

(36) 環境温度および速度効果を考慮したゴム製防舷材の数値解析手法に関する考察

A study about numeric analysis 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

*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)

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

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. 近年の船舶の大型化に伴い, 衝撃緩衝効果に優れたゴム製の防舷材が主に用いられ, 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.

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^{1),2),3)}, 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と考えられる. 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. しかしながら, これらの要因を試験的に評価することは多大な労力とコストが必要となり, 現実的に困難であると言わざるを得ない.

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と落錘式衝撃試験に対応する数値シミュレーションを行うことで, 防舷材の力学的特性を数値解析手法により予測可能かについて検証を試みた.

2. ゴム製防舷材の温度効果と速度効果に関する試験

2.1 サークル型防舷材の一定速度載荷試験

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 に示すサークル型防舷材に対し, 環境温度を -20°C および 40°C とした場合の一定速度載荷試験を行った. ここでは, 十分静的とみなせる速度 ($=0.08\text{mm/sec}=5\text{mm/min}$,

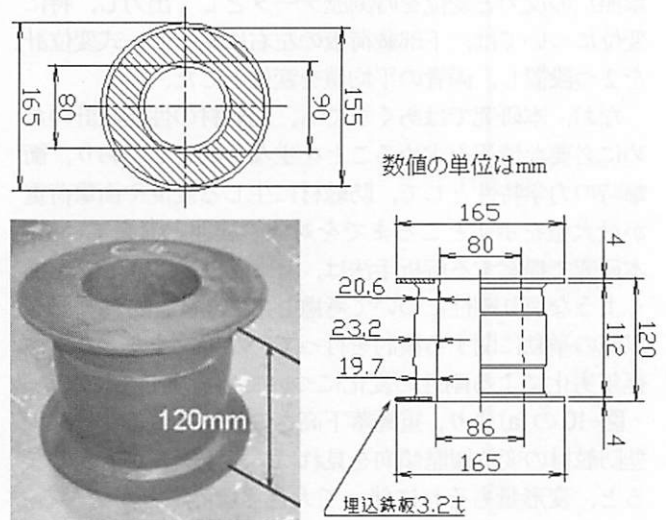


図-1 サークル型防舷材

ひずみ速度 $0.01/\text{sec}$ 相当) を載荷した場合から, 比較的大きな速度 ($=10\text{mm/sec}$, ひずみ速度 $0.08\sim 0.1/\text{sec}$ 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, 過去の文献⁴⁾を参照し, 載荷速度をひずみ速度に換算した値が $0.01/\text{sec}$ 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.

ここでは, 環境温度を -20°C および 40°C とした場合の, サークル型防舷材に対する一定速度載荷試験の結果を示す (図-7 の (a), (b) を参照). 各試験における変位と荷重は, 一定速度載荷試験における上部載荷板 (図-6 参照) に生じる反力と変位に対応している.

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座屈が生じ, 図-7 の (a) 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, 反力の

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、明確な定反力ゾーンが見られなくなる。また、载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 サークル型防舷材の落錘式衝撃試験

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を実施した。なお、当日の福岡の最高気温は32℃、最低気温は25.8℃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。

サークル型防舷材に対する、落錘式衝撃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)に示す。試験における変位と荷重は、上部載荷板(図-6参照)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対象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おらず、特にピーク以降の挙動に関する検討を行っていない。また、ゴムの経年劣化による剛性の変化についても考慮していない。

図-10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、変形量もそれに伴って大きくなる事が分かる。また、図-10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にくいことも確認できる。

表-1 重錘落下高さとの初速度の関係

入力エネルギー kN×mm	重錘質量 kg	
	200	
	重錘落下高さ mm	衝突初速度 mm/sec
196	100	1400
392	200	1980
588	300	2425

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行うために、前章の

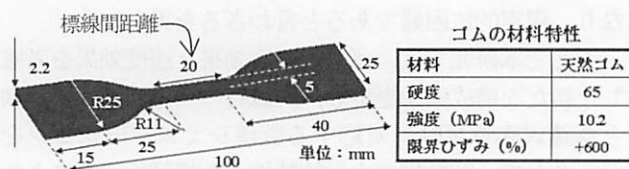
一定速度载荷試験に対する数値シミュレーションを試みた。本研究では、一連の計算に汎用非線形構造解析プログラム Marc2005r3 を使用しており、防舷材の圧縮プロセスにおいて懸念される座屈や自己接触などの非線形性の高い現象については、高精度のシミュレーションを実現するための要素分割や接触条件の検討を試みた。以下に本研究のために考案した数値解析モデルについて説明する。

