

防舷材反力の確率分布に関する研究

STUDY ON PROBABILITY DISTRIBUTION OF REACTION FORCE OF FENDERS

長尾 毅¹・佐貫哲朗²・尾崎竜三³
Takashi NAGAO, Tetsuro SANUKI and Ryuzo OZAKI

¹正会員 工博 国土技術政策総合研究所 (〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1)

²正会員 復建調査設計 (〒732-0052 広島市東区光町 2-10-11)

³正会員 工博 中央復建コンサルタンツ(株) (〒533-0033 大阪市東淀川区東中島 4-11-10)

It is necessary to evaluate the probability distribution of variables in order to apply the reliability-based design method. In this study, probability distribution of reaction force of fenders acting on quay walls is studied. For the purpose, we firstly evaluated the probability distribution of berthing energy acting on fenders. We then evaluated the probability distribution of reaction force by using performance curves of fenders. It was found that probability distribution of berthing force is complicated and not easy to handle for probabilistic design methods. Therefore we conducted first-order reliability analyses and proposed the probability distribution that is suitable to reliability-based design method.

Key Words : Berthing force, probability distribution, reliability-based design

1. はじめに

港湾構造物の設計には、基本的に安全率を用いた確定論的設計法が長年にわたり採用されてきた。この方法は簡便ではあるものの、その設計法により担保される構造物の性能や安全性水準が明確ではないという非常に大きな問題点を有している。安全率は安全性水準を示す指標と受け止められることが多いが、実際には安全率は安全性水準を定性的に示す指標に過ぎない。何故なら、設計計算式に用いられるパラメタは何らかの確率変動を有するが、設計に用いている値(設計用値)がそのパラメタの確率分布の中でどの程度の超過確率値に設定されているかによって、同じ安全率を有していても破壊の可能性は全く異なる可能性がある¹⁾ためである。

ISO2394(構造物の設計法に関する一般原則)の制定などの流れを踏まえて、土木構造物の標準的な設計法として信頼性設計法を採用すべきとの議論がなされている²⁾。信頼性設計法は確率論に基づいた設計法であり、構造物の耐力 R と荷重効果 S の設計用値の比(安全率)を安全性判定の基準とするものではなく、 R を S が超過する確率(破壊確率)を安全性判定の基準とする。すなわち、信頼性設計法においては構造物の破壊可能性をある特定の値以下に保つことが可能となる。

このような背景のもと、筆者らは、港湾構造物の信頼性設計法に関する研究を行ってきた^{3,4,5)}。特に文献5)においては、防舷材の信頼性設計法に関する研究を行ったが、棧橋式岸壁の設計においては、船

舶の接岸によって生じる防舷材反力の作用に対して、杭の安全性照査を行う必要がある。このため本研究では、棧橋の設計において必要となる防舷材反力の確率分布に関する検討を行った。

検討にあたり、船舶の接岸エネルギーの従う確率分布を船舶の重量トン DWT 毎に評価し、防舷材の性能曲線を用いて防舷材反力の従う確率分布を評価した。検討の結果、防舷材反力は正規分布や対数正規分布などの信頼性設計法で扱いの容易な確率分布には従わないことが明らかとなった。このため、信頼性設計法において扱いが容易な確率分布として評価を行うため、FORM(First-Order Reliability Method)を用いて棧橋の杭を対象とした信頼性解析を行い、確率分布を提案した。

2. 船舶接岸エネルギーの従う確率分布

上田ら^{6),7),8),9),10),11)}の一連の研究では、防舷材の設計にかかわる上記パラメタの従う確率分布を評価するとともに、防舷材の破壊確率をモンテカルロシミュレーションなどにより算出している。本研究では、上述した既往の研究により明らかにされている防舷材の設計パラメタの従う確率分布を用いて、まず船舶接岸エネルギーの確率分布の検討を行う。

船舶接岸エネルギーに関する諸元(船舶質量、接岸速度、仮想質量係数、偏心係数)は、船舶の重量トン DWT の関数であり、既往の研究によると、これら諸元は船舶重量トン数のべき乗値に対して対数正

規分布に従うため、船舶の重量トン数のべき乗に対して対数正規分布に従う確率分布 P_X を乗じることによって表現できる。なお、重量トン数とは船舶が積載し得る貨物の最大重量をトン単位で表した数である。

