

ゴム鋼併用型耐震緩衝材の開発

学生氏名 高寄 太一

指導教員 皆川 勝

本研究では、落橋防止装置の緩衝材として、ゴム管と鋼管を併用した新しい緩衝材を考え、基礎特性を静的圧縮試験及び動的応答解析によって検討した。静的圧縮試験より、鋼管の外側にゴム管を巻く形式の緩衝材の荷重-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わかった。そこでモデル化の妥当性を確認するために再度ゴム厚、鋼管厚等の寸法を変えて静的載荷実験を行い、ゴム鋼併用型緩衝材の力学モデルを再検討した。またゴム鋼併用型緩衝装置が、橋梁システム全体系の動的挙動にどのような役割、効果をもたらすかについて検討するために、ゴム鋼併用型耐震緩衝材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。

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

1. はじめに

兵庫県南部地震により橋梁は、既存の落橋防止構造により落橋を防ぐことができずに甚大な被害を受けた。また兵庫県南部地震以降、免震橋や地震力分散式橋梁が積極的に採用されるようになったが、こうした形式の橋は長周期化により桁の変位が大きくなるため隣接桁間及び桁と橋台間に衝突が生じる恐れがある。そのため近年落橋防止構造の高機能化、高性能化の必要性が高まり、道路橋示方書¹⁾においては、落橋を防ぐために、桁かかり長、落橋防止構造、変位制御構造および段差防止構造から構成される落橋防止システムが新たに規定された。さらに、落橋防止システムのうち、落橋防止構造や変位制御構造には、大地震時に衝撃的な力が作用すると考えられるため、ゴムなどの緩衝材を設置することが推奨されている^{1), 2)}。

落橋防止装置および落橋防止システム用緩衝材に求められる基本性能は、衝撃的な地震力を緩和することだが、今日では従来の衝撃緩衝性能に加えて、桁の有する運動エネルギーを吸収する性能(エネルギー吸収性能)が要求される。しかし、緩衝効果やエネルギー吸収効果を定量的に判定する方法がまだ確定されていないため、緩衝材の性能を考慮した設計は研究者や開発者の一存に任されてきた。今後、大規模な地震が近い内に来ることが予想されることから、要求される性能を定量的に評価する方法を早期に確立する必要がある。

落橋防止装置および落橋防止システム用緩衝材の設計法においては、供用期間中に発生する確率の高い中・小規模地震と供用期間中に発生する確率の低い大規模地震に対する2段階設計法の適用が検討されている。すなわち、中・小規模地震の変形に対しては、緩衝材の弾性範囲内の変形、または伸縮装置などの他のデバイスで吸収させるため、緩衝材の降伏点および落橋防止装置の機能開始変位量を明確に設定する必要がある。また大規模地震時には、緩衝材および落橋防止装置の損傷を許容し、降伏後の塑性変形によって桁の運動エネルギーを吸収させる。これにより、落橋防止構造および橋梁における他の構成部材の損傷を防ぎ、かつ上部構造が桁かかり長に達するような運動を制限することができる。さらに地震後には速やかに復旧できることから合理的な設計法といえる。長嶋^{3), 4)}らの鋼管製緩衝装置、越峠・運上⁵⁾らの円筒型ゴム製緩衝装置は、降伏点が明確であるため、合理的な2段階設計ができるとしている。また村田・高山⁶⁾らは初期剛性を大きくするための剛構造要素とエネルギー吸収性能を高めるための柔構造要素からなる2段階ばね構造の落橋防止装置などを用いている。図-1に鋼管製緩衝材を実橋へ適用した場合の設置イメージ図を示す³⁾。

これら上述した落橋防止システム用緩衝材の力学特性は、荷重-変位関係であらわすと弾塑性型(ひずみ軟化型)に分類される。弾塑性型は、明確な降伏点(変曲点)が存在し、降伏後、荷重がほぼ一定の状態に変位のみが増加する材料であり、エネルギー吸収性能が高い。一方

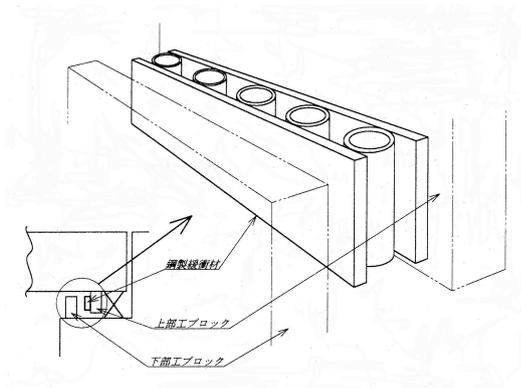


図-1 鋼管製緩衝材設置イメージ図³⁾

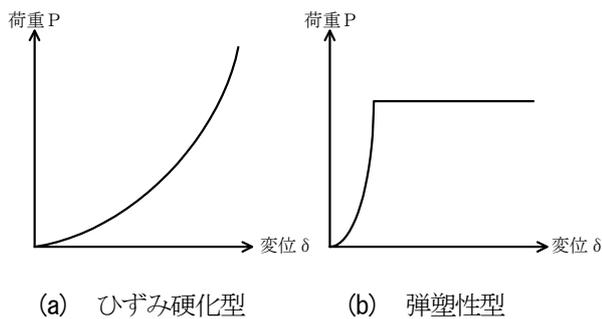
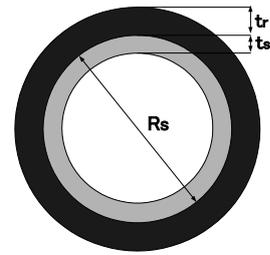


図-2 緩衝材の力学特性

ゴムに代表される材料は、圧縮初期の荷重が小さく、変形が進むと伴に荷重が急激に増加するひずみ硬化型を示す。可逆的変形が可能のためエネルギー吸収性能は低いが、圧縮初期においては弾塑性型よりも荷重が小さく、僅かだがエネルギー吸収が見込める。図-2 にひずみ硬化型と弾塑性型の荷重-変位関係を示す。また潤田・川島⁷⁾らの直方体ゴムの圧縮特性の推定法に関する研究や園田・西本⁸⁾らの矩形ゴムゴムの性能評価を行った研究が示すように、ゴムの荷重-変位関係は Moony-Rivlin 式を用いて精度良くモデル化することができる。

