

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

An Analytical Study on the Dynamic Constitutive Law of Rubber Fender Considering Strain Rate Effect

下藺征史*, 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) シンバタ工業株式会社, 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 from the colliding accident, rubber fenders are usually installed on the quay berth. There are various shapes and degrees of stiffness of rubber fenders and they are selected by specified static energy absorbing capacity. However their design method is going to be revised by the concept of performance based design in the near future. According to new design concept, energy absorbing capacity of rubber fender should be estimated by considering impact velocity of colliding vessel. Therefore, main objectives of this study are to investigate strain rate effect of rubber material, and to simulate dynamic behavior of rubber fender with strain rate effect. To achieve these objectives, dynamic constitutive law of rubber material is considered by experimental results, and dynamic response of rubber fenders are conducted by 3-dimensional nonlinear finite element method.

Key Words: Rubber Fender, Strain Rate Effect, Dynamic Analysis

1. 緒言

ゴムは、剛性が小さく可逆的な大変形が可能であり、高い粘弾性を有するためエネルギー吸収性能に優れることなどから、古くから衝撃緩衝材として広く用いられている。しかしながら、ゴムは速度依存性を有し、載荷速度が速くなると剛性が大きくなることなどが知られており^{1),2),3)}、静的荷重下の力学特性だけを用いても、実現象を正確に再現することは困難である。今後、さまざまな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高速載荷時の力学特性を把握することは非常に重要であるといえる。

例えば、船舶が岸壁に接岸する際に衝撃緩衝材として用いられる防舷材(写真-1)にも信頼性設計を適用した性能設計法の導入が検討されている。これは、現在の防舷材の設計が、静的圧縮試験で得られた吸収エネルギー量を用いて行われているのに対し、実際の船の接岸速度に応じた速さで圧縮された際の吸収エネルギー量で性能を評価し、設計しようというものである。このため、接岸速度に応じた動的圧縮時の性能を評価する手法が必要となる。

ここで、防舷材の速度効果を試験的に確認するには、試験機の規模や性能の制約があり、実寸レベルでの評価は非

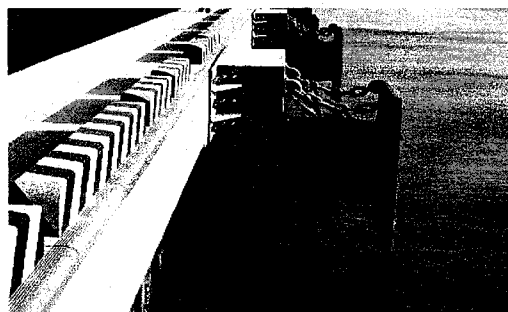


写真-1 防舷材の設置例

常に困難であり、有限要素解析などによる数値シミュレーションを用いた評価が不可欠となる。ゴムの数値シミュレーションに関しては、これまでにタイヤやゴム支承、積層繊維補強ゴムなどに対して数多く実施されている。例えば、中島らは、有限要素解析に最適化技術を組合せ、転がり抵抗を最小にするタイヤ形状の最適化の研究を行っている⁴⁾。また、吉田らは、積層ゴム支承に対する3次元有限要素解析モデルを提案しており、多軸載荷試験に関するシミュレーションを高い精度で実現している⁵⁾。一方、著者らはこれまでに、積層繊維補強ゴム緩衝材の母材に用いられるゴムの動的な特性として、簡易に静的解析に用いる

Mooney-Rivlin 定数を一律 2 倍することで衝撃試験結果を良好に予測できることを確認している⁹⁾。しかし、従来の研究では、ゴムの速度効果を構成則に導入し、防舷材の座屈挙動のような大変形に至るまでの動的挙動に対する計算は試みられていない。

そこで本研究では、ゴムの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に対する数値シミュレーションを行い、ゴムの速度依存性を考慮した設計に必要な動的荷重-変位特性を数値計算により求めることが可能か検証することを主な目的とした。

材料の時間的変化を論ずる場合、まず、粘弾性材料モデルを仮定したアプローチが一般的手法として考えられる。しかし、衝撃緩衝材として用いられるゴムには、高速かつ大変形といった 2 つの課題が同時に伴うため、通常の粘弾性材料で考えるひずみ・ひずみ速度のレンジを遥かに超えた材料モデルの取扱いが必要となる。

そこで、本研究では防舷材に一定の載荷速度を与える試験 (Constant Velocity 方式試験⁷⁾) のシミュレーションを目的として、材料試験結果から求めた動的構成則を用いた数値計算によって、防舷材の動的荷重-変位特性の予測を試みた。

2. ゴム製緩衝材の速度効果に関する試験

本研究では、防舷材の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、3 種類のゴム製緩衝材に対し、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 5mm/min (ひずみ速度 8.57×10^{-3} /sec 相当) を載荷した場合から、比較的大きな速度 (ひずみ速度 1.0/sec 程度) を載荷した場合における荷重-変位関係の比較を行い、ゴムの有する速度効果を試験的に確認した。

