

防舷材の速度依存性・温度依存性に関する研究

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
 エムエスシーソフトウェア株式会社 正会員 下藺征史 シバタ工業株式会社 正会員 西本安志

1. 緒言

防舷材は、船舶が岸壁に接岸する際に生じる衝撃を緩和するために用いられる。一般に防舷材には、大きな変形能力を有し、復元力特性に優れたゴム材料が用いられており、用途に応じた様々なタイプの製品が設計開発されている。しかしながらゴムは、力学的材料特性として環境温度および速度依存性を有することが知られており、温度の影響を無視した静的荷重下の力学特性だけで実現象を正しく評価することは困難である。今後、港湾構造物に関して性能設計への移行が検討されていることを考えると、衝撃緩衝材としての防舷材ゴムの温度効果と速度効果を考慮した力学特性を把握することは非常に重要であるといえる。

そこで本研究では、ゴムの温度効果と速度効果を考慮した新たな構成則を提案し、防舷材の一定速度載荷試験（CV 方式）に対応する数値シミュレーションを行い、防舷材の力学的特性を数値計算により速度依存性・温度依存性を考慮した。さらに、通常的设计条件下における基準性能からの変動を換算倍率として定義し、温度・速度を変数とした関数として表現し、設計に速度依存性・温度依存性を取り入れる簡易な照査法の検討を試みた。

2. 解析手法

本研究では、汎用 FEM 解析ソフトを用いて非線形有限要素解析を行った。V 型防舷材・サークル型防舷材の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・温度依存性の影響を数値解析によって把握し、それぞれの温度・速度での性能と防舷材の基準性能（環境温度 23℃、圧縮速度 0.83mm/sec）との比較を行った。

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ており、単位体積当りのひずみエネルギー密度関数を用いて構成式は式(1)のように定義される。

$$\sigma_i = \frac{\partial W}{\partial \lambda_i} \cdot \dots \quad (1)$$

W : ひずみエネルギー密度関数, λ_i : 主伸張比

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 3 パラメータを有する Mooney-Rivlin 関数 (Signiorini 形式) を選定した。

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

C_{10} , C_{01} , C_{20} : Mooney-Rivlin 定数 (MPa)

I_1 , I_2 : 主伸張比の 1 次, 2 次不変量

本研究では C_{10} , C_{01} , C_{20} をひずみ速度・環境温度を変数とした関数式とし簡易な取扱いを試みた。

まず、(環境温度 (-20℃～40℃)・ひずみ速度 (0.01/sec～0.83/sec) の 48 通りの状況で行った) 一軸引張実験と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、個々の条件における材料定数を決定した。次に、その定数をひずみ速度を変数として対数近似を行った。その近似式をもとに速度・環境温度を考慮した Mooney-Rivlin 関数 (Signiorini 形式) を導いた。

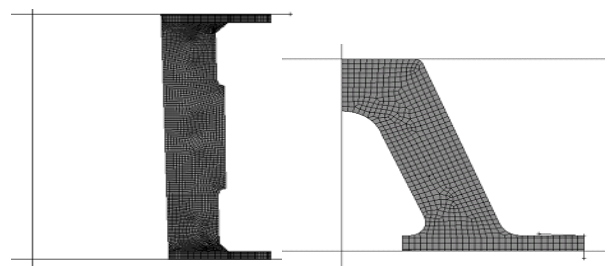
2.2 解析対象および解析モデル

本解析における解析対象を写真-1に示す。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



<a> サークル型 V 型

写真-1 解析対象の防舷材



<a> サークル型 V 型

図-1 解析モデル

型（高さ 120mm）は上下面に、V 型（高さ 100mm）は下面のみに鉄板が埋設されている。解析モデルは、サークル型は図-1<a>に示すような軸対称要素を、V 型は図-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。ゴムの構成則には上記の Mooney-Rivlin 関数を適用し、防舷材の一定速度载荷試験 (CV 方式) に対応する数値シミュレーションを行った。

3. 解析結果および考察

3.1 解析結果（サークル型）

図-2、図-3 に -20°C と 40°C における各圧縮速度 (mm/sec) でのサークル型の解析結果の荷重-変位関係の比較を示す。これらの結果から速度依存性・温度依存性を考慮した構成則を用いることで、環境温度・圧縮速度によって変化する防舷材の性能を再現できることが確認できた。図-4 に -20°C （圧縮速度 0.83mm/sec, 10mm/sec）における実験と解析の比較を示す。この結果から荷重-変位関係において解析が実験を良好に再現していることが確認できた。ここではサークル型のみを取り上げるが、V 型についても同様の結果となることが確認できた。