本研究では、緩衝材の材料としてエネルギー吸収性能が高く、市販の型鋼を用いた鋼管に着目した。しかし、鋼管が完全に圧壊した場合、急激に荷重が増大し、緩衝材として機能しない⁹⁾欠点がある。そこで鋼管の圧壊近傍での荷重の立ち上がりを抑えるために可逆的な性質を持つゴムを利用して、鋼管の外側にゴムを巻く形式の新しいゴム鋼併用型の緩衝材を考案し、実験を行った。

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時に、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。



Rs	tr	ts
70	10, 20, 30, 40	4, 5, 6, 7
80	15, 25, 35, 45	4, 5, 6, 7
95	15, 25, 35, 45	8, 10
110	15, 25, 35, 45	8, 10

図-3 試験体の形状及び寸法

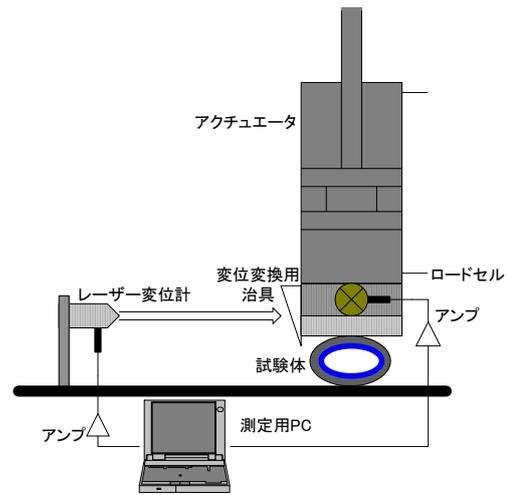


図-4 荷重装置概要

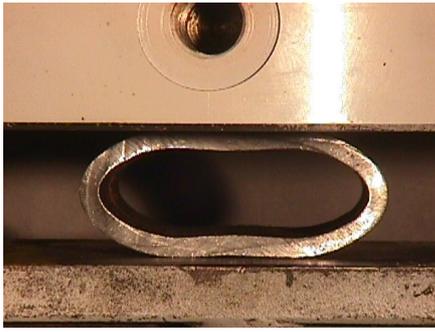
さらに、鋼管の外側にゴム管を巻く形式の緩衝材の荷重-変位関係は、それぞれの部材の基本特性から精度良く予測できることが可能であり、エネルギー吸収性能も大きいことが実験結果より分かっている¹⁰⁾。

本研究では、これらの結果を踏まえた上でゴム厚、鋼管厚の寸法等を変えて再度静的荷重実験を行い、力学モデルの妥当性を検証した。またゴム鋼併用型緩衝装置が、橋梁システム全体系の動的挙動にどのような役割、効果をもたらすかについて検討するために、ゴム鋼併用型耐震緩衝材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。

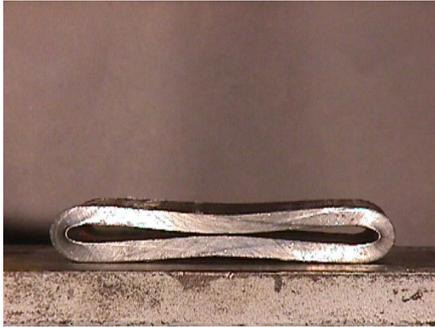
2. ゴム鋼併用型緩衝材の静的圧縮試験

(1) 試験体

試験体は、12種類の寸法の鋼管にそれぞれ4種類の寸法のゴムを巻いた形式のものとした。図-3に試験体の寸法及び形状を示す。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



(a) 変形量 30mm



(b) 実験終了後

図-5 鋼管(鋼管径 70mm, 鋼管厚 6mm)の変位形状の推移



(a) 変形量 30mm



(b) 実験終了後

図-6 ゴム鋼併用耐震緩衝材(鋼管径 70mm, 鋼管厚 6mm, ゴム厚 40mm)の変位形状の推移

た、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。

(2) 実験方法

載荷装置の概要を図-4 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、荷重 250kN を変形可能な最大変位とし、そこで載荷を中断した。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。

(3) 実験結果

図-5, 図-6 に外径 70mm, 鋼管厚 6mm の鋼管とその鋼管に厚さ 40mm のゴムを巻いた試験体の変形形状の推移を示す。また、図-7 に外径 70mm, 鋼管厚 6mm の鋼管とその鋼管にゴム厚 10mm~40mm の計 4 種類のゴムをそれぞれ巻いた試験体の荷重-変位関係を示す。

図-5, 7 より鋼管は、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-6, 7 よりゴム鋼併用型耐震緩衝材では、鋼管の降

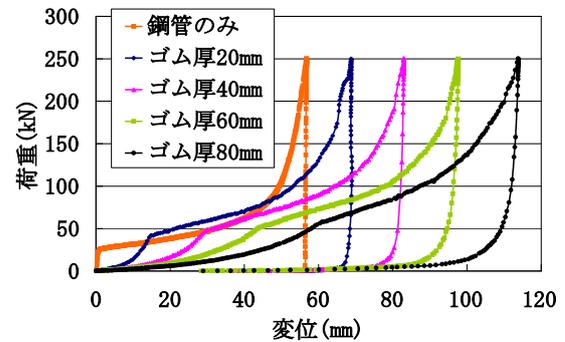


図-7 ゴム鋼併用耐震緩衝材の荷重-変位関係(鋼管外径 70mm, 鋼管厚 6mm を基本)

伏まではゴムのみが変形しており、剛性は低い(Phase I)。鋼管降伏時の変位および降伏荷重はゴム厚にほぼ比例し、ゴム厚が厚いほどおおきくなっている。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。その後の載荷及び除荷・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ると考えられる(Phase III)。

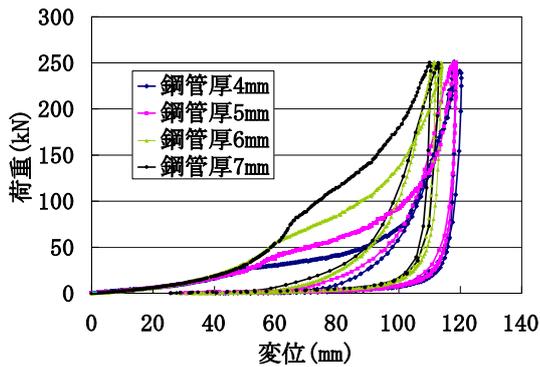


図-8 鋼管厚の違いによる比較
(鋼管径 70mm, ゴム厚 40mm を基本)

