

ゴム防舷材の設計法と試験法に関するガイドライン

Guideline for the design and testing of rubber marine fenders

秋山 斉*・泉妻 弘悦**・好田 拓朗***・中垣 政則****・丸山 達弥*****
元水 佑介*****・山本 修司*****

Hitoshi Akiyama*・Hiroyoshi Izunome**・Hiroaki Kouda***・Masanori Nakagaki****・Tatsuya Maruyama*****
Yusuke Motomizu*****・Shuji Yamamoto*****

- * (株)ブリヂストン インフラ資材開発部 兼 大阪大学工学研究科博士課程後期
- ** 榊明治ゴム化成 技術部
- *** シバタ工業 技術部
- **** 西武ポリマ化成(株) 技術部
- ***** 住友ゴム工業(株) インフラビジネスチーム
- ***** (一財) 沿岸技術研究センター 調査部 研究員
- ***** (一財) 沿岸技術研究センター 参与

The practical guideline for the design and testing of rubber marine fender are made in order to organize appropriate methods into the reasonable procedures. Despite the fact that the range of rubber marine fender is as wide from 100mm to 3000mm in heights, the currently available design guidelines don't take care of the difference of design according to the size of fender and the background of berthing facility. So, the design and testing sometimes requires too much process or sometimes are considered insufficient. It could cause inconsistency between the procedure in Japan and in other countries. The authors defined the grades of fender design according to the sizes and design backgrounds. Also, the test requirements and procedures are graded according to the purpose. The practical design steps and test procedures in each category are explained in detail.

Key Words: *rubber fender, fender design, fender test*

1. はじめに

ゴム防舷材とは接岸する船舶の接岸エネルギーを吸収する目的で岸壁や栈橋などに設置される緩衝装置である。かつては木材や古タイヤなどが使われていたが、接岸エネルギーを効率よく吸収できるゴム防舷材が開発され、船舶の大型化に伴って高性能になり、高さも3mまで大型化した。防舷材の選定のカギとなるのは船舶の接岸エネルギーである。我が国では文献1)によってその設計が、文献2)によってその仕様と試験方法が規定されている。一方、海外においては文献3)が長い間使用されてきたが、最近では文献4)や5)がガイドラインとして活用されている。

このように防舷材の技術基準は充実しているといえるが近年、次のような問題が発生している。

- ① 海外で参照されている設計と試験のガイドラインと国内で使用されているものとの間で齟齬が生じている。
- ② 防舷材性能の速度による変動と温度による変動が強調され他の変動要因の考慮が明確になっていない。
- ③ 防舷材性能を精密に考慮すべきケースと必要性

が低いケースが区別されておらず不必要な手間や過剰な設計が行われることがある。本稿では、このような状況を改善するため次のように提案した。

- ① 防舷材の大きさを大, 中, 小の3種類に分類。
- ② 岸壁構造, 使用目的によって4段階に分類。
- ③ それらをマトリクスにして3×4=12段階に分け、それらを3段階の設計グレードに整理した。
- ④ それぞれの設計グレードにおいて考慮すべき要因, 設計方法を整理した。
- ⑤ 試験は開発試験, 認証試験, 品質確認試験に分け、それぞれ設計グレードに応じて実施すべき試験を分類し試験方法を提案した。

以下に上記提案の具体的な考え方とガイドライン^⑥の要約を示す。

2. ゴム防舷材の種類と役割

2.1 ゴム防舷材の分類

ゴム防舷材(以降, 防舷材)をそのサイズと性能によって次のような3種類に分類した。

- ① 小型防舷材: 載貨重量トン数 5,000DWT(フェリ

ーは 5,000GT. 旅客船は 1,000GT) 以下の船舶を対象とした防舷材。

- ② 中型防舷材：載貨重量トン数 5,001DWT から 30,000DWT (フェリーは 5,001GT, 旅客船は 1,001GT) までの船舶を対象とした防舷材。
- ③ 大型防舷材：載貨重量トン数 30,000DWT (フェリーは 30,001GT, 旅客船は 60,001GT) 以上の船舶を対象とした防舷材。

港湾で使用されるゴム防舷材には、丸型ゴム防舷材、空気式防舷材、回転式防舷材をはじめ、角型、D型、梯子防舷材、潜り込み防止ネット、コーナー保護材などのゴム資材があるがこれらは本書では取り上げていない。

