

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

北原武嗣¹・梶田幸秀²・西本安志³・香月 智⁴

¹関東学院大学工学部社会環境システム学科助教授 (〒236-8501 神奈川県横浜市金沢区六浦東1-50-1)

E-mail: kitahara@kanto-gakuin.ac.jp

²九州大学大学院工学研究院建設デザイン部門助教授 (〒812-8581 福岡県福岡市東区箱崎6-10-1)

E-mail: ykajita@doc.kyushu-u.ac.jp

³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

⁴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

桁間衝突用ゴム製緩衝材の衝撃力低減効果を検討するため、2本の鋼材による水平衝突実験を行った。この際、桁間衝突は固有周期が異なる橋梁間、すなわち上部構造重量が異なる橋梁間で発生しやすいことを考慮し、2本の鋼材質量が同じ場合と違う場合で鋼材に作用する最大衝撃力がどのような影響を受けるか、また、重いものが軽いものに衝突する場合と軽いものが重いものに衝突する場合で、差異が生じるかどうかを確認した。さらに、実験パラメータとして緩衝材厚さと鋼材の衝突速度を選び、鋼材に作用する最大衝撃力と緩衝材厚さ、鋼材の衝突速度、および鋼材質量の間の関係について考察した。

Key Words: collision between girders, shock absorbing rubber, mass of girders, thickness of rubber, collision velocity

1. はじめに

1964年新潟地震や1995年兵庫県南部地震により落橋が生じた。落橋が発生すると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。

しかしながら、道路橋示方書には、緩衝材の大きさ(断面積)や厚さに関する基準は存在しない。そのため、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ことで断面積を求めることが一般的である²⁾。また、

厚さに関しては文献2)を参考に5cm程度以上とすることが多いが、この根拠は明白でない。

ところで、緩衝材の衝撃力低減効果に関しては、緩衝材の種類や衝突速度に着目した研究3)~7)がほとんどであり、ゴム製緩衝材の厚さによる影響を検討した研究は見あたらない。

そこで著者らは、桁間衝突時のゴム製緩衝材による衝撃力低減効果を把握するため、レール上で可動な2本の鋼材を衝突させる実験的研究を実施した。これらの研究では、ゴム製緩衝材の厚さと衝突速度をパラメータとし、これらの違いが衝撃力低減効果に与える影響を定量的に評価した^{8),9)}。

一方、桁間衝突現象は2つの橋梁(設計振動単位)の固有周期の違いが原因で起きると考えられており、道路橋示方書でも、2つの橋梁の固有周期の比が1.5倍以上になる時に桁間衝突の配慮が必要と記載されている¹⁾。すなわち、桁間衝突が発生する箇所では、上部構造の質量は異なることが一般的であると考えられ、この場合の衝突速度に関しても解析的検討が行われている¹⁰⁾。

しかしながら、文献9)では同じ質量の鋼材間の衝突実験しか実施しなかった。そこで本研究では、2本の鋼材の質量および質量比が異なる場合の実験を行い、鋼材質量が最大衝撃力に与える影響について把握することを目的とした。なお、本研究の最終目的は、落橋防止構造に用いるゴム製緩衝材厚さの設計式を提案することにあるが、本研究では、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、エアフローティング装置を組み合わせることで桁間衝突実験を行った。動的物性評価装置は、最大3m/sの速度で可動な载荷ラムを有している。

また、エア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、载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。

実験は、図-1に示すように長さ3000mmのガイドレール

上に、桁に見た長さ1000mmの鋼材を2体設置し、1体を静止させ、もう1体を载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。

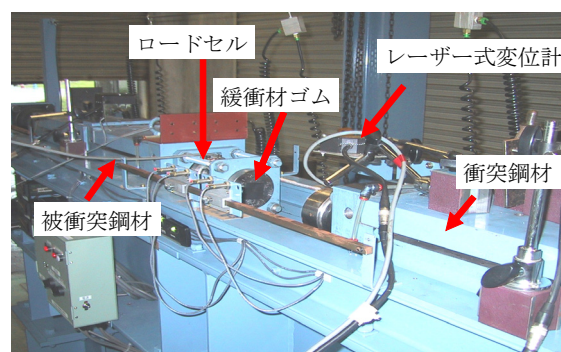


写真-1 実験装置全景

(2) 計測項目

ゴム製緩衝材による衝撃力低減効果を評価することが目的である。このため、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。

