

鋼材衝突実験におけるゴム製緩衝材に作用する最大衝撃力の推定式

Estimated formula of maximum impact force on natural rubber during collision between two steel bars

梶田幸秀*, 北原武嗣**, 西本安志***, 大塚久哲****

Yukihide Kajita, Takeshi Kitahara, Yasushi Nishimoto and Hisanori Otsuka

*博士 (工学), 九州大学大学院助教授, 工学研究院建設デザイン部門 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

**博士 (工学), 関東学院大学助教授, 工学部社会環境システム学科 (〒236-8501 横浜市金沢区六浦東 1-50-1)

***博士 (工学), シバタ工業株式会社, 商品企画第2グループ (〒674-0082 兵庫県明石市魚住町中尾 1058)

****工博, 九州大学大学院教授, 工学研究院建設デザイン部門 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

In the Japanese Specifications for Highway Bridges, the design load of the device which prevents a superstructure from falling off is set to be 1.5 times as the weight of the superstructure. The collision velocity of the superstructure is not considered. So, the purpose of this study is to propose the estimated formula of the maximum impact force on the natural rubber as a shock absorber during the collision, specifically the collision between two steel bars. The collision test between two steel solid bars is carried out. The thickness of shock absorbing rubbers ranges from 2mm to 40mm, the collision velocity ranges from 0.2m/sec to 1.0m/sec on 7 stages and the mass of the steel bar ranges from 250kg to 500kg on 4 stages. From the results, it is confirmed that the maximum impact force is proportional to the reduced mass and the collision velocity squared.

Key Words: estimated formula, maximum impact force, collision velocity, reduced mass

キーワード: 推定式, 最大衝撃力, 衝突速度, 換算質量

1. 序論

現在の道路橋示方書・V耐震設計編¹⁾では,「落橋防止構造は,衝撃的な地震力を緩和できる構造とするものとする.」,「衝撃的な地震力を緩和するためゴムパッド等の緩衝材を用いて耐衝撃性を高める構造とするものとした.」と記されており,落橋防止構造における緩衝材への期待は大きいと考えられる.道路橋において衝撃的な力を考慮する事例としては,落橋防止構造と上部構造の衝突だけでなく,桁間衝突も挙げられる.道路橋示方書では,2つの橋梁(設計振動単位)の固有周期の比が1.5以上になる時に桁間衝突の配慮が必要という記述にとどまっているが,1995年兵庫県南部地震や1999年台湾集集地震では,桁間衝突による桁端部の損傷が見られており,桁間衝突に対しても,落橋防止構造と同様に桁端部に緩衝材を設置するなどの対策を行い,桁端部の被害の低減を目指すべきであると考えられる.

落橋防止構造の設計荷重は死荷重反力の1.5倍と道路橋示方書で規定されている.すなわち,上部構造重量が決定

されれば衝突時における上部構造の速度,言い換えれば,地震の規模に関係なく一義的に落橋防止構造の設計荷重は決定される.落橋防止構造と同じように衝撃力を受ける代表的な構造物としてロックシェッドや砂防ダムが挙げられる.ロックシェッドの場合,斜面からの落石による衝撃力の大きさは落石の重量と落石の予想落下高さ(すなわち落下速度)の関数として落石対策便覧²⁾において示されている.また,砂防ダムの場合でも,土石流内に含まれる巨礫による衝撃力は巨礫の大きさと衝突速度の関数となっている³⁾.すなわち,道路橋における落橋防止構造の設計荷重,すなわち落橋防止構造や桁端部に設置される緩衝材の設計荷重は,上部構造の重量だけでなく上部構造の衝突速度も重要なパラメータの一つとして考えるべきである.

落橋防止構造や桁間衝突に関する実験や解析^{例えば4), 5)}は1995年兵庫県南部地震以降,数多く行われてきたが,そのほとんどは,種々の緩衝材による衝撃力低減効果の確認や,衝突を考慮した橋梁全体系の応答に着目されており,落橋防止構造や桁端部に設置される緩衝材に発生する衝

撃力を定量的に求めようとする研究は少ない。阿部ら⁶⁾は、接触解析手法と衝突ばねを融合することにより桁間の3次元的な衝突現象を精微に再現できるモデルの提案を行っているが、衝撃力と衝突時の速度の関係までは述べられていない。

そこで本研究では、桁間衝突用緩衝材の設計荷重に上部構造の速度パラメータを導入するために、まずは現在まで行ってきた桁間衝突実験結果⁷⁻⁹⁾から緩衝材に作用する最大衝撃力の推定式を作成し、最大衝撃力と衝突速度の関係について検討することを研究目的とした。具体的には、ゴム製緩衝材の厚さ、衝突速度、鋼材の質量をパラメータとして行われた2つの鋼材の衝突実験結果から、ロックシェッドや砂防ダムにおいて衝突荷重の算定に用いられているHertzの接触理論式¹⁰⁾を基に、実験式の回帰式の作成を行った。

本研究の最終目的は、実橋梁を対象とした桁間衝突時に用いるゴム製緩衝材の設計荷重を提案することにある。実橋梁での実験を行うことは難しいため、数値シミュレーションに頼ることになるが、数値シミュレーションの妥当性を示すためにも、まず、実験結果からの回帰式を作ることが必要であると考え、本研究を行った。