船舶接岸エネルギーに関する諸元は、互いに独立な確率変数を用いて、式(1)～式(5)のように表現できる⁹⁾。なお、排水トン数とは、静止状態で浮いている船体が排除する水の量のトン数である。

①船舶質量（排水トン数）

$$DT = P_{DT} \cdot DWT^{0.957} \quad (\text{コンテナ船}) \quad (1)$$

$$DT = P_{DT} \cdot DWT^{0.913} \quad (\text{一般貨物船}) \quad (2)$$

②接岸速度（m/s）

$$V_b = P_{Vb} \cdot DWT^{-0.338} \quad (3)$$

③仮想質量係数

$$C_M = P_{CM} \cdot DWT^{0.022} \quad (4)$$

④偏心係数

$$C_e = P_{Ce} \cdot DWT^{-0.015} \quad (5)$$

ここで、各パラメタの従う確率分布は表-1 および表-2 のようになる。ここに、 μ および σ はそれぞれ平均値及び標準偏差である。また、重量トン数は日本のある主要な港における船舶の入港実績での確率分布である。まず、表に示された船舶を対象に、接岸エネルギーの従う確率分布を検討する。

表-1 パラメタの従う確率分布（コンテナ船）

	確率分布	μ	σ
P_{DT} （船舶質量）	対数正規分布	2.131	0.156
P_{Vb} （接岸速度）	対数正規分布	2.040	0.714
P_{CM} （仮想質量係数）	対数正規分布	1.491	0.054
P_{Ce} （偏心係数）	対数正規分布	0.621	0.019
DWT	対象船舶=10,000DWT	9322	6886
	対象船舶=15,000DWT	12345	7650
	対象船舶=20,000DWT	13318	10234
	対象船舶=35,000DWT	30265	15117

表-2 パラメタの従う確率分布（一般貨物船）

	確率分布	μ	σ
P_{DT} （船舶質量）	対数正規分布	3.128	0.238
P_{Vb} （接岸速度）	対数正規分布	2.040	0.714
P_{CM} （仮想質量係数）	対数正規分布	1.491	0.054
P_{Ce} （偏心係数）	対数正規分布	0.621	0.019
DWT 対象船舶=15,000DWT	対数正規分布	6729	6974

船舶接岸エネルギー E は式(6)により算出される。

$$E = \frac{1}{2} P_{DT} \cdot P_{Vb}^2 \cdot P_{CM} \cdot P_{Ce} \cdot DWT^n \quad (6)$$

ただし、 $n=0.288$ （コンテナ船）、 0.244 （一般貨物船）である。

式(6)よりわかるように接岸エネルギーは P_{Vb} と

DWT に関して高次の項を含んでいるため、まずこれらの確率分布を算出した。算出にあたっては、まず各変数の確率分布を用いて、各変数について累積分布で 5×10^{-4} 刻みで 2000 個の値を算出し、これを n 乗して P_{Vb}^2 と DWT^n の平均値および標準偏差を算出した。次に、 P_{DT} 、 P_{Vb}^2 、 P_{CM} 、 P_{Ce} 、 DWT^n を独立な確率変数として船舶接岸エネルギーの平均値及び標準偏差を式(7)により求めた。

$$E = g(X_1, X_2, \dots, X_n)$$

$$\mu_E = g(\mu_{X_1}, \mu_{X_2}, \dots, \mu_{X_n}) \quad (7)$$

$$\sigma_E^2 = \sum_{i=1}^n \left(\left. \frac{\partial g}{\partial X_i} \right|_{X_i=\mu_{X_i}} \right)^2 \sigma_{X_i}^2$$

ここに、 X_i は各確率変数、 μ および σ はその添字の変数に関するそれぞれ平均値および標準偏差である。

検討結果を表-3 に示す。ここで、接岸エネルギーの変動係数に最も影響を及ぼす因子は P_{Vb}^2 であり、 P_{Vb}^2 の変動係数は 0.76 である。このため、接岸エネルギーの確率分布はどのケースにおいても 0.8 程度の値となる。次に、防舷材反力の分布を検討するためには接岸エネルギーの従う確率分布を評価する必要がある。このため、モンテカルロシミュレーションを別途実施して接岸エネルギーの従う確率分布を推定した。コンテナ船 10000DWT について、10 万回の試行回数結果を図-1 に示す。図より、接岸エネルギーの従う確率分布は対数正規分布であるとみなせることがわかる。このため、表-3 に示した平均値と標準偏差を用いた対数正規分布の理論頻度分布を曲線で重ねて示したが、両者はよく一致している。他の DWT についても一致は良好であった。よって以下では、接岸エネルギーの従う確率分布を表-3 に示す平均値と標準偏差をもつ対数正規分布として扱う。

