

20. 防振ゴム材の応力緩衝効果に関する基本考察

東海大学・院 ○南條 聡嗣
 東海大学・院 難波 達郎
 東海大学 近藤 博

1. はじめに

建設機械等において、防振ゴムは重要機能部品をはじめ、部材と部材の間に必ずといっていいほど使われている。防振ゴムの主な使用目的は、防振、緩衝、防音のためである。

防振に関しては、詳細な検討が行われている。一方、緩衝効果については、次のように考察されている。ひとつは、鋼部材を質点、ゴム材をバネとおいた一次元振動系に、衝撃外力が作用したときの応答から、他の鋼部材への伝達力を求める方法¹⁾である。もうひとつは、鋼部材-ゴム材-鋼部材と伝播する進行波のみの検討から、防振ゴムの緩衝効果を検討する方法²⁾である。

前者の問題は、鋼部材を質点として扱うので、鋼部材内部に生じる弾性波の影響を考慮できなのが問題である。また、後者は波動問題で防振ゴムの緩衝効果を検討しているが、進行波のみの考察から、ゴム材の応力緩衝効果が非常に大きいと判断していることある。しかし、このように判断できるのは、衝突する鋼部材から継続時間の短い応力波(継続時間が $\tau_0=2L_r/c_r$ 以下の波。ここに、 L_r はゴム材厚さ、 c_r はゴム材中の波動伝播速度)がゴム材に入力された場合だけである。

応力波の継続時間が τ_0 以上になると、ゴム材に入射した応力波の多重反射の影響を考慮する必要が生じる。すなわち、ゴム材中の応力波の多重反射により、応力波の重ね合わせの現象が生じ、ゴム材及び鋼部材中の応力が大きくなる。例えば、鋼部材長が大きくなると、応力波の継続時間(鋼部材長と比例関係にある)が大きくなり、条件によっては、鋼部材中の応力は、入射応力と同値まで上昇する。同様な現象は、ゴム材が薄くなっても起こる。

本論文では、まず、進行波を採用した既往の考え

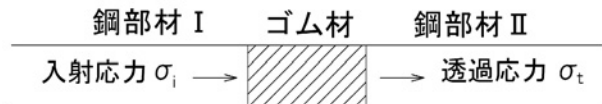


図-1 入射応力波と透過応力波の従来の考え方

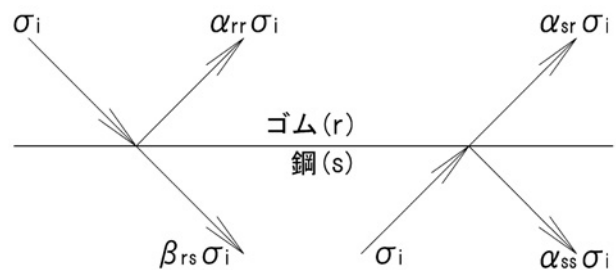


図-2 反射係数と透過係数の記号

方と今回提案する多重反射を考慮したときの応力緩衝効果について述べた。次に、鋼部材が長くなると応力緩衝効果が小さくなることを、ホプキンソン棒を用いた衝突実験により示した。次に、波動伝播モデルを採用したシミュレーションにより、実験波形が再現できることを確認した。さらに、波動伝播モデルにより、ゴム材の応力緩衝効果の基本特性が検証できることを示した。

2. 既往の考え方²⁾

図-1により、鋼部材 I からゴム材、鋼部材 II と応力波が伝播する場合の既往の考え方を説明する。鋼部材 I と鋼部材 II は同材質とし、そのインピーダンスを Z_s 、ゴム材のインピーダンスを Z_r と記す。また、鋼部材からゴム材への応力波の透過係数を β_{rs} 、ゴム材から鋼部材への透過係数を β_{rs} と記すことにする(図-2 参照)と、両透過係数はインピーダンスを用いて次式で示される。

$$\beta_{sr} = 2Z_r / (Z_s + Z_r) \quad (1)$$

$$\beta_{rs} = 2Z_s / (Z_s + Z_r) \quad (2)$$

いま、鋼部材 I から入射応力波 σ_i が伝播すると、鋼部材 II に透過する応力波 σ_t は、両透過係数を用いて次式で求められるとしている。

$$\sigma_t = \beta_{sr} \cdot \beta_{rs} \cdot \sigma_i = \left\{ 4Z_r \cdot Z_s / (Z_s + Z_r)^2 \right\} \sigma_i \quad (3)$$

