

# 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

園田佳巨<sup>1</sup>・西本安志<sup>2</sup>・石川信隆<sup>3</sup>・彦坂熙<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 九州大学大学院助教授 工学研究院建設デザイン部門 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

<sup>2</sup>正会員 シバタ工業株式会社 技術開発部 (〒674-0082 兵庫県明石市魚住町中尾 1058 番地)

<sup>3</sup>フェロー会員 工博 防衛大学校教授 システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 横須賀市走水 1-10-20)

<sup>4</sup>正会員 工博 九州大学大学院助教授 工学研究院建設デザイン部門 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

本研究は、落橋防止用衝撃緩衝ゴムの性能を簡易に評価する手法について検討したものである。まず、ゴム緩衝材に対する重錘落下実験を行い、発生する衝撃荷重を測定した。次に、JIS規格に基づく単軸引張試験から求めた材料定数を超弾性体の構成式に適用した3次元大変形有限要素解析を行うことで、緩衝材としてのゴムの基本的性能を表わす静的圧縮荷重～変位特性が精度良く得られることを確認した。さらに、数値解析で求めた圧縮荷重～変位関係を非線形パネとした1質点系モデルによる簡易な衝撃応答解析で、実際の衝撃荷重を実用レベルで推定できることを検証した。また、一次元波動解析によりゴム内の応力波の伝播状況を調べ、適用範囲についても検討した。本研究で示す手順を用いれば、使用するゴムの引張試験を行うだけで矩形状衝撃緩衝ゴムの性能評価を行うことが可能であることを確認した。

*Key Words: rubber, shock absorber, large deformation analysis, hyper elastic model, impact test*

## 1. 緒言

ゴムは、鋼材やコンクリート等の一般的な土木材料に比べて剛性が約1/1000～1/10000と極端に小さく、可逆的な大変形が可能であるなどの特徴を有することから、タイヤやホースなどの工業用品の材料として幅広く利用されてきた。その他にも、代表的な用途としては港湾における防舷材のような衝撃緩衝材が挙げられ、兵庫県南部地震以降では、落橋防止壁用緩衝材や橋梁の桁間衝突用の緩衝材としての利用法についても活発な検討が行われている。例えば、窪田ら<sup>1)</sup>は各種の高分子材料による落橋防止壁用緩衝材の緩衝効果を実験的に明らかにし、川島・庄司<sup>2)</sup>は桁間にゴム製緩衝装置を用いた場合の発生衝撃力やエネルギー吸収性能について解析的な検討を行っている。また、伊津野ら<sup>3)</sup>はゴム材の圧縮変形を利用した反力分散装置の開発を試みている。このように、ゴムは固体間の衝突が想定される箇所において、過度な衝撃荷重の発生や被衝突物の局部破壊の防止などを目的に緩衝材として設置することが多く、落橋防止システムにおいても道路橋の復旧仕様<sup>4)</sup>にその使用が推奨されている。しかし、衝撃緩衝材としてのゴムの性能評価について汎用的な方法は確立されておらず、実験データを踏

まえた判断をもとに、使用するゴムの材質や寸法を決定しているのが実状である。これは、ゴムの変形解析が主としてタイヤメーカーの主導で行われてきた経緯があり、土木・建築分野においては、ゴム支承のせん断変形特性の評価が主たる検討項目であったことに起因している。衝撃緩衝材としてのゴムは、構造物を防護する副次的な存在のイメージが強く、圧縮変形特性に関しては庄司<sup>5)</sup>や潤田ら<sup>6)</sup>の研究が見られるが、衝撃荷重が作用したときの性能を評価できる汎用的な手法は確立されていない。

そこで、本研究では、まず最初にゴム製緩衝材の重錘落下衝撃実験を行い、その緩衝効果について実験的に検討した。次に、重錘落下実験より得られた衝撃荷重を、ゴムの静的圧縮変形特性を非線形パネに置換した1質点系パネモデルによる衝撃応答解析を行って、実用レベルで推定できることを示した。ただし、ゴムを換算パネとしてモデル化することは、簡易かつ実用的な手法であるが、非線形パネ特性を決定するために、ゴムの材質や寸法が異なる度の実験を実施する必要があるようでは実用的とはいえない。また、ゴム厚が大きくなるほど、内部の慣性力分布等の影響により、換算パネでモデル化することの矛盾が顕在化してくるものと考えられ、適用限界が存在することが想定される。

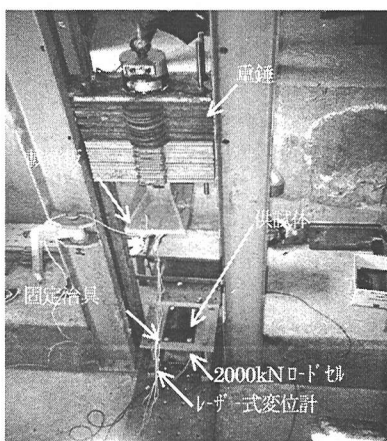


写真-1 落錘式衝撃実験の概要

表-1 ゴムの材料物性

ゴムの硬度	硬度 50 度	硬度 60 度
ゴムの種類	天然ゴム	
引張強度(MPa)	17.4	14.3
破断時の伸び(%)	540	410
初期剛性(MPa)	1.8	3.1

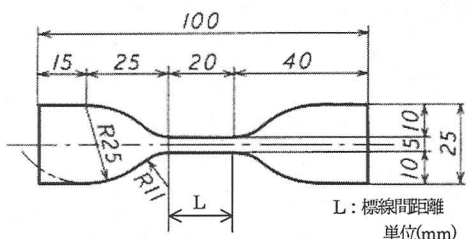


図-1 JIS3 号ダンベル状ゴム試験片

そこで、任意の材質および厚さのゴム製緩衝材の圧縮荷重～変位関係を得る手法として、JIS 規格に基づく単軸引張材料試験データを利用した3次元有限要素解析について検討した。さらに、ゴム製緩衝材の圧縮応力波の伝播状況を1次元波動伝播解析により調べ、非線形バネモデルの適用範囲について検討した。本研究で行った手順を用いれば、使用するゴムの単軸引張試験のみで衝撃緩衝用ゴムの性能評価を行うことが可能であることを確認した。

