

港湾構造物の目標安全性水準に関する研究

Target safety level for port and harbor facilities

長尾 毅*, 森屋陽一**

Takashi Nagao and Yoichi Moriya

*工博 国土交通省 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)

**工博 五洋建設(株) 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須郡西那須野町四区町 1534-1)

The reliability-based design method is regarded as the standard design method for the next version of technical codes for port facilities. Target failure probability should be optimized in order to apply the reliability-based design to the practical design. For the purpose, authors conducted life-cycle cost analyses on breakwaters and quay walls and then found the optimum failure probabilities giving the minimum life-cycle costs. Authors showed the method to estimate target failure probabilities by using design conditions such as water depth.

Key Words: reliability-based design, target safety level, life-cycle cost, port facilities

キーワード: 信頼性設計, 目標安全性水準, ライフサイクルコスト, 港湾構造物

1. はじめに

ISO2394 (構造物の信頼性に関する一般原則) の制定などを契機として, 構造物の設計法への信頼性設計法の導入が期待されている¹⁾. 港湾構造物についても, 部分安全係数を用いるレベル1信頼性設計法を次期基準の標準的な設計法とすべきであると筆者らは考えており²⁾, そのための検討を始めている^{3)~5)}.

信頼性設計法の適用においては, 目標安全性水準をどのように定めるかが重要である. その際の最も有力な方法のひとつは, 過去の設計法における平均的な安全性水準に一致させる方法である⁶⁾. ところで, 港湾構造物の代表的な施設であるケーソン式防波堤およびケーソン式岸壁の被災事例から推定される破壊確率は, それぞれ 7×10^{-3} および 5×10^{-2} であり^{3), 4)}, 1オーダーの違いがある. この安全性水準の違いは明瞭な意図のもとに設定されたものではなく, 実際のところはそれぞれ別個に工学的判断により定められてきた性格が強い. このように, 港湾基準⁷⁾の平均安全性水準が妥当であるか否かについては, 十分な検証がなされてきたとは必ずしもいえない.

目標安全性水準の設定方法のひとつとして, 初期建設費に, 破壊確率と破壊時の費用を乗じた値を加えた費用により定義されるライフサイクルコストが最小となる安全性水準を目標水準とすべきという考え方がある⁸⁾. 本研究ではその考え方に立脚し, 港湾構造物の主要な構造物である防波堤と岸壁について, 最適な目標安全性水準の検討を行うことを目的とする. ここで, レベル2以上

の信頼性設計法を適用すれば, ライフサイクルコストの検討は可能であるが, 次世代の標準的な設計法として考えられているレベル1信頼性設計法では, 破壊確率の算出を行わないために, ライフサイクルコストの検討を行うことが出来ない. しかしながら, あらかじめ構造形式や設計条件ごとに目標とする安全性水準を定めることが出来れば, レベル1信頼性設計法によってもライフサイクルコストを考慮した合理的かつ経済的な設計を行うことが可能となると考えられる. このため本研究では, 各構造物の安全性に関係するパラメータの従う確率分布を推定し, FORM (First-Order Reliability Method) により破壊確率の算定を行うとともに, ライフサイクルコストの検討を行った. 対象とした構造形式は, 防波堤についてはケーソン式混成堤 (ケーソン前面に消波工のないタイプ) および消波ブロック被覆堤 (ケーソン前面に消波工を設置したタイプ) であり, 岸壁はケーソン式岸壁と矢板式岸壁である. なお, ケーソン式混成堤および消波ブロック被覆堤^{3), 5)}およびケーソン式岸壁⁴⁾の破壊確率算定については筆者らの研究事例があり, 矢板式岸壁の破壊確率算定に関しては鈴木ら⁸⁾の研究事例がある. このうち鈴木ら⁸⁾の検討では, 矢板式岸壁の安全性において支配的な要因となると考えられる震度や, 前面潮位, 残留水位および鋼材強度などのパラメータを確定的に扱っているが, 本研究ではこれらパラメータも確率変数として扱っている. また, ケーソン式岸壁のライフサイクルコストについては Ichii^{9), 10)}の研究があるが, Ichii の研究においては個々の設計パラメータの従う確率分布は考慮

せずに過去の被災事例の再現性からフィラジリティカーブを求めており、確率変数の取扱いの点で改善の余地があると考えられる。

なお、本研究では、ライフサイクルコストの検討においては再現期間 25 年～数千年の荷重作用を考慮した。また、本研究ではコストを指標とした安全性水準の検討を行うため、通常の防波堤および岸壁を対象としている。このため、津波発生時に背後圏の安全を確保することが求められる津波防波堤や、L2 地震動発生後に緊急支援物資輸送の拠点としての機能が求められる耐震強化岸壁は対象外とする。これら施設は、その目的から、通常の施設よりも高い安全性が要求されるといえる。

2. 検討方法

2.1 破壊確率の算出方法

図-1 に、本研究で対象とする構造物の形式毎の荷重作用条件を示す。防波堤については波浪作用条件、岸壁については地震動作用条件を対象とする。

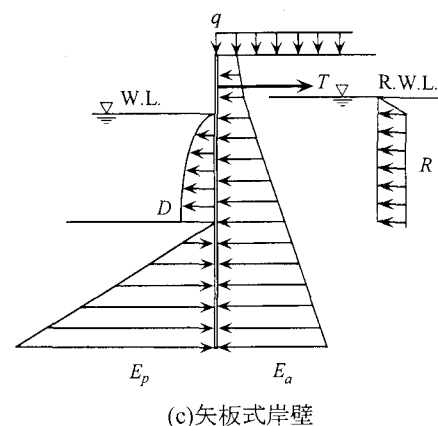
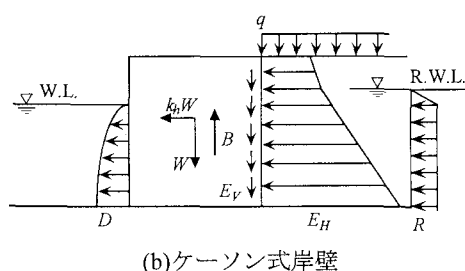
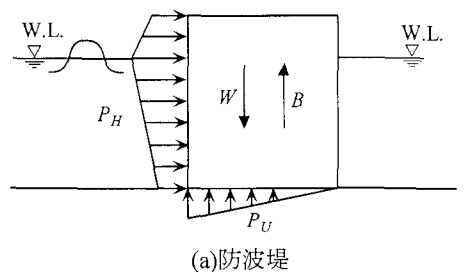