ここで、鋼部材 (弾性係数 $2.1 \times 10^5 \text{N/mm}^2$, 密度 7850kg/m^3) とゴム材 (弾性係数 4.5N/mm^2 , 密度 1350kg/m^3) のインピーダンス比 ($q=Z_s/Z_r$) は、約 510 になるので、透過応力は

$$\sigma_t = 7.8 \times 10^{-3} \sigma_i \quad (4)$$

となる。

すなわち、鋼部材 I から鋼部材 II に透過する応力は、入射応力 σ_i の約 0.78% と小さくなるので、ゴム材の緩衝効果が期待できるとしている。

以上の説明から明らかなように、既往の考え方は進行波のみ考え、ゴム材中に生じる応力波の多重反射の影響を考慮していないことがわかる。

3. ゴム材中の多重反射と透過応力

ゴム材中の多重反射の様子を検討するために必要となる 2 媒体間の反射係数 α と透過係数 β を図-2 のように定義することとする。図-3 は、鋼部材に挟まれたゴム材中を応力波が反射を繰り返しながら、鋼部材 II に透過していく様子を示したものである。この計算に必要なのが、次式のゴム材と鋼部材の境界面での応力波の反射係数 α_{rr} である。

$$\alpha_{rr} = (Z_s - Z_r) / (Z_s + Z_r) \quad (5)$$

鋼部材 I に入射応力 σ_i が入射すると、ゴム材中の応力 σ_b は式(5)の反射係数と式(1)に示した透過係数を用いて次式で求めることができる。

$$\sigma_b = \frac{\beta_{sr} (1 - \alpha_{rr}^n)}{1 - \alpha_{rr}} \sigma_i \quad (6)$$

ここに、 n は、ゴム材中を応力波が行き来する回数である。ここで、 n の値が大きくなると、 σ_b は次式で表現される。

$$\sigma_b = \sigma_i \quad (7)$$

同様にして、鋼部材 II に入射される応力 σ_{II} は、式(1)、式(2)および式(5)を用いて次式で求めることができる。

$$\begin{aligned} \sigma_{II} &= \beta_{sr} \beta_{rs} (1 + \alpha_{rr}^2 + \alpha_{rr}^4 + \dots + \alpha_{rr}^{2l}) \\ &= \frac{\beta_{sr} \beta_{rs} (1 - \alpha_{rr}^{2l})}{1 - \alpha_{rr}^2} \sigma_i \end{aligned} \quad (8)$$

