

鋼製緩衝装置の衝撃性能と設計手法に関する検討

Energy Absorption Performance and Design Method of Steel Shock Absorbers

中田宏司* 長嶋文雄** 都築昭夫*** 金子 修**** 大竹省吾*****

Koji NAKATA, Fumio NAGASHIMA, Akio TUZUKI, Osamu KANEKO and Syogo OHTAKE

- | | | |
|-------|------------------------|--------------------------------|
| * | (株)日本構造橋梁研究所 設計部 | (〒107-0062 東京都港区南青山 5-12-4) |
| ** | 工博 東京都立大学助教授 工学研究科 | (〒129-0367 東京都八王子市南大沢 1-1) |
| *** | 川口金属工業(株) 技術部 | (〒332-0028 埼玉県川口市宮町 18-19) |
| **** | (株)サクラダ 橋梁設計部 | (〒272-0002 千葉県市川市二俣新町 21) |
| ***** | (株)オリエンタルコンサルタンツ 総合技術部 | (〒450-0002 愛知県名古屋市東区名駅 2-38-2) |

キーワード： 緩衝装置、 耐衝撃設計、 鋼製緩衝工、 耐震工学

(Shock absorption device, Seismic design, Steel shock absorber, Earthquake engineering)

1. はじめに

兵庫県南部地震以降、衝撃的な地震力を緩和するために、橋梁の落橋防止構造には緩衝材が設置されるようになった。ところが道路橋示方書¹⁾等の設計基準では、緩衝効果についての規定がないために、耐震設計上、緩衝材の性能については十分な検討がなされていない。また緩衝材の材料としては一般的にゴムが用いられており、それ以外の材料は使われていないのが現状である。

そこで本研究では、静的載荷実験によりゴムの緩衝効果や力学特性を確認するとともに、ゴムに変わる緩衝材として、衝撃エネルギー吸収性能のよい鋼製緩衝装置を提案し、実験および解析により、その緩衝効果を確認した。さらにエネルギー吸収を考慮した設計法を提案している。

鋼製緩衝装置とは、入手しやすく安価な形鋼を利用した緩衝材である。構造物が鋼製緩衝装置に衝突した場合、形鋼の一部分は塑性化するが、その後も形鋼が圧壊するまでは耐荷力を維持するために、衝突エネルギーの吸収という面では効率がよいという特性がある。本研究では、鋼管、角形鋼管、およびL形鋼を利用した、4種類の鋼製緩衝装置について、その有効性を検討した。

鋼製緩衝装置を実橋へ使用した場合の設置イメージを図-1に示す。

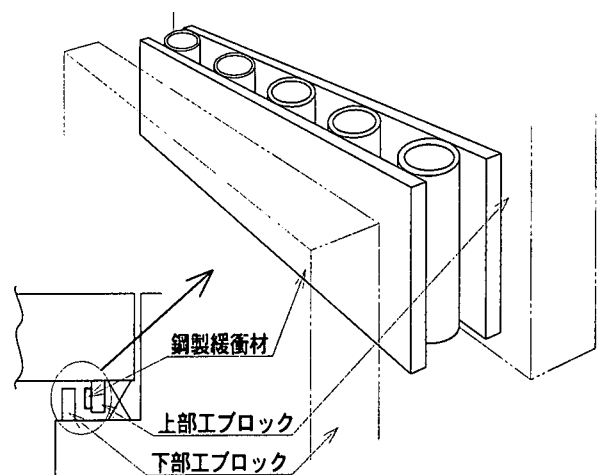


図-1 鋼製緩衝装置の実橋への設置イメージ

2. 実験

2.1 実験方法

ゴム製の試験体1種類と鋼製の試験体4種類との計5種類の試験体を用い、定盤上に置いた試験体の静的載荷実験をそれぞれ3シリーズ行い、荷重-変位関係を測定した。ゴム製試験体については、落橋防止装置のゴム製緩衝材の設計に用いる許容支圧応力度の5倍程度(11.76x5=58.8N/mm²)の支圧応力度になるまで載荷した。鋼製試験体については、試験体がほぼ完全に圧壊するか、または急激に荷重が立ち上がる領域まで載荷した。実験には最大荷重1960KNの載荷試験機を用い、ゴム製緩衝材について

