

桁間衝突実験による緩衝材ゴムの 形状率と圧縮剛性に関する検討

北原武嗣¹・梶田幸秀²・西本安志³・四元義直⁴・松本 力⁵・金子智成⁶

¹正会員 博(工) 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)

²正会員 博(工) 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)

³正会員 博(工) 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番地)

⁴学生員 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)

⁵学生員 関東学院大学 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)

⁶学生員 防衛大学校 理工学研究科地球環境科学専攻(〒239-8686 横須賀市走水1-10-20)

1. はじめに

ゴム支承や免震支承の普及により、大地震時には桁間衝突や橋桁と橋台の衝突が生じる危険性が指摘されている。このような衝突現象が生じた際の桁端部や橋台の損傷を軽減するため、緩衝材の役割が重要と考えられる。

道路橋示方書・V耐震設計編¹⁾では、衝突時の衝撃力低減効果を緩衝材に期待しており、緩衝材の役割は重要であると述べている。しかしながら、緩衝材の設計手法は明確には規定されていないのが現状である。このため著者らは、桁間衝突用緩衝材ゴムを対象として、緩衝材ゴムの設計式を提案することを目標として一連の実験的、解析的検討を進めてきている^{2),3)}。

著者らのこれまでの検討から、衝突時に緩衝材ゴムに作用する最大衝撃力は、衝突速度、衝突物体の質量、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きた³⁾。これらの要因のうち、衝突速度に関しては、川島・佐藤⁴⁾、武村・伊津野⁵⁾、著者ら⁶⁾の検討などが行われている。

ゴムの圧縮剛性に関しては、例えば文献^{7),8)}でゴム支承や免震支承を対象とした検討は行われている。しかし、これらは積層ゴムの検討であり、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。

緩衝材ゴムの圧縮剛性に関しては、著者ら⁹⁾が静的載荷実験により検討した例はあるが、十分でないのが実情である。特に、桁間衝突時の緩衝材ゴムを

対象と考えると、衝突時の圧縮剛性を評価する必要があるが、このような検討はあまり行われていない。

そこで本研究では、桁間衝突実験を行い、緩衝材ゴムの衝突時の圧縮剛性に関して検討を行うものとした。ここでは、緩衝材ゴムの断面積や厚さなどの形状、およびゴムの硬度が圧縮剛性に与える影響を明らかにし、圧縮剛性の評価式を導くことを目的とした。

2. 実験概要

(1) 実験供試体

図-1に示すような直方体のゴム供試体を用いて実験を行った。ゴム製緩衝材は、通常、文献¹⁰⁾を参考にして硬度55±5のゴムが用いられることが多いことを勘案し、硬度50のゴムを用いた。

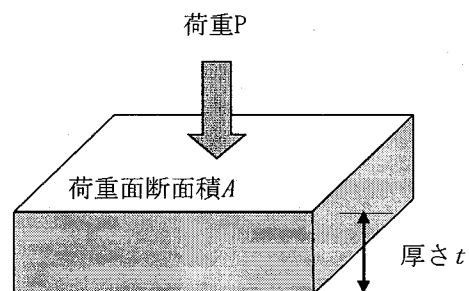


図-1 供試体形状

また、断面積や厚さなどの形状がゴムの圧縮剛性に与える影響を把握するため、表-1に示す形状の供試体とした。表中、断面積とは図-1に示した荷

重を受ける断面の断面積であり、その形状は正方形である。全部で 15 種類の供試体を用い、各供試体とも 2 体の実験を行った。

表-1 供試体 (硬度 50)

辺長 (mm)	厚さ t (mm)	断面積 A (mm ²)	形状率 α
40	5	1600	0.50
40	10	1600	1.00
40	20	1600	2.00
50	5	2500	0.40
50	15	2500	1.20
50	30	2500	2.40
60	10	3600	0.67
60	20	3600	1.33
60	40	3600	2.67
70	10	4900	0.57
70	20	4900	1.14
70	40	4900	2.29
80	10	6400	0.50
80	25	6400	1.25
80	50	6400	2.50

形状率 α は次式のように、自由表面積を荷重を受ける断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⁸⁾と逆数の関係にある。

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

ここに、 A : 荷重を受ける断面積、

A_f : 自由表面積(ハッチの部分)。

実際の供試体は、製作上、多少のばらつきがあるため、各供試体とも断面寸法をノギスで実測し、形状率 α を求めた。

(2) 衝撃実験概要

防衛大学校の所有する水平高速载荷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で桁間衝突実験を行った。水平高速载荷装置は、最大 3m/s の速度で可動な载荷ラムを有している。

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。実験概要図を写真-1 および図-2 に示す。実験は、図-2 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。

