

腐食の進行を考慮した矢板式岸壁の ライフサイクルコストの簡易評価法に関する研究

A study on the simple evaluation method of life cycle cost for sheet pile quay walls
considering the progress of corrosion

長尾 毅*, 尾崎竜三**
Takashi Nagao and Ryuzo Ozaki

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

**博(工), 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)

This study discusses the life cycle cost for sheet pile quay walls considering the progress of corrosion. It is necessary to calculate the failure probabilities according to the decrease of section modulus by corrosion for the evaluation of life cycle cost. The condition that the section modulus becomes initial value after the restoration work makes the evaluation of life cycle cost difficult. We proposed the simple evaluation method of life cycle cost and showed that the proposed method well evaluates the failure probability corresponding to the minimum life cycle cost. We also compared the failure probability for minimum life cycle cost with that for minimum expected total cost.

Key Words: life cycle cost, expected total cost, failure probability

キーワード: ライフサイクルコスト, 期待総費用, 破壊確率

1. はじめに

2007年に港湾の施設の技術上の基準が改定され, 部分係数を用いた信頼性設計法が本格的に導入された¹⁾. 港湾の主要な施設である係留施設のうち, 矢板式岸壁の主たる設計状態として永続作用が支配的な状態(永続状態)がある. この永続状態における部分係数は, 被災時費用に破壊確率を乗じた値と初期建設費の合計で得られる期待総費用最小化に基づいて設定されている²⁾. 岸壁の標準的な設計供用期間は50年であることから, 部分係数の設定時には50年間の矢板の腐食を考慮した断面係数が用いられている. 従って, 期待総費用は1年間(設計供用期間の最終年)に対するものであり, 設計供用期間全体を考慮したものではない. 最終的に採用された部分係数は期待総費用最小化に基づく安全性水準を用いて計算された値から0.05刻みで安全側に丸めて設定されているが, この部分係数は設計供用期間全体を考慮したライフサイクルコストの観点から判断した場合にも適切なのだろうかという疑問が生じる.

ただし, ライフサイクルコストの算出においては各年

の断面係数により変化する破壊確率と被災時費用を掛け合わせたものを設計供用期間分足しあわせる必要があり, この計算は簡単なものではない. この困難さは, 被災後の復旧により断面係数が初期値に戻る(矢板が新しくなる)ことによるものであり, 50年の設計供用期間の破壊確率を計算するためには約563兆ケースの事象を考慮する必要がある. 従って, 設計実務においてライフサイクルコストを正確に評価することは困難であると考えられる.

このため, 本研究では設計供用期間の破壊確率の正確な評価を行うとともに, その簡易評価法について検討した. 提案する方法をもとにライフサイクルコストを算出し, 正確なライフサイクルコスト最小の破壊確率と簡易推定法による破壊確率を比較してその精度を検証した. さらに, 1年間の期待総費用最小化に対する破壊確率と, 設計供用期間50年間のライフサイクルコスト最小化に対する破壊確率について相互比較を行うとともに, 港湾技術基準における部分係数を用いた破壊確率との比較検討を行った.

2. 破壊確率の評価

2.1 腐食を考慮した断面諸元

本研究では鋼材の腐食を1年ごとに考慮するため、各年の矢板の断面係数やタイ材の断面積が変化し、これに伴い破壊確率も変わることになる。

t 年後の腐食量は、標準的な腐食環境における条件¹⁾として腐食速度は海側で0.2mm/y、陸側で0.01mm/yとし、電気防食効率90%で防食工は海側のみに設置する条件で算出する。算出された腐食量をもとに、鋼矢板については、各年の腐食を見込んだ断面係数を設定する。鋼管矢板については、腐食量を考慮した断面において重心の位置を算出し、不利な値となる断面係数を設定する。経年による腐食に応じて断面係数は、ほぼ直線的に減少していく結果となった。ここで、矢板の断面諸元の設定にあたっては文献3)を参考にした。また、タイロッドについては、腐食速度0.02(mm/y)として、 t 年後の腐食量を考慮し、断面積を算出する。

検討断面は既往の研究²⁾と同じ条件とし、設計水深として-7.5m, -11.0m, -14.0mとした。潮位差、上載荷重の特性値については平均的な値を用いた。用いる鋼材は鋼矢板についてはSY390、鋼管矢板はSKY490とした。また、タイロッドは高張力鋼740とした。その他の条件も港湾における標準的な条件としている。即ち、図-1に示すとおり矢板背後には裏込石を配し、裏込石の湿潤および水中単位体積重量はそれぞれ18, 10kN/m³、せん断抵抗角は40度、また壁面摩擦角は15度としている。

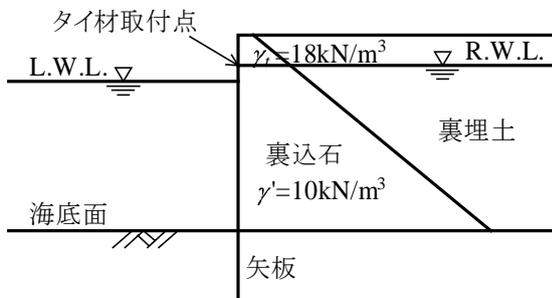


図-1 検討断面イメージ

2.2 矢板壁の曲げ降伏とタイ材の引張降伏による破壊確率の算定

t 年後の矢板の断面係数およびタイ材の断面積に対して、それぞれ土圧等の作用による矢板の曲げ破壊、タイ材の引張降伏について一次信頼性理論 (FORM)⁴⁾による信頼性解析を実施して信頼性指標を算出し、破壊確率を算定する。断面諸元、水深、初期建設費、復旧費、経済損失など検討条件は、既往の研究²⁾と同じとする。

矢板の曲げ降伏、タイ材の引張降伏モードの性能関数は、式(1)に示すとおりである。またパラメタの従う確率分布は正規分布とし、平均値の偏りおよび変動係数は表-1²⁾に示す通りとする。

表-1 パラメタの平均値と変動係数²⁾

| | α | V |
|-----------------|----------|-------|
| 残留水位 RWL | 1.00 | 0.05 |
| 土圧 ke | 1.00 | 0.10 |
| 上載荷重 q | 1.00 | 0.40 |
| 鋼材降伏応力度精度 f_y | 1.20 | 0.065 |
| 矢板断面力算定精度 mS | 1.00 | 0.10 |

注) α : 平均値の偏り(平均値/特性値), V : 変動係数

$$Z = E_y(f_y) - \sigma_s(ke, q, RWL, mS) \quad (1)$$

ここに、 E_y : 鋼材の強度、 f_y : 鋼材降伏応力度、 σ_s : 矢板壁及びタイ材応力度、 ke : 土圧静的成分、 q : 上載荷重、 RWL : 残留水位、 mS : 矢板壁断面力及びタイ材張力算定式精度

矢板壁の曲げ降伏とタイロッドの降伏の2つの破壊モードを考慮したシステム破壊確率は、Owenの方法⁵⁾を用いて、モード間の相関係数、各モードの信頼性指標を元に算出する。

$$P_{js} = \Phi(-\beta_p) + \Phi(-\beta_T) - \Phi(-\beta_p)\Phi(-\beta_T) - \int_0^{\rho} \frac{1}{2\pi\sqrt{1-t^2}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\beta_p^2 - 2t\beta_p\beta_T + \beta_T^2}{1-t^2}\right)\right\} dt \quad (2)$$

ここに、 Φ : 標準正規確率分布関数、 ρ : モード間の相関係数である。また、添字 P, T はそれぞれ矢板壁およびタイロッドの破壊モードに対応する。

2.3 設計供用期間中の破壊確率の算出

ライフサイクルコストの算出においては、土圧や残留水圧等の作用により矢板およびタイロッドにおいて破壊が生じる確率を検討開始時点から必要な年数にわたり評価する必要がある。本研究の場合、設計供用期間50年間にわたる評価が必要である。破壊確率の算出方法を以下に示す。

上述の通り、電気防食により腐食速度は防食を行わない条件の10%に低下するが、腐食は毎年進行するため断面係数や断面積は毎年変化する。そこで、初期状態から t 年後の断面に対象とする土圧等が作用した場合に破壊する確率を P_t とすると、 t 年後に土圧等の作用により初めて破壊する確率 $P(t)$ は以下のように定義できる。

$$P(t) = \begin{cases} qP_t = P_t & t = 1 \\ qP_t E = P_t E & t \geq 2 \end{cases} \quad (3)$$

$$E = \prod_{j=1}^{t-1} (1 - qP_j) = \prod_{j=1}^{t-1} (1 - P_j) \quad (4)$$

ここに、 $P(t)$: 土圧等の作用により t 年後に初めて破壊する確率、 q : 対象とする作用の年平均発生確率 ($=1/t=1/1=1$)、 r : 対象とする作用の再現期間(年)で、永続状態の場合=1、 E : $t-1$ 年後までに対象とする作用により破壊しない確率、 t : 初期断面からの経過年数(年)

一方、一度破壊が発生した場合、復旧断面は建設当初の諸元とすることが一般的であり、本研究でもその前提に従う。つまり、復旧直後の年の破壊確率は P_1 に戻る。さらに、復旧工事は1年以内で完了すると仮定する。検討期間 T 年間で毎年破壊が発生する場合、破壊確率は P_1^T

