

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

上 田 茂* ・ 梅 村 亮** ・ 白 石 悟***
山 本 修 司**** ・ 赤 倉 康 寛***** ・ 山 瀬 晴 義*****

1. ま え が き

船舶接岸用防舷材は、船舶接岸エネルギーを吸収し接岸力を和らげる目的で設置される。船舶接岸エネルギーは、船舶の仮想質量および接岸速度の自乗に比例するが、接岸船舶の回転による偏心係数を考慮して求められる。現行法は、最大船型もしくは標準船型に対して、実測等に基づく設計接岸速度及び偏心係数を与えて、確定論的に求める。近年船型の大型化が著しく、とくにコンテナ船は 60,000~80,000 DWT 級のものが建造されているが、我が国では、施設整備が船舶の大型化に対応できていないので、計画船型を超えるものは喫水調整を強いられている。港湾の施設の技術上の基準 (1999) によれば、標準船型は船舶明細を統計処理し、おおむね 75%信頼値で与えられる。したがって、そもそも入港船舶の重量トン数が計画船型を上回るのとはより、船型の大型化によって喫水調整はするものの計画船型の排水トン数を超える船舶が接岸するおそれがある。筆者らは供用中のバースで入港船舶の実態調査を行った結果、船舶接岸用防舷材の設計においては当然このことを考慮すべきであると考えた。また、設計接岸速度は実測等に基づくこととされているが、この数値の統計的検討は必ずしも十分ではない。

以上のことから、本研究では船型 (重量トン数) DWT, 船舶質量 (接岸時排水トン数) M , 接岸速度 V_0 , 仮想質量係数 C_M , 偏心係数 C_e などの、接岸エネルギー算定に係わる諸元を確率変数として取り扱い、また、ゴム防舷材の吸収エネルギーのカタログ値 E_{cat} に対する変動を考慮して、統計的手法による船舶接岸用防舷材の設計について考察した。

2. 本研究の手順

本研究は以下の手順で行った。

- * 正会員 工 博 鳥取大学教授 工学部土木工学科
- ** 正会員 (株)開発コンサルタント
- *** 正会員 工 博 港湾技術研究所構造部海洋構造研究室長
- **** 正会員 工 博 港湾技術研究所計画設計基準部設計基準研究室長
- ***** 正会員 工 博 港湾技術研究所計画設計基準部主任研究官
- ***** 工学士 (株)プリダストン 海洋商品開発部

- ① 実在のバースにおいて、計画船型ごとに接岸船舶の重量トン数 DWT の確率分布を調査した。
- ② 守屋ら (1991) による横浜港での接岸速度の調査結果を用いて、重量トン数 DWT と接岸速度 V_0 の関係、及びその確率分布を求めた。
- ③ 赤倉ら (1998) による船舶諸元の回帰式を用いて、重量トン数 DWT と仮想質量係数 C_M および偏心係数 C_e の関係、及びその確率分布を求めた。
- ④ ゴム防舷材の製品ごとの吸収エネルギーのカタログ値 E_{cat} に対する係数 Z の確率分布を求めた。
- ⑤ 以上の確率変数を与え、設計基準式を $G=Z \cdot E_{cat} - M \cdot V_0^2 \cdot C_M \cdot C_e / 2$ として、モンテカルロシミュレーションを行い、吸収エネルギーに対する接岸エネルギーの超過確率を求めた。
- ⑥ 適切な超過確率 (許容超過確率) および所要の安全係数を検討した。

3. 船舶接岸用防舷材に関する確率変数の統計的特性

(1) 入港船舶の重量トン数の確率分布推定

表-1 は B 港の X, Y, Z 埠頭で調べた船舶の接岸実績である。この 6 年間に計画船型を超える船舶がかなりあることがわかる。

しかし、図-1 に示すように、これらの船舶の大半は満載喫水で入港しているわけではなく、とくに計画船型を超える船舶では喫水調整をしている。そこで、実績に基づいて図-2 のように接岸船舶の分布を求め、計画船型ごとに接岸船舶の重量トン数の確率分布を推定した。対数正規分布の当てはめについては、度数密度が、 $f(x_i) = f_i(\text{度数}) / N(\text{標本総度数})$ であるから、期待度数 F_i は $F_i = Nf(x_i)$ で求める。

