

ゴム材の応力緩衝効果の推定手法の提案

The proposal of the estimation method of stress buffer effect in rubber material

難波達郎^{*}, 木村修一^{**}, 本間重雄^{***}, 近藤博^{****}

Tatsuro Namba, Shuichi Kimura, Shigeo Honma, Hiroshi Kondo

^{*}東海大学大学院工学研究科(〒259-1292 神奈川県平塚市北金目1117)

^{**}博士(工学), 通信土木コンサルタント(株)(〒108-0014 東京都江東区木場3-14-4)

^{***}Dr. Eng. 東海大学教授, 工学部土木工学科(〒259-1292 神奈川県平塚市北金目1117)

^{****}工博, 東海大学教授, 工学部土木工学科(〒259-1292 神奈川県平塚市北金目1117)

Rubber materials have been used for the relaxation of impact stresses on the collision of steel members. The use of rubber is considered to be very effective for the stress relaxation through investigations on the progressive wave between members, however, the inference does not take the influence of multiple reflections of the incidence wave in the rubber into consideration. This paper disclosed by employing a wave propagation model that the stress relaxation diminishes as the steel member becomes longer, and the results of the model were verified by collision experiments using Hopkinson bar.

Keyword : rubber, buffer effect, wave propagation, multiple reflection

キーワード: ゴム材, 緩衝効果, 伝播, 多重反射

1. はじめに

鋼部材の衝突等による損傷を防ぐためゴム製緩衝材(以下, ゴム材と記す)がよく用いられている。これは, 鋼部材-ゴム材-鋼部材間の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からである。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。すなわち, 応力波の継続時間が τ_0 以下の場合, 以上の考察で問題は生じない。

しかし, 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, ゴム材中の多重反射の影響により, 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。橋桁のように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可能性がある。

本論文では, 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, 多重反射現象が扱える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, ゴム材の緩衝効果の基本特性が検証できることを示した。

2. 応力波の反射と透過

ゴム材の応力緩衝効果を, 現在の設計法と考えられる進行波のみで検討する場合には, 媒体境界面での応力波の透過係数 β のみを考慮すればよい。しかし, この問題を, 応力波の多重反射問題として検討するためには, 媒体境界面での透過係数の他に, 反射係数 α も考慮する必要がある。また, 2種の媒体での多重反射を検討する場合には, 両係数とも2種類存在する。そこで, これらの係数を図-1に示すように定義することとする。ここに, σ_i は, ある媒体を境界面に向かって進行する応力波とする。 $\alpha\sigma_i$ は境界面で反射し, σ_i が進行してきた媒体に帰る応力波を, $\beta\sigma_i$ は境界面を通過して異なる媒体を進行する応力波を示している。各係数の添字は, 境界面に到達する前後の応力波が進行す

る媒体を表している。

いま鋼部材とゴム材のインピーダンス ($Z=(E\rho)^{0.5}$, E : 弾性係数, ρ : 密度) を, それぞれ Z_s , Z_r と記すと, 反射係数と透過係数はインピーダンスを用いて次のように示される。

$$\alpha_{ss} = (Z_r - Z_s) / (Z_s + Z_r) \quad (1)$$

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

$$\alpha_{rr} = (Z_s - Z_r) / (Z_s + Z_r) \quad (3)$$

$$\beta_{rs} = 2Z_s / (Z_s + Z_r) \quad (4)$$

図-2 は, 鋼部材 I を伝播してきた応力波が, ゴム材に入射後, ゴム材中で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。

従来の考え方¹⁾は, 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, 図の赤線で示した経路で伝播する応力波のみで検討され, ゴム材中で生じる多重反射の影響を考慮していないようである。よって, 従来の手法では, 鋼部材 II への透過応力は次式で求められるとしている。

$$\begin{aligned} \sigma_t &= \beta_{sr} \cdot \beta_{rs} \cdot \sigma_i \\ &= \left\{ 4Z_r \cdot Z_s / (Z_s + Z_r)^2 \right\} \sigma_i \quad (5) \end{aligned}$$

ここで, 鋼部材の弾性係数 E と密度 ρ をそれぞれ, $2.0 \times 10^5 \text{N/mm}^2$, 7850kg/m^3 とゴム材の弾性係数と密度をそれぞれ, 4.5N/mm^2 , 1350kg/m^3 とすると, 両者のインピーダンス比 ($=Z_s/Z_r$) は, 約 510 になるので, 透過応力は

$$\sigma_t = 7.8 \times 10^{-3} \sigma_i \quad (6)$$

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。

しかし, 鋼部材 I に継続時間の長い応力 σ_i が入射すると, 前述したようにゴム材に入射した応力波はゴム材中で多重反射しゴム材の応力 σ_b は上昇する。ゴム材中の応力は, 図から明らかなように等比級数の和になるので, 反射係数と透過係数を用いて次式で求めることができる。

$$\sigma_b = \frac{\beta_{sr} (1 - \alpha_{rr}^n)}{1 - \alpha_{rr}} \sigma_i \quad (7)$$

