

桁間衝突時の衝撃力緩和・エネルギー吸収能 に与える緩衝材ゴム厚の影響

北原武嗣¹・梶田幸秀²・西本安志³・鈴木智子⁴・磯貝幸子⁵

¹正会員 博(工) 群馬工業高等専門学校助教授 環境都市工学科 (〒371-8530 前橋市鳥羽町580)

²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)

³正会員 シバタ工業株式会社 技術開発本部 (〒674-0082 明石市魚住町中尾1058)

⁴群馬工業高等専門学校 環境都市工学科学生 (〒371-8530 前橋市鳥羽町580)

⁵群馬工業高等専門学校 専攻科環境工学専攻学生 (〒371-8530 前橋市鳥羽町580)

1. はじめに

1995 年兵庫県南部地震において、多くの橋梁構造物が被災し、落橋に至ったものもあった。落橋は交通、特に緊急車両の通行や救援物資の運搬を妨げるため、震災後の復旧作業が極めて困難となる。そのため、震災以降、大地震時においても落橋を防ぐ目的で、桁かかり長・落橋防止構造・変位制限構造・段差防止構造からなる落橋防止システムを設けることが必要となった。

道路橋示方書・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」、またその補足説明として「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」と記されている。そこでは、落橋防止構造の設計荷重は死荷重反力の 1.5 倍(1.5Rd)と規定しているが、割増係数である 1.5 の明確な根拠はない。

緩衝材がない落橋防止構造に上部構造が衝突した場合の荷重を考えると、1.5 という割増係数は小さいと考えられるため、緩衝材による衝突力緩和効果を期待せざるを得ない。しかしながら、道路橋示方書には、緩衝材の大きさ(断面積)、厚さに関する基準は存在しない。そのため、設置する緩衝材の断面積は落橋防止構造の大きさから決定するしかない。また、緩衝材の厚さは、上部構造との空間の範囲内であれば、道路橋示方書にうたわれているゴムパッドのような薄いものから、空間をすべて塞ぐような厚いものまで自由に決めることができる。

したがって、落橋防止構造における緩衝材の厚さの決定方法を検討することが重要な課題であると考えられる。そこで本研究では、緩衝材厚さの決定方法を検討するための基礎資料を得るべく、桁間衝突実験を行うものとする。ここでは、材料および断面積の等しい天然ゴム製の緩衝材を対象として、緩衝材の厚さ、ならびに衝突速度が緩衝効果に与える影響を把握すること、また、道路橋示方書が推奨している、ゴムパッドのような薄い緩衝材の耐衝撃性能を確認することを目的とする。

兵庫県南部地震以降、落橋防止構造、特に緩衝材の緩衝効果に対する研究は多く行われてきた^{2), 3), 4)}。しかし、そのほとんどが固定物の前面に緩衝材を設置し、そこに上部構造に見たてた重量物を衝突させてエネルギー吸収力や衝撃力を検討するものであった。しかしながら、上部構造同士が衝突する現象、いわゆる桁間衝突現象を再現するためには、これらの実験では不十分であると考えられる。

そこで梶田らは、より現状に近い桁間衝突時の緩衝効果を把握するため、レール上で可動な上部構造同士を衝突させる実験を実施した^{5), 6)}。しかしながら、文献 5), 6) の実験では、レール上で上部構造同士を衝突させたときに若干の摩擦力が存在していることが確認された。したがって本研究では、上記の摩擦力を低減させるため、レール上に空気を圧送することにより、衝突鋼材および被衝突鋼材を浮上させ衝突させるものとした。

なお、本研究の最終目的は、落橋防止構造に用いる緩衝材厚さの設計式を提案することにある。しか

しながら本論文では、そのための基礎資料を実験的に得ることに主眼をおいており、緩衝材ゴム厚が、衝撃力の緩和やエネルギー吸収能に与える影響を定性的に評価することを目的としている。

2. 実験概要

(1) 実験装置

防衛大学の所有する動的物性評価装置を加速装置に用い、桁間衝突実験を行った。実験は図-1に示すように、長さ3000mmのガイドレール上に、桁に見たてた長さ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設定速度で押し出し、静止した鋼材に衝突させることで桁間衝突を再現した。