である。

設計供用期間 50 年間の破壊確率は、供用開始から T 年間 ($T=1\sim 50$) に土圧等の作用により、1~複数回破壊する確率を検討期間 50 年間分合計して求めることができる。ここで、1年の破壊回数は1回として、最大50回の破壊回数を考慮する。

6 年目までの 1~複数回破壊する確率を例示すると表-2 のとおりである。破壊確率は1年目、2年目、 n 年目の順に左から並べて示している。すなわち、例えば2年目の列に例示した $(1-P_1)P_2$ は、1年目に破壊しなかったが2年目に破壊するケースであり、 P_1P_1 は1年目に破壊

表-2 6年目までの破壊確率

| 完成後 1年目 | 2年目 | 3年目 | case No. | 4年目 | 4年目の並べ替え | case No. |
|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------|--|--|----------------------------|-------------|
| P_1 | $(1-P_1)P_2$ | $(1-P_1)(1-P_2)P_3$ | ③ | $(1-P_1)(1-P_2)(1-P_3)P_4$ | $(1-P_1)(1-P_2)(1-P_3)P_4$ | ⑤ |
| | | $(1-P_1)P_2P_1$ | ② | $(1-P_1)(1-P_2)P_3P_1$ | $(1-P_1)(1-P_2)P_1P_3$ | ③ |
| | P_1P_1 | $P_1(1-P_1)P_2$ | ② | $(1-P_1)P_2(1-P_1)P_2$ | $(1-P_1)(1-P_1)P_2P_2$ | ④ |
| | | $P_1P_1P_1$ | ① | $(1-P_1)P_2P_1P_1$ | $(1-P_1)P_1P_1P_2$ | ② |
| | | | | $P_1(1-P_1)(1-P_2)P_3$ | $(1-P_1)(1-P_2)P_1P_3$ | ③ |
| | | | | $P_1(1-P_1)P_2P_1$ | $(1-P_1)P_1P_1P_2$ | ② |
| | | $P_1P_1(1-P_1)P_2$ | $(1-P_1)P_1P_1P_2$ | ② | | |
| | | $P_1P_1P_1P_1$ | $P_1P_1P_1P_1$ | ① | | |
| 5年目 | 5年目の並べ替え | case No. | 6年目 | 6年目の並べ替え | case No. | |
| $(1-P_1)(1-P_2)(1-P_3)(1-P_4)P_5$ | $(1-P_1)(1-P_2)(1-P_3)(1-P_4)P_5$ | ⑦ | $(1-P_1)(1-P_2)(1-P_3)(1-P_4)(1-P_5)P_6$ | $(1-P_1)(1-P_2)(1-P_3)(1-P_4)(1-P_5)P_6$ | ⑪ | |
| | | | $(1-P_1)(1-P_2)(1-P_3)(1-P_4)P_5P_1$ | $(1-P_1)(1-P_2)(1-P_3)(1-P_4)P_1P_5$ | ⑧ | |
| $(1-P_1)(1-P_2)(1-P_3)P_4P_1$ | $(1-P_1)(1-P_2)(1-P_3)P_1P_4$ | ⑤ | $(1-P_1)(1-P_2)(1-P_3)P_4(1-P_1)P_2$ | $(1-P_1)(1-P_1)(1-P_2)(1-P_3)P_2P_4$ | ⑨ | |
| | | | $(1-P_1)(1-P_2)(1-P_3)P_4P_1P_1$ | $(1-P_1)(1-P_2)(1-P_3)P_1P_1P_4$ | ⑤ | |
| $(1-P_1)(1-P_2)P_3(1-P_1)P_2$ | $(1-P_1)(1-P_1)(1-P_2)P_2P_3$ | ⑥ | $(1-P_1)(1-P_2)P_3(1-P_1)(1-P_2)P_3$ | $(1-P_1)(1-P_1)(1-P_2)(1-P_2)P_3P_3$ | ⑩ | |
| | | | $(1-P_1)(1-P_2)P_3(1-P_1)P_2P_1$ | $(1-P_1)(1-P_1)(1-P_2)P_1P_2P_3$ | ⑥ | |
| $(1-P_1)(1-P_2)P_3P_1P_1$ | $(1-P_1)(1-P_2)P_1P_1P_3$ | ③ | $(1-P_1)(1-P_2)P_3P_1(1-P_1)P_2$ | $(1-P_1)(1-P_1)(1-P_2)P_1P_2P_3$ | ⑥ | |
| | | | $(1-P_1)(1-P_2)P_3P_1P_1P_1$ | $(1-P_1)(1-P_2)P_1P_1P_1P_3$ | ③ | |
| $(1-P_1)P_2(1-P_1)(1-P_2)P_3$ | $(1-P_1)(1-P_1)(1-P_2)P_2P_3$ | ⑥ | $(1-P_1)P_2(1-P_1)(1-P_2)(1-P_3)P_4$ | $(1-P_1)(1-P_1)(1-P_2)(1-P_3)P_2P_4$ | ⑨ | |
| | | | $(1-P_1)P_2(1-P_1)(1-P_2)P_3P_1$ | $(1-P_1)(1-P_1)(1-P_2)P_1P_2P_3$ | ⑥ | |
| $(1-P_1)P_2(1-P_1)P_2P_1$ | $(1-P_1)(1-P_1)P_1P_2P_2$ | ④ | $(1-P_1)P_2(1-P_1)P_2(1-P_1)P_2$ | $(1-P_1)(1-P_1)(1-P_1)P_2P_2P_2$ | ⑦ | |
| | | | $(1-P_1)P_2(1-P_1)P_2P_1P_1$ | $(1-P_1)(1-P_1)P_1P_1P_2P_2$ | ④ | |
| $(1-P_1)P_2P_1(1-P_1)P_2$ | $(1-P_1)(1-P_1)P_1P_2P_2$ | ④ | $(1-P_1)P_2P_1(1-P_1)(1-P_2)P_3$ | $(1-P_1)(1-P_1)(1-P_2)P_1P_2P_3$ | ⑥ | |
| | | | $(1-P_1)P_2P_1(1-P_1)P_2P_1$ | $(1-P_1)(1-P_1)P_1P_1P_2P_2$ | ④ | |
| $(1-P_1)P_2P_1P_1P_1$ | $(1-P_1)P_1P_1P_1P_2$ | ② | $(1-P_1)P_2P_1P_1(1-P_1)P_2$ | $(1-P_1)(1-P_1)P_1P_1P_2P_2$ | ④ | |
| | | | $(1-P_1)P_2P_1P_1P_1P_1$ | $(1-P_1)P_1P_1P_1P_1P_2$ | ② | |
| $P_1(1-P_1)(1-P_2)(1-P_3)P_4$ | $(1-P_1)(1-P_2)(1-P_3)P_1P_4$ | ⑤ | $P_1(1-P_1)(1-P_2)(1-P_3)(1-P_4)P_5$ | $(1-P_1)(1-P_2)(1-P_3)(1-P_4)P_1P_5$ | ⑧ | |
| | | | $P_1(1-P_1)(1-P_2)(1-P_3)P_4P_1$ | $(1-P_1)(1-P_2)(1-P_3)P_1P_1P_4$ | ⑤ | |
| $P_1(1-P_1)(1-P_2)P_3P_1$ | $(1-P_1)(1-P_2)P_1P_1P_3$ | ③ | $P_1(1-P_1)(1-P_2)P_3(1-P_1)P_2$ | $(1-P_1)(1-P_1)(1-P_2)P_1P_2P_3$ | ⑥ | |
| | | | $P_1(1-P_1)(1-P_2)P_3P_1P_1$ | $(1-P_1)(1-P_2)P_1P_1P_1P_3$ | ③ | |
| $P_1(1-P_1)P_2(1-P_1)P_2$ | $(1-P_1)(1-P_1)P_1P_2P_2$ | ④ | $P_1(1-P_1)P_2(1-P_1)(1-P_2)P_3$ | $(1-P_1)(1-P_1)(1-P_2)P_1P_2P_3$ | ⑥ | |
| | | | $P_1(1-P_1)P_2(1-P_1)P_2P_1$ | $(1-P_1)(1-P_1)P_1P_1P_2P_2$ | ④ | |
| $P_1(1-P_1)P_2P_1P_1$ | $(1-P_1)P_1P_1P_1P_2$ | ② | $P_1(1-P_1)P_2P_1(1-P_1)P_2$ | $(1-P_1)(1-P_1)P_1P_1P_2P_2$ | ④ | |
| | | | $P_1(1-P_1)P_2P_1P_1P_1$ | $(1-P_1)P_1P_1P_1P_1P_2$ | ② | |
| $P_1P_1(1-P_1)(1-P_2)P_3$ | $(1-P_1)(1-P_2)P_1P_1P_3$ | ③ | $P_1P_1(1-P_1)(1-P_2)(1-P_3)P_4$ | $(1-P_1)(1-P_2)(1-P_3)P_1P_1P_4$ | ⑤ | |
| | | | $P_1P_1(1-P_1)(1-P_2)P_3P_1$ | $(1-P_1)(1-P_2)P_1P_1P_1P_3$ | ③ | |
| $P_1P_1(1-P_1)P_2P_1$ | $(1-P_1)P_1P_1P_1P_2$ | ② | $P_1P_1(1-P_1)P_2(1-P_1)P_2$ | $(1-P_1)(1-P_1)P_1P_1P_2P_2$ | ④ | |
| | | | $P_1P_1(1-P_1)P_2P_1P_1$ | $(1-P_1)P_1P_1P_1P_1P_2$ | ② | |
| $P_1P_1P_1(1-P_1)P_2$ | $(1-P_1)P_1P_1P_1P_2$ | ② | $P_1P_1P_1(1-P_1)(1-P_2)P_3$ | $(1-P_1)(1-P_2)P_1P_1P_1P_3$ | ③ | |
| | | | $P_1P_1P_1(1-P_1)P_2P_1$ | $(1-P_1)P_1P_1P_1P_1P_2$ | ② | |
| $P_1P_1P_1P_1P_1$ | $P_1P_1P_1P_1P_1$ | ① | $P_1P_1P_1P_1(1-P_1)P_2$ | $(1-P_1)P_1P_1P_1P_1P_2$ | ② | |
| | | | $P_1P_1P_1P_1P_1P_1$ | $P_1P_1P_1P_1P_1P_1$ | ① | |

