

# 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

梶田幸秀1・北原武嗣2・西本安志3・香月 智4

<sup>1</sup>防衛大学校建設環境工学科助手 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20)
 E-mail:kajita@nda.ac.jp
 <sup>2</sup>群馬工業高等専門学校環境都市工学科助教授 (〒371-8530 群馬県前橋市鳥羽町580)
 E-mail:kitahara@cvl.gunma-ct.ac.jp
 <sup>3</sup>シバ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)
 E-mail:Yasushi\_Nishimoto@sbt.co.jp
 <sup>4</sup>防衛大学校建設環境工学科教授 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20)
 E-mail:katsuki@nda.ac.jp

道路橋示方書・耐震設計編では、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し、そのためゴムパッド等の緩衝材を用いることとすると記されている.しかしながら、緩衝材の厚さに関する 基準は存在しない.したがって、落橋防止構造における緩衝材厚さの決定方法を検討することは重要な課 題である.そこで本研究では、まず、より現実に近い桁間衝突時の緩衝効果を把握するため、レール上に 空気を圧送し鋼材を浮上させることで摩擦力を極力低減させ、鋼材同士を衝突させる実験手法を構築した. さらに、構築した実験手法を用いて、ゴム製緩衝材厚さが衝撃力緩和およびエネルギー吸収能に与える影 響を明らかにした.

*Key Words:* collision between girders, shock absorbing rubber, thickness of rubber, collision velocity, air floating equipment

# 1. はじめに

1964 年新潟地震により 3 橋の落橋が発生したのを受け, 1971 年道路橋耐震設計指針が制定され落橋防止構造の導入がなされた.しかしながら, 1995 年兵庫県南部地震により, 落橋防止装置を設置している橋にも多くの落橋が生じた.

落橋は緊急車両の通行や救援物資の運搬を妨げ,震災 後の復旧作業が困難となるため、大地震時にも落橋しな いようにする必要がある.このため、1996年道路橋示 方書・V耐震設計編の改訂にあたり、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よう、規定が強化された.

現在の道路橋示方書・V耐震設計編<sup>1</sup>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、落橋防止構造には衝撃力緩 和能力とエネルギー吸収能力が期待されていると考えら れる.

さて、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という 値の明確な根拠は述べられていない、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 による衝撃力緩和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 示方書に記されている,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<sup>2),3,4</sup>.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.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、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<sup>5,6</sup>.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、より現実に近い桁間衝突を再 現するための実験手法を考案した.すなわち、レールと 鋼材間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レール から浮上させて衝突させるものとし、摩擦力の低減効果 の確認も行った.

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

防衛大学校の所有する水平高速載荷装置を加速装置に 用い,エアーフローティング装置を組み合わせて桁間衝 突実験を行った.水平高速載荷装置は,最大3m/sの速度 で可動な載荷ラムを有している.

また,エアーフローティング装置とは,鋼材を圧送空 気により浮上させ,載荷レールとの間にほとんど摩擦力 が生じない状態で,鋼材を運動させることができる装置 である.装置全体図を**写真-1**に示す.



写真-1 実験装置全景

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.

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.

## (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.





**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、ゴム製 緩衝材を用いた場合は50 µ sec,緩衝材なしおよび ゴムシートの場合は衝突時間が短いことを考慮して 5 µ 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,200×200×1000mm 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 40×40 mmの正方形断面とし,厚さを 10 mm, 20 mm,および 40 mm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体ずつ実験を行

うものとした.ただし,厚さ 10 mm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 20 mm以上の供試体で,初速度 0.2m/sec の実験 も 1 度行ったが,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. 実験手法,計測データの確認

#### (1) エアーフローティング装置の摩擦

本実験で採用したエアーフローティング装置は, 圧送空気により鋼材を浮上させ,レールとの間に摩 擦力をほとんど働かない状態を再現している.しか し,全く摩擦力が生じていないわけではない.そこ で,動摩擦係数を把握するための予備実験を行った.

