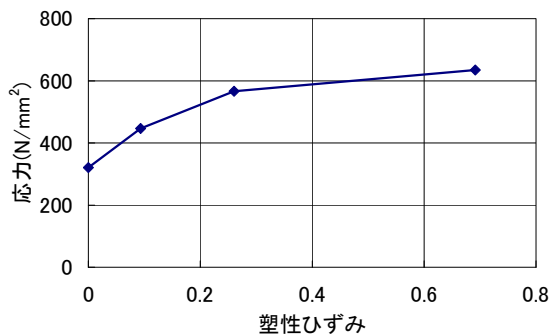


図-5 鋼管の応力-塑性ひずみ関係

(4) 解析結果及び考察

それぞれの変形性状を図-6, 7 に、また、図-8, 9 にそれぞれの荷重-変位関係を示し、表-3 に吸収エネルギー量を、文献 15) の実験結果と解析結果をあわせて示す。

直方体ゴムの場合、載荷時の挙動は解析によって再現できたが、除荷時の様子を再現することは出来なかった。

鋼管は、徐々に楕円形に潰れ、変位が25mmを越えたあたりから上下の溶接部の影響によりくびれが生じた。変位が50mm程度でそれらがお互い接触した。降伏荷重は180kN程度であり、その後荷重値はほぼ一定値を保った。そして、くびれ部同士が接触した時点で荷重値が急激に増加した。

荷重-変位関係及び変形形状の比較により、解析により比較的正確に実験結果をシミュレートすることがわかった。特に鋼管製緩衝材は塑性後も荷重値をほぼ一定に保ちながら変形が進行し、十分に緩衝効果を期待できる結果となった。

3. 緩衝装置を有する免震橋の地震時挙動

前節の結果を踏まえて、免震橋の橋台部や桁間に緩衝装置を設置した場合を想定して、非線形地震応答解析を行い、衝突力の低減効果、エネルギー

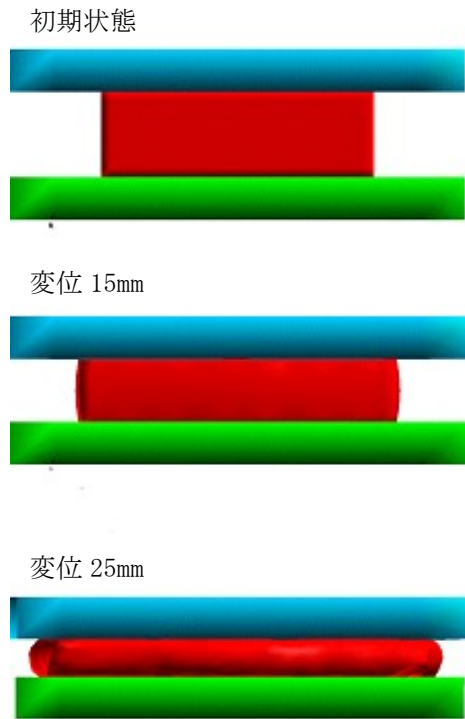


図-6 ゴムの変形の様子



図-7 鋼管の変形の様子

表-3 吸収エネルギー(単位:N・m)

試験体	直方体型ゴム	鋼管(溶接あり)
実験結果	4.22	7.34
解析結果	-	7.84

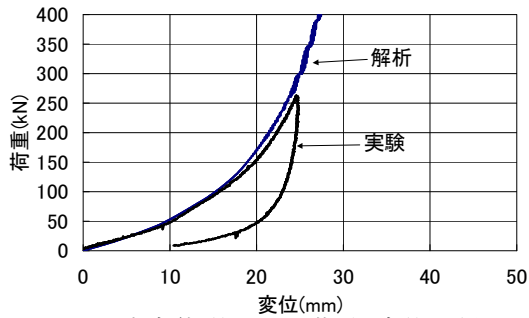


図-8 直方体型ゴムの荷重-変位関係

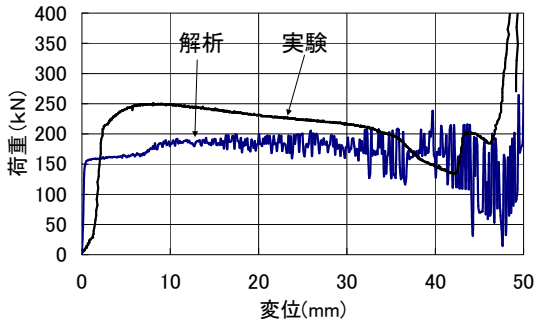


図-9 鋼管の荷重-変位関係

一吸収効果を比較検討し、その実用性ならびに有効性を検討した。

(1) 解析方法

解析には、3次元動的応答解析システムであるTDAPⅢを用いた。時間積分には定加速度法を用い、時間刻みは1/10000とした。

(2) 解析対象

対象構造物は橋脚高さが20m、支間長50mの2径間の免震橋とし、上部構造は総重量1300tの鋼箱桁、下部構造は断面変化が2箇所ある鋼製橋脚(断面積1:2820cm²、断面積2:2270cm²、断面2次モーメント1:3.36×10⁷cm⁴、断面2次モーメント2:2.52×10⁷cm⁴)とした¹⁸⁾。そして、直方体ゴム及び鋼管製緩衝装置を、桁間と橋台部の3ヶ所に取り付けた。