は荷重制御で、鋼製緩衝材については変位制御で実験を行なった。

2. 2 試験体形状

ゴム製の試験体（A-Type）は、落橋防止構造の緩衝材として一般的に使われているクロロプレンゴムを使用し、厚さを50 mmとした。平面寸法は試験機の能力から決定した。

（図-2）

鋼製の試験体（B～E-Type）は、材質をSS400相当とし、市販の形鋼を用いて簡単に製作出来るものとした。また、試験体が完全に圧壊した場合のストロークが、ゴムの厚みとほぼ同じになるような寸法の形鋼を選定した。鋼製試験体の形状寸法を図-3～図-6に示す。

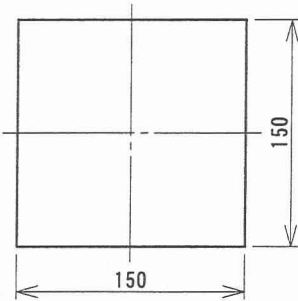


図-2 A-Type 形状図

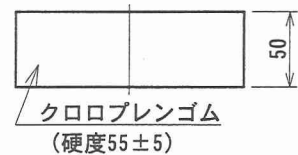


図-3 B-Type 形状図

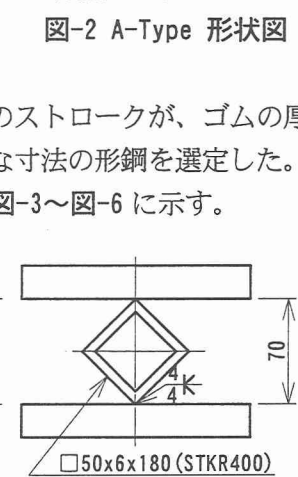


図-4 C-Type 形状図

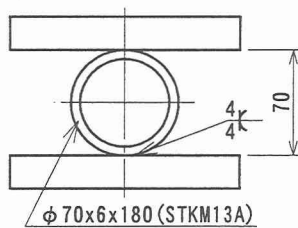


図-5 D-Type 形状図

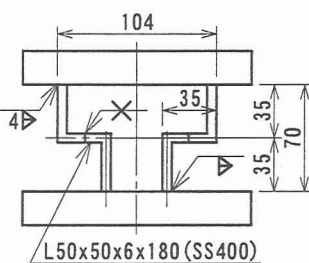


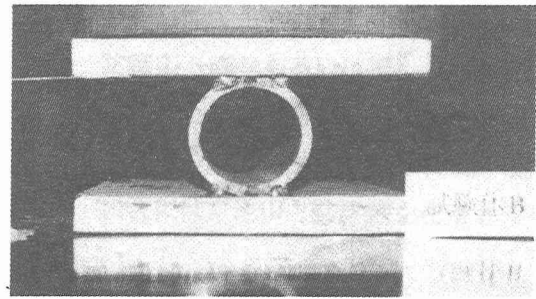
図-6 E-Type 形状図

2. 3 実験結果

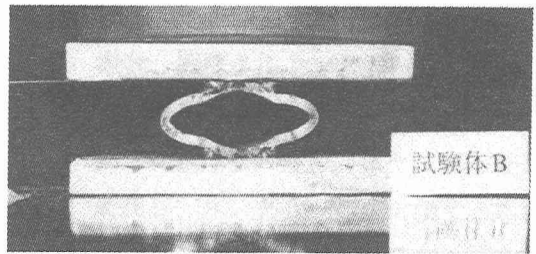
(1) 変形状態

鋼製試験体の代表的な変形状態として、B-Typeの場合を図-7に示す。

<初期状態>



<変位 25 mm>



<変位 50 mm>

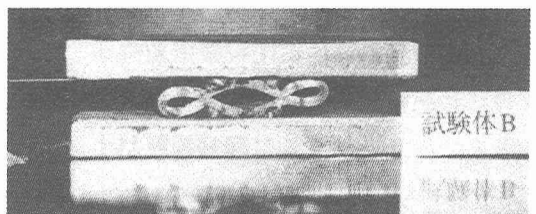


図-7 B-Type 変形状態

(2) 荷重変位曲線

A-Typeの荷重-変位曲線を図-8に示す。変位の小さい部分では曲線の傾きは穏やかだが、変位が増加するに従い急激に傾きも大きくなった。またシリーズ毎で大きなばらつきが出た。

