

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

Seismic behavior of base-isolated bridges with rubber or steel shock absorbers

皆川 勝* 藤谷 健** ○高峯 太一** 長嶋 文雄***

Masaru MINAGAWA, Takeshi TOYA, Taichi TAKASAKI and Fumio NAGASHIMA

ABSTRACT In case seismic isolation support systems are introduced in girder bridges, displacement response may exceed the limit displacement and result in collisions between adjacent girders or a girder and the abutment supporting the girder during a large earthquake. This paper describes a numerical result to investigate the effectiveness of steel pipe shock absorbers to mitigate collisions. A series of nonlinear dynamic frame analysis was conducted for a base-isolated bridge with rubber or steel shock absorbers. This study confirms that steel shock absorbers are superior to rubber type absorbers from the view point of energy absorbing capacity.

Keywords : 緩衝装置, 衝突荷重, 動的応答解析

Shock absorbers, Collision load, Dynamic response analysis

1. はじめに

兵庫県南部地震の甚大な被害を契機として橋梁における耐震設計は、地震力に耐えようとする剛の構造から、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柔の構造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許容伸縮量の大きいジョイントが必要となる。反対に衝突を許容した場合、新しい経済的、合理的な落橋防止システムを考慮する必要がある。そのような落橋防止システムは、すでに早くからニュージーランドで実用化されているが、我が国では実施はない。中小の地震による変形は伸縮装置が吸収するが、耐用年数の間に一度生じるか生じないかというような大規模な地震の際には、緩衝装置が塑性変形、破壊することで衝突力を吸収し、桁の応答変位を小さくすることで構造物自身に損傷が及ばないようにすることは合理的である。また部分的な修復のみで復旧できることから近未来の落橋防止システムとして期待が高い。

緩衝装置の材料として実用化の可能性や価格の面からゴムが有望である¹⁾という見解もあるが、市販の型鋼を用いて緩衝装置を製作できればコストを低く抑えることができる。また、設置スペースを小さくすることができれば施工上有利である。緩衝装置の形態としてはエネルギー吸収量大きい、すなわち、荷重-変位関係において荷重がほぼ一定で塑性変形が増してエネルギー吸収量が増大する形態が望ましい。急激なひずみ硬化型の圧縮特性をもつゴム製緩衝装置¹⁾に対して、鋼管製緩衝装置の圧縮特性はゆるやかなひずみ軟化型であることから大きなエネルギー吸収が期待できる²⁾。この様な面からも型鋼を使用した

*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)

***東京都立大学工学部土木工学科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)

緩衝装置について実用化の可能性を調べることは有意義である。また緩衝装置の応答特性を静的解析及び実験により検討したケースは多くあるが、動的解析による検討は少ない。

そこで本研究では落橋防止装置としてゴム製および鋼管製緩衝装置に注目し、免震橋の地震時の非線形応答解析を行う。緩衝装置は橋台部や桁間に設置し、衝突力の低減効果、エネルギー吸収効果を比較検討し、その実用性ならびに有効性を検証する。

2. 緩衝装置について

ゴム製緩衝装置は 150×50×180(クロロプレンゴム)の正方形断面とし、鋼製緩衝装置は、鋼管： $\phi 70 \times 6 \times 180$ (STKM13A) としている。図-1 に材質及び形状を示す。

本研究で想定するものと同一材料、同一寸法の緩衝装置に対して静的荷重実験²⁾が行われた。それぞれの荷重-変位関係を図-2, 3 に示す。

図-2 よりゴム製緩衝装置は急激なひずみ硬化型の圧縮特性を持ち、変位が 0~20mm の間でのエネルギー吸収量は小さく、荷重が急激に立ち上がる変位 20mm 以上でエネルギー吸収量が大きくなっている。この部分では大きな力が作用しており、必ずしも緩衝効果が大いとはいえない。しかし完全につぶれて緩衝装置として機能しなくなることはない。これに対して図-3 より鋼管製緩衝装置はゆるやかなひずみ軟化型の圧縮特性を持ち、初期剛性が高いため降伏後の一定荷重領域で変形に比例してエネルギー吸収量が増加する。つまりコンスタントにエネルギー吸収量が増加する特性を持つことを示している。しかし変位 50mm では完全に圧壊した状態となり荷重が急激に立ち上がりエネルギー吸収、緩衝効果は期待できず、緩衝装置として機能しなくなる。