## 2. ゴム緩衝材に対する重錘落下実験

### (1) 重錘落下衝撃実験の概要

ゴム製緩衝材の緩衝効果を調べるために、重錘落下衝撃実験を実施した。重錘重量は4.0kN(=408kgf)とし、5通りの所定の高さから重錘を自由落下させ、供試体に衝

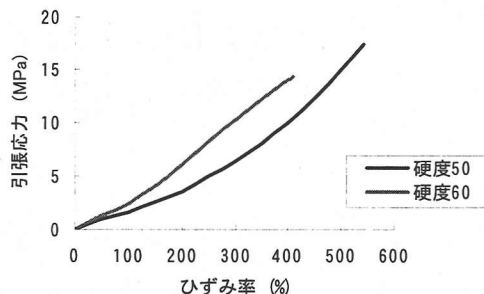


図-2 ゴムの単軸引張試験結果

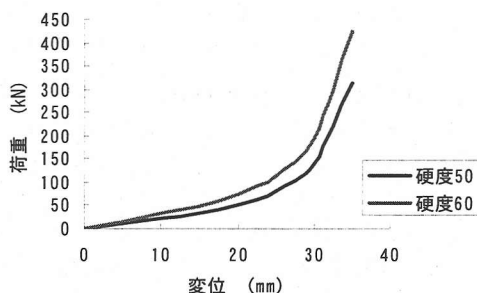


図-3 ゴム硬度が静的圧縮変形特性に与える影響

表-2 落錘式衝撃実験の入力条件

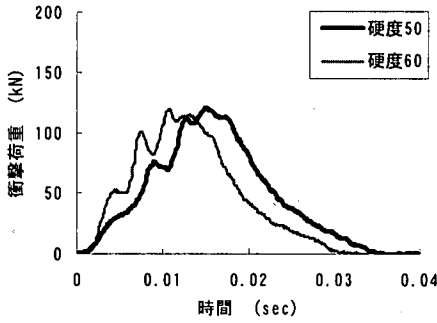
入力エネルギー (kJ)	落下高さ (m)	衝突速度 *(m/s)
1.0	0.25	2.21
3.0	0.75	3.83
5.0	1.25	4.94
7.0	1.75	5.85
10.0	2.50	7.00

\*衝突速度  $v=(2gh)^{1/2}$  により算出。

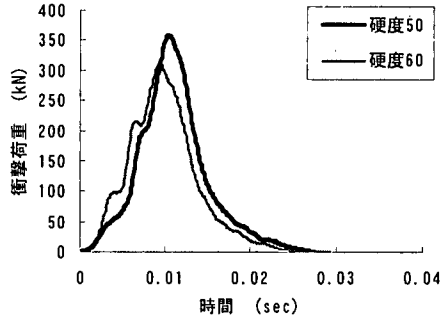
撃的な外力を与えた。重錘落下実験の概要を写真-1に示す。本実験での計測項目は、レーザー式変位計による重錘の変位とロードセルによる供試体背面に発生した伝達荷重の2つである。レーザー式変位計は、(株)キーエンス社製のLB-300(測定範囲20～40cm, 分解能50μm, 応答周波数915Hz)を用い、ロードセルは、共和電業株製のLC-200TE(定格容量2000kN)を用いた。なお、計測におけるサンプリング時間間隔はいずれの入力条件においても0.1msecである。

### (2) 実験供試体

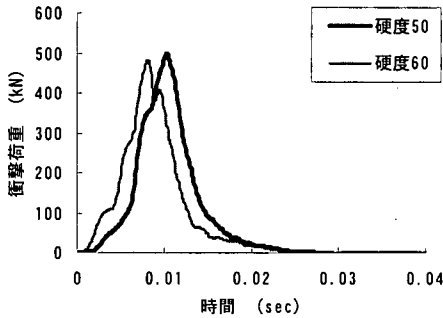
本実験に使用したゴム緩衝材の形状は、縦150mm×横150mm×厚さ50mmの矩形ブロック状のものである。本実験に用いたゴムは、単軸引張試験における初期剛性(200%伸張時の引張応力から算出したもの)が、約1.8MPa(硬度50度のゴムに相当)、約3.1MPa(硬度60度のゴムに



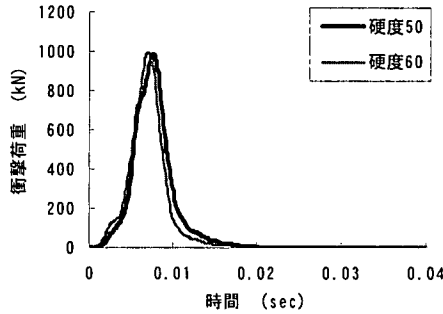
(a) 1.0kN·m のケース



(b) 3.0kN·m のケース



(c) 5.0kN·m のケース



(d) 10.0kN·m のケース

図-4 落錘式衝撃実験で得られた衝撃荷重～時間関係

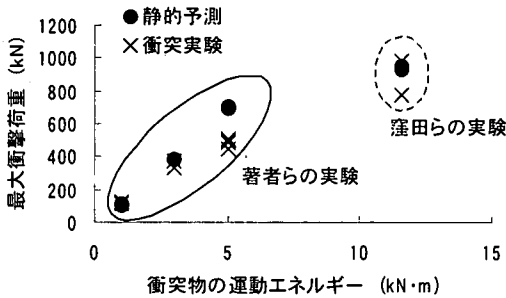


図-5 静的実験データを用いた最大衝撃荷重の予測

相当)の2種類である。これは、文献4)に記載されている落橋防止壁用緩衝材の規格値(硬度55±5度程度)を参考として決定した。用いたゴムの材料諸元を表-1に、JIS K 6301に基づく3号ダンベル試験片(図-1)を用いた単軸引張実験結果(公称応力-公称ひずみ関係)を図-2に示す。

次に、これら2種類のゴム緩衝材の静的圧縮実験結果を図-3に示す。静的圧縮実験は、5000kN圧縮試験機(株式会社島津製作所製)を使用し、圧縮速度5mm/minで行った。測定項目は、載荷点荷重と載荷点変位である。この図より、約20mmの変位(圧縮ひずみ40%)以降から、2種類ともに圧縮剛性が急激に増加する傾向が見られ、強度の非線形性を有することが認められる。これは、一般にゴムが体積変化を殆ど生じない材料であるため、底面摩