2. 鋼角柱の衝突実験

2.1 実験概要

衝突実験は、防衛大学校が所有する動的物性評価装置と空気浮上式ガイドレールを用いて行った。実験は図-1に示すように、長さ3000mmのガイドレール上に、上部構造に見たてた長さ1000mmの鋼材を2体設置し、1体を静止させ、もう1体を載荷ラムにより一定速度で押し出し、静止した鋼材に衝突させることとした。本実験において、載荷ラムによって押し出された鋼材を衝突鋼材、静止している鋼材を被衝突鋼材と呼ぶ。

2.2 計測項目

ゴム製緩衝材に作用する衝撃力と衝突速度の関係を明らかにするため、衝突時に鋼材が受ける衝撃力と、衝突前後の衝突鋼材および被衝突鋼材の速度の計測を行った。鋼材の衝撃力は、写真-1に示すとおり、衝突鋼材および被衝突鋼材に取付けたロードセルにより計測した。また鋼材の速度は、衝突鋼材および被衝突鋼材の移動距離をレーザー式変位計により計測し、得られた時間-移動距離関係のグラフを最小自乗法により時間に関する1次式で表し、その近似式の傾きとした。ここで用いたロードセルは、本実験装置に取付けられるよう加工した特注品である。設置した緩衝材の厚さにより、3000kN用ロードセルと500kN用ロードセルを使い分けた。検定試験から3,000kN用ロード

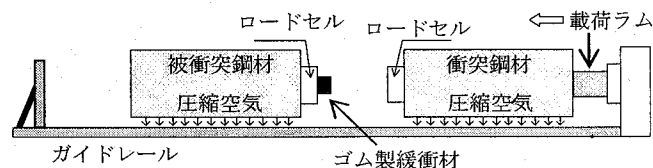


図-1 実験状況概要図

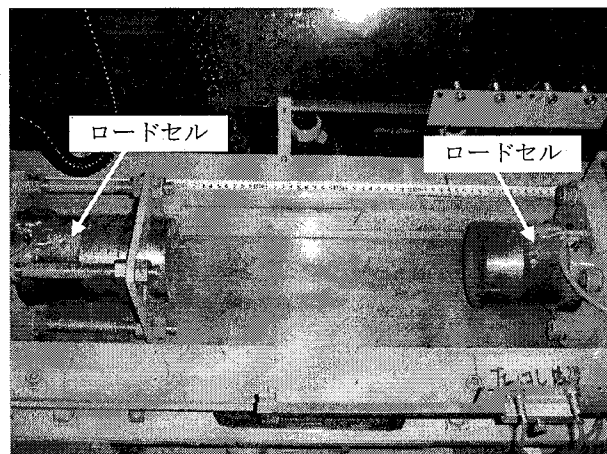


写真-1 衝撃力計測用ロードセル

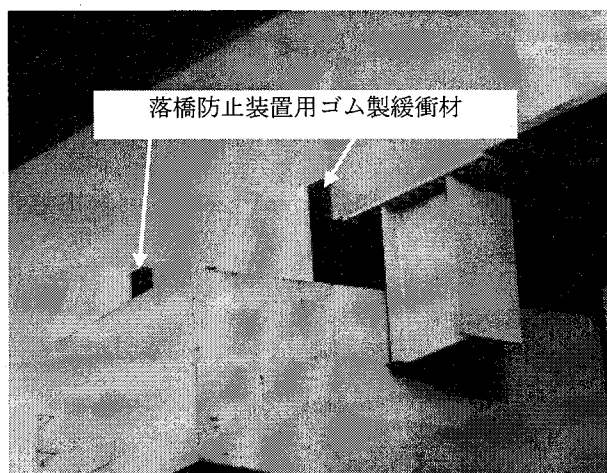


写真-2 落橋防止装置

セルは600N、500kN用ロードセルでは100Nの分解能を有していることを確認している。またロードセルの固有振動数は、3000kN用ロードセルは13.5kHz、500kN用ロードセルは8.9kHzである。用いたレーザー式変位計は、(株)キーエンス社製のLB-300である。計測サンプリング時間間隔は50μsecとした。

2.3 鋼材の概要

衝突鋼材および被衝突鋼材ともに、SS400を使用し、200×200×1000mmが基本形状である。その鋼材にロードセルを取り付けたときの重量は、衝突鋼材は2.92kN、被衝突鋼材は2.94kNであった。被衝突鋼材の方が若干重いのは、写真-2に示すようにゴム製緩衝材を取り付けるための

治具が被衝突鋼材側（写真-1 では左側）のロードセル前面に取り付けられているからであり、ゴム製緩衝材は被衝突鋼材側に取り付けた。鋼材質量もパラメータとして衝突実験を行っているが、鋼材の質量を軽くする場合は、鋼材から鋼板をはずし、重くする場合は、80mm×80mm×1000mm（質量 50kg）の鋼材を基本形状鋼材に取り付けることで対応している。

2.4 実験供試体の断面決定手法

供試体の断面決定は、実橋梁での落橋防止構造用緩衝材の設計を参考にした。写真-2 に落橋防止構造用緩衝材の設置事例を示す。設置されている落橋防止構造用緩衝材の厚さは、断面積によらず 50mm が一般的であり、実際に衝突する面積（受圧面積：AI）と衝突面に垂直な面の面積（自由表面積：AF）の比（AF/AI）が 0.3～1.0 というのが一般的である¹¹⁾。本論文ではこの値を形状率と呼ぶことにする。