ここに、 $2l = n - 1$ ($n = 1, 3, 5, \dots$) とする。

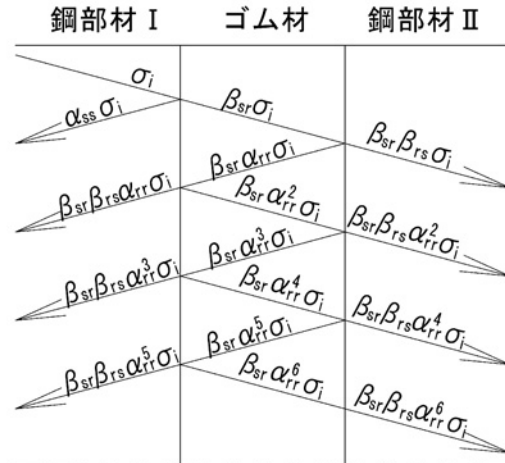


図-3 ゴム材中の応力波の多重反射の状況

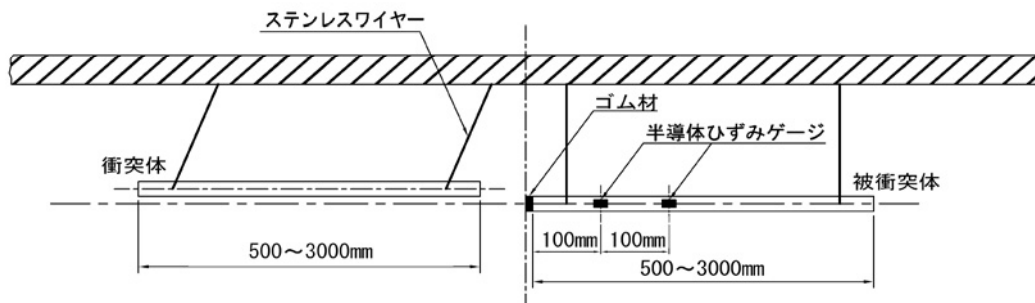


図-4 実験装置の概要

ここで、 l の値が大きくなると、

$$\sigma_{II} = \sigma_i \quad (9)$$

となる。すなわち、入射応力の継続時間が大きくなると、両部材中の応力は入射応力と一致することになる。

4. 検証実験と検討

4.1 実験装置と方法

図-4 に、実験装置の概要を示す。2本の鋼部材模型(直径 25mm, 長さ 500mm(A), 1000mm(B), 2000mm(C), 3000mm(D)の4種)をワイヤーロープで吊り下げ、衝突体を所定の高さ(衝突速度 1m/s, 2m/s を得る高さ)から振り子スタイルで被衝突体に衝突させる方法で実験を行う。本方法は、図-1 で示したモデルで、鋼部材 I に、長さ 500mm~3000mm の鋼部材が衝突するときや、同モデルで、鋼部材 I と鋼部材 II の長さを 500mm~3000mm としたときに、鋼部材 I に衝突力が作用し鋼部材 I がある速度で運動するときの挙動を再現したものである。

ゴム材は、硬度 50 の天然ゴムで、直径 25mm, 厚さ 10mm である。応力波の計測は、被衝突体の衝突面から 100mm, 200mm の 2 点に半導体ひずみゲージを貼付して行った。なお、応力波形はログステーションを用いてサンプリングタイム 1 μ s で収録・処理した。

4.2 実験結果と検討

図-5 は、実験装置の検証のために、ゴム材を設置しないで、実験を行ったときの、鋼部材模型 B(衝突速度 1m/s と 2m/s の 2 段階)と鋼部材模型 C(衝突速度 1m/s)での、衝突応力-時間関係を示したものである。また図中に理論値を破線で示した。

同材質、同断面の鋼部材模型が速度 V_0 で衝突し

たときの、理論応力 σ は、鋼部材模型の弾性係数を E , 鋼部材模型中の波動伝播速度を c とすると、次式で表現できる。

$$\sigma = (E/2c)V_0 \quad (10)$$

式(10)から、衝突応力は衝突速度に比例するが、鋼部材模型の断面積や長さに影響されないことがわかる。ただし、鋼部材模型長が大きくなると、衝突を持続する時間(応力継続時間)が長くなる。図から、実験波形は立ち上がり少々遅れるものの、理論波形に近い矩形波形が得られることがわかる。実験波形から被衝突体への入射エネルギーを計算したところ衝突体の保持したエネルギーの約 98% になった。よって、ホプキンソン棒を鋼部材模型に採用した本実験装置により、ゴム材の応力緩衝効果が精度良く検討できることになる。

