

(37) ゴムの環境温度および速度効果を考慮した

ゴム製防舷材の設計手法に関する数値解析的アプローチ

Approach of the analysis about the design method for rubber fender
considering environmental temperature and strain rate effect

西本安志*, 下藪征史**, 園田佳巨***, 川上千歳****

Yasushi Nishimoto, Masafumi Shimozono, Yoshimi Sonoda, Chitoshi Kawakami

*博士(工学) シバタ工業株式会社, 商品企画第2グループ(〒674-0082 兵庫県明石市魚住町中尾 1058 番地)

**株式会社アドバンステクノロジー CAE 技術部(〒150-0011 東京都渋谷区東 2-22-14)

***工博 九州大学大学院教授, 工学研究院建設デザイン部門(〒812-8581 福岡県福岡市西区元岡 744 番地)

****シバタ工業株式会社, 海洋土木事業部海洋設計グループ(〒674-0082 兵庫県明石市魚住町中尾 1058 番地)

Key Words: rubber fender, strain rate effect, temperature effect

キーワード: ゴム製防舷材, 速度効果, 温度効果

1. 緒言

ゴム製防舷材は、船舶が岸壁に接舷する際に生じる衝撃力、係留中の波浪や強風による船舶の動揺による岸壁との衝突で生じる衝撃力などを緩和するために、写真-1に示すように設置されている。

従来のゴム製防舷材の設計は、常温状態(雰囲気温度23°C)における静的載荷試験(圧縮速度50mm/min)から得られる荷重-変位特性に基づいた性能評価を行ってきた¹⁾。しかしながら、供用中の防舷材を考えた場合、地域や季節により生じる雰囲気温度の影響および船舶の規模や海面状態により生じる接触速度の影響は、ゴム材料が強い温度依存性と速度依存性^{2), 3)}を示すことから、今後の防舷材の性能設計上、実現象を的確に評価するための重要因子になると考えられる。

ここで、著者らはこれまでに、防舷材の温度効果や速度効果に関して実験的なアプローチを試みた⁴⁾が、防舷材には様々な形状があり、それらについて温度と速度をパラメトリックに実験を行うことは多大な労力が必要であり、試験機の制約も大きく現実的ではない。そのため、ゴムの温度効果と速度効果を考慮した構成則を新規に導入し、ゴム製防舷材の動的応答特性に対する数値解析的アプローチを試みている^{5), 6)}。

そこで本研究では、温度および速度効果を考慮した防舷材の設計手法に関して、著者らがこれまで実施した防舷材の数値解析を導入した設計手法について一提案を行い、その適用性と有効性について考察した。