予備実験では、エアーフローティング装置に鋼材 1体だけを設置し、長さLの2点間を通過する速度を 計測することにより、動摩擦係数を算定した.鋼材 に作用する外力は摩擦力だけであると仮定し、摩擦 力はクーロン摩擦力(垂直抗力に比例)に従うもの とすると、鋼材の運動方程式は次式となる.

$$F = m\alpha = -\mu mg \tag{1}$$

ここに,

m:鋼材質量(kg), a:鋼材の加速度(m/s<sup>2</sup>), $<math>\mu:動摩擦係数, g:重力加速度(=9.8m/s<sup>2</sup>),$ F:摩擦力(N).

時刻 t=0において初速度 $V_1$ である点を通過し,長 さ Lだけ離れた地点を速度 $V_2$ (時刻 t=T)で通過し たとすると,次式が成立する.

$$v_2 = -\mu g T + v_1 \tag{2a}$$

$$L = -\frac{1}{2}\mu gT^{2} + v_{1}T$$
 (2b)

式(2a)および式(2b)を連立させることにより,動 摩擦係数µは次のように算出することができる.

$$\mu = \frac{v_1^2 - v_2^2}{2Lg} \tag{3}$$

初速度を3通りに変化させ、式(3)により動摩擦係 数を計算したところ、平均値は0.004となった.こ れは、文献5),6)の実験手法で検討した動摩擦係数 0.009~0.0155と比較して、1/2~1/4程度になって いることがわかる.このことから、既往の実験手法 より、摩擦力の低減効果のあることが確認できた. また式(2a)より,鋼材が1秒間に失われる速度は, 0.004×9.8≒0.04(m/s)となる.後述するが,本衝 突実験において,衝突時間は長いものでも0.03秒で あり,その間に鋼材が失う速度は,0.04×0.03 = 0.0012(m/s)となる.鋼材の初速度は0.35m/s~ 2.1m/sであるから,衝突中に失われる速度は,初速 度に対して0.34%~0.06%程度と極めて小さいことが わかる.

以上より,エアーフローティング装置を用いた衝 突実験では,摩擦力は極めて微少であり,摩擦力に よるエネルギー損失はほとんどない.すなわち,衝 突時のエネルギー損失の大部分は,ゴム製緩衝材に よって吸収されたエネルギーであると考えられる.

#### (2) 鋼材速度の算出方法

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-3 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 変位一時間関係を示す.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-3 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時間で、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(離反)時間である.

上記のように衝突時間と離反時間を確認し、衝突 鋼材の絶対変位のグラフにおいて、衝突前 0.01 秒 間のグラフの傾きと、離反後 0.01sec 間のグラフの 傾きから、衝突鋼材の衝突前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-2** に示す.**表-2** 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.



## (3) 計測データの信頼性

2物体の衝突問題では、衝突の前後において運動 量保存則が満たされること、また、衝突前後の運動

	緩衝材 厚さ (mm) 10	衝突前	衝突後	
目標		衝突	衝突	被衝突
(m/sec) 0.20		- 婀 / 古 庄	- 狮杉 (古庄	<b>劉</b> 松 、古 南
		速度 (m/aaa)		
		(III/ sec)		
		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
	40	0.691	0.046	0.665
	10	0.706	0.048	0.675
	10	1.251	0.355	0.942
		1.259	0.362	0.907
0.70	20	1.256	0.237	1.022
0.10		1.230	0.235	1.037
	40	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
	40	1.670	0.204	1.523
		1.670	0.204	1.495
	20	2.059	0.552	1.516
1.30		2.069	0.596	1.502
	40	2.034	0.310	1.787
		2.108	0.621	1.737

表-2 衝突前後の鋼材速度

量の変化量と衝突中に受けた力積は等しい、という 関係が成立する.本実験で得られたデータに関して も、これらの関係を満たしているかどうかを確認す ることにより、計測データの信頼性を検討した. 運動量保存則は、次式で示される.