図-6 は、同じ長さの衝突体と被衝突体が、境界

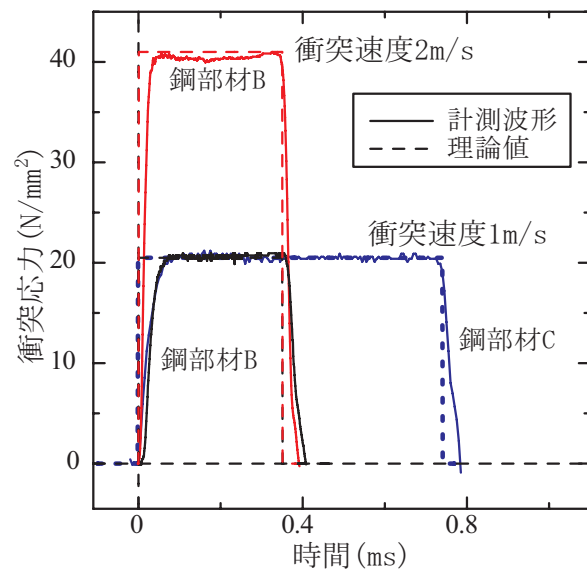


図-5 ゴム材を設置しないときの理論波形と実験波形

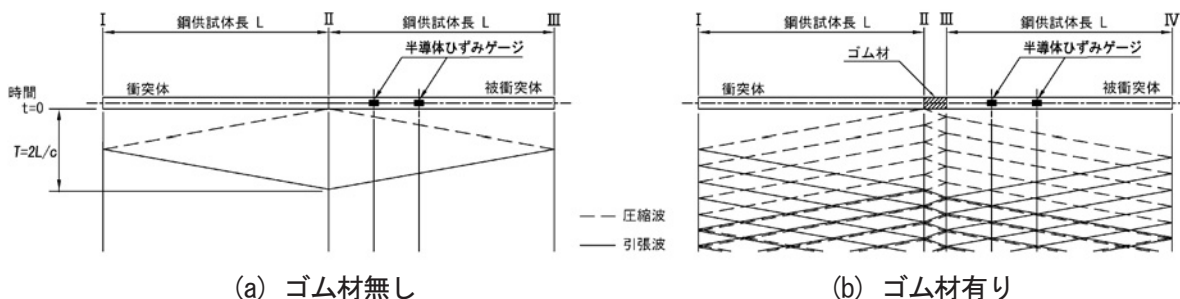


図-6 鋼部材中の弾性波の伝播の様子

面Ⅱで衝突したときに、鋼部材内を伝播する応力波の様子を示したものである。図中の破線は圧縮波、実線は引張波を表している。

図-6(a)は、ゴム材を設置しないときの様子を示したものである。境界Ⅱで衝突が起これると、他端に向かい圧縮波が伝播し、自由端である境界ⅠおよびⅢで引張波として反射する。その反射波の波頭が衝突面に到達するまで衝突が継続する。ここに、衝突継続時間 T は、衝突体長さを L 、衝突体内の波動伝播速度を c とすると、 $T=2L/c$ となる。 T 時間後、衝突体は静止し、被衝突体は、衝突体の衝突速度で移動を開始する。このときの、ゲージ点で測定される波形は、図-5 で示したような矩形波形となる。また、 T 時間後には、両衝突体中の波動エネルギーは消滅する。衝突の持続時間 T は、鋼部材の長さを 1000mm とすると、弾性波の伝播速度は約 5100m/s であるので、約 0.4ms になる。

図-6(b)は、ゴム材を設置したときの初期部の応力波の伝播の様子を表したものである。境界Ⅱで衝突が起これると、ゴム材に入射した応力波が、多重反射を繰り返すとともに、図-6(a)の場合とは異なり、境界ⅠおよびⅣからの引張波が、衝突面に到達した後も衝突が継続することになる。これは、ゴム材の剛性が鋼部材に比べて小さいため、衝突体の保持したエネルギーがゴム材に入射されに

