

# 港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE  
OF  
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No. 1089

December 2004

信頼性解析に基づいた防衝工および係船柱の安全性評価に関する検討

米山 治男

白石 悟

独立行政法人 港湾空港技術研究所

Independent Administrative Institution,  
Port and Airport Research Institute, Japan

## 目 次

|  |    |
|--|----|
| 要 旨 .....                                      | 4  |
| 1. はじめに .....                                  | 5  |
| 2. 研究の内容 .....                                 | 5  |
| 3. 温度補正係数および速度補正係数を導入した防衝工設計法 .....            | 6  |
| 3.1 防衝工設計法の動向 .....                            | 6  |
| 3.2 防衝工の性能照査の考え方 .....                         | 8  |
| 3.3 新しい防衝工設計法による計算例 .....                      | 8  |
| 3.4 防衝工の簡易選定システム .....                         | 9  |
| 4. 数値シミュレーションによる船舶接岸力および係留力の確率的変動特性の検討 .....   | 10 |
| 4.1 概説 .....                                   | 10 |
| 4.2 接岸シミュレーションによる船舶接岸力の変動特性の把握 .....           | 11 |
| 4.3 船舶動揺シミュレーションによる動揺量および係留力の変動特性の把握 .....     | 16 |
| 5. 信頼性解析による温度補正係数および速度補正係数を考慮した防衝工の安全性評価 ..... | 27 |
| 5.1 概説 .....                                   | 27 |
| 5.2 条件の設定 .....                                | 27 |
| 5.3 温度補正係数の評価 .....                            | 29 |
| 5.4 速度補正係数の評価 .....                            | 33 |
| 5.5 補正係数を考慮しない場合との比較および総合評価 .....              | 37 |
| 5.6 まとめ .....                                  | 38 |
| 6. 信頼性解析による係船柱の安全性評価 .....                     | 41 |
| 6.1 概説 .....                                   | 41 |
| 6.2 条件の設定 .....                                | 41 |
| 6.3 港湾の特徴を考慮した係留力の確率的変動特性 .....                | 42 |
| 6.4 係留力に対する係船柱の信頼性評価 .....                     | 50 |
| 6.5 まとめ .....                                  | 57 |
| 7. 結論 .....                                    | 57 |
| 8. おわりに .....                                  | 57 |

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 参考文献                         | 58 |
| 記号表                          | 58 |
| 付録A 防衛工の簡易選定システム             | 61 |
| 付録B 計算ケース一覧                  | 67 |
| 付録C コンテナ船の動揺量および係留力の傾向       | 71 |
| 付録D 動揺振幅, 防衛工反力および係留索張力の頻度分布 | 74 |
| 付録E 防衛工の破壊確率                 | 77 |
| 付録F 波浪および風の出現頻度表             | 81 |
| 付録G コンクリート上部工の破壊確率           | 84 |

# Examination on Safety Evaluation of Fenders and Mooring Posts Based on Reliability Analysis

Haruo YONEYAMA\*  
Satoru SHIRAISHI\*\*

## Synopsis

In late years, a design system of structures has been greatly changed from a conventional specification rule to a performance rule, and a limit state design method has been totally adopted in safety checking of structures. On the other hand, distribution environment in ports has changed greatly, and construction conditions of berths including mooring facilities have also changed into deepwater and offshore positions according to jumboization of ships. In addition, there is the international trend where a fender design method with Temperature Factors and Velocity Factors is going to be introduced into safety evaluation of fenders.

Therefore, considering the change of design conditions of mooring facilities and the trend of the fender design method, we examined a safety evaluation method of fenders and mooring posts by using reliability analysis. At first, we proposed concept of performance checking by the limit state design method on the fender design method with Temperature Factors and Velocity Factors, and since the proposed design method is more complicated than a conventional design method, we created the database system that can choose fenders simply and easily. In addition, considering the design conditions such as construction of deepwater offshore berths and advent of larger ships, we grasped the probabilistic variation characteristics of berthing forces and mooring forces of large-scale ships by using Monte Carlo simulation of berthing forces and numerical simulation of moored ships. Finally, based on the probabilistic evaluation results of berthing forces and mooring forces, we evaluated safety of fenders and mooring posts by reliability analysis and calculated safety factors in the limit state design method.

**Key Words:** fender, mooring post, berthing force, mooring force, limit state design method, reliability analysis, safety evaluation, numerical simulation

---

\* Head of Offshore Structures Division, Geotechnical and Structural Engineering Department

\*\* Former Head of Offshore Structures Division, Geotechnical and Structural Engineering Department  
(Coastal Development Institute of Technology)

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-46-844-5060 Fax : +81-46-844-0255 e-mail:yoneyama@pari.go.jp

# 信頼性解析に基づいた防衝工および係船柱の 安全性評価に関する検討

米山 治男\*  
白石 悟\*\*

## 要 旨

近年、構造物の設計体系が従来の仕様規定から性能規定へと大きく改変され、構造物の安全性照査法に限界状態設計法が全面的に取り入れられてきている。一方で、港湾の物流環境は大きく変化してきており、船舶の大型化に伴い係留施設の建設位置の大水深化、外洋化などバースの建設条件も変化してきている。また、防衝工の安全性評価に関しては、温度補正係数および速度補正係数を用いた設計法が導入されつつあるという国際的動向もある。

そこで、本研究では、このような係留施設の設計条件の変化や防衝工設計法の動向を考慮して、信頼性解析を用いた防衝工および係船柱の安全性評価手法について検討した。まず、温度補正係数および速度補正係数を導入した防衝工の設計法について、限界状態設計法による性能照査の考え方を示すとともに、この設計法は従来の設計法よりも煩雑になることから、防衝工を簡便に選定できるデータベースシステムを作成した。また、バースの大水深化・外洋化、船型の大型化、船型の変化などの設計条件を考慮して、船舶の接岸力のモンテカルロシミュレーションおよび係留船舶の動揺シミュレーションにより、大型船舶の接岸力および係留力（衝突力、けん引力）の確率的変動特性を把握した。最終的に、船舶の接岸力および係留力の確率的評価結果に基づいて、信頼性解析により防衝工および係船柱の安全性を評価し、限界状態設計法における安全係数を算定した。

キーワード：防衝工，係船柱，接岸力，係留力，限界状態設計法，信頼性解析，安全性評価，  
数値シミュレーション

---

\* 地盤・構造部海洋構造研究室長

\*\* 前 地盤・構造部海洋構造研究室長（現 財団法人沿岸技術研究センター）

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人港湾空港技術研究所

電話：046-844-5060 Fax：046-844-0255 e-mail:yoneyama@pari.go.jp



## 1. はじめに

近年、構造物の設計体系が従来の仕様規定から性能規定へと大きく改変され、構造物の安全性照査法に限界状態設計法が全面的に取り入れられてきている。一方で、港湾の物流環境は大きく変化してきており、船舶の大型化などの船型の変化に伴い係留施設の建設位置の大水深化、外洋化などバースの建設条件も変化してきている。また、防衛工の安全性評価に関しては、温度補正係数および速度補正係数を用いた設計法が導入されつつあるという国際的動向もある。

これまで、防衛工については、係留船舶の動揺を考慮した設計法の提案（上田ら，1987，1992）や信頼性設計法に関する検討（上田ら，2000；Ueda *et al.*，2002；長尾ら，2003）が行われている。また、温度補正係数および速度補正係数を導入した防衛工設計法に関するガイドラインが公表されている（PIANC，2002）。一方、係船柱については、その標準的な設計法の提案（稲垣ら，1970）や係留船舶の動揺シミュレーションによるけん引力に関する検討（福田ら，1982）が行われている。また、信頼性手法を適用した係留船舶の動揺シミュレーションにより、防衛工および係留索の安全性評価を行った例もある（笹ら，2000）。しかしながら、防衛工の設計法への温度補正係数および速度補正係数の導入に関する検討や信頼性解析による係船柱の安全性評価手法の検討についてはこれまで例がない。防衛工および係船柱の設計に限界状態設計法を導入するためには、船舶の接岸力あるいは係留船舶の係留力のような荷重の確率的変動特性を評価した上で、荷重係数などの安全係数や荷重の特性値を設定する必要がある。

本研究では、このような係留施設の設計条件の変化や防衛工設計法の動向、また構造物の安全性の確率的評価が国際的にも要請されている状況を考慮して、信頼性解析に基づいた防衛工および係船柱の安全性評価手法について検討する。

## 2. 研究の内容

本研究における検討項目および研究の流れは、図-1に示すとおりである。図中の（ ）内は、本資料で対応する章を表している。

まず、第3章では、温度補正係数および速度補正係数を導入した防衛工設計法に関して検討する。ここでは、温度補正係数および速度補正係数を導入した防衛工の設計法について、限界状態設計法による性能照査の考え方を

示すとともに、この設計法は従来の設計法よりも煩雑になることから、防衛工を簡便に選定できるデータベースシステムを作成する。次に、第4章では、数値シミュレーションにより船舶接岸力および係留力の確率的変動特性について評価する。ここでは、船舶の標準船型や風圧受圧面積の変化を考慮して、船舶の接岸力のモンテカルロシミュレーションおよび係留船舶の動揺シミュレーションにより、船舶の接岸力および係留力（衝突力、けん引力）の確率的変動特性を把握する。第5章では、信頼性解析を用いて防衛工の安全性評価手法に関して検討する。ここでは、第3章および第4章の結果を踏まえ、船舶の接岸力の確率的評価結果を用いて温度補正係数および速度補正係数を考慮した防衛工の安全性を評価し、限界状態設計法における安全係数を算定する。一方、第6章では、信頼性解析を用いて係船柱の安全性評価手法に関して検討する。ここでは、第4章の係留船舶の動揺による係留力の確率的評価結果に基づいて、信頼性解析により係船柱が設置されている岸壁上部工の安全性を評価し、限界状態設計法における安全係数を算定する。

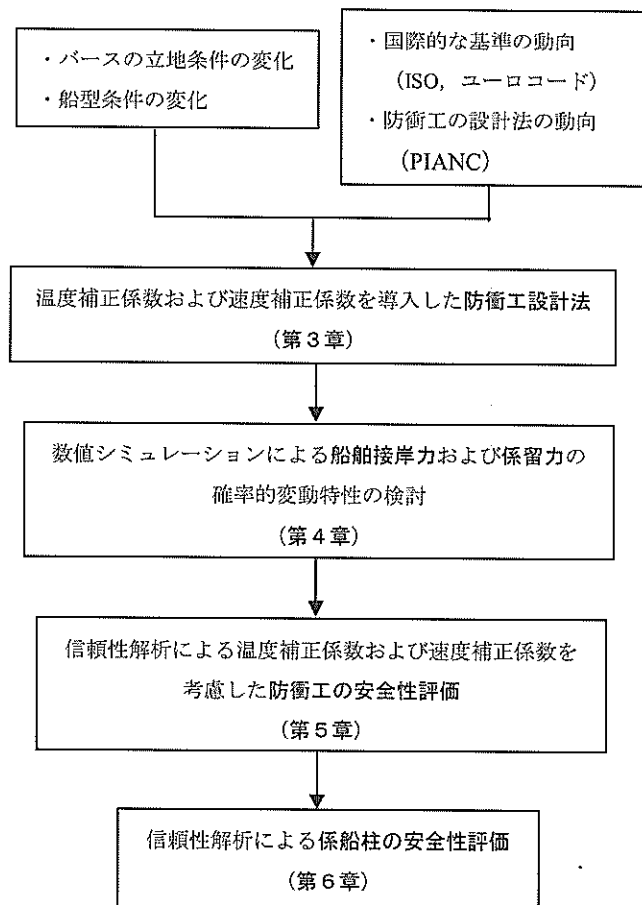


図-1 検討項目および研究の流れ

### 3. 温度補正係数および速度補正係数を導入した防衝工設計法

#### 3.1 防衝工設計法の動向

##### (1) 従来の設計手法

従来の防衝工の設計手法では、式(1)に示す船舶の接岸エネルギーの算定式を用いて、接岸エネルギーの計算値が防衝工の吸収エネルギーの推定値よりも小さいことを確認し、防衝工を選定する。防衝工の各メーカーが発行しているカタログには、防衝工の性能に関して、規定の試験方法により求められた吸収エネルギーや反力などの特性が記載されている。吸収エネルギーの推定値は、カタログに記載されている吸収エネルギーの性能値に性能公差を考慮して求められる。

$$E_S = \frac{W_S V^2}{2} C_e C_m C_s C_c \quad (1)$$

ここで、 $E_S$ ：設計接岸エネルギー (kNm)、 $W_S$ ：船舶の排水量 (t)、 $V$ ：接岸速度 (m/s)、 $C_e$ ：偏心係数、 $C_m$ ：仮想質量係数、 $C_s$ ：柔軟性係数、 $C_c$ ：パースの形状係数、である。

##### (2) 防衝工の種類

防衝設備として用いる防衝工は、ゴム防舷材、空気式防舷材が一般的である。防舷材の反力特性は、定反力型と反力漸増型に分けられ、ゴム防舷材および空気式防舷材はそれぞれ定反力型および反力漸増型の特性を有している。また、防舷材の素材について見ると、我が国では、通常、天然ゴムを素材とするゴム防舷材が使用されている。一方、海外では、これに加えて合成ゴムを素材とするゴム防舷材についても製造され、一般的に使用されている。

##### (3) 防衝工の性能の変化

防衝工として一般的に用いられるゴム防舷材には、使用環境条件によって以下のような性能の変化があることが知られている (運輸省港湾局, 1999)。

- (a) 動的荷重時の圧縮特性の変化
- (b) 繰り返し荷重時の圧縮特性の変化
- (c) 傾斜荷重時の圧縮特性の変化
- (d) 温度変化時の圧縮特性の変化
- (e) 経年変化後の圧縮特性の変化
- (f) クリープ後の圧縮特性の変化

##### (4) 大型浮体構造物に用いる防衝工の性能

長崎県上五島および福岡県北九州市白島に建設された海上貯油基地施設では、貯蔵船が防衝工 (ゴム防舷材)

を介して重力式ドルフィンによって係留されている。このような大型の浮体構造物では、暴風時の係留システムの安全性の確保のために防衝工の果たす機能は極めて大きい。したがって、これらの海上貯油基地施設の設計においては、事前に数多くの防舷材の性能試験が実施され、使用環境条件に対する特性の変動幅が調査された。また、この調査結果に基づいて、設計時に考慮すべき性能などの変動幅が表-1のように設定されている (運輸省港湾局, 1999)。

表-1 防舷材の特性の変動幅

|        | 変動幅 (ただし、公称特性曲線については同一ひずみに対する荷重の変動幅)  |
|--------|---|
| 製造上の誤差 | 0.9~1.10  |
| 経年変化   | 1.0~1.05  |
| 動的特性   | 1.0~1.10  |
| クリープ特性 | 防舷材に作用する定常外力又は平均荷重が当該防舷材の10%ひずみを上回る場合、特性が著しく不安定になるので、定常外力又は平均荷重はこの範囲内にあるものとし、クリープ特性を考慮した特性曲線を用いる。 |
| 繰り返し性状 | 0.8~0.9 (40%変形、波数10波に相当する特性)  |
| 傾斜圧縮特性 | 軸直角方向力を軸方向力の10%以上とする特性  |
| 温度特性   | 0.95~1.25 (50~0℃に対応、20℃を標準とするが、低温部変動幅が大きい)  |

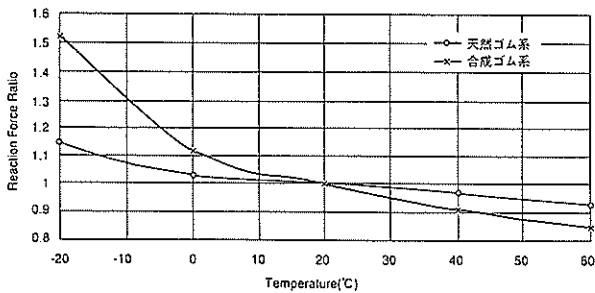
また、大阪港においては、我が国初の浮体橋梁が建設された (例えば、中西ら, 1998)。この浮体橋梁は、海上貯油基地施設と同様に橋体がゴム防舷材を介して反力壁で係留されている。しかしながら、海上貯油基地施設に使用されたゴム防舷材よりも大きな定格変形ひずみを有する防舷材を使用するため、改めて種々の性能試験が実施された (例えば、上田ら, 1998)。

このように、大型の浮体構造物の設計においては、使用環境条件に対して防衝工の性能変化の影響を考慮してきた。

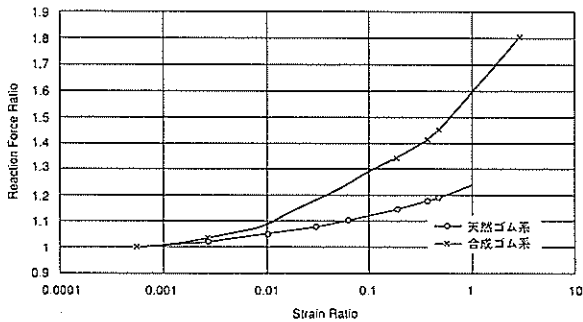
##### (5) 船舶係留用の防衝工の性能

大型浮体構造物の場合と異なり、船舶係留用の防衝工に関しては、温度の影響あるいは船舶の接岸速度の影響については、一般的には考慮されてきていない。これは、我が国で使用されている天然ゴムの防舷材は、通常、温度の条件あるいは接岸速度の条件では性能特性の変動幅が比較的小さいため、特にこれらの影響を考慮する必要がないからである。一方、海外で使用されている合成ゴムの防舷材は、温度変化の影響および船舶の接岸速度の影響を大きく受けるため、これらの影響を考慮する必要があると指摘されている。図-2は、天然ゴムの防舷材および合成ゴムの防舷材の反力特性の温度依存性および速度依存性を示す (上田ら, 1999)。この図では、合成ゴム

の防舷材と天然ゴムの防舷材の性能の比を、20℃の温度条件に対する比、また、最低速の荷重の載荷速度に対する比として示している。合成ゴムの防舷材は、天然ゴムの防舷材に比較して、温度変化および荷重の載荷速度に対する性能の変化が大きくなる。すなわち、合成ゴム素材の防舷材は、天然ゴム素材の防舷材に比べると、温度依存性および速度依存性が大きいと言える。したがって、合成ゴムの防舷材については、温度の影響および船舶の接岸速度の影響のような環境変化の影響を考慮する必要がある。



(a)温度依存性



(b)速度依存性

図-2 防舷材の種類による特性の相違  
(温度依存性および速度依存性)

#### (6) PIANC (国際航路会議協会) による新しい防衝工設計法の提案

PIANC (国際航路会議協会) では、1984年に防衝工の設計法の指針を提案している (PIANC, 1984)。ところが、この指針は、一般的にあまり活用されていないと言われていた。その理由は、一つは、船舶の接岸速度の値や船舶接岸時の仮想質量の算定方法が特定されていないため、防衝工の設計を明確な方法で実施できないからである。また、もう一つは、防衝工のメーカーが作成するカタログの防衝工の性能特性の試験方法が、船舶接岸時の状態を正確に再現していないからである。ゴム防舷材の場合は、性能特性が載荷速度に依存する速度依存性を有し、

天然ゴム素材、合成ゴム素材の種類によってこの性能特性は大きく異なる。しかしながら、防舷材の性能試験における載荷速度は接岸速度よりはかなり低速 (0.02～0.08m/min) であり、現在のメーカーのカタログの性能特性には、ゴム素材による速度依存性の相違までは記載されていない。

以上のことから、PIANCは、WG33/PTCIIを設立し、船舶の係留施設における接岸用防衝工の設計法および防衝工の性能試験に関する国際標準を作成した (PIANC, 2002)。このガイドラインの中には、防衝工について、統一的な性能試験法、性能の表示法、船舶の接岸速度および温度などの使用環境条件に対する性能の変化を考慮した設計法などが記載されている。

ゴム防舷材の性能試験法については、以下の2方法が提案されている。また、防舷材の温度依存性に関する試験や長期耐久性試験などの方法も規定されている。

#### CV (Constant Velocity) 法 :

実際の防舷材および模型防舷材を使用し、複数の速度で一定載荷して、変形と反力の関係を調査しておき、この特性を用いて、実際の防舷材の速度変化の影響を計算する試験方法

#### DV (Decreasing Velocity) 法 :

実際の防舷材を使用し、初速0.15m/sより直線的または正弦波的に載荷速度を減速させて、変形と反力の関係を調査する試験方法

防衝工の性能試験で得られた性能特性については、防衝工のメーカーのカタログに記載される。防衝工の性能特性の温度依存性および速度依存性は、それぞれ温度補正係数 (Temperature Factor) および速度補正係数 (Velocity Factor) として示されることになる。温度補正係数は、標準温度23℃に対する比として表した性能特性を示し、また速度補正係数は、初速0.15m/sの載荷速度に対する比として表した性能特性を示す。したがって、防衝工設置場所の気温や船舶の接岸速度が標準温度や標準速度と異なる条件においては、防衝工を設計する場合に、これらの補正係数を考慮して吸収エネルギーを算定する。

防衝工の設計法については、限界状態設計法に基づく荷重係数設計法が導入されている。この設計法では、荷重係数として異常接岸係数 (Factor for Abnormal Impact) を用いて、船舶の接岸エネルギー算定式による計算値にこの係数を乗じた値を設計接岸エネルギーとする。異常接岸 (Abnormal Impact) とは、通常の接岸 (Normal Impact) に対する概念であり、限界状態設計法の考え方に基づいて終局限界状態として船舶の極限状態の接岸を考えたものである。異常接岸係数の数値としては、船舶の種類に



もよるが、1.25～2.0が提案されている。接岸エネルギーの算定式およびそのパラメータについては従来の方法と同様であるが、仮想質量係数については上田式あるいはパスコスタ式の使用を規定している。また、防衝工の吸収エネルギーは、カタログから防衝工の性能特性を読み取り、性能公差、温度補正係数および速度補正係数を考慮して算定する。最終的に、設計接岸エネルギーが防衝工の吸収エネルギーの算定値よりも小さいことを確認し、防衝工を選定する。

ここに示した防衝工の設計法などは、今後、ISO（国際標準化機構）などの国際的な基準として位置づけられると考えられる。

### 3.2 防衝工の性能照査の考え方

#### (1) 限界状態設計法による防衝工の性能照査

3.1で説明したPIANCの提案による防衝工の設計法に基づいて、限界状態設計法による防衝工の性能照査の考え方を示す。防衝工の設計は、以下の式(2)および式(3)を用いる。

$$Z = E_f - \gamma_S E_S > 0 \quad (2)$$

$$E_f = \gamma_m E_{cat} R_T R_V \quad (3)$$

ここで、 $Z$ ：性能関数、 $E_f$ ：防衝工の吸収エネルギー(kNm)、 $E_{cat}$ ：防衝工の吸収エネルギー規格値(カタログ表示値)(kNm)、 $\gamma_m$ ：品質による吸収エネルギーのばらつきを考慮する係数(現行設計法では、通常 $\gamma_m=0.9$ )、 $R_T$ ：温度補正係数、 $R_V$ ：速度補正係数、 $E_S$ ：船舶の接岸エネルギーの公称値(kNm)(現行設計法では=設計接岸エネルギー)、 $\gamma_S$ ：安全係数(荷重係数)、である。

式(2)は、性能関数を表し、荷重係数を考慮した設計接岸エネルギーが防衝工の吸収エネルギーの算定値よりも小さいことにより、防衝工の性能を照査する。品質による吸収エネルギーのばらつきを考慮する係数 $\gamma_m$ は安全係数(材料係数)に相当するものである。また、PIANCのガイドライン(PIANC, 2002)に示されている異常接岸係数は、荷重係数 $\gamma_S$ に対応する。

式(2)および式(3)を用いて防衝工の設計を実施するためには、式中のパラメータに関するデータを事前に整備しておく必要がある。温度補正係数 $R_T$ 、速度補正係数 $R_V$ 、防衝工の吸収エネルギー規格値 $E_{cat}$ は、メーカーによる性能試験および評価によって求められ、カタログに記載された数値を用いる。材料係数 $\gamma_m$ は、メーカーによる防衝工の品質のばらつき調査により算定する。また、荷重係数 $\gamma_S$ および船舶の接岸エネルギーの公称値 $E_S$ は、接

岸エネルギー算定式の各パラメータのばらつきを考慮して接岸エネルギーの確率的変動特性を計算することにより算定する。このような接岸エネルギーの確率的変動特性の計算では、接岸エネルギー算定式の関数表現が困難であるため、一般的にモンテカルロシミュレーションが用いられる。ここで示した防衝工の性能照査法では、船舶の接岸速度 $V$ が船舶の接岸エネルギー $E_S$ と速度補正係数 $R_V$ に影響するため、防衝工の選定のために繰り返し計算を行わなければならない点に注意が必要である。

#### (2) 船舶の係留時の影響を考慮した防衝工の選定

防衝工の設計は、まず船舶接岸時の条件に対して行われ、通常はこの接岸時の条件により防衝工が選定される。しかしながら、外洋に面した港湾では、船舶の係留時の動揺により発生する防衝工の変形が、接岸時の変形を超える可能性がある。このような場合には、係留船舶の動揺シミュレーションを実施し、船舶接岸時の条件で選定された防衝工の安全性を評価する必要がある。これについては、先に示したPIANCのガイドラインや港湾の施設の技術上の基準・同解説(運輸省港湾局, 1999)においても、防衝工の選定において係留船舶の動揺の影響を考慮する必要性が説明されている。ただし、防衝工の基本的な設計は船舶の接岸時の条件に対して行い、必要に応じて船舶の係留時の影響も考慮するという考え方である。

### 3.3 新しい防衝工設計法による計算例

#### (1) 概要

新しい防衝工の設計法では、温度補正係数および速度補正係数を考慮することになるため、防衝工の選定は従来の方法と比較してかなり複雑になる。ここでは、温度補正係数および速度補正係数を考慮した防衝工の選定の概略的な手順を示す。

#### (2) 防衝工の選定条件

防衝工の選定条件として以下の条件を設定する。

対象船舶：30,000DWT一般貨物船

接岸速度：0.15m/s

バースの最大反力の制限：980kN

(バースの設計条件から規定)

環境温度：40～10℃

性能公差：-10% (吸収エネルギーに対して)

+10% (反力に対して)

接岸エネルギー：401.9kNm

(上記計算条件から式(1)を用いて計算)

#### (3) 温度補正係数

防衝工の使用環境温度(40～10℃)より、図-3を用いて温度補正係数を設定する。

温度補正係数： $R_T(T_{max})=0.945$  (40℃)  
 $R_T(T_{min})=1.055$  (10℃)

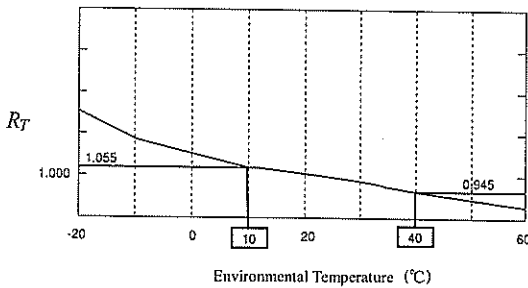


図-3 温度補正係数の特性例

(4) 速度補正係数

防衝工の高さを1mと仮定して、接岸速度0.15m/sから防衝工のひずみ速度を計算し、図-4を用いて速度補正係数を設定する。

ひずみ速度： $V_S = (0.15\text{m/s}/1\text{m}) \times 100 = 15\%/s$   
 速度補正係数： $R_{VE}(V_S) = 1.000$  (吸収エネルギー)  
 $R_{VR}(V_S) = 1.000$  (反力)

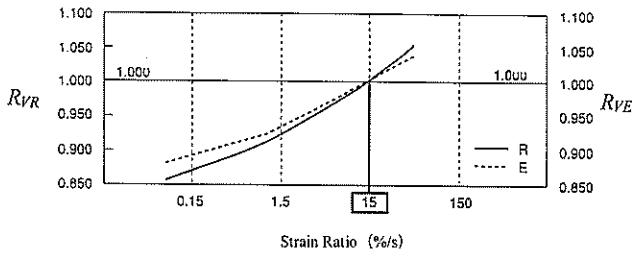


図-4 速度補正係数の特性例

(5) 防衝工の必要性

防衝工のメーカーのカタログには、標準条件(環境温度23℃、接岸速度0.15m/s)の性能が標準値として記載される予定である。これを用いて、設計で考慮する環境温度および接岸速度に対して、必要とされる防衝工の吸収エネルギーおよび反力の標準状態に対する換算値を算定する。防衝工の使用環境温度が40～10℃の場合は、以下のようなになる。

①40℃に対する吸収エネルギーおよび反力

$$E \geq E_S / (R_{VE}(V_S) \times R_T(T_{max}) \times 0.9)$$

$$= 401.9 / (1.000 \times 0.945 \times 0.9)$$

$$= 472.5\text{kNm}$$

$$R \geq R_S / (R_{VR}(V_S) \times R_T(T_{max}) \times 1.1)$$

$$= 980.0 / (1.000 \times 0.945 \times 1.1)$$

$$= 942.8\text{kN}$$

②10℃に対する吸収エネルギーおよび反力

$$E \geq E_S / (R_{VE}(V_S) \times R_T(T_{min}) \times 0.9)$$

$$= 401.9 / (1.000 \times 1.055 \times 0.9)$$

$$= 423.3\text{kNm}$$

$$R \geq R_S / (R_{VR}(V_S) \times R_T(T_{min}) \times 1.1)$$

$$= 980.0 / (1.000 \times 1.055 \times 1.1)$$

$$= 844.5\text{kN}$$

表-2に以上の結果を取りまとめて示す。この表から、防衝工に要求される性能は以下のとおりとなる。

吸収エネルギー  $\geq 472.5\text{kNm}$  (温度40℃の条件で決定)  
 反力  $\leq 844.5\text{kN}$  (温度10℃の条件で決定)

表-2 防衝工に要求される性能

| 評価項目      | 30,000DWT一般貨物船         |                        |
|-----------|------------------------|------------------------|
|           | 40℃の場合                 | 10℃の場合                 |
| 必要吸収エネルギー | $\geq 472.5\text{kNm}$ | $\geq 423.3\text{kNm}$ |
| 最大反力      | $\leq 942.8\text{kN}$  | $\leq 844.5\text{kN}$  |

標準条件(環境温度23℃、接岸速度0.15m/s)に対して、この吸収エネルギーおよび反力の条件を満足する防衝工を防衝工メーカーのカタログから選定する。ただし、以上の計算では、防衝工の高さを1mと仮定して防衝工のひずみ速度を算定し、速度補正係数を設定している。高さ1m以外の防衝工を検討する場合にはひずみ速度が異なり、また他の種類の防衝工を検討する場合には速度依存特性が異なってくる。したがって、速度補正係数の値が異なるため、以上の計算を再度実施することになる。このような煩雑な防衝工の選定を効率的に行うためには、防衝工の簡易選定システムが必要になる。このシステムは、温度補正係数、速度補正係数などのデータベースからデータを取り出して、船舶の接岸エネルギーあるいは防衝工の吸収エネルギーを自動的に計算し、防衝工の選定を簡便に実行するソフトウェアである。

3.4 防衝工の簡易選定システム

(1) 防衝工選定の流れ

防衝工の簡易選定システムは、パーソナルコンピュータを用いて防衝工の選定を簡易に実行できるソフトウェアである。本システムの構成、使用方法などの詳細については、付録Aに掲載する。ここでは、本システムを用いた防衝工の選定の流れとその内容について簡単に述べる。本システムによる防衝工の選定の流れは、図-5のようなになる。

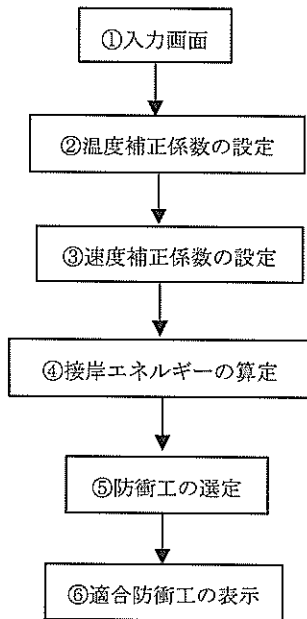


図-5 防衝工の選定の流れ

## (2) 防衝工選定の内容

図-5に示した防衝工の選定の内容について説明する。

### ①条件の入力画面

船種、船型、載荷重量トン数、接岸速度、環境温度（最高気温、最低気温）、および防衝工の種類を入力する。

### ②温度補正係数の設定

環境温度（最高気温、最低気温）から、防衝工の種類別の温度補正係数の特性図（例えば、図-3）を用いて、最高気温および最低気温に対する温度補正係数を設定する。

### ③速度補正係数の設定

船舶の接岸速度および防衝工の高さから、防衝工のひずみ速度を求める。

$$V_s = V/H \times 100 \quad (4)$$

ここで、 $V_s$ ：防衝工のひずみ速度（%/s）、 $V$ ：接岸速度（m/s）、 $H$ ：防衝工の高さ（m）、である。

ひずみ速度から、防衝工の種類別の速度補正係数の特性図（例えば、図-4）を用いて、反力に対する速度補正係数および吸収エネルギーに対する速度補正係数を設定する。

### ④接岸エネルギーの算定

船舶の接岸エネルギーを式(1)を用いて算定する。限界状態設計法による場合は、荷重係数を考慮する。

### ⑤防衝工の選定

防衝工の性能照査における式(2)および式(3)を用いて、

性能関数が正となるかどうかを確認する。ただし、温度については、最高気温および最低気温の両方で確認する。検討した防衝工が性能を満足しない場合には、再度②から繰り返し計算を実施する。

### ⑥適合防衝工の表示

①の入力条件の中で選択条件を満足する防衝工について、すべての選定結果を表示する。

## 4. 数値シミュレーションによる船舶接岸力および係留力の確率的変動特性の検討

### 4.1 概説

船舶の大型化などの船型の変化により、船舶の標準船型や風圧受圧面積の見直しが行われている。このため、これまで検討されている船舶の接岸力や係留力は、過小評価されていることになる。そこで、このような係留施設の設計条件の変化を考慮して、大型船による接岸力および係留力（衝突力、けん引力）を接岸力のモンテカルロシミュレーションおよび係留船舶の動揺シミュレーションで評価する。限界状態設計法の考え方に基づいて係留施設の防衝工および係船柱の設計法を構築するための基礎データとして、船舶接岸力および係留力の確率的変動特性を把握する。

計算条件を設定する際には、バースの大水深化、長周期波の影響を含む外洋性港湾の波浪条件、幅広船出現など、近年のバースの立地条件、船型の変化を考慮して接岸力および係留力を検討する際の船舶条件、船舶の係留条件を整理する。対象船型の設定においては、赤倉ら（1998）により提案されている回帰式およびその標準偏差を用いた。また、船舶の係留条件の設定においては、バースレイアウト、係船柱の強度および配置、防衝工の配置について、同規模バースの事例を参考にした。係留索の諸元については、設定した船型条件による艀装数から所要索強度を満足する索諸元を設定した。

船舶接岸力の確率的変動特性の評価では、モンテカルロシミュレーションを実施し、船舶諸元、接岸速度、接岸角度などのばらつきを考慮した。モンテカルロシミュレーションでは、1万回の繰り返し計算を行い、船舶の接岸エネルギーの確率的変動特性を評価した。また、係留力の確率的変動特性の評価では、係留船舶の動揺シミュレーションを実施した。このとき、船舶諸元、外力条件などを変化させて、合計276ケースの解析を行った。動揺シミュレーションにより得られた索張力および防衝工反力の時系列データから頻度分布を求め、船舶の係留力の確率的変動特性を評価した。

## 4.2 接岸シミュレーションによる船舶接岸力の変動特性の把握

### (1) 概要

モンテカルロシミュレーションによる船舶の接岸シミュレーションを行って船舶接岸力を確率的に求め、防衝工の設計に限界状態設計法を用いる際に必要となる接岸力の確率的特徴を評価する。ここでは、50,000DWTコンテナ船を対象として、船舶接岸力として船舶の接岸エネルギーの確率的特徴を把握した。接岸シミュレーションの計算手順を図-6に示す。

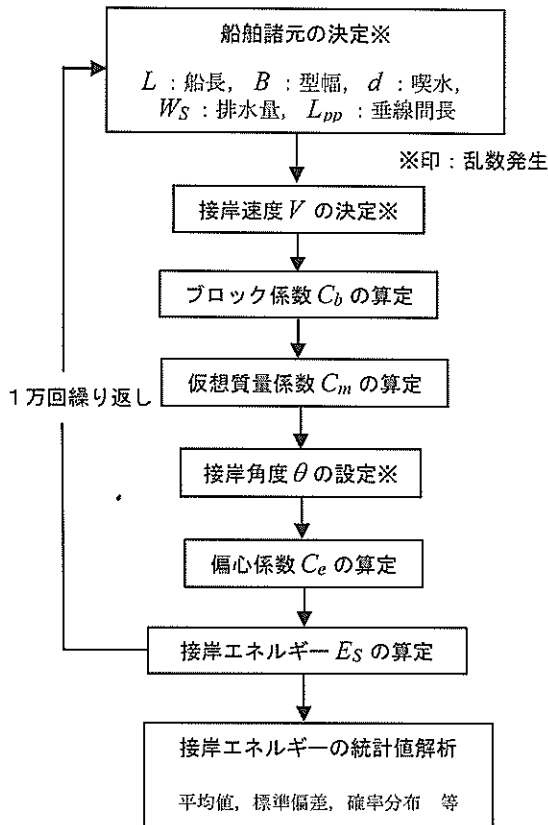


図-6 接岸シミュレーションの計算手順

### (2) 計算条件の設定

接岸シミュレーションの計算条件は、以下のように設定した。

#### a) 対象船舶

50,000DWTコンテナ船を対象とし、矩形乱数を発生することにより船舶信頼度を無作為に設定し、船型のばらつきを評価する。その場合の船舶諸元は、赤倉ら(1998)が提案している回帰式を用いた。ここで、船舶信頼度は、ある値以下の諸元を有する船舶数の船舶総数に対する割合を確率統計的に求めたものである。例えば、船舶信頼度75%とは、船舶総数に対して75%の船舶がその信

頼度に対応する値以下の諸元を有していることになる。

#### b) 防衝工の配置

船舶が接岸するバースの防衝工は、20m間隔で配置されているものとした。

#### c) 接岸速度

船舶の接岸速度に関しては、図-7に示す上田ら(2000)による重量トン数と接岸速度の回帰式から、対象船舶の重量トン(50,000DWT)の船舶信頼度に対する接岸速度の確率密度関数を以下のように設定した。

接岸速度の確率分布：

平均値0.0497m/s, 標準偏差0.0212m/sの正規分布

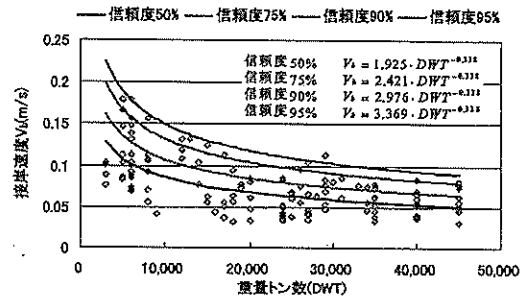


図-7 重量トンと接岸速度の関係

#### d) 接岸角度

接岸角度に関しては実測データが無いため、大部分の船舶が0~10°間で接岸しているものとして接岸角度の確率密度関数を以下のように設定した。

接岸角度の確率分布：

平均値5.0°, 標準偏差2.0°の正規分布

### (3) 計算結果

#### a) 接岸速度

接岸速度の確率分布は横浜港における実測値に基づいて、上田ら(2000)がその確率分布を求めたものを参考にしている。図-8は、モンテカルロシミュレーションにおいて発生させた接岸速度の頻度分布と正規分布による理論度数分布を示したものである。

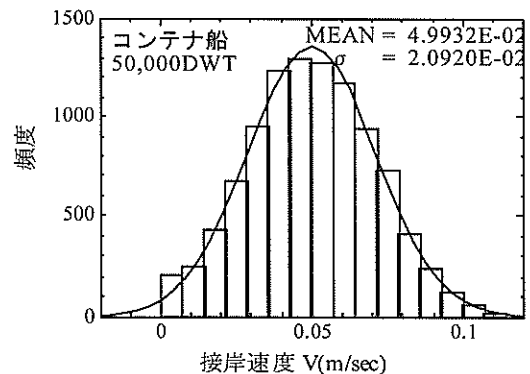


図-8 接岸速度の頻度分布および正規分布

b)ブロック係数および仮想質量係数

ブロック係数および仮想質量係数は式(5)および式(6)から算定した。図-9は、モンテカルロシミュレーションによって得られたブロック係数の頻度分布と対数正規分布による理論度数分布を比較したものである。また、図-10は仮想質量係数についての頻度分布と正規分布による理論度数分布を比較したものである。

$$C_m = 1 + \frac{\pi}{2C_b} \cdot \frac{d}{B} \quad (5)$$

$$C_b = \frac{W_S}{(\rho L_{pp} B d)} \quad (6)$$

ここで、 $C_m$ ：仮想質量係数、 $C_b$ ：ブロック係数、 $\pi$ ：円周率、 $d$ ：喫水 (m)、 $B$ ：型幅 (m)、 $W_S$ ：船舶の排水量 (t)、 $\rho$ ：海水の単位体積質量 (=1.03) (t/m<sup>3</sup>)、 $L_{pp}$ ：垂線間長 (m)、である。

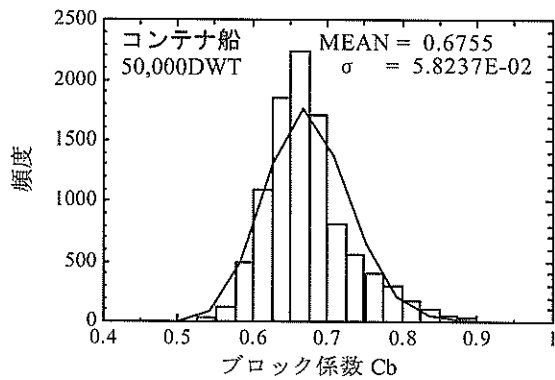


図-9 ブロック係数の頻度分布および対数正規分布

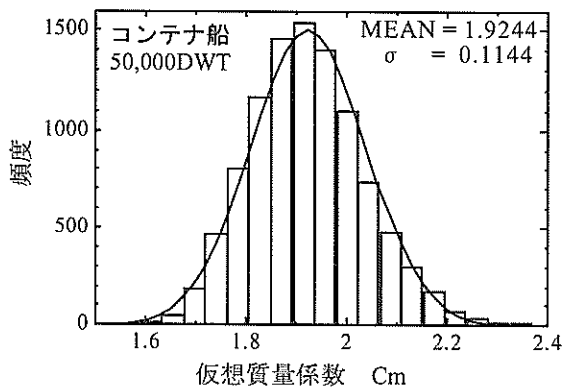


図-10 仮想質量係数の頻度分布および正規分布

c)偏心係数

偏心係数は式(7)により求めた。図-11は接岸角度の頻度分布を示したものである。接岸角度は平均値5.0°、標準偏差2.0°の正規分布を仮定しており、角度が負の値になった場合は0°として処理をしている。また、図-12は偏心係数の頻度分布と正規分布による理論度数分布を比較したものである。

$$C_e = \frac{1}{1 + (\ell/r)^2} \quad (7)$$

ここで、 $C_e$ ：偏心係数、 $\ell$ ：船舶の接触点から係留施設の法線に平行に測った当該船舶の重心までの距離 (m) であり、以下の  $L_1$  と  $L_2$  のうち大きい方を用いる。

$$L_1 = \{0.5\alpha + e(1-k)\}L_{pp} \cos\theta \quad (8)$$

$$L_2 = \{0.5\alpha - ek\}L_{pp} \cos\theta \quad (9)$$

ここで、 $\theta$ ：接岸角度 (°) (0~10°程度)、 $e$ ：船の長軸方向に測った防衝工間隔と垂線間長との比、 $\alpha$ ：防衝工との接触点高さにおける船舶側面の平行舷の長さとの比 (一般的に  $\alpha=1/3 \sim 1/2$  であるが、ここでは、 $\alpha=0.33$  とした。)、 $k$ ：2つの防衝工の間において船舶と係船岸が最も近づく点を表すパラメータ ( $0 < k < 1$  であるが、一般的には  $k=0.5$  程度)、である。

また、 $r$ ：船舶の鉛直軸周りの環動半径 (m) であり、以下の式で計算する。

$$r = (0.19C_b + 0.11)L_{pp} \quad (10)$$

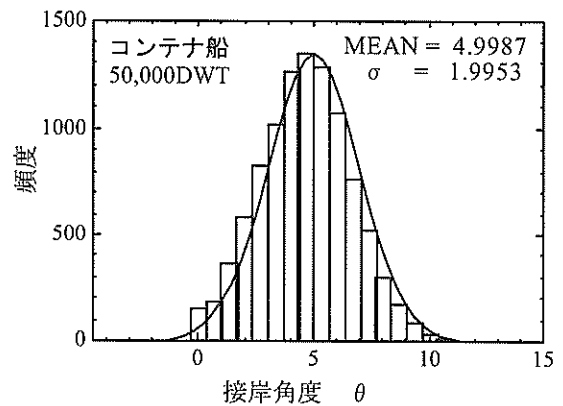


図-11 接岸角度の頻度分布

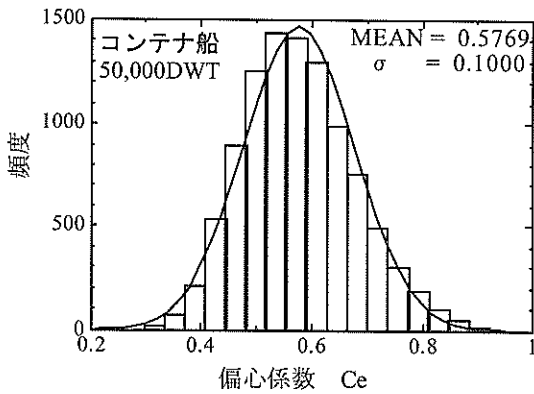


図-12 偏心係数の頻度分布および正規分布

d)接岸エネルギー

式(1)を用いて接岸エネルギーを算定した。なお、ここでは、 $C_s=1.0$ 、 $C_e=1.0$ とした。図-13は、接岸エネルギーの頻度分布と対数正規分布による理論度数分布を比較したものである。この結果を見ると、接岸エネルギーの頻度分布は対数正規分布に対してはあまり良い一致を示しているとは言えない。したがって、次項において、接岸エネルギーの変動特性を表す確率分布について詳細に検討することとする。

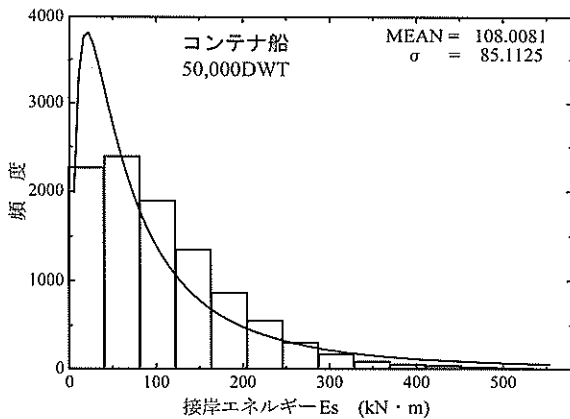


図-13 接岸エネルギーの頻度分布と対数正規分布との比較

(4) 接岸エネルギーの確率分布関数

a)概要

モンテカルロシミュレーションにより求めた接岸エネルギーの頻度分布を基にして確率論的評価を行う。接岸エネルギーの頻度分布に対して、プロットングポジション公式を用いて確率分布関数を当てはめ、超過確率による分布の裾の広がり进行评估して、最適な確率分布関数の選定を行う。次に、現行設計法による設計接岸エネルギーの値に対し、最適分布関数から  $1/n$  超過確率の接岸

エネルギーの比率を求めて限界状態設計法における異常接岸係数の検討を行うものとする。ここで、 $n$ は繰り返し回数である。

b)プロットングポジション

接岸エネルギーのモンテカルロシミュレーション結果から、接岸エネルギーの計算値を大きい順に並び替えて順序統計量として組み直し、プロットングポジション公式を用いて確率分布関数の母数算定を行う（例えば、合田、1990）。ここでは、順序統計量が基準化変量の直線回帰式で表されるとして、最小自乗法により各母数を推定する。検討対象とする分布関数は、対数正規分布およびワイブル分布の2種類とした。なお、ワイブル分布の形状母数  $k$  については、0.75、1.0、1.4および2.0の4種類に固定して計算を行った。

c)最適確率分布関数

プロットングポジション公式を用いた対数正規分布およびワイブル分布に対するフィッティングの結果を図-14に示す。図中の破線はモンテカルロシミュレーションによる超過確率分布を示し、実線はプロットングポジション公式を用いた結果である。これを見ると、対数正規分布は接岸エネルギーが大きくなるに従い、シミュレーション結果から大きく離れていくことがわかる。一方、ワイブル分布は  $k=1.0$  のケースでシミュレーション結果の裾の広がり比較的良く表現している。なお、ワイブル分布  $k=1.0$  の場合の尺度母数  $A$  および位置母数  $B$  の値は以下のとおりである。

尺度母数：  $A=1.468760$ 、位置母数：  $B=2.011072$

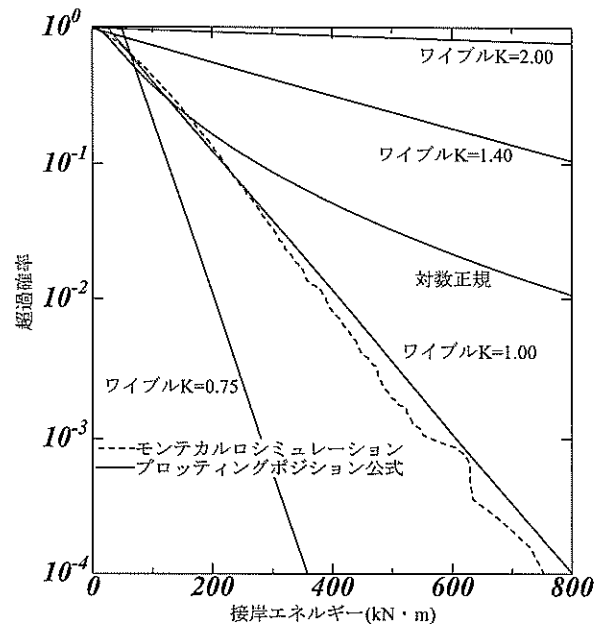


図-14 接岸エネルギーの超過確率分布



d)接岸エネルギーの超過確率に対する異常接岸係数

以上の検討結果から1/n 超過確率に対する接岸エネルギーを求め、現行設計法による接岸エネルギーに対する比率である異常接岸係数を式(11)により求めた。なお、計算条件として、現行設計法で用いた接岸速度および超過確率を表-3に示す。

$$E_d = f_a E_S \quad (11)$$

ここで、 $E_S$ ：現行設計法による接岸エネルギー (kNm) (式(1)を用いて算定)、 $E_d$ ：ある超過確率における接岸エネルギー (kNm)、 $f_a$ ：異常接岸係数、である。

表-3 計算条件

| 船舶信頼度 | 接岸速度                      | 超過確率   |
|-------|---------------------------|--|
| 75%   | 0.08 m/s<br>(92.47%未超過確率) | 1-1/20 : 95.00 %<br>1-1/100 : 99.00 %                              |
|       | 0.10 m/s<br>(99.17%未超過確率) | 1-1/500 : 99.80 %<br>1-1/1,000 : 99.90 %                           |
|       | 0.12 m/s<br>(99.96%未超過確率) | 1-1/3,000 : 99.97 %<br>1-1/5,000 : 99.98 %<br>1-1/10,000 : 99.99 % |

現行設計法による各接岸速度に対する接岸エネルギーを基に異常接岸係数について検討した。その結果を表-4(1)～(3)および図-15(1)～(3)に示す。シミュレーション結果と最適確率分布関数の超過確率ごとの接岸エネルギーを見ると、対数正規分布の場合は1/500超過確率で2倍以上接岸エネルギーに差があり、1/10,000超過確率では4倍以上の差になる。一方、ワイブル分布では1/10,000超過確率で2～3%程度の差があるだけであり、シミュレーション結果を精度良く推定できている。

また、現行設計法による接岸エネルギーに対して異常接岸係数が約1.0となる超過確率は、各接岸速度に対して以下ようになる。

- $V = 0.08\text{m/s}$ (92.47%未超過確率)  
→1/20超過確率 (95.0%未超過確率)
- $V = 0.10\text{m/s}$ (99.17%未超過確率)  
→1/100超過確率 (99.0%未超過確率)
- $V = 0.12\text{m/s}$ (99.96%未超過確率)  
→1/1,000超過確率 (99.8%未超過確率)

表-4(1) 接岸エネルギーの1/n 超過確率に対する異常接岸係数 ( $V = 0.08\text{m/s}$ )