本実験は桁間衝突現象に着目して行っているが、落橋防止構造用緩衝材の設計例に従えば、実験で用いる緩衝材の断面積は死荷重反力（基本となる鋼材重量 3000N）の 1.5 倍を硬度 50 度の天然ゴムの許容支圧応力（12N/mm²）で除することで求め、必要断面積は約 400mm²、つまり、一辺 20mm の正方形となる。形状率から厚さを求めると、1.5mm から 5.0mm とかなり薄くなり、複数の厚さの供試体を作成するのが困難となる。そこで、本研究では、緩衝材の受圧面を一辺 40mm の正方形にし、形状率から求まる厚さ 3mm から 10mm の供試体を用意した。なお、形状率の考え方は、積層ゴムのばね定数を求めるときに使われる一次形状係数の考え方を踏襲している¹²⁾。一次形状係数は受圧面積を自由表面積で除する（AI/AF）ことで求められる。自由表面積が 0（緩衝材がない場合）では一次形状係数が無限大になる。そのため本論文では、一次形状係数の逆数を形状率と定義し、形状率をパラメータとした。

2.5 実験ケース

本実験では、衝突鋼材に与える設定速度を 0.2, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 1.0m/sec の 7 通り、緩衝材の厚さを 3.5mm, 6mm, 8mm, 10mm の 4 種類に変化させた。鋼材の質量については、表-1 に示すとおり 6 種類用意した。ただし、鋼材質量をパラメータとした実験（表-1 中の Case 2～6）では、緩衝材の厚さは 6mm と 10mm の 2 種類、設定速度については、0.4, 0.7, 1.0m/s の 3 通りで実験を行った。但し、厚さ 6mm のとき Case 5 については行っていない。実験は各設定速度で 2 回ずつ行い、得られたデータについては文献 7) で示したとおり、衝突前後の運動量が保存されていないものや衝突前後での鋼材の運動量の変化量と力積の大きさが異なるものは実験結果からは棄却した。棄却さ

表-1 実験ケース

	衝突鋼材 質量(kg)	被衝突鋼材 質量(kg)	備考
Case 1	300	300	鋼材の基本 形状
Case 2	250	250	
Case 3	250	375	被衝突鋼材 質量を Case 2 の 1.5 倍
Case 4	250	500	被衝突鋼材 質量を Case 2 の 2 倍
Case 5	500	500	2 つの鋼材 とも Case 2 の 2 倍
Case 6	500	250	Case 4 の鋼 材質量を入 れ替えた

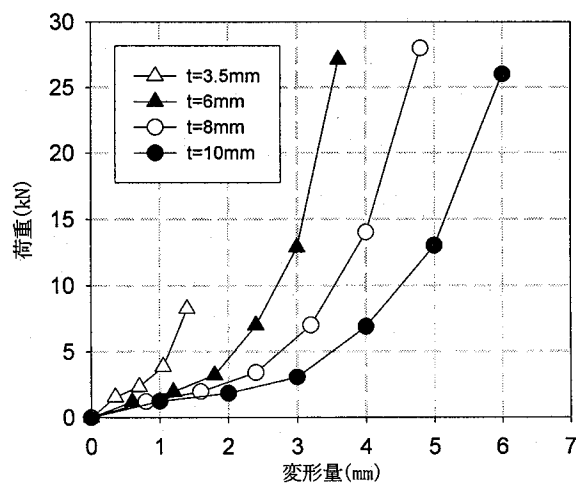


図-2 緩衝材の静的荷重-変形関係

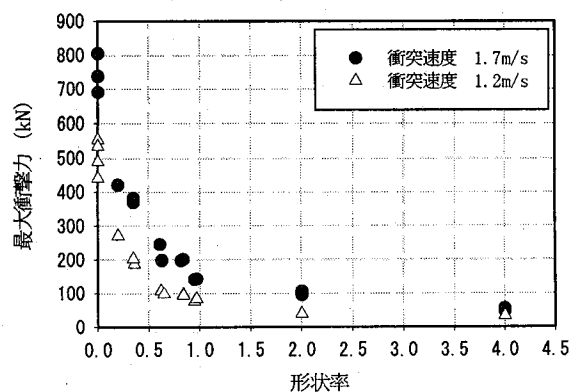
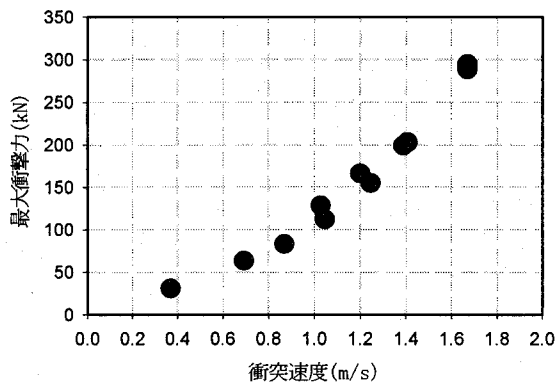
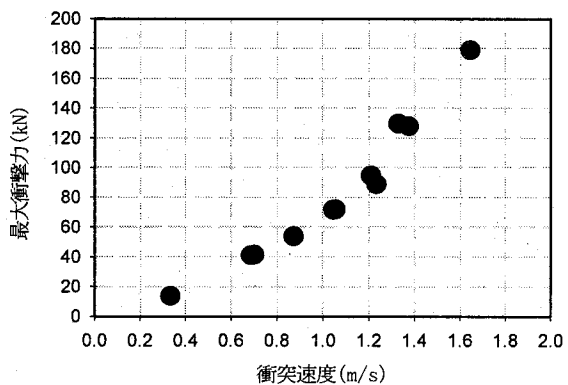