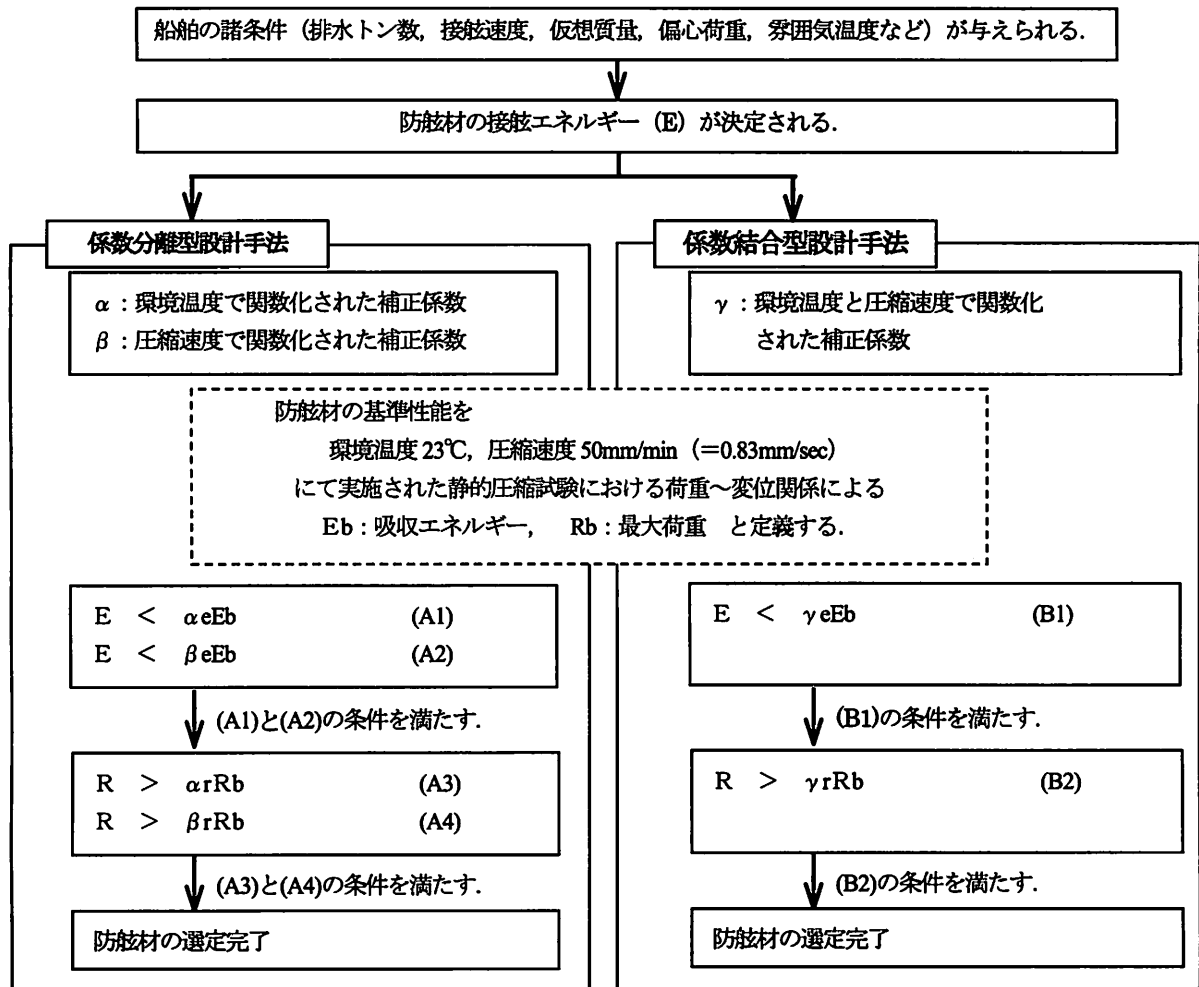


(a) 受衝板付サークル型防舷材



(b) V型防舷材

写真-1 防舷材の設置事例



ここに、
 αe : 環境温度で関数化された吸収エネルギーに対する補正係数、 βe : 圧縮速度で関数化された吸収エネルギーに対する補正係数、
 αr : 環境温度で関数化された最大荷重に対する補正係数、 βr : 圧縮速度で関数化された最大荷重に対する補正係数、
 γe : 環境温度と圧縮速度で関数化された吸収エネルギーに対する補正係数、
 γr : 環境温度と圧縮速度で関数化された最大荷重に対する補正係数、
 ただし、全ての補正係数は、基準性能において1.0となる。

図-1 温度効果や速度効果を考慮した防舷材の設計フロー

2. 防舷材の現行設計手法と課題

防舷材は、船舶が岸壁に接岸する際の船舶の接岸エネルギーを吸収し、その際に生じる衝撃力を緩和する目的で設置されるため、船舶の接岸エネルギーを吸収し、ある一定の反力以下になるように設計される。

防舷材の吸収エネルギーに関しては、室温下 (23°C) において、圧縮速度が 50mm/min (8.3×10^{-4} m/sec) で静的載荷された際の荷重～変位関係から求められる値が用いられている。しかしながら、実際に供用される環境を考慮すると、日本国内でも四季の影響で気温変化が著しい上、国内や海外においては防舷材が取り付けられる地域差による温度の影響を大きく受ける。ゴムは、低温側では剛性が向上し、高温側では剛性が低下するという温度依存性を有する。