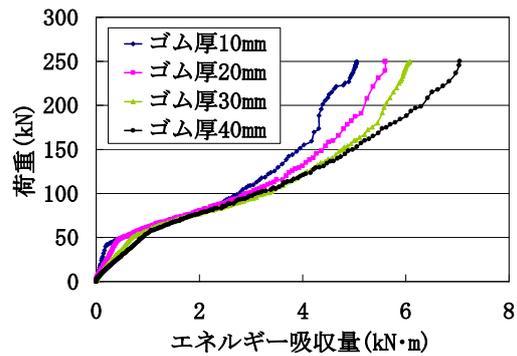


図-10 荷重-エネルギー吸収量の関係
(鋼管径 70mm, 鋼管厚 6mm を基本)

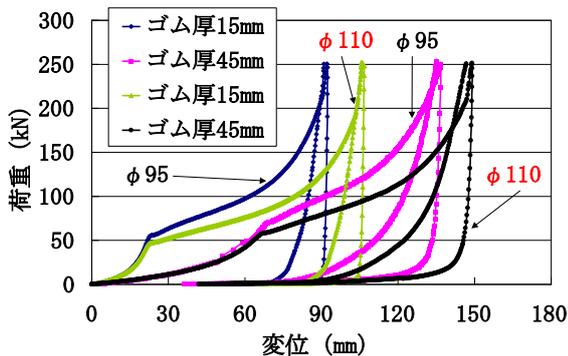


図-9 鋼管の外径の違いによる比較
(鋼管厚 8mm を基本)

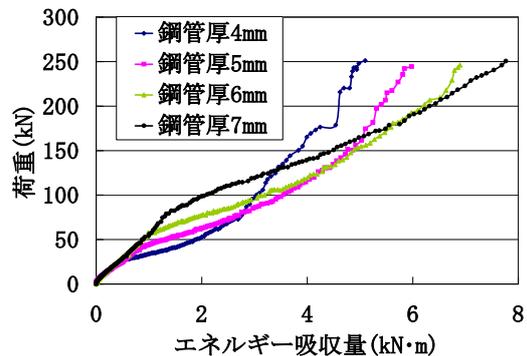


図-11 荷重-エネルギー吸収量の関係
(鋼管径 70mm, ゴム厚 40mm を基本)

(4) 寸法の違いによる力学特性の比較

図-8 にそれぞれ鋼管厚の違い試験体の荷重-変位関係を示した。鋼管の外径 70mm, ゴム厚 40mm を基本として、鋼管厚を 4mm~7mm まで計 4 種類変化させた。図-8 より、鋼管厚が厚いほど、鋼管の降伏変位及び降伏荷重は大きくなっている。また降伏後の剛性、エネルギー吸収量も大きくなった。一方、最大変位は小さくなっている。以上から、鋼管厚が厚いほどハードニングの傾向が強くなり、くびれ同士が接触する時期が早くなるため変形が制限される考えられる。

図-9 にそれぞれ鋼管の外径が異なる試験体の荷重-変位関係を示した。鋼管厚 8mm を基本として、ゴム厚を 15mm 又は 45mm の時に鋼管の外径を 95mm 及び 110mm と変化させた。図-9 より、鋼管の外径が大きいくほど、最大変位は大きくなった。しかし、鋼管の降伏時の変位および荷重は小さくなっている。また降伏後の剛性も外径 110mm の方が小さい。このことから外径を大きくした場合見かけ上剛性が小さくなるといえる。但し、総エネルギー吸収量については、外径が異なってもほぼ同じであった。

(5) エネルギー吸収性能

図-10 にそれぞれゴム厚の異なる試験体の荷重-エネルギー吸収量の関係を示した。外径 70mm, 鋼管厚 6mm

の鋼管に厚さ 10mm~40mm の計 4 種類のゴムを巻いた。荷重-エネルギー吸収量の関係図において、傾きが小さいほどエネルギー吸収量が大きく緩衝材に発生する荷重が小さいので、緩衝材として望ましい。図-10 よりゴム厚が厚いほど初期における傾きが小さい。これは、鋼管が降伏するまでゴムが変形するため、わずかだがエネルギーも吸収している。また鋼管の圧壊後も傾きが急激に上昇しないことからゴムがエネルギー吸収材として残っていることがわかる。一方、ゴム厚が薄いとすぐに降伏してしまい、鋼管の圧壊後もエネルギー吸収材として働かないことが、図の傾きから読み取れる。

図-11 にそれぞれ鋼管厚の違い試験体の荷重-エネルギー吸収量の関係を示した。鋼管の外径 70mm, ゴム厚 40mm を基本として、鋼管厚を 4mm~7mm まで計 4 種類変化させた。図-11 より、鋼管が降伏する前まですべての試験体が同じ傾きを持つことがわかる。鋼管の降伏後に傾きが小さくなることから鋼管の塑性変形によるエネルギー吸収性能は高いといえる。また鋼管厚が薄いと圧壊しやすいのでエネルギー吸収性能はよくない。一方、鋼管厚が厚すぎると、降伏荷重が大きくなってしまいなかなか降伏しない。そのためエネルギー吸収性能は必ずしも良いとはいえない。

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

ゴム鋼併用型耐震緩衝材の荷重-変位関係に影響を与える要因として、以下の項目が文献 10)より明らかにされている。

- ・ 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

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-変位関係を再度モデル化すると共に、その妥当性を検証する。

(2) ゴム管の圧縮変形特性

鋼管が圧壊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、鋼柱を挿入して、静的圧縮試験を行った。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。

