

## 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

An analytical study on the dynamic response of rubber fender considering environmental temperature and strain rate effect

下藪征史\*, 園田佳巨\*\*, 西本安志\*\*\*

Masafumi SHIMOZONO\*, Yoshimi SONODA\*\*, Yasushi NISHIMOTO\*\*\*

\* エムエスシーソフトウェア株式会社 コンサルティング事業部 (〒160-0023 東京都新宿区西新宿 1-23-7)

\*\*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)

\*\*\*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)

To protect vessel's body and quay wall from hard colliding, various 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 equations are derived by the results of constant speed compression test. After that impact response of rubber fenders are simulated by 3-dimensional nonlinear FE analysis in order to validate them.

*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

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(写真-1)。特に近年では、船舶の大型化に伴い、衝撃緩衝効果に優れるゴム製防舷材が主流となり、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。

しかしながら防舷材の母材として用いられるゴムは、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<sup>1)2)3)</sup>、温度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、広い分野で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ゴムの温度効果と速度効果を考慮し力学特性を把握することは非常に重要であるといえる。

日本国内で防舷材の年間を通じた使用を考えると、夏季南域で40～冬季北域で20程度の環境温度になると予想される。また、船が接岸する際の防舷材の圧縮変形状態を考えれば、同じ圧縮量であっても接岸速度が大きいほど、船体が受ける反力も高くなる。

そこで、環境温度と速度効果を考慮した、防舷材の力学的特性の試験的な確認が必要となるが、試験機の規模や性能の制約があり、実寸レベルでのデータ採取は困難である。そのため、有限要素解析などによる数値シミュレーション



写真-1 防舷材の設置例

を用いた評価が不可欠となる。著者らはこれまでに、ゴムの動的特性に対する数値解析的アプローチとして、一定速度載荷試験より得られた Mooney-Rivlin 定数をひずみ速度の関数として表現し、防舷材の動的荷重-変位特性を良好に予測できることを確認している<sup>4)</sup>。しかしながら、従来の研究手法では、ゴムの温度効果を構成則に導入し、防舷材に衝撃力を与えた場合の、大変形挙動に対する検討は行われていない。

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)と落錘式衝撃試験(DV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予測可能か検証することを主な目的とした。

なお、本研究では、ゴムの経年劣化の効果については検討しておらず、ゴム製防舷材を長期的に使用した際の材料および力学的特性の変動については考慮していない。

## 2. ゴム製防舷材の温度効果と速度効果に関する試験

本研究では、ゴム製防舷材の温度効果と速度効果に関する力学的特性について詳細な検討を行うため、まず、図-1の(a)と(b)にそれぞれ示す、サークル型防舷材とV型防舷材に対し、環境温度を $-20^{\circ}\text{C}$ および $40^{\circ}\text{C}$ とした場合の一定速度載荷試験(CV方式試験、図-2参照)を行った。ここでは、十分静的とみなせる速度(=5mm/min, ひずみ速度0.01/sec相当)を載荷した場合から、比較的大きな速度(=10mm/sec, ひずみ速度0.08~0.1/sec相当)を載荷した場合における荷重-変位関係の比較を行い、ゴムの有する温度効果と速度効果を試験的に確認した。なお、本稿では、文献<sup>9)</sup>を参照し、載荷速度をひずみ速度に換算した値が0.01/sec以下であれば静的載荷とし、それ以上のひずみ速度であれば高速載荷と定義した。

さらに本研究では、上記の防舷材に対する耐衝撃性能を確認するために、2005年8月1日に九州大学にて、質量200kgの重錘による落錘式衝撃試験(DV方式試験、図-3参照)を実施した。なお、当日の福岡の最高気温は $32^{\circ}\text{C}$ 、最低気温は $25.8^{\circ}\text{C}$ であった。表-1にエネルギー保存則より求めた重錘落下高さとの衝突初速度の関係を示す。

表-1 重錘落下高さ-衝突初速度の関係

重錘落下高さ mm	衝突初速度 mm/sec	防舷材タイプ	
		サークル型	V型
100	1400	サークル型	V型
200	1980	サークル型	V型
300	2425	サークル型	
400	2800		V型

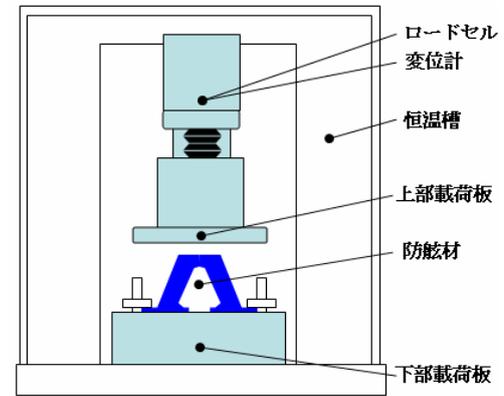


図-2 一定速度載荷試験 (CV方式試験) 状況

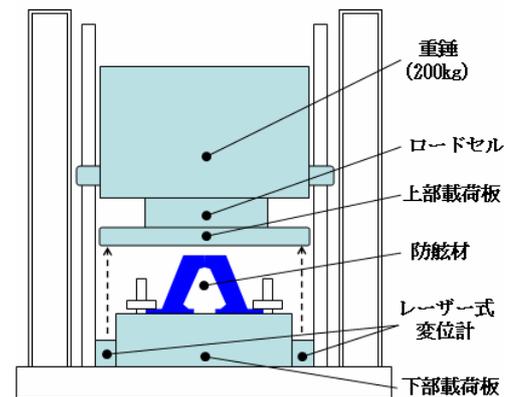
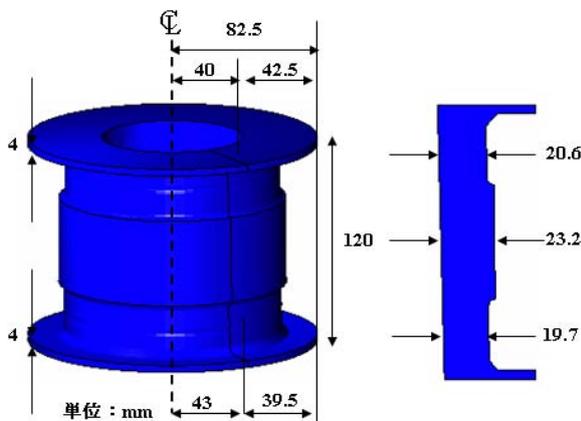
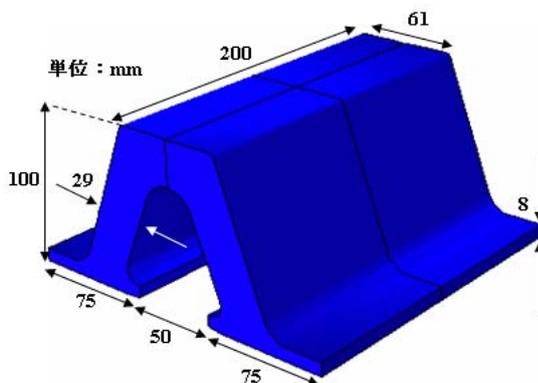