また、実際の接岸速度は 0.1～0.5m/sec であることから、

防舷材の性能を評価する 50mm/min (8.3×10^{-4} m/sec) という圧縮速度では、ゴムが速度依存性を有することを考慮すると、必ずしも実現象を確実に反映したものとは言い難いと考えられる。

よって、これらのことを考慮して、これまで用いてきた防舷材の静的な性能にその環境温度や速度に応じた値となるような補正係数を乗じて、防舷材の吸収エネルギーを評価することが検討されている。

3. 数値解析を導入した設計手法の一提案

3.1 提案する防舷材の設計フロー

本研究では、温度効果と速度効果を考慮した新たな防舷材の設計フローの確立に、著者らが過去に実施した数値解析^{5), 6)}を導入することとした。

温度効果や速度効果を考慮した防舷材の設計フロー

を図-1 に示す。図-1 に示すように、検討する設計手法は、これまで用いてきた静的な性能に補正係数を適用したものである。この設計手法には、適用する補正係数に応じて、環境温度と圧縮速度に対して個別に補正係数を定義した「係数分離型設計手法」および環境温度と圧縮速度とを同時に考慮した補正係数を用いた「係数結合型設計手法」の2種類がある。いずれの手法についても現在様々な議論がなされている。

係数分離型設計手法は、環境温度と圧縮速度の効果をそれぞれ個別の補正係数として取り扱うため、環境温度や接触速度に大きな変化がないような場合、いずれか一方の最小値から最大値まで変化させることで、その作用する値のレンジを推定できるというメリットがある。しかし、防舷材の様々な使用状況を考えると、温度と速度の両者が複合して補正係数に対し影響し合うため、温度および速度のどちらか一方を固定した任意断面でしか傾向を捉えることができないという課題もある。

一方、変数結合型設計手法は、環境温度と圧縮速度の効果を同時に考慮できる補正係数を用いているため、任意の雰囲気温度や圧縮速度に対してそれらを相互に関連付けて評価できるため、より実現象に近いあたりの評価が可能となり、汎用性が高いと考えられる。

ここで、この補正係数を求めるためには、実験的手法と解析的手法による2通りのアプローチが考えられるが、温度と速度の両者を変化させ、任意に圧縮させる実験は多大な労力が必要であり、数多くの防舷材の形状やサイズを考えると、試験機などの制約から現実的に不可能であると言わざるを得ず、数値解析による温度や速度を考慮した防舷材の性能評価手法が必要不可欠であるといえる。

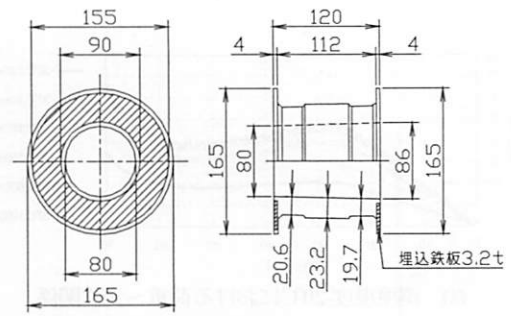
そこで、温度効果や速度効果の補正係数を求める手法として、著者らの提案した環境温度とひずみ速度効果を考慮したゴムの数値解析^{5), 6)}を導入した。すなわち、温度と速度をパラメトリックに変化させた防舷材の数値シミュレーションにより、任意の温度と速度に対する防舷材の性能を定性的かつ定量的に評価することで、静的性能からの補正係数を求めた。

なお、ゴム製防舷材に対する2つの設計手法について説明したが、ここでは、防舷材の設計フローとして係数結合型設計手法に着目し、数値シミュレーションによって補正係数を導出し、その適用性を考察した。