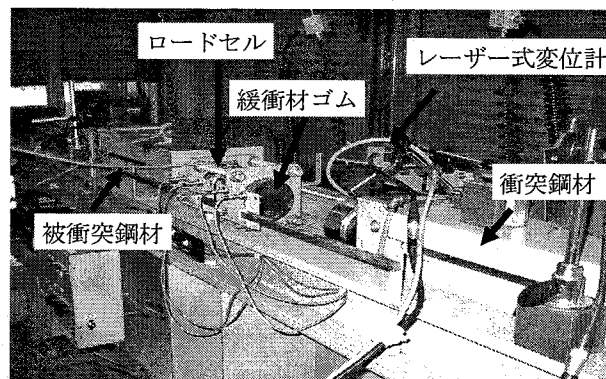


写真-1 実験装置全景

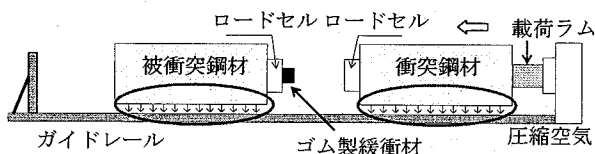


図-2 実験概要

衝撃実験においては、衝突時に鋼材が受ける衝撃力をロードセルで、衝突前後の衝突鋼材および被衝突鋼材の変位をレーザー変位計で計測した。その他、実験の詳細は文献 2) を参照頂きたい。

計測した衝撃力と変位を用いて、衝突時の圧縮剛性を次式で求めた。ただし、ゴムに作用する衝撃力は衝突鋼材の衝撃力と等しいものとし、ゴムの圧縮変位は衝突鋼材と被衝突鋼材の相対変位として計算した。

$$K = \frac{P}{\Delta} \quad (2)$$

ここに、 K : 圧縮剛性、

P : ゴムに作用する衝撃力、

Δ : ゴムの圧縮変位。

なお本研究では式(2)を検討する際、ひずみ 10% に対応する圧縮変位での接線剛性を初期剛性、ひずみ 60% に対応する圧縮変位の接線剛性を硬化後剛性として定義した。

3. 実験結果と考察

(1) 圧縮剛性と形状率の関係

衝撃実験による緩衝材ゴムの圧縮剛性を検討する前に、文献 9) で検討した静的载荷実験による初期圧縮剛性と形状率の関係を図-3 に再掲する。文献 9) で

は、硬度50と硬度60の緩衝材ゴムを用いて検討したため、図-3には両者の結果が示されている。

図-3からわかるとおり、静的な初期圧縮剛性は、形状率 α の2乗と逆比例の関係にあるといえる。また、その関係は、下記のように表すことができる。

$$K = \frac{1.2}{\alpha^2} \quad (3)$$

ここに、 K : 圧縮剛性(kN/mm)、 α : 形状率。

このように形状率の2乗に逆比例するのは以下のような理由であると考えられる。すなわち、ゴム材料は、ポアソン比が0.5程度と大きく、荷重と直交する方向にも変形が生じる。ところが、形状率が小さい(すなわち、荷重を受ける断面積に対して、厚さが薄い)と、上下面が拘束されていることにより圧縮直交方向に変形しづらくなるため、剛性が大きくなっていると考えられる。

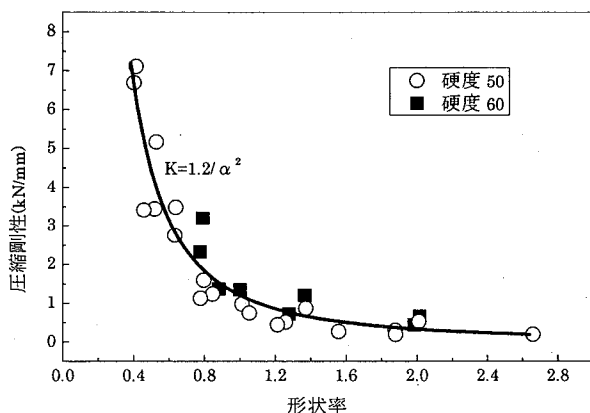


図-3 初期圧縮剛性 K と形状率 α の関係(静的)

つぎに、衝撃実験の結果を用いて、緩衝材ゴムの形状と衝突時の圧縮剛性の関係を検討した。初期圧縮剛性と形状率の関係を図-4に示す。図-4は衝突鋼材と被衝突鋼材の質量がそれぞれ375kg、250kgの場合の結果である。実験データを回帰した曲線(図中の破線)は、 $K = 1.71/\alpha^{2.3}$ の関係で表されることがわかる。

静的な場合と同様、形状率 α の2乗に逆比例していると考えると、回帰した曲線は実線のようになり、 $K = 2.45/\alpha^2$ と表すことができる。この際の決定係数は0.88であり、形状率 α の2乗に逆比例していると判断して差し支えないといえる。

