環境温度と速度効果を考慮したゴム製防舷材の設計手法に関する一考察

A study of the design method for rubber fender considering environmental temperature and strain rate effect

下薗征史*, 西本安志**, 園田佳巨*** Masafumi Shimozono*, Yasushi Nishimoto**, Yoshimi Sonoda***

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

To protect both vessel's body and quay wall from hard colliding, various types of rubber fenders are usually installed on the quay berth. In general, they are selected by specified static absorbed energy. However their design method will be revised by the concept of performance based design and absorbed energy should be estimated considering environmental temperature and strain rate effect. Therefore, this study is to investigate the effect of strain rate and temperature on the impact behavior of rubber material. To consider the change of mechanical property by temperature and strain rate, new constitutive laws are derived by the results of constant speed compression test. A parametric study of rubber fender with environmental temperature and compression rate shows one equivalent factor's equation for performance-based design.

Key Words: rubber fender, temperature effect, strain rate effect キーワード: ゴム製防舷材, 温度効果, ひずみ速度効果

1. 緒言

港湾の岸壁などに取り付けられている防舷材は,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 を緩和し,船舷および岸壁の両者の損傷を防ぐために用い られるゴム製の衝撃緩衝材である.防舷材は使用状況によ り,適した形状およびサイズが選定される.写真-1に,大 型コンテナー船岸壁に使用される受衝板付きサークル型 防舷材の使用例を示す.

従来のゴム製防舷材の設計は、防舷材に対する常温状態 (雰囲気温度 23℃)における静的載荷(圧縮速度 50mm/min)試験を行い、そこから得られる荷重-変位特性 に基づいた性能評価を行ってきた.しかしながら、防舷材 の現実的な供用を考えた場合、地域や季節による雰囲気温 度の違い、および船舶の規模や海面状態による接舷速度の 違いは、大半がゴムで占められる防舷材にとって非常に大 きな問題となる.すなわち、ゴム材料は強い温度依存性¹⁾ と速度依存性²⁾を示すことから、従来の常温状態や接舷速 度の影響を考慮していない静的な力学特性による評価法 では、実現象を的確に捉えているとは言い難く、今後の防 舷材の性能設計上、重要な因子になると考えられる.

著者らはこれまでに、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



写真-1 サークル型防舷材 (受衝板付き)

に対する数値解析的アプローチを試みている^{3,4}. 速度効 果については、一定速度載荷試験(単軸圧縮および引張試 験)より得られた Mooney-Rivlin 定数をひずみ速度の対数 関数として表現し、ひずみ速度がある程度大きくなると限 界値に漸近すると仮定した.また、温度効果については、 雰囲気温度を-20℃および 40℃に保った恒温槽内における 一定速度載荷試験結果から、任意の温度における材料特性 を線形補間することで表現し、良好なシミュレーション結 果を得ている.

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材料構成則による防舷材の圧縮変形シミュレーション を導入することによる、温度効果と速度効果とを考慮した防舷材の新たな設計手法について一提案を行い、その適用 性について検証した.

2. 防舷材の性能設計

2.1 現状の防舷材の設計法とその課題

防舷材は、船舶が岸壁に接舷する際の船舶の接舷エネル ギーを吸収し、そこに生じる反力を抑制することを目的と して使用される.図-1に、サークル型やV型の形状を有 する防舷材を、静的に載荷したときの荷重-変位特性の概 念図を示す.初期状態(①)から、ある程度圧縮が進むと 座屈を開始(②)し、しばらく変位が進行しても荷重がほ ぼ一定値を示す定反力ゾーンが現れ、最終的には、防舷材 内部で自己接触が生じ、急激に反力が上昇するハードニン グ状態(③)に至る.

現行の設計法では、常温かつ静的に載荷したときの荷重 -変位特性から防舷材の性能を求めている⁵⁰.しかしながら、 実際の使用状況を想定すると、日本国内でも四季の影響で 気温較差が著しく、防舷材が取り付けられる地域によって は温度の影響を大きく受ける.ゴムは、一般的に温度の影響を大きく受けることが知られており、低温側では剛性が 高上し、高温側では剛性が低下するという温度効果を有す.

また、実際の接舷速度は100~500mm/sec であることか らも、防舷材の性能を評価する 50mm/min (0.83mm/sec) という圧縮速度では、ゴムの速度効果を論ずる上で、実現 象を的確に反映しているとは言い難い.

よって、これらのことを考慮して、著者らは、これまで 用いてきた防舷材の静的な性能に何らかの係数補正を行 い、防舷材の吸収エネルギーを評価することを検討してき た^{4,5,6}.