擦等の影響で側方への膨らみが限界に達するにつれ、圧縮変形に対する抵抗力も増加することに起因している。したがって、緩衝材としての効果を発揮するには、適度な撓み性を持つことが前提となることから、ゴム緩衝材の場合には約60~70%ひずみ域(本供試体の場合、30~35mm変位域)までを適用範囲とみなすことが望ましいと考えられる。

### (3) 入力条件

重錘の落下高さは、衝突時に重錘が有する運動エネルギーが1.0, 3.0, 5.0, 7.0, 10.0kN·mとなるような換算落下高さを求めることで決定した。実験条件を表-2に示す。なお、今回の実験で与えた重錘の運動エネルギーは、1.0kN·m~3.0kN·mでゴムの静的圧縮ひずみ60~70%までの変形による吸収エネルギーに対応しており、5.0~10.0kN·mの運動エネルギーは、今回のゴム緩衝材に70%を上回る圧縮ひずみを発生させる大きな入力エネルギーとなっている。

### (4) 実験結果および考察

図-4(a)~(d)は、硬度50, 60の2種類のゴムで製作された供試体を用いたときの衝撃荷重～時間関係を、重錘の衝突エネルギーが1.0, 3.0, 5.0, 10.0kN·mの4通りのケースについて示したものである。これらより、全

一般的に衝撃力波形は正弦半波に近いもので、2種類のゴムで最大衝撃力および衝撃作用時間に殆ど差が無いことがわかる。また、硬度60のゴムの方が、剛性が大きいために衝撃荷重の起ち上がりが見え早くなる傾向が見られるが、重錘の衝突速度が速くなる（衝突エネルギーが大きくなる）につれてその相違も失われていくことが認められる。したがって、この2種類のゴムは、衝撃緩衝材として見た場合、殆ど性能差はなく、緩衝効果や適用範囲を寸法によって把握できることが推察される。

ところで、図-4(a)~(d)の最大発生荷重に着目すると図-5のようになり、重錘が衝突時に有する運動エネルギーとはほぼ線形関係にあることが認められる。既往の研究においても、窪田ら<sup>1)</sup>はゴム製緩衝材の場合、衝突物の運動エネルギーと静的圧縮実験によって得られた荷重~変位関係の面積を等価におくことで、最大衝撃荷重を推定できるケースがあることを指摘している。また、著者ら<sup>7)</sup>も、天然ゴム系の緩衝材が60~70%以下の圧縮ひずみ域で応答するようなケースであれば、同様の手法で衝撃荷重の予測が可能であることを実験的に確認している。図-5は、その根拠となるデータを示したもので、窪田らと著者らの規模が全く異なる2つの衝撃実験データをもとに、静的荷重~変位関係を用いた衝撃荷重の予測値と実験値との比較を行っている。この図より、静的荷重~変位関係を用いた推定値と衝突実験における最大発生荷重には、約10~20%の相違が見られる程度で、静的圧縮実験による予測値が、衝撃荷重の第一近似値として有効な場合があることがわかる。

### 3. ゴム緩衝材の性能評価法

衝撃緩衝用ゴムの性能評価を簡易に行う手段として、2.(4)の考察より、ゴム緩衝材の静的圧縮変形特性を用いて発生衝撃荷重をある程度予測することができることを確認した。そこで、本実験供試体の静的圧縮荷重~変位関係を3次元有限要素解析により求め、得られた荷重~変位関係の勾配を非線形バネ係数として1質点系バネモデルによる衝撃応答解析を行い、重錘落下実験による衝撃荷重の推定を試みた。なお、ここでは任意の材質（配合や加硫条件）や厚さのゴム緩衝材の静的圧縮荷重~変位関係を求めることを可能にするために、超弾性体の構成式を用いた3次元大変形解析プログラムを作成した。これは、ゴムが形状係数（載荷面積と自由表面積の比）によって圧縮剛性が大きく異なるため、材料試験データから荷重~変位関係を直接的に推定することができないためである。最後に、1次元波動伝播解析と1質点系バネモデルによる衝撃応答解析の比較を行うことにより、簡易なバネ-質点系解析の適用範囲について検討した。

#### (1) ゴムの大変形解析手法

ゴムは、非線形弾性体として、引張側では約400%の大ひずみ領域まで可逆的な大変形が可能であることや変形時の体積変化が殆ど無いなど、鋼やコンクリート等の他の土木材料と大きく異なる力学特性を有する。したがって、ゴムの挙動を大ひずみ領域まで精度良く予測するには、他の材料とは異なる解析手法を用いる必要がある。

本研究では、衝撃緩衝用ゴムの圧縮変形特性を約60~70%程度のひずみ域まで再現するために、超弾性体の構成式を用いた3次元大変形解析プログラムを作成した。

##### a) ゴムの構成方程式

ゴムは一般に超弾性体<sup>8)</sup>として扱われ、単位体積当りのひずみエネルギー密度関数 $W$ を用いて構成式が以下のように定義される。

$$S_{ij} = \frac{\partial W}{\partial E_{ij}} \quad (1)$$

ただし、 $S_{ij}$ は第2Piola-Kirchhoff応力、 $W$ はひずみエネルギー密度関数、 $E_{ij}$ はGreen-Lagrangeひずみテンソルである。

式(1)に用いるひずみエネルギー密度関数には、MooneyやOgden<sup>9)</sup>他、多くの研究者により各種の式が提案されている。しかし、現状ではゴムのひずみエネルギー密度関数を用途に応じて理論的に選択するだけの知見は十分には得られてなく、単軸引張もしくは二軸伸張試験のデータを用いて、必要なひずみ域までうまく再現できる式の選択とパラメータの同定を行うことが多い。

そこで、本研究ではゴムのモデル化にあたり、以下の点に留意し、ひずみエネルギー密度関数として式(2)に示す3パラメータを有するMooney-Rivlin式を採用することにした。

①衝撃緩衝用ゴムの有効な使用範囲として、約0~70%の圧縮ひずみ域が期待されるため、70%ひずみ域までのゴムの変形特性を再現できること。

②パラメータの同定に用いる材料試験は、できるだけ簡易かつ標準的な手法が望ましい。そこで、衝撃緩衝用ゴムの性能が、単純な圧縮変形特性で評価されることを想定し、JIS規格に基づく単軸引張試験を採用する。