図-3 落錘式衝撃試験 (DV方式試験) 状況



(a) サークル型防舷材



(b) V型防舷材

図-1 防舷材の種別

### 2.1 ゴム製防舷材の一定速度載荷試験

ここでは、環境温度を $-20^{\circ}\text{C}$ および $40^{\circ}\text{C}$ とした場合の、サークル型とV型の防舷材に対する一定速度載荷試験(CV方式試験)の結果を示す。各試験における変位と荷重は、図-2の一定速度載荷試験状況に示す上部載荷板における反力と変位に対応しており、載荷速度を変更することで、防舷材のサイズに応じた任意の圧縮速度における載荷試験が可能である。なお、本試験機には、等温状態を保つ恒温槽が設けられており、任意の温度(範囲 $-20\sim 60^{\circ}\text{C}$ )を環境温度として設定できる。

一般の防舷材では通常、圧縮ひずみがある程度進行すると屈座が生じ、図-4の(a)と図-5の(a)に示す静的載荷試験結果にみられるような、反力がほぼ一定となる定反力ゾーンが現れることで、反力上昇を抑制しつつ高いエネルギー吸収効果を示すように工夫されている。しかしながら、温度が低く、圧縮速度が大きいと、特にV型防舷材では、

明確な定反力ゾーンが見られなくなる。また、載荷速度の上昇に伴い、定反力ゾーンに至るまでの防舷材の初期剛性値および、ゾーン内における反力値自体も高くなる事が分かる。

## 2.2 ゴム製防舷材の落錘式衝撃試験

サークル型と V 型の防舷材に対する、落錘式衝撃試験 (DV 方式試験) より得られた変位-時間、衝撃荷重-時間の関係を、図-6 の(a),(b)および図-7 の(a),(b)にそれぞれ示す。各試験における変位と荷重は、図-3 の落錘式衝撃試験状況に示す、上部載荷板の反力と変位を時刻歴データとして出力し、特に変位については、下部載荷板の左右にレーザー式変位計を 2 つ設置し、両者の平均値を変位とした。

なお、本研究ではあくまでも、防舷材の性能設計のために必要な情報を求めることを主な目的としており、衝撃時の力学特性として、防舷材に生じる変位や衝撃荷重が最大値を示すところまでを検討の範囲と考えている。本研究で提案する解析手法は、ヒステリシスループを描くような戻り剛性について考慮していないことから、ここでは特にピーク以降の挙動について検討を行っていない。

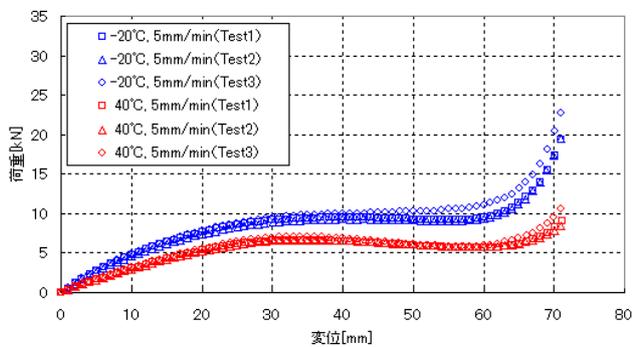
図-6 の(a)より、重錘落下高さの違いによるサークル型防舷材の変位履歴傾向を見れば、落下高さが大きくなると、定反力ゾーンに至るまでの変位の変化率、およびゾーン内の変位自体も上昇することが分かる。また、図-6 の(b)より、重錘落下高さが 300mm を超えると、衝撃荷重が急増することから、防舷材に大きな圧縮ひずみが生じ、ゴム材同士

が互いに接触する自己接触が起きたと考えられる。そして、落下高さを変化させても、定反力ゾーンにおける衝撃荷重値に明確な差が現れないことも確認できる。

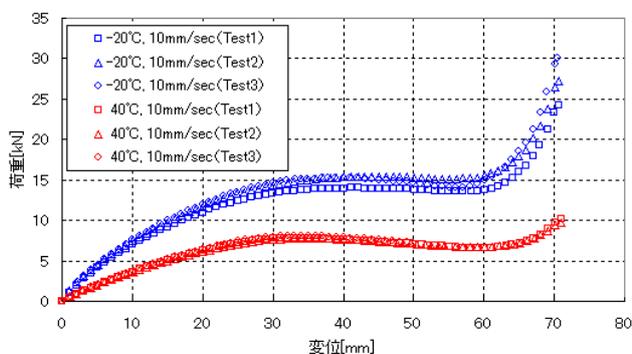
一方、V 型防舷材の耐衝撃性能については、図-7 の(a)に示す変位の時刻歴より、サークル型防舷材と同様の傾向となる事が分かる。また、図-7 の(b)に示す衝撃荷重の履歴より、落下高さが大きくなると、定反力ゾーンに至る防舷材の衝撃荷重の変化率、およびゾーン内における衝撃荷重値が上昇する傾向となる事が分かる。そして、落下高さが 400mm を超えると、自己接触に至る大きな圧縮ひずみが生じ、定反力ゾーンを逸脱する高い圧縮状態に移したと考えられる。

## 3. 防舷材の解析モデル

ゴムの温度効果と速度効果を考慮した場合の、防舷材の力学的挙動について詳細な検討をすすめるために、2.で述べた 2 種類の試験方式 (一定速度載荷試験、落錘式衝撃試験) に対する数値シミュレーションを試みた。本研究では、一連の計算に汎用非線形構造解析プログラム Marc2005r3 を使用しており、防舷材の圧縮プロセスにおいて懸念される、座屈や自己接触などの非線形性の高い現象については、高精度のシミュレーションを実現するための適切な機能を用いた。以下に本研究のために考案した数値解析モデルについて説明する。

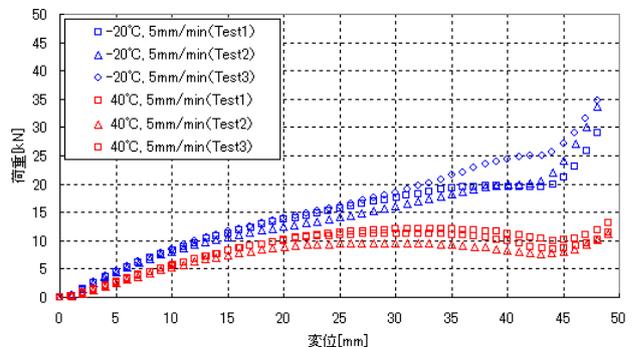


(a) 荷重-変位特性 (静的載荷)

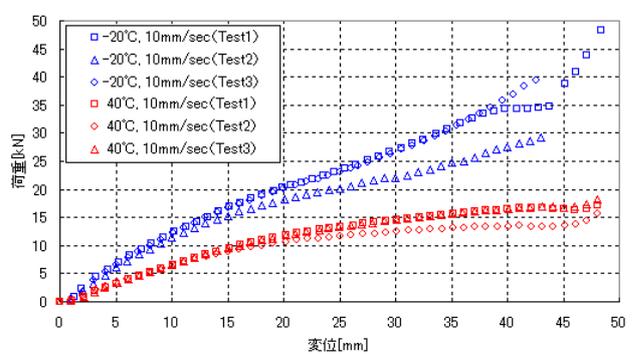


(b) 荷重-変位特性 (高速載荷)