2.2 提案する防舷材の設計フロー

本研究では、過去に実施した数値シミュレーション手法 を適用した、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を目指した.

防舷材の設計フローは、図-2に示すように、大別して手法A(変数分離型)と手法B(変数結合型)の2通りの手法が考えられており、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.

ここで、防舷材の実際の使用状況を考えた場合、船舶と の衝撃による防舷材の圧縮速度は時間とともに変化する. 試験でも防舷材の衝撃緩衝過程を的確に再現できれば理 想的であるが、試験装置の規模や圧縮速度制御のための設 備などの問題に加え、実際の衝突速度の減衰プロセスなど が不明確であることから、速度変化が生じることを前提と した評価手法を適用することは非常に難しいと考えられ る.そのため、設計フローの条件として与える圧縮速度は 一定値と定義し、試験でもそれに応じた一定速度による圧 縮載荷によって、防舷材に対する荷重-変位特性から性能 評価を行う必要があるといえる.

なお、本設計フローでは、荷重-変位特性より得られる、 初期状態から設計変形量(定格変形量)までの吸収エネル ギーE、および設計変形量における荷重 R を性能評価指標 としており、環境温度 23 $^{\circ}$ 、圧縮速度 50mm/min (0.83mm/sec)の条件で得られる吸収エネルギーE_b、およ び荷重 R_bを防舷材の基準性能としている.

手法Aは、2つの異なる換算倍率を用い、環境温度と圧 縮速度の効果をそれぞれ個別に扱う変数分離型の手法で ある.それぞれの条件がある程度限定された場合は、他方 の条件による換算倍率の変化傾向を簡易に推測できる利 点がある.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換算倍率に対し影響し合う 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を残した 手法であるといえる(図-3 参照).

一方,手法Bは,換算倍率を定めるために,環境温度と 圧縮速度の効果を同時に考慮できる変数結合型の手法と いえる.この場合,吸収エネルギーおよび最大荷重に対す る換算倍率を,2変数関数として扱い,3次元空間におけ る応答曲面を用い求めることになる.本手法のメリットと して,より実現象に近いかたちでの評価が可能となり,換 算倍率の因子である温度と速度を相互に関連付けて把握 でき,防舷材の設計を行うための総合的な評価を1つの換 算倍率に集約して行えることが挙げられる(図-3参照).

実際に、換算倍率を求めるには、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非常に手間が かかるとともに、数多くの防舷材の形状やサイズを考える と、現実的に不可能であると言わざるを得ない、すなわち、 数値シミュレーション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,設計フローに換算倍率の概念を導入し,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 材料構成則⁴を適用することで,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 量的に評価する手法を採用することとした.

なお、ここでは、ゴム製防舷材に対する2つの手法について説明したが、本研究では、防舷材の設計フローとして 手法Bを採用し、数値シミュレーションによる換算倍率導 出における設計手法への適用性を考察した.



ここに、α_e:環境温度で関数化された吸収エネルギーに対する換算倍率

- β_e: 圧縮速度で関数化された吸収エネルギーに対する換算倍率
 - α_r:環境温度で関数化された最大荷重に対する換算倍率
 - β_r: 圧縮速度で関数化された最大荷重に対する換算倍率
 - γ_e: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換算倍率
 - γ_r:環境温度と圧縮速度で関数化された最大荷重に対する換算倍率
- ただし、全ての補正係数は、基準性能時において1.0とする.
 - 図-2 環境温度と圧縮速度を設計変数とするゴム製防舷材の設計フロー



図-3 手法Aと手法Bの関係説明図

3. 防舷材の解析モデルと設計フローへの適用

3.1 温度効果と速度効果を考慮したゴムの構成則3.1.1 ゴムの構成則

温度効果と速度効果を考慮したゴムの構成則の詳細に ついては、著者らが過去に実施した文献^{3,4)}を参考にされ たい.ここでは、温度および速度を考慮した防舷材のシミ ュレーションに本構成則を導入するため、以下に要約して 示す.

ゴムの温度効果と速度効果を考慮した材料特性を試験 的に確認するために、総ゴム(硬度 65 相当)で成形され た2つの試験片について、設定温度を-20,20 および40℃ とした場合の一定の引張速度と圧縮速度を与える単軸試 験を個別に行った.引張試験については、JIS 規格に基づ いたダンベル型試験片を用い、圧縮試験については、鋼材 とゴムを接着したシリンダー型試験片を用いて行った.