③引張試験結果から求めた材料定数を圧縮場に適用するにあたり、できるだけ簡易なひずみエネルギー密度関数を用いる。

④引張・圧縮の両域でゴムの非線形な応力-ひずみ関係(S字状を呈するケースが多い)を良好に再現するには、それ自体をひずみの関数とした2パラメータ、もしくは3つ以上の定数係数のパラメータを持つひずみエネルギー密度関数<sup>10)</sup>を用いる必要性が指摘されている。

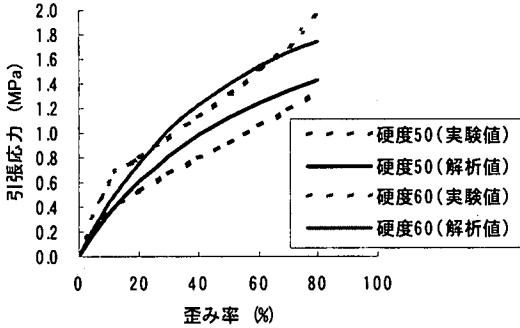


図-6 ゴムの単軸引張試験のシミュレーション

$$W = c_{10}(I_1 - 3) + c_{01}(I_2 - 3) + c_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) \quad (2)$$

ただし、 $c_{10}, c_{01}, c_{11}$ は、それぞれ材料試験により得られる Mooney-Rivlin 定数 (MPa)、 $I_1, I_2, I_3$ は、それぞれ右 Cauchy-Green 変形テンソルの 3 不変量である。

ここで、ゴムの変形解析を行う場合、非圧縮性を考慮することは避けられない。通常、この特性は剛塑性解析と同様に、Lagrange の未定乗数法とペナルティ関数法の 2 通りのどちらかが用いられるが、ここでは以下の式(3)をペナルティ項としたペナルティ関数法を用いて非圧縮性を数値的に考慮することにした。

$$\phi(I_3) = \frac{\lambda}{2}(I_3 - 1)^2 \quad (3)$$

ただし、 $\lambda$ は体積変化 ( $I_3 - 1$ ) にかかるペナルティ係数である。

式(2)に式(3)を加えて式(1)に代入することにより、本研究で用いるゴムの構成式は以下のように表される。

$$S_{ij} = 2\{c_{10} + c_{01}I_1 + c_{11}\{(I_2 - 3) + I_1(I_1 - 3)\}\}\delta_{ij} - 2\{c_{01} + c_{11}(I_1 - 3)\}C_{ij} + \lambda(I_3 - 1)(I_2\delta_{ij} - I_1C_{ij} + C_{ik}C_{kj}) \quad (4)$$

ただし、 $C_{ij}$ は右 Cauchy-Green 変形テンソル、 $\delta_{ij}$ はクロネッカーのデルタである。

#### b) ゴムの大変形解析手法

ゴムの大変形領域までの挙動を解析するには、幾何学的な非線形性の考慮が不可欠である。そこで、解析は更新ラグランジュ法<sup>11), 12)</sup>に基づく増分形式で行い、増分剛性マトリックスは以下の式で与えることにした。

$$[k] = \int_{n_{t-1}} [B]^T [D] [B] dv + \int_{n_{t-1}} [G]^T [S] [G] dv \quad (5)$$

ただし、 $[B]$ は 2 次の変位増分まで考慮したひずみ節点変位マトリックス、 $[D]$ は式(4)を Green のひずみ  $E_{ij}$  で再度偏微分して得られる応力-ひずみマトリックス、 $[G]$ は変位勾配マトリックス、 $[S]$ は初期応力マトリックスである。

表-3 同定計算で得られたゴムの材料定数 (MPa)

ゴムの種類	$c_{01}$	$c_{10}$	$c_{11}$	$\lambda$
硬度 50 のゴム	-0.049	0.490	0.196	1.470
硬度 60 のゴム	-0.098	0.490	0.294	1.960

式(5)中の  $[D]$ マトリックスは、式(2)から得られる本来

の超弾性体の剛性項と、式(3)の非圧縮性由来するペナルティ項の和で与えられる。ここでは、非圧縮性による過拘束の問題が生じないように、ペナルティ項は要素中心における 1 点積分を、本来の剛性項は 8 点積分を行う選択低減積分法を採用し、ゴム緩衝材の剛性を評価した。

#### c) ゴムの材料定数の評価

ゴムの材料定数の評価には、重錘落下実験に用いたものと同じ材質のゴムを用いた JIS 規格に基づく単軸引張実験結果 (図-2) を利用した。具体的には、ゴム業界で加硫ゴム物性を得るのに汎用的に用いられている JIS K 6301 に基づく単軸引張実験を行い、70%ひずみ域の単軸引張試験を用いて材料定数を決定し、圧縮変形解析に適用することにした。ここで、ゴム緩衝材に期待される 70%程度の圧縮ひずみは、伸長比換算で 300%以上の引張ひずみに対応するが、圧縮・引張両域を良好に再現しうるパラメータの決定が容易でないことや、本研究では圧縮域でのゴムの特性評価が主目的であり、引張側の大変形域までシミュレートする必要は無いため、70~80%ひずみ域の引張試験を用いて材料定数を決定した。図-6 は、2 種類のゴムに対して、80%の引張ひずみまで単軸引張試験の同定を行った結果である。図-6 のように 80%の引張ひずみまでの挙動を良好に再現可能な 2 種類のゴムの材料定数として、表-3 に示す値が求められた。

#### d) ゴム緩衝材の静的圧縮変形挙動のシミュレーション

ここでは、ゴム緩衝材の静的圧縮荷重試験のシミュレーションを行い、単軸引張試験で求めた材料定数を用いて圧縮荷重~変位関係を評価可能であるか検証した。検討の対象としたのは、重錘落下実験に用いた矩形ブロック状の供試体 (以後、供試体 A という) と、防舷材として使用される V 字型の供試体 (以後、供試体 B という) の 2 種類である。ここに、2 種類の供試体を検討したのは、両者がそれぞれ全く異なる抵抗メカニズムを有すると考えられるからで、供試体 A で主として圧縮変形領域にお