図4 サークル型防舷材の一定速度載荷試験結果

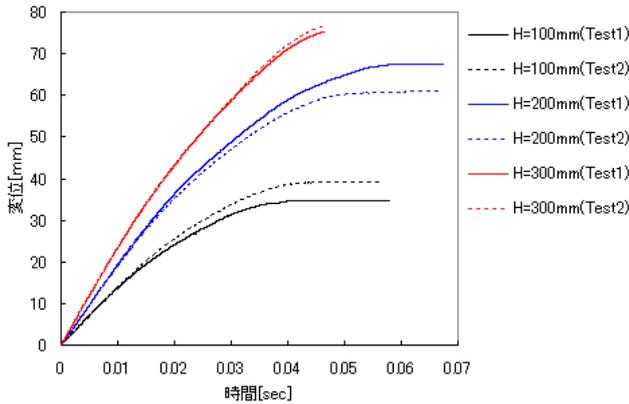


(a) 荷重-変位特性 (静的載荷)

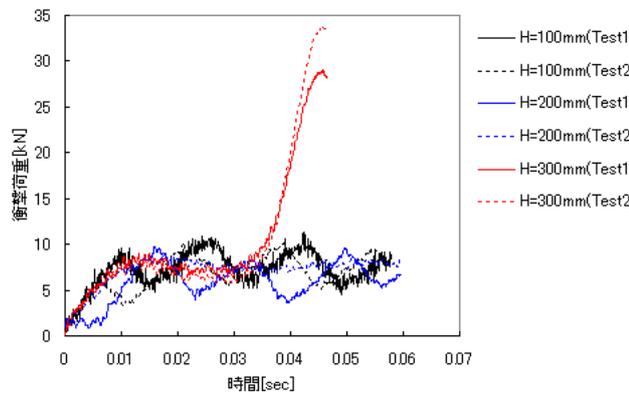


(b) 荷重-変位特性 (高速載荷)

図5 V型防舷材の一定速度載荷試験結果

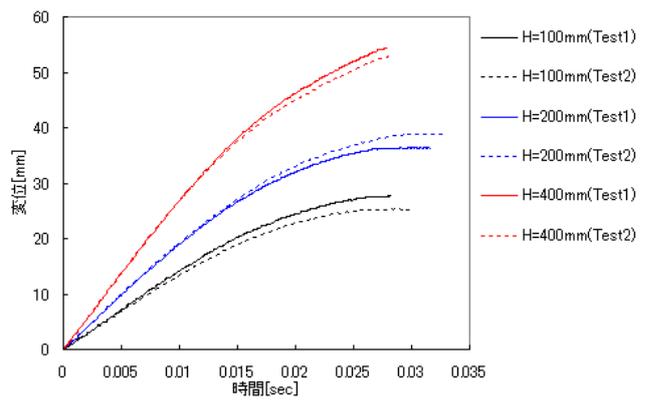


(a) 変位-時間関係

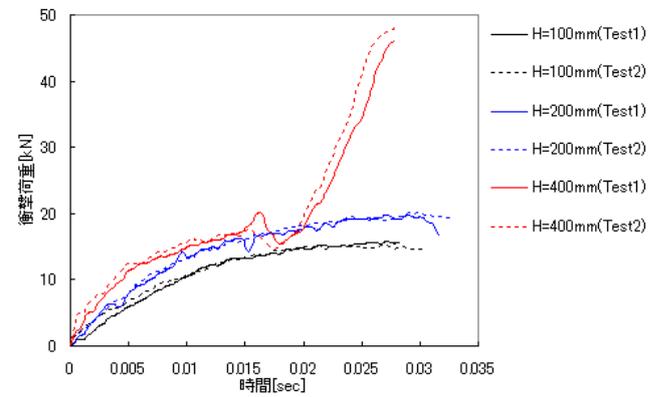


(b) 衝撃荷重-時間関係

図-6 サークル型防舷材の落錘式衝撃試験結果



(a) 変位-時間関係



(b) 衝撃荷重-時間関係

図-7 V型防舷材の落錘式衝撃試験結果

### 3.1 温度効果と速度効果を考慮したゴム材料のモデル化

防舷材の大部分を占めるゴムは、代表的な高分子材料であり、熱の影響を受けやすい。年間を通じ温度差が大きな使用環境下では、緩衝材としての性能は大きく変化することが予想される。また、船舶と岸壁の間に緩衝材として用いられる防舷材は、圧縮変形しながら衝撃力を緩和する。そのため、ゴムの使用環境を想定した温度と、高速圧縮された場合の速度の両者の効果を十分配慮した設計をしなければ、防舷材が本来有す緩衝性能を正しく評価しているとは言い難い。

そこで本研究では、ゴムが有する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、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 $-20^{\circ}\text{C}$ と $40^{\circ}\text{C}$ 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（図-8の(a)）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（図-8の(b)）を用いて行った。

なお本研究では、単軸試験におけるひずみ速度の定義を、載荷速度を試験片初期長（引張20mm、圧縮35mm）で除した値としている。ここでは、各設定温度において、

0.01/sec から 0.829/sec に至る6段階のひずみ速度（表-2参照）に対するゴムの応力-ひずみ関係を得ている。

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、著者らがこれまで行った手法<sup>4),6)</sup>と同じく、ゴムを超弾性体と仮定した、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。前述した応力-ひずみ関係は、圧縮域と引張域とで異なる形状の試験片から得られた2種類の試験データを原点で繋いだものであり、結果として変曲点を多く有する複雑な曲線となる。

そこで本研究では、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Mooney-Rivlin式(1) (Signorini形式)を採用し、試験データの同定を試みた。図-9に、静的載荷状態（温度 $-20^{\circ}\text{C}$ 、 $40^{\circ}\text{C}$ ）におけるカーブフィッティング状況を示す。

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

ここに、 $W$ :ゴムのひずみエネルギー密度関数 (MPa)

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

$I_1, I_2$ : 1次および2次のひずみ不変量

なお、ひずみエネルギー密度関数の選択については、既往の研究でも多種多様な式が提案されており、ゴムの使用用途や状況に応じた選択を行う必要がある。中でも一般に普及している代表的なモデルとして、Mooney-Rivlin と Ogden の2つが考えられるが、小石らの研究<sup>7)</sup>によれば、一軸伸張、純せん断、均等二軸の3種類の試験結果が揃わない場合、伸張比の関数である Ogden モデルを数値解析に使用すべきではないとの見解がある。本研究ではあくまでも、一軸圧縮、一軸引張の2つの試験データのみを用いた材料同定を行うことが前提であるため、ここでは、ひずみエネルギー密度関数として Mooney-Rivlin モデルを選択した。