2.1 矩形状ゴム試験片による速度効果の確認

ここでは、縦横高さの寸法が $150 \times 150 \times 50$ mm の矩形状ゴムブロック試験片を用いて、一定速度載荷試験を行った。図-1 より、高速載荷の方が静的載荷よりも荷重が高くなる傾向を示している。全般的に、載荷速度に関わらず、圧縮量が 15mm (圧縮率 30%) 近くになると、応力-ひずみ関係が変化し、線形領域から荷重が急激に上昇するハードニング領域に移行するという傾向がみられる。

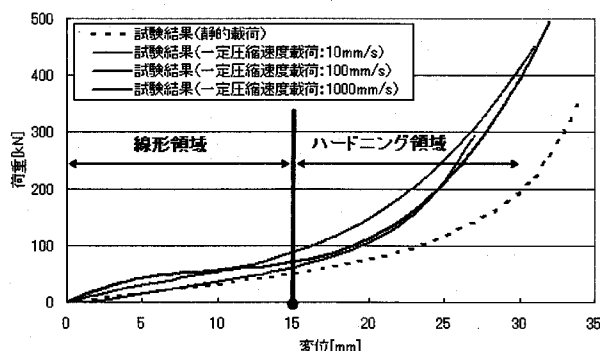


図-1 矩形状試験片の荷重-変位の関係

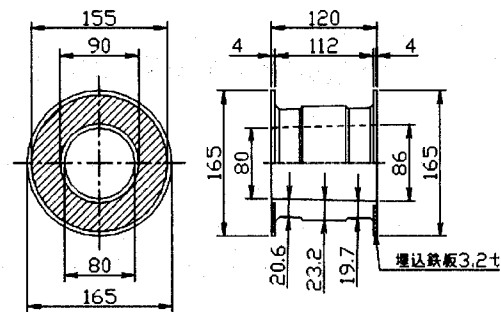


図-2(a) サークル型防舷材

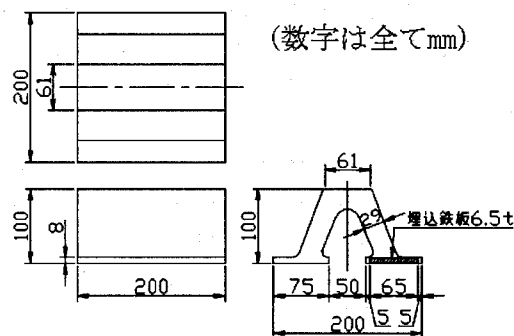


図-2(b) V型防舷材

図-2 防舷材概要図

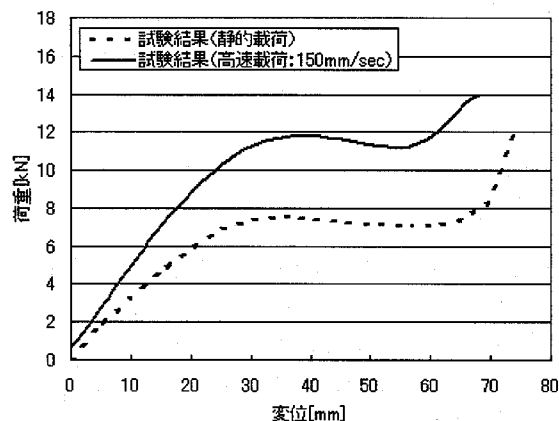


図-3 サークル型防舷材の荷重-変位の関係

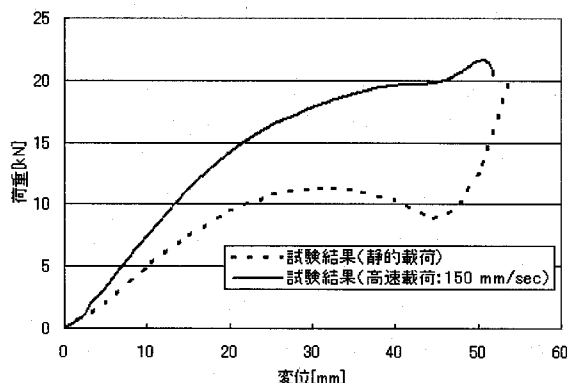


図-4 V型防舷材の荷重-変位の関係

2.2 防舷材の速度効果の確認

2.1では、ゴムがブロック状の場合、圧縮ひずみがあるレベルを超えるとハードニング特性が現れることを確認した。ここでは、サークル型(図-2(a))とV型(図-2(b))の防舷材を用いた一定速度載荷試験の結果を示す。

一般の防舷材では通常、圧縮変形がある程度進行すると座屈が生じ、図-3や図-4の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、圧縮速度が大きくなると、サークル型やV型では、明確な定反力ゾーンが見られなくなる。また、載荷速度が大きくなると、矩形状試験片で見られたのと同様に、定反力ゾーンに移るまでの防舷材の初期剛性値は高く、定反力ゾーンにおける反力値自体も上昇することが分かる。