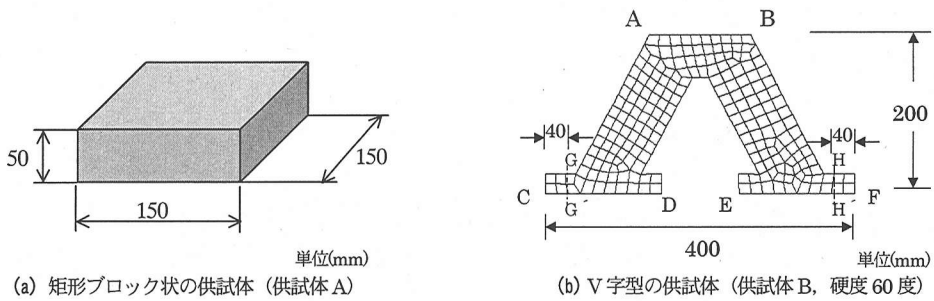


図-7 ゴム緩衝材の構造寸法

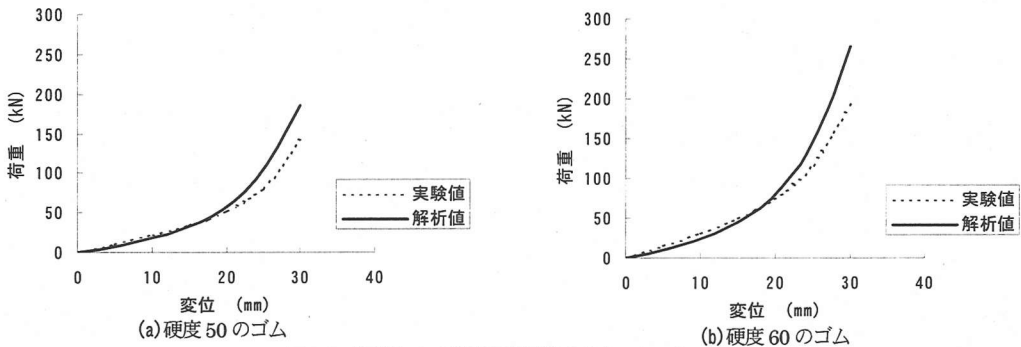


図-8 供試体 A の静的圧縮試験のシミュレーション

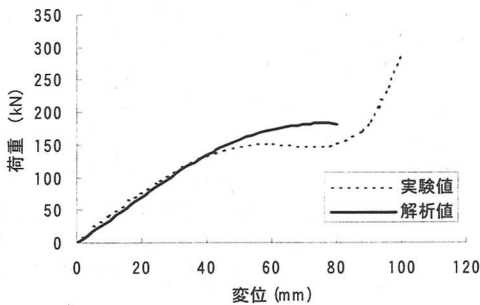


図-9 供試体 B の荷重～変位関係の比較

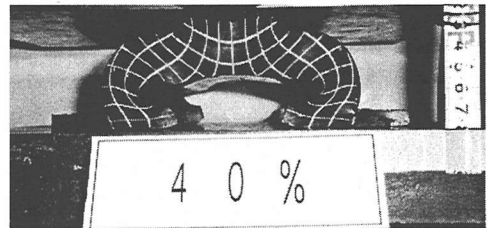


写真-2 40%圧縮時の変形状況 (供試体 B)

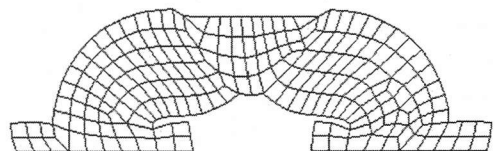


図-10 解析による 40%圧縮時の変形状況 (供試体 B)

けるゴムの構成式の妥当性を、供試体 B では幾何学的非線形性の影響を考慮した解析手法の妥当性を検証した。ここで、供試体 A および供試体 B の断面寸法は、それぞれ図-7 に示すとおりである。

まず、供試体 A に対して本手法で静的圧縮荷重実験のシミュレーションを行った結果を図-8 (a), (b) に示す。この図より、2 種類のゴムともに変位 20mm までは良好に実験値を再現しているが、その後の圧縮剛性の増加を過大評価する傾向にあることがわかる。これは、ゴムの体積変形特性を正確に把握しきれていないため、体積変化の影響が現れ始める 20mm (40% 圧縮) 以上の変形域で実験値との相違が生じたものと思われる。

次に、硬度 60 のゴムで製作された供試体 B の静的圧縮荷重実験のシミュレーションを行った結果を図-9 に示す。この図より、供試体 B は V 字型形状の影響により、圧縮変形が進展するにつれて両脚に座屈現象が発生し、硬化型弾塑性体に近い挙動を示すことがわかる。本解析は、幾何学的非線形性を考慮した効果により、その傾向を良好にシミュレートしていることが認められる。

写真-2 および図-10 は、それぞれ供試体 B を 40% 圧縮したときの変形状況を示したもので、図-10 から両脚の曲げ変形状況を再現できていることが確認される。なお、実験で 90mm 以降の変形域で見られる圧縮剛性の増加は、曲げ変形した脚と基部との接触によるものであるが、

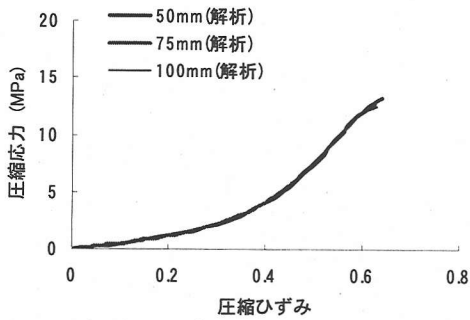


図-11 厚みが異なるゴムの圧縮応力～圧縮ひずみ関係 (硬度 60 度)