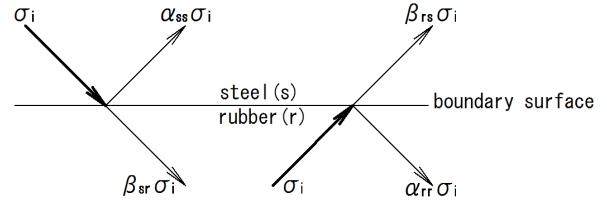


図-1 反射係数と透過係数の定義

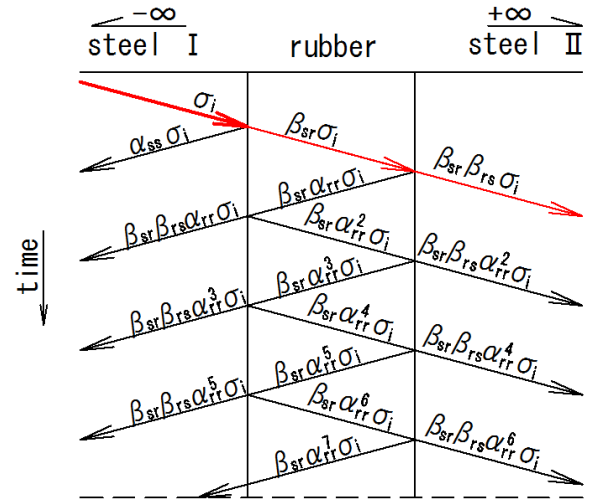


図-2 応力波の伝播状況

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 の値が十分に大きくなると, σ_b は次式で表現される。

$$\sigma_b = \frac{\beta_{sr}}{1 - \alpha_{rr}} \sigma_i \quad (8)$$

また, $\beta_{sr} = 1 - \alpha_{rr}$ であるので,

$$\sigma_b = \sigma_i \quad (9)$$

となる。

同様に, 鋼部材 II に入射される応力 σ_{II} は, 次式で求めることができる。

$$\begin{aligned} \sigma_{II} &= \beta_{sr} \beta_{rs} (1 + \alpha_{rr}^2 + \alpha_{rr}^4 + \cdots + \alpha_{rr}^{2l}) \\ &= \frac{\beta_{sr} \beta_{rs} (1 - \alpha_{rr}^{2l})}{1 - \alpha_{rr}^2} \sigma_i \quad (10) \end{aligned}$$

ここに,

$$2l = n - 1 \quad (n = 1, 3, 5, \dots)$$

とする．ここで、 l 値が十分に大きくなると、

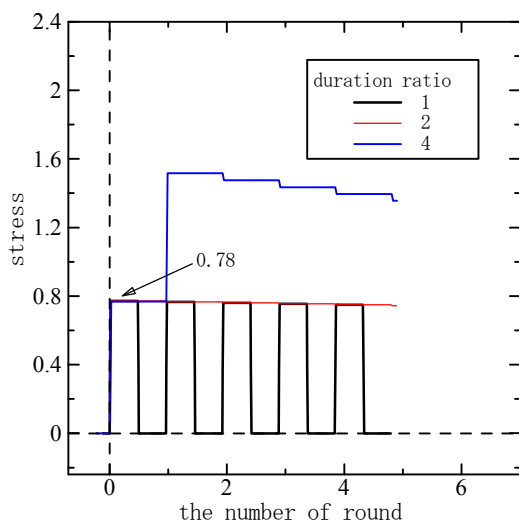
$$\sigma_{II} = \frac{\beta_{sr}\beta_{rs}}{1-\alpha_{rr}^2}\sigma_i \quad (11)$$

$$\sigma_{II} = \sigma_i \quad (12)$$

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．また、境界面の力の釣り合いも成立していることがわかる．

図-3 は、入射応力を 100 と仮定したときの応力継続時間と透過応力の関係を示したものである．ここで、入射応力の継続時間とゴム材の波動伝播時間($\tau_0/2$)の比を継続時間比と呼ぶことにする．