し、復旧したが2年目に再び破壊するケースである。ここで、1年目の破壊による復旧のため2年目には建設当初の断面諸元に戻っているために破壊確率としては P_1 となる。

3年目以降、異なるツリーであるが破壊確率としては同じケースが生じる。例えば3年目の場合、1, 2, 3年目の順に、①破壊せず、破壊、破壊のケース(表中、3年目の2列目)、②破壊、破壊せず、破壊のケース(表中、3年目の3列目)である。同じケースが n 個ある場合は、破壊確率は n 倍となる。このような同じ破壊確率のケースをカウントするために、4年目以降は破壊確率を並べ替えている。

表に示したケース番号は、同じ破壊確率のケースをまとめたうえで、異なる破壊確率のケースが幾つ生じるかを示している。表-3には $T=6$ の場合の n 倍する際の係数をあわせて示している。

これらの表の事象をまとめて各年のライフサイクルコストの計算式を定式化する必要があるが、表より以下のことが明らかとなる。

a) T 年目には 2^{T-1} 通りの事象が生じる。また並べ替えて得られる係数の和は 2^{T-1} となる。

例えば、 $T=6$ の場合、 $2^{6-1}=32$ 、 $T=50$ の場合、 $2^{50-1}=562,949,953,421,312$ である。

b) 式(4)で表される作用により破壊しない確率の項を無視すれば、 T 年目の破壊確率のそれぞれの式において

$$\sum_{t=T} T \text{ である。}$$

例えば $T=6$ の場合、表-2の $P_1P_1P_1P_1P_1P_1$ のケースでは $\sum_{t=1}^6 1 \times 6 = 6$ 、 $P_1P_1P_1(1-P_1)P_2P_1$ のケースにおいて

$$\sum_{t=1}^6 1 \times 4 + 2 = 6 \text{ となる。ここで、}(1-P_1)\text{の項は破壊しない年のものであるため総和の計算には反映されない。}$$

c) 式(4)で表される作用により破壊しない確率は >1 の P_i に対して、 $\prod_{j=1}^{i-1} (1-P_j)$ をその前に伴う。これは、 P_i の定義より明らかであろう。

d) T 年目の破壊確率 P_T の評価において考慮する必要のある破壊イベントは、破壊しない確率の項を無視すれば、 T 以下の数値を、重複を許容して T 以下の個数並べる順列のうち、合計が T となるケースである。

例えば、表-3に示す $T=6$ の場合で、 $P_1P_1P_1P_1P_1P_1$ のケースから $(1-P_1)(1-P_2)(1-P_3)(1-P_4)(1-P_5)P_6$ のケースまでとなる。ここで、 P_1 が4回、 P_2 が1回生じるケースでは P_2 の発生時期により5通りのケースがある。同様に、 P_1 、 P_2 、 P_3 が各々1回生じるケースでは、3つの順列により6通りのケースがある。

つまり、 T 年間で、破壊の生じる回数が N 回 ($N \leq T$)

あり、その中で P_i, P_j, \dots, P_k が a 回、 b 回、 c 回重複していれば、 $N!/a!/b!/\dots/c!$ 通りとなる。

従って、 $T=6$ の場合を考慮すると表-4に示す組み合わせが得られる。50年後において考慮すべきケース数は天文学的な数字となる。これを一つ一つ評価していくことは計算負荷の観点で大きく不利である。このため、計算効率を高める観点から、本研究では以下のような処理を行って破壊確率を評価した。

計算負荷の観点で問題となるのは T が大きくなった時の破壊する確率の項の組み合わせ、すなわち、異なる破壊確率となるケースの数を得ることである。なお、同じ破壊確率となるケースの数については、重複を許した順列の数の問題として簡便に評価が可能である。

ここで、簡単のため、 $T=3$ の場合を考える。PCの演算

表-3 6年目の各ケース

| 破壊確率(6年目並べ替え) | case No. | 係数 (=登場回数) |
|--|----------|---------------|
| $P_1P_1P_1P_1P_1P_1$ | ① | 1 |
| $(1-P_1)P_1P_1P_1P_1P_2$ | ② | 5 |
| $(1-P_1)(1-P_2)P_1P_1P_1P_3$ | ③ | 4 |
| $(1-P_1)(1-P_1)P_1P_1P_2P_2$ | ④ | 6 |
| $(1-P_1)(1-P_2)(1-P_3)P_1P_1P_4$ | ⑤ | 3 |
| $(1-P_1)(1-P_1)(1-P_2)P_1P_2P_3$ | ⑥ | 6 |
| $(1-P_1)(1-P_1)(1-P_1)P_2P_2P_2$ | ⑦ | 1 |
| $(1-P_1)(1-P_2)(1-P_3)(1-P_4)P_1P_5$ | ⑧ | 2 |
| $(1-P_1)(1-P_1)(1-P_2)(1-P_3)P_2P_4$ | ⑨ | 2 |
| $(1-P_1)(1-P_1)(1-P_2)(1-P_2)P_3P_3$ | ⑩ | 1 |
| $(1-P_1)(1-P_2)(1-P_3)(1-P_4)(1-P_5)P_6$ | ⑪ | 1 |
| | Σ | 32 |

表-4 $T=6$ の場合の破壊が生じるパターンと登場回数

| パターン | | | | | | 係数 (=登場回数) | |
|------|---|---|---|---|---|---------------|---|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | $6!/6!=$ | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | - | $5!/4!=$ | 5 |
| 1 | 1 | 1 | 3 | - | - | $4!/3!=$ | 4 |
| 1 | 1 | 2 | 2 | - | - | $4!/2!/2!=$ | 6 |
| 1 | 1 | 4 | - | - | - | $3!/2!=$ | 3 |
| 1 | 2 | 3 | - | - | - | $3!=$ | 6 |
| 2 | 2 | 2 | - | - | - | $3!/3!=$ | 1 |
| 1 | 5 | - | - | - | - | $2!=$ | 2 |
| 2 | 4 | - | - | - | - | $2!=$ | 2 |
| 3 | 3 | - | - | - | - | $2!/2!=$ | 1 |
| 6 | - | - | - | - | - | $1!=$ | 1 |

係数の和= 32

表-5 一般的なアルゴリズムにより検索

| 破壊回数 | 1回 | 2回 | 3回 | $\Sigma t=T$ の条件適合 |
|------|----|----|----|--------------------|
| 1回 | 1 | — | — | |
| | 2 | — | — | |
| | 3 | — | — | ○ |
| 2回 | 1 | 1 | — | |
| | 1 | 2 | — | ○ |
| | 1 | 3 | — | |
| | 2 | 1 | — | (○だが, 必要なし) |
| | 2 | 2 | — | |
| | 2 | 3 | — | |
| | 3 | 1 | — | |
| | 3 | 2 | — | |
| 3回 | 3 | 3 | — | |
| | 1 | 1 | 1 | ○ |
| | 1 | 1 | 2 | |
| | 1 | 1 | 3 | |
| | 1 | 2 | 1 | |
| | 1 | 2 | 2 | |
| | 1 | 2 | 3 | |
| | 1 | 3 | 1 | |
| | 1 | 3 | 2 | |
| | 1 | 3 | 3 | |
| | 2 | 1 | 1 | |
| | 2 | 1 | 2 | |
| | 2 | 1 | 3 | |
| | 2 | 2 | 1 | |
| | 2 | 2 | 2 | |
| | 2 | 2 | 3 | |
| | 2 | 3 | 1 | |
| | 2 | 3 | 2 | |
| | 2 | 3 | 3 | |
| | 3 | 1 | 1 | |
| 3 | 1 | 2 | | |
| 3 | 1 | 3 | | |
| 3 | 2 | 1 | | |
| 3 | 2 | 2 | | |
| 3 | 2 | 3 | | |
| 3 | 3 | 1 | | |
| 3 | 3 | 2 | | |
| 3 | 3 | 3 | | |