この際、ガイドレールと鋼材の間に空気を圧送することにより、2体の鋼材を浮上させ、ガイドレールと鋼材との摩擦をできるだけ小さくするようにした。このため、ガイドレールのみを用いた実験^{5), 6)}に比べ、本実験装置による実験では動摩擦係数を半分程度に減少することができ、より摩擦力の少ない

状態で実験を行うことができるようになった。本実験においては、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。

本衝突実験では、衝突鋼材および被衝突鋼材ともに、圧送空気で浮上させることにより、ガイドレールからの動摩擦力がほとんど作用しない状態としている。そのため、衝突時のエネルギー損失の大部分は、ゴム製緩衝材により吸収されたエネルギーであると考えられる。

(2) 計測項目

本実験においては、ゴム製緩衝材による衝撃力緩和およびエネルギー吸収を評価することが目的である。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を計測することが必要となる。鋼材の衝撃力は、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する。また速度は、衝突鋼材および被衝突鋼材の変位を計測し、得られた変位を時間で微分することにより算定するものとした。

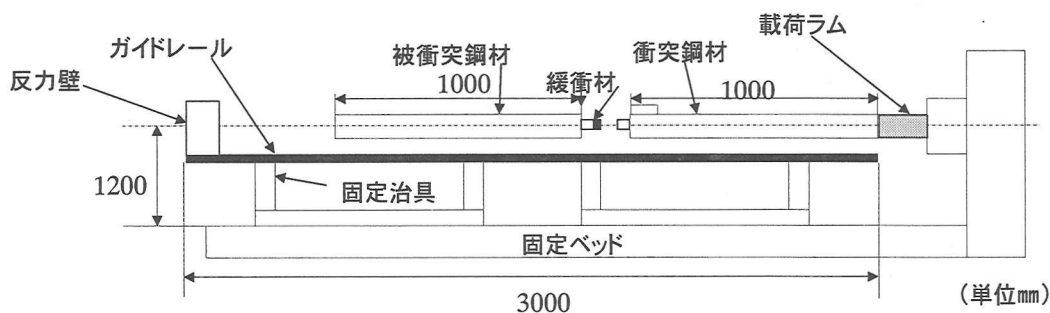


図-1 実験装置概要

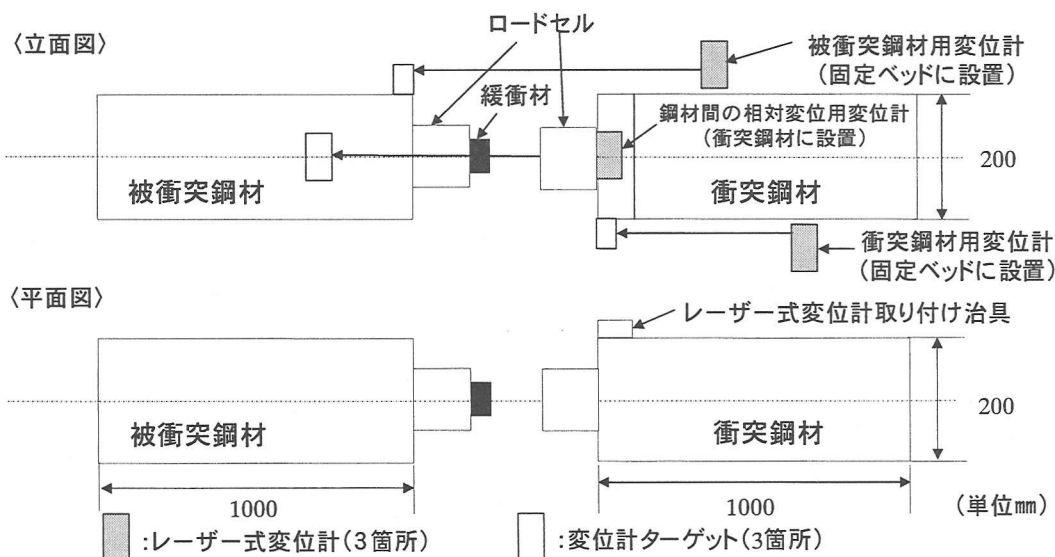


図-2 計測器取付位置

表-1 実験ケース名

供試体		設定速度 (m/sec)				
緩衝材	厚さ (mm)	0.20	0.40	0.70	1.00	1.30
緩衝材なし	—	n-v02	n-v04	n-v07	n-v10	—
ゴムシート	2	s-v02	s-v04	s-v07	s-v10	—
ゴム	10	r-v02-h10	r-v04-h10	r-v07-h10	r-v10-h10	—
ゴム	20	—	r-v04-h20	r-v07-h20	r-v10-h20	r-v13-h20
ゴム	40	—	r-v04-h40	r-v07-h40	r-v10-h40	r-v13-h40

ここで用いたロードセルは、緩衝材なし、およびゴムシートの場合は 3,000kN 用、ゴム製緩衝材がある場合には 500kN 用であり、本実験装置に取付けられるよう加工した特注品である。検定試験により、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た。

