

FORMに基づく防舷材の 信頼性設計法に関する研究

STUDY ON RELIABILITY-BASED DESIGN METHOD FOR FENDERS BASED ON FORM

長尾 毅¹・岡田達彦²・上田 茂³

Takashi NAGAO, Tatsuhiko OKADA and Shigeru UEDA

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

²学生員 鳥取大学 工学部土木工学科 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)

³フェロー会員 工博 鳥取大学教授 工学部土木工学科 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)

The reliability-based design method is regarded as the standard design method to be applied in the next edition of technical standard for port and harbour facilities. In this study, we have focused on the design method for fenders for berthing ship. First-Order Reliability Method is applied in order to calculate the failure probability of fenders by using the probability distributions of design parameters. Safety levels of fenders with present design method are clarified quantitatively. Moreover, partial safety factors for level-1 reliability-based design method are proposed.

Key Words : reliability-based design, fender, berthing force

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、設計法が担保する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ー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)がそのパラメー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。

現在、土木構造物の性能規定型設計基準の検討が進められている。構造物に要求される性能として何の指標を用いるべきかは構造物の種類や重要度などの要因によって異なるものであり、一律にある特定の指標によって代表させることは難しいが、構造物の破壊確率をその候補の一つとして取り上げることが妥当であると考えられる。その際、性能規定型の設計法においては、設計者に課せられる命題は「構造物の安全率をある特定の値以上に保つこと」ではなく、「構造物の破壊可能性をある特定の値以下に

保つこと」となる。そして、そのような命題に対して、安全率を用いた従来型の設計法は十分な解決方法を示すことが出来ない。従来型の設計法に変わる設計法として導入が期待されるものが信頼性設計法であり、構造物の破壊可能性を確率論的な方法を用いて許容値以下に収める手法である。ISO2394(構造物の設計法に関する一般原則)においても信頼性設計法が位置付けられており、信頼性設計法は今後、設計法の国際標準となるものと考えられる。

このような背景のもと、港湾基準の次期改正においては、信頼性設計法の全面的な導入が考えられている²⁾。その際、標準的な構造物に対する方法としては部分安全係数を用いるレベル1信頼性設計法を適用することとしている。ここで、レベル1信頼性設計法を用いる利点は、現行設計法と形式的に大差ない簡易な方法でありながら、目標とする安全性水準(目標破壊確率)を定量的に満足できる点にある。これに対して、レベル2以上の信頼性設計法(例えば、モンテカルロシミュレーションにより破壊確率を求める方法も広義には該当する)を適用する場合は、目標安全性に対してばらつきの少ない設計を行えるものの、設計計算は煩雑となる。このため設計者が独自の判断で採用する場合には問題ないものの、基準として全ての構造物に対してこれを強制するまでの熟度はないと判断される。ISO2394などの国際

標準規格においてレベル1信頼性設計法が標準的な方法として位置付けられているのもそのためであると考えられる。なお、特に重要度の高い構造物などに対しては必要に応じてレベル2以上の方法の適用が望ましいといえる。

本研究では、以上のような背景のもと、防舷材の安全性水準を信頼性理論に基づいて検討するとともに、レベル1信頼性設計法において用いる安全係数の検討を行い、性能規定型の港湾構造物の設計法確立に資することとした。

2. 防舷材の性能設計

(1) 防舷材の性能設計に関する既往の研究

防舷材は、船舶接岸エネルギー（荷重効果）が防舷材吸収エネルギー（耐力）を超えないように設計される。

ここで、荷重効果側の船舶接岸エネルギーは、船舶の仮想質量と接岸速度、偏心係数などの諸量に基づいて算定される。これら諸量は変動係数が非常に大きいことが特徴である。さらに、近年船型の大型化が進んだことから、たとえ喫水調整を行ったとしても、実際に入港する船舶が計画船型の排水トン数を超える可能性が存在し、この点も接岸エネルギーの確率変動に寄与する成分となる。

また、耐力側の防舷材の吸収エネルギーについても、製品ごとに規格値に対する確率変動を有することはいうまでもない。

このような点を考慮して、上田ら^{2), 3), 4), 5), 6), 7)}の一連の研究においては、防舷材の設計にかかわる諸元の統計的性質を考慮して、荷重効果が耐力を上回る確率（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。さらに、許容破壊確率を変えて現行設計法に基づいて設計した防舷材に対する安全係数の提案を行っている。