2.2 岸壁構造・使用目的の分類

同じゴム防舷材でもその使われ方によって設計や試験のあり方も変わってくる。ここでは岸壁構造、使用目的のグレード分類を行った。

- ① 漁港、プレジャーボート、小型貨物船対象の浮棧橋または岸壁：これらの用途では反力の大小よりもむしろ突起物による引掛けや局所的な集中荷重などの予測し難い負荷に対する配慮が必要であり、性能の変動に対する構造物や船側への影響は小さい。
- ② 接岸エネルギーの吸収に岸壁の水平変位を考慮しない場合：これらの岸壁は重力式や矢板式、棚式など接岸力や波力などの外力に対して安定であり、老朽化した岸壁やフェリー用など特殊な事情がある場合を除けば防舷材の反力が問題になることは少ない。
- ③ 接岸エネルギーの吸収に岸壁の水平変位を考慮する場合：横棧橋、縦棧橋、デタッチトピア、ジャケット、ドルフィンなど杭によって支えられている場合において、水平方向の変形が接岸エネルギーの吸収に考慮されている場合、防舷材の反力とその変動幅などがある程度予測して構造物の設計に反映する必要がある。
- ④ 船体動揺を考慮する場合：下記のような場合は、防舷材の性能とその変動を精密に推定して数値シミュレーションに入力し、施設全体の重要な構成要素として設計する必要がある。
 - (a) 荒天時も離岸せずに係岸避泊する場合。
 - (b) 長周期波などにより通常時でも係留船舶の動揺が無視できない条件が発生する場合。
 - (c) 防舷材を用いた浮体構造物の係留施設。
 - (d) 30,000DWT 以上で大型防舷材と岸壁水平変位が吸収エネルギーに考慮する場合。
 - (e) 上記以外でもこれに準ずるほど防舷材の性能が重要視される場合。

2.3 防舷材設計におけるグレード分類

防舷材の設計に際しては使用される防舷材の大きさ、岸壁の条件を総合して、次のようなグレード分けを行いグレード別とそのニーズに見合った設計を実施する。

- ① グレード1：防舷材性能の変動の影響の小さい用途向けの簡易設計。
- ② グレード2：多様な条件における防舷材性能の変動を実用的な範囲で考慮した汎用設計。
- ③ グレード3：防舷材の重要度が高い施設で性能の変動を様々な条件に対応できるように精密に考慮すべき設計。

先に分類した防舷材、岸壁構造・使用目的を表-1 の様にマトリクスに整理し、適用すべき防舷材設計のグレードを当てはめた。設計に際してはまずこの設計グレードを設定することから始める。

表-1 ゴム防舷材の設計グレード分け

岸壁条件	防舷材性能		
	小型防舷材	中型防舷材	大型防舷材
漁港、プレジャーボート、小型貨物船用重力式岸壁	グレード 1	グレード 1	
岸壁の水平変位を考慮しない場合	グレード 1	グレード 2	グレード 2
岸壁の水平変位を考慮する場合	グレード 2	グレード 2	グレード 3
船体動揺を考慮する場合		グレード 3	グレード 3

3. 防舷材の性能の変動要因

3.1 設計の基本的な考え方

ゴムは非線形の粘弾性という性質を持つ繊細な材料でありそれによって作られたゴム防舷材は様々な長所を持つ一方でその性能は環境や使用条件の影響を受けて変動しやすい。設計にあたってはそのような変動要因を必要に応じて考慮するものとする。防舷材の性能の変動要因として次の7種類について必要に応じて考慮する。

- ① 製造誤差： C_p
特に制約のない場合、防舷材の性能の製造に起因する誤差は±10%とし、標準偏差 0.03 の正規分布に従うと考えてよいとした。
- ② 角度依存性： C_a
防舷材を圧縮する船側の角度、船体の侵入する傾斜角度などの定義を明確にした。
- ③ 速度依存性： IV
ゴムの粘弾性により防舷材は速い速度で圧縮されると反力が増大する。一定の遅い速度で圧縮した静的性能、一定速度で圧縮した CV 性能、初期速度から減速して最後はゼロになる DV 性能が定義される。

