

サンドコンパクションパイルが打設された港湾施設の円弧すべり計算への信頼性設計法の適用

STUDY ON THE APPLICATION OF THE RELIABILITY-BASED DESIGN METHOD ON CIRCULAR ARC SLIP FAILURE MODE OF PORT FACILITIES BUILT ON IMPROVED GROUND BY THE SAND COMPACTION PILE METHOD

長尾 毅¹・野津光夫²・今井優輝³

Takashi NGAO, Mitsuo NOZU and Yuki IMAI

¹正会員 工博 国土技術総合政策研究所 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

²正会員 工博 不動建設(株) (〒103-8543 東京都中央区日本橋小網町6-1)

³正会員 不動建設(株) (〒103-8543 東京都中央区日本橋小網町6-1)

Some partial factors have been proposed to introduce the level-one reliability-based design method for port facilities. However, any particular partial factor for Sand-Compaction-Pile (SCP) method has not been proposed.

In order to establish the partial factors for circular arc slip failure mode of port facilities including SCP improved ground, reliability indices against that failure mode were checked. In this analysis, the probability distribution of friction coefficient of SCP on the basis of SPT-N records is identified. As the result of the analysis, it is confirmed that the safety level by the present design method is higher than that of the minimum expected total cost, and that some parameters, such as SCP-friction coefficient, has a significant impact on stability. On the basis of the sensitivity factors of parameters, the partial factors designed for facilities including SCP improved ground are proposed.

Key Words : Reliability-based design, circular arc slip, sand compaction pile method

1. はじめに

護岸や防波堤の設計において、自重や上載荷重などの永続作用を考慮する条件では基礎地盤のすべりの照査が実施される。現行設計法では、すべり面を円弧と仮定する2次元問題として解析され、安定性をもっとも小さいときの安全率で評価される¹⁾。しかしながら、例えば防波堤の波浪時安定計算は、滑動安全率は1.2、支持力安全率は1.0であるにも関わらず、破壊モードは滑動が圧倒的であるなど、安全率が意味する安全性水準は破壊モードごとに異なり、定量的な評価が十分になされていないとは言えない。一方滑動と支持力の照査を確率的に評価すると、滑動の確率が大きく、被災事例と整合する結果が得られている²⁾。またISO2394には、信頼性を構造物に要求する性能とすることが示されており、これまでも防波堤や護岸の定量的な性能設計法として、安全性水準すなわち破壊確率を評価するレベル1信頼性設計法の適用が検討されてきた³⁾。

レベル1信頼性設計法は、部分係数を用いて性能関数が特定の値になるよう仕様を調整し、一定の信頼性を確

保する方法である。部分係数は、土の重量、粘土の粘着力、砂の摩擦係数といった土質パラメータごとに定められるが、サンドコンパクションパイル(以下、SCPとする)による地盤改良の部分係数の検討はこれまでに行われていない。SCPの摩擦係数は安定性に対する影響が大きく、また専用施工機で人工的に造成されるために、その摩擦係数の確率分布は砂質土地盤と異なると考えられるので、砂質土地盤と分けて部分係数を求める必要があると考えられる。

本研究では、永続状態(自重等の永続作用が主たる作用の状態)での基礎地盤のすべりについて、SCPの施工記録を基に設定した摩擦係数の確率分布を用いて、供用中の護岸、防波堤の円弧すべりに関する信頼性指標を確認した。また信頼性検討で得られた各パラメータの感度係数を基に、SCPを伴う施設の部分係数を提案した。