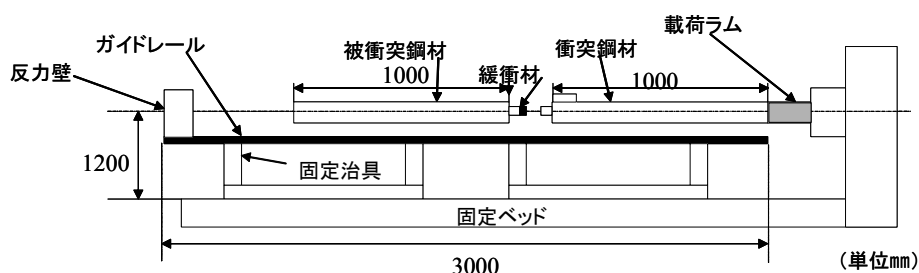


図-1 実験装置概要

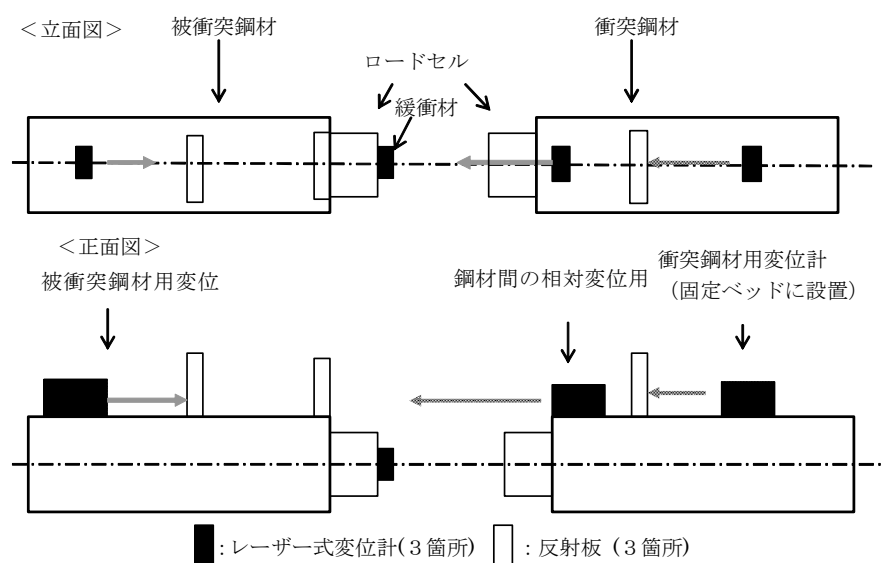


図-2 計測器取付位置

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．ここで用いたロードセルは、緩衝材なしの場合は 3,000kN 用、ゴム製緩衝材がある場合には 500kN 用であり、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．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 $50\mu\text{sec}$ 、緩衝材なしの場合は衝突時間が短いことを考慮して $5\mu\text{sec}$ とした．

(3) 実験供試体および実験ケース

衝突鋼材および被衝突鋼材ともに、SS400 を使用した． $200\text{mm}\times 200\text{mm}\times 1000\text{mm}$ の角柱が基本形状であり、このときの鋼材質量は 300kg である．

エアフローティング実験装置の角柱は、25kg の鋼板が 2 枚取り外し可能、また、50kg の角柱を 4 本取り付け可能のように製作されている．本実験では、これらの鋼板および角柱を組み合わせることで、鋼材質量を 250kg、375kg、500kg の 3 種類に設定して実験を行った．鋼材質量の組み合わせは表-1 に示す 5 ケースを設定した．

このため、衝突鋼材および被衝突鋼材の断面積は質量により異なることとなる．しかしながら、衝突鋼材に設置したロードセルとゴム製緩衝材が衝突面となるため、鋼材質量を変えた場合でも、衝突面積は常に 1600mm^2 (後述するゴム製緩衝材の断面 $40\text{mm}\times 40\text{mm}$) で一定である．

