

ゴム緩衝材設置時の桁間衝突応力に及ぼす桁長の影響

Relation between Collision Stress on Girders and Its Length Set Up with A Shock Absorbing Rubber

難波達郎¹, 木村修一², 本間重雄³, 近藤博⁴

Tatsuro Nanba, Motoki Mizukoshi, Shigeo Honma, Hiroshi Kondo

¹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)

²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)

³Dr. 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)

⁴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)

It is necessary to take the length of girders into consideration in making clear the collision mechanism of girders, since this phenomenon is really a wave propagation problem. Hereupon, the investigation was made for the influence of the girder length on the shock absorbing effect of rubbers through collision experiments using 4-different lengths of testing girders. It was found the collision stresses generated are proportioned to the girder length, and the generated stresses can be estimated by the impedance method based on the average modulus of deformation of shock absorbing rubbers obtained from the experiments. Furthermore, with the aid of numerical analysis, it was shown that the collision stresses produced in an actual length of girders can be estimated by assuming the modulus of deformation of shock absorbing rubber during the period of collision.

Key Words: impact, pounding girder, shock absorber, impedance, bridges

キーワード: 衝撃, 桁間衝突, 緩衝材, インピーダンス法, 橋梁

1. はじめに

地震による, 桁間衝突現象によって落橋や桁の破壊を防ぐために, 現在の道路橋示方書・V耐震設計編¹⁾には, 落橋防止システムを設けるよう記述されている。さらに, 落橋防止構造には, 衝撃的な地震力を緩和するためゴムパット等の緩衝材を用いて耐衝撃性を高める構造とすると記されている。すなわち, 落橋防止構造には応力緩衝効果とエネルギー吸収効果が期待されている。そのため, ゴム緩衝材の緩衝効果に関する研究が数多く実施されている。

例えば, 島ノ江²⁾らは, コンクリート製のブロックに設置したゴム製緩衝材に台車を衝突させる方法で, ゴム緩衝材の力学特性に関して検討し, 応力-ひずみ関係に及ぼす衝突力の影響やゴム材のエネルギー吸収効果等について考察している。しかし, この研究では, コンクリート製ブロックに入射されるエネルギーについては考慮されていないようである。また, 北原³⁾らは, 桁をモデル化した長さ 1.0m の角鋼材(1000×200×200)の衝突部にロードセルを取付け, そのロードセルの載荷部にゴム緩衝材を設置し桁間衝突実験を行い, ゴム製緩衝材の緩衝効果について考察している。しかし, この研究では, 衝突応力に及ぼす桁長の影響が検討されていない。さらに, 衝突荷重の計測にロードセルを採用したところに問題があると推察される。すなわち, ロードセルで動的荷重を測定すると, 設置場所の機械インピーダンス Z (断面積を A , 弾性係数を E , 波動伝播速度を c とすると, $Z=AE/c$ となる。以下, インピーダンスと記す) やロードセルの寸法の大小により測

定値が変動^{4), 5)} するからである。また, 藤井ら⁶⁾も, 一般的に用いられているロードセルは動的荷重下においてはその校正法が確立されておらず, 計測値そのものに誤差が含まれている可能性が高いと述べている。

そこで, 著者らは, 動的センサの校正等に利用されているホプキンソン棒⁷⁾ (長さ 1.0m) を桁供試体に採用して, 桁間衝突再現実験を行うとともに, 多重反射計算にインピーダンス法^{8), 9)} が有効であること, 同法を用いたシミュレーションにより, 衝突応力に与える桁長の影響が大きいことを報告⁸⁾ した。

現在, 落橋防止の観点から連続桁化が推進¹⁰⁾ され, 桁長が長くなる傾向にある。そこで, 桁間衝突応力に及ぼす桁長の影響を検討することは急務と考えられるが, ほとんど検討されていない。

本研究は, 桁間衝突現象は波動伝播問題と考え, 長さ4段階(0.5m~3.0m)のホプキンソン棒を桁供試体に採用して, 振り子スタイルで桁間衝突再現実験を行い, 桁間衝突応力に及ぼす, 桁長, 緩衝材硬度等の影響について検討した。さらに, 桁間衝突応力は桁長と比例的関係を示したので, 実験が困難な, 実桁長レベルの衝突応力について, インピーダンス法を採用したシミュレーションにより検討したものである。

2. 実験装置と実験方法

2.1 緩衝材

表-1は, 実験に用いたゴム緩衝材(以下緩衝材と記す)の

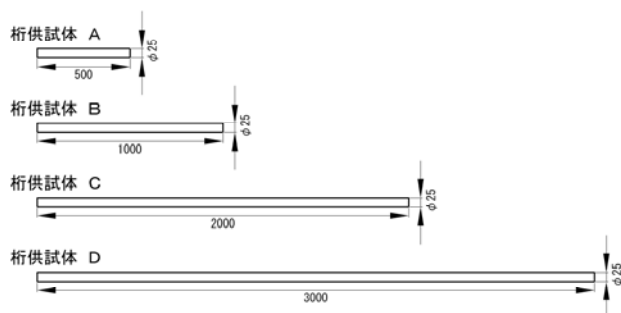


図-1 桁供試体(ホプキンソン棒)の寸法

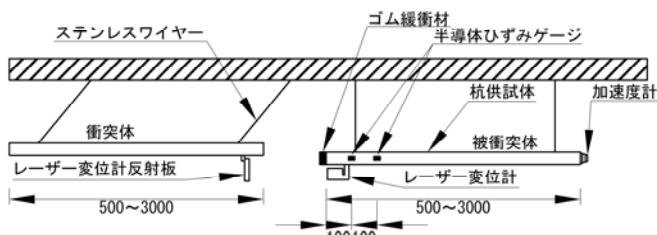


図-2 実験装置の概要

形状寸法や物理特性を示したものである。緩衝材の硬度は、30, 50, 70の3種類、直径は25mm、厚さは10, 20mmの2種類となっている。この他に、緩衝材の厚さが、桁の動的挙動に与える影響を検討するために、硬度50の厚さを変化させた数種の緩衝材を準備した。

