

防舷材の速度依存性に関する研究

九州大学 学生会員 伊藤俊介 九州大学大学院 正会員 園田佳巨
九州大学大学院 正会員 森谷晋 MSC・SOFTWARE株式会社 下藺征史

1. 緒言

現在、防舷材の設計法に性能設計の概念を導入した見直しがなされている。その大きなポイントとして、従来の設計が防舷材の静的吸収エネルギー量をベースに行っていたのに対し、新設計ではゴム材の速度依存性を考慮する必要があることを規定していることが挙げられる。そこで、本研究では防舷材に対して载荷速度をパラメータとした耐荷性能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の確立を目的とした基礎的な考察を行った。

2. 解析手法の概要

本研究では、汎用FEMソフトMARC2005を用いた三次元非線形有限要素解析を行った。具体的には、最初に静的载荷試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、定载荷速度による試験の数値解析を行うことで、速度依存性の影響を把握可能かどうか確認した。



<a>サークル型 V 型

写真-1 解析対象の防舷材

2.1 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、単位体積当りのひずみエネルギー密度関数 W を用いて構成式は以下のように定義される。

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

ここに、 S_{ij} ：第2種 Piola-Kirchhoff 応力、 W ：ひずみエネルギー密度関数、 E_{ij} ：Green-Lagrange ひずみテンソル

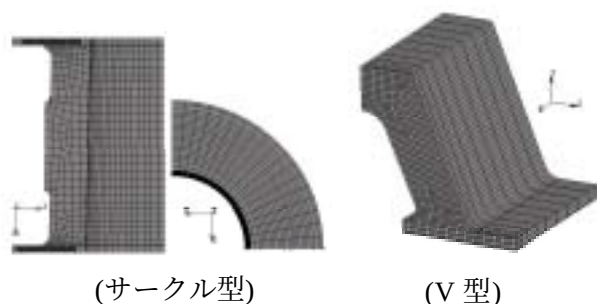
本研究では、解析に使用するひずみエネルギー密度関数として、式(2)に示すような5パラメータを有する Mooney-Rivlin 式を選定した。

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

ここに、 $C_{01}, C_{10}, C_{11}, C_{20}, C_{30}$ ：材料試験により得られる 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

2.2 供試体および解析モデル

写真-1に本解析が対象とした供試体を示す。両方使用材料は硬度65のゴムで、上下面には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。



(サークル型) (V 型)
左-正面図 右-上面図

図-1 解析モデル

表-1 ゴムの材料定数

		ひずみ速度			
		0/sec	0.42/sec	0.63/sec	0.83/sec
Mooney定数	C_{10}	0.695599	0.942102	0.923314	1.087900
	C_{01}	-0.037304	-0.188519	-0.120068	-0.214993
	C_{11}	-0.022708	0.011125	0.003322	0.028962
	C_{20}	0.038684	0.040159	0.046104	0.029224
	C_{30}	-0.000478	-0.000679	-0.000786	-0.000566

鋼板には速度依存性は考慮せず（ヤング率 21000N/mm^2 ，ポアソン比 0.3，密度 0.000785N/mm^3 ）、ゴム材料には、表-1 に示すような圧縮・引張実験結果に対して最小二乗法でカーブフィッティングさせ求め、ひずみ速度で異なる材料定数を用いた。

2.3 解析条件

供試体上・下面は鋼板が埋設されていることから境界条件として、上面を圧縮・下面を固定することで解析を行った。

3. 解析結果および考察

3.1 静的載荷試験のシミュレーション

図-2,3に静的実験結果と解析による荷重－変位関係の比較を示した。解析値は、両方40%圧縮時まで実験値を良好に再現しており、本研究で用いた構成式と解析モデルの妥当性が確認できた。

3.2 静的載荷試験の変形状況

図-5は、サークル型、V型防舷材の実験および解析で得られた変形状況（圧縮前、40%圧縮時）を示している。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再現できていることがわかる。

