

信頼性設計法を用いた防舷材の最適設計と船舶破損確率の算定

中央大学 ○学生会員 村田 直也
中央大学 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。これらの点を明確にするため、確率分布を用いた信頼性設計が効果的と思われる。

以上の背景より、船舶係留施設に必要な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の把握と最適な防舷材規格値の算出を目標とする。

2. 防舷材の設計方法について

(1)防舷材の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。現行設計法では設計外力に対象船舶最大級の載荷重量トン数(DWT)を用いる¹⁾。しかし、現実には様々な大きさの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、表-1に従う互いに独立な確率変数とする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より算出した。また、防舷材の性能関数 G は次式で表される。

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

- ・防舷材規格値： E_{cat} [kN・m]
- ・劣化係数： Z_d ・防舷材係数： Z
- ・船舶質量： $M = P_{DT} \times DWT^{0.957}$ [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 G は以下のようになる。

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

ここで、排水トン数 GT と載荷重量トン数 DWT の関係は、 $DWT = GT / 0.88$ とする¹⁾。また、劣化係数 Z_d については(2)節で詳しく述べる。

(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が、実現象として経時劣化、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。既往研究より、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³⁾。よって、要交換性

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 | 船舶耐面圧 |
|---------------------------|----------------|-----------------|-------|-------|
| 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 | | |
| 船 隻 重 量 (GT) | 400~499ト | 567 | 0 | 0.129 |
| | 500~599ト | 770 | 9 | 0.027 |
| | 700~999ト | 861 | 20 | 0.033 |
| | 1,000~1,999ト | 1481 | 153 | 0.003 |
| | 2,000~2,999ト | 3251 | 77 | 0.019 |
| | 3,000~3,999ト | 4271 | 86 | 0.003 |
| | 4,000~4,999ト | 5216 | 235 | 0.024 |
| | 5,000~5,999ト | 6299 | 193 | 0.019 |
| | 6,000~6,999ト | 7280 | 168 | 0.016 |
| | 7,000~7,999ト | 8408 | 220 | 0.017 |
| 載 荷 重 量 (DWT) | 8,000~8,999ト | 9732 | 276 | 0.015 |
| | 9,000~9,999ト | 10796 | 59 | 0.058 |
| | 10,000~19,999ト | 17443 | 340 | 0.199 |
| | 20,000~29,999ト | 30811 | 778 | 0.021 |
| 耐 面 圧 | 30,000~39,999ト | 39988 | 599 | 0.068 |
| | 40,000~49,999ト | 50238 | 973 | 0.207 |
| | 50,000~59,999ト | 60998 | 1111 | 0.074 |
| 60,000ト~ | 78921 | 2982 | 0.069 | <200 |

能は初期状態の 85%になった時とする。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。既往研究³⁾より、要交換レベルに達した防舷材の件数と使用期間の関係は、正規分布に従うことがわかったので、以下に確率密度関数 $f_N(x)$ を示す⁴⁾。

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

(7)式が防舷材の交換年数 N の分布である。交換年数 N は吸収エネルギーが 85%まで低下する年数であり、この間の性能低下は以下に示す(8)式の直線式で補間する。ここで、(8)式中の傾き Z_r は、交換年数 N から逆算される。また、 t は経過年数とする⁴⁾。

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

3. 船舶破損の判定について

(1)船舶破損の判定方法と各変数について

船舶破損の判定については、以下に示す(9)式を用いる。

$$G_2 = H_p - R_f \quad \dots (9)$$

- ・船舶側面部の耐面圧： H_p
- ・防舷材反力： R_f

ここで、船舶側面部の耐面圧 H_p を表-1に示す⁵⁾。また、防舷材反力については(2)節で述べる。

(2)防舷材のモデル化について

防舷材は劣化により、エネルギー吸収量だけでなく反力特性も変化する。そこで、既往研究より劣化レベル別に反力の初期状態からの変化率を求め、表-2に示す³⁾。そして防舷材規格値ごとに、エネルギー吸収量に対応した反力を算出した。また、船舶にかかる反力の値を抑える役割を持つ、防舷材の受衝板についてもモデル化を行った。受衝板面積は、大井コンテナ埠頭で使用されている設計値を基に、船舶にかかる反力の値が設計条件内に