2.2 桁供試体

図-1は、実験に用いた桁供試体の寸法を示したものである。桁供試体はスチール製丸棒(鋼種:SS400, 直径:25mm)で、桁長が衝突応力に及ぼす影響を検討するために、長さ500, 1000, 2000, 3000mmの4種を準備した。また、衝突応力を測定するための半導体ひずみゲージ(ゲージ長:1mm, 抵抗値:350Ω, ゲージ率:約150)は、衝突端から100mmの位置に曲げの影響を排除するために対称に貼付した(図-2参照)。衝突端から200mmの位置のひずみゲージは、桁供試体内の波動伝播の様子を調べる(2点ゲージ法)ために用いたものである。

2.3 実験装置と方法

図-2は、実験装置の概要を示したものである。桁供試体をステンレス製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と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。また、図に示すように、緩衝材の変形量を測定するためのレーザ変位計(サンプリングタイム:0.7ms)を桁供試体に設置した。さらに、長さ3000mmの桁供試体Dには、緩衝材厚さが桁供試体の動的挙動に及ぼす影響を調べるために、図に示す位置に加速度計(応答周波数:10kHz)を設置した実験も行った。応力波形等はロガーステーションを用いてサンプリングタイム1μsで収録・処理した。計測に用いたストレンアンプ、チャージアンプ及びデータ収集装置の周波数特性は、それぞれ、200kHz、

表-1 ゴム緩衝材の寸法と物理特性

直径(mm)	硬度	厚さ(mm)	密度[kN/m ³]	波動伝播速度[m/s]
25	30	10	12.7	71
		20		
	50	10	12.0	104
		20		
	70	10	15.9	145
		20		

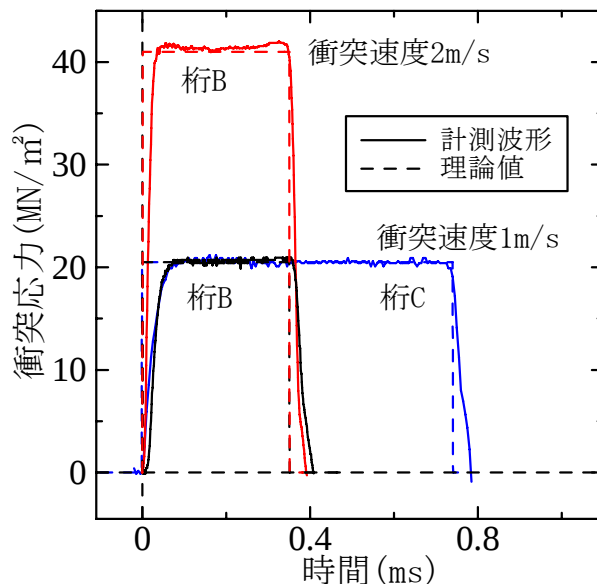


図-3 緩衝材を設置しないときの理論値と計算波形

100kHz、及び400kHzである。

3. 実験装置の検証

3.1 緩衝材を設置しないときの応力波形

図-3は、緩衝材を設置しないで実験したときの、桁供試体B(衝突速度2段階)と桁供試体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、図中には、理論値を点線で示してある。

同材質、同断面の桁供試体が速度 V_0 で衝突したときの、理論衝突応力 σ は、桁供試体の弾性係数を E 、桁供試体中の波動伝播速度を c とすると、次式で表現できる。

$$\sigma = (E / 2c)V_0 \quad (1)$$

式(1)から、衝突応力は衝突速度に比例するが、桁供試体の断面積や桁長に影響されないことがわかる。ただし、桁長が長くなると、衝突の継続時間が長くなる。衝突が継続し桁に応力が入射している時間を応力継続時間(衝突継続時間)と呼ぶことにする。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状波形が得られていることがわかる。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、ホプキンソン棒を桁供試体に採用した本実験装置により、緩衝材が衝突応力等に与える影響を精度良く検討できることになる。以下、桁供試体Bを桁Bのように記す。