V=0.08m/s

| 確率値            | シミュレーション結果 |       | 対数正規分布   |       | ワイブル分布k=1.00 |       |
|----------------|------------|-------|----------|-------|--------------|-------|
|                | Edm(kNm)   | $f_a$ | Edd(kNm) | $f_a$ | Edd(kNm)     | $f_a$ |
| CURRENT DESIGN | 249.76     | 1.00  | 249.76   | 1.00  | 249.76       | 1.00  |
| 1-1/20         | 272.23     | 1.09  | 404.56   | 1.62  | 277.23       | 1.11  |
| 1-1/100        | 389.16     | 1.56  | 821.00   | 3.29  | 412.80       | 1.65  |
| 1-1/500        | 497.37     | 1.99  | 1456.29  | 5.83  | 548.48       | 2.20  |
| 1-1/1,000      | 573.79     | 2.30  | 2384.32  | 9.55  | 606.26       | 2.43  |
| 1-1/3,000      | 634.12     | 2.54  | 2511.36  | 10.05 | 698.47       | 2.80  |
| 1-1/5,000      | 729.86     | 2.92  | 2895.91  | 11.59 | 744.58       | 2.98  |
| 1-1/10,000     | 782.54     | 3.13  | 3487.95  | 13.97 | 800.50       | 3.21  |

表-4(2) 接岸エネルギーの1/n 超過確率に対する異常接岸係数 ( $V = 0.10\text{m/s}$ )

V=0.10m/s

| 確率値            | シミュレーション結果 |       | 対数正規分布   |       | ワイブル分布k=1.00 |       |
|----------------|------------|-------|----------|-------|--------------|-------|
|                | Edm(kNm)   | $f_a$ | Edd(kNm) | $f_a$ | Edd(kNm)     | $f_a$ |
| CURRENT DESIGN | 390.34     | 1.00  | 390.34   | 1.00  | 390.34       | 1.00  |
| 1-1/20         | 272.23     | 0.70  | 404.56   | 1.04  | 277.23       | 0.71  |
| 1-1/100        | 389.16     | 1.00  | 821.00   | 2.10  | 412.80       | 1.06  |
| 1-1/500        | 497.37     | 1.27  | 1456.29  | 3.73  | 548.48       | 1.41  |
| 1-1/1,000      | 573.79     | 1.47  | 2384.32  | 6.11  | 606.26       | 1.55  |
| 1-1/3,000      | 634.12     | 1.62  | 2511.36  | 6.43  | 698.47       | 1.79  |
| 1-1/5,000      | 729.86     | 1.87  | 2895.91  | 7.42  | 744.58       | 1.91  |
| 1-1/10,000     | 782.54     | 2.00  | 3487.95  | 8.94  | 800.50       | 2.05  |

表-4(3) 接岸エネルギーの1/n 超過確率に対する異常接岸係数 ( $V = 0.12\text{m/s}$ )

V=0.12m/s

| 確率値            | シミュレーション結果 |       | 対数正規分布   |       | ワイブル分布k=1.00 |       |
|----------------|------------|-------|----------|-------|--------------|-------|
|                | Edm(kNm)   | $f_a$ | Edd(kNm) | $f_a$ | Edd(kNm)     | $f_a$ |
| CURRENT DESIGN | 562.01     | 1.00  | 562.01   | 1.00  | 562.01       | 1.00  |
| 1-1/20         | 272.23     | 0.48  | 404.56   | 0.72  | 277.23       | 0.49  |
| 1-1/100        | 389.16     | 0.69  | 821.00   | 1.46  | 412.80       | 0.73  |
| 1-1/500        | 497.37     | 0.88  | 1456.29  | 2.59  | 548.48       | 0.98  |
| 1-1/1,000      | 573.79     | 1.02  | 2384.32  | 4.24  | 606.26       | 1.08  |
| 1-1/3,000      | 634.12     | 1.13  | 2511.36  | 4.47  | 698.47       | 1.24  |
| 1-1/5,000      | 729.86     | 1.30  | 2895.91  | 5.15  | 744.58       | 1.32  |
| 1-1/10,000     | 782.54     | 1.39  | 3487.95  | 6.21  | 800.50       | 1.42  |

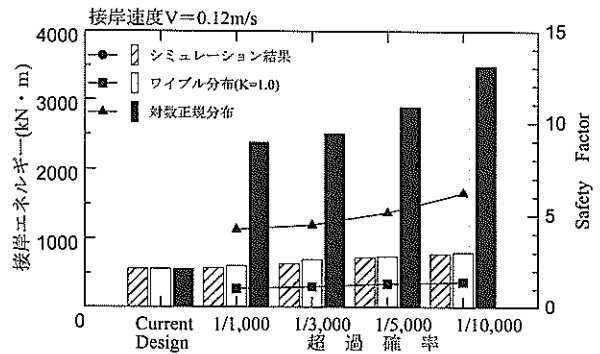
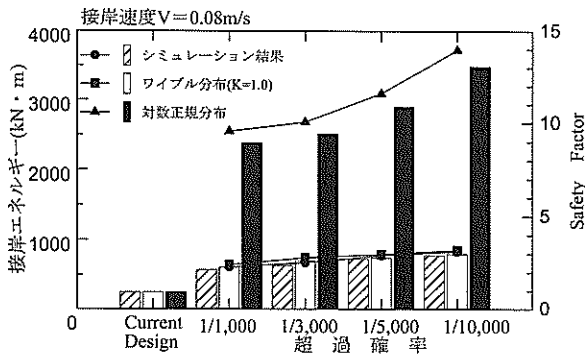
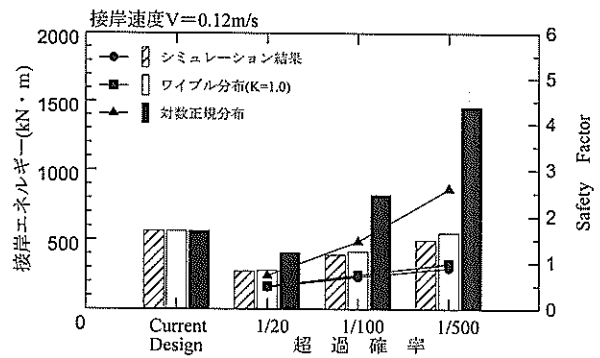
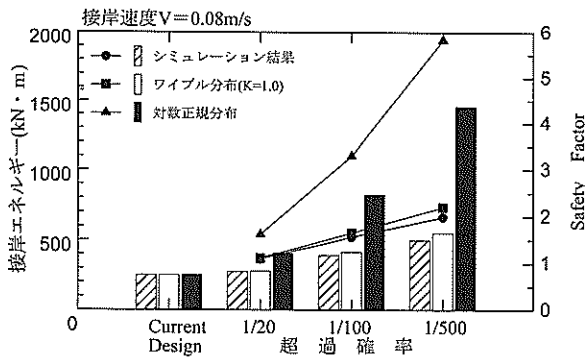


図-15(1) 接岸エネルギーの1/n 超過確率に対する異常接岸係数 ( $V=0.08\text{m/s}$ )

図-15(3) 接岸エネルギーの1/n 超過確率に対する異常接岸係数 ( $V=0.12\text{m/s}$ )

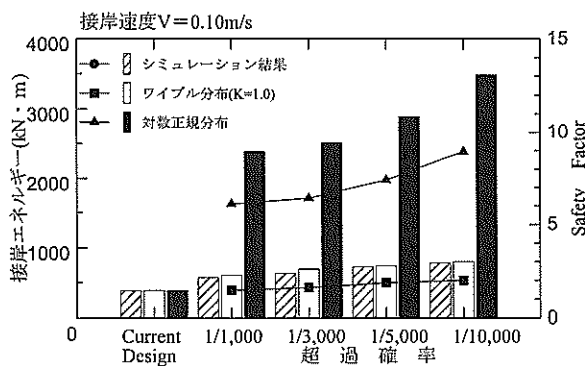
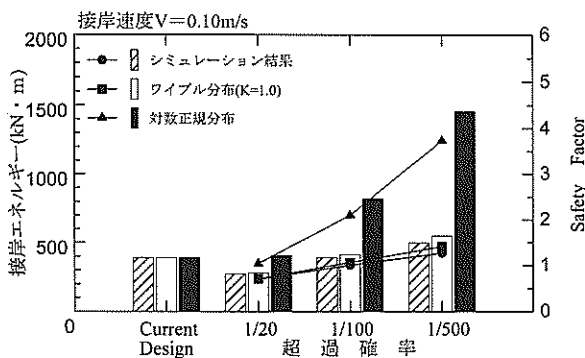


図-15(2) 接岸エネルギーの1/n 超過確率に対する異常接岸係数 ( $V=0.10\text{m/s}$ )

e) 考察

これらの検討から、最適確率分布関数としてワイブル分布を採用し、現行設計法による接岸エネルギーに対する異常接岸係数を接岸速度ごとに表-5に示す。Ueda *et al.* (2002) の検討結果によると、現行設計法による接岸エネルギー算定の際の接岸速度は、95%未超過確率のものを用いており、35,000DWTコンテナ船に対する異常接岸係数は1/500超過確率で2.4程度であるとしている。よって、図-7で示した船舶信頼度に対する接岸速度の回帰式より、50,000DWTコンテナ船の95%未超過接岸速度を求めると0.087m/s程度となる。したがって、最も近い接岸速度0.08m/sの結果を見ると、1/500超過確率では、異常接岸係数は2.20である。このように、接岸エネルギーに最も支配的なパラメータである接岸速度に対して異常接岸係数を設定することにより、現行設計法で選定される防衛工と、接岸エネルギーの確率的変動特性を考慮した限界状態設計法で選定される防衛工との整合性が図られるものと考えられる。

表-5 現行設計法に対する異常接岸係数

| 接岸速度 (m/s) | 未超過確率 (%) |       |       |       |       |       |       |
|------------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|            | 95.00     | 99.00 | 99.80 | 99.90 | 99.97 | 99.98 | 99.99 |
| 0.08       | 1.11      | 1.65  | 2.20  | 2.43  | 2.80  | 2.98  | 3.21  |
| 0.10       | 0.71      | 1.06  | 1.41  | 1.56  | 1.79  | 1.91  | 2.05  |
| 0.12       | 0.49      | 0.73  | 0.98  | 1.08  | 1.24  | 1.32  | 1.42  |

※50,000DWTコンテナ船 (船舶信頼度75%)

(5) まとめ

50,000DWTコンテナ船を対象として、モンテカルロシミュレーションによる船舶の接岸シミュレーションを行って、船舶の接岸エネルギーの確率的変動特性を評価した。また、接岸エネルギーの最適確率分布関数としてワイブル分布を推定し、現行設計法による接岸エネルギーに対する異常接岸係数の検討を行った。

4.3 船舶動揺シミュレーションによる動揺量および係留力の変動特性の把握

(1) 概要

係留船舶の動揺シミュレーションにより、船舶諸元および外力条件の変化が船舶の動揺量および係留力へ及ぼす影響について分析し、係留柱および防衝工の設計に限界状態設計法を用いる際に必要となる係留力の確率的変動特性を評価する。

(2) 検討項目および検討の流れ

船舶動揺シミュレーションにおける検討項目は、以下のように設定した。

a)対象船舶

外洋に面した港湾を想定して比較的大型の船舶を検討対象とすることとし、船種および係留系の相違による船舶の動揺量および係留力への影響を調べるため、以下の2船種、2係留系を対象とする。

- ①50,000DWTコンテナ船
- ②50,000DWTコンテナ船 (係留系変更ケース)  
(係留索の材質を変更)
- ③40,000 DWT一般貨物船

b)船型条件の影響の検討

実際に係船岸に着棧する船舶の船型にはばらつきがあるため、既に提案されている船舶諸元の回帰式 (赤倉ら, 1998) における船舶信頼度をパラメータとして船型を指定する (2.5~97.5%まで20船型を設定)。図-16に検討の基本的な考え方を示す。

c)外力条件の影響の検討

船舶係留時の波浪条件および風条件には変動があるた

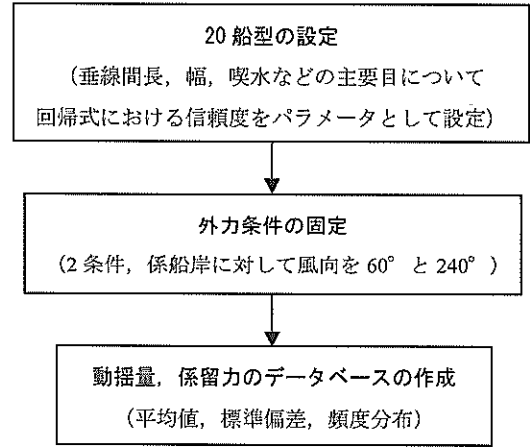


図-16 船型条件に対する検討の流れ

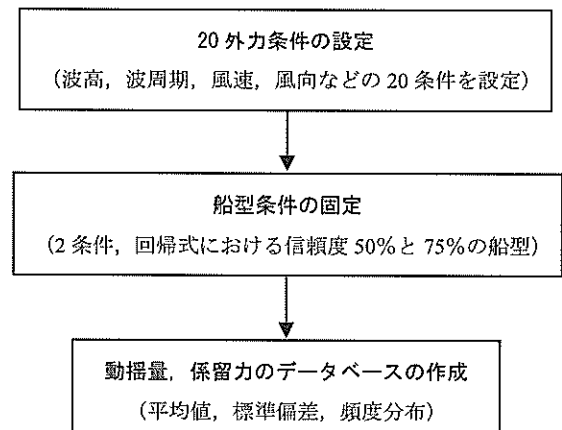


図-17 外力条件に対する検討の流れ

め、それらを考慮する。ただし、すべての条件を網羅的に計算することは困難であるため、条件を整理して動揺シミュレーションを行う。図-17に検討の基本的な考え方を示す。

(3) 計算条件の設定

a)船舶・係留系条件

対象船舶は、コンテナ船 (50,000DWT)、一般貨物船 (40,000DWT) の2船型である。

図-18(1)は50,000DWTコンテナ船 (船舶信頼度75%) に対する係留配置を示し、図-18(2)は40,000DWT一般貨物船 (船舶信頼度75%) に対する係留配置を示す。また、図-18(1)~(2)に対応して、動揺シミュレーションにおける防衝工および係留索の番号を図-19(1)~(2)に示す。係留柱の間隔は35.0mとして、係留索の配置パターン (配置本数, 展張角度) を標準化させておき、その条件に最も近くなる係留柱を選定するようにしている。なお、初期張力は49kNとして設定する。

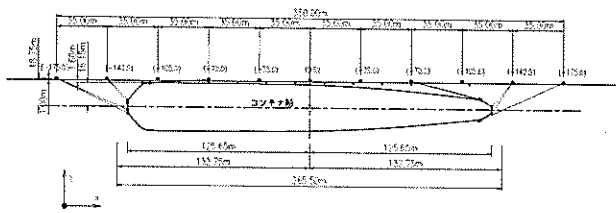


図-18(1) 50,000DWTコンテナ船の係留配置

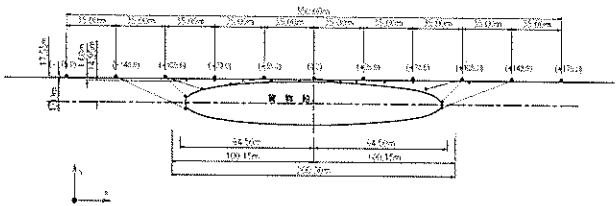


図-18(2) 40,000DWT一般貨物船の係留配置

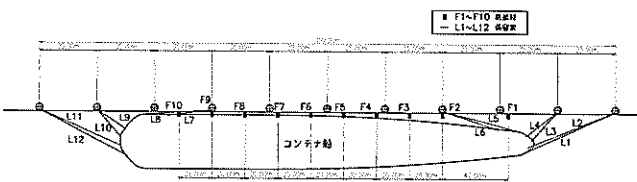


図-19(1) 防衝工および係留索の番号 (コンテナ船)

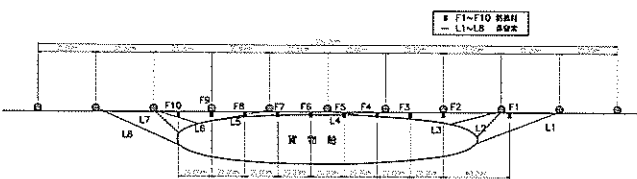


図-19(2) 防衝工および係留索の番号 (一般貨物船)

コンテナ船に用いる係留索としては、比較的伸び率の小さいパイレンタフレと、それよりも伸び率の大きいポリプロモノの2種類を使用する。また、一般貨物船の係留索としては、ポリプロモノのみを用いる。艀装数は回帰式(浜田ら, 1991)により求め、艀装数に対するアンカー、アンカーチェーンおよび係留索の一覧表(上田, 1984)を用いて、対応する艀装記号から係留索諸元を求める。

- ①50,000DWTコンテナ船→係留索の切断荷重647.5kN  
パイレンタフレの場合： $\phi$  65mm (破断荷重657.3kN)  
ポリプロモノエイトロープの場合：  
 $\phi$  90mm (破断荷重675.9kN)
- ②40,000DWT一般貨物船→係留索の切断荷重480.7kN  
ポリプロモノエイトロープの場合：  
 $\phi$  75mm (破断荷重481.7kN)

防衝工は、中・大型船舶の着岸可能なバースを対象とし、ゴム防舷材を想定する。ここでは、以下の条件で算定された接岸エネルギーを吸収可能な防衝工を選定した。50,000DWTコンテナ船について

- 接岸速度：0.15m/s
  - 垂線間長：251.3m
  - 型幅：32.3m
  - 満載喫水：13.1 m
  - 排水量： $W_S = 10^{(0.365+0.953 \log(DWT))} = 69,682t$
  - ブロック係数：0.624
  - 仮想質量係数：2.226
  - 偏心係数：0.5 (1/4接点接岸と仮定)
- ここで、 $DWT$ ：船舶の重量トン (t)、である。

以上の条件から、接岸エネルギーは  $E_S = 873.3kNm$  となる。この接岸エネルギーの算定値を用い、防衝工の吸収エネルギーに対する性能公差-10%を考慮して、ここでは仮にセル型防舷材 (1,600H) を選定した。

b)外力条件

波浪条件については、波浪スペクトルとして、ブレッドシュナイダー光易型スペクトルと平石ら (1997) が提案している簡易型の長周期波スペクトルの両方を考慮し、これらのスペクトルから合成した波形を与える。長周期波成分は20~500sまでの波周期帯に対して、等周波数間隔で20成分を与える。ただし、各長周期波成分における代表周波数は各周波数間内でランダムに決定し、バース前面における成分波高を約0.5mになるように設定する。有義波周期は、8.0s, 10.0s, 12.0sとした。一例として、動揺シミュレーションで使用した有義波高0.50m, 有義波周期10.0sの入射波のスペクトルを図-20に示す。図中の破線は長周期スペクトルレベルを示し、動揺シミュレーションで用いた成分波振幅レベルを○印で示している。

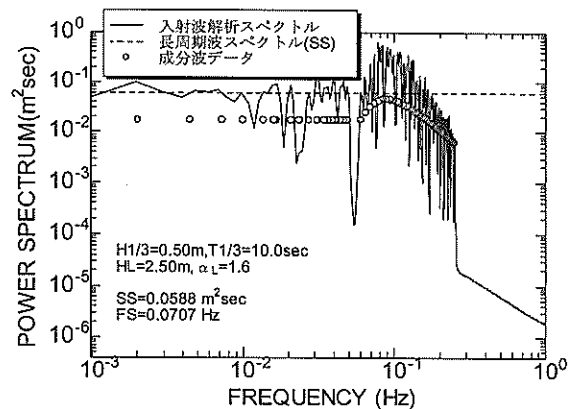


図-20 長周期波成分を含む入射波スペクトル ( $H_{1/3}=0.5m, T_{1/3}=10.0s$ )

風条件については、風のスペクトルはダベンポート型とし、風速は荷役限界とされている10.0m/sを中心に5.0m/s, 15.0m/sを設定した。

#### (4) 動揺シミュレーションの計算ケース

船舶の動揺シミュレーションは、船種（50,000DWTコンテナ船, 40,000DWT一般貨物船）、船型のばらつき（回帰式において船舶信頼度2.5%から97.5%までを与える）、外力条件（有義波高：0.25m, 0.50m, 有義波周期：8.0s, 10.0s, 12.0s, 風速：5.0m/s, 10.0m/s, 15.0m/s, 風向：0°から330°まで30°おき）、係留系（コンテナ船：パイレンタフレφ65mm, ポリプロモノφ90mm, 一般貨物船：ポリプロモノφ75mm）を変更して276ケース実施した。計算ケースは、検討項目ごとにS1～S3, F1～F3の6シリーズに区分した。各シリーズの説明を以下に示し、計算ケースの一覧表を付録Bに掲載する。

S1：50,000DWTコンテナ船について、風向60°に対する船舶信頼度を変えた計算ケース（S1-1～S1-22）、風向240°に対する船舶信頼度を変えた計算ケース（S1-23～S1-44）

S2：50,000DWTコンテナ船（係留索変更）について、風向60°に対する船舶信頼度を変えた計算ケース（S2-45～S2-66）、風向240°に対する船舶信頼度を変えた計算ケース（S2-67～S2-88）

S3：40,000DWT一般貨物船について、風向60°に対する船舶信頼度を変えた計算ケース（S3-89～S3-110）、風向240°に対する船舶信頼度を変えた計算ケース（S3-111～S3-132）

F1：50,000DWTコンテナ船について、船舶信頼度50%の船型について波高、波周期、風速、風向の条件を変えた計算ケース（F1-133～F1-156）、船舶信頼度75%の船型について波高、波周期、風速、風向の条件を変えた計算ケース（F1-157～F1-180）

F2：50,000DWTコンテナ船（係留索変更）について、船舶信頼度50%の船型について波高、波周期、風速、風向の条件を変えた計算ケース（F2-181～F2-204）、船舶信頼度75%の船型について波高、波周期、風速、風向の条件を変えた計算ケース（F2-205～F2-228）

F3：40,000DWT一般貨物船について、船舶信頼度50%の船型について波高、波周期、風速、風向の条件を変えた計算ケース（F3-229～F3-252）、船舶信頼度75%の船型について波高、波周期、風速、風向の条件を変えた計算ケース（F3-253～F3-276）

#### (5) 動揺量のシミュレーション結果

コンテナ船の係留索の変更前と変更後における動揺量および係留力のシミュレーション結果については、両者

に大きな相違が見られなかった。そこで、コンテナ船のシミュレーション結果については、係留索の変更前と変更後の結果を対比させて、付録Cに掲載する。ここでは、コンテナ船および一般貨物船の動揺量のシミュレーション結果について比較する。

##### a) 動揺量の時系列およびスペクトル

図-21は、50,000DWTコンテナ船の動揺量の時系列の一例（S1-1）である。サージおよびヨウは波周期よりも長周期の動揺をしているが、他の動揺成分についてはほぼ波周期と同じ動揺周期を示している。図-22は、図-21に対応する動揺の周波数スペクトルである。この図から、サージには長周期動揺が発生していることがわかる。すなわち、サージのスペクトルには、0.02Hz（波周期50s）付近にエネルギーのピークが見られる。通常、波周期100s付近にサージの卓越周期があることが多いが、この波周期よりも短周期側にピークがあるのは、やや硬めの特性を有する係留索（パイレンタフレ）を使用しているためであると考えられる。

##### b) 船舶信頼度に対する動揺特性

図-23(1)～(2)は、風向60°の場合について、横軸に船舶信頼度を取り、動揺6成分の動揺量の最大値、平均値、最小値を図示したものである。それぞれ、50,000DWTコンテナ船（パイレンタフレ）および40,000DWT一般貨物船（ポリプロモノ）に対する動揺量を示している。コンテナ船のサージおよびヨウについては、船舶信頼度40%付近において動揺量が急激に変化している。これは、船舶の諸元が変化しても、係留柱の間隔が一定であるために、船舶信頼度40%付近で係留索の配置パターン（特に展張角度）が急に変化することが原因である。同様に、コンテナ船のロールについては、船舶信頼度95%付近において動揺量が大きく変化している。これは、メタセンター高さの値が船舶信頼度95%付近で大きく変化しているためである。一方、一般貨物船の動揺量については、このような急変する部分はない。一般貨物船の場合は、船舶信頼度が大きくなるにつれてスウェイおよびヨウの動揺量が徐々に小さくなる傾向が見られる。

##### c) 風向に対する動揺特性

図-24(1)～(2)は、船舶信頼度75%の場合について、横軸に風向を取り、動揺6成分の動揺量の最大値、平均値、最小値を図示したものである。船舶・係留系条件は図-23(1)～(2)と同一である。風向の影響は、サージ、スウェイ、ヨウの動揺3成分において顕著に生じている。風向の変化によって船舶の風圧受圧面積が変化し、船舶への風圧力が変動するため、水平面内の動揺成分であるこれらの動揺量に対して風向の影響が大きいと考えられる。

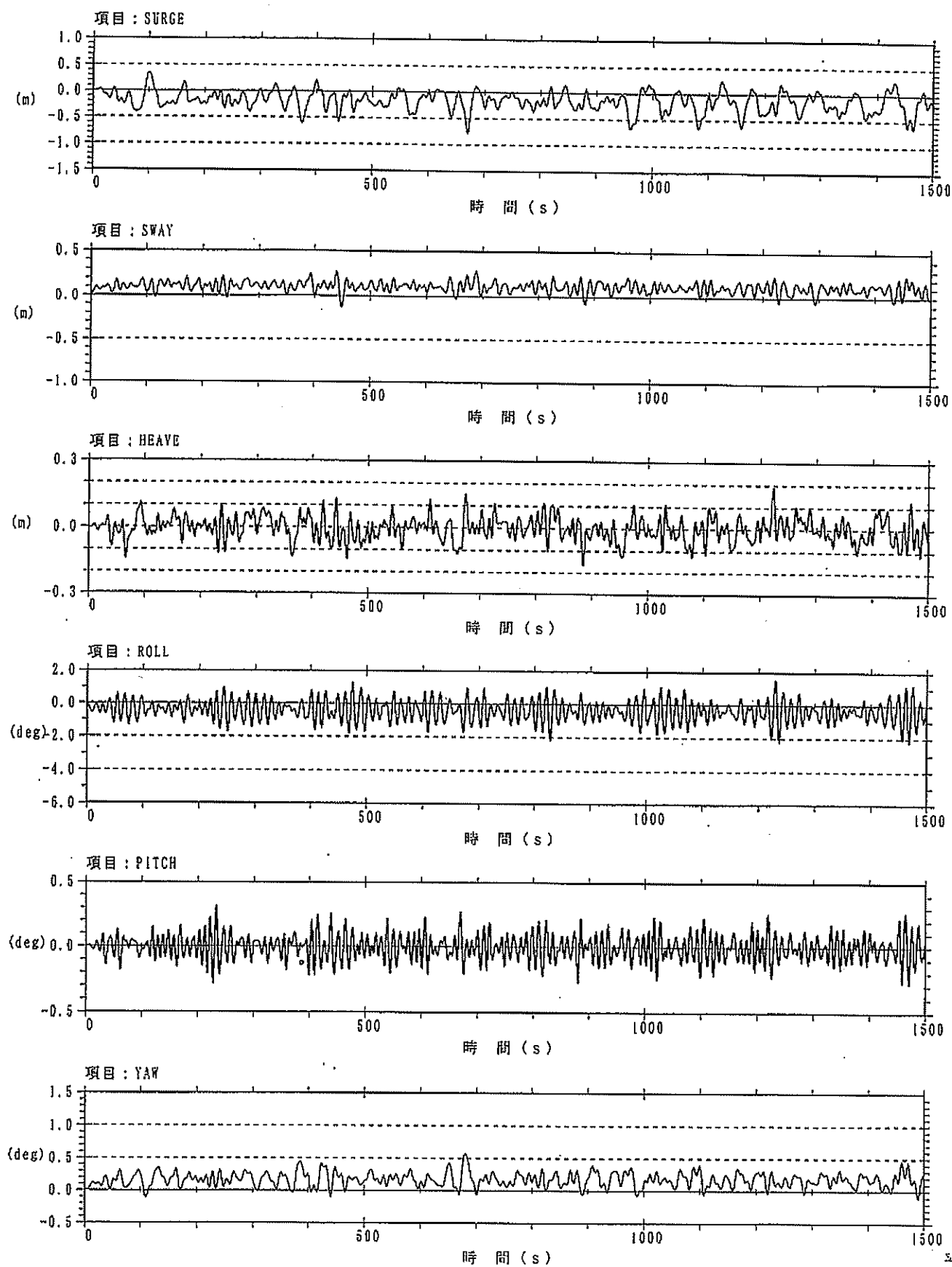


図-21 動揺量の時系列 (S1-1)



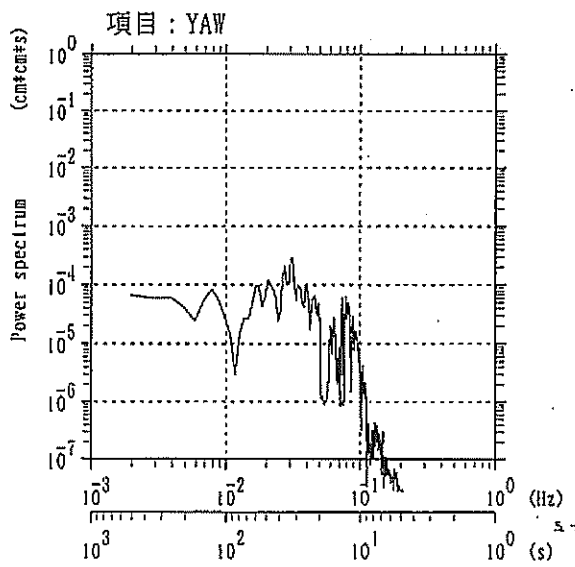
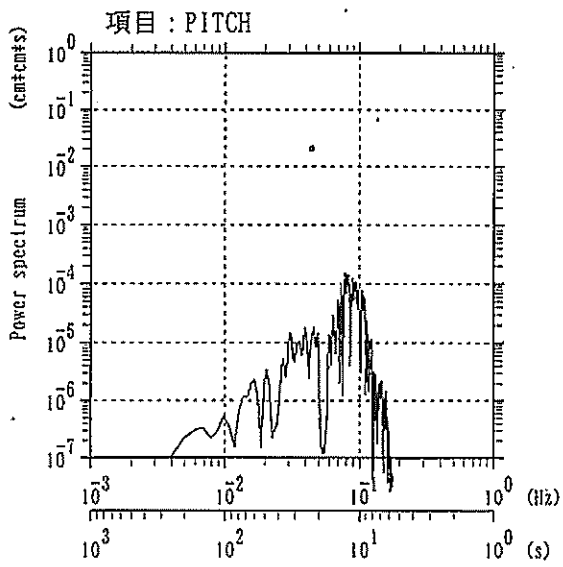
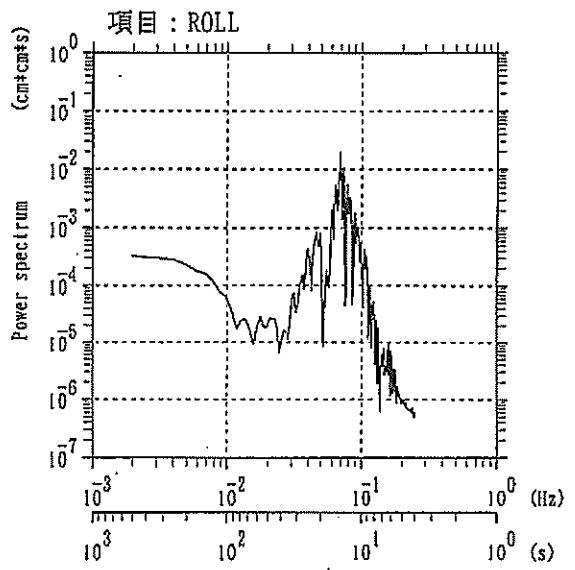
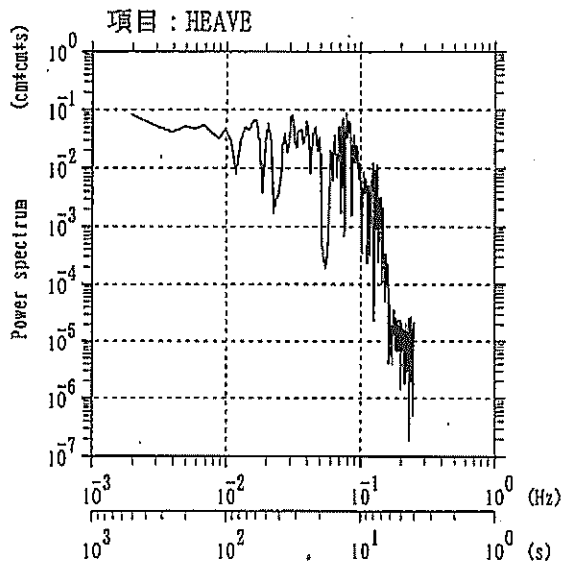
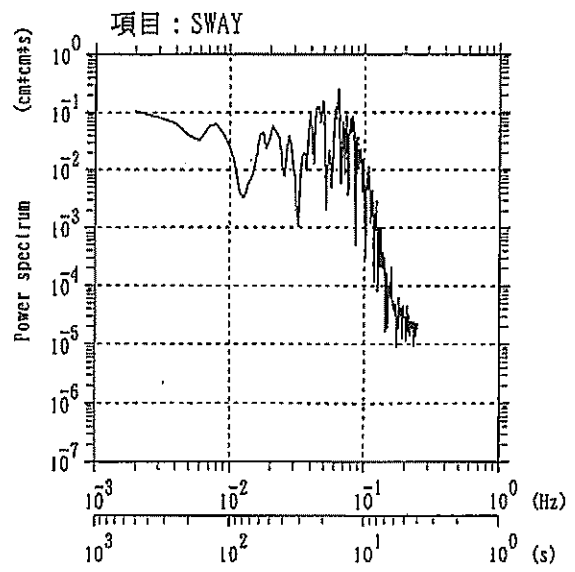
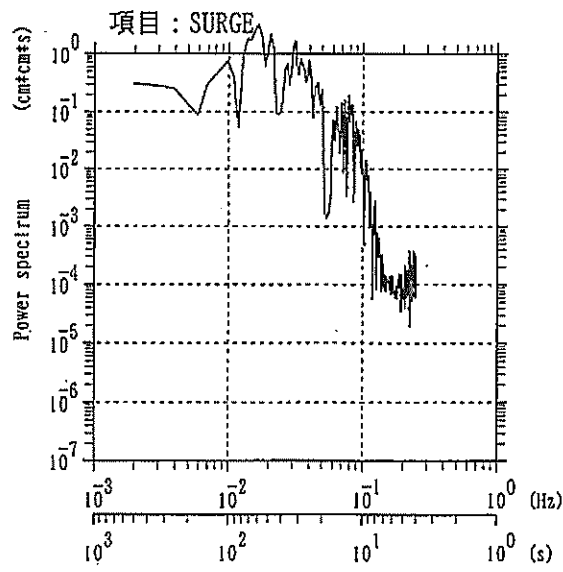


図-22 動揺量の周波数スペクトル (S1-1)

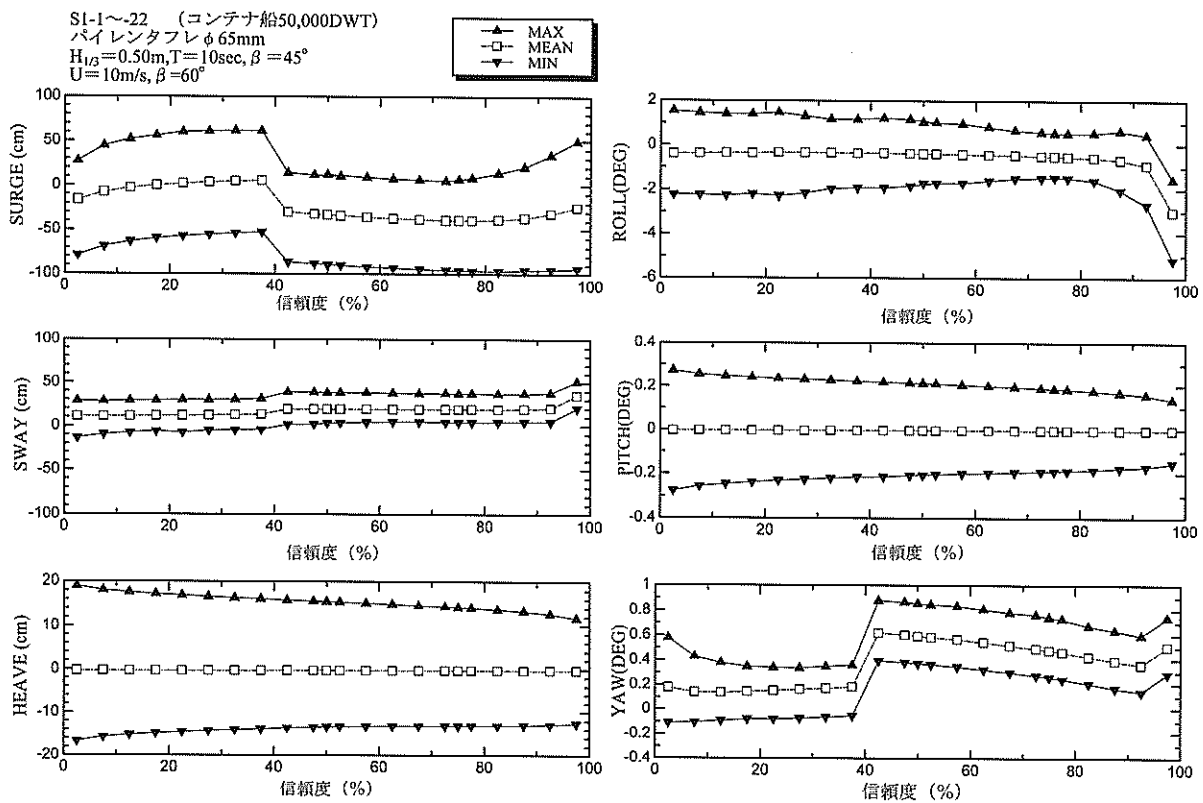


図-23(1) 船舶信頼度に対するコンテナ船の動揺量 (パイレンタフレ) 風向 $60^\circ$

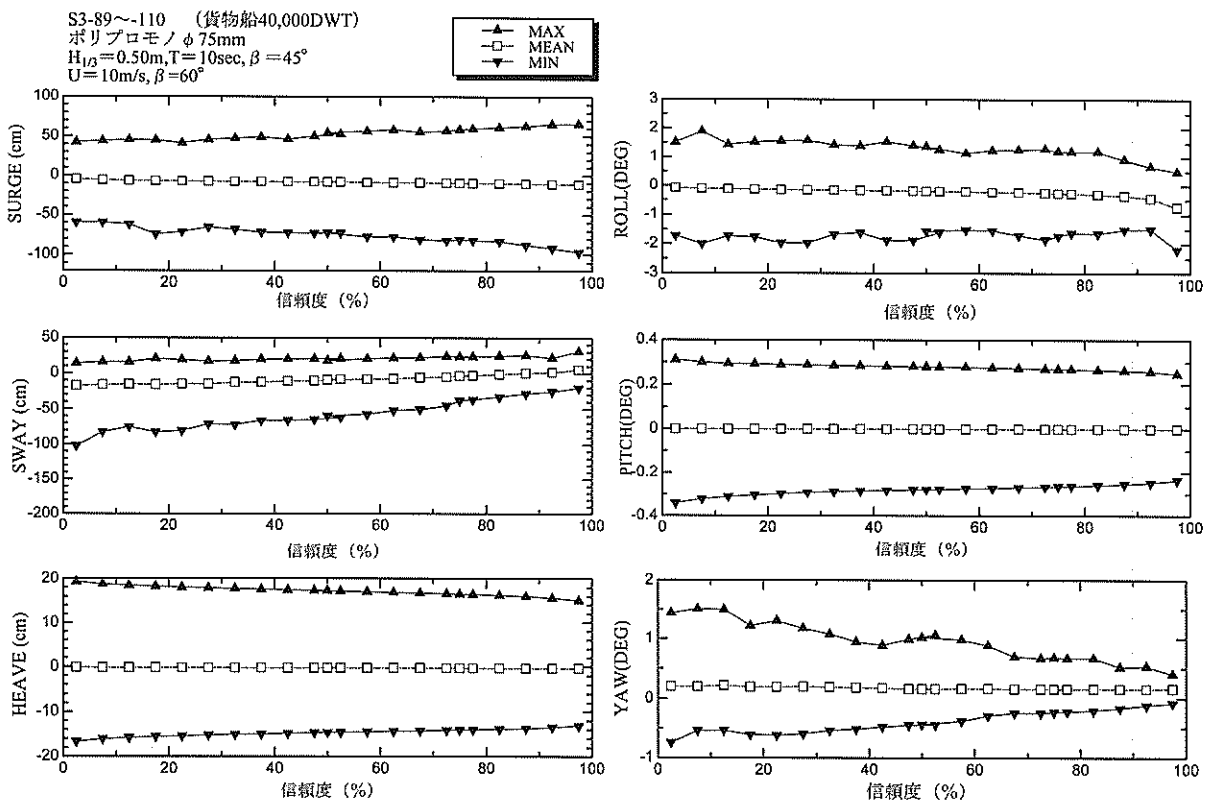


図-23(2) 船舶信頼度に対する一般貨物船の動揺量 (ポリプロモノ) 風向 $60^\circ$

F1-171~180 (コンテナ船50,000DWT信頼度75%)  
 パイレンタフレ  $\phi$  65mm  
 $H_{1/3}=0.50m, T=10sec, \beta=45^\circ$   
 $U=10m/s, \beta=0\sim 330^\circ$

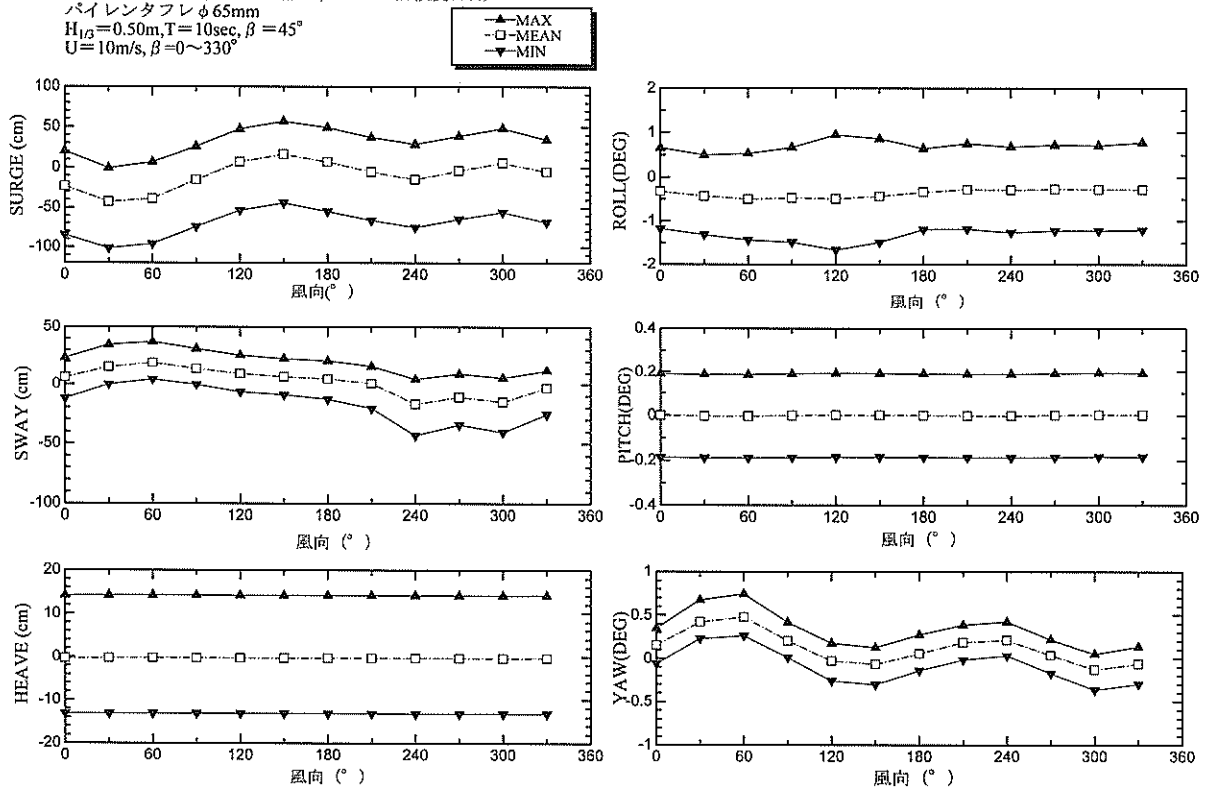


図-24(1) 風向に対するコンテナ船の動揺量 (パイレンタフレ) 船舶信頼度75%

F3-267~276 (貨物船40,000DWT信頼度75%)  
 ポリプロモノ  $\phi$  75mm  
 $H_{1/3}=0.50m, T=10sec, \beta=45^\circ$   
 $U=10m/s, \beta=0\sim 330^\circ$

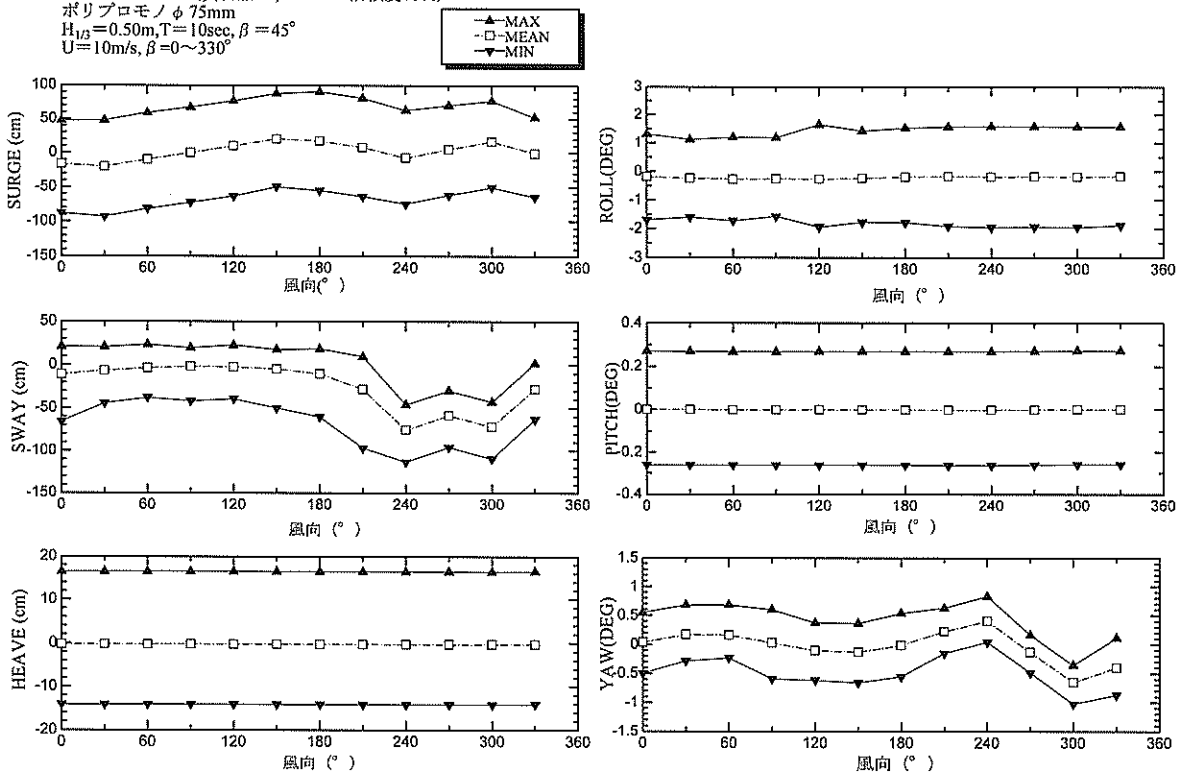


図-24(2) 風向に対する一般貨物船の動揺量 (ポリプロモノ) 船舶信頼度75%

S1 (001~044)  
 コンテナ船50,000DWT  
 パイレンタフレφ65mm  
 H1/3=0.50m,T=10s  
 U=10m/s

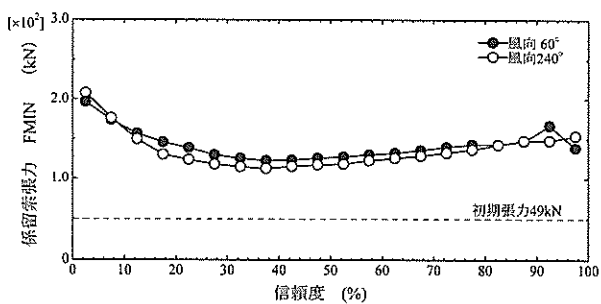
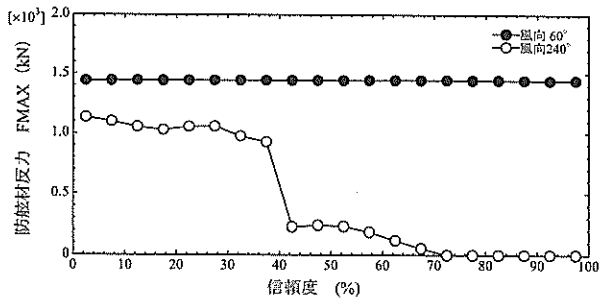


図-25 (1) 船舶信頼度に対するコンテナ船  
 (パイレンタフレ) の係留力の最大値

F1 (147~156)  
 コンテナ船50,000DWT  
 パイレンタフレφ60mm  
 H1/3=0.50m,T=10s  
 U=10m/s

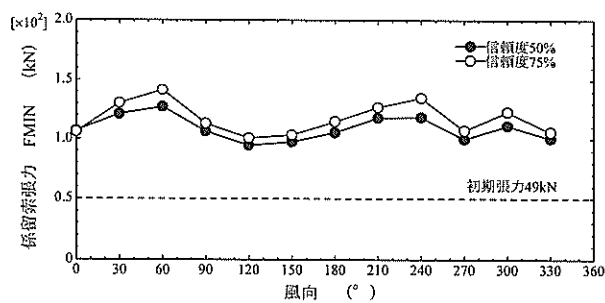
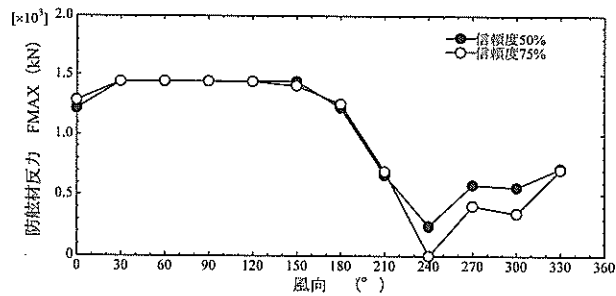


図-26 (1) 風向に対するコンテナ船  
 (パイレンタフレ) の係留力の最大値

S3 (089~132)  
 貨物船40,000DWT  
 ポリプロモノφ75mm  
 H1/3=0.50m,T=10s  
 U=10m/s

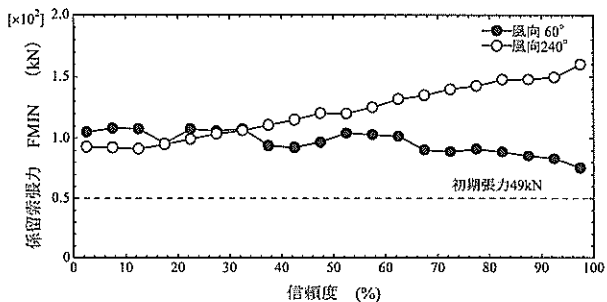
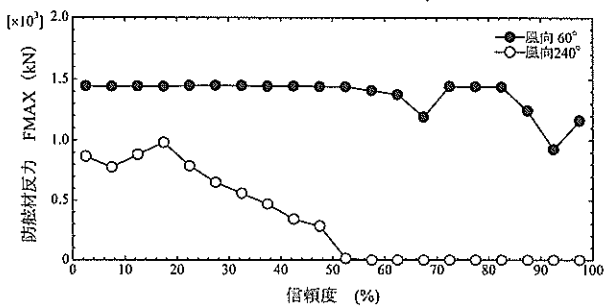


図-25 (2) 船舶信頼度に対する一般貨物船  
 (ポリプロモノ) の係留力の最大値

F3  
 貨物船40,000DWT  
 ポリプロモノφ75mm  
 H1/3=0.50m,T=10s  
 U=10m/s

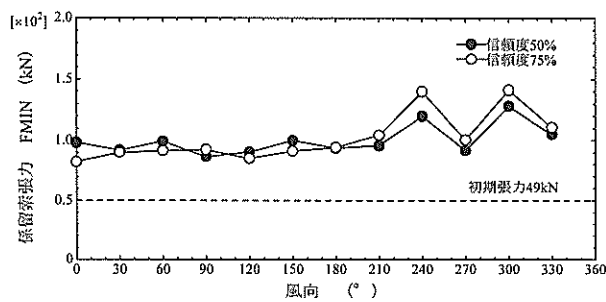
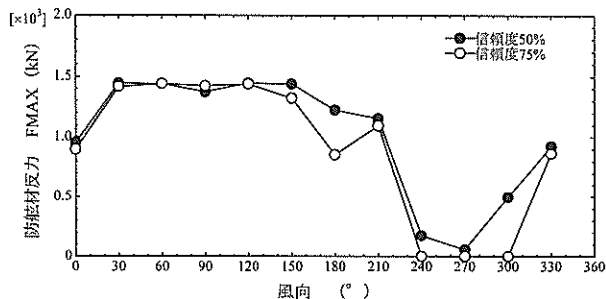


