

防波堤を対象とした円弧すべりに関する 信頼性設計法の適用

STUDY ON APPLICATION OF RELIABILITY BASED DESIGN METHOD ON CIRCULAR ARC SLIP FAILURE OF BREAKWATERS

尾崎竜三¹・長尾 毅²

Ryuzo OZAKI and Takashi NAGAO

¹正会員 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)

²正会員 工博 国土技術政策総合研究所 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

It is necessary to determine the target safety level in order to introduce level-1 reliability-based design method. We discussed the target safety level against the circular arc slip failure of breakwaters under ordinal condition, for which the effect of the wave forces are not taken into account. Based on the comparison of average safety level under the current design method with that of the minimum expected total cost including the economic loss, it is shown that safety level by the current design method is very high. The partial factors for level-1 reliability-based design method are proposed.

Key Words: Reliability based design, circular arc slip, breakwater

1. はじめに

防波堤の設計では、通常、波浪の作用と、必要に応じて地震動や津波の影響を考慮した照査が行われる。これに加えて、自重などの永続作用のみを考慮する条件（以下、常時とする）についても照査が行われる。波浪等の作用を考慮する条件では、直立部の滑動、転倒、基礎の支持力に関する安定性などが照査されるが、常時の条件では基礎地盤のすべりについて照査が実施される。このうち本研究で対象とするのは常時の基礎地盤のすべりである。

現行設計法においては、自重による常時の基礎地盤のすべり破壊に関する安定性は、円弧のすべり面を仮定した二次元問題として解析され、安定性が最も低下する安全率によって評価される¹⁾。しかしながら、安全率は構造物の安全性を定性的に示す指標であるため、本格化しつつある設計法の性能規定化の流れを踏まえると、構造物に要求される性能を明確に規定し、性能が満足されることを示す合理的な手法の導入が必要であると言える²⁾。今後、その手法としてISO2394の附属書にも位置づけられたレベル1信頼性設計法の採用が進むと考えられる。そこで本研究では、防波堤の常時の円弧すべり解析について信頼性設計法の適用性を検討した。

ところで、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な課題のひ

とつである。その際の有力な方法として、従来の設計法の平均的な安全性水準に一致させる方法がある³⁾。まず本研究では、現行設計法において、円弧すべり解析の許容安全率が1.3であることを考慮して、その状態を原設計断面から防波堤の堤体幅を変えずに堤体重量を変化させることで検索し、その時の安全性水準を検討した。ただし、現行設計法の安全性水準の妥当性については、定量的な検討が十分になされているとは言えない。そこで、破壊確率と被災時費用を乗じた値を初期建設費に加えた費用により定義される期待総費用が最小となる安全性水準について検討した。

検討は防波堤の主要な構造形式であるケーソン式混成堤、消波ブロック被覆堤を対象とし、目標安全性水準の検討とあわせて、レベル1信頼性設計法に用いる部分係数の検討を行った。部分係数の検討においては、目標信頼性指標と感度係数から得られる部分係数を基本として、現行設計法との比較結果も考慮した上で部分係数を提示した。

2. 円弧すべり破壊解析

現行設計法における防波堤の常時の基礎地盤のすべりに対する安定性の検討¹⁾は、式(1)の修正フェレニウス法による円弧すべり計算を行う(図-1)。

$$F_s = \frac{r \sum (c'l + W' \cos \alpha \tan \phi)}{\sum W' x} = \frac{\sum (c'b + W' \cos^2 \alpha \tan \phi) \sec \alpha}{\sum W' \sin \alpha} \quad (1)$$

ここに、 F_s ：安全率、 r ：滑り円の半径(m)、 l ：分割片の底辺の長さ(m)、 x ：分割片の重心と滑り円中心間の水平距離(m)、 c' ：見かけの粘着力(kN/m²)、 W' ：単位長さあたりの分割片の有効重量（土および防波堤の重量）(kN/m)、 α ：分割片底面が水平面となす角度(度)、 ϕ ：排水条件における内部摩擦角(度)、 b ：分割片の幅(m)であり、図中の記号も同じである。

また図-2に、本研究で対象とする防波堤の荷重作用条件を示す。図中の記号は以下の通りである。
 W ：ケーソンの重量、 B ：浮力、 b ：ケーソン幅、
 $W.L.$ ：潮位、 q ：ケーソンの有効重量をケーソン幅で除して得られる分布荷重である。常時の防波堤の円弧すべり破壊においては、ケーソンの有効重量が支配的な作用となる。通常、安定性の照査は港内側、港外側へのすべり面を想定して実施される。