表-3 接岸エネルギーの平均値と標準偏差

	μ_E (kJ)	σ_E (kJ)	変動係数
コンテナ船 10,000 DWT	61.27	48.48	0.79
コンテナ船 15,000 DWT	67.19	52.77	0.79
コンテナ船 20,000 DWT	67.70	53.68	0.79
コンテナ船 35,000 DWT	87.91	68.55	0.78
一般貨物船 15,000 DWT	54.31	43.25	0.80

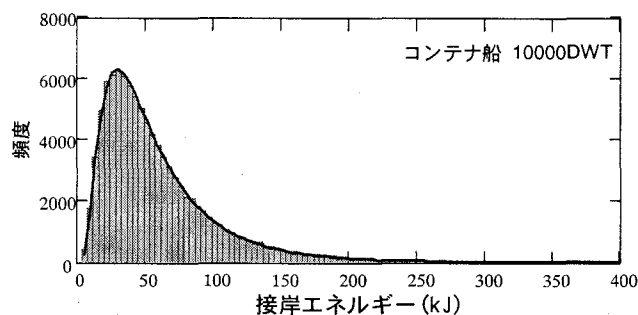


図-1 モンテカルロシミュレーション結果

3. 防舷材反力の従う確率分布

次に防舷材反力の従う分布を検討する。防舷材の仕様は形状と H (高さ)× L (長さ)で表される。本研究では最も一般的な防舷材である V 型防舷材を対象とした。防舷材の高さは全ての対象船舶で同一とし、吸収エネルギーと接岸エネルギーから決定される所要長さと防舷材高さのバランスを考慮して 600H(600mm)とした。各対象船舶の防舷材の長さは、接岸エネルギーの 95%信頼値が防舷材の最大吸収エネルギーを上回らない長さとした。V 型 600H×1000L の最大吸収エネルギーは 50%圧縮時の吸収エネルギーの平均値 106kJ に性能公差-10%を考慮した 95.4kJ とした。表-4 に対象船舶ごとの防舷材長さを、図-2 に V 型 600H×1000L の接岸エネルギーと反力の関係を示す。表-3 の接岸エネルギーの確率分布を防舷材長さで除して、防舷材長さ 1m 当りの確率分布に置き換え、次に P_{1b} と DWT の高次の項と同様に、累積分布で 5×10^{-5} 刻みで 20000 個の接岸エネルギーの値を算出し、これを図-2 に当てはめて防舷材反力の確率分布を算出した。また最大吸収エネルギー以上の接岸エネルギーは作用しないものとして、防舷材長さ 1m 当りの反力の最大値は、50%圧縮時の反力の平均値である 594kJ とした。

表-4 防舷材の長さ

	防舷材長さ (mm)
コンテナ船 10,000 DWT	1,500
コンテナ船 15,000 DWT	1,700
コンテナ船 20,000 DWT	1,700
コンテナ船 35,000 DWT	2,200
一般貨物船 15,000 DWT	1,400

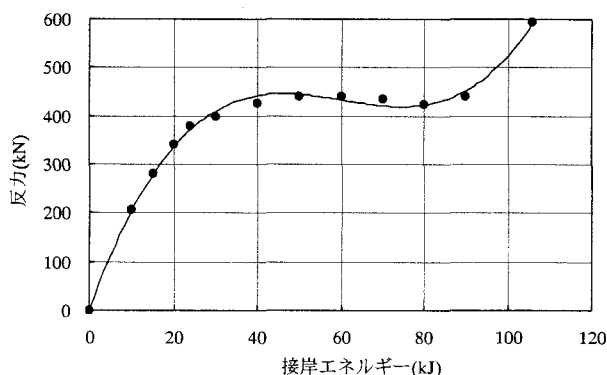


図-2 防舷材性能曲線

防舷材反力の算出結果の例を図-3 に示す。図-2 に示した防舷材の性能曲線において吸収エネルギーと防舷材反力の関係が非線形であるため、ある値の範囲で確率密度が非常に高い分布となる。なお、防舷材反力が最大の部分で確率密度がやや大きいのは、防舷材反力の最大値を設定しているためである。防舷材反力の確率分布は、正規分布や対数正規分布な