温度効果と速度効果を考慮したゴムの構成則を考案するために、ゴムを超弾性体と仮定し、適切なひずみエネル ギー密度関数を選定するための検討を行った. 圧縮-引張 両域におけるS字状の応力-ひずみ特性を高い精度で表現 するために、ひずみエネルギー密度関数として3つの定数 を有する式(1)に示す Mooney-Rivlin 式 (Signiorini 形式)を 採用し、試験データの同定を試みた.

$$W = c_{10}(I_1 - 3) + c_{01}(I_2 - 3) + c_{20}(I_1 - 3)^2$$
(1)

ここに、*c*₁₀, *c*₀₁, *c*₂₀: Mooney-Rivlin 定数(MPa) 各設定温度(-20, 20, 40°C)とひずみ速度(0.01~0.83/sec) に対する Mooney-Rivlin 定数の関係を表-1 に示す.また、 カーブフィッティング状況の一例として、静的載荷状態 (ひずみ速度 0.01/sec)における応力-ひずみ特性(-20, 20, 40°C)を図-4 に示す.

表-1 Mooney-Rivlin 定数-ひずみ速度の関係

-20°C	C10	C01	C20	
0.01/sec	1.08943	-0.181618	0.109104	
0.08/sec	1.36553	-0.264216	0.0980549	
0.21/sec	1.48154	-0.253971	0.087391	
0.42/sec	1.48315	-0.126682	0.0828079	
0.63/sec	1.57068	-0.127405	0.0762344	
0.83/sec	1.98591	-0.18065	0.0602301	
20°C	C10	C01	C20	
0.01/sec	0.7316926	-0.143564	0.0555336	
0.08/sec	0.7538905	-0.136318	0.0586848	
0.21/sec	0.7458225	-0.110299	0.0590948	
0.42/sec	0.7530801	-0.085144	0.0630345	
0.63/sec	0.8028593	-0.061134	0.0597158	
0.83/sec	0.8576705	-0.050641	0.0594351	
40°C	C10	C01	C20	
0.01/sec	0.579175	-0.118541	0.0466858	
0.08/sec	0.60967	-0.125957	0.053623	
0.21/sec	0.631834	-0.094257	0.0431825	
0.42/sec	0.680196	-0.146159	0.0459615	
0.63/sec	0.703841	-0.138795	0.0480931	
0.83/sec	0.813062	-0.172425	0.0555132	



図-4 カーブフィッティング状況(静的載荷状態)

これらの結果から, Mooney-Rivlin 定数を, ひずみ速度 と温度の結合関数として表現する場合, 定数とひずみ速度 には対数的関係, 定数と温度には線形的関係がほぼ成り立 つことを確認した.

3.1.2 ゴム製防舷材の圧縮変形シミュレーション例

図-5 の(a)は、本シミュレーションの対象となるサークル 型防舷材に関する諸元、(b)は解析モデルの要素分割状況を 示しており、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 μ =0.1 を設定した.



試験および解析ともに、上部載荷板の受ける反力を荷重, 移動量を変位として出力し、それらの比較を行った.図-6 に、静的載荷(5mm/min≒0.083mm/sec),および高速載 荷(10mm/sec)における荷重-変位特性を示す.

これより、前述した温度効果と速度効果を考慮したゴムの材料構成則を用いることで、サークル型防舷材の荷重-変位特性を本シミュレーションによりほぼ的確に捉えていることがわかる.



3.2 設計フローへの適用

次にここでは、2.2 で提案した設計フローに必要となる 換算倍率を求めるために、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一定圧縮速度載荷シミ ュレーションのパラメトリックスタディを行った。

設計条件として採用する環境温度の条件は全 8 ケース (-20, -10, 0, 10, 20, 23, 30, 40℃), 圧縮速度の条件は全6 ケース(0.83, 10, 100, 150, 500, 1000mm/sec)であり, 基準 性能(換算倍率1.0)に対する条件を,環境温度23℃, 圧 縮速度50mm/min(=0.83mm/sec)として定めた.

また,2.1 で述べた設計変形量(定格変形量)について は、いくつか解釈(防舷材のタイプ別に規定された圧縮率 を用いるⁿ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 る変位として定めた(具体的には、図-7 に示す設計変形量 の導出プロセスに従い求める).なお、通常の防舷材で用 いられる設計変形量は、概ねこの値に等しくなっている.



- ① 線形領域後の最大荷重:R_{max}を求める
- ② R_{max}に再び等しくなる荷重を探す
- ③ R_{max}に対する変位を設計変形量:δ_dとする
 - 図-7 設計変形量の導出プロセス

3.2.1 荷重-変位特性の変化傾向

図-8 の(a)と(b)に、環境温度を固定し、圧縮速度を変化 させたときの荷重-変位特性の変化傾向について示し、図-8 の(c)と(d)に圧縮速度を固定した場合の、環境温度の違いに よる荷重-変位特性の変化傾向について示す。

本図により、環境温度が低く圧縮速度が大きくなるほど、 ハードになる傾向が全体的に示されており.ゴムが本来有 する材料特性の影響が大きく計算結果として表現できて いることを確認できる.