(2) 防舷材の性能設計法の検討

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にかかわる諸元の統計的性質を考慮して、1次信頼性理論（FORM：First-Order Reliability Method）を用いた破壊確率の検討を行い、レベル1信頼性設計法における安全係数の検討を行う。ここで、既往の研究で用いられてきたモンテカルロシミュレーションに代わってFORMを用いる利点としては、破壊確率を解析的に算出することが可能になるほか、破壊確率算出時に付随的に算出される感度係数（線形化近似係数）を用いることにより安全係数を合理的に設定することが可能になる点があげられる。

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、これら諸元は両自然対数軸上の船舶の重量トン数のべ

き乗値に対して正規分布に従うと仮定できる。つまり、自然軸上の船舶の重量トン数に対しては対数正規分布に従う。そのため、船舶接岸エネルギーに関する諸元は、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 を乗じることで表現できることになる。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。本研究で用いる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を用い、入港実績に対する検討を行う。

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⁴⁾。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、各パラメータの従う確率分布は表-1および表-2のようになる。

表-1 パラメータの従う確率分布（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
Z	(防舷材係数)	正規分布	0.997	0.031
DWT	対象船舶=10,000DWT	対数正規分布	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 パラメータの従う確率分布（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
Z	(防舷材係数)	正規分布	0.997	0.031
DWT	対象船舶=15,000DWT	対数正規分布	6729	6974

また、防舷材の性能関数 G は式(6)により表現できる。

$$G = Z \cdot E_{cat} - \frac{1}{2} \cdot M \cdot V_b^2 \cdot C_M \cdot C_e \quad (6)$$

ここに、

Z : 防舷材係数
 E_{cat} : 防舷材規格値 (kNm)
 M : 船舶質量 (t)
 V_b : 船舶接岸速度 (m/s)
 C_M : 仮想質量係数
 C_e : 偏心係数
 ただし, $E_{cat} = const$

式(1)~式(5)と式(6)を組み合わせることで、性能関数は式(7)のようになる。

$$\begin{aligned}
 G &= g(Z, E_{cat}, M, V_b, C_M, C_e, DWT) \\
 &= Z \cdot E_{cat} \\
 &\quad - \frac{1}{2} P_{DT} \cdot P_{Vb}^2 \cdot P_{CM} \cdot P_{Ce} \cdot DWT^n
 \end{aligned} \tag{7}$$

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

次に、1次信頼性理論FORMを用いて、実在バースでの入港実績に対する破壊確率、安全性指標 β お

よび感度係数 α の算定を行う。ここで、FORMとは、性能関数の破壊点に関する1次項までのテーラー展開により安全性指標 β を算出する方法である。安全性指標と破壊確率には相関があるため、安全性指標が算出できれば性能関数が負となる確率(破壊確率)を計算することが出来る。解析にはRCP GmbH社製のプログラム「COMREL」を使用した。

検討にあたり、各諸元の設計に用いる信頼度(非超過確率)により破壊確率が異なると考えられるため、実際に設計に用いられている各諸元の信頼度の組み合わせを実態調査をもとに検討した。その結果、接岸速度 V_b については概ね95%値が共通して用いられていることが分かった。しかしながら、船舶質量 DT 、仮想質量係数 C_M 、偏心係数 C_e については、港湾の施設の技術上の基準・同解説⁹⁾に示された値は75%であり、各諸元で用いられる信頼度には違いがある可能性があることがわかった。

そこで、本研究では、各諸元の信頼度の組み合わせに対して現行設計法によって防舷材の設計を行い、規格値 E_{cat} を求めた防舷材の破壊確率、安全性指標 β 、感度係数 α をそれぞれ算定した。解析結果をコ