3. 解析概要

解析には、3次元動的応答解析システムである TDA P III を用い、本研究では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。

対象構造物は図-4, 5 に示すように橋脚高さが 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: 2270 cm², 断面 2 次モーメント 1: 3.36×10^7 cm⁴, 断面 2 次モーメント 2: 2.52×10^7 cm⁴)とした³⁾。

解析モデルを図-6 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(パイリニアモデル)、免震支承はバネ要素(パイリニアモデル)でそれぞれモデル化した。図-7 に鋼製橋脚の M- ϕ 関係³⁾を示す。また表-1 に免震支承を表すバネの特性値を示す。

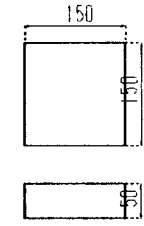
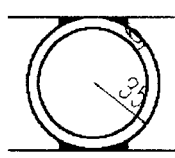
試験体	寸法・形状	材質
ゴム		クロロプレンゴム
鋼管		STKM13A

図-1 ゴム製及び鋼管製緩衝装置の寸法・形状²⁾

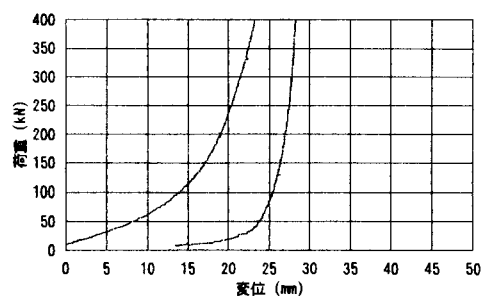


図-2 ゴム製緩衝装置の荷重-変位関係²⁾

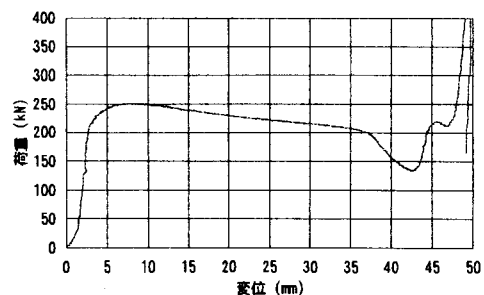


図-3 鋼管製緩衝装置の荷重-変位関係²⁾

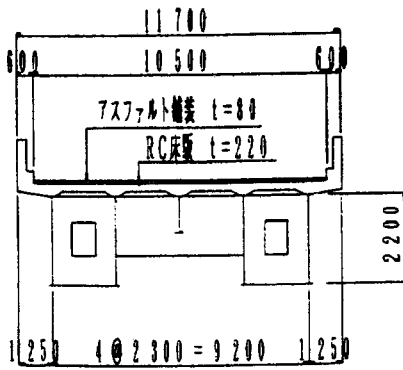


図-4 上部構造断面図³⁾

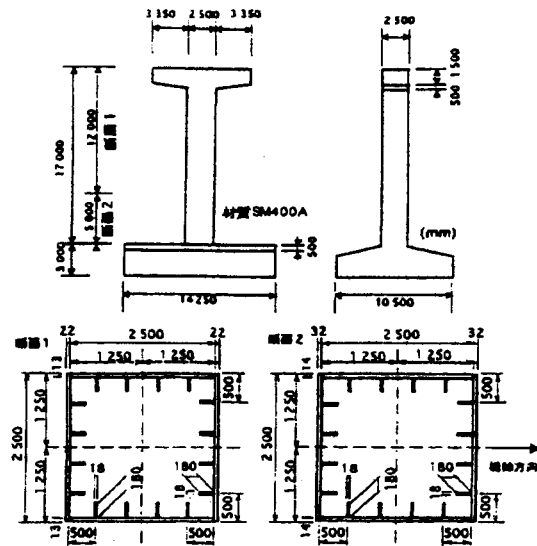


図-5 橋脚高さ 20m の鋼製橋脚断面図³⁾

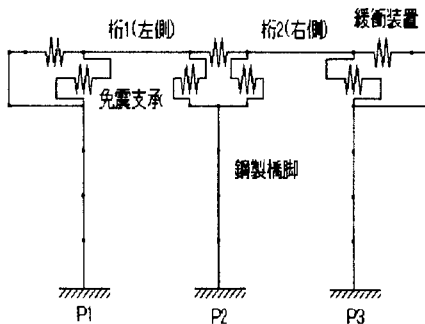


図-6 解析モデル図

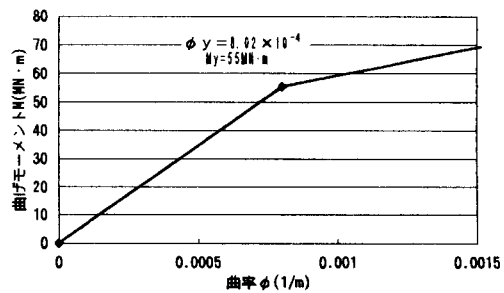


図-7 橋脚の M-phi 関係³⁾

緩衝装置は、桁間と橋台部(図-8)の 3ヶ所に取り付けた。また、想定した緩衝装置の個数分の荷重-変位関係は、文献 2)の緩衝装置 1個における静的載荷実験のデータを元にゴム製緩衝装置と鋼管製緩衝装置をバネ(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)のみを指定し引張側(プラス側)には機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、個数に関係なく桁の軸方向剛性とした。図-9に簡略化した鋼管製緩衝装置の復元力モデルを示す。