表-2 にひずみ速度と Mooney-Rivlin 定数の関係を、図-10 に3つの定数をひずみ速度の対数関数でカーブフィッティングした結果を-20 と 40°Cの温度別に示す。対数関数によるフィッティングを行うことで、大きな衝撃力を受けた場合、局部的にひずみ速度が急増しても各定数はある限界値に漸近し発散しないと予想される。なお、各定数の関数化については、対数関数の他に多項式(3次多項式)を用いた場合の検討も行ったが、ひずみ速度が大きくなると計算が不安定になり、現実とかけ離れた挙動を示すことを確認している。

本研究で提案する構成則では、各定数値は、試験結果(図-13の(a))から、温度に対し線形的な関係が成り立つと仮定している。図-11は、任意の温度に対するひずみ速度と各定数の関係であり、-20°Cから40°Cまで10°C刻みで示したものである。温度とひずみ速度の2変数により関数化された Mooney-Rivlin 定数は、本研究で新たに開発したユーザーサブルーチンにより、要素の積分点単位で求めたひずみ速度を用いて計算され、環境温度とひずみ速度に応じたゴムの材料特性の変化に追従できるようにしている。

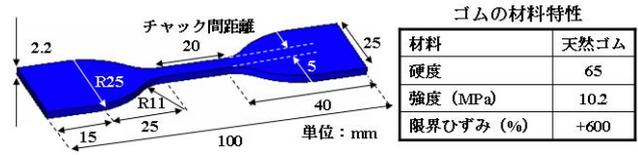
なお、本研究では、前述したように材料試験のひずみ速度が荷重速度を試験片初期長で除した公称ひずみベースで定義されていることから、解析においても同様の取扱いを行うために、ひずみ速度を一般的な定義と異なる平均的な値として求めている。式(2)に一般的な定義のひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ 、および公称ひずみベースで定義されたひずみ速度 $\dot{\epsilon}_n$ をそれぞれ示す。要素の積分点で計算されるひずみ速度の下限値(試験装置の計測限界)は0.01/secとし、このとき静的な荷重状態であると仮定した。

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} \quad (2)$$

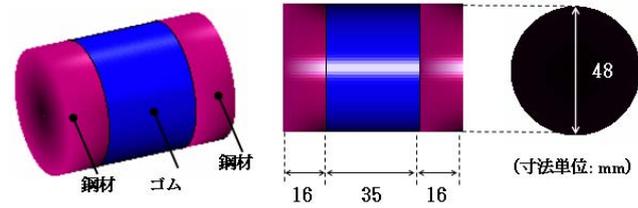
$$\dot{\epsilon}_n = \frac{\int_0^\epsilon d\epsilon}{\int_0^t dt}$$

ここに、 $\dot{\epsilon}$  : 一般的な定義のひずみ速度

$\dot{\epsilon}_n$  : 公称ひずみベースで定義されたひずみ速度



(a) 引張試験片



(b) 圧縮試験片

図-8 単軸試験片概要図

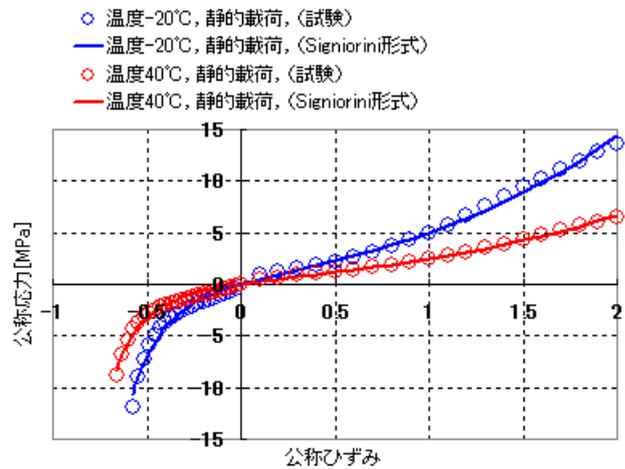


図-9 カーブフィッティング状況

表-2 Mooney-Rivlin 定数-ひずみ速度の関係

-20°C	C10	C01	C20
0.01/sec	1.08943	-0.18162	0.109104
0.08/sec	1.36553	-0.26422	0.098055
0.21/sec	1.48154	-0.25397	0.087391
0.42/sec	1.48315	-0.12668	0.082808
0.63/sec	1.57068	-0.12741	0.076234
0.83/sec	1.98591	-0.18065	0.06023

40°C	C10	C01	C20
0.01/sec	0.579175	-0.11854	0.046686
0.08/sec	0.60967	-0.12596	0.053623
0.21/sec	0.631834	-0.09426	0.043183
0.42/sec	0.680196	-0.14616	0.045962
0.63/sec	0.703841	-0.1388	0.048093
0.83/sec	0.813062	-0.17243	0.055513