図-26 (2) 風向に対する一般貨物船  
 (ポリプロモノ) の係留力の最大値

(6) 係留力のシミュレーション結果

a) 船舶信頼度に対する係留力特性

図-25(1)～(2)は、船舶信頼度に対する係留力（防衛工反力、係留索張力）の最大値を示したものである。船舶・係留系条件は図-23(1)～(2)と同一である。防衛工反力は、風向60° の場合は船舶信頼度によらず1,500kN程度である。これは、風向60° の場合には、船舶を係船岸側へ押し付ける方向に風圧力が作用するため、防衛工の反力値が防衛工の反力特性の定反力区間に入るからである。一方、風向240° の場合は、船舶が係船岸から離される方向に風圧力が作用するため、船舶信頼度が大きくなって船舶の風圧受圧面積が大きくなると、防衛工反力は発生しなくなる。また、係留索張力については、コンテナ船の場合は船舶信頼度30～40%で最も小さくなるが、一般貨物船の場合は風向によって異なり、風向240° では船舶信頼度が大きくなるにつれて徐々に大きくなる傾向にある。

b) 風向に対する係留力特性

図-26(1)～(2)は、風向に対する係留力（防衛工反力、係留索張力）の最大値を示したものである。船舶・係留系条件は図-23(1)～(2)と同一である。図には、船舶信頼度50%および船舶信頼度75%に対する係留力を示している。コンテナ船の場合には、防衛工反力は風向30° から150° の範囲でほぼ一定の値を示しているが、これは、先に述べたように防衛工の反力値が防衛工の反力特性の定反力区間に入っているからである。また、コンテナ船の係留索張力は、風向60° および240° の場合に大きい傾向が見られる。一方、一般貨物船の場合には、コンテナ船の場合と同様に、防衛工反力は風向30° から150° の範囲でほぼ一定値を示している。一般貨物船の係留索張力については、風向 240° および300° の場合に張力が最大になっている。これは、風向が船舶を係船岸から離す方向であり、しかも船舶に対して真横から30° ずれてヨウモメントが船舶に作用するケースである。

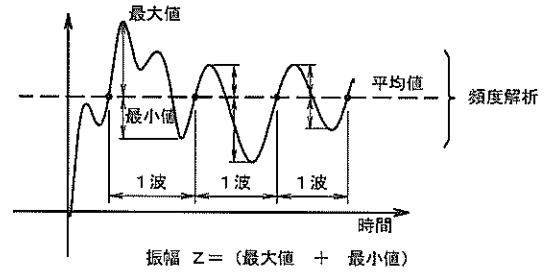
以上のことから、防衛工反力および係留索張力が最大になる風向条件（風向60° および240° ）に対して、動揺量および係留力の頻度分布を求めることとした。

(7) 動揺量および係留力の頻度分布

a) 頻度分布の解析方法

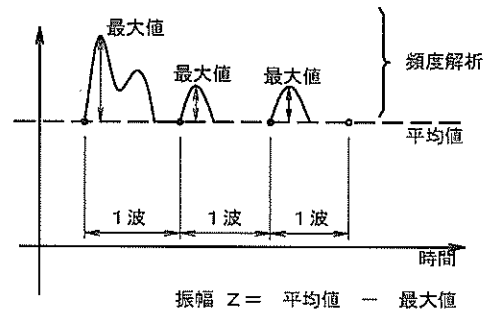
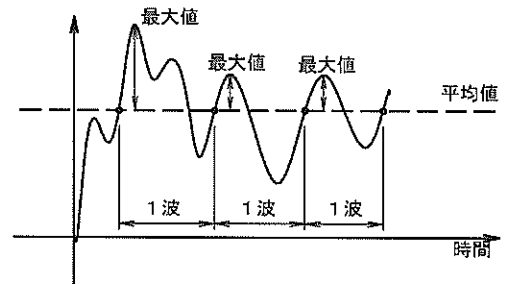
船舶の動揺シミュレーションで得られた動揺量および係留力の時系列データを用いて、それらの頻度分布を算定した。この頻度分布解析では、時系列データの波形をゼロアップクロス法により一波一波の波に分解するが、その振幅については、図-27に示すように動揺量と係留力で取り方を変えて解析した。

手法1



両振幅→船舶の動揺量（動揺6成分）

手法2



最大値の片振幅→係留力（防衛工反力、係留索張力）

図-27 頻度分布の解析方法

Case158 コンテナ船信頼度75%

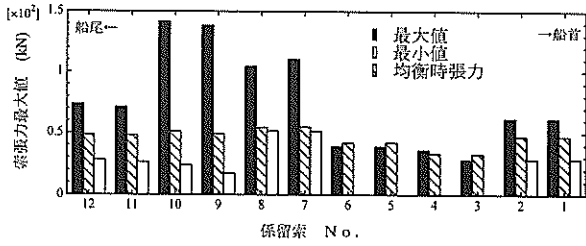
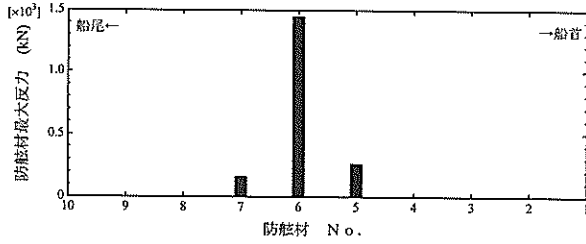


図-28(1) 係留施設別のコンテナ船(船舶信頼度75%)の係留力の最大値(風向60°)(Case158)

Case254 貨物船信頼度75%

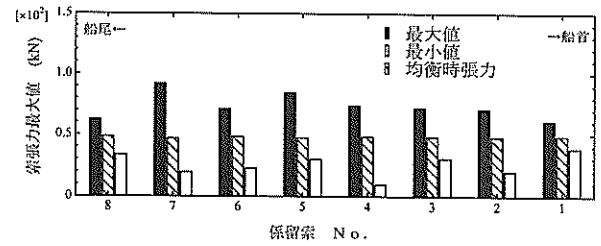
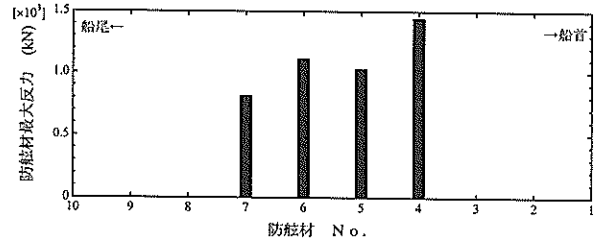


図-28(3) 係留施設別の一般貨物船(船舶信頼度75%)の係留力の最大値(風向60°)(Case254)

Case164 コンテナ船信頼度75%

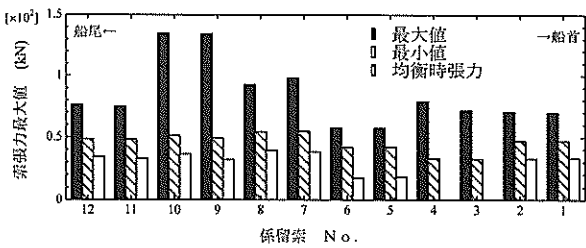
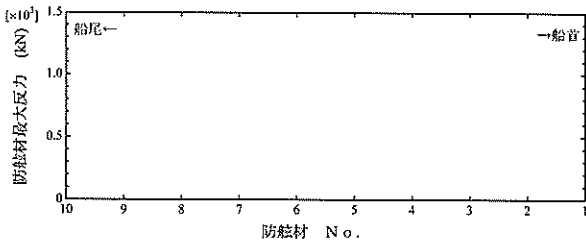


図-28(2) 係留施設別のコンテナ船(船舶信頼度75%)の係留力の最大値(風向240°)(Case164)

Case260 貨物船信頼度75%

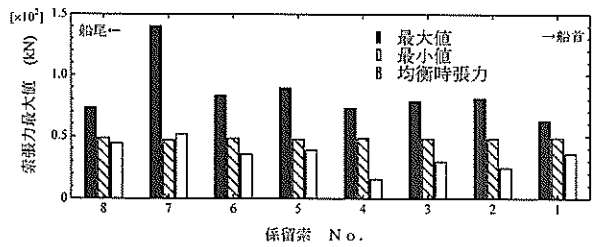
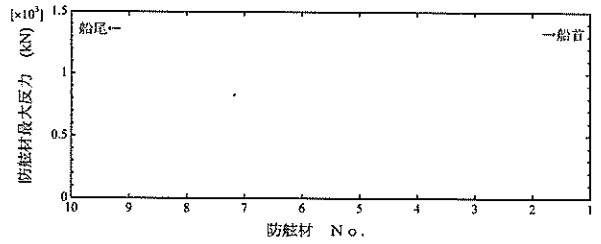


図-28(4) 係留施設別の一般貨物船(船舶信頼度75%)の係留力の最大値(風向240°)(Case260)

表-6 頻度分布解析の計算ケース

| 船種    | 重量トン     | 船舶信頼度 | 風向          | 係留索   | 防衝工  |
|-------|----------|-------|-------------|-------|------|
| コンテナ船 | 50,000 t | 75%   | 60°<br>240° | No.10 | No.6 |
| 一般貨物船 | 40,000 t | 75%   | 60°<br>240° | No.7  | No.4 |



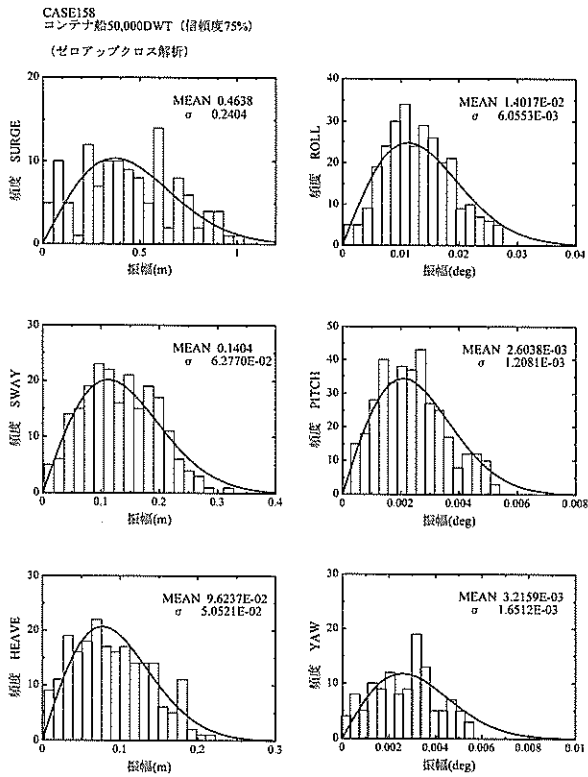


図-29 コンテナ船の動揺振幅の頻度分布  
(風向60°)

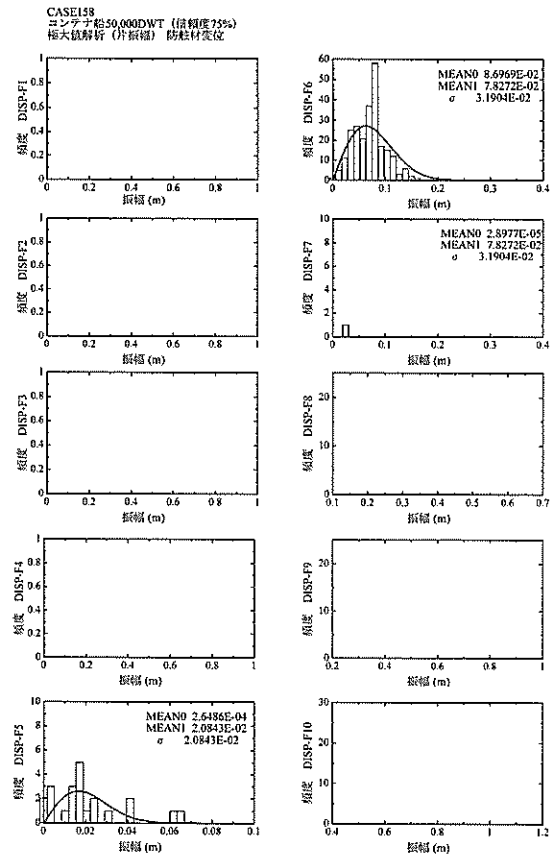


図-30 コンテナ船の防舷工反力の頻度分布  
(風向60°)

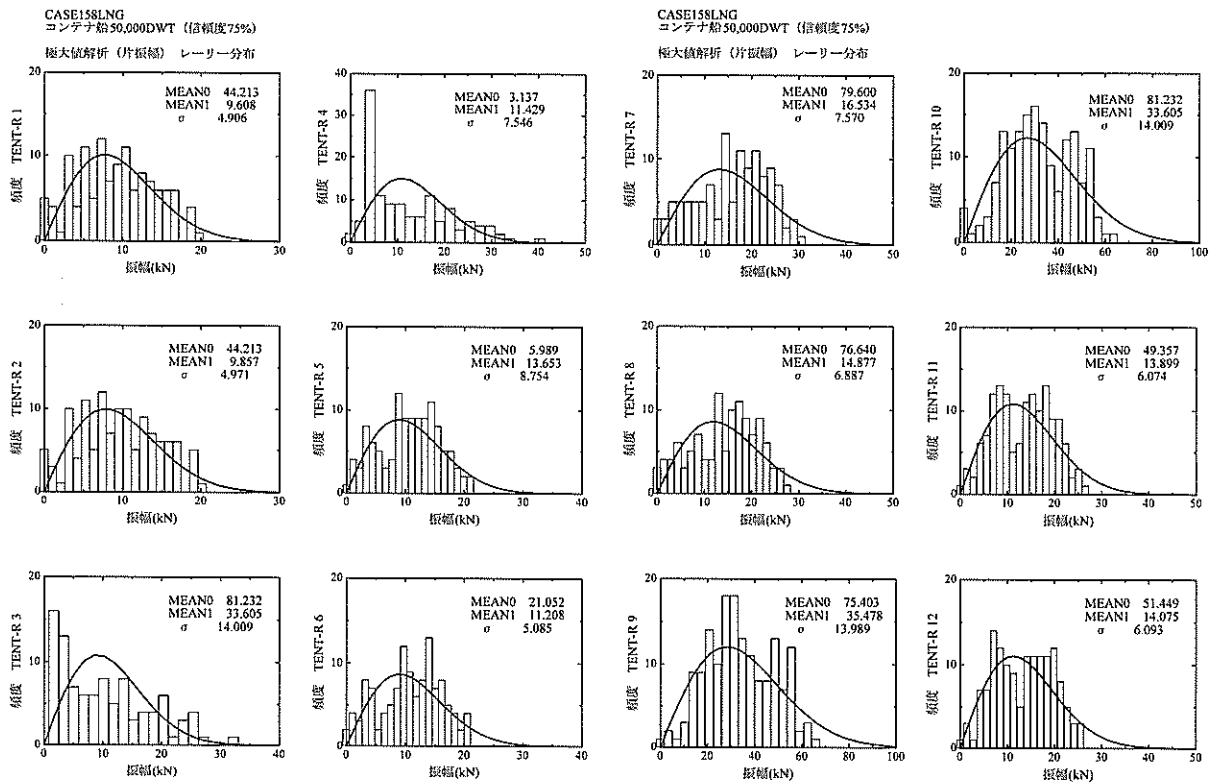


図-31 コンテナ船の係留索張力 (パイレンタフレ) の頻度分布 (風向60°)

すべての防衝工および係留索に対して頻度分布解析を行うことは困難であるため、ここでは、解析対象とする防衝工および係留索を選定する。すなわち、顕著に係留力が発生している防衝工および係留索に限定して解析を行う。図-28(1)~(4)は、防衝工反力および係留索張力の最大値および最小値を係留施設ごとに示したものである。また、係留索については、波浪および風の外力が作用していない係留船舶の均衡状態における張力を均衡時張力として示している。この均衡時張力は、初期張力49kNとほぼ同等の張力となっており、張力が突出して発生している係留索はない。これらの図から、防衝工反力および係留索張力が最大になる防衝工および係留索が明らかになったので、表-6に示す計算ケースについて頻度分布解析を行った。ここでは、風向60°の場合の50,000DWTコンテナ船の動揺量および係留力の頻度分布について考察する。他の結果については、付録Dに掲載する。

#### b) 動揺量の頻度分布

図-29は、風向60°の場合のコンテナ船の動揺量の頻度分布を動揺成分ごとに示したものである。図には、レーリー分布の理論曲線を実線で併せて示している。いずれの動揺成分の頻度分布もレーリー分布におおむね一致しているが、頻度が少ないものはばらつきが大きいことがわかる。動揺量の頻度分布がレーリー分布に一致する傾向にあるのは、波浪の出現頻度分布がレーリー分布によく一致することに起因している。

#### c) 防衝工反力の頻度分布

図-30は、風向60°の場合のコンテナ船に対する防衝工反力の頻度分布である。ただし、防衝工反力は防衝工の反力特性の定反力区間に入ることが多いことから、防衝工反力の頻度分布を求めることは難しい。そこで、ここでは防衝工反力の代わりに防衝工変位の頻度分布を示している。図中の実線は、レーリー分布の理論曲線である。船舶に接触しない防衝工があるため、反力が生じている防衝工についてのみ頻度分布が現れている。防衝工変位の頻度分布の形状は、レーリー分布にあまり一致していない。これは、防衝工の反力特性が強い非線形履歴を有しているため、レーリー分布のような線形の確率分布と厳密には一致しにくいからである。

#### d) 係留索張力の頻度分布

図-31は、風向60°の場合のコンテナ船に対する係留索張力の頻度分布である。図中の実線は、レーリー分布の理論曲線を示している。この図を見ると、張力の発生頻度が少ない係留索については、係留索張力の頻度分布が必ずしもレーリー分布に一致していない。しかしながら、係留索張力が大きいNo.9およびNo.10の頻度分布につい

ては、レーリー分布に一致する傾向がある。係留索張力の頻度分布がレーリー分布に一致しにくい理由として、係留索の張力特性が弱い非線形性を有していることが考えられる。

#### (8) まとめ

50,000DWTコンテナ船および40,000DWT一般貨物船を対象として、係留船舶の動揺シミュレーションを行い、船舶諸元および外力条件の変化が船舶の動揺量および係留力へ及ぼす影響について分析した。また、船舶の動揺量および係留力の頻度分布を算定することにより、その確率的変動特性を評価した。

## 5. 信頼性解析による温度補正係数および速度補正係数を考慮した防衝工の安全性評価

### 5.1 概説

防衝工の設計の合理化を図る目的で、限界状態設計法の考え方に基づいて防衝工の安全性を評価する。防衝工の性能を照査する場合には、防衝工の特性に及ぼす温度影響および速度影響を考慮する必要があることが指摘されている。そこで、PIANCにより提案されている温度補正係数および速度補正係数を考慮する場合と考慮しない場合との相違を明確にし、その影響度について検討する。また、その結果に基づき、限界状態設計法における安全係数について検討する。

### 5.2 条件の設定

#### (1) 気温の確率分布の設定

我が国の代表的な気象条件として、寒冷地域、本州地域、温暖地域の3地域を対象とし、各地域における対象港湾を釧路港、横浜港、那覇港として設定し、各港湾における気温の確率分布を求める。まず、気温の出現頻度分布を求めるデータとして、(財)日本気象協会の地上気象観測原簿の1989年から2000年までの観測データを用い、頻度分布解析を行う。気温の確率分布は、観測データから求めた気温の出現頻度分布を基にして、正規分布と仮定してモデル化する。ここでは、一般的に船舶の接岸作業が実施される時間として、6~18時までの気温の観測データを用いて解析を行っている。図-32(1)~(3)に、各港湾における気温の出現頻度分布および正規分布による理論度数分布を示す。

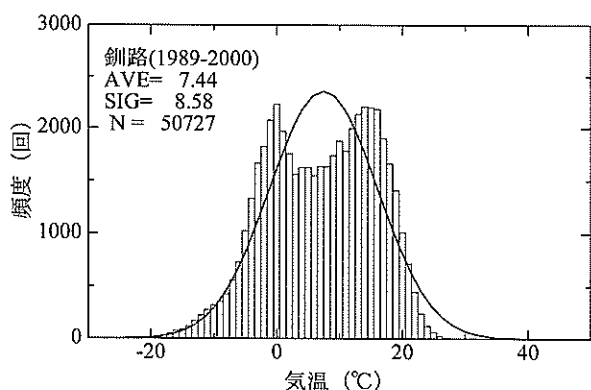


図-32 (1) 釧路港の気温の頻度分布

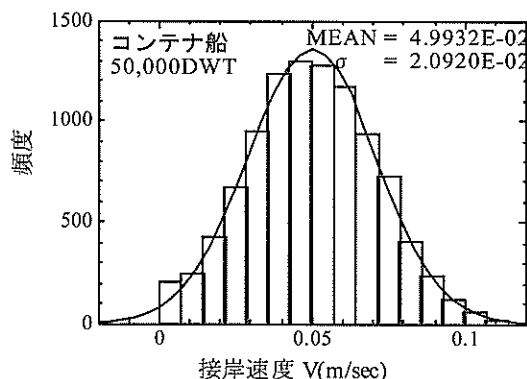


図-33 コンテナ船の接岸速度の頻度分布

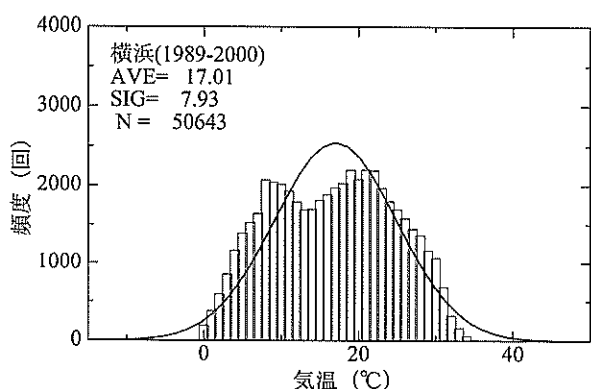


図-32 (2) 横浜港の気温の頻度分布

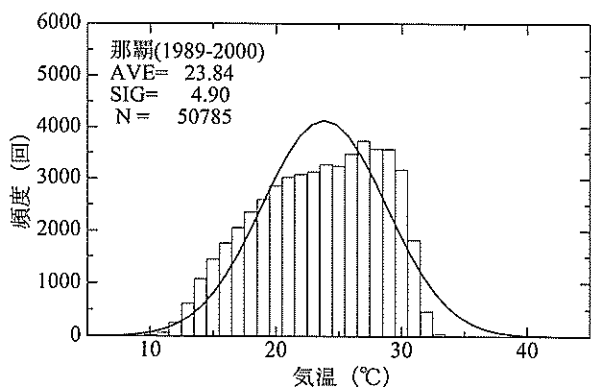


図-32 (3) 那覇港の気温の頻度分布

(2) 接岸速度の確率分布の設定

接岸速度の確率分布については、上田ら (2000) が横浜港における実測値 (守屋ら, 1991) に基づいた分布 (図-6) を用いて検討を行っているの、その分布を参考にして正規分布としてモデル化する。図-33は、モンテカルロシミュレーションを用いて発生させた接岸速度の頻度分布と正規分布による理論度数分布を示したものである。

(3) 補正係数のデータベース化

温度補正係数および速度補正係数については、防衛工として天然ゴムおよび合成ゴムの防舷材を対象とし、文献 (上田ら, 1999 ; PIANC, 2002) を参考にして補正係数をデータベース化する。データベース化した温度補正係数を図-34 (1) に、また、速度補正係数を図-34 (2) に示す。なお、ここでは、合成ゴムの防舷材に対する補正係数は仮定して設定している。

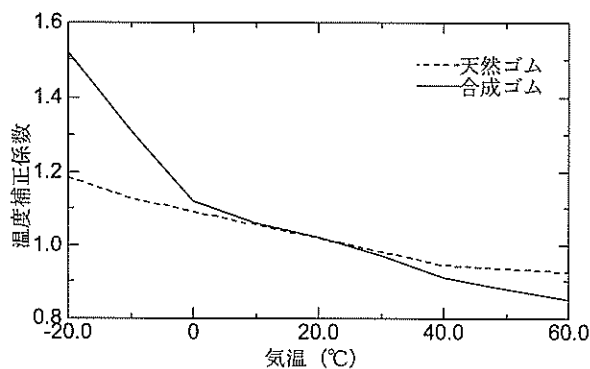


図-34 (1) 温度補正係数

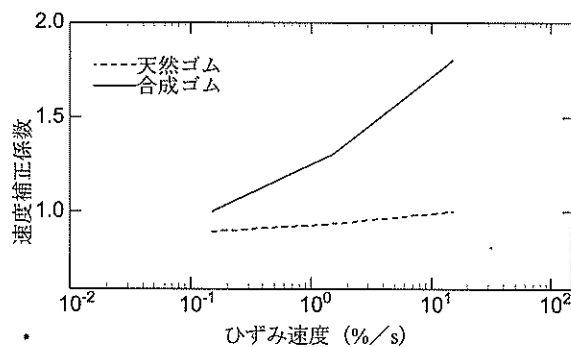


図-34 (2) 速度補正係数

(4) 現行設計法に基づいた防衝工の選定

現行設計法に基づいて船舶の接岸エネルギーを算定し、その接岸エネルギーを吸収可能な防衝工を選定する。表-7は、船舶の接岸エネルギーの算定条件および算定結果を示す。

表-7 接岸エネルギーの算定条件および算定結果

|         |                        |
|---------|------------------------|
| 対象船舶    | 50,000WDTコンテナ船(信頼度75%) |
| 排水量     | 69,900t                |
| 接岸速度    | 0.10m/s                |
| 接岸角度    | 5.0°                   |
| ブロック係数  | 0.64                   |
| 仮想質量係数  | 1.99                   |
| 偏心係数    | 0.56                   |
| 接岸エネルギー | 389kJ                  |

船舶の接岸エネルギーの算定結果から、性能公差-10%を考慮した吸収エネルギー438kJ (カタログ値487kJ)を有する防衝工として、ここではセル型防舷材 (1,250H)を選定した。

(5) 限界状態設計法による性能照査

式(2)および式(3)で示した性能照査式を用いて、防衝工の安全性照査を実施する。信頼性解析では、防衝工の性能公差のばらつきを確率分布として考慮する。図-35は、防衝工の性能公差の頻度分布を示している。防衝工の性能公差は、平均値0.997、標準偏差0.031の正規分布に従うものとする。

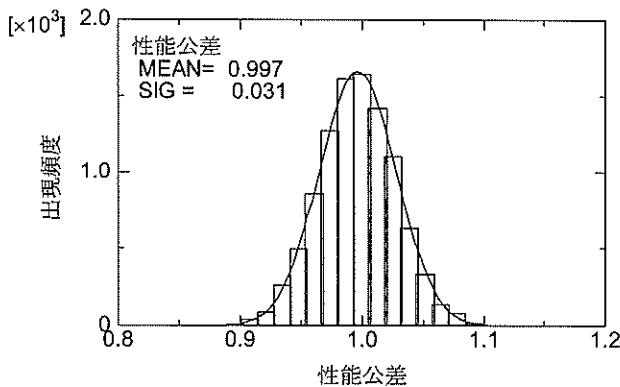
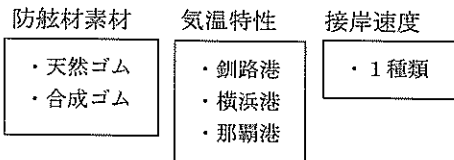


図-35 防衝工の性能公差の頻度分布

5.3 温度補正係数の評価

(1) 概要

モンテカルロシミュレーションによる防衝工の信頼性解析を実施する。ただし、変動させるパラメータは温度補正係数のみとして、使用環境(温度変化)の相違による防衝工の特性への影響を評価する。温度補正係数を考慮する場合の気温の確率分布については、図-32(1)~(3)に示した正規分布を使用する。また、防衝工の材質は、温度補正係数の変動幅の比較的小さい天然ゴム系の防舷材、および温度補正係数の変動幅の比較的大きい合成ゴム系の防舷材を対象として計算を行う。なお、船舶の平均接岸速度は0.05m/sに固定する。



2ケース × 3ケース × 1ケース = 計6ケース

(2) 温度補正係数の確率分布

図-36は、モンテカルロシミュレーションにより求めた各港湾における気温の頻度分布を示す。また、それらの気温分布に対する温度補正係数の頻度分布を図-37(1)~(6)に示す。合成ゴムの防舷材の場合で釧路港においては、温度補正係数の頻度分布が実線で示した正規分布の理論曲線に一致していない。すなわち、温度補正係数の変動の大きい合成ゴムの防舷材を用いた場合は、気温の変化の大きい寒冷地域において、温度補正係数の特性の影響を受けやすいと言える。

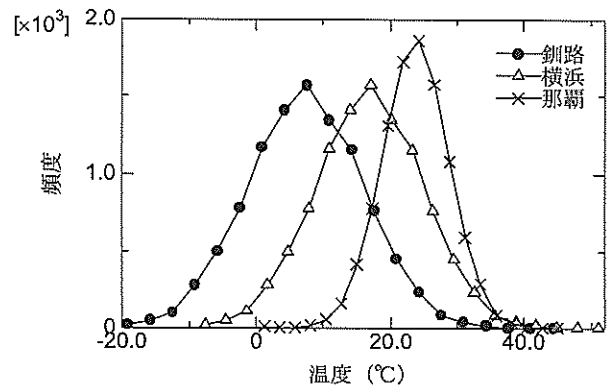


図-36 モンテカルロシミュレーションによる気温の頻度分布

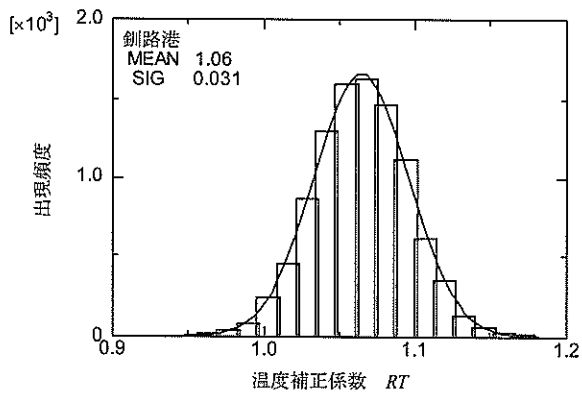


図-37(1) モンテカルロシミュレーションによる  
温度補正係数の頻度分布 (天然ゴム：釧路港)

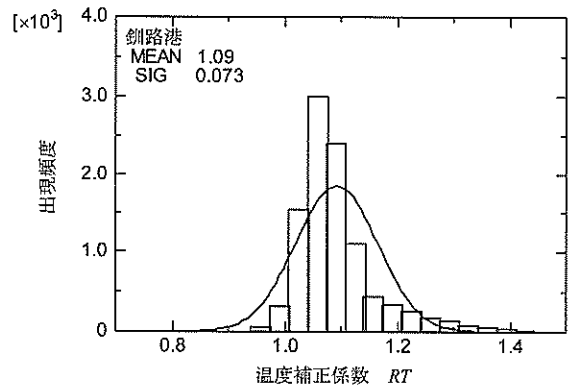


図-37(4) モンテカルロシミュレーションによる  
温度補正係数の頻度分布 (合成ゴム：釧路港)

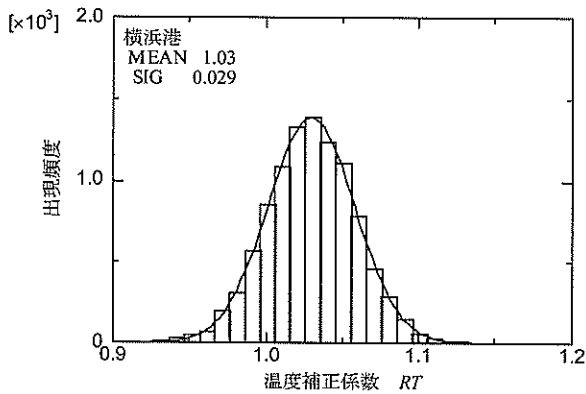


図-37(2) モンテカルロシミュレーションによる  
温度補正係数の頻度分布 (天然ゴム：横浜港)

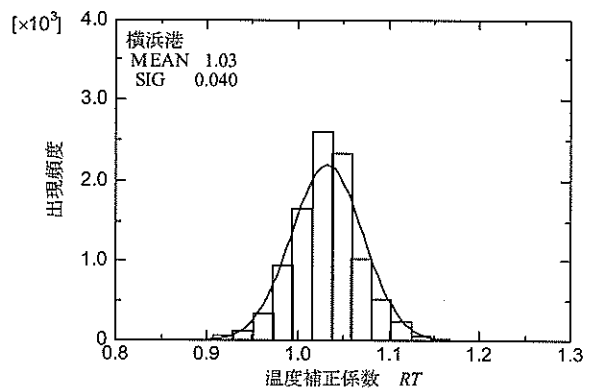


図-37(5) モンテカルロシミュレーションによる  
温度補正係数の頻度分布 (合成ゴム：横浜港)

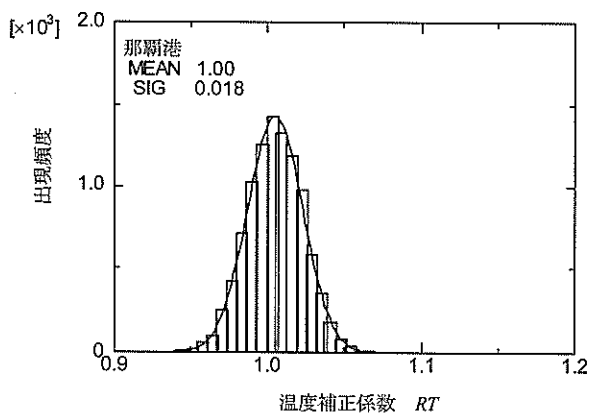


図-37(3) モンテカルロシミュレーションによる  
温度補正係数の頻度分布 (天然ゴム：那覇港)

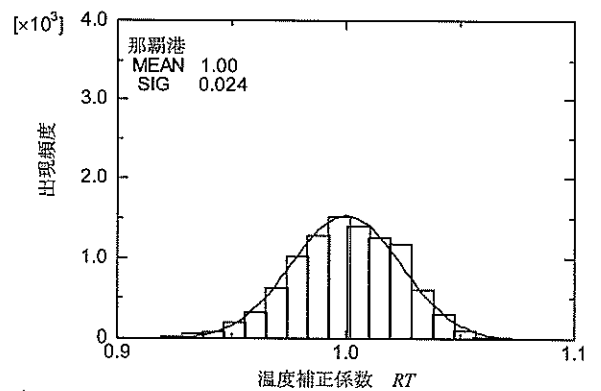


図-37(6) モンテカルロシミュレーションによる  
温度補正係数の頻度分布 (合成ゴム：那覇港)

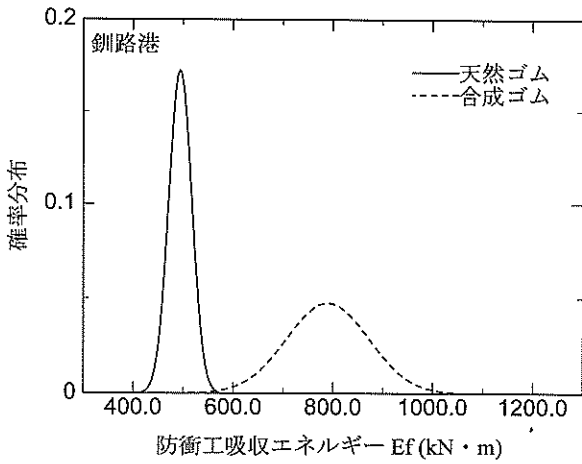


図-38(1) 天然ゴムおよび合成ゴムによる吸収エネルギーの比較（釧路港）

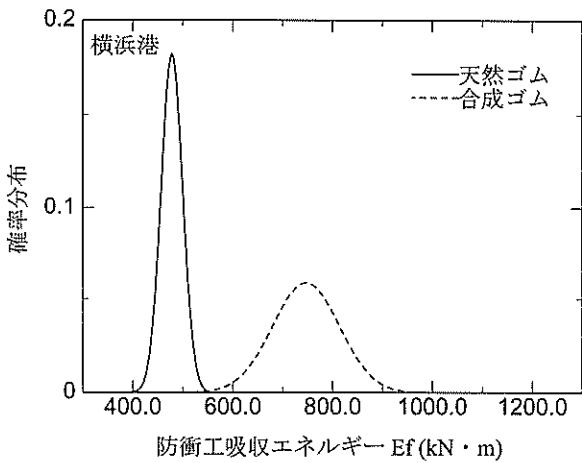


図-38(2) 天然ゴムおよび合成ゴムによる吸収エネルギーの比較（横浜港）

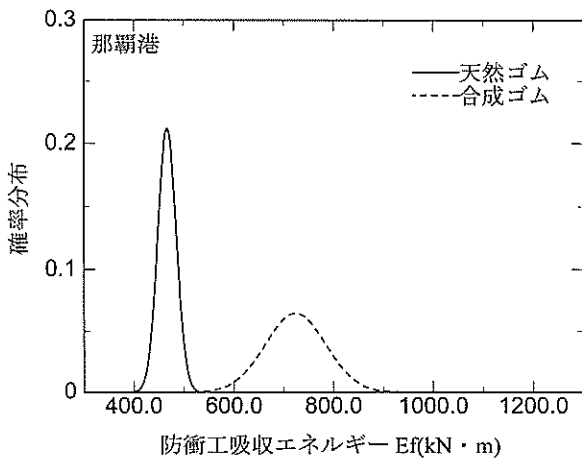


図-38(3) 天然ゴムおよび合成ゴムによる吸収エネルギーの比較（那覇港）

(3) 温度補正係数を考慮した吸収エネルギー

式(2)および式(3)の限界状態設計法の照査式における吸収エネルギーを算定する。ここでは、対象港湾ごとに天然ゴムおよび合成ゴムの防舷材に対する吸収エネルギーの確率分布を算定する。図-38(1)～(3)は、天然ゴムおよび合成ゴムの防舷材の材質の相違による吸収エネルギーの確率分布の変化を対象港湾ごとに示したものである。これらの図を見ると、合成ゴムの防舷材の方が吸収エネルギーが大きく、その分布も広いことがわかる。また、図-39(1)～(2)は、天然ゴムおよび合成ゴムの防舷材の吸収エネルギーを超過確率分布として示している。同一の超過確率に対しては、寒冷地域において吸収エネルギーが大きくなり、合成ゴムの防舷材による吸収エネルギーは天然ゴムの場合の約2倍である。ただし、防舷材は低温時には脆くなる傾向にあるため、注意が必要である。

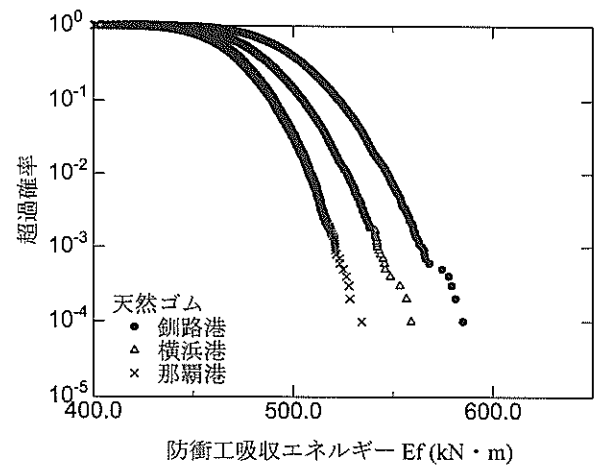


図-39(1) 吸収エネルギーの超過確率（天然ゴム）

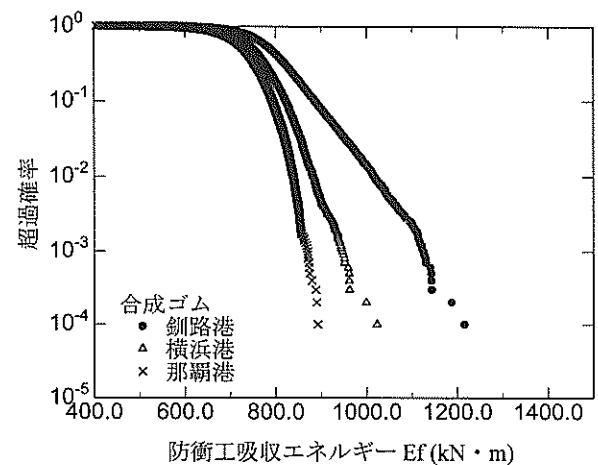


図-39(2) 吸収エネルギーの超過確率（合成ゴム）



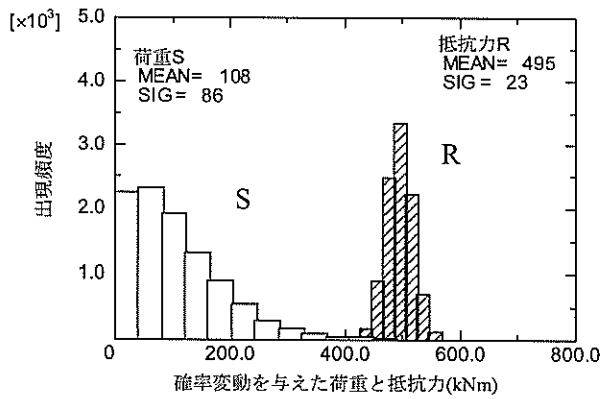


図-40(1) 接岸エネルギーおよび吸収エネルギーの  
頻度分布 (天然ゴム：釧路港)

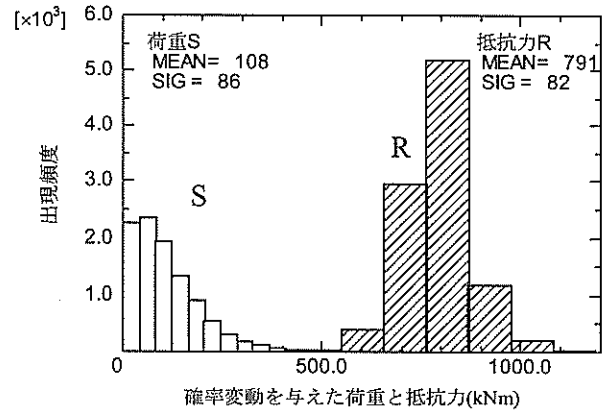


図-41(1) 接岸エネルギーおよび吸収エネルギーの  
頻度分布 (合成ゴム：釧路港)

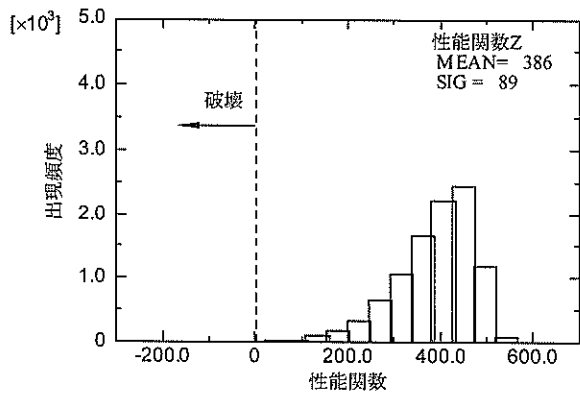


図-40(2) 性能関数の頻度分布 (天然ゴム：釧路港)

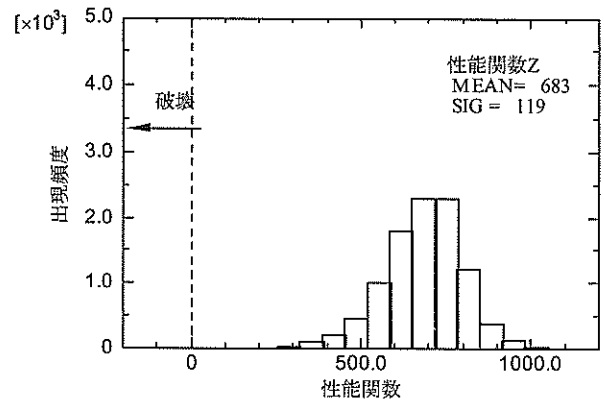


図-41(2) 性能関数の頻度分布 (合成ゴム：釧路港)

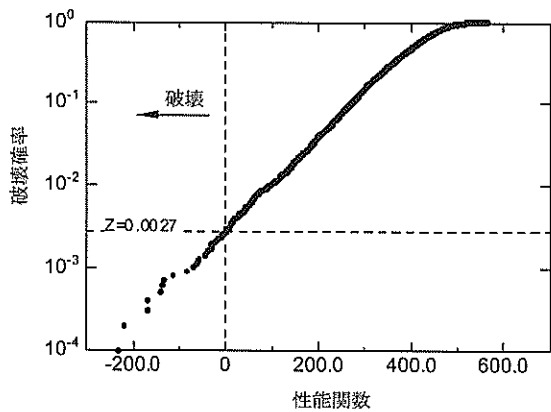


図-40(3) 防衛工の破壊確率 (天然ゴム：釧路港)

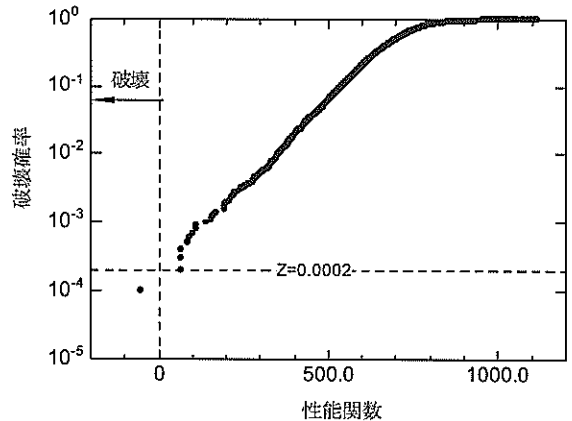


図-41(3) 防衛工の破壊確率 (合成ゴム：釧路港)

(4) 温度補正係数の確率的評価

a)破壊確率

防衝工の吸収エネルギーの確率分布を用いて、50,000DWTコンテナ船の接岸エネルギー（平均接岸速度0.05m/s）に対する信頼性解析を行い、釧路港、横浜港、那覇港における防衝工の破壊確率を求める。釧路港における天然ゴムの防舷材について、モンテカルロシミュレーションによる接岸エネルギーおよび吸収エネルギーの頻度分布を図-40(1)に示す。性能関数の頻度分布は、図-40(2)のようになる。また、図-40(3)は、性能関数の超過確率から求めた防衝工の破壊確率を示している。さらに、合成ゴムの防舷材についての結果を図-41に示す。横浜港および那覇港の結果については、付録Eに掲載する。天然ゴムの防舷材の破壊確率は合成ゴムの場合と比較して、1オーダー大きくなっている。一方、天然ゴムおよび合成ゴムの防舷材の材質ごとに見ると、使用環境（温度変化）の破壊確率に与える影響は小さいことがわかる。

b)安全性指標

信頼性解析により求められた防衝工の破壊確率から、式(12)により安全性指標を算定する。

$$\beta = \Phi^{-1}(1 - P_f) \quad (12)$$

ここで、 $\beta$ ：安全性指標、 $\Phi^{-1}$ ：標準正規分布関数の逆関数、 $P_f$ ：破壊確率、である。

算定結果を表-8(1)～(2)に示す。その結果、安全性指標は、天然ゴムの防舷材の場合は2.7程度の値を示し、合成ゴムの防舷材の場合は3.5程度となる。したがって、合成ゴムの防舷材を採用すると、安全係数を考慮しない場合にはやや過大な設計となる。

表-8(1) 気温特性を考慮した安全性指標（天然ゴム）

| 港名 | 破壊確率   | 安全性指標 |
|----|--------|-------|
| 釧路 | 0.0027 | 2.78  |
| 横浜 | 0.0038 | 2.67  |
| 那覇 | 0.0040 | 2.65  |

表-8(2) 気温特性を考慮した安全性指標（合成ゴム）

| 港名 | 破壊確率   | 安全性指標 |
|----|--------|-------|
| 釧路 | 0.0002 | 3.54  |
| 横浜 | 0.0002 | 3.54  |
| 那覇 | 0.0003 | 3.43  |

5.4 速度補正係数の評価

(1) 概要

モンテカルロシミュレーションによる防衝工の信頼性解析を実施する。ただし、変動させるパラメータは速度補正係数のみとして、50,000DWTコンテナ船の平均接岸速度の相違による防衝工の特性への影響を評価する。このとき、船舶の平均接岸速度は、0.05m/s, 0.08m/s, 0.10m/sと設定する。また、気温特性については代表的な一事例とし、横浜港の気温特性を用いる。また、防衝工の材質は、速度補正係数の変動幅の比較的小さい天然ゴム系の防舷材、および速度補正係数の変動幅の比較的大きい合成ゴム系の防舷材を対象として計算を行う。

| 防舷材素材          | 気温特性 | 接岸速度 |
|----------------|------|------|
| ・天然ゴム<br>・合成ゴム | ・横浜港 | ・3種類 |

2ケース × 1ケース × 3ケース = 計6ケース

(2) 速度補正係数の確率分布

船舶の接岸時の平均速度として0.05m/s, 0.08m/s, 0.10m/sの3種類の条件を設定した。図-42は、モンテカルロシミュレーションにより求めた接岸速度の頻度分布を示す。船舶の接岸速度の頻度分布は正規分布である。また、図-43(1)～(6)は、これらの平均接岸速度に対する速度補正係数の頻度分布を示す。速度補正係数の頻度分布は、速度補正係数が防衝工のひずみ速度の対数に比例する係数であるために、対数正規分布になっている。

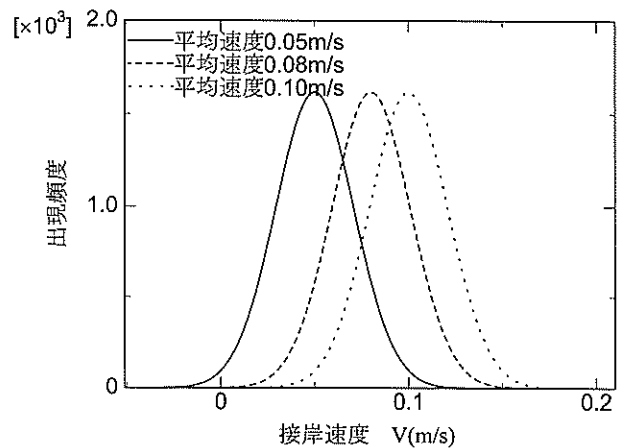


図-42 モンテカルロシミュレーションによる接岸速度の頻度分布

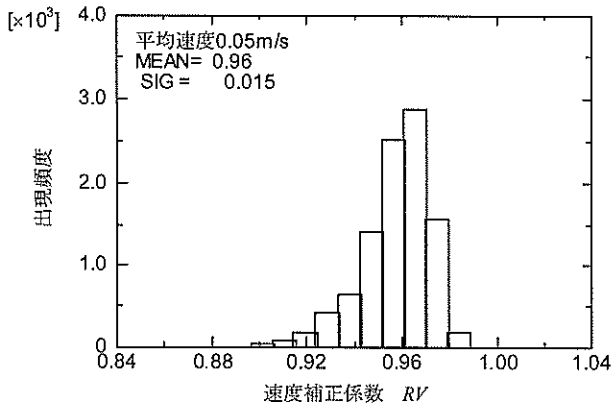


図-43(1) モンテカルロシミュレーションによる  
速度補正係数の頻度分布 (天然ゴム : 0.05m/s)

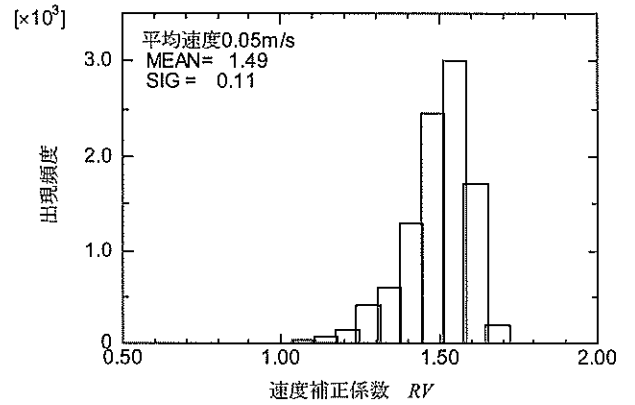


図-43(4) モンテカルロシミュレーションによる  
速度補正係数の頻度分布 (合成ゴム : 0.05m/s)

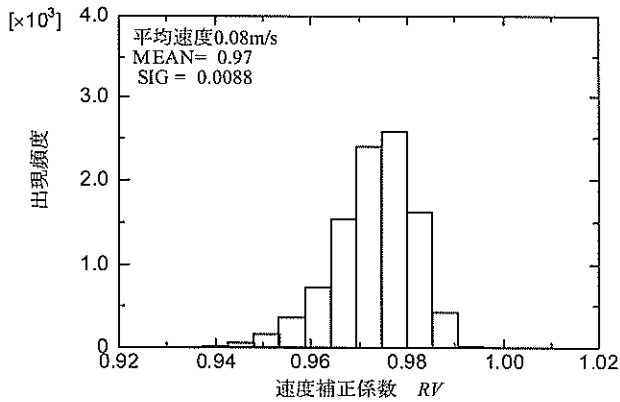


図-43(2) モンテカルロシミュレーションによる  
速度補正係数の頻度分布 (天然ゴム : 0.08m/s)