図-1 荷重作用条件

ここに、

W : 壁体重量

B : 浮力

P_H : 水平波力

P_U : 揚圧力

E_H : 水平主働土圧

E_V : 鉛直主働土圧

R : 残留水圧

D : 動水圧

q : 上載荷重

k_h : 震度

W.L.: 前面水位

R.W.L.: 残留水位

T : タイロッド張力

E_a : 主働土圧

E_p : 受働土圧

表-1 考慮する破壊モード

防波堤	滑動破壊, 転倒破壊
ケーソン式岸壁	滑動破壊, 転倒破壊
矢板式岸壁	矢板壁曲げ破壊, タイロッド破断

考慮する破壊モードは表-1 に示すとおりである。破壊確率算定に用いる性能関数および荷重算出方法は現行設計法によるものと基本的に同じとする。矢板式岸壁のうち、控え工は本研究の対象外とする。

ライフサイクルコストを検討するためには、構造物をシステムとしてとらえ、各破壊モードの破壊確率およびその相関を考慮することより、システム破壊確率を算定する必要がある。各破壊モードそれぞれの破壊確率は、FORM (First-Order Reliability Method) を用いて、性能関数の破壊点における線形化近似による安全性指標¹¹⁾をもとに算出する。また、各破壊モードの相関を考慮したシステム破壊確率は Madsen and Lind¹²⁾ に従って算定する。

各構造形式の破壊モード別の性能関数は、式(1)～式(5)に示す通りである。括弧内の記号は確率変数として扱うパラメータであることを示す。また、 $a_1 \sim a_6$ は確定値扱いする。

(ケーソン式防波堤・滑動破壊)

$$Z = f\{W - B(wl) - P_U\} - P_H \quad (1)$$

(ケーソン式防波堤・転倒破壊)

$$Z = a_1 W - a_2 B(wl) - a_3 P_U - a_4 P_H \quad (2)$$

(ケーソン式岸壁・滑動破壊)

$$Z = f\{W - B(R_{WL}) + E_V(k_h, ke, pd)\} - k_h W - E_H(k_h, ke, pd) - R(R_{WL}, R_{RWL}) \quad (3)$$

(ケーソン式岸壁・転倒破壊)

$$Z = a_1 W - a_2 B(R_{WL}) + a_3 E_V(k_h, ke, pd) - a_4 k_h W - a_5 E_H(k_h, ke, pd) - a_6 R(R_{WL}, R_{RWL}) \quad (4)$$

(矢板式岸壁・矢板壁曲げ破壊, タイロッド破断)

$$Z = E_y(f_y) - \sigma_S(k_h, ke, R_{WL}, R_{RWL}, mS) \quad (5)$$

ここに,

f : 堤体底面と基礎との摩擦係数

wl : 潮位

R_{WL} : 岸壁前面潮位比

R_{RWL} : 岸壁残留水位比

ke : 土圧静的成分

pd : ケーソンの慣性力と土圧動的成分の位相差

E_y : 鋼材の強度

f_y : 鋼材降伏応力度精度

σ_S : 矢板壁及びタイロッド応力度

mS : 矢板壁断面力及びタイロッド張力算定式精度

$a_1 \sim a_6$: 各荷重のアーム長

上記確率変数の従う確率分布は表-2 の通りである。設計パラメータとその設計値の比は正規分布に従うと仮定しており、式(6)のように各変数の平均値とその設計値の比を α 、各変数の変動係数を V と定義し、 α および V の従う分布を表示している。ただし、ケーソンの慣性力と土圧動的成分の位相差 pd 、岸壁前面潮位比 R_{WL} および岸壁残留水位比 R_{RWL} については、平均値を α 、変動係数を V として表示している。

$$\alpha = \frac{\mu_X}{X_d} \quad (6)$$

ここに,

μ_X : 確率変数 X の平均値

X_d : 確率変数 X の設計値

これらの確率分布の設定方法は次の通りである。まず、ケーソン式防波堤関係³⁾のうち、波力関係パラメータは、沖波波高推定精度を除いては実験結果をもとに設定されたものである。設計沖波波高推定精度については、極値統計解析などにより求められた沖波波高の設計値に対して実際の沖波波高はその値の周辺に正規分布していると考えている。なお、設計沖波波高は有義波(波群の中で波高の大きい全体の 1/3 の波の平均値)によるものである。このため、一般に波群中の波高はレーリー分布に従うが、設計沖波分布はレーリー分布には従わない。また、水深変化の緩/急の区分は、海底勾配 1/30 未満/以上とす

表-2 パラメータの従う確率分布

	α	V
波力(P_H, P_U)		
沖波波高推定精度	1.00	0.10
波浪変形計算精度		
水深変化緩	0.97	0.04
水深変化急	1.06	0.08
砕波変形推定精度	0.87	0.10
波力算定式推定精度		
ケーソン式混成堤	0.91	0.19
消波ブロック被覆堤	0.84	0.12
潮位・水位		
防波堤前面潮位 wl	1.00	0.20~0.40
岸壁前面潮位比 R_{WL}	0.60	0.30
岸壁残留水位比 R_{RWL}		
ケーソン式岸壁	1.10	0.20
矢板式岸壁	1.00	0.38
摩擦係数 f	1.06	0.15
自重 W		
鉄筋コンクリート	0.98	0.02
無筋コンクリート	1.02	0.02
中詰砂	1.02	0.04
設計震度 k_h (A地区2種地盤)	1.17	0.25
土圧静的成分 ke	1.00	0.10
慣性力位相差 pd	-0.50	0.30
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/設計用値)
ただし、 pd, R_{WL}, R_{RWL} については平均値
 V : 変動係数

る。防波堤前面潮位については、高波発生時は異常潮位となることから、設計潮位としては通常、朔望平均満潮面 H.W.L.を用いる。表-2 に示した値は、防波堤被災時の潮位記録や日本全国の 50 年間の潮位記録をもとに定めた。摩擦係数、自重についても実測結果をもとに定めている。

次に、岸壁関係のうち⁴⁾、設計震度は、震度算出に関係する不確定要素(距離減衰関係推定精度、極値統計解析精度、地震動増幅特性推定精度、震度算定式精度)の精査をもとに設定したものである。なお、ここでは港湾基準⁶⁾の分類で関東地区などの含まれる A 地区(工学基盤の設計震度 0.15)を対象にしており、地盤種別は平均的な第 2 種地盤である。地震時の土圧の動的成分については設計震度の確率分布を考慮して求める。ケーソン式岸壁については実験データなどをもとに、ケーソン慣性力と土圧動的成分の位相差 pd を考慮する。岸壁の潮位及び残留水位については、通常設計で考慮するのは堤体の安全性が最も低くなる時(前面潮位が朔望平均干潮面 L.W.L.)であるが、地震の発生は潮位変動とは相関が無いと考えられることから、日本全国の潮位の確率分布や