(3) 解析条件

解析モデルを図-10に示す。橋軸方向の緩衝効果に焦点を絞るため、対象橋梁を2次元モデルとして取り扱い、橋台を想定して両橋脚を剛体とみなした。上部構造は弾性はり要素とし、鋼製橋脚は図-11に示すようなM-φ関係を有する非線形はり要素(バイリニアモデル)、免震支承は表-4に示すバネ要素(バイリニアモデル)でそれぞれモデル化した。鋼管製及びゴム製緩衝装置を図-12、図-13に示すように、ばね要素(非対称トリリニアモデル)でモデル化した。但し、圧縮側(マイナス側)のみ反力を生じるものとし引張側(プラス側)には機

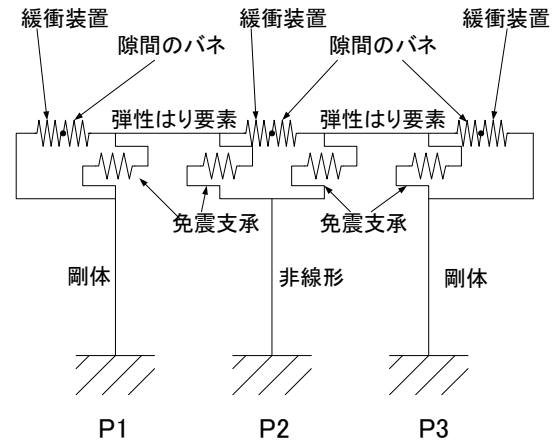


図-10 解析モデル

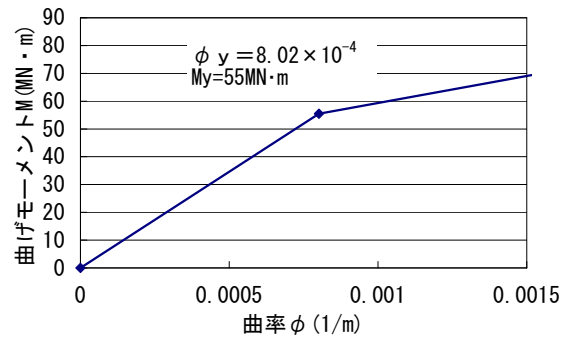


図-11 鋼製橋脚のM-φ関係

表-4 免震支承のバネ特性値

材料特性	免震支承
一次剛性(MN/m)	13.7
等価減衰定数	0.02
降伏点ひずみ(ε)	0.02
剛性の低下率(a)	0.154

能しないようにした。緩衝装置が圧壊して荷重が立ち上がる箇所の剛性は、緩衝材の個数に関係なく桁の軸方向剛性とした。

また、緩衝装置と桁の間には、隙間と衝突を表現するための仮想的なバネ¹²⁾を挿入した。仮想バネとは圧縮側に隙間分変形した時、すなわち隙間がなくなった時、バネの剛性が働くようにしたものである。仮想バネの剛性について、川島ら¹²⁾は、仮想バネの剛性と上部工の要素の軸方向剛性との比をおおむね1程度とすれば、緩衝装置や衝突後の桁の応答速度及び桁に生じる応力分布を比較的正しく評価できるとしているため、この比を1.0とした。また引張側は働かないように剛性を0とした。

図-14に遊間Ucと隙間Ugの定義を示す。設計の際遊間Ucが先に決定されると考えられるため、ま

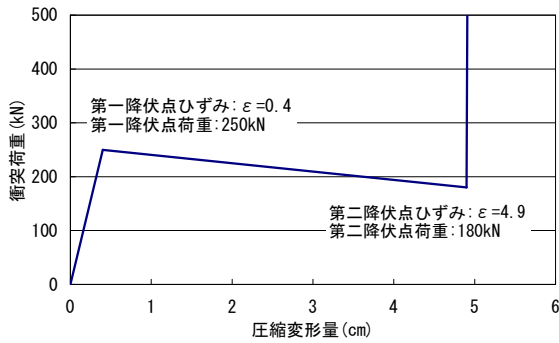


図-12 鋼管製緩衝装置の荷重-変位関係

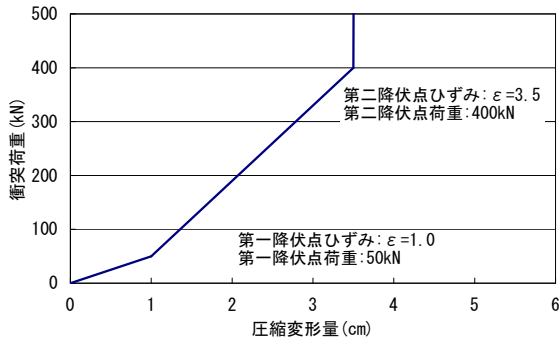


図-13 直方体型ゴム緩衝装置の荷重-変位関係

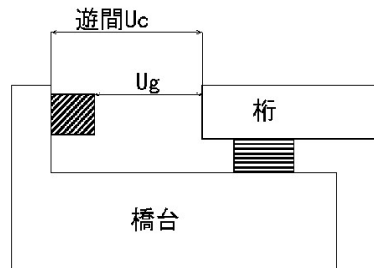


図-14 遊間 U_c と隙間 U_g の関係

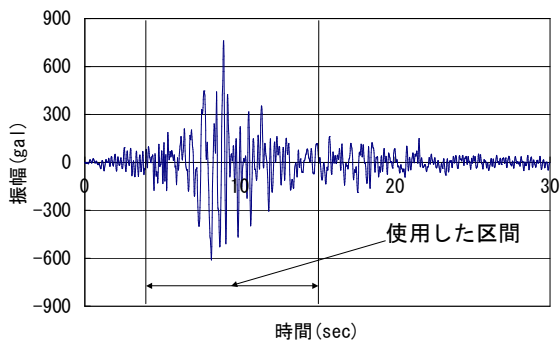


図-15 入力地震波

ず $U_c=10, 15, 20, 25\text{cm}$ と決め、 U_c から緩衝材の厚さ(ゴム製緩衝装置の厚さ: 5cm , 鋼管製緩衝装置の厚さ: 7cm)を引いた分を緩衝材と桁の間の隙間 U_g とした。