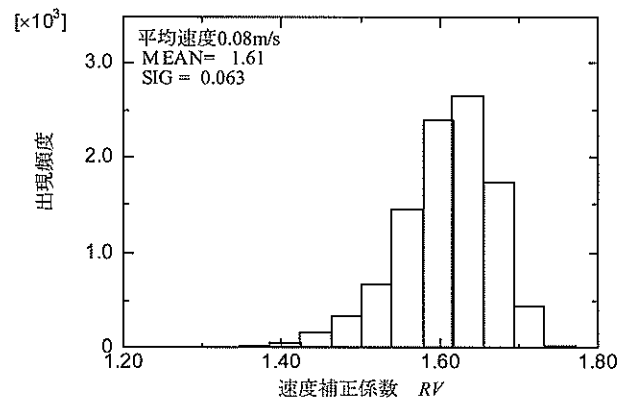


図-43(5) モンテカルロシミュレーションによる  
速度補正係数の頻度分布 (合成ゴム : 0.08m/s)

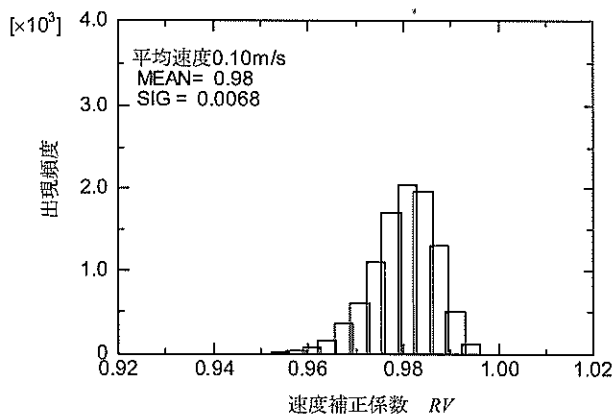


図-43(3) モンテカルロシミュレーションによる  
速度補正係数の頻度分布 (天然ゴム : 0.10m/s)

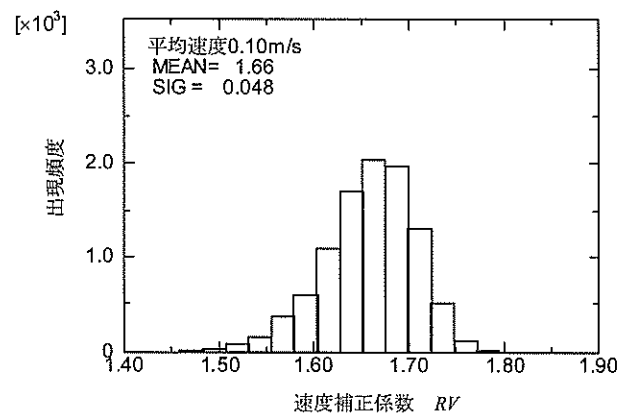


図-43(6) モンテカルロシミュレーションによる  
速度補正係数の頻度分布 (合成ゴム : 0.10m/s)

(3) 速度補正係数を考慮した吸収エネルギー

式(2)および式(3)の限界状態設計法の照査式における吸収エネルギーを算定する。このとき、船舶の平均接岸速度ごとに天然ゴムおよび合成ゴムの防舷材に対する吸収エネルギーの確率分布を算定する。図-44(1)～(2)は、平均接岸速度を変化させた場合の天然ゴムおよび合成ゴムの防舷材の吸収エネルギーを超過確率として示したものである。天然ゴムの防舷材については、平均接岸速度が異なっても吸収エネルギーはほとんど変わらない。一方、合成ゴムの防舷材については、天然ゴムの場合と比べると速度補正係数の変動幅が大きいことから、平均接岸速度の変化に対する吸収エネルギーの変化も大きくなっている。

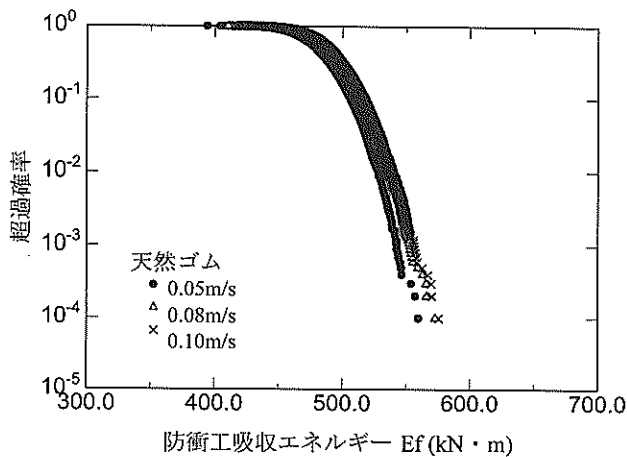


図-44(1) 吸収エネルギーの超過確率 (天然ゴム)

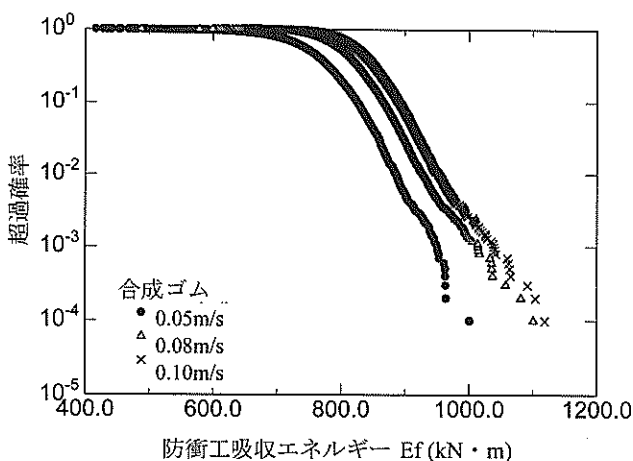


図-44(2) 吸収エネルギーの超過確率 (合成ゴム)

(4) 速度補正係数の確率的評価

a)破壊確率

防衝工の吸収エネルギーの確率分布を用いて、50,000DWTコンテナ船の平均接岸速度ごとの接岸エネルギーに対する信頼性解析を行い、防衝工の破壊確率を求める。このとき、船舶の平均接岸速度を0.05m/s, 0.08m/s, 0.10m/sの3種類に設定する。平均接岸速度0.08m/sの場合の天然ゴムの防舷材について、モンテカルロシミュレーションによる接岸エネルギーおよび吸収エネルギーの頻度分布を図-45(1)に示す。性能関数の頻度分布は、図-45(2)のようになる。また、図-45(3)は、性能関数の超過確率から求めた防衝工の破壊確率を示している。さらに、合成ゴムの防舷材についての結果を図-46に示す。平均接岸速度0.05m/sおよび0.10m/sの結果については、付録Eに掲載する。速度補正係数に対する結果と同様に、天然ゴムの防舷材の破壊確率は合成ゴムの場合と比較して、1オーダー大きくなっている。また、平均接岸速度が大きくなるほど破壊確率は大きくなるのがわかる。

b)安全性指標

信頼性解析により求められた防衝工の破壊確率から、式(12)により安全性指標を算定する。算定結果を表-9(1)～(2)に示す。その結果、平均接岸速度が増加するほど破壊確率が大きくなり、天然ゴムの防舷材の場合は、平均接岸速度0.10m/sのときには安全性指標が0.67にまで減少する。一方、合成ゴムの防舷材の場合は、平均接岸速度0.10m/sのときでも安全性指標は2.01であり、天然ゴムの場合と比べて安全性指標が大きい。

表-9(1) 接岸速度を考慮した安全性指標 (天然ゴム)

| 平均接岸速度  | 破壊確率   | 安全性指標 |
|---------|--------|-------|
| 0.05m/s | 0.0038 | 2.67  |
| 0.08m/s | 0.0650 | 1.51  |
| 0.10m/s | 0.2500 | 0.67  |

表-9(2) 接岸速度を考慮した安全性指標 (合成ゴム)

| 平均接岸速度  | 破壊確率   | 安全性指標 |
|---------|--------|-------|
| 0.05m/s | 0.0002 | 3.54  |
| 0.08m/s | 0.0034 | 2.71  |
| 0.10m/s | 0.0220 | 2.01  |

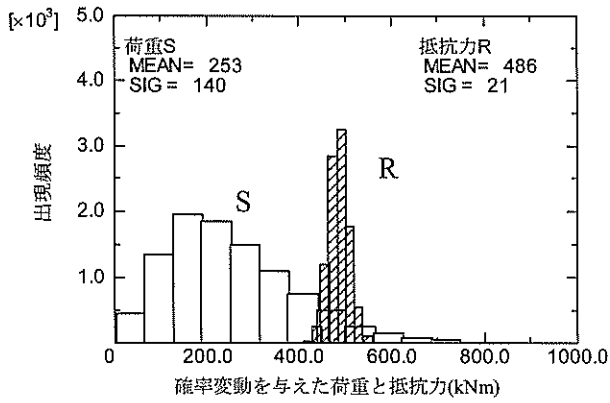


図-45(1) 接岸エネルギーおよび吸収エネルギーの  
頻度分布 (天然ゴム : 0.08m/s)

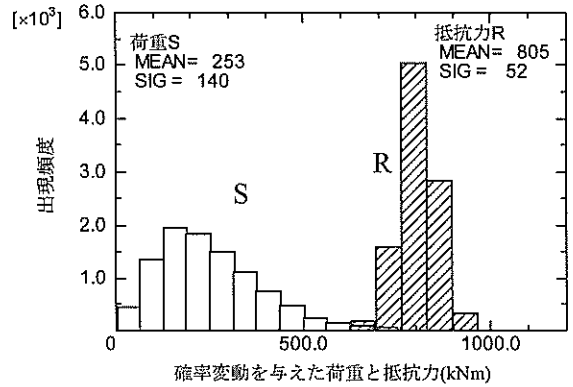


図-46(1) 接岸エネルギーおよび吸収エネルギーの  
頻度分布 (合成ゴム : 0.08m/s)

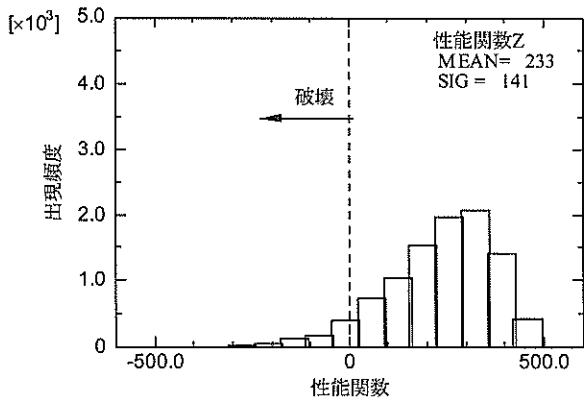


図-45(2) 性能関数の頻度分布 (天然ゴム : 0.08m/s)

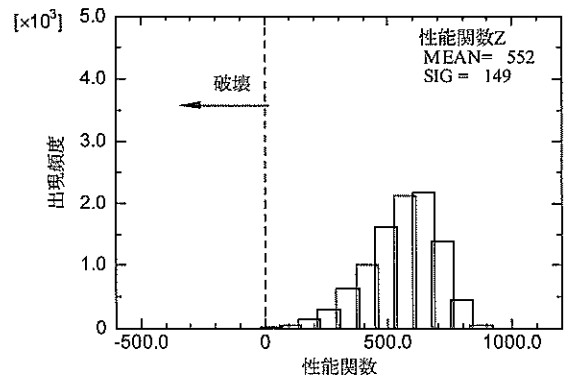


図-46(2) 性能関数の頻度分布 (合成ゴム : 0.08m/s)

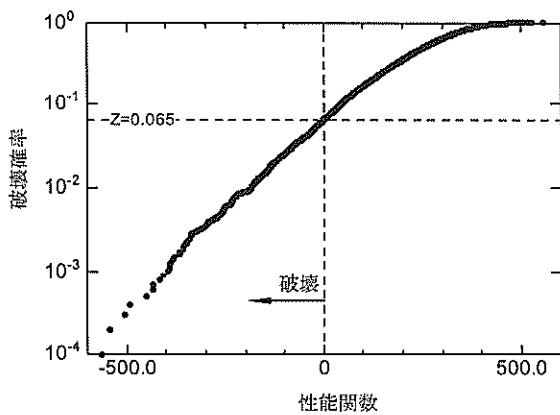


図-45(3) 防衛工の破壊確率 (天然ゴム : 0.08m/s)

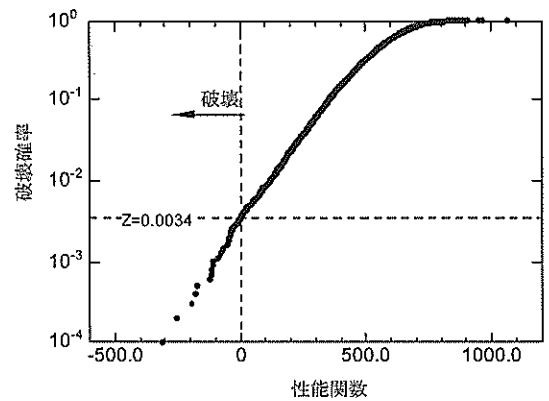


図-46(3) 防衛工の破壊確率 (合成ゴム : 0.08m/s)

5.5 補正係数を考慮しない場合との比較および総合評価

(1) 概要

5.3および5.4の結果を用いて、温度補正係数および速度補正係数を考慮しない場合の防衛工の信頼性解析の結果と比較する。また、限界状態設計法における防衛工の安全係数を算定する。

(2) 補正係数を考慮しない場合の吸収エネルギーおよび確率的評価

温度補正係数および速度補正係数を考慮しない場合の防衛工の吸収エネルギーを求める。ただし、防衛工の性能公差のばらつきを考慮し、吸収エネルギーのカタログ値に性能公差±10%程度のばらつきを設定する(吸収エネルギーの平均値  $E_{cat} = 487\text{kNm}$ , 平均値の偏り0.997, 変動係数0.031)。図-47は、補正係数を考慮しない場合の防衛工の吸収エネルギーの頻度分布を示す。

次に、この吸収エネルギーの確率分布を用いて、50,000DWTコンテナ船の接岸エネルギーに対する信頼性解析を行い、防衛工の破壊確率および安全性指標を求める。モンテカルロシミュレーションによる接岸エネルギーおよび吸収エネルギーの頻度分布を図-48(1)に示す。性能関数の頻度分布は、図-48(2)のようになる。また、図-48(3)は、性能関数の超過確率から求めた防衛工の破壊確率を示している。補正係数を考慮しない場合の防衛工の破壊確率は、0.0037となる。また、このときの安全性指標は2.68となる。

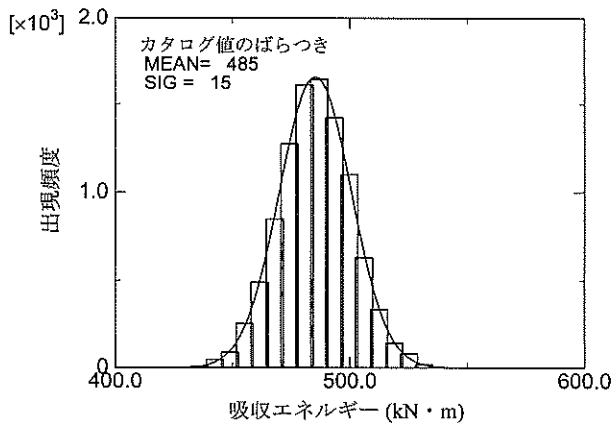


図-47 補正係数を考慮しない場合の吸収エネルギーの頻度分布 (性能公差のみ)

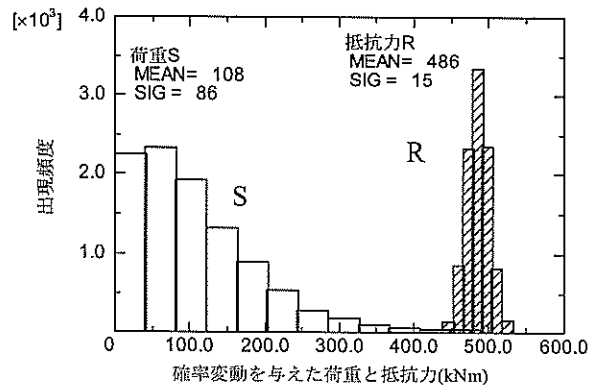


図-48(1) 接岸エネルギーおよび吸収エネルギーの頻度分布 (性能公差のみ)

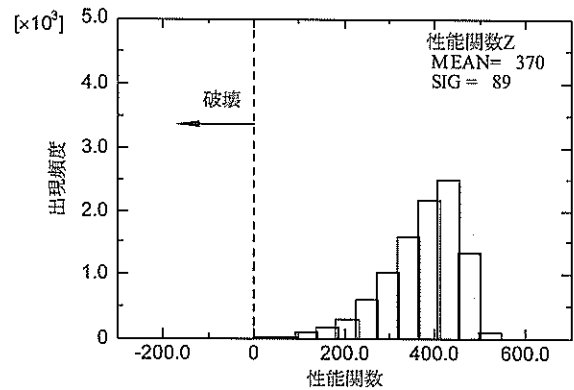


図-48(2) 性能関数の頻度分布 (性能公差のみ)

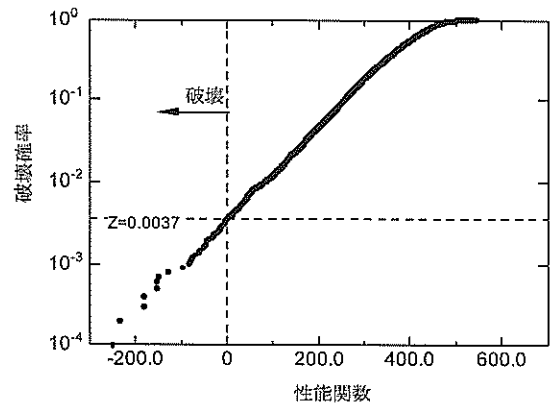


図-48(3) 防衛工の破壊確率 (性能公差のみ)

(3) 破壊確率および安全性指標

表-10(1)～(2)に破壊確率および安全性指標の結果を一覧で示す。ここでは、釧路港および那覇港において平均接岸速度が0.08m/sおよび0.10m/sの場合も追加ケースとして検討している。

表-10(1) 破壊確率および安全性指標の一覧 (天然ゴム)

| 破壊確率    |        |        |        |        |
|---------|--------|--------|--------|--------|
| 平均接岸速度  | 釧路港    | 横浜港    | 那覇港    | 補正なし   |
| 0.05m/s | 0.0027 | 0.0038 | 0.0040 | 0.0037 |
| 0.08m/s | 0.0552 | 0.0650 | 0.0721 |        |
| 0.10m/s | 0.2273 | 0.2500 | 0.2694 |        |
| 安全性指標   |        |        |        |        |
| 平均接岸速度  | 釧路港    | 横浜港    | 那覇港    | 補正なし   |
| 0.05m/s | 2.78   | 2.67   | 2.65   | 2.68   |
| 0.08m/s | 1.60   | 1.51   | 1.46   |        |
| 0.10m/s | 0.75   | 0.67   | 0.61   |        |

表-10(2) 破壊確率および安全性指標の一覧 (合成ゴム)

| 破壊確率    |        |        |        |        |
|---------|--------|--------|--------|--------|
| 平均接岸速度  | 釧路港    | 横浜港    | 那覇港    | 補正なし   |
| 0.05m/s | 0.0002 | 0.0002 | 0.0003 | 0.0037 |
| 0.08m/s | 0.0022 | 0.0034 | 0.0045 |        |
| 0.10m/s | 0.0151 | 0.0220 | 0.0257 |        |
| 安全性指標   |        |        |        |        |
| 平均接岸速度  | 釧路港    | 横浜港    | 那覇港    | 補正なし   |
| 0.05m/s | 3.54   | 3.54   | 3.43   | 2.68   |
| 0.08m/s | 2.85   | 2.71   | 2.61   |        |
| 0.10m/s | 2.17   | 2.01   | 1.95   |        |

(4) 安全係数

式(2)を基にした性能関数の基本式を式(13)に示す。

$$Z = \frac{\gamma_m \cdot E_{cat} \cdot R_T \cdot R_V}{R} - \gamma_{E_n} \frac{E_n}{S} > 0 \quad (13)$$

ここで、 $\gamma_m \cdot E_{cat} = E_y$  (確率変数)とする。つまり、防衛工の性能公差のばらつきを考慮した吸収エネルギーを確率変数として考える。 $E_n$ は接岸エネルギーを表している。また、 $\gamma_{E_n} (= \gamma_S)$ は荷重係数であるから、基本式から性能関数を求めるためには削除する必要がある。性能関数および安全性照査式、また、接岸エネルギー、吸収エネルギー、温度補正係数および速度補正係数の安全係数の算定式は、それぞれ式(14)~(19)として与えられ

る。安全係数の算定式は、文献(長尾ら, 1998; 長尾ら, 2001)を参考にして求めた。

$$\text{性能関数: } Z = E_y \cdot R_T \cdot R_V - E_n \quad (14)$$

安全性照査式:

$$\gamma_{E_y} E_{yK} \cdot \gamma_{R_T} R_{TK} \cdot \gamma_{R_V} R_{VK} \geq \gamma_{E_n} E_{nK} \quad (15)$$

安全係数:

$$\text{接岸エネルギー: } \gamma_{E_n} = (1 + \alpha \beta V_{E_n}) \frac{\mu_{E_n}}{E_{nK}} \quad (16)$$

$$\text{吸収エネルギー: } \gamma_{E_y} = (1 - \alpha \alpha' \beta V_{E_y}) \frac{\mu_{E_y}}{E_{yK}} \quad (17)$$

$$\text{温度補正係数: } \gamma_{R_T} = (1 - \alpha \alpha' \alpha'' \beta V_{R_T}) \frac{\mu_{R_T}}{R_{TK}} \quad (18)$$

$$\text{速度補正係数: } \gamma_{R_V} = (1 - \alpha \alpha' \alpha'' \beta V_{R_V}) \frac{\mu_{R_V}}{R_{VK}} \quad (19)$$

ここで、下付きの  $K$  は特性値を表し、 $\gamma$ :安全係数、 $\alpha$ 、 $\alpha'$  および  $\alpha''$ :線形化近似係数 (=0.7)、 $V$ :変動係数、 $\mu$ :平均値、である。

安全係数の算定結果を表-11(1)~(4)および表-12(1)~(4)に示す。ここでは、算定式の特性値に平均値を用いた安全係数と設計用値を用いた安全係数について求めた。

5.6 まとめ

①温度補正係数の影響を評価するため、天然ゴムおよび合成ゴムの防舷材について、寒冷地域、本州地域、温暖地域の気温の分布特性を考慮して防衛工の信頼性解析を行った。その結果、合成ゴムの防舷材に対する安全性指標は天然ゴムの場合よりも大きくなるが、防衛工の使用地域が安全性指標へ与える影響は小さいことがわかった。

②速度補正係数の影響を評価するため、天然ゴムおよび合成ゴムの防舷材について、船舶の平均接岸速度を3種類設定し、防衛工の信頼性解析を行った。その結果、合成ゴムの防舷材に対する安全性指標は天然ゴムの場合よりも大きくなり、船舶の平均接岸速度が大きいほど安全性指標は小さくなることがわかった。

③補正係数を考慮しない場合について防衛工の信頼性解析を行い、補正係数を考慮した場合と比較検討した。その結果、補正係数を考慮しない場合の安全性指標は、天然ゴムの防舷材については平均接岸速度0.05m/sの場合と同等の安全性指標となり、合成ゴムの防舷材については平均接岸速度0.08m/sと同等の安全性指標となった。また、防衛工の信頼性解析の結果から、限界状態設計法で用いる安全係数を算定した。

表-11(1) 安全係数 (接岸エネルギー, 天然ゴム)

| 荷重係数 |          | Pf(破壊確率) | $\beta$ (安全性指標) | $\sigma$ (標準偏差) | V(変動係数) | $\mu$ (平均値) | 設計用値 | $\gamma$ (平均値) | $\gamma$ (設計用値) |
|------|----------|----------|-----------------|-----------------|---------|-------------|------|----------------|-----------------|
| 釧路港  | 0.05 m/s | 0.0027   | 2.78            | 86              | 0.796   | 108         | 389  | 2.55           | 0.71            |
|      | 0.08 m/s | 0.0552   | 1.60            | 140             | 0.553   | 253         | 389  | 1.62           | 1.05            |
|      | 0.10 m/s | 0.2273   | 0.75            | 179             | 0.464   | 386         | 389  | 1.24           | 1.23            |
| 横浜港  | 0.05 m/s | 0.0038   | 2.67            | 86              | 0.796   | 108         | 389  | 2.49           | 0.69            |
|      | 0.08 m/s | 0.0650   | 1.51            | 140             | 0.553   | 253         | 389  | 1.58           | 1.03            |
|      | 0.10 m/s | 0.2500   | 0.67            | 179             | 0.464   | 386         | 389  | 1.22           | 1.21            |
| 那覇港  | 0.05 m/s | 0.0040   | 2.65            | 86              | 0.796   | 108         | 389  | 2.48           | 0.69            |
|      | 0.08 m/s | 0.0721   | 1.46            | 140             | 0.553   | 253         | 389  | 1.57           | 1.02            |
|      | 0.10 m/s | 0.2694   | 0.61            | 179             | 0.464   | 386         | 389  | 1.20           | 1.19            |
| 補正無し | 0.05 m/s | 0.0037   | 2.68            | 86              | 0.796   | 108         | 389  | 2.49           | 0.69            |

表-11(2) 安全係数 (吸収エネルギー, 天然ゴム)

| 吸収エネルギー(Ecat) |          | Pf(破壊確率) | $\beta$ (安全性指標) | $\sigma$ (標準偏差) | V(変動係数) | $\mu$ (平均値) | 設計用値 | $\gamma$ (平均値) | $\gamma$ (設計用値) |
|---------------|----------|----------|-----------------|-----------------|---------|-------------|------|----------------|-----------------|
| 釧路港           | 0.05 m/s | 0.0027   | 2.78            | 15              | 0.031   | 485         | 487  | 0.96           | 0.95            |
|               | 0.08 m/s | 0.0552   | 1.60            | 15              | 0.031   | 485         | 487  | 0.98           | 0.97            |
|               | 0.10 m/s | 0.2273   | 0.75            | 15              | 0.031   | 485         | 487  | 0.99           | 0.98            |
| 横浜港           | 0.05 m/s | 0.0038   | 2.67            | 15              | 0.031   | 485         | 487  | 0.96           | 0.96            |
|               | 0.08 m/s | 0.0650   | 1.51            | 15              | 0.031   | 485         | 487  | 0.98           | 0.97            |
|               | 0.10 m/s | 0.2500   | 0.67            | 15              | 0.031   | 485         | 487  | 0.99           | 0.99            |
| 那覇港           | 0.05 m/s | 0.0040   | 2.65            | 15              | 0.031   | 485         | 487  | 0.96           | 0.96            |
|               | 0.08 m/s | 0.0721   | 1.46            | 15              | 0.031   | 485         | 487  | 0.98           | 0.97            |
|               | 0.10 m/s | 0.2694   | 0.61            | 15              | 0.031   | 485         | 487  | 0.99           | 0.99            |
| 補正無し          | 0.05 m/s | 0.0037   | 2.68            | 15              | 0.031   | 485         | 487  | 0.96           | 0.96            |

表-11(3) 安全係数 (温度補正係数, 天然ゴム)

| 温度補正係数(天然ゴム) |          | Pf(破壊確率) | $\beta$ (安全性指標) | $\sigma$ (標準偏差) | V(変動係数) | $\mu$ (平均値) | 設計用値 | $\gamma$ (平均値) | $\gamma$ (設計用値) |
|--------------|----------|----------|-----------------|-----------------|---------|-------------|------|----------------|-----------------|
| 釧路港          | 0.05 m/s | 0.0027   | 2.78            | 0.031           | 0.029   | 1.06        | ---- | 0.97           | ----            |
|              | 0.08 m/s | 0.0552   | 1.60            | 0.031           | 0.029   | 1.06        | ---- | 0.98           | ----            |
|              | 0.10 m/s | 0.2273   | 0.75            | 0.031           | 0.029   | 1.06        | ---- | 0.99           | ----            |
| 横浜港          | 0.05 m/s | 0.0038   | 2.67            | 0.029           | 0.028   | 1.03        | ---- | 0.97           | ----            |
|              | 0.08 m/s | 0.0650   | 1.51            | 0.029           | 0.028   | 1.03        | ---- | 0.99           | ----            |
|              | 0.10 m/s | 0.2500   | 0.67            | 0.029           | 0.028   | 1.03        | ---- | 0.99           | ----            |
| 那覇港          | 0.05 m/s | 0.0040   | 2.65            | 0.018           | 0.018   | 1.00        | ---- | 0.98           | ----            |
|              | 0.08 m/s | 0.0721   | 1.46            | 0.018           | 0.018   | 1.00        | ---- | 0.99           | ----            |
|              | 0.10 m/s | 0.2694   | 0.61            | 0.018           | 0.018   | 1.00        | ---- | 1.00           | ----            |
| 補正無し         | 0.05 m/s | 0.0037   | 2.68            | 0.000           | 0.000   | 1.00        | 1.00 | 1.00           | 1.00            |

表-11(4) 安全係数 (速度補正係数, 天然ゴム)

| 速度補正係数(天然ゴム) |          | Pf(破壊確率) | $\beta$ (安全性指標) | $\sigma$ (標準偏差) | V(変動係数) | $\mu$ (平均値) | 設計用値 | $\gamma$ (平均値) | $\gamma$ (設計用値) |
|--------------|----------|----------|-----------------|-----------------|---------|-------------|------|----------------|-----------------|
| 釧路港          | 0.05 m/s | 0.0027   | 2.78            | 0.0150          | 0.016   | 0.96        | ---- | 0.98           | ----            |
|              | 0.08 m/s | 0.0552   | 1.60            | 0.0088          | 0.009   | 0.97        | ---- | 1.00           | ----            |
|              | 0.10 m/s | 0.2273   | 0.75            | 0.0068          | 0.007   | 0.98        | ---- | 1.00           | ----            |
| 横浜港          | 0.05 m/s | 0.0038   | 2.67            | 0.0150          | 0.016   | 0.96        | ---- | 0.99           | ----            |
|              | 0.08 m/s | 0.0650   | 1.51            | 0.0088          | 0.009   | 0.97        | ---- | 1.00           | ----            |
|              | 0.10 m/s | 0.2500   | 0.67            | 0.0068          | 0.007   | 0.98        | ---- | 1.00           | ----            |
| 那覇港          | 0.05 m/s | 0.0040   | 2.65            | 0.0150          | 0.016   | 0.96        | ---- | 0.99           | ----            |
|              | 0.08 m/s | 0.0721   | 1.46            | 0.0088          | 0.009   | 0.97        | ---- | 1.00           | ----            |
|              | 0.10 m/s | 0.2694   | 0.61            | 0.0068          | 0.007   | 0.98        | ---- | 1.00           | ----            |
| 補正無し         | 0.05 m/s | 0.0037   | 2.68            | 0.0000          | 0.000   | 1.00        | 1.00 | 1.00           | 1.00            |



表-12(1) 安全係数 (接岸エネルギー, 合成ゴム)

| 荷重係数 |          | Pf(破壊確率) | $\beta$ (安全性指標) | $\sigma$ (標準偏差) | V(変動係数) | $\mu$ (平均値) | 設計用値 | $\gamma$ (平均値) | $\gamma$ (設計用値) |
|------|----------|----------|-----------------|-----------------|---------|-------------|------|----------------|-----------------|
| 釧路港  | 0.05 m/s | 0.0002   | 3.54            | 86              | 0.796   | 108         | 389  | 2.97           | 0.83            |
|      | 0.08 m/s | 0.0022   | 2.85            | 140             | 0.553   | 253         | 389  | 2.10           | 1.37            |
|      | 0.10 m/s | 0.0151   | 2.17            | 179             | 0.464   | 386         | 389  | 1.70           | 1.69            |
| 横浜港  | 0.05 m/s | 0.0002   | 3.54            | 86              | 0.796   | 108         | 389  | 2.97           | 0.83            |
|      | 0.08 m/s | 0.0034   | 2.71            | 140             | 0.553   | 253         | 389  | 2.05           | 1.33            |
|      | 0.10 m/s | 0.0220   | 2.01            | 179             | 0.464   | 386         | 389  | 1.65           | 1.64            |
| 那覇港  | 0.05 m/s | 0.0003   | 3.43            | 86              | 0.796   | 108         | 389  | 2.91           | 0.81            |
|      | 0.08 m/s | 0.0045   | 2.61            | 140             | 0.553   | 253         | 389  | 2.01           | 1.31            |
|      | 0.10 m/s | 0.0257   | 1.95            | 179             | 0.464   | 386         | 389  | 1.63           | 1.62            |
| 補正無し | 0.05 m/s | 0.0037   | 2.68            | 86              | 0.796   | 108         | 389  | 2.49           | 0.69            |

表-12(2) 安全係数 (吸収エネルギー, 合成ゴム)

| 吸収エネルギー(E <sub>cat</sub> ) |          | Pf(破壊確率) | $\beta$ (安全性指標) | $\sigma$ (標準偏差) | V(変動係数) | $\mu$ (平均値) | 設計用値 | $\gamma$ (平均値) | $\gamma$ (設計用値) |
|----------------------------|----------|----------|-----------------|-----------------|---------|-------------|------|----------------|-----------------|
| 釧路港                        | 0.05 m/s | 0.0002   | 3.54            | 15              | 0.031   | 485         | 487  | 0.95           | 0.94            |
|                            | 0.08 m/s | 0.0022   | 2.85            | 15              | 0.031   | 485         | 487  | 0.96           | 0.95            |
|                            | 0.10 m/s | 0.0151   | 2.17            | 15              | 0.031   | 485         | 487  | 0.97           | 0.96            |
| 横浜港                        | 0.05 m/s | 0.0002   | 3.54            | 15              | 0.031   | 485         | 487  | 0.95           | 0.94            |
|                            | 0.08 m/s | 0.0034   | 2.71            | 15              | 0.031   | 485         | 487  | 0.96           | 0.95            |
|                            | 0.10 m/s | 0.0220   | 2.01            | 15              | 0.031   | 485         | 487  | 0.97           | 0.97            |
| 那覇港                        | 0.05 m/s | 0.0003   | 3.43            | 15              | 0.031   | 485         | 487  | 0.95           | 0.94            |
|                            | 0.08 m/s | 0.0045   | 2.61            | 15              | 0.031   | 485         | 487  | 0.96           | 0.96            |
|                            | 0.10 m/s | 0.0257   | 1.95            | 15              | 0.031   | 485         | 487  | 0.97           | 0.97            |
| 補正無し                       | 0.05 m/s | 0.0037   | 2.68            | 15              | 0.031   | 485         | 487  | 0.96           | 0.96            |

表-12(3) 安全係数 (温度補正係数, 合成ゴム)

| 温度補正係数(合成ゴム) |          | Pf(破壊確率) | $\beta$ (安全性指標) | $\sigma$ (標準偏差) | V(変動係数) | $\mu$ (平均値) | 設計用値 | $\gamma$ (平均値) | $\gamma$ (設計用値) |
|--------------|----------|----------|-----------------|-----------------|---------|-------------|------|----------------|-----------------|
| 釧路港          | 0.05 m/s | 0.0002   | 3.54            | 0.073           | 0.067   | 1.09        | ---- | 0.92           | ----            |
|              | 0.08 m/s | 0.0022   | 2.85            | 0.073           | 0.067   | 1.09        | ---- | 0.93           | ----            |
|              | 0.10 m/s | 0.0151   | 2.17            | 0.073           | 0.067   | 1.09        | ---- | 0.95           | ----            |
| 横浜港          | 0.05 m/s | 0.0002   | 3.54            | 0.040           | 0.039   | 1.03        | ---- | 0.95           | ----            |
|              | 0.08 m/s | 0.0034   | 2.71            | 0.040           | 0.039   | 1.03        | ---- | 0.96           | ----            |
|              | 0.10 m/s | 0.0220   | 2.01            | 0.040           | 0.039   | 1.03        | ---- | 0.97           | ----            |
| 那覇港          | 0.05 m/s | 0.0003   | 3.43            | 0.024           | 0.024   | 1.00        | ---- | 0.97           | ----            |
|              | 0.08 m/s | 0.0045   | 2.61            | 0.024           | 0.024   | 1.00        | ---- | 0.98           | ----            |
|              | 0.10 m/s | 0.0257   | 1.95            | 0.024           | 0.024   | 1.00        | ---- | 0.98           | ----            |
| 補正無し         | 0.05 m/s | 0.0037   | 2.68            | 0.000           | 0.000   | 1.00        | 1.00 | 1.00           | 1.00            |

表-12(4) 安全係数 (速度補正係数, 合成ゴム)

| 速度補正係数(合成ゴム) |          | Pf(破壊確率) | $\beta$ (安全性指標) | $\sigma$ (標準偏差) | V(変動係数) | $\mu$ (平均値) | 設計用値 | $\gamma$ (平均値) | $\gamma$ (設計用値) |
|--------------|----------|----------|-----------------|-----------------|---------|-------------|------|----------------|-----------------|
| 釧路港          | 0.05 m/s | 0.0002   | 3.54            | 0.1100          | 0.074   | 1.49        | ---- | 0.91           | ----            |
|              | 0.08 m/s | 0.0022   | 2.85            | 0.0630          | 0.039   | 1.61        | ---- | 0.96           | ----            |
|              | 0.10 m/s | 0.0151   | 2.17            | 0.0480          | 0.029   | 1.66        | ---- | 0.98           | ----            |
| 横浜港          | 0.05 m/s | 0.0002   | 3.54            | 0.1100          | 0.074   | 1.49        | ---- | 0.91           | ----            |
|              | 0.08 m/s | 0.0034   | 2.71            | 0.0630          | 0.039   | 1.61        | ---- | 0.96           | ----            |
|              | 0.10 m/s | 0.0220   | 2.01            | 0.0480          | 0.029   | 1.66        | ---- | 0.98           | ----            |
| 那覇港          | 0.05 m/s | 0.0003   | 3.43            | 0.1100          | 0.074   | 1.49        | ---- | 0.91           | ----            |
|              | 0.08 m/s | 0.0045   | 2.61            | 0.0630          | 0.039   | 1.61        | ---- | 0.97           | ----            |
|              | 0.10 m/s | 0.0257   | 1.95            | 0.0480          | 0.029   | 1.66        | ---- | 0.98           | ----            |
| 補正無し         | 0.05 m/s | 0.0037   | 2.68            | 0.0000          | 0.000   | 1.00        | 1.00 | 1.00           | 1.00            |

## 6. 信頼性解析による係船柱の安全性評価

### 6.1 概説

係船柱の設計の合理化を図る目的で、限界状態設計法の考え方に基づいて係船柱の安全性を評価する。係船柱の安全性評価では、係留船舶の動揺シミュレーションを用いて、係船柱を設計する際の外力条件のうち、係留中の船舶の動揺による係留力を算定する。そこで、4.3で得られた係留力の頻度分布を基礎データとすることで、波浪および風の出現頻度特性から、ある特定の港湾を想定した場合の係留力の確率分布を求める。また、係船柱の信頼性解析を行い、その結果に基づいて、限界状態設計法における安全係数について検討する。

### 6.2 条件の設定

#### (1) 対象バース

南北太平洋側および日本海側の代表的な3港湾として、常陸那珂港、伏木富山港、高知港を対象港湾とし、これらの港湾において50,000DWTコンテナ船が着岸可能な14m岸壁を対象バースとする。各港湾の対象バースの位置を図-49(1)～(3)に示す。

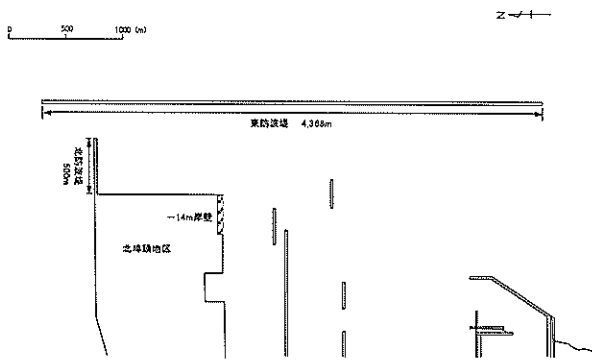


図-49(1) 常陸那珂港の対象バース

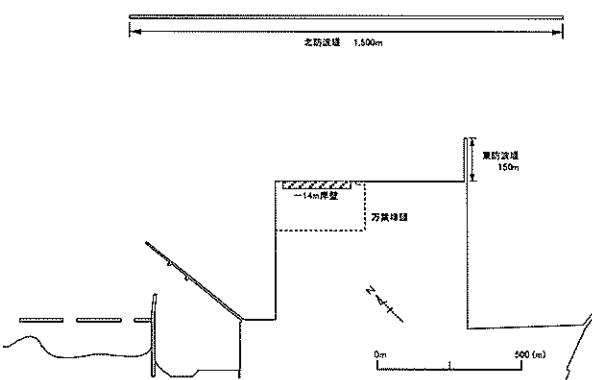


図-49(2) 伏木富山港の対象バース

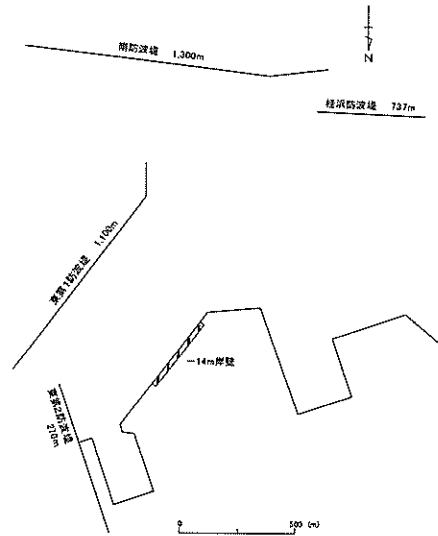


図-49(3) 高知港の対象バース

#### (2) 外力条件

係留船舶の係留力の確率的評価を行う際の外力条件を設定する。対象港湾における外力（波浪および風）の出現頻度表を作成し、係留力を算定するための外力条件とする。なお、常陸那珂港における波浪および風の出現頻度表は港湾計画図に記載されているものを採用し、その他の港湾については、NOWPHAS（全国港湾海洋波浪情報網）における観測データを用いて頻度解析を行い、波浪および風の出現頻度表を作成した。常陸那珂港における波浪および風の観測期間は1991～1996年の6年間であり、伏木富山港および高知港における波浪の観測期間は1997～2001年の5年間、また風の観測期間は1999～2001年の3年間である。

常陸那珂港、伏木富山港、高知港の波浪出現頻度表および風出現頻度表は、付録Fに掲載する。

#### (3) 港内波高比

港外で観測された沖波波高を港内における波高に換算するための港内波高比を設定する。ここでは、港外の波浪観測地点における波浪が港口部から港内に進入してくるものと仮定し、対象バース前面における波高比を用いることとする。また、波高比の波周期は、各港湾の波浪出現頻度表から波周期5.0s以下、波高1.5m以下の波浪を除いて、最多頻度となる波周期ランクで代表させる。設定した各港湾の港内波高比を表-13(1)～(3)に示す。なお、港内波高比は、既往調査によるものを用いている。

表-13(1) 波向別港内波高比 (常陸那珂港)

波周期T=8.0s

| NE   | ENE  | E    | ESE  | SE   |
|------|------|------|------|------|
| 0.19 | 0.12 | 0.11 | 0.13 | 0.25 |

表-13(2) 波向別港内波高比 (伏木富山港)

波周期T=6.0s

| N    | NNE  | NE   |
|------|------|------|
| 0.37 | 0.23 | 0.16 |

表-13(3) 波向別港内波高比 (高知港)

波周期T=9.0s

| ESE  | SE   | SSE  | S    | SSW  |
|------|------|------|------|------|
| 0.20 | 0.18 | 0.22 | 0.32 | 0.43 |

(4) 動揺シミュレーションの計算ケース

係留船舶の動揺シミュレーションにおいては、4.3の検討結果を活用する。また、これらの計算ケースに追加して、風向60°で風速5.0m/s, 10.0m/s, 15.0m/sのケースの動揺シミュレーションを行った。追加計算ケースの一覧は、付録Bに掲載する。船舶の動揺シミュレーションにおける計算条件および船舶の係留状況を表-14および図-50にそれぞれ示す。

表-14 動揺シミュレーションの計算条件

|     |                                |
|-----|--------------------------------|
| 船型  | コンテナ船 (50,000DWT)              |
| 係留索 | パイレンタフレφ65mm<br>(破断荷重 657.3kN) |
| 防衝工 | セル型防舷材 1,600H                  |

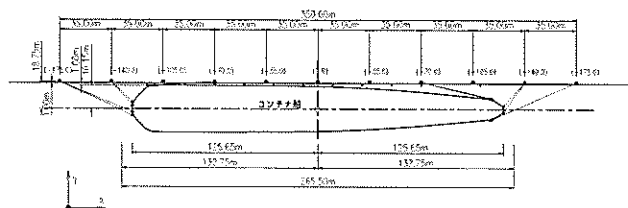


図-50 船舶の係留状況

6.3 港湾の特徴を考慮した係留力の確率的変動特性

(1) 概要

ある港湾に対して来襲する波浪および風の出現頻度を考慮して係留力の確率分布を求めるためには、すべての波高、波周期、波向に対して係留船舶の動揺シミュレーションを実施して係留力の頻度分布解析を行う必要があり、きわめて煩雑な作業となる。したがって、4.3で実施

した船舶の動揺シミュレーションの結果を用いて、外力条件の変動に対する係留力分布の平均値およびドリフト量 (定常変位) の変化量をあらかじめパラメータ化しておき、波浪出現頻度表の波向、波高、波周期に対するランク別に係留力の確率分布を求める。最終的には、波浪出現頻度表のすべてのランクで累計して、各港湾における係留力の確率分布とその特性値を算定する。

(2) 係留力の基本確率分布

係留力の確率分布の算定は、各港湾で観測された波浪および風の出現頻度表に基づいて行う。波浪の確率分布は一般的にレーリー分布で表現されるが、それが外力として作用した場合の係留船舶の動揺量および係留力の確率分布も同様にレーリー分布になる傾向がある。ただし、レーリー分布となるのは、平均値周りの変動量 (変動振幅) であるため、設計で用いる最大変位量 (最大荷重) を評価するためには、ドリフト量 (定常変位) を併せて考慮することが必要になる。したがって、係留力の基本確率分布の形状を表す関数として平均振幅およびドリフト量で規定される式(20)を用い、図-51に示すような切片を持ったレーリー分布を基本関数形として仮定する。

$$U_0' = U_0 \times \gamma$$

$$U_1' = U_1 \times \gamma$$

(20)

$$P(T) = \frac{\pi}{2} \frac{T}{U_1'} \exp \left\{ -\frac{\pi}{4} \left( \frac{T}{U_1'} \right)^2 \right\} + U_0'$$

ただし、 $U$  : 係留力,  $U_0$  : 係留力のドリフト量,  $U_0'$  : 係留力のドリフト量の換算値,  $U_1$  : 係留力の振幅平均値,  $U_1'$  : 係留力の振幅平均値の換算値,  $\gamma$  : 換算パラメータ,  $T$  : 係留力,  $P$  : 係留力の確率, である。

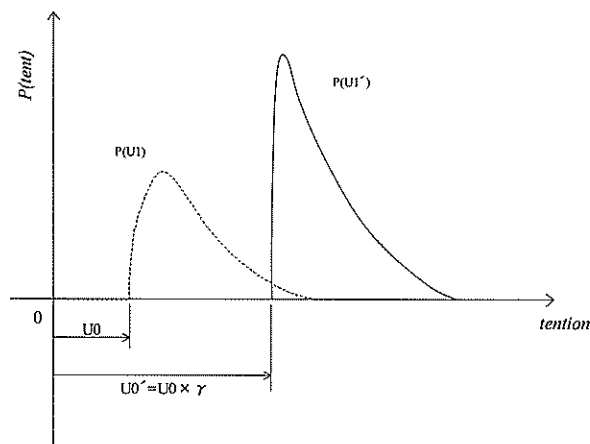


図-51 ドリフト量を考慮したレーリー分布形

(3) 波向別の港外波浪の出現確率

港外波浪の出現確率を算定するために、港外における波浪観測記録から求めた波浪出現頻度表の出現回数のみを使用し、波高および波周期の各ランクの中間値をランクの代表値として設定する。常陸那珂港の結果を例として、波高の代表値に対する波浪出現頻度表を表-15に示す。なお、常陸那珂港の場合は、波高の最大ランクは、永井(2002)を参考にして2m~7mの中間値として4.5mとした。

波向別の波浪出現頻度表は、波高別・波周期別出現頻度表の出現頻度を用いて、全波向の出現頻度に対する波向別の出現頻度の割合で比例配分することにより作成する。ただし、出現頻度の少ない波向はまとめて5波向程度

の主要波向とし、波高のランクについてはランク幅が大きすぎるため、線形補間してランク幅を小さくする。以下に常陸那珂港を例に、波向別の波浪出現頻度表を示す。常陸那珂港ではN~Sまでの波向が観測されているが、表-15に示すように頻度の少ないN~NEおよびSE~Sはまとめて、それぞれNEおよびSEとして取り扱うため、主要波向はNE~SEまでの5波向とする。また、波浪出現頻度表の波高ランクは50cm間隔となっているが、10cm間隔にランク間で比例配分して中間の波高ランクにおける出現頻度を求める。一例として、波向E方向の波浪出現頻度表を表-16に示す。

表-15 波浪出現頻度表 (常陸那珂港)

| cm    | N   | NNE | NE  | ENE  | E    | ESE  | SE  | SSE | S   | Total |
|-------|-----|-----|-----|------|------|------|-----|-----|-----|-------|
| 25    | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.7  | 1.3  | 0.9  | 0.2 | 0.0 | 0.0 | 3.3   |
| 75    | 0.0 | 0.0 | 2.7 | 11.9 | 17.2 | 9.4  | 2.9 | 0.1 | 0.2 | 44.5  |
| 125   | 0.0 | 0.1 | 3.1 | 7.6  | 10.0 | 7.2  | 2.0 | 0.1 | 0.1 | 30.3  |
| 175   | 0.0 | 0.0 | 1.8 | 3.1  | 4.7  | 2.8  | 0.8 | 0.0 | 0.0 | 13.4  |
| 450   | 0.0 | 0.1 | 1.1 | 1.5  | 3.4  | 1.6  | 0.7 | 0.1 | 0.0 | 8.5   |
| Total | 0.0 | 0.2 | 8.8 | 24.9 | 36.7 | 21.9 | 6.7 | 0.4 | 0.4 | 100.0 |
|       | 9.0 |     |     | 24.9 |      | 21.9 |     | 7.5 |     |       |

| cm    | ~5.0 | 5.1~6.0 | 6.1~7.0 | 7.1~8.0 | 8.1~9.0 | 9.1~10.0 | 10.1~11.0 | 11.1~12.0 | 12.1~ | Total |
|-------|------|---------|---------|---------|---------|----------|-----------|-----------|-------|-------|
| 25    | 0.1  | 0.3     | 0.9     | 1.1     | 0.7     | 0.2      | 0.0       | 0.0       | 0.0   | 3.3   |
| 75    | 1.6  | 5.0     | 9.9     | 12.5    | 8.5     | 4.0      | 1.6       | 0.5       | 0.2   | 43.8  |
| 125   | 0.7  | 3.4     | 4.9     | 7.0     | 6.6     | 3.8      | 2.3       | 1.0       | 0.6   | 30.2  |
| 175   | 0.0  | 0.9     | 2.1     | 2.3     | 2.6     | 2.5      | 1.7       | 1.0       | 0.5   | 13.5  |
| 450   | 0.0  | 0.1     | 0.8     | 1.5     | 1.6     | 1.8      | 1.3       | 0.9       | 1.0   | 9.1   |
| Total | 2.5  | 9.7     | 18.6    | 24.5    | 20.0    | 12.2     | 6.8       | 3.4       | 2.3   | 100.0 |

表-16 波向別波浪出現頻度表 (E方向) (常陸那珂港)