収まるよう決定した。

4. 防舷材破壊確率と船舶破損確率の算出

性能劣化を加味し、モンテカルロシミュレーションにより防舷材破壊確率と船舶破損確率を求める。シミュレーション数を100万回、 $G_1 < 0$ の回数を防舷材破壊回数、 $G_2 < 0$ の回数を船舶破損回数とし、それぞれをシミュレーション数で除した値を防舷材破壊確率と船舶破損確率とする。計算結果を図-1、図-2に示す。

5. 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。

$$C_t = C_i + \sum_{j=1}^{\lfloor \frac{49}{n} \rfloor} \frac{1}{1.04^{n \times j}} \times C_m + \left(\sum_{k=0}^{49} \frac{1}{1.04^k} P_{f_fender} \right) \times C_m + \left(\sum_{k=0}^{49} \frac{1}{1.04^k} P_{f_ship} \right) \times C_{f_ship} \dots (10)$$

C_t : トータルコスト C_i : 初期コスト C_m : 交換コスト
 C_{f_ship} : 船舶の破損時コスト(円)
 P_{f_ship} : k年経過時の船舶破損確率
 P_{f_fender} : k年経過時の防舷材破壊確率
 k : 経過年数($0 \leq k \leq 49$)
 n : 定めた防舷材の使用年数($1 \leq n \leq 50$)

以上より、初期コストと破壊時コストを表-3に、トータルコストを(10)式に示し、変数 n に5年から50年まで5年刻みに代入し、比較した結果を図-3に示す。

6. 考察

図-1より、防舷材の破壊確率は経年劣化の考慮の有無により、極端に差があることがわかる。以上より、経年劣化を考慮した設計の必要性が得られた。また、劣化状態や交換時期の定量的な評価が可能となった。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、港湾運営における効率化が期待できる。

7. 今後の課題

破壊時コストについては、船舶や岸壁への影響など、所定の設計作用値以下での破壊・事故の発生は瑕疵担保責任が発生する可能性があり、これに対する責任分担や保険のかけ方など、現場での課題とされる問題は多い。この課題を考慮した結果については、発表時に示す予定である。

<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) 長尾毅・岡田達彦・岩田直樹・松本英雄・石田誠・佐藤祐司 国総研資料 No. 63「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) 寺内潔・小泉哲也・山本修司・細川浩二 港湾技研資 No. 878「防舷材の劣化実態と機能評価について」1997.7
- 4) 村田直也・佐藤尚次 第65回土木学会年次学術講演会「信頼性設計法を用いた防舷材の最適設計について」2010.9
- 5) 国際航路協会「防舷材システム設計の指針：2002版」2004.4

表-2 防舷材反力の変化率

| 劣化レベル | 3 | 4~5.7 | 6 | 劣化レベル | 3 | 4~5.7 | 6 |
|---------|---------|-------|----|---------|---------|-------|-----|
| ひずみ率(%) | 反力比率(%) | | | ひずみ率(%) | 反力比率(%) | | |
| 0.0 | 0 | 0 | 0 | 42.5 | 99 | 110 | 92 |
| 2.5 | 44 | 60 | 28 | 45.0 | 97 | 109 | 93 |
| 5.0 | 57 | 60 | 35 | 47.5 | 99 | 109 | 95 |
| 7.5 | 69 | 60 | 42 | 50.0 | 104 | 109 | 101 |
| 10.0 | 82 | 61 | 49 | 52.5 | 115 | 117 | 113 |
| 12.5 | 84 | 75 | 56 | 55.0 | 125 | 125 | 128 |
| 15.0 | 86 | 83 | 60 | 57.5 | 135 | 135 | 143 |
| 17.5 | 88 | 89 | 64 | 60.0 | 145 | 145 | 158 |
| 20.0 | 89 | 96 | 68 | 62.5 | 155 | 155 | 173 |
| 22.5 | 91 | 98 | 72 | 65.0 | 165 | 165 | 188 |
| 25.0 | 94 | 100 | 76 | 67.5 | 175 | 175 | 203 |
| 27.5 | 96 | 105 | 80 | 70.0 | 185 | 185 | 218 |
| 30.0 | 96 | 107 | 84 | 72.5 | 195 | 195 | 233 |
| 32.5 | 98 | 109 | 88 | 75.0 | 205 | 205 | 248 |
| 35.0 | 100 | 111 | 89 | 77.5 | 215 | 215 | 263 |
| 37.5 | 100 | 110 | 90 | 80.0 | 225 | 225 | 278 |
| 40.0 | 100 | 110 | 91 | | | | |