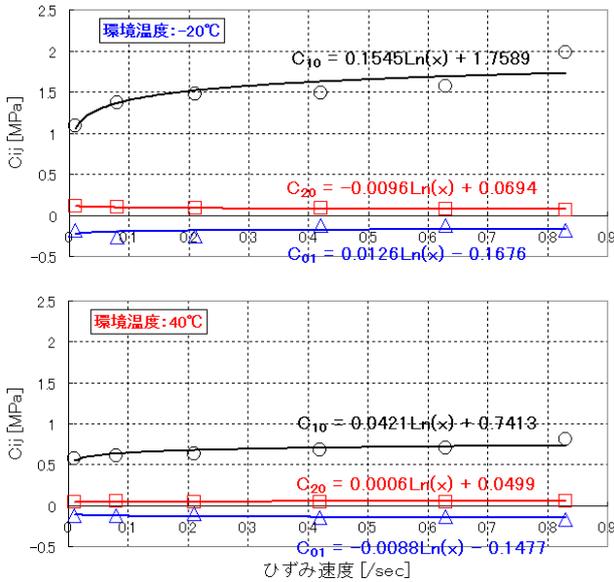


図-10 Mooney-Rivlin 定数のカーブフィッティング

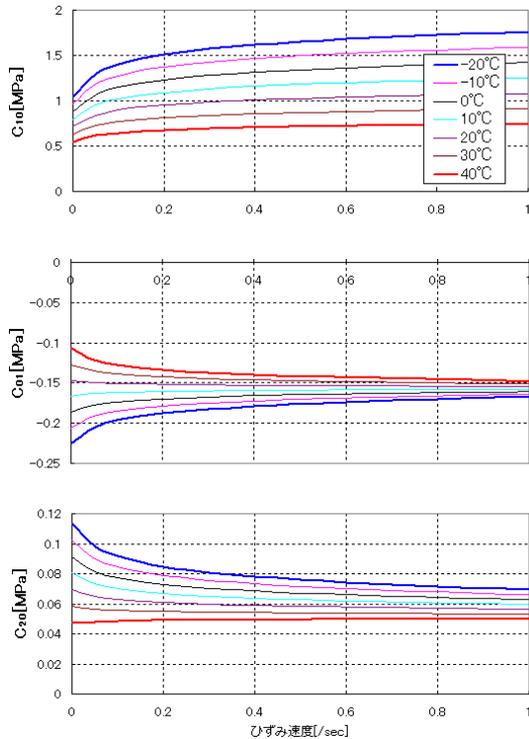


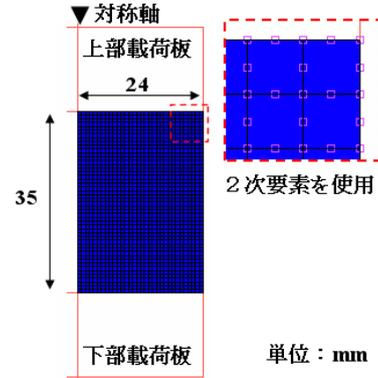
図-11 Mooney-Rivlin 定数-ひずみ速度の関係

### 3.2 試験片および防眩材の有限要素モデル

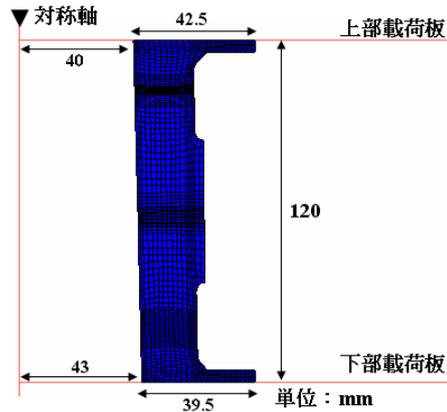
本研究では、前述のシリンダー型試験片、および防眩材（サークル型、V型）に対する一定速度荷重試験および落錘式衝撃落下試験について、数値シミュレーションによる検討を行なった。表-3は、各有限要素モデルに関する諸元についてまとめており、計算時間の項目は、環境温度-20°C、静的荷重状態における解析コストを示している（OSはWindows XP SP2、マシンCPUはIntel T2500@2.00GHz、物理メモリは2GB搭載）。図-9の(a),(b),(c)に、各モデルに対する要素分割状況を示す。

表-3 有限要素モデル諸元

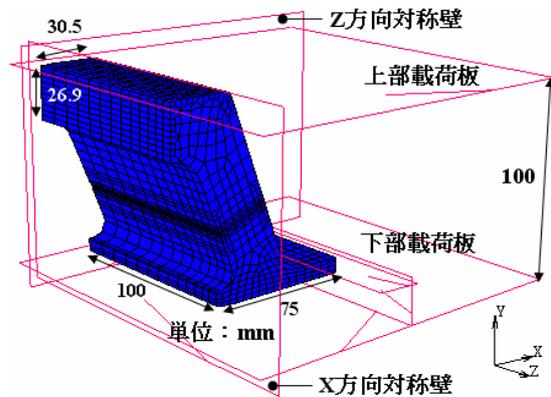
モデル	試験片	防眩材	
	シリンダー型	サークル型	V型
解析タイプ	軸対称	軸対称	3次元(1/4対称)
要素タイプ	8節点2次要素	4節点1次要素	8節点1次要素
総節点数	4769	1954	4718
総要素数	1536(48×32)	1801	3705(285×13)
接触条件(摩擦係数μ)	固着	接触(μ=0.1)	接触(μ=0)
計算時間(圧縮率%)	165sec(60%)	1166sec(62.5%)	1015sec(50%)



(a) シリンダー型試験片（軸対称）



(b) サークル型防眩材（軸対称）



(c) V型防眩材（3次元）

図-12 有限要素モデルの要素分割状況

ブロック状のゴムの圧縮変形解析を低次要素(1次要素)で行う場合、圧縮率が50%を超えるレンジにおいて、載荷板近傍のゴム要素は極端に大きなひずみが現れ、ゴムのハードニング効果だけでは説明できない過剰な反力上昇を示す。そこでここでは、シリンダー型試験片のみ、2次要素モデルを用いた計算を行い、要素の中間節点が増すことによる変形形状の再現性の向上を図った。

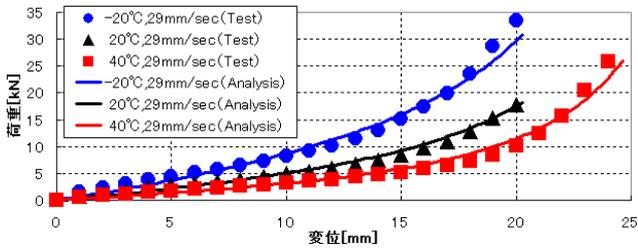
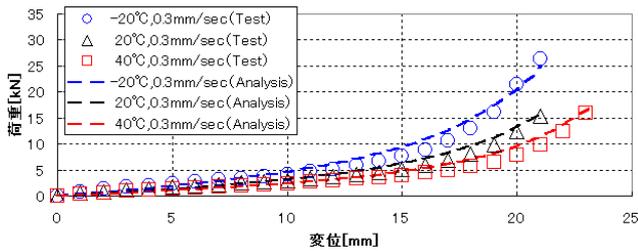
また、防舷材の動的な圧縮変形プロセスを的確にシミュレートすることを考えた場合、振動や座屈等に起因する接触状況の変化に追従可能な計算モデルの作成が必要となる。特に座屈が生じる場合、接触条件の変化を正しく追跡

できず、収束性が極端に悪化する危険性もあることから、防舷材内部の要素に関しては、載荷板-ゴムの接触、およびゴム同士の自己接触が予想される近傍の領域について、より詳細な要素分割を行った。

#### 4. 防舷材の一定速度載荷シミュレーション

ゴムの温度効果と速度効果を考慮した材料構成則、および防舷材のモデル化の妥当性について確認するために、3.の有限要素モデルに対する、一定圧縮速度載荷試験シミュレーションを行なった。動的過渡応答解析に用いる時間積分については Marc2005r3 に標準機能として用意されているシングルステップフォーボルト法を用い、各パラメータは全て初期値のままとした。また、変位増分は固定式で与えており、載荷速度が変化した場合、同等の変位増分になるよう適切なステップ数を設定した。

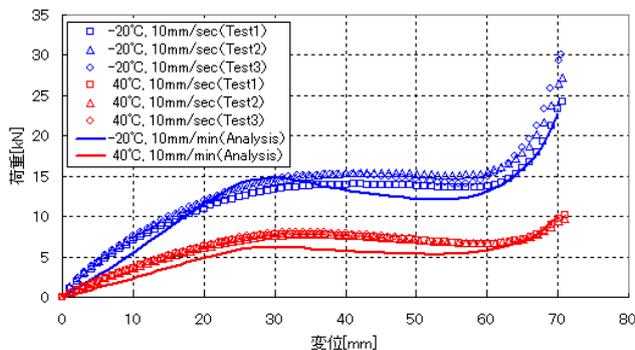
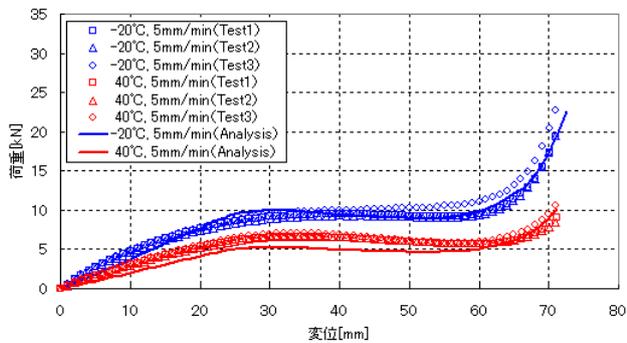
解析モデルにおける荷重-変位の結果は、上部載荷板(剛体)の受ける反力を荷重、移動量を変位とし、試験結果と解析結果の比較を行なった。