175cm~450cmの等分割

|       | ~5.0 | 5.1~6.0 | 6.1~7.0 | 7.1~8.0 | 8.1~9.0 | 9.1~10.0 | 10.1~11.0 | 11.1~12.0 | 12.1~ | Total |
|-------|------|---------|---------|---------|---------|----------|-----------|-----------|-------|-------|
|       | 4.5  | 5.5     | 6.5     | 7.5     | 8.5     | 9.5      | 10.5      | 11.5      | 12.5  |       |
| 25    | 0.0  | 0.1     | 0.2     | 0.2     | 0.2     | 0.0      | 0.0       | 0.0       | 0.0   | 0.7   |
| 35    | 0.0  | 0.1     | 0.2     | 0.3     | 0.2     | 0.1      | 0.0       | 0.0       | 0.0   | 0.8   |
| 45    | 0.1  | 0.2     | 0.3     | 0.4     | 0.3     | 0.1      | 0.0       | 0.0       | 0.0   | 1.4   |
| 55    | 0.1  | 0.2     | 0.5     | 0.6     | 0.4     | 0.2      | 0.1       | 0.0       | 0.0   | 2.0   |
| 65    | 0.1  | 0.3     | 0.6     | 0.8     | 0.5     | 0.2      | 0.1       | 0.0       | 0.0   | 2.6   |
| 75    | 0.1  | 0.4     | 0.7     | 0.9     | 0.6     | 0.3      | 0.1       | 0.0       | 0.0   | 3.2   |
| 85    | 0.1  | 0.3     | 0.7     | 0.8     | 0.6     | 0.3      | 0.1       | 0.0       | 0.0   | 3.0   |
| 95    | 0.1  | 0.3     | 0.6     | 0.8     | 0.6     | 0.3      | 0.1       | 0.1       | 0.0   | 2.8   |
| 105   | 0.1  | 0.3     | 0.5     | 0.7     | 0.5     | 0.3      | 0.1       | 0.1       | 0.0   | 2.6   |
| 115   | 0.1  | 0.3     | 0.4     | 0.6     | 0.5     | 0.3      | 0.2       | 0.1       | 0.0   | 2.4   |
| 125   | 0.1  | 0.2     | 0.4     | 0.5     | 0.5     | 0.3      | 0.2       | 0.1       | 0.0   | 2.2   |
| 135   | 0.0  | 0.2     | 0.3     | 0.4     | 0.4     | 0.3      | 0.2       | 0.1       | 0.0   | 2.0   |
| 145   | 0.0  | 0.2     | 0.3     | 0.4     | 0.4     | 0.2      | 0.2       | 0.1       | 0.0   | 1.7   |
| 155   | 0.0  | 0.1     | 0.2     | 0.3     | 0.3     | 0.2      | 0.1       | 0.1       | 0.0   | 1.5   |
| 165   | 0.0  | 0.1     | 0.2     | 0.2     | 0.2     | 0.2      | 0.1       | 0.1       | 0.0   | 1.2   |
| 175   | 0.0  | 0.1     | 0.2     | 0.2     | 0.2     | 0.2      | 0.1       | 0.1       | 0.0   | 1.0   |
| 185   | 0.0  | 0.1     | 0.2     | 0.2     | 0.2     | 0.2      | 0.1       | 0.1       | 0.0   | 1.0   |
| 195   | 0.0  | 0.1     | 0.2     | 0.2     | 0.2     | 0.2      | 0.1       | 0.1       | 0.0   | 1.0   |
| 245   | 0.0  | 0.0     | 0.1     | 0.1     | 0.1     | 0.1      | 0.1       | 0.1       | 0.1   | 0.7   |
| 295   | 0.0  | 0.0     | 0.1     | 0.1     | 0.1     | 0.1      | 0.1       | 0.1       | 0.1   | 0.7   |
| 345   | 0.0  | 0.0     | 0.1     | 0.1     | 0.1     | 0.1      | 0.1       | 0.1       | 0.1   | 0.7   |
| 395   | 0.0  | 0.0     | 0.1     | 0.1     | 0.1     | 0.1      | 0.1       | 0.1       | 0.1   | 0.7   |
| 450   | 0.0  | 0.0     | 0.1     | 0.1     | 0.1     | 0.1      | 0.1       | 0.1       | 0.1   | 0.7   |
| Total | 0.9  | 3.6     | 6.8     | 9.0     | 7.3     | 4.5      | 2.5       | 1.3       | 0.8   | 36.7  |

波高25cmの3/5  
補間  
波高75cmの1/5  
補間  
波高125cmの1/5  
補間  
波高175cmの1/5  
波高175cmの1/5  
波高175cmの1/5  
波高450cmの1/5  
波高450cmの1/5  
波高450cmの1/5  
波高450cmの1/5

表-17 風出現頻度表 (常陸那珂港)

| m/sec | 静穏  | N    | NNE | NE   | ENE | E   | ESE | SE  | SSE | S   | SSW | SW  | WSW | W   | WNW | NW  | NNW | Total |
|-------|-----|------|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|
| 静穏    | 0.5 | 0.0  | 0.0 | 0.0  | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.5   |
| 2.5   | 0.0 | 8.4  | 5.6 | 7.3  | 6.4 | 4.7 | 3.7 | 3.2 | 2.6 | 4.4 | 5.4 | 3.2 | 1.9 | 2.9 | 3.9 | 7.9 | 8.2 | 79.9  |
| 7.5   | 0.0 | 1.9  | 2.5 | 5.8  | 1.8 | 0.7 | 0.5 | 0.6 | 0.3 | 1.1 | 0.5 | 0.4 | 0.2 | 0.5 | 0.4 | 0.7 | 0.5 | 18.5  |
| 12.5  | 0.0 | 0.1  | 0.2 | 0.6  | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 1.1   |
| 17.5  | 0.0 | 0.0  | 0.0 | 0.0  | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0   |
| 25    | 0.0 | 0.0  | 0.0 | 0.0  | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0   |
| Total | 0.5 | 10.5 | 8.3 | 13.8 | 8.3 | 5.4 | 4.2 | 3.8 | 2.9 | 5.6 | 5.9 | 3.6 | 2.1 | 3.4 | 4.4 | 8.6 | 8.8 | 100.0 |

表-18 波高および風速の未超過出現確率表 (常陸那珂港)

波の未超過出現確率の算出

| cm  | Total  | N    | NNE  | NE   | ENE  | E    | ESE  | SE   | SSE  | S    |
|-----|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0   | 0.00   | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 25  | 0.0332 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.03 | 0.04 | 0.04 | 0.03 | 0.00 | 0.05 |
| 75  | 0.4781 | 0.00 | 0.07 | 0.31 | 0.51 | 0.51 | 0.47 | 0.47 | 0.38 | 0.53 |
| 125 | 0.7812 | 0.40 | 0.44 | 0.67 | 0.81 | 0.78 | 0.80 | 0.77 | 0.73 | 0.86 |
| 175 | 0.9154 | 0.60 | 0.63 | 0.88 | 0.94 | 0.91 | 0.93 | 0.89 | 0.86 | 0.95 |
| 450 | 1.0000 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |

風の未超過出現確率の算出

| m/sec | N    | NNE  | NE   | ENE  | E    | ESE  | SE   | SSE  | S    | Total  |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------|
| 0     | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0      |
| 2.5   | 0.80 | 0.68 | 0.53 | 0.78 | 0.87 | 0.88 | 0.85 | 0.89 | 0.79 | 0.8042 |
| 7.5   | 0.99 | 0.98 | 0.96 | 0.99 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.99 | 0.9889 |
| 12.5  | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.9995 |
| 17.5  | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.9999 |
| 25    | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.0000 |

(4) 風の出現確率

風の出現確率は、波浪の場合と同様に風観測記録から求めた風出現頻度表を用いて、風速の各ランクの中間値をランクの代表値として設定し、算定する。常陸那珂港を例として、風速の代表値に対する風出現頻度表を表-17に示す。

(5) 波浪と風の相関関係

波浪と風の相関関係については、観測記録による実測値に基づいて、波高・波向と風速・風向について相関関係を推定するのが望ましいが、ここでは、以下に示すような簡略的な取り扱いとする。高い波高が出現するときには、ある程度強い風が吹いていることから、ある波高に対して未超過確率が等しい風速を選択することにより、波浪と風の関連付けを行う。なお、方向については、波向に対して風向が $+15^\circ$ の角度で作用するものと仮定する。例として、常陸那珂港における波高および風速の未超過出現確率表を表-18に示す。また、波高および風速の未超過出現確率の関係を図-52に示す。例えば、沖波波高1.75mの場合の未超過出現確率は0.9154である。この波高に対する風速は2.5~7.5m/sの間にあるため、線形補間することにより、同じ未超過出現確率0.9154に対応する風速を求めると、風速は5.51m/sとなる。

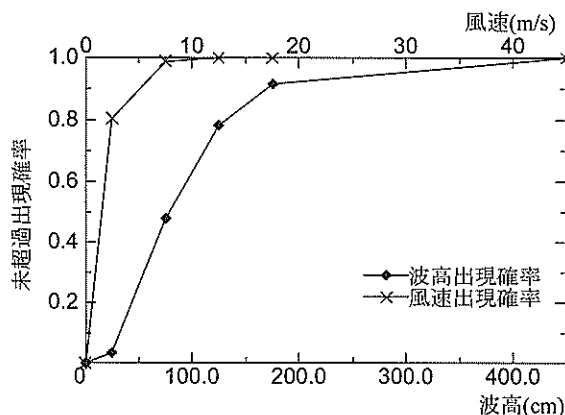


図-52 波高および風速の未超過出現確率 (常陸那珂港)

(6) 係留力の基本値

表-19は、外力条件の変化に対する係留力の確率分布特性の変動をパラメータ化するために基準となる条件を示している。これは、4.3における計算ケースの中間条件に相当する。また、対象係留施設は、図-53に示すように係留船舶の動揺時に最も荷重が作用する係留索No.10および防衝工No.6とする。この基本条件下における係留索No.10および防衝工No.6の係留力の頻度分布は図-54(1)および(2)となり、この結果から係留力の基本値を表-20のように設定する。ここで、係留力としては係留索張力

および防衛工反力を考えているが、4.3でも述べたように防衛工反力の頻度分布を算定することが困難であったため、防衛工反力の代わりに防衛工変位を係留力として示すこととする。

表-19 係留力の基本条件

|                         |       |        |
|-------------------------|-------|--------|
| 外力条件                    | 波向    | 45°    |
|                         | 波高    | 0.5 m  |
|                         | 波周期   | 10.0 s |
|                         | 風向    | 波向+15° |
|                         | 風速    | 10 m/s |
| 船型条件<br>コンテナ船 50,000DWT | 船舶信頼度 | 50%    |
|                         | 係留索   | No.10  |
| 対象係留施設                  | 係留索   | No.10  |
|                         | 防衛工   | No.6   |

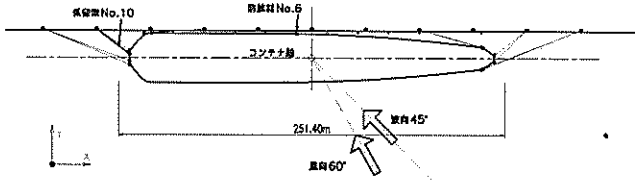


図-53 対象係留施設

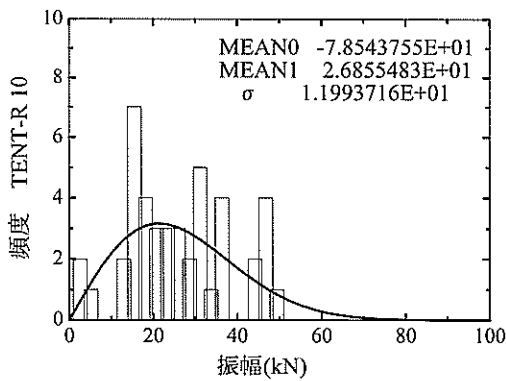


図-54(1) 係留力の頻度分布 (係留索)

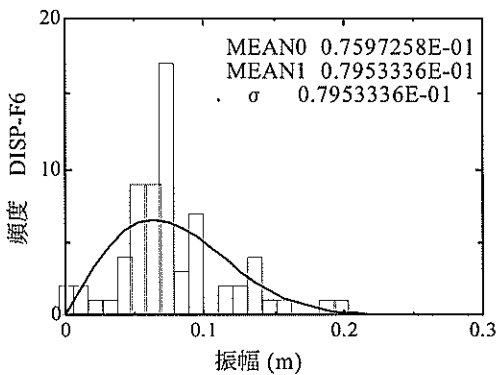


図-54(2) 係留力の頻度分布 (防衛工)

(7) 係留力の換算パラメータの設定

4.3における係留船舶の動揺シミュレーションの検討結果を用いて、係留力の確率分布を算定するための係留力の換算パラメータ（ドリフト量、振幅平均）を設定する。換算パラメータは、表-20に示した係留力の基本値を基準にしてパラメータ化した。各計算条件における係留力は、式(21)および式(22)を用いて、換算パラメータと基本係留力の積により求められる。設定した換算パラメータは、船舶信頼度パラメータ、波高パラメータ、波周期パラメータ、風速パラメータ、風向パラメータの5種類であり、これらのパラメータを図-55(1)～(5)に示す。

$$U_0 = \gamma \cdot U_0 \tag{21}$$

$$U_1 = \gamma \cdot U_1 \tag{22}$$

表-20 係留力の基本値

| 係留施設 | 係留索      | 平均値       | 平均ドリフト値   | 度数   | 区間幅      |
|------|----------|-----------|-----------|------|----------|
|      |          | $U_1$     | $U_0$     |      |          |
|      | TENT-R10 | 26.855 kN | 78.544 kN | 43 回 | 2.600 kN |
|      | DISP-F6  | 0.0795 m  | 0.0760 m  | 66 回 | 0.0105 m |

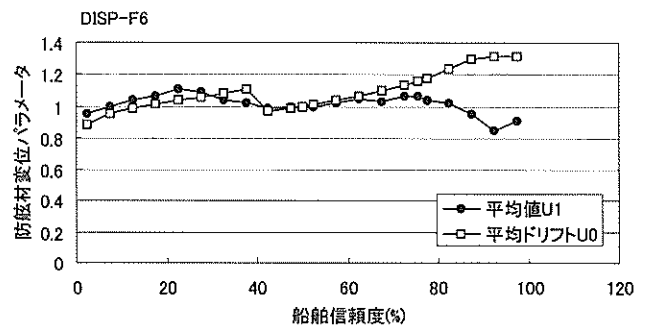
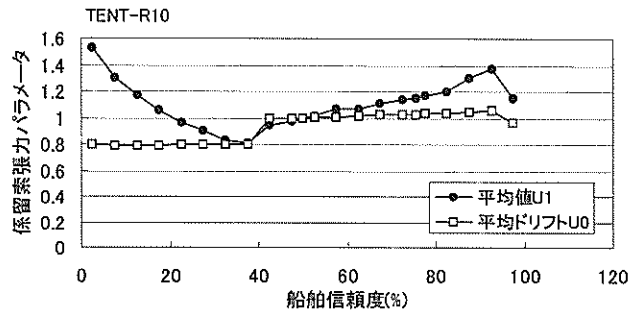


図-55(1) 船舶信頼度パラメータ

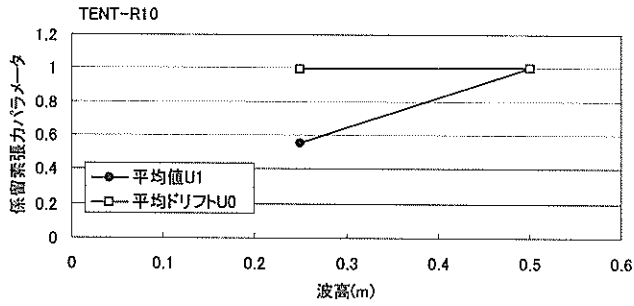


図-55(2) 波高パラメータ

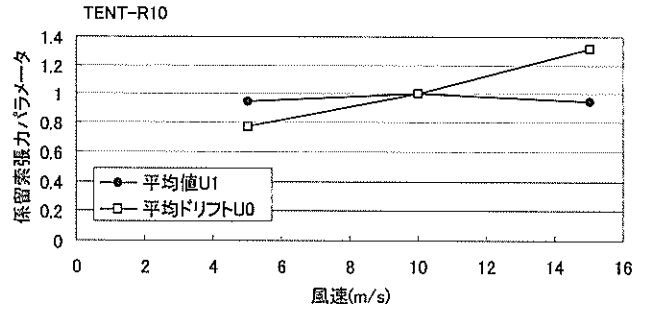


図-55(4) 風速パラメータ

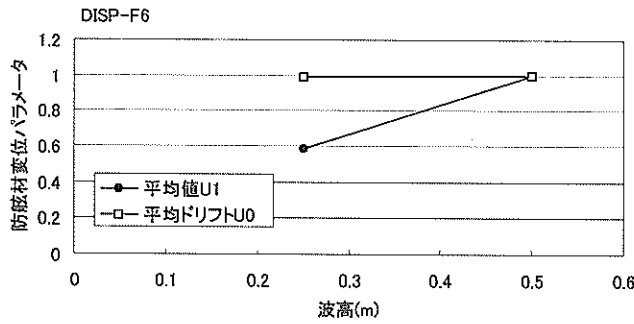


図-55(3) 波周期パラメータ

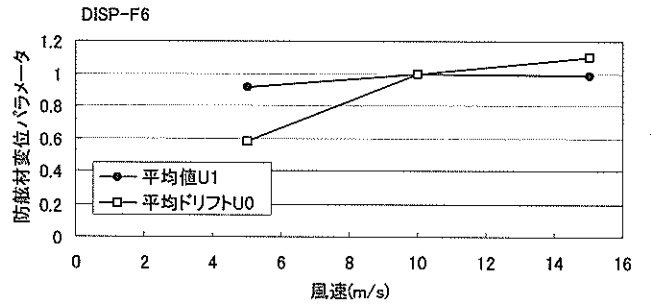


図-55(5) 風向パラメータ

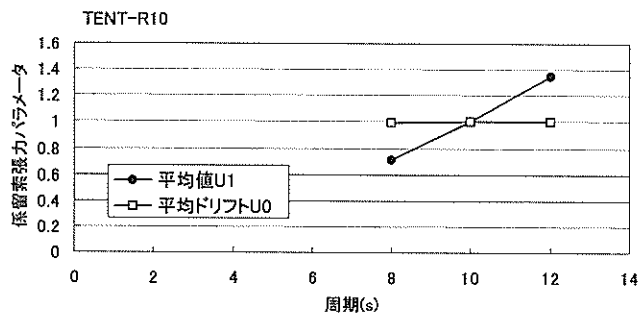


図-55(3) 波周期パラメータ

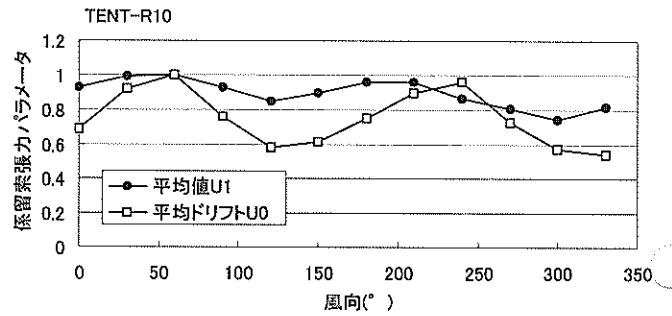


図-55(5) 風向パラメータ

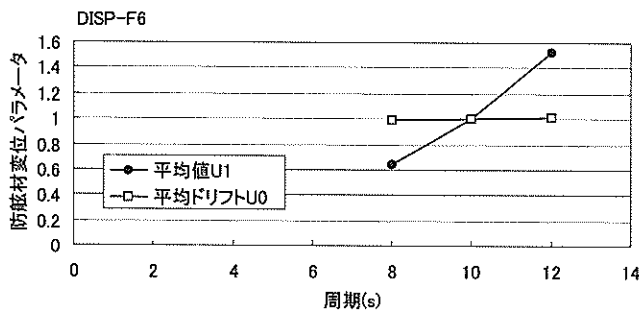


図-55(3) 波周期パラメータ

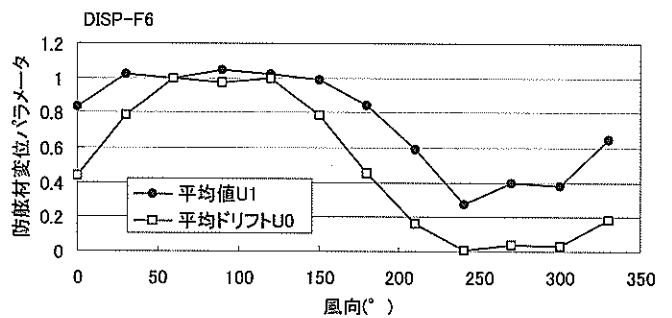


図-55(5) 風向パラメータ

(8) 係留力の確率分布の算定方法

常陸那珂港を例として、係留力の確率分布の算定方法について述べる。まず、先に示した波浪出現頻度表の波向、波高、波周期について、ランク別に係留力の確率分布を求める。船舶信頼度が50%の場合の波向E、波高1.75m、波周期7.5sのランクに対する換算パラメータ $\gamma$ の計算例を表-21に示す。ここで、波浪出現頻度表の波高は港外における沖波波高であるため、表-13(1)の港内波高比を用いてパース前面における港内波高に換算する。パラメータ $\gamma$ による換算係留力の計算結果は、表-22のようになる。

表-21 パラメータ $\gamma$ の計算例

|   |           | 係留索張力        |                | 防衛工変位        |                |
|---|-----------|--------------|----------------|--------------|----------------|
|   |           | 平均値<br>$U_1$ | ドリフト量<br>$U_0$ | 平均値<br>$U_1$ | ドリフト量<br>$U_0$ |
| 波向  | 45°       |              |                |              |                |
| 船舶信頼度   | 50%       | 1            | 1              | 1            | 1              |
| (岸壁)波高  | 0.1925m   | 0.4527       | 0.9969         | 0.4919       | 0.9908         |
| 波周期   | 7.5s      | 0.6340       | 0.9973         | 0.5498       | 0.9920         |
| 風速  | 5.5116m/s | 0.9571       | 0.7980         | 0.9209       | 0.6213         |
| 風向  | 60°       | 1            | 1              | 1            | 1              |
| $\gamma = \gamma_1 \times \gamma_2 \times \gamma_3 \times \gamma_4 \times \gamma_5$ |           | 0.2747       | 0.7933         | 0.2490       | 0.6107         |

表-22 パラメータ $\gamma$ による換算係留力の計算結果

|          | 係留索張力        |                | 防衛工変位        |                |
|----------|--------------|----------------|--------------|----------------|
|          | 平均値<br>$U_1$ | ドリフト量<br>$U_0$ | 平均値<br>$U_1$ | ドリフト量<br>$U_0$ |
| $\gamma$ | 0.2747       | 0.7933         | 0.2490       | 0.6107         |
| 基本値      | 2737.56      | 8006.50        | 0.0795       | 0.0760         |
| 換算値      | 752.04       | 6351.55        | 0.0198       | 0.0464         |

この換算係留力の平均値およびドリフト量と係留力の基本確率分布であるレーリー分布を用いて、波浪出現頻度表のランク別に係留力の確率分布を求める。最終的に、すべてのランクで累計して、常陸那珂港における係留力の確率分布を算定する。

(9) 係留力の確率分布

常陸那珂港における波向E方向の場合の係留索張力の確率分布を図-56に示す。図-56(1)の係留索張力の確率分布は、波向、波高、波周期に対して累計し、船舶信頼度ごとに示したものである。ここで、船舶信頼度は正規分布に従うと仮定し、5種類の船舶信頼度に対して計算している。また、図-56(2)は、図-56(1)の各船舶信頼度を累計した結果であり、波向E方向に対する係留索張力の確率分布である。図-57(1)は、係留索張力の確率分布を波向

別に示したものである。よって、各波向の係留索張力の確率分布をすべて累計し、最終的に求める常陸那珂港の係留索張力の確率分布は図-57(2)に示すとおりになる。同様に、伏木富山港および高知港の係留索張力の確率分布の算定結果を図-58～図-59にそれぞれ示す。

一方、防衛工変位について、常陸那珂港、伏木富山港、高知港における防衛工変位の確率分布の算定結果を図-60～図-62にそれぞれ示す。

以上の結果より、波浪および風の出現頻度表より求められた係留力の確率分布の特性値は表-23のようになる。

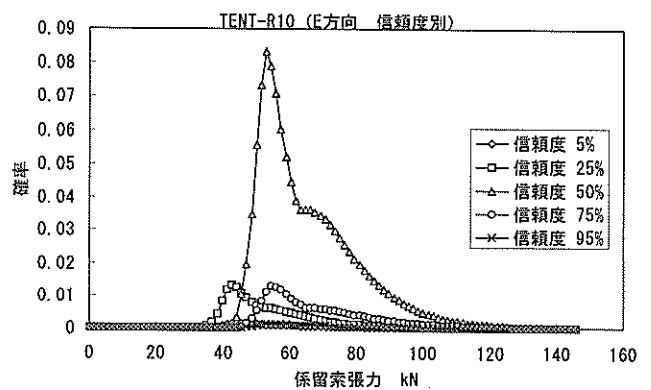


図-56(1) 波向Eに対する船舶信頼度ごとの係留索張力の確率分布 (常陸那珂港)

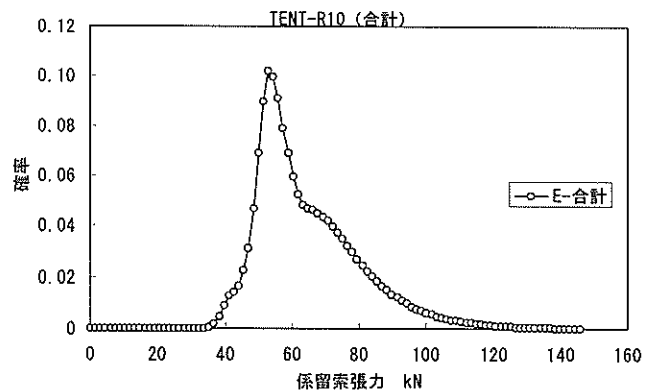


図-56(2) 波向Eに対する係留索張力の確率分布 (常陸那珂港)



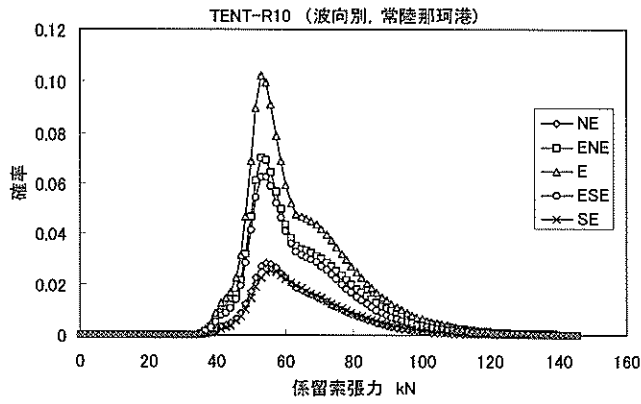


図-57(1) 各波向に対する係留索張力の確率分布  
(常陸那珂港)

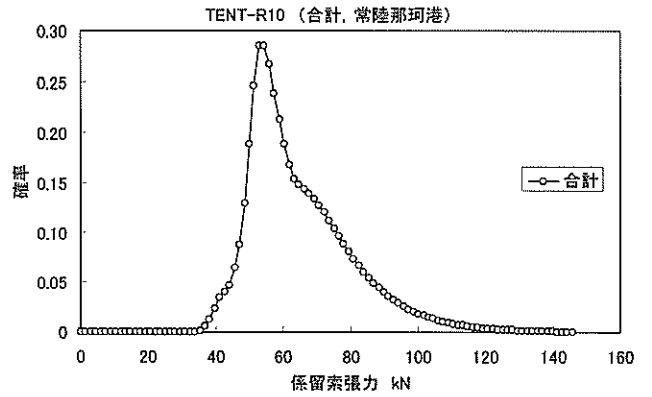


図-57(2) 係留索張力の確率分布  
(常陸那珂港)

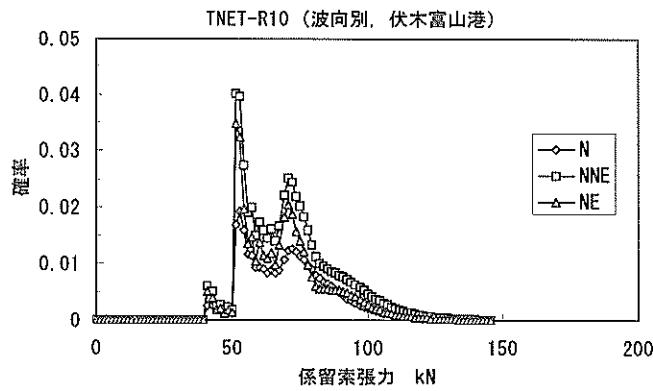


図-58(1) 各波向に対する係留索張力の確率分布  
(伏木富山港)

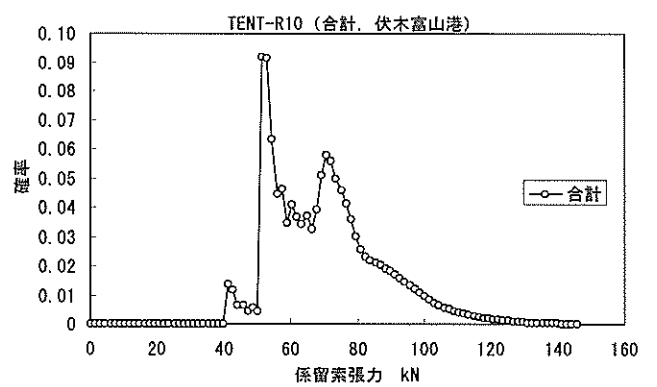


図-58(2) 係留索張力の確率分布  
(伏木富山港)

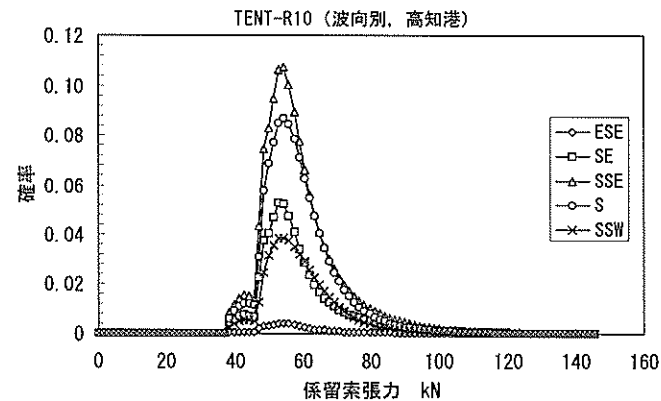


図-59(1) 各波向に対する係留索張力の確率分布  
(高知港)

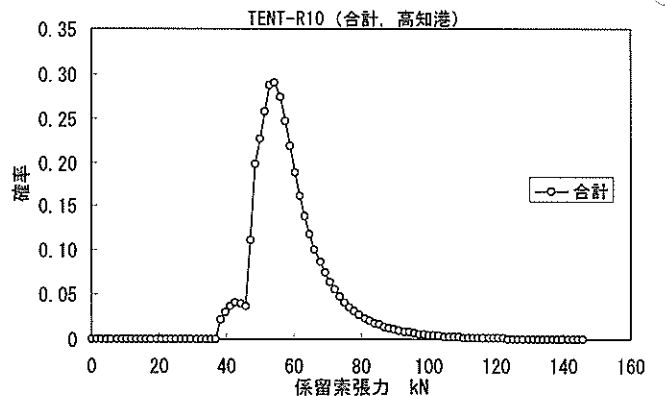


図-59(2) 係留索張力の確率分布  
(高知港)

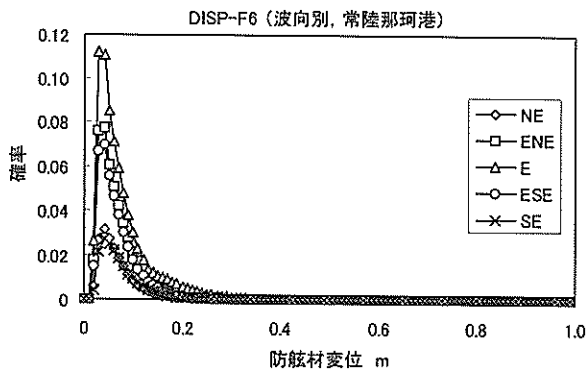


図-60(1) 各波向に対する防衝工変位の確率分布  
(常陸那珂港)

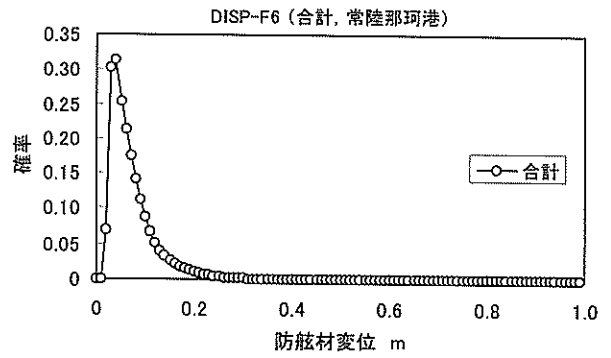


図-60(2) 防衝工変位の確率分布  
(常陸那珂港)

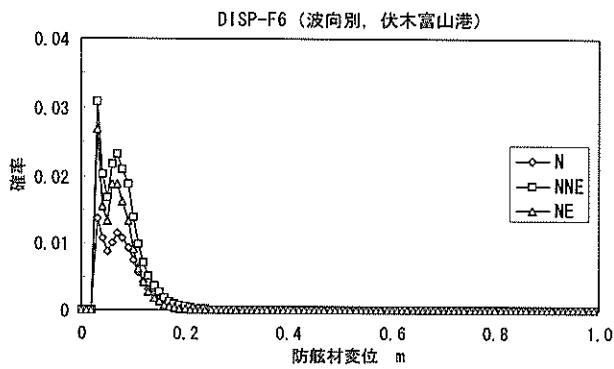


図-61(1) 各波向に対する防衝工変位の確率分布  
(伏木富山港)

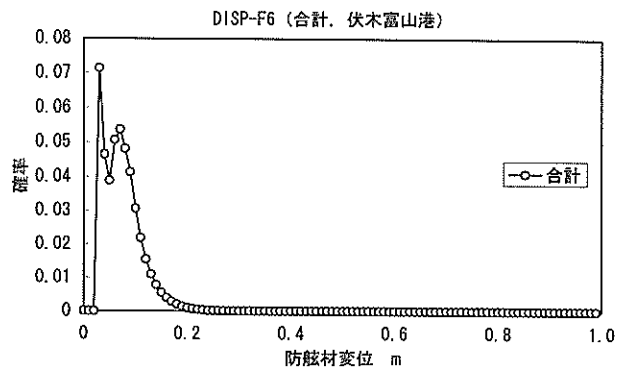


図-61(2) 防衝工変位の確率分布  
(伏木富山港)

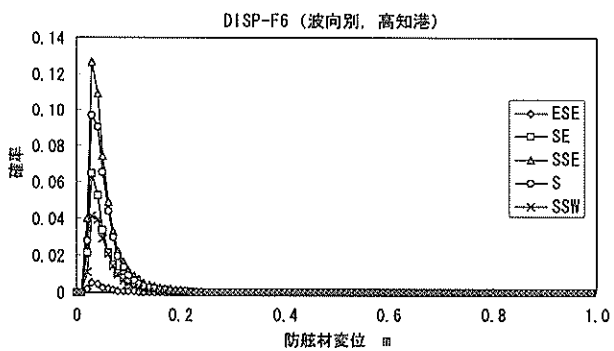


図-62(1) 各波向に対する防衝工変位の確率分布  
(高知港)

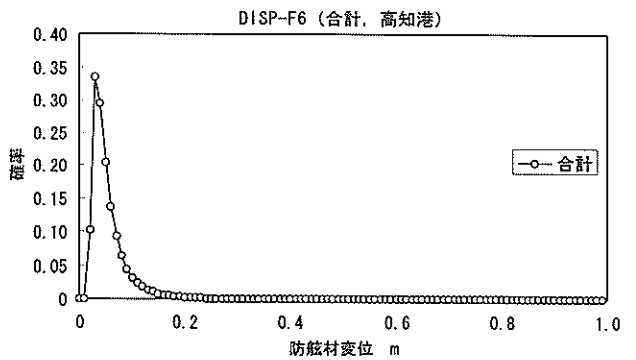


図-62(2) 防衝工変位の確率分布  
(高知港)

表-23 係留力の特性値

|       |             | 常陸<br>那珂港 | 伏木<br>富山港 | 高知港   |
|-------|-------------|-----------|-----------|-------|
| 係留索張力 | 平均値<br>(kN) | 64.77     | 70.23     | 59.04 |
|       | 標準偏差        | 18.53     | 20.13     | 13.89 |
| 防衛工変位 | 平均値<br>(m)  | 0.071     | 0.073     | 0.054 |
|       | 標準偏差        | 0.005     | 0.004     | 0.003 |

(10) 考察

防衛工変位の確率分布は、いずれの港湾においても、ほぼ1つのピークを持つ滑らかな分布形状をしている。一方、係留索張力の確率分布は、常陸那珂港および高知港の場合のように1つのピークを持っている場合も、滑らかな分布形状とはなっていない。係留力の確率分布を算定するには、波浪出現頻度表の各ランクに対して、基本確率分布であるレーリー分布にドリフト量を見込んで切片を付けている。この各ランクに対するレーリー分布のドリフト量の大小が、すべてのランクを累計したときの係留力の確率分布の形状に影響していると考えられる。

波高パラメータや波周期パラメータについては、ドリフト量がおおむね一定値であるため、その影響は少ない。しかしながら、船舶信頼度パラメータについては、40%付近の船舶信頼度を境にドリフト量が不連続になっており、係留力の確率分布の形状への影響があると考えられる。実際に、図-56(1)に示した船舶信頼度ごとの係留索張力の確率分布を見ると、船舶信頼度5%および25%の確率分布は他の船舶信頼度のものからずれていることがわかる。これは、船舶信頼度47.5%を境に係留索を繋ぐ係船柱が異なることにより、係留索の配置状況がその前後で大きく変化するためである。

また、波浪と風の相関関係に基づいて波高から風速を算定する際に、風速ランク間を線形補間することにより風速を求めていることも原因と考えられる。すなわち、波高の変化に対して、ドリフト量の風速パラメータが非線形に変化するため、係留力の確率分布が均一に分布しなくなるのである。一例として、波高に対する振幅平均値およびドリフト量の風速パラメータの関係を図-63に示す。波高の変化に対して、平均値の風速パラメータはほぼ直線的に推移しているが、ドリフト量の風速パラメータは階段状に変動している。したがって、波高ランクが等間隔で設定されていても、波高から風速を算定するときに係留力の確率分布が不均一にばらつくようになる。

このようなドリフト量の影響が防衛工変位の確率分布

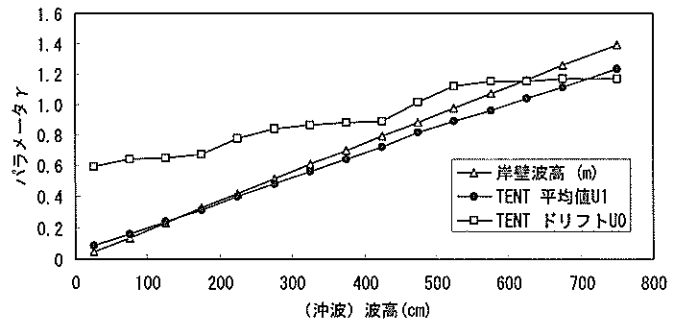


図-63 波高と風速パラメータの関係 (高知港, 周期4.5s)

に対しては小さく、係留索張力の確率分布に対して大きいのは、防衛工の反力特性が強い非線形履歴を有している一方で、係留索の張力特性が弱い非線形性を有していることが原因であると考えられる。

次に、係留力の特性値に基づいて、係留索および防衛工の安全性について簡単に検討する。係留索の確率分布から標準偏差の3倍程度まで張力が発生すると仮定すると、係留索張力の最大値は伏木富山港の場合の130.6kNである。係留索の破断荷重は657.3kNであるから、安全率に換算すると5.0となる。また、係留索の繰返し使用による強度の低下を考慮して係留索の破断荷重が50%まで低下すると仮定すると、係留索の破断荷重は328.7kNとなる。この場合は、安全率に換算すると2.5となる。また、防衛工変位についても係留索の場合と同様に最大変位を考えると、防衛工変位の最大値は常陸那珂港の場合の0.09mである。防衛工の高さは1.6mであることから、定格変形量52.5%には遠く及ばないことがわかる。

6.4 係留力に対する係船柱の信頼性評価

(1) 対象構造物

対象構造物は、図-64に示すケーソン式岸壁のコンクリート製上部工とし、係留船舶からのけん引力(係留索張力)が係船柱(曲柱)に外力として作用すると仮定した。

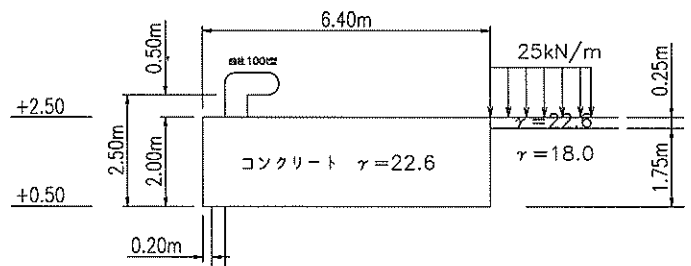


図-64 コンクリート上部工の断面図

まず、現行設計法を用いてけん引力が直接作用する上部工断面の安定計算を行い、滑動および転倒の破壊モードに対して安全率1.2が満足される堤体幅を有する構造断面を設定する。外力としては、けん引力の他に背後土圧を考慮し、上載荷重 $25\text{kN/m}^2$ 、内部摩擦角 $35^\circ$ 、壁面摩擦角 $15^\circ$ として算定する。けん引力は $1,000\text{kN}$ とし、上部コンクリートの目地割りスパンを $10\text{m}$ とすると、単位幅当たりのけん引力は $100\text{kN/m}$ となる。また、モーメントの作用長は上部工高さ（ $2.0\text{m}$ ）に係留索の取付高さ（ $0.5\text{m}$ ）を加えて $2.5\text{m}$ とする。けん引力によるモーメントは、 $250\text{kN}\cdot\text{m/m}$ になる。安定計算の結果、コンクリート上部工の堤体幅は、図-64のように $6.40\text{m}$ として設計した。

### (2) 信頼性解析

設定したコンクリート上部工およびけん引力の確率分布を用いて、モンテカルロシミュレーションにより信頼性解析を行う。モンテカルロシミュレーションにより1万回の繰り返し計算を行うことで、外力、抵抗力および安全率の確率分布を算定し、上部工の破壊確率を求める。信頼性解析の流れを図-65に示す。この図において、※印は、乱数を発生させることにより、変動特性を考慮するパラメータである。

### (3) パラメータの変動特性

信頼性解析におけるパラメータの変動特性（確率分布、平均値、平均値の偏り、変動係数）は、表-24のように設定する。なお、各パラメータ（コンクリート単位体積質量、摩擦係数、土圧）は正規分布によりばらつきを与えるが、けん引力に関しては6.3で算定した係留索張力の確率分布を用いる。また、土圧の平均値は、上部工断面の安定計算で算定された値を用いる。

### (4) パラメータの確率分布

#### a) コンクリート上部工

コンクリート上部工本体に関するパラメータの確率分布については、単位体積質量および摩擦係数のばらつきを考慮し、平均値は、港湾の施設の技術上の基準・同解説（運輸省港湾局、1999）などで規定されている単位体積質量 $22.6\text{kN/m}^3$ （無筋コンクリート）および摩擦係数0.5（コンクリートとコンクリート）とする。図-66は、コンクリート上部工に関するパラメータの確率分布を示す。

#### b) 土圧

土圧に関するパラメータの確率分布については、水平および鉛直の各合力にそれぞればらつきを与えるものとする。平均値は、上部工断面の安定計算において算定された土圧水平力および土圧鉛直力とし、平均値の偏り1.00および変動係数0.10とする。図-67は、土圧に関するパラメータの確率分布を示す。

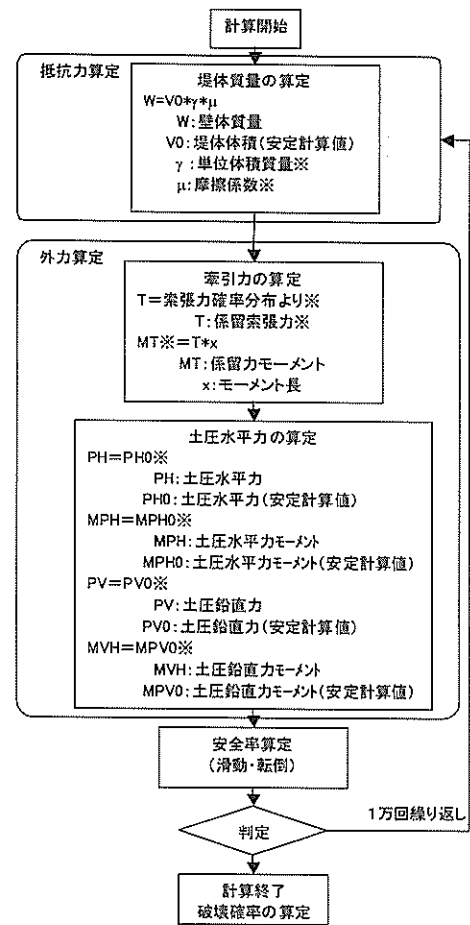
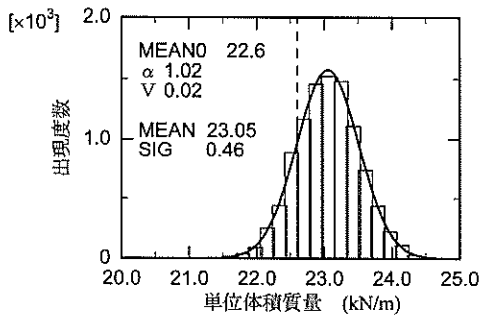


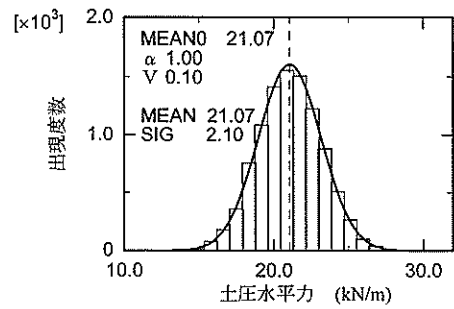
図-65 信頼性解析の流れ

表-24 パラメータの変動特性

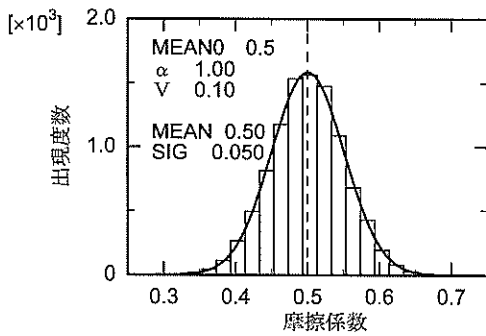
| 上部工条件           |                         | 平均値                              | 平均値の偏り | 変動係数 |
|-----------------|-------------------------|----------------------------------|--------|------|
| 無筋コンクリート        | 単位体積質量                  | 22.6 $\text{kN/m}^3$             | 1.02   | 0.02 |
|                 | 摩擦係数<br>(コンクリートとコンクリート) | 0.5                              | 1.00   | 0.10 |
| 外力条件            |                         | 平均値                              | 平均値の偏り | 変動係数 |
| けん引力<br>(係留索張力) |                         | 6.3で算定した確率分布                     |        |      |
|                 | 土圧水平力                   | 21.07 $\text{kN/m}$              | 1.00   | 0.10 |
|                 | 〃 モーメント                 | 18.15 $\text{kN}\cdot\text{m/m}$ | 1.00   | 0.10 |
|                 | 土圧鉛直力                   | 5.65 $\text{kN/m}$               | 1.00   | 0.10 |
|                 | 〃 モーメント                 | 35.03 $\text{kN}\cdot\text{m/m}$ | 1.00   | 0.10 |



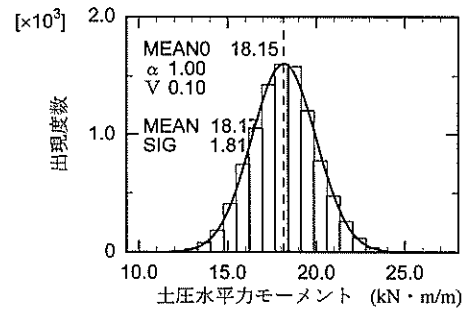
(a)単位体積質量



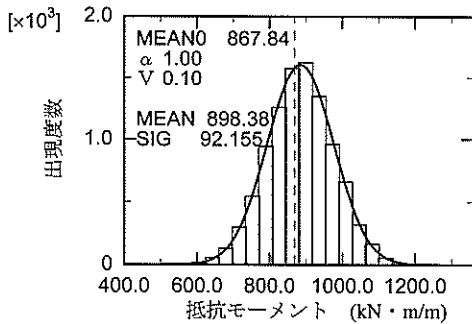
(a)土圧水平力



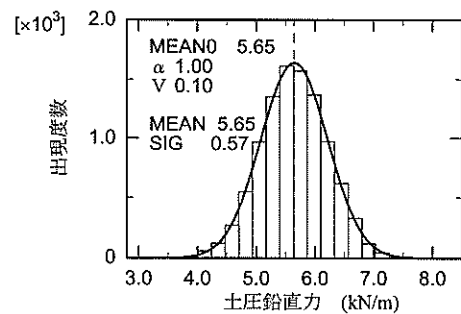
(b)摩擦係数



(b)土圧水平モーメント

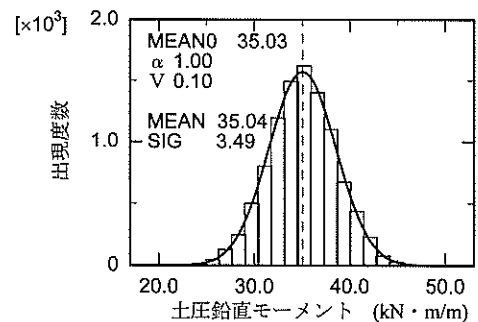


(c)上部工質量モーメント



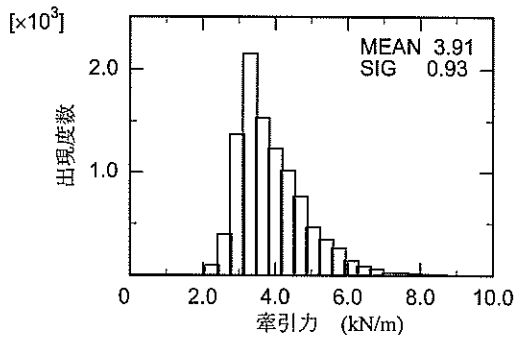
(c)土圧鉛直力

図-66 コンクリート上部工に関する  
パラメータの確率分布

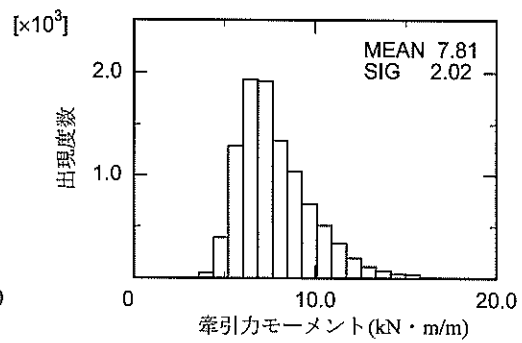


(d)土圧鉛直モーメント

図-67 土圧に関するパラメータの確率分布

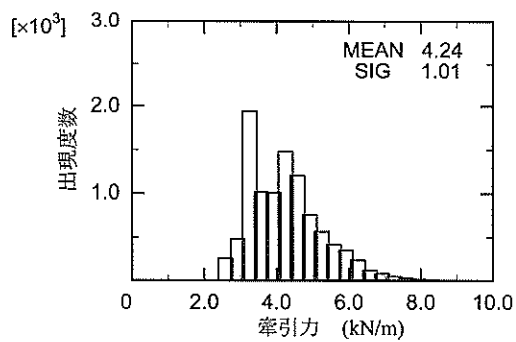


(a)けん引力

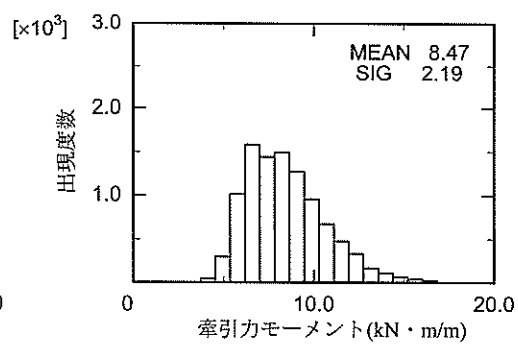


(b)けん引モーメント

図-68(1) けん引力およびけん引モーメントの確率分布 (常陸那珂港)

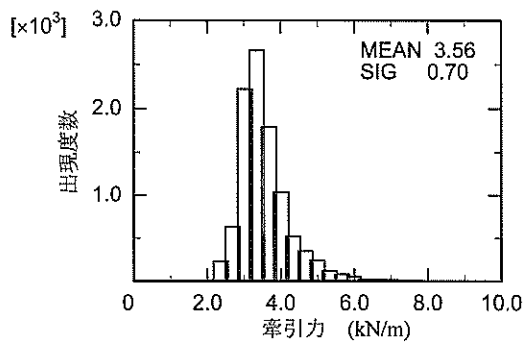


(a)けん引力

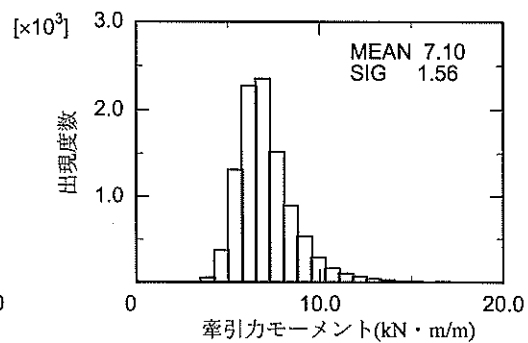


(b)けん引モーメント

図-68(2) けん引力およびけん引モーメントの確率分布 (伏木富山港)



