

ゴム鋼併用型耐震緩衝装置をもつ免震橋の地震応答解析

Seismic behavior of base-isolated bridge attached with shock absorber composed of rubber and steel pipes

皆川 勝* ○高嶋 太一** 土井 雄司** 藤谷 健***
Masaru MINAGAWA Taichi TAKASAKI Yuji DOI Takeshi TOYA

ABSTRACT The authors proposed a new type of shock absorber composed of steel pipes wrapped with rubber pipes. And static loading tests were conducted. As the result, it was confirmed that the shock absorber has sufficient energy absorbing capacity and can be used for shock absorbers. And a model to estimate the load-displacement characteristics of the shock absorber proposed was constructed. In this research, the dynamic response analysis of base isolated bridge attached with the shock absorbers was conducted, and the practical use and validity of the absorbers were proved.

Keywords: 緩衝装置, ゴム管, 鋼管, 桁衝撃, 免震橋, 動的応答解析

Shock absorber, rubber pipe, steel pipe, pounding of girders, base-isolated bridge, dynamic response analysis

1. はじめに

兵庫県南部地震以降, 橋梁における設計方法は, 地震力に耐えようとする耐震設計から, 免震支承やゴム支承などを用いることで, 地震力の伝達を絶縁, 吸収, または緩和するといった免震設計へと大きく変わった. しかし, 大規模な地震の場合, 免震支承を用いた橋梁では桁の応答変位が大きくなるため, 桁と橋台, 隣接桁どうしの衝突を避けるために大きな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構造形式として緩衝材の使用が考えられる. 橋梁の免

震設計をする際, 橋台と橋桁間に緩衝材を設置した例¹⁾がニュージーランドにおいてみられるが, わが国ではいまだ検討段階である. 緩衝材を実橋へ適用した場合の設置イメージを図-1に示す²⁾.

緩衝材には, 衝撃的に作用する地震力を低減するための衝撃緩衝能力と地震発生時に桁の有する運動エネルギーを吸収するための高いエネルギー吸収能力が求められる. 現在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, 実験的および解析的検討によりその基本特性が明らかにされつつある. ここでは, 荷重-変位関係において望ましい形態は, 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されている.

緩衝材の材質としては実用化の可能性や価格の面からゴムが有望である³⁾という見解もあるが,

*武蔵工業大学工学部土木工学科 (〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1)

**武蔵工業大学大学院工学研究科土木工学専攻 (同上)

***株式会社荏原製作所 (〒144-8510 東京都大田区旭町 11-1)

市販の型钢を用いた緩衝材も提案されており、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³⁾、⁴⁾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⁵⁾の解析的検討により示されている。

そこで、著者らは鋼管の圧壊近傍での過度の反力を抑えるために、ゴム管と鋼管を併用した新しい緩衝装置を考え、基本特性を静的実験より検討した⁶⁾。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と考えられる。更に、実験結果より、鋼管の外側にゴム管を巻く形式の緩衝装置の荷重-変位関係は、それぞれの部材の基本特性から精度良く予測できることが可能であり、エネルギー吸収性能も大きいことが分かっている。

これを踏まえた上で、本論文では、ゴム鋼併用型耐震緩衝装置を有する免震橋の動的応答解析を行い、その実用性ならびに有効性を検証した。

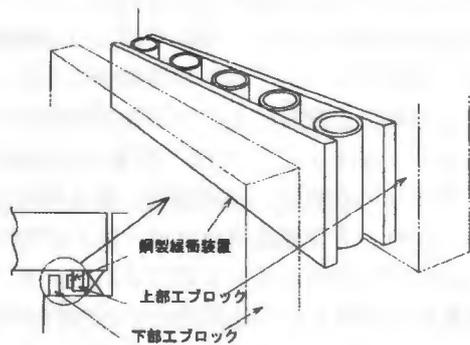


図-1 緩衝装置設置イメージ図²⁾

2. ゴム鋼併用型耐震緩衝装置の静的圧縮試験

本章では、文献 6)で実施したゴム鋼併用型耐震緩衝装置の静的圧縮試験の概要を示す。

2.1 試験体

試験体は図-2 に示す鋼管の外側にゴムを巻い

た形式のもの 4 種類とした。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、試験機の容量の関係で、試験体の奥行きは 100mm とした。比較のため、使用した鋼管の静的圧縮試験も行った。