においては、ループ変数を1つから始めて、2つ、3つ・・・と多重ループを形成するアルゴリズムが簡便であるため、一般には表-5のような $t=1\sim 3$ でのループ処理を行う。これは考慮する年数 T が変動していくことから、破壊回数として T 回から1回を検索するよりも1回から T 回を検索の方がコード化しやすいためである。また破壊回数をランダムに検索することはこの種の演算においては考えにくい。表-5より破壊回数が2回以上となる場合に、上記 b)の条件に適合するものを検索した後、多数の無駄な検索が行われていることが分かる。ここに示す $T=3$ であれば、計算負荷は大きな問題にならないが、 T が大きくなるに従って、この方法では計算に莫大な時間を要することとなる。

ここで、①前述した b)の条件に適合する必要があること、②検索すべきは組み合わせであって、順列ではないことをループ処理に反映させる。具体的には①の条件より、 Σt が T を超えるようなパターンは検索する必要がなく、例えば $T=3$ の場合では、2回目以降のループ終端は3まではなく、“ $3-\Sigma$ (それ以前のループの t)”とすることができる。また②の条件より、2回目以降のループ開始は1ではなく、“直前のループの t ”とすることができる。当然ループの開始が終端の値を超えるようなケースは省略される。

これらの処理により表-5の検索は表-6のとおりとなり、検索回数が格段に減少していることが分かる。なお、表-6では上記の②の効果は明瞭ではないが、 T が大きくなれば非常に有効に機能する。

これにより検索に要する時間は格段に減少し、Intel社製 Xeon 3.60GHz プロセッサのPCにおいて約5分間の計算時間で $T=50$ までのパターンを検索することが可能となった。なお、 $T=50$ において考慮すべき組み合わせのパターン数は204,226である。

ここで、 t 年の各事象の破壊確率を足しあわせたものを $P_{f,t}$ とすると、設計供用期間50年間に作用により破壊が生起する確率 $P_{f,50}$ は、 $P_{f,t}$ を設計供用期間分($t=1\sim 50$)足し合わせて、式(5)の通りとなる。

$$P_{f,50} = \sum_{t=1}^{50} P_{f,t} \quad (5)$$

表-6 短縮検索アルゴリズムによる検索

| 破壊回数 | 1回 | 2回 | 3回 | $\Sigma t=T$ の条件適合 |
|------|---------------|---------------------|-------------------------|--------------------|
| 1回 | $t_1=1\sim 3$ | | | |
| | 1 | — | — | |
| | 2 | — | — | |
| 2回 | 3 | — | — | ○ |
| | $t_1=1\sim 3$ | $t_2=t_1\sim 3-t_1$ | | |
| 2回 | 1 | 1 | — | |
| | 1 | 2 | — | ○ |
| 3回 | $t_1=1\sim 3$ | $t_2=t_1\sim 3-t_1$ | $t_3=t_2\sim 3-t_2-t_1$ | |
| | 1 | 1 | 1 | ○ |

2.4 破壊確率の比較

工業製品であるわが国の矢板の断面係数は、あらかじめ鉄鋼会社により指定された値のもののみが用意される。そして、矢板の規格は断面係数のピッチが密ではなく、ある特定の領域では断面係数の空白が生じてしまう。本研究では、この断面係数の刻み幅の不統一がLCC最小化等の検討に及ぼす影響を低くするために、断面係数の空白領域に仮想の矢板規格を設定した。この仮想の規格は今後仮想A等と記す。

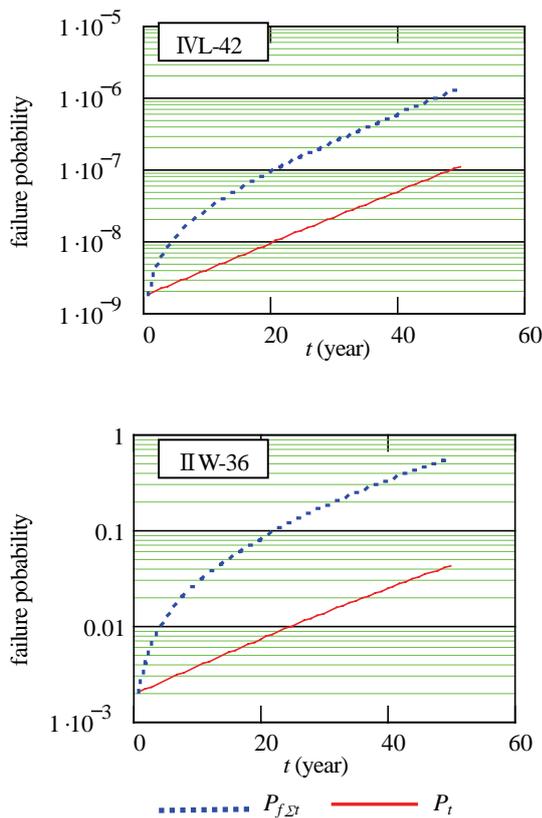


図-2 鋼材の腐食に伴うシステム破壊確率の変化

結果の一例として、水深-11mの鋼材の腐食に伴うシステム破壊確率の変化を図-2に示す。それぞれ矢板がIVL型-タイ材径42mm、矢板がIIW型-タイ材径36mmの結果であり、水深-11mの条件では諸元の最も大きい場合と最も小さい場合の組み合わせになる。

図より、片対数軸上で P_t は経過年に対してほぼ1次関数的に増加している。この理由について考察する。矢板の破壊とタイ材の破壊の相関係数は概ね0.95以上と非常に相関が高いことが分かった。この場合、システム破壊確率はエレメントの破壊確率のうち、破壊確率の大きい方にほぼ一致する。従って、2つの破壊モードのうち支配的なモードの信頼性指標によってシステム信頼性指標が評価できる。限界状態関数は式(1)に示すとおりであり作用効果（鋼材応力度）は関係する確率変数により構成される非線形項であるが、いま矢板に関して強度 R 、作用モーメント M の2変数よりなる単純な場合に置換えて議論すると、上述の通り断面係数は経過年に対して1次関数的に減少することから、信頼性指標 β は式(6)により評価できる。

$$\beta = \frac{\mu_R - \frac{\mu_M}{Z(1-at)}}{\sqrt{\sigma_R^2 + \left(\frac{\sigma_M}{Z(1-at)}\right)^2}} \quad (6)$$

ここに、 Z : 断面係数初期値、 t : 経過年、 a : 断面係数減少に関する係数である。また、 μ 、 σ はそれぞれ平均、標準偏差である。

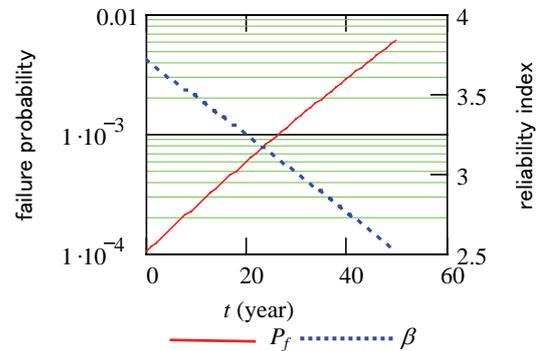


図-3 破壊確率の経年変化試算結果

今 $\mu_R = 468000\text{kN/m}^2$ 、 $\mu_M = 313.402\text{kN}\cdot\text{m}$ 、 $\sigma_R = 30420\text{kN/m}^2$ 、 $\sigma_M = 42.329\text{kN}\cdot\text{m}$ 、 $\alpha = 0.00279$ 、 $Z = 0.001097\text{m}^3$ の条件で計算してみると図-3に示すように経過年に対して、信頼性指標は普通軸で一次関数的に減少、破壊確率は対数軸で一次関数的に増加する。このような特徴が、後述するライフサイクルコスト算出時の破壊確率の簡易評価に重要な意味を持つが、これは信頼性指標及び破壊確率の変化度が比較的小さい領域における議論であることが大きいといえる。

次に、 $P_{f,t}$ について検討する。ライフサイクルコストの算出に必要な $P_{f,t}$ は上述の通り破壊と復旧を考慮した経過年までの破壊確率の和となるために簡単な評価はできない。しかし、表-2に示したように、例えば2年目までについては $P_{f,t} = P_1 + P_2 - P_1(P_2 - P_1)$ であり、右辺第三項は破壊確率の積となること、さらにカッコ内の $P_2 - P_1$ は破壊確率の経年変化が比較的小さいことからゼロに近い値となることなどが期待できるため、近似的には $P_{f,t} \approx P_1 + P_2$ となることが想定される。3年目以降についても概ね同様な議論が成立する。