図-3(a) は、入射応力の継続時間比が 1, 2, 4 のときの透過応力を示したものである．継続時間比が 1 のときは、パルス応力 0.78, 0.77, ... と、徐々に低下する、パルス幅 $\tau_0/2$ 、周波数 $1/\tau_0$ の透過応力に、継続時間比 2 のときは、ステップ幅 τ_0 で、透過応力が 0.78, 0.77, ... と徐々に低下する階段波形パルスになることがわかる．前述したように、継続時間比が 2 までは、応力波の重ね合わせの影響は生じず、このときの透過応力の最大値は 0.78 になり、入射応力の 0.78% となる(式(6)参照)．継続時間比が 4 になると応力波の重ね合わせの影響で、透過応力は大きくなり、時間比 1, 2 の場合の約 2 倍になり、透過応力に与える入射応力の継続時間が無視できないことがわかる．



(a) 継続時間比が 1, 2, 4 の場合

図-3(b) は、継続時間比が大きい場合のものである．図には継続時間比が 300~1400 の 6 段階の透過応力を示した．図からも継続時間比が大きくなると徐々に透過応力が大きくなって行き、継続時間比が 1400 でゴム材の応力緩衝効果が消滅することがわかる．また、継続時間比 400 で、入射応力の約 90% の透過応力になることもわかる．なお、透過応力は、後述する波動伝播モデルで計算したものである．

3. 検証実験と検討

3.1 実験装置と方法³⁾

図-4 は、実験に用いた鋼材模型の寸法を示したものである．鋼材模型は、直径 25mm の鋼丸棒(材質: SS400)で、衝突体および被衝突体の長さが衝突中に伝播する応力波の多重反射におよぼす影響を調べるために長さ 500, 1000, 2000, 3000mm の 4 種を準備した．また、実験に用いたゴム材は、硬度 50 の天然ゴムで、直径 25mm、厚さ 10mm である．

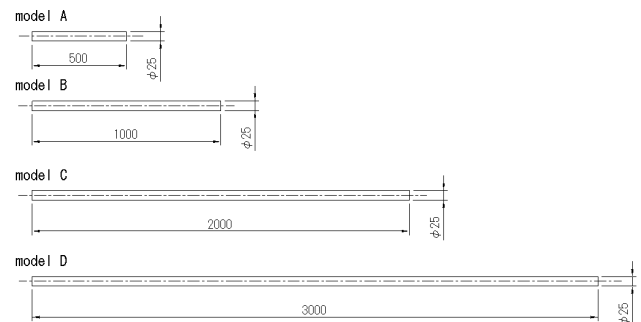
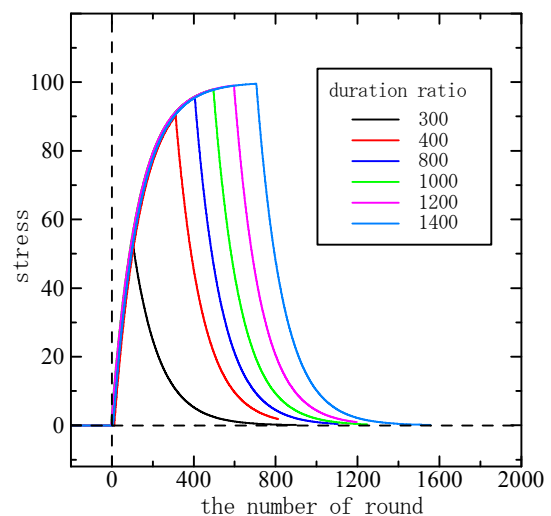


図-4 鋼材模型



(b) 継続時間比が大きい場合

図-3 継続時間比と透過応力

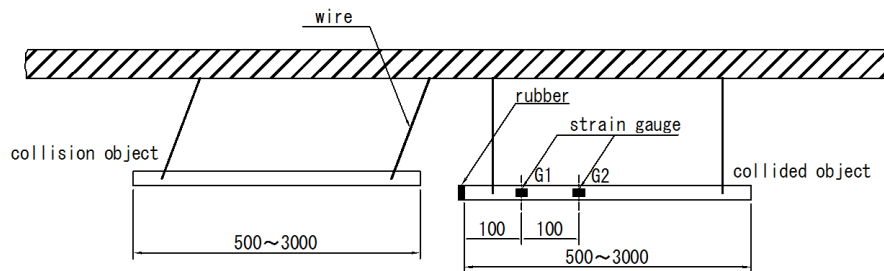


図-5 実験装置の概要

図-5 に、実験装置の概要を示す．長さの等しい2本の鋼材模型をワイヤーで吊り下げ、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った．本方法を採用した理由は、ゴム材を介して接触している鋼部材に、同じ長さの鋼部材が衝突する場合と同一の現象が再現できるからである．

