

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

梶田幸秀¹，北原武嗣²，西本安志³，香月智⁴

¹正会員 博（工） 防衛大学校助手 建設環境工学科（〒239-8686 横須賀市走水 1-10-20）

²正会員 博（工） 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）

³正会員 博（工） シンパタ工業株式会社 技術開発本部（〒674-0082 兵庫県明石市魚住町中尾 1058）

⁴正会員 工博 防衛大学校教授 建設環境工学科（〒239-8686 横須賀市走水 1-10-20）

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」と記載されており、緩衝材への期待は大きいと考えられる。しかし、道路橋示方書には緩衝材の断面積や厚さ決定するための基準は存在しない。そのため現状では緩衝材の断面積は、道路橋示方書に示されている落橋防止構造に作用する設計荷重（死荷重反力の 1.5 倍）をゴムの許容支圧応力で除することで設計することが多い²⁾。なお、ゴムの許容支圧応力は面圧 12N/mm^2 が一般的な値である。一方、厚さに関しても文献²⁾を参考に 5cm 程度以上とされるのが一般的であるが、厚さの設定に関する工学的根拠ははっきりしていない。

これまでの緩衝材による衝撃力低減効果に関する研究^{3)~7)}は、緩衝材の種類の違いによるものや緩衝材に衝突する物体の速度の違いによるものがほとんどであり、ゴム製緩衝材の厚さの違いによる衝撃力低減効果について言及した研究はほとんど無い。さらに、これらの研究は、固定物の前面に緩衝材を設置し、そこに上部構造に見立てた重量物を衝突させたものがほとんどである。落橋防止構造に対してはその実験方法で十分であるが、衝撃的な力が発生するのは落橋防止構造だけではなく、上部構造同士の衝突（桁間衝突）でも衝撃的な力が上部構造に作用する。桁間衝突では、衝突前後で 2 物体は移動可能であるため、先の実験方法では検討不足であると考えられる。

そこで著者らは、桁間衝突に着目し、矩形ゴム緩衝材のゴム厚の違いによる衝撃力低減効果に関する基礎資料を得るべく 2 本の鋼材の衝突実験を行い、その成果を報告した⁸⁾。文献⁸⁾で得られたゴム厚および衝突速度の影響をより詳細かつ定量的に評価するため、ゴム厚および鋼材の衝突速度のパラメータを細かく設定した追加実験を行い、ゴムパッドのよ

うな薄い緩衝材でも十分な衝撃力低減効果が得られるかどうか、さらには、鋼材の衝突速度と最大衝撃力についてさらなる考察を本論文で行った。

厳密には、桁間衝突に対して緩衝材の設置を推奨する記述は道路橋示方書には無いが、衝突による桁端部の損傷を押さえ、緊急車両の走行を確保することは重要であると考えられる。また、実橋梁に対して合成樹脂による緩衝材が桁間衝突用緩衝材として桁端部に設置された例も報告されている⁹⁾。

2. 鋼角柱の衝突実験

(1) 実験概要

衝突実験は、防衛大学校の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。動的物性評価装置は、載荷ラムを水平方向に最大 3m/s のスピードで動かすことができる装置である。空気浮上式ガイドレールは、写真-1 に示すとおり、ガイドレールと鋼材の間に空気を圧送することにより、鋼材を浮上させ水平方向の移動に対してほとんど摩擦がない状態を作り出すことができる装置である。

実験は図-1 に示すように、長さ 3000 mm のガイドレール上に、上部構造に見立てた長さ 1000 mm 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) 計測項目

本実験の目的は、ゴム製緩衝材による衝撃力の低減を評価することである。そのため、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-2 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