図-3 形状率と最大衝撃力の関係

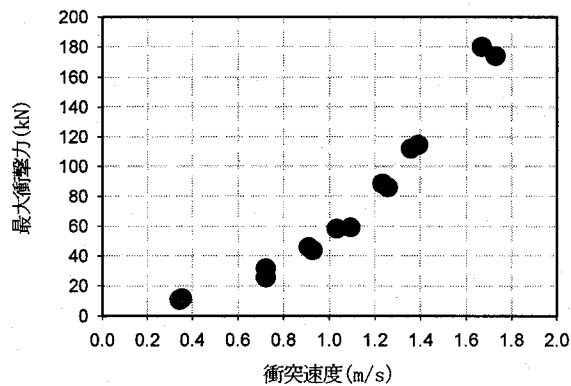
れたデータが存在した原因としては、得られた実験結果から衝突開始時間と衝突終了時間を厳密に定義することは難しく、また、衝突が起きていないときでもロードセルの値はちょうど 0 を示さず、微小な値を示すため、力積の大きさは、衝突継続時間（積分時間）の定義の仕方により異



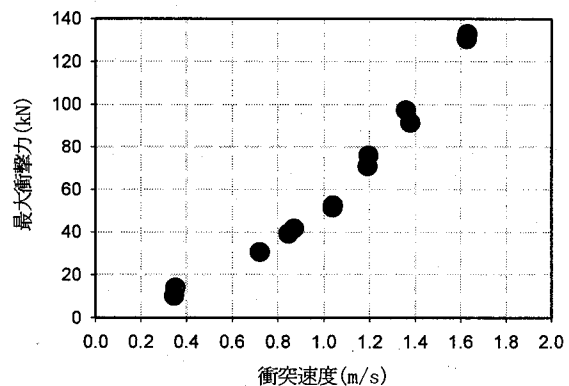
(a) ゴム厚 3.5mm の場合



(b) ゴム厚 6mm の場合



(c) ゴム厚 8mm の場合



(d) ゴム厚 10mm の場合

図-4 衝突速度と最大衝撃力の関係

なるからである。よって、鋼材の運動量の変化量と力積の大きさが大きく異なる実験データについては、衝突継続時間の判断に時間を割くのではなく、データを棄却し、再実験を行い、すべてのケースで2つのデータを得た。

3. 実験結果の考察

回帰式を作成するに当たり、実験結果について簡単に述べる。詳細な考察については、文献 8), 9) を参照していただきたい。

図-2 に用いた緩衝材の静的载荷試験結果を示す。厚さが厚いほど（形状率が大きいほど）、剛性が小さくなっていることがわかる。図-3 に形状率と最大衝撃力の関係を示す。なお、図中には、文献 8) で行った緩衝材無し、厚さ 2mm, 20mm, 40mm のケースも示している。これより、最大衝撃力は形状率に反比例していると考えられる。図-4 に緩衝材厚さを一定としたときの最大衝撃力と衝突速度の関係である。衝突速度とは、実際に計測された衝突直前の衝突鋼材の速度であり、その速度は設定速度の約 1.7 倍になっていた^{7), 8)}。図-4 より、最大衝撃力は衝突速度の関数で表されることがわかる。図-5 に表-1 に示した実験 Case 4 と Case 6 の結果を示す。これにより、質量を入れ替えても最大衝撃力は一定であるといえるので、最大衝撃力を求める際に、重い鋼材が軽い鋼材に当たる場合と軽い

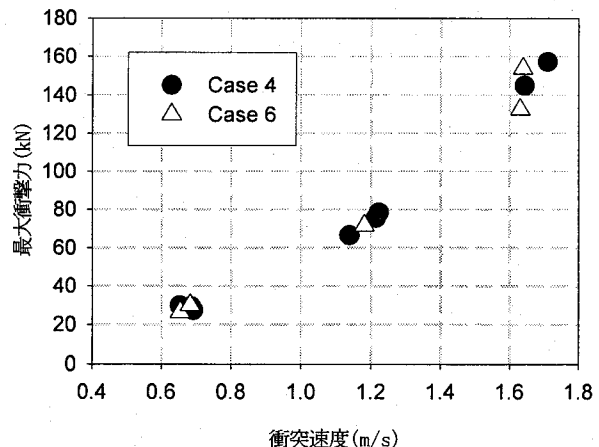
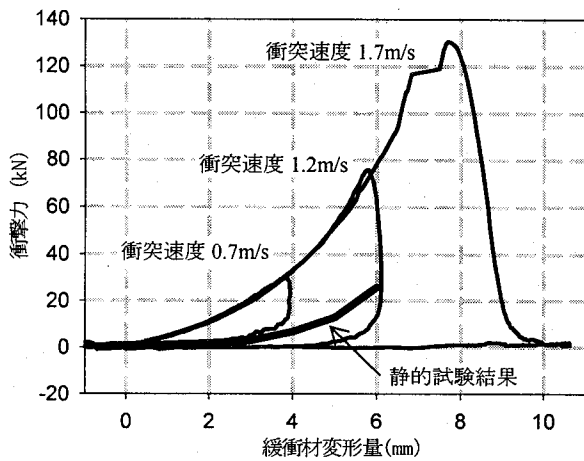
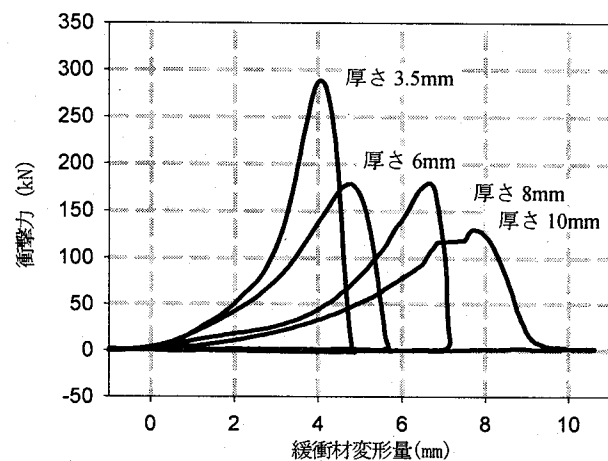