被衝突体の衝突端から 100mm と 200mm の2カ所にひずみゲージを貼付したのは、弾性棒の2カ所の応力波形から、柳原の提案する手法²⁾(以下、2点ゲージ法と記す)により、鋼材模型のあらゆる箇所の、応力、変位速度および変位を求めることができるからである．

図-6 は、鋼部材長が無限長の場合の透過応力と実験装置のように有限長の場合の透過応力(図-9(b)参照)を並べて示したものである．図から、継続時間比が小さい場合は、実情に近い、鋼部材長が有限の場合の透過応力が大きくなった．また、継続時間比が大きくなると両者の透過応力はほぼ一致した．よって、今回採用した方法で、ゴム材の応力緩衝効果を検討しても良いことがわかる．

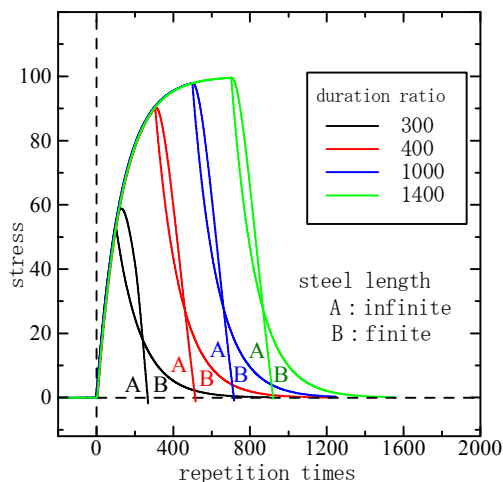


図-6 鋼部材長の有限と無限が透過応力に与える影響

応力波の計測は、半導体ひずみゲージ(ゲージ長 1mm, 抵抗値 350 Ω , ゲージ率約 150)を貼付して行った．なお、ひずみゲージは、曲げの影響を排除するために鋼材模型の軸芯に対して対称に貼付してある．計測に用いたストレインアンプの周波数特性は、200kHz で、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．

3.2 実験結果と検討

図-7 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、鋼材模型B(衝突速度 1m/s と 2m/s の2段階)と鋼材模型C(衝突速度 1m/s)のゲージ1 (G1)で測定した応力を示したものである．また、図中に理想条件で鋼棒が衝突したときの、ゲージ1での応力(理論値)を破線で示した．以下に示す実験波形はゲージ1で測定したものである．

図からも明らかなように、透過応力は衝突速度に比例し、鋼材模型長に影響されないことがわかる．ただし、鋼材模型長と衝突を継続する時間は比例する．

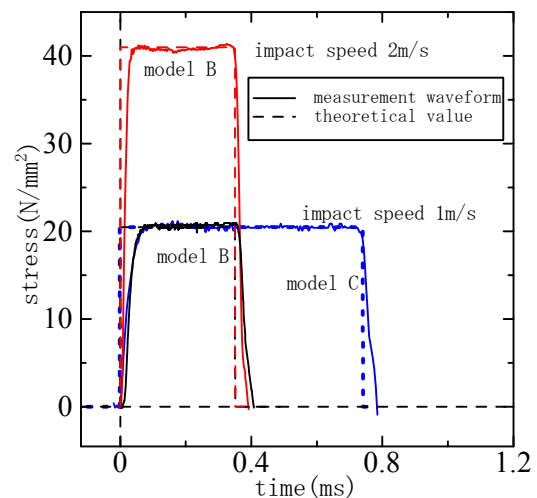


図-7 実験波形と理論波形の比較

ここで、透過応力が持続し、鋼部材に応力が入射している時間を応力継続時間と呼ぶこととする。図から、実験波形は立ち上がりが少々遅れるものの、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材模型に採用した本実験装置により、ゴム材が透過応力等に与える影響を精度良く検討できることになる。

図-8 は、ゴム材の有無が透過応力におよぼす影響を調べるために、鋼材模型 B を用いて衝突速度 1m/s で実験を行ったときの応力波形を並べて示したものである。図から、ゴム材を設置しないときの応力は約 20.5N/mm² であるが、ゴム材を設置すると最大応力は約 1.5N/mm² となった。また、ゴム材を設置すると、応力継続時間は約 20 倍と大きくなることわかる。

図-9 は、同じ長さの衝突体と被衝突体が、境界面 II で衝突したときに、鋼部材内を伝播する応力波の状況を示したものである。図中の赤線は圧縮波、青線は引張波を表している。