衝突鋼材と被衝突鋼材の質量が共に 250kg のものを基準ケース (Case1) として、衝突鋼材の質量 (m_1) はそのままにし、被衝突鋼材の質量 (m_2) のみを変え、質量比を変えたケース (Case2, Case3)、Case3 に対して衝突鋼材と被衝突鋼材の質量を入れ替えたケース (Case4)、そして衝突・被衝突鋼材の質量を共に Case1 の 2 倍にしたケース (Case5) に対して実験を行った．

表-1 実験ケース

	m_1 (kg)	m_2 (kg)	質量比	総質量 (kg)
Case1	250	250	1.0	500
Case2	250	375	1.5	625
Case3	250	500	2.0	750
Case4	500	250	2.0	750
Case5	500	500	1.0	1000

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 6mm と 10mm の 2 種類に変化させた． $40\text{mm}\times 40\text{mm}$ の形状は、文献 9) に詳述した考え方を踏襲し設定した．また、厚さに関しては、文献 9) の検討結果から形状率 (自

由表面積/衝突面積) 0.6 以上を確保することが適切であることを確認したため、最小で 6mm (形状率 0.6) とし、ゴム厚の違いを再確認するため 10mm の検討も行った．さらに、比較検討のため緩衝材なしの場合も検討した．ここに形状率とは、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¹⁾の逆数として定義している．

衝突速度に関しても、文献 9) の検討結果を参考に設定した．すなわち、実測衝突速度 0.7m/s の間でゴム製緩衝材の硬化により、衝撃力低減効果にバイニア関係がみられるため、 0.4 、 0.7m/s 、および 1.0m/s (実測衝突速度で $0.5\sim 1.5\text{m/s}$ 程度) の 3 ケースに設定した．

以上より、質量の組み合わせとして 5 ケース、ゴム厚として 3 ケース、衝突速度が 3 ケースとなり、合計 $5\times 3\times 3=45$ ケースの実験を行った．

(4) 実験手法、計測データの確認

本実験を行う前に予備実験を行い、エアフローティング装置の摩擦力を検定した．摩擦力の検定手法は文献 8) と同様に行い、摩擦力が十分に小さいことを確認した．

また、計測データの信頼性に関しても文献 9) と同様、運動量保存則と、力積と運動量の変化の関係を満たしていることを確認した．

3. 実験結果および考察

(1) 衝突および被衝突鋼材の質量入替の影響

図-3 に衝突鋼材と被衝突鋼材の質量を入れ替えた場合 (Case3 と Case4) の最大衝撃力と衝突速度の関係を示す．(a) には緩衝材がない場合の結果を、(b) にはゴム製緩衝材 10mm の場合の結果を示す．図中、縦軸に最大衝撃力を、横軸に衝突速度を示す．Case3 は質量の軽い鋼材が重い鋼材に衝突する場合であり、Case4 は重い鋼材が軽い鋼材に衝突する場合の実験結果である．

図-3 より、緩衝材なしとゴム製緩衝材 10mm のどちらの場合も、衝突側鋼材と被衝突側鋼材の質量を入れ替えてもほぼ同じ最大衝撃力を示すことが分かる．図には示していないがゴム製緩衝材 6mm の場合も同様の結果であった．すなわち、質量の重い鋼材が軽い鋼材に衝突する場合と質量の軽い鋼材が重い鋼材に衝突する場合で、どちらの場合でも最大衝撃力に違いがないといえる．

(2) 質量比の影響

つぎに図-4 に質量比が異なる場合 (Case1, 2, 3) における最大衝撃力と衝突速度の関係を示す．(a) は緩衝材がない場合の、(b) はゴム製緩衝材 6mm の場合の、(c) はゴム製緩衝材 10mm の場合の結果を示している．図中、縦軸は最大衝撃力を、横軸は衝突

速度を示す. Case1, Case2, Case3 とともに軽い鋼材が重い鋼材に衝突する場合であり, 質量比がそれぞれ, 1.0, 1.5 および 2.0 となっている.