図-5 鋼材質量を入れ替えた場合の最大衝撃力

鋼材が重い鋼材に当たる場合に分ける必要がないことがわかる。表-2 に Case 2 から Case 5 の実験結果を示す。表は Case 2 の最大衝撃力を 1 とした場合の Case 3, Case 4 の最大衝撃力の値を示している。これより、緩衝材厚さ 6mm の場合は、2 物体の換算質量 $m_1 m_2 / (m_1 + m_2)$ の割合よりも少し小さな値がでていますが、これは基準となる Case 2 の最大衝撃力の値が厚さ 10mm の場合よりも大きく、鋼材質量が大きくなるにつれ、最大衝撃力も大きくなっているが、割合（変化量）としては小さくなったためと考えられる。鋼材の質量を変化させた場合、最大衝撃力の値は 2 物体の換算質量に比例していると考えられる。



(a) 衝突速度が異なる場合 (緩衝材厚さ10mm)



(b) 緩衝材の厚さが異なる場合 (衝突速度1.7m/s)

図-6 緩衝材に作用する衝撃力と変形量の関係

4. 実験結果の回帰式の作成

4.1 Hertz の接触理論

ロックシェッドや砂防ダムの衝突荷重の算定式は Hertz の接触理論により求められた式を基に作られているため、本研究においても同じように行う。Hertz の接触理論式は 2 つの球体の衝突荷重を求める式であり、下式のように表される¹¹⁾。

$$P_{\max} = \left\{ \frac{4}{3\pi} \cdot \frac{1}{k_1 + k_2} \cdot \sqrt{\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}} \right\}^{\frac{1}{5}} \cdot \left\{ \frac{5}{4} v_0^2 \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \right\}^{\frac{3}{5}} \quad (1)$$

$$k_1 = \frac{1 - \nu_1}{\pi E_1}, \quad k_2 = \frac{1 - \nu_2}{\pi E_2}$$

$P_{\max}$: 最大衝撃力, R : 球体の半径, v_0 : 衝突速度, m : 物体の質量, ν : ポアソン比, E : ヤング率, 添え字の 1, 2 は物体の番号。Hertz の接触理論によると最大衝撃力は大きく 3 つの項目に分けられる。一つめは物体の接触面積と剛性に関する係数, 二つめは衝突速度, 三つめは 2 物体の換算質量 ($m_1 m_2 / (m_1 + m_2)$) である。

4.2 厚さが異なる緩衝材の実験結果からの回帰式の作成

図-4 に示した最大衝撃力と衝突速度の実験結果に対して回帰式の作成を試みる。Hertz の接触理論と同様, 接触面積と剛性に関する項, 換算質量に関する項, 衝突速度に関する項の積の形, すなわち, $P_{\max} = (\text{剛性}) \times (\text{換算質量}) \times (\text{衝突速度})$ で最大衝撃力を表すことにした。初めに衝突速度に着目し, 回帰式を $P_{\max} = a v_0^b$ (a, b : 定数) に設定して実験結果の回帰を行った。回帰した結果を表-3 に示す。表より, 緩衝材が厚くなるにつれ a の値が小さくなるのは, 厚さが厚いほど剛性が低くなるため, 最大衝撃

表-2 鋼材質量を変えた場合の最大衝撃力の比

(a) 緩衝材厚さ 10mm

	$v=0.7\text{m/s}$	$v=1.2\text{m/s}$	$v=1.7\text{m/s}$	$\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$
Case 2	1.00	1.00	1.00	1
Case 3	1.11	1.13	1.21	1.2
Case 4	1.19	1.24	1.31	1.33
Case 5	1.58	1.84	1.86	2.0

(b) 緩衝材厚さ 6mm

	$v=0.7\text{m/s}$	$v=1.2\text{m/s}$	$v=1.7\text{m/s}$	$\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$
Case 2	1.00	1.00	1.00	1
Case 3	1.15	1.06	1.20	1.2
Case 4	1.15	1.12	1.20	1.33

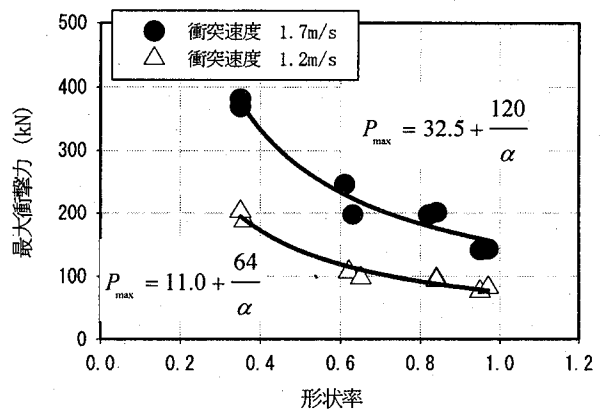
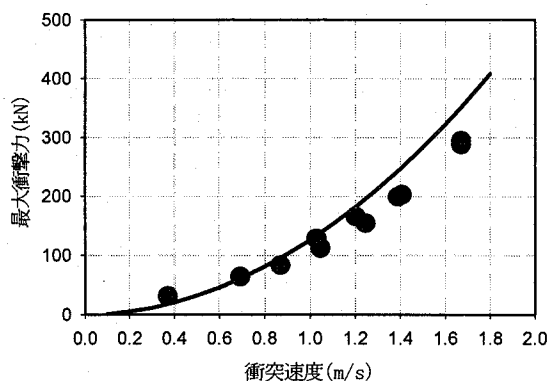