破壊確率算定に用いる性能関数は現行設計法にもとづき、式(2)を用いる。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。

$$Z = R(c', \tan \phi, w', q) - S(w', q) \quad (2)$$

前述した以外で、 w' ：土の有効重量である。確率変数の従う確率分布は表-1のとおりである⁴⁾。設計パラメータとその特性値の比は正規分布に従うと仮定して、各変数の平均値とその特性値の比を 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。

破壊確率は、First-Order Reliability Method（以下FORMとする）を用いて性能関数の破壊点における線形化近似による信頼性指標⁵⁾をもとに算出する。なお、円弧すべり解析において地盤強度の自己相関性を考慮する必要があるが、本研究では土田・湯⁶⁾と同様に、深度方向に2～2.5m程度を単位として確率的に独立な土層が堆積していると考え、水平方向については、海成粘土の物性に関する調査結果において、深度方向と比較して自己相関性が非常に強く、数10m程度以内範囲ではほぼ均一と見なしてよい⁷⁾ことが報告されていることから、同一の層と見なす。なおここで考慮していない要素として、円弧すべりの照査式の精度がある。円弧すべりの照査式の精度については、飽和した軟弱な粘土地盤を対象にした研究事例がある⁸⁾。本研究では粘性土地盤のみならず砂質土地盤、および置換砂、SCPによる改良地盤を対象とするため、照査式算定精度は考慮しないこととし、今後の課題とする。

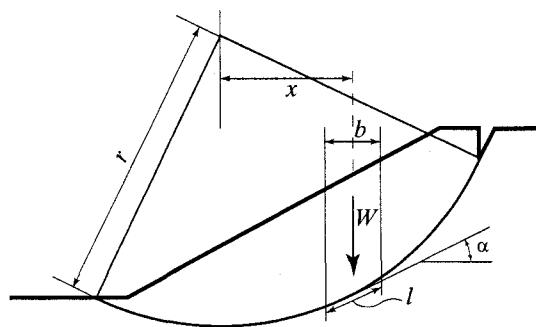


図-1 修正フェレニウス法による円弧すべり解析

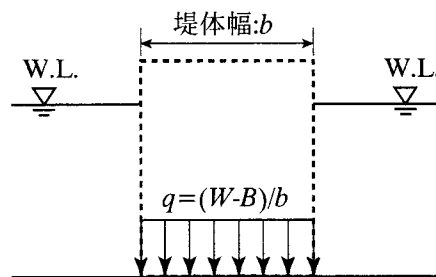


図-2 荷重作用条件

表-1 パラメータの従う確率分布

	α	V
単位体積重量		
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
基礎地盤	1.00	0.03
基礎地盤強度 $c', \tan \phi$	1.00	0.10

注) α ：平均値の偏り（平均値／特性値）

V ：変動係数

3. 現行設計法の安全性水準

信頼性設計法の適用に際して、目標安全性水準を適切に設定することが重要である。ここではまず現行設計法における平均的な安全性水準について検討した。

現行設計法においては、円弧すべり解析の許容安全率が1.3であることを考慮して、その状態を原設計断面から防波堤の堤体幅を変えずに堤体重量を変化させることで検索し、FORMを用いて、その状態での信頼性指標を算出した。検討対象として全国の既設防波堤断面からケーソン式混成堤を20断面選択した。各断面の港内側へのすべりについて、最小安全率が1.3となる堤体重量における安全率 F_s (≈ 1.3)、信頼性指標 β 、破壊確率 P_f を表-2に示す。

表-2に示すように、信頼性指標 β の平均値は7.2であり、破壊確率に換算すると 10^{-6} のオーダー以下となる。防波堤の耐波外的安定性の平均的な破壊確率は 10^{-3} のオーダーである⁴⁾ことと比較すると、円弧すべり解析で安全率1.3となる断面の平均的な安全性水準は、非常に安全側に設定されていると言える。

円弧すべりの安全性水準のもう一つの特徴は、同じ安全率1.3の条件ではばらつきが非常に大きいことである。この理由は地盤の空間的な自己相関性に起因する問題である。図-3に示すように、すべり円弧の大小によって確率的に独立な土層を横切る数 n が変化する。このためにすべり円弧の大小により地盤強度の変動係数が変化し、性能関数の標準偏差、つまり信頼性指標がばらつく。この傾向は港外側へのすべりについても同じであった。