残留水位の実測結果¹³⁾などをもとに定めている。岸壁前面潮位比 R_{WL} は潮位と朔望平均満潮面 H.W.L. との比により定義されるパラメータである。残留水位比 R_{RWL} はケーソン式岸壁については残留水位 R.W.L. と潮位との比により定義されるパラメータであり、矢板式岸壁については式(7)に示すとおりであり、両者の定義は異なる。矢板式岸壁はケーソン式岸壁と比較して水密性が高いため、残留水位は高くなる傾向にある。

$$R.W.L. = R_{RWL} (0.53wl + 0.87) \quad (7)$$

ここに、 wl : 潮位(m)である。

鋼材については、SM490 の降伏強度の保証降伏点に対する比の値¹⁴⁾を用いた。矢板断面力算定精度 mS については、有効な情報が不足しているため、0.1 の変動係数を有するものと想定した。

2.2 ライフサイクルコストの算出方法

ライフサイクルコストの算出においては、建設費、維持管理費、廃棄に要する費用などの施設の設計供用期間中に発生するすべての費用を見積もる必要がある。しかしながら、港湾構造物における維持管理費は初期建設費と比較して非常に僅かである。また、設計供用期間を過ぎれば撤去されるものでもないため、建設費と被災時の費用が総費用を構成する主要な因子であると考えてよい。港湾構造物は通常設計供用期間内に被災が生じた場合は直ちに原型復旧される。このため、本研究では設計供用期間 (50 年) 中に発生する費用をライフサイクルコストと定義し、複数の被災可能性を考慮する。ライフサイクルコストの期待値は式(8)により表現される。

$$ELC = C_i + \sum_{j=1}^m \frac{E_{fj}}{T} C_f R \quad (8)$$

$$R = \sum_{k=1}^T \frac{1}{(1+i)^{k-1}} \quad (9)$$

ここに、

ELC : ライフサイクルコストの期待値

C_i : 初期建設費

m : 対象とする荷重ランク数

T : 設計供用期間 (50 年)

E_{fj} : 対象とする荷重による期待被災回数

C_f : 破壊時損失費

i : 社会的割引率

被災時の費用は、直接被害費用 (物理的な復旧に要する費用) に加えて、社会経済面における間接被害費用が存在する。間接被害費用は背後圏の状況などの影響により複雑に変化する。このため、直接被害費用について、標準的な額の最大 3 倍まで考慮することで、間接的費用が無視し得ない場合についても検討した。なお、港湾構

造物に関する間接被害費用についての研究例として、1993 年釧路沖地震時の釧路港における検討によると¹⁵⁾、1 バースあたり 0.6 億円程度である。この額は、地震被害発生直後より復旧工事完了までの費用であり、直接被害費用の 20% 程度である。また、将来発生する復旧費用は社会的割引率を用いて現在の費用に換算する。本研究では土木事業における一般値として 4% を用いる。なお、インフレは経済評価においては考慮しないのが原則であるため、対象外とする。

期待被災回数は長尾¹⁶⁾による。荷重作用はポアソン過程に従うと仮定すると、同じ強度を持つ荷重が複数回作用する場合、構造物が破壊する事象は各荷重作用時で独立であると仮定する方法と、完全相関であると仮定する方法の 2 通りの方法があり、期待被災回数はそれぞれ式(10)および式(11)により得られるが、両者は一致する。ここに、 P_f は対象とする荷重の作用による破壊確率、 ν は対象とする荷重の年平均発生率 ($=1/r$)、 r は対象とする荷重の再現期間である。

$$E_f = \sum_{n=1}^{\infty} n \frac{(\nu t P_f)^n}{n!} \exp(-\nu t P_f) = \nu t P_f \quad (10)$$

$$E_f = P_f \sum_{n=1}^{\infty} n \frac{(\nu t)^n}{n!} \exp(-\nu t) = \nu t P_f \quad (11)$$

ライフサイクルコストの検討条件を以下に示す。対象とする荷重の再現期間は防波堤については 25, 50, 75, 100, 200, 1000, 5000 年とした。岸壁については、L1 地震動と L2 地震動のそれぞれを考慮する観点から、L1 地震動は 25, 50, 75, 100 年とし、L2 地震動はプレート境界型 (200 年) とプレート内型 (1000 年または 2000 年) とした。以上の条件によると、設計供用期間 50 年における再現期間 100 年の荷重に対応する期待被災回数は $50/100 \cdot P_{fj}$ となるが、例えば、再現期間 75 年の荷重には、再現期間 100 年の荷重が含まれるため、再現期間 75 年の荷重に対する期待被災回数は $(50/75 - 50/100) P_{fj}$ となるので、注意を要する。

ケーソン式防波堤に作用する再現期間毎の波高を図 2 に示す。その設定手順は以下のとおりである。まず、日本全国をカバーする 18 地点の波浪統計データをもとに、再現期間毎の確率波高を調査した。次に再現期間 r (年) に対する有義波高 $H_{1/3}$ (m) の平均的な増幅率を算出した。設計波高は碎波の影響を受けるため、その増幅率は波高のみならず周期、水深などの条件により規定され、ケース毎に異なる値を取る可能性があるが、本研究では便宜的に $H_{1/3} = A \times \ln(r) + B$ とした。ここで、 A を統計的に求め、 B はケース毎に決定する。最後に、再現期間 50 年の場合の有義波高と設計波高の比を用いて、各再現期間の設計波高を算定した。