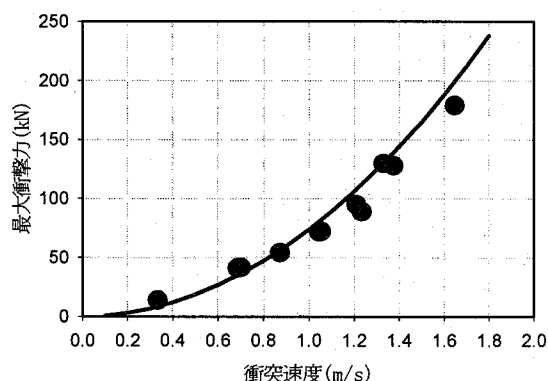
図-7 形状率と最大衝撃力の関係

力が小さくなるという傾向に一致している。また, 速度項については, Hertz の接触理論では, 衝突速度の 1.2 乗で表されているが, 表-3 に示した b の値の平均値は 1.955 となり, 式の簡便性も考慮に入れ, 本実験からの回帰式では衝突速度の 2 乗を用いるのが良いと判断した。

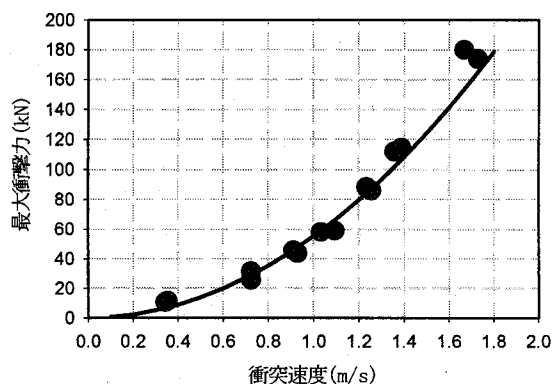
続いて, 形状率 (緩衝材の剛性) が最大衝撃力に与える影響について考える。図-6 (a) に緩衝材厚さが一定で衝突速度が異なる場合の衝撃力と緩衝材の変形関係を, 図



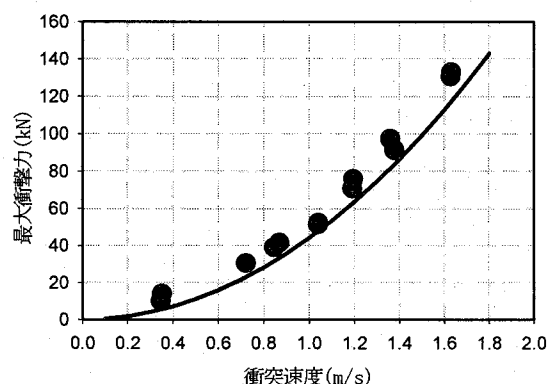
(a) ゴム厚 3.5mmの場合



(b) ゴム厚 6mmの場合



(c) ゴム厚 8mmの場合



(d) ゴム厚 10mmの場合

図-8 衝突速度と最大衝撃力の関係 (回帰式付き)

-6(b)に衝突速度一定で、緩衝材の厚さが違う場合の衝撃力と緩衝材の変形関係を示す。図-6(a)より、緩衝材厚さが同じならば、衝突速度の違いによらず衝撃力と緩衝材の変形関係は同じ傾きを有していることがわかる。すなわち、緩衝材の剛性を表す係数は、緩衝材の形状が決まれば、衝突速度に依存せず一定でもかまわないといえる。しかし、図-6(a)からわかるように衝突実験から得られる荷重（衝撃力）-変形関係は、静的試験から得られるものと異なるため、静的試験の剛性をそのまま最大衝撃力の推定式に用いることは難しい。図-6(b)からは、緩衝材の厚さが薄いほど衝撃力-変形関係の傾きが大きくなる傾向はわかるが、傾きの違いを定量的に把握することは今後の課題にする。

本論文では、緩衝材厚さの影響を形状率という係数で表している。形状率が大きいほどゴム厚は厚くなり、剛性は小さくなるので、発生する最大衝撃力は小さくなる。すなわち、最大衝撃力は形状率の逆数をパラメータとして表せると考えられる。よって、図-3 に示した形状率と最大衝撃力に対して、形状率の逆数を関数としたグラフを重ねてみる。その結果を図-7 に示す。これより、衝突速度が速い場合は、曲線と実験データに少し開きがあるが、最大衝撃力は形状率の逆数に比例すると考えた。

以上より、次に示す考えに基づき回帰式を作成した。

- ・速度については、衝突速度の2乗 (v_0^2) を用いる

表-3 回帰式の係数

緩衝材 厚さ(mm)	形状率	a	b
3.5	0.35	111.5	1.843
6.0	0.60	68.94	1.894
8.0	0.80	54.64	2.208
10.0	1.0	52.36	1.878