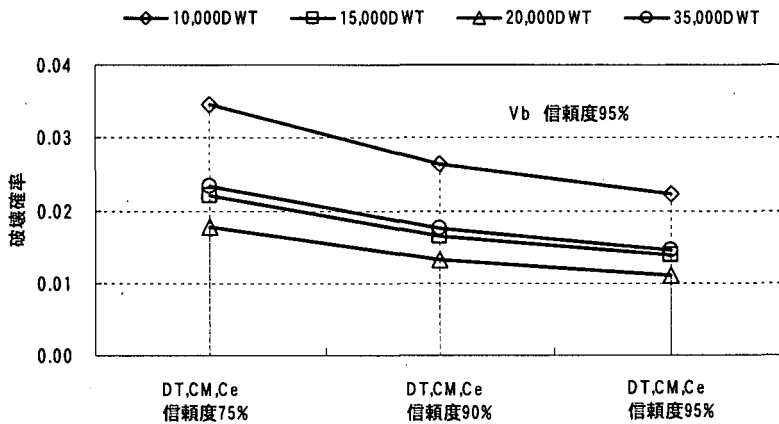


図-1 現行設計による破壊確率 (コンテナ船)

表-3 解析結果 (コンテナ船)

対象船舶 DWT	各諸元の信頼度				防舷材規格値 E_{cat} (kNm)	超過確率	β	α					
	V_b	DT	C_M	C_e				Z	P_{Vb}	P_{DT}	P_{CM}	P_{Ce}	DWT
10,000	95%	75%	75%	75%	174	0.0345	1.8180	0.0452	-0.9549	-0.1027	-0.0509	-0.0430	-0.2669
	95%	90%	90%	90%	189	0.0264	1.9360	0.0452	-0.9549	-0.1027	-0.0509	-0.0430	-0.2669
	95%	95%	95%	95%	199	0.0224	2.0070	0.0452	-0.9549	-0.1027	-0.0509	-0.0430	-0.2669
15,000	95%	75%	75%	75%	217	0.0221	2.0130	0.0456	-0.9636	-0.1036	-0.0514	-0.0434	-0.2327
	95%	90%	90%	90%	236	0.0165	2.1310	0.0456	-0.9636	-0.1036	-0.0514	-0.0434	-0.2327
	95%	95%	95%	95%	249	0.0138	2.2040	0.0456	-0.9636	-0.1036	-0.0514	-0.0434	-0.2327
20,000	95%	75%	75%	75%	236	0.0177	2.1030	0.0451	-0.9526	-0.1024	-0.0508	-0.0429	-0.2749
	95%	90%	90%	90%	257	0.0132	2.2200	0.0451	-0.9526	-0.1024	-0.0508	-0.0429	-0.2749
	95%	95%	95%	95%	270	0.0109	2.2920	0.0451	-0.9526	-0.1024	-0.0508	-0.0429	-0.2749
35,000	95%	75%	75%	75%	277	0.0234	1.9880	0.0460	-0.9719	-0.1045	-0.0518	-0.0437	-0.1943
	95%	90%	90%	90%	301	0.0175	2.1080	0.0460	-0.9719	-0.1045	-0.0518	-0.0437	-0.1943
	95%	95%	95%	95%	317	0.0146	2.1810	0.0460	-0.9719	-0.1045	-0.0518	-0.0437	-0.1943

表-4 解析結果 (一般貨物船)

対象船舶 DWT	各諸元の信頼度				防舷材規格値 E_{cat} (kNm)	超過確率	β	α					
	V_b	DT	C_M	C_e				Z	P_{Vb}	P_{DT}	P_{CM}	P_{Ce}	DWT
15,000	95%	75%	75%	75%	215	0.0115	2.2720	0.0449	-0.9476	-0.1059	-0.0505	-0.0426	-0.2905
	95%	90%	90%	90%	240	0.0076	2.4250	0.0449	-0.9476	-0.1059	-0.0505	-0.0426	-0.2905
	95%	95%	95%	95%	256	0.0059	2.5150	0.0449	-0.9476	-0.1059	-0.0505	-0.0426	-0.2905

テナ貨物船について図-1および表-3に、一般貨物船について表-4に示す。コンテナ貨物船の安全性指標は1.82~2.29、破壊確率は0.01~0.03であり、一般貨物船の安全性指標は2.27~2.52、破壊確率は0.006~0.01の範囲にある。これら結果より分かるように、設計に用いる信頼度によって破壊確率には差が生じる。特に、全ての諸元について信頼度95%を用いたとしても安全性指標は2.01~2.52の範囲にあり、例えば防波堤の外的安定に関する安全性指標平均値の2.4⁹⁾と同程度の破壊可能性を有している。これは、主として船舶の接岸速度の変動係数が大きいことに起因するものと考えられる。