- ④ 温度依存性：TF
防舷材の性能は温度によっても変動する。通常、温度が下がると防舷材の反力は増加する。温度による性能の変化は速度による性能の変化と相似の関係にある。
- ⑤ 繰返し疲労：CR
防舷材は繰返し圧縮されることで反力は低下する。繰返し回数が100回、1,000回と増えてゆくにつれて性能の低下は少なくなってゆくがさらに圧縮が続くと、どこかで破損が発生し、防舷材としての機能を失う。
- ⑥ クリープ特性
防舷材に一定の圧縮荷重をかけ続けると時間とともに圧縮歪が進んでゆく。
- ⑦ 経年変化：Cag
防舷材は温度、紫外線、酸素などの影響により劣化してゆく。長期間圧縮されずにいると1回目よりも高い反力まで硬化してしまうこともある。

これらの変動要因は式(1)、(2)のように線形に重ね合せて変動後の性能を算定する。

$$\text{反力} = \text{静的反力} \times C_p \times C_a \times VF \times TF \times CR \times Cag \quad (1)$$

$$\text{吸収エネルギー} = \text{静的吸収エネルギー} \times C_p \times C_a \times VF \times TF \times CR \times Cag \quad (2)$$

変動要因は設計グレードに応じて表-2のように考慮するものとする。

表-2 設計グレード別の防舷材性能変動要因の取扱い

設計グレード	グレード 1	グレード 2	グレード 3
製造公差	±10%	±10%	±10%
傾斜特性	考慮なし	最大/最少係数	歪別係数
速度特性	考慮なし	最大/最少係数	歪別係数または考慮しない
温度特性	考慮なし	最大/最少係数	歪別係数
繰返し疲労	考慮なし	考慮なし	0.9~1.0
クリープ特性	考慮なし	考慮なし	風荷重検証
経年変化	考慮なし	考慮なし	1.0~1.05

4. 防舷材の設計法

防舷材の設計に際しては、使用条件、環境における最悪の条件においても接岸エネルギーを吸収できるだけの容量を持ち、かつ岸壁、棧橋が構造上耐えうる範囲内の発生反力しか発生しないものを選定し、周辺部品も含めて安全なシステムとして設計する。その流れは、図-1に示すとおりである。ここでは、設計の流れについて簡単に説明する。

- ① 接岸エネルギー計算

接岸エネルギーの計算式については他の文献から引用し整理して解説した。複数の防舷材に接岸する場合の考え方も加えた。

- ② 設計グレード分類
防舷材の設計グレードによって考慮すべき性能の変動係数について表-2に従って変動を考慮した吸収エネルギーと発生反力を求めれば合理的、経済的な設計が可能になる。
- ③ 防舷材の選定
性能変動要因を考慮した吸収エネルギーEAと接岸エネルギーEbはEA>Ebとなるように、荷重に関しては性能変動要因を考慮した最大反力が岸壁構造物の設計荷重や船側の強度に対して低くなるように防舷材を選定する。
- ④ 防舷材のシステム設計
防舷材システムは防舷材本体に加えて、受衝板、チェーンなどの部品の設計が必要になる。これらの設計はタイプ、サイズ、メーカーによって異なるので基本原理のみ整理した。加えて塗装、めっきなど鋼材の防食や係留索の引掛り防止、船体突起物の引掛り防止などに対する設計上の配慮にも言及した。

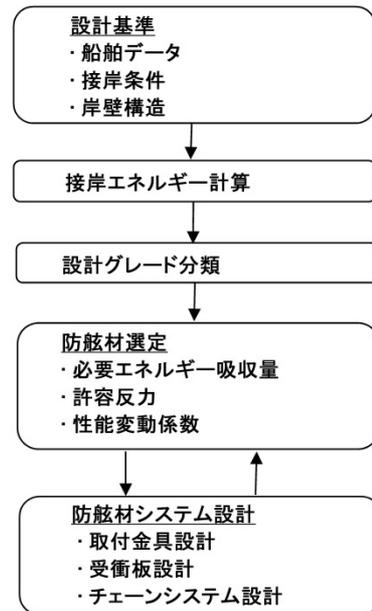


図-1 防舷材の設計フロー

5. 防舷材の試験法

ゴムは複雑な特性を持つ粘弾性体であり、防舷材の性能試験を精度よく実施するためには管理する条件を適切に設定し、試験ロットごとの差をできるだけ小さくし、再現性を確保する必要がある。このため表-3のように試験を行う目的によって開発試験、認証試験、品質確認試験に分類し試験の目的に応じた管理・運用を行うこと