くくなるため、鋼部材模型長が 1000mm のとき、接触継続時間は約 8ms となっている。すなわち、鋼部材模型に入射された弾性波は、鋼部材模型中を約 20 回($=8/0.4$)往復することになる(鋼部材長が短い場合は、3章での検討より複雑な現象になる)。その後、衝突体と被衝突体は離れる。

図-7 は、鋼部材模型長を4段階と変化させ、衝突速度 1m/s で実験したときの衝突応力-時間関係を示したものである。ゴム材を設置しないときの衝突応力は鋼部材模型長の影響を受けない(図-5 参照)が、緩衝材を設置した場合は、鋼部材模型長が大きくなると、ゴム材中の多重反射の影響により衝突応力が大きくなり、鋼部材長が 3000mm の場合には、ゴム材を設置しないときの約 15% の応力に達し、ゴム材の応力緩衝効果が小さくなる様子がわかる。よって、鋼部材長がさらに大きくなると、3章で論じたように、ゴム材の応力緩衝効果が消滅することになる。同様な現象は、ゴム材厚さが小さくなくても起こる。

5. 波動伝播モデル

5.1 波動伝播モデルの検証

多重反射の計算に、最適と考えるインピーダンス法^{3,4)}(例えば、図-6(b)に示した応力伝播状況で、所要箇所の応力を求める手法)を採用した波動伝播モデルで、実験結果の再現性について検討した。