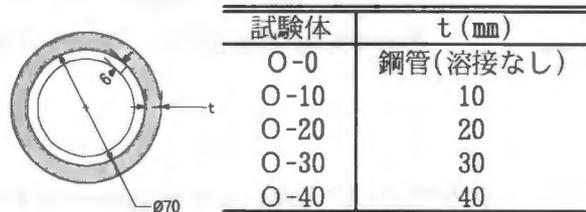


図-2 外にゴムを巻いた試験体の寸法・形状

2.2 実験方法

载荷装置の概要を図-3 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。測定時には、同図中に示したように、载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、载荷方法については、荷重 250kN を変形可能な最大変位とし、そこで载荷を中断した。そして荷重を完全に除荷した後、荷重 250kN まで再び载荷した。

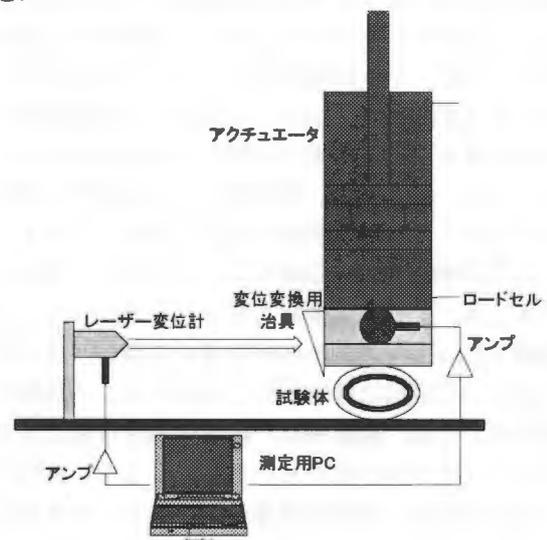
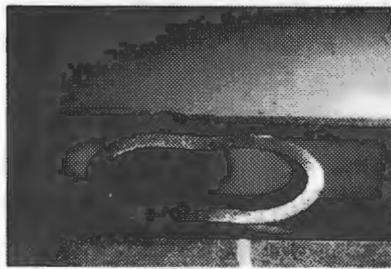


図-3 载荷装置概要

2.3 実験結果

図-4、図-5 に鋼管(O-0)及びO-40 の変形形状の推移を示す。また、図-6 にO-0~40 の荷重-変位関係を示す。但し、ゴム鋼併用型耐震緩衝装置(O-10~40)については再载荷時の荷重-変位関係

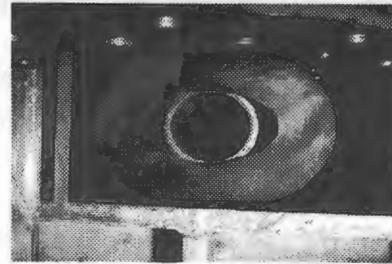


(a) 変形量 30mm

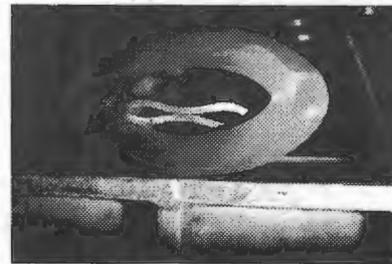


(b) 実験終了後

図-4 鋼管(O-0)の変位形状の推移



(a) 変形量 30mm



(b) 実験終了後

図-5 O-40の変位形状の推移

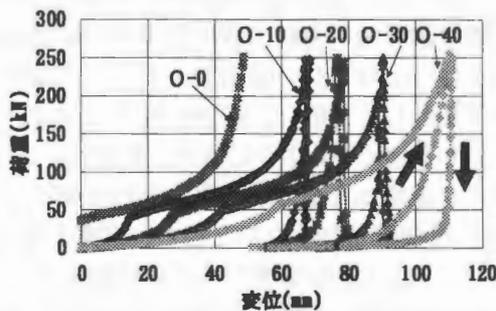


図-6 ゴム鋼併用型耐震緩衝装置の荷重-変位関係

も示した。O-40 を例に、図中に除荷経路と再載荷経路を矢印の方向で示した。表-1 にO-0~40の最大荷重時の吸収エネルギー量を示す。

図-4~6 より鋼管が、40kN 程度で降伏するために、一度剛性が急に低下する。その後、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材料のひずみ硬化が進むため剛性が徐々に上がるハードニングを示した。ま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。