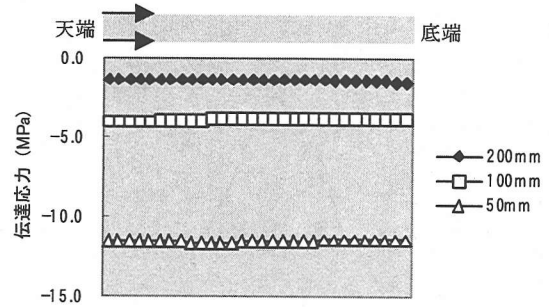
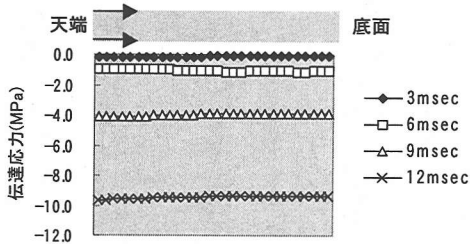
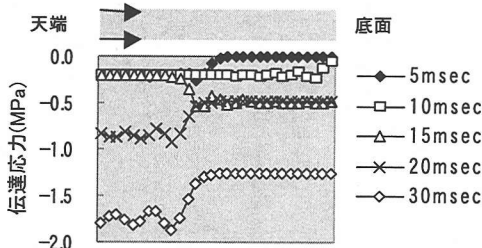


図-13 ゴム厚を変化させた場合の応力分布 (最大衝撃力発生時)



(a) ゴム緩衝材中の伝達応力分布 (ゴム厚 50mm)



(b) ゴム緩衝材中の伝達応力分布 (ゴム厚 500mm)

図-12 ゴム緩衝材内部の圧縮応力分布の時間的変化

本解析ではこの種の接触現象は考慮していないため、90mm 以上の計算は行わなかった。以上の 2 つの供試体に対するシミュレーションより、幾何学的非線形性と超弾性体としてのゴムの構成式を導入した有限要素解析を用いれば、衝撃緩衝用ゴムの静的圧縮変形特性を実用上、十分な精度で評価可能であることが認められた。

## (2) ゴム緩衝材の衝撃緩衝効果のシミュレーション

3. (1)における考察より、本解析法でゴム緩衝材の静的圧縮変形特性を精度良く評価できることが検証された。次に、数値解析で求めた静的圧縮バネ特性を用いた簡易な 1 質点系バネモデルによる衝撃応答解析を行い、ゴム緩衝材の衝撃緩衝効果について調べた。

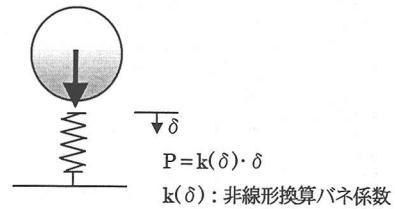


図-14 1 質点系バネモデル

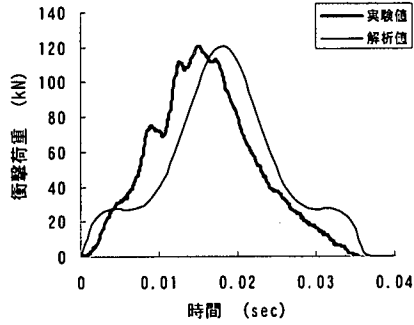
### a) 1 質点系バネモデルによる衝撃応答解析

衝撃緩衝用ゴムの性能評価を簡易に行う手法として、ここでは、静的圧縮荷重～変位関係の勾配をゴムの非線形バネ係数として用いた 1 質点系バネモデルによる衝撃応答解析を試みる。ただし、衝撃緩衝用ゴムの 1 つの非線形バネでモデル化することの妥当性は、以下の 2 つの条件を満足する場合に限定されるものと考えられる。

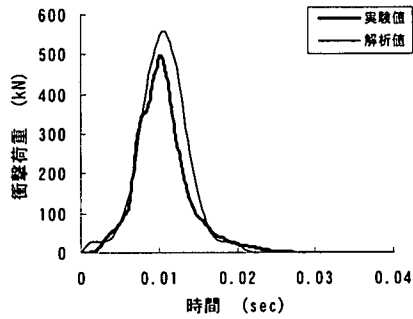
- ① 緩衝材内の応力分布がほぼ一様とみなせる場合。(緩衝材の厚さが薄く、内部を伝播する圧縮応力波の速度が十分に速い場合には、緩衝材内の応力がほぼ一様な値を示しながら増減すると考えられる。)
- ② 緩衝材中に発生する慣性力が相対的に小さい場合。(衝撃緩衝用ゴムの質量が衝突物の質量に比べて非常に小さくかつ低速度の衝突現象であれば、緩衝材中の慣性力は十分に小さいと考えられる。)

以上のことを想定し、硬度 60 のゴム緩衝材の厚さが 50mm、500mm の 2 ケースを例に、3.0kN・m の運動エネルギーで重錘が衝突した際の内部の圧縮応力分布の時間的変化を波動伝播解析<sup>13)</sup>により試算を行った。ただし、境界条件はゴム底面を固定、天端には重錘衝突による強制変位を与えることとし、ゴムの圧縮応力～ひずみ関係は、図-11 に示すように 3 種類の異なる厚み (50, 75, 100 mm) の緩衝材に対して数値解析で得た圧縮荷重～変位関係を無次元化したものを用いた。

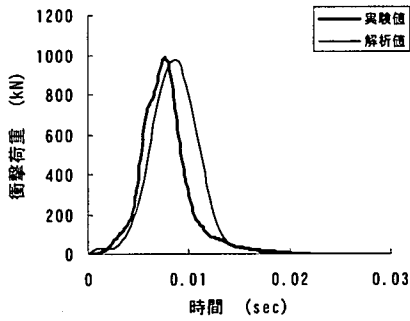
図-12 は、2 種類の厚さのゴム内部の圧縮応力分布を示したものである。この図より、厚さ 50mm のケースではゴム緩衝材内の応力分布はほぼ一様な状態で増減するとみ