図-2 に、これらを計測するための計測機器の取付位置を示す。図に示した 3 つのレーザー式変位計により、衝突鋼材および被衝突鋼材の絶対変位、衝突鋼材と被衝突鋼材の相対変位を計測する。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、すべての実験ケースに対して $50\mu\text{sec}$ 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、 $200\times 200\times 1000\text{mm}$ での基本形状とした。このとき、衝突鋼材の重量は 2.92kN、被衝突鋼材の重量は 2.94kN であった。ゴム製緩衝材は被衝突鋼材に取り付けた。

ゴム製緩衝材は硬度 50 度の天然ゴムであり、形状は $40\times 40\text{mm}$ の正方形断面とし、厚さを 10mm、20mm、および 40mm の 3 種類に変化させた。なお、比較検討のため、ゴム製緩衝材と同じ正方形断面で厚さ 2mm のゴムシートと、緩衝材を用いない場合も考慮し、合計 5 種類の供試体を採用した。なお、ここで比較検討に用いたゴムシートは、道路橋示方書が推奨しているゴムパッドのような薄い緩衝材をイメージしたものである。

ここで、ゴム製緩衝材の形状決定は文献 6) に示されている考え方を踏襲した。すなわち、文献 6) によれば、ゴム製緩衝材の重量と桁の重量との比は約 1:10000 であることから、この重量比に近くなるように緩衝材の形状および厚さを設定した。ただし、厚さに関しては、今回、パラメータとして取り扱っているため、10mm、20mm、および 40mm の 3 種類に変化させた。

(4) 実験ケース

本実験では、衝突鋼材に与える目標初速度を 0.20m/sec、0.40m/sec、0.70m/sec、1.00m/sec、および 1.30m/sec の 5 種類に変化させ、被衝突鋼材に

衝突させるものとした。この際、表-1 のように実験ケース名を付けた。表中、n, s, r はそれぞれ緩衝材なし、ゴムシート、ゴムを表す。また、v02, v04, v07, v10 および v13 は目標初速度を、h10, h20, h40 はゴム厚さを示している。

すべての実験ケースに対して、2 体づつ実験を行うものとした。ただし、厚さ 10mm 以下の供試体は、鋼材の受ける衝撃力が過大になる危険性があるため、目標初速度 1.30m/sec の実験は行わなかった。また、厚さ 20mm 以上の供試体で、初速度 0.2m/sec の実験も 1 度行なったが、衝突荷重が小さく、本実験で用いたロードセルでは十分信頼のおけるデータが計測できなかったため、初速度 0.2m/sec の実験は行わないことにした。以上により、合計 40 体の実験を行った。

3. 実験結果および考察

(1) 緩衝材ゴムの力学特性

緩衝材として実験に用いた天然ゴムの力学特性を把握するため、静的圧縮載荷試験を行った。静的圧縮載荷試験の結果を図-3 に示す。図中、縦軸は圧縮荷重を、横軸は圧縮変位を表している。また、実線でゴム厚 10mm の、点線でゴム厚 20mm の、破線でゴム厚 40mm の結果を示している。