どの確率的に扱いやすい分布ではない。部分安全係数を用いるレベル 1 信頼性設計法においては、全ての設計変数が正規分布または対数正規分布等に従う場合は安全係数を合理的な形で設定することが出来るが、そうでないときには適用が困難である。従ってこの結果は、防舷材反力の作用による栈橋の設計に対して信頼性設計法を適用するにあたって困難な点となる。このため以下では、確率的に扱いやすい形式で防舷材反力の分布を設定することを検討する。

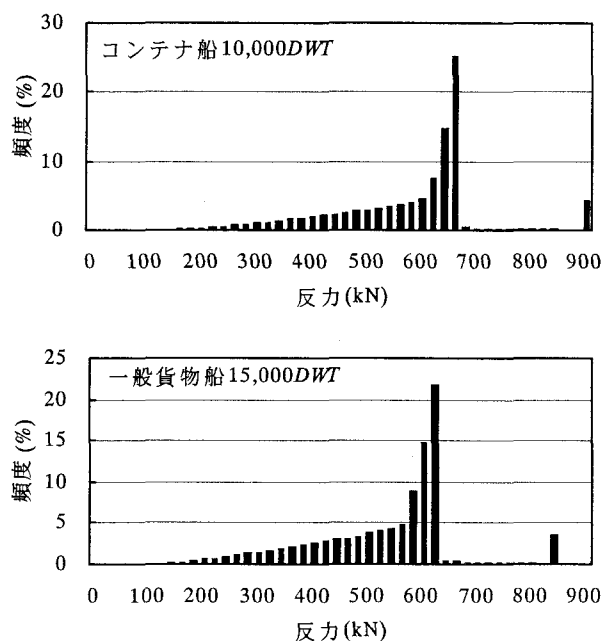


図-3 防舷材反力確率分布

4. 信頼性理論を用いた防舷材反力確率分布の検討

栈橋の杭を対象に、防舷材反力の確率分布の検討を行う。検討にあたり、表-5 に示す水深および対象船舶（以下、設計における対象船舶の DWT を計画 DWT と呼ぶ）を対象とする。ここで、対象船舶は表-1 および表-2 に示した船舶と異なっているため、実際の DWT の従う確率分布を評価する必要がある。

表-5 検討対象

栈橋の計画水深	対象船舶	
-7.5m	一般貨物船	5,000 DWT
-11.0	一般貨物船	18,000 DWT
-14.0m	一般貨物船	55,000 DWT
	コンテナ船	50,000 DWT

表-1 および表-2 より、実際の DWT 平均値と計画 DWT の比の値の平均値は 0.44~0.93 の範囲にあり、標準偏差は 0.43~0.69 である。ここで、標準偏差にはばらつきは少ないが、平均値の比はコンテナ船では 0.67~0.93、一般貨物船では 0.44 であり、船舶の

種類によって違いが大きい。そこで、以下ではコンテナ船の場合の実際の DWT 平均値と計画 DWT の比の平均値を 0.9、一般貨物船の場合の比の平均値を 0.5 とする。また、比の標準偏差は 0.6 とする。一般貨物船 5000DWT の接岸エネルギーの分布は図-4 のようになる。