(a) 1.0kN·m のケース

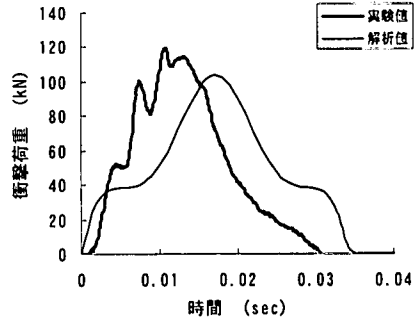


(b) 5.0kN·m のケース

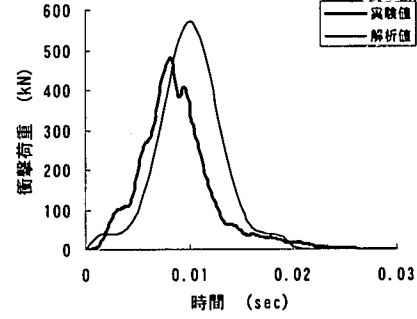


(c) 10.0kN·m のケース

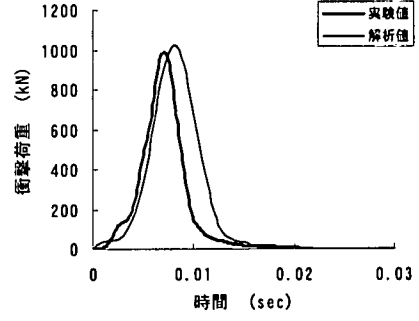
図-15 衝撃荷重～時間関係のシミュレーション  
(硬度 50 度, 供試体 A)



(a) 1.0kN·m のケース



(b) 5.0kN·m のケース



(c) 10.0kN·m のケース

図-16 衝撃荷重～時間関係のシミュレーション  
(硬度 60 度, 供試体 A)

なせることがわかる。一方、厚さ 500mm のケースでは、ゴムの応答ひずみが小さくなるのにもなって圧縮応力波の伝播速度が遅くなり、緩衝材中を往復するための所要時間が約 20msec と伝達衝撃力自体の周期と同レベルに達する結果、不均一な応力分布を示すことがわかる。ここでは、簡易な一次元応力場での考察を行ったが、1 質点系バネモデルの適用範囲は、ここに示したようなゴム厚と圧縮波の伝播速度（応答ひずみレベルにより変化するため、一概には結論づけられない）の両者の関連によって評価できるものと考えられる。

図-13 は、硬度 60 の 3 種類の厚さ（50, 100, 200mm）のゴム緩衝材に、3.0kN·m の運動エネルギーで重錘が衝突した場合を想定した解析を行い、最大衝撃力発生

時の圧縮応力分布を示したものである。この図より、今回の研究で検討対象とした硬度 60 のゴムの場合、厚さ 200mm 程度までは 1 質点系バネモデルで性能評価を行えることがわかる。

以上の考察を基に、ここではゴムの緩衝効果の評価に図-14 に示す 1 質点系バネモデルを用いることにした。ただし、厚さ 50mm の供試体 A の緩衝材を対象に、2 種類のゴムの非線形バネ係数として、それぞれ以下の変形量  $\delta$  の 2 次関数式で与えることにした。

$$\text{硬度 50: } k(\delta) = 0.0621 \delta^2 - 1.388 \delta + 7.601 \quad (6a)$$

$$\text{硬度 60: } k(\delta) = 0.0813 \delta^2 - 1.814 \delta + 10.19 \quad (6b)$$

ただし、 $\delta$  は変形量(mm)である。

なお、本研究で行った衝撃実験の場合、ゴム質量 1kg



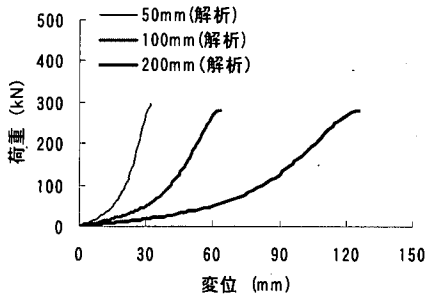


図-17 解析で求めた圧縮変形特性に対するゴム厚の影響

に対して重錘 400kg と約 400 倍になることから、十分に上記の条件②を満たしているものと考えられる。

図-15 および図-16 は、それぞれ 2. (4) の衝撃実験のシミュレーションとして、重錘の衝突エネルギーが 1.0, 5.0, 10.0 kN・m の 3 通りの実験で得られた衝撃力～時間関係をバネ-質点系解析で求めたものである。これらの図より、解析で得られた衝撃力は、バネ係数を 2 次式でモデル化したために釣鐘状の波形となり、1.0 kN・m のケースでは起ち上がり時のカーブに現実の波形と大きな相違が見られるが、最大衝撃力は全般的に精度良く評価していることがわかる。また、重錘条件が大きくなり、荷重継続時間が短くなるにつれて、起ち上がりのカーブの相違も小さなものとなり、全般的にうまく実験結果をシミュレートしていることがわかる。したがって、予めゴム緩衝材の静的圧縮荷重～変位関係を数値解析により精度良く求めておけば、供試体 A の衝撃緩衝効果を簡易な質点系モデルによる計算で把握できることを確認した。

**b) ゴム厚が衝撃緩衝効果に与える影響**

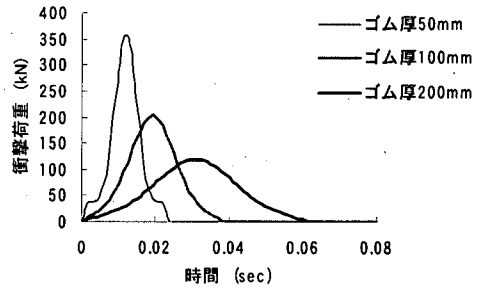
次に、供試体 A のゴム厚を 50, 100, 200mm の 3 通りに変えたときの解析を行い、ゴム厚が緩衝効果に与える影響について検討した。

図-17 は、3 種類のゴム厚の緩衝材の圧縮変形特性を有限要素解析により求めたものである。この図より、ゴム厚が増すにつれて同一変形量に対する圧縮荷重が小さくなり、衝撃緩衝効果が高まることが期待される。

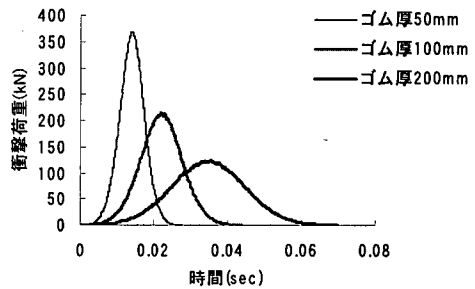
図-18 は、3 種類のゴム厚の緩衝材に 3.0 kN・m の運動エネルギーを有する重錘を衝突させたときの伝達衝撃力を、1 質点系バネモデル解析と一次元波動伝播解析の 2 通りの方法で推定したものである。この図より、両者の結果は良く一致しており、ゴム厚を 4 倍にすることで発生衝撃力を約 1/3 程度まで低減できることが認められる。