また、衝突時にはひずみ速度効果により、静的な圧縮剛性よりも大きくなることが一般的である。図-3および図-4を比較すると、衝突時の初期圧縮剛

性は静的な初期圧縮剛性の約2倍になっていることもわかる。

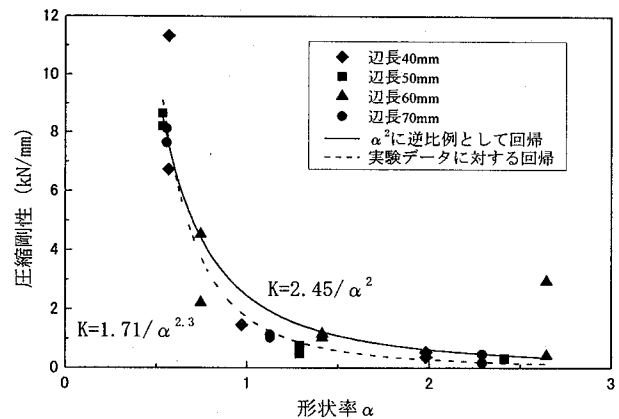


図-4 初期圧縮剛性 K と形状率 α の関係(衝突時)

さて、桁間衝突が生じるような際には、ゴムが硬化を示すような大きな変位の生じることも多いと考えられる。そのため、ゴムが硬化した後の剛性も重要になる。ここでは、例として、ひずみが60%時の圧縮剛性を硬化後剛性として検討を行った。図-5に硬化後圧縮剛性と形状率の関係を示す。

図-5より、硬化後圧縮剛性を形状率の2乗に逆比例すると考えて回帰した式は、 $K = 22.6/\alpha^2$ と表され、この際に決定係数は0.78となる。初期剛性を検討したときに決定係数0.88よりは小さな値となっているが、硬化後の圧縮剛性も形状率の2乗に逆比例すると考えてよいと判断できる。また、硬化領域に入っているため、同じ形状率に対して、初期剛性よりも約8倍の剛性を示すこともわかる。

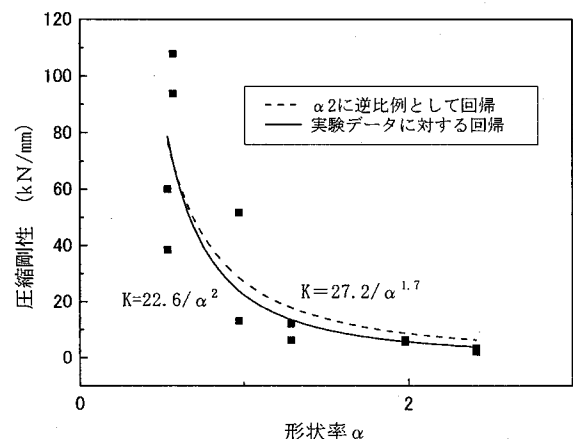


図-5 硬化後圧縮剛性 K と形状率 α の関係

(2) 最大衝撃力の検討

著者らのこれまでの研究により、最大衝撃力は衝

突速度と換算質量、ゴムの圧縮剛性に関係することを明らかにしている。そこで、衝突前後の運動エネルギーの消失分 $((1/2)(m_1 m_2 / (m_1 + m_2)) v_0^2)$ が緩衝材ゴムの弾性エネルギー $((1/2)(P_{\max}^2 / K))$ に消費されたと考え、式(4a)の形で最大衝撃力を推定することを試みる。式(4a)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(4b)が導かれる。今後、この推定式を詳細に検討し、緩衝材ゴムの設計式を導いていきたい。

$$P_{\max} = C \cdot \sqrt{\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \cdot K} \cdot (v_0 + b) \quad (4a)$$

$$P_{\max} = C \cdot \sqrt{\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \cdot \frac{1}{\alpha^2}} \cdot (v_0 + b) \quad (4b)$$

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

4. 結論

本研究では、緩衝材ゴムの設計式を求めることを最終的な目標として、まず、緩衝材ゴムの衝突時圧縮剛性に関して検討を行った。得られた結論を以下に示す。

- (1) 静的な圧縮剛性、および衝突時の圧縮剛性ともに、ほぼ形状率の2乗に逆比例していることを示した。これらは、厚さが薄い場合、上下面の拘束が大きく、圧縮直交方向への変形がしづらくなるからであると考えられる。
- (2) 衝突時の初期圧縮剛性 K は形状率 α を用いて、 $K = 2.45/\alpha^2$ という関係式で表すことができる。また、ひずみ速度効果により静的な初期圧縮剛性のほぼ2倍の値となっていることを示した。
- (3) 硬化領域に入っていると考えられるひずみ60%時の圧縮剛性も、初期剛性と同様、形状率の2乗に逆比例することを示した。

今後、衝突時に緩衝材ゴムに作用する最大衝撃力推定式の検討を通して、緩衝材ゴムの設計手法を検討していく予定である。

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。また、衝突実験の実施においては防衛大学校 香月智教授のご協力を得た。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。
- 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) (社)日本道路協会：道路橋支承便覧、丸善、2004。
- 8) (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。
- 9) 北原武嗣、梶田幸秀、西本安志：桁間衝突用緩衝材ゴムの圧縮剛性に関する実験的検討、第10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.285-288、2007。
- 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。