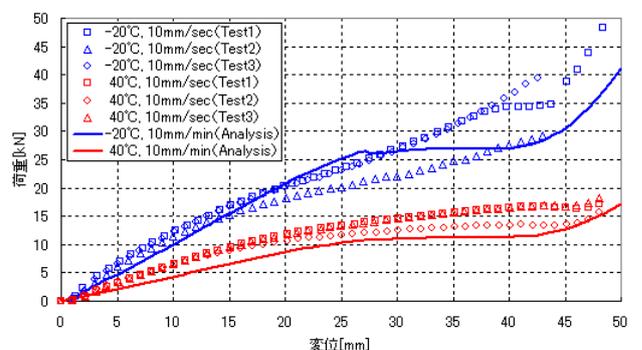
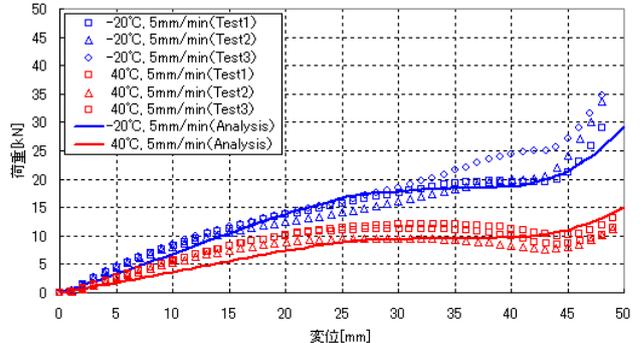
(a) シリンダー型試験片の荷重-変位特性

#### 4.1 シリンダー型試験片の一定速度載荷シミュレーション

ここでは、ゴムの温度効果と速度効果の確認のために3.1の一定圧縮速度載荷試験より得られた荷重-変位の関係を、数値シミュレーションで確認した。図-13の(a)に、静的載荷(速度 0.3mm/sec, ひずみ速度 0.01/sec 相当)と高速載荷(速度 29mm/sec, ひずみ速度 0.83/sec 相当)における、温度の違いによるシリンダー型モデルの荷重-変位特



(b) サークル型防舷材の荷重-変位特性



(c) V型防舷材の荷重-変位特性

図-13 各モデルに対する一定速度載荷シミュレーション結果

性を示す。著者らは、1次要素による計算の場合、ひずみが大きくなると解析は試験より荷重値が高くなる傾向を示した<sup>4)</sup>が、今回行った2次要素による計算では、ひずみ速度と温度の違いによるゴムの材料特性の変化について、高い精度でシミュレートできていることが分かる。

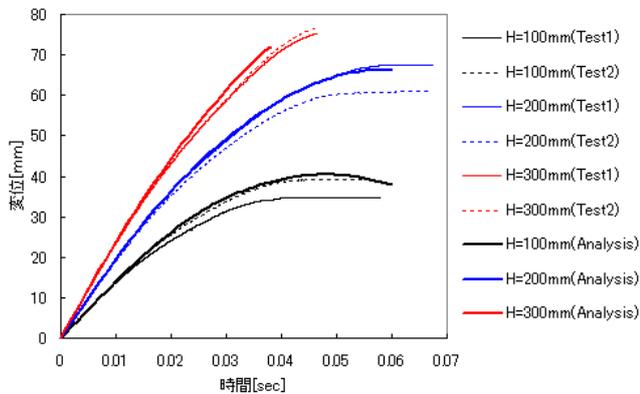
このことから、圧縮と引張の両域で、形状の異なる試験片を用いた材料試験データを用い、温度効果と速度効果を考慮したゴムの力学的特性を数値解析により把握できることが分かった。

## 4.2 サークル型防舷材の一定速度荷重シミュレーション

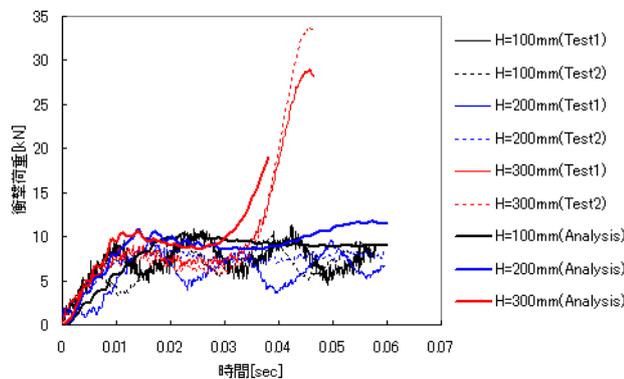
4.1 のシリンダー型試験片の数値シミュレーション結果から、3.1 で示したゴム材料のモデルを適用すれば、温度効果を考慮したゴム材の動的変形時の耐力特性について、定量的に信頼可能な結果が得られるものと考えられる。

ここでは、実際に港湾構造物の衝撃緩衝材として用いられるサークル型防舷材を対象に、大変形に伴う座屈や自己接触などが起こる防舷材の高速圧縮解析を試みた。

図-13 の(b)より、静的荷重 (5mm/min) , 高速荷重 (10mm/sec) とともに、ゴムの温度効果および速度効果による初期剛性の変化傾向を的確に捉えていることが分かる。また、座屈が現れ始めてから荷重が一定となる定反力ゾーンについては、試験が解析値よりもやや大きくなる傾向を示している。



(a) サークル型防舷材の変位-時間関係



(b) サークル型防舷材の衝撃荷重-時間関係

図-14 サークル型防舷材の落錘式衝撃シミュレーション結果

## 4.3 V型防舷材の一定速度荷重シミュレーション

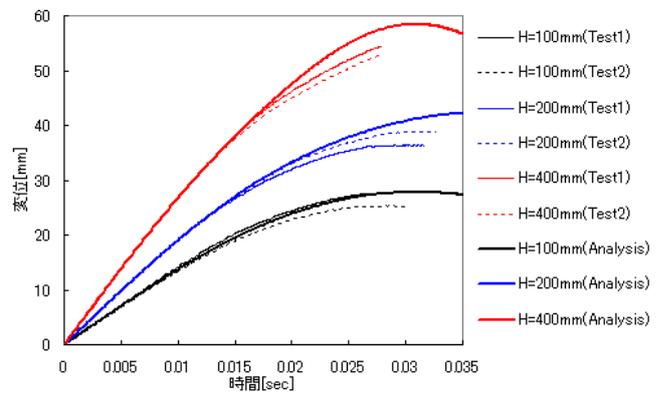
4.2 のサークル型防舷材と同様、形状が大きく変化し座屈による一定の反力が得られる V 型防舷材を対象に、一定速度で圧縮変した場合の変形挙動について検討を行なった。