なお、本図の(a)と(b)で、圧縮速度 1000mm/sec のときの 出力結果が計算開始時から常に振動を伴うものとなって いるが、ひずみ速度に換算すると 8.33 と非常に大きいこ とが原因と考えられる.現実的な接舷速度の範囲は、100 ~500mm/sec 程度であり、これをひずみ速度に換算すると 防舷材のサイズ (120mm)から、0.83~4.17/sec に相当し ており、急激な圧縮変形が与られていることがわかる.

3.2.2 吸収エネルギーの変化傾向

3.2.1 と同様に、図-9 の(a)と(b)に、環境温度を固定し、 圧縮速度を変化させたときの吸収エネルギーの変化傾向 について示し、図-9 の(c)と(d)に、圧縮速度を固定した場 合の、環境温度の違いによる吸収エネルギーの変化傾向に ついて示す.

本図より、いずれのケースにおいても、荷重が最大値を 示す変位 30mm 以降で、吸収エネルギーはほぼ線形的に増 加していくことがわかる.また、環境温度が上昇するほど、 圧縮速度の変化に伴う吸収エネルギーの変化のレンジが 狭くなる傾向を示すことがわかる.

3.2.3 最大荷重および吸収エネルギーに対する換算倍率

ここではまず3.2.1 と3.2.2 で示した計算結果から,設計 フローに適用する換算倍率の導出を試みた.すなわち,各 計算結果から,基準性能の条件(環境温度 23℃,圧縮速 度0.83mm/sec)における換算倍率を1.0 とし,各条件での 最大荷重および吸収エネルギーに対する換算倍率を求め た.表-2 および表-3 にそれらを示す.



/		圧縮速度[mm/sec]					
		0.83	10	100	150	500	1000
	-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
環境温度 [℃]	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	1.95
	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

表-2 最大荷重に対する換算倍率の一覧表

表-3 吸収エネルギーに対する換算倍率一覧表

$\langle \rangle$		圧縮速度[mm/sec]					
	\sim	0.83	10	100	150	500	1000
環境温度 [℃]	-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

図-10の(a)は表-2に基づき,最大荷重に対する換算倍率の変化傾向を環境温度の関数として表現したものである. いずれの圧縮速度においても,換算倍率が環境温度の1次 関数としてほぼ定式化できることがわかる.

また,図-10の(b)は表-2を用い,最大荷重に対する換算 倍率の変化傾向について圧縮速度の関数として表現した ものである.いずれの環境温度においても,換算倍率が圧 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.

そして、図-10の(c)は、(a)で示した最大荷重に対する換算倍率 γ , 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(2)で、A(T)は勾配、B(T)は切片に対応すると考えれば、 γ , が環境温度と接舷速度の変数結合型の関数として以下のように定式化できる.

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

$$\begin{cases} A(T) = -0.0036T + 0.2063 \\ B(T) = -0.0136T + 1.3159 \end{cases}$$
(2)

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換算倍率とする.

同様に,吸収エネルギーに対する換算倍率の変化傾向に ついても,表-3により状況確認が可能である.図-11の(a) に圧縮速度の違いによる換算倍率 Y_eの変化傾向を,(b)に 環境温度の違いによる換算倍率 Y_eの変化傾向を,(c)に式 (3)の1 次関数による未定係数のフィッティング状況をそ れぞれ示す.

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

$$\begin{cases} A(T) = -0.0039T + 0.2174 \\ B(T) = -0.013T + 1.3102 \end{cases}$$
(3)

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換算倍率 とする.

式(2)と式(3)から,最大荷重に対する換算倍率 ア,と吸収 エネルギーに対する換算倍率 ア。の比較から,数値は異な るものの,定性的な面では似た傾向を示すことがわかった. その理由として,荷重-変位特性の定反力ゾーンにおける 反力値がほとんどのケースで顕著な変化が無く,定反力ゾ ーンにおける吸収エネルギーもほぼ線形的に変化してい ることなどが挙げられる.





図-10 最大荷重に対する換算倍率の定式化プロセス



図-11 吸収エネルギーに対する換算倍率の定式化プロセス

本章のまとめとして、 γ_rの式(2)と γ_eの式(3)を基とした 3 次元応答曲面を、図-12 の(a)と(b)にそれぞれ示す.本図 を用いることにより、換算倍率の因子である環境温度と接 舷速度の関連性を的確に表現できるとともに、ゴム製防舷 材の設計を行うための換算倍率を、1 つの係数として取り 扱うことが可能となり、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.