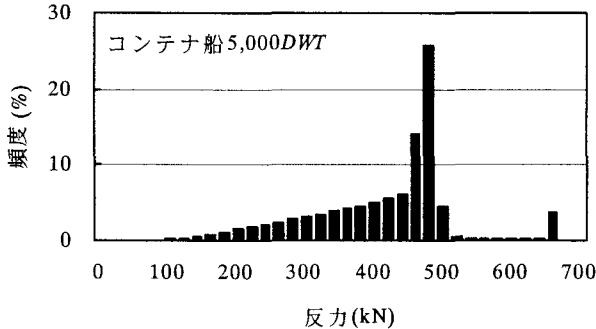


図-4 防舷材反力分布

さらに、信頼性理論を用いて、栈橋の杭の破壊確率を算出する。検討にあたっては、杭の曲げ破壊と支持力破壊のそれぞれを対象とした。

杭頭モーメントの検討における性能関数 M は、式(8)～(10)のとおりである。

$$M = \psi - \frac{\sigma_{cs}}{f_c} - \frac{\sigma_{Ms}}{f_R} \quad (8)$$

$$\sigma_{cs} = \frac{d + q + C_3(C_1 R_h + C_2)(h + 1/\beta)}{A} \quad (9)$$

$$\sigma_{Ms} = \frac{(C_1 R_h + C_2)(h + 1/\beta)}{Z} \quad (10)$$

ここで、 ψ は耐力式の精度を表すパラメタ、 σ_{cs} は軸力に起因する応力、 σ_{Ms} は曲げモーメントに起因する応力、 f_c は鋼材の降伏軸方向圧縮応力、 f_R は鋼材の降伏曲げ引張応力、 d は床版自重、 q は上載荷重、 R_h は防舷材反力、 h は杭突出長、 $1/\beta$ は杭の特性長、 A は杭の断面積、 Z は杭の断面係数である。また、 C_1 、 C_2 、 C_3 は線形骨組解析により得られる係数である。

杭の支持力の検討における性能関数 B は、式(11)および式(12)のとおりである。

$$B = \eta_1 30 N A_p + \eta_2 2 \bar{N} A_s - P \quad (11)$$

$$P = d + q + C_3(C_1 R_h + C_2)(h + 1/\beta) \quad (12)$$

ここで、 η_1 は先端支持力の算定精度を表すパラメタ、 η_2 は周面摩擦力の算定精度を表すパラメタ、 N は杭先端地盤の N 値、 $\bar{N}$ は杭根入れ全長に対する平均 N 値、 A_p は杭の先端面積、 A_s は杭周の全表面積である。他の記号の意味は杭頭モーメントの式と同じである。

設計変数の内、確率的に扱うものは、防舷材反力 R_h 、杭の特性長 $1/\beta$ 、鋼材の降伏軸方向圧縮応力 f_c 、

鋼材の降伏曲げ引張応力 f_R 、耐力式の精度を表すパラメタ ψ 、先端支持力の算定精度を表すパラメタ η_1 および周面摩擦力の算定精度を表すパラメタ η_2 とした。それぞれの変数の確率分布は森屋・長尾¹²⁾に従い表-6 のとおりとした。ここに、平均値のズレとは各変数の平均値と従来の設計で用いられる値（公称値）の比により定義される値である。

表-6 設計変数の確率分布¹²⁾

	平均値 のズレ	変動係数
杭の特性長 $1/\beta$	1.00	0.10
鋼材の降伏軸方向圧縮応力 f_c	1.00	0.065
鋼材の降伏曲げ引張応力 f_R	1.00	0.065
耐力式精度パラメタ ψ	1.17	0.10
先端支持力算定精度パラメタ η_1	0.93	0.20
周面摩擦力算定精度パラメタ η_2	1.60	0.35

破壊確率の算出方法は次のとおりである。

①図-4 に示した防舷材反力の頻度分布の各代表値を用いて破壊確率を算出する。その際、防舷材反力の値は確定値とし、その他の確率分布は表-6 に示す値とする。破壊確率の算出は FORM を用いて破壊点周りの安全性指標をまず算出し、安全性指標から破壊確率に換算する。

②すべての代表値についてその確率密度と破壊確率を乗じ、この総計を取ることで破壊確率（以下、 P_f と呼ぶ）を算出する。

次に、防舷材反力の確率分布として、確率的に扱いやすい正規分布を仮定して FORM により破壊確率の算出を行う（以下、 $P_{f,cal}$ と呼ぶ）。仮定した分布形状は表-7 に示す 3 ケースで各々次のように設定した。