(a)けん引力



(b)けん引モーメント

図-68(3) けん引力およびけん引モーメントの確率分布 (高知港)

c)けん引力

けん引力は、6.3で検討した係留索張力の確率分布を用いる。その際には、係留配置図から推定した係留索の取付角度(37.7°)を用いて、バース法線直角方向の単位長さ当たりの荷重に換算する。図-68(1)~(3)は、常陸那珂港、伏木富山港、高知港の各港湾におけるけん引力およびけん引モーメントの確率分布を示す。

(5) 現行設計断面に対する解析結果

常陸那珂港におけるコンクリート上部工のけん引力に対する信頼性解析結果について検討する。モンテカルロシミュレーションによる滑動に対するコンクリート上部工の解析結果を図-69(1)~(3)に示す。図-69(1)は、外力および抵抗力の確率分布である。また、図-69(2)は、滑動に対する安全率の頻度分布であり、図-69(3)は、滑動による上部工の破壊確率である。図-69(1)を見ると、けん引力による外力の確率分布の平均値は、抵抗力の確率分布の平均値と比較してかなり小さいことがわかる。また、図-69(2)から、滑動に対する安全率の平均値は約6.0であり、滑動によって上部工が破壊する頻度、すなわち安全率1.0以下の場合には0回である。このことから、少なくとも滑動による上部工の破壊確率は $10^{-4}$ 以下であり、安全性指標に換算すると3.7以上となる。実際に荷役作業中に係船柱やコンクリート上部工が破壊するという被災事故例が極めて少ないことから、現行設計法におけるけん引力の設定はかなり安全側の設定であると考えられる。

(6) 上部工の堤体幅を縮小した場合の検討

現行設計法で設計されたコンクリート上部工断面に対しては、係留船舶のけん引力によって破壊は発生しないことが判明した。そこで、上部工の堤体幅を現行設計法による最適幅6.4mの1/2~1/4まで変化させて、堤体幅の大小による抵抗力の変化が上部工の破壊確率に与える影響について検討する。なお、上部工の破壊確率はフィッティングさせた確率分布関数で $10^{-7}$ 程度まで算定し、それ以下の破壊確率になる場合は破壊確率を0としている。

ここでは、常陸那珂港における上部工の堤体幅(6.4m)および堤体幅1/4(1.6m)の場合について、上部工の破壊確率の算定結果を図-70(1)~(2)に示す。この図から、破壊確率の最適確率分布関数としては対数正規分布がよく適合していると考えられ、滑動による破壊確率は堤体幅1/4の時に $10^{-4}$ 程度であり、転倒による破壊確率は堤体幅1/4でも $10^{-7}$ 程度である。なお、常陸那珂港、伏木富山港、高知港における上部工の破壊確率の算定結果を付録Gにすべて掲載する。

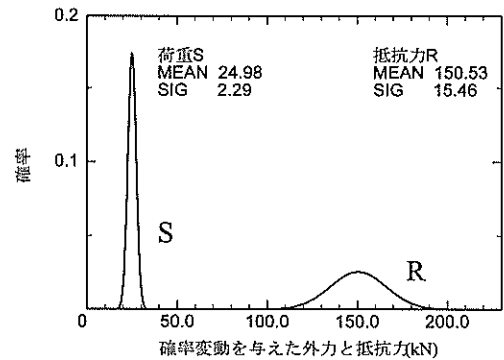


図-69(1) 外力および抵抗力の確率分布(常陸那珂港)

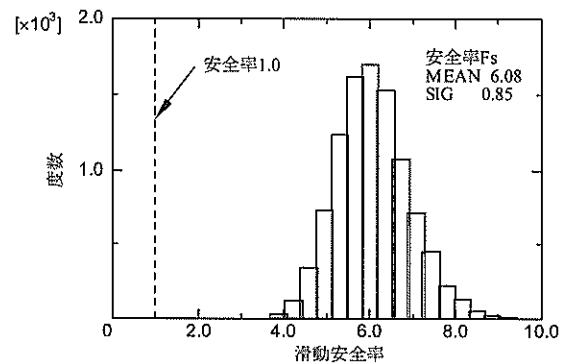


図-69(2) 滑動に対する安全率の頻度分布(常陸那珂港)

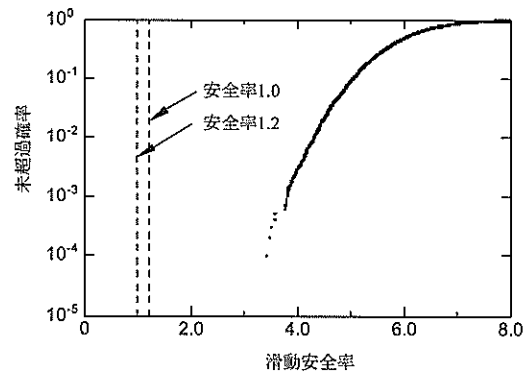


図-69(3) 滑動による上部工の破壊確率(常陸那珂港)

(7) 安全性指標

信頼性解析により求められたコンクリート上部工の破壊確率から、式(12)により安全性指標を算定する。上部工の堤体幅ごとの破壊確率および安全性指標を表-25(1)~(3)に示す。これらの表から、滑動による破壊確率は各港湾ともに堤体幅1/4(1.6m)で $10^{-4}$ 程度となり、その場合の安全性指標は3.2~3.5である。したがって、上部工の堤体幅1/4(1.6m)の場合でも十分に安全であると考えられる。

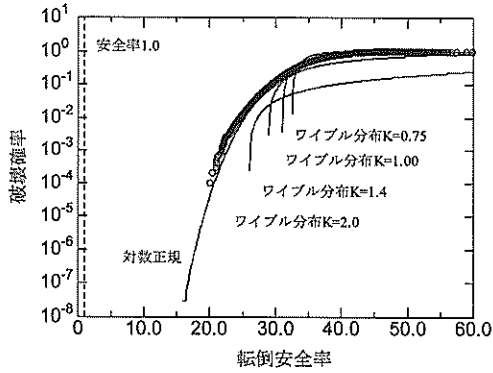
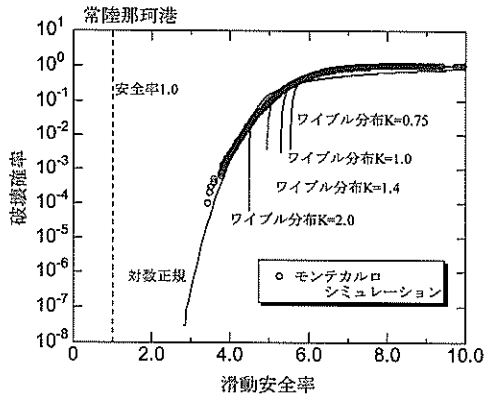


図-70(1) 堤体幅 (6.4m) の場合の破壊確率 (常陸那珂港)

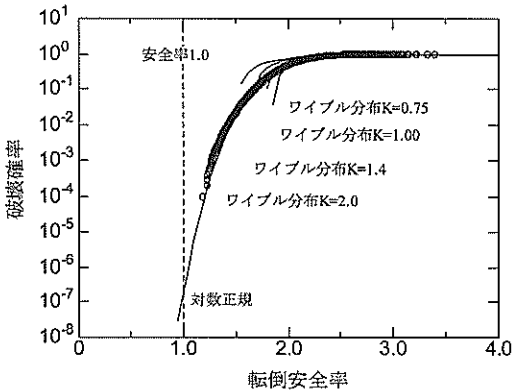
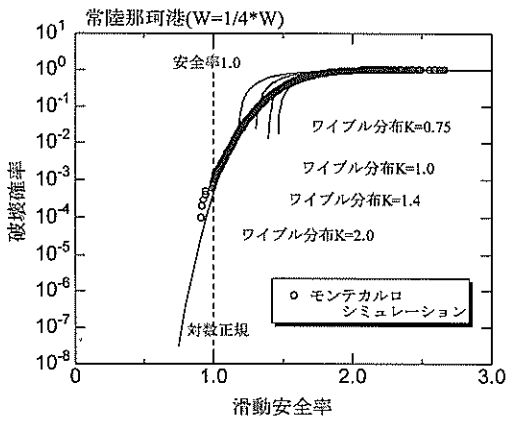


図-70(2) 堤体幅1/4 (1.6m) の場合の破壊確率 (常陸那珂港)

表-25(1) 堤体幅に対する破壊確率および安全性指標 (常陸那珂港)

| 堤体幅 |        | 滑動       |       | 転倒       |       |
|-----|--------|----------|-------|----------|-------|
|     |        | 破壊確率     | 安全性指標 | 破壊確率     | 安全性指標 |
| 1   | 6.40 m | 0        | ----- | 0        | ----- |
| 1/2 | 3.20 m | 0        | ----- | 0        | ----- |
| 1/3 | 2.11 m | 5.96E-08 | ----- | 0        | ----- |
| 1/4 | 1.60 m | 4.43E-04 | 3.32  | 1.79E-07 | ----- |

表-25(2) 堤体幅に対する破壊確率および安全性指標 (伏木富山港)

| 堤体幅 |        | 滑動       |       | 転倒       |       |
|-----|--------|----------|-------|----------|-------|
|     |        | 破壊確率     | 安全性指標 | 破壊確率     | 安全性指標 |
| 1   | 6.40 m | 0        | ----- | 0        | ----- |
| 1/2 | 3.20 m | 0        | ----- | 0        | ----- |
| 1/3 | 2.11 m | 1.19E-07 | ----- | 0        | ----- |
| 1/4 | 1.60 m | 6.28E-04 | 3.23  | 6.56E-07 | 4.8   |

表-25(3) 堤体幅に対する破壊確率および安全性指標 (高知港)

| 堤体幅 |        | 滑動       |       | 転倒   |       |
|-----|--------|----------|-------|------|-------|
|     |        | 破壊確率     | 安全性指標 | 破壊確率 | 安全性指標 |
| 1   | 6.40 m | 0        | ----- | 0    | ----- |
| 1/2 | 3.20 m | 0        | ----- | 0    | ----- |
| 1/3 | 2.11 m | 2.98E-08 | ----- | 0    | ----- |
| 1/4 | 1.60 m | 2.71E-04 | 3.46  | 0    | ----- |

(8) 安全係数

滑動および転倒の各破壊モードの性能関数および安全性照査式は、式(23)~(26)に示すとおりである。また、各パラメータの安全係数は式(27)~(35)により算定できる。安全係数の算定式は、文献(長尾ら, 1998; 長尾ら, 2001)を参考にして求めた。

<滑動>

$$\text{性能関数: } Z = f(W + Pv) - (P_H + T) \quad (23)$$

安全性照査式:

$$\gamma_f f_K (\gamma_W W_K + \gamma_P Pv_K) \geq \gamma_{P_H} P_{H_K} + \gamma_T T_K \quad (24)$$

<転倒>

$$\text{性能関数: } Z = (M_W + M_Pv) - (M_{P_H} + M_T) \quad (25)$$

安全性照査式:

$$\gamma_{M_W} M_{W_K} + \gamma_{M_Pv} M_{Pv_K} \geq \gamma_{M_{P_H}} M_{P_H_K} + \gamma_{M_T} M_{T_K} \quad (26)$$



表-26(1) 安全係数 (常陸那珂港)

滑動

|      | Pf(破壊確率) | $\beta$ (安全性指標) | V(変動係数)  | $\mu$ (平均値) | 設計用値   | $\gamma$ (平均値) | $\gamma$ (設計用値) |
|------|----------|-----------------|----------|-------------|--------|----------------|-----------------|
| 摩擦係数 | 4.43E-04 | 3.32            | 0.10     | 0.50        | 0.50   | 0.84           | 0.84            |
| 堤体質量 | 4.43E-04 | 3.32            | 0.10     | 295.04      | 289.28 | 0.89           | 0.90            |
| 土圧鉛直 | 4.43E-04 | 3.32            | 0.10     | 5.65        | 5.65   | 0.89           | 0.89            |
| 土圧水平 | 4.43E-04 | 3.32            | 0.10     | 21.07       | 21.07  | 1.16           | 1.16            |
| 係留力  | 4.43E-04 | 3.32            | 9.30E-03 | 3.91        | 100.00 | 1.02           | 0.04            |

転倒

|           | Pf(破壊確率) | $\beta$ (安全性指標) | V(変動係数)  | $\mu$ (平均値) | 設計用値   | $\gamma$ (平均値) | $\gamma$ (設計用値) |
|-----------|----------|-----------------|----------|-------------|--------|----------------|-----------------|
| 堤体質量モーメント | 1.79E-07 | $\infty$        | 0.10     | 898.38      | 867.84 | ---            | ---             |
| 土圧鉛直モーメント | 1.79E-07 | $\infty$        | 0.10     | 35.04       | 35.03  | ---            | ---             |
| 土圧水平モーメント | 1.79E-07 | $\infty$        | 0.10     | 18.17       | 18.15  | ---            | ---             |
| 係留力モーメント  | 1.79E-07 | $\infty$        | 8.08E-03 | 7.81        | 250.00 | ---            | ---             |

表-26(2) 安全係数 (伏木富山港)

滑動

|      | Pf(破壊確率) | $\beta$ (安全性指標) | V(変動係数)  | $\mu$ (平均値) | 設計用値   | $\gamma$ (平均値) | $\gamma$ (設計用値) |
|------|----------|-----------------|----------|-------------|--------|----------------|-----------------|
| 摩擦係数 | 6.28E-04 | 3.23            | 0.10     | 0.50        | 0.50   | 0.84           | 0.84            |
| 堤体質量 | 6.28E-04 | 3.23            | 0.10     | 295.04      | 289.28 | 0.89           | 0.91            |
| 土圧鉛直 | 6.28E-04 | 3.23            | 0.10     | 5.65        | 5.65   | 0.89           | 0.89            |
| 土圧水平 | 6.28E-04 | 3.23            | 0.10     | 21.07       | 21.07  | 1.16           | 1.16            |
| 係留力  | 6.28E-04 | 3.23            | 1.01E-02 | 4.24        | 100.00 | 1.02           | 0.04            |

転倒

|           | Pf(破壊確率) | $\beta$ (安全性指標) | V(変動係数)  | $\mu$ (平均値) | 設計用値   | $\gamma$ (平均値) | $\gamma$ (設計用値) |
|-----------|----------|-----------------|----------|-------------|--------|----------------|-----------------|
| 堤体質量モーメント | 6.56E-07 | 4.77            | 0.10     | 898.38      | 867.84 | 0.77           | 0.79            |
| 土圧鉛直モーメント | 6.56E-07 | 4.77            | 0.10     | 35.04       | 35.03  | 0.84           | 0.84            |
| 土圧水平モーメント | 6.56E-07 | 4.77            | 0.10     | 18.17       | 18.15  | 1.16           | 1.16            |
| 係留力モーメント  | 6.56E-07 | 4.77            | 8.76E-03 | 8.47        | 250.00 | 1.02           | 0.03            |

表-26(3) 安全係数 (高知港)

滑動

|      | Pf(破壊確率) | $\beta$ (安全性指標) | V(変動係数)  | $\mu$ (平均値) | 設計用値   | $\gamma$ (平均値) | $\gamma$ (設計用値) |
|------|----------|-----------------|----------|-------------|--------|----------------|-----------------|
| 摩擦係数 | 2.71E-04 | 3.46            | 0.10     | 0.50        | 0.50   | 0.83           | 0.83            |
| 堤体質量 | 2.71E-04 | 3.46            | 0.10     | 295.04      | 289.28 | 0.88           | 0.90            |
| 土圧鉛直 | 2.71E-04 | 3.46            | 0.10     | 5.65        | 5.65   | 0.88           | 0.88            |
| 土圧水平 | 2.71E-04 | 3.46            | 0.10     | 21.07       | 21.07  | 1.17           | 1.17            |
| 係留力  | 2.71E-04 | 3.46            | 7.00E-03 | 3.56        | 100.00 | 1.01           | 0.04            |

転倒

|           | Pf(破壊確率) | $\beta$ (安全性指標) | V(変動係数)  | $\mu$ (平均値) | 設計用値   | $\gamma$ (平均値) | $\gamma$ (設計用値) |
|-----------|----------|-----------------|----------|-------------|--------|----------------|-----------------|
| 堤体質量モーメント | 0.00E+00 | $\infty$        | 0.10     | 898.38      | 867.84 | ---            | ---             |
| 土圧鉛直モーメント | 0.00E+00 | $\infty$        | 0.10     | 35.04       | 35.03  | ---            | ---             |
| 土圧水平モーメント | 0.00E+00 | $\infty$        | 0.10     | 18.17       | 18.15  | ---            | ---             |
| 係留力モーメント  | 0.00E+00 | $\infty$        | 6.24E-03 | 7.10        | 250.00 | ---            | ---             |

<滑動>

安全係数:

$$\text{摩擦係数: } \gamma_f = (1 - \alpha\alpha'\beta V_f) \frac{\mu_f}{f_K} \quad (27)$$

$$\text{上部工質量: } \gamma_W = (1 - \alpha\alpha'\beta V_W) \frac{\mu_W}{W_K} \quad (28)$$

$$\text{土圧鉛直力: } \gamma_{P_V} = (1 - \alpha\alpha'\beta V_{P_V}) \frac{\mu_{P_V}}{P_{V_K}} \quad (29)$$

$$\text{土圧水平力: } \gamma_{P_H} = (1 + \alpha\alpha'\beta V_{P_H}) \frac{\mu_{P_H}}{P_{H_K}} \quad (30)$$

$$\text{けん引力: } \gamma_T = (1 + \alpha\alpha'\beta V_T) \frac{\mu_T}{T_K} \quad (31)$$

<転倒>

安全係数:

$$\text{上部工質量モーメント: } \gamma_{M_W} = (1 - \alpha\alpha'\beta V_{M_W}) \frac{\mu_{M_W}}{M_{W_K}} \quad (32)$$

土圧鉛直モーメント:

$$\gamma_{M_{P_V}} = (1 - \alpha\alpha'\beta V_{M_{P_V}}) \frac{\mu_{M_{P_V}}}{M_{P_V_K}} \quad (33)$$

土圧水平モーメント:

$$\gamma_{M_{P_H}} = (1 + \alpha\alpha'\beta V_{M_{P_H}}) \frac{\mu_{M_{P_H}}}{M_{P_H_K}} \quad (34)$$

$$\text{けん引モーメント: } \gamma_{M_T} = (1 + \alpha\alpha'\beta V_{M_T}) \frac{\mu_{M_T}}{M_{T_K}} \quad (35)$$

ここで、 $f$ :摩擦係数、 $W$ :上部工質量、 $P_V$ :土圧鉛直力、 $P_H$ :土圧水平力、 $T$ :けん引力、 $M_W$ :上部工質量モーメント、 $M_{P_V}$ :土圧鉛直モーメント、 $M_{P_H}$ :土圧水平モーメント、 $M_T$ :けん引モーメント、である。また、下付きの $K$ は特性値を表し、 $\gamma$ :安全係数、 $\alpha$ 、 $\alpha'$ および $\alpha''$ :線形化近似係数(=0.7)、 $V$ :変動係数、 $\mu$ :平均値、である。

安全係数の算定結果を表-26(1)~(3)に示す。ここでは、算定式の特性値に平均値を用いた安全係数と設計用値を用いた安全係数について求めた。

### 6.5 まとめ

①港外における波浪および風の出現頻度表から、外力条件に対する係留力の換算パラメータを用いて、常陸那珂港、伏木富山港、高知港における係留力の確率分布および特性値を算定した。その結果、係留索張力は係留索の破断荷重に比べて、また防衛工変位も防衛工の定格変形量に比べて小さな値となり、現行設計法によって選定された係留索および防衛工の係留力に対する安全性は十分

高いことがわかった。

②係留力の確率分布を用いて、係船柱を設置するコンクリート上部工の滑動および転倒の破壊モードに対する信頼性解析を行った。その結果、現行設計法によって設計されたコンクリート上部工の破壊確率は非常に小さくなり、現行設計法によるけん引力の設定はかなり安全側の設定であると考えられる。また、コンクリート上部工の信頼性解析の結果から、限界状態設計法で用いる安全係数を算定した。

## 7. 結論

本研究の成果を以下のとおり取りまとめる。

- (1) 温度補正係数および速度補正係数を導入した防衛工の限界状態設計法の考え方を示し、防衛工の設計法の簡便化に資するためのデータベースシステムを作成した。
- (2) バースの大水深化・外洋化、船型の大型化、船型の変化などの設計条件を考慮して、大型船舶による接岸力および係留力(衝突力、けん引力)の確率的変動特性を船舶の接岸力のモンテカルロシミュレーションおよび係留船舶の動揺シミュレーションにより評価した。
- (3) 船舶の接岸力および係留力の確率的評価結果を用いて、信頼性解析により防衛工および係船柱の安全性を評価し、限界状態設計法における安全係数を算定した。

## 8. おわりに

本研究は、防衛工および係船柱の設計法への限界状態設計法の適用に関する基礎的検討であり、その成果は、次期技術基準策定のための基礎資料になると考えている。しかしながら、防衛工および係船柱の限界状態設計法の確立までには至っておらず、今後も研究を進めていく必要がある。今後の課題として、防衛工の限界状態設計法における接岸エネルギー算定式の各パラメータの安全係数の設定や、信頼性解析による係船柱本体の安全性評価に関する検討があげられる。また、現状では、各種防衛工についての温度補正係数および速度補正係数のデータがほとんど取得できていないため、防衛工メーカーの協力を得て、これらの補正係数のデータベースを整備する必要がある。

(2004年5月14日受付)

## 参考文献

- 赤倉康寛・高橋宏直・中本隆 (1998) : 統計解析等による対象船舶の諸元, 港湾技研資料, No.910, 23p.
- 稲垣紘史・山口孝市・片山猛雄 (1970) : けい船柱の標準設計 (案), 港湾技研資料, No.102, 117p.
- 上田茂 (1984) : 係岸船舶の動揺解析手法とその応用に関する研究, 港湾技研資料, No.504, pp.337-342.
- 上田茂・大井栄二郎 (1987) : 港湾の係留施設における防衛工の設計について, 港湾技研資料, No.596, 127p.
- 上田茂・白石悟 (1992) : 係留船舶の動揺に基づく防衛工の設計について, 港湾技研資料, No.729, 55p.
- 上田茂・白石悟・丸山忠明・上國晃・高崎守・山瀬晴義 (1998) : 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論文集, pp.359-364.
- 上田茂・白石悟 (1999) : 防舷材の性能試験及び設計法, 港湾学術交流会年報, No.36, pp.143-155.
- 上田茂・梅村亮・白石悟・山本修司・赤倉康寛・山瀬晴義 (2000) : 統計的手法による船舶接岸用防舷材の設計に関する研究, 海岸工学論文集, 第47巻, pp.866-870.
- 運輸省港湾局 (1999) : 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 日本港湾協会, 下巻, pp.825-832, pp.1080-1088.
- 合田良實 (1990) : 港湾構造物の耐波設計- 波浪工学への序説-, 鹿島出版会, pp.267-298.
- 笹健児・白石悟 (2000) : 信頼性手法による船舶の荷役および係留の安全性評価に関する基礎的検討, 港湾技研資料, No.956, 44p.
- 中西正昭・丸山忠明 (1998) : ポートで橋が動く- 旋回式浮体橋-, 土木学会誌, pp.12-14.
- 永井紀彦 (2002) : 全国港湾海洋波浪観測30か年統計 (NOWPHAS1970-1999), 港湾空港技術研究所資料, No.1035, 388p.
- 長尾毅・大久保昇・川崎進・林由木夫 (1998) : 信頼性設計法による防波堤の全体系安全性 (第3報) - レベル1, 2の設計法の適用性総括-, 港湾技術研究所報告, 第37巻第2号, pp.131-176.
- 長尾毅・吉浪康行・佐貫哲朗・嘉門雅史 (2001) : ケーソン式岸壁の外的安定に関する信頼性設計法の適用, 構造工学論文集, Vol.47A, pp.293-304.
- 長尾毅・岡田達彦・岩田直樹・松本英雄・石田誠・佐藤祐司 (2003) : 係留施設の船舶接岸時の性能設計法に関する基礎的研究, 国土技術政策総合研究所資料, No.63, 31p.
- 浜田賢二・松本英雄・黒田祐一・早藤能伸 (1991) : 外力算定のための船舶諸元およびマスト高の解析, 港湾

技研資料, No.714, 63p.

- 平石哲也・河野信二・玉城重則・長谷川準三 (1997) : 港湾構造物の設計に用いる長周期波の標準スペクトルについて, 海岸工学論文集, 第44巻, pp.246-250.
- 福田功・柳生忠彦 (1982) : 係船柱にかかるけん引力について, 港湾技研資料, No.427, 57p.
- 守屋義一・吉田行秀・伊勢博・宮崎和行・杉浦淳 (1991) : 船舶の接岸速度に関する現地調査, 海岸工学論文集, 第38巻, pp.751-755.
- PIANC (1984) : Report on the International Commission for Improving the Design of Fender System, *Supplement to Bulletin No.45*, 158p.
- PIANC (2002) : Guidelines for the Design of Fender Systems : 2002, *Report of WG 33 of PIANC*, 70p.
- Ueda, S., Hirano, T., Shiraishi, S., Yamamoto, S. and Yamase, S. (2002) : Statistical Design of Fender for Berthing Ship, *Proc. of the 12th International Offshore and Polar Engineering Conference*, pp.545-551.

## 記号表

- $A$  : 尺度母数
- $B$  : 型幅 (m), または位置母数
- $C_b$  : ブロック係数
- $C_c$  : パースの形状係数 (標準は, 1.0)
- $C_e$  : 偏心係数
- $C_m$  : 仮想質量係数
- $C_s$  : 柔軟性係数 (標準は, 1.0)
- $DWT$  : 船舶の重量トン (t)
- $d$  : 喫水, または満載喫水 (m)
- $E$  : エネルギー (kNm)
- $E_{cat}$  : 防衛工の吸収エネルギー規格値 (カタログ表示値) (kNm)
- $E_d$  : ある超過確率における接岸エネルギー (kNm)
- $E_f$  : 防衛工の吸収エネルギー (kNm)
- $E_n$  : 接岸エネルギー (kNm)
- $E_{nK}$  : 接岸エネルギーの特性値 (kNm)
- $E_S$  : 船舶の接岸エネルギーの公称値 (kNm)  
(現行設計法では=設計接岸エネルギー)
- $E_\gamma (= \gamma_m \cdot E_{cat})$  : 性能公差を考慮した吸収エネルギー (確率変数) (kNm)
- $E_{\gamma K}$  : 性能公差を考慮した吸収エネルギーの特性値 (kNm)
- $e$  : 船の長軸方向に測った防衛工間隔と垂線間長との比
- $f$  : 摩擦係数
- $f_a$  : 異常接岸係数

- $f_K$  : 摩擦係数の特性値  
 $H$  : 防衝工の高さ (m)  
 $k$  : 2つの防衝工の間において船舶と係船岸が最も近づく点を表すパラメータ ( $0 < k < 1$ , 一般的に  $k=0.5$ 程度), またはワイブル分布の形状母数  
 $L$  : 船長 (m)  
 $L_{pp}$  : 垂線間長 (m)  
 $\ell$  : 船舶の接触点から係留施設の法線に平行に測った当該船舶の重心までの距離 (m)  
 $M_{Ph}$  : 土圧水平モーメント (kNm/m)  
 $M_{PhK}$  : 土圧水平モーメントの特性値 (kNm/m)  
 $M_{Pv}$  : 土圧鉛直モーメント (kNm/m)  
 $M_{PvK}$  : 土圧鉛直モーメントの特性値 (kNm/m)  
 $M_T$  : けん引モーメント (kNm/m)  
 $M_{TK}$  : けん引モーメントの特性値 (kNm/m)  
 $M_W$  : 上部工質量モーメント (kNm/m)  
 $M_{WK}$  : 上部工質量モーメントの特性値 (kNm/m)  
 $n$  : 繰り返し回数  
 $P$  : 係留力の確率  
 $P_f$  : 破壊確率  
 $P_H$  : 土圧水平力 (kN/m)  
 $P_{HK}$  : 土圧水平力の特性値 (kN/m)  
 $P_V$  : 土圧鉛直力 (kN/m)  
 $P_{VK}$  : 土圧鉛直力の特性値 (kN/m)  
 $R$  : 反力 (kN), または抵抗力  
 $R_S$  : パースの最大反力の制限値 (kN)  
 $R_T$  : 温度補正係数  
 $R_{TK}$  : 温度補正係数の特性値  
 $R_V$  : 速度補正係数  
 $R_{VE}$  : 吸収エネルギーに対する速度補正係数  
 $R_{VK}$  : 速度補正係数の特性値  
 $R_{VR}$  : 反力に対する速度補正係数  
 $r$  : 船舶の鉛直軸周りの環動半径 (m)  
 $S$  : 荷重  
 $T$  : 係留力, またはけん引力 (係留索張力) (kN/m)  
 $T_K$  : けん引力 (係留索張力) の特性値 (kN/m)  
 $T_{max}$  : 防衝工の使用環境における最高気温 (°C)  
 $T_{min}$  : 防衝工の使用環境における最低気温 (°C)  
 $U$  : 係留力の基本値  
 $U'$  : 係留力の換算値  
 $U_0$  : 係留力のドリフト量  
 $U'_0$  : 係留力のドリフト量の換算値  
 $U_1$  : 係留力の振幅平均値  
 $U'_1$  : 係留力の振幅平均値の換算値  
 $V$  : 接岸速度 (m/s), または変動係数  
 $V_{E_n}$  : 接岸エネルギーの変動係数  
 $V_{E_y}$  : 性能公差を考慮した吸収エネルギーの変動係数  
 $V_f$  : 摩擦係数の変動係数  
 $V_{M_{Ph}}$  : 土圧水平モーメントの変動係数  
 $V_{M_{Pv}}$  : 土圧鉛直モーメントの変動係数  
 $V_{M_W}$  : 上部工質量モーメントの変動係数  
 $V_{M_T}$  : けん引モーメントの変動係数  
 $V_{P_H}$  : 土圧水平力の変動係数  
 $V_{P_V}$  : 土圧鉛直力の変動係数  
 $V_{R_T}$  : 温度補正係数の変動係数  
 $V_{R_V}$  : 速度補正係数の変動係数  
 $V_S$  : 防衝工のひずみ速度 (%/s)  
 $V_T$  : けん引力 (係留索張力) の変動係数  
 $V_W$  : 上部工質量の変動係数  
 $W$  : 上部工質量 (kN/m)  
 $W_K$  : 上部工質量の特性値 (kN/m)  
 $W_S$  : 船舶の排水量 (t)  
 $Z$  : 性能関数 (例えば,  $Z = R - S$ )  
 $\alpha$  : 防衝工との接触点高さにおける船舶側面の平行舷の長さとの垂線間長の比 (一般的に  $\alpha=1/3 \sim 1/2$ ), または線形化近似係数 (=0.7)  
 $\alpha'$  : 線形化近似係数 (=0.7)  
 $\alpha''$  : 線形化近似係数 (=0.7)  
 $\beta$  : 安全性指標  
 $\gamma$  : 安全係数, または換算パラメータ ( $\gamma = \gamma_1 \times \gamma_2 \times \gamma_3 \times \gamma_4 \times \gamma_5$ )  
 $\gamma_1$  : 船舶信頼度の換算パラメータ  
 $\gamma_2$  : 波高の換算パラメータ  
 $\gamma_3$  : 波周期の換算パラメータ  
 $\gamma_4$  : 風速の換算パラメータ  
 $\gamma_5$  : 風向の換算パラメータ  
 $\gamma_{E_n}$  : 接岸エネルギーに対する安全係数  
 $\gamma_{E_y}$  : 性能公差を考慮した吸収エネルギーに対する安全係数  
 $\gamma_f$  : 摩擦係数に対する安全係数  
 $\gamma_{M_{Ph}}$  : 土圧水平モーメントに対する安全係数  
 $\gamma_{M_{Pv}}$  : 土圧鉛直モーメントに対する安全係数  
 $\gamma_{M_T}$  : けん引モーメントに対する安全係数  
 $\gamma_{M_W}$  : 上部工質量モーメントに対する安全係数  
 $\gamma_m$  : 品質による吸収エネルギーのばらつきを考慮する係数 (現行設計法では, 通常  $\gamma_m=0.9$ )  
 $\gamma_{P_H}$  : 土圧水平力に対する安全係数  
 $\gamma_{P_V}$  : 土圧鉛直力に対する安全係数  
 $\gamma_{R_T}$  : 温度補正係数に対する安全係数  
 $\gamma_{R_V}$  : 速度補正係数に対する安全係数

$\gamma_S$  : 安全係数 (荷重係数)  
 $\gamma_T$  : けん引力 (係留索張力) に対する安全係数  
 $\gamma_W$  : 上部工質量に対する安全係数  
 $\theta$  : 接岸角度 (°)  
 $\mu$  : 平均値  
 $\mu_{E_n}$  : 接岸エネルギーの平均値 (kNm)  
 $\mu_{E_v}$  : 性能公差を考慮した吸収エネルギーの平均値 (kNm)  
 $\mu_f$  : 摩擦係数の平均値  
 $\mu_{M_{PH}}$  : 土圧水平モーメントの平均値 (kNm/m)  
 $\mu_{M_{PV}}$  : 土圧鉛直モーメントの平均値 (kNm/m)  
 $\mu_{M_W}$  : 上部工質量モーメントの平均値 (kNm/m)  
 $\mu_{M_T}$  : けん引モーメントの平均値 (kNm/m)  
 $\mu_{PH}$  : 土圧水平力の平均値 (kN/m)  
 $\mu_{PV}$  : 土圧鉛直力の平均値 (kN/m)  
 $\mu_{R_T}$  : 温度補正係数の平均値  
 $\mu_{R_v}$  : 速度補正係数の平均値  
 $\mu_T$  : けん引力 (係留索張力) の平均値 (kN/m)  
 $\mu_W$  : 上部工質量の平均値 (kN/m)  
 $\pi$  : 円周率  
 $\rho$  : 海水の単位体積質量 (=1.03) (t/m<sup>3</sup>)  
 $\Phi^{-1}$  : 標準正規分布関数の逆関数  
 $\phi$  : 係留索の直径

付録A 防衛工の簡易選定システム

1. システムの構成

防衛工の簡易選定システムは、選定条件入力部、演算処理部、データベース部、選定結果表示部から構成される。システムの構成および防衛工選定の流れを図-A.1に示す。

図-A.1に基づいて、各部の機能について以下に説明する。

(1) 選定条件入力部

防衛工の選定条件として、以下の入力項目を適切に設定する。

○船舶条件

- ・ 船型
- ・ 重量トン数
- ・ 接岸速度
- ・ 防衛工の接触点高さにおける船舶の平行サイドの長さ  
と垂線間長との比

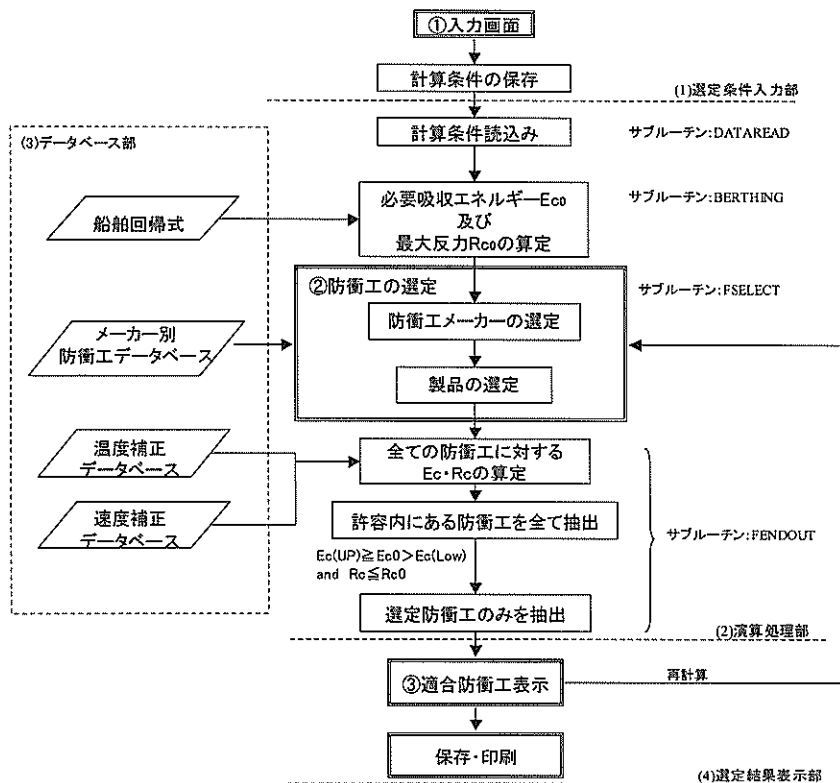
○構造条件

- ・ 防衛工の設置間隔
- ・ 使用環境温度（上限温度，下限温度）

・ 荷重係数（接岸エネルギー）

(2) 演算処理部

演算処理部では、選定条件入力部で入力された値を基に、防衛工の必要吸収エネルギー  $E_{c0}$  を算定する。このとき、船舶諸元は、船舶回帰式データベースを用いて設定される。そして、任意に選択した防衛工に対して、吸収エネルギーのカタログ値  $E_{cat}$  から防衛工が許容可能な吸収エネルギーの範囲を算定する。ただし、防衛工の反力については、バースに対する反力の最大値の設定ができない場合を考慮して、本システムでは反力を用いた防衛工の適合判定は行わない。したがって、防衛工の性能公差に適切な範囲（デフォルト値は-10～-20%）を設定することにより、防衛工の吸収エネルギーの算定値のみを用いて防衛工の適合判定を行う。ただし、杭式栈橋では、反力の規制値が必要となることがあるので、この場合には別途の検討が必要になる。なお、防衛工の種類によっては、単位長さ当たりの吸収エネルギーや反力が規定値としてカタログに掲載されているものもある。防衛工の長さの上限値は製品の種類によって異なるため、便宜上1.0mから0.5m間隔で3.5mまで製品があるものとして、防衛工の吸収エネルギーおよび反力の算定を実行する。



※①～③表示画面を示す

図-A.1 システムの構成（防衛工選定の流れ）と表示画面

(3) データベース部

1) 概説

防衛工の簡易選定システムでは、船舶諸元に関する回帰式のデータベースと主要な防衛工メーカーのカタログにおける防衛工の性能特性を数値化したデータベースを用いる。各データベースの特徴を以下に示す。

2) 船舶回帰式データベース

本システムで使用する船舶諸元は、船型（船種および船舶信頼度）および重量トン数から一義的に決めている。これは、赤倉ら（1998）により取りまとめられた船舶回帰式の係数表をデータベース化したものである。船舶回帰係数の一覧を表-A.1に示す。

表-A.1 船舶回帰係数の一覧

| 船種              | 諸元              | N of data       | $\alpha$ | $\beta$ | $\gamma$ | $\delta$ | $\epsilon$ |        |
|-----------------|-----------------|-----------------|----------|---------|----------|----------|------------|--------|
| 貨物船             | 1万DWT以上         | L               | 3,078    | 0.272   | 0.973    | 1.035    | 0.273      |        |
|                 |                 | B*              | 2,089    | 0.296   | 0.971    | 0.097    | 0.295      |        |
|                 |                 | d               | 3,124    | 0.267   | 0.972    | -0.172   | 0.267      |        |
|                 |                 | D <sub>sp</sub> | 1,200    | 0.316   | 0.913    | 0.494    | 0.313      |        |
|                 |                 | L <sub>sp</sub> | 3,125    | 0.285   | 0.977    | 0.950    | 0.285      |        |
|                 |                 | L               | 4,552    | 0.300   | 0.927    | 0.900    | 0.300      |        |
|                 | 1万DWT未満         | B               | 2,299    | 0.268   | 0.929    | 0.209    | 0.268      |        |
|                 |                 | d               | 4,867    | 0.314   | 0.931    | -0.381   | 0.314      |        |
|                 |                 | D <sub>sp</sub> | 1,109    | 0.359   | 0.850    | 0.522    | 0.359      |        |
|                 |                 | L <sub>sp</sub> | 4,842    | 0.310   | 0.901    | 0.823    | 0.310      |        |
|                 |                 | コンテナ船           | L        | 1,089   | 0.342    | 0.988    | 0.549      | 0.342  |
|                 |                 |                 | B*       | 742     | 0.272    | 0.854    | 0.246      | 0.272  |
| d               | 1,099           |                 | 0.474    | 0.303   | -0.324   | 0.463    |            |        |
| D <sub>sp</sub> | 602             |                 | 0.553    | 0.991   | 0.343    | 0.553    |            |        |
| L <sub>sp</sub> | 1,111           |                 | 0.401    | 0.907   | 0.491    | 0.401    |            |        |
| タンカー            | L               |                 | 2,299    | 0.315   | 0.994    | 0.822    | 0.315      |        |
|                 | B*              | 1,298           | 0.310    | 0.991   | 0.057    | 0.310    |            |        |
|                 | d               | 2,470           | 0.516    | 0.291   | -0.293   | 0.291    |            |        |
|                 | D <sub>sp</sub> | 963             | 0.356    | 0.999   | 0.294    | 0.356    |            |        |
|                 | L <sub>sp</sub> | 2,539           | 0.322    | 0.933   | 0.768    | 0.322    |            |        |
|                 | ロールオン・ロールオフ船    | L               | 50       | 0.332   | 0.956    | 0.897    | 0.332      |        |
| B               |                 | 2,486           | 0.242    | 0.936   | 0.413    | 0.242    |            |        |
| d               |                 | 50              | 0.326    | 0.290   | -0.277   | 0.290    |            |        |
| D <sub>sp</sub> |                 | 9               | 0.445    | 0.909   | 0.984    | 0.445    |            |        |
| L <sub>sp</sub> |                 | 49              | 0.373    | 0.349   | 0.982    | 0.349    |            |        |
| 自動車専用船          |                 | L               | 87       | 0.288   | 0.966    | 1.103    | 0.288      |        |
|                 | B*              | 86              | 0.230    | 0.261   | 0.348    | 0.261    |            |        |
|                 | d               | 87              | 0.859    | 0.233   | -0.058   | 0.233    |            |        |
|                 | D <sub>sp</sub> | 39              | 0.588    | 0.193   | 1.872    | 0.588    |            |        |
|                 | L <sub>sp</sub> | 87              | 0.280    | 0.968   | 1.025    | 0.280    |            |        |
|                 | 旅客船（日本）         | L               | 274      | 0.323   | 0.354    | 0.710    | 0.323      |        |
| B               |                 | 274             | 0.247    | 0.594   | 0.928    | 0.247    |            |        |
| d**             |                 | 268             | 0.378    | 0.285   | -0.422   | 0.285    |            |        |
| D <sub>sp</sub> |                 | 18              | 0.904    | 0.981   | -0.044   | 0.981    |            |        |
| L <sub>sp</sub> |                 | 265             | 0.331    | 0.359   | 0.637    | 0.331    |            |        |
| 旅客船（世界）         |                 | L               | 210      | 0.346   | 0.850    | 0.738    | 0.346      |        |
|                 | B               | 179             | 0.250    | 0.980   | -0.602   | 0.250    |            |        |
|                 | d***            | 211             | 0.328    | 0.395   | -0.403   | 0.395    |            |        |
|                 | D <sub>sp</sub> | 48              | 0.891    | 0.929   | -0.050   | 0.929    |            |        |
|                 | L <sub>sp</sub> | 220             | 0.385    | 0.320   | 0.575    | 0.320    |            |        |
|                 | フェリー            | 長距離***          | L        | 37      | -        | 0.918    | 0.008      | 99.373 |
| B               |                 |                 | 37       | -       | 0.851    | 0.001    | 37.343     |        |
| d               |                 |                 | 35       | -       | 0.861    | 0.000    | 3.622      |        |
| D <sub>sp</sub> |                 |                 | 50       | 0.683   | 0.916    | 1.350    | 0.683      |        |
| L <sub>sp</sub> |                 |                 | 34       | -       | 0.933    | 0.006    | 54.620     |        |
| 中短距離****        |                 |                 | L        | 291     | 0.395    | 0.943    | 0.633      | 0.395  |
|                 |                 | B               | 291      | 0.241   | 0.927    | 0.413    | 0.241      |        |
|                 |                 | d               | 287      | 0.702   | 0.226    | -0.154   | 0.226      |        |
|                 |                 | D <sub>sp</sub> | 77       | 0.904   | 0.873    | 0.438    | 0.904      |        |
|                 |                 | L <sub>sp</sub> | 245      | 0.401   | 0.957    | 0.579    | 0.401      |        |

\*) Panamaxを設定（5.1を参照）  
 \*\*) 喫水限界を設定（5.2を参照）  
 \*\*\*) D<sub>sp</sub>を除く全諸元の限界を設定すると共に直線回帰：y=ax+b（5.3を参照）  
 \*\*\*\*) D<sub>sp</sub>を除く全諸元の限界を設定（5.3を参照）  
 注) N of dataは回帰分析を行った隻数であり、限界値を設定し分析から除いたデータ数は含まれていない

3) 防衛工データベース

本システムで使用する防衛工の諸元に関するデータベースは、製品名データベース、定反力型防衛工データベース、反力漸増型防衛工データベースの3種類のサブデータベースから構成される。各サブデータベースの内容について以下に示す。

① 製品名データベース

主要な防衛工メーカーの会社名および製品名にローマ字コードを割り当て、データベース化したものである。データベースの内容を図-A.2に示す。

| 番号 | 会社名  | 防衛材種類                 | 入力コード |
|----|------|-----------------------|-------|
| 1  | 住友ゴム | セル型                   | BSC   |
| 2  | 住友ゴム | スーパーセル型               | BSSUC |
| 3  | 住友ゴム | スーパーM型                | BSSM  |
| 4  | 住友ゴム | ダイナアーチ型(A TYPE)       | BSDAA |
| 5  | 住友ゴム | ダイナアーチ型(B TYPE, 受衝板付) | BSDAB |
| 6  | 住友ゴム | スーパーアーチ型              | BSSA  |
| 7  | 住友ゴム | エアブロックフェンダー           | YOABF |
| 8  | 住友ゴム | エアブロックフェンダー(受衝板付)     | YOABP |
| 9  | 住友ゴム | 空気式防衛材                | YOAF  |
| 10 | 住友ゴム | ゴムブロックフェンダー           | YORBF |
| 11 | 住友ゴム | V型防衛材                 | YOHV  |
| 12 | 住友ゴム | ハマボックス型防衛材            | YOHB  |
| 13 | 住友ゴム | V型                    | SEV   |
| 14 | 住友ゴム | H型                    | SEH   |
| 15 | 住友ゴム | ユニットII型               | SEU2  |
| 16 | 住友ゴム | TTV-A型                | SETVA |
| 17 | 住友ゴム | TTV-B型                | SETVB |
| 18 | 住友ゴム | TTV-C型                | SETVC |
| 19 | 住友ゴム | NW型                   | SENV  |
| 20 | 住友ゴム | V型(ハイパーエース)           | SUV   |
| 21 | 住友ゴム | α型(Hα型)               | SUPAI |
| 22 | 住友ゴム | Λ型                    | SULMD |
| 23 | 住友ゴム | κ型                    | SUKAP |
| 24 | 住友ゴム | 空気型                   | SUAIR |
| 25 | 住友ゴム | 日型                    | SUBET |
| 26 | 住友ゴム | 空気型(PA型)              | SIAPA |
| 27 | 住友ゴム | 空気型(PS型)              | SIAPS |
| 28 | 住友ゴム | サークル型(OA型)            | SICA  |
| 29 | 住友ゴム | サークル型(OH型)            | SICH  |
| 30 | 住友ゴム | サークル型(OP型)            | SICE  |
| 31 | 住友ゴム | サークル型(OQ型)            | SICP  |
| 32 | 住友ゴム | サークル型(OS型)            | SICG  |
| 33 | 住友ゴム | S V型                  | SISV  |
| 34 | 住友ゴム | S H型                  | SISH  |
| 35 | 住友ゴム | 円筒型                   | SICYC |
| 36 | 住友ゴム | V型                    | MEV   |
| 37 | 住友ゴム | 六角型                   | MEHX  |
| 38 | 住友ゴム | 角型                    | MEREC |
| 39 | 住友ゴム | D型                    | MED   |
| 40 | 住友ゴム | 丸型                    | MEGYC |
| 41 | 住友ゴム |                       |       |

図-A.2 製品名データベース

② 定反力型防衛工データベース

定反力型防衛工の形状諸元、材質のグレードおよび反力特性をデータベース化したものである。データベースの内容を図-A.3に示す。また、データベース内に登録されている項目を以下に示す。

1行目：防衛工コード

特性種別（1：定反力型，2：反力漸増型）

高さ（mm）

長さ（mm）

グレード

特性種別（1：単体，2：1m当たり）

吸収エネルギー

2行目：ばね特性値

（ばね定数およびばね定数の変化点での変位量）

|        |       |        |        |   |        |        |        |
|--------|-------|--------|--------|---|--------|--------|--------|
| MEHX   | 1     | 600    | 1000S  | 2 | 7.540  |        |        |
| 333.30 | 6.10  | 246.70 | 333.30 | 2 | 107.40 | 0.0880 | 0.2780 |
| MEHX   | 1     | 800    | 1000S  | 2 | 13.009 |        |        |
| 340.00 | 6.32  | 81.25  | 340.00 | 2 | 106.70 | 0.1170 | 0.3840 |
| MEHX   | 1     | 1000   | 1000S  | 2 | 20.130 |        |        |
| 344.00 | 6.30  | 120.00 | 344.00 | 2 | 103.40 | 0.1480 | 0.4800 |
| MEV    | 1     | 150    | 1000L  | 2 | 0.341  |        |        |
| 266.70 | 55.30 | 358.70 | 266.70 | 2 | 97.80  | 0.0220 | 0.0680 |
| MEV    | 1     | 200    | 1000L  | 2 | 0.619  |        |        |
| 234.00 | 17.50 | 267.00 | 234.00 | 2 | 100.30 | 0.0350 | 0.0900 |
| MEV    | 1     | 250    | 1000L  | 2 | 0.951  |        |        |
| 223.60 | 19.50 | 234.40 | 223.60 | 2 | 99.40  | 0.0480 | 0.1130 |
| MEV    | 1     | 300    | 1000L  | 2 | 1.327  |        |        |
| 232.70 | 13.00 | 272.00 | 232.70 | 2 | 98.60  | 0.0560 | 0.1350 |
| MEV*   | 1     | 400    | 1000L  | 2 | 2.467  |        |        |
| 240.00 | 14.75 | 275.50 | 240.00 | 2 | 98.20  | 0.0720 | 0.1800 |
| MEV    | 1     | 500    | 1000L  | 2 | 4.019  |        |        |
| 238.00 | 7.50  | 288.00 | 238.00 | 2 | 104.60 | 0.0930 | 0.2250 |
| MEV    | 1     | 600    | 1000L  | 2 | 5.627  |        |        |

図-A.3 定反力型防衛工データベース

### ③ 反力漸増型防衛工データベース

反力漸増型防衛工の形状諸元、材質のグレードおよび反力特性をデータベース化したものである。データベースの内容を図-A.4に示す。また、データベース内に登録されている項目を以下に示す。反力漸増型防衛工データベースでは、ばね特性値のデータ形式が定反力型防衛工データベースの場合と異なる。

1行目：防衛工コード

特性種別（1：定反力型，2：反力漸増型）

高さ（mm）

長さ（mm）

グレード

特性種別（1：単体，2：1m当たり）

吸収エネルギー

2行目：ばね特性値（変形量）

3行目：ばね特性値（反力）

|        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| MED    | 2      | 127    | 1000S  | 2      | 0.287  |        |        |        |
| 8      | 0.0000 | 0.0100 | 0.0200 | 0.0300 | 0.0400 | 0.0500 | 0.0600 | 0.0700 |
| 0.00   | 1.70   | 3.50   | 5.10   | 7.71   | 10.25  | 16.50  | 39.10  |        |
| MEV    | 2      | 152    | 1000S  | 2      | 0.361  |        |        |        |
| 10     | 0.0000 | 0.0100 | 0.0200 | 0.0300 | 0.0400 | 0.0500 | 0.0600 | 0.0700 |
| 0.00   | 1.70   | 3.50   | 5.10   | 6.30   | 8.00   | 11.30  | 18.10  |        |
| 0.0800 | 0.0900 |        |        |        |        |        |        |        |
| 33.70  | 72.80  |        |        |        |        |        |        |        |
| MEV    | 2      | 203    | 1000S  | 2      | 0.616  |        |        |        |
| 12     | 0.0000 | 0.0100 | 0.0200 | 0.0300 | 0.0400 | 0.0500 | 0.0600 | 0.0700 |
| 0.00   | 1.70   | 3.50   | 5.10   | 6.30   | 7.80   | 9.56   | 11.84  |        |
| 0.0800 | 0.0900 | 0.1000 | 0.1100 |        |        |        |        |        |
| 14.90  | 21.50  | 33.50  | 55.10  |        |        |        |        |        |
| MEV    | 2      | 508    | 1000S  | 2      | 3.658  |        |        |        |
| 16     | 0.0000 | 0.0200 | 0.0400 | 0.0600 | 0.0800 | 0.1000 | 0.1200 | 0.1400 |
| 0.00   | 3.50   | 7.00   | 10.53  | 13.10  | 17.06  | 19.70  | 23.90  |        |
| 0.1600 | 0.1800 | 0.2000 | 0.2200 | 0.2400 | 0.2600 | 0.2800 | 0.3000 |        |
| 26.50  | 31.00  | 38.00  | 54.65  | 76.00  | 116.70 | 170.00 | 185.00 |        |
| MEV    | 2      | 381    | 1000S  | 2      | 2.341  |        |        |        |
| 11     | 0.0000 | 0.0200 | 0.0400 | 0.0600 | 0.0800 | 0.1000 | 0.1200 | 0.1400 |
| 0.00   | 3.50   | 7.00   | 10.91  | 14.50  | 18.41  | 21.99  | 26.20  |        |