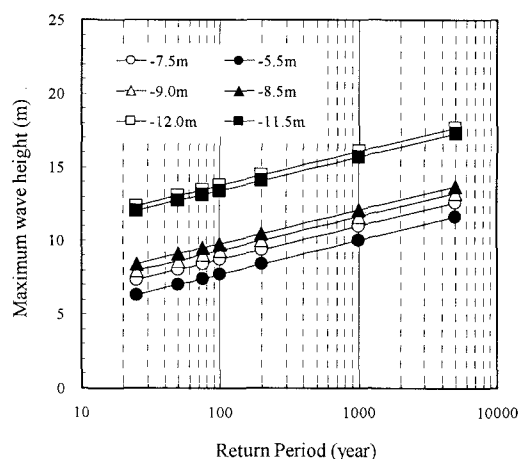


図-2 再現期間別の波高

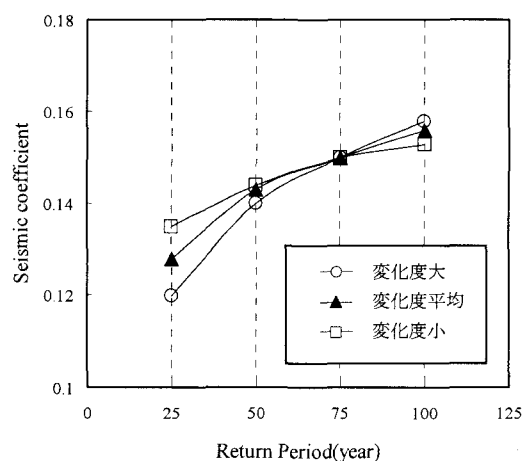


図-3 再現期間別の作用震度

岸壁に作用する再現期間毎の作用震度を図-3 に示す。再現期間 75 年の設計震度は港湾基準の A 地区の地域別震度である 0.15 とし、再現期間に対する設計震度の変化のレベルを考慮して再現期間毎の設計震度を設定した。設定手順は以下のとおりである。まず日本全国をカバーする 280 地点の基盤加速度のデータに確率分布をあてはめ、再現期間に対応する基盤加速度最大値の期待値を求める。次に表層地盤による地震動増幅特性を考慮して地表面加速度最大値の分布を求め、港湾基準⁷⁾の方法により各地点の再現期間毎の作用震度の期待値を求める。地点毎に再現期間 75 年の作用震度の期待値と他の再現期間の作用震度の期待値の比を取る。最後に、再現期間毎のその比の統計処理により、変化の大きい場合、平均、小さい場合の 3 通りについて、作用震度を設定した。なお、図には示していないが、レベル 2 地震動相当の作用震度としては、0.25 および 0.28 とした。

検討ケースとしては、ケーソン式防波堤は、ケーソン式混成堤と消波ブロック被覆堤について、水深が異なる 3 ケースずつ設定した。ケーソン式岸壁と矢板式岸壁については水深の異なる 3 ケース(-7.5, -11.0, -14.0m)を設定した。上載荷重などの条件は標準的な値を用いた。

初期建設費および破壊時損失費は、日本の標準的な人件費、材料費、工事の稼働率などを基に算出した。なお、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、矢板式岸壁のタイロッド材は高張力鋼 740 とした。破壊時損失費の算出にあたっては、表-3 に示す中規模被害と大規模被害を想定し、それらの平均損失費を破壊時損失費としている。

図-4～図-5 に初期建設費に対する標準的な被災時費用を示す。なお、以降に示す費用はすべて断面奥行き 1m 当たりの価格で、直接工事費用である。図-4 に示した防波堤のうち、実線はケーソン式混成堤、点線は消波ブロック被覆堤である。消波ブロック被覆堤の 1 例を除いて初期費用と被災時費用の関係はほぼ一定である。傾向が異なる 1 例は水深が -5.5m のケースである。初期建設費用には、ケーソン費用のみならずマウンド構築費用

表-3 想定被害程度

	中規模被害	大規模被害
防波堤	堤体の滑動、消波工の移動	堤体の大規模な滑動および沈下、消波工の移動
ケーソン式岸壁	堤体の滑動、エプロン舗装破壊	堤体の大規模な滑動および沈下、エプロン舗装破壊
矢板式岸壁	タイロッド破壊、エプロン舗装破壊	矢板壁およびタイロッド破壊、エプロン舗装破壊

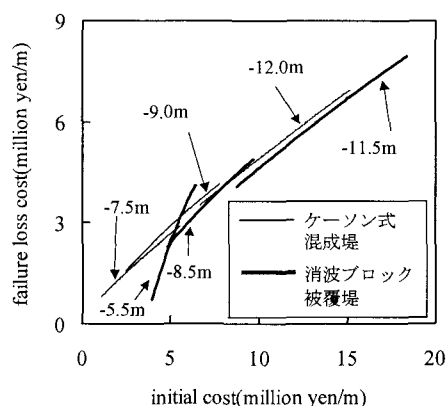


図-4 初期建設費と被災時費用の関係（防波堤）

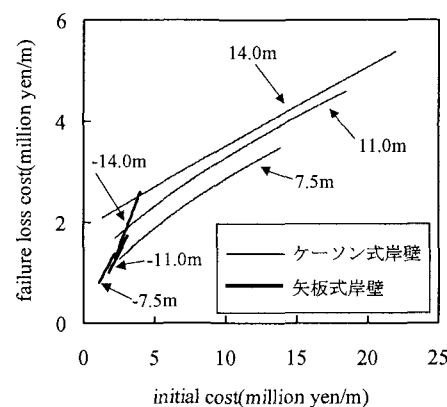


図-5 初期建設費と被災時費用の関係（岸壁）

も含まれているため、水深の浅い場合は初期建設費用に占めるケーソン費用の割合が相対的に小さくなる。しかしながら、被災時費用はほぼケーソンの規模に比例するため、水深の浅い-5.5m のケースはケーソン幅が増加しても初期建設費の増加程度は低く、被災時費用の増加程度は他のケースと同様であるためこのような結果となる。図-5 に示した岸壁では、初期建設費用に対する被災時費用の割合が防波堤と比較して低い（図中の線の傾きが小さい）ことが特徴である。これは、岸壁の初期建設費用には上部工や裏込め工など、様々な費用が含まれているためである。

3. 検討結果

図-6～図-9 に、構造形式別に初期建設費用に対する各再現期間の荷重作用に対する破壊確率を示す。各構造形式の3種類のうち水深が中間の場合を示している。ここで、矢板式岸壁の場合のみ滑らかな曲線とならないが、これは矢板壁およびタイロッドに用いる JIS 規格の鋼材の断面係数が不連続であること、および鋼材の規格（例えば鋼管矢板の径と肉厚）の変化に対する破壊確率と建設費用の変化の程度が一樣ではないためである。また、初期建設費用に対する破壊確率の関係はケーソン式岸壁を除いては上に凸の曲線となるが、ケーソン式岸壁は下に凸の曲線形状を示す。この理由を検討するため、ケーソン式混成堤とケーソン式岸壁について、50 年再現期間の荷重に対する各モードの破壊確率を比較した。結果を図-10 に示す。初期建設費が非常に小さい領域では転倒モードが支配的となるが、転倒安全性については堤体幅の増加に伴い堤体重量とモーメント算出時のアーム長が同時に増加するため、初期建設費の増加に伴って破壊確率は急激に減少する。システム破壊確率が 20-30% の領域で支配的なモードは滑動に変化するが、ケーソン式岸壁においては堤体重量の増加は滑動抵抗力の増加とともに慣性力も増加させるため、初期建設費の増加に対する破壊確率の減少度合いは他の構造物と比較して小さくなる。このことが、図-8 の関係において下に凸の曲線となる理由である。

図-11～14 にライフサイクルコストの算出結果を示す。水平軸はケーソン幅や鋼矢板等の断面係数を変化させた場合のそれぞれ2つの破壊モードを考慮したシステム破壊確率である。システム破壊確率は 50 年再現期間の荷重作用に対する値としている。ここで岸壁については、L1 地震動では再現期間ごとに複数の作用震度を有し、かつ L2 地震動については複数の再現期間及び作用震度を有するが、ここではそれらの平均を示している。矢板式岸壁については、例えば水深-14m の破壊確率が 0.05% 程度を境界にしての破壊確率の変化に伴う初期建設費の変化の度合いが異なるが、これはその境界において矢板壁の規格が鋼管矢板から鋼矢板へと変化するることによる。

