

信頼性設計法を用いた防舷材の破壊確率の算定

中央大学理工学部土木工学科 ○学生会員 村田 直也
中央大学理工学部土木工学科 正会員 佐藤 尚次

1. はじめに

港湾施設は、国民生活や産業を支える重要インフラであり、常に最低限の物流機能維持のため構造性能を確保している必要がある。

現在、公共事業の予算は減少しており、既存構造物の長期供用が不可欠である。性能設計の観点からも、現行設計では設計者が構造物の安全率の意味に対しての注意が少なく、安全余裕が信頼性や耐久性にどんな影響を持つか認識していないことは問題である。また、構造物の劣化の進行を把握し、適切な時期に補修・交換を行い、常に要求性能を満たすことが維持補修において重要である。以上の点を明確にするため、確率分布を使用した信頼性設計を行うことが効果的と思われる。

以上の背景より、本研究では船舶係留施設の附帯設備である防舷材に着目し、信頼性設計法を用いて防舷材の経年劣化と破壊確率の把握を目標とする。

2. 防舷材の設計方法について

(1) 設計方法と各パラメータ

防舷材を設計する上で、船舶接岸力が大きく影響してくる。「港湾の施設の技術上の基準・同解説」に順ずる現行設計法¹⁾では設計外力を決める際、計画船舶として対象船舶最大級の重量トン数(DWT)を用いる。しかし、現実にはあらゆる船舶が入港している。よって、任意の対象船舶の重量トン数を含め、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有しており、表-1に示す。²⁾ここで、対象船舶の平均・標準偏差と対総隻割合は、1997年から2006年の大井コンテナ埠頭の入港数データを基に算出した。

防舷材の性能関数 G は次式で表される。

$$G = R - S$$

$$= Z_d \times Z \times E_{cat} - 1/2 \times M \times V_b^2 \times C_M \times C_e \quad \dots (1)$$

各変数については以下に示す。

- ・防舷材吸収エネルギー量：R
- ・船舶接岸エネルギー量：S
- ・防舷材規格値： E_{cat} (kN・m)
- ・劣化係数： Z_d

<正規分布に従う変数>

- ・防舷材係数： Z

<対数正規分布に従う変数>

- ・船舶質量： $M = DT = P_{DT} \times DWT^{0.957}$ (DT) $\dots (2)$
- ・接岸速度： $V_b = P_{Vb} \times DWT^{-0.338}$ (m/s) $\dots (3)$
- ・仮想質量係数： $C_M = P_{CM} \times DWT^{0.022}$ $\dots (4)$
- ・偏心係数： $C_e = P_{Ce} \times DWT^{0.015}$ $\dots (5)$

(1)~(5)式より性能関数は以下ようになる。

$$G = R - S$$

$$= Z_d \times Z \times E_{cat} - 1/2 (P_{DT} \times P_{Vb}^2 \times P_{CM} \times P_{Ce}) DWT^{0.288} \quad \dots (6)$$

ここで、載貨重量トン数を DWT、排水トン数を GT とし、 $DWT = GT/0.88$ の関係とする。¹⁾そして、 P_{DT} 、 P_{Vb} 、 P_{CM} 、 P_{Ce} は統計的見地から、載貨重量トン数を用いてこれらの変数を求めるための係数である。また、劣化係数 Z_d については(2)節で詳しく述べる。

表-1 パラメータの従う確率分布

	μ (平均)	σ (標準偏差)	対総隻割合
P_{DT} (船舶質量)	2.131	0.156	
P_{Vb} (接岸速度)	2.04	0.714	
P_{CM} (仮想質量係数)	1.491	0.054	
P_{Ce} (偏心係数)	0.621	0.019	
Z (防舷材係数)	0.997	0.031	
重量トン数 (GT)	400~499ト	439	0
	500~599ト	593	0
	600~699ト	659	0
	700~799ト	1147	154
	800~899ト	2518	122
	900~999ト	3308	26
	1,000~1,999ト	4039	99
	2,000~2,999ト	4872	162
	3,000~3,999ト	5744	59
	4,000~4,999ト	6511	181
重量トン数 (DWT)	400~499ト	7536	65
	500~599ト	8361	48
	600~699ト	13508	281
	700~799ト	23860	642
	800~899ト	30966	495
	900~999ト	38904	803
	1,000~1,999ト	47237	917
	2,000~2,999ト	62111	1091
	3,000~3,999ト		0.069
	4,000~4,999ト		

表-2 V型防舷材の交換までの年数と件数の関係

交換年数分布(年)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
件数	0	1	0	0	0	1	0	2	5	3
累計百分率	0.00%	1.22%	1.22%	1.22%	1.22%	2.44%	2.44%	4.88%	10.98%	14.63%
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	計
73.17%	74.39%	80.49%	82.93%	87.80%	92.68%	92.68%	93.90%	97.56%	100.00%	