図-5, 6よりゴム鋼併用型耐震緩衝装置では、鋼管の降伏まではゴムのみが変形しており、剛性は低い(Phase I)。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。また鋼管の降伏後の剛性も徐々に上昇している。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)。荷重250kN近傍で鋼管は完全に圧壊した。その後の荷重及び除荷・再載荷の経路では、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ていると考えられる(Phase III)。

表-1より鋼管(O-0)とO-10~40の吸収エネルギー量を比較すると、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。ゴム鋼併用型耐震緩衝装置は、ゴム厚が増すと変形量が大きくなるためエネルギー吸収量が増加する。また鋼管は、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ある程度のエネルギーは、ゴムで吸収することが出来る。さらに、ゴム厚の影響によって降伏後の荷重値の上昇を抑制し、鋼管の圧壊後もゴム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ことが図-6よりわかる。

表-1 吸収エネルギー量

試験体	吸収エネルギー量(kN・m)
O-0(鋼管)	4.0
O-10	4.6
O-20	4.8
O-30	5.4
O-40	6.2

3. ゴム鋼併用型耐震緩衝装置の荷重-変位関係のモデル化とその精度

本章では、文献 6)で提案したゴム鋼併用型耐震緩衝装置の荷重-変位関係のモデル化とその精度について概説する。

3.1 荷重-変位関係のモデル化

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、

- ・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。詳細は文献6)に述べられているが、ここでは、ゴム管の曲げ抵抗による荷重増加分と、ゴムから鋼管へ力が分布して伝わることによって生じる荷重増加分が考慮されている。

本研究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したが、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。

3.2 モデル化の精度

図-7に、上述の荷重増加分を考慮したモデル及び考慮しないモデルの荷重-変位関係と実測結果を比較して示す。荷重増加分を考慮したモデルは実験結果を良く表現し得ていることがわかる。

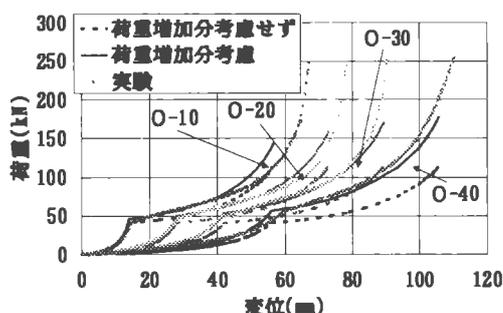


図-7 荷重増加分を考慮したモデル及び考慮しないモデルと実験結果の荷重-変位関係

4. ゴム鋼併用型耐震緩衝装置をもつ免震橋の動的応答解析

4.1 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。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、非線形2次元骨組時刻歴応答解析を行った。数値積分法には定加速度法を用い、時間刻みは0.0005secとした。

4.2 対象構造物および解析モデル

対象構造物は図-8, 9に示すように橋脚高さが20m, 支間長50mの10径間の長大免震橋とし、上部構造は総重量1300tの鋼箱桁、下部構造は断面変化が1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³⁾。

解析モデルを図-10に示す。上部構造は弾性はり要素とし、橋脚は非線形はり要素(バイリニアモデル)、免震支承はバネ要素(バイリニアモデル)でそれぞれモデル化した。図-11に鋼製橋脚のM-φ関係⁷⁾を示す。また表-2に免震支承を表すバネの特性値を示す。

4.3 緩衝装置及び衝突のモデル化

ゴム鋼併用型耐震緩衝装置の荷重-変位関係はゴム管と鋼管それぞれの静的載荷時の荷重-変位関係から2つのバネ(非対称トリリニアモデル)でモデル化した。但し、伝達荷重が2つのバネに対して等しくなるように直列に配置し、3.1で述べた荷重増加分を考慮した。また引張側(プラス側)には機能しないものとした。緩衝装置の剛性については、緩衝装置の長さを実験値の2倍にしたものを解析モデルでは想定したので、剛性は2倍になり、エネルギー吸収量も表-1の2倍になる。鋼管が圧壊して荷重が立ち上がる箇所の剛性は、緩衝材の剛性に関係なく桁の軸方向剛性と同一とした。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³⁾を挿入した。仮想バネとは圧縮側に隙間分変形した時(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。文献3)において仮想バネの剛性と1つの梁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されているため、仮想バネの剛性と1つの梁要素の軸方向剛性との比を1.0とした。したがって、仮想バネの剛性は2.00×10⁴MN/mとし、引張側は働かないように剛性を0とした。