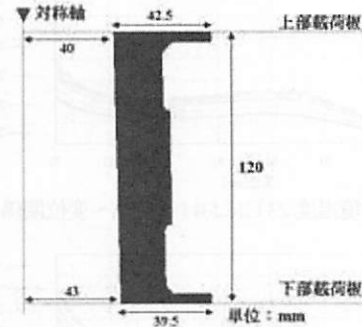
4. 防舷材の数値解析と設計手法の導入

4.1 防舷材の数値シミュレーション

温度効果および速度効果を考慮したゴムの構成則および数値シミュレーションの詳細については、著者らが過去に実施した文献^{5), 6)}を参考にされたい。ここでは、その数値解析を適用した防舷材のシミュレーション結果について示す。

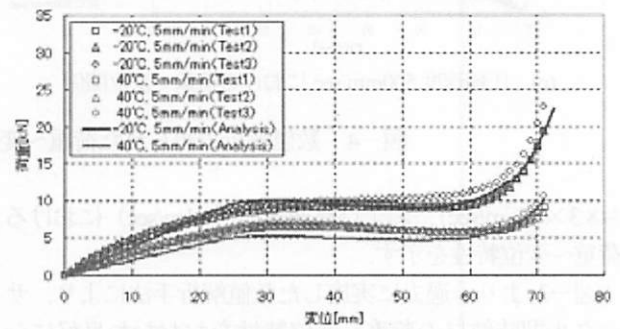


(a) 形状図

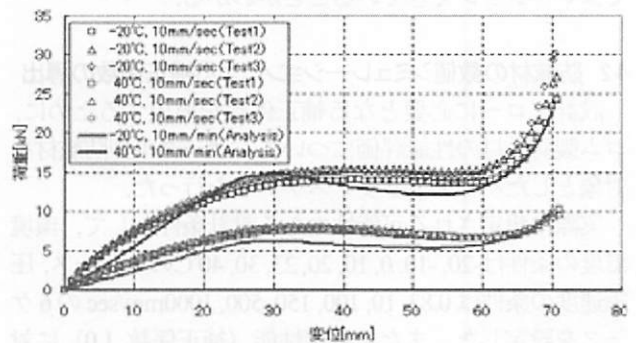


(b) 解析モデルの要素分割

図-2 対象としたサークル型防舷材のミニチュア



(a) 静的載荷 (圧縮速度 5mm/min ≒ 0.083mm/sec)

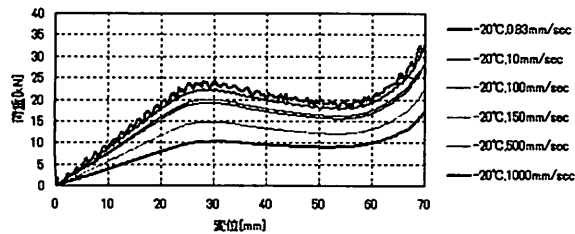


(b) 高速載荷 (圧縮速度 10mm/sec)

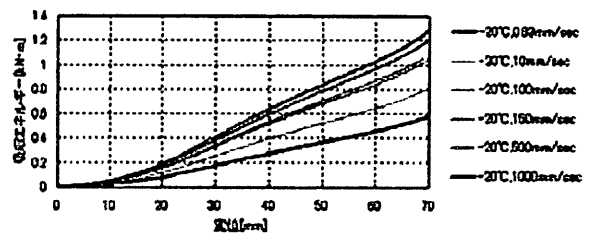
図-3 ミニチュアサークル型防舷材のシミュレーション結果

本シミュレーションの対象となるミニチュアレベルのサークル型防舷材の形状を図-2(a)に、その解析モデルの要素分割状況を図-2(b)に示している。なお、総節点数 1954、総要素数 1801、接触条件として載荷板とゴム間に摩擦係数 $\mu=0.1$ を設定した。