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¹⁾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。仮想バネの剛性は、文献 1)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。また引張側は働かない

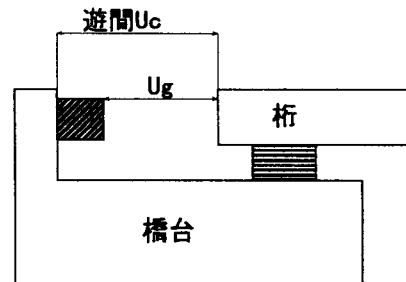


図-8 橋台部の緩衝装置

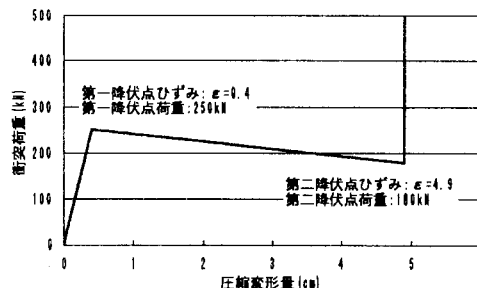


図-9 非対称トリリニアモデル(鋼管の場合)

ように剛性を 0 とした。

本研究では橋台を想定して図-6の P1, P3 の両橋脚を剛体とみなした。また図-8 の遊間 U_c と隙間 U_g については、設計の際遊間 U_c が先に決定されると考えられるため、まず $U_c=10, 15, 20, 25\text{cm}$ 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。

入力地震波としては、道路橋示方書⁴⁾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振幅調整した加速度波形(表-2)を主要部分(10 秒間)のみ 3 波用いた。道路橋示方書⁴⁾では、動的解析に使用する加速度波形は 3 波形程度用いるのが良いとされている。これは当該地点に予想される地震動は地震の特性、規模等によって異なるため、3 波形程度の入力地震動に対する動的解析結果の平均値を用いて耐震性を照査するのが望ましいからである。しかし本研究では緩衝装置の動特性を知るためにそれぞれの波形の結果について比較検討した。

表-1 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)	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

表-2 入力地震加速度波形

入力地震加速度波	最大加速度(gal)
No.1	812
No.2	760
No.3	761

4. 緩衝装置がある場合とない場合の応答特性

図-10 に緩衝装置がない場合の仮想バネに作用する衝突力、鋼管製あるいはゴム製緩衝装置 60 個を設置した場合の緩衝装置に作用する衝突力をそれぞれ左橋台部、入力地震波 No.1, 遊間 U_c を 15cm とした時の時刻歴で示した。これらの図より緩衝装置を設置することにより大幅に衝突力が低減していることがわかる。また鋼管は隙間 U_g がゴムより小さく初期剛性が大きいいため衝突回数が多くなったと考えられる。