3.3 数値解析による定速載荷試験

図-4はサークル型において、ひずみ速度を変化させたときの防舷材の荷重－変位に関する解析結果を示したものである。これより、ひずみ速度の増加とともに防舷材の剛性も大きくなり、最大耐力も静的載荷時と比較して最大で約1.4倍に達していることが認められる。この結果から、実験で得られたようなゴムの速度依存性が表現できることを確認できた。

4. 結論

静的載荷試験に対するシミュレーションより、本研究で採用した5パラメータひずみエネルギー密度関数（Mooney-Rivlin 式）と解析モデルの妥当性を確認できた。また、数値解析によって、速度依存性を解析的に評価可能であることが確認できた。実現象では、防舷材に船舶が衝突した瞬間から、次第にひずみ速度の影響は減少していくことが考えられることから、今後、実衝突現象を踏まえた衝撃応答解析を行う必要があると考えられる。

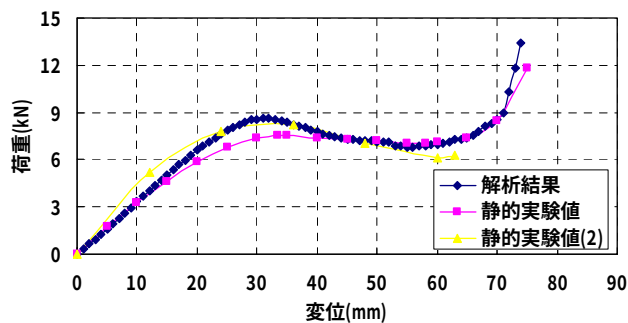


図-2 静的載荷実験と解析（サークル型）

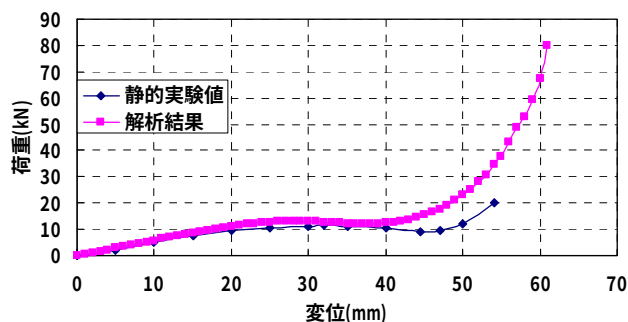


図-3 静的載荷実験と解析（V型）

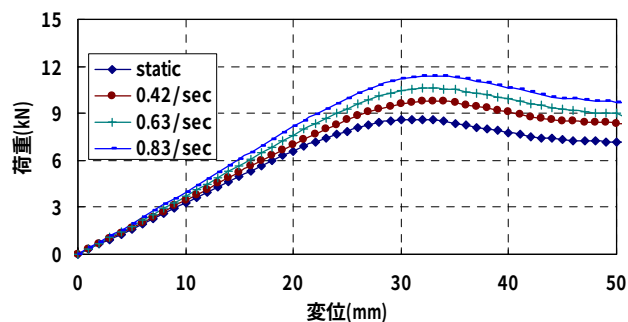
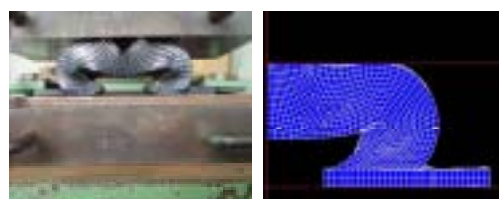
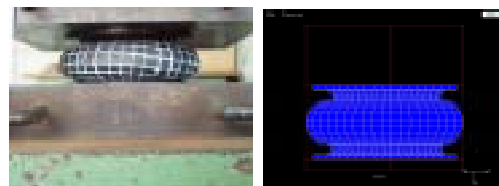


図-4 ひずみ速度による剛性変化



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