3.1 温度効果と速度効果を考慮したゴム材料モデル

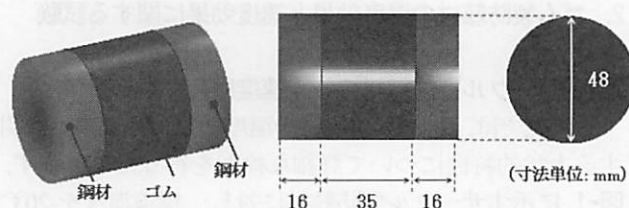
防舷材の主材料であるゴムは、高分子材料であるため、温度の影響を受けやすい。年間を通じ温度差が大きな使用環境下では、緩衝材としての性能は大きく変化することが予想される。また、船舶と岸壁の間に緩衝材として用いられる防舷材は、圧縮変形しながら衝撃力を緩和する。そのため、ゴムの使用環境を想定した温度と高速圧縮された場合の速度という両者の効果を十分配慮した設計を実施しなければ、防舷材が本来有する緩衝性能を正しく評価しているとは言い難い。

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℃と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(図-2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ドラー型試験片(図-2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、载荷速度を引張の場合は標線間距離20mm、圧縮の場合は全試験片厚さ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。



(a) 引張試験片



(b) 圧縮試験片

図-2 単軸試験片概要図

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⁵⁾⁶⁾と同じく、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。前述の応力-ひずみ特性は、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でおり、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、ひずみエネルギー密度関数として3つの定数を有す Mooney-Rivlin 式 (1) (Signiorini 形式) を採用し、試験データの同定を試みた。図-3 に、静的载荷状態 (温度-20, 40°C) における応力-ひずみ特性の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

表-1 にひずみ速度と Mooney-Rivlin 定数の関係を、図-4 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°C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、局所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-7 参照) 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-5 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~40°Cを 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⁷⁾により、要素の積分点単位で求め