表-7 防舷材反力の確率分布

	対象船舶	反力の 平均値 (kN)	反力の 標準偏差 (kN)	変動 係数
ケース 1	一般貨物船 5,000 DWT	413.79	104.86	0.25
	一般貨物船 18,000 DWT	539.21	130.82	0.24
	一般貨物船 55,000 DWT	724.00	179.16	0.25
	コンテナ船 50,000 DWT	923.16	221.14	0.24
ケース 2	一般貨物船 5,000 DWT	463.00	14.00	0.03
	一般貨物船 18,000 DWT	603.00	9.00	0.01
	一般貨物船 55,000 DWT	823.00	9.00	0.01
	コンテナ船 50,000 DWT	1043.00	9.00	0.01
ケース 3	一般貨物船 5,000 DWT	370.00	115.00	0.30
	一般貨物船 18,000 DWT	485.00	146.00	0.30
	一般貨物船 55,000 DWT	650.00	196.00	0.30
	コンテナ船 50,000 DWT	830.00	249.00	0.30

①ケース 1：図-4 のもとになった 20000 個の防舷材反力の標本（以下、反力標本）の平均および標本標準偏差を有する正規分布

②ケース2：反力標本で頻度の高い部分において確率密度の積分値が等しくなる正規分布

③ケース3：変動係数をケース1より大きい 0.3 とし、平均値+3×標準偏差の値がケース1とほぼ等しくなる正規分布

ここで、ケース3は、破壊確率に影響を及ぼす確率分布の裾部分の値が一致するように定めたものである。図-5に一般貨物船 18000DWT について、先に求めた防舷材反力の頻度分布と、ケース1～3の正規分布の確率密度を重ねて示す。

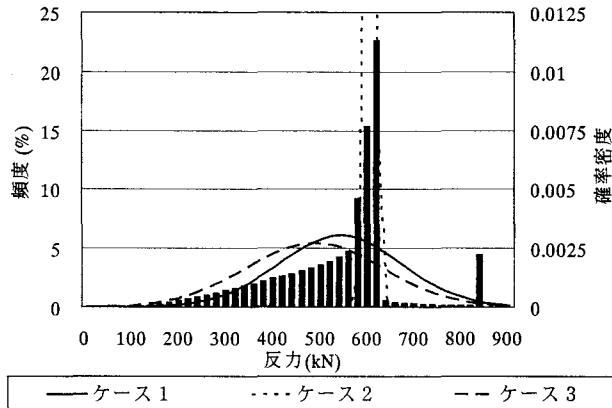


図-5 一般貨物船 18,000DWT に対する確率分布

P_{ft} と $P_{f,cal}$ を曲げ破壊および支持力破壊についてそれぞれ算出し、さらに2つの破壊モードを考慮したシステム破壊確率も併せて算出した。システム破壊確率は、破壊モードの相関を考慮して Madsen et al.¹³⁾ に従って算出した。

ケース1における P_{ft} と $P_{f,cal}$ の比較を図-6(a)～(c)に、ケース2および3のうち一般貨物船 18000DWT とコンテナ船 50000DWT のシステム破壊確率の比較を図-6(d)に示す。システム破壊確率に対する支配的な破壊モードは、杭の断面係数が大きくなるに従い曲げから支持力へ変わる。支持力破壊の最も支配的なパラメータは杭径であることから、例えば図-6(b)の断面係数 0.005m³ 付近のように、杭径が同一の場合には肉厚が変化しても破壊確率はほぼ一定値となっている。また支持力破壊は P_{ft} と $P_{f,cal}$ の差が小さく防舷材反力の分布形状の影響をあまり受けていない。曲げ破壊については防舷材反力の分布形状に影響を受けるが、図-6(a)に見られるように P_{ft} と $P_{f,cal}$ は、一般的な杭式横棧橋の破壊確率と考えられる 0.01～0.001 程度の範囲では概ね一致している。従って、ケース1の方法により信頼性設計において用いる防舷材反力の確率分布を評価してもよいと考えられる。一方、図-6(d)に示すように、ケース2およびケース3では P_{ft} と $P_{f,cal}$ の違いがやや大きい。このため、ケース1の考え方を採用することが適切と考えられる。