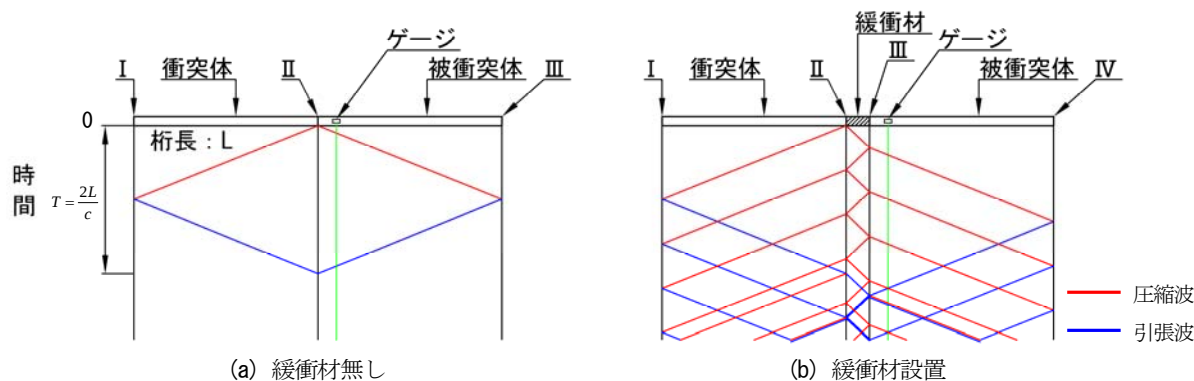


図-5 桁供試体内の波動の模式図

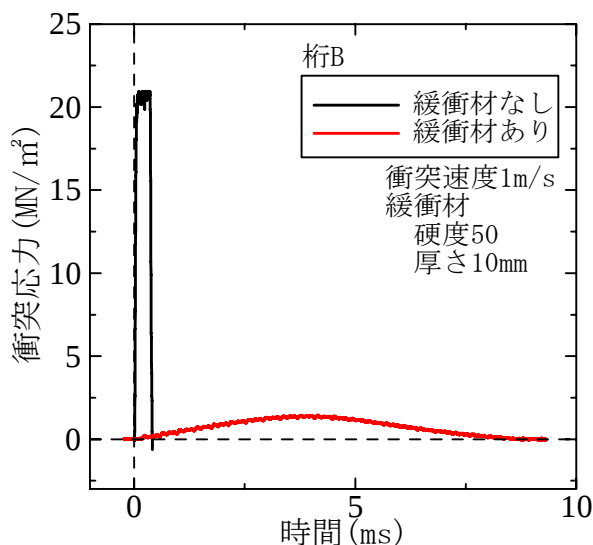


図-4 緩衝材の効果

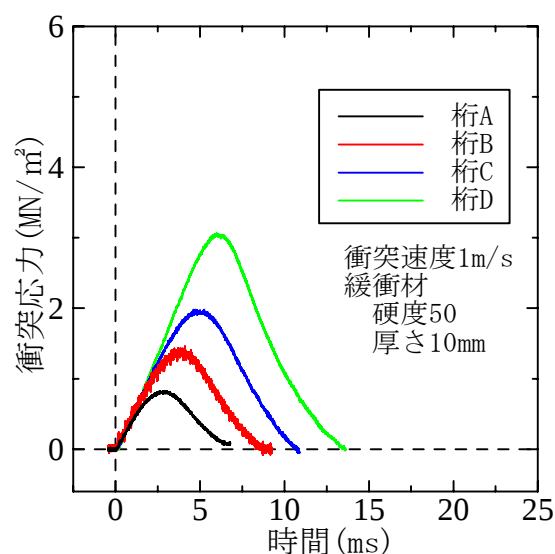


図-6 衝突応力と桁長の関係

なお、桁の衝突速度は、武野ら¹¹⁾の報告を参考に決定した。

3.2 緩衝材が応力波形に及ぼす影響

図-4は、桁Bを採用し、衝突速度1m/sで実験したときの、緩衝材を設置した場合と設置しないときの衝突応力-時間関係を並べて示したものである。

図から、緩衝材を設置しないときの応力は約 20.5MN/m²であるが、緩衝材を設置すると、最大応力は約 1.5 MN/m²と非常に小さくなった。しかし、応力継続時間は約 20 倍と長くなることがわかる。

図-5 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、桁供試体内を伝播する応力波の様子を示したものである。図中の赤線は圧縮波を、青線は引張波を表している。

図-5(a)は、緩衝材を設置していないときの様子を示したものである。今、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及び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。衝突の継続時間 T は、衝突体の長さを L 、桁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始める。このときに、ゲージ点で測定される波形は、図-3 に示したよう

な矩形形状なる。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。衝突の継続時間 T は、桁供試体の長さを 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-5(b)は、緩衝材を設置したときの初期部分の様子を示したものである。図-5(a)の場合とは異なり、境界Ⅰ及びⅣからの引張波が、衝突面に到達後も衝突が継続することになる。これは、緩衝材の剛性が小さいため、衝突体の保持したエネルギーが被衝突体に入射されにくくなるためである。これは、図-4 に示した波形からもわかるように、桁長が 1000mm の場合の衝突継続時間は約 8ms になっている。すなわち、桁に入射された弾性波の波頭は、桁中を約 20 回(=8/0.4) 往復することになる。その後、衝突体と被衝突体は離れて移動を始める。緩衝材が無いときは、離れた後、衝突体は静止するが、緩衝材を設置すると、離れた後でもエネルギーを保持する。以上に述べたように、緩衝材の有無により桁供試体の動的挙動が大きく異なることになる。

5 章で示したシミュレーション波形は、図中のグリーン線(ゲージ点)を通過する応力波を重ね合わせて求めたものである。

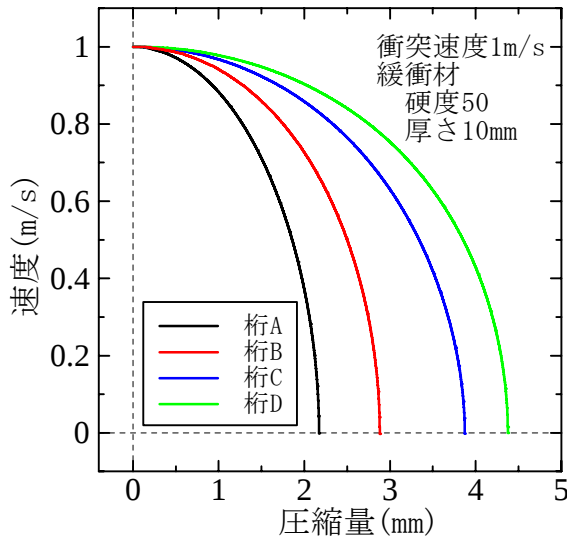


図-7 桁長・速度・緩衝材圧縮量関係

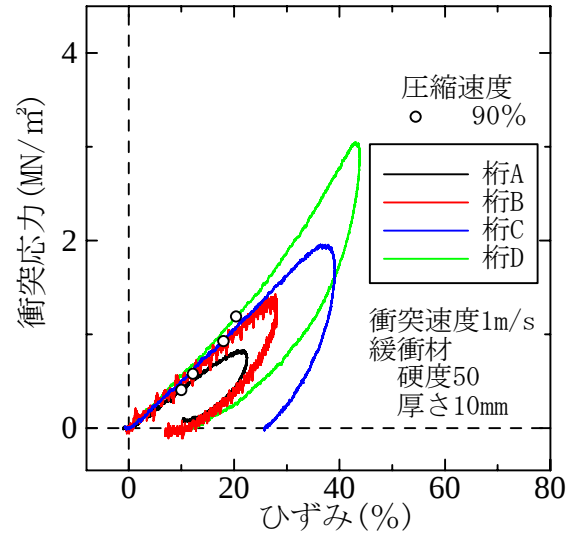


図-8 桁供試体長と緩衝材の応力-ひずみ関係

4. 実験結果と検討

4.1 桁長と衝突応力

図-6は、4種の桁を用いて、緩衝材を設置し衝突速度1m/sで実験したときの衝突応力-時間関係を並べて示したものである。緩衝材を設置しない場合は、図-3の結果から明らかなように、桁A, B, C, Dで、衝突継続時間は桁長と比例関係になるものの、衝突応力は同一になる。しかし、緩衝材を設置すると、図-6から明かなように、衝突応力は桁長が大きくなると増加し、桁長と比例的关系を示すことがわかる。この傾向が続くと仮定すると、桁長20m程度で緩衝材を設置しないときの衝突応力になり、緩衝材の応力緩衝効果が期待できないことになる。よって、緩衝材の応力緩衝効果を検討する場合には、桁長と衝突応力の関係を明らかにする必要がある。