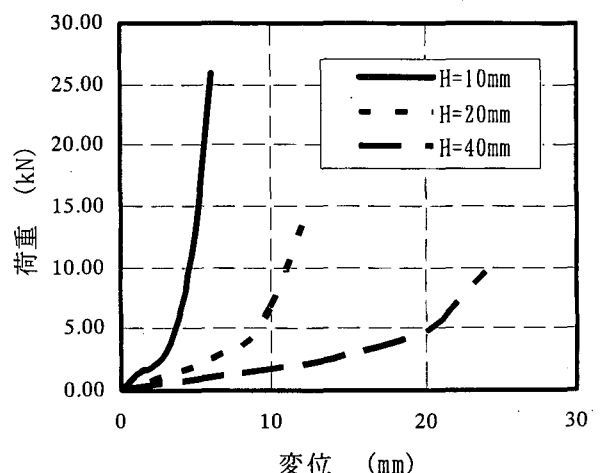


図-3 静的圧縮荷重-変位関係

図-3 から、厚さに関係なくすべてのゴムは、変形の小さい範囲では荷重と変形の間に線形の関係があり、ある変位を越えると急に硬化し剛性が大きくなることがわかる。また、薄いゴムのほうが、小さい変形で硬化しはじめることがわかる。

また、図-3 から硬化前の初期剛性を読みとった。それぞれの厚さに対する初期剛性を表-2 に示す。表-2 より、ゴム厚が薄いほど初期剛性の値は大きいことがわかる。

表-2 初期剛性

ゴム厚(mm)	初期剛性(kN/mm)
10	1.005
20	0.378
30	0.158

(2) 鋼材速度の算定方法

衝突前後における鋼材速度は、衝突鋼材と被衝突鋼材の相対変位から求めた。実験において、相対変位は図-2 に示したレーザー式変位計により計測した。図-4 に、例として厚さ 10 mm のゴム製緩衝材に 0.20m/sec の目標初速度で衝突させた場合の、相対変位－時間関係を示す。縦軸は衝突鋼材と被衝突鋼材の相対変位を、横軸は時間を表している。

図-4 において、相対変位が最初にゼロになる位置が衝突鋼材と被衝突鋼材が衝突した位置で、相対変位がゼロ以下ではゴムが圧縮されている状態である。その後、相対変位がゼロになっている位置は衝突鋼材と被衝突鋼材が離れたときである。衝突する前 0.01sec 間のグラフの傾きから衝突鋼材の衝突前の速度を算定し、離れた後 0.01sec 間のグラフの傾きから衝突鋼材の衝突後の速度を算定した。

各実験ケースとも同様の手法で衝突前後の鋼材速度を算定した。ゴム製緩衝材に対する算定結果を表-3 に示す。表-3 から、衝突時の実際の速度は、目標初速度に対して 1.5～2.0 倍程度の速度が生じていたことがわかる。

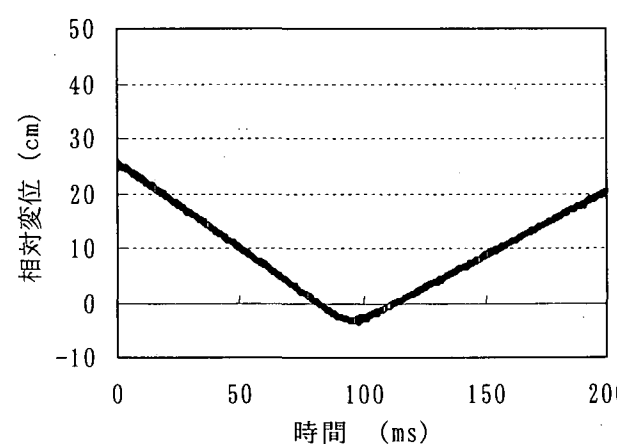


図-4 相対変位－時間関係

表-3 衝突前後の鋼材速度

目標 初速度 (m/sec)	緩衝材 厚さ (mm)	衝突後		
		衝突 鋼材 速度 (m/sec)	衝突 鋼材 速度 (m/sec)	被衝突 鋼材 速度 (m/sec)
0.20	10	0.346	0.051	0.310
		0.351	0.035	0.315
0.40	10	0.717	0.126	0.601
		0.709	0.119	0.591
	20	0.722	0.069	0.673
		0.705	0.071	0.674
		0.691	0.046	0.665
		0.706	0.048	0.675
0.70	10	1.251	0.355	0.942
		1.259	0.362	0.907
	20	1.256	0.237	1.022
		1.230	0.235	1.037
		1.241	0.131	1.151
		1.250	0.124	1.142
1.00	10	1.728	0.494	1.202
		1.678	0.531	1.160
	20	1.706	0.360	1.317
		1.693	0.376	1.316
		1.670	0.204	1.523
		1.670	0.204	1.495
1.30	20	2.059	0.552	1.516
		2.069	0.596	1.502
	40	2.034	0.310	1.787
		2.108	0.621	1.737