2. SCPを含む断面での円弧すべりの性能関数

現行設計法でのすべり安定性の検討は、修正フェレニ

ウス法にブシネスク解を用いた鉛直応力増分とSCPによる抵抗モーメントの拡張を施した円弧すべり計算により行われる¹⁾。信頼性評価に用いる性能関数は、このすべり計算式の抵抗モーメント M_R 、起動モーメント M_D を用いた式(1)による。

$$Z = M_R(c, \gamma, \tan \phi, \gamma_s, \tan \phi_s) - M_D(\gamma, \gamma_s) \quad (1)$$

$$M_R = \sum (c + \sum \alpha \gamma \cos^2 \theta \tan \phi) l R + \sum \{ (1 - as)(c + \frac{\Delta c / \Delta p}{1 + (n-1)as} \sum \alpha \gamma U) + \sum as(\gamma, z_s + \sum \alpha \gamma \frac{n}{1 + (n-1)a_s}) \cos^2 \theta \tan \phi_s \} l R$$

$$M_D = \sum \{ (\gamma S(1 - as) + \gamma_s S a_s) \} \times arm$$

ここに、 c ：粘性土の非排水せん断強度、 $\sum \alpha \gamma$ ：分割片底面の鉛直応力、 γ ：土・上部構造の単位体積重量、 α ：要素重量から鉛直応力を求めるための係数、 θ ：分割片底面の水平面となす角、 ϕ ：砂質土の排水条件での内部摩擦角、 l ：分割片の底辺の長さ、 R ：すべり円の半径、 as ：SCPの改良率、 $\Delta c / \Delta p$ ：粘土の強度増加率、 n ：SCPの応力分担比、 U ：SCP間粘土の圧密度、 γ_s ：SCPの単位体積重量、 z_s ：SCPの分割片底面までのSCP高さ、 ϕ_s ：SCPの内部摩擦角、 S ：分割片の面積、 arm ：分割片重心とすべり円中心との水平距離である。図-1に上記の一部を示す。式(1)括弧内の記号は確率変数として扱うパラメータを示している。

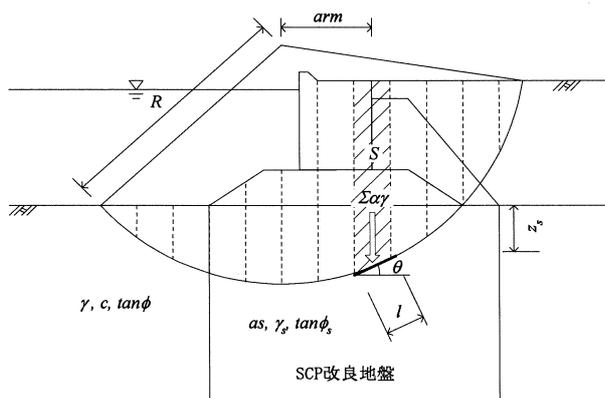


図-1 円弧すべり解析

確率変数は正規分布に従うと仮定した。表-1に示す平均値と特性値（設計用値）の比と変動係数を正規分布のパラメータとする。この中で次節3.で述べるSCPの摩擦係数の分布以外は、文献4)に従っている。他に、円弧すべり計算では地盤強度の自己相関性を考慮する必要があるが、本研究では粘土の粘着力は深度方向に $2.5m^3$ を単位として、SCPの摩擦係数は後述する理由により10mを単位として確率的に独立していると考えた。水平方向は、粘土に関しては数10mの範囲で自己相関性が非常に強い⁵⁾ことから、同一の地盤強度と見なす。自己相関性の考慮とは、具体的には図-2に示すように、円弧の横切

る確率的な独立層の数によって、変動係数を変化させることである³⁾。

式(1)ですべり破壊を意味する $Z < 0$ の確率は、First-Order Reliability Method（以下FORMとする）を用いて、性能関数の破壊点での線形近似によって得られる信頼性指標を基に算出する⁶⁾。

表-1 パラメータの従う確率分布

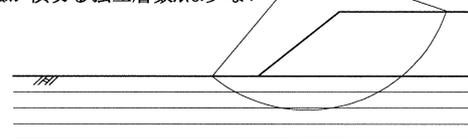
	μ_X / X_k	V
地盤強度		
粘着力 c 、摩擦係数 $\tan \phi$	1.00	0.10
単位体積重量		
ケーン	0.98	0.02
敷砂・捨石等	1.02	0.04
地盤（SCP含む）	1.00	0.03
上載荷重	1.00	0.40
残留水重量	1.00	0.05
SCPの摩擦係数 $\tan \phi_s$		
設計 $\tan \phi_s = 0.70$ の場合	1.00	0.05
設計 $\tan \phi_s = 0.58$ の場合	1.21	0.05