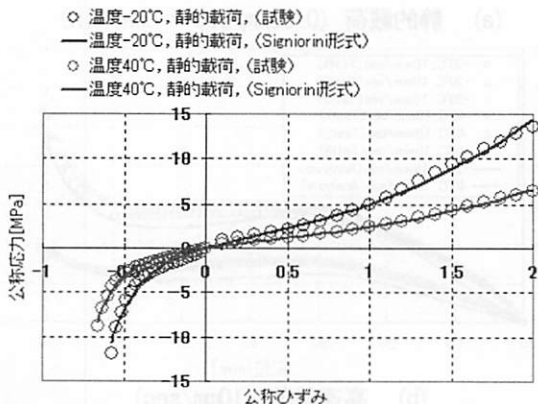


図-3 応力-ひずみ特性のカーブフィッティング

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

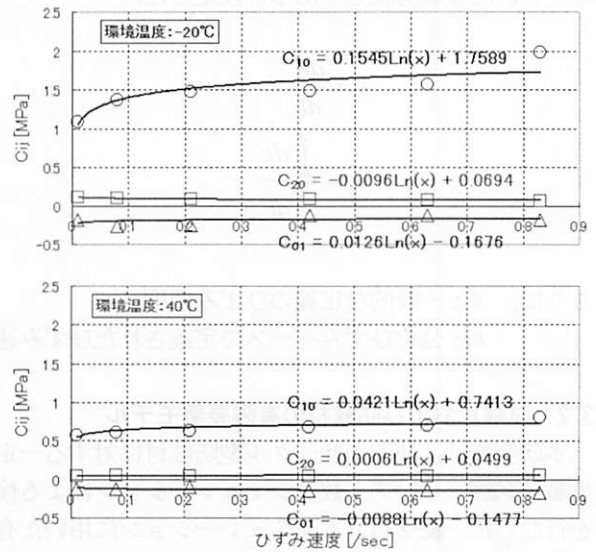


図-4 Mooney-Rivlin 定数のカーブフィッティング

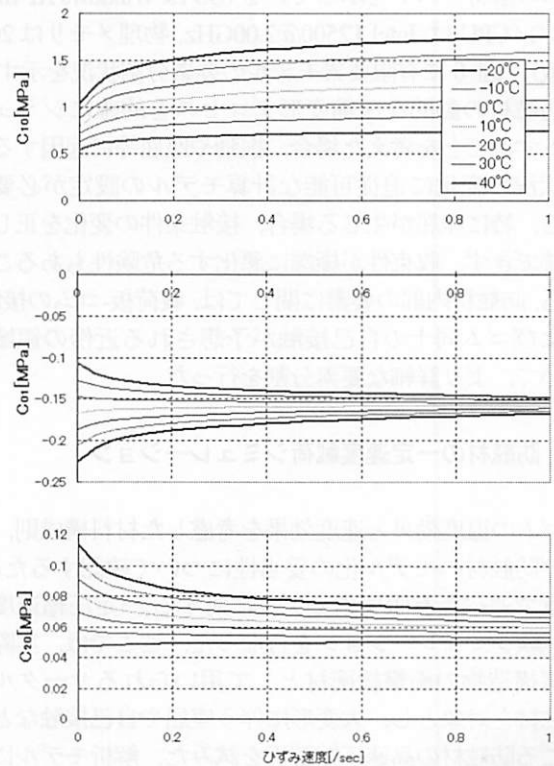


図-5 Mooney-Rivlin 定数-ひずみ速度の関係

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、前述のように材料試験のひずみ速度が载荷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、このとき静的な载荷状態であると仮定した。

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt}$$

$$\dot{\epsilon}_n = \frac{\int_0^{\epsilon} d\epsilon}{\int_0^t dt} \quad (2)$$

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

3.2 試験片および防舷材の有限要素モデル

本研究では、前述のサークル型防舷材に対する一定速度载荷試験について、数値シミュレーションによる検討を行なった。表-2は、本シミュレーションに用いた有限要素モデルに関する諸元であり、計算時間の項目は、温度および速度の条件を、-20℃かつ静的载荷状態としたケースの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-6に有限要素モデルの要素分割状況を示す。

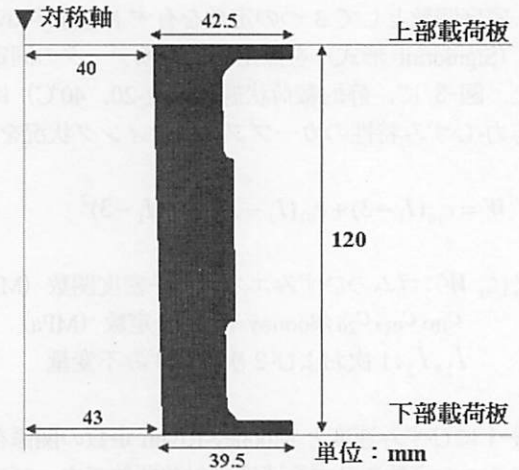
防舷材の動的な圧縮変形プロセスを的確にシミュレートすることを考えた場合、振動や座屈等に起因する接触状況の変化に追従可能な計算モデルの設定が必要となる。特に座屈が生じる場合、接触条件の変化を正しく追跡できず、収束性が極端に悪化する危険性もあることから、防舷材内部の要素に関しては、载荷板-ゴムの接触、およびゴム同士の自己接触が予想される近傍の領域について、より詳細な要素分割を行った。

4. 防舷材の一定速度载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、前章で述べた有限要素モデルに対する、一定圧縮速度载荷試験シミュレーションを行なった。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とし、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。解析モデルにおける荷重-変位の結果は、図-6に示す上部载荷板(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。

図-7の(a)と(b)より、静的载荷(0.08mm/sec=5mm/min)、高速载荷(10mm/sec)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、試験に比べ解析の反力が小さくなる傾向を示している。

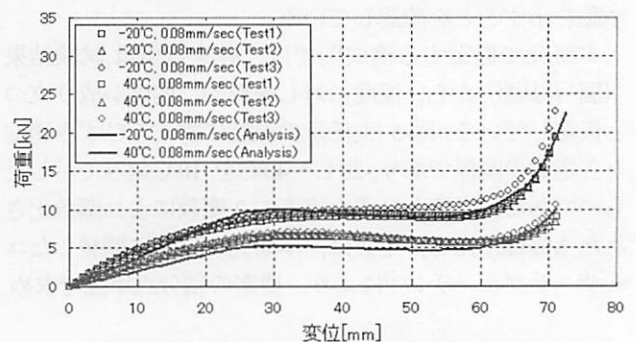


サークル型防舷材(軸対称)