(3) 鋼材が受ける衝撃力

緩衝材には衝撃荷重の緩和効果が期待されている。本論文では、鋼材が受ける衝撃力が小さければ小さいほど、緩衝材の衝撃荷重緩和効果が有効に発揮されていると考えている。実験においては、衝突鋼材および被衝突鋼材ともに、ロードセルにより衝撃力を計測した。

図-5に衝突鋼材が受ける衝撃力と衝突速度の関係を示す。図中、縦軸は衝突鋼材が受ける衝撃力を、横軸は衝突鋼材の衝突速度を表している。また、図-5(a)では、■, ▼, □, ○, および△はそれぞれ、緩衝材なし、ゴムシート、ゴム厚10mm、ゴム厚20mm、およびゴム厚40mmの結果を示している。図-5(b)では、■, ○, △はそれぞれ、ゴム厚10mm、ゴム厚20mm、およびゴム厚40mmの結果を示している。

これらの図より、すべての場合において、衝突速度が増加するとともに衝撃力が大きくなることがわかる。また、その関係にはほぼ線形の関係があることもわかる。

また図-5(a)より、緩衝材なしとゴムシートの場合、ゴム製緩衝材を用いた場合と比較して、かなり

大きな衝撃力が発生していることがわかる。すなわち、ゴム製緩衝材を用いた場合最大でも200kN程度未満の衝撃力であるのに対し、緩衝材なしやゴムシートの場合、衝突速度が大きくなると、1000kNを越える衝撃力となり、ゴム製緩衝材を用いたときの5倍以上の衝撃力の生じることがわかる。