 $m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v_1 + m_2 v_2 \tag{4}$ 

ここに,

- *m*<sub>1</sub>, *m*<sub>2</sub>: 衝突鋼材,および被衝突鋼材の質量(kg),
- *v<sub>1</sub>*:衝突鋼材の衝突前速度(m/sec),
- $v_2$ :被衝突鋼材の衝突前速度(m/sec),
- $v_1$ : 衝突鋼材の衝突後速度(m/sec),
- $v_2$ : 被衝突鋼材の衝突後速度(m/sec).

本実験では、衝突鋼材と被衝突鋼材の質量がほぼ 等しいこと、および被衝突鋼材の衝突前速度は 0m/secであることを考慮すると、式(4)は以下のよ うに変形できる.

$$v_1 = v_1' + v_2'$$
 (5)

**表-2**において,衝突前速度と衝突後の衝突鋼材と 被衝突鋼材の速度の和は,全てのケースでほぼ等し くなっており,式(5)の関係,すなわち,運動量保 存則が満たされていることが確認できる.

つぎに,被衝突鋼材の運動量の変化と力積の間に は次式の関係が成り立つ.

$$m_{2}(v_{2}'-v_{2}) = \int_{t_{1}}^{t_{2}} F(t)dt$$
(6)

ただし,

*F(t)*:被衝突鋼材が受けた力(N),

t<sub>1</sub>, t<sub>2</sub>: 衝突開始,および終了時刻.

被衝突鋼材に取り付けたロードセルにより得られ た時間-荷重関係を積分することで式(6)の右辺を 計算し,被衝突鋼材の衝突前後の速度から左辺を計 算した結果を,図-4に示す.

図-4の縦軸は力積を、横軸は運動量の変化を示している.■はゴム厚10mmの結果、○はゴム厚20mmの結果、▲はゴム厚40mmの結果を表している.また、実線で式(6)の関係を、点線で式(6)から±20%誤差の範囲を示している.この図から、ゴム厚40mmの実験結果で2,3のデータが±20%誤差の範囲から逸脱しているが、他のデータはすべて±20%誤差の範囲内に収まっている.

図-4において,被衝突鋼材の時間-荷重関係は計 測データをそのまま用いており,高周波成分を除去 する等のデータ処理は行っていない.衝突実験では, 微少時間間隔で計測を行う際に計測データに高周波 成分のノイズが含まれることがある.そのため,力 積計算に用いた荷重の計測データに誤差が生じた可 能性もある.

より詳細に定量的評価を行うためには、今後、荷 重計測の方法や計測データのフィルタ処理等を検討 する必要があると考えられる.しかしながら、本実 験から得られたデータは、式(5)、(6)の2つの関係 式をほぼ満たしており、定性的な傾向を把握する目 的からは十分信頼性があるものと判断した.



## 4. 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-5 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-5 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は線形の関係 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-5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-3 に示す. 表-3 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.

衣う	初期剛性
厚(mm)	初期剛性(kN/ı

누구 분만 꼬리 누구

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

## (2) 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-6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-6**(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-

**6**(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り、緩衝材 がない場合、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-6(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.

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.





さらに図-6(b)には、ゴム厚10mm、20mm、40mmの 結果ごとに回帰直線も示した. これらの回帰直線よ

り,緩衝材ゴムを用いた場合,衝撃力と衝突速度の 間にはバイリニアの関係があると考えられる.すな わち,ある衝突速度を超えると急激に衝撃力が大き くなるといえる.

つぎに、衝突鋼材が受ける衝撃力と緩衝材ゴムの 最大変位量の関係を図-7に示す.図中、凡例は図-6(b)と同様であり、縦軸は衝突鋼材が受ける衝撃力 を、横軸は緩衝材ゴムの最大変位量を表している.