図-11 はその時の左側の桁中央の水平応答変位の時刻歴である。(a), (b), (c)を比較すると鋼管製およびゴム製緩衝装置が衝突時にエネルギー吸収することによって、その直後やや長周期化していることがわかる。また衝突が起こるとゆれも戻しの応答変位が減少している。

緩衝装置は免震支承の変位を抑える方向に作用するため、衝突力が支承に伝達されても反力が大きくなることはない。解析結果によれば、緩衝装置を挿入することにより免震支承反力も減少しており、衝突力の伝達による支承の破損という現象は見られなかった。

5. 緩衝装置の個数の違いによる応答特性の比較

図-12 に緩衝装置の個数を 60 個又は 90 個とした時の両橋台、桁間の鋼管またはゴム製緩衝装置に作用する衝突力を時刻歴で示した。入力地震波や遊間は図-10 及び 11 の場合と同じである。

ゴム製および鋼管製緩衝装置を増やした場合、緩衝装置の剛性が上がるため衝突力も大きくなる。そのため衝突回数も多くなった。鋼管は衝突回数が多く衝突力も大きい。そのため鋼管 60 個では右橋台部の緩衝装置が圧壊してしまったが、ゴムは破壊ひずみまで変形しなかった。

図-13 に緩衝装置 90 個の場合の最初と最後の衝突時における衝突力の拡大図を示した。鋼管は最初と最後の衝突継続時間がほとんど変わらず一定だった。また、ここでは示していないが鋼管は個数を少なくすると、ひずみ軟化型なので衝突継続時間はゴムより長くなることがわかった。しかしあまり個数を少なくしてしまうと圧壊する危険性が高くなってしまふ。ゴムは最初の衝突継続時間が長くひずみ硬化型のため徐々に衝突継続時間は短くなっている。以上のことから鋼管はひずみ軟化型の性質と衝突回数も多くなることから、合計の衝突継続時間はゴムより長くなると言える。