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

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-12に示す。図-12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⁷⁾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。

$$a_{r1} = 2.868, b_{r1} = -0.168 \quad (\text{kN}) \quad (3)$$

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。

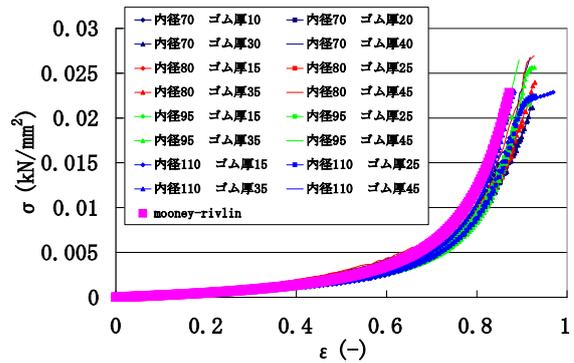


図-12 鋼柱を挿入したゴム管の応力-ひずみ関係

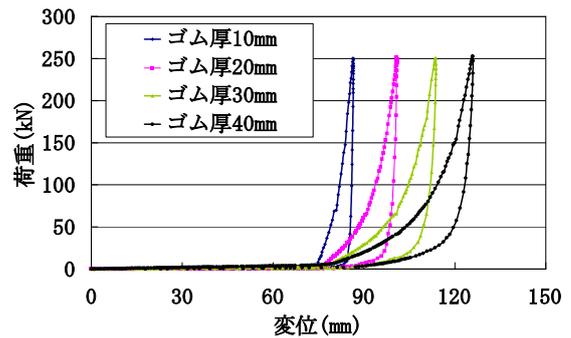


図-13 ゴム管単体(内径 80mm)の荷重-変位関係

(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試験を行った。得られた荷重-変位関係を図-13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、荷重 P 及び変位 Δ から無次元荷重及びひずみを次式より求めた。

$$\sigma_{r2} = \frac{PR_m}{Et_r^2 H}, \varepsilon_{r2} = \frac{\Delta}{2R_i} \quad (4)$$

ここで、 E はゴムのヤング率(3.426N/mm²)、 R_m はゴム管の平均半径である。得られた結果を図-14に示す。但しひずみをゴム管内部がほぼ接触するまでの範囲としている。(4)式で算出した無次元荷重は、円形固定アーチの弾性限界荷重算定式¹¹⁾を用いて求めた。これは中央集中荷重が載荷される場合の両端固定アーチの断面にかかる曲げ応力を考えることにより得られる。図-14より、それぞれの直線がほぼ同一直線上にあることから、ゴム管の曲げ特性を評価できるといえる。ここで、厚さの薄いゴムほどバラツキがあり精度が悪く見える。これは、測定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。

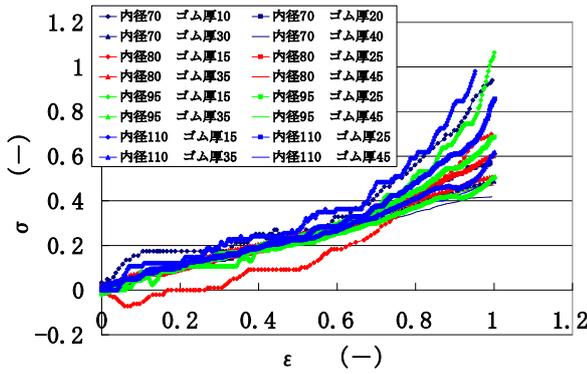


図-14 ゴム管単体の無次元荷重-ひずみ関係

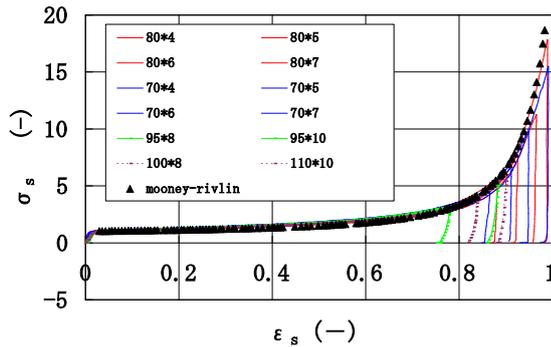


図-15 鋼管単体の無次元荷重-ひずみ関係

(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。前回の研究¹⁰⁾では鋼管の形状、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、前節で用いた円形固定アーチの式¹¹⁾より無次元荷重-ひずみを求めた。但し、鋼管は降伏が生じることから、降伏応力を用いて無次元化した。算定式を以下に示す。

$$\sigma_s = \frac{1.91PR_{ms}}{\sigma_y t_s^2 H}, \epsilon_s = \frac{\Delta}{2R_{is}} \quad (5)$$

ここで、 R_{ms} は鋼管の平均半径、 σ_y は鋼管の降伏応力、 t_s 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-15に示す。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の式を援用する。

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。

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

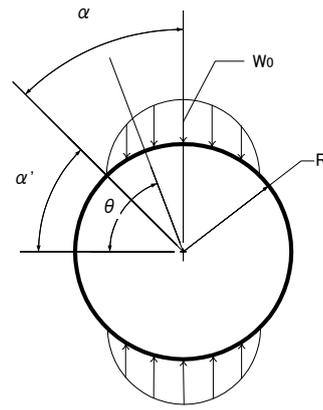


図-16 荷重が線形分布で伝達する場合

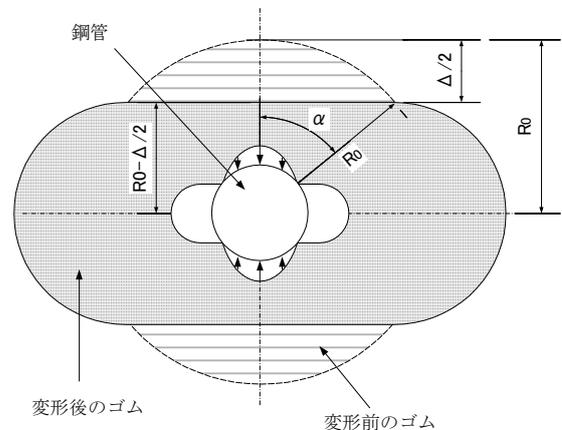


図-17 ゴムの変形と伝わる伝達荷重

$$a_s = 1.251, b_s = -0.0094 \quad (7)$$

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

図-15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

この節のモデル化の方法は前回の研究¹⁰⁾と変わっていないため詳細な部分については割愛させて頂く。

ゴムから鋼管へ伝達される荷重を図-16に示すように、角度 θ に関して線形分布すると仮定した。

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

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

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

と表される¹¹⁾。これは、鋼管からゴム管へ分布して力が

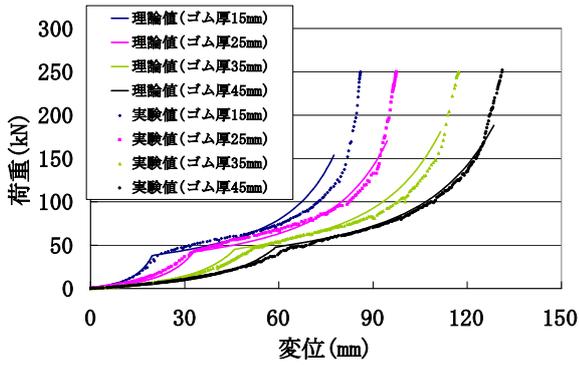


図-18 載荷時におけるモデルと実測結果の荷重-変位関係(鋼管径 80mm, 鋼管厚 6mm)