図-7より,緩衝材ゴムの最大変位量がある変位を 超えると,鋼材が受ける衝撃力が急激に大きくなる ことがわかる.また,その変位量は,図-5において, 硬化が開始する変位量よりも若干大きめの値ではあ るが,よい対応を示していると考えられる.

以上,図-6(b)と図-7より,衝突速度が速くなる と,緩衝材ゴムの最大変位量が大きくなる.このため,緩衝材ゴムの静的圧縮荷重-変位特性から,衝 撃力と衝突速度は硬化型のバイリニア関係を示すといえる.





#### (3) 緩衝材によるエネルギー吸収率

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 収率を評価する.

$$\frac{\Delta E}{E_1} = \frac{E_1 - \left(E_1' + E_2'\right)}{E_1} = \frac{\left(1 - e^2\right)m_2}{m_1 + m_2} \quad (7)$$

ここに,

 $\Delta E$ :損失エネルギー(kN・m),  $E_i$ :衝突前の衝突鋼材の運動エネルギー,  $E_i$ ':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,  $m_i$ :衝突鋼材の質量, $m_2$ :被衝突鋼材の質量, e:反発係数.

図-8に緩衝材によるエネルギー吸収率と衝突鋼材 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率を、横軸は衝突鋼材の衝突速 度を表している.また、凡例は図-6と同様である.

図-8(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率と衝突速度には、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(7)より、エネルギー吸収率は理論上、0~0.5の 値となる.図-8(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.



図-8 緩衝材によるエネルギー吸収率と衝突速度 の関係

また図-8(b)より、ゴム厚が増加するほどエネル ギー吸収率は小さくなることがわかる.図-6(b)に おいて、衝撃力緩和効果はゴム厚が厚いほど大きい ことを示したが、エネルギー吸収率はゴム厚が薄い ほど大きい結果となっており、これら2つの能力の 間にはトレードオフの関係が存在するといえる.

しかしながら,エネルギー吸収率に関して逆の見 方をすれば,エネルギー吸収率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 吸収能力は大きいと考えることができる.

またこれらの図から, エネルギー吸収率が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.

## 5. 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) 現実の桁間衝突状態に近い状態を再現するため、 鋼材とレール間の摩擦力をできるだけ小さくす るエアーフローティング装置による実験手法を 確立した。
- (2) 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.また、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.
- (3)ゴム製緩衝材を取付けた場合、衝突速度と発生 する衝撃力の間には硬化型のバイリニアの関係 があることを示した.これは、緩衝材ゴムの静 的圧縮荷重-変位特性によると考えられる.
- (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率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の残存能力は大きいことを示した.
- (5) ゴム製緩衝材を用いても、エネルギー吸収が期 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に関して定性的な傾向を 明らかにした. 今後,解析的検討も加えることにより,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行っていく予定である.

謝辞:本研究を実施するに当たり,井澤孝二氏(当時,防衛大学校土木工学科4年),磯貝幸子氏(当時, 群馬工業高等専門学校専攻科1年),および鈴木智子 氏(当時,群馬工業高等専門学校環境都市工学科5 年)にご協力頂いた.ここに記して謝意を表する.

#### 参考文献

- (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 ー: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.
- 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.
- 28) 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.

(2003.6.30受付)

# COLLISION BETWEEN GIRDERS ON SHOCK ABSORBING RUBBER USING AIR FLOATING EQUIPMENT

## Yukihide KAJITA, Takeshi KITAHARA, Yasushi NISHIMOTO and Satoshi KATSUKI

Studied herein is an experimental investigation on the collision between two steel girders using shock absorbing rubber. The thickness of shock absorbing rubbers ranges from 10mm to 40mm and the collision velocity ranges from 0.2m/sec to 1.3m/sec on 5 stages. In this experiment, we propose a new experimental equipment, named air floating equipment, in which there are less friction force between girders and a guide rail. Consequently, it is clarified the influence of the rubber thickness and collision velocity on the shock absorbing and the energy absorption performance.