注) μ_X / X_k ：平均値の偏り（平均値/特性値）

V：変動係数

すべり円弧：小

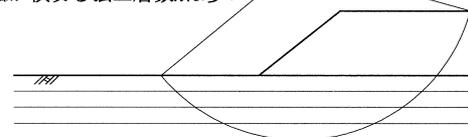
円弧が横切る独立層数 n は少ない



地盤強度の変動係数 V

すべり円弧：大

円弧が横切る独立層数 n は多い



自己相関性を考慮した変動係数 V'

SCPの摩擦係数 $\tan \phi_s$ （確率変数1個）

$$V' = V/n^{0.5}$$

粘土の粘着力 c （確率変数は c_0 と増加勾配の2個）

$$V' = V/(2n)^{0.5}$$

図-2 すべり円の深さによる変動係数の変化

3. SCPの摩擦係数の確率分布

SCP工法は、所定の深さごとに一定量の砂を圧入することで人工的に均一な砂杭を造成する工法である。そのため自然堆積地盤と異なる確率分布を持つと考えられる。SCPの確率変数は摩擦係数と単位体積重量であるが、本

研究では豊富な施工記録がある標準貫入試験結果を用いて、摩擦係数の分布を検討した。単位体積重量については計測例が少ないので砂質地盤と同等の評価とした。検討に用いた標準貫入試験記録は、表-2に示す45本のSCP杭心の測定記録である。

表-2 検討に用いた標準貫入試験

地域	改良率 α_s (%)	設計での $\tan\phi_s$ (括弧内は ϕ_s)	本数
東京	78.5	0.70 (35)	24
大阪	70	0.58 (30)	2
神戸	70	0.66 (33.4)	11
	25	0.58 (30)	2
和歌山	25	0.58 (30)	5
鹿児島	80	0.70 (35)	1
総数			45

深度方向のN値分布は、上載圧の影響で深度が大きいくほど大きくなる。そこで式(2)により上載圧を考慮した摩擦角 ϕ_s に変換し、実際の設計に即した深度方向にほぼ一定の値として評価した。

$$\phi_s = 25 + \sqrt{100N / (70 + \sigma_v')} \quad (2)$$

ここに、 ϕ_s : SCPの内部摩擦角, N : 標準貫入試験値, σ_v' : 有効上載圧(kN/m²)である。 σ_v' は原地盤粘土とSCPの重量を改良率に応じて配分した単位体積重量を基に計算している。 $\tan\phi_s$ の深度方向の分布例を図-3に示す。SCP1本の $\tan\phi_s$ の平均値を、45本の試験結果に対して求め、ヒストグラムとしたのが図-4である。設計値と異なり改良率に関わらず $\tan\phi_s$ は0.70から0.74に集中しており、平均値は0.721、標準偏差は0.018であった。また図-5より変動係数は5%付近に分布していることが確認できた。