写真-1 空気浮上式ガイドレール全景

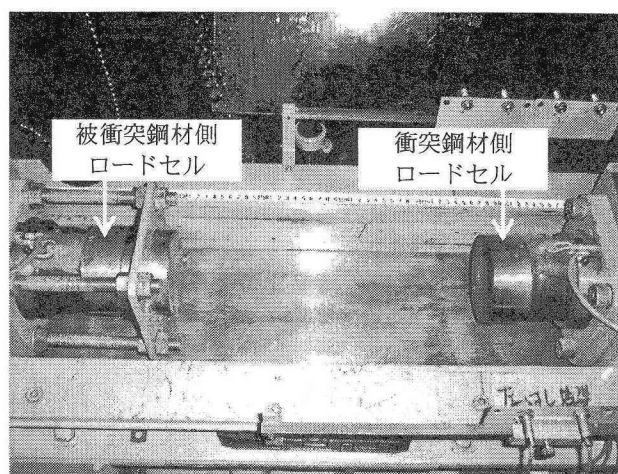


写真-2 衝撃力計測用ロードセル

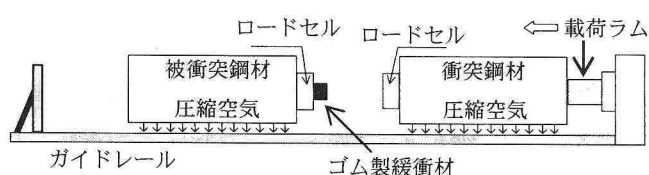


図-1 実験状況概要図

一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。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、緩衝材がある場合は50μsec、緩衝材がない場合は10μsecとした。

(3) 実験供試体

衝突鋼材および被衝突鋼材ともに、SS400を使用し、200×200×1000mm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-2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。

ゴム製緩衝材は硬度50度の天然ゴム系であり、形状は40×40mmの正方形断面、厚さを2mm、3.5mm、6mm、8mm、10mm、20mm、40mmの7種類に変化させた。緩衝材を用いない場合も含めると厚さのパラメータは8種類となる。

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形状を参考にした。写真-3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: A_f)



写真-3 落橋防止構造用緩衝材の設置例

と衝突面に垂直な面の面積(自由表面積: A_F)の比(A_f/A_F)が0.3~1.0というのが一般的である。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(ここでは鋼材重量3000N)の1.5倍を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~10mmの他に、それより薄い場合(2mm)と厚い場合(20mmと40mm)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¹⁰⁾。一次形状係数は受圧面積を自由表面積で除する(A_f/A_F)ことで求められる。本実験では自由表面積が0の場合(緩衝材がない場合)もあり、自由表面積が0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て考察を行った。

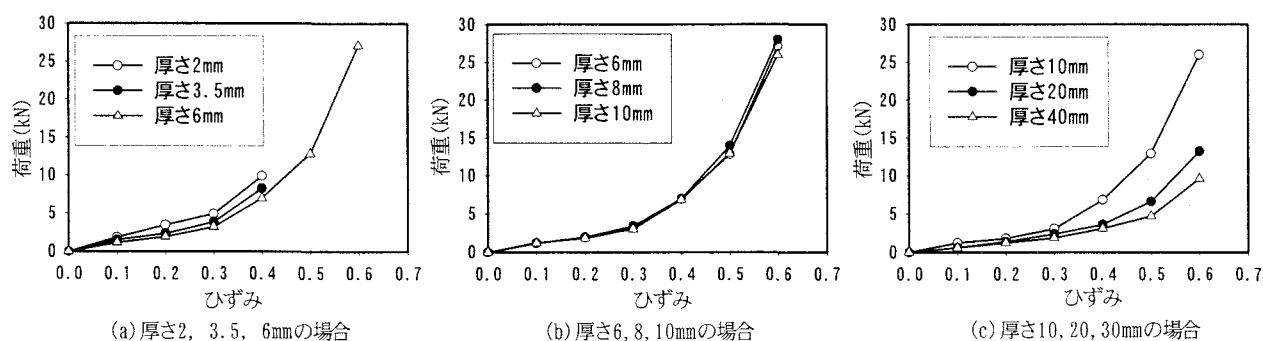


図-2 緩衝材の静的荷重-ひずみ関係

(4) 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 種類に変化させて行った。なお厚さ 2.0mm の緩衝材については 0.2, 0.4, 0.7, 1.0m/s, 20mm と 40mm の緩衝材については 0.7, 1.0m/s の設定速度のみで実験を行った。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 8) 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 ($\int F(t) dt$) の大きさが異なるものは実験結果からは棄却した。