そこで、式(7)に示すように、 $P_{f,t}$ の簡易推定を行う。式(7)では膨大なケースの組み合わせを考慮する必要がなく、ライフサイクルコストの評価に必要な $P_{f,t}$ の評価が比較的容易に行える。

$$P_{f,t_est1} = \sum_{k=1}^t P_k \quad (7)$$

さらに、 $P_{f,t}$ のより簡易な評価方法として、上述の結果を踏まえて片対数軸上で P_t を t に対して1次関数近似を行い(式(8))、1年目と50年目の P_1 と P_{50} のみを用いて P_t を推定し、さらに式(9)によって $P_{f,t}$ を簡易推定する方法を併せて検討する。この方法では破壊確率の評価を2年分のみ行えばよいので、適用は非常に容易に行える。

$$P_{t_est} = 10^{\frac{\log(P_{50}) - \log(P_t) + \log(P_0)}{50}} \quad (8)$$

$$P_{f\Sigma t_est2} = \sum_{k=1}^t P_{k_est} \quad (9)$$

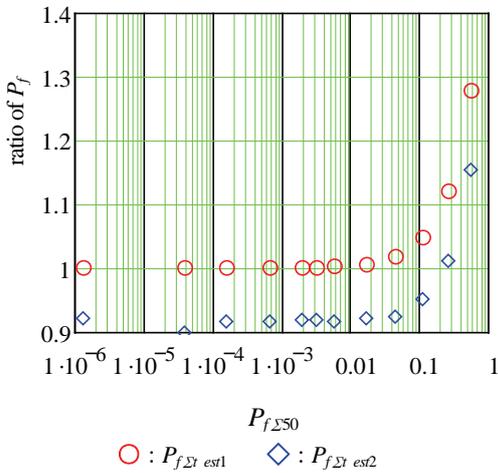


図-4 $P_{f\Sigma 50}$ の推定精度

水深-11m の場合について、両推定法による $P_{f\Sigma 50}$ の推定精度を図-4 に示す。鉛直軸は $P_{f\Sigma 50}$ に対する各手法による推定値の比である。図より、破壊確率が小さい領域では $P_{f\Sigma t_est1}$ の精度が高いことが分かる。破壊確率の大きな領域では誤差が大きく、破壊確率 0.5 程度の際には約 30% の過大評価となる。しかしながら、通常ライフサイクルコストの評価で問題となる破壊確率の値は 1% 以下であることが想定されるため、ライフサイクルコストの評価に及ぼす影響は比較的低いことが想定される。破壊確率が大きい領域における過大評価はライフサイクルコストカーブにおけるライフサイクルコスト最小点よりも破壊確率が大きい領域での過大評価となるため、ライフサイクルコスト最小のポイントは破壊確率が小さい領域に移る傾向となり、結果としては安全側の評価となる可能性が高いと考えられる。

一方、 $P_{f\Sigma t_est2}$ では破壊確率の小さい領域で 10% 程度の過少評価であった。ここで、破壊確率の非常に小さい領域における破壊確率の過小評価はライフサイクルコストカーブへの影響は小さいことが想定される。ただし、破壊確率の比較的大きな領域での過小評価は $P_{f\Sigma t_est1}$ とは逆に危険側の評価になる可能性がある。

以上述べた傾向は、他の水深においても概ね同様であった。本研究ではライフサイクルコストの評価を行うことを目的としており破壊確率そのものの精密な評価が主目的ではないため、 $P_{f\Sigma t_est2}$ の方法も適用性がある可能性がある。具体的には次章で検討を行う。

なお、期待総費用で対象とする P_{50} とライフサイクルコストで対象とする $P_{f\Sigma 50}$ の比較を図-5 に示す。 P_{50} に

対する $P_{f\Sigma 50}$ の比は 10.0~18.0 の範囲にあり、平均的には 13.5 である。なお、この比の値には $P_{f\Sigma 50}$ が 1.0 となるデータは除いている。

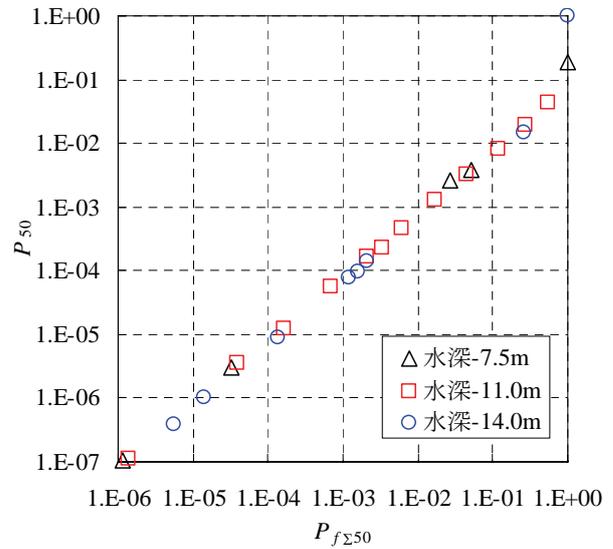


図-5 P_{50} と $P_{f\Sigma 50}$ の比較

4. ライフサイクルコストと期待総費用の比較検討

4.1 ライフサイクルコストと期待総費用の算出方法

被災時の費用には社会的割引率を考慮する考え方があるため、本研究では社会的割引率を考慮する場合と考慮しない場合の 2 ケースの検討を行う。社会的割引率とは、将来発生する破壊により必要となる復旧の費用を現在の貨幣価値に換算することで初期建設費などと同じ水準で比較できるという考え方に基づくものである。

永続状態における検討であるため、考慮すべき作用は永続作用であり、再現期間は 1 年であることから、社会的割引率を考慮する場合、考慮しない場合のライフサイクルコストの期待値 ELC はそれぞれ式(10)、(11)により得られる。ここで、社会的割引率 i としては、日本での公共事業評価における標準値として $i=0.04$ を用いる⁹⁾。また、比較の対象となる期待総費用 ETC については式(12)により得られる。

$$ELC = C_i + C_f \sum_{t=1}^{50} \frac{P_{ft}}{(1+i)^{t-1}} \quad (10)$$

$$ELC = C_i + C_f P_{f\Sigma 50} \quad (11)$$

$$ETC = C_i + P_{50} C_f \quad (12)$$

ここに、 C_i : 初期建設費、 C_f : 被災時費用(復旧費+経済損失)、 i : 社会的割引率、 P_{50} : 対象とする土圧等が作用した場合に破壊する確率(50 年後の腐食を見込んだ断面に対応)

さらに、被災時費用の算出に用いる経済損失について

は、被災に伴って生じる陸上・海上輸送における迂回に伴う経済損失（輸送費用・輸送時間）、代替輸送による費用の増加をモデル化した既往の研究の結果²⁾を用いた。既往の研究の結果により、経済損失の平均値 μ および標準偏差 σ を用いて、重要度の高い港湾の経済損失を $\mu+\sigma$ 、重要度の特に高い港湾の経済損失を $\mu+3\sigma$ と設定した。

4.2 ライフサイクルコストと期待総費用

本節ではライフサイクルコスト等の検討を行うが、本研究では矢板とタイ材のシステム破壊確率を検討しているため、矢板の断面係数とタイ材の断面積の組み合わせ数は非常に多くなる。ただし、最終的にライフサイクルコスト等の議論において意味のある組み合わせは限られたものとなる。

システム信頼性指標やシステム破壊確率は矢板とタイ材の各々のエレメント信頼性指標により評価されるが、2つのモード間に次の関係がある。即ち、矢板の信頼性指標は断面係数の増加に伴って増加する。しかしな