現行設計法の安全性水準の妥当性については定量的な検討が十分になされているとは言えないため、これに基づいて目標安全水準を設定すると、地盤改良などを実施する場合、過度に安全側の改良が要求される可能性がある。そこで、次章より期待総費用最小化に基づいた安全性水準について検討する。

表-2 現行設計法による円弧すべりの安全性水準

No	F_s	β	P_f
1	1.307	6.97	1.64×10^{-12}
2	1.307	6.46	5.35×10^{-11}
3	1.307	7.71	6.44×10^{-15}
4	1.306	6.85	3.83×10^{-12}
5	1.306	5.12	1.51×10^{-7}
6	1.301	8.71	1.0×10^{-16} 以下
7	1.303	9.66	1.0×10^{-16} 以下
8	1.302	10.14	1.0×10^{-16} 以下
9	1.301	8.20	1.11×10^{-16}
10	1.304	8.28	1.11×10^{-16}
11	1.305	8.31	1.0×10^{-16} 以下
12	1.302	4.93	4.10×10^{-7}
13	1.307	4.47	3.91×10^{-6}
14	1.305	4.36	6.63×10^{-6}
15	1.305	8.24	1.11×10^{-16}
16	1.308	8.82	1.0×10^{-16} 以下
17	1.305	7.34	1.06×10^{-13}
18	1.304	7.85	2.11×10^{-15}
19	1.303	4.58	2.31×10^{-6}
20	1.306	7.53	2.46×10^{-14}
平均値		7.23	6.70×10^{-7}

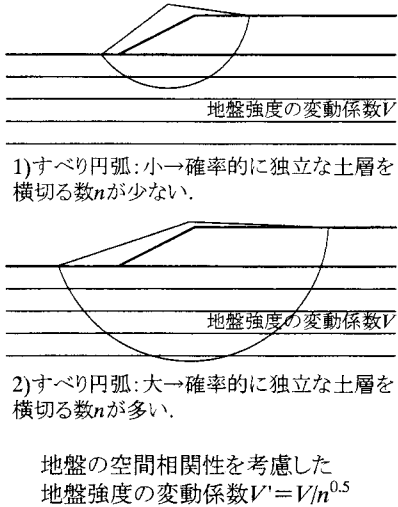


図-3 地盤の空間的な自己相関性の考慮

4. 期待総費用を考慮した安全性水準

(1) 破壊確率の算出方法

検討に際して、基礎地盤が砂質土層、粘性土層の両方を含む既設断面のうち、マウンド肩幅の広いもの、置換砂工法、SCP工法による地盤改良が実施されたものをそれぞれ2断面ずつ合計6断面抽出し、3.で検討した安全率1.3の荷重状態からマウンド肩幅、地盤改良範囲、改良率を低減させることにより破壊確率の変化を考慮した(図-4参照)。破壊確率の算出は、FORMを用いて得られる信頼性指標に基づいている。

(2) 期待総費用の算出方法

期待総費用は式(3)により表現される。

$$ETC = C_i + P_f C_f \quad (3)$$

ここに、 ETC ：期待総費用、 C_i ：初期建設費、 P_f ：対象とする荷重による破壊確率、 C_f ：被災時費用である。本研究では常時の問題を扱うため社会的割引率は考慮しない。また、被災時費用は、復旧費用と経済損失の両方を考慮する。

防波堤ケーソンのマウンドからの滑落、ケーソン上部の水没などによる被災の場合、復旧費が初期建設費の125%程度になる⁹⁾。本研究で対象とするのは常時状態での堤体全体の円弧すべり破壊であり、より大規模な被災であると考えられるため、マウンドより上部の復旧費用は初期建設費の150%とした。