図-9(a) は、緩衝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-7 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。衝突継続時間 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-9(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 で衝突が起こると、ゴム材に入射して応力波が、多重反射を繰り返すとともに、図-9(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、ゴム材の剛性が鋼供試体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である。これは、図-8 に示した波形からもわかるように、鋼材模型長が 1000mm のとき、応力継続時間は約 8ms となっている。すなわち、鋼材模型に入射された弾性波は、鋼材模型中を約 20 回 ($=8/0.4$) 往復することになる(鋼部材長が短い場合は、2 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て移動を始める。ゴム材が無いときは、被衝突体が離れた後、衝突体は静止するが、ゴム材を設置すると、衝突体と被衝突体が離れた後も両者は運動エネルギーを保持する(図-17 参照)。以上に述べたように、緩衝材の有無により鋼材模型の動的挙動が大きく異なることになる。

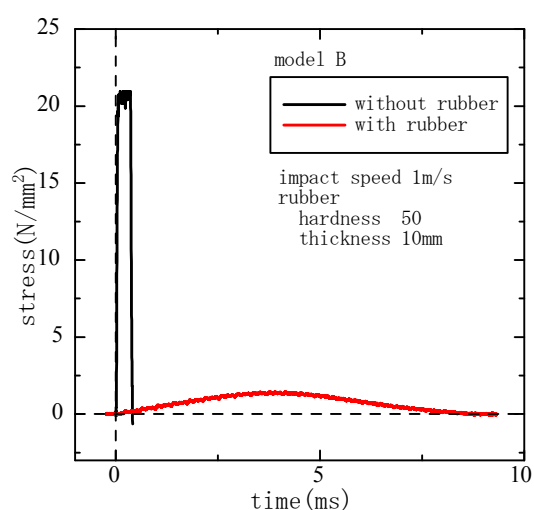


図-8 緩衝材の有無と透過応力

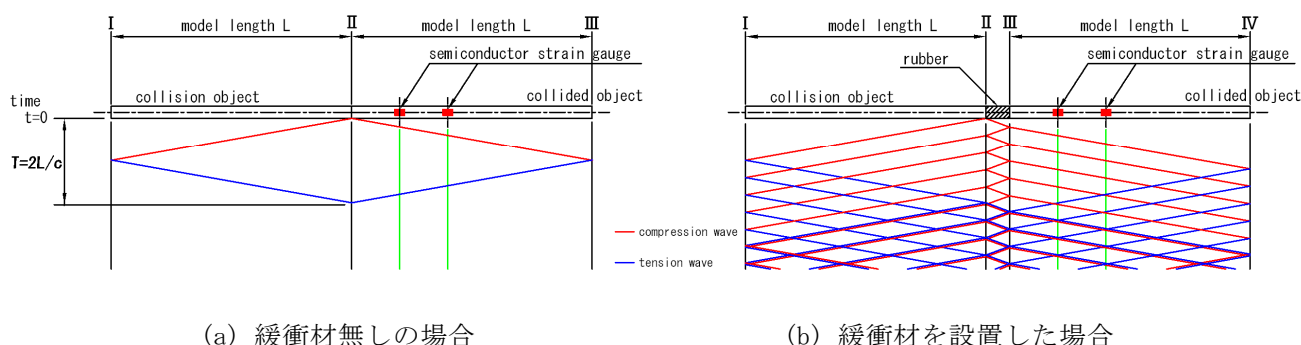


図-9 緩衝材の有無と応力波の伝播状況

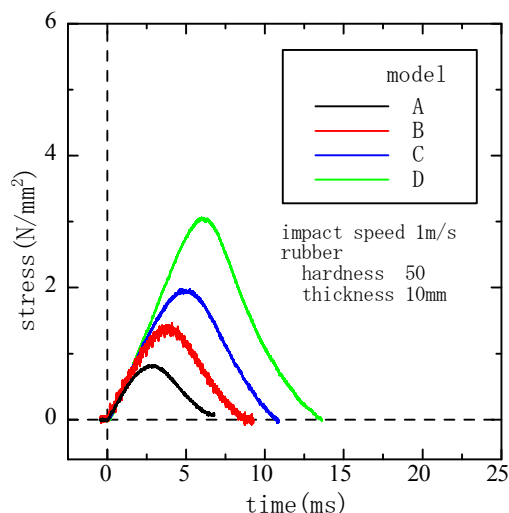


図-10 鋼部材長と透過応力

図-10 は、鋼材模型長を 4 段階と変化させたときの応力波形を示したものである。ゴム材を設置しないときの応力は鋼材模型長の影響を受けない(図-7 参照)が、緩衝材を設置した場合は、鋼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透過応力が大きくなり、ゴム材の応力緩衝効果が小さくなっていく様子がわかる。よって、鋼部材長がさらに大きくなると、2 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が予測される。