緩衝材を設置したときの衝突端(図-5の境界面Ⅲ)は、緩衝材と桁のインピーダンスが大きく異なるので、桁に入射した応力波は自由端的に挙動する。よって、被衝突体の衝突端の変位速度 v_3 と変位 u_3 は、応力波形を利用して次式で表現できる。

$$v_3 = (c/E)\sigma \quad (2)$$

$$u_3 = \int v_3 dt \quad (3)$$

また、作用反作用の関係から、境界面Ⅱの衝突体の衝突端の変位 u_2 は、次式で求めることができる。

$$u_2 = V_0 dt - u_3 \quad (4)$$

図-7は、境界面ⅡおよびⅢの変位-時間関係を用いて、緩衝材の载荷速度(緩衝材の圧縮速度)-圧縮量関係を求めたものである。図から、桁長が長くなると緩衝材への载荷速度の低下割合が小さくなる(同一圧縮量での载荷速度は桁長に比例)ことと、緩衝材の圧縮量が大きくなることがわかる。

図-8は、図-7と同様、図-6に示した実験波形から緩衝材の応力-ひずみ関係を求めたものである。図中の○印は、緩衝材への

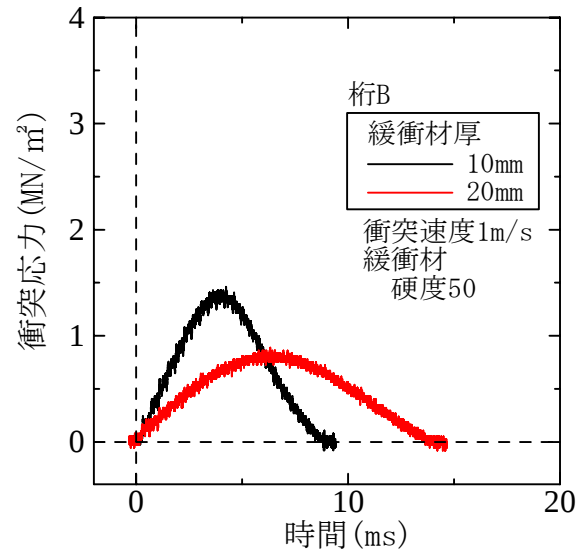


図-9 緩衝材厚さと応力-時間関係

载荷速度が衝突速度の90%になった点を示したものである。図から、桁長が長くなるにつれ、速度90%点における応力-ひずみ関係の勾配が大きくなっていくことが観察される。

以上の検討から、桁長が大きくなると、緩衝材の载荷速度効果や、衝突継続時間の増加、及び緩衝材の圧縮量増加に起因したハードニング効果等により、衝突応力が大きくなると推察される。よって、緩衝材の速度効果の詳細な検討が必要と思われる。

なお、図の横軸のひずみは、前述したように、桁の衝突応力から計算で求めたものであるが、この値はレーザー変位計の計測値から求めた緩衝材のひずみとほぼ一致した。

4.2 緩衝材厚さと衝突応力

図-9は、桁Bを用い、衝突速度1m/sで、緩衝材厚さを10mm, 20mmと変化させたときの応力-時間関係を並べて示したものである。図から、緩衝材厚さが2倍になると、最大衝突応力は約6割に低下することがわかる。他の実験でもほぼ同様な結果になった。また、衝突継続時間は緩衝材厚さが2倍になると約1.6倍と大きくなった。

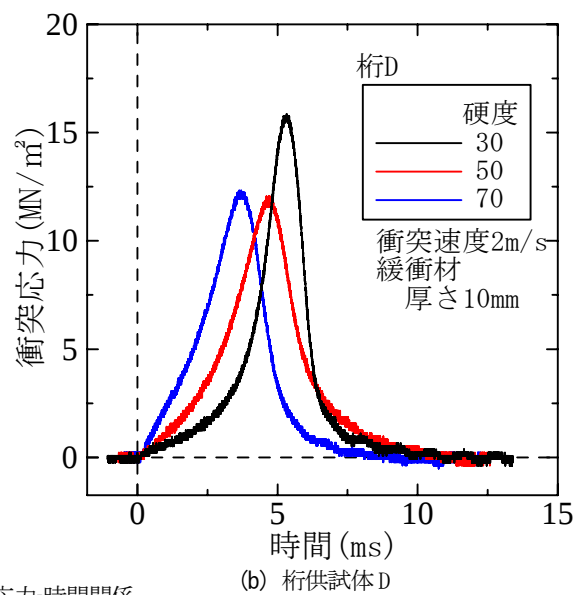
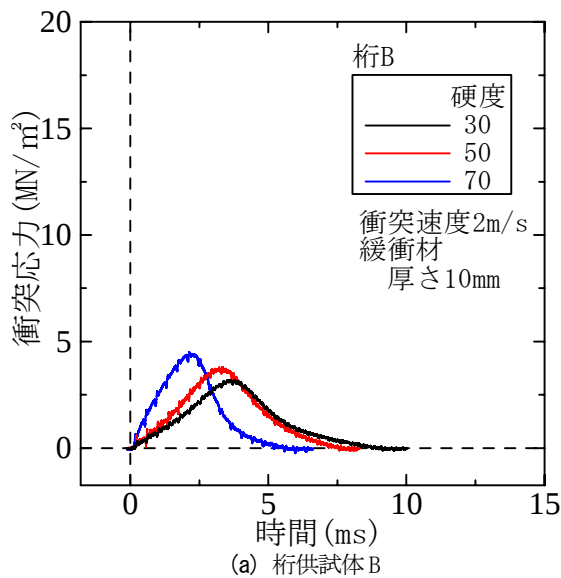