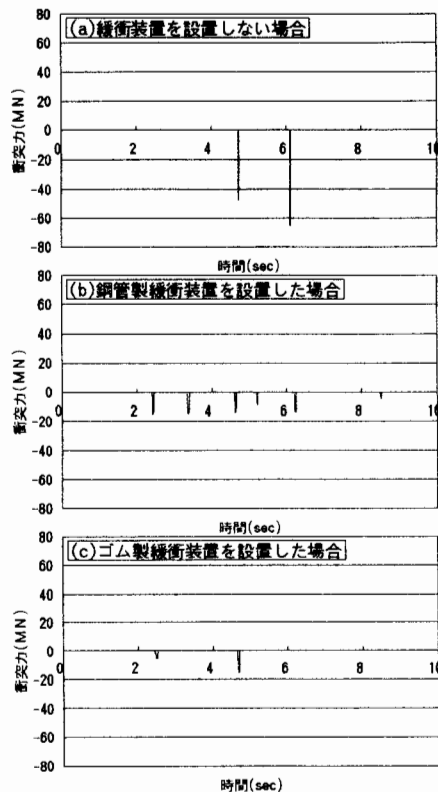


図-10 衝突力の時刻歴

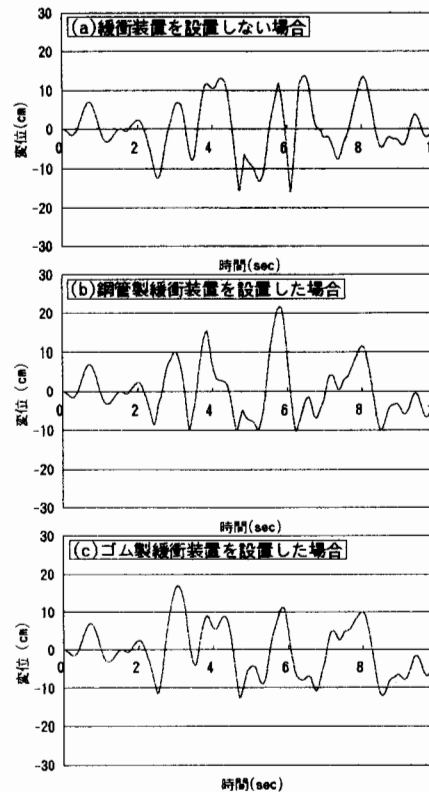


図-11 桁中央の水平応答変位の時刻歴

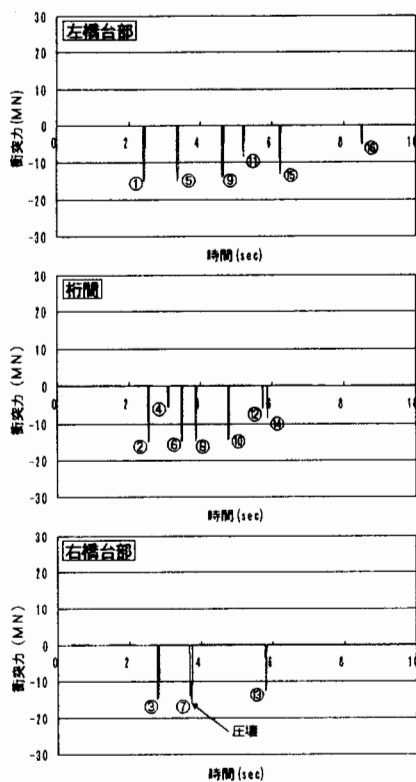
6. ゴム製緩衝装置と鋼管製緩衝装置の比較

図-14にゴム及び鋼管製緩衝装置を90個設置した場合の緩衝装置に作用する衝突力と遊間との関係を示した。但し、図の縦軸の衝突力については1径間の桁の重量6.5MNで除して無次元化した。また入力地震波はNo.3を使用した。(a)より鋼管は遊間 $U_c=10\sim 20\text{cm}$ で緩衝装置に作用する衝突力が一定であった。これは鋼管の変形量が塑性領域内であることを示しており、それぞれの遊間に対して適度な強度を保っていたと言える。しかし(b)よりゴムはそれぞれの遊間に応じて緩衝装置に作用する衝突力は異なり、鋼管より大きな衝突力が作用している。そのため遊間 $U_c=10\text{cm}$ では圧壊してしまった。

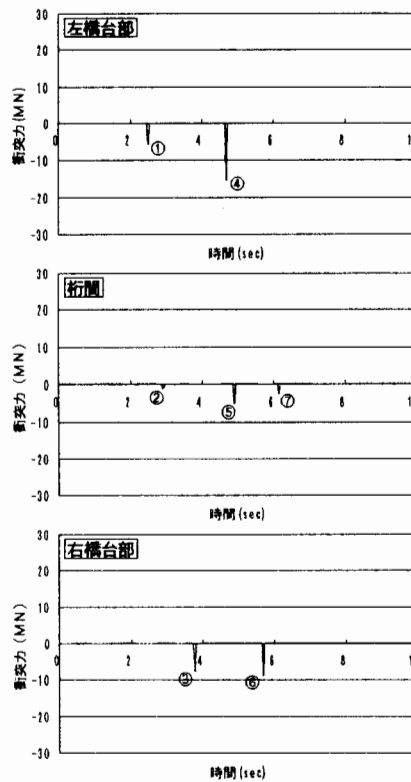
図-15には同じ解析例における緩衝装置のエネルギー吸収量と遊間の関係を示した。但し、図の縦軸のエネルギー吸収量の値については静的載荷実験²⁾で得られた終局状態でのエネルギー吸収量(ゴム90個:373kN・m, 鋼管90個:936kN・m)で除して無次元化した。