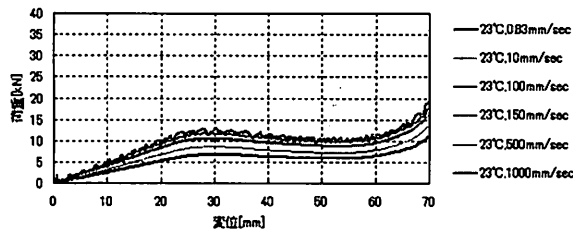
数値解析の比較対照となる実験および数値解析ともに、上部載荷板の受ける反力を荷重、移動量を変位とし、それらの比較を行った。図-3に、静的載荷 (5mm/min



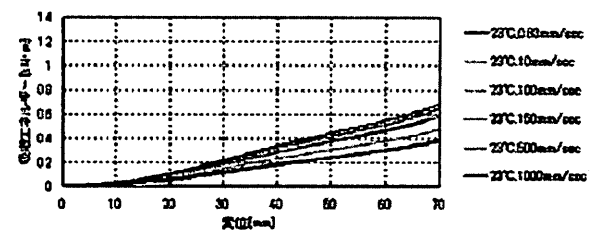
(a) 環境温度-20°Cにおける荷重～変位関係



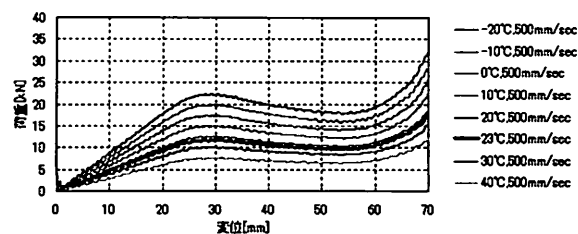
(b) 環境温度-20°Cにおける吸収エネルギー～変位関係



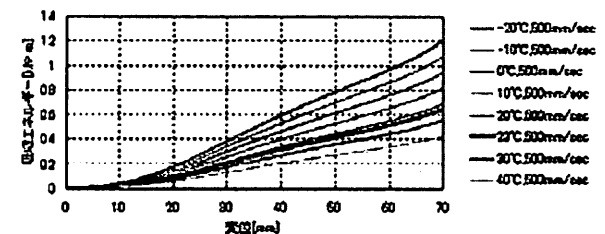
(c) 環境温度 23°Cにおける荷重～変位関係



(d) 環境温度 23°Cにおける吸収エネルギー～変位関係



(e) 圧縮速度 500mm/secにおける荷重～変位関係



(f) 圧縮速度 500mm/secにおける吸収エネルギー～変位関係

図-4 数値解析で得られた荷重～変位関係と吸収エネルギー～変位関係の一例

$\approx 8.3 \times 10^5 \text{ m/sec}$), および高速載荷 (0.1m/sec) における荷重～変位特性を示す。

図-3 より, 過去に実施した数値解析手法により, サークル型防舷材の荷重～変位特性をおおむね良好にシミュレーションできていることがわかる。

4.2 防舷材の数値シミュレーションによる補正係数の導出

設計フローに必要となる補正係数を導出するために, ゴム製防舷材の性能評価について, サークル型防舷材を対象としたパラメトリックスタディを行った。

実際に想定される可能性のある設計条件として, 環境温度の条件は-20, -10, 0, 10, 20, 23, 30, 40°Cの8ケース, 圧縮速度の条件は0.83, 10, 100, 150, 500, 1000mm/secの6ケースを設定した。また, 基準性能(補正係数 1.0)に対する条件を雰囲気温度 23°C, 圧縮速度 50mm/min ($=0.83\text{mm/sec}$) として定めた。

防舷材の吸収エネルギー量や最大反力を求める際には, 設計変形量に関する議論が必要であり, 防舷材のタイプ別に規定された圧縮率を用いる⁷⁾などがあるが, 様々な形状とサイズの防舷材に対する数値シミュレーションを用いた設計を行う場合, より統一性および汎用性の高い手法の確立が必要になると思われる。そこでここでは設計変形量を, 最大荷重を迎えた後ハードニング状態となり再び最大荷重と等しくなる変位として定義し, 通常の防舷材で用いられる設計変形量と概ね等しく