4. 波動伝播モデル

4.1 波動伝播モデルの検証

波動伝播モデルとして、音響管等の計算に用いられているインピーダンス法^{4,5)}(図-9(b)に示した応力伝播状況で、所要箇所の応力を求める)を採用した。

図-11 は、鋼材模型 A、ゴム材厚さ 10mm、衝突速度 1m/s で実験したときの計測波形とインピーダンス法を用いた計算波形を並べて示したものである。計算波形に見られるノイズのようなものは多重反射に起因するもので、このような様子は実験波形でも見られる。また、計算に採用したゴム材の弾性係数は 4.5N/mm^2 である。この値は、実験波形から求めた応力-ひずみ曲線の $1/3\sigma_{max}$ 点と $2/3\sigma_{max}$ 点を結ぶ勾配値である(図-13 参照)。図から、計算波形のほうが大きくなることがわかる。これは、応力波がゴム材を伝播するとき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、一端を打撃し速度値の低下率を求めたところ、約 $0.1\%/mm$ となった。この値を応力減衰率と呼ぶことに

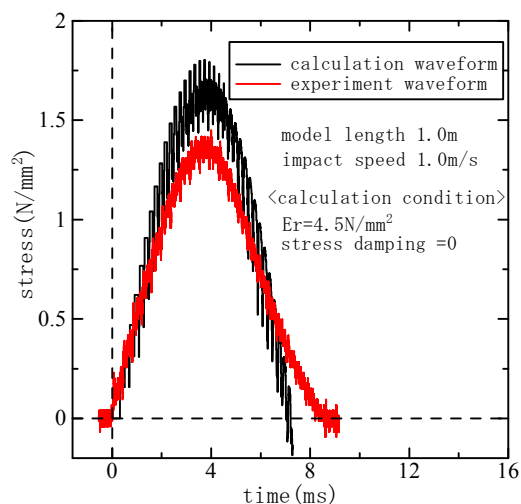


図-11 計算波形と実験波形

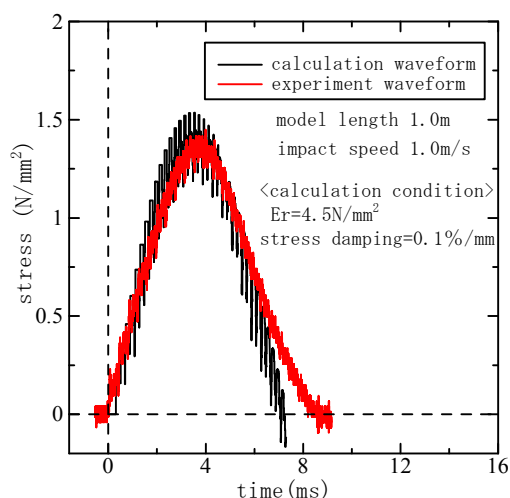


図-12 応力減衰率を考慮したときの計算波形と実験波形

する。

図-12 は、図-11 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。なお、後半部での両波形の不一致は、計算に载荷過程の平均的な弾性係数を採用したことにより起因すると判断している。

図-13 は、図-11 と図-12 の応力波形から求めた、ゴム材の応力-ひずみ関係である(ゴム材の圧縮量は、図-11 や図-12 の応力波形(G1)と同時に測定した G2 での応力波形を用いて、2 点ゲージ法により求めた衝突端の変位を用いて求めたものである)。ゴム材の応力減衰率を採用したときの応力-ひずみ関係は、実験波形から求まる曲線とほぼ一致した。

よって、インピーダンス法を採用し、ゴム材の応力減衰率を考慮することにより、ゴム材の緩衝効果を精度よく検討できることがわかる。

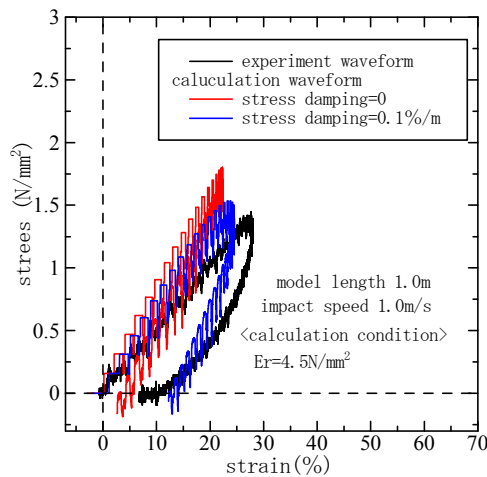


図-13 計算波形と実験波形から求めた
応力-ひずみ曲線

4.2 波動伝播モデルによるシミュレーション

ゴム材は、圧縮量が大きくなると、ハードニング効果により弾性係数が大きくなる。つまり、長い鋼部材が衝突すると、ゴム材の弾性係数は大きくなる。各機関の実験研究等から判断すると、ゴム材の弾性係数は 10N/mm^2 から 500N/mm^2 の範囲に入るようである⁶⁾。