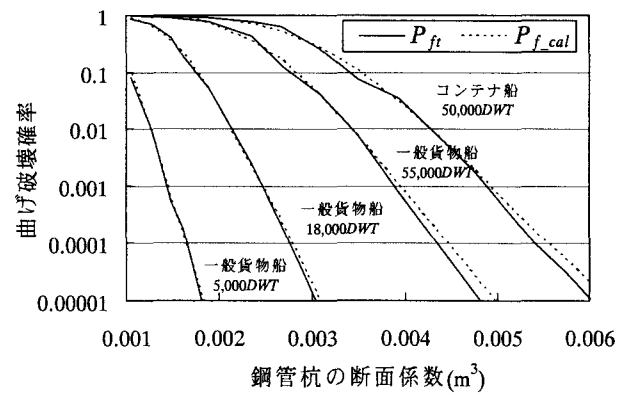


図-6(a) 曲げ破壊の P_{ft} と $P_{f,cal}$ の比較

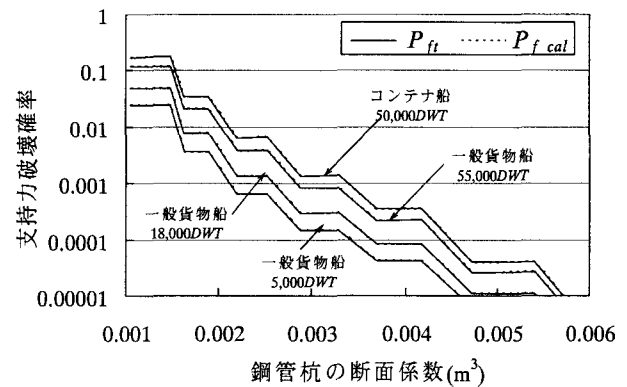


図-6(b) 支持力破壊の P_{ft} と $P_{f,cal}$ の比較

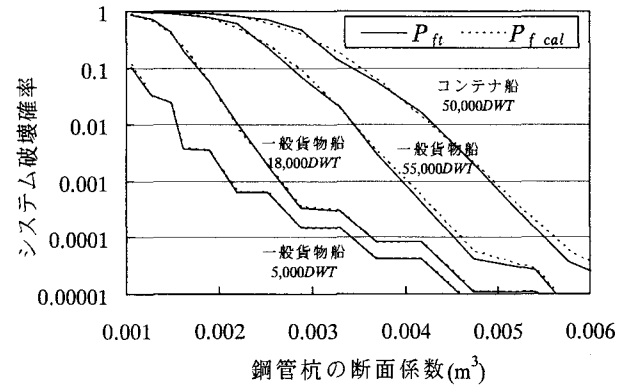


図-6(c) システム破壊の P_{ft} と $P_{f,cal}$ の比較

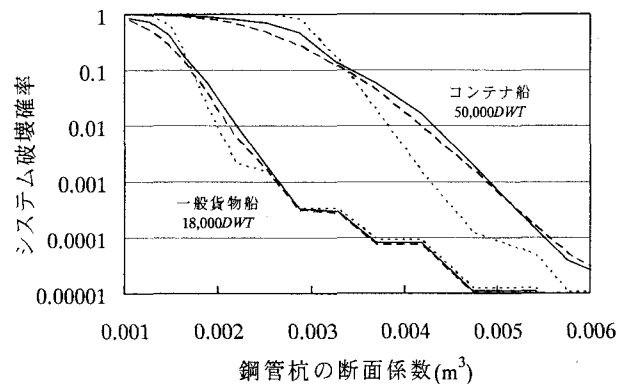


図-6(d) システム破壊の P_{ft} と $P_{f,cal}$ の比較

5. 現行設計の防舷材反力との比較

現行設計法で用いられる防舷材反力の標準的な設計値を港湾の技術基準¹⁴⁾により算出し、提案した正規分布との比較を行う。船舶接岸エネルギーの算出に用いたパラメータを表-8に示す。また算出された接岸エネルギー、防舷材長および防舷材反力を表-9に示す。防舷材長および防舷材反力の算定における防舷材 1m あたりの吸収エネルギーおよび反力は、現行設計法と同様に設計標準圧縮時（45%圧縮時）の値に性能公差±10%を考慮した値を用いた。

表-8 防舷材反力設計値のパラメータ

対象船舶	船舶の 満載排水量 (DT)	船舶の 接岸速度 (V_b)	仮想質量 係数 (C_M)	偏心 係数 (C_e)
一般貨物船5,000DWT	7,500t	12.5cm/s	1.913	0.736
一般貨物船18,000DWT	24,900t	8.0cm/s	1.873	0.736
一般貨物船55,000DWT	69,000t	5.5cm/s	1.782	0.745
コンテナ船50,000DWT	69,700t	6.0cm/s	1.959	0.695