図-10 緩衝材硬度と応力-時間関係

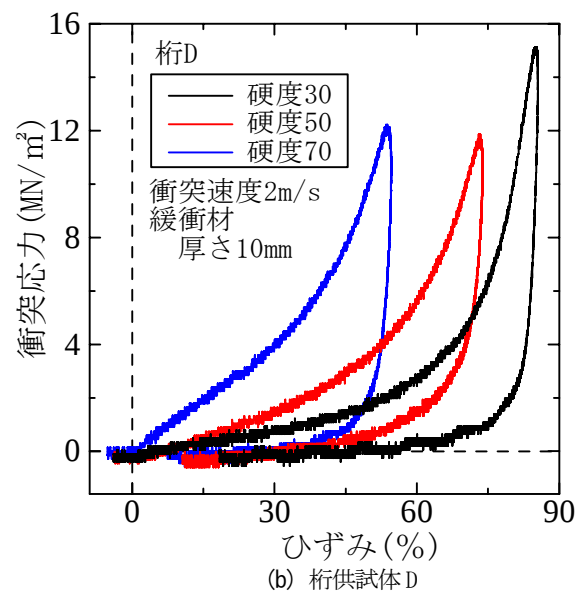
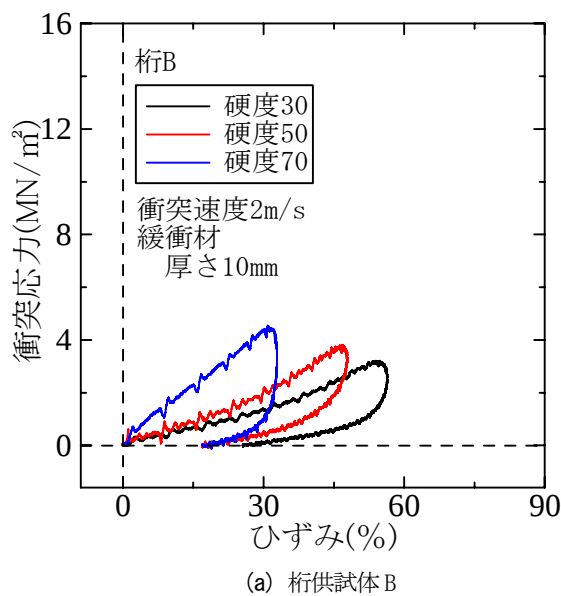
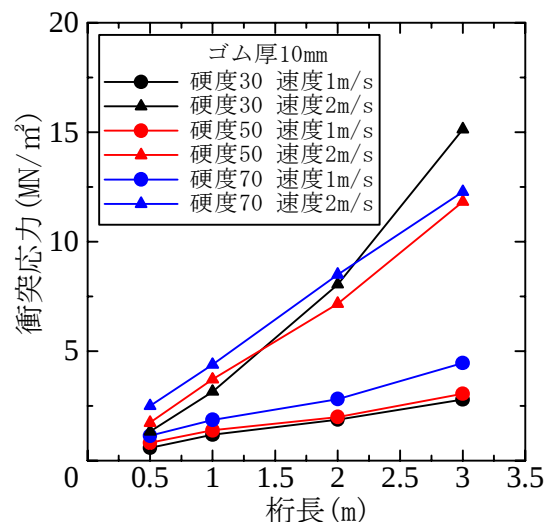


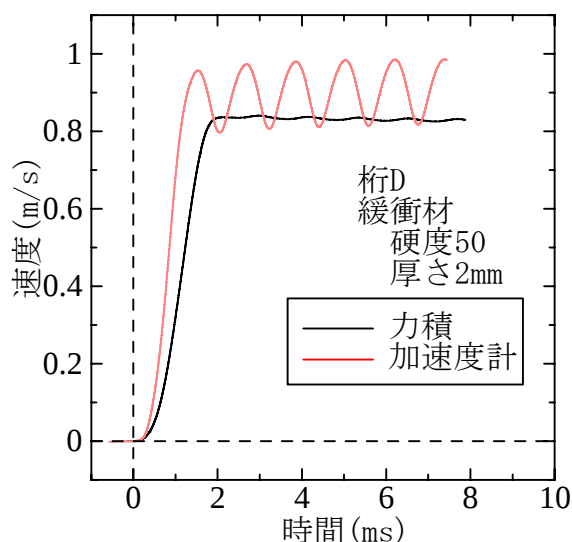
図-11 緩衝材硬度と応力-ひずみ関係

4.3 緩衝材の硬度と衝突応力

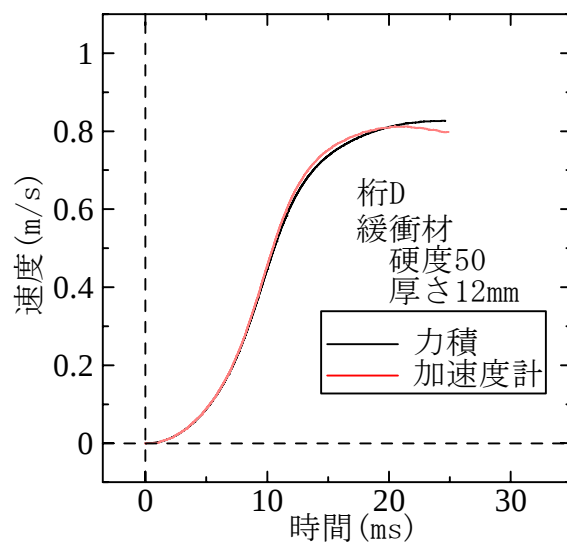
図-10は、衝突速度2m/s、緩衝材硬度を30、50、70と変化させたときの、桁Bと桁Dでの実験波形を示したものである。図から、桁長1mの桁Bでの、硬度30、50、70の応力比は1:1.2:1.4と、衝突応力が硬度と比例関係にあることがわかる。一方、桁長が大きい桁Dでは、硬度30、50、70の応力比は1:0.75:0.78と、衝突応力が硬度と反比例的な関係を示した。

図-11(a)、(b)は、図-10の結果を用い、緩衝材の応力-ひずみ関係を求めたものである。図から、緩衝材のひずみ値は、硬度が小さい程大きくなる。しかし、最大衝突応力は、桁が短いときは硬度と比例関係にあるが、桁が長くなると(図-11(b))、硬度30のときの衝突応力が大きくなる、興味ある結果が得られた。図から、硬度30の緩衝材の応力-ひずみ関係は、他の硬度の緩衝材に比べ、大きなハードニングが生じていることがわかる。