そこで、ゴム材の弾性係数を 10N/mm^2 と 50N/mm^2 の2段階、鋼部材長を 10m, 50m, 100m, 200m, 500m と変化させてシミュレーション計算を行い、透過応力に影響する鋼部材長の影響について調べた。

図-14 は、ゴム材の弾性係数を 10N/mm^2 (応力減衰なし) とし、衝突速度を 1m/s としたときの計算波形を示したものである。図-10 の実験結果と同様、鋼部材長が大きくなると最大応力が大きくなるとともに、応力継続時間が長くなることがわかる。また、図から、鋼部材長が 200m 程度で、ゴム材を設置しないときの透過応力 (20.5N/mm^2) に到達することもわかる。

図-15 は、図-14 と同条件で、ゴム材の弾性係数を 50N/mm^2 としたときの計算波形を示したものである。図から、弾性係数 10N/mm^2 のときの約半分の鋼部材長 100m でゴム材を設置しないときの応力値に到達した。また、鋼部材長 200m 程度で、出力波形が矩形に近づくことがわかる。つまり、ゴム材を設置しないときの波形に近づき、この波形形状からも応力緩衝効果が消滅したことが判断できる。

図-16 は、図-15 と同一条件で、ゴム材の応力減衰率を考慮したときのシミュレーションの結果である。図-15 の波形を、縦方向に縮めたような応力波形が得られた。飽和値は約 11.6N/mm^2 になり、ゴム材の応力減衰率を考慮すると、最大応力を約 43.4% 軽減することがわかる。以上の検討から、

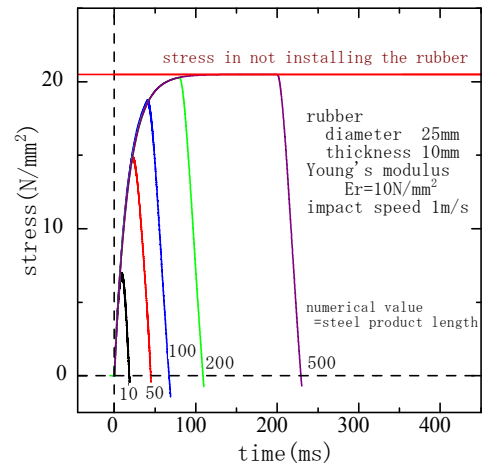


図-14 鋼部材長とシミュレーション波形
(弾性係数： 10N/mm^2)

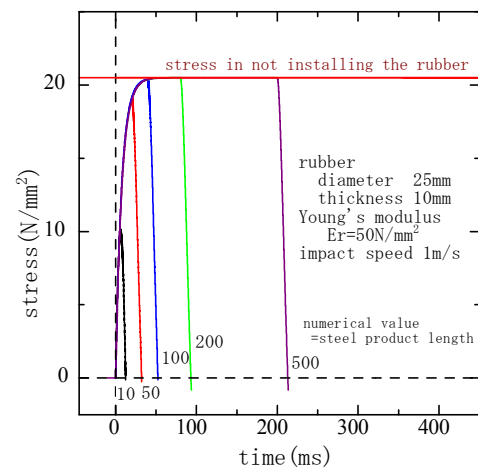


図-15 鋼部材長とシミュレーション波形
(弾性係数： 50N/mm^2)

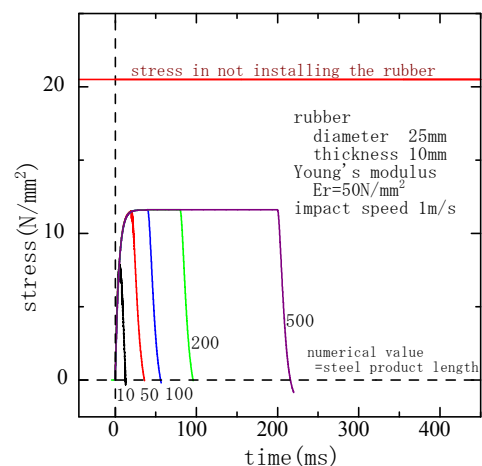


図-16 応力減衰率を考慮したときの
シミュレーション波形(弾性係数： 50N/mm^2)