入力地震波は、道路橋示方書¹⁹⁾に規定されているI種地盤のタイプIIの標準加速度スペクトルに近い特性を有するように阿高猪名川架橋予定地点地盤上で観測された地震波を振幅調整した加速度波形の、図-15に示す主要部分(10秒間)のみ用いた。

(4) 遊間量の決定

まず、緩衝材を設置せず、遊間量を変化させ桁の最大応答変位を探った。遊間 $U_c=10, 15\text{cm}$ では衝突が起こり、衝突が起こらなかった遊間における桁の最大応答変位は 16.9cm となった。この結果より、本研究では、遊間 $U_c=15\text{cm}$ の場合を想定して解析を行うこととした。

(5) 緩衝装置の個数の影響

遊間 $U_c=15\text{cm}$ として、鋼管製及びゴム製緩衝装置を $30, 60, 90, 120, 150$ 個と変化させた場合について解析を行った。

図-16, 17に鋼管製又はゴム製緩衝装置の個数と衝突力の関係を示す。これらより、鋼管製緩衝装置 30 個では圧壊してしまうため衝突力は大きくなるが、 60 個から圧壊しなくなるため衝突力は小さくなり、個数に比例して大きくなっていることがわかる。これは鋼管の変形量が塑性領域内である場合、第一降伏点荷重より衝突力は大きくなるためである。しかし逆に個数が多すぎると弾性域に入ってしまうため、衝突力は下がってくると考えられる。ゴム製緩衝装置も 30 個では圧壊したため衝突力は大きくなっているが圧壊しなくなったからは鋼管のように一定ではなく不規則に大きくなっている。

図-18, 19に鋼管製又はゴム製緩衝装置の個数とエネルギー吸収量の関係を示す。鋼管製緩衝装置では両橋台部、桁間で状況は大きく異なっている。これは衝突回数や衝突力の影響で緩衝装置の変形量に差が出てくるためと考えられる。また個数を多くしても必ずしもエネルギー吸収量が多くなるとはいえず、効率良くエネルギーを吸収しているのは鋼管を 120 個設置した場合である。その一方、ゴム製緩衝装置では、個数を増やしても変形量が小さいため、エネルギー吸収量は増加しない。

これらの結果より、遊間 $U_c=15\text{cm}$ においてエネルギー吸収量を大きくして衝突力を小さくするのに最も適した数はゴム製緩衝装置では 90 個程度、鋼管製緩衝装置は $90\sim 100$ 個程度だと考えられる。

表-5に鋼管製緩衝装置のエネルギー吸収率を示す。吸収率は解析により求められた最大応答速度から運動エネルギーを求め、これを鋼管製緩衝装置 90 個、 120 個のエネルギーで除して求めたものである。図-18の結果より 120 個のときが最もバランス良くエネルギーを吸収できているが、効率の面では 120 個より 90 個のほうが良い結果となった。

表-5 エネルギー吸収率

	緩衝装置の個数	
	90	120
最大応答速度(m/sec)	1.42	1.55
桁の運動エネルギー(kN・m)	653	775
緩衝装置の最大吸収エネルギー量(kN・m)	939	1248
吸収率	70	62