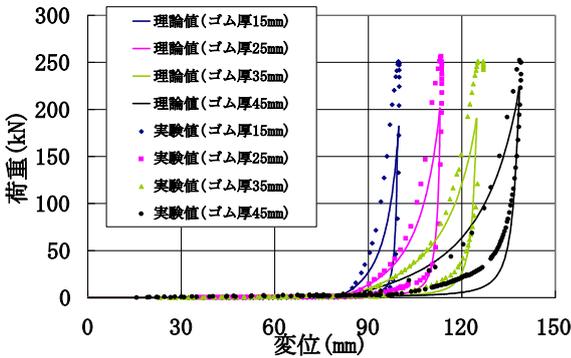


図-19 除荷および再載荷時におけるモデルと実測結果の荷重-変位関係(鋼管径 80mm, 鋼管厚 6mm)

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、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、

$$M_2 = 0.3183P \cdot R \quad (9)$$

と表される¹¹⁾。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、 γ_2 を次式で定義する。

$$\gamma_2 = \frac{M_2}{M_1} - 1 \quad (10)$$

これは、基本伝達荷重分布角度 $\alpha = 90 - \alpha'$ 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。つまり、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 の関係を図-17のように仮定すると、次式のように表せる。

$$\alpha = \cos^{-1} \frac{R_0 - \frac{\Delta}{2}}{R_0} \quad (11)$$

しかし、実際にはもう少し狭い範囲で荷重が分布していると考えられる。また、降伏荷重の増加に対する要因が(2)節のゴム管の曲げ抵抗による荷重増加分と、本節の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であることから、本節の寄与分を説明するために係数 β を考慮してモデル化する。

$$\alpha' = 90 - \beta\alpha \quad (12)$$

$$\beta = \left(1 - 0.7 \frac{t_r R_i}{t_p R_o} \right) \times 0.9 \quad (13)$$

(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も前回の研究¹⁰⁾と変わっていないため詳細な部分については割愛させて頂く。

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。

(7) モデル化の精度

(1)節~(5)節の関係をを用いて載荷時の荷重-変位関係、(6)節から除荷時と再載荷時の荷重-変位関係を予測した。図-18, 19に実験値と理論値を併せて示した。図-18より、伝達特性以外の特性の評価に関しては精度良くモデル化できているといえる。しかし、伝達特性による荷重増加分の考慮の仕方に問題があるため、モデル化の精度が良好ではない部分もある。伝達特性の評価に関しては今後の課題とする。