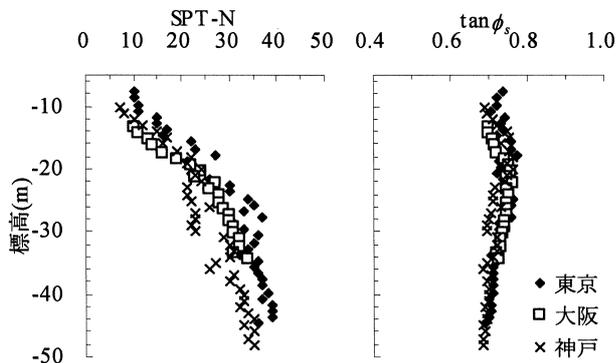


図-3 N値, $\tan\phi_s$ 分布の例

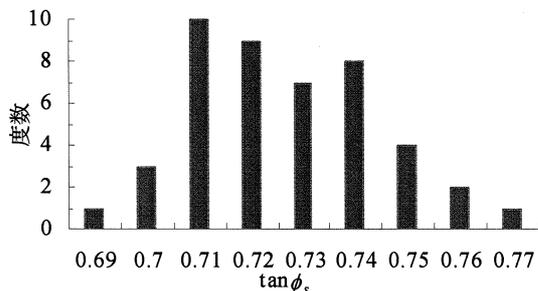


図-4 平均 $\tan\phi_s$ のヒストグラム

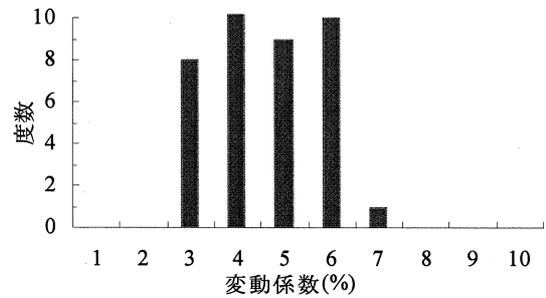


図-5 $\tan\phi_s$ の変動係数のヒストグラム

図-6に深度方向の自己相関係数を示す。図中の破線は式 $\gamma = \exp(-\Delta z/L)$ で近似した場合である。Lは相関距離と呼ばれる数値で、このLの地盤厚の中では土質の相関が高いことを意味する⁷⁾。本研究ではこの厚さごとに確率的に独立な層が存在するものと扱う。この相関距離を45本の $\tan\phi_s$ に対して求めると、図-7のヒストグラムが得られた。全サンプルの80%ほどが $L < 10m$ であった。本研究では、安全側の結果を得る観点から相関距離を10mとした。以上の資料から、本研究で用いるSCPの分布定数を表-3のように定めた。

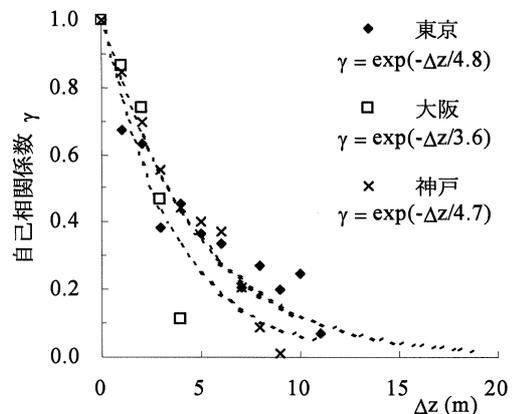


図-6 $\tan\phi_s$ の深度方向の自己相関係数

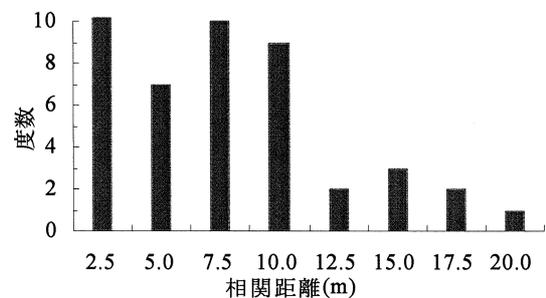


図-7 $\tan\phi_s$ の相関距離のヒストグラム

表-3 SCPの摩擦係数 $\tan\phi_s$ の分布定数

		備考
平均値	0.70	平均0.721, $\sigma=0.018$
変動係数V	0.05	
相関距離L	10m	$L < 10m$ がサンプルの80%

4. 現行設計法の安全性水準

本研究での解析対象断面は、表-4、図-8、9に示すような供用中の護岸4つと防波堤2つである。他に安全性水準の実証確認のため、舞鶴港で実施された実物大ケーソンのすべり破壊実験⁸⁾の断面でも信頼性解析を行った。なお舞鶴港の破壊実験では、円弧すべり解析と実際のすべり面の一致を確認したほか、すべり時の逆解析によりSCPと杭間粘土の応力分担比等の提案が行われている。