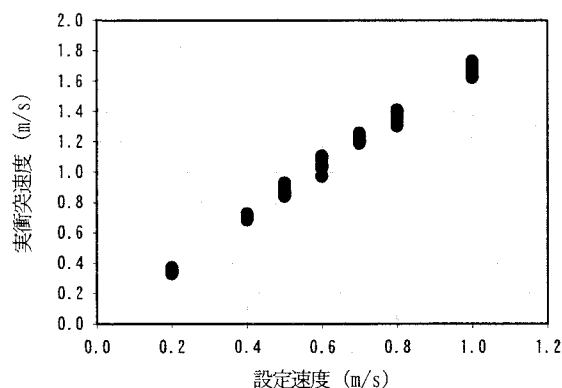


図-3 設定速度と実衝突速度の関係

3. 実験結果と考察

(1) ゴム製緩衝材の静的圧縮実験

図-2 に取り付けた緩衝材の荷重～ひずみ関係（静的載荷実験結果）を示す。図より、ゴム厚 6,8,10mm ではほとんど明確な違いが出ていないが、全体の傾向としては、形状率が小さい（ゴム厚が薄い）ほど、剛性が大きくなる傾向を示している。これは、ゴムの変形自由度が減少することに起因しており、厚さ 2mm, 3.5mm ではひずみが 0.3 程度、それ以外では 0.4 程度で剛性が大きくなり始めることがわかる。

(2) 設定衝突速度と実衝突速度

本実験は、先ほど述べたとおり衝突鋼材に対して載荷ラムにより初速度を与え、衝突鋼材を静止している被衝突鋼材に衝突させている。実験結果を見ると載荷ラムに与えた設定速度と衝突鋼材の実衝突速度は異なっており、どの程度のばらつきがあるのかを確認した。図-3 にその結果を示す。図より、実衝突速度は設定速度の約 1.7 倍になっており、0.35m/s から 1.65m/s での実験となっていることがわかる。武野・伊津野¹¹⁾によると、道路橋示方書¹²⁾に適合する標準地震入力例の地震時保有水平耐力照査法レベルの波形による上部構造の衝突速度はおおむね 0.5m/s から 3.0m/s となっており、本実験での実衝突速度は地震時に起こりうる範囲の衝突速度であるといえる。

また、例えば、設定速度 0.7m/s の場合、実験総数は 10 回で、実衝突速度の平均値は 1.218m/s、最大値、最小値はそれぞれ 1.256m/s, 1.191m/s であり、平均値を真値とした場合の誤差は約 3%であった。他の設

定速度においても誤差は最大でも 7%以内に収まっているため、次節で示す形状率と最大衝撃力の関係のグラフにおいては実衝突速度を一定とみなし、平均実衝突速度（以後、単に衝突速度と記す）ごとに整理した。

(3) 形状率と最大衝撃力の関係

図-4 に衝突速度 1.21m/s（設定速度 0.7m/s）と 1.65m/s（設定速度 1.0m/s）のときの形状率と最大衝撃力の関係を示す。横軸にはゴムの変形のしやすさを表す指標を用いる必要があり、今回提案した形状率の他にも、ゴムの静的荷重-変形量関係における初期剛性などを用いることもできると考えられる。図-4 を見ると、いずれの衝突速度においても、ほぼ双曲線の形状を描いていることがわかる。

道路橋示方書では落橋防止構造に作用する設計荷重は死荷重反力の 1.5 倍で設計するように規定されている。桁間衝突用緩衝材に関する設計荷重は設定されていないため、ここでは落橋防止構造の設計荷重と同じと考える。相似則を忠実に再現した実験ではないため、実験結果をそのまま実現象には適用できないが、形状率 4.0（厚さ 40mm）のゴム製緩衝材を用いても衝撃力を鋼材重量 3kN の 1.5 倍である 4.5kN 以下にすることはできないことがわかる。しかし、本実験での最大衝撃力は衝突継続時間内にロードセルで計測された荷重の最大値であり、図-5 に 1 例を示すとおり、衝突継続時間は 10msec ととても短い。最大衝撃力の値が数秒のオーダーで上部構造に作用した場合、端部は確実に破壊（座屈）するとい