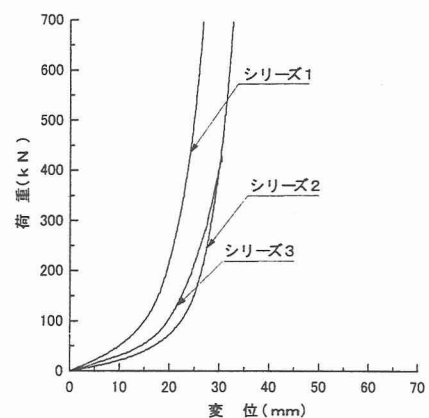


図-8 A-Type 荷重-変位曲線

B-Typeの荷重-変位曲線を図-9に示す。荷重は降伏荷重まで立ち上がった後はほぼ一定値を保ち、溶接部近傍にくびれが生じ始めたところで一度下がり、その後上下の部材が接触し急激に荷重が上がり始めた。シリーズ毎のばらつきはほとんどなかった。

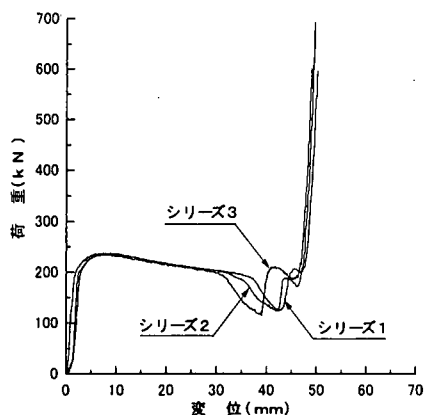


図-9 B-Type 荷重-変位曲線

C-Type の荷重-変位曲線を図-10 に示す。荷重は降伏荷重まで立ち上がった後は圧壊するまでほぼ一定の値を保った。またシリーズ毎のばらつきはほとんどなかった。

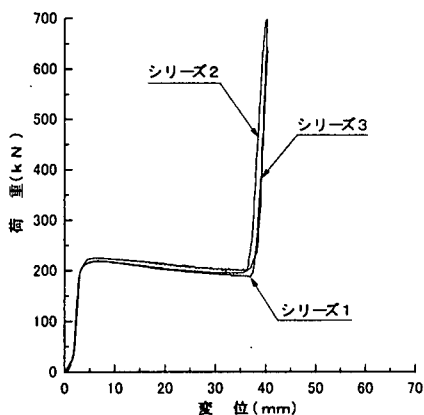


図-10 C-Type 荷重-変位曲線

D-Type の荷重-変位曲線を図-11 に示す。荷重は、降伏荷重まで立ち上がった後は圧壊するまでほぼ一定の値を保った。降伏荷重はB-Type の2割程度しかなかった。またシリーズ毎のばらつきはほとんどなかった。

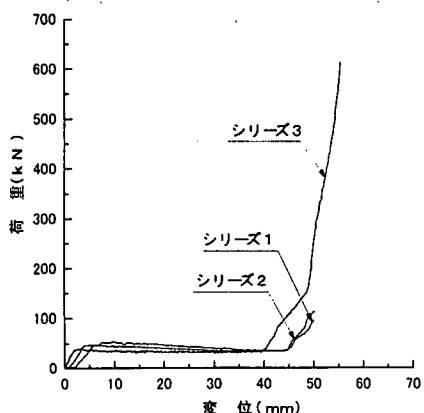


図-11 D-Type 荷重-変位曲線

E-Type の荷重-変位曲線を図-12 に示す。荷重は降伏荷重まで立ち上がった後はほぼ一定の値を保ち、その後角部が上下の鋼板に接触して、荷重が急激に立ち上がったため、完全な圧壊までには至らなかった。またシリーズ毎のばらつきはほとんどなかった。