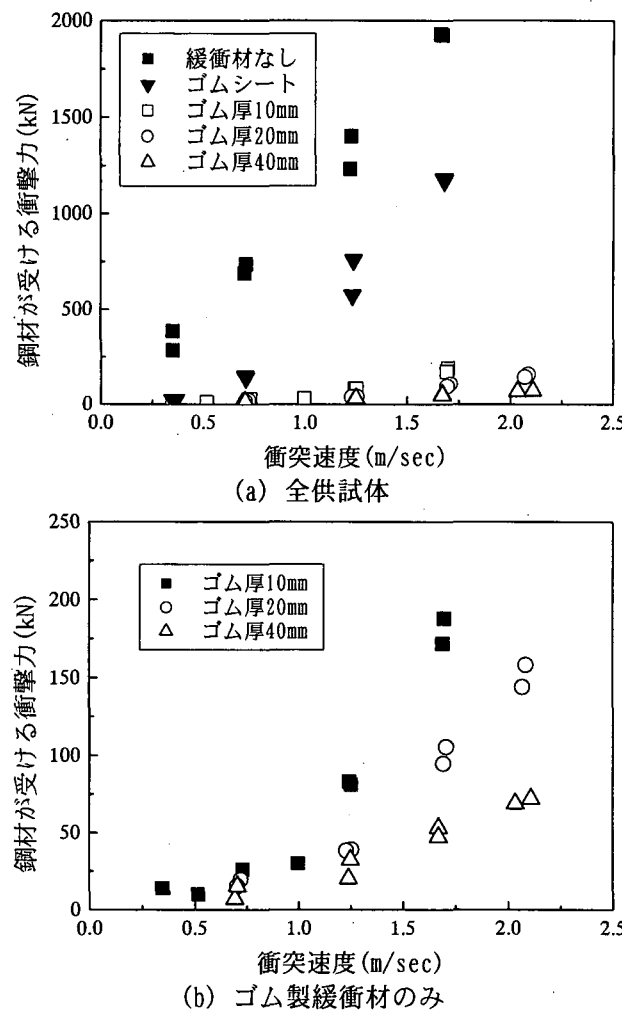


図-5 衝突鋼材が受ける衝撃力と衝突速度の関係

このことから、ゴム製緩衝材は鋼材が受ける衝撃力の緩和効果に大きく寄与しているといえる。さらに、今回の結果のみで判断すると、ゴムシートのような厚さの薄い緩衝材を用いた場合、衝撃力緩和効果は小さいと考えざるを得ない。したがって、ゴムパッドのような薄い緩衝材を用いる際には衝撃力緩和効果について十分な検討を行う必要があると考えられる。

(4) 緩衝材によるエネルギー吸収

緩衝材に求められる要求性能として、エネルギー吸収効果も重要である。本研究では、緩衝材のエネルギー吸収効果と衝突によるエネルギー損失がほぼ等しいと考え、次式により、緩衝材のエネルギー吸収効果を評価する。

$$\frac{\Delta E}{E_1} = \frac{E_1 - (E_1' + E_2')}{E_1} = \frac{(1 - e^2)m_2}{m_1 + m_2} \quad (1)$$

ここに、
 ΔE : 損失エネルギー(kN・m)、
 E_1 : 衝突前の衝突鋼材の運動エネルギー、
 E_1' : 衝突後の衝突鋼材の運動エネルギー、
 E_2' : 衝突後の被衝突鋼材の運動エネルギー、
 m_1 : 衝突鋼材の質量、 m_2 : 被衝突鋼材の質量、
 e : 反発係数。

図-6に緩衝材によるエネルギー吸収と衝突鋼材の衝突速度との関係を示す。図中、縦軸は緩衝材によるエネルギー吸収を、横軸は衝突鋼材の衝突速度を表している。また、凡例は図-5と同様である。

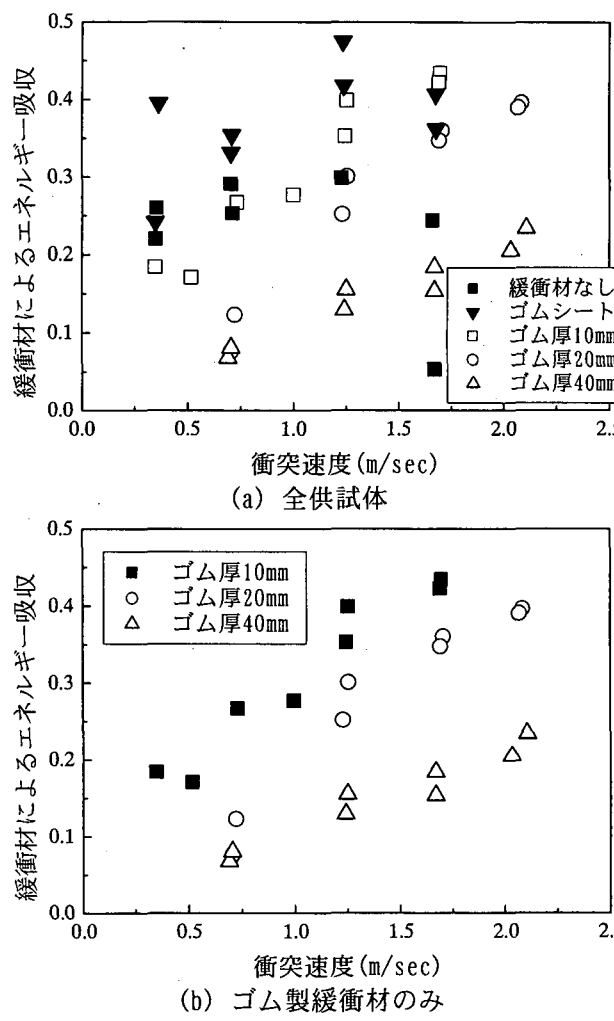


図-6 緩衝材によるエネルギー吸収と衝突速度の関係

図-6(a)より、ゴム製緩衝材を取付けた場合、緩衝材によるエネルギー吸収と衝突速度には、ほぼ線形の関係があり、衝突速度が増加するほどエネルギー吸収が大きくなることがわかる。しかしながら、