3.2 基準性能（ 23°C , 0.83mm/sec）との比較（サークル型）

解析結果より、各環境温度・圧縮速度について設計変形量での荷重と基準性能（ 23°C , 0.83mm/sec）との比較を行った。その結果を表-2 に示す。表-2 の数値は換算倍率（各ケースの設計変形量での荷重/基準性能の設計変形量での荷重）となっている。

この結果より、 -20°C の極寒状況では、 23°C における基準性能より最大で 3.2 倍の大きな値を示すことが確認できた。

3.3 基準性能からの換算倍率評価式（サークル型）

表-2 をもとに環境温度と速度を変数とした式(3)の設計変形量での荷重に関する評価式を導き出した。

$$Z = f(T, V) \cdots (3)$$

Z : 換算倍率, T : 環境温度, V : 圧縮速度

この式を用いることで、各環境温度・圧縮速度における防舷材の性能を簡易に表現でき、設計段階において防舷材の断面決定に有用であることが確認できた。

4. 結言

一定速度载荷試験 (CV 方式) に対応する数値シミュレーションより、本研究で採用した温度依存性と速度依存性を考慮した Mooney-Rivlin 関数 (Signiorini 形式) と解析手法を用いることでゴム製緩衝材の温度・速度による性能変化を評価可能であることが確認できた。その結果をもとに環境温度と圧縮速度をパラメータとした関数で基準性能（ 23°C , 0.83mm/sec）からの換算倍率を表す手法を用いることで、防舷材の温度依存性・速度依存性を簡易に表現できることが確認できた。

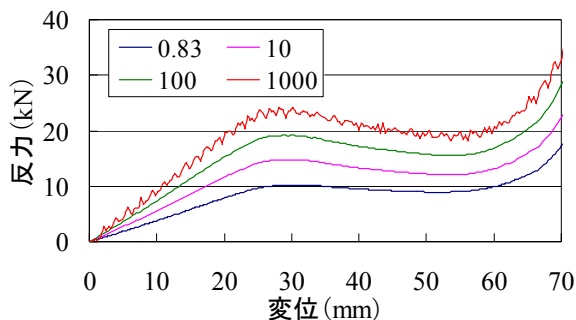


図-2 -20°C における荷重-変位関係

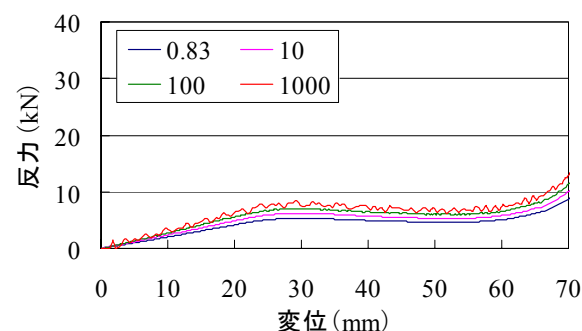


図-3 40°C における荷重-変位関係

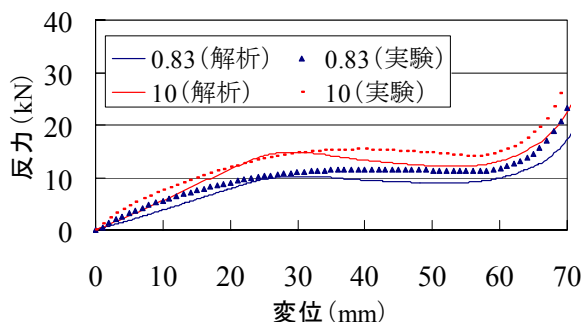


図-4 -20°C における解析と実験の比較

表-2 基準性能からの換算倍率

		速度 (mm/sec)					
		0.83	10	100	150	500	1000
温度 ($^\circ\text{C}$)	-20	1.55	2.05	2.62	2.72	3.00	3.20
	-10	1.42	1.86	2.34	2.44	2.68	2.87
	0	1.30	1.67	2.08	2.16	2.36	2.54
	10	1.17	1.48	1.82	1.88	2.07	2.19
	20	1.04	1.28	1.56	1.60	1.74	1.80
	23	1.00	1.23	1.47	1.52	1.67	1.79
	30	0.91	1.10	1.29	1.32	1.42	1.41
	40	0.79	0.90	1.03	1.05	1.13	1.10