3. 防舷材の解析モデル

ゴムの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で行った試験に関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、防舷材のように要素に大きなひずみが生じ、座屈や自己接触などの非線形性の高い現象に対して精度良く計算を行うための適切な機能を用いた。以下に本研究に用いた数値解析モデルについて説明する。

3.1 速度効果を考慮したゴム材料のモデル化

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ことから、ゴムが圧縮された場合の速度効果を十分配慮した設計を行わなければ、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えない。

そこで本研究では、ゴムが有する速度効果を考慮した材料特性を試験的に把握するために、図-6に示す硬度65の総ゴムで成形された2つの試験片に対し、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、図-6(a)のJIS規格に準じたダンベル型試験片を採用し、圧縮試験については、図-6(b)に示す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。

ゴムの材料特性を正しく評価するには、単軸、純せん断、二軸の3種類の引張試験を行う必要があることが、山下らの研究⁷⁾などで述べられている。しかしながら、純せん断と二軸引張試験は試験装置が非常に高価であるだけでなく、これらに関する速度効果を考慮した試験を高精度で行うのは現実的に不可能と考えられる。

単軸試験であれば、速度効果を考慮した信頼性の高い試験を行うことは可能である。ここでは、特に圧縮側の試験片については、横ひずみで膨らんだ場合においても載荷板等に接触しないように配慮しており、ゴム自体の圧縮特性の速度効果を評価できるよう工夫している。

なお本研究では、載荷速度を初期試験片長さ(引張: 20mm, 圧縮: 35mm)で除して得られるひずみ速度を、速度効果の尺度として用いた。図-7に、 $8.57 \times 10^{-3}/\text{sec}$ から $0.829/\text{sec}$ に至る7段階のひずみ速度に対するゴムの応力-ひずみ関係を示す。ここではひずみの値の範囲を、-0.6(圧縮)~2.0(引張)と定めているが、これは予備検討解析によって、後述する防舷材(サークル型、V型)に発生するひずみがこの範囲内になることを確認して決定したものである。

速度効果を考慮したゴムの構成則を考案するために、一般的な取扱いに準じてゴムを超弾性材料と仮定し、材料に適切なひずみエネルギー密度関数を求めるための検討を行った。図-7の応力-ひずみ特性を得るために、圧縮域にはシリンダー型試験片、引張域にはダンベル型試験片の異なる試験から得られた2種類の試験データを原点で繋いでいる。その結果、応力-ひずみ曲線は、変曲点を多く有する複雑な曲線となり、低次パラメータモデルによる材料同定を行った場合、カーブフィッティングの精度が悪くなることが予想される。

そこで本研究では、図-7の圧縮-引張両域におけるS字状の応力-ひずみ特性をなるべく高精度で表現するために、エネルギー密度関数として5つの定数を有する Mooney-Rivlin 式(1) (James-Green-Simpson の3次不変量形式)を適用し、試験データの同定を試みた。

$$W = c_{10}(I_1 - 3) + c_{01}(I_2 - 3) + c_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + c_{20}(I_1 - 3)^2 + c_{30}(I_1 - 3)^3 \quad (1)$$

ここに、 $c_{10}, c_{01}, c_{11}, c_{20}, c_{30}$: Mooney-Rivlin 定数 (MPa)

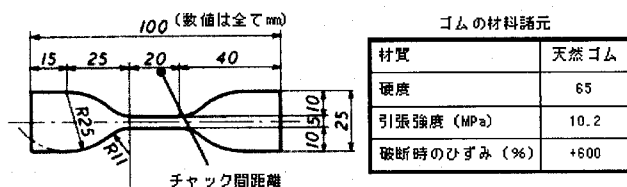


図-6(a) 引張試験片

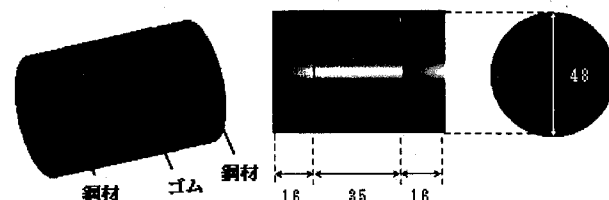


図-6(b) 圧縮試験片

図-6 試験片概要図

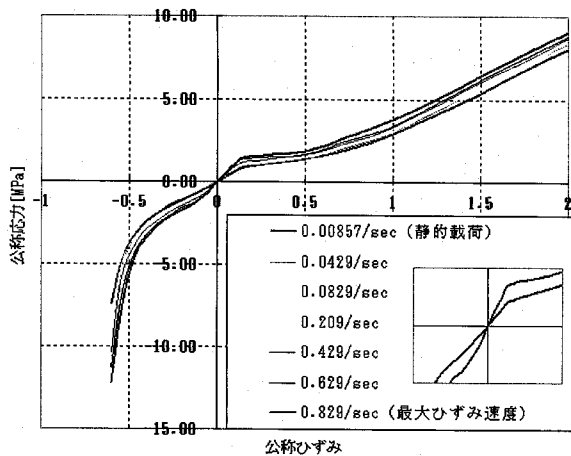


図-7 ゴムの材料特性 (応力-ひずみ関係)