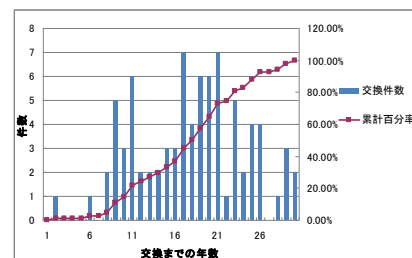


図-1 V型防舷材交換までの年数と件数のヒストグラム

表-3 傾き Z_r のパラメータ

直線の傾き Z_r	直線の傾き Z_r	直線の傾き Z_r	直線の傾き Z_r	直線の傾き Z_r	直線の傾き Z_r
0	0.11%	-1.6666667	2.31%	-0.8333333	6.37%
-15	0.17%	-1.5	2.86%	-0.7894737	6.29%
-7.5	0.25%	-1.3636364	3.46%	-0.75	6.04%
-5	0.38%	-1.25	4.07%	-0.7142857	5.67%
-3.75	0.54%	-1.1538462	4.67%	-0.6818182	5.18%
-3	0.76%	-1.0714286	5.23%	-0.6521739	4.62%
-2.5	1.05%	-1	5.71%	-0.625	4.01%
-2.1428571	1.40%	-0.9375	6.07%	-0.6	3.40%
-1.875	1.82%	-0.8823529	6.30%	-0.5769231	2.81%

(2) 劣化係数の作成

現行設計法では劣化を考慮した設計は行われていない。しかし、実現象として経時的劣化、疲労劣化などの要因により防舷材の性能は低下する。よって、性能劣化を考慮し、より現実的な設計を行うために、劣化の程度を表す劣化係数 Z_d を算出する。

キーワード：信頼性設計、維持補修、疲労劣化、最適設計、港湾施設

連絡先：〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 中央大学理工学部土木工学科

tel.03-3817-1816

文献 3)より、使用後の防舷材の力学試験を行ったところ、防舷材規格値が初期状態の 85%以下から急激に吸収エネルギー量が下降し、劣化状態が激しいことがわかった。よって、防舷材の要交換性能は防舷材規格値が初期状態の 85%になった時とする。³⁾

次に、防舷材の劣化の程度のばらつきを確率分布によって求める。V 型防舷材の交換までの年数と件数の関係を表-2 に、そのヒストグラムを図-1 に示す。³⁾このデータは先に述べた様々な劣化要因により、要交換レベルに達した防舷材の件数と使用期間を表したものである。表-2 は正規分布に従うことがわかったので、図-1 のヒストグラムに沿う正規分布の確率密度関数 $f_N(x)$ を求め、以下に示す。

$$f_N(x) = \frac{1}{15.754} e^{-\frac{(x-17.951)^2}{79.008}} \cdots (7)$$

(7)式を防舷材の交換年数分布の代表値とする。ここで x の区間は、実例より 0 年から 35 年とする。

また、劣化の程度 Z_d は直線式で表せると仮定した。様々な劣化直線の傾き Z_r は、(7)式に従う確率により選定され、表-3 に示す。そして、劣化係数 Z_d は(8)式より求められる。ここで、 t は経過年数とする。

$$Z_d = 1 + Z_r \times t \cdots (8)$$

3. 破壊確率の算定

(6)式内の防舷材規格値 E_{cat} の値を 0 から 600(kN・m)までとし、性能劣化を加味して、モンテカルロシミュレーション(以下、MCS)により設計を行う。シミュレーション回数を 100 万回、 $G < 0$ となる回数を破壊回数、破壊確率は破壊回数をシミュレーション回数で除した値とする。そして、MCS の結果として、規格値ごとの経過年数と破壊確率の関係を図-2 に表す。

4. 最適な防舷材規格値の算出

ライフサイクルコスト(以下、LCC)の考え方をを用いて、経済的に最適な防舷材規格値を求める。

破壊時コストについては外部不経済を考慮し、輸入船における係留施設の使用不可時に発生する代替港への迂回輸送費のみとする。⁴⁾迂回輸送費は、海上迂回輸送費と陸上迂回輸送費、迂回輸送時間費の和とする。破壊時コストの発生ケースとして、係留施設に附帯する防舷材の数と船舶の大きさの関係から、総トン数 40,000 から 70,000 までの入港予定の船舶の場合とする。本研究では、入港予定港である東京港の代替港として名古屋港を仮定して、計算を行う。以上より、初期コストと破壊時コストを表-4 に示す。

そして、トータルコストを(9)式に示す。

$$C_T = C_i + P_{f2} \times C_{f2} + P_{f3} \times C_{f3} \cdots (9)$$

C_T : トータルコスト C_i : 初期コスト
 P_{f2} : 防舷材 2 個破壊確率 P_{f3} : 防舷材 3 個破壊確率
 C_{f2} : 防舷材 2 個破壊した際の破壊時コスト
 C_{f3} : 防舷材 3 個破壊した際の破壊時コスト

