

## ゴム製緩衝材の衝撃応答特性に関する解析的研究

九州大学大学院 学生会員 伊藤 俊介，九州大学大学院 正会員 園田 佳巨  
シバタ工業 正会員 西本 安志，MSC-SOFTWARE 正会員 下園 征史

### 1. 目的

現在、防舷材の設計法について性能設計の概念を導入する見直しがなされている。その大きな変更点として、従来の設計では防舷材の静的吸収エネルギー量を基準としていたのに対し、新設計ではゴム材の速度依存性を考慮しなければならないと規定されていることが挙げられる。そこで、本研究ではゴム製緩衝材である防舷材に対して載荷速度をパラメータとした試験の数値シミュレーションを行い、速度依存性を考慮した防舷材の設計手法の確立を目的とした基礎的な考察を行った。

### 2. 解析概要

#### 2.1 解析手法

本研究では、汎用FEM解析ソフトを用いて三次元非線形有限要素解析を行った。まず、静的載荷実験のシミュレーションにより解析手法（構成式）と解析モデルの妥当性を検討した。次に、定速度載荷実験のシミュレーションを行うことで、速度依存性の影響を数値解析によって把握可能かどうか確認した。その上で、衝撃応答解析により落錘式衝撃実験を再現できるかを検討した。

#### 2.2 ゴムの構成方程式

一般的に防舷材に用いるゴムは、超弾性体として扱われており、単位体積当りのひずみエネルギー密度関数  $W$  を用いて構成式は(1)のように定義される。

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

$S_{ij}$  : 第2種 Piola-Kirchhoff 応力

$E_{ij}$  : Green-Lagrange ひずみテンソル

本解析では、ひずみエネルギー密度関数として、式(2)に示すような5パラメータを有するMooney-Rivlin関数を選定した。

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + C_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{30}(I_1 - 3)^3 \quad \dots (2)$$

$C_{10}, C_{01}, C_{11}, C_{20}, C_{30}$  : 材料実験により得ら

キーワード：ゴム製緩衝材，ひずみエネルギー密度関数，衝撃応答特性

連絡先：〒812-8581 福岡県福岡市東区箱崎 6-10-1 Tel：092-642-3262

れる Mooney-Rivlin 定数 (MPa)

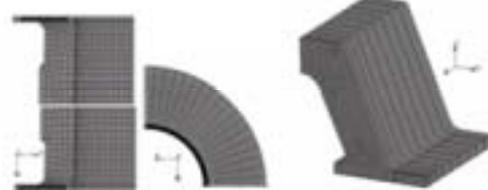
$I_1, I_2, I_3$  : 右 Cauchy-Green 変形テンソルの1次，2次，3次不変量

#### 2.3 解析対象および解析モデル

本解析における解析対象を写真-1に示した。いずれの解析対象も材料に硬度65のゴムを使用しており、サークル型は上下面に、V型は下面のみに鉄板が埋設されている。解析モデルは、図-1に示すような3次元ソリッド要素を用いた1/4モデルとした。鋼板の材料定数はヤング率  $2.1 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ ，密度  $7.85 \times 10^{-4} \text{ N/mm}^3$ ，ポアソン比0.3とした。ゴムの材料定数は図-2に示すような一軸引張実験・一軸圧縮実験結果の応力-伸び率関係をもとにカーブフィッティングを行い、ひずみ速度ごとに異なる材料定数を決定した。表-1にひずみ速度ごとの材料定数 ( $C_{10}, C_{01}, C_{11}, C_{20}, C_{30}$ ) を示した。



<a> サークル型 <b> V型  
写真-1 解析対象の防舷材



<a> サークル型 <b> V型  
図-1 解析モデル

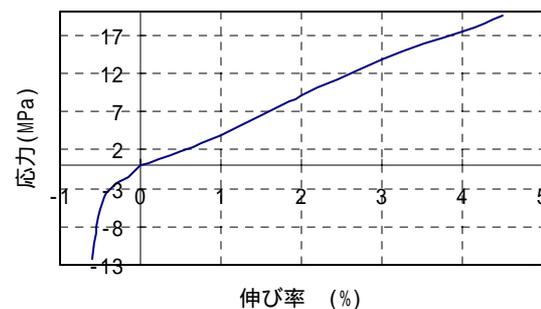


図-2 応力-伸び率関係

表-1 ゴムの材料定数

ひずみ速度	0/sec	0.63/sec	0.83/sec
C <sub>10</sub>	0.865664	0.923314	1.0879
C <sub>01</sub>	-0.138833	-0.120068	-0.214993
C <sub>11</sub>	0.0244376	0.00332217	0.0289624
C <sub>20</sub>	-0.0589607	0.0461041	0.029224
C <sub>30</sub>	0.00712976	-0.00078555	-0.00056598