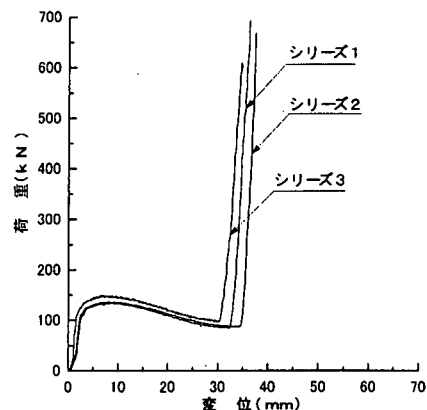


図-12 E-Type 荷重-変位曲線

(3) エネルギー吸収量

測定された荷重 P - 変位 δ 関係から、それぞれの試験体のエネルギー吸収量を式(1)により計算した。

$$E = \sum (\delta_{i+1} - \delta_i) \times (P_{i+1} + P_i) / 2 \quad \dots\dots (1)$$

ここに i : 载荷ステップ

計算した各タイプ毎の累積エネルギー吸収量を図-13 に示す。鋼製の試験体は、いずれも変位に対してコンスタントなエネルギー吸収性能を示している。

また、変位 25mm までの B-Type および C-Type のエネルギー吸収量はゴム製緩衝材の 2.5 倍以上あり、鋼製緩衝装置が良好なエネルギー吸収性能を有していることがわかる。一方ゴムの場合、载荷初期の剛性が小さいことから、ある程度変位が進まないとエネルギー吸収が見込めない結果となった。

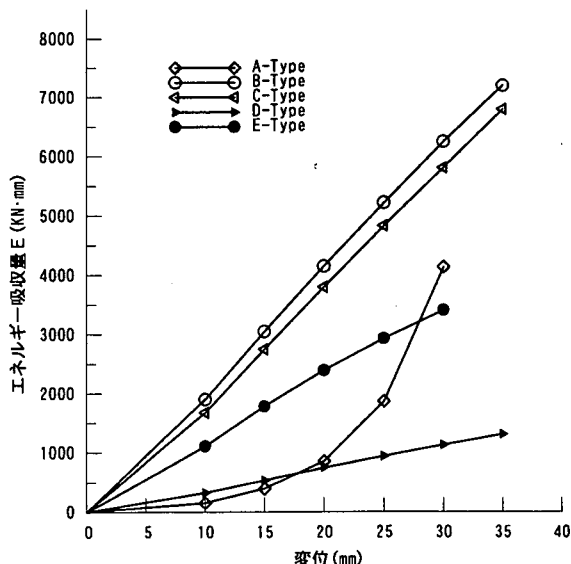


図-13 エネルギー吸収量と変位の関係

3. 解析

3. 1 解析方法

鋼製緩衝装置について、衝撃荷重による応答特性を把握するために、有限要素動的応答解析を行った。解析には、市販の汎用コードであるLS-DYNAを用いた。時間積分は中心差分法であり、用いた要素は3次元破壊要素である。