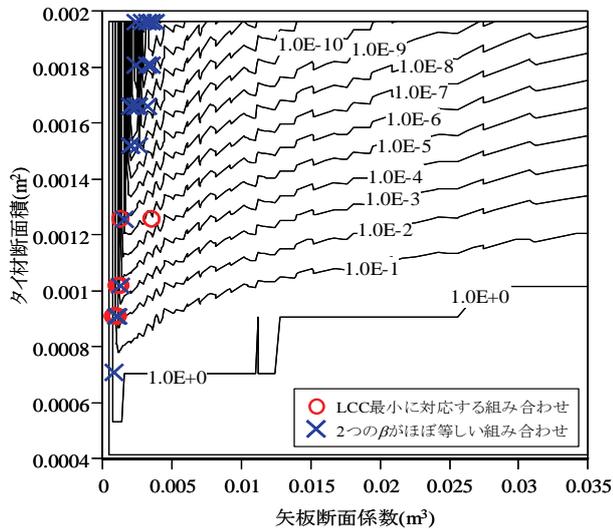


図-6 システム破壊確率の等高線

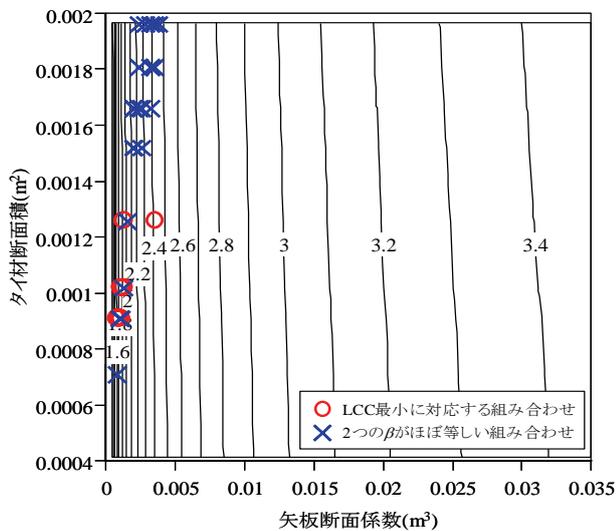


図-7 初期建設費の等高線

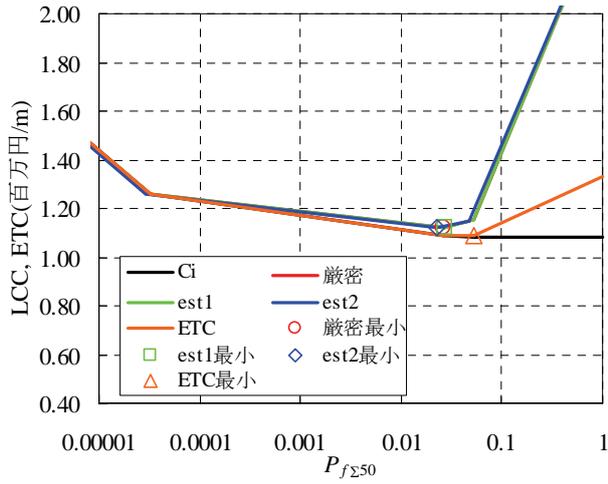
がら、矢板の断面係数を増加させることはタイ材取付け点における支点反力の増加をもたらすためにタイ材の信頼性指標の減少につながる。このため、矢板の断面係数とタイ材の断面積に対する $P_{f,250}$ の等高線を示すと図-6 のようになり、システム破壊確率の等高線は図に示した座標軸において右下がりの傾向は示さない。

また、初期建設費の等高線は図-7 に示した関係にあり、建設費 C_i は矢板の規格に依存する傾向が強く、ほぼ鉛直軸に平行な等高線を示す。以上のことより、ライフサイクルコスト最小に対応する断面諸元は図-6 および図-7 において○のマークを付した条件となる。これらの図にはエレメント信頼性指標がほぼ一致する条件を◇のマークで示したが、両者はほぼ一致していることが分かる。

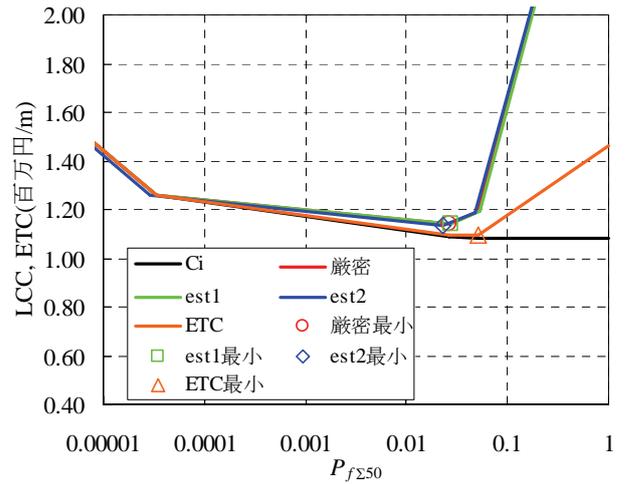
ライフサイクルコストの検討を行う際、矢板の断面係数とタイ材の断面積をそれぞれ変化させて全ての組み合わせに対して破壊確率を評価することが一般的と考えられるが、算出される組み合わせのうちライフサイクルコストの評価に必要なのはそのうちの僅かな条件でしかない。ここまでの議論より、ライフサイクルコストの検討におけるシステム破壊確率の探索条件として、以下の方法が計算負荷の観点から推奨される。

- ①タイ材の断面積を一定値に仮定して、矢板の断面係数を変化させて矢板の曲げに関する信頼性指標を評価する。これは、矢板の信頼性指標はタイ材の断面積の影響を受けないためである。
- ②ライフサイクルコストの検討において必要なシステム信頼性指標は、概ね矢板の信頼性指標とタイ材の信頼性指標が概ね一致する条件である。これより、各断面係数における矢板の信頼性指標をもとにした部分係数法によりタイ材の断面積を決定する。部分係数は、文献2)に示した感度係数と、ここで求めた信頼性指標などより求めることが出来る。求められたタイ材断面積の前後数点の断面積を抽出し、システム破壊確率を評価する。

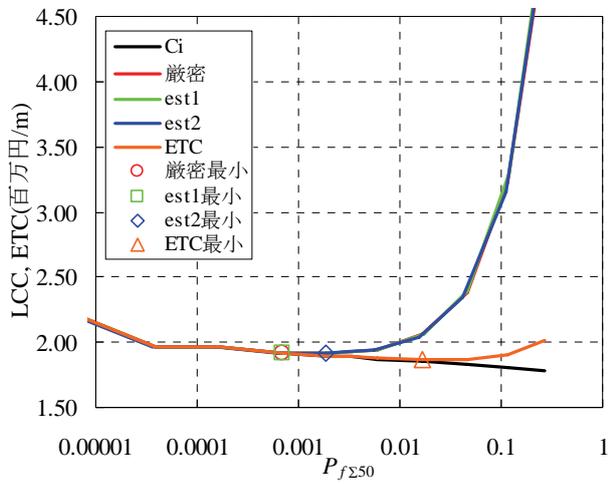
図-8 には各手法によるライフサイクルコストカーブ、図-9 には各手法による社会的割引率を考慮したライフサイクルコストカーブを示す。比較のために期待総費用のカーブを併せて示している。ここで、est1は $P_{f,250,est1}$ を用いたライフサイクルコストであり、est2は $P_{f,250,est2}$ を用いたライフサイクルコストである。図より、社会的割引率を考慮する場合、水深-7.5mでは破壊確率の大きい領域で簡易法はライフサイクルコストをやや過大に評価している。なお、水深-7.5mで破壊確率を過小評価するest2によるカーブがest1によるカーブを上回るように見えるが、これは破壊確率が0.05付近でest2のプロットがest1のプロットの左下に位置し、その右隣のプロットでは破壊確率が両者とも1.0となり、同じプロットになるためである。従ってest2のライフサイクルコストはest1よりも小さい。その他のケースでは各簡易法による