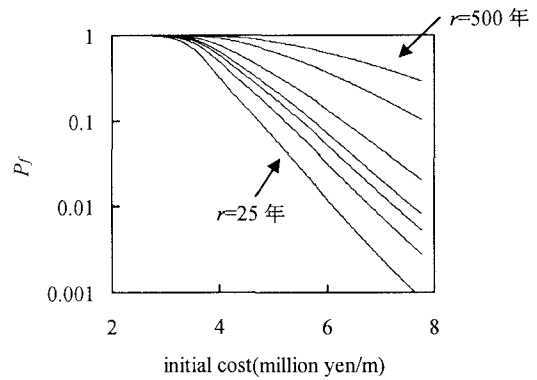


図-6 初期建設費と破壊確率の関係（ケーソン式混成堤）

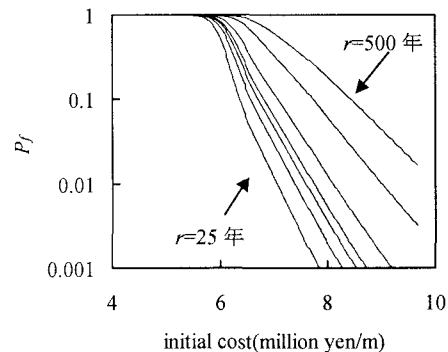


図-7 初期建設費と破壊確率の関係（消波ブロック被覆堤）

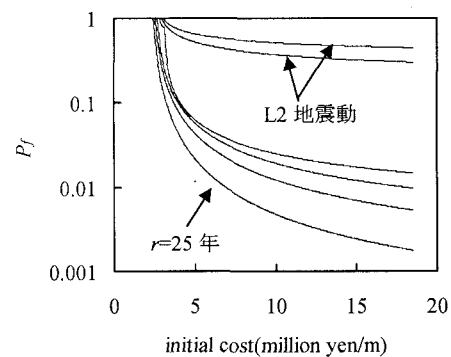


図-8 初期建設費と破壊確率の関係（ケーソン式岸壁）

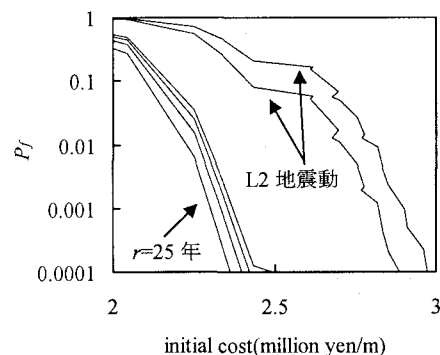
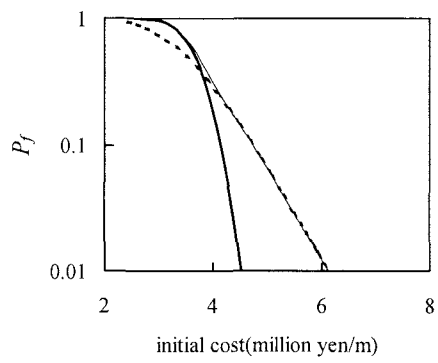
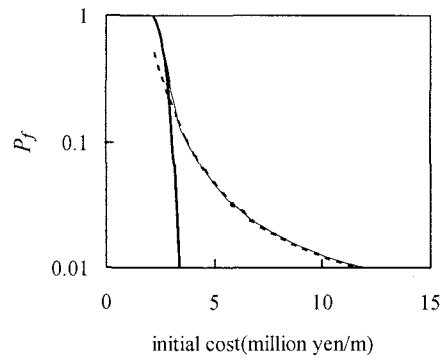


図-9 初期建設費と破壊確率の関係（矢板式岸壁）



(a)ケーソン式混成堤



(b)ケーソン式岸壁

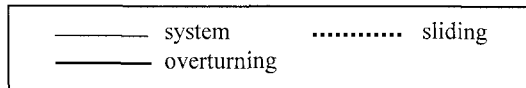


図-10 初期建設費と各モードの破壊確率の関係

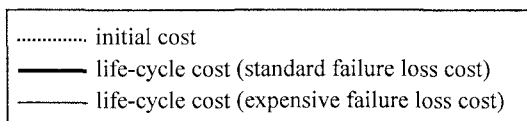
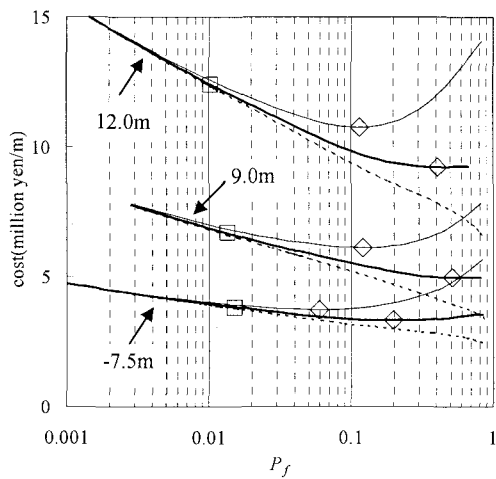


図-11 ライフサイクルコスト (ケーソン式混成堤)

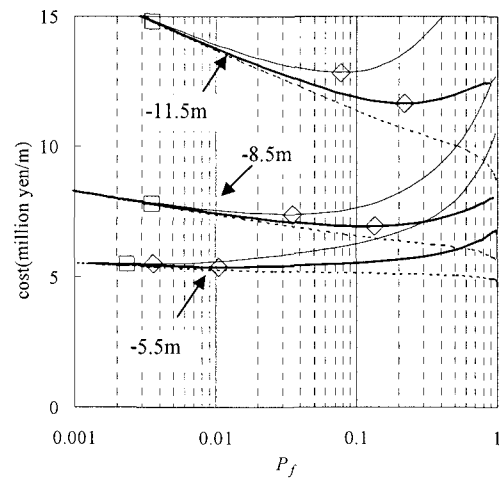


図-12 ライフサイクルコスト (消波ブロック被覆堤)

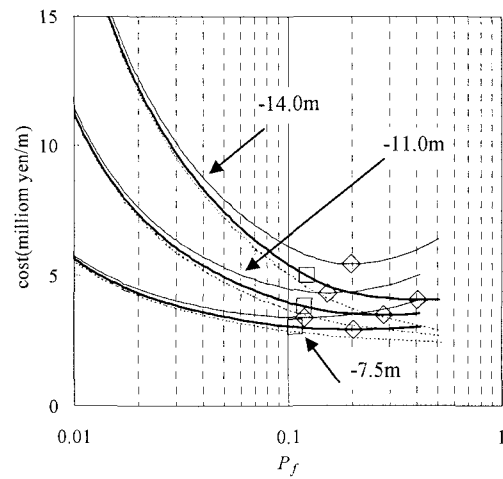


図-13 ライフサイクルコスト (ケーソン式岸壁)