次に信頼性設計法による目標安全性水準について検討する。一般的に用いられる方法は信頼性設計法の安全性水準を現行設計法の平均安全性水準とするものである。その場合、船舶接岸速度 V_b 以外のパラメータについて、実際に用いられる可能性のある75%、90%、95%の信頼度の組み合わせの相対頻度分布が厳密には必要となる。しかしながら、実際にはそのようなデータを収集することは困難である。そこで、表-3および表-4に示した諸元のうち、 V_b 以外の諸元の信頼度の組み合わせ(75%、90%、95%)は等しい確率(=1/3)で実際に用いられているものと仮定し、信頼性設計法による目標安全性水準を定めると、目標安全性指標 β_T は、コンテナ船については2.066、一般貨物船については2.392となる。

さらに、レベル1信頼性設計法に用いる感度係数についても、設計パラメータの信頼度により異なるため、ここではコンテナ船、一般貨物船の各カテゴリーごとに平均した値を用いる。

防舷材のレベル1信頼性設計法による性能関数は式(8)のようになる。

$$\begin{aligned}
 G &= Z_d \cdot E_{cat} \\
 &- \frac{1}{2} P_{DT_d} \cdot P_{V_b}^2 \cdot P_{CM_d} \cdot P_{C_{e_d}} \cdot DWT_d^n \\
 &= \gamma_Z \cdot Z_k \cdot E_{cat} \\
 &- \frac{1}{2} \gamma_{P_{DT}} \cdot P_{DT_k} \cdot (\gamma_{P_{V_b}} \cdot P_{V_b})^2 \cdot \gamma_{P_{CM}} \cdot P_{CM_k} \\
 &\cdot \gamma_{P_{C_e}} \cdot P_{C_{e_k}} \cdot (\gamma_{DWT} \cdot DWT_k)^n
 \end{aligned} \tag{8}$$

ここに、記号 γ はその添字に関する安全係数、添字 d は設計用値、添字 k は特性値であることを示す。式より分かるように、設計用値は特性値に安全係数を乗じることにより得られる。

各パラメータの安全係数は一般的には式(9)により設定できる。また、特性値としては、これまでの設計で用いられてきた値を継承することが一般的と考えられる。ただしその場合、上述のように各パラメータについて用いられてきた信頼度が様々であるため、同じ目標安全性水準であっても特性値の信頼

度に応じて安全係数は変化することとなる。ここでは、信頼度ごとの安全係数を提示することは煩雑であるので、平均値を特性値とした場合の安全係数を提示する。すなわち、安全係数の算定式は式(10)のようになる。実際の設計において信頼度 p %の値(X_p)を使いたいときは、今後提示する安全係数を μ_x / X_p 倍すればよい。ただしその場合でも、設計用値は同じ値となるので、設計計算結果は平均値を特性値とした場合と全く同じである。

$$\gamma_X = (1 - \beta_T \alpha_X V_X) \frac{\mu_X}{X_k} \tag{9}$$

$$\begin{aligned}
 \gamma_X &= 1 - \beta_T \alpha_X V_X \\
 X_k &= \mu_X
 \end{aligned} \tag{10}$$

ここに、

α : 感度係数

β_T : 目標安全性指標

V : 変動係数

μ : 平均値

表-3および表-4に示された感度係数を用いて式(10)により安全係数を求めた。安全係数は表-5および表-6のとおりである。得られた安全係数を用いて式(8)により試設計を実施した。設計結果をもとにFORMを用いて安全係数を表した結果を表-7および表-8に示す。