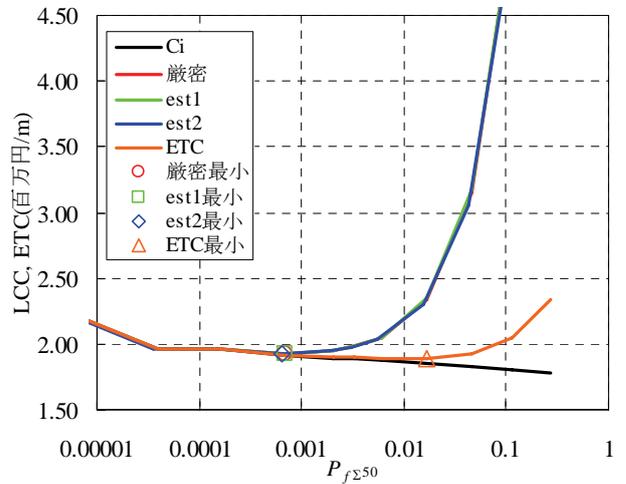
1)水深-7.5m



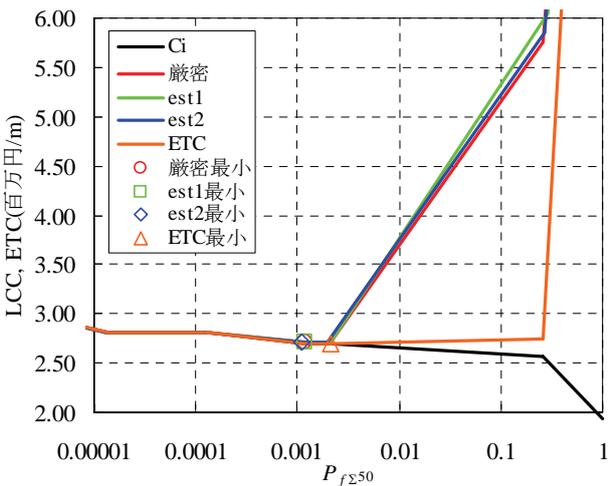
1)水深-7.5m



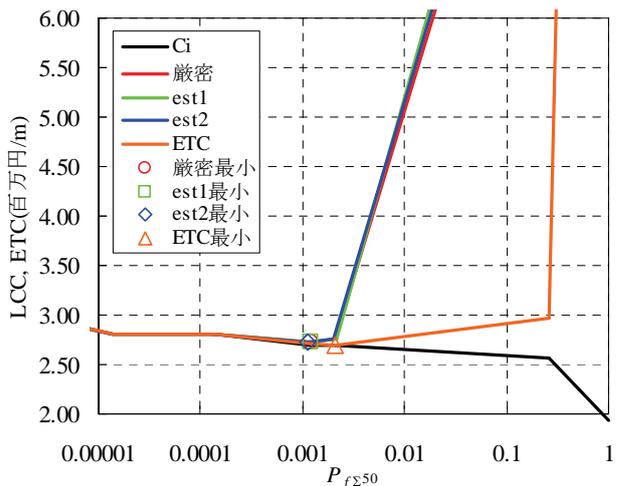
2)水深-11.0m



2)水深-11.0m



3)水深-14.0m

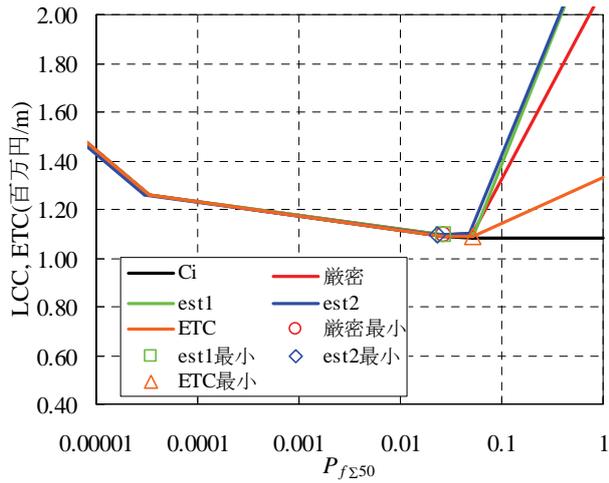


3)水深-14.0m

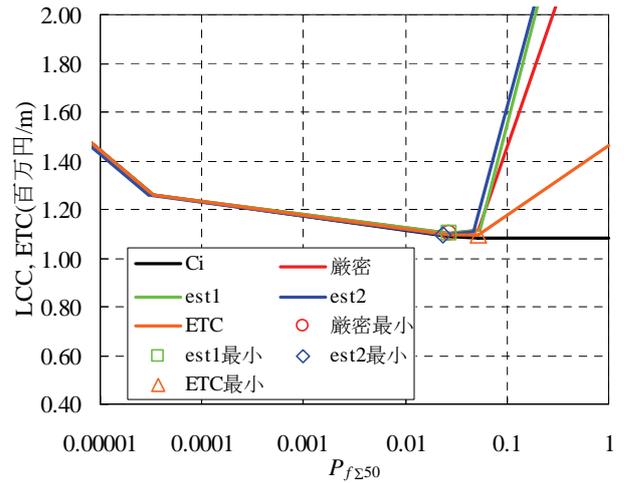
a) 経済損失の設定： $\mu+\sigma$

b) 経済損失の設定： $\mu+3\sigma$

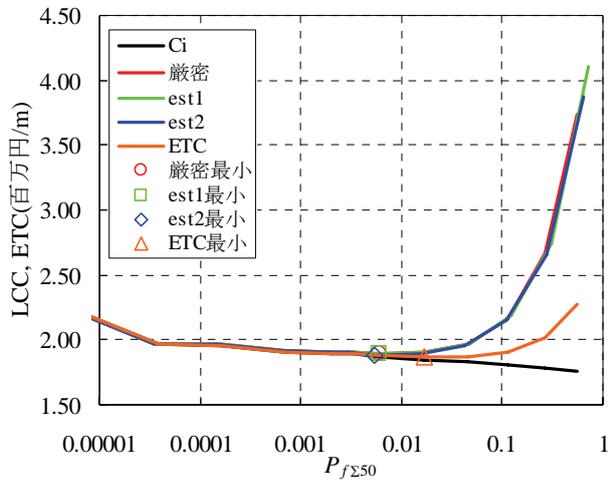
図-8 ライフサイクルコストカーブ



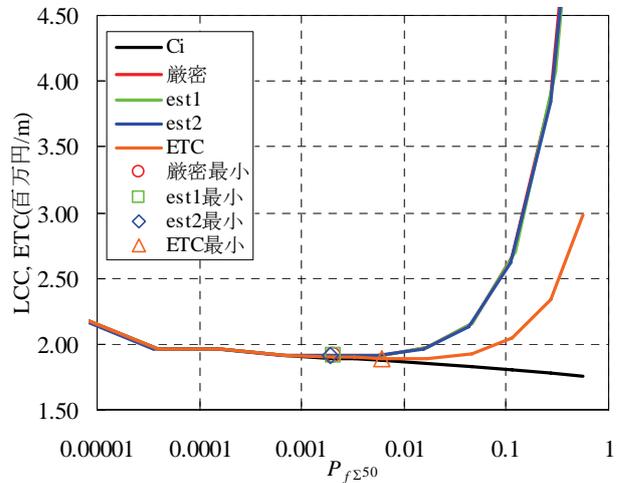
1)水深-7.5m



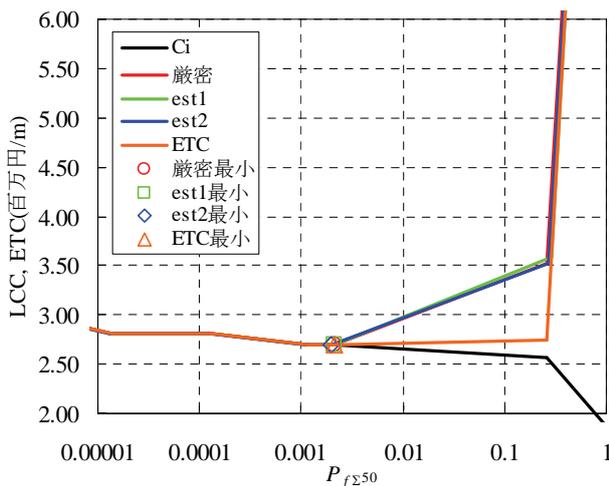
1)水深-7.5m



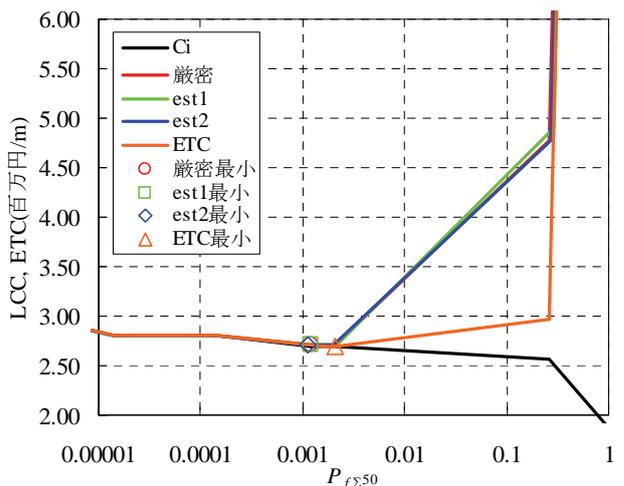
2)水深-11.0m



2)水深-11.0m



3)水深-14.0m



3)水深-14.0m

a) 経済損失の設定: $\mu + \sigma$

b) 経済損失の設定: $\mu + 3\sigma$

図-9 ライフサイクルコストカーブ(社会的割引率考慮)