$f(x_i)$ は対数正規密度関数であるから、

$$f(x_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta x} e^{-\frac{(\ln x_i - \mu_x)^2}{2\zeta^2}} \dots\dots\dots (1)$$

$$\lambda = \ln \mu_x - \zeta^2 / 2 \} \dots\dots\dots (2) \\ \zeta = \ln(1 + \sigma_x^2)$$

(2) 重量トン数と各影響要因関係

a) 船舶質量

表-1 船舶の入港状況

計画船型	水深 (m)	総入港数 (1993~1998)	計画船型以上 の船舶数	満載での入港 (計画船型以上)
10,000	12	5144	240	1 (0)
15,000	12	3349	991	26 (0)
20,000	12	2815	632	10 (0)
35,000	10	9357	4112	20 (0)

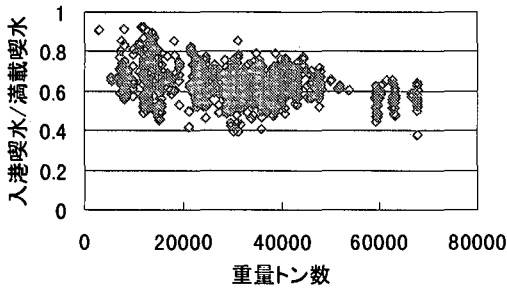
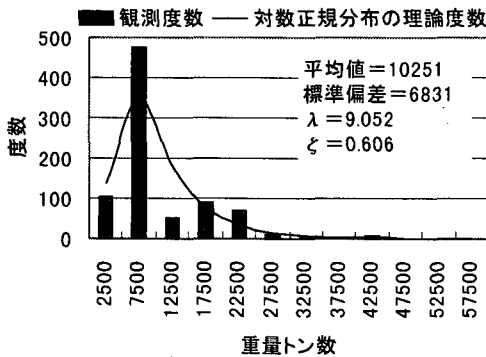
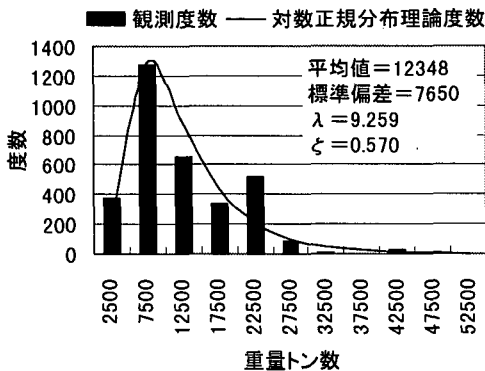