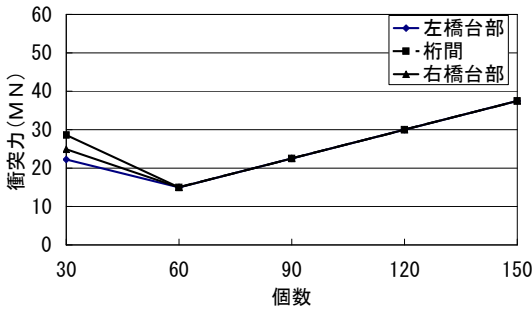


図-16 鋼管製緩衝装置の個数と衝突力の関係

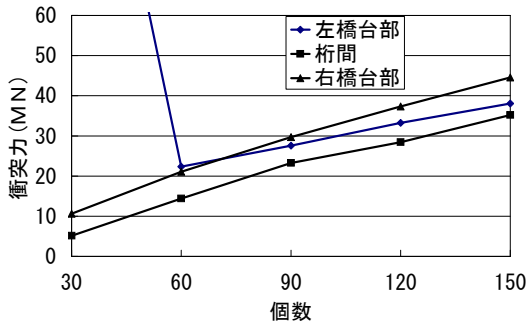


図-17 直方体型ゴム緩衝装置の個数と衝突力の関係

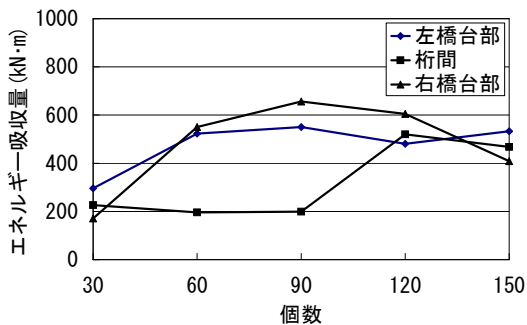


図-18 鋼管製緩衝装置の個数とエネルギー吸収量の関係

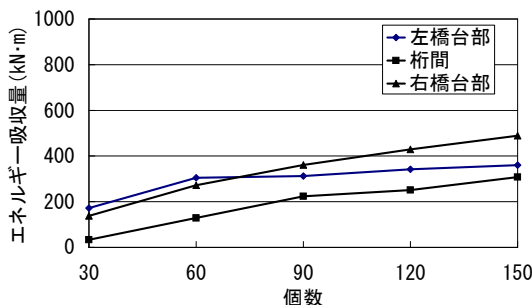


図-19 直方体ゴム型緩衝装置の個数とエネルギー吸収量の関係

(6) 鋼管緩衝材の利点と欠点

鋼管は、荷重が一定で変形に比例してエネルギー吸収量が増えるため塑性領域内で変形を抑えればゴムより高いエネルギー吸収効果及び衝突力の

低減効果を望める。しかし、塑性領域内に変形を抑えるためには適切な剛性・強度をもたせる必要がある。また、地震時の桁間衝突は複数回発生する可能性があり、早い回に緩衝装置の過度の損傷を生じることが好ましくない。一方、適度な損傷にとどめた上で、十分な塑性ひずみを生じさせなければならない。ゆえに、比較的柔な構造としておいて、最終的な圧壊に至る変形は生じない工夫が必要である。

4. ゴム鋼管併用型緩衝材の静的載荷実験

鋼管の過度の変形を抑制し、また、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実験を行った。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。また一部のものについては、数値解析によって荷重-変位関係の再現を試みた。

(1) 試験体

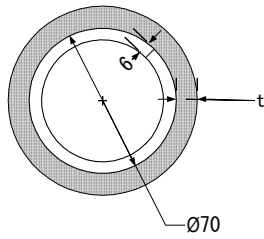
試験体は図-20 に示す、鋼管の外側にゴムを巻いたもの 4 種類と、図-21 に示す鋼管内にゴムを詰めたもの 2 種類である。鋼管の材質は STKM13A とし、ゴムの材質はクロロプレンゴム(硬度 60±5)とした。また、試験体の奥行きは 100mm である。また、比較のため、使用した鋼管(溶接なし)の載荷実験を行った。

(2) 実験方法

載荷装置の概要を図-22 に示す。静的載荷実験には 30tf 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水平変位を鉛直変位に変換した。また、外にゴムを巻いた試験体については、除荷後再び載荷を行った。

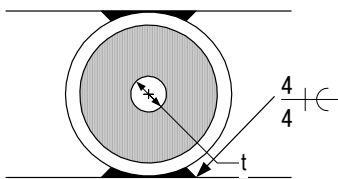
(3) 実験結果

図-23 に鋼管(溶接なし)の実験及び解析による荷重-変位関係を、また、図-24 に変形形状の推移を示す。解析方法は 2. で述べた方法と同様である。これらより、溶接していないために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、実験及び解析から得られた変形形状は 40kN 程度で降伏後、楕円状につぶれてい



試験体	t(mm)
O-10	10
O-20	20
O-30	30
O-40	40
O-0	鋼管(溶接なし)

図-20 外にゴムを巻いた鋼管の寸法・形状



試験体	t(mm)
I-0	0
I-15	15

図-21 内部にゴムを挿入した鋼管の寸法・形状

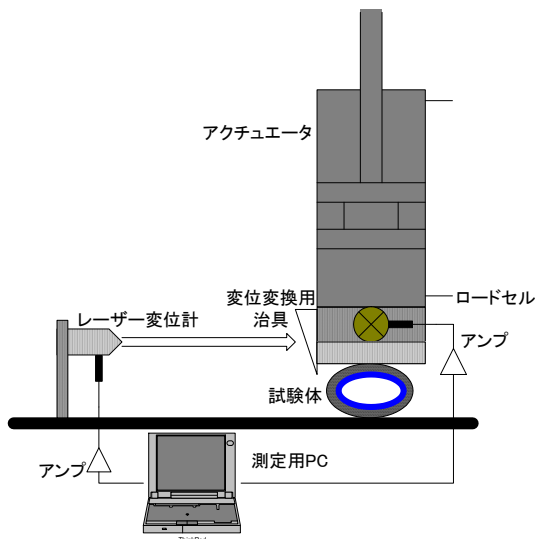


図-22 載荷装置概要

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。なお、荷重-変位関係がほぼ一致していることから、解析によっ

て実験結果を再現できたと考える。

O-10, 20, 30, 40, および鋼管(溶接なし)の荷重-変位関係を図-25に示す。また、図-26にO-40の変形状の推移を示す。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が生じていると考えられる(Phase III)。

図-27にI-0, I-15の荷重変位関係を示す。また、図-28にI-0の変形状の推移を示す。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。

(4) エネルギー吸収性能

表-6に算出した吸収エネルギー量を示す。図-26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I-15, I-0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-29に荷重-吸収エネルギー関係を示す。これより、鋼管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、鋼管にゴムを巻いたものはわずかなエネルギーなら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、荷重値の上昇を抑制されていることが分かる。このことは、図-30に示す吸収エネルギー-変位関係からいへ、同じ量の吸収エネルギーに対して、ゴムを巻いたものは鋼管のみのものに比べて変位量が大きい値となっていることから、エネルギーを変形によって効率よく吸収していることがわかる。

以上のことから、鋼管の外にゴムを巻いた形式の緩衝材を、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、鋼管の圧壊後にも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提案する。