表-1 導出された補正係数の一覧表

(a) 吸収エネルギーに対する補正係数

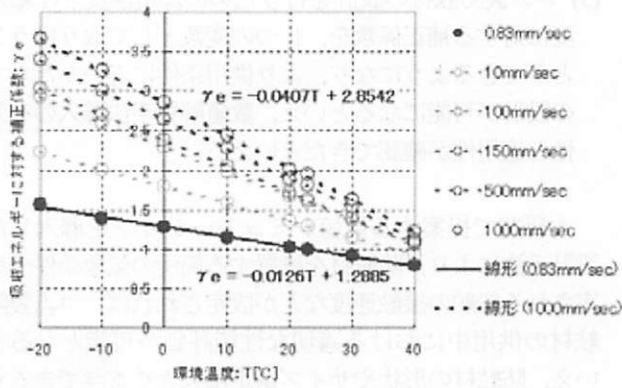
		圧縮速度 (mm/sec)					
		0.83	10	100	150	500	1000
環境 温度 °C	-20	1.58	2.24	2.93	3.03	3.39	3.67
	-10	1.39	2.01	2.60	2.71	3.01	3.26
	0	1.28	1.80	2.30	2.38	2.64	2.85
	10	1.15	1.58	1.98	2.05	2.29	2.45
	20	1.03	1.36	1.68	1.73	1.88	2.01
	23	1.00	1.30	1.59	1.63	1.81	1.95
	30	0.92	1.15	1.37	1.40	1.53	1.64
	40	0.79	0.93	1.06	1.08	1.12	1.22

(b) 最大荷重に対する補正係数

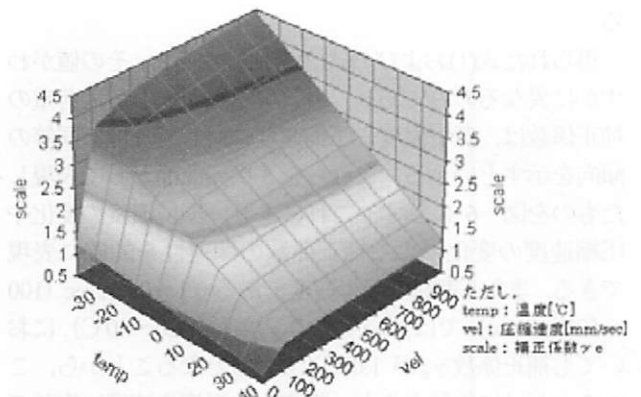
		圧縮速度 (mm/sec)					
		0.83	10	100	150	500	1000
環境 温度 °C	-20	1.64	2.20	2.85	2.95	3.29	3.58
	-10	1.40	1.98	2.54	2.64	2.94	3.17
	0	1.28	1.77	2.23	2.33	2.58	2.85
	10	1.16	1.56	1.94	2.01	2.23	2.42
	20	1.04	1.35	1.65	1.69	1.83	2.02
	23	1.00	1.28	1.56	1.60	1.77	1.96
	30	0.91	1.14	1.34	1.38	1.51	1.57
	40	0.79	0.92	1.04	1.07	1.09	1.31

なることを確認した。

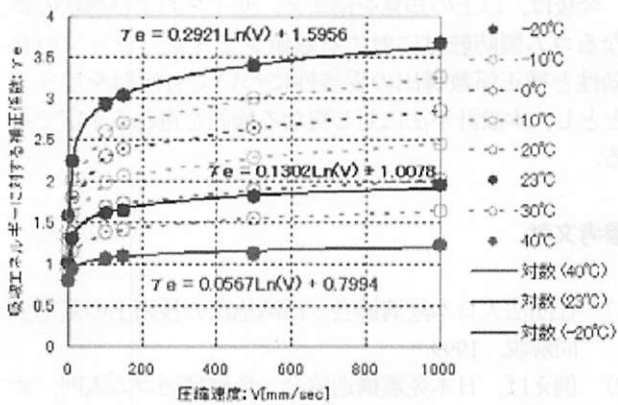
図-4 に荷重～変位関係と吸収エネルギー～変位関係の解析結果の一例を示す。環境温度が低温である程, また, 圧縮速度が高速である程, 荷重や吸収エネルギーが増加する傾向が認められた。ここで, 得られた吸収エネルギーおよび最大荷重の補正係数の一覧を表-1 に示す。