载荷方法は重量98kNの物体を80cm/secの速度で衝突させる方法を用いた。

3. 2 解析モデル

図-14～図-17に有限要素モデルを示す。

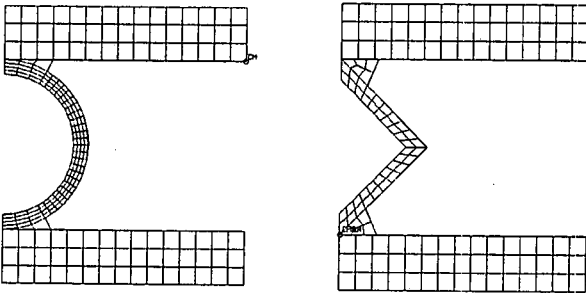


図-14 B-Type 要素分割図 図-15 C-Type 要素分割図

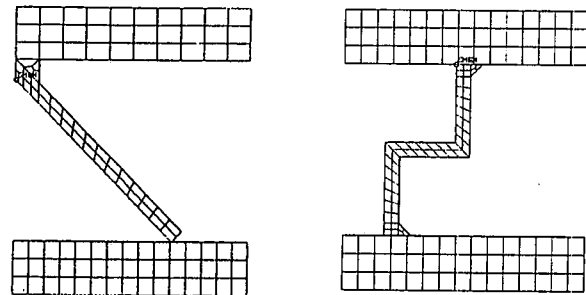


図-16 D-Type 要素分割図 図-17 E-Type 要素分割図

3. 3 解析結果

ここでは、B-Typeについて述べるが、他の鋼製緩衝装置も同様の傾向を示している。

変形性状の時刻歴を図-18に示す。塑性変形の後、衝突体を跳ね返す様子が再現できている。

図-19に示す荷重-時間線図より、荷重値は衝突から0.03sec程度までほぼ一定値を保っており、良好なエネルギー吸収性能を有していることがわかる。

図-20に衝突体の加速度時刻歴を示す。これより衝突体は、衝突時にほぼ一定の加速度で減速され、その後0.03sec程度まで変動はあるものの一定の加速度を保つことが確認できた。このことは、鋼製緩衝装置が衝撃荷重を受ける際にも、良好なエネルギー吸収性能を有していることを示している。