表-4 各断面の仕様概要

断面	構造 (水深)	SCP改良率	円弧すべりでの $\tan\phi_s$
舞鶴	防波堤状(6.5m)	23%	0.7
護岸	1 栈橋式護岸(14m)	75%	0.7
	2 直立式護岸(7.5m)	70%	0.7
	3 直立式護岸(5m)	78%	0.7
	4 緩傾斜護岸(4m)	30%	0.58
防波堤	5 防波堤(5m)	80%	0.7
	6 防波堤(10m)	70,35%	0.7,0.58

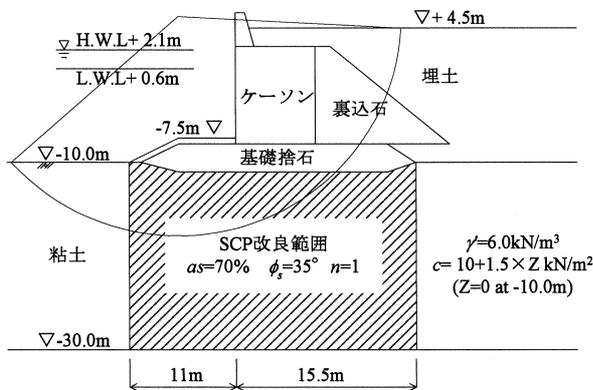


図-8 護岸断面例(断面2)

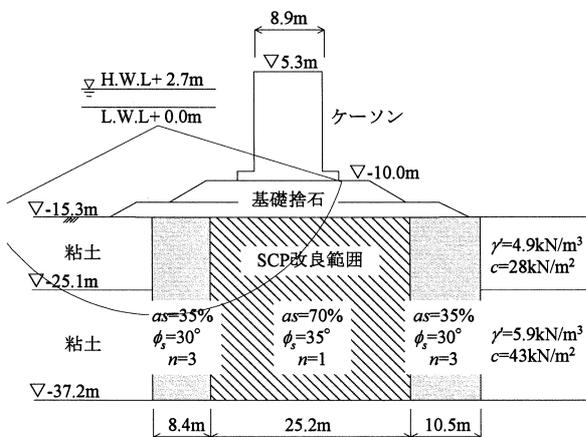


図-9 防波堤断面例(断面6)

これらの断面に対し、各施設の設計時の定数を用いて、現行設計法での安全性水準を確認した。円弧すべりの安

全率 F_s とあわせて表-5、図-10に示す。安全率は1.2以下となる事例が一つあったが、広範囲の事例について感度係数を検討するために本研究の対象としている。

舞鶴破壊実験の解析では、実際にすべりが生じている断面での破壊確率が95%となった。このことから円弧すべりを破壊モードとした信頼性解析が、実際の安全性水準を表現していると考えられる。

断面1~6では、まず全体的に破壊確率が小さいことが分かる。破壊時の復旧費を含めた期待総費用を算出した研究⁴⁾によると、期待総費用最小となる破壊確率は 10^{-4} のオーダーであるので、安全側に設計されていたと言える。護岸の断面1~3は、安全率に応じて信頼性指標 $\beta=2.5\sim5$ で推移している。低改良率の断面4は安全率が1.239と小さいにも関わらず $\beta=5$ と大きな信頼性指標となっている。これは設計での $\tan\phi_s$ が0.58と、平均値0.7に対して小さく設定されており、安全率が過小評価されているためである。防波堤では、護岸と比較して壁体背後の埋土がないため、護岸に比べ大きな β を示している。断面6が断面5よりも大きな β となっているのは、これも設計時の $\tan\phi_s=0.58$ の影響である。