表-7 各手法による矢板およびタイ材の断面諸元

| 水深 | 設計 | 重要度 | 矢板規格 | 矢板断面係数 m ³ /m | タイ ロッド径 mm | P ₅₀ | P _{f250} |
|--------|---------------------------|------|-------|-----------------------------|------------------|------------------|-------------------|
| -7.5m | 厳密 : LCC 最小 | 高い | I A | 0.00043 | 32 | 2.677E-03 | 2.670E-02 |
| | | 特に高い | I A | 0.00043 | 32 | 2.677E-03 | 2.670E-02 |
| | 厳密 : LCC 最小 社会的割引率考慮 | 高い | I A | 0.00043 | 32 | 2.677E-03 | 2.670E-02 |
| | | 特に高い | I A | 0.00043 | 32 | 2.677E-03 | 2.670E-02 |
| | est1 : LCC 最小 | 高い | I A | 0.00043 | 32 | 2.677E-03 | 2.703E-02 |
| | | 特に高い | I A | 0.00043 | 32 | 2.677E-03 | 2.703E-02 |
| | est1 : LCC 最小 社会的割引率考慮 | 高い | I A | 0.00043 | 32 | 2.677E-03 | 2.703E-02 |
| | | 特に高い | I A | 0.00043 | 32 | 2.677E-03 | 2.703E-02 |
| | est2 : LCC 最小 | 高い | I A | 0.00043 | 32 | 2.677E-03 | 2.304E-02 |
| | | 特に高い | I A | 0.00043 | 32 | 2.677E-03 | 2.304E-02 |
| | est2 : LCC 最小 社会的割引率考慮 | 高い | I A | 0.00043 | 32 | 2.677E-03 | 2.304E-02 |
| | | 特に高い | I A | 0.00043 | 32 | 2.677E-03 | 2.304E-02 |
| | ETC 最小 | 高い | I A | 0.00043 | 28 | 3.796E-03 | 5.212E-02 |
| | | 特に高い | I A | 0.00043 | 28 | 3.796E-03 | 5.212E-02 |
| | レベル1信頼性 設計 | 高い | II A | 0.00073 | 32 | 4.692E-06 | 5.103E-05 |
| | | 特に高い | II A | 0.00073 | 32 | 4.692E-06 | 5.103E-05 |
| -11.0m | 厳密 : LCC 最小 | 高い | III | 0.00119 | 38 | 5.697E-05 | 6.898E-04 |
| | | 特に高い | III | 0.00119 | 38 | 5.697E-05 | 6.898E-04 |
| | 厳密 : LCC 最小 社会的割引率考慮 | 高い | III | 0.00119 | 38 | 5.697E-05 | 6.898E-04 |
| | | 特に高い | III | 0.00119 | 42 | 5.697E-05 | 6.898E-04 |
| | est1 : LCC 最小 | 高い | III | 0.00119 | 38 | 5.697E-05 | 6.900E-04 |
| | | 特に高い | III | 0.00119 | 38 | 5.697E-05 | 6.900E-04 |
| | est1 : LCC 最小 社会的割引率考慮 | 高い | III | 0.00119 | 38 | 5.697E-05 | 6.900E-04 |
| | | 特に高い | III | 0.00119 | 42 | 5.697E-05 | 6.900E-04 |
| | est2 : LCC 最小 | 高い | III | 0.00119 | 38 | 5.697E-05 | 6.318E-04 |
| | | 特に高い | III | 0.00119 | 38 | 5.697E-05 | 6.318E-04 |
| | est2 : LCC 最小 社会的割引率考慮 | 高い | III | 0.00119 | 38 | 5.697E-05 | 6.318E-04 |
| | | 特に高い | III | 0.00119 | 42 | 5.697E-05 | 6.318E-04 |
| | ETC 最小 | 高い | III | 0.00119 | 38 | 5.697E-05 | 6.898E-04 |
| | | 特に高い | III | 0.00119 | 38 | 5.697E-05 | 6.898E-04 |
| | レベル1信頼性 設計 | 高い | III | 0.00119 | 38 | <u>5.697E-05</u> | <u>6.898E-04</u> |
| | | 特に高い | III A | 0.00134 | 38 | 1.217E-05 | 1.628E-04 |
| -14.0m | 厳密 : LCC 最小 | 高い | IV | 0.00204 | 44 | 7.951E-05 | 1.188E-03 |
| | | 特に高い | IV | 0.00204 | 44 | 7.951E-05 | 1.188E-03 |
| | 厳密 : LCC 最小 社会的割引率考慮 | 高い | IV A | 0.00203 | 42 | 1.386E-04 | 2.119E-03 |
| | | 特に高い | IV | 0.00204 | 44 | 7.951E-05 | 1.188E-03 |
| | est1 : LCC 最小 | 高い | IV | 0.00204 | 44 | 7.951E-05 | 1.188E-03 |
| | | 特に高い | IV | 0.00204 | 44 | 7.951E-05 | 1.188E-03 |
| | est1 : LCC 最小 社会的割引率考慮 | 高い | IV A | 0.00203 | 42 | 1.386E-04 | 2.121E-03 |
| | | 特に高い | IV | 0.00204 | 44 | 7.951E-05 | 1.188E-03 |
| | est2 : LCC 最小 | 高い | IV | 0.00204 | 44 | 7.951E-05 | 1.111E-03 |
| | | 特に高い | IV | 0.00204 | 44 | 7.951E-05 | 1.111E-03 |
| | est2 : LCC 最小 社会的割引率考慮 | 高い | IV A | 0.00203 | 42 | 1.386E-04 | 1.996E-03 |
| | | 特に高い | IV | 0.00204 | 44 | 7.951E-05 | 1.111E-03 |
| | ETC 最小 | 高い | IV A | 0.00203 | 42 | 1.386E-04 | 2.119E-03 |
| | | 特に高い | IV A | 0.00203 | 42 | 1.386E-04 | 2.119E-03 |
| | レベル1信頼性 設計 | 高い | IV A | 0.00203 | 42 | <u>1.386E-04</u> | <u>2.119E-03</u> |
| | | 特に高い | IV W | 0.00246 | 44 | 8.889E-06 | 1.346E-04 |

■ : ETC 最小 ≥ LCC 最小となる破壊確率, : L1 設計 ≥ LCC 最小となる破壊確率

太字 : 断面を決定した破壊確率

レベル1信頼性設計において, 重要度が高いは $\beta=2.7$, 特に高いは $\beta=3.6$ に相当する

カーヴは厳密法によるものとはほぼ一致している。このためライフサイクルコスト最小と判定される破壊確率もほぼ一致している。これに対して期待総費用最小の破壊確率は、ライフサイクルコスト最小の破壊確率よりも大きな破壊確率であり、期待総費用最小化を厳密に適用するとライフサイクルコスト最小化の観点からは危険側の評価となるといえる。

4.3 各方法による安全性水準の比較

表一7 に各手法による矢板およびタイ材の断面諸元を比較する。表には、港湾基準¹⁾に示される部分係数によるレベル1信頼性設計を行った場合の断面とその破壊確率についても示している。上述の通り、港湾基準における部分係数は期待総費用最小化に対応する部分係数を0.05刻みで安全側に丸めたものである。なおここでは実際の日本の規格に従って記しており、仮定の規格は除外している。

表より、社会的割引率を考慮しない場合、簡易推定法によるライフサイクルコスト最小化の破壊確率は、厳密法と比較すると14%(est2)~1%(est1)程度の誤差となる。ただし、誤差の大きいest2は安全側の評価となっており、簡易法としては許容しうる範囲ではないかと考えられる。さらに、矢板およびタイ材の断面諸元は簡易推定法と厳密法で一致する。従って、複雑な計算を必要とするライフサイクルコストを厳密に計算しなくとも、本研究による簡易推定法で十分な精度のライフサイクルコストカーヴが評価できると考えられる。

また、期待総費用最小化の破壊確率はライフサイクルコスト最小化の破壊確率に対して最大で2.0倍程度(P_{JS50} で評価)であり、断面諸元も小さく危険側となる。一方港湾基準における規定では、期待総費用最小化をそのまま適用するよりもライフサイクルコスト最小化との差は縮まり、水深-11m および-14m の経済損失 $\mu + \sigma$ 以外の条件においては港湾基準による部分係数の方が安全側の結果となる。

次に社会的割引率を考慮する場合も、簡易推定法により社会的割引率を考慮しない場合とほぼ同じ結果が得られている。また、期待総費用最小に対応した断面諸元は一部を除いてライフサイクルコスト最小となる断面よりも危険側の設定となっているが、港湾基準に示される部分係数は、ライフサイクルコスト最小に対応した断面諸元と比較して同じか又は安全側の設定となっている。よって、社会的割引率の適用が標準的という考え方に立つとすれば、港湾基準による部分係数を用いることでライフサイクルコスト最小にも対応していると見なすことができると言える。

5. まとめ

本研究では、矢板式岸壁を対象に、鋼材の腐食の進行

を考慮した矢板壁とタイ材のシステム破壊確率に基づくライフサイクルコストについて検討した。本研究による主要な結論は以下の通りである。

- ①設計供用期間が50年の場合、ライフサイクルコストの正確な評価を行うためには、膨大なケースの破壊確率の評価を行う必要がある。これは、経年劣化が進んだ岸壁が破壊した場合は初期断面で復旧され、復旧後の破壊確率は建設初年度の値に戻るためである。本研究では同じ破壊パターン数を効率よく数えるアルゴリズムを検討し、ライフサイクルコスト評価の効率化の方法を示した。
- ②ライフサイクルコストの評価のためには、矢板の断面係数とタイ材の断面積の組み合わせによるシステム破壊確率の評価が必要があるが、全ての組み合わせを検討することは計算負荷の問題がある。このためライフサイクルコストの評価において必要となる条件を絞り込み、評価の効率化を行う方法を示した。
- ③ライフサイクルコストの評価に必要な設計供用期間の破壊確率の厳密評価法以外に、経年劣化の進行に伴う単年度の破壊確率をもとに、設計供用期間の破壊確率を簡易に評価する方法を提案した。簡易推定法による破壊確率を用いた場合、ライフサイクルコストはほぼ一致する結果となり、簡易推定法で十分な精度のライフサイクルコストカーヴが評価できると考えられる。
- ④ライフサイクルコスト最小化の条件と期待総費用最小化の条件を比較するとともに、港湾基準における部分係数を用いた安全水準との相互比較を行った。その結果、社会的割引率を考慮する条件においては、港湾基準による部分係数を用いることでライフサイクルコスト最小化にも対応していることが分かった。

参考文献

- 1) 国土交通省港湾局監修、(社)日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説、2007。
- 2) 長尾 毅、柴崎隆一、尾崎竜三：経済損失を考慮した期待総費用最小化のための岸壁の常時のレベル1信頼性設計法、構造工学論文集 Vol.51A, pp.389-400, 2005。
- 3) 鋼管杭協会：鋼矢板、設計から施工まで、2000。
- 4) Rackwitz, R. and Fiessler, B. : Structural Reliability under Combined Random Load Sequences, *Computers & Structures*, Vol. 9, pp.489-494, 1978
- 5) Owen, D. B.: Tables for computing bivariate normal probabilities, *Ann. Math. Stat.*, Vol.27, pp. 1075-1090, 1956。
- 6) 大釜達夫：事前評価はどこまで実施されているかー運輸関係公共事業の場合ー、土木学会誌, Vol.84, Feb., pp.30-31, 1999。

(2008年9月18日受付)