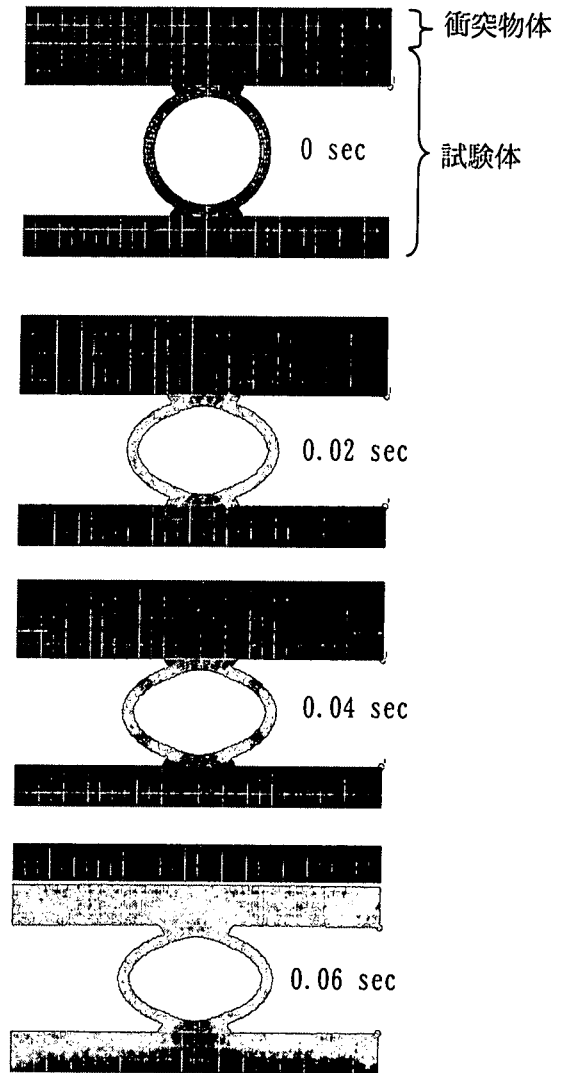


図-18 B-Typeの変形時刻歴

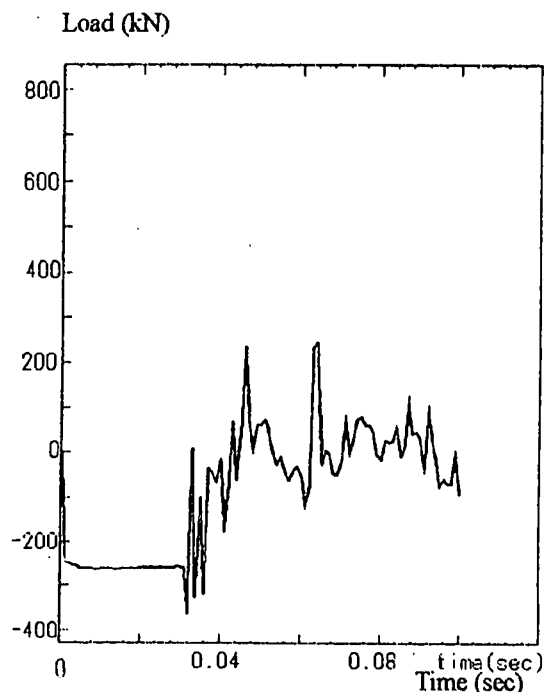


図-19 B-Typeの荷重-時間線図

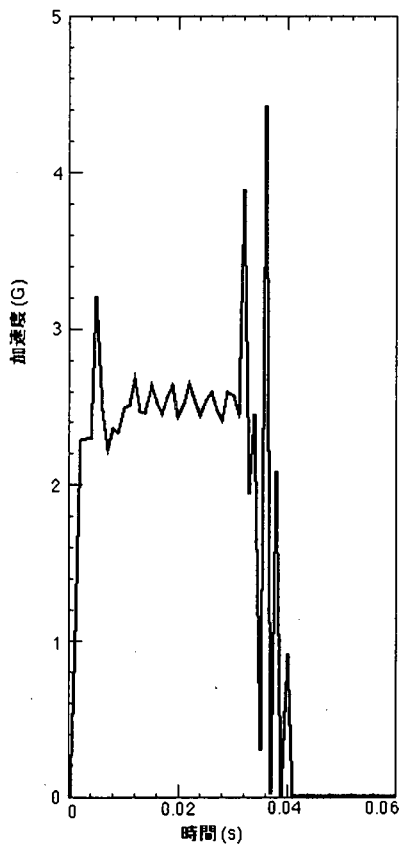


図-20 B-Type における衝突体の加速度時刻歴

4. 鋼製緩衝装置の設計法の提案

鋼製緩衝装置のエネルギー吸収量 W は、降伏荷重 P と幾何形状から決まる変形許容量 δ とから内部仕事として計算できる。

$$W = P \times \delta \quad \dots\dots (2)$$

従って、地震時に生じる橋梁上部工の運動エネルギー E_0 を動的解析などから算出すれば、この運動エネルギーを吸収することのできる緩衝材の設計が式(3)により可能となる。

$$W > E_0 = \frac{1}{2} \times m \times v^2 \quad \dots\dots (3)$$

さらに、形鋼を組み合わせる等して変形許容量 δ を変えることにより、橋梁下部工への伝達力 T_{max} を任意に設定することも可能である。

$$T_{max} > P \quad \dots\dots (4)$$

ここで降伏荷重は、例えばB-Type については、以下の手順で算出する。

鋼管の片側部分に作用するモーメント M は、図-21 のモーメント図から式(5)で表わされる。

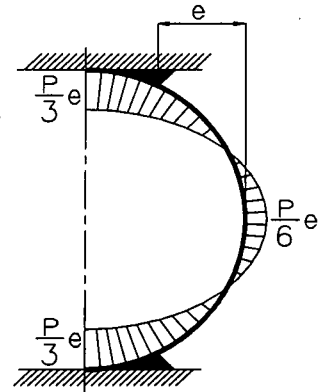


図-21 B-Type モーメント図

一方、全塑性モーメント M_p を式(6)で算出すれば、式(7)により降伏荷重 P を計算できる。

$$M = \frac{1}{3} \times P \times e \quad \dots\dots (5)$$

$$M_p = 2 \times d \times \frac{t}{2} \times \frac{t}{4} \times \sigma_{max} \quad \dots\dots (6)$$

