

ゴム製緩衝材の圧縮剛性と 最大衝撃力の推定に関する検討

北原 武嗣¹・梶田 幸秀²・西本 安志³・四元 義直⁴

¹関東学院大学准教授 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)

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

²九州大学大学院准教授 工学研究院建設デザイン部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)

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

³シバタ工業株式会社 商品企画第2グループ (〒674-0082 明石市魚住町中尾1058)

E-mail:Yasushi_Nishimoto@sbt.co.jp

⁴関東学院大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (〒236-8501 横浜市金沢区六浦東1-50-1)

E-mail:m0645007@kanto-gakuin.ac.jp

耐震性能向上の観点から、近年、ゴム支承が普及してきている。一方、ゴム支承の採用は耐震性能が向上する反面、上部構造の変位が増大するため、大地震時には桁間や桁と橋台の衝突が危惧される。このような衝突現象が生じた際、桁端部の損傷を軽減するためにも緩衝材に対する期待は大きいといえる。しかしながら、緩衝材の設計法に関しては、十分に確立されていないのが現状である。そこで本研究では、ゴム製緩衝材の設計式を構築することを目的として、静的圧縮実験および衝突実験を行った。静的圧縮実験から形状率と圧縮剛性の関係を明らかにし、衝突実験から、形状率、衝突速度、衝突質量をパラメータとした最大衝撃力の推定式に関して検討を行った。

Key Words : *shock absorbing rubber, maximum impact force, collision velocity, shape factor, compression stiffness*

1. はじめに

近年、耐震性能の向上の観点からゴム支承が普及してきている。しかしながら、ゴム支承の採用は耐震性能が向上する反面、上部構造の変位は増大するため、大地震時には桁間、および桁と橋台などの衝突が危惧される。このような衝突現象が発生した際に、桁端部などの損傷を防ぐためにも緩衝材への期待は大きいといえる¹⁾。

緩衝材には衝突時の衝撃力緩和効果が期待されているため、緩衝材設計の際には最大衝撃力の推定が重要である。現行の道路橋示方書・V耐震設計編¹⁾では、死荷重反力の1.5倍(1.5R_d)を設計荷重と規定されているが、この値の根拠は明確ではない。

著者らは、桁間衝突時のゴム製緩衝材を対象とし、緩衝材ゴムに作用する最大衝撃力に関して一連の実験を実施してきている^{2,3)}。その結果、最大衝撃力は衝突速度、衝突質量、および緩衝材ゴムの圧縮剛性が大きく影響することを明らかにしている³⁾。桁間衝突時の衝突速度に関しては、川島・佐藤の研究⁴⁾、武野・伊津野の研究⁵⁾、

著者らの研究^{6,7)}も行われているが、緩衝材ゴムの剛性に関する研究はあまり行われていないのが現状である。ゴム支承を対象とした圧縮剛性やせん断剛性に関しては文献^{8), 9)}で検討されているが、これらは積層ゴムに対する検討結果であり、ゴム製緩衝材のような単層ゴムにそのまま適用することは困難だと考えられる。

そこで本研究では、これまで十分な検討を行っていなかったゴム製緩衝材の圧縮剛性に着目し、静的圧縮試験からゴム製緩衝材の形状率と圧縮剛性の関係を導くことを第一弾の目的とした。さらに、本静的実験から求めた圧縮剛性と形状率の関係をを用いて、桁間衝突実験における最大衝撃力の推定式に関して検討を行うこととした。

2. 静的圧縮試験

(1) 試験概要

静的圧縮試験には、図-1に示す直方体の供試体を用

いた。一般的に緩衝材ゴムには、硬度 55±5 のものが使われる¹⁰。そのため、ここではその両端にあたる硬度 50 および硬度 60 の供試体ゴムを用いることとした。ゴムのサイズおよび形状率を表-1、表-2 に示す。形状率 α は式(1)のように、自由表面積を受圧面積で除した値として定義した。形状率は免震ゴム等で用いられる 1 次形状係数⁹と逆数の関係になる。

$$\alpha = \frac{A_f}{A} \quad (1)$$

ここに、 A : 荷重面断面積,

A_f : 自由表面積 (図中ハッチ部分)。

ゴム試験法¹¹を参考に荷重速度を 10mm/min として圧縮試験を行った。1 ケースについて 3 回の荷重を行い、1 回目の荷重はゴムの成分をなじませるための慣らし荷重とし、2 回目および 3 回目の平均値を試験結果として用いた。

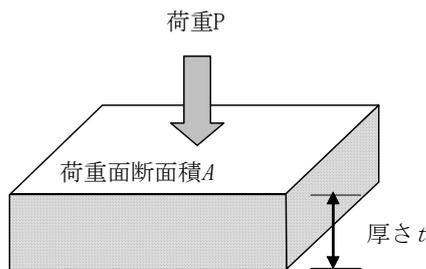


図-1 実験供試体

表-1 供試体サイズと形状率 (硬度 50)