図-19より除荷時と再載荷時のモデルは、実験値によく近似していることがわかる。

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

(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。

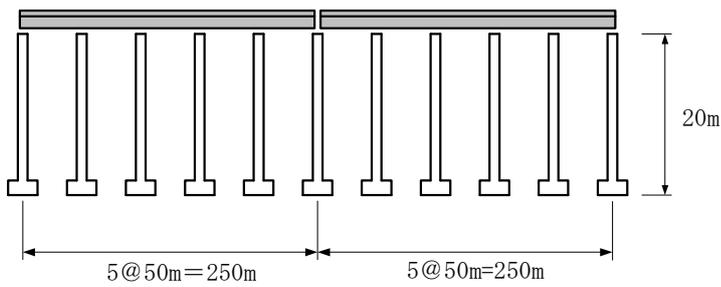


図-20 解析対象橋¹²⁾

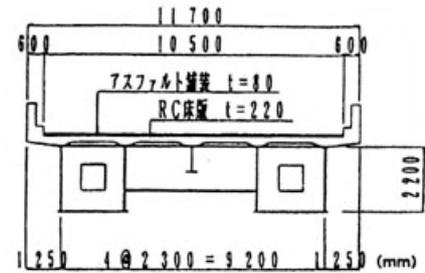


図-21 上部構造断面図¹²⁾

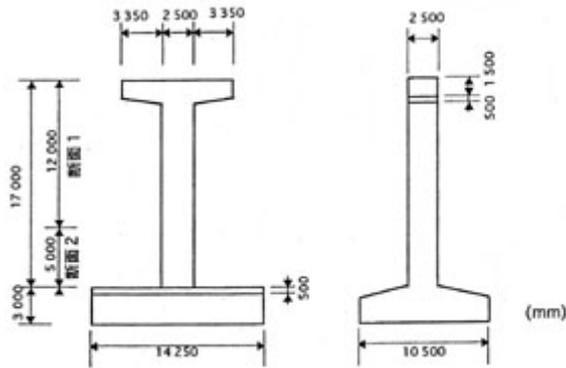


図-22 橋脚高さ20mの鋼製橋脚¹²⁾

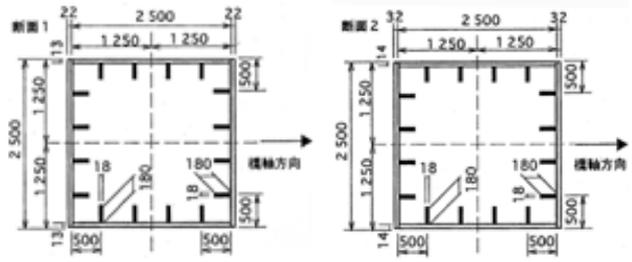


図-23 鋼製橋脚断面図¹²⁾

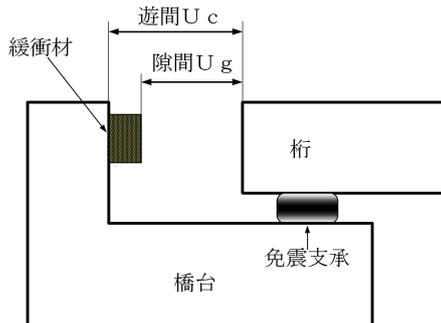


図-24 橋台部に緩衝材を設置した例

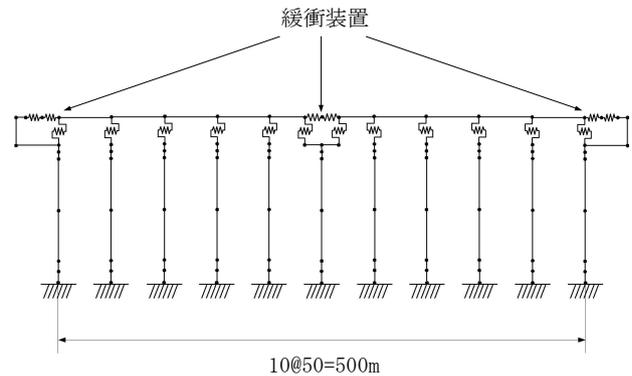


図-25 解析モデル

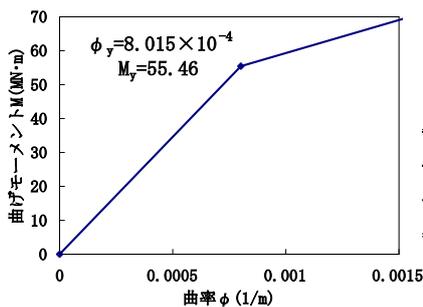


図-26 橋脚のM-φ関係¹²⁾

表-1 免震支承を表すバネの特性値

免震支承	初期剛性(MN/m)	等価減衰定数	降伏点ひずみ(ε)	剛性の低下率(a)
端支点用	11.6	0.234	0.0342	0.154
中間支点用	36.0	0.186	0.0190	0.154

(2) 対象構造物および解析モデル

対象構造物は図-20 に示すように橋脚高さが 20m、支間長 50m の 5 径間連続橋が 2 連つながった長大免震橋とした。上部構造は、図-21 に示すように 5 径間分の総重量 3250t の鋼箱桁とし、下部構造は、図-22 に示すように断面変化が 1 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 1:3.36×10⁷ cm⁴, 断面 2 次モーメント 2:2.52×10⁷ cm⁴)とした¹²⁾。鋼製橋

脚断面図を図-23 に示す。

本解析では、桁同士および橋台と桁との衝突現象を扱うために、両端の橋脚を剛体として、橋台とみなした。また緩衝材は、両橋台部、桁間の 3 ヲ所に設置することとした。橋台部に緩衝材を設置した概念図を図-24 に示す。

解析モデルを図-25 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(バイリニアモデル)でそれぞれモデル化した。
 図-26に鋼製橋脚のM- ϕ 関係¹²⁾を示す。また表-1に免震支
 承を表すバネの特性値を示す。

(3) 緩衝材及び衝突のモデル化

ゴム鋼併用型耐震緩衝材の荷重-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
 非線形バネ(非対称トリリニアモデル)で簡易的にモデ
 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た。また引張側(プラス側)には
 機能しないものとした。鋼管が圧壊して荷重が立ち上
 がる箇所は、緩衝材の剛性に関係なく桁の軸方向剛
 性と同一とした。また、緩衝材の個数については、剛性
 を個数倍していくことで考慮した。

緩衝材と桁の間には、隙間と衝突を表現するための仮
 想的なバネ^{13),14)}を挿入した。仮想バネとは圧縮側に隙
 間変形した時(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13),14)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、緩衝材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 1.31
 $\times 10^4 \text{MN/m}$ とし、引張側には、抵抗力が働かないように
 剛性を0とした。

(4) 解析条件及び入力地震波

本解析で対象とする緩衝材は、ゴム厚の影響について
 比較検討しやすくするために外径70mm、厚さ6mmの鋼管
 とその鋼管の外側に厚さ40mmのゴムを巻いたものを扱
 うこととした。以下、鋼管のみを0-0、ゴム厚40mmのゴ
 ム鋼併用タイプを0-40と呼ぶこととする。また、実用
 的な観点から緩衝材の奥行きを実験値の2倍の200mmを
 想定した。そのため解析で扱う緩衝材の剛性およびエネ
 ルギー吸収量は2倍になるとした。

遊間については、震度法に用いる免震装置の設計変位
 を基本に主要構造物間の遊間を定めることにしている免
 震設計法マニュアル¹⁵⁾を利用して遊間を算出した。した
 がって、地震時保有水平耐力法で規定しているような大
 規模地震時には、衝突が生じる可能性がある。算出した
 結果、遊間量は大体15cmとなった。また想定している緩
 衝材0-40の外径が150mmより、橋台部および桁間の遊間
 を15cm又は20cmとした。

緩衝材の個数については、図-1に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、圧壊した時の緩衝材の面積がおおく見積もって外
 径の2倍になると仮定した場合、以下に示す数がそれぞ
 れ設置可能であると考えられる。

1) 0-0(外径7cm)を想定した場合

幅員÷緩衝材がつぶれた時の幅=10m÷(7×2)≒71個
 設置可能

2) 0-40(外径15cm)を想定した場合

10m÷(15×2)≒33個設置可能

また、衝突が起きないとした場合における5径間連続桁
 の中央節点の最大応答速度が、入力する地震波によって
 0.70~0.90m/sの値を示した。ここで、桁の最大応答速
 度を0.80m/sと想定して桁の運動エネルギーを計算する
 と、大体1040kN・mになる。これを左橋台部と桁間の緩衝
 材で吸収すると仮定した場合、一カ所で520kN・mのエネ
 ルギーを吸収することになり、0-0の場合、1個当たりの
 総エネルギー吸収量が約8.0kN・mよりおよそ65個、0-40
 の場合、1個あたりの総エネルギー吸収量が約12.0kN・m
 よりおよそ44個必要となる。しかし、緩衝材が直接的に
 地震力を低減することを目指すものではないと考えられ
 ている。そこで、落橋防止構造の分担率を利用して必要
 な個数を算出した。次式²⁾に示す。

$$E_G = \frac{1}{2} m V^2 \quad (14)$$

ここで、

E_G : 地震時に上部工に発生する最大エネルギー

m : 上部工の質量

V : 上部工の最大応答速度

$$E_D = \alpha \cdot E_G \quad (15)$$

ここで、

E_D : 落橋防止構造の分担エネルギー

α : 落橋防止構造の分担率 = W_D / W_U

W_D : 落橋防止構造の上部工分担重量

W_U : 全上部工重量

上記の式を用いて緩衝材の個数を計算する。但し、落
 橋防止構造の上部工分担重量は、道路橋示方書¹⁾に規定
 されている設計地震力 H_F に相当する重量としている。