$$P = \frac{3 \times M_p}{e} \quad \dots\dots (7)$$

ここに、 P : 降伏荷重

e : 溶接ビード端部から鋼管中央断面の中心軸までの距離

d : 部材長

t : 板厚

σ_{max} : 鋼棒の引張試験で得られた真応力の最大値

同様に、C-Type および E-Type についても、部材に作用するモーメントを式(8)により与えれば、降伏荷重を算出できる。

$$M = \frac{1}{4} \times P \times e \quad \dots\dots (8)$$

静的載荷実験における降伏荷重の平均値と、計算で求めた降伏荷重を比較したものを表-1 に示す。

表-1 降伏荷重 P (kN)の実験値と計算値の比較

	B-Type	C-Type	E-Type
実験値	237	222	141
計算値	257	226	142

比較の結果、実験値と計算値との差は1割以下であり、よく一致しているといえる。このことから、

緩衝材の設置スペースや吸収するエネルギー量などの諸条件の違いによって、形鋼の大きさや板厚を変化させても、降伏荷重は計算により求めることができるといえる。

また衝撃荷重による実挙動では、歪み速度効果のため、降伏荷重は静的載荷時より少し大きくなるが、設計上は、歪み速度効果を考慮しない降伏荷重を用いれば、安全側となる。

5. 結論

(1) 静的載荷実験結果より、ゴムの試験体は初期剛性が低く、変形量の小さな領域におけるエネルギー吸収はほとんど見込めない。また変形が進むと剛性が急激に高くなり、エネルギー吸収量は増加するものの、荷重も非常に大きくなる。このことから、落橋防止構造に取り付けられる緩衝材の役割を、衝撃エネルギーの減少・吸収および下部工に伝達される地震力の低減と考えた場合、ゴムを緩衝材として用いることのメリットは、限定的なものとなる。

またゴムの試験体の実験結果にばらつきがあることから、緩衝効果を実設計に取り入れる場合、ゴムのエネルギー吸収性能は安全側に低く見ておく必要があると考えられる。

(2) これに対し鋼製緩衝装置については、実験を行ったいずれのタイプでも初期剛性が高く、かつ、降伏後に長く一定荷重を保てる特性があり、大きなエネルギー吸収を見込める実験結果が得られた。

また実験結果にばらつきがほとんどないことから、実験で得られたエネルギー吸収性能は、実設計でも十分適用が可能であると考えられる。

(3) 衝撃解析では、衝突物体は、衝突時にほぼ一定の加速度で減速されることが確認できた。これは鋼製緩衝装置が、衝撃荷重を受ける際にも、良好なエネルギー吸収性能を有していることを示している。

なお、今後鋼製緩衝装置の衝撃実験を行い、解析結果の検証を行うつもりである。

(4) 鋼製緩衝装置の降伏荷重は、作用するモーメントと全塑性モーメントの釣り合いから算出することができ、計算結果は実験結果とよく一致した。また、降伏荷重と変位の積を鋼製緩衝装置が吸収できるエネルギーと考えることで、鋼製緩衝装置の設計法を提案することができた。

さらに形鋼の寸法や板厚を変化させれば、下部工への伝達力を任意に設定できることを示した。

【参考文献】

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 (1996)
- 2) 中田宏司，長嶋文雄，都築昭夫，大竹省吾，金子修：鋼製緩衝装置の荷重変形特性に関する実験的検討，土木学会第54回年次学術講演会概要集 1-B pp. 424-425 (1999.9)
- 3) 島田泰至，長嶋文雄，皆川勝，寺尾圭史，佐藤豪：鋼製緩衝装置の緩衝効果に関する解析的検討，土木学会第54回年次学術講演会概要集 1-B pp. 428-429 (1999.9)
- 4) 都築昭夫，長嶋文雄，中田宏司，大竹省吾，金子修：鋼製緩衝材の荷重変形特性に関する実験的検討，日本鋼構造協会，鋼構造年次論文報告集 Vol.7 pp.9-14 (1999.11)
- 5) 島田泰至，長嶋文雄，皆川勝，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，日本鋼構造協会，鋼構造年次論文報告集 Vol.7 pp.15-22 (1999.11)