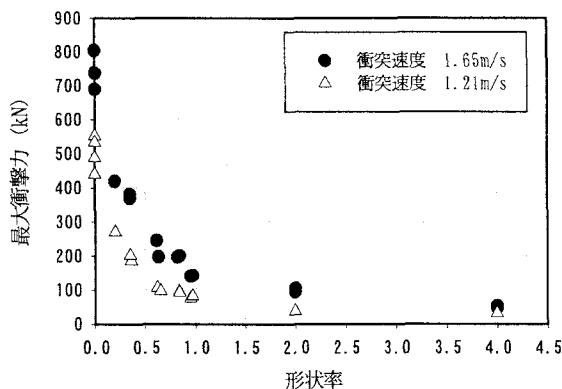


図-4 形状率と最大衝撃力の関係

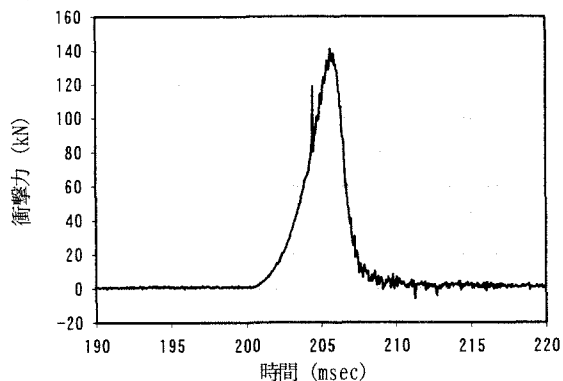
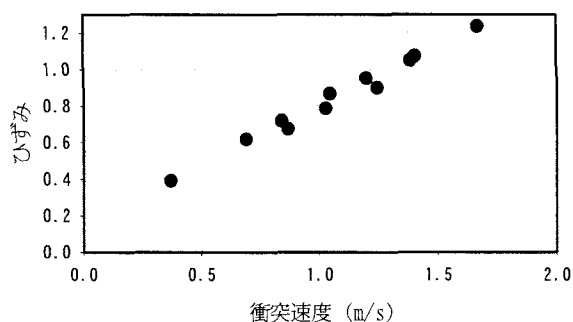
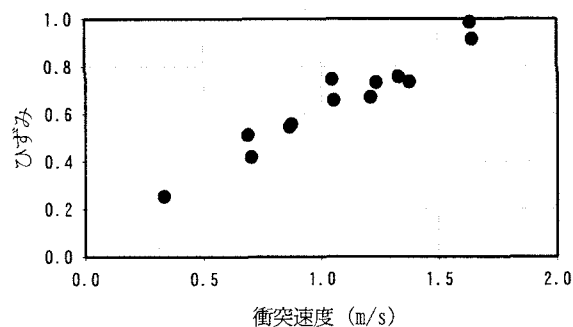


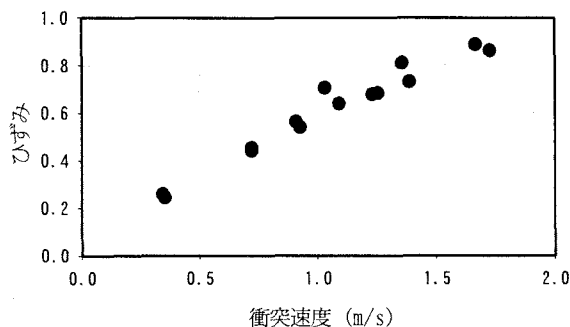
図-5 衝撃力-時間関係 (設定速度1.0m/s, ゴム厚10mm)



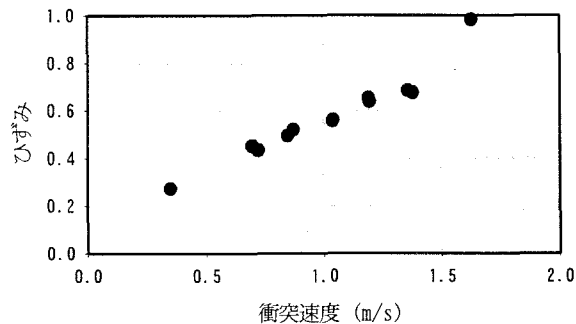
(a) 厚さ 3.5mm



(b) 厚さ 6mm



(c) 厚さ 8mm



(d) 厚さ 10mm

図-6 衝突速度とひずみの関係

えるが、最大値は大きい作用時間が短い荷重が上部構造に作用した場合、上部構造の端部がどのような挙動を示すかは、別途検討をする必要があるといえる。

また、図-4 から形状率が 0.3 より小さくなると最大衝撃力が急激に大きくなるといえる。言い換えれば、形状率を 0.3 より大きくすると最大衝撃力は緩やかな減少傾向にある。つまり、適切な衝撃力低減効果を得るためには、現在の落橋防止構造用緩衝材に多く見られるような形状率 0.3 以上の厚さの緩衝材が必要と考えられ、ゴム厚の薄い緩衝材では適切な衝撃力低減効果が得られないと考えられる。

(4) 衝突速度と最大衝撃力の関係

図-6 に衝突速度と緩衝材の最大圧縮ひずみ（最大圧縮変位量／ゴム厚）の関係を、図-7 に衝突速度と

最大衝撃力の関係を示す。図-6 において、ゴム厚 3.5mm でひずみが 1.0 を超えているのは、ゴム厚が薄く、衝突鋼材に取り付けたレーザー式変位計で測定した相対変位量にノイズが入ったためである。