表-9 防舷材反力設計値

対象船舶	船舶接岸 エネルギー (kJ)	防舷材長 (mm)	防舷材反力 (kN)
一般貨物船5,000DWT	82.50	1000	484.00
一般貨物船18,000DWT	109.84	1300	629.20
一般貨物船55,000DWT	138.55	1700	822.80
コンテナ船50,000DWT	170.81	2200	1016.40

防舷材反力の現行設計法における設計値と、提案する確率分布の平均値の比の値は一般貨物船5000DWTで0.85、18000DWTで0.86、55000DWTで0.88、コンテナ船50000DWTで0.87であり、平均的には0.87である。このため、信頼性設計において用いる防舷材反力の確率分布として、表-10に示す正規分布を提案する。ここで、設計値とは、現在設計で用いられる防舷材反力の値である。

表-10 信頼性設計で用いる防舷材反力の正規分布

平均値／設計値	変動係数
0.87	0.25

6. まとめ

本研究では、岸壁の信頼性設計法の検討の一環として、船舶接岸力により生じる防舷材反力の確率分布について検討した。本研究により得られた知見は以下のとおりである。

①船舶接岸エネルギーの従う確率分布は対数正規分

布である。しかしながら、防舷材の吸収エネルギーと防舷材反力は強い非線形の関係にあるため、防舷材反力の従う確率分布は正規分布などの確率的に扱いやすい分布とはならない。

②このため、信頼性理論を用いて棧橋の杭の破壊確率を算出することによって扱いやすい形式での防舷材反力の確率分布を提案した。

③現行設計法で用いられている防舷材反力設計値をもとに、信頼性設計で用いるための防舷材反力の確率分布を提案した。

参考文献

- 1) 長尾 毅：港湾構造物の技術基準の改訂動向，第5回鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集，土木学会鋼構造委員会，pp.9-20，2002。
- 2) 国土交通省：土木・建築にかかる設計の基本，2002
- 3) 長尾 毅：ケーソン式防波堤の外的安定に関する信頼性設計法の適用，土木学会論文集，No.689，I -57，pp.173-182，2001。
- 4) 長尾 毅：ケーソン式防波堤の終局曲げ安全性照査に関する信頼性設計手法の提案，土木学会論文集，No.696，I -58，pp.173-184，2002。
- 5) 長尾 毅，岡田達彦，上田 茂：FORMに基づく防舷材の信頼性設計法に関する研究，海洋開発論文集，第19巻，pp.671-676，2003
- 6) 上田 茂，平野敏彦，寺崎 誠，山本修司，白石悟，山瀬晴義：船舶の統計特性に基づく船舶接岸用防舷材の設計に関する研究，土木学会第56回年次学術講演会，pp.102-103，2001。
- 7) 上田 茂，平野敏彦，岡田達彦，山本修司，白石悟，山瀬晴義：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～防舷材の品質が破壊確率に与える影響について～，土木学会第57回年次学術講演会，pp.115-116，2002。
- 8) Ueda, S., R. Umemura, S. Shiraishi, T. Yamamoto, Y. Akakura and S. Yamase: Statistical Design of Fenders for Berthing Ship, Proc. of the 11th ISOPE, Vol.IV, pp.583-588, 2001.
- 9) Ueda, S., T. Hirano, S. Shiraishi, T. Yamamoto, and S. Yamase: Statistical Design Method of Fenders for Berthing Ship, Proc. of the 12th ISOPE, Vol.III, pp.554-551, 2002.
- 10) Ueda, S., T. Hirano, S. Shiraishi, T. Yamamoto, and S. Yamase: Reliability tatistical Design Method of Fenders for Berthing Ship, Proc. of the 12th ISOPE, Vol. III, pp.554-551, 2002.
- 11) Ueda, S., T. Hirano, S. Shiraishi, T. Yamamoto, and S. Yamase: Reliability Design Method Of Fender For Berthing Ship, Proc. of the 30th PIANC, pp.692-707, 2002.
- 12) 森屋陽一，長尾 毅：係留施設の信頼性設計における地震時上載荷重，海洋開発論文集，第19巻，pp.713-718，2003。
- 13) Madsen, H. O., Krenk, S., and Lind, N. C. : Methods of Structural Safety, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1986.
- 14) 運輸省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説，日本港湾協会，1999。