とした。

従来の試験のガイドラインは試験の方法の解説のみで目的による分類が無かったため個別のプロジェクトにおいて混乱を招くことがあった。表-3 により必要な試験を必要な時に決められた方法で実施することが可能になると期待される。

表-3 防舷材試験の目的別分類

試験 解説	開発試験	認証試験	品質確認試験
定義	ゴム防舷材の開発に際してメーカーにおいて実施される試験でカタログデータなどのもとになる試験	客観的な評価を得るために第3者機関に委託して実施する試験	メーカーが出荷する製品の品質を確認するために実施する試験。必要に応じて全数または抽出
実施される試験の種類	基本性能、材料試験、速度特性、温度特性、疲労特性、繰返し性状、クリープ特性、傾斜特性、その他必要に応じて	第3者機関において実施可能な試験。但し、疲労試験は防舷材メーカーも実施可	基本性能試験、材料試験
試験と結果開示の方法	各メーカーの自主的開示、カタログ、ホームページ。メーカーのノウハウであるとともに再現にコスト、時間が掛るものがある	第3者機関の指定する方法と認証書類	メーカーまたは試験実施が可能な第三者機関の試験報告書
実施者	ゴム防舷材メーカー	第三者機関、疲労試験は防舷材メーカーも実施可	ゴム防舷材メーカー（出荷試験） 購入者（受入試験）

具体的な試験方法については下記の試験についてそれぞれガイドラインを示した。

- ① 静的圧縮試験
- ② 温度依存性試験
防舷材の温度依存性試験
材料の温度依存性試験
- ③ 速度依存性試験
温度係数、速度係数の補間と検証
- ④ 角度依存性試験
- ⑤ 疲労試験
- ⑥ 材料試験
- ⑦ 縮尺モデル試験における相似則の解説

防舷材の各設計グレードにおいてプロジェクトごとに実施されるべき品質確認試験、第三者機関を通して認証される認証試験、結果と方法を開示すべき開発試験をそれぞれ割り当てて表-4を作成した。

開発試験は認証試験として第三者機関において実施したり、第三者立会いで完全に保証することは困難な場合が多いので、代替策として製品と同じロットの材料サンプルと縮尺モデルを購入者または第三者に

提出することで認証試験に替えることができることとした。これにより購入者は実物の防舷材の使用期間中これらのサンプルを保管し防舷材に何らかの問題が発生した場合には材料の分析などの品質確認を独自に実施することができる。

表-4 各設計グレードにおける試験の種類と分類

設計グレード	グレード 1	グレード 2	グレード 3
静的圧縮性能（出荷試験）	品質確認試験（抽出）	品質確認試験（抽出）	品質確認試験（全数）
材料物性	品質確認試験	品質確認試験	品質確認試験
速度特性	無	開発試験	開発試験
温度特性	無	開発試験	開発試験
疲労特性（3000回）	認証試験	認証試験	認証試験
繰返し疲労	無し	無し	開発試験
クリープ特性	無し	無し	開発試験
傾斜特性	無し	開発試験	開発試験

6. おわりに

今回の検討においては防舷材の設計と試験に関する集大成として、有識者による委員会を開催し、そこでの意見を踏まえながら技術ガイドラインを作成した。

この方法を運用し改良を加えながらゆくゆくは国際的な活用を提言してゆくことを目指したい。

謝辞

本稿は、国内の防舷材メーカー5社と国交省港湾局、国土技術政策総合研究所、国立研究開発法人港湾空港技術研究所の関係者から貴重なご意見、ご指導をいただきました。ここに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) (社)日本港湾局: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, pp1177-1183, 2007.
- 2) (社)日本港湾局: 港湾工事共通仕様書, Vol. 1, pp70-71, 2015.
- 3) British Standard: Maritime Structures-Part 4 Code of practice for design of fendering and mooring systems, 1994.
- 4) PIANC 日本国内委員会: 係船岸の防衝システムの設計, 1980.
- 5) 国際航路協会: 防舷材システム設計の指針, 海港委員会第33作業部会報告書, 2002.
- 6) (一財)沿岸技術研究センター: ゴム防舷材の設計法と試験法(案), 2017 (予定)