また, 基準ケースである Case1 の最大衝撃力を 1 とした時の各設定速度での最大衝撃力の増加量を倍率として表し, 表-2 に示す.

緩衝材なしの場合, 図-4(a)と表-2 より, 衝突鋼材間の質量比が異なっても最大衝撃力はほとんど変わらないことがわかる. さらに, 後ほど 3 (3) の検討でも示す緩衝材なしの場合, 総質量が変わっても最大衝撃力に変化ないことが確かめられた. これは, 緩衝材なしの場合, 弾性応力波理論にしたがっているためであると考えられる. 弾性応力波理論では, 衝撃力は鋼材の密度, ヤング率, 接触面積と衝突速度のみに依存することが知られており, 質量に依存しないという今回の結果は妥当であるといえる.

ゴム製緩衝材のゴム厚 6mm と 10mm の場合, 図-4(b)と図-4(c)より, 質量比 1.0, 1.5, 2.0 と大きくなるにつれて, 最大衝撃力も増大していることがわかる. しかしながら, 質量比が大きくなるにしたがい, 総質量も 500kg, 625kg, 750kg と増えているため, 最大衝撃力の増加の原因が総質量によるものか質量比によるものなのか判断できない.

また表-2 より, 増加量は Case2 が約 1.25 倍, Case3 が約 1.35 倍となっており, 質量比の増加率よりも総質量の増加率に近く, 総質量に比例しているようにも見える.

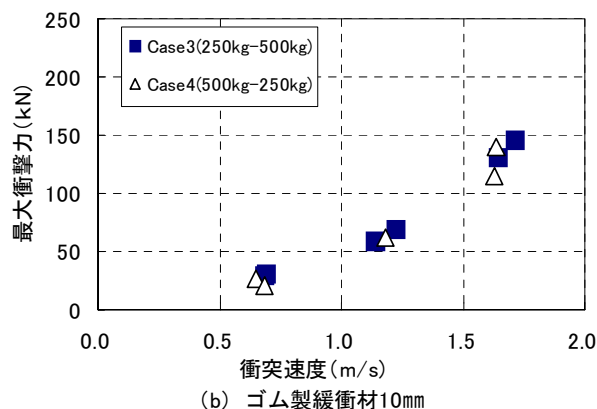
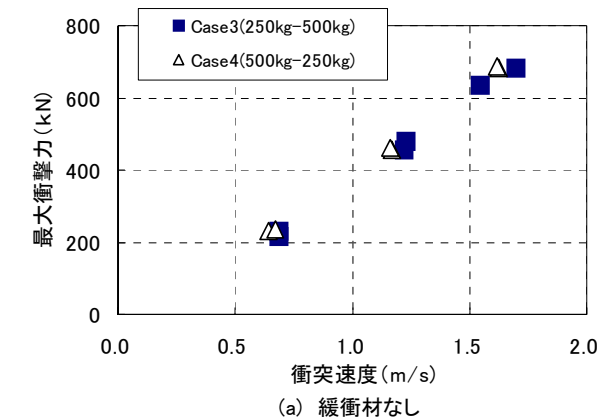
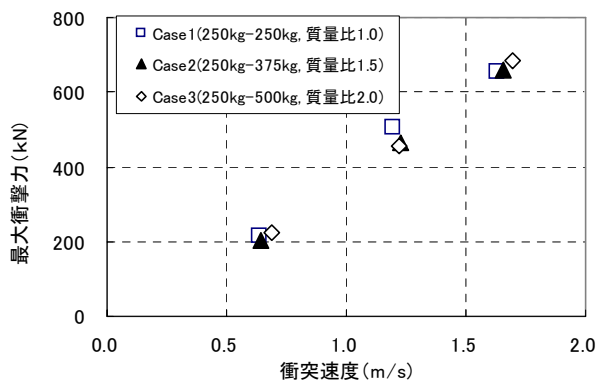
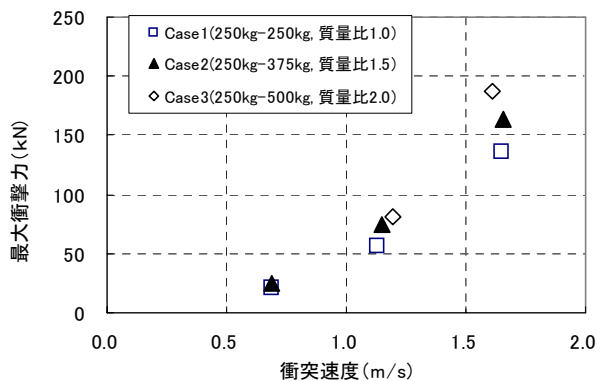