図-A.4 反力漸増型防衛工データベース

### 4) 温度補正係数データベース・速度補正係数

データベース

防衛工の温度補正係数特性および速度補正係数特性は、防衛工の形状、ゴムの材質などにより異なると考えられ

る。しかしながら、これらの補正係数のデータが十分取得されていない現状では、完全なデータベースを構築することは困難である。そこで、本システムでは、図-A.5に示す温度補正係数の特性曲線、および図-A.6に示す速度補正係数の特性曲線を代表させてデータベース化している。

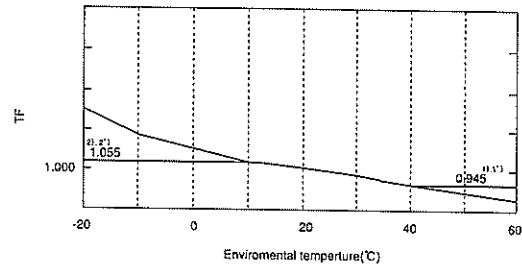


図-A.5 温度補正係数の特性例

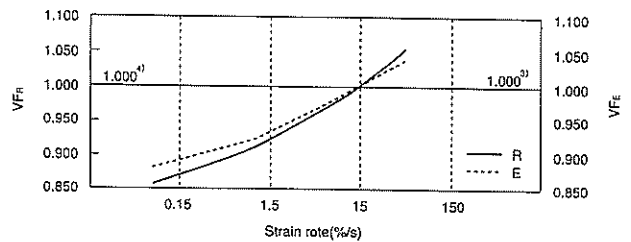


図-A.6 速度補正係数の特性例

### (4) 選定結果表示部

演算処理部における防衛工の選定結果を画面に出力する。出力項目を以下に示す。

- ・防衛工の製品名および材質（グレード）
- ・防衛工の諸元（長さ、高さなど）
- ・吸収エネルギーの算定値
- ・防衛工の種別（定反力型，反力漸増型）

## 2. システムの使用方法

防衛工の簡易選定システムは、パーソナルコンピュータ上で用いるソフトウェアであり、Windows型のコンピュータにインストールして使用する。

### 2.1 使用機器

本システムは、ハードウェアとしてパーソナルコンピュータおよびプリンタを必要とする。本システムの使用機器の構成を図-A.7に示す。

#### ① パーソナルコンピュータ

OS：Windows95/98/Me，WindowsNT4.0/2000/XP



対応機種：OSが正常に作動する機種（Pentium以上）

ハードディスク容量：10MB以上の空き容量

② プリンタ

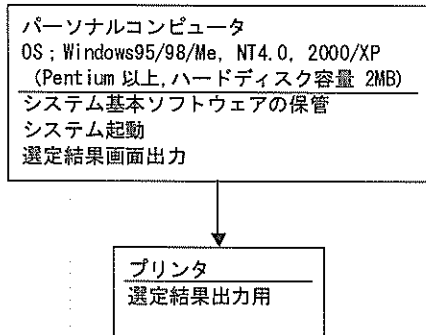


図-A.7 システムの機器構成

2.2 ディレクトリ構成

本システムを構成するディレクトリのツリー図を図-A.8に示す。

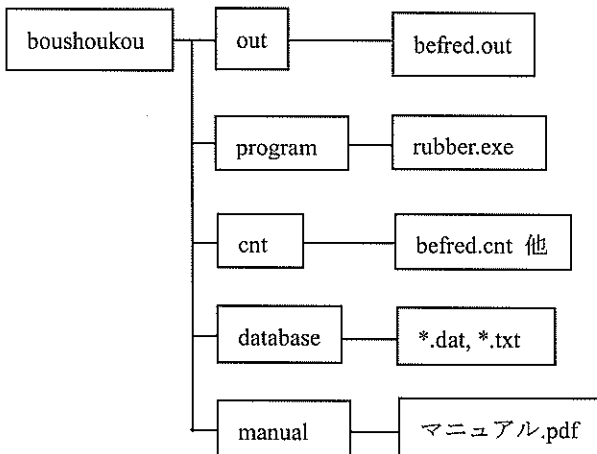


図-A.8 システムのディレクトリ構成

2.3 システムの操作手順

システムの手順を図-A.9に示す。

具体的な操作方法および各項目の説明を以下に示す。

(1) システムの起動

防衛工の簡易選定システムを起動する。

(2) 計算ケースの選定

既存の計算ケースファイルを選定する。また、新規に計算を行う場合は、既存の計算ケースファイルをコピーする。計算ケースの選定画面を図-A.10に示す。

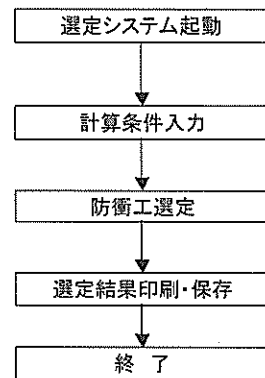


図-A.9 操作手順



図-A.10 計算ケースの選定画面

(3) 計算条件の入力

船舶の接岸エネルギーの算定に必要な計算条件を入力する。計算条件の入力画面を図-A.11に示す。

1) 計算ケース名

計算条件を変更する場合は、計算ケース名を入力する。

2) リセット（詳細設定を含む）

編集した計算条件をリセットし、計算ケースを呼び出した初期の状態に復帰させる。

3) 船舶条件の設定

船舶条件を以下の項目について入力する。

① 船型

プルダウンメニューから対象船舶名を選択する。

② 載貨重量トン数

対象船舶の重量トンを入力する。（単位：t）



図-A.11 計算条件の入力画面

③ 接岸速度

接岸速度を入力する。(単位: m/s)

④ 接岸角度

接岸角度を入力する。(単位: °)

4) 構造条件

① 防衛工間隔

対象バースの防衛工の間隔を入力する。(単位: m)

② 使用環境温度

気温の上限値および下限値を入力する。(単位: °C)

③ 荷重係数

荷重係数を考慮する場合は、適切な数値を入力する。荷重係数を考慮しない場合は、デフォルト値として1.0とする。

5) 詳細設定

システムにおいて、デフォルト値を指定しているパラメータを任意に設定する場合に使用する。通常は変更する必要はない。計算条件の入力詳細画面を図-A.12に示す。

① 船舶信頼度

船舶回帰式を用いて船舶諸元を計算する際の信頼度を入力する。(デフォルト値: 75%)

② バース最大反力の制限

バースに対する反力の最大値の設定ができない場合を考慮して、本システムでは反力を用いた防衛工の適合判定は行わない。したがって、ダミーデータである。(デフォルト値: 100kN)

③ 船舶と係船岸が最も近づく点を表すパラメータ

2つの防衛工間において、船舶と係船岸が最も近づく点を表すパラメータであり、 $0 < k < 1$ の値をとる。(デフォルト値: 0.5)

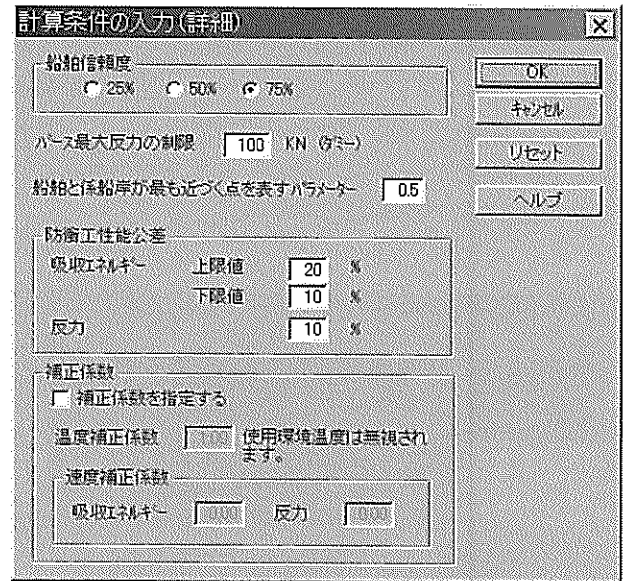


図-A.12 計算条件の入力詳細画面

④ 防衛工の性能公差

本システムでは、反力の最大値を設定しないため、防衛工の吸収エネルギーの上限値を設定することにより、防衛工の適合判定を行う。したがって、防衛工の性能公差の範囲を上限値および下限値として設定する。(デフォルト値: 上限値 -20%, 下限値 -10%) また、反力に対する防衛工の性能公差は、ダミーデータである。(デフォルト値: +10%)

⑤ 補正係数の指定

温度補正係数および速度補正係数に任意の数値を入力する。このとき、計算においては入力した補正係数が使用され、温度補正係数データベースおよび速度補正係数データベースの特性値は無視される。

⑥ リセット

編集した計算条件をリセットし、入力詳細画面を開いた初期の状態に復帰させる。

6) <<戻る

計算ケースの選定画面に戻る。

7) ヘルプ

ヘルプを表示する。

8) キャンセル (終了)

編集した計算条件をキャンセルし、システムを終了する。

9) 次へ>>

計算条件を確定して、防衛工の選定画面に移動する。

(4) 防衝工の選定

計算対象とする防衝工を一覧から選択する。本システムでは、画面に表示される防衝工メーカー名および製品名を任意に選択できる。選択した防衝工に対して、計算条件を満足する防衝工が適合製品一覧に表示される。防衝工の選定画面を図-A. 13に示す。

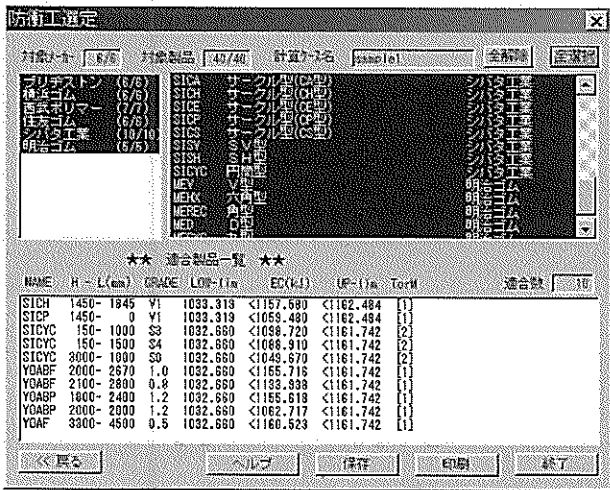


図-A. 13 防衝工の選定画面

1) 全解除

防衝工の選択をすべて解除する。

2) 全選択

すべての防衝工を選択する。

3) <<戻る

計算ケースの選定画面に戻る。

4) 保存

防衝工の選定結果をテキストファイルに保存する。

5) 印刷

防衝工の選定結果をプリンタに出力する。

6) 終了

システムを終了する。

2.4 防衝工の選定例

(1) 計算条件

設定した計算条件を以下に示す。

1) 船舶条件

船種：コンテナ船

載貨重量トン数：50,000DWT

接岸速度：0.10m/s

接岸角度：5°

2) 構造条件

防衝工間隔：20m

使用環境温度：10°C～40°C

荷重係数：1.0

(2) 防衝工の選定結果

防衝工の選定結果を図-A. 14に示す。

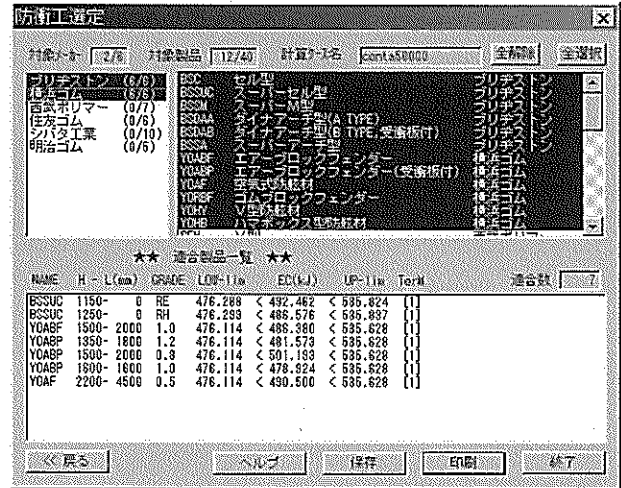


図-A. 14 防衝工の選定結果の表示例







表-B.2 追加計算ケース一覧表

※AXI:水面上正投影面積(空載条件), AYI:水面上側面投影面積(空載条件)

| ケース | 番号 | 記号       | 船種    | 船型条件       |          |         |         |         |          |           |           |                       |                       | 外力条件      |           |           |             | 備考 |           |
|-----|----|----------|-------|------------|----------|---------|---------|---------|----------|-----------|-----------|-----------------------|-----------------------|-----------|-----------|-----------|-------------|----|-----------|
|     |    |          |       | 総質量<br>DWT | 信頼度<br>s | 船長<br>m | 船幅<br>m | 型幅<br>m | 型深さ<br>m | 満載喫水<br>m | 空載喫水<br>m | AXI<br>m <sup>2</sup> | AYI<br>m <sup>2</sup> | 波向<br>(°) | 波高<br>(m) | 周期<br>(s) | 風速<br>(m/s) |    | 風向<br>(°) |
| F4  | 1  | F4-12-1  | コンテナ船 | 50000      | 50.0     | 251.4   | 237.3   | 32.3    | 20.3     | 12.8      | 8.1       | 1110.9                | 4654.3                | 45        | 0.50      | 10.0      | 5.0         | 60 |           |
|     | 2  | F4-12-2  | コンテナ船 | 50000      | 50.0     | 251.4   | 237.3   | 32.3    | 20.3     | 12.8      | 8.1       | 1110.9                | 4654.3                | 45        | 0.50      | 10.0      | 10.0        | 60 |           |
|     | 3  | F4-12-3  | コンテナ船 | 50000      | 50.0     | 251.4   | 237.3   | 32.3    | 20.3     | 12.5      | 8.1       | 1110.9                | 4654.3                | 45        | 0.50      | 10.0      | 15.0        | 60 |           |
|     | 4  | F4-12-4  | コンテナ船 | 50000      | 50.0     | 251.4   | 237.3   | 32.3    | 20.3     | 12.5      | 8.1       | 1110.9                | 4654.3                | 45        | 0.25      | 10.0      | 5.0         | 60 |           |
|     | 5  | F4-12-5  | コンテナ船 | 50000      | 50.0     | 251.4   | 237.3   | 32.3    | 20.3     | 12.8      | 8.1       | 1110.9                | 4654.3                | 45        | 0.25      | 10.0      | 10.0        | 60 |           |
|     | 6  | F4-12-6  | コンテナ船 | 50000      | 50.0     | 251.4   | 237.3   | 32.3    | 20.3     | 12.8      | 8.1       | 1110.9                | 4654.3                | 45        | 0.25      | 10.0      | 15.0        | 60 |           |
|     | 7  | F4-12-7  | コンテナ船 | 50000      | 75.0     | 255.5   | 251.3   | 32.3    | 21.4     | 13.1      | 8.4       | 1248.2                | 5449.2                | 45        | 0.50      | 10.0      | 5.0         | 60 |           |
|     | 8  | F4-12-8  | コンテナ船 | 50000      | 75.0     | 255.5   | 251.3   | 32.3    | 21.4     | 13.1      | 8.4       | 1248.2                | 5449.2                | 45        | 0.50      | 10.0      | 10.0        | 60 |           |
|     | 9  | F4-12-9  | コンテナ船 | 50000      | 75.0     | 255.5   | 251.3   | 32.3    | 21.4     | 13.1      | 8.4       | 1248.2                | 5449.2                | 45        | 0.50      | 10.0      | 15.0        | 60 |           |
|     | 10 | F4-12-10 | コンテナ船 | 50000      | 75.0     | 255.5   | 251.3   | 32.3    | 21.4     | 13.1      | 8.4       | 1248.2                | 5449.2                | 45        | 0.25      | 10.0      | 5.0         | 60 |           |
|     | 11 | F4-12-11 | コンテナ船 | 50000      | 75.0     | 255.5   | 251.3   | 32.3    | 21.4     | 13.1      | 8.4       | 1248.2                | 5449.2                | 45        | 0.25      | 10.0      | 10.0        | 60 |           |
|     | 12 | F4-12-12 | コンテナ船 | 50000      | 75.0     | 255.5   | 251.3   | 32.3    | 21.4     | 13.1      | 8.4       | 1248.2                | 5449.2                | 45        | 0.25      | 10.0      | 15.0        | 60 |           |
| F5  | 1  | F5-12-1  | 貨物船   | 40000      | 50.0     | 193.5   | 182.6   | 28.8    | 15.7     | 11.4      | 6.1       | 849.7                 | 3354.0                | 45        | 0.50      | 10.0      | 5.0         | 60 |           |
|     | 2  | F5-12-2  | 貨物船   | 40000      | 50.0     | 193.5   | 182.6   | 28.8    | 15.7     | 11.4      | 6.1       | 849.7                 | 3354.0                | 45        | 0.50      | 10.0      | 10.0        | 60 |           |
|     | 3  | F5-12-3  | 貨物船   | 40000      | 50.0     | 193.5   | 182.6   | 28.8    | 15.7     | 11.4      | 6.1       | 849.7                 | 3354.0                | 45        | 0.50      | 10.0      | 15.0        | 60 |           |
|     | 4  | F5-12-4  | 貨物船   | 40000      | 50.0     | 193.5   | 182.6   | 28.8    | 15.7     | 11.4      | 6.1       | 849.7                 | 3354.0                | 45        | 0.25      | 10.0      | 5.0         | 60 |           |
|     | 5  | F5-12-5  | 貨物船   | 40000      | 50.0     | 193.5   | 182.6   | 28.8    | 15.7     | 11.4      | 6.1       | 849.7                 | 3354.0                | 45        | 0.25      | 10.0      | 10.0        | 60 |           |
|     | 6  | F5-12-6  | 貨物船   | 40000      | 50.0     | 193.5   | 182.6   | 28.8    | 15.7     | 11.4      | 6.1       | 849.7                 | 3354.0                | 45        | 0.25      | 10.0      | 15.0        | 60 |           |
|     | 7  | F5-12-7  | 貨物船   | 40000      | 75.0     | 200.3   | 189.0   | 29.9    | 17.7     | 11.8      | 6.4       | 899.2                 | 3921.3                | 45        | 0.50      | 8.0       | 10.0        | 60 |           |
|     | 8  | F5-12-8  | 貨物船   | 40000      | 75.0     | 200.3   | 189.0   | 29.9    | 17.7     | 11.8      | 6.4       | 899.2                 | 3921.3                | 45        | 0.50      | 10.0      | 10.0        | 60 |           |
|     | 9  | F5-12-9  | 貨物船   | 40000      | 75.0     | 200.3   | 189.0   | 29.9    | 17.7     | 11.8      | 6.4       | 899.2                 | 3921.3                | 45        | 0.50      | 12.0      | 10.0        | 60 |           |
|     | 10 | F5-12-10 | 貨物船   | 40000      | 75.0     | 200.3   | 189.0   | 29.9    | 17.7     | 11.8      | 6.4       | 899.2                 | 3921.3                | 45        | 0.25      | 8.0       | 10.0        | 60 |           |
|     | 11 | F5-12-11 | 貨物船   | 40000      | 75.0     | 200.3   | 189.0   | 29.9    | 17.7     | 11.8      | 6.4       | 899.2                 | 3921.3                | 45        | 0.25      | 10.0      | 10.0        | 60 |           |
|     | 12 | F5-12-12 | 貨物船   | 40000      | 75.0     | 200.3   | 189.0   | 29.9    | 17.7     | 11.8      | 6.4       | 899.2                 | 3921.3                | 45        | 0.25      | 12.0      | 10.0        | 60 |           |

付録C コンテナ船の動揺量および係留力の傾向

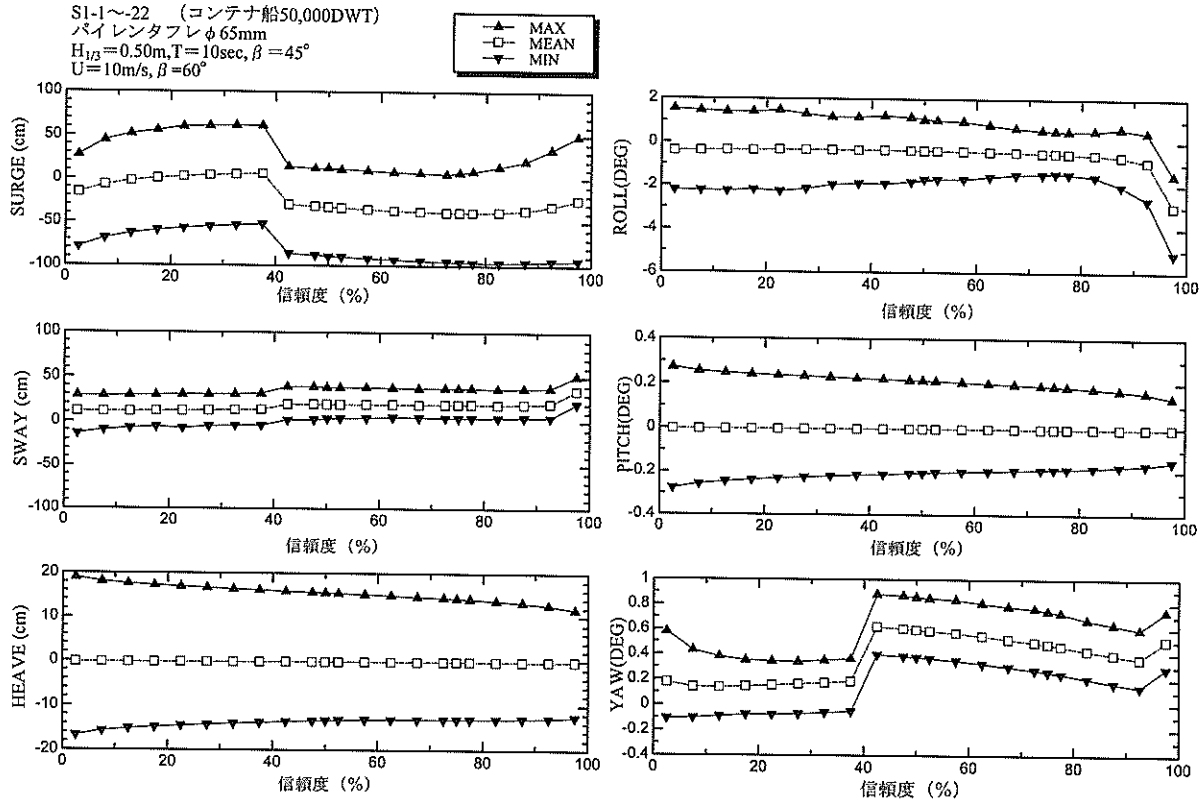


図-C.1(1) 船舶信頼度に対するコンテナ船の動揺量 (パイレントフレ) 風向60°

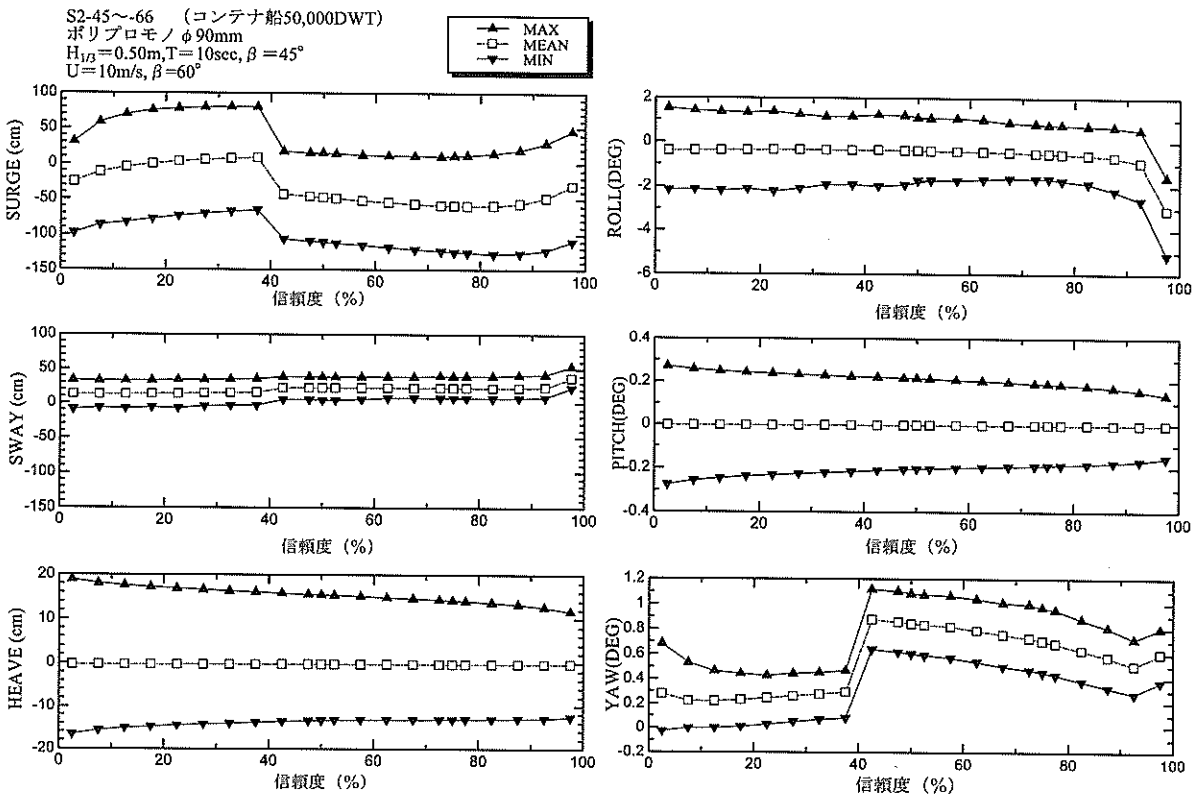


図-C.1(2) 船舶信頼度に対するコンテナ船の動揺量 (ポリプロモノ) 風向60°



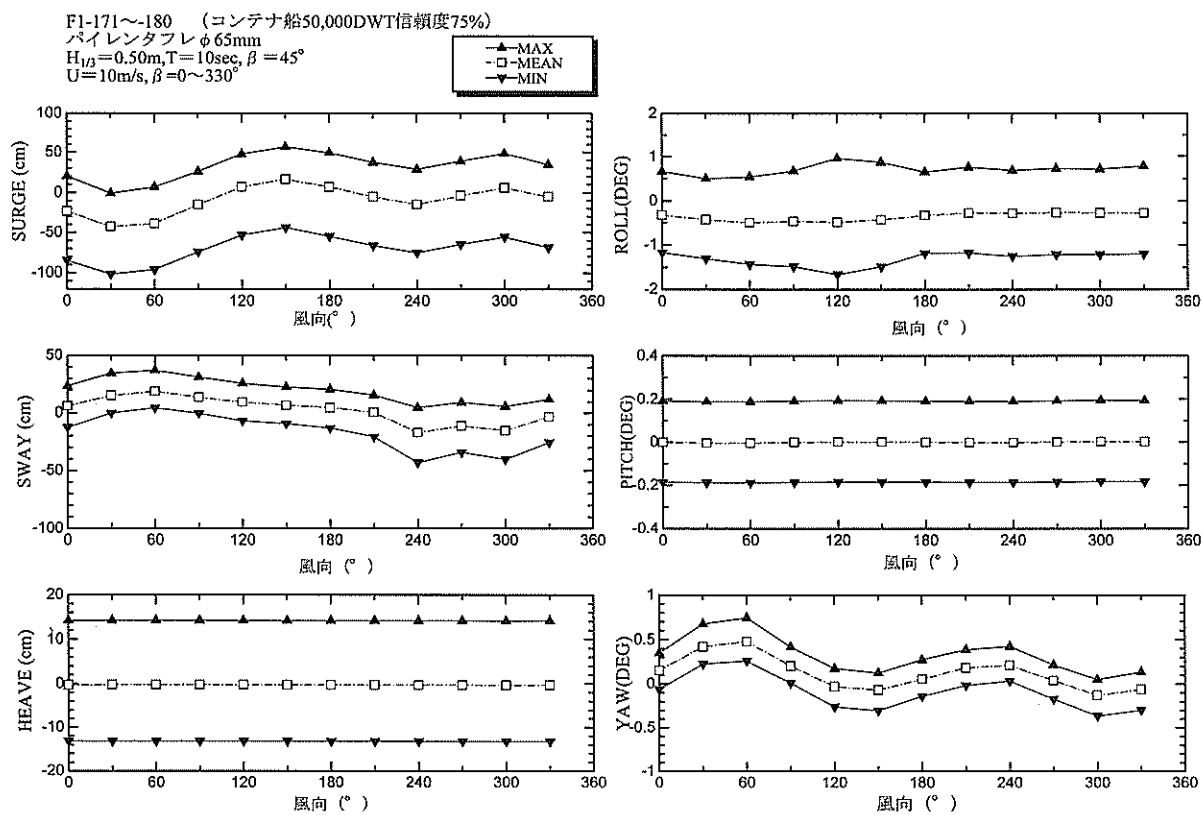


図-C.2(1) 風向に対するコンテナ船の動揺量 (パイレンタフレ) 船舶信頼度75%

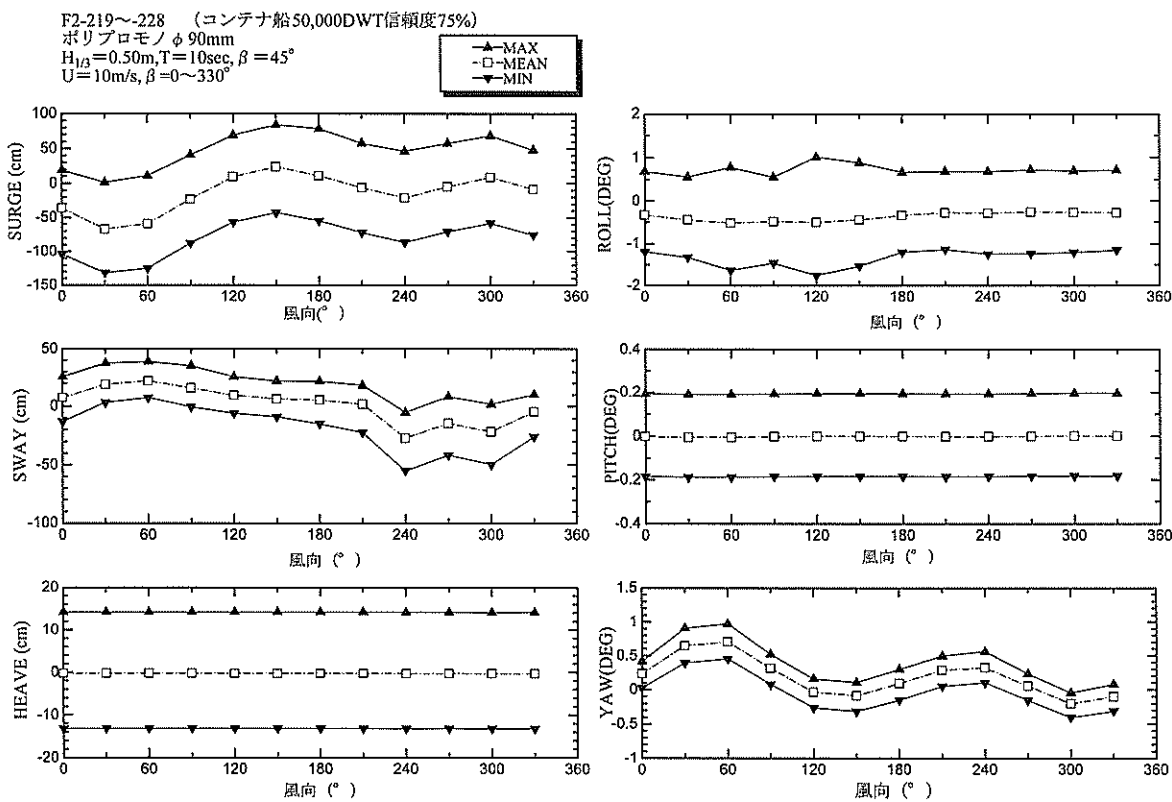


図-C.2(2) 風向に対するコンテナ船の動揺量 (ポリプロモノ) 船舶信頼度75%

S1 (001~044)  
 コンテナ船50,000DWT  
 パイレンタフレ φ65mm  
 H1/3=0.50m, T=10s  
 U=10m/s

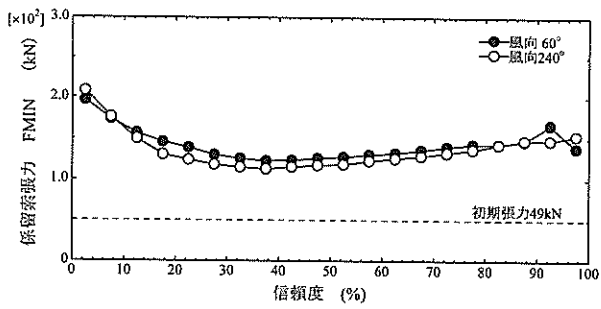
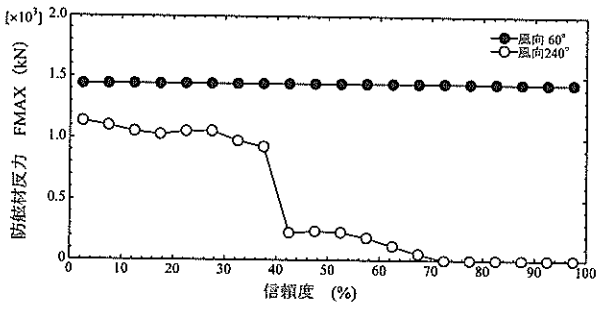


図-C.3(1) 船舶信頼度に対するコンテナ船  
 (パイレンタフレ) の係留力の最大値

F1 (147~156)  
 コンテナ船50,000DWT  
 パイレンタフレ φ60mm  
 H1/3=0.50m, T=10s  
 U=10m/s

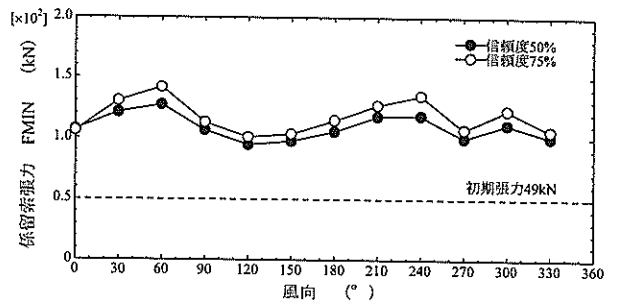
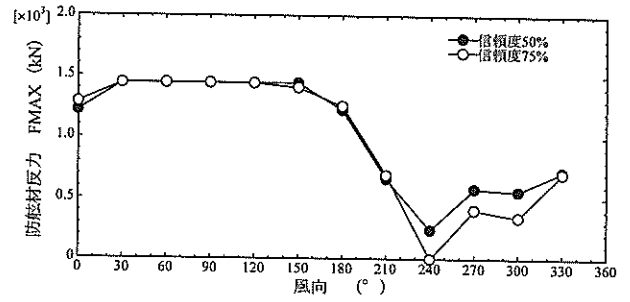


図-C.4(1) 風向に対するコンテナ船  
 (パイレンタフレ) の係留力の最大値

S2 (045~088)  
 コンテナ船50,000DWT  
 ポリプロモノ φ90mm  
 H1/3=0.50m, T=10s  
 U=10m/s

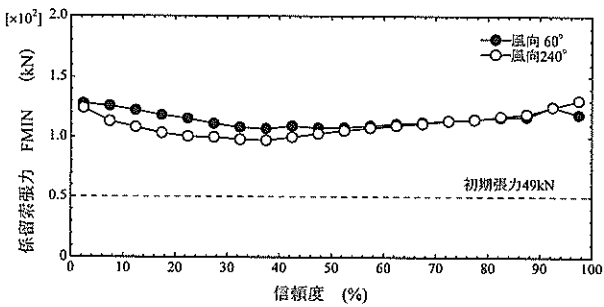
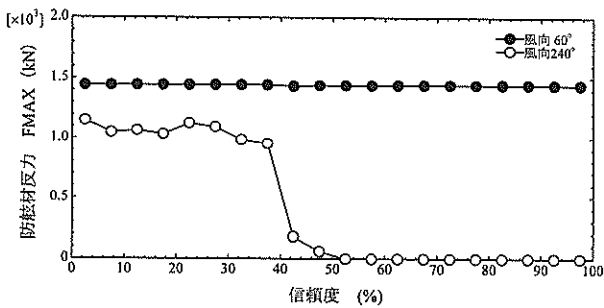


図-C.3(2) 船舶信頼度に対するコンテナ船  
 (ポリプロモノ) の係留力の最大値

F2  
 コンテナ船50,000DWT  
 ポリプロモノ φ90mm  
 H1/3=0.50m, T=10s  
 U=10m/s

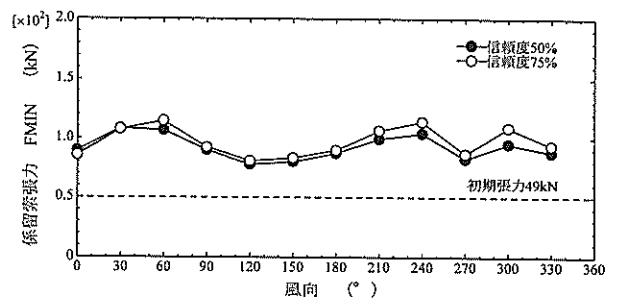
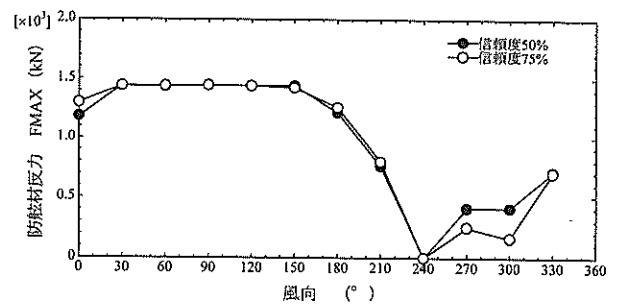


図-C.4(2) 風向に対するコンテナ船  
 (ポリプロモノ) の係留力の最大値

付録D 動揺振幅, 防衛工反力および係留索張力の頻度分布

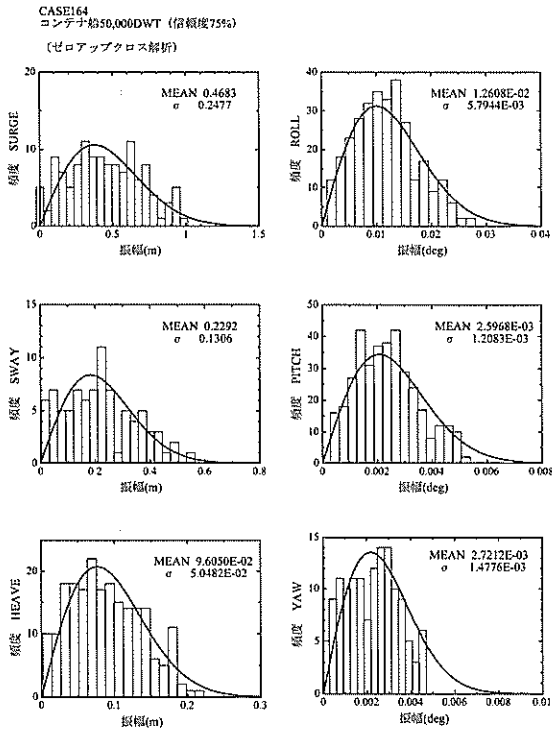


図-D.1(1) コンテナ船の動揺振幅の頻度分布  
(風向240°)

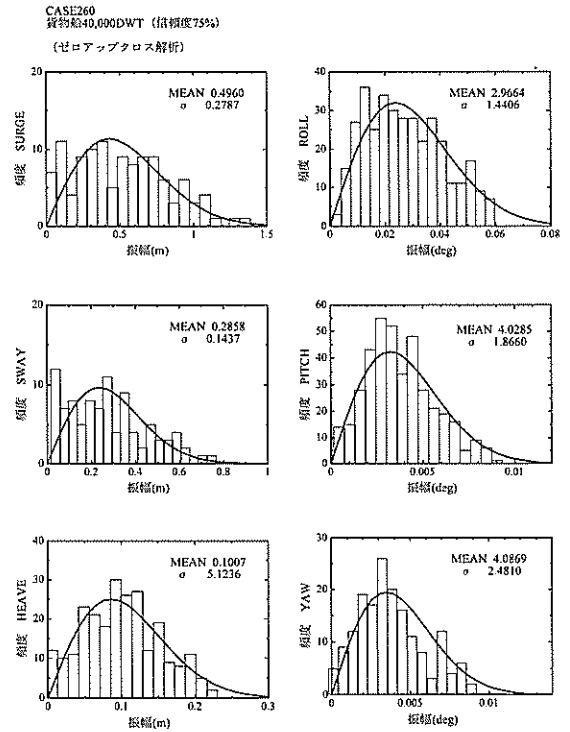


図-D.1(3) 一般貨物船の動揺振幅の頻度分布  
(風向240°)

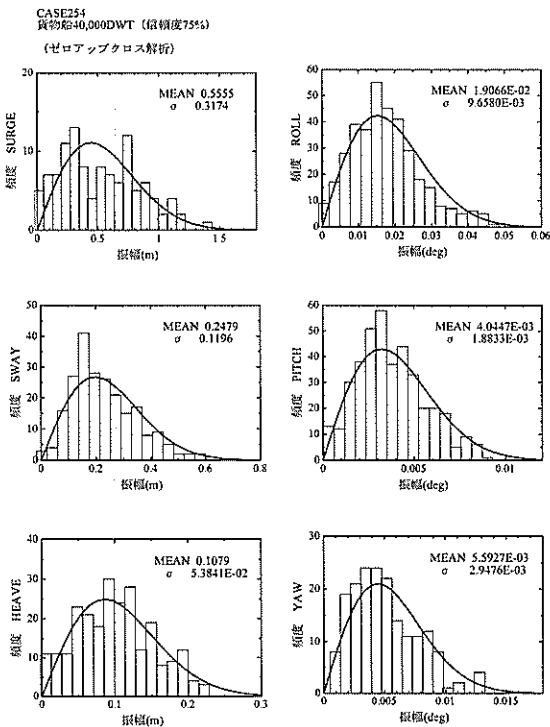


図-D.1(2) 一般貨物船の動揺振幅の頻度分布  
(風向60°)

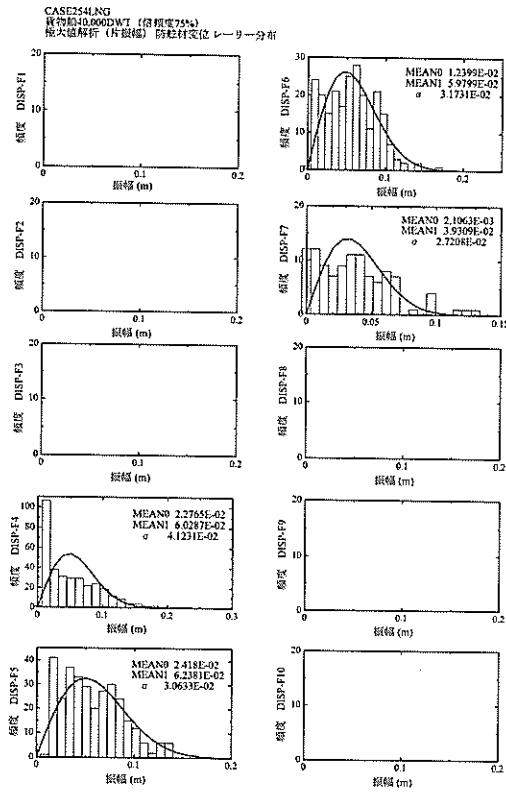


図-D.2 一般貨物船の防衝工反力の頻度分布 (風向60°)

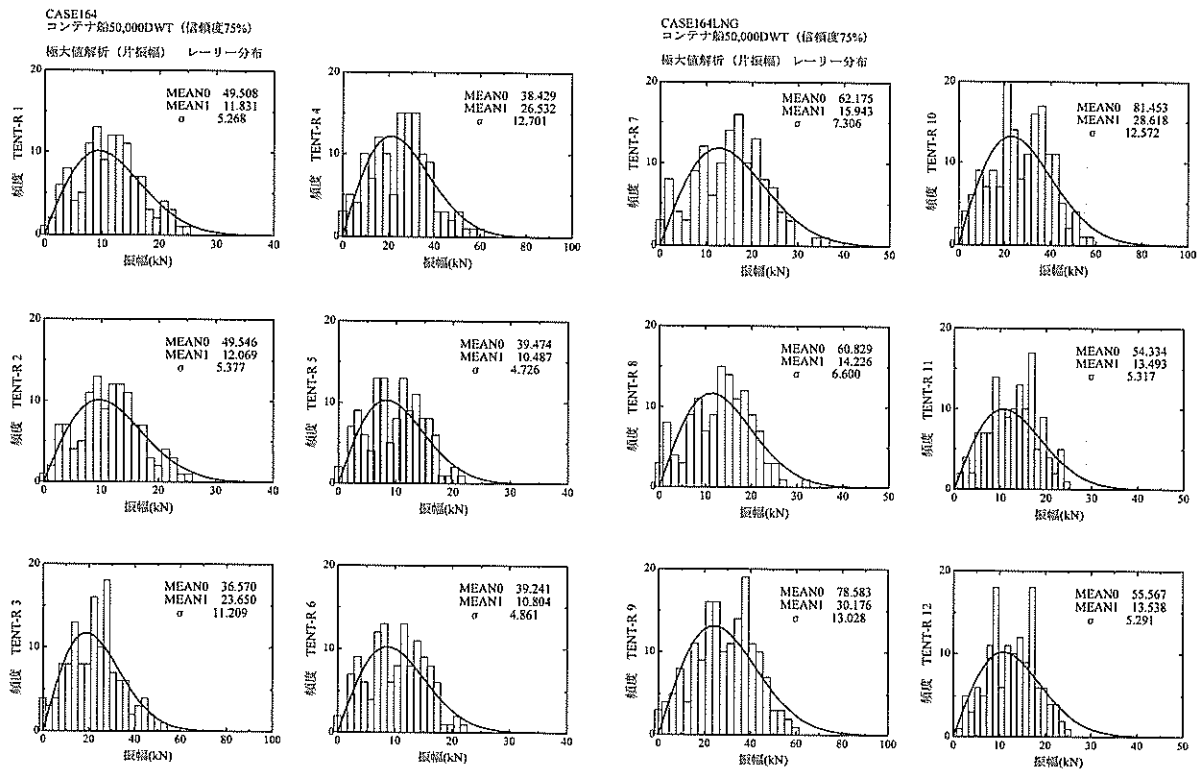


図-D.3(1) コンテナ船の係留索張力 (パイレンタフレ) の頻度分布 (風向240°)

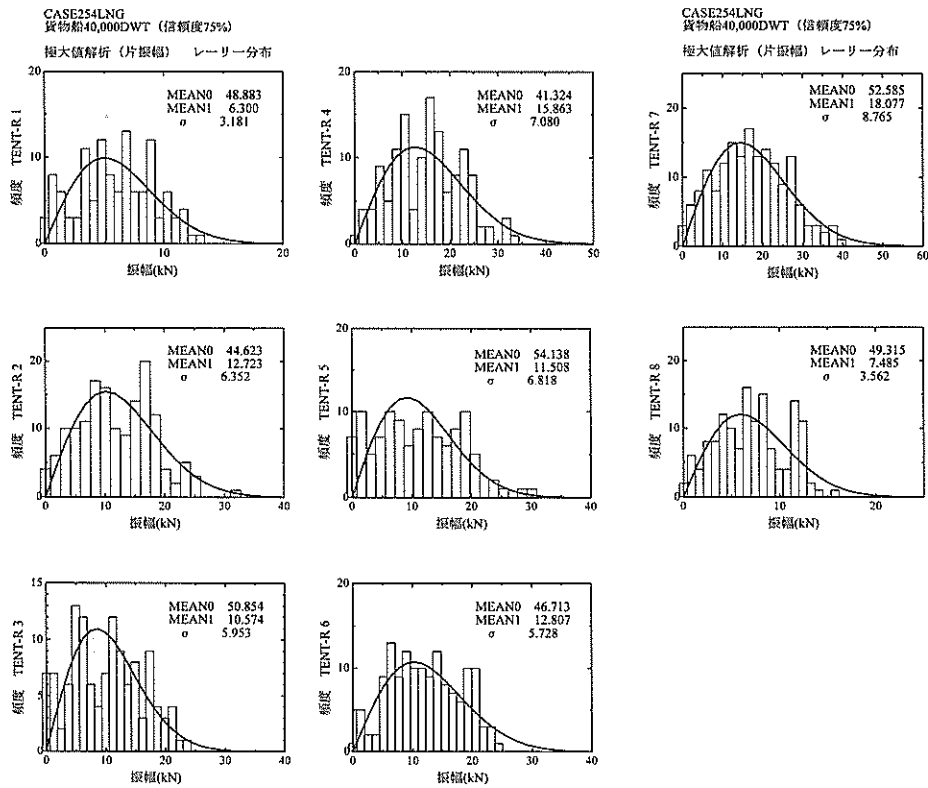


図-D.3(2) 一般貨物船の係留索張力 (ポリプロモノ) の頻度分布 (風向60°)

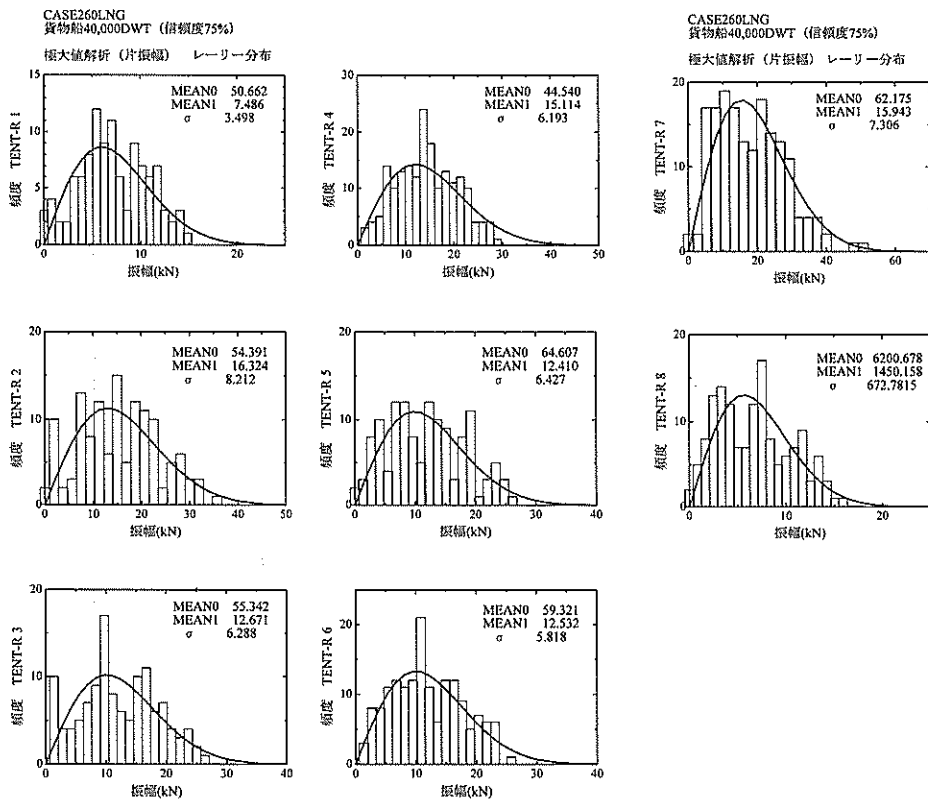


図-D.3(3) 一般貨物船の係留索張力 (ポリプロモノ) の頻度分布 (風向240°)

付録E 防衛工の破壊確率

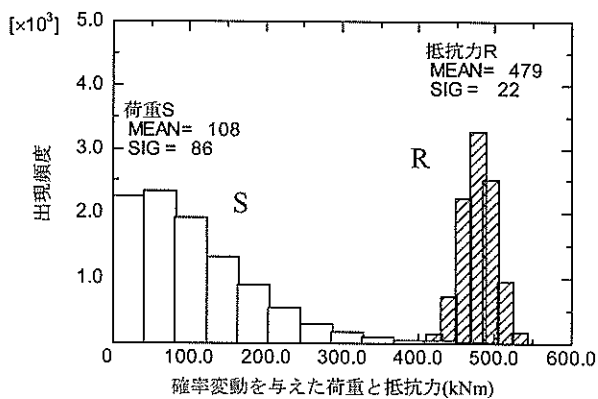


図-E.1(1) 接岸エネルギーおよび吸収エネルギーの頻度分布 (天然ゴム：横浜港)