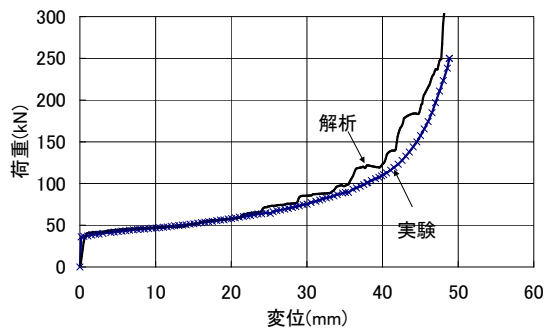


図-23 鋼管(O-0)の荷重-変位関係

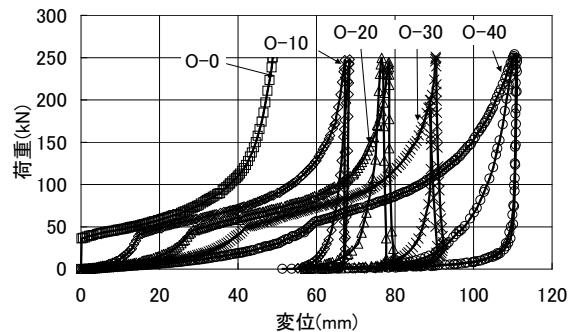


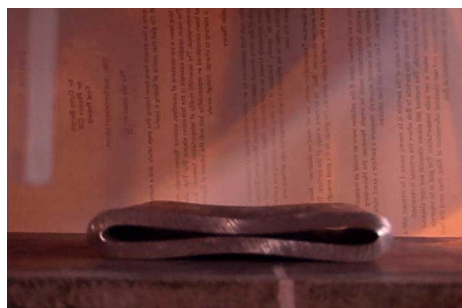
図-25 外まきゴム緩衝材の荷重-変位関係



(a) 初期状態



(b) 変形量 30mm



(c) 実験終了後

図-24 鋼管(O-0)の変形形状の推移



(a) 初期状態



(b) 変形量 30mm



(c) 実験終了後

図-26 O-40の変形形状の推移

5. 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

- ・ ゴム管の曲げの変形特性
 - ・ 鋼管の圧縮変形特性
 - ・ ゴムから鋼管へ伝わる力の分布特性
- があげられる。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理論を構築し、その妥当性を検証する。

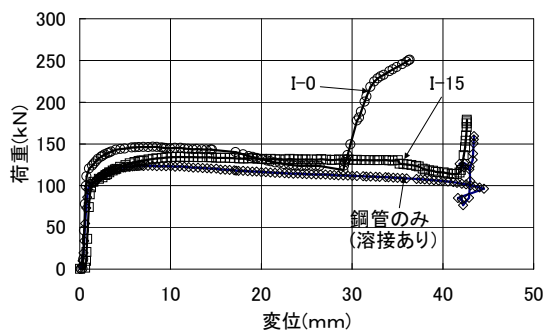


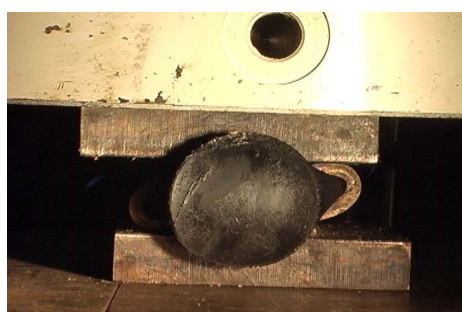
図-27 鋼管内にゴムを詰めた緩衝材の荷重-変位関係



(a) 初期状態



(b) 変形量 20mm



(c) 実験終了後

図-28 I-0 の変形形状の推移

(2) ゴム管の圧縮変形特性

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鋼柱を挿入して、静的圧縮実験を行った。その結果得られた荷重-変位関係を図-31に示す。そして変位 Δ 及び荷重 P から応力及びひずみを次式のように求めた。