図-6 より衝突速度と最大圧縮ひずみはほぼ比例関係にあることがわかり、また衝突速度が 0.5m/s から 1.0m/s では、ひずみが 0.4 程度となり、図-2 で示したゴム製緩衝材の硬化域（高剛性域）に入り始めていることがわかる。さらに衝突速度が 1.0m/s を超えるとひずみは 0.6 以上となるため、ゴム製緩衝材は完全に硬化していることがわかる。

図-7 に示した衝突速度と最大衝撃力の関係のグラフはゴムの圧縮載荷実験結果の形状によく似ており、ほぼ 2 直線で近似できることがわかる。また、2 直線の交点はほぼ衝突速度 1.0m/s 付近にある。つまり、ある速度以上で衝突が起きると、衝突速度の増加に

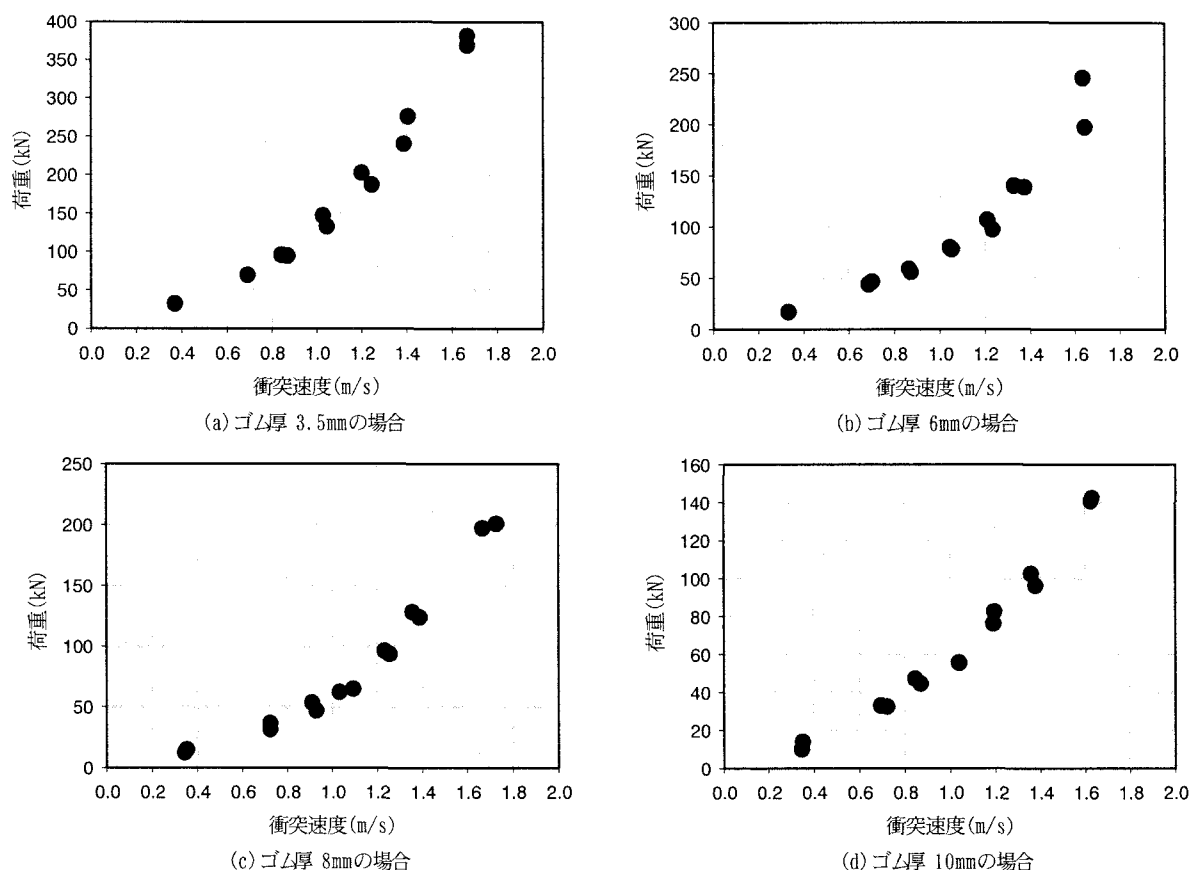


図-7 衝突速度と最大衝撃力の関係

対して荷重の増加の割合が大きくなることを意味している。実橋梁においても、桁間の狭小なスペースで緩衝材が効果を発揮するときは、おそらく衝突速度の増加に対して荷重が大きく立ち上がる領域も考慮しなければならないと考えられる。