表-1 ひずみ速度と Mooney-Rivlin 定数の関係

$\dot{\epsilon}$ (/sec)	c10	c01	c11	c20	c30
0.00857	0.861518	-0.24076	0.025697	0.021795	0.001613
0.0429	0.954932	-0.29587	0.034482	0.013085	0.002015
0.0829	1.01669	-0.32672	0.050554	-0.00517	0.00278
0.209	1.09186	-0.35852	0.066147	-0.0262	0.003815
0.429	1.25901	-0.44056	0.085454	-0.06533	0.006045
0.629	1.20761	-0.34486	0.076262	-0.04328	0.004875
0.829	1.31574	-0.38937	0.089267	-0.04853	0.004418

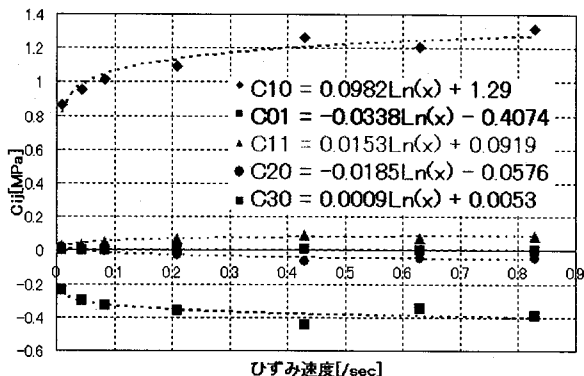


図-8 Mooney-Rivlin 定数のカーブフィッティング例

表-1 にひずみ速度と Mooney-Rivlin 定数の関係を、図-8 に表-1 の各材料定数を用いひずみ速度の対数関数でカーブフィッティングを行なった結果を示す。関数化された Mooney-Rivlin 定数は、本研究で新たに開発した自作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、材料特性の変化が表現される。

なお、本研究では、材料試験のひずみ速度が荷重速度を初期試験片長さ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するために、ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ は、式(2)で表わされる値として求めることにした。

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

なお、要素の積分点で計算されるひずみ速度に対して、試験装置の測定限界である荷重速度を、下限値 $8.57 \times 10^{-3}/\text{sec}$ と定義し、このとき静的な状態であると仮定した。

3.2 試験片および防舷材の有限要素モデル

本研究では、前述の試験片 (シリンダー型、矩形状)、および防舷材 (サークル型、V型) に対する一定速度荷重試験について、数値シミュレーションによる検討を行なった。表-2 は、各有限要素モデルに関する諸元についてまとめており、図-9(a),(b),(c),(d) は、各モデルに対する要素分割状況を示している。

今回対象とする防舷材の変形挙動のように、座屈現象が問題となる計算では、一時的かつ局所的に発生する大ひずみの取扱いが難しく、正しい接触条件の変化を追跡できずに収束性を極端に悪化させる可能性もある。そのため、防舷材内部の要素分割に関しては、荷重板-ゴムの接触、ゴム領域同士の自己接触が予想される箇所については、より細かい要素分割を行うなどの配慮を行った。

表-2 有限要素モデル諸元

モデル型式	試験片(ブロック)		防舷材	
	シリンダー	矩形状	サークル	V
解析モデル	軸対称	3次元(1/4対称)	軸対称	3次元(1/4対称)
要素タイプ	4節点軸対称	8節点ソリッド	4節点軸対称	8節点ソリッド
総節点数	262	637	1342	4718
総要素数	228 (12×19)	432 (6×6×12)	1214	3705 (285×13)
ゴム-荷重板の接触	接着	接触 ($\mu = 0.1$)	接触 ($\mu = 0.1$)	接触 ($\mu = 0$)

4. 防舷材の一定速度荷重シミュレーションおよび考察

ゴムの速度効果を考慮した解析モデル、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速度荷重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シングルステップフォーボルト法を用いた。本手法は、時間積分の際に高次の数値減衰を含んでおり、接触時のチャタリングを早期に防ぎ収束性を安定化させる効果がある。

各解析モデルにおける荷重-変位の結果は、荷重は下部荷重板の受ける反力、変位は上部荷重板の移動量としており、試験結果と解析結果の比較を行なった。

4.1 シリンダー型試験片の一定速度荷重シミュレーション

ここでは、ゴムの速度効果確認のために3.1の一定速度荷重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-10(a)にシリンダー型モデルの荷重-変位関係を示す。静的荷重 (0.3mm/sec)、高速荷重 (2.9, 29mm/sec) とともに、変位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すが、比較対象となる試験結果のばらつきと適用条件 (圧縮率 50~60%) を考えれば、ほぼ許容できるシミュレーション結果であると考えられる。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、速度効果を含む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。