ここで、防舷材 2 個の破壊確率は 1 個破壊確率の 2 乗、防舷材 3 個の破壊確率は 1 個破壊確率の 3 乗とする。以上より、防舷材供用開始からの経過年数ごとの LCC 算出表を求めた。例として、25 年経過時の LCC

算出表を表-5 に示す。

5. 考察

図-2 より、経年劣化を考慮した場合の破壊確率は考慮しなかった場合と比べ、極端に増えることがわかる。特に、規格値が 300(kN・m)以上の場合、供用開始から 7 年以内に破壊確率が急激に上がり、7~10 年では破壊確率の変化は少ないことがわかった。以上より、経年劣化を考慮した設計が必須である。

また、現在では防舷材の維持補修に関して、目視とスケールを用いて検査しており、アナログ的であり時間もかかる。しかし、図-2 の結果より、劣化状態や交換時期の定量的な評価が可能になり、維持補修における効率の向上につながることを期待できる。

さらに、LCC の考え方をを用いて、最適な防舷材規格値の算出方法を提案することができた。

6. 今後の課題

本研究では、防舷材の劣化曲線を仮定して計算を行ったが、より正確な設計をするためには、劣化要因別に防舷材の性能検査を行い、統計的なデータから劣化曲線を求めることである。

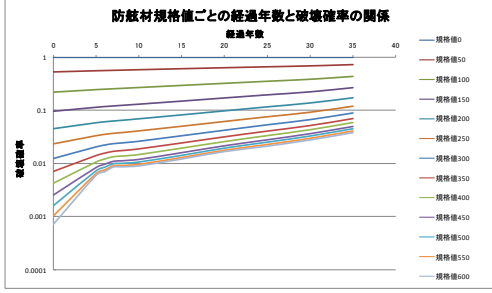


図-2 規格値ごとの経過年数と破壊確率の関係

表-4 初期コストと破壊時コスト

総トン数(GT)	海上輸送費用(円)	陸上輸送費用(円)	輸送時間費用(円)	迂回輸送費用(円)	迂回輸送発生時の防舷材破壊個数	対総隻割合
40,000~49,999トン	16,523,874	321,406,334	87,417,446	425,347,654	3	0.207
30,000~59,999トン	17,086,277	390,245,128	106,140,511	513,471,917	2	0.074
60,000~69,999トン	22,466,545	513,128,725	139,562,909	675,158,178	2	0.069

表-5 25 年経過時の LCC 算出表

防舷材規格値	初期コスト	25年経過時破壊確率			破壊時コスト(円)		LCC(トータルコスト)
		1個破壊	2個破壊	3個破壊	2個破壊	3個破壊	
0	0	1	1	1	84,736,570	87,918,728	¥172,655,298
50	2330416.6	0.662473	0.438871	0.29074	84,736,570	87,918,728	¥65,080,278
100	4660833.3	0.350829	0.123081	0.04318	84,736,570	87,918,728	¥18,886,659
150	6991249.9	0.19479	0.037943	0.007391	84,736,570	87,918,728	¥10,856,225
200	9321666.6	0.116902	0.013666	0.001598	84,736,570	87,918,728	¥10,620,141
250	11652083	7.62E-02	0.005811	0.000443	84,736,570	87,918,728	¥12,183,376
300	13982500	5.41E-02	0.002923	0.000158	84,736,570	87,918,728	¥14,244,061
350	16312917	4.11E-02	0.001691	6.95E-05	84,736,570	87,918,728	¥16,462,307
400	18643333	3.33E-02	0.001108	3.69E-05	84,736,570	87,918,728	¥18,740,424
450	20973750	2.83E-02	0.000798	2.26E-05	84,736,570	87,918,728	¥21,043,392
500	23304166	2.50E-02	0.000626	1.57E-05	84,736,570	87,918,728	¥23,358,562
550	25634583	2.27E-02	0.000517	1.17E-05	84,736,570	87,918,728	¥25,679,395
600	27965000	2.11E-02	0.000445	9.4E-06	84,736,570	87,918,728	¥28,003,570

<参考文献>

1)日本港湾協会「港湾の施設の技術上の基準・同解説」1999.4
2)国総研資料 No.63 長尾毅・岡田達彦・岩田直樹・松本英雄・石田誠・佐藤祐司
「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」2003.3
3) 港湾技研資料 No.878 寺内潔・小泉哲也・山本修司・細川浩二
「防舷材の劣化実態と機能評価について」1997.7
4)国総研資料 No.311 佐藤秀政・長尾毅
「破壊確率を考慮した既存栈橋の補修方法に関する一考察」2006.6