3. 解析結果および考察

3.1 静的載荷実験のシミュレーション

図-3にサークル型の静的載荷実験結果と静的解析結果の荷重-変位関係の比較を示した。2つのパラメータを有するMooney-Rivlin関数を用いた解析では、変位30mmまでしか実験を再現できなかった。しかし、5つのパラメータを有するMooney-Rivlin関数を用いることで実験結果を良好に再現できることが分かった。よって、5つのパラメータを用いたMooney-Rivlin関数の有用性が確認できた。

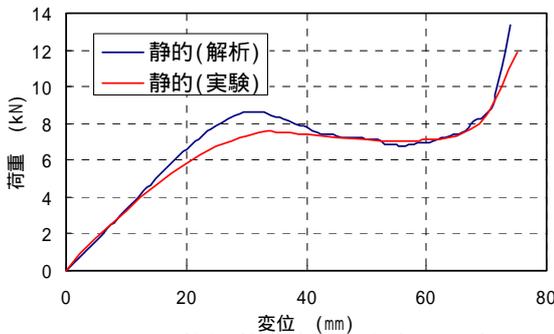


図-3 静的載荷実験と解析の比較

3.2 定速度載荷実験のシミュレーション

図-3に定速度載荷実験の結果と、ひずみ速度0.83/sec時の材料定数を用いた解析結果を加えたものを図-4に示した。この結果から、解析においてひずみ速度の影響を考慮することで、実験結果が示す耐力の上昇を解析でも再現できることが分かった。

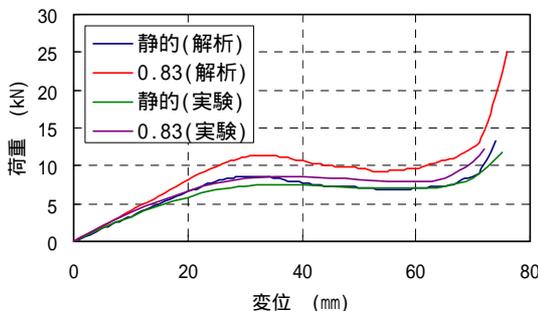
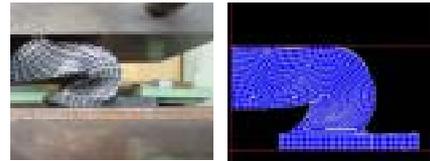


図-4 静的・定速度載荷実験と解析の比較

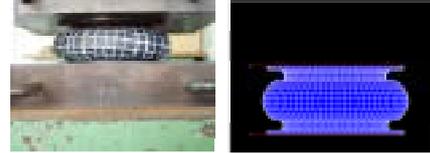
3.3 防舷材の変形状況

図-5に、サークル型、V型防舷材の実験および解析によって得られた変形状況（40%圧縮時）を示した。両者の比較により、本解析モデルが現実の防舷材の変形状

況を良好に再現できていることが認められた。



V型防舷材 - 実験と解析の変形状況の比較



サークル型防舷材 - 実験と解析の変形状況の比較

図-5 変形状況

3.4 落錘式衝撃実験のシミュレーション

図-6はサークル型防舷材に対して行った落錘式衝撃実験のシミュレーションで得られた衝突位置の荷重-変位関係を実験結果と比較したものである。解析では、図-1に示した解析モデルの上面に重錘モデルを衝突させることで、落錘式衝撃実験を再現した。解析結果は、重錘側の加速度に質量を乗じて求めていることから、高次振動が含まれるが、実験結果とほぼ同じ挙動が求められることがわかった。よって、実験結果と解析結果の比較により、ゴム製緩衝材の衝撃応答特性を数値解析で評価可能であることが確認できた。

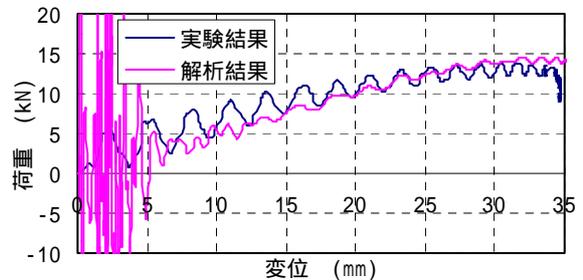


図-6 落錘式衝撃実験と解析の比較

4. 結論

静的載荷実験・定速度載荷実験・落錘式衝撃実験の3種類の実験に対するシミュレーションより、本研究で採用した5つのパラメータを有するMooney-Rivlin関数と解析手法を用いることで、防舷材の静的載荷実験・定速度載荷実験を再現でき、ゴム製緩衝材の衝撃応答特性を評価可能であることが確認できた。

現段階ではゴムの速度依存性を考慮した数値解析を行うことはできてはいないが、今後、ゴムの速度依存性を考慮したひずみエネルギー密度関数を用いて数値解析を行う予定である。