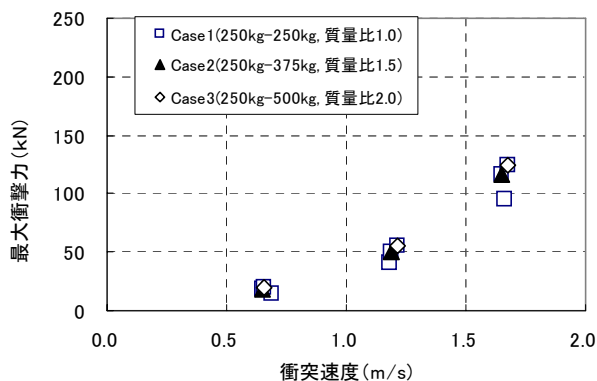
図-3 最大衝撃力と衝突速度の関係



(a) 緩衝材なし



(b) 緩衝材厚さ 6mm



(c) 緩衝材厚さ 10mm

図-4 最大衝撃力と衝突速度の関係

表-2 最大衝撃力の比較

緩衝材	実測速度 (m/s)	Case1 (250kg-250kg)	Case2 (250kg-375kg)	Case3 (250kg-500kg)
なし	0.65	1.00	0.95	1.05
	1.23	1.00	0.92	0.90
	1.66	1.00	1.01	1.04
10mm	0.69	1.00	1.25	1.36
	1.18	1.00	1.23	1.36
	1.66	1.00	1.22	1.31

(3) 総質量の影響

最後に, 図-5 に鋼材の質量比, 総質量とともに異なる場合 (Case1, 3, 5) の最大衝撃力と衝突速度の関係を示す. Case1 は質量比 1.0 で総質量 500kg,

Case3 は質量比 2.0 で総質量 750kg, Case5 は質量比 1.0 で総質量 1000kg の場合である. 図中, 縦軸には最大衝撃力を, 横軸には衝突速度を示す.

また, Case1 を基準とした時の各設定速度での最大衝撃力の増加量を倍率として表し, 表-3 に示す.