図-13 の(c)によれば、温度-20°C、高速荷重 (10mm/sec) のケースで、定反力ゾーン以降において試験と解析の傾向の違いが見られるものの、試験で得られたデータ自体、定反力ゾーン以降でケース間のバラつきは大きい。その他のケースについては、温度と速度の違いによる防舷材の荷重-変位特性の変化傾向をほぼ再現できていることが分かる。

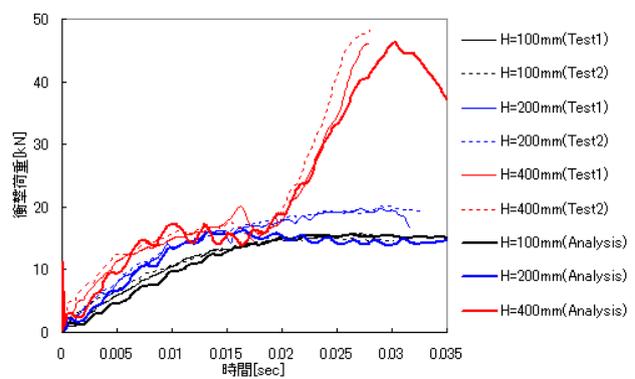
なお、ゴム製防舷材の設計を行う際には、通常 45~55% の範囲の圧縮率を設計変形量として性能評価を行うことから、定反力ゾーン以降の荷重-変位特性の再現性については、ゴムの自己接触や載荷板との接触の問題が複雑に作用するため、今後の課題としたい。

## 5. 防舷材の落錘式衝撃シミュレーション

4. の防舷材の一定速度荷重シミュレーションでは、試験結果の傾向をほぼ再現できることを確認した。しかしながら、防舷材の現実的な挙動を考えた場合、載荷速度が時々刻々と変化する力学的特性は非常に重要となる。ここでは、



(a) V型防舷材の変位-時間関係



(b) V型防舷材の衝撃荷重-時間関係

図-15 V型防舷材の落錘式衝撃シミュレーション結果

2. で説明した防舷材に対する落錘式衝撃試験シミュレーションを行い、本研究に用いた解析手法(3.1のゴム材料のモデル化に示した手法)を、任意の環境温度を想定した衝撃現象に適用する場合について検討をすすめた。

防舷材の衝撃解析で得られる衝撃荷重と変位の時刻歴は、剛体として設定した上部載荷板(重錘)における反力と移動量を出力し、これらを試験結果と比較した。

### 5.1 サークル型防舷材の落錘式衝撃シミュレーション

試験当日の最高気温は32℃、最低気温は25.8℃であったことから、ここでは、環境温度を30℃と設定した数値シミュレーションを行い、重錘落下高さを100,200,300mmと変化させた場合の、変位-時間(図-14の(a))、衝撃荷重-時間(図-14の(b))の関係を調べた。

この図より、任意の環境温度におけるゴムの速度効果を導入した衝撃シミュレーションがほぼ実現できることが分かる。また、入力エネルギー(落下高さ)の違いによる防舷材の力学特性を最大変位量や衝撃荷重の変化傾向などから評価することが可能となる。

### 5.2 V型防舷材の落錘式衝撃シミュレーション

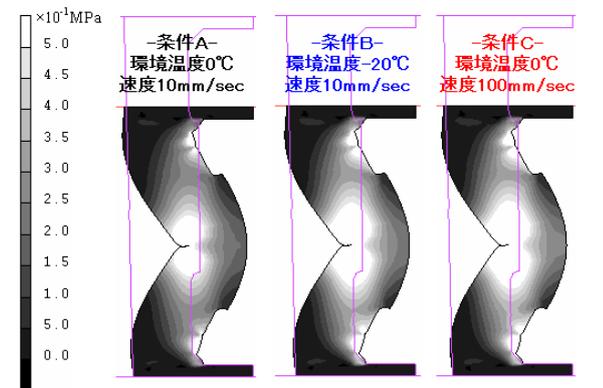
5.1と同様、V型防舷材についても、環境温度を30℃とし、重錘落下高さを100,200,400mmと変化させた場合の、変位-時間(図-15の(a))、衝撃荷重-時間(図-15の(b))の

関係について調べた。V型防舷材はサークル型防舷材と異なり、落下高さが増すと定反力ゾーンの反力値も上昇する。この図によれば、重錘落下高さが100mmの場合、高い精度でシミュレートできているものの、落下高さに応じた定反力ゾーンの反力値の変化が表現できていない。V型防舷材の圧縮変形プロセスは、サークル型防舷材と比較し形状または構造的な相違からより複雑となり、特に座屈現象後の重錘とゴム間における接触/非接触状況が再現できておらず、結果として防舷材の力学特性をうまく表現できない一因として挙げられる。

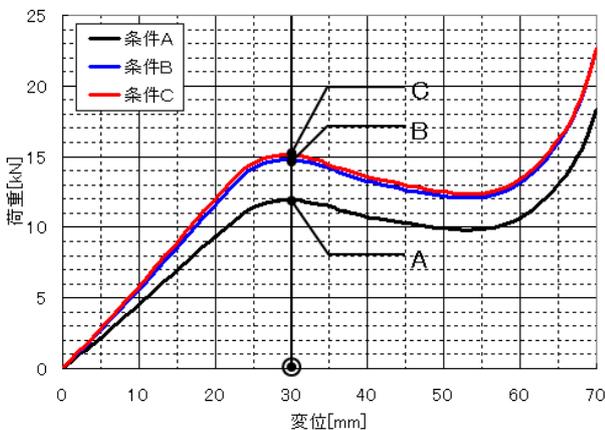
## 6. 防舷材の力学特性に関する考察

4. および5. では、環境温度と速度効果を考慮したゴム製防舷材の設計上特に重要となる、防舷材の性能特性(荷重-変位特性、および荷重履歴、変位履歴)について考察を行った。

ここでは、防舷材の内部的な力学特性について更なる検討を行うため、ゴムと載荷板間の接触状況の表現が比較的容易なサークル型防舷材を例に、一定速度載荷試験(CV方式試験)と落錘式衝撃試験(DV方式試験)のシミュレーション結果について、荷重と変位に加え、3.1の式(1)で述べたひずみエネルギー密度関数の分布に関する考察を行う。

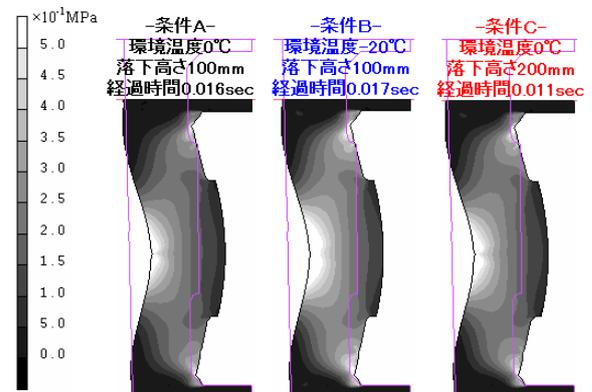


(a) ひずみエネルギー密度関数の分布 (CV方式)