ケース	断面積 A (mm)	厚さ t (mm)	形状率 α
60-30	3600	30.0	2.00
60-20	3600	20.0	1.33
60-10	3600	10.0	0.67
60-8	3600	8.0	0.53
60-6	3600	6.0	0.40
40-20	1600	20.0	2.00
40-10	1600	10.0	1.00
40-8	1600	8.0	0.80
40-6	1600	6.0	0.60
40-3.5	1600	3.5	0.35
30-20	900	20.0	2.67
30-10	900	10.0	1.33
30-8	900	8.0	1.07
30-6	900	6.0	0.80
30-3.5	900	3.5	0.47
20-10	400	10.0	2.00
20-8	400	8.0	1.60
20-6	400	6.0	1.20
20-3.5	400	3.5	0.70
20-2	400	2.0	0.40

表-2 供試体サイズと形状率 (硬度 60)

ケース	断面積 A (mm)	厚さ t (mm)	形状率 α
60-30	3600	30.0	2.00
60-20	3600	20.0	1.33
60-10	3600	10.0	0.67
40-20	1600	20.0	2.00
40-10	1600	10.0	1.00
40-8	1600	8.0	0.80
30-10	900	10.0	1.33
30-6	900	6.0	0.80

(2) 結果と考察

図-2 に、圧縮剛性と形状率の関係を示す。縦軸は圧縮剛性を、横軸は形状率を表している。また、図中の○は硬度 50 の結果を、■は硬度 60 の結果をプロットしたものである。図中の実線は、試験結果を非線形回帰した曲線を示している。ここに、圧縮剛性は、ゴムに作用する荷重をゴムの圧縮変位で除することにより求めた。

図より、圧縮剛性は形状率の 2 乗に反比例することがわかる。この際、関係式は式(2)の形で近似することができる。また、ゴム製緩衝材に用いられる硬度の範囲 (硬度 55±5) であれば、硬度が異なっても圧縮剛性に大きな差異は生じていないと判断できる。

$$K = \frac{1.2}{\alpha^2} \quad (2)$$

ここに、 K : 圧縮剛性, α : 形状率.

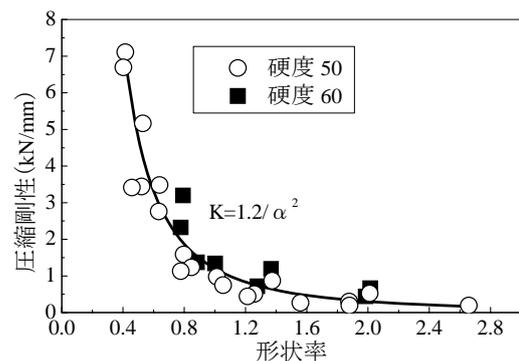


図-2 圧縮剛性と形状率の関係

3. 最大衝撃力推定式の検討

ゴム製緩衝材に作用する最大衝撃力と、衝突速度、衝突物体の質量、および緩衝材の剛性の関係を検討することを目的に、鋼角柱の衝突実験を実施してきている^{2,3}。

実験概要を図-3 に示す。なお、実験の詳細は文献 2)を参照されたい。

これらの衝突実験から、ゴム製緩衝材に作用する最大衝撃力は、衝突 2 物体(それぞれ質量 m_1 と m_2)の換算質量($m_1 \cdot m_2 / (m_1 + m_2)$)、衝突速度 v_0 、および緩衝材の剛性 K に影響することがわかっている。

本研究では、これらのパラメータを用いた最大衝撃力 P_{max} の推定式を検討した。この際、衝突前後の運動エネルギーの消失分 ($(1/2)(m_1 m_2 / (m_1 + m_2))v_0^2$) がゴム製緩衝材の弾性エネルギー ($(1/2)(P_{max}^2 / K)$) に消費されたと考え、式(3a)の形で最大衝撃力を推定することとした。式(3a)において、圧縮剛性を形状率 α で置き換えることにより、式(3b)が導かれる。

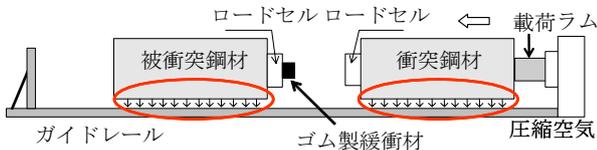


図-3 実験概要

$$P_{max} = C \cdot \sqrt{\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \cdot K \cdot v_0 + b} \quad (3a)$$

$$P_{max} = C \cdot \sqrt{\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \cdot \frac{1}{\alpha^2} \cdot v_0 + b} \quad (3b)$$

ここに、 P_{max} ：最大衝撃力、 α ：形状率、 m_1, m_2 ：質量、 v_0 ：衝突速度、 c ：比例定数。

式(3b)により衝突実験結果を回帰した結果を、図-4 および図-5 に示す。図-4 は衝突鋼材、被衝突鋼材とも 300kgの結果であり、図-5 は両者とも 250kgの結果を示している。これらの結果、式(3b)中の定数 c は $c = 63.8$ 、回帰した際の決定係数は、それぞれ $R^2 = 0.78$ および $R^2 = 0.80$ となり、どちらの場合も比較的強い相関を示した。したがって、式(3b)の形で最大衝撃力を評価することが可能だと考えられる。ただし、式(3b)では衝突速度が小さい範囲では最大衝撃力が負となるため、衝突速度 0.6m/s以上を適用範囲と考えている。