(a) 最大荷重に対する換算倍率 γ_rの3 次元的表現



(b) 吸収エネルギーに対する換算倍率 γ の3 次元的表現

図-12 換算倍率 γ_r と γ_eの 3 次元的表現

4. 設計手法の具体的実用例

ここでは、本研究で試みた設計手法(手法B)に基づき、 数値解析手法により得られた最大荷重と吸収エネルギー について換算倍率式(2)と(3)を用いた、サークル型防舷材 に対する具体的な設計事例を示す。例として、福岡県地方 の港湾に防舷材が設置されるケースを仮定する。本来であ れば、防舷材の長期間の使用を想定した 30~50 年程度の 長期間の気象データから求まる最高気温と最低気温を考 えるべきであるが、あくまでも適用事例であるため、図-13 に示す 2006 年気象データ[®](最高気温は赤線、最低気温 は青線、データは 15 時の観測速報)を基に検討すること とした。

年間を通じての最高気温は35℃であり,最低気温は0℃ であった.仮に,接舷速度が100~500mm/secの範囲で変 化し,最高気温がT=35℃,最低気温がT=0℃であると仮 定すれば,最大荷重および吸収エネルギーに対する換算倍 率 $\gamma_r \ge \gamma_e$ は,それぞれ図-14の(a) \ge (b)に示すように分布 する.本図より, γ_r については,1.21~2.74, γ_e につい ては,1.23~2.81の範囲で値が変動することがわかる.



図-13 最高気温と最低気温の年間データ(2006年福岡)

以上の結果から、供用化における防舷材の荷重範囲は、 当初の設計で想定した荷重(基準性能)の1.21~2.74 倍に 達することがわかる.これにより、実際の船体や岸壁の強 度に対する評価が可能となり、年間を通じての実現象にお ける船舶および岸壁などの安全性について照査できると いえる.

また,得られた吸収エネルギーの換算倍率範囲 1.23~ 2.81のみに着目し,防舷材の製品ラインナップから適した サイズの選定を行うのであれば,同タイプのサークル型防 舷材を同じ条件で使用すると仮定した場合,約1/3~4/5程 度の範囲でサイズダウン (コンパクト化)が可能になると 考えられる.

5. 結論

本研究では、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を導入 することによる、温度効果と速度効果とを考慮した防舷材 の新たな設計手法について一提案を行い、サークル型防舷 材を一例として、その適用性および有効性について検証し た.本章で得られた知見を要約すると以下のようになる.



図-14 防舷材の換算倍率の分布状況

- (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として、基準性能における換算倍率の導出に関して、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) 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,防舷材の基準性能を1.0 とした最大荷重および吸 収エネルギーに対する換算倍率を,温度と速度を相互に 関連付けた1つの係数として表現できた.
- (3) 本設計手法の適用例として,2006年の福岡地方(年間 最高気温35℃,最低気温0℃)に対する防舷材の性能評 価を行った.その結果,最大荷重の換算倍率は1.21~2.74, 吸収エネルギーの換算倍率は1.23~2.81の範囲で変動す ることが確認できた.よって他の諸条件を考慮せず,接 舷速度と環境温度のみに着目すると,吸収エネルギーの 換算倍率から,約1/3~4/5程度の範囲で防舷材のサイズ ダウン(コンパクト化)となる可能性が示唆された.

本研究で提案する数値シミュレーションによる設計手 法により、ゴムの温度効果と速度効果を導入したゴム製防 舷材の新たな設計が可能となるといえる.

以上の知見を踏まえ、今後は、サイズおよび形状の異な るゴム製防舷材の設計についても、その適用性を評価する とともに、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

- 玉井裕基,丸山健司,飯島正徳,皆川勝:力学試験と 熱量測定による緩衝ゴムの性能評価,構造工学論文集 Vol.54A, pp. 228-237, 2008
- 2) 都留崎恭一, 飛鳥井俊文: FEM 解析のためのゴム材料 の物性パラメタ決定方法, 神奈川県産業技術総合研究所 研究報告 No.10/2004
- 3) 下薗征史,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, pp. 293-300, 2007
- 4) 下薗征史,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, pp. 979-988, 2008
- 5) 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
- 6) 池邉将光,西本安志,川上千歳,下薗征史: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 pp. 213-218,2006
- 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
- 8) YAHOO! JAPAN 天気情報:天気ガイド,過去の天気, http://weather.yahoo.co.jp/weather/jp/past/

(2008年9月18日受付)