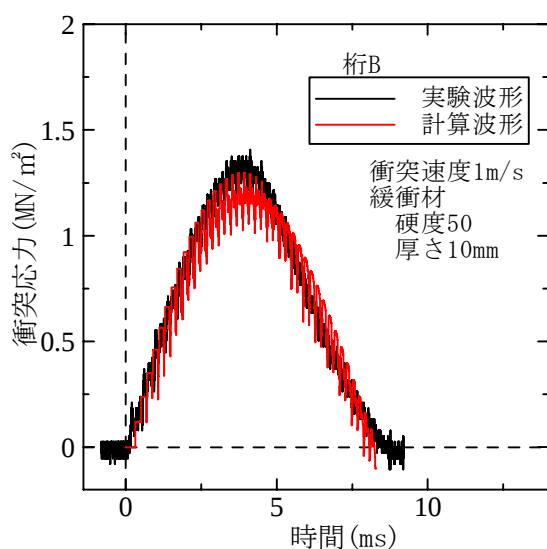


(a) 緩衝材厚 2mm

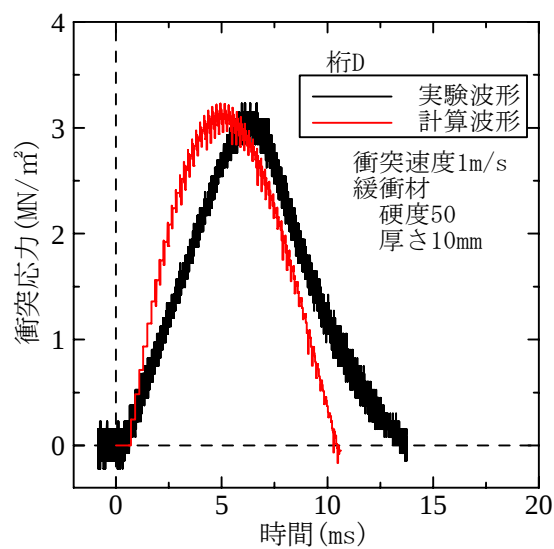


(b) 緩衝材厚 12mm

図-13 桁供試体の挙動に及ぼす緩衝材厚さの影響



(a) 桁 B



(b) 桁 D

図-14 実験波形とシミュレーション波形

図-11(a), (b) の応力-ひずみ関係から、さらに桁長が大きくなると、硬度 50 の最大応力が、硬度 70 の値を越すことが推察される。現在、硬度 50 の緩衝材が一般に利用されているが、桁長に合った緩衝材硬度が存在することが推察できる。

図-12は、緩衝材厚さ10mm、桁長4段階、硬度3段階、衝突速度2段階での、最大衝突応力と桁長の関係を示したものである。図から、衝突速度1m/sの場合は、衝突応力は硬度とほぼ比例の関係にあることがわかる。一方、衝突速度が2m/sの場合には、前述したように、硬度30での折れ線が特徴的な傾向を示した。この原因は、図-11(b)からわかるように、速度が大きくなると、硬度の小さい緩衝材は、歪みが大きくなり、ハードニング効果がより大きく生じることと、厚さが薄くなるためと考えられる。このような現象は、衝突速度が小さくても、桁長がさらに長くなると、硬度の大きい緩衝材でも生じる現象と推察される。

4.4 緩衝材厚さが桁挙動に及ぼす影響

図-13 は、桁 D の速度-時間関係を、応力波形の力積から求めた速度と加速度計の波形から求めた速度を並べて示したものである。図から、厚さ 2mm の緩衝材を設置したときは、力積と加速度計から求めた速度が一致しない様子が観察される。さらに、加速度波形から求めた速度波形から、衝突終了後も桁に入射された応力が波動的に挙動していることがわかる。いっぽう、厚さ 12mm の緩衝材を設置したときには、力積と加速度計から求まる速度がほぼ一致した。これは、緩衝材が厚くなり、衝突応力が小さくなる場合は、桁内の波動エネルギーを無視して桁間衝突現象を検討して良いことを示している。以上から、桁長と緩衝材厚さの比によって桁供試体の動的挙動が変化することが明らかになった。よって、実桁は長いので、桁間衝突現象を波動伝播問題として扱う必要があることがわかる。

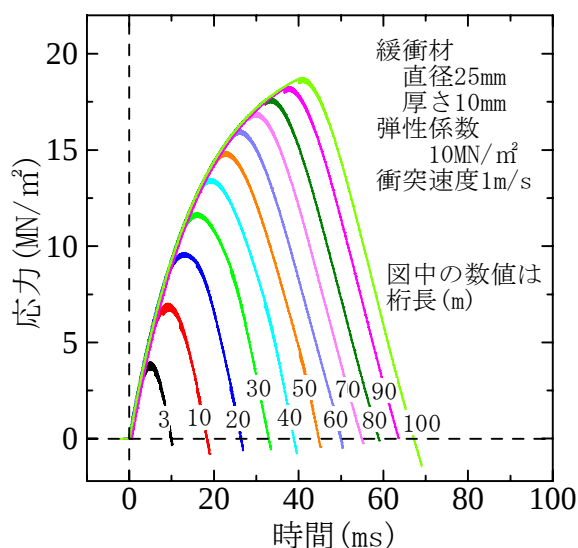


図-15 桁長が衝突応力に及ぼす影響
(弾性係数：10MN/m²，応力減衰率：0)

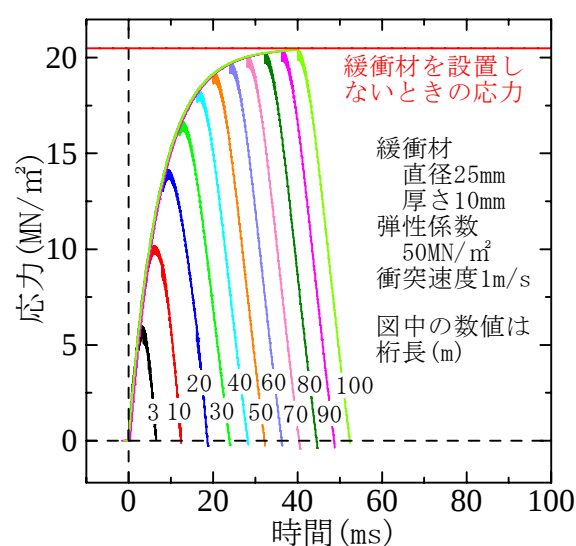


図-16 桁長が衝突応力に及ぼす影響
(弾性係数：50MN/m²，応力減衰率：0)