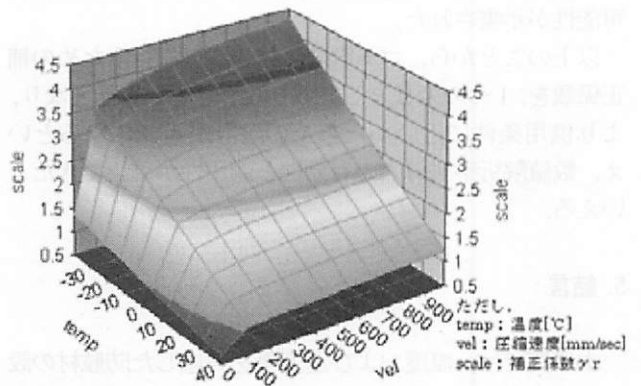
(a) 圧縮速度の違いによる補正係数 γ_e の変化傾向



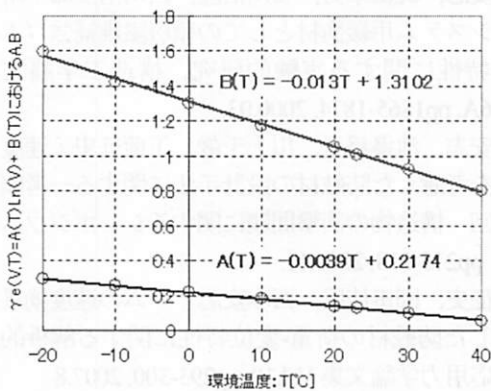
(a) 吸収エネルギーに対する補正係数 γ_e の3次元曲面



(b) 環境温度の違いによる補正係数 γ_e の変化傾向



(b) 最大荷重に対する補正係数 γ_r の3次元曲面



(c) γ_e の未定係数に対するフィッティング状況

図-6 補正係数の3次元曲面

そして、図-5(c)は、図-5(a)で示した吸収エネルギーに対する補正係数 γ_e を、環境温度 T の1次関数として関数化したときの未定係数に対するフィッティング状況を示す。式(1)で、 $A(T)$ は勾配、 $B(T)$ は切片に対応と考えれば、 γ_e が環境温度と接触速度の係数結合型の補正係数の数式化された関数として以下のように定式化できる。

$$\gamma_e(T, V) = A(T) \ln(V) + B(T) \quad (1)$$

$$\begin{cases} A(T) = -0.0039T + 0.2174 \\ B(T) = -0.013T + 1.3102 \end{cases}$$

図-5 吸収エネルギーに対する補正係数の定式化プロセス

4.3 補正係数の数式化

表-1の補正係数を数式で表現するため、それぞれの傾向分析を行った。

図-5(a)に吸収エネルギーに対する補正係数の補正係数の変化傾向を環境温度の関数として表したものであるが、いずれの圧縮速度においても補正係数が環境温度の1次関数としてほぼ定式化できることがわかる。

また、図-5(b)は、吸収エネルギーに対する補正係数の変化傾向について圧縮速度の関数として表したもので、いずれの環境温度においても補正係数が圧縮速度の対数関数としてほぼ定式化できることがわかる。

ここに、 $\gamma_e(T, V)$ を、環境温度 T と圧縮速度 V の結合関数として表現した吸収エネルギーに対する補正係数である。

同様に、最大荷重に対する補正係数の変化傾向についても、式(2)に示すように定式化できた。

$$\gamma_r(T, V) = A(T) \ln(V) + B(T) \quad (2)$$

$$\begin{cases} A(T) = -0.0036T + 0.2063 \\ B(T) = -0.0136T + 1.3159 \end{cases}$$