表よりわかるように、試設計結果は目標安全性指標に必ずしも近い結果とはならず、いずれも目標安全性指標よりも低い値が安全性指標として算出される。これは、性能関数の非線形性等のための誤差であると考えられる。そこで、式(10)に用いる感度係数 α の値は固定とし、目標安全性指標の値を当初の目標値から変化させて試設計を実施し、目標とする安全性水準と最も近くなる目標安全性指標を算出することとした。最適性の判定は式(11)による。すなわち、目標破壊確率と設計結果の破壊確率の分散の最小案を最適案として採用する。

$$\sum (P_{fi} - P_{fr})^2 \rightarrow \min \tag{11}$$

ここに、

P_{fi} : 破壊確率の目標値

P_{fr} : 信頼性設計法による破壊確率

図-2および図-3に、目標安全性指標と、破壊確率の分散の関係を示す。コンテナ船については目標安全性指標=2.360、一般貨物船については目標安全性指標=2.823の条件が最適となり、その際の安全係数は表-9および表-10に示す通りとなる。また、図-4には、コンテナ船について最適案による設計結果を示す。これら結果より、信頼性設計法によって目標とする安全性水準に近い合理的な設計を行うことが可能になることが分かる。

表-5 安全係数 (コンテナ船)

		β_T	α	安全係数 γ_x
Z	(防舷材係数) 0	2.066	.045	0.997
P_{DT}	(船舶質量)		-0.103	1.016
P_{vb}	(接岸速度)		-0.961	1.695
P_{CM}	(仮想質量係数)		-0.051	1.004
P_{Ce}	(偏心係数)		-0.043	1.003
DWT	対象船舶=10,000DWT		-0.267	1.407
	対象船舶=15,000DWT	-0.233	1.298	
	対象船舶=20,000DWT	-0.275	1.436	
	対象船舶=35,000DWT	-0.194	1.200	

表-6 安全係数 (一般貨物船)

		β_T	α	安全係数 γ_x
Z	(防舷材係数) 0	2.392	.045	0.997
P_{DT}	(船舶質量)		-0.106	1.019
P_{vb}	(接岸速度)		-0.948	1.793
P_{CM}	(仮想質量係数)		-0.051	1.004
P_{Ce}	(偏心係数)		-0.043	1.003
DWT	対象船舶=15,000DWT		-0.291	1.720

表-7 試設計結果 (コンテナ船)

対象船舶 DWT	設計用値 ($\gamma_x \cdot \mu_x$)						防舷材規格値 E_{cat} (kNm)	破壊確率	β
	Z	P_{vb}	P_{DT}	P_{CM}	P_{Ce}	DWT			
10,000	0.994	3.457	2.164	1.497	0.623	13119	186	0.0280	1.911
15,000						16022	197	0.0305	1.873
20,000						19130	207	0.0275	1.918
35,000						36333	249	0.0334	1.834

表-8 試設計結果 (一般貨物船)

対象船舶 DWT	設計用値 ($\gamma_x \cdot \mu_x$)						防舷材規格値 E_{cat} (kNm)	破壊確率	β
	Z	P_{vb}	P_{DT}	P_{CM}	P_{Ce}	DWT			
15,000	0.994	3.658	3.188	1.498	0.623	11575	196	0.0161	2.143

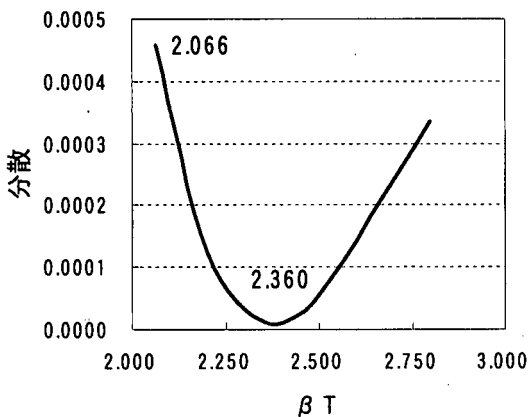


図-2 最適案判定結果 (コンテナ船)

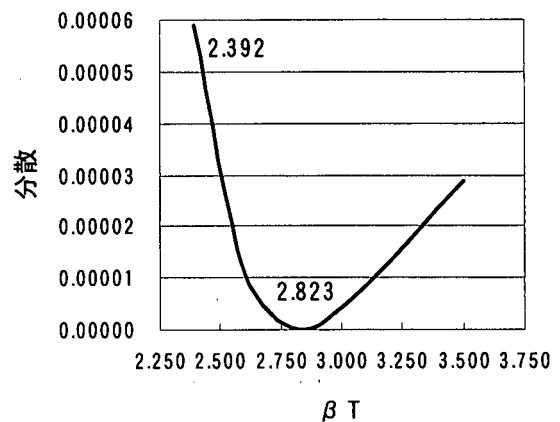


図-3 最適案判定結果 (一般貨物船)