計算した結果、落橋防止構造の分担エネルギーは、大
 体125kN・mとなった。したがって、0-0では約16個、0-40
 では約11個必要になってくる。

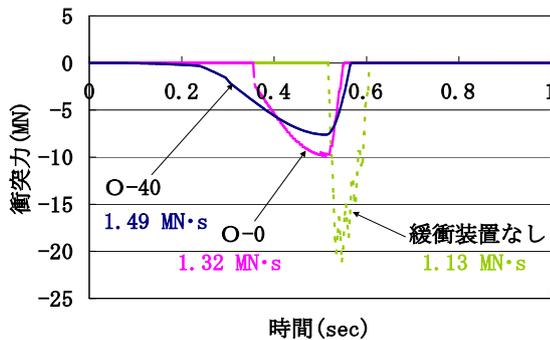


図-27 衝突力の時刻歴

以上よりこれらの結果を参照して、緩衝材の個数を15, 30, 45個設置することを想定してモデル化した。

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10秒とした。

(5) 解析結果及び考察

a) ゴム鋼併用タイプ緩衝材の緩衝効果

図-27に緩衝装置がない場合の衝突パネに生じる衝突力、O-0及びO-40を30個設置した場合の緩衝材に生じる衝突力を時刻歴で示した。またそのときの力積も併せて示した。但し、衝突が最初に起きた左橋台部の緩衝材に着目し、遊間 $U_c=15\text{cm}$ の場合を示した。図-27よりいずれの場合も、衝突は約0.2秒から0.6秒の間に一回生じた。緩衝材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O-0を用いた場合には剛性が大きいので急に衝突力が上昇するが、提案した緩衝材O-40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の場合と比べ長いので、緩衝材としての機能時間は長いと言える。

b) 個数および遊間の違いによる比較

図-28に遊間 U_c を15cm, 20cmとし、O-0及びO-40を15, 30, 45個設置した場合の桁間部, 両橋台部の緩衝材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。しかし桁間部ではO-40の方が衝突力は大きくなっている。これはO-40の場合、隙間 U_g がなく振動初期から機能するためである。

遊間 U_c 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り、免震装置で桁の運動エネルギーを吸収

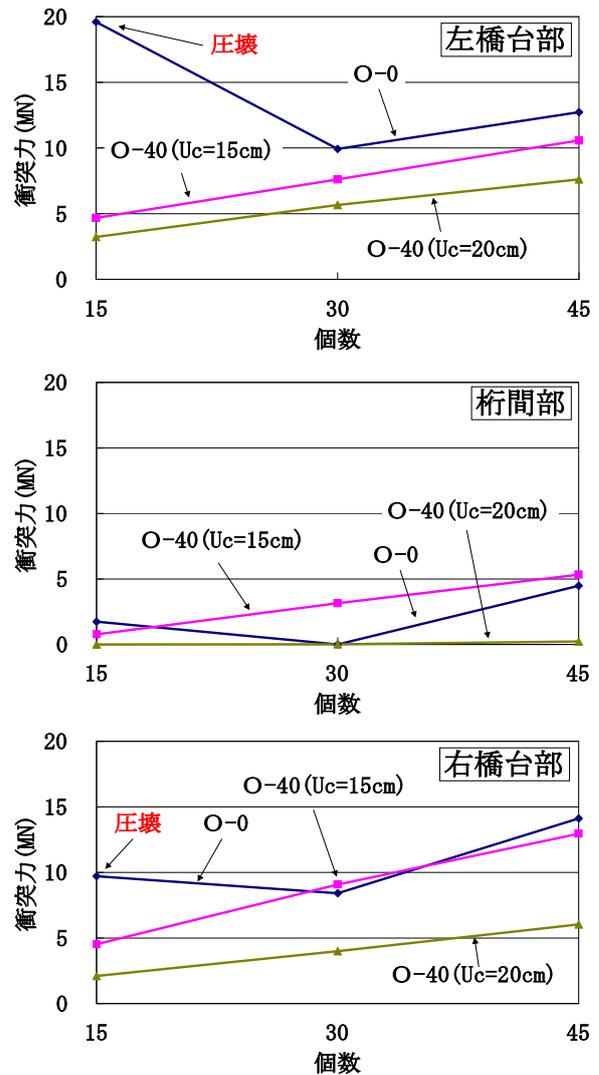


図-28 緩衝材の個数と衝突力の関係

しようとするため、衝突時の桁の応答速度は小さくなると考えられる。そのため緩衝材自体の圧縮変位は小さくなり、衝突力も小さくなったといえる。また緩衝材は、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。

c) 緩衝材のエネルギー吸収効果

表-2に遊間 $U_c=15\text{cm}$ とし、O-0及びO-40を15, 30, 45個設置した場合と、遊間 $U_c=20\text{cm}$ 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材に着目した。また解析で想定した緩衝材がどれだけ桁の運動エネルギーを吸収したかを表すために、(4)節で記述した桁の運動エネルギー全てを直接緩衝材で吸収する場合と桁の運動エネルギーを分担して吸収する場合のそれぞれ必要とされるエネルギー吸収量(直接: $520\text{kN}\cdot\text{m}$, 分担: $125\text{kN}\cdot\text{m}$)で割ったものを吸収率として表-2に示した。表-2より $U_c=15\text{cm}$ 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、

表-2 緩衝材の総吸収エネルギー量と吸収率

緩衝材及び遊間	個数	総吸収エネルギー量 (kJ・m)	吸収率	
			分担して吸収	直接に吸収
0-0 (Uc=15cm)	15	153	1.22	0.29
	30	271	2.17	0.52
	45	290	2.32	0.56
0-40 (Uc=15cm)	15	229	1.83	0.44
	30	302	2.42	0.58
	45	386	3.09	0.74
0-40 (Uc=20cm)	15	107	0.86	0.21
	30	163	1.30	0.31
	45	194	1.55	0.37