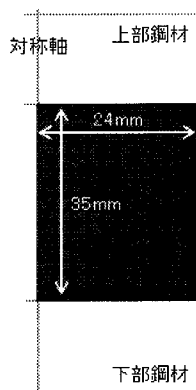


図-9(a) シリンダー型モデルの要素分割状況

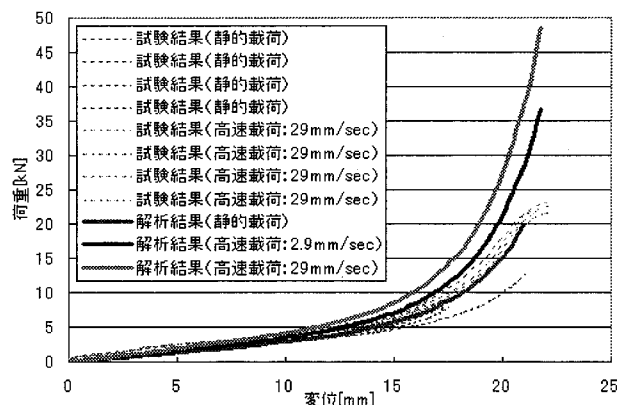


図-10(a) シリンダー型モデルの荷重-変位関係

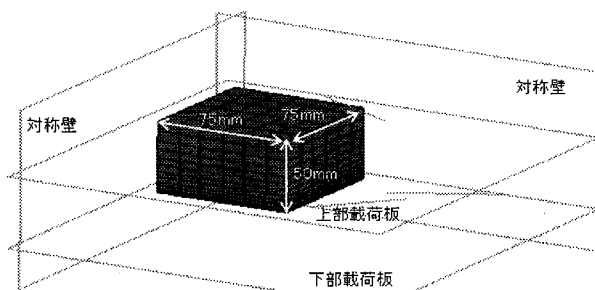


図-9(b) 矩形状モデルの要素分割状況

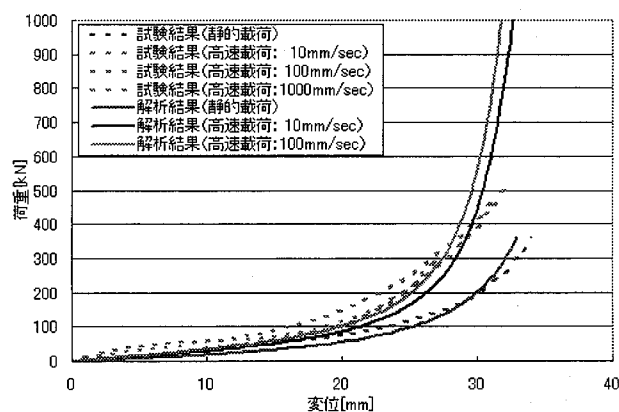


図-10(b) 矩形状モデルの荷重-変位関係

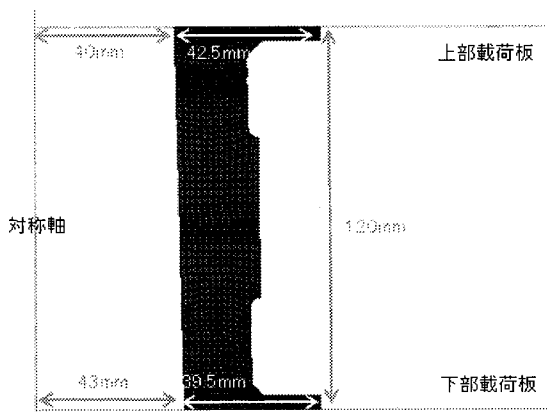


図-9(c) サークル型モデルの要素分割状況

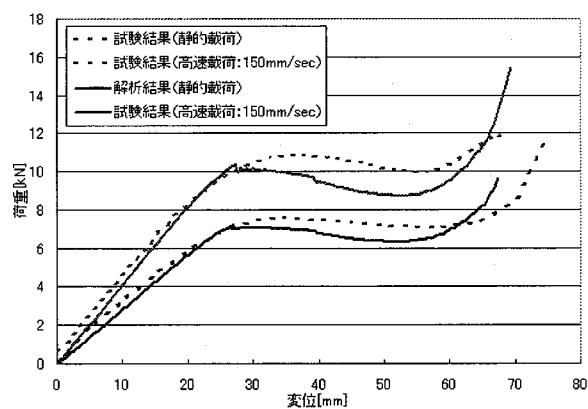


図-10(c) サークル型モデルの荷重-変位関係

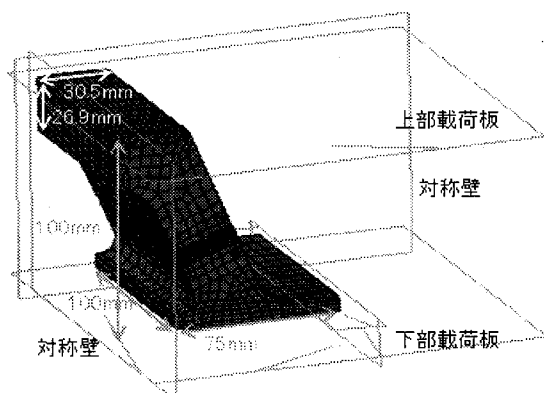


図-9(d) V型モデルの要素分割状況

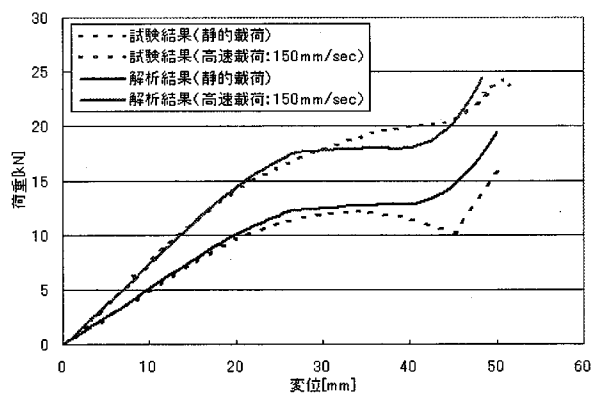


図-10(d) V型モデルの荷重-変位関係

4.2 矩形試験片の一定速度載荷シミュレーション