5. インピーダンス法によるシミュレーション

5.1 実験波形とシミュレーション波形

図-14 は、実験波形と多重反射問題を精度良く扱えるインピーダンス法⁹⁾を採用した計算波形を比較して示したものである。図(a)は桁Bの、及び図(b)は桁Dの、衝突速度1m/s、緩衝材厚さ10mmでの結果を示したものであるが、両波形はよく一致した。この結果からも、桁間衝突現象は桁内の波動伝播の問題として扱う必要があることがわかる。

桁間衝突現象をインピーダンス法でシミュレーションする場合に問題になるのは、計算に用いる緩衝材の弾性係数と緩衝材によるエネルギー減衰効果である。

緩衝材の弾性係数は載荷速度や変形量の影響を大きく受ける。そこで、測定波形から求めた、緩衝材の応力-ひずみ関係の、最大応力値の1/3と2/3の応力値点を結ぶ直線の勾配値を計算に採用する弾性係数とした。衝突継続中に、最初に緩衝材に入射した応力波は、緩衝材中の波動伝播速度を100m/sと仮定すると、緩衝材中を、ホプキンソン棒との境界面での反射を繰り返しながら1m前後伝播することになる(図-5(b)参照)。そこで、直径25mm、長さ300mmのゴム棒の中央部の2箇所(間隔50mm)に加速度計を貼付し、一端を打撃して応力値の減衰率を求めたところ、硬度50の緩衝材で、約0.1%/mmとなった。この値を応力減衰率と呼ぶことにする。図-14の計算波形は応力減衰率0.1%/mmを用いて計算したものである。

この他に、計算に用いた物理定数は、桁供試体の弾性係数、単位体積重量、波動伝播速度およびゴム緩衝材の単位体積重量、波動伝播速度である。

よって、緩衝材の衝突継続中の平均的な弾性係数と応力減衰率が分かると、桁間衝突応力がインピーダンス法により簡単に推定できることになる。また、弾性係数が推定できると、計算波形を実験波形に合わせる手法により、応力減衰率を求めることができる。さらに、この計算波形を用いて、図-8に

示すような応力-ひずみ曲線を描き、緩衝材のエネルギー減衰効果を検討できることになる。

5.2 衝突応力と桁長の関係

4章での検討から、桁間衝突応力を推定するためには、桁長の影響を考慮することが大変重要であることが明らかになった。しかも、この問題は、波動問題であるので、実験的に検討するのは困難を伴うものと推察される。そこで、インピーダンス法を採用して、衝突応力と桁長の関係についての基本特性を検討することは有用と判断する。

実桁寸法でシミュレーション計算する場合に問題になるのが、5.1で述べたように、計算に用いる緩衝材の弾性係数値である。各機関の実験研究等から¹²⁾判断すると、緩衝材の弾性係数は10MN/m²から500MN/m²の値になるようである。そこで、今回は10、50、200MN/m²の三段階の弾性係数を採用してシミュレーション計算を行った。

図-15は、緩衝材の弾性係数10MN/m²(応力減衰率:0)、厚さ10mm、衝突速度1m/sで、桁長を3m~100mの11段階で計算したときの、衝突応力-時間関係を示したものである。図から、桁長が大きくなると、衝突応力と衝突継続時間が大きくなることがわかる。

図-16は、緩衝材の弾性係数を50MN/m²とし、他の条件を図-15の場合と同一にしたときの計算結果を示したものである。弾性係数が大きくなると、桁長100m程度で、衝突応力が飽和する傾向を示した。なお、このときの飽和値は、緩衝材を設置しないときの衝突応力と一致する(図-3参照)。

図-17は、緩衝材の応力減衰率を0.1%/mmとし、他の条件を図-16の場合と同一にしたときの計算結果を示したものである。応力減衰率を採用すると、桁長50m程度で、衝突応力が飽和する傾向を示した。このときの衝突応力は応力低減率を0としたときの約57%になった。これから、緩衝材にはエネルギー減衰効果の大きなものを利用する必要があることが

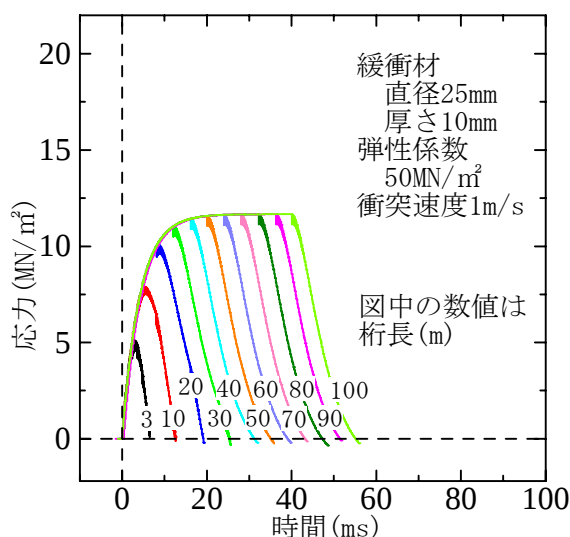


図-17 桁長が衝突応力に及ぼす影響
(応力減衰率：0.1%/mm)

わかる。従来、緩衝材を設置すると、衝突応力が1/15(約7%)程度になる¹³⁾と言われていたが、この結果から、桁長が長くなると、緩衝材の応力緩衝効果が小さいこともわかる。

図-18は、桁長を40mとし、緩衝材の弾性係数200MN/m²(応力減衰率:0.1%/mm)、衝突速度1m/sで、緩衝材厚さを10mm～50mmまでの5段階と変化させたときの、衝突応力-時間関係を示したものである。図から、衝突応力は緩衝材厚さが大きくなると小さくなった。今回の計算条件の場合、衝突応力は緩衝材厚さの-0.56乗に比例した。

図-19は、桁長と緩衝材厚比を1000:1とし、緩衝材の弾性係数200MN/m²(応力減衰率:0.1%/mm)、衝突速度1m/sで、桁長を10m～50mまでの5段階と変化させたときの、衝突応力-時間関係を示したものである。図から、桁長と緩衝材厚さを相似関係にすると、桁長が大きくなると、衝突応力が小さくなる傾向を示した。また、衝突継続時間は、桁長とほぼ比例関係を示すこともわかる。