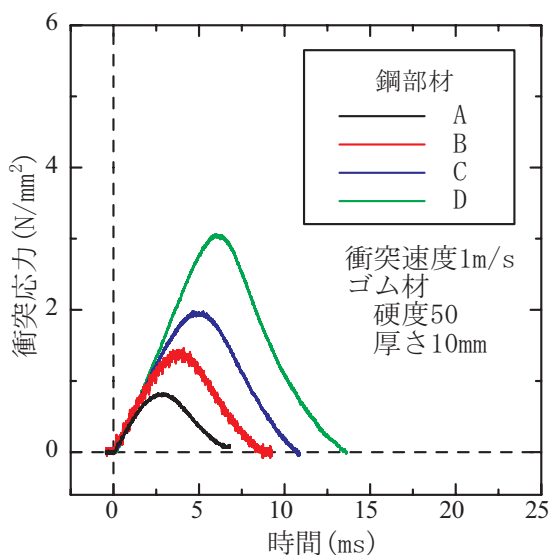


図-7 鋼部材長さと緩衝材設置時の衝突応力

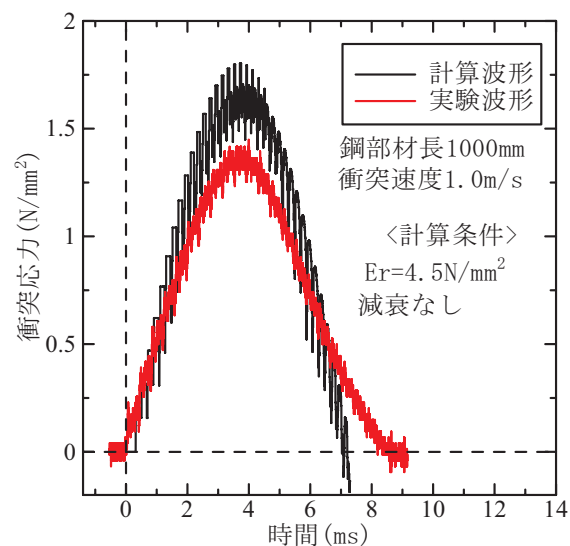


図-8 実験波形とゴム材の応力減衰率を考慮しないときの計算波形

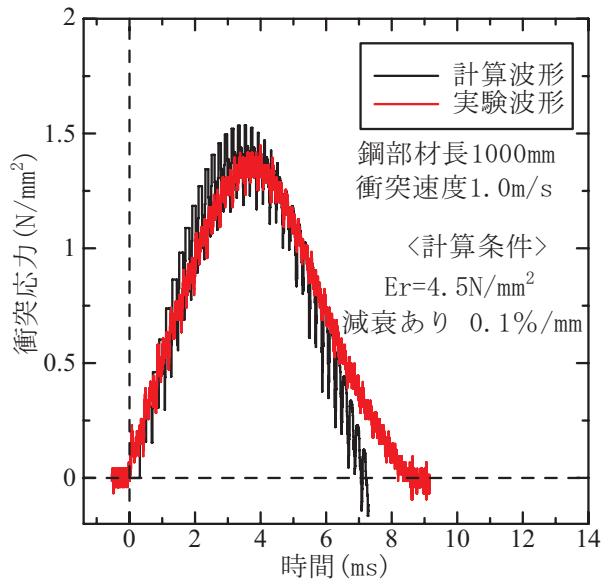


図-9 実験波形とゴム材の応力減衰率を考慮したときの計算波形

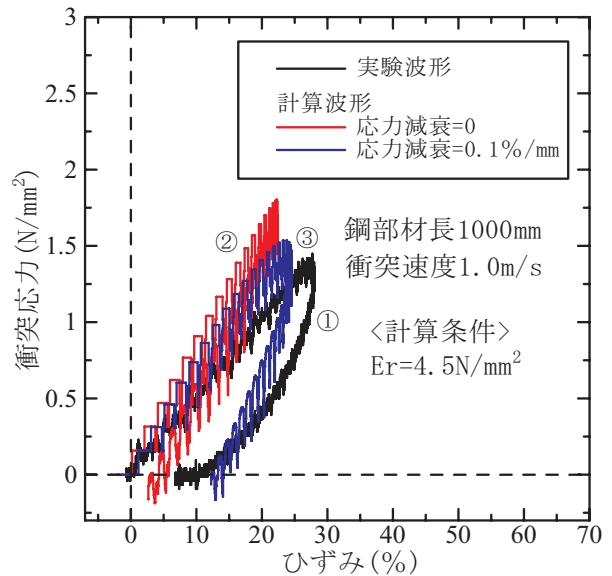


図-10 3者の応力-ひずみ曲線の比較

図-8 は、鋼部材模型 B、ゴム材厚さ 10mm、衝突速度 1m/s で実験したときの計測応力波形とインピーダンス法を用いて計算した波形を並べて示したものである(計算に用いたゴム材の弾性係数 4.5N/mm^2 は、実験波形から求めた応力-ひずみ関係の応力最大値の $1/3$ と $2/3$ の点を結ぶ直線の勾配値を採用した)。図から、計算波形のほうが大きくなるのがわかる。これは、ゴム材変形時のエネルギー消費を考慮しなかったためである。

そこで、直径 25mm、長さ 300mm のゴム棒の中央部 2 カ所(間隔 50mm)に加速度計を貼付し、一端を打撃し速度の低下率を求めたところ、約 $0.1\%/\text{mm}$ となった。この値を応力減衰率と呼ぶことにする。

図-9 は、図-8 と同一の実験波形と、応力減衰率を採用したときの計算波形を並べて示したものである。図から、両波形はよく一致している様子がわかる。

図-10 は、図-8 と図-9 の応力波形から求めた、ゴム材の応力-ひずみ関係である(ホプキンソン棒を採用すると、応力波形から棒の変位を求めることができる)。線①は実験波形から求めたゴム材の応力-ひずみ曲線である。線②はゴム材を弾性体と仮定したときのもので、応力-ひずみ曲線が