この結果から、期待総費用の観点から現行設計法は安全側であること、また同様の安全率でも構造形式の違いにより安全性水準が大きく異なることが確認された。なお安全性の違いは、パラメータの変動係数と、感度係数に依存しており、次節で述べることとする。

以上のように現行設計法である安全率は、安全性水準、構造形式の違いによる信頼性の差の2点で問題があることが確認された。この点を解決するために、先程述べた期待総費用最小化となる破壊確率を目標として、レベル1信頼性設計法を検討することとした。

表-5 現行設計法での円弧すべりの安全性水準

断面	安全率 F_s	信頼性指標 β	破壊確率 P_f
舞鶴	0.897	-1.590	0.95
護岸	1	1.235	7.3×10^{-4}
	2	1.142	6.5×10^{-3}
	3	1.365	4.2×10^{-6}
	4	1.239	2.1×10^{-7}
防波堤	5	1.229	6.2×10^{-9}
	6	1.263	1.5×10^{-10}

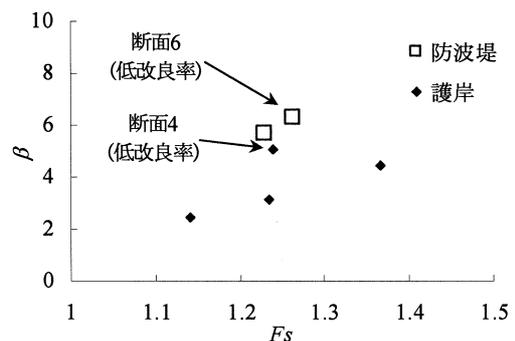


図-10 安全率 F_s と信頼性指標 β

5. レベル1信頼性設計法の検討

(1) 感度係数の設定

部分係数の求め方として、現行設計法の破壊確率に合わせる方法もあるが、構造形式ごとに確率が異なるため、基準値を定めにくい。ここでは、期待総費用最小となる破壊確率になるような各パラメータの部分係数の検討を行う⁴⁾。目標信頼性指標と感度係数をもとにして、部分係数は式(3)により求められる。

$$\gamma_x = (1 - \alpha_x \beta_T V_x) \frac{\mu_x}{X_k} \quad (3)$$

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。

目標信頼性指標は、文献4)等に記載されている表-6の値から、施設の重要度、構造形式に応じて使用した。

表-6 各構造形式の目標信頼性指標⁴⁾

	護岸 (ケーソン式岸壁)		防波堤
	耐震	一般	ケーソン式混成堤
β_T	3.1	2.7	3.3
P_f	1.0×10^{-3}	4.0×10^{-3}	5.0×10^{-4}

感度係数は、性能関数の破壊点近傍での値の変化に及ぼす各パラメータの影響度を意味し、絶対値が大きいほど、信頼性指標に及ぼす影響が大きい。この感度係数は下記の手順で設定した。

- 1) 構造形式ごとに、FORMにより得られる感度係数を抽出する。
- 2) 同じような傾向を示すパラメータをまとめ、その感度係数を平均する。

この手順で感度係数を護岸、防波堤について算出した。図-11は感度係数の分布を示す。図表中の各文字は、 c は粘着力、 $\tan\phi$ は摩擦係数、 γ は単位体積重量、 q は上載荷重、 w は残留水重量を表す。

図-11より、護岸ではSCPの摩擦係数が大きな感度係数を持ち、耐力に対する影響が非常に大きいことが分かる。捨石や裏込石の摩擦係数もある程度の感度を示している。その一方、作用側の負の感度係数を示すパラメータとして重量があるが、小さな感度で影響は小さい。防波堤ではSCPの感度が高いのと同時に、粘着力の感度も0.5程度と大きい。また重量の感度がマイナス側に大きく、護岸に比べると作用への影響度が大きい。