以上より、緩衝材に作用する荷重は衝突速度に大きく依存していることが実験結果から明らかになった。落橋防止構造用緩衝材の設計では、静的荷重を設計荷重として与えているが、落石による衝撃力を受けるロックシェッド構造物や土石流による衝撃力を受ける鋼製砂防構造物では、衝撃力は構造物に作用すると予想される巨礫の大きさと予想衝突速度から算定されている^{12), 13)}。落橋防止構造用緩衝材や桁間衝突用緩衝材についても同様に、上部構造重量と予想される衝突速度の最大値から設計荷重を算定する方が良いと思われる。

4. 結論

本研究では、ゴム製緩衝材のゴム厚と衝突速度をパラメータとした桁間衝突実験により、衝撃力低減効果に関する検討を行った。得られた結論は以下の通りである。

- (1) 形状率 4.0 (厚さ 40mm) のような立方体形状の非常に厚いゴムを設置しても、最大衝撃力は死

荷重反力の 1.5 倍に以下に抑えることはできない。しかし、最大衝撃力の作用時間は非常に短いため、鋼材端部の被害というものは別途検討の必要があるといえる。

- (2) 形状率が 0 から 0.3 の範囲で最大衝撃力は大きく低下していくが、薄いゴム厚では十分な衝撃力緩衝効果が得られないことがわかった。
- (3) 衝突速度とゴムの圧縮変位量の関係はほぼ比例関係にあり、衝突速度と最大衝撃力の関係はゴム製緩衝材の静的圧縮試験結果に類似することがわかった。
- (4) 本実験結果では、衝突速度が 1.0m/s を超えるとゴム製緩衝材は硬化域に入るため、衝突速度の増加に対して最大衝撃力の増加量が大きくなる。
- (5) 緩衝材に作用する荷重は衝突速度に大きく依存しているため、衝突速度を考慮した荷重を設計荷重とすることが必要であると考えられる。

今後は、今回得られた実験結果に対する近似式の提案を行い、また、鋼材重量を変えた実験も行う予定である。

謝辞：本実験を実施するに当たり、吉田真治氏（防衛大学校建設環境工学科 4 年）ならびに船越隆治氏（関東学院大学工学部土木工学科 4 年）にご協力頂いた。また、平成 16 年度科学研究費補助金・基盤研

究(C)(2)「地震動の周期特性と非定常性を考慮した動的耐震設計法に関する研究」(課題番号:15560416, 研究代表者:北原武嗣)の補助を得た。ここに記して謝意を表する。

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, 2002.3.
- 2) (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.
- 3) 窪田賢司, 菅野 匡, 上東泰, 石田 博:緩衝効果を有する落橋防止装置の衝撃実験および地震応答解析, 日本道路公団試験研究報告, Vol.34, 1997.11.
- 4) 越峠雅博, 運上茂樹, 足立幸郎, 長屋和宏:落橋防止構造における緩衝材の効果に関する検討, 第2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.423-426, 1998.12.
- 5) 越峠雅博, 運上茂樹, 足立幸郎, 長屋和宏:弾塑性特性を有する緩衝構造の衝撃吸収効果に関する実験的検討, 第25回地震工学研究発表会講演論文集, pp.857-860, 1999.7.
- 6) 園田佳巨, 西本安志, 石川信隆, 彦坂熙:落橋防止用矩形状ゴム製緩衝材の性能評価法に関する基礎的考察, 土木学会論文集, No.689/I-57, pp.215-224, 2001.10.
- 7) 村田清満, 高山智宏, 後藤貴士, 山田正人, 生駒信康, 浮島徹:エネルギー吸収機能を有する落橋防止装置による耐震補強効果, 土木学会論文集 No.689/I-57, pp.275-288, 2001.10.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 日本免震構造協会:免震積層ゴム入門, オーム社, 1997.9 (ISBN: 4-274-10209-2).
- 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) (社)土木学会:ロックシェッドの耐衝撃設計, 構造工学シリーズ8, 1998.11 (ISBN4-810-60232-X).
- 13) (財)砂防・地すべり技術センター:鋼製砂防構造物設計便覧(平成13年版), 2001.2.