4. 結論

本研究で得られた結論を、以下にまとめる。

- (1) ゴム製緩衝材の圧縮剛性は、形状率の 2 乗に反比例する。ゴム製緩衝材の硬度を 55 ± 5 を適用範囲とすれば、硬度にかかわらず、 $K = 1.2/\alpha^2$ で評価

できると考えられる。

- (2) 衝突物体の換算質量、衝突速度、および緩衝材の形状率をパラメータとした最大衝撃力の推定式を検討した。衝突速度 0.6m/s 以上を適用範囲として、

$$P_{max} = C \cdot \sqrt{\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \cdot \frac{1}{\alpha^2} \cdot v_0 + b}$$

の形で評価できることを示した。

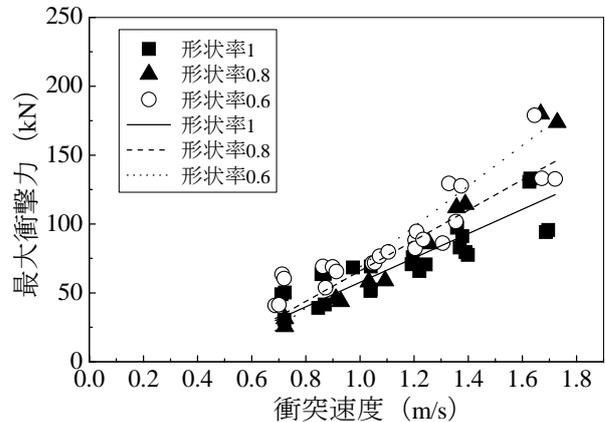


図-4 最大衝撃力と衝突速度の関係 (300kg-300kg)

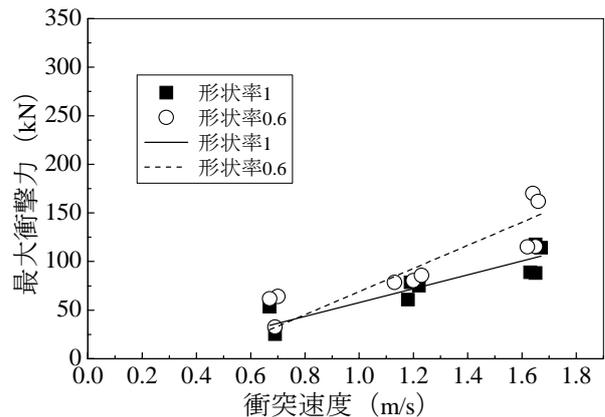


図-5 最大衝撃力と衝突速度の関係 (250kg-250kg)

謝辞：本研究の実施に際し、科学研究費補助金・基盤研究(B)「緩衝機能を有する落橋防止装置の耐力と変形性能の評価および動的設計法の開発」の補助を受けた。記して謝意を表す。

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) 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(CD-

- ROM), Vol.28, 2005.
- 3) 梶田幸秀, 北原武嗣, 西本安志, 大塚久哲: 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, 構造工学論文集, Vol. 52A, pp. 557-564, 2006.
 - 4) 川島一彦, 佐藤貴志: 相対変位応答スペクトルの提案とその適用, 構造工学論文集, Vol. 42A, pp. 645-652, 1996.
 - 5) 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.
 - 6) 北原武嗣, 伊津野和行, 梶田幸秀, 四元義直: 弾塑性応答を考慮した桁間衝突速度の研究, 第12回日本地震工学シンポジウム論文集 (CD-ROM), NO. 205 (pp. 926-929), 2006.
 - 7) 北原武嗣, 梶田幸秀, 西本安志, 四元義直: 橋脚2次剛性と衝突ばね剛性が桁間衝突速度に与える影響, 構造物の安全性および信頼性 (JCOSSAR2007) 論文集, Vol. 6, pp. 779-782, 2007.
 - 8) (社)日本道路協会: 道路橋支承便覧, 丸善, 2004.
 - 9) (社)日本ゴム協会: 設計者のための免震用積層ゴムハンドブック, 理工図書, 2000.
 - 10) (社)日本道路協会: 「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様」の準用に関する参考資料(案), 1995.
 - 11) (社)日本ゴム協会: ゴム試験法[第3版], 丸善, 2006.

(2007.06.29 受付)

ESTIMATE EQUATION OF MAXIMUM IMPACT FORCE OF SHOCK ABSORBING RUBBER USING SHAPE FACTOR

Takeshi KITAHARA, Yukihide KAJITA,
Yasushi NISHIMOTO and Yoshinao YOTSUMOTO

Shock absorbing rubbers should be required to reduce the impact load with the collision between a superstructure and a device which prevents a superstructure from falling off. However, 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. So, the purpose of this study is to propose the estimated formula of maximum impact force on the natural rubber during the collision. The collision test between two steel solid bars and the static compression test are carried out. From the results, it is confirmed that the maximum impact force is proportional to the collision velocity and the square root of compression stiffness.