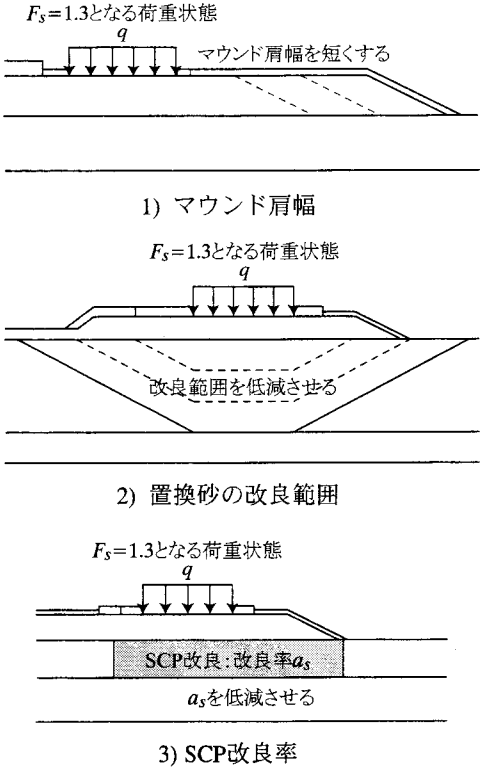


図-4 破壊確率の変化を考慮する際の要因

併せて、地盤改良について、マウンドの肩幅、置換砂の範囲、SCPの改良率に応じた工事費用を計上している。工事費用は、日本の標準的な人件費、材料費、工事の稼働率などをもとに算出した。

岸壁の被災時には当該施設を利用できないことによって経済損失が存在する¹⁰⁾と同様に、防波堤についても被災時には港内岸壁での船舶の安全な接岸や円滑な荷役が阻害されるため経済損失が生じる。ただし、防波堤の常時状態での被災による港内岸壁での経済損失の検討は様々な要因を考慮する必要がある、すべてを考慮することは困難である。一方、常時状態の検討であるため、変動および偶発状態での安全性と比較すると要求される安全性水準は高いと言える。そこで安全側の目標安全性水準を設定するために、経済損失については文献10)をもとに、奥行き1mあたりで最大となる損失額（28.0百万円/m）を考慮することとした。

図-5に一例として、検討対象とした6断面のケーソン式混成堤の港内側への円弧すべりについて、初期建設費、復旧費、経済損失の関係を示す。図中、初期建設費と復旧費の関係は本検討において考慮した範囲についてのみ示している。上述のように復旧費は初期建設費の150%程度となっている。初期建設費はマウンド肩幅、置換砂の範囲およびSCPの改良率に応じた費用となるが、被災時には地盤の一定範囲を改良復旧するため、置換砂の範囲およびSCPの改良率の変化を考慮する断面の復旧費は初期建設費に対して一定となる。マウンド肩幅の変化を考慮する断面は一定の地盤改良復旧費が含まれるが、マウンド以浅の部分は現況復旧となるため、復旧費は初期建設費に応じて変化する。また経済損失は復旧費の0.7～1.5倍程度である。

(3) 目標安全性水準

図-6に、ケーソン式混成堤・消波ブロック被覆堤の置換砂の範囲を変化させた断面における港内すべりについて期待総費用カーブを例示する。それぞれの図には抽出した2断面の結果を示す。水平軸は地盤改良範囲を変化させた場合の円弧すべり破壊の破壊確率である。

図中□をつけた破壊確率が、期待総費用が最小となる破壊確率である。構造形式ごとに期待総費用が最小となる破壊確率は異なる。さらに△で示した破壊確率は現行設計法による安全性水準であるが、円弧すべりの破壊確率は非常に小さく、図に示した最小の破壊確率以下となる。本章で選択した6断面の現行設計法による破壊確率は、ケーソン式混成堤および消波ブロック被覆堤について、それぞれ 10^{-16} 以下($\beta=8.82$)～ 1.12×10^{-7} 、 10^{-16} 以下($\beta=10.40$)～ 1.53×10^{-6} である。ここで検討したのは6断面だけであるが、3. で議論した現行設計法による破壊確率と大きな違いはない。現行設計法による破壊確率と期待総費用最小の破壊確率の関係を比較すると、現行設計法による破壊確率の方が小さくなる。これは3. で検討した理由によるものと考えられる。