表-3 左側の連続桁およ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)	作用する衝突力 (MN)
衝突なし	+13.0	+235	0
	-16.4	-223	
緩衝材なし	+18.7	+2527	21
	-15.7	-2315	
O-0 (Uc=15cm)	+18.2	+958	10
	-12.8	-890	
O-40 (Uc=15cm)	+15.3	+418	7.6
	-11.6	-396	
O-40 (Uc=20cm)	+17.0	+415	5.7
	-14.5	-391	

桁が開く方向(プラス側), 桁が閉じる方向(マイナス側)

O-40の方が小さい。これはUc=20cm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。吸収率をみると、分担して吸収する場合は、Uc=20cmでO-40を15個設置した場合以外は、すべて1.0を越えており、安全側に設計できるといえる。しかし直接、緩衝材で吸収する場合はどれも1.0未満で、Uc=15cmでO-40を45個設置した場合でも吸収率は、0.74である。実用的な面から考えて、多くの緩衝材を設置するスペースを取るのは難しい。またスペースがあったとしても緩衝材1個当たりのコストを考えた場合、不経済になってしまう可能性がある。したがって、桁の運動エネルギーは、分担して吸収することが設計上望ましいといえる。

d) 緩衝材の動的特性が橋梁全体系に与える影響

下記に示す5つの場合について、左側の5径間連続桁の中央節点における最大応答変位、最大応答加速度及び左橋台部のパラペットおよび緩衝材に作用する最大衝突力の結果を表-3に示した。但し、左橋台部からみて、桁が開く方向をプラス側、桁が閉じる方向(衝突が起きる

方向)をマイナス側としている。

解析条件：

- 衝突が起きないようにパラペット部分を取り除いた場合
- 緩衝材を設置しない場合
- 遊間Uc=15cmとし、O-0を30個設置した場合
- 遊間Uc=15cmとし、O-40を30個設置した場合
- 遊間Uc=20cmとし、O-40を30個設置した場合

表-3より桁の最大応答変位と最大応答加速度は、衝突によって桁が開く方向(プラス側)の値が大きくなることがわかる。衝突方向つまり桁が閉じる方向(マイナス側)の最大応答変位は、緩衝材を設置しているので衝突なしの場合および緩衝材なしの場合と比べ小さくなっている。O-40を遊間Uc=15cmの場合と遊間Uc=20cmの場合で比べると、遊間が大きい方が桁の最大応答変位は大きくなるが衝突力は小さくなっている。これは、遊間Uc=15cmだと隙間がないので桁の振動初期からO-40が機能するため最大応答変位は減少した。一方、Uc=20cmでは隙間が5cmあるため応答変位はUc=15cmの場合と比べ大きくなったが衝突力は減少したと考えられる。

桁が開く方向の応答値に注目するとO-40では、最大応答変位、最大応答加速度が共に緩衝材なしの場合やO-0と比べて小さい。このことからO-40は、衝突による桁の離反応答が増加するのを制限するといえる。そのため他の部材や支承に与える影響は小さいと考えられる。

O-0とO-40を比較した場合、緩衝材に作用する衝突力と表-3の総エネルギー吸収量から、O-40はO-0と比べ衝突力を低減でき、エネルギー吸収量も大きいことがいえる。

5. 結論

本研究では、落橋防止装置の緩衝材として、ゴム管と鋼管を併用した緩衝材について、基礎特性及び動的特性を静的圧縮試験及び動的応答解析によって検討した。静的圧縮試験より、鋼管の外側にゴム管を巻く形式の緩衝材の荷重-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。そこでモデル化の妥当性を確認するために再度ゴム厚、鋼管厚等の寸法を変えて静的載荷実験を行い、ゴム鋼管併用型緩衝材の力学モデルを再検討した。またゴム鋼併用型緩衝材が、橋梁システム全体系の動的挙動にどのような役割、効果をもたらすかについて検討するために、ゴム鋼併用型耐震緩衝材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。

本研究から得られた結論を以下に示す。

- 1) ゴム鋼併用型耐震緩衝材の荷重-変位関係のモデル化においてゴムから鋼管への力の伝達特性の部分に不明確な部分がある。荷重の分布幅をどう評価するかが今

後の課題である。それ以外の特性では精度良くモデル化できる。

- 2) 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、緩衝材としての機能時間が長い。
- 3) 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。
- 4) 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と考えられる。
- 5) 衝突前の桁の最大応答速度がわかれば簡単な計算で、必要とする緩衝材の個数を設定することが可能である。但し、緩衝材だけで桁の運動エネルギーを直接吸収させることは非合理的である。

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、土井雄司氏、佐藤貴之氏、鏑田直希氏、渡邊淳史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) 日本道路協会：「道路橋示方書・同解説，V 耐震設計編」，1996.12.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 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) 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，Vol689/I-55，pp.99-112，2001.4.
- 6) 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，Vol689/I-57，pp.275-288，2001.10.
- 7) 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，Vol661/I-53，pp.71-83，2000.10.
- 8) 園田佳巨，西本安志，石川信隆，彦坂熙：落橋防止用矩形状ゴム製緩衝材の性能評価に関する基礎的考察，土木学会論文集，Vol689/I-57，pp.215-224，2001.10.
- 9) 皆川勝，藤谷健，高嵩太一，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.
- 10) 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，Vol689/I-57，pp.343-353，2001.10.
- 11) 土木学会：構造力学公式集，pp.261，pp.408，1986.
- 12) 長嶋文雄：落橋防止装置の衝撃応答特性および設計法に関する研究，文部省科学研究費補助金，基礎研究(C)，1997.3.
- 13) 渡邊学歩，川島一彦：衝突ばねを用いた棒の衝突の数値解析，土木学会論文集，No.675/I-55，pp.129-139，2001.4.
- 14) 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.612/I-46，pp.129-142，1999.1.
- 15) 建設省土木研究所：道路橋の免震設計法マニュアル(案)，1992.

DEVELOPMENT OF SHOCK ABSORBER COMPOSED OF RUBBER AND STEEL PIPES

Masaru MINAGAWA , Taichi Takasaki

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, static loading tests were conducted again to confirm the validity of modeling the load-displacement characteristics, 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.