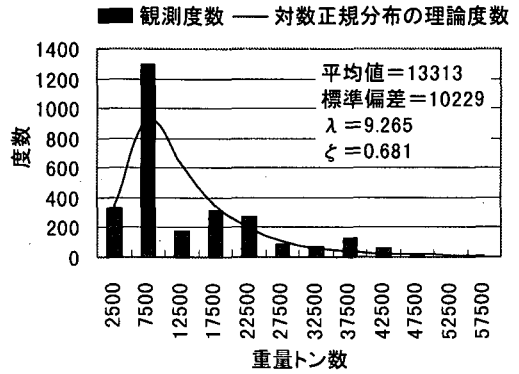
図-1 入港時の船舶の喫水調整



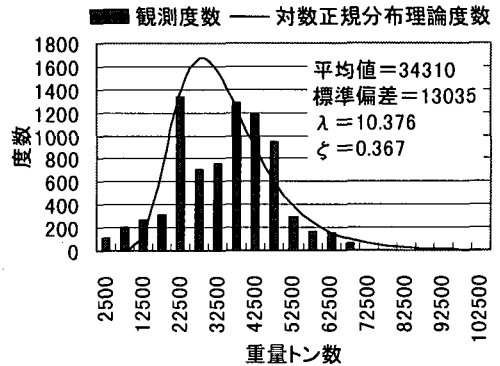
(a) 対象船舶 10000 DWT



(b) 対象船舶 15000 DWT



(c) 対象船舶 20000 DWT



(d) 対象船舶 35000 DWT

図-2 各計画船型の重量トン数の確率分布

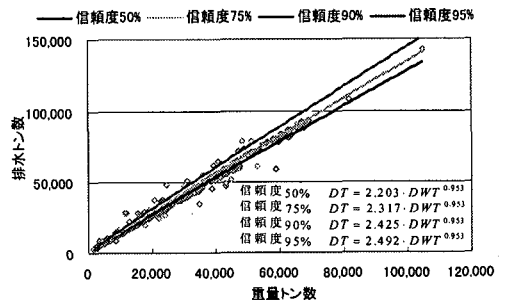


図-3 重量トン数と排水トン数の関係

船舶質量は図-3に示す重量トン数との関係(1998)から算定した。この図は満載時に対する関係であるが、計画船型を超えるものについては、つぎの2方法で入港時

の喫水調整を考慮した。方法1)については、実測では計画船型以上の船舶は満載喫水の80%以下の喫水で(入港していた(図-1)ので、乱数発生させた重量トン数が計画船型以上の場合には満載排水トン数に0.8を乗じた。また、方法2)については、実測値をそのまま用いることとし、実測値の重量トン数から満載排水トン数を算定し、これに入港時喫水比(入港喫水/満載喫水)を乗じた。

b) 接岸速度

船舶の接岸は、はじめ船首もしくは船尾が接岸し、続いてもう一方が接岸する。守屋ら(1991)の調査結果に

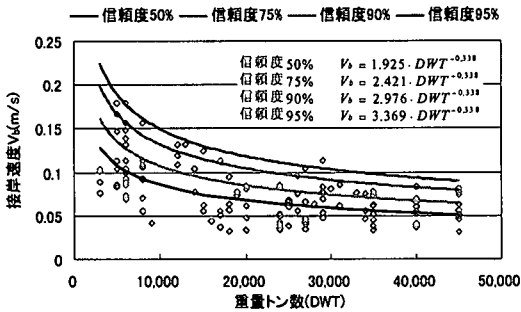


図-4 重量トンと接岸速度の関係

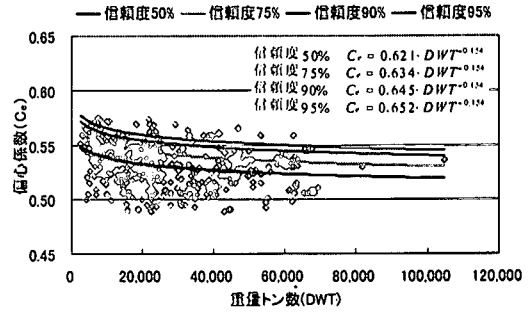


図-6 重量トン数と偏心係数の関係

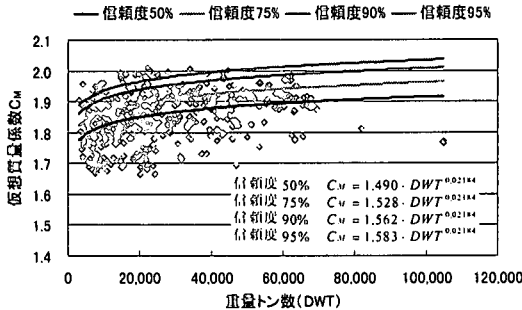


図-5 重量トン数と仮想質量係数の関係

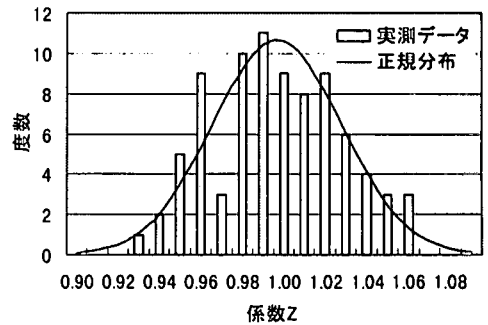


図-7 変数Zの度数分布と期待度数

よると、船首接岸の接岸速度が大きい傾向があるが、船尾接岸の場合にも接岸速度が大きい事例があるので、ここでは船首・船尾接岸速度を区別せずに統計解析し、コンテナ船の重量トン数と接岸速度の関係を推定した。