ゴムシートの場合、ゴム製緩衝材がある場合と比較して、ばらつきが大きく、エネルギー吸収効果が安定していないことがわかる。

ここで、反発係数は $0 < e < 1$ の範囲であるから、式(1)より、エネルギー吸収は理論上、 $0 \sim 0.5$ の値となる。図-6(a)を見てみると、すべての実験ケースにおいてエネルギー吸収は 0.5 以下となっており、妥当な結果が得られていると判断できる。

また図-6(b)より、ゴム厚が増加するほどエネルギー吸収は小さくなることがわかる。エネルギー吸収の値が小さいということは、理論上の限界値である 0.5 まで、エネルギー吸収能力にまだ余力がある状態だと考えることができる。したがって、ゴム厚が厚いほどエネルギー吸収効果は大きいと考えることができる。

さらに、これらの図から、エネルギー吸収が 0.5 で頭打ちとなってしまう限界の衝突速度が存在することが類推できる。したがって、設計においては、予想される衝突速度において、十分なエネルギー吸収効果の期待できるゴム厚を設定することが重要となる。

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、ゴム製緩衝材の衝撃力緩和およびエネルギー吸収効果の検討を行った。得られた結論は以下の通りである。

- (1) 緩衝材なし、およびゴムシートを緩衝材とした場合、ゴム製緩衝材を用いた場合と比較して5倍以上の衝撃力が生じることを示した。したがって、ゴムシートのように薄い緩衝材を用いる場合、衝撃力に関して十分な検討を行う必要があるといえる。
- (2) ゴム製緩衝材を取付けた場合、衝突速度が速くなるにしたがい、発生する衝撃力もほぼ線形的に大きくなる。また、ゴム厚が厚いほど衝撃力緩和効果も大きい。
- (3) ゴムシートを緩衝材とした場合、エネルギー吸収効果も安定せず、ばらつきの大きいことを示した。
- (4) ゴム製緩衝材を用いた場合、衝突速度が増加すれば緩衝材によるエネルギー吸収もほぼ線形的に増加する。また、ゴム厚が厚いほどエネルギー吸収効果も大きい。

- (5) ゴム製緩衝材を用いても、エネルギー吸収効果が期待できなくなるような、限界衝突速度が存在することを示唆した。

本研究では、ゴム製緩衝材のゴム厚と衝撃力緩和およびエネルギー吸収効果の関係について、以上のような結論が得られたが、未だ、定性的な傾向を示したところである。今後、解析的検討も加えることにより、定量的な評価を行い、落橋防止構造の設計において、適切なゴム製緩衝材厚さの設定が行えるような設計式の検討を今後行っていく予定である。

謝辞：本研究を実施するに当たり、防衛大学校システム工学群建設環境工学科 石川信隆教授、および同 香月智助教授には適切なご助言、ご指導を頂いた。また、本実験の実施に際しては、防衛大学校理工学研究科学生 白石博文氏および群馬工業高等専門学校環境都市工学科5年生 清水善行君にご協力頂いた。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。
- 2) 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。
- 3) 庄司 学，川島一彦，Anat Ruangrassamee，運上茂樹，足立幸郎，長屋和宏：振動台実験によるゴム製緩衝装置の有効性に関する検討，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.427-432，1998。
- 4) 都築昭夫，長嶋文雄，中田宏司，金子 修，大竹省吾：鋼製緩衝材の荷重変形特性に関する実験的研究，鋼構造年次論文報告集，第7巻，pp.9-14，1999。
- 5) 梶田幸秀，西本安志，石川信隆，香月 智，渡邊英一：桁間衝突現象のモデル化に関する一考察，土木学会論文集，No.661/I-53，pp.251-264，2000。
- 6) 梶田幸秀，金光 明，西本安志，石川信隆：積層繊維補強ゴム緩衝材を用いた桁間衝突時における緩衝効果に関する実験的研究，鋼構造論文集，第9巻第33号，2002。
- 7) 川島一彦，庄司 学：衝突緩衝用落橋防止システムによる桁間衝突の影響の低減効果，土木学会論文集，No.612/I-46，pp.129-142，1999。
- 8) 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。