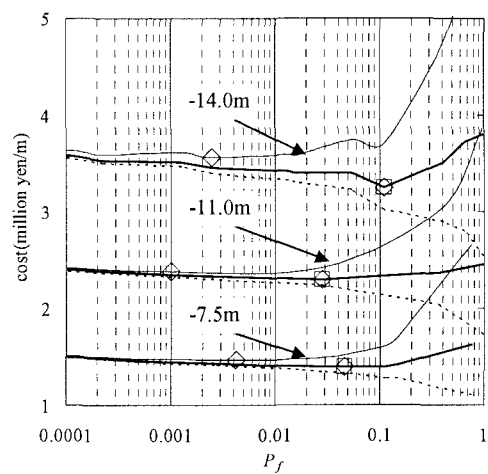


図-14 ライフサイクルコスト (矢板式岸壁)

図中に◇を付してある破壊確率がライフサイクルコスト最小となる破壊確率である。ライフサイクルコスト最小となる破壊確率は、ケーソン式混成防波堤の場合 19.7-51.4% (標準的な被害費用の場合), 5.9-12% (被害費用が標準の3倍の場合), 消波ブロック被覆堤の場合 1-21.9% (標準的な被害費用の場合), 0.4-7.7% (被害費用が標準の3倍の場合), ケーソン式岸壁の場合 20.2-40.4% (標準的な被害費用の場合), 12-19.6% (被害費用が標準の3倍の場合), 矢板式岸壁の場合 2.8-11% (標準的な被害費用の場合), 0.1-0.4% (被害費用が標準の3倍の場合) である。このように、たとえ同じ荷重作用条件においても、構造形式ごとにライフサイクルコスト最小となる破壊確率は異なる。さらに、同じ構造形式の構造物であっても、条件(水深)毎にライフサイクルコスト最小となる破壊確率は異なる。

図中に□を付した破壊確率は現行設計法による安全性水準を示している。構造形式別に差はあるものの、矢板式岸壁を除いては概ね現行設計法による破壊確率はライフサイクルコスト最小となる破壊確率よりも小さく、ライフサイクルコスト最小化の考え方に基づく建設費用が削減できる可能性が高いことが分かる。ただし矢板式岸壁については、現行設計法の破壊確率と標準的な被災時費用の場合のライフサイクルコスト最小の破壊確率は一致する結果となった。また、現行設計法による破壊確率は、ライフサイクルコスト最小化に対応する破壊確率と比較すると、構造形式別に水深の変化にかかわらず大きな変化を示さないことも特徴である。

以上検討したように、同じ構造形式であっても条件ごとにライフサイクルコスト最小に対応する破壊確率は異なるため、ライフサイクルコスト最小化を目標とした設計法を設計実務に適用するためには、レベル2以上の信頼性設計法が必要である。

さらにその場合においても、再現期間の異なる複数の荷重を設定するなどの煩雑な手順が必要となる。また、安全性指標を算出しないレベル1信頼性設計法においては、基本的にこの方法の適用は困難である。しかしながら、設計手順の簡便さ、および ISO2394 などの国際標準への採用などの環境を考慮すると、レベル1信頼性設計法においてもライフサイクルコスト最小化に対応した設計法が用意されていることが望ましいことはいうまでもない。そこで、ライフサイクルコスト最小化に対応する目標破壊確率 P_{ft} を他の何らかの指標と関連付けることが出来れば、ライフサイクルコスト最小化に対応したレベル1信頼性設計法の構築が図れる可能性がある。このため以下では、ライフサイクルコスト最小化に対応する破壊確率を他の指標で推定することを試みる。

4. 最適安全性水準の検討

まず、断面諸元の変化に伴う初期建設費用と破壊確率

の常用対数の変化度の比 $dC_i/d\log(P_f)$ を指標として、 P_{ft} との関係を整理した。この比は負の値を取るが、比の値がゼロに近いほど初期建設費用は破壊確率に対して変化しないため、図-11~14 に示したライフサイクルコストの関係において初期建設費用はフラットとなり、破壊確率を小さくした方が有利となる。

結果を図-15 に示す。水平軸は費用と破壊確率の比であるが、対数軸で示すために絶対値で整理している。なお、矢板式岸壁については図-14 に示したように、 $dC_i/d\log(P_f)$ の値が一定ではないため、以下ではライフサイクルコスト最小となる破壊確率近傍での値を整理している。構造形式を示す記号は凡例に示したとおりであり、以降の記号も各構造形式に対して同じものを用いている。図より、ケーソン式混成堤の一部を除いて、 $dC_i/d\log(P_f)$ の絶対値の増加に伴って P_{ft} が増加する傾向にあり、この指標をもとにしてライフサイクルコスト最小化に対応した破壊確率目標値が推定できる可能性が高いことが分かる。ところで、 $dC_i/d\log(P_f)$ の値を得るためには、信頼性理論を用いて破壊確率を算出しなければならない。これを他の指標で推定できないか検討した。その結果、水深と $dC_i/d\log(P_f)$ の間の相関性が高いことが分かった。このため、水深(depth)と P_{ft} の関係を示すと図-16 のようになり、矢板式岸壁(□)ではややばらつきが大きい。図中に示した関係を用いて、水深別に破壊確率の目標値を設定できる可能性がある。ただしこの関係式は、水深が14mまでの範囲に適用が限られることに注意が必要である。なお、矢板式岸壁についてばらつきの大きい理由は、使用する鋼材の JIS 規格値の不連続性のためであると考えられる。また、ケーソン式混成堤と消波ブロック被覆堤で同じ防波堤であるにもかかわらず結果が異なるのは、消波ブロック被覆堤では初期建設費に消波工が含まれるため、堤体幅の変化が初期建設費の変化に及ぼす影響度合いがケーソン式混成堤と比較して異なるためであると考えられる。図中に示した関係式は次のとおりである。

ケーソン式混成堤 (×)

$$P_{ft} = 3 \cdot 10^{-3} \cdot \text{depth}^2 \quad (12)$$

消波ブロック被覆堤 (◇) ———

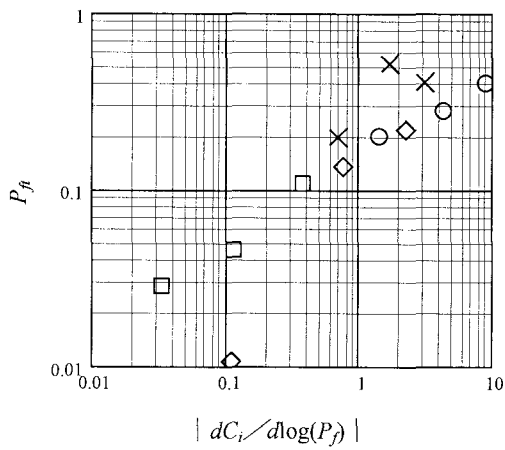
$$P_{ft} = 1 \cdot 10^{-5} \cdot \text{depth}^4 \quad (13)$$