c) 仮想質量係数

船舶の仮想質量は、船舶質量に仮想質量係数を乗じて求められる ($M_s = C_M \cdot M$)。本研究では、赤倉ら (1998) が統計解析に用いた船舶について、満載喫水 d 、船幅 B 及びブロック係数 C_b を与えて、上田 (1981) による仮想質量係数を算定し、重量トン数との関係を推定した。

$$C_M = 1 + \frac{\pi}{2C_b} \times \frac{d}{B} \quad \dots\dots\dots (3)$$

d) 偏心係数

偏心係数は、船舶が係留施設に接岸後の回転による運動エネルギーの消費を考慮して算定されるもので、次式で与えられる。

$$C_e = \frac{1}{1 + (l/r)^2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

l : 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) であるが、防舷材が所定の間隔で設置されている場合には、港湾の施設の技術上の基準 (1999) により、接岸点近傍の2つの防舷材までの距離について計算し、偏心係数が大きくなる方とする。

r : 船舶の重心を通る鉛直軸まわりの環動半径 (m)。

これらに基づいて偏心係数を計算し、図-6に示す重量トン数との関係を求めた。

(3) 吸収エネルギーの確率分布関数

ゴム防舷材の製品ごとの吸収エネルギー E_{cat} に対する係数 Z の確率分布関数を求める。係数 Z は、吸収エネルギーがカタログ値と同一であれば1.0、-10%なら0.9というようにする。この係数 Z は、正規分布に当てはまり、平均値は0.997、標準偏差は0.031であった。図-7は、係数の度数分布と期待度数である。

4. 吸収エネルギーに対する接岸エネルギーの超過確率

本章では、これまでに示した各確率変数の統計的特性を考慮してモンテカルロシミュレーションを行い、吸収エネルギーに対する接岸エネルギーの超過確率を求めた。シミュレーション回数は、10,000回とした。

各確率変数の乱数は、個々の統計的特性に基づいて発生させた。船舶質量は、3.で示した2つの方法によって与えた。図-8～10は、それぞれ排水トン数、接岸速度、接岸エネルギーの確率分布である。図-8及び10の(a)、(b)は、それぞれ乱数発生させた場合、実測値に基づく場合に対するものである。なお、ここでは、使用した防舷材の設計は、排水トン数、仮想質量係数、偏心係数については75%信頼値に基づき、また、接岸速度は、75%、

90%, 95%の信頼値に基づいて行った(表-2)。

図-11は、設計接岸速度を上記の信頼値に基づいて求めたときの、計画船型が10,000, 15,000, 20,000, 35,000 DWTのバースにおける、防舷材の吸収エネルギーに対する接岸エネルギーの超過確率である。ここに、計画船型10,000, 15,000, 20,000 DWTのバースについては、図-2(a), (b), (c)に示した入港船舶の確率分布関数に

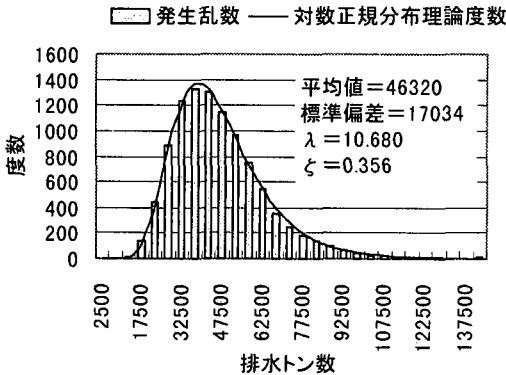


図-8(a) 排水トン数の確率分布
(方法1)

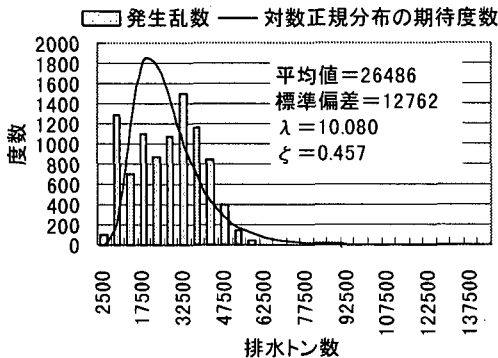


図-8(b) 排水トン数の確率分布
(方法2)