4.4 解析条件及び入力地震波

緩衝装置としては、ゴム厚の影響について比較検討しやすくするために鋼管のみのO-0とゴ

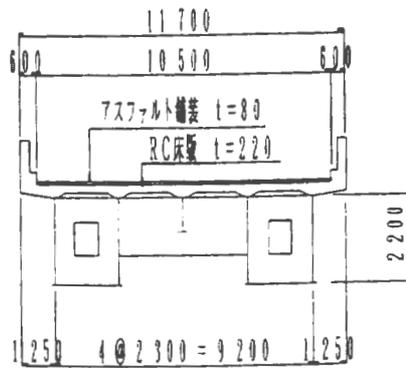


図-8 上部構造断面図⁷⁾

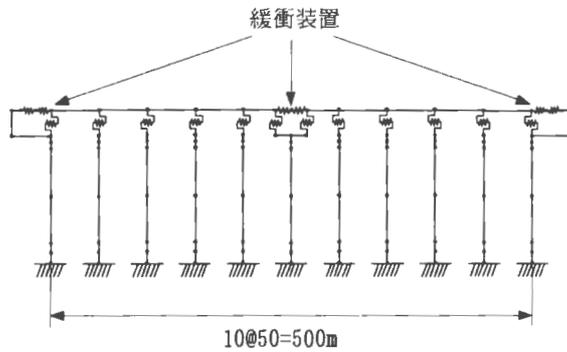


図-9 橋脚高さ20mの鋼製橋脚断面図⁷⁾

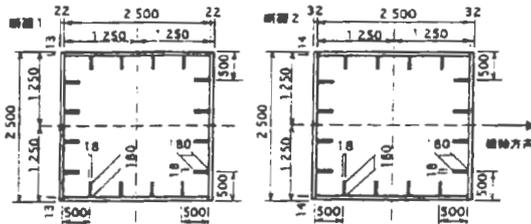


図-10 解析モデル図

表-2 免震支承を表すバネの特性値

材料特性	免震支承
一次剛性(MN/m)	30.6
等価減衰定数	0.15
降伏点ひずみ(ϵ)	0.017
剛性の低下率(a)	0.154

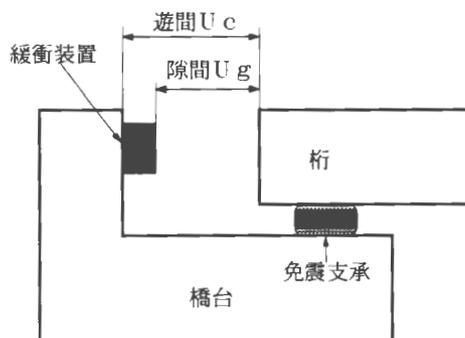


図-11 橋脚のM- ϕ 関係⁷⁾

で示すように円筒を縦にして取り付けることを想定した。

対象構造物の幅員を 10m, 圧壊した時緩衝装置の面積が 3 倍になると仮定した場合, $10\text{m} \div (1 \text{個あたり直径 } 7\text{cm} \times 3) \div 50$ 個の緩衝装置を並べて設置可能である。また, 後述するが, 左側 5 径間の桁を一つの桁と見なした場合, 衝突が起こらない時の左から 3 番目の桁における支間中央の衝突方向の最大応答速度 (0.636m/sec) より, 桁の運動エネルギーを計算したところ $666\text{kN}\cdot\text{m}$ となった。これを左橋台部と桁間の緩衝装置で吸収すると仮定した場合, 一カ所で $333\text{kN}\cdot\text{m}$ のエネルギーを吸収することになり, 0-0 の場合およそ 42 個, 0-40 の場合およそ 27 個必要となる。但し, ここでの緩衝装置のエネルギー吸収量としては表-1 の実験値を 2 倍した値を用いている。そこで緩衝装置の個数については, 15, 30, 45 個を想定してモデル化した。