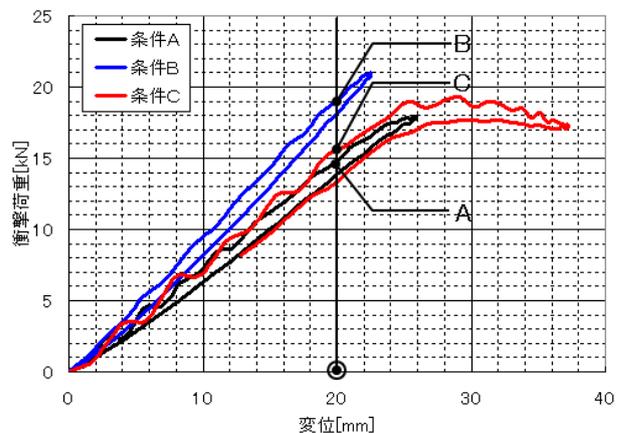


(b) 荷重-変位関係 (CV方式)

図-16 一定速度載荷シミュレーションの結果比較



(a) ひずみエネルギー密度関数の分布 (DV方式)



(b) 衝撃荷重-変位関係 (DV方式)

図-17 落錘式衝撃シミュレーションの結果比較

ここではまず、サークル型防舷材について、環境温度(-20,0)と载荷速度(10,100mm/sec)を変えたA,B,C(図-16の(a)を参照)の3条件に対し、一定速度载荷試験(CV方式試験)の数値計算による比較検討を行った。

図-16の(b)の荷重-変位関係によれば、いずれの条件でも変位がほぼ30mmのときに荷重が最大値を示すことから、変位が30mmになる点を計算結果の評価点とした。評価点における条件B,Cの特性は、ほぼ一致しているものの、わずかに条件Cの値が大きいので、荷重値は大きい方から、条件C,B,Aの順に並ぶ。一方、図-16の(a)は、評価点におけるひずみエネルギー密度関数の分布であり、コンターバンドは、最小値(黒)0から最大値(白)0.5MPaまでの範囲を10段階表示している。条件Aの分布は、他の条件に比べ低い値を示していること、条件BとCの分布がほぼ一致していることなどが確認できる。

次に、同じサークル型防舷材について、環境温度(-20,0)と落下高さ(100,200mm)(衝突初速度1400,1980mm/sec相当)を変えたA,B,C(図-17の(a)を参照)の3条件に対し、落錘式衝撃試験(DV方式試験)の数値計算による比較検討を行った。

図-17の(b)の衝撃荷重-変位関係より、条件Bの最大変位は25mmを下回るため、ここでは、防舷材が衝撃を受け初めて変位が20mmになる点を計算結果の評価点とした。図-17の(a)は、CV方式の場合と同様、ひずみエネルギー密度分布を最小値(黒)0から最大値(白)0.5MPaまでの範囲を10段階表示している。評価点において条件AとCを比較した場合、図-17の(b)から衝撃荷重はほぼ一致していることが示されている。このことは、図-17の(a)のひずみエネルギー密度関数の分布を両者間で比較しても、ほとんど差がないことから確認できる。

以上の考察により、本研究で提案されたゴムの材料構成則(3.1で示したゴム材料のモデル化)が、温度効果と速度効果を考慮した防舷材に対する一連のシミュレーションにおいて、正しく反映されていることが確認できた。

## 7. 結論

本研究は、ゴムの温度効果と速度効果を考慮した防舷材の力学的特性を調べるために、一定速度载荷試験および落錘式衝撃試験に関する圧縮変形プロセスシミュレーションを行い、試験と解析の両面から検証を行った。本研究により得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 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を新たに考案し、その有用性について、環境温度を-20℃と40℃としたシリンダー型試験片の一定速度载荷試験のシミュレーションで検証した。計算結果よりゴムの速度効果を考慮した計算が概ね可能であることが確認できた。
- (2) 防舷材の一定速度载荷試験のシミュレーションでは、シリンダー型試験片と同様に、環境温度を-20℃と40℃と仮定し、サークル型とV型の2タイプの防舷材を例

に計算を行った。荷重-変位の関係の比較により、初期状態から座屈後の非線形応答領域まで、良好なシミュレーション結果を得た。

- (3) 防舷材の落錘式衝撃試験のシミュレーションでは、サークル型とV型の2タイプの防舷材を例に、環境温度を30℃と仮定し計算を行った。時間-変位の関係については、試験で得られた傾向を高い精度で追従できることが確認できた。時間-衝撃荷重の関係については、V型で若干傾向の違いが見られたものの、重錘落下高さに応じた防舷材の力学的特性の表現が概ね可能であることが分かった。
- (4) V型防舷材の衝撃応答シミュレーションをより高い精度で行うためには、刻々と変化する接触および変形状況に追従できるモデル化が不可欠と思われる。
- (5) サークル型防舷材に対する、CVおよびDV方式試験シミュレーションにおけるひずみエネルギー密度分布の比較より、ゴムの構成則が正しく機能していることが分かった。

本研究で示した解析手法(3.1のゴム材料のモデル化、および3.2の有限要素モデル)により、ゴムの温度効果と速度効果が正しく反映されていることが、一連の計算結果により認められた。

以上の知見を踏まえ、今後は、サークル型、V型以外の防舷材についてもシミュレーションを行い、より精度の高い解析手法の確立に向け検討をすすめる予定である。

## 参考文献

- 1) Oliver A. Shergold, Norman A Fleck, Darren Radford, The uniaxial stress versus strain response of pig skin and silicone rubber at low and high strain rates, International Journal of Impact Engineering 32(2006) 1384-1402
- 2) Michelle S. Hoo Fatt, Xin Ouyang, Integral-based constitutive equation for rubber at high strain rates, International Journal of Solids and structures 44(2007) 6491-6506
- 3) 上田茂, 白石悟, 丸山忠明, 上園昇, 高崎守, 山瀬晴義: 浮体橋に使用する係留用ゴムフェンダーの特性, 第14回海洋工学シンポジウム平成10年7月16日, 17日
- 4) 下園征史, 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
- 5) 構造工学シリーズ6 構造物の衝撃挙動と設計法, 社団法人 土木学会発行, 1994.1
- 6) 下園征史, 園田佳巨, 玉井宏樹, 西本安志: 積層繊維補強ゴム緩衝材の衝撃破壊特性に関する解析的研究, 構造工学論文集 Vol.52A, pp1201-1208, 2006.3
- 7) 小石正隆 他: ゴムの FEM 解析のためのひずみと応力入門, ゴムの FEM 解析(基礎から最新の話まで), ゴムの力学入門コース 2007(関東・関西)  
(2007年9月18日受付)