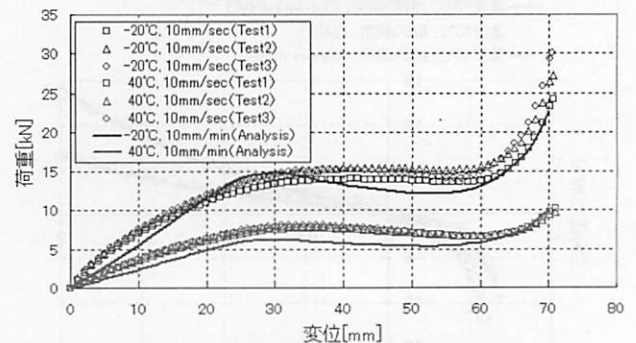
図-6 有限要素モデルの要素分割状況

表-2 有限要素モデル諸元

サークル型防舷材解析モデル諸元					
解析タイプ	要素タイプ	総節点数	総要素数	摩擦係数 (载荷板-ゴム)	計算時間 (圧縮率)
軸対称	4節点1次要素	1954	1801	$\mu=0.1$	1166sec (62.5%)



(a) 静的载荷 (0.08mm/sec = 5mm/min)



(b) 高速载荷 (10mm/sec)

図-7 荷重-変位特性の比較

また、ここでは、環境温度と载荷速度を変えた以下の3条件に対し、一定速度载荷試験の数値計算による比較検討を行った。

- A (環境温度：20℃，载荷速度：10mm/sec)
- B (環境温度：0℃，载荷速度：10mm/sec)
- C (環境温度：20℃，载荷速度：100mm/sec)

図-8の荷重-変位特性によれば、いずれの条件でも変位がほぼ30mmのときに荷重が最大となることから、このときの変位を計算結果の評価点と定めることとした。評価点における荷重値は、大きい方からB,C,Aの順に並ぶことが分かる。

一方、図-9は、評価点におけるひずみエネルギー密度分布であり、カラーコンターは、最小値(青)0から最大値(赤)0.5MPaまでの範囲を20段階でレベル表示している。分布図より、条件Bが最も高い値を示すことが把握できる。

以上より、環境温度と载荷速度が異なる場合、ゴム製防舷材内に生じるひずみエネルギー密度関数分布と荷重-変位特性との間に高い相関性も見られることから、本研究で提案したゴムの材料構成則が正しく機能していることが分かった。