ケーソン式岸壁 (○) ———

$$P_{ft} = 10^{0.046\text{depth}-1.04} \quad (14)$$

矢板式岸壁 (□) -.-.-.-

$$P_{ft} = 10^{0.046\text{depth}-1.9} \quad (15)$$



× : ケーソン式混成堤 ◇ : 消波ブロック被覆堤
○ : ケーソン式岸壁 □ : 矢板式岸壁

図-15 $|dC_f/d\log(P_f)|$ と P_{ft} の関係

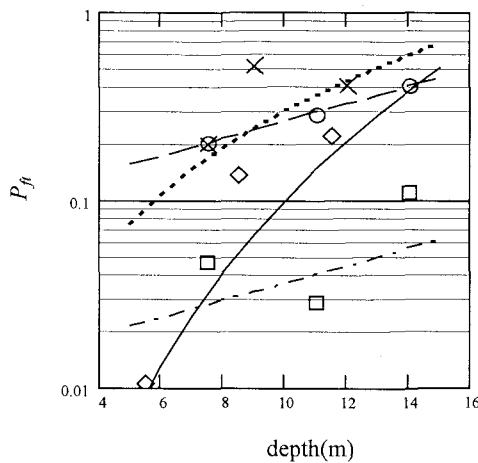


図-16 水深と P_{ft} の関係

これまででは、被災時の費用が標準的な場合についての検討であった。以下に、被災時の間接被害費用を無視しない場合について検討する。ライフサイクルコスト最小化に対応する破壊確率は、被災時費用と初期建設費用の比の値に依存することが考えられる。すなわち、被災時費用が相対的に高いほど、被災を生じさせないことが有利となるため破壊確率は小さい方が有利となると考えられる。このため、被災時費用と初期建設費用の比 C_f/C_i を指標として P_{ft} との関係を整理した。ここで、 C_f/C_i はライフサイクルコスト最小となる破壊確率の範囲を考慮して、破壊確率が $2 \times 10^{-2} \sim 2 \times 10^{-1}$ の範囲の平均値とした。 C_f/C_i は、通常的设计実務においても算出することは容易であると考えられる。破壊時の費用として通常のケースから3倍まで考慮したケースについて、 C_f/C_i と P_{ft} の関係を整理した。結果を図-17~18に示す。基本的な傾向として、 C_f/C_i の増加に伴って P_{ft} が減少

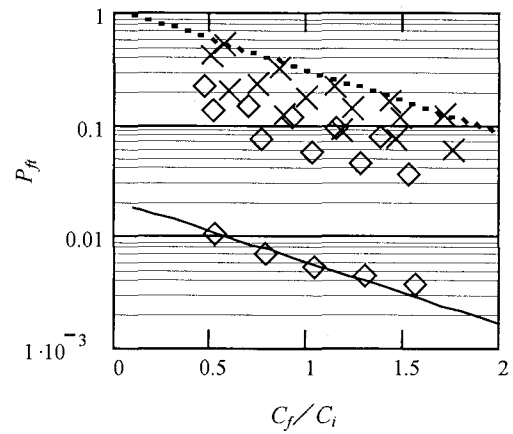


図-17 C_f/C_i と P_{ft} の関係 (防波堤)

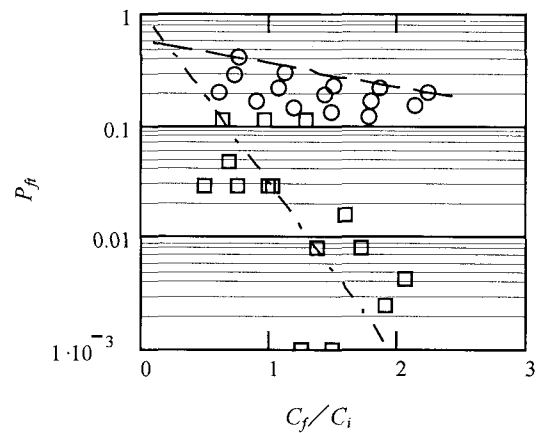


図-18 C_f/C_i と P_{ft} の関係 (岸壁)

する。矢板式岸壁においてはばらつきが大きい、構造形式ごとに C_f/C_i に対する P_{ft} の変化度はほぼ一定であることが分かる。よって、図中に示した直線に従って、 C_f/C_i の値に応じて P_{ft} を補正することにより更に精度のよい目標破壊確率の推定が可能であると考えられる。図中に示した関係式は次のとおりである。ここに、 $const.$ は構造形式ごとの定数である。

防波堤 (×) および (◇) ————

$$P_{ft} = 10^{const. - 0.55 \frac{C_f}{C_i}} \quad (16)$$

ケーソン式岸壁 (○) ————

$$P_{ft} = 10^{const. - 0.21 \frac{C_f}{C_i}} \quad (17)$$

矢板式岸壁 (□) ————

$$P_{ft} = 10^{const. - 1.56 \frac{C_f}{C_i}} \quad (18)$$

以上により、 C_f/C_i と $dC_i/d\log(P_f)$ の両方を指標とすることにより、 P_f を推定できる可能性があることが示唆される。具体的には、まず図-16 に示す水深と P_f の関係から P_f を推定し、次に C_f/C_i の値に応じて P_f を補正すればよい。式(19)～(22)に推定式を示す。また、このようにして推定した破壊確率目標値($P_{f,cal}$)と実際のライフサイクルコスト最小となる P_f の関係を図-19～図-20 に示す。ケーソン式混成堤、消波ブロック被覆堤、ケーソン式岸壁については目標破壊確率の推定精度は概ね良好である。しかしながら、矢板式岸壁についてはややばらつきが大きい。さらに、このようにして設定した目標破壊確率を用いた場合のライフサイクルコストと現行設計法の安全性水準によるライフサイクルコストの比を水深別に整理すると図-21 のようになる。特に水深の深い場合に、本研究による目標破壊確率に基づくライフサイクルコストが縮減できる可能性が高いことが分かる。ただし、矢板式岸壁については、目標破壊確率の推定精度が良好ではないために、ライフサイクルコストの観点からも現行設計法と比較して優位を主張できないことが分かる。以上の結果より、矢板式岸壁を除いては、ライフサイクルコスト最小に対応したレベル1信頼性設計法の構築の可能性があると判断される。ただし今回は限られた検討ケース数であるため、今後ケース数を増やすことにより、さらに精度のよい P_f の算定方法について検討することが必要と考えられる。