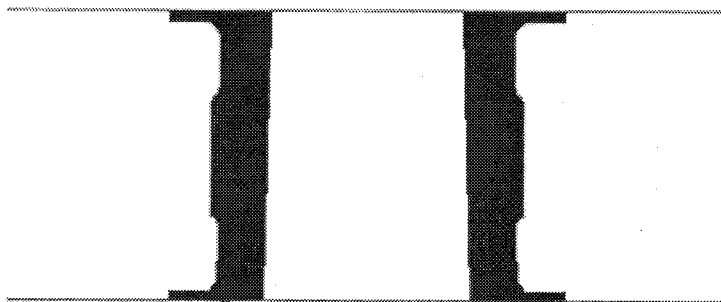
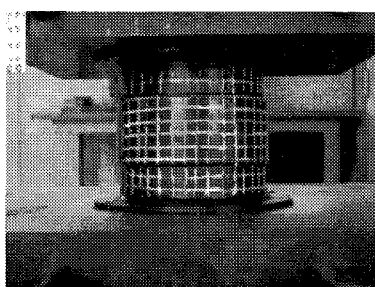
4.1 で確認したゴムの速度効果を考慮した材料特性を基に、ここでは矩形ゴムブロック試験片の速度効果を考慮した荷重-変位関係について解析を行った、なお、ゴム-載荷板間の摩擦係数 μ については、0.1 と仮定している。図-10(b)の矩形モデルの荷重-変位関係によれば、静的載荷(5mm/min)において良好なシミュレーション結果が得られていることが分かる。また、高速載荷の試験結果を見ると、載荷速度を10,100,1000mm/secと変化させても、目立った相違はないが、解析結果(載荷速度10,100mm/sec)は、静的載荷に比べ荷重が高くなる傾向が再現されていることが分かる。

4.3 サークル型防舷材の一定速度載荷シミュレーション

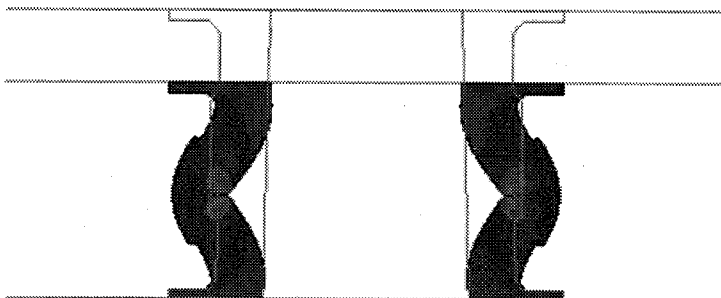
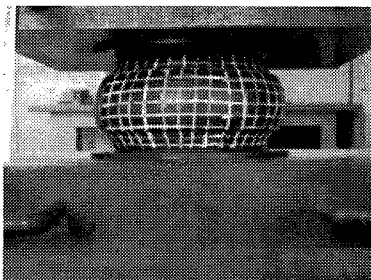
4.1 および4.2の数値シミュレーション結果から、本研究で提案する解析モデルを適用すれば、ゴム材の動的変形時の耐力特性について、定量的に信頼可能な結果を得ることができると考えられる。