表-4 回帰式の係数

厚さ	3.5mm	6mm	8mm	10mm
形状率	0.35	0.6	0.8	1.0
c (1/m)	26.02	27.58	29.14	34.91

- ・質量の影響については、表-2 より、2 物体系の換算質量 $m_1 m_2 / (m_1 + m_2)$ を用いる。

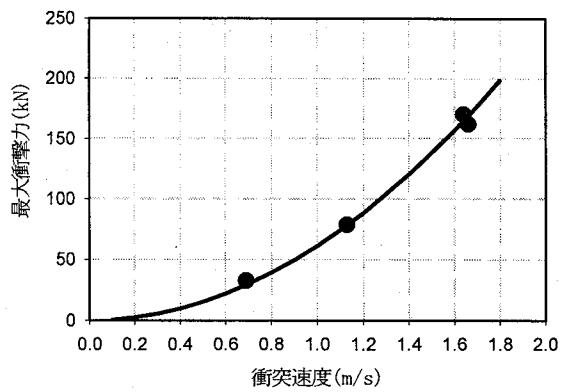
- ・緩衝材の剛性の影響は形状率で表し、形状率の逆数を用いる。

これにより、回帰する式を下記のように設定する。

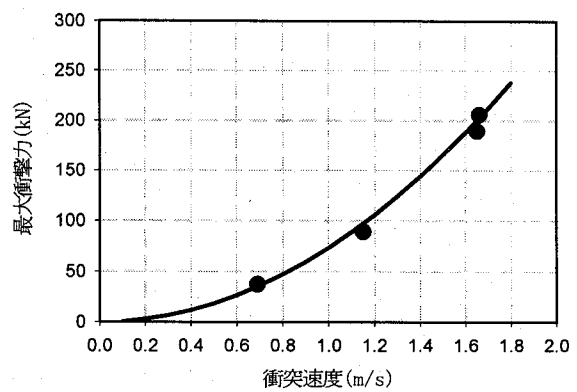
$$P_{\max} = c \cdot \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \cdot \frac{1}{\alpha} \cdot v_0^2 \quad (2)$$

ここで、 α は形状率であり、定数 c は、長さの-1 乗の単位を有する。定数 c の値を図-4 の実験値から回帰すると、表-4 のようになる。4 つの値の平均値である 29.41 を定数

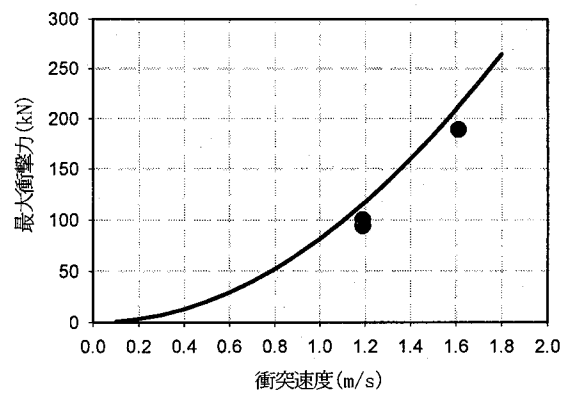
$$c \text{ の値として採用し、回帰式を } P_{\max} = 29.41 \cdot \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \cdot \frac{1}{\alpha} \cdot v_0^2$$



(a) 質量 (250kg-250kg) の場合

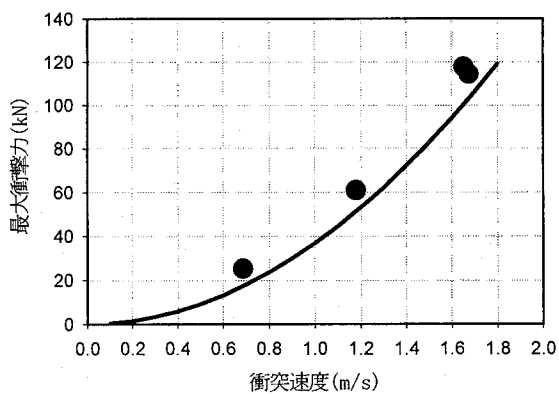


(b) 質量 (250kg-375kg) の場合

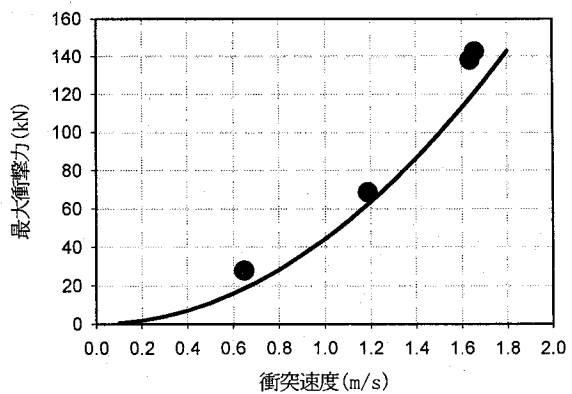


(c) 質量 (250kg-500kg) の場合

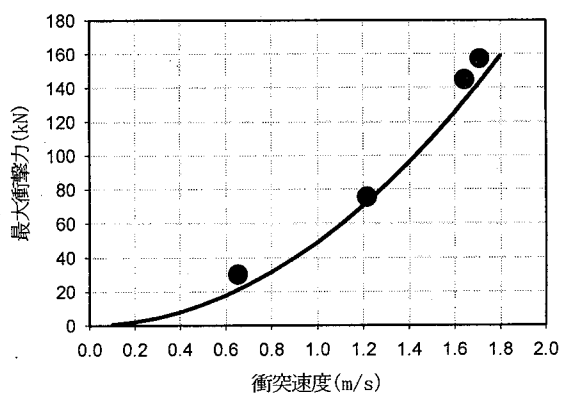
図-9 衝突速度と最大衝撃力の関係 (緩衝材厚さ6mm)