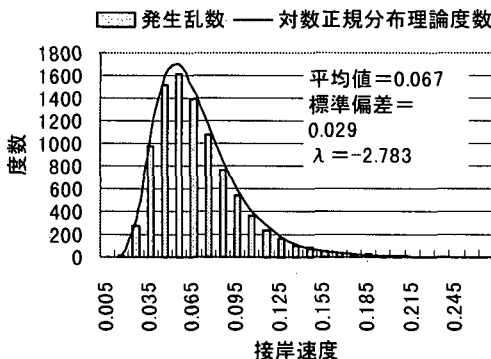


図-9 接岸速度の確率分布

基づいて、入港船舶を乱数発生させた場合、すなわち、3.に示した方法1)によって計算した結果である。ただし、このときには、計画船型を超えるものについても喫水調整はしていない。したがって、超過確率はやや過大

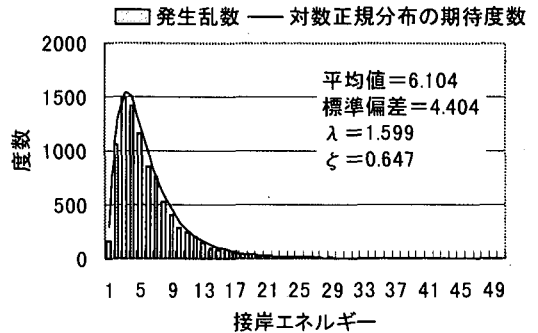


図-10(a) 接岸エネルギーの確率分布

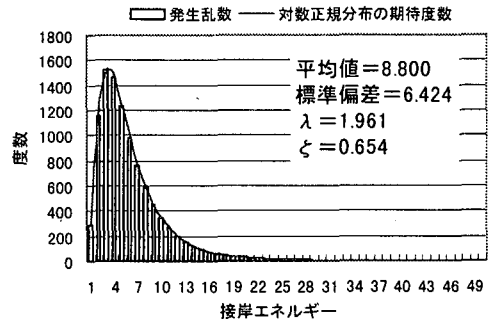


図-10(b) 接岸エネルギーの確率分布

表-2 防舷材の設計

接岸速度を75%信頼値としたとき				
対象船舶	10000	15000	20000	35000
排水トン	15024	22110	29084	49576
接岸速度(75%信頼値)	0.11	0.09	0.08	0.07
仮想質量係数	1.87	1.89	1.90	1.93
偏心係数	0.55	0.55	0.54	0.54
接岸エネルギー	9.1	10.2	11.1	13.0
吸収エネルギー	10.1	11.4	12.3	14.4
接岸速度を90%信頼値としたとき				
対象船舶	10000	15000	20000	35000
排水トン	15024	22110	29084	49576
接岸速度(90%信頼値)	0.13	0.12	0.10	0.09
仮想質量係数	1.87	1.89	1.90	1.93
偏心係数	0.55	0.55	0.54	0.54
接岸エネルギー	13.8	15.4	16.8	19.6
吸収エネルギー	15.3	17.2	18.6	21.8
接岸速度を95%信頼値としたとき				
対象船舶	10000	15000	20000	35000
排水トン	15024	22110	29084	49576
接岸速度(95%信頼値)	0.15	0.13	0.12	0.10
仮想質量係数	1.87	1.89	1.90	1.93
偏心係数	0.55	0.55	0.54	0.54
接岸エネルギー	17.6	19.7	21.4	25.0
吸収エネルギー	19.5	21.9	23.7	27.8

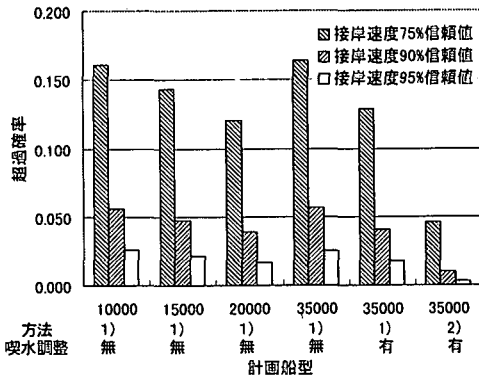


図-11 超過確率の算定結果

であると考えられる。35,000 DWT については、図-2 (d) に示した入港船舶の確率分布関数に基づく方法 1) と実測データに基づく方法 2) によって計算した結果である。この場合についても、方法 1) の喫水調整をしないときの超過確率は当然かなり大きい。実際現象をよく説明しているのは、35,000 DWT の方法 2) の喫水調整をしているときの結果である。