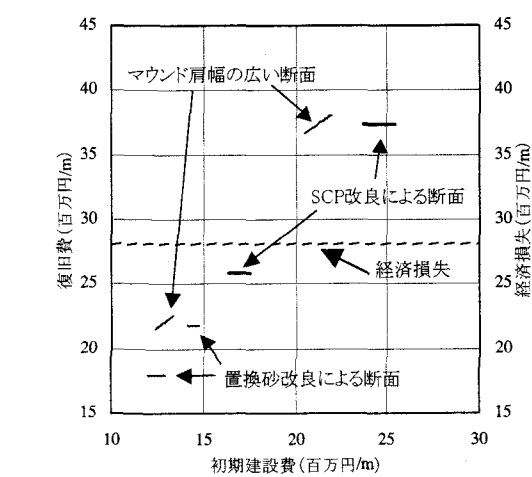
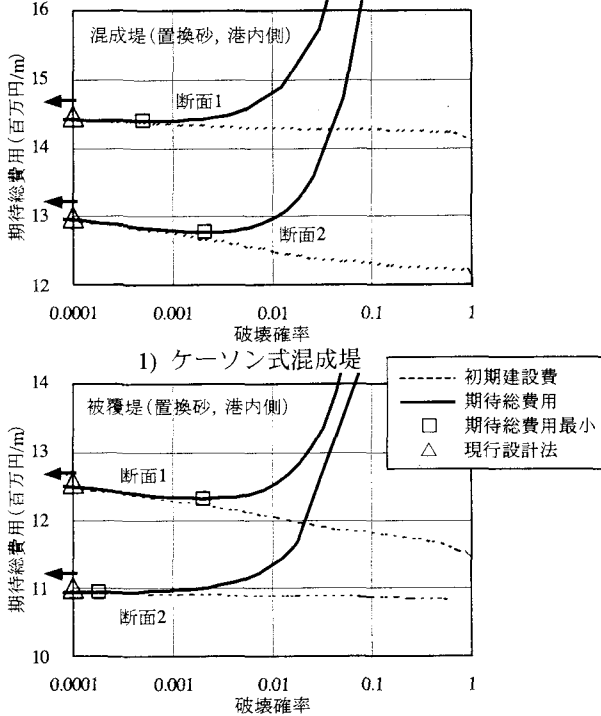


図-5 初期建設費、復旧費、経済損失の関係



1) ケーソン式混成堤
2) 消波ブロック被覆堤
図-6 期待総費用カーブ

期待総費用が最小となる安全性水準は同じ構造形式ではばらつきが少なく、港内側、港外側とも同じ安全性水準となった。設定した目標安全性水準（信頼性指標 β_T ）をまとめて表-3に示す。

5. レベル1信頼性設計法の検討

(1) 感度係数の設定

ここでは、レベル1信頼性設計法に用いる部分係数の検討を行う。目標信頼性指標とそれに対応する感度係数をもとにして、部分係数は式(4)により得られる。

$$\gamma_X = (1 - \alpha_X \beta_T V_X) \frac{\mu_X}{X_k} \tag{4}$$

ここに、 γ_X ：部分係数、 α_X ：感度係数、 β_T ：目標信頼性指標、 V_X ：変動係数、 μ_X ：平均値、 X_k ：特性値である。

感度係数の設定は文献10)を参考に以下の手順に従う。

- 1) 構造形式ごとに、すべての断面において β_T と一致する結果を探索する。
- 2) 1)で得られる断面の感度係数を抽出し、これを平均する。

この手順によりケーソン式混成堤および消波ブロック被覆堤について港内、港外側で感度係数を算出した。図-7に感度係数を、また表-4には各パラメータの感度係数の平均値を示す。全国の既設断面より抽出した断面をもとに検討しているため、感度係数にばらつきがある。また単位体積重量は条件によって大きく異なることから、マウンドを含むそれより上の地盤を γ_1 、マウンドより下の地盤のうち砂質土層を γ_2 、粘性土層を γ_3 として評価した(図-8参照)。ケーソン式混成堤、消波ブロック被覆堤の港外側での γ_1 は、マウンド、消波工の形状によって正負いずれの感度にもなるが、その絶対値は小さい。消波ブロック被覆堤の港内側では、消波ブロックは荷重効果(負値)として寄与するが、感度は低い。基礎地盤のうち砂質土は、荷重効果として作用する成分が円弧中心を対象として左右で相殺され、せん断抵抗(正值)のみに寄与する場合と、地盤改良により成層状態が乱され、左右で相殺されずに荷重効果(負値)として寄与する場合がある。一方、粘性土では荷重効果として作用する成分が円弧中心を対象として左右で相殺され、感度がゼロになる場合と、地盤改良により成層状態が乱されることにより、抵抗モーメント(正值)に寄与する場合がある。