ゴムと鋼管を比べると実験値では鋼管の方がエネルギー吸収量は倍以上大きい。しかし解析上では緩衝装置の損傷や衝突が与える影響から大きく変わってくるのがわかった。そのためゴムでは損傷を起こしている箇所では実験値を超えている場合が多い。反対に鋼管は実験値以下に収まっておりエネルギー吸収量は大きい。このことから遊間が狭い場所では衝突が頻繁に起こるので、エネルギー吸収性のあまり良くないゴムよりエネルギー吸収性の良い鋼管のほうが適していると考えられる。また遊間が広い場所では緩衝装置のエネルギー吸収量小さいので、緩衝装置の個数を減らして大きく変形させることで衝突エネルギーを多く吸収させるなどの工夫が必要である。したがって緩衝装置の個数は遊間 U_c に合わせて適度に設置することが重要であると考えられる。

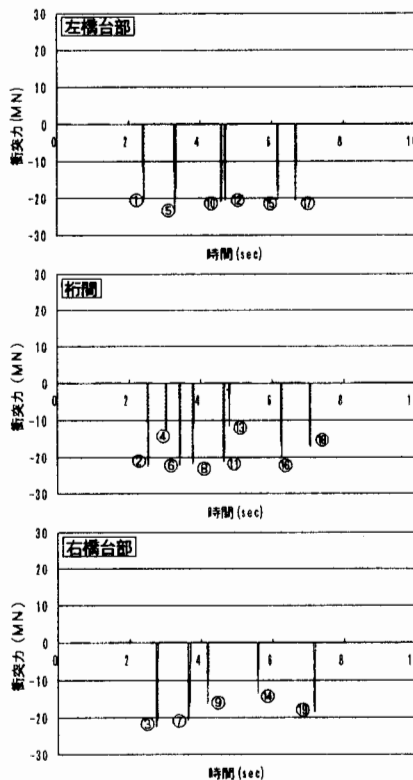
次に遊間 U_c を15cm, 入力地震動をNo.1と想定して鋼管製及びゴム製緩衝装置を30, 60, 90, 120, 150個と設置した場合について解析を実施した。図-16に鋼管製又はゴム製緩衝装置の個数と衝突力の関係を示す。図-17に鋼管製又はゴム製緩衝装置の個数とエネルギー吸収量の関係を示す。また静的載荷実験²⁾で得られたエネルギー吸収量(終局状態でのエネルギー吸収量)も併せて示した。



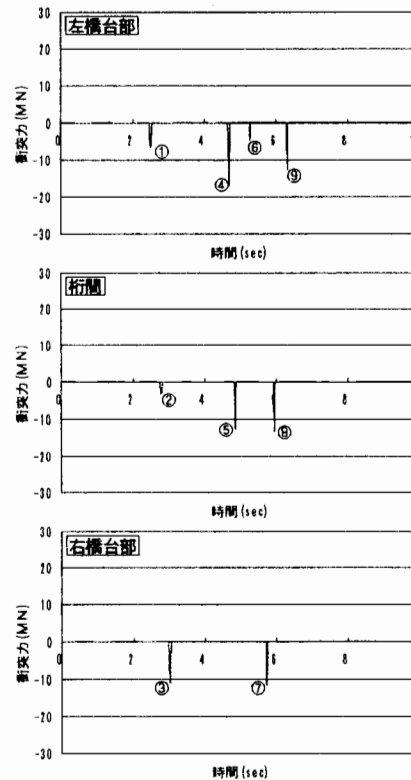
(a) 鋼管製緩衝装置 60 個



(b) ゴム製緩衝装置 60 個



(c) 鋼管製緩衝装置 90 個



(d) ゴム製緩衝装置 90 個

図-12 衝突力の時刻歴の比較 (緩衝装置の個数の影響)