このとき、応力減衰率をゼロにすると、衝突応力は桁長の影響を受けず一定値になった。

以上の検証から、桁間衝突の基本特性が明らかにされていない現状において、桁間衝突の再現実験を行う場合は、出来るだけ長い桁模型を採用し、桁長と緩衝材厚の関係を相似にして模型実験を行う必要があると推察する。このときの衝突応力-時間関係の、時間軸を実桁長に合わせて補正した、衝突応力-時間関係値を採用すると、安全側の設計になると思料する。

6. まとめ

- (1) 桁供試体にホプキンソン棒を採用すると、桁間衝突現象の基本特性が精度良く検討できる。
- (2) 緩衝材を設置しないときの衝突応力は桁長の影響を受けないが、緩衝材を設置したときは、桁長が大きくなると、衝突応力が増加するので、ゴム緩衝材の応力緩衝効果を論じる場合には、桁長の影響を考慮する必要がある。

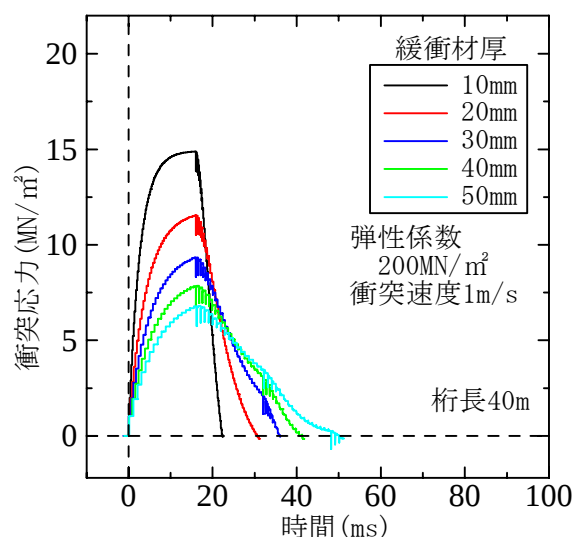


図-18 緩衝材の厚さが衝突応力に及ぼす影響
(応力減衰率：0.1%/mm)

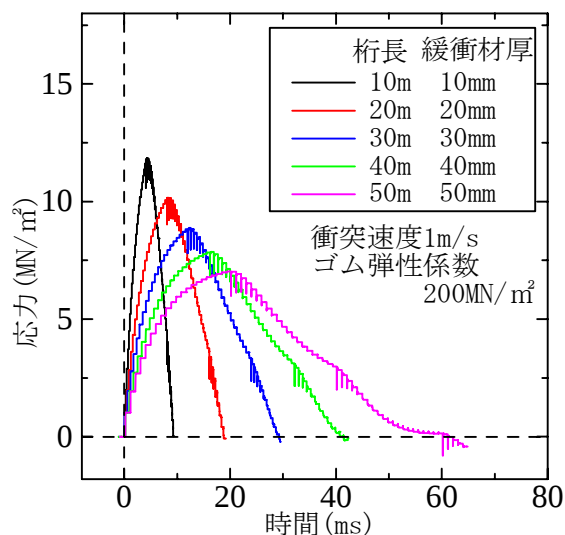


図-19 桁長緩衝材厚比1:1000での
シミュレーション波形(応力減衰率：0.1%/mm)

- (3) 緩衝材の硬度が小さいほうが、衝突応力が大きくなる場合がある。現在硬度50程度のゴム緩衝材が利用されているが、桁長や衝突速度に合ったゴム緩衝材の硬度が存在することが推察される。
- (4) 桁間衝突現象は波動伝播問題として扱う必要がある。よって、桁間衝突現象の基本特性の解明に、インピーダンス法は有効である。
- (5) ホプキンソン棒を採用した、本試験装置の実験波形と、数値計算波形を合わせる方法で、ゴム緩衝材の応力減衰率を推定できる。
- (6) 桁間衝突の再現実験を行う場合は、出来るだけ長い桁模型を採用し、桁長と緩衝材厚の関係を相似にして実験を行い、このときの衝突応力-時間関係の、時間軸を実桁長に合わせて補正した値を採用すると、安全側の設計になると思料する。

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) 島ノ江哲，長谷川恵一，川島一彦，庄司学：衝突力を受けるゴム製緩衝装置の動特性，土木学会論文集，No. 612/ I -46, pp. 129-142, 1991. 1.
- 3) 北原武嗣，梶田幸秀，西本安志，香月智：鋼材質量を考慮したゴム製緩衝材の衝撃力低減効果に関する桁間衝突実験，第 28 回地震工学研究発表会報告集，2005.
- 4) 木村修一，近藤博，本間重雄：動的ロードセルの設置条件に関する一考察，土木学会論文集 No. 777/VI-65, pp. 187-192, 2004. 12.
- 5) 木村修一，近藤博：動的ロードセルの寸法が計測荷重値に与える影響，平成 19 年度建設施工と建設機械シンポジウム(梗概集)，pp.51-52, 2007.10
- 6) 磯部大吾郎，藤井雄作，斎藤聡：エアスライド型衝突試験機による動荷重計測値の実験的および解析的評価，日本機械学会論文集(A 編)，67 巻，657 号，pp. 19-26, 2001. 5
- 7) ISO-16063-22:Methods for transducers-Part22:Shock calibration by comparison to a reference transducer (2005) .
- 8) 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. 1.
- 9) 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
- 10) 運上茂樹：最近の地震による橋梁被害と耐震性向上策，第 52 回道路講習会，No. 10, pp. 10-1-10-18, 2004.
- 11) 武野志之歩，伊津野和行：隣接橋梁間の地震時相対速度応答と衝突速度スペクトルに関する研究，土木学会論文集，No.668/ I -54, pp.163-175, 2001.1
- 12) 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：緩衝材物性および載荷/除荷速度がゴム製緩衝装置の応力度－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, 1999. 7
- 13) 金光明，梶田幸秀，香月智，石川信隆：ゴム製緩衝材を用いた桁間衝突実験のシミュレーション解析，構造工学論文集，Vol. 48A, pp. 887-898, 2002. 3

(2007 年 9 月 13 日受付)