図-7に示すように構造形式ごとに港内側・港外側で各感度係数のばらつきの程度に顕著な差はないため、設計時の便を考慮して、港内側・港外側で1種類の感度係数とした。

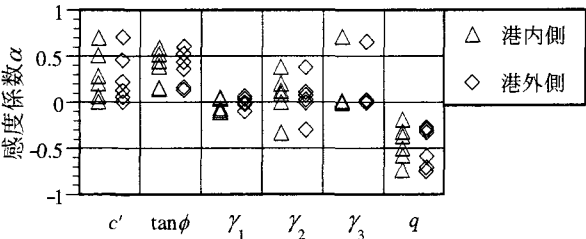
各パラメータについて見ると c' 、 $\tan\phi$ の感度が抵抗側として大きく、 q の感度が荷重側として大きくなり、信頼性指標に大きな影響を及ぼすパラメータである。

(2) 部分係数の提案

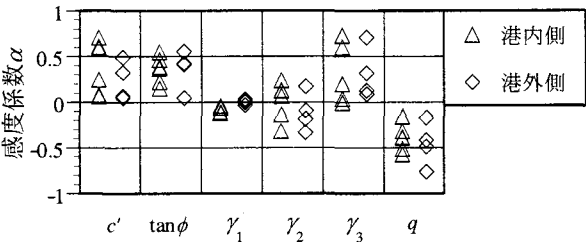
部分係数の提案においては、式(4)より上述した感度係数と目標信頼性指標を用いて部分係数を設定するとともに、最適解を探索するために目標信頼性指標を前後にずらせて部分係数を設定し、キャリブレーションを実施して、目標破壊確率に対する設計断面の破壊確率の分散が最小となる案を最適と判断するのが一般的である。ここで、部分係数の丸めはレベル1信頼性設計結果の信頼性指標の大きなばらつきに結びつくため、本来望ましいことではない。しかしながら、本研究で対象とするのは常時状態での検討であり、変動および偶発作用に対する信頼性と比較すると要求される信頼性水準は高いと言える。現行設計法における許容安全率の設定にもそのよう

表-3 目標安全性水準

構造形式	ケーソン式 混成堤	消波ブロック 被覆堤
目標信頼性指標 β_T	3.30	3.90



1) ケーソン式混成堤



2) 消波ブロック被覆堤

図-7 各構造形式における感度係数の分布
(港内外すべりとも)

表-4 感度係数(平均値)

1) ケーソン式混成堤

β_T	c'	$\tan\phi$	γ_1	γ_2	γ_3	q
3.30	0.285	0.380	-0.007	0.070	0.125	-0.463

2) 消波ブロック被覆堤

β_T	c'	$\tan\phi$	γ_1	γ_2	γ_3	q
3.60	0.327	0.364	-0.034	-0.027	0.285	-0.410

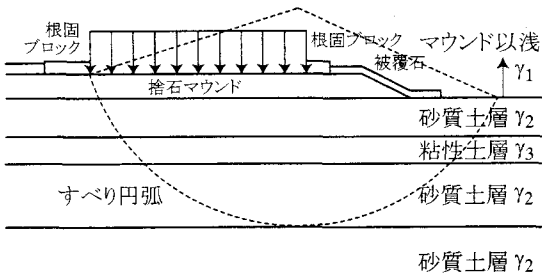


図-8 土層による単位体積重量の感度係数の扱い

な考え方が反映されていると考えられる。加えて、レベル1信頼性設計法においては設計結果の断面の保有する信頼性指標にはばらつきがある。このような点を踏まえて、本研究では、期待総費用を最小とする信頼性水準より安全側の断面をレベル1信頼性設計により設計することを目標とし、式(4)より得られる部分係数を丸める。さらにレベル1信頼性設計法による設計断面と現行設計断面の保有する信頼性水準の比較結果も考慮して、部分係数の妥当性を評価する。部分係数の丸めは0.1とした。