**c) 衝撃緩衝効果の簡易評価法**

これまでの考察により、以下の手順で桁間衝突に対して通常用いられる衝撃緩衝用ゴムの性能を評価することが可能であると思われる。



(a) 1 質点系バネモデルによる伝達衝撃力～時間関係



(b) 一次元波動伝播解析による伝達衝撃力～時間関係

図-18 1 質点系バネモデル解析および一次元波動伝播解析による伝達衝撃力波形の比較

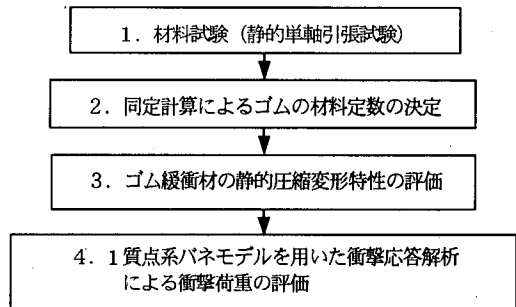


図-19 ゴム緩衝材の衝撃緩衝効果の評価方法

- ① ゴムの材料試験により超弾性体モデルに用いる材料定数を決定する。
- ② 対象とするゴム緩衝材をモデル化した大変形有限要素解析により、使用ひずみ域での静的圧縮荷重～変位関係を求める。
- ③ ②で求めた荷重～変位関係から、ゴムの非線形バネ係数を求める。
- ④ 簡易な 1 質点系バネモデルによる衝撃応答解析により衝撃荷重の推定を行う。

以上のフローをまとめると、図-19 のようになる。本法により、今回の供試体 A のような平らな薄板状のゴム緩衝材の衝撃緩衝効果については、ゴムの材料試験のみを行えば数値計算により評価できるものと考えられる。

今後、本法の適用可能な条件の定量的な把握をしよう  
えてゴム緩衝材の設計方法の検討を行う必要がある。

#### 4. 結論

本研究は、落橋防止システム等に用いられるゴム製緩衝材の簡易性能評価法について検討したもので、得られた成果を要約すると、以下のようになる。

- (1) 重錘落下実験により、ゴム製緩衝材の硬度の相違による緩衝効果の違いは殆ど見受けられなかった。
- (2) ゴム緩衝材の静的圧縮変形特性は、単軸引張試験より求めた材料定数を超弾性体の構成式に適用し、3次元有限要素法による大変形解析を行えば精度良く評価できることが認められた。
- (3) ゴム緩衝材の静的圧縮試験のシミュレーションで求めた換算バネ係数を用いて、簡易な1質点系モデルによる衝撃応答解析を行うことにより、ゴム緩衝材の衝撃緩衝効果を把握できることが認められた。
- (4) 今回の簡易な1質点系モデルの適用範囲としては、通常の桁間衝突用に用いられる硬度50~60、厚さ50~200mmのゴム緩衝材であり、低速度で衝突物が作用する場合に十分適用可能である。

なお、本手法をV字型防舷材等の形状の異なるゴム製緩衝材に適用する場合には、改めて検証を行う必要があることを付記する。

#### 参考文献

- 1) 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突実験および地震時応答解析, 日本道路公団試験研究所報告, Vol.34, pp.98-104, 1997.11.
- 2) 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, 1999.01.

- 3) 伊津野和行, 児島孝之, 鈴木亮介, 和田教志, 濱田誠, 吉野伸: ゴム材圧縮変形を利用した地震時反力分散装置の開発, 土木学会論文集, No.563/I-39, pp.71-78, 1997.4.
- 4) 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), pp.III-41, 1995.6.
- 5) 庄司学, 川島一彦, 宇根寛, 剣持安伸, 長谷川恵一, 島ノ江哲: 高ひずみ/高面圧下におけるゴム製緩衝装置の応力度-ひずみ関係, 構造工学論文集 Vol.46A, pp.917-928, 2000.3.
- 6) 潤田久也, 川島一彦, 庄司学, 須藤千秋: 高面圧を受ける直方体ゴム製緩衝装置の圧縮特性の推定法に関する研究, 土木学会論文集, No.661/I-53, pp.71-83, 2000.10.
- 7) 西本安志, 梶田幸秀, 石川信隆, 西川信二郎: 落橋防止システム用緩衝材としての積層繊維補強ゴムの動的特性に関する基礎的考察, 第5回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集, pp.107-112, 2000.6.
- 8) 久田俊明, 野口裕久: 非線形有限要素法の基礎と応用, 丸善, 1995.
- 9) R.W.Ogden: Non-Linear Elastic Deformation, Dover, 1997
- 10) 河村幸伸, 裏山健治, 糴谷信三, 深堀美英: エラストマーのひずみエネルギー密度関数の解析, 日本ゴム協会誌 Vol.73, pp.6-13, 2000.1.
- 11) 日本機械学会: 計算力学ハンドブック(1)有限要素法 構造編, 1998.
- 12) J.T.Oden: The finite elements of nonlinear continua, McGrawHill, 1972.
- 13) 園田佳巨, 松菜美晴, 彦坂照: 緩衝材を介して伝達する衝撃荷重の簡易推定法に関する研究, 構造工学論文集 Vol.46A, pp.1885-1892, 2000.3.

(2000.12.22 受付)

## FUNDAMENTAL STUDY ON THE MITIGATING EFFECT OF RUBBER AS A SHOCK ABSORBER

Yoshimi SONODA, Yasushi NISHIMOTO, Nobutaka ISHIKAWA and Hiroshi HIKOSAKA

This study presents a fundamental investigation on the mitigation effect of rubber as a shock absorber of bridge restrainer system. First, the weight-dropping impact test was performed for the two types of rubber. Second, the static compression test was carried out to determine the static load ~ displacement curve. Third, the three-dimensional (3D) large deformation FEM analysis of rubber was developed to obtain the static load ~ displacement curve. Forth, the impact response analysis was executed by the single-degree of freedom (SDOF) using the static load ~ displacement curve obtained by 3D analysis as a spring. It was confirmed that the proposed SDOF could simulate well the results obtained by the weight-dropping impact test.