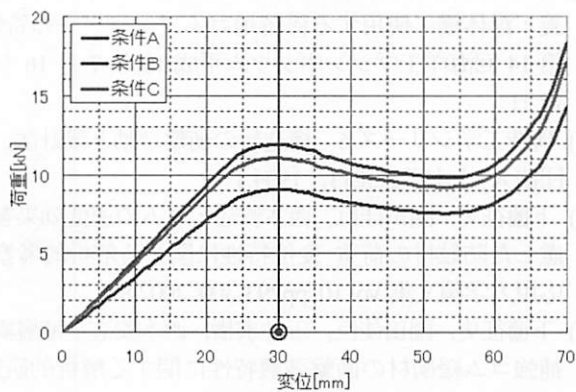


図-8 荷重-変位特性の比較

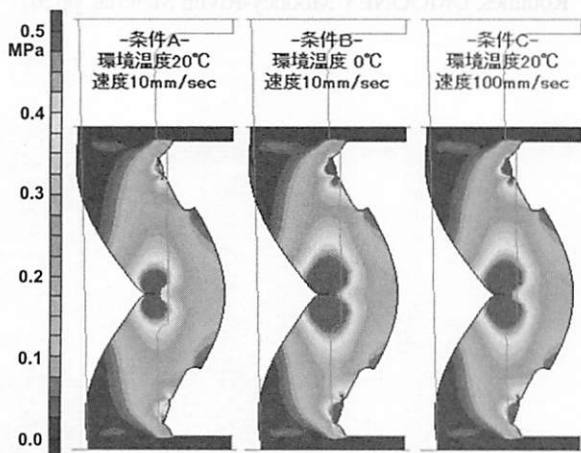


図-9 ひずみエネルギー密度関数分布の比較

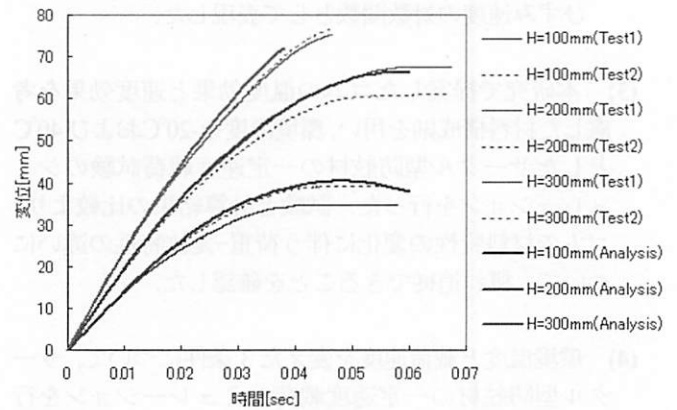
5. 防舷材の落錘式衝撃試験シミュレーション

防舷材の一定速度载荷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、载荷速度が刻々と変化する力学的特性は非常に重要となる。

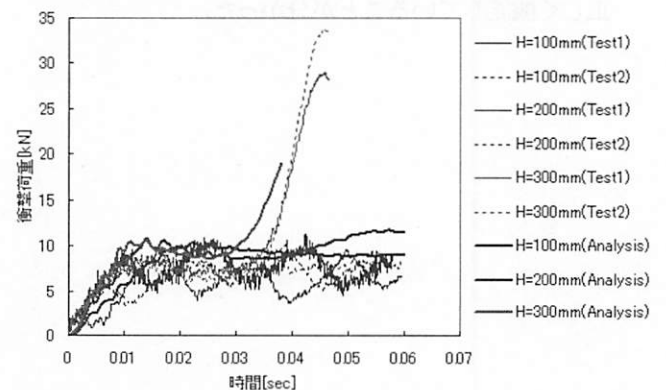
ここでは、本稿で述べた解析手法を、任意の環境温度を想定した衝撃現象に適用する場合について検討をすすめた。防舷材の衝撃解析で得られる衝撃荷重と変位の時刻歴は、剛体として設定した上部载荷板(重錘)における反力と移動量を出力し、これらを試験結果と比較した。

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、衝撃荷重-時間(図-10の(a)と(b))の関係をそれぞれ調べた。

本図より、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。



(a) 変位-時間関係



(b) 衝撃荷重-時間関係

図-10 落錘式衝撃シミュレーション結果

6. 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、一定速度載荷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。本研究より得られた知見をまとめると以下ようになる。

- (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提案するため、単軸の圧縮と引張の材料試験を行い、それぞれ異なる試験片より得られた試験データを用いた。
- (2) 試験より得られた荷重-変位特性データを整理し、以下のようなゴムの材料特性に対する同定を試みた。
 - a) 低温になるほど反力は増大し、環境温度と反力がほぼ線形的な関係を示すことから、各材料定数 (Mooney-Rivlin 定数) を、温度の1次関数として仮定した。
 - b) ひずみ速度が大きくなるほど反力は増大するものの、ある限界値に漸近すると仮定し、各材料定数をひずみ速度の対数関数として表現した。
- (3) 本研究で提案したゴムの温度効果と速度効果を考慮した材料構成則を用い、環境温度を -20°C および 40°C としたサークル型防舷材の一定速度載荷試験のシミュレーションを行った。試験と計算結果の比較より、ゴムの材料特性の変化に伴う荷重-変位特性の違いについて、概ね追従できることを確認した。
- (4) 環境温度と載荷速度を変えた3条件について、サークル型防舷材の一定速度載荷シミュレーションを行った。荷重-変位特性とひずみエネルギー密度関数分布の比較より、本研究で提案したゴムの材料構成則が正しく機能していることが分かった。

- (5) 防舷材の落錘式衝撃試験のシミュレーションでは、サークル型防舷材を例に、環境温度を 30°C と仮定した計算を行った。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、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。

以上の知見を踏まえ、今後は、他のタイプおよびサイズのゴム製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) 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
- 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, 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) MSC.Marc, Volume D: User Subroutines and Special Routines, UMOONEY Mooney-Rivlin Material. pp267