解析モデルにおいては, 橋台を想定して図-10 の両橋脚を剛体とした。また緩衝装置の厚さを含

図-12 橋台部の緩衝装置
ム厚 40mm の O-40 のみを扱うこととした。設置箇所は中央部と両橋台部の 3 ヶ所とし, 図-1

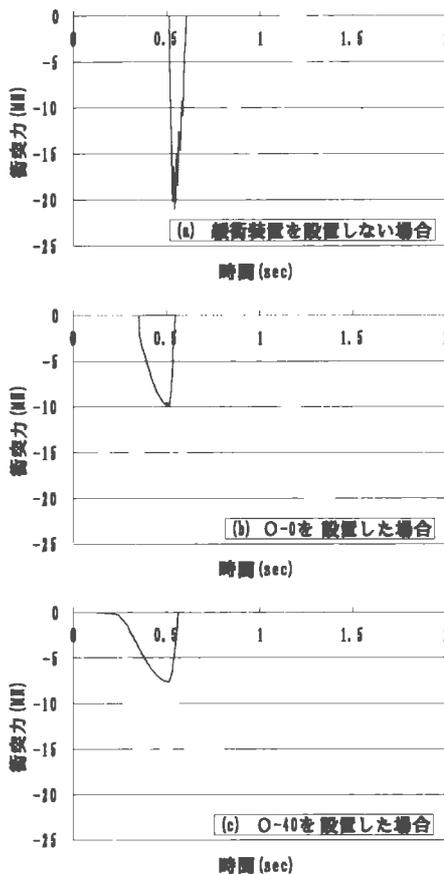


図-13 衝突力の時刻歴

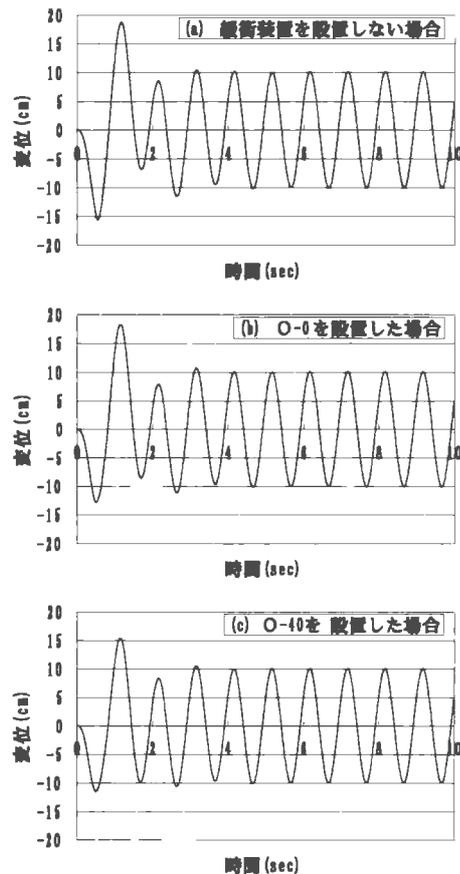


図-14 水平応答変位の時刻歴

む遊間 U_c は $U_c=15\text{cm}$ または 20cm とした。これは、厚さが最大となる O-40 の厚さが 15cm となることによる。図-12 に緩衝装置を設置した橋台部の概念図を示す。

入力地震波には、緩衝装置の基本的な動特性を知るために振幅 300gal 、周波数 1.0Hz の正弦波を使用し、解析時間を 10sec とした。

5. 解析結果

図-13 に緩衝装置がない場合の仮想バネに生じる衝突力、O-0 及び O-40 を 30 個設置した場合の緩衝装置に生じる衝突力を時刻歴で示した。但し、衝突が最初に起きた左橋台部の緩衝装置に着目し、遊間 $U_c=15\text{cm}$ の場合を示した。図-14 に左から 3 番目の桁における支間中央の水平応答変位を時刻歴で示した。図-13 よりいずれの場合も、衝突は約 0.2sec から 0.6sec の間に一回生じた。緩衝装置を用いない場合の衝突力と比べ O-0 では 52% 、O-40 では 64% も衝突力を低減している。また提案した緩衝装置を用いない場合には剛性が