表-5 レベル1信頼性設計法と現行設計法の破壊確率の比較

1) ケーソン式混成堤

		現行設計法	レベル1信頼性設計法	期待総費用最小化にもとづいた目標信頼性水準
港内側	マウンド肩幅	3.83×10^{-12}	4.53×10^{-9}	4.83×10^{-4}
		6.98×10^{-12}	2.46×10^{-6}	
	置換砂の改良範囲	1.12×10^{-7}	4.61×10^{-5}	
		3.36×10^{-9}	9.63×10^{-5}	
	SCPの改良率	1.0×10^{-16} 以下	2.64×10^{-7}	
港外側		3.50×10^{-10}	2.59×10^{-6}	
	マウンド肩幅	3.38×10^{-14}	1.16×10^{-8}	
		8.54×10^{-12}	1.92×10^{-6}	
	置換砂の改良範囲	1.13×10^{-8}	8.40×10^{-6}	
		1.11×10^{-9}	1.15×10^{-4}	
	SCPの改良率	2.00×10^{-12}	2.48×10^{-8}	
		4.19×10^{-10}	7.65×10^{-7}	

2) 消波ブロック被覆堤

		現行設計法	レベル1信頼性設計法	期待総費用最小化にもとづいた目標信頼性水準
港内側	マウンド肩幅	1.0×10^{-16} 以下	4.23×10^{-12}	1.59×10^{-4}
		3.20×10^{-12}	8.14×10^{-7}	
	置換砂の改良範囲	7.33×10^{-15}	4.60×10^{-7}	
		1.53×10^{-6}	9.43×10^{-4}	
	SCPの改良率	3.33×10^{-13}	7.00×10^{-11}	
港外側		4.72×10^{-12}	1.41×10^{-6}	
	置換砂の改良範囲	4.44×10^{-15}	1.51×10^{-6}	
		7.69×10^{-8}	1.75×10^{-4}	
	SCPの改良率	1.66×10^{-12}	2.64×10^{-11}	
		1.43×10^{-7}	1.16×10^{-4}	

表-6 部分係数の提案

1) ケーソン式混成堤

β_T	c'	$\tan \phi$	γ_1	γ_2	γ_3	q
3.30	0.9	0.9	1.0	0.9	0.9	1.1

2) 消波ブロック被覆堤

β_T	c'	$\tan \phi$	γ_1	γ_2	γ_3	q
3.60	0.9	0.9	1.0	0.9	0.9	1.1

2. に示した条件を用いて算出した部分係数により各構造物のレベル1信頼性設計を実施した。表-5に現行設計法、レベル1信頼性設計法による設定断面の破壊確率、さらに参考として期待総費用最小化に基づく目標安全性水準 (β_T とする) をまとめる。現行設計断面よりは経済的で、期待総費用最小とする信頼性水準よりは安全な断面となることが分かる。

最後にここでの結果をまとめて表-6にレベル1信頼性設計法に用いる部分係数を示す。ただし、消波ブロック被覆堤では、前述までの手法によれば、 γ_2 の部分係数は1.0と得られるが、設計時の便を考慮して、部分係数にはケーソン式混成堤と同じ値であ

る0.9と提示した。どちらの値を採用したレベル1信頼性設計法においても、本研究で用いた断面について現行設計法より経済的な断面が得られたことを確認している。

6. まとめ

本研究は、防波堤を対象とした円弧すべりに関する信頼性設計法の適用について検討した。本研究により得られた主な結論は次の通りである。

①円弧すべりの現行設計法で標準とされる許容安全率1.3となる断面の安全性水準は、破壊確率が 10^{-6} のオーダー以下であり、耐波外的安定性の 10^{-3} のオーダーの破壊確率と比較すると非常に安全側に設定されていると考えられる。

②期待総費用最小化に基づく方法を採用し、適切な目標安全性水準を設定した。またそれに基づいて提案したレベル1信頼性設計法は、被災時費用として経済損失を考慮し、部分係数の丸めも行うことで安全側の断面を設定するが、現行設計法より経済的な設計が可能となることを確認した。

参考文献

- 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.
- 国土交通省：土木・建築にかかる設計の基本，2002.
- 星谷 勝，石井 清：構造物の信頼性設計法，鹿島出版会，1986.
- 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.
- 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.
- 土田 孝，湯 怡新：港湾構造物の円弧すべり解析における最適な安全率に関する研究，港湾技術研究所報告，Vol.35, No.1, pp.117-146, 1996.
- 奥村樹郎，土田 孝：土質定数のばらつきを考慮した不同沈下の推定，港湾技術研究所報告，Vol.20, No.3, pp.131-168, 1981.
- 松尾 稔：地盤工学 信頼性設計の理念と実際，技報堂出版，1984.
- 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 (JCROSSAR2000) 論文集，pp.441-448, 2000.
- 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.