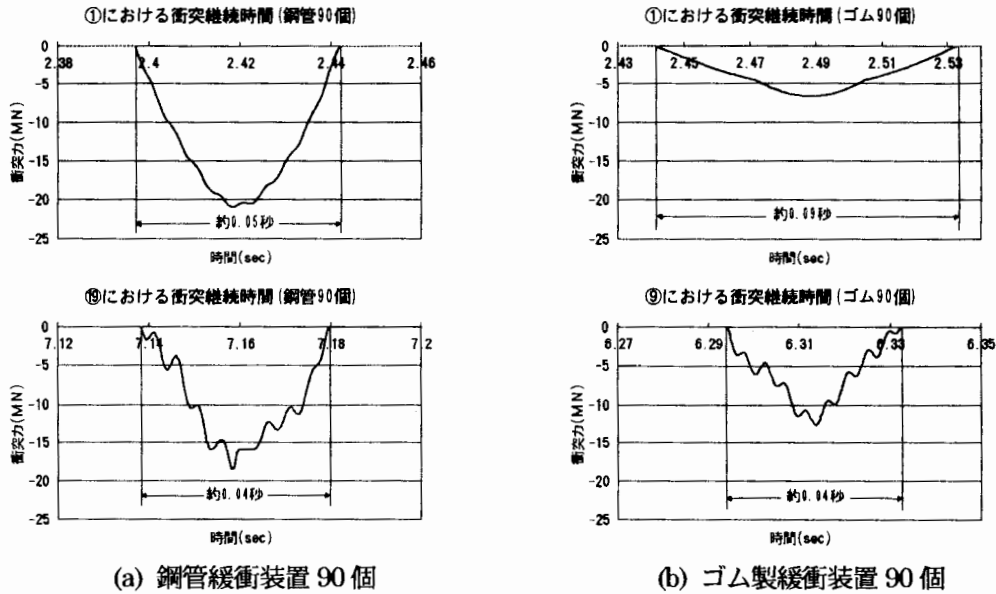


図-13 衝突継続時間の比較

図-16 より鋼管の場合、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思われる。ゴムは 30 個でも圧壊しなかったため個数に対応して衝突力は大きくなっているが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-17 より鋼管では両橋台部、桁間で大きく変わってくる。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だと考えられる。また個数を多くすればエネルギー吸収量も多くなるということにはならず、効率良くエネルギーを吸収しているのは鋼管 90 個設置した場合である。

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では 100 個程度、鋼管は 90~100 個程度が適当だと考えられる。これは、およそ 0.40m/sec 程度の速度に対応する運動エネルギーを消費し得る装置に相当している。