大きいので急に衝突力が上昇するが、提案した緩衝装置を用いた場合、ゴムの剛性が低くひずみ硬化の性質により、徐々に衝突力が上昇している。さらに桁と緩衝装置が接触している時間が O-0 の場合と比べ長いため、緩衝装置としての機能時間は長いと言える。図-14 よりいずれの場合も衝突後に応答変位が増大している。提案した緩衝装置を用いない場合は、提案した緩衝装置を用いた場合と比べ剛性が大きく衝突力が大きいので提案した緩衝装置を用いた場合より応答変位が大きくなったと考えられる。しかし時間の経過と共にいずれの場合もほぼ同じ 10cm 程度の変位に収束している。これは、図-13 における力積が同程度であることからわかるように、一回の衝突で桁の運動エネルギーが同程度吸収されたためだと考えられる。

図-15 に遊間 U_c を 15cm 、 20cm とし、O-0 及び O-40 を 15, 30, 45 個設置した場合の中央部、両橋台部の緩衝装置に生じる衝突力の最大値を示した。O-0 を 15 個設置した場合、両橋台部では

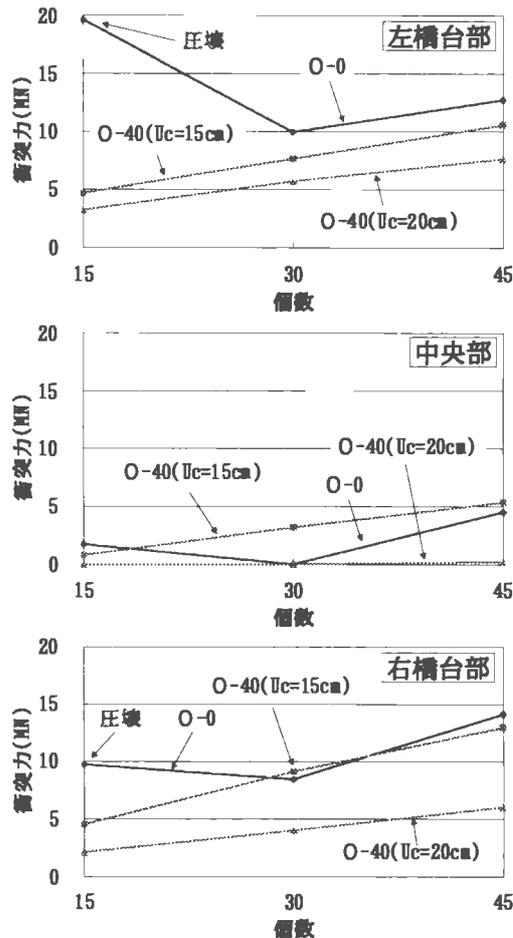


図-15 緩衝装置の個数と衝突力の関係

圧壊してしまうがO-40の場合は15個でも圧壊せずに衝突力を低減している。また30個、45個の場合にも生じる衝突力はO-0と比べ小さい。しかし中央部ではO-40の方が衝突力は大きくなっている。隙間 U_g を20cmと大きくし、O-40を設置した場合、両橋台部の衝突力は $U_c=15\text{cm}$ の場合と比べ小さく、桁間では衝突が起きなかった。隙間 U_g が広いと桁の応答変位は大きくなるが、衝突時の桁の応答速度は小さくなる。そのため緩衝装置自体の圧縮変位は小さくなり、衝突力も小さくなったと考えられる。また緩衝装置は、個数が増えるほど剛性が上がるため衝突力が大きくなっていることがわかる。

遊間 $U_c=15\text{cm}$ とし、衝突が起きないようにパラベットを取りはずした場合、緩衝装置なしの場合、O-0及びO-40を30個設置した場合と、遊間 $U_c=20\text{cm}$ とし、O-40を30個設置した場合の左から3番目の桁の最大応答変位・加速度及び左橋台部に作用する最大衝突力を表-3に示した。