緩衝材は、エネルギー消費が大きいゴム材を用いることが有効であることがわかる。

5. ゴム材の消費エネルギー

衝突前に衝突体が保有していた運動エネルギーは、衝突によって、ゴム材の変形によって消費されるエネルギーと衝突後の衝突体および被衝突体の運動エネルギーに変換される。そこで、透過応力から、両鋼材模型の速度を算出し、衝突後の両者の運動エネルギーについて調べた。

図-17は、図-11に示した実験波形から求めた、両鋼材模型の速度の系時変化を示したものである。両鋼材模型は約9ms間衝突を継続した後離れる。そのときの、衝突体の速度は約0.196m/s、被衝突体の速度は約0.804m/sである。鋼材模型の質量は3.85kgであるので、衝突直前(速度1m/s)に衝突体が保持した運動エネルギーは、約1.93Jとなる。また、衝突終了直後の衝突体と被衝突体の運動エネルギーは、それぞれ、約0.074Jと約1.245Jとなる。よって、ゴム材による消費エネルギーは約0.607Jとなる。

また、実験時のゴム材の消費エネルギーは、図-13に示した応力-ひずみ曲線のヒステリシスループの面積からも求めることができる。図のループ面積から消費エネルギーを求めたところ約0.59Jとなり、衝突体と被衝突体の運動エネルギーから求めた値0.607Jとほぼ一致した。よって、ゴム材のエネルギー消費を大きくするためには、薄めの緩衝材を採用して、衝突応力を大きくし、ゴム材にハードニング現象を起こし、ヒステリシスループの面積を大きくしたほうが良い場合も考えられる。

以上の検討から、ホプキンソン棒を採用した本実験装置により、応力緩衝効果とともに、ゴム材

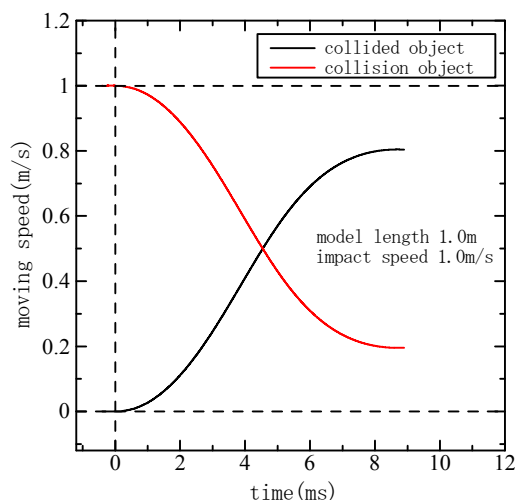


図-17 鋼部材速度の系時変化

の変形に伴うエネルギー消費量を検討できることがわかる。

6. まとめ

ゴム製緩衝材の緩衝効果について、ホプキンソン棒法を採用した衝突実験と、インピーダンス法を採用した波動伝播モデルにより検討し、以下の知見を得た。

- (1) 従来法による、進行波のみを考慮したゴム材の応力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。
- (3) 橋桁のような鋼部材長が大きい場合は、部材内部の多重反射現象により、ゴム材の応力緩衝効果が消滅する可能性がある。
- (4) 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での計算値は、実験結果をシミュレートできるので、ゴム材の応力緩衝効果の基本特性を知るのに有効である。
- (5) ゴム材の応力緩衝効果を大きくするためには、エネルギー消費の大きなゴム材が有効である。
- (6) ゴム材の動的特性を知る方法として、波動の多重反射の影響を詳細に検討できる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) 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.
- 2) 柳原直人: 次元弾性応力波理論による衝撃力測定法, 日本機械学会論文集, 43 巻 375 号, pp. 4048-4052, 1977.
- 3) 難波達郎, 木村修一, 本間重雄, 近藤博: ゴム緩衝材設置時の桁間衝突応力に及ぼす桁長の影響, 構造工学論文集, vol. 54A, 2008, 3
- 4) 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, 1991.
- 5) 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, 2004. 1.
- 6) 例えば, 庄司学, 川島一彦, 宇根寛, 剣持安伸, 長谷川恵一, 島ノ江哲, 緩衝材物性および载荷/除荷速度がゴム製緩衝装置の応力-ひずみ関係に与える影響, 第25回地震工学研究発表会講演論文集, pp. 873~876, 1997, 7.

(2009年9月24日受付)