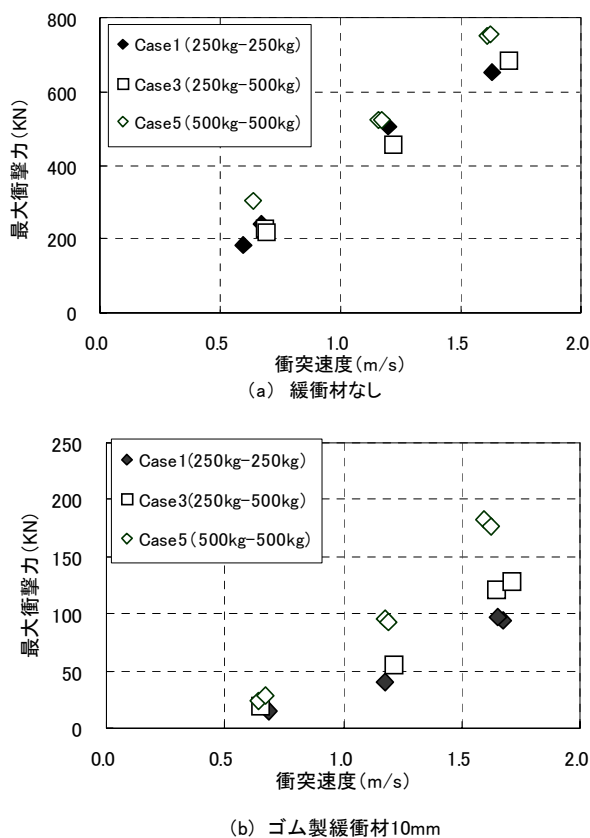


図-5 最大衝撃力と衝突速度の関係

表-3 最大衝撃力の変化

緩衝材	実測速度 (m/s)	Case1 (250kg-250kg)	Case3 (250kg-500kg)	Case5 (500kg-500kg)
なし	0.64	1.00	1.05	1.41
	1.20	1.00	0.90	1.03
	1.63	1.00	1.04	1.15
10mm	0.69	1.00	1.36	1.85
	1.18	1.00	1.36	2.32
	1.66	1.00	1.31	1.88

図-5 および表-3 より, 緩衝材がない場合, 3 (2) でも述べたように, 最大衝撃力は総質量に関係なく, 10%程度のばらつきに収まっていることがわかる. 実測速度 0.64m/s(設定速度 0.4m/s)の際, Case5 の最大衝撃力が Case1 の 1.41 倍となっているが, これは衝撃力の計測誤差の影響と考えられる.

3 (2) および本節での検討結果から, 緩衝材なしの場合, 最大衝撃力は総質量の影響を受けないと判断して問題ないといえる.

ゴム製緩衝材がある場合, 総質量が 1.5 倍になる

と最大衝撃力も約 1.35 倍に, 総質量が 2.0 倍になると最大衝撃力は約 2.0 倍になっていることがわかる. したがって, 最大衝撃力は総質量と比例関係にあるといえる. これは, 衝突前後でゴム製緩衝材が吸収するエネルギーが, エネルギー保存則に従っているためであると考えられる.

4. 結論

本研究では, ゴム製緩衝材の衝撃力低減効果に関して, 鋼材質量が最大衝撃力に与える影響を把握するため, 鋼材の質量比および総質量をパラメータとして桁間衝突実験を行った. 以下に本研究で得られた結論を示す.

- (1) 緩衝材がない場合は, 質量比や総質量を変えても最大衝撃力に大きな変化はない. これは弾性応力波理論にしたがっており, 最大衝撃力は鋼材の密度, ヤング率, 接触面積および衝突速度により決定され则认为られる.
- (2) ゴム製緩衝材の場合は, 質量を入れ替えても最大衝撃力に変化がないことを示した. したがって, 桁間衝突におけるゴム製緩衝材の設計にあたって, 衝突側と被衝突側の配慮をしなくてもよいことになる.
- (3) 最大衝撃力は, 鋼材間の質量比よりも鋼材の総質量と強い関係にあり, ほぼ比例関係にあることを示した. ゴム製緩衝材がある場合, エネルギー保存則に従い, 衝突前後でゴム製緩衝材が吸収するエネルギーに支配されるため, 総質量に比例する则认为られる.

本研究および文献9)の検討をとおし, 衝撃力低減効果に与えるゴム厚(形状率), 鋼材質量および衝突速度の間の関係を明らかにした. 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, 吉田真治氏(当時, 防衛大学校土木工学科4年), 船越隆治氏(当時, 関東学院大学工学部土木工学科4年)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) (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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 日本免震構造協会: 免震積層ゴム入門, オーム社, 1997.
- (2005. 6. 6 受付)

INFLUENCE OF MASS OF GIRDERS ON REDUCTION OF IMPACT FORCE DURING COLLISION BETWEEN STEEL GIRDERS WITH SHOCK ABSORBING RUBBER

Takeshi KITAHARA, Yukihide KAJITA, Yasushi NISHIMOTO and Satoshi KATSUKI

Studied herein is an experimental study on the collision between two steel girders using shock absorbing rubber, in order to investigate the influence of mass of girders on the reduction of impact force. The mass of girders ranges from 250kg to 500kg on 3 stages. As a result, it is found the impact forces are not different even if the mass is turned over between collision girders. Consequently, it is clarified the impact force is correlation with the total mass of girders not the mass ratio.