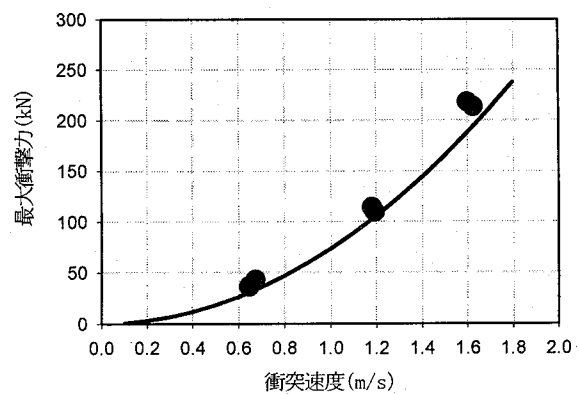
(a) 質量 (250kg-250kg) の場合



(b) 質量 (250kg-375kg) の場合



(c) 質量 (250kg-500kg) の場合



(d) 質量 (500kg-500kg) の場合

図-10 衝突速度と最大衝撃力の関係 (緩衝材厚さ10mm)

として計算すると実験結果と回帰式は図-8 のように表される。この結果、厚さ 10mm の場合は回帰式の値が若干実験結果の値を下回っている。これは、表-4 に示した定数 c の値が厚さ 10mm のときは他の 3 種類に比べて少し大きいからだと考えられる。すなわち、緩衝材の剛性の影響を形状率のみで表すことや、1 次式で表すことに関しては改善の余地があると考えられる。

4.3 鋼材質量が異なった場合の実験結果と回帰式の比較

前項で決定した最大衝撃力の回帰式(推定式)と、鋼材質量が異なった場合の実験結果の比較を行った。その結果を緩衝材厚さ 6mm の場合は図-9 に、緩衝材厚さ 10mm の場合は図-10 に示す。図-9 に示した緩衝材厚さ 6mm の場合は、よく一致しているが、前項と同じように緩衝材厚さ 10mm の場合は、いずれの質量ケースにおいても回帰式の値が若干実験結果の値を下回っている。しかし、鋼材質量の影響については、換算質量として推定式に用いることが妥当であるといえる。

5. 結論

本論文は、今まで行った桁間衝突実験のデータから最大衝撃力の推定式の作成を試みたものである。以下に、本研究から得られた知見を述べる。

- 1) Hertz の接触理論を基に、最大衝撃力は緩衝材の剛性、質量、衝突速度のパラメータであると考え、実験結果を基に、衝突速度は 2 乗で、質量については換算質量で表すと最大衝撃力の推定が精度良く行えることを示した。
- 2) 緩衝材の形状率が一定の場合、緩衝材に作用する衝撃力と緩衝材の変形量の関係は衝突速度によらず同じ曲線を描くため、衝突速度によらず緩衝材ごとに剛性を表す係数があると考えられる。
- 3) 静的試験から得られる緩衝材の剛性と衝撃実験から得られる緩衝材の剛性は異なるため、推定式に静的試験の剛性をそのまま用いることは難しい。
- 4) 本論文では、形状率の逆数を緩衝材の剛性を表す係数として採用し、推定式は実験値とある程度は一致しているが、緩衝材の厚さが厚くなると推定式は実験値を下回る傾向が見られた。

本実験データだけでは、緩衝材の剛性に対する検討が不十分であると考えられるため、さらなる実験や解析による実験データの補間などを行い、推定式の精度を高めていきたい。また、本推定式は模型実験レベルのものであり、これを実際の緩衝材の設計にはそのまま適用することは出来ない。そのため、今後、実橋梁をモデル化した実験や解析を行うことにより、実橋梁に適用可能なように検討を拡張していくことが課題である。

謝辞: 本論文における実験は第一著者が防衛大学校勤務時代に行ったものであり、防衛大学校建設環境工学科構造力学研究室の香月智教授をはじめ学生の方々にご協力を頂いた。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 丸善, 2002.
- 2) (社)日本道路協会: 落石対策便覧, 2000.
- 3) (財)砂防・地すべり技術センター: 鋼製砂防構造物設計便覧, 2001.
- 4) 芦塚憲一郎, 小林伸吉, 春日昭夫, 玉置一清, 永元直樹: 大規模地震時の桁間衝突に備えた桁間緩衝材の設計について, 第 3 回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.227-232, 1999.12.
- 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, pp.193-202, 2004.1.
- 6) 阿部雅人, 藤野陽三, 吉田純司, 朱平, 柳野和也: 地震時における橋桁の衝突現象のモデル化と実験的検証, 土木学会論文集 No.759/I-67, pp.181-197, 2004.4.
- 7) 梶田幸秀, 北原武嗣, 西本安志, 香月智: エアーフローティング装置を用いたゴム製緩衝材の桁間衝突実験, 土木学会地震工学論文集, 論文 No.316(CD-ROM), 2003.12.
- 8) 梶田幸秀, 北原武嗣, 西本安志, 香月智: ゴム厚に注目したゴム製緩衝材の衝撃力低減効果に関する検討, 第 8 回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.163-168, 2005.2.
- 9) 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 回土木学会地震工学研究発表会報告集, No.11 (CD-ROM), 2005.8.
- 10) 土木学会構造工学委員会: ロックシェッドの耐衝撃設計(構造工学シリーズ 8), 土木学会, 1998.11.
- 11) (社)日本道路協会: 「兵庫県南部地震により被災した道路今日の復旧仕様に係る仕様」の準用に関する参考資料(案), 1995.6.
- 12) 日本免震構造協会: 免震積層ゴム入門, オーム社, 1997.

(2005 年 9 月 10 日受付)