表-6 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

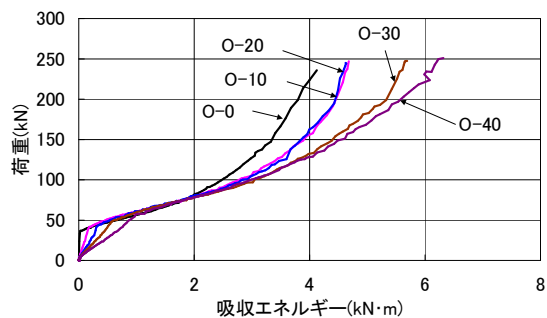


図-29 荷重-吸収エネルギー関係

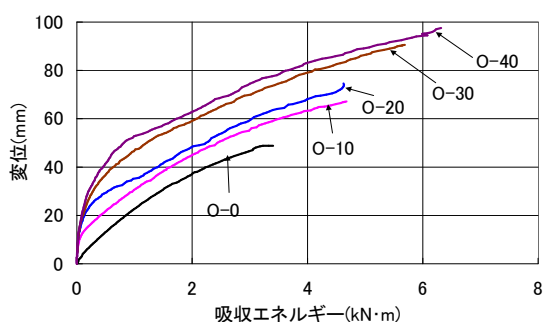


図-30 変位-吸収エネルギー関係

$$\sigma_r = \frac{P}{R_i H}, \varepsilon_r = \frac{\Delta}{2t_r} \quad (1)$$

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

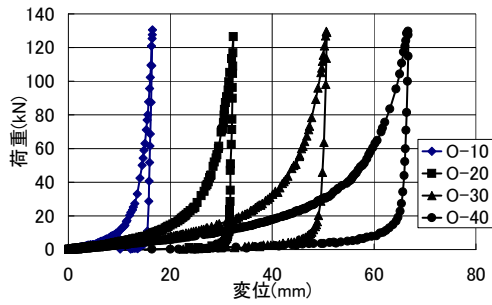


図-31 鋼柱を挿入したゴム管の荷重-変位関係

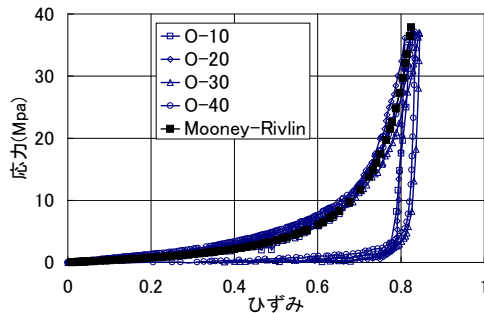


図-32 鋼柱を挿入したゴム管の応力-ひずみ関係

ることを評価するためである。

その結果を図-32に示す。そして、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-ひずみ関係式により表すものとした。

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

ここで、 $\lambda_r = 1 - \varepsilon_r$ 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。

$$a_{r1} = 0.458, b_{r1} = 0.0223 \quad (\text{Mpa})$$

(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実験を行った。得られた荷重-変位関係を図-33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 $\left(\frac{t_r}{R_0}\right)^3$ の関係を求めた。

その結果を図-34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、これらには良好な比例関係が成立する。

$$\gamma_2 = 0.265 \left(\frac{t_r}{R_0} \right)^3 \quad (4)$$

これは、ゴム管の曲げ抵抗による見かけの荷重増加率を与えている。

(4) 鋼管の圧縮変形特性

鋼管の圧縮特性は図-23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ことから、Mooney-Rivlinの式を援用することとした。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。

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

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。

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

$$a_s = -381, b_s = 378 \quad (7)$$

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

(5) ゴムから鋼管への力の伝達特性

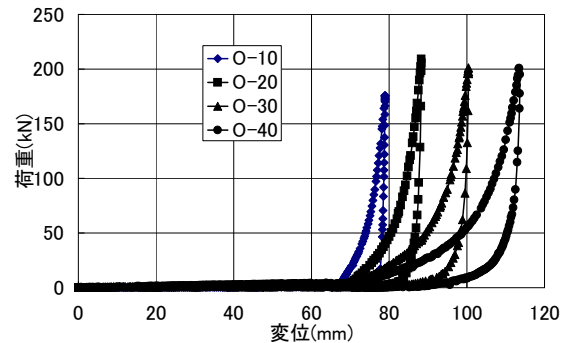


図-33 ゴム管単体の荷重-変位関係

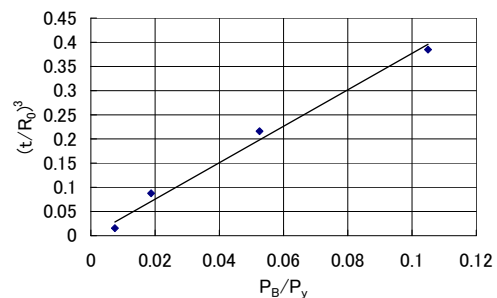


図-34 P_B/P_y と $(t_r/R_0)^3$ の関係

ゴムから鋼管へ伝達される荷重を図-35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。

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

これを積分すると、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、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から、図-35のときの曲げモーメントは次式のように求まる。

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

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

次に、相対する2点集中荷重が中央に作用したとき、中央点での曲げモーメント M_2 は、

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

と表される。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_1 を次式で定義する。

$$\gamma_1 = \frac{M_2}{M_1} - 1 \quad (13)$$

式(13)より、横軸に伝達荷重分布角度 $\alpha = 90 - \alpha'$ をとり、縦軸に伝達荷重和増加係数(M_2/M_1)をとると、図-36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-25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、その結果見かけ上降伏荷重が増加したものと考えられる。

次に伝達荷重分布角度 α とゴムの変形量 Δ の関係について考察をする。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-37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。