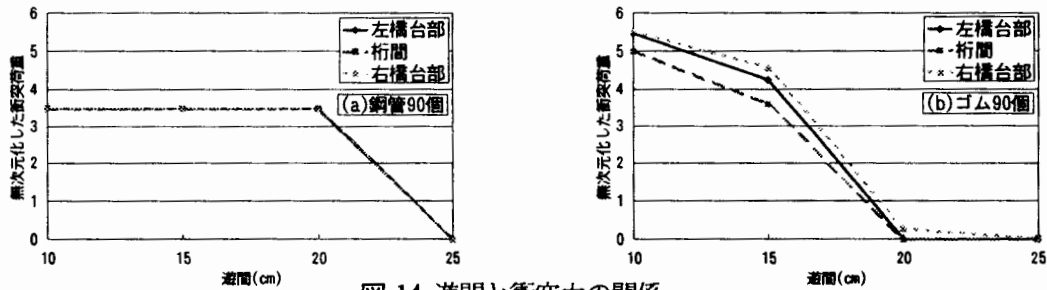


図-14 遊間と衝突力の関係

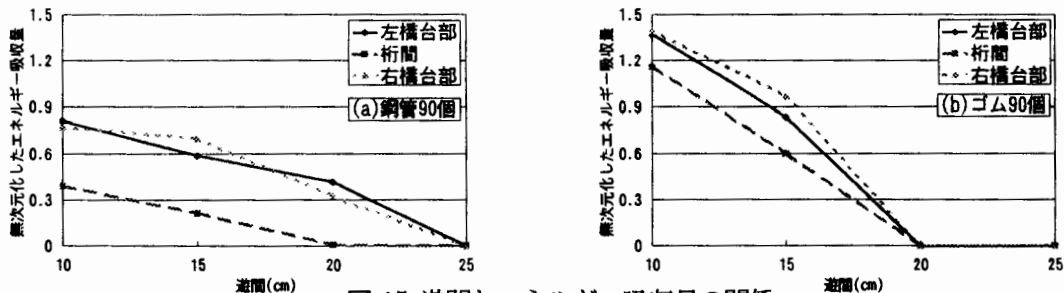


図-15 遊間とエネルギー吸収量の関係

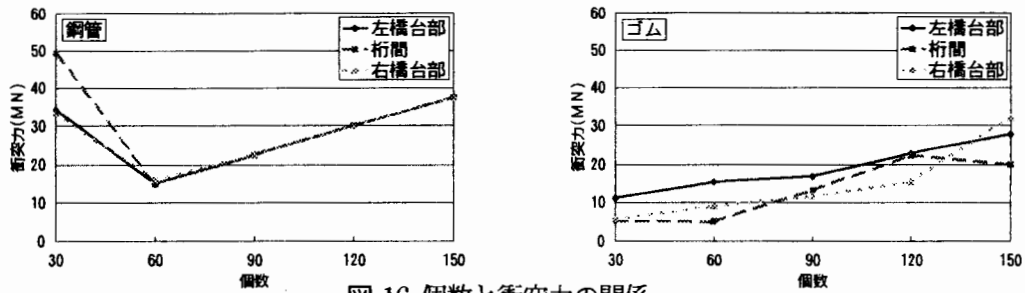


図-16 個数と衝突力の関係

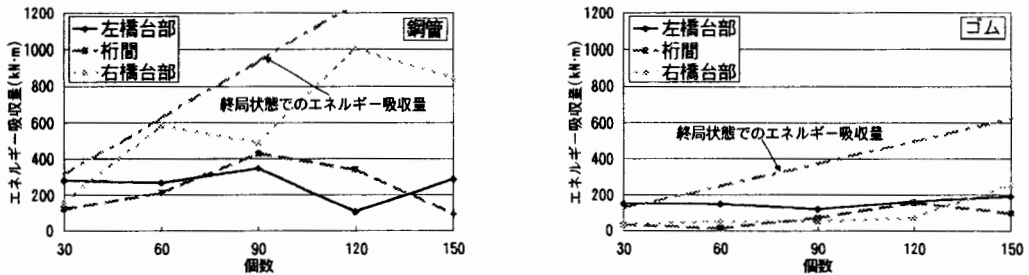


図-17 個数とエネルギー吸収量の関係

7. 結論

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。

入力地震動によっては、本研究における解析結果で示したように、適度の性能を緩衝装置にもたせることは可能であったが、他の波形では完全圧壊してしまうケースもあった。したがって、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。ひとつの可能性としては、鋼管内にゴムなどの柔らかい材料を挿入して鋼管の圧壊近傍では、過度の反力を生じないで、鋼管の過度な変形を抑制する方法も考えられる。これにより、結果的に衝突継続時間も長くすることができ、かつ、緩衝装置が圧壊して支承反力などの衝突による作用力が大きくなることも避けられる可能性がある。

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が、本研究では、これを特定する一般的な方法を見出すには至っていない。今後は、上記の方法も念頭に入れながら、広い範囲の入力地震動に対して十分な緩衝効果を得られる方法を検討してゆきたい。

本研究は、文部省科学研究費補助金・基盤研究(c) (代表者:皆川勝, 課題番号 12650485) の助成を受けて行ったものである。また、本研究の一部は鋼橋技術研究会・耐震設計部会 (部会長:長嶋文雄) の活動として行われたものである。

【参考文献】

- 1) 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, No.12/I-46, pp.129-142, 1999.1.
- 2) 鋼橋技術研究会耐震免震研究部会報告書, pp.77-144, 1999.11.
- 3) 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.
- 4) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, V耐震設計編, 1996.2.
- 5) 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巻, 3号, pp.87-94, 1991.3.
- 6) 菊地敏男, 樋口俊一, 後藤洋三: 免震橋用ロックオフ装置の滑動時における破壊機構と最大反力簡易算定法の検討, 土木学会論文集, No.501/I-29, pp.153-161, 1994.10.