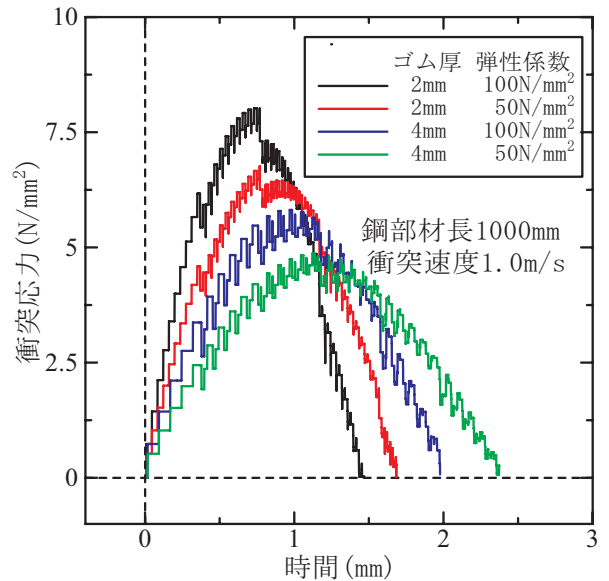


図-11 シミュレーション波形

直線状になっていることがわかる。図で曲線が振動しているように見えるのは、図-6 から分かるように、自由端からの引張波の影響である。線③はゴム材の応力減衰率を採用したときの応力-ひずみ関係で、実験波形から求まる曲線とほぼ一致した。また、応力-ひずみ曲線のループの面積から求まる、ゴム材の圧縮変形時のエネルギー消費量と、鋼材模型の速度変化から求まるエネルギー消費の値もほぼ一致した。よって、インピーダンス法を採用した波動伝播モデルにより、ゴム材の

応力緩衝効果やゴム材のエネルギー消費量を精度よく検討できることになる。

5.2 波動伝播モデルによるシミュレーション

4章で示した検証実験は、ゴム材厚さ10mmで行ったものである。そこで、ゴム材厚さを小さくしたときの応力緩衝効果についてシミュレーションにより検討した。

ゴム材厚さが小さくなると、衝突応力が増大する。応力が増大すると、ゴム材がハードニング効果により、見かけの弾性係数が増大する。そこで、鋼部材長1000mm、ゴム材の厚さ2mmと4mm、弾性係数を50N/mm²と100N/mm²と仮定して計算を行った。

図-11は、そのときの計算結果を示したものである。図から、当然のことではあるが、衝突応力は、ゴム材厚さが薄くなると大きく、見かけの弾性係数が大きくなると大きくなった。ゴム材厚さ2mm、弾性係数100N/mm²での衝突応力は、緩衝材を設置しないときの約4割にも達し、既往の考え方の約50倍の応力になる。よって、緩衝材の応力緩衝効果が小さくなっていることがわかる。

以上のように、本手法はゴム材の変形時の平均的な弾性係数が推定できれば伝播応力を推定できる。よって、本手法はゴム材の緩衝効果の基本特性を扱うのに有効と考えられる。

6. まとめ

- (1) 従来から行われてきた、進行波のみを考えたゴム材の緩衝効果の推定法は、緩衝効果を過大に見積もる。
- (2) ゴム材の緩衝効果は、鋼部材-ゴム材-鋼部材内部に生じる、弾性波の多重反射現象を考慮する必要がある。よって、鋼部材長が大きい場合や、ゴム材が薄い場合はゴム材の緩衝効果が消滅する可能性がある。
- (3) 今回提案した、インピーダンス法に立脚した、波動伝播モデルは、ゴム材の緩衝効果の基本特性を知るのに有効である。
- (4) ゴム材の応力緩衝効果やエネルギー消費量を求める方法として、今回採用したホプキンソン棒を用いた試験法は有効である。

参考文献

- 1) 防振ゴム研究会編：新版防振ゴム，現代工学社，pp.97～113，1998.
- 2) 石川信隆，大野友則，別府万寿博，藤掛一典：衝撃工学，森北出版，pp.141～142，2008.
- 3) 野村昭一郎，武者利光，内藤喜之，森泉豊栄：振動波動入門，コロナ社，pp.148～149，1977.
- 4) 近藤博，木村修一，鈴木勝也，本間重雄：インピーダンス法による桁間衝突のモデル化とゴム材の緩衝効果について，土木学会論文集 No.752/I -66，pp.193～202，2004.