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。

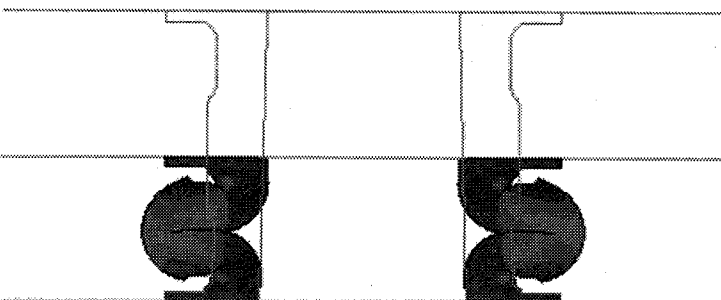
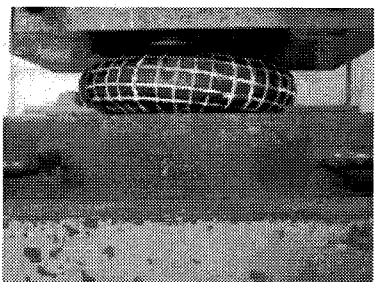
図-10(c)より、静的載荷(5mm/min)、高速載荷(150mm/sec)ともに、ゴムの速度効果による初期剛性の増加傾向を捉えていることが分かる。また、座屈が現れ始めてから荷重が一定となる定反力ゾーンについては、試験が解析値よりも小さくなる傾向を示している。図-11は、静的載荷におけるサークル型防舷材の変形プロセスを試験と解析の状況を並べ示している。試験結果から、座屈後も載荷板-ゴム間の接触が保たれているが、変形モードのバランスが失われ不安定になる様子が観察される。解析結果のカラーコンターは相当ひずみ分布を10段階表示したものであり、圧縮率50%(最大値1.443)の値を基準としている。



初期状態



圧縮率25%(変位30mm, 座屈開始)時の変形状態



圧縮率50%(変位60mm)時の変形状態

図-11 静的載荷におけるサークル型防舷材変形プロセス状況(カラーコンターは相当ひずみ分布)

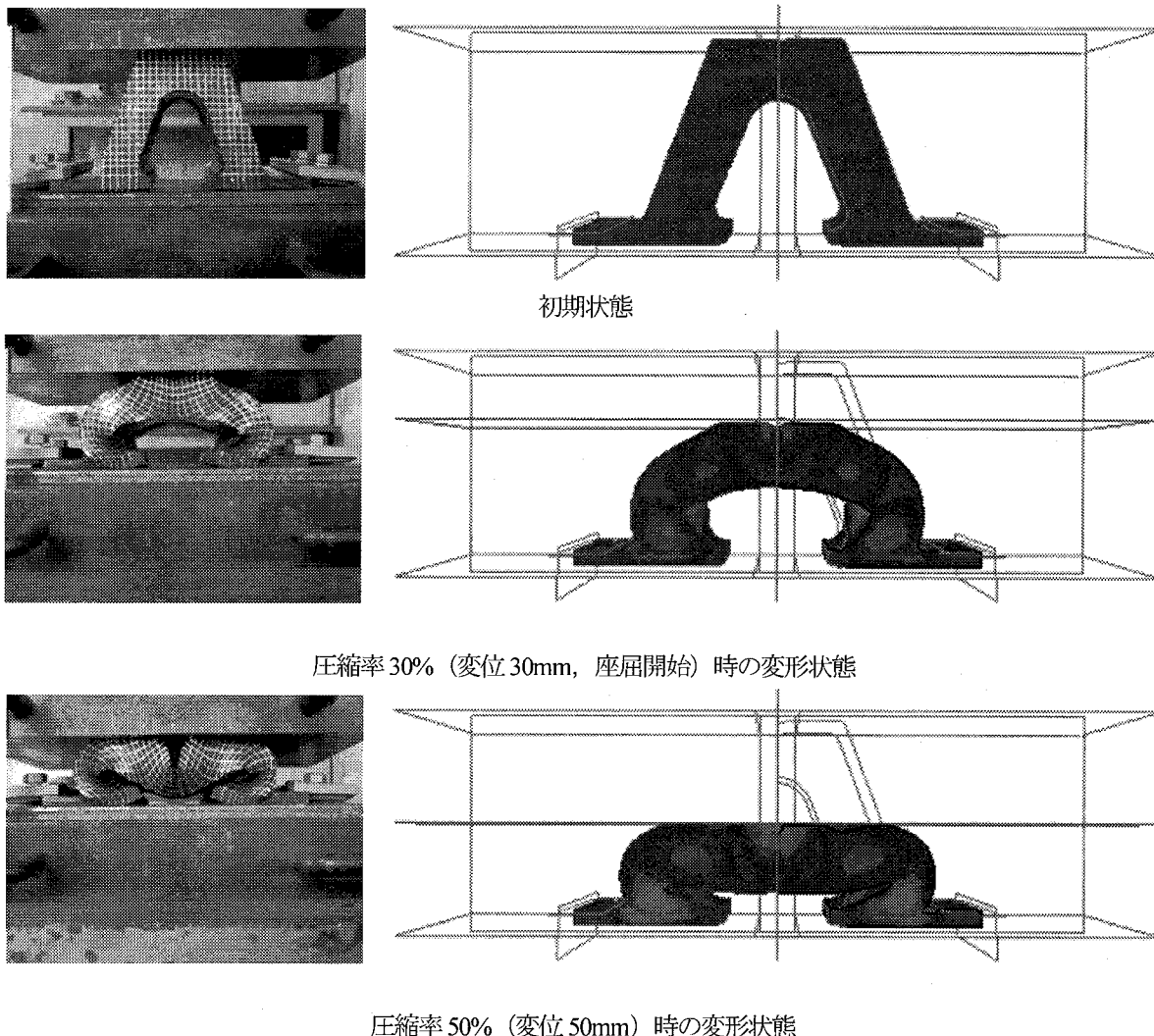


図-12 静的載荷におけるV型防舷材変形プロセス状況（カラーコンターは相当ひずみ分布）

4.4 V型防舷材の一定速度載荷シミュレーション

4.3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、一定速度で変形させた場合の変形挙動について検討を行なった。