表-3より桁の最大応答変位と最大応答加速度は、衝突が起きる場合衝突方向(マイナス側)と反対方向(プラス側)の値が大きくなるのがわかる。衝突方向(マイナス側)の最大応答変位は、衝突方向に緩衝装置を設置しているため衝突なしの場合と比べ小さくなっている。衝突方向と反対方向の応答値に注目するとO-40では最大応答変位、最大加速度すべて緩衝装置なしやO-0と比べて小さい。O-40は、 $U_c=15\text{cm}$ の場合隙間がないので桁の振動初期から機能するため応答変位の減少につながったと考えられる。一方、 $U_c=20\text{cm}$ では隙間が5cmあるため応答変位は $U_c=15\text{cm}$ の場合と比べ大きくなったが衝突力は減少している。

表-4に $U_c=15\text{cm}$ とし、O-0及びO-40を15、30、45個設置した場合と、 $U_c=20\text{cm}$ とし、O-40を15、30、45個設置した場合の総エネルギー吸収量を示した。但し、衝突が最初に起こる左橋台部の緩衝装置に着目した。 $U_c=15\text{cm}$ ではO-0と比べ、エネルギー吸収量はO-40の方が大きい。一方 $U_c=20\text{cm}$ では、O-40の方が小さい。これは $U_c=20\text{cm}$ の時、鋼管まで変形が進まずゴムで吸収しようとしたためだと考えられる。表-4よりO-0の場合およそ45個、O-40の場合およそ30個で桁の運動エネルギーを約90%吸収できることから桁の最大応答速度がわかれば設置させる緩衝装置の個数は設定できると考えられる。

6. 結論

ゴム鋼併用型耐震緩衝装置の衝突力の低減効果及びエネルギー吸収効果などを動的応答解析によって検討し、その実用性ならびに有効性を検証した。

本解析から得られた結果をまとめると、以下のようなになる。

- 1) 鋼管と比べ衝突力を低減でき、さらにエネルギー吸収量も大きい。また急激な衝突力の上昇をゴムの低剛性、ひずみ硬化の性質によって抑え、桁と接触している時間が長いため、緩衝装置としての機能時間が長い。
- 2) 鋼管と比べ衝突によって生じる応答変位および応答加速度の増加を抑えることが出来るため、他の部材や支承などに与える影響は小さいといえる。
- 3) 遊間が広く、隙間 U_g が広い場合、緩衝装置自体の圧縮変形量が小さく、ゴムだけの変形によ

表-3 衝突時の桁及び左橋台部の最大応答結果

解析条件	桁の応答変位 (cm)	桁の応答加速度 (cm/sec ²)	左橋台部に作用する衝突力 (MN)
衝突なし	+13.0 -16.4	+235 -223	0
緩衝装置なし	+18.7 -15.7	+2527 -2315	21
O-0	+18.2 -12.8	+958 -890	10
O-40 (Uc=15cm)	+15.3 -11.6	+418 -396	7.6
O-40 (Uc=20cm)	+17.0 -14.5	+415 -391	5.7

衝突方向と反対方向(プラス側), 衝突方向(マイナス側)

【参考文献】

- 1) 川島一彦, 後藤洋三: 道路橋の免震設計とロ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: 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 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(投稿中).
- 7) 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化, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.725-732, 1998.3.

表-4 緩衝装置の総吸収エネルギー量

個数	O-0	O-40 (Uc=15cm)	O-40 (Uc=20cm)
15	153	229	107
30	271	302	163
45	290	386	194

(単位:kN・m)

ってエネルギーを吸収しようとするため逆に吸収エネルギー量は鋼管より小さくなる可能性がある。一方、衝突力はゴムだけの変形なので小さくなる可能性がある。

4) 衝突前の桁の最大応答速度がわかれば簡単な計算で、必要とする緩衝装置の個数を設定することが可能である。但し今回の入力波形は正弦波だったが、地震波の場合、衝突回数や桁の振動性状が複雑になると予想されるので今後検討する必要がある。

5) 3.2 で記述したように荷重-変位関係を精度良くモデル化することが可能であるため、遊間の大きさに合わせて様々な寸法に適應できる。今後、最も実用性の高い鋼管及びゴム管の寸法を決定するため静的、動的解析、実験により新しい緩衝材の緩衝効果、力学特性が構造物の応答に与える影響を更に詳細に調べる必要がある。