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

次に、 α' に関係する量として、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。

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

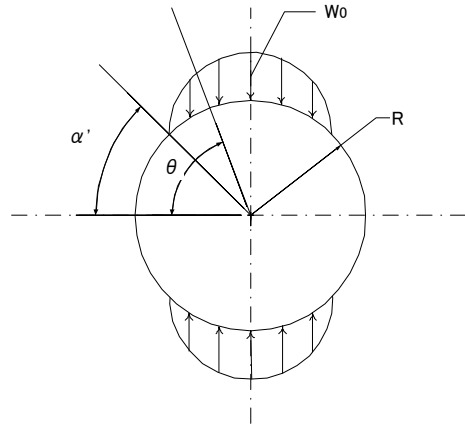


図-35 ゴムから鋼管に伝わる荷重分布

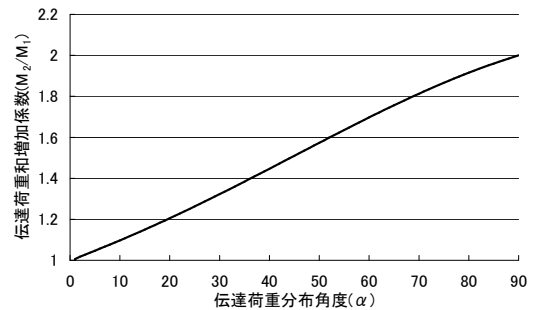


図-36 伝達荷重増加係数

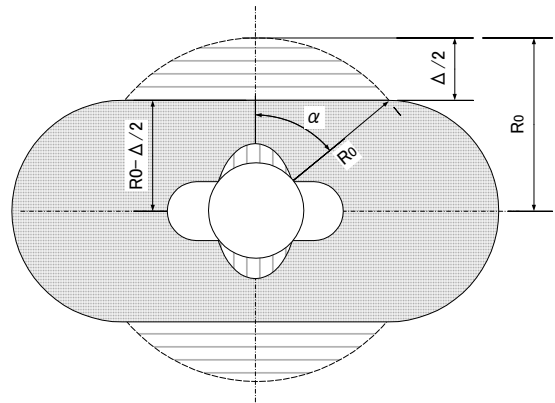


図-37 ゴムの変形と伝わる伝達荷重分布角度

$$\beta = \left(\frac{t_r R_i}{t_p R_o} \right) \quad (16)$$

t_r : ゴムの厚さ

t_p : 鋼管の厚さ

R_i : ゴム管の内径

R_o : ゴム管の外径

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_2 および本節の γ_1 であることから、降伏荷重の増加に対する γ_1 の寄与分を説明できる β を求めるため、 β と $\frac{t_r R_i}{t_p R_o}$ の関係をプロットした結果を図-38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。

$$\beta = \left(1 - 0.7 \frac{t_r R_i}{t_p R_o} \right) \times 0.9 \quad (17)$$

ここまでの関係を用いて載荷時の荷重-変位関係を予測した結果を図-39, 40, 41, 42に示す。これより、理論式は実験結果を良く表現できていることがわかる。

(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目安として、次式で応力とひずみを求めた。

$$\sigma_{r2} = \frac{P}{\pi R_m H}, \quad \text{ひずみ } \varepsilon_{r2} = \frac{\Delta'}{2t_r} \quad (18)$$

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。

除荷時の応力-ひずみ関係は、ほぼ次式で表現できる。

$$\sigma_{r2} = a_{r2} \left(\exp \frac{b_{r2}}{\varepsilon_0 - \varepsilon} - 1.0 \right) \quad (19)$$

ここで、

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_{r2} + 0.12$$

$$b_{r2} = 0.7$$

$$a_{r2} = 4.112 \times 10^{-5}$$

これらのパラメータは試行錯誤により求めた。得られた関係を図-43, 44, 45, 46に実験結果と併せて示すが、実験結果を良く表現できていることがわかる。

次に、再載荷時の荷重-変位関係については σ_{r2} と ε_{r2} の関係をMooney-Rivlin式で表すものとして、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。

$$a_{r2} = -0.330, b_{r2} = 0.712 \text{ (Mpa)} \quad (20)$$

図-43, 44, 45, 46に併せて示すように実験結果を良く表現できていることがわかる。

6. 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

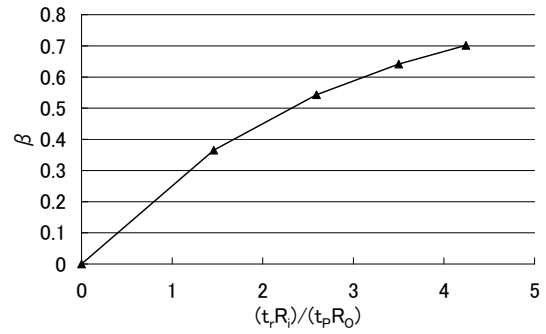


図-38 β と $\frac{t_r R_i}{t_p R_o}$ の関係

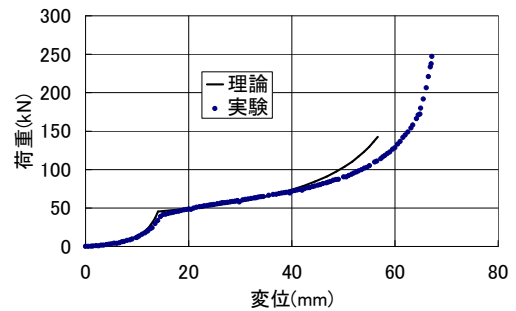


図-39 O-10 を予測した荷重-変位関係

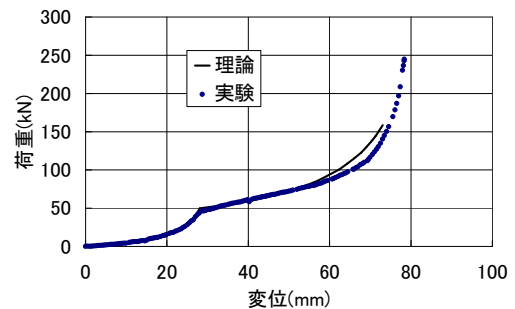


図-40 O-20 を予測した荷重-変位関係

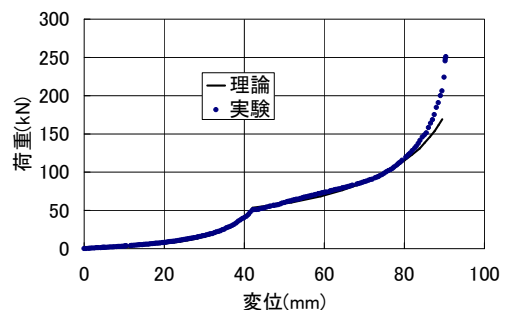


図-41 O-30 を予測した荷重-変位関係

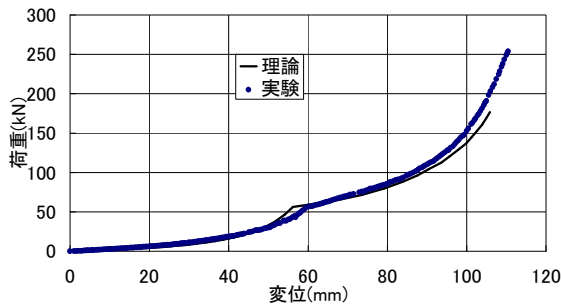


図-42 O-40 を予測した荷重-変位関係

いようにゴムを併用した緩衝材を考案し、静的載荷実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-変位関係を予測する方法を考案した。それらの結果をまとめると以下のとおりである。