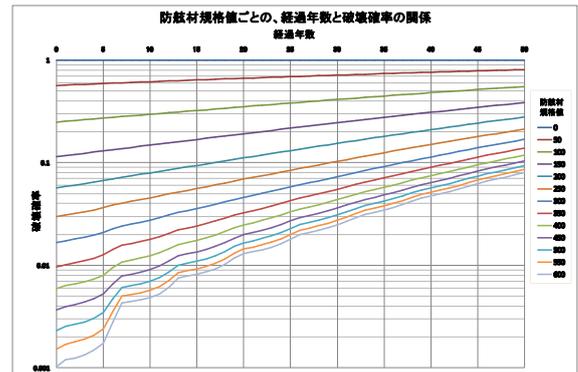


図-1 防舷材規格値ごとの経過年数と防舷材破壊確率の関係

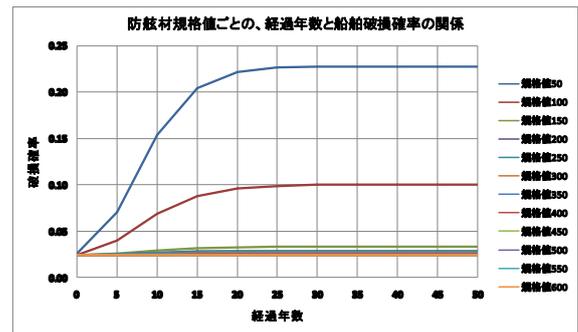


図-2 防舷材規格値ごとの経過年数と船舶破損確率の関係

表-3 初期コストと破壊時コスト

| 防舷材規格値(kN・m) | 価格(円) | 防舷材規格値(kN・m) | 価格(円) |
|--------------|-------------|--------------|-------------|
| 50 | ¥2,528,609 | 350 | ¥16,858,163 |
| 100 | ¥4,857,218 | 400 | ¥19,246,471 |
| 150 | ¥7,254,927 | 450 | ¥21,629,780 |
| 200 | ¥9,663,236 | 500 | ¥24,008,089 |
| 250 | ¥12,066,545 | 550 | ¥26,381,398 |
| 300 | ¥14,464,854 | 600 | ¥28,749,707 |

| 船型区分 | | 破損時コスト(円) |
|----------|-----------|----------------|
| 以上 | 未満 | |
| 3,000GT | 10,000GT | ¥320,000,000 |
| 10,000GT | 20,000GT | ¥500,000,000 |
| 20,000GT | 50,000GT | ¥1,040,000,000 |
| 50,000GT | 100,000GT | ¥1,640,000,000 |

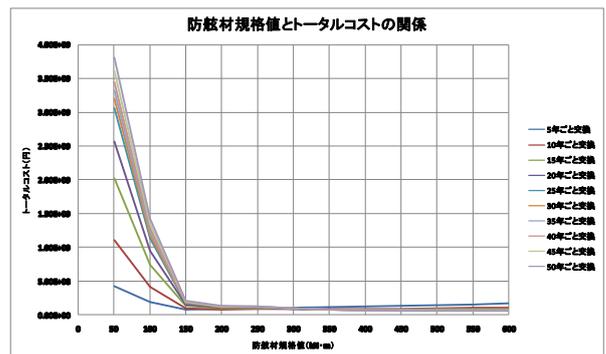


図-3 防舷材規格値とトータルコストの関係