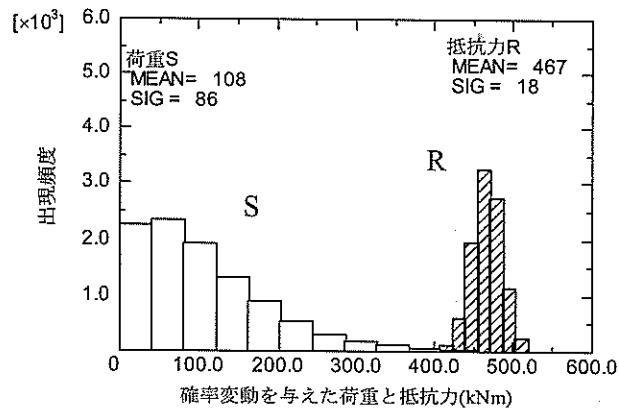


図-E.2(1) 接岸エネルギーおよび吸収エネルギーの頻度分布 (天然ゴム：那覇港)

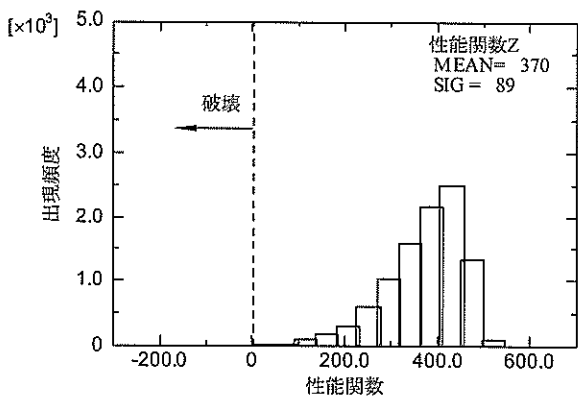


図-E.1(2) 性能関数の頻度分布 (天然ゴム：横浜港)

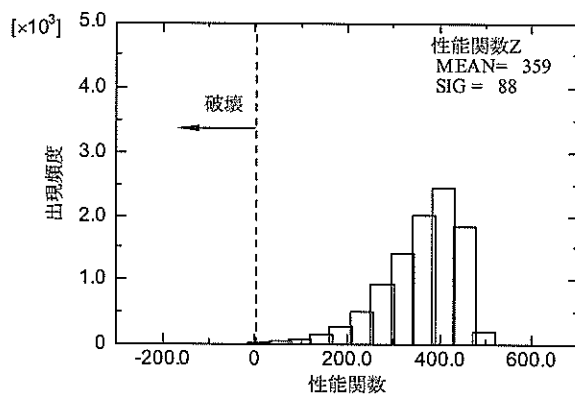


図-E.2(2) 性能関数の頻度分布 (天然ゴム：那覇港)

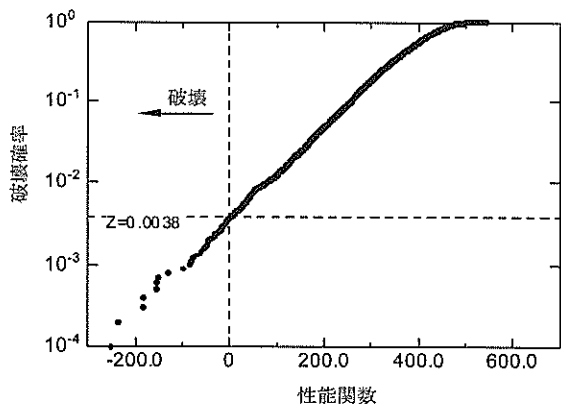


図-E.1(3) 防衛工の破壊確率 (天然ゴム：横浜港)

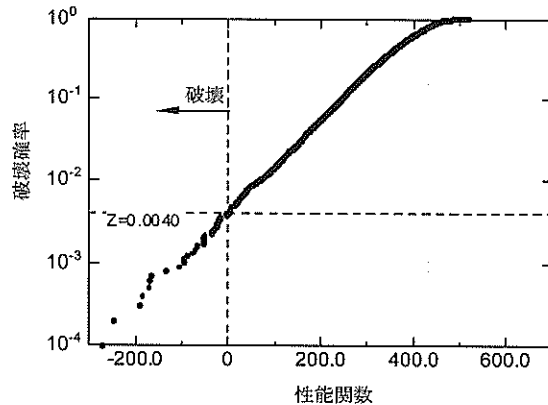


図-E.2(3) 防衛工の破壊確率 (天然ゴム：那覇港)

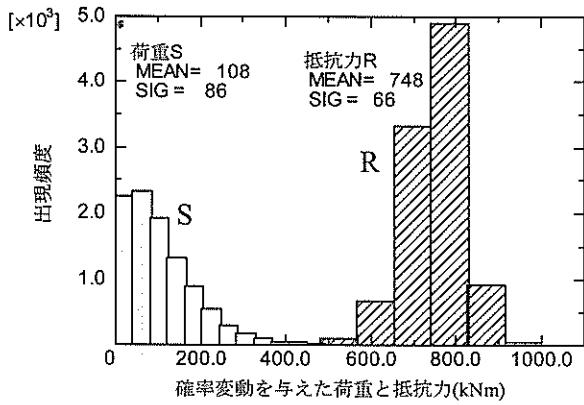


図-E. 3(1) 接岸エネルギーおよび吸収エネルギーの  
頻度分布 (合成ゴム: 横浜港)

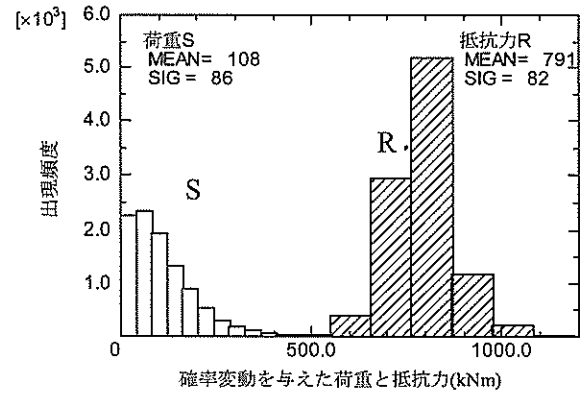


図-E. 4(1) 接岸エネルギーおよび吸収エネルギーの  
頻度分布 (合成ゴム: 那覇港)

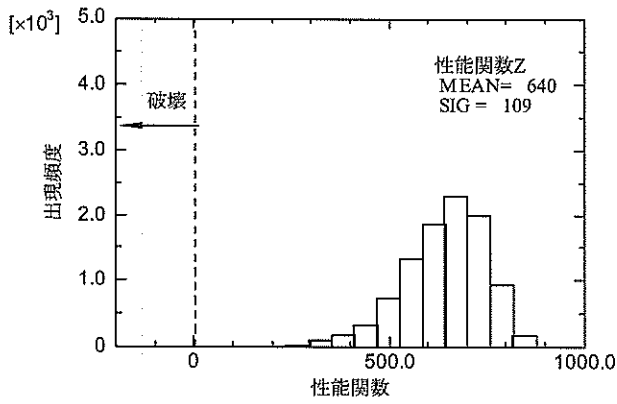


図-E. 3(2) 性能関数の頻度分布 (合成ゴム: 横浜港)

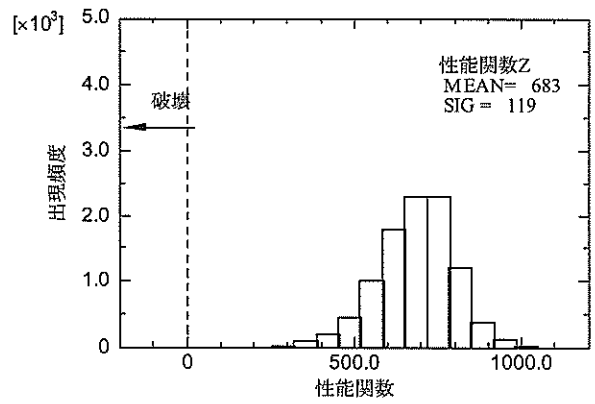


図-E. 4(2) 性能関数の頻度分布 (合成ゴム: 那覇港)

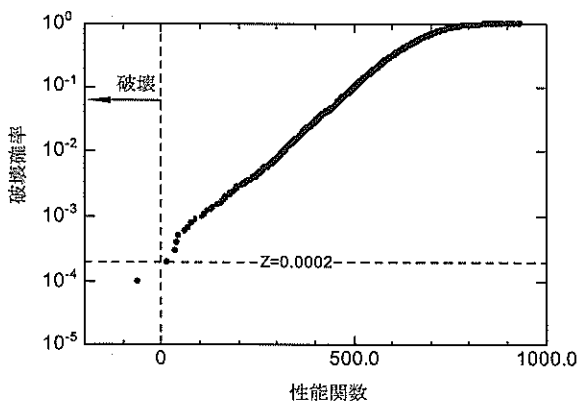


図-E. 3(3) 防衛工の破壊確率 (合成ゴム: 横浜港)

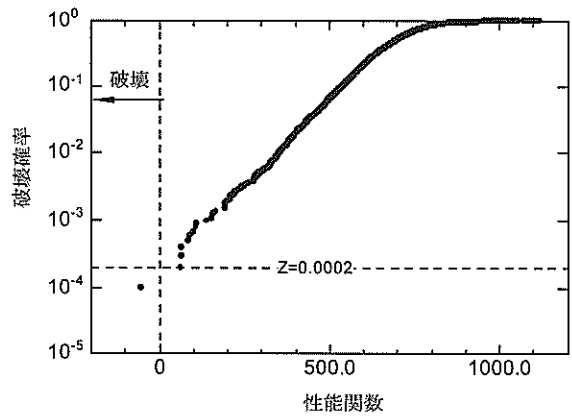


図-E. 4(3) 防衛工の破壊確率 (合成ゴム: 那覇港)

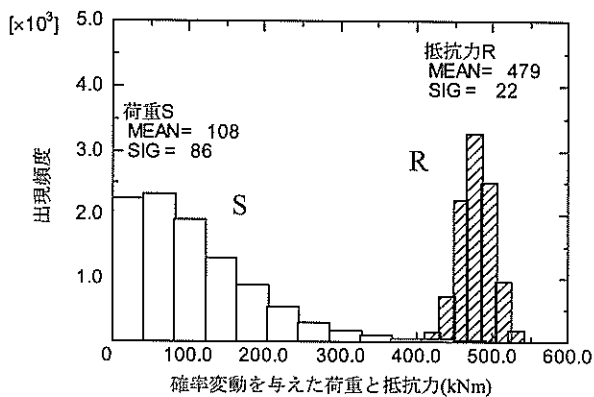


図-E. 5(1) 接岸エネルギーおよび吸収エネルギーの  
頻度分布 (天然ゴム : 0.05m/s)

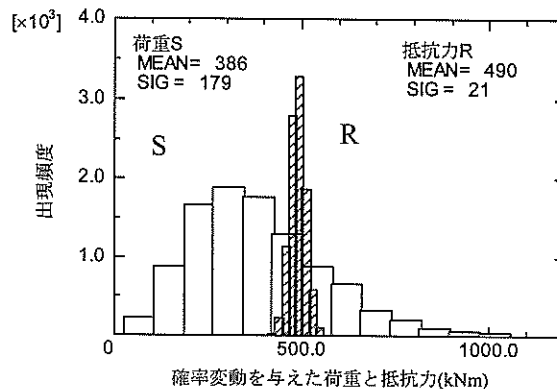


図-E. 6(1) 接岸エネルギーおよび吸収エネルギーの  
頻度分布 (天然ゴム : 0.10m/s)

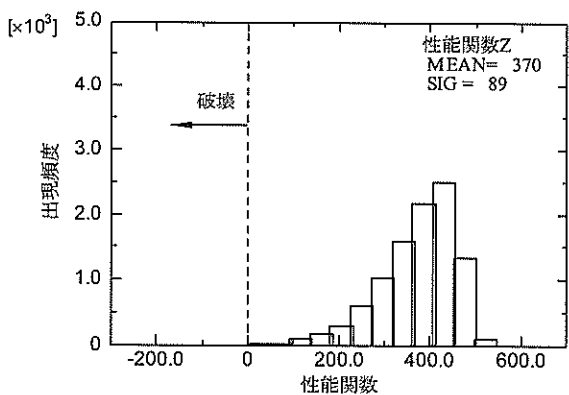


図-E. 5(2) 性能関数の頻度分布 (天然ゴム : 0.05m/s)

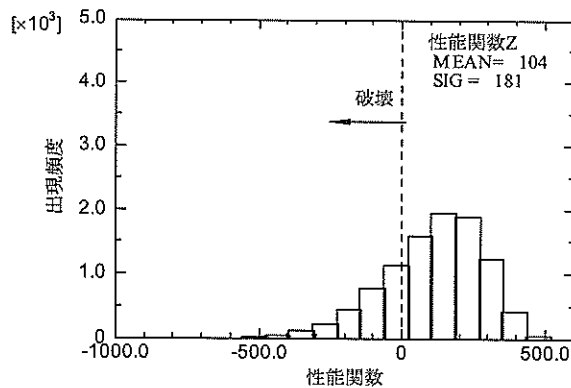


図-E. 6(2) 性能関数の頻度分布 (天然ゴム : 0.10m/s)

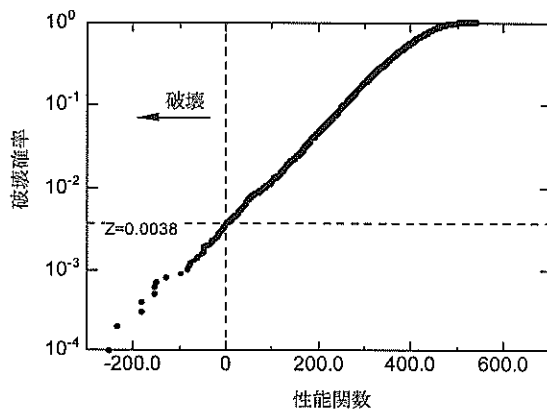


図-E. 5(3) 防衛工の破壊確率 (天然ゴム : 0.05m/s)

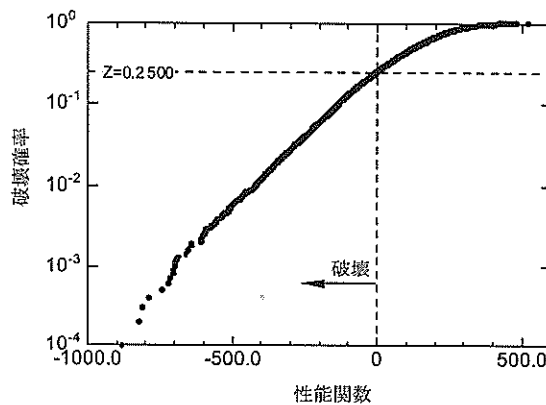


図-E. 6(3) 防衛工の破壊確率 (天然ゴム : 0.10m/s)



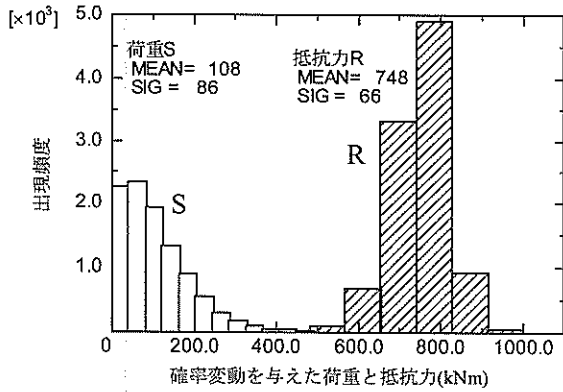


図-E. 7(1) 接岸エネルギーおよび吸収エネルギーの頻度分布 (合成ゴム : 0.05m/s)

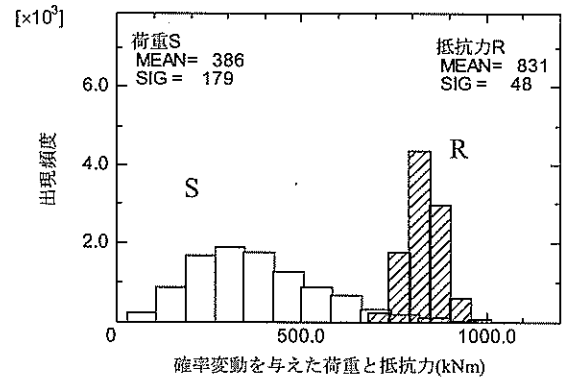


図-E. 8(1) 接岸エネルギーおよび吸収エネルギーの頻度分布 (合成ゴム : 0.10m/s)

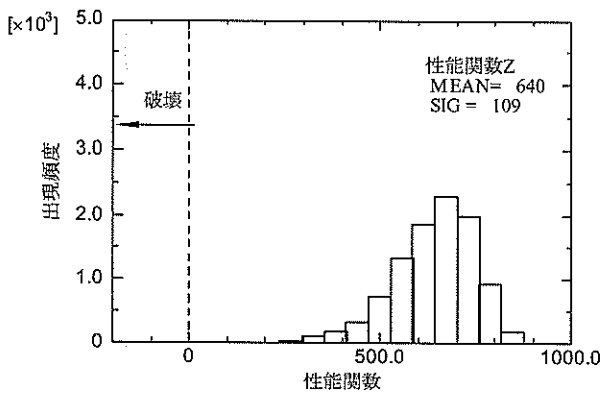


図-E. 7(2) 性能関数の頻度分布 (合成ゴム : 0.05m/s)

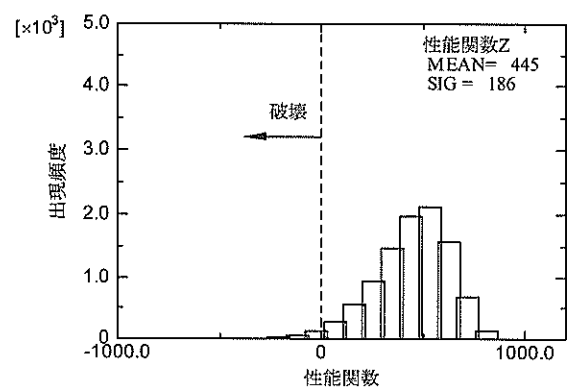


図-E. 8(2) 性能関数の頻度分布 (合成ゴム : 0.10m/s)

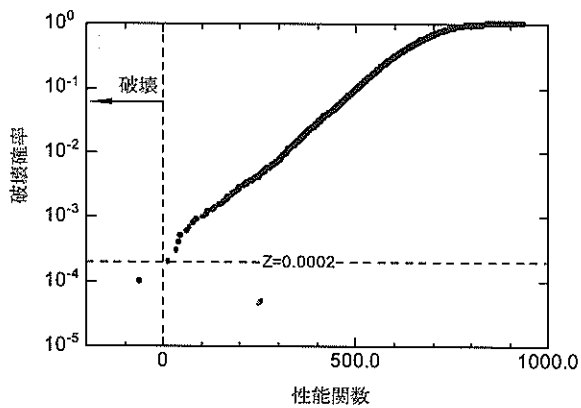


図-E. 7(3) 防衛工の破壊確率 (合成ゴム : 0.05m/s)

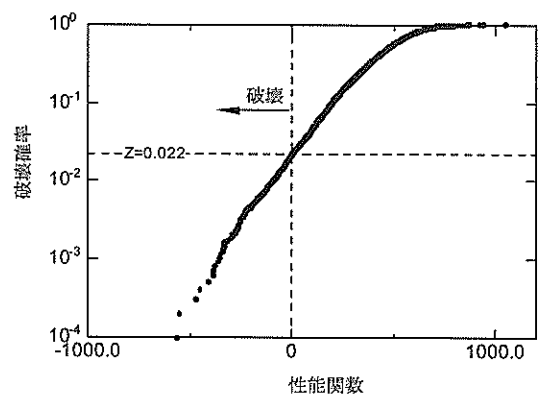


図-E. 8(3) 防衛工の破壊確率 (合成ゴム : 0.10m/s)



表-F.3(1) 波高波向出現頻度表 (高知港)

波高・波向別出現頻度表

波向: 全波向  
季節: 通年  
期間: 1997年1月~2001年12月  
地点名: 高知

波向: 16方位  
波高: cm  
周期: sec

| 波高      | 波向 | NNE       | NE        | ENE       | E         | ESE        | SE           | SSE          | S            | SSW          | SW         | WSW       | W         | WNW       | NW        | NNW       | N         | 静穏 | 合計    | 累計    |
|---------|----|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|--------------|--------------|--------------|--------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----|-------|-------|
| 0-50    |    | 13<br>0.1 | 16<br>0.1 | 12<br>0.1 | 35<br>0.2 | 137<br>0.8 | 1350<br>8.2  | 2632<br>16.0 | 1648<br>10.0 | 444<br>2.7   | 129<br>0.8 | 23<br>0.1 | 8<br>0.0  | 10<br>0.1 | 11<br>0.1 | 10<br>0.1 | 12<br>0.1 |    | 6490  | 6490  |
| 50-100  |    | 2<br>0.0  | 4<br>0.0  | 4<br>0.0  | 9<br>0.1  | 36<br>0.2  | 1378<br>8.4  | 2384<br>14.5 | 1758<br>10.7 | 755<br>4.6   | 125<br>0.8 | 8<br>0.0  | 2<br>0.0  | 4<br>0.0  | 8<br>0.0  | 9<br>0.1  | 10<br>0.1 |    | 6496  | 12986 |
| 100-150 |    |           | 1<br>0.0  |           |           | 5<br>0.0   | 316<br>1.9   | 576<br>3.5   | 624<br>3.8   | 268<br>1.6   | 35<br>0.2  | 2<br>0.0  |           |           |           |           |           |    | 1827  | 14813 |
| 150-200 |    |           |           |           |           | 84<br>0.5  | 327<br>2.0   | 331<br>2.0   | 128<br>0.8   | 21<br>0.1    |            |           |           |           |           |           |           |    | 891   | 15704 |
| 200-250 |    |           |           |           |           | 1<br>0.0   | 23<br>0.1    | 109<br>0.7   | 162<br>1.0   | 55<br>0.3    | 5<br>0.0   |           |           |           |           |           |           |    | 365   | 16059 |
| 250-300 |    |           |           |           |           | 11<br>0.1  | 48<br>0.3    | 115<br>0.7   | 27<br>0.2    | 3<br>0.0     |            |           |           |           |           |           |           |    | 204   | 16263 |
| 300-350 |    |           |           |           | 2<br>0.0  | 4<br>0.0   | 30<br>0.2    | 38<br>0.2    | 9<br>0.1     | 1<br>0.0     |            |           |           |           |           |           |           |    | 84    | 16347 |
| 350-400 |    |           |           |           | 2<br>0.0  | 1<br>0.0   | 14<br>0.0    | 25<br>0.1    | 1<br>0.0     |              |            |           |           | 1<br>0.0  |           |           |           |    | 45    | 16392 |
| 400-450 |    |           |           |           |           | 5<br>0.0   | 22<br>0.1    | 4<br>0.1     |              |              |            |           |           |           |           |           |           |    | 31    | 16423 |
| 450-500 |    |           |           |           |           | 1<br>0.0   | 4<br>0.0     | 11<br>0.1    |              |              |            |           |           |           |           |           |           |    | 16    | 16439 |
| 500-550 |    |           |           |           |           | 2<br>0.0   | 5<br>0.0     | 1<br>0.0     |              |              |            |           |           |           |           |           |           |    | 8     | 16447 |
| 550-600 |    |           |           |           |           |            |              | 1<br>0.0     | 1<br>0.0     |              |            |           |           |           |           |           |           |    | 2     | 16449 |
| 600-650 |    |           |           |           |           |            |              |              |              |              |            |           |           |           |           |           |           |    | 0     | 16449 |
| 650-700 |    |           |           |           |           |            |              |              | 1<br>0.0     |              |            |           |           |           |           |           |           |    | 1     | 16450 |
| 700-    |    |           |           |           |           |            |              |              |              |              |            |           |           |           |           |           |           |    | 0     | 16450 |
| 合計      |    | 15<br>0.1 | 21<br>0.1 | 16<br>0.1 | 48<br>0.3 | 180<br>1.1 | 3168<br>19.3 | 6131<br>37.3 | 4741<br>28.8 | 1693<br>10.3 | 319<br>1.9 | 33<br>0.2 | 10<br>0.1 | 15<br>0.1 | 19<br>0.1 | 19<br>0.1 | 22<br>0.1 |    | 16450 | 16450 |
| 累計      |    | 15        | 36        | 52        | 100       | 280        | 3448         | 9579         | 14320        | 16013        | 16332      | 16365     | 16375     | 16390     | 16409     | 16428     | 16450     |    | 16450 | 16450 |

測得率: 75.1 (%) , 欠測回数 5462      静穏率: 0.0 (%) , 静穏回数 0      上段: 出現回数, 下段: 出現頻度 (%)

表-F.3(2) 波高周期出現頻度表 (高知港)

波向別波高・周期別出現頻度表

波向: 全波向  
季節: 通年  
期間: 1997年1月~2001年12月  
地点名: 高知

波向: 16方位  
波高: cm  
周期: sec

| 波高      | 周期 | 0 | 1 | 2 | 3   | 4    | 5    | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16    | 17    | 18    | 合計    | 累計    |
|---------|----|---|---|---|-----|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0-50    |    |   |   | 7 | 308 | 990  | 2127 | 2710  | 1842  | 692   | 163   | 23    | 7     |       |       |       |       |       |       |       | 8869  | 8869  |
| 50-100  |    |   |   | 0 | 1   | 107  | 587  | 1616  | 2132  | 1811  | 1250  | 142   | 43    | 21    | 7     | 1     |       |       |       |       | 8243  | 17112 |
| 100-150 |    |   |   | 0 | 0   | 0    | 0    | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 2316  | 19428 |
| 150-200 |    |   |   |   |     |      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       | 1039  | 20467 |
| 200-250 |    |   |   |   |     |      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       | 385   | 20852 |
| 250-300 |    |   |   |   |     |      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       | 1     | 21069 |
| 300-350 |    |   |   |   |     |      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       | 1     | 21269 |
| 350-400 |    |   |   |   |     |      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       | 0     | 21309 |
| 400-450 |    |   |   |   |     |      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       | 0     | 21318 |
| 450-500 |    |   |   |   |     |      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       | 0     | 21318 |
| 500-550 |    |   |   |   |     |      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       | 0     | 21318 |
| 550-600 |    |   |   |   |     |      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       | 0     | 21318 |
| 600-650 |    |   |   |   |     |      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       | 0     | 21318 |
| 650-700 |    |   |   |   |     |      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       | 0     | 21318 |
| 700-    |    |   |   |   |     |      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       | 0     | 21318 |
| 合計      |    |   |   | 8 | 415 | 1616 | 4185 | 5864  | 4432  | 2648  | 1107  | 448   | 233   | 155   | 126   | 70    | 11    |       |       |       | 21318 | 21318 |
| 累計      |    | 0 | 0 | 8 | 423 | 2039 | 6224 | 12088 | 16520 | 19168 | 20275 | 20723 | 20956 | 21111 | 21237 | 21307 | 21318 | 21318 | 21318 | 21318 | 21318 | 21318 |

測得率: 97.3 (%) , 欠測回数 594      静穏率: 0.0 (%) , 静穏回数 0      上段: 出現回数, 下段: 出現頻度 (%)

表-F.4 風速風向出現頻度表 (常陸那珂港)

Daily Maximum Wind Velocity by Wind Direction 風向別の日最大風速出現回数及び出現率 (1991-1999年) (平成3年～9年)

| Wind velocity (m/sec)<br>風速 (m/SEC) | Wind direction<br>風向 | Calm<br>静穏 | N     | NNE   | NE    | ENE   | E     | ESE   | SE    | SSE   | S     | SSW   | SW    | WSW   | W     | WNW   | NW    | NNW    | Total<br>合計 |
|-------------------------------------|----------------------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------------|
| Calm<br>静穏                          | Times<br>回           | 224        |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |        | 224         |
|                                     | 回%                   | 0.5        |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |        | 0.5         |
| 0.3~4.9                             | Times<br>回           | 3,903      | 2,608 | 3,397 | 2,975 | 2,154 | 1,730 | 1,483 | 1,199 | 2,048 | 2,497 | 1,475 | 900   | 1,351 | 1,818 | 3,629 | 3,804 | 26,523 | 36,523      |
|                                     | 回%                   | 6.4        | 5.6   | 7.3   | 6.4   | 4.7   | 3.7   | 3.2   | 2.6   | 4.4   | 5.4   | 3.1   | 1.9   | 2.5   | 3.8   | 7.9   | 8.3   | 59.8   | 100.0       |
| 5.0~9.9                             | Times<br>回           | 697        | 1,156 | 2,706 | 537   | 327   | 225   | 282   | 147   | 516   | 239   | 173   | 75    | 212   | 194   | 339   | 248   | 1,529  | 18.5        |
|                                     | 回%                   | 1.9        | 2.5   | 5.8   | 1.8   | 0.7   | 0.5   | 0.6   | 0.3   | 1.1   | 0.5   | 0.4   | 0.2   | 0.5   | 0.4   | 0.7   | 0.5   | 4.4    | 5.1         |
| 10.0~14.9                           | Times<br>回           | 69         | 71    | 274   | 17    | 2     | 5     | 4     | 4     | 15    | 19    | 1     | 3     | 2     | 4     | 4     | 4     | 43     | 0.5         |
|                                     | 回%                   | 0.1        | 0.2   | 0.8   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.3    | 0.4         |
| 15.0~19.9                           | Times<br>回           | 1          | 4     | 8     | 4     |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |        | 1           |
|                                     | 回%                   | 0.0        | 0.0   | 0.0   | 0.0   |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |        | 0.0         |
| 20.0 or more<br>20以上                | Times<br>回           | 0          | 0     | 0     | 0     |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |        | 0           |
|                                     | 回%                   | 0.0        | 0.0   | 0.0   | 0.0   |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |        | 0.0         |
| Total<br>合計                         | Times<br>回           | 224        | 4,670 | 3,859 | 6,376 | 3,284 | 2,223 | 1,960 | 1,749 | 1,343 | 2,579 | 2,754 | 1,631 | 975   | 1,566 | 2,015 | 3,891 | 4,055  | 46,291      |
|                                     | 回%                   | 0.5        | 10.4  | 8.3   | 15.9  | 8.3   | 5.5   | 4.2   | 3.8   | 2.9   | 5.8   | 5.9   | 3.5   | 2.1   | 3.4   | 4.4   | 8.6   | 8.8    | 100.0       |

表-F.5 風速風向出現頻度表 (伏木富山港)

風速・風向別出現頻度表

風向: 全風向  
季節: 通年  
期間: 1999年1月~2001年12月  
地点名: 高知

風向: 16方位  
風速: m/s

| 風速    | 波向 | NNE | NE  | ENE | E   | ESE  | SE   | SSE  | S    | SSW  | SW   | WSW  | W    | WNW  | NW   | NNW  | N     | 静穏 | 合計    | 累計    |
|-------|----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|----|-------|-------|
| 0-5   |    | 368 | 51  | 33  | 137 | 204  | 156  | 228  | 684  | 439  | 142  | 166  | 259  | 274  | 1239 | 1433 | 1962  |    | 7775  | 7775  |
|       |    | 4.5 | 0.6 | 0.4 | 1.7 | 2.5  | 1.9  | 2.8  | 8.4  | 5.4  | 1.7  | 2.0  | 3.2  | 3.3  | 15.1 | 17.5 | 24.0  |    | 95.0  | 95.0  |
| 5-10  |    | 22  | 3   |     | 2   | 27   | 21   | 17   | 34   | 22   | 12   | 41   | 7    | 7    | 5    | 12   | 167   |    | 399   | 8174  |
|       |    | 0.3 | 0.0 |     | 0.0 | 0.3  | 0.3  | 0.2  | 0.4  | 0.3  | 0.1  | 0.5  | 0.1  | 0.1  | 0.1  | 0.1  | 2.0   |    | 4.9   | 99.8  |
| 10-15 |    | 1   |     |     |     | 2    | 1    | 2    |      |      |      |      |      |      |      |      | 5     |    | 13    | 8187  |
|       |    | 0.0 |     |     |     | 0.0  | 0.0  | 0.0  |      |      | 0.0  |      |      |      |      |      | 0.1   |    | 0.2   | 100.0 |
| 15-20 |    |     |     |     |     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |    |       | 8187  |
|       |    |     |     |     |     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |    |       | 100.0 |
| 20-   |    |     |     |     |     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |    |       | 8187  |
|       |    |     |     |     |     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |    |       | 100.0 |
| 合計    |    | 391 | 54  | 33  | 139 | 233  | 178  | 247  | 718  | 461  | 155  | 207  | 266  | 281  | 1244 | 1446 | 2134  |    | 8187  | 8187  |
|       |    | 4.8 | 0.7 | 0.4 | 1.7 | 2.8  | 2.2  | 3.0  | 8.8  | 5.6  | 1.9  | 2.5  | 3.2  | 3.4  | 15.2 | 17.7 | 26.1  |    | 100.0 | 100.0 |
| 累計    |    | 391 | 445 | 478 | 617 | 850  | 1028 | 1275 | 1993 | 2454 | 2609 | 2816 | 3082 | 3363 | 4607 | 6053 | 8187  |    | 8187  | 8187  |
|       |    | 4.8 | 5.4 | 5.8 | 7.5 | 10.4 | 12.6 | 15.6 | 24.3 | 30.0 | 31.9 | 34.4 | 37.6 | 41.1 | 56.3 | 73.9 | 100.0 |    | 100.0 | 100.0 |

測得率: 62.2 (%) , 欠測回数 4965

上段: 出現回数, 下段: 出現頻度 (%)

表-F.6 風速風向出現頻度表 (高知港)

風速・風向別出現頻度表

風向: 全風向  
季節: 通年  
期間: 1999年1月~2001年12月  
地点名: 伏木

風向: 16方位  
風速: m/s

| 風速    | 波向 | NNE | NE   | ENE  | E    | ESE  | SE   | SSE  | S    | SSW  | SW   | WSW  | W    | WNW  | NW   | NNW   | N     | 静穏 | 合計    | 累計    |
|-------|----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|----|-------|-------|
| 0-5   |    | 290 | 467  | 350  | 164  | 84   | 94   | 224  | 534  | 761  | 344  | 227  | 320  | 517  | 373  | 231   | 175   |    | 5155  | 5155  |
|       |    | 3.0 | 4.8  | 3.6  | 1.7  | 0.9  | 1.0  | 2.3  | 5.5  | 7.9  | 3.6  | 2.4  | 3.3  | 5.4  | 3.9  | 2.4   | 1.8   |    | 53.4  | 53.4  |
| 5-10  |    | 288 | 646  | 242  | 37   | 8    | 13   | 48   | 425  | 691  | 307  | 229  | 223  | 262  | 204  | 140   | 180   |    | 3943  | 9098  |
|       |    | 3.0 | 6.7  | 2.5  | 0.4  | 0.1  | 0.1  | 0.5  | 4.4  | 7.2  | 3.2  | 2.4  | 2.3  | 2.7  | 2.1  | 1.4   | 1.9   |    | 40.8  | 94.2  |
| 10-15 |    | 88  | 76   | 13   |      |      | 2    | 10   | 31   | 40   | 51   | 60   | 65   | 43   | 20   | 11    | 35    |    | 545   | 9643  |
|       |    | 0.9 | 0.8  | 0.1  |      |      | 0.0  | 0.1  | 0.3  | 0.4  | 0.5  | 0.6  | 0.7  | 0.4  | 0.2  | 0.1   | 0.4   |    | 5.6   | 99.8  |
| 15-20 |    | 5   | 1    |      |      |      |      |      | 1    |      | 2    | 4    | 2    |      | 1    |       |       |    | 16    | 9659  |
|       |    | 0.1 | 0.0  |      |      |      |      |      | 0.0  |      | 0.0  | 0.0  | 0.0  |      | 0.0  |       |       |    | 0.2   | 100.0 |
| 20-   |    |     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |       |    |       | 9659  |
|       |    |     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |       |    |       | 100.0 |
| 合計    |    | 671 | 1190 | 605  | 201  | 92   | 109  | 282  | 991  | 1492 | 704  | 520  | 610  | 822  | 598  | 382   | 390   |    | 9659  | 9659  |
|       |    | 6.9 | 12.3 | 6.3  | 2.1  | 1.0  | 1.1  | 2.9  | 10.3 | 15.4 | 7.3  | 5.4  | 6.3  | 8.5  | 6.2  | 4.0   | 4.0   |    | 100.0 | 100.0 |
| 累計    |    | 671 | 1861 | 2466 | 2667 | 2759 | 2868 | 3150 | 4141 | 5633 | 6337 | 6857 | 7467 | 8289 | 8887 | 9269  | 9659  |    | 9659  | 9659  |
|       |    | 6.9 | 19.3 | 25.5 | 27.6 | 28.6 | 29.7 | 32.6 | 42.9 | 58.3 | 65.6 | 71.0 | 77.3 | 85.8 | 92.0 | 100.0 | 100.0 |    | 100.0 | 100.0 |

測得率: 73.4 (%) , 欠測回数 3493

上段: 出現回数, 下段: 出現頻度 (%)

付録G コンクリート上部工の破壊確率

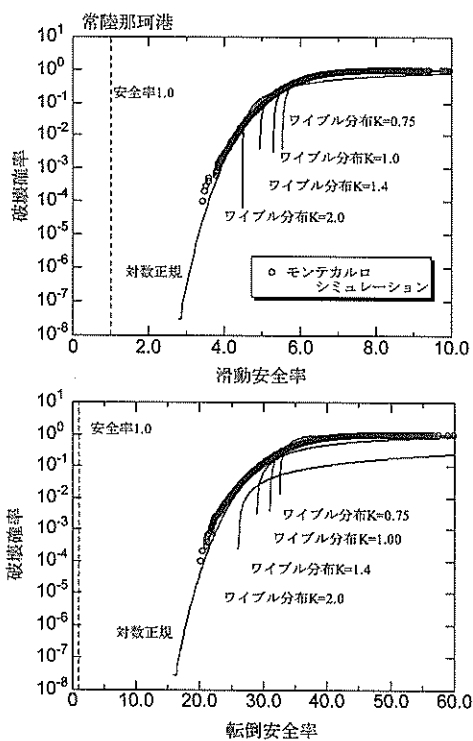


図-G.1(1) 堤体幅 (6.4m) の場合の破壊確率 (常陸那珂港)

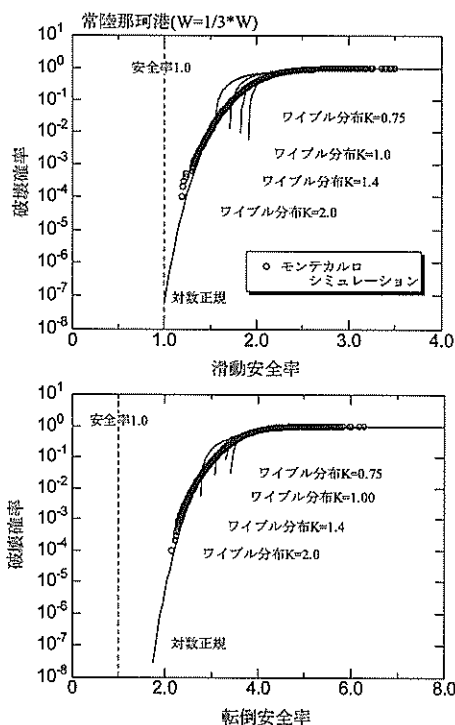


図-G.1(3) 堤体幅1/3 (2.1m) の場合の破壊確率 (常陸那珂港)

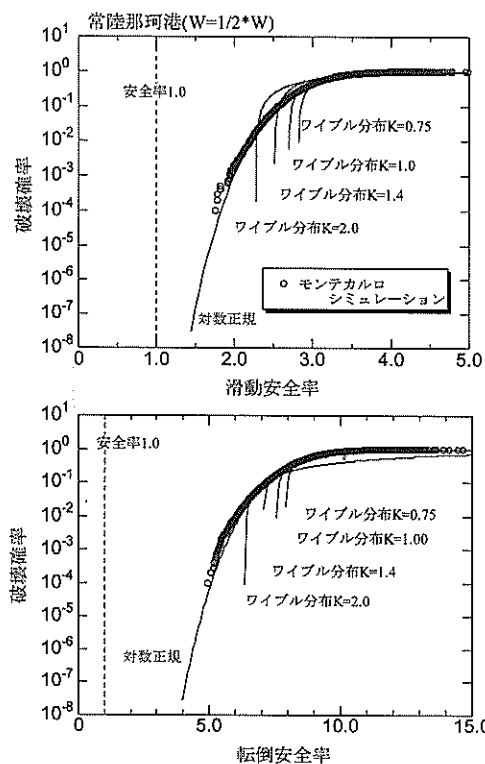


図-G.1(2) 堤体幅1/2 (3.2m) の場合の破壊確率 (常陸那珂港)

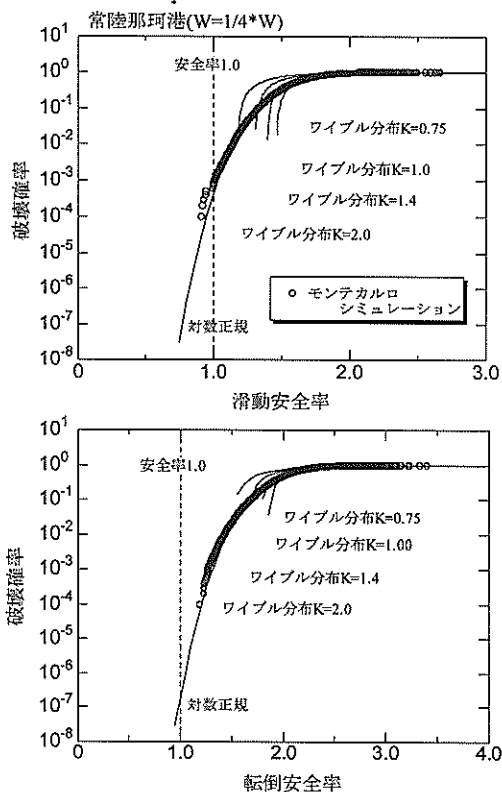


図-G.1(4) 堤体幅1/4 (1.6m) の場合の破壊確率 (常陸那珂港)

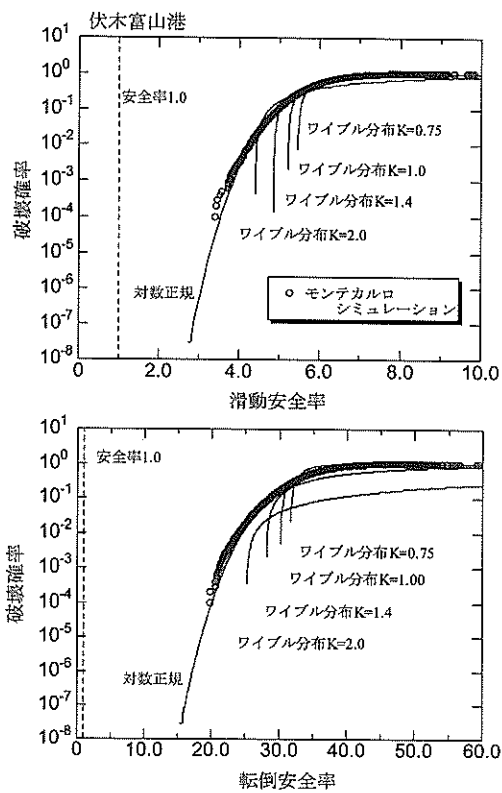


図-G.2(1) 堤体幅 (6.4m) の場合の破壊確率 (伏木富山港)

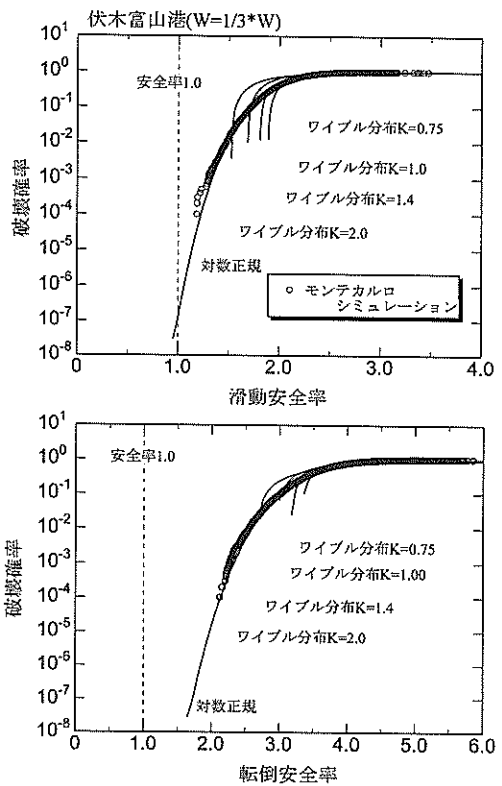


図-G.2(3) 堤体幅1/3 (2.1m) の場合の破壊確率 (伏木富山港)

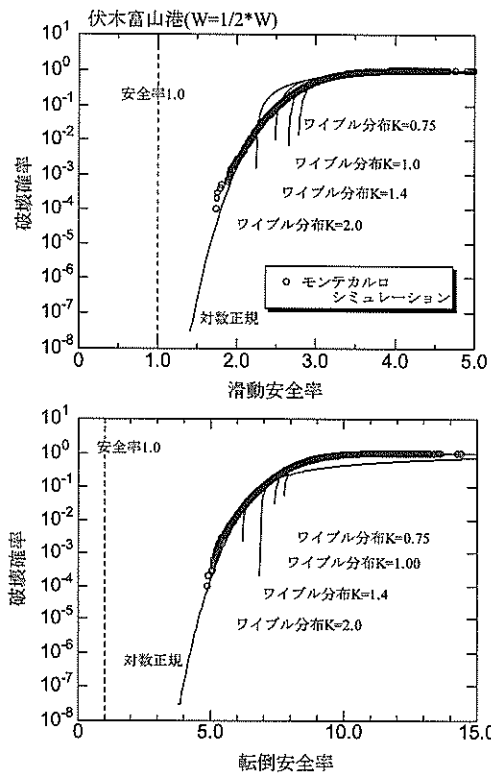


図-G.2(2) 堤体幅1/2 (3.2m) の場合の破壊確率 (伏木富山港)

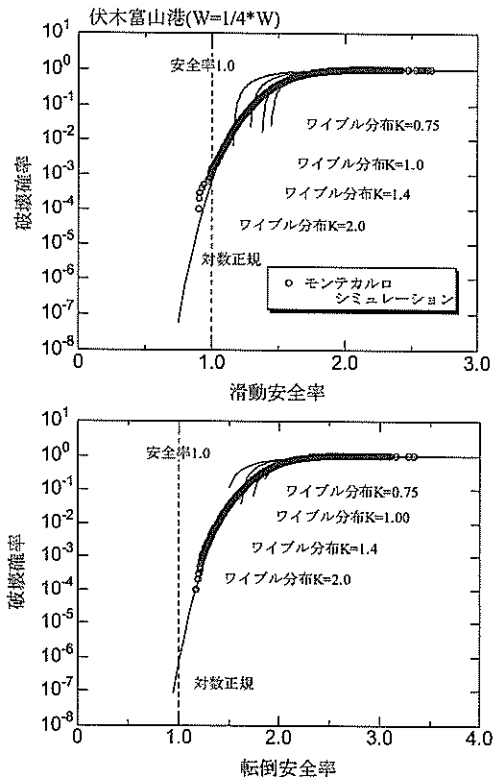


図-G.2(4) 堤体幅1/4 (1.6m) の場合の破壊確率 (伏木富山港)

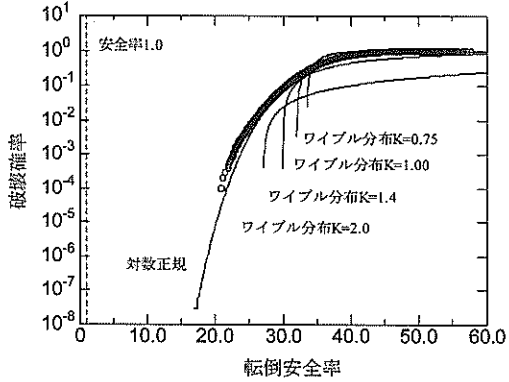
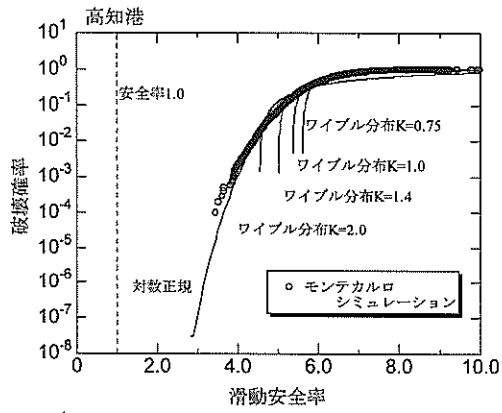


図-G.3(1) 堤体幅 (6.4m) の場合の破壊確率 (高知港)

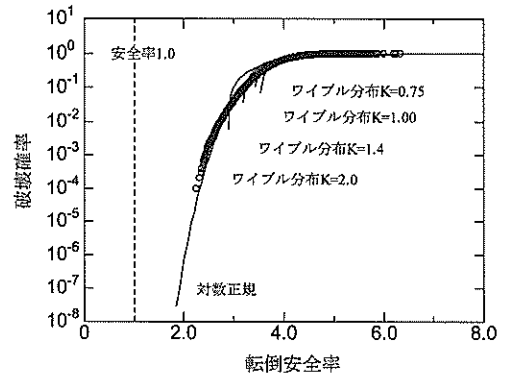
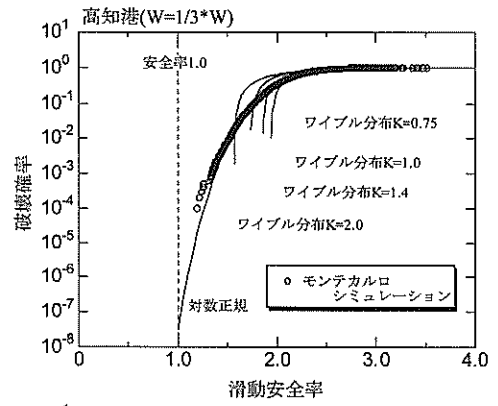


図-G.3(3) 堤体幅1/3 (2.1m) の場合の破壊確率 (高知港)

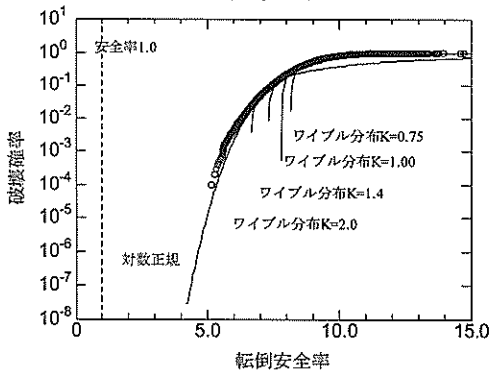
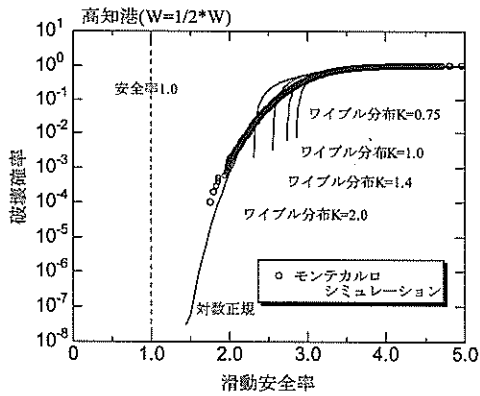


図-G.3(2) 堤体幅1/2 (3.2m) の場合の破壊確率 (高知港)

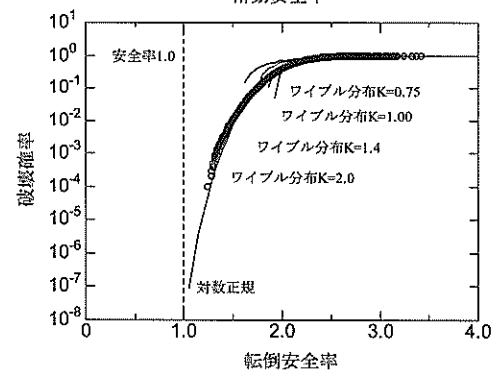
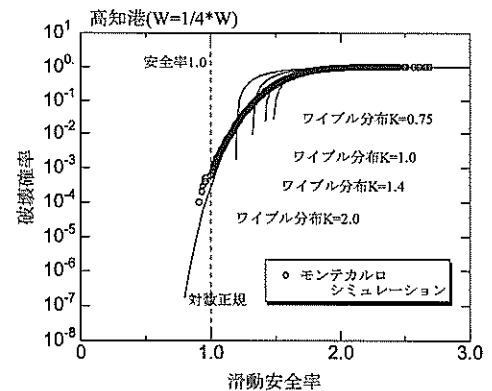


図-G.3(4) 堤体幅1/4 (1.6m) の場合の破壊確率 (高知港)



港湾空港技術研究所資料 No. 1089

2004. 12

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所

横須賀市長瀬3丁目1番1号  
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 昭和情報プロセス株式会社

Copyright © (2004) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。