5. 防舷材の統計的手法による設計

ここでは、許容超過確率を変化させ、それぞれについて接岸エネルギーに対する安全係数を仮定し、許容超過確率を満足するために必要な防舷材の吸収エネルギーを算定した。安全係数の算定は次式を用いた。

$$E_f = Z_n \cdot E_{cat} > \gamma \cdot E_n \quad (5)$$

ここで、 E_f : 防舷材の吸収エネルギー (tfm), Z_n : 品質による吸収エネルギーのパラツキを考慮する係数の公称値, E_{cat} : 吸収エネルギーの規格値 (tfm), E_n : 船舶接岸エネルギーの公称値 (tfm), γ : 安全係数。

図-12 は許容超過確率を与えて求めた所要の安全係数と必要吸収エネルギーを示したものである。ここに、現行設計は、船型、仮想質量、偏心係数を 75% 信頼値、接岸速度を 95% 信頼値として求めたものである。許容超過確率に対する吸収エネルギーおよび安全係数は以下の手順で求めた。まず防舷材の吸収エネルギーを仮定し、入港船舶の重量トン数を実績に基づいて乱数発生させ、例えば安全係数 1.5 に対して超過確率を求めた。この手順を防舷材の吸収エネルギーおよび安全係数を変えて繰り返し計算し、所要の許容超過確率に対するそれらの値を求めた。図-12 で方法 1) の 10,000 DWT~35,000 DWT の喫水調整無しについては、安全率が大きい。

6. ま と め

①船舶の入港実態によると、標準船型を上回る重量ト

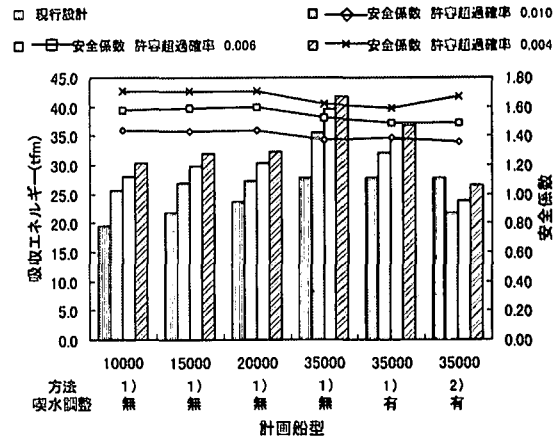


図-12 安全係数と必要吸収エネルギーの算定結果

ン数の船舶の入港が多く、吃水調整をしているにも拘らず現行設計で与える排水トン数を超える確率が高い。②重量トン数と接岸速度の関係およびその確率分布を求め、現行設計法における設計接岸速度の統計的意義を明らかにした。③許容超過確率を変えて求めた接岸エネルギーに対する安全係数はおおむね 1.3 から 1.5 であった。④以上のことから、船舶接岸用防舷材の設計において、接岸エネルギーは接岸船舶および接岸速度等の確率分布に基づいて検討する必要があることを明らかにした。また、現行設計法による場合には、この研究によって得られた接岸エネルギーに対して求めた安全係数を見込む必要があることを示した。⑤このことは、単に船舶接岸用防舷材の設計のみならず、船舶の大型化を適切に予測し、その確率分布に基づいて施設整備を行うこと重要性を示唆するものである。

謝辞：本研究にあたって、運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所から船舶接岸速度に関する調査にかかわる基礎データをいただいた。ここに記して謝意を表する。

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, 港研資料, No. 910, 23 p.
- 上田 茂 (1981): 大型タンカーの接岸力に関する研究, 港研報告, Vol. 20, No. 2, pp. 169-209.
- (社) 日本港湾協会 (1999): 港湾の施設の技術上の基準・同解説, pp. 48-55.
- 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.