ケーソン式混成堤

$$P_{f10} = 10^{2\log(\text{depth}) - 0.55 \frac{C_f}{C_i} - 2.22} \quad (19)$$

消波ブロック被覆堤

$$P_{f10} = 10^{4\log(\text{depth}) - 0.55 \frac{C_f}{C_i} - 4.73} \quad (20)$$

ケーソン式岸壁

$$P_{f10} = 10^{0.046\text{depth} - 0.21 \frac{C_f}{C_i} - 0.90} \quad (21)$$

矢板式岸壁

$$P_{f10} = 10^{0.046\text{depth} - 1.56 \frac{C_f}{C_i} - 0.96} \quad (22)$$

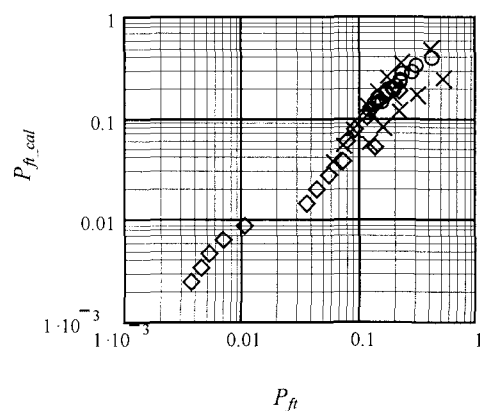


図-19 P_f の推定精度 (矢板式岸壁以外)

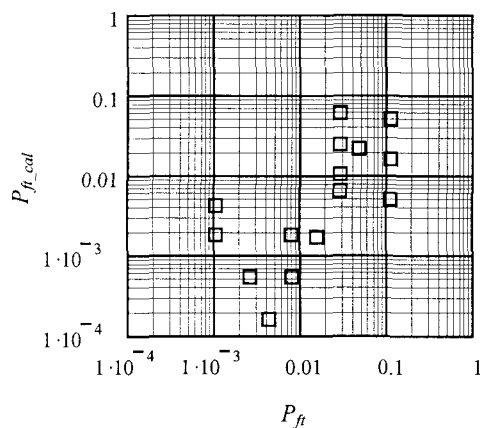


図-20 P_f の推定精度 (矢板式岸壁)

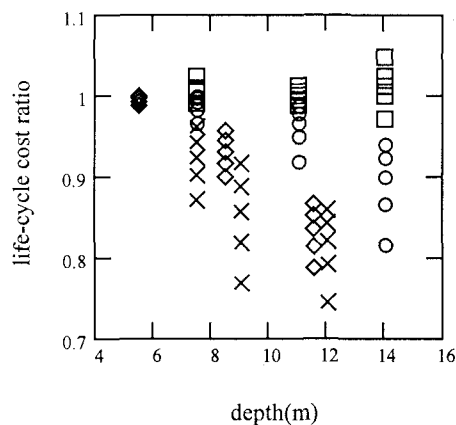


図-21 ライフサイクルコスト比 (提案法/現行設計法)

5. まとめ

本研究では、港湾構造物の設計法に信頼性設計法を導入するにあたり適切に設定する必要のある目標安全性水準について、ライフサイクルコスト最小化の観点から検討した。検討により得られた主要な結論は以下のとおり

である。

①ライフサイクルコスト最小となる破壊確率は、同じ構造形式であっても条件毎に大きく変化する。よって、ライフサイクルコスト最小化の観点からは、構造形式毎にただ1つの目標安全性水準を設定することは好ましくない。

②簡易なレベル1信頼性設計法により設計を行う場合、破壊確率の算出は行わないため、基本的にはライフサイクルコストの検討を行うことが出来ない。しかしながら、水深や破壊時費用と初期建設費用の比などのパラメータを用いることにより、ライフサイクルコスト最小に対応した目標破壊確率を推定できる可能性がある。ただし、矢板式岸壁については、鋼材の規格値の不連続性などの理由により、ライフサイクルコスト最小に対応した目標破壊確率の推定は困難である。

ライフサイクルコスト最小化に対応した目標安全性水準を簡易に推定することが出来れば、建設コストの縮減に寄与することができる。今回は限られた検討ケースであったため、今後は検討ケースをさらに増やすとともに、特に岸壁についてはレベル1地震動に対する設計震度の値を変化させた場合などについて更に検討を行う必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 国土交通省：土木・建築にかかる設計の基本，2002.
- 2) 長尾 毅：港湾構造物の技術基準の改訂動向，鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集，pp.9-20，2002.
- 3) 長尾 毅，吉浪康行：信頼性解析によるケーソン式防波堤の外的安定性評価，構造工学論文集 Vol.47A，pp.305-312，2001.
- 4) 長尾 毅，吉浪康行，佐貫哲朗，嘉門雅史：ケーソン式岸壁の外的安定に関する信頼性設計法の適用，構造工学論文集 Vol.47A，pp.293-304，2001.
- 5) 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手法の適用，土木学会論文集 No.689，I-57，pp.173-182，2001.
- 6) 星谷 勝，石井 清：構造物の信頼性設計法，鹿島出版会，1986
- 7) 運輸省港湾局監修，日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，1999.
- 8) 鈴木 誠，辻岡信也，菊池喜昭，山本修司，石井 清：部分係数を導入した矢板式係船岸の設計法の検討，土木学会論文集，III-58，No.701，pp.401-408，2002
- 9) Ichii, K. : Optimization of design seismic coefficient based on total expected cost for gravity type quay walls, Journal of Structural Mechanics and Earthquake Engineering, JSCE, Vol.20, No.1, 13s-23s, 2003
- 10) Ichii, K. : A seismic risk assessment procedure for gravity type quay walls, Journal of Structural Mechanics and Earthquake Engineering, JSCE, Vol.19, No.2, 131s-140s, 2002
- 11) Hasofer, A. M. and Lind, N. C. : Exact and Invariant Second moment Code Format, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol.100, No.EM1, pp.111-121, 1974.
- 12) Madsen, H. O., Krenk, S., and Lind, N. C. : Methods of Structural Safety, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1986.
- 13) 古土井光昭，片山猛雄：残留水位測定調査，港湾技研資料，No.115，1971
- 14) 土木学会：鋼構造シリーズ 6，鋼構造物の終局強度と設計，1994
- 15) 上部達生，佐野 透，野津 厚：経済被害を考慮した港湾の液状化対策工の費用便益分析，第23回地震工学研究発表会講演論文集，pp.687-690，1995.
- 16) 長尾 毅：破壊確率を考慮した防波堤の期待総費用最小化に関する研究，第4回構造物の安全性・信頼性に関する国内シンポジウム(JCOSSAR2000)論文集，pp.441-448，2000

(2003.9.12 受付)