ここに、 $\gamma_r(T, V)$ を、環境温度 T と圧縮速度 V の結合関数として表現した最大荷重に対する補正係数であ

る。

得られた式(1)およびの式(2)を比較すると、その値がわずかに異なるのみであり、吸収エネルギーと最大荷重の補正係数は、環境温度や圧縮速度に対して、ほぼ同等の傾向を示すといえる。これらを3次元曲面として表現したものを図-6に示す。これにより、環境温度の変化や圧縮速度の変化による補正係数の関連性を的確に表現できる。また、実際の接岸速度である0.1~0.5m/sec(100~500mm/sec)では、いずれの温度下(-20~40℃)においても補正係数 γ_c が1.00以上の値となることから、このことだけに着目すると、設定する温度や速度に応じて、現状の防舷材のサイズよりもダウンサイジングできる可能性が示唆された。

以上のことから、ゴム製防舷材の設計を行うための補正係数を、1つの変数として取り扱うことが可能となり、より供用条件に近いかたちでの設計が可能になるといえる。数値解析手法導入の有効性と適用性が確認できたといえる。

5. 結言

本研究では、温度および速度効果を考慮した防舷材の設計手法に関して、著者らがこれまで実施した防舷材の数値解析を導入した設計手法について一提案を行い、サークル型防舷を一例として、その適用性と有効性について考察した。本研究で得られた知見を要約すると以下のようになる。

- (1) 温度効果と速度効果とを考慮したゴム製防舷材の新たな設計手法を整理し、基準性能における補正係数の導出に関して、ゴムの温度効果と速度効果を考慮した材料構成則による防舷材の圧縮変形シミュレーションの適用を提案した。
- (2) ミニチュアサイズのサークル型防舷材に対するパラメトリックスタディの結果、先に実施した実験的検討と同様に、環境温度が低温である程、また、圧縮速度が高速である程、荷重や吸収エネルギーが増加する傾向が認められた。

- (3) ゴム製防舷材の設計を行うための環境温度と圧縮速度に対する補正係数を、1つの変数として取り扱うことができるようになり、より供用条件に近いかたちでの設計が可能になるといえる。数値解析手法導入の有効性と適用性が確認できたといえる。

本研究で提案する数値シミュレーションを導入した設計手法により、防舷材を設置する箇所の気象条件や想定される船舶の接舷速度などが設定されれば、ゴム製防舷材の供用中における適切な性能評価が可能になるといえる。防舷材の形状やサイズ選定に大きく寄与できるものと考えられる。

今後は、以上の知見を踏まえ、サイズおよび形状の異なるゴム製防舷材に対する数値シミュレーションの有効性と補正係数導出の妥当性についても検討を行うこととし、本設計手法に対し更なる検討を重ねる予定である。

参考文献

- 1) 社団法人日本港湾協会：港湾施設の技術上の基準・同解説、1999。
- 2) 例えば、日本免震構造協会：免震積層ゴム入門、オーム社、1997.09
- 3) 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実験的研究、構造工学論文集 Vol.46A, pp1865-1874, 2000.03.
- 4) 西本安志、池邊将光、川上千歳、下齒征史：速度依存性を考慮した防舷材の設計手法に関する一考察、第8回 構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集 pp213-218, 2006.11.
- 5) 下齒征史、園田佳巨、西本安志：ゴムの速度効果を考慮した防舷材の荷重-変位特性に関する解析的考察、応用力学論文集 Vol.10, pp293-300, 2007.8
- 6) 下齒征史、園田佳巨、西本安志：環境温度と速度効果を考慮したゴム製防舷材の解析手法に関する研究、構造工学論文集 Vol.54A, pp979-988 2008.3
- 7) 国際航路協会：防舷材システム設計の指針：2002 版、海港委員会第33作業部会報告書