構造形式によって違いが生じる理由として、護岸背面の埋土の重量が考えられる。護岸では、背面の埋土、裏込石の重量による鉛直応力が大深度まで大きく働くため、大深度でも大きな摩擦力が発揮される。大きな摩擦力により深いすべりが生じにくくなるので、浅い円弧が最も安定性の小さいものとなる。このときの円弧は粘土の残る未改良域をあまり通らず、また、もともと摩擦力の割合が大きいことから粘着力の影響は小さくなる。一方防波堤では、重量要因がケーソンのみと小さいため大深度

での鉛直応力が小さく、大深度では摩擦力も小さい。このため深い円弧の安定性はそれほど大きくない。このときの円弧は改良域外の粘土層を通る割合が大きく、粘着力の影響が大きくなる。また重量が少ないことから摩擦力はもともと小さく、粘着力も安定に大きく寄与している。さらにSCP部の円弧が急勾配で摩擦が有効に働かない領域があるため、SCP部の重量が専ら起動モーメントとして働いてしまい、SCPの重量が相対的に作用側として働く割合が高くなる。

前節で、護岸と防波堤で安全性水準が異なった理由のひとつは、以下のように考えられる。護岸ではSCPの摩擦力の他に捨石の摩擦力(変動係数10%)も耐力に寄与する。一方防波堤では、SCPの摩擦力の他は粘着力(自己相関性を考慮した変動係数5%)が耐力に寄与するだけで、両者を比べると防波堤の方が耐力のばらつきが小さい。このために防波堤が大きな安全性を示す。

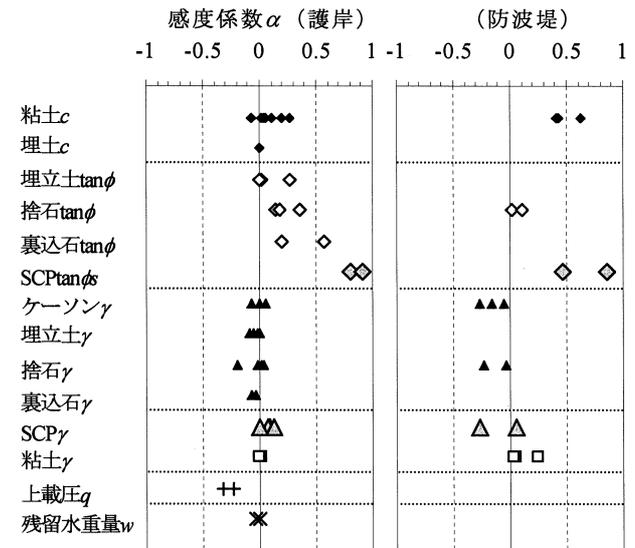


図-11 両構造形式での感度係数 α の分布

表-7 感度係数の平均値

	α	
	護岸	防波堤
c	0.092	0.484
$\tan\phi$ (捨石・裏込石等)	0.218	0.060
(SCP)	0.861	0.664
γ (捨石・裏込石・ケーソン等)	-0.041	-0.140
(SCP)	0.069	-0.110
(原地盤粘土)	0.009	0.115
q 上載荷重	-0.270	--
w 残留水重量	-0.022	--

表-7は、構造形式ごとに求めた感度係数の平均値である。図-11で同様の傾向を示したパラメータをまとめている。この表からも護岸では摩擦項が支配的であること、

防波堤では摩擦力の影響が若干減り、粘着力の影響力が大きいことがわかる。

(2) 部分係数の提案

部分係数は、式(3)により設定される。ここで、本研究で扱っているのは永続状態であり、かつ目標としている安全性水準は期待総費用が最小となる水準である。このため、既往の研究⁴⁾に準じて、目標の信頼性よりも安全側の結果となる断面になるよう式(3)の結果の値を丸める。

表-6, 7の値と式(3)を用いて、期待総費用最小となる信頼性を基に部分係数を求めると、表-8が得られる。この表の値は、既往の研究⁴⁾に準じて上述の丸めを0.05単位で行っている。なおSCPの $\tan\phi_s$ の部分係数は、設計 $\tan\phi_s=0.70$ の場合と $\tan\phi_s=0.58$ の場合で異なる値が得られる(表中括弧内の値)。しかしながら現行設計法は、すべり以外の破壊モードを加味して、平均値0.70に対して安全側に設計値0.58としている可能性もある。そのため、本研究では設計値0.70での部分係数のみを提案することとした。