- ・緩衝装置として鋼管を単独で用いると圧壊後に過度の反力が生じる。
- ・ゴムを鋼管内に入れると、降伏荷重が増加し変形量が小さくなるため、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られる。
- ・この緩衝材の荷重-変位関係をMooney-Rivlin式をもとにした理論式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：解析実施にあたり、(株)テラバイトの小森禎氏、岩田勲氏の両氏には有益なご助言を多数頂きました。実験実施にあたり、武蔵工業大学の仲宗根茂技士にご協力頂きました。修士1年の高岸太一君、学部4年の米広誠君には、実験、解析の両面で共に研究を推進してもらいました。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。最後に大学院まで出させてもらった両親に感謝します。

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) 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.
- 3) 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.
- 4) 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検討，土木学会第 54 回年次学術講演会，

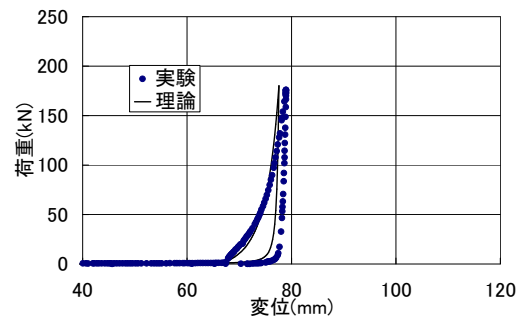


図-43 O-10 の除荷時と再載荷時を予測した荷重-変位関係

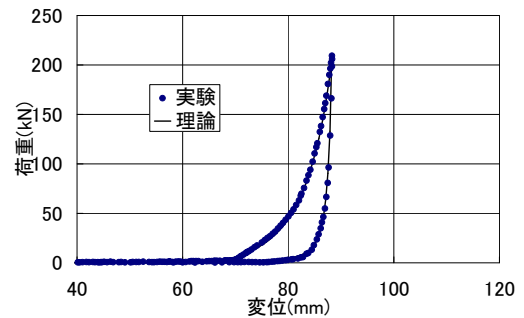


図-44 O-20 の除荷時と再載荷時を予測した荷重-変位関係

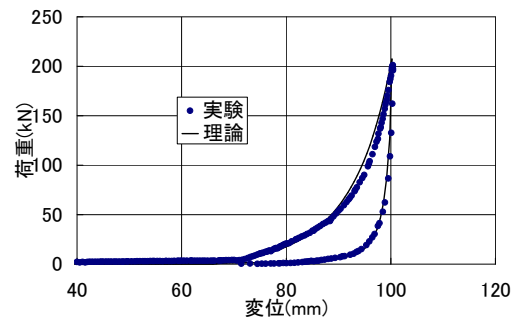


図-45 O-30 の除荷時と再載荷時を予測した荷重-変位関係

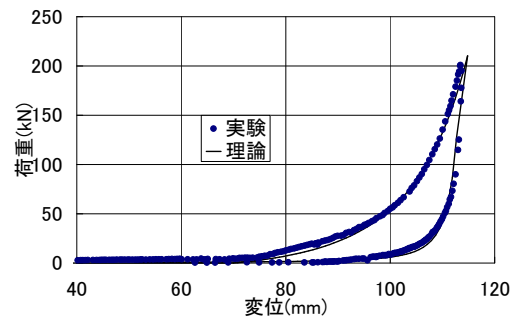


図-46 O-40 の除荷時と再載荷時を予測した荷重-変位関係

- pp. 422-423, 1999. 9.
- 5) 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.
 - 6) 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.
 - 7) 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.
 - 8) 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.
 - 9) 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.
 - 10) 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.
 - 11) 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.
 - 12) 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. 1612/I-46, pp. 129-142, 1999. 1.
 - 13) 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.
 - 14) 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, Vol. 1661/I-53, pp. 71-83, 2000. 10.
 - 15) 鋼橋技術研究会: 耐震・免震研究部会報告書, 1999. 11.
 - 16) 日本総合研究所: LS-DYNA. Ver. 940 使用の手引き, 1997. 6.
 - 17) 日本総合研究所: LS-DYNA. Ver. 940 USER'S MANUAL, 1997. 6.
 - 18) 長嶋文雄, 田中努, 大丸隆, 小林義明: 鋼製橋脚を有する既設橋の免震化による耐震効果, 構造工学論文集, Vol. 44A, pp. 725-732, 1998. 3.
 - 19) 日本道路協会: 「道路橋示方書・同解説, V 耐震設計編」, 1996. 12.

DEVELOPMENT OF SHOCK ABSORBER COMPOSED OF RUBBER AND STEEL PIPES

Takeshi TOYA supervised by Masaru MINAGAWA

Paying attention to using as a material for shock absorbers, load-displacement characteristic of steel pipes was examined experimentally. As the result, it was confirmed that steel pipes have sufficient energy absorbing capacity and then 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 theory 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.