図-10(d)によれば、4.3のサークル型防舷材の解析結果と同様に、静的載荷（5mm/min）、高速載荷（150mm/sec）の2ケースともに、初期剛性の変化を高い精度で再現できていることが分かる。また、V型防舷材の主な特徴として、座屈後に荷重がピーク近くになると、上部および下部の載荷板-ゴム間に隙間が現れ、ゴム材の自己接触状態が徐々に進行する。図-12の50%圧縮時におけるV型防舷材の変形状況を試験と解析で比較すると、試験では上部載荷板とゴムは完全に離れた状態であるが、解析ではわずかに離れたままであり、両者の変形モードに大きな相違がみられる。また、試験では定反力ゾーンを過ぎて荷重が若干低下するが、解析ではこの傾向を捉えきれていない。その主な原因としては、載荷板とゴムの間の摩擦特性を正確に表現でき

ていないことが考えられる。両者の接触状況の変化を正しく再現できるようにすることが、今後の課題であると考えられる。図-12の解析のカラーコンターは図-11と同じく、相当ひずみ分布を10段階表示したものであり、圧縮率50%（最大値1.284）の値を基準としている。

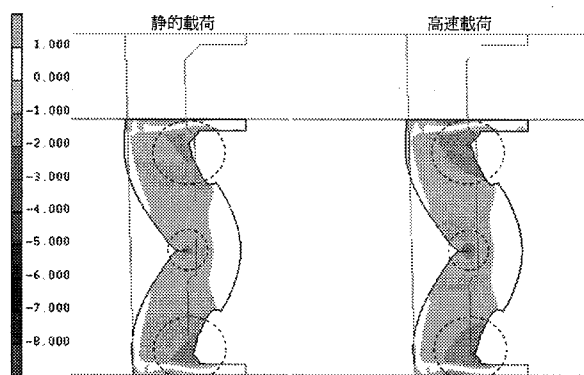


図-13 サークル型防舷材の平均応力分布(単位はMPa)

5. 結論

本研究は、ゴムの速度効果を考慮した防舷材の荷重-変位特性を解析的に求めるために、一定速度載荷による圧縮変形プロセスを試験と解析の両面から検証した。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、その有用性をシリンダー型試験片の一定速度載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) 矩形試験片の一定速度載荷試験のシミュレーションでは、ゴム-鋼材間の摩擦係数を 0.1 として計算を行った。ゴムの線形領域からハードニング領域に至る材料の基本的な特性について、速度効果を反映した結果を得ることができた。
- (3) 防舷材の一定載荷速度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。

本研究で提案された手法により、ゴムの速度効果が正しく反映されていることが、図-13 のサークル型防舷材の平均応力分布により確認できる。25%圧縮時(変位 30mm)における分布を静的載荷と高速載荷の場合で比較すると、特にひずみ速度が大きくなる湾曲部近傍において速度効果の影響が顕著に現れていることが分かる。

なお、圧縮変形プロセスについては、特に載荷板とゴム間に隙間が生じ非接触になると、試験と解析の間に大きな相違が生じた。防舷材の変形プロセスを精度良くシミュレートするためには、刻々と変化する接触および変形状況を十分に把握し、状況に応じた要素分割や接触条件を考慮する必要があることが確認できた。

以上の知見を踏まえ、今後は、防舷材のモデル化に関する更なる検討を行い、衝撃荷重を受けた場合の力学的挙動について研究を進める。また、防舷材の使用環境を考慮した場合、年間を通した温度差が大きいことから、ゴムの構成則に速度依存性に加えて温度依存性を考慮した検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 西本安志, 玉井弘樹, 園田佳巨, 別府万寿博, 彦坂熙: 積層繊維補強ゴムを用いた緩衝材の衝撃挙動に関する研究, 構造工学論文集 Vol.51A, pp1625-1634, 2005.3
- 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) Nakajima, Y., Kamegawa, T., and Abe, A., Theory of optimum tire contour and its application, Tire Science and Technology, TSTCA, Vol.24, No.3(1996), 184
- 5) 吉田純司, 阿部雅人, 藤野陽三: 高減衰積層ゴム支承の 3 次元有限要素解析, 土木学会論文集, No.717/I-61, pp37-52, 2002
- 6) 下藁征史, 園田佳巨, 玉井弘樹, 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) 池邊将光, 西本安志, 川上千歳, 下藁征史: 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
- 8) 山下義裕: ゴムの材料実験と力学特性, 計算工学 Vol.11, No.3 2006 pp10-15
- 9) MSC.Software: Marc2005r3 Volume D: User Subroutines and Special Routines

(2007 年 4 月 12 日受付)