この部分係数で図-8, 9の断面に対してレベル1信頼性設計の試算を行った。試算の結果、図-8のSCP改良幅を1.1倍(耐震)、1.05倍(その他)、図-9を0.85倍することで部分係数を導入した性能関数は0($F_s=1$)とな

り、照査基準を満足する結果となった。このときの信頼性指標を求めたところ、表-9に示す値が得られた。部分係数の丸めを行っているため若干の乖離はあるが、目標信頼性指標に近い値が得られており、部分係数の設定は妥当と言える。

6. まとめ

本研究では、SCPを含む護岸、防波堤の円弧すべりに対するレベル1信頼性設計法の適用を検討した。

信頼性解析に必要なSCPの摩擦係数の確率分布を、SCP杭心の標準貫入試験結果から設定した。摩擦係数は改良率に関わらず0.70、変動係数は5%ほどであった。

この分布を用いて実際の護岸、防波堤の信頼性解析を行ったところ、期待総費用最小となる破壊確率に比べて小さな破壊確率となる断面が多く確認された。また護岸と防波堤では同じ安全率でも破壊確率に大きな違いがあり、信頼性設計の必要性を確認した。

各パラメータの感度係数を求めたところ、護岸ではSCPの摩擦係数がすべり安定に関して支配的であること、防波堤では、SCPの摩擦係数に加えて原地盤粘土の粘着力も支配的であることが確認された。

得られた感度係数を基に提案した部分係数を用い、レベル1信頼性設計を試算したところ、目標に近い信頼性となる断面仕様が得られることを確認した。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 尾崎竜三, 長尾 毅: 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, 海洋開発論文集, 第21巻 pp.963-968, 2005.
- 4) 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.
- 5) 地盤工学会編: 土質基礎工学ライブラリー28 土質基礎の信頼性設計, 地盤工学会, 1985.
- 6) Rackwitz, R. and Fiessler, B.: Structural Reliability under Combined Random Load Sequences, *Computers & Structures*, Vol. 9, pp.489-494, 1978.
- 7) 松尾 稔: 地盤工学—信頼性設計の理念と実際—, 技報堂出版, 1984.
- 8) 岡田靖夫, 柳生忠彦, 幸田勇二: 低置換率サンドコンパクションパイル工法による改良地盤の現地破壊実験, 土と基礎, Vol.37 No.08, pp.57-62, 1989.

表-8 部分係数の提案

		護岸		防波堤
		耐震	その他	
		$\beta_T=3.1$	$\beta_T=2.7$	$\beta_T=3.3$
c	埋立土	1.00	1.00	--
	原地盤粘土	0.95	1.00	0.90
$\tan\phi$	捨石・裏込石等	0.95	0.95	1.00
	SCP $\tan\phi_s=0.70$ ($\tan\phi_s=0.58$)	0.80 (1.05)	0.80 (1.10)	0.90 (1.10)
γ 海底面 以上	ケーソン	1.00	1.00	1.00
	捨石・裏込石等	1.05	1.00	1.05
	背面埋立土	1.00	1.00	--
海底面 以下	砂質土 (SCP)	1.00	1.00	1.00
	粘性土 (粘土)	1.00	1.00	1.00
q		1.35	1.30	--
w		1.00	1.00	--

表-9 レベル1信頼性設計の試算

目標		護岸 (図-8)		防波堤 (図-9)
		耐震	その他	
	β_T	3.1	2.7	3.3
	P_f	1.0×10^{-3}	4.0×10^{-3}	5.0×10^{-4}
試算 での値	β	3.11	2.89	3.33
	P_f	0.94×10^{-3}	2.0×10^{-3}	4.3×10^{-4}