表-9 最適案の安全係数 (コンテナ船)

		β_T	γ_x
Z	(防舷材係数)	2.360	0.997
P_{DT}	(船舶質量)		1.018
P_{vb}	(接岸速度)		1.794
P_{CM}	(仮想質量係数)		1.004
P_{Ce}	(偏心係数)		1.003
DWT	対象船舶=10,000DWT		1.465
	対象船舶=15,000DWT	1.340	
	対象船舶=20,000DWT	1.499	
	対象船舶=35,000DWT	1.229	

表-10 最適案の安全係数 (一般貨物船)

		β_T	γ_x
Z	(防舷材係数)	2.823	0.996
P_{DT}	(船舶質量)		1.023
P_{vb}	(接岸速度)		1.936
P_{CM}	(仮想質量係数)		1.005
P_{Ce}	(偏心係数)		1.004
DWT	対象船舶=15,000DWT		1.850

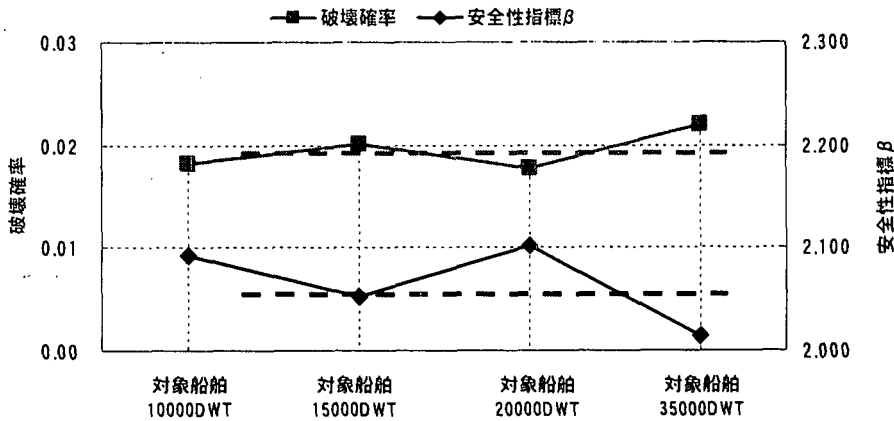


図-4 最適案による設計結果 (コンテナ船)

最後に、以上の結果を用いてコンテナ船 10000DWT に対するレベル1信頼性設計法を行う具体的な方法を示す。設計計算においては、表-9に示した安全係数提案値と式(8)を用いればよい。すなわち、式(12)を満足するように防舷材の規格 E_{cat} を定めればよい。

$$G = 0.997Z_k E_{cat} - \frac{1}{2} \left\{ 1.018 P_{DT_k} \times (1.794 P_{Vb_k})^2 \times 1.004 P_{CM_k} \times 1.003 P_{Ce_k} \right\} \cdot (1465 DWT_k)^{0.288} \geq 0 \quad (12)$$

ここで、添字 k の特性値には表-1に示した平均値 μ を用いればよい。

3. おわりに

本研究では、船舶接岸時の係留施設の性能設計に関する研究として、防舷材の信頼性設計法の検討を行った。このため、次期港湾基準で標準的な設計法となるレベル1信頼性設計法で用いる安全係数を FORM に基づいて検討した。防舷材に関係する船舶接岸時の設計法としては、このほかに棧橋式岸壁の船舶接岸時の安全性照査法があげられる。今後は、船舶接岸時の防舷材反力のばらつきを考慮した棧橋式岸壁のレベル1信頼性設計法の検討を行う予定である。

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) 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。
- 3) 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。
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) Ueda, S., T. Hirano, S. Shiraishi, T. Yamamoto, and S. Yamase: Relaiability Design Method Of Fender For Berthing Ship, Proc. of the 30th PIANC, pp.692-707, 2002.
- 8) 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。
- 9) 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。