

防波堤を対象とした円弧すべりの信頼性解析

中央復建コンサルタンツ(株) 正会員 ○尾崎 竜三
国土技術政策総合研究所 正会員 長尾 毅

1. はじめに

港湾構造物の設計において、自重や載荷重による斜面すべりの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、斜面の安定性が最も低下する安全率によって安全性を評価してきた¹⁾。しかし、安全率は構造物の安全性を定性的に示す指標でしかないため、設計法の性能規定化の流れを踏まえると、構造物の安全性を定量的に評価しうる信頼性設計法の導入²⁾が必要と考えられる。そこで本研究では防波堤の円弧すべり解析への信頼性設計法の導入を検討する。さらに、堤体全体のシステム破壊確率について考察する。

2. 検討手法および検討対象

常時の防波堤全体の安定計算¹⁾は、地盤の特性に応じて、式(1)の修正フェレニウス法による円弧すべり計算を行い、安定性の検討を行う（図-1 参照）。

$$F_s = \frac{\sum (cb + W' \cos^2 \alpha \tan \phi) \sec \alpha}{\sum W \sin \alpha} \quad (1)$$

ここで、 F_s ：安全率、 c ：粘着力(kN/m²)、 W' ：単位長さあたりの分割片の有効重量(kN/m)、 α ：分割片底面が水平面となす角度(度)、 ϕ ：内部摩擦角(度)、 W ：単位長さあたりの分割片の全重量(kN/m)、 b ：分割片の幅(m)である（防波堤常時の安定計算には水平力 H は考慮しない）。

本研究では、信頼性設計法の導入に際して、円弧すべり解析の現行設計法の安全率が 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重量を変化させることで検索し、その時の安全性指標を算出して検討に用いた。一方、堤体全体としてマウンドを含めた基礎地盤構造を考慮するが、そのような地盤構造系の破壊確率は文献 3) をもとに以下の単純化を行って検討した。

- 1) 地盤各層の物性値として平均値を採用し、各層に関する最小安全率を与えるすべり円弧を探索する。
- 2) 上記 1) で求めた各すべり円弧に対して、修正フェレニウス法の性能関数を用いて破壊確率を求める。
- 3) 全体系の破壊確率は、すべり円弧相互の相関がないと仮定して求める。

検討対象として全国の既設防波堤断面からマウンド高さの高低を考慮して 7 断面を選択した。その中のいくつかは、堤体全体のシステム破壊確率を検討するため、基礎地盤が粘性土・砂質土など数層で構成される断面を選択した。図-2 に堤体断面の 1 例を示す。各設計用値は防波堤資料を参考にした。また表-1⁴⁾に設計パラメータの従う確率分布を示す。さらに基礎地盤強度に関してはすべり円弧の大きさによって地盤の空間的な自己相関性⁴⁾を考慮した。

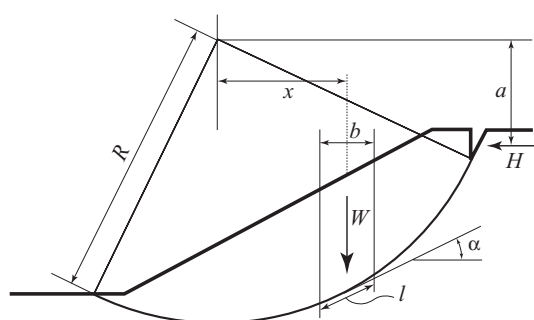


図-1 修正フェレニウス法による円弧すべり解析¹⁾

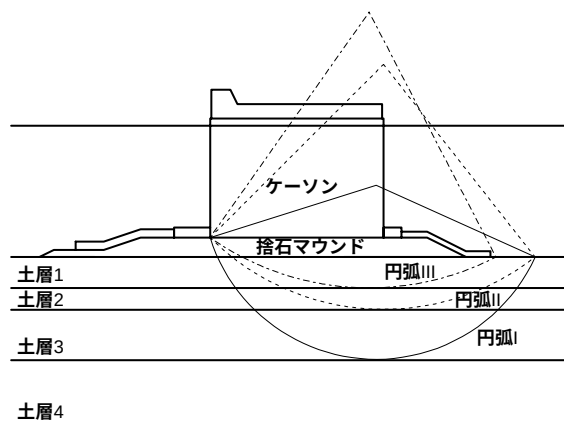


図-2 堤体断面

キーワード 信頼性設計, 円弧すべり, 修正フェレニウス法

連絡先 〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1 国土技術政策総合研究所 TEL 046-844-5029

3. 検討結果

対象防波堤断面について現行設計法で最小安全率が 1.3 となる断面における安全率 F_s (1.3), ケーソン底面からすべり円弧最深部までの距離（以下円弧深さ d とする）, 安全性指標 β , 破壊確率 P_f およびマウンド高さを表-2 に示す. また図-2 にはこの断面のすべり円弧（円弧 I, 実線）も併せて示した. これらより防波堤の常時安定性に関する破壊確率は小さく, マウンドの高さに応じた傾向は見られないことが分かる. 安全率は一様であるため, 円弧深さと安全性指標の関係を図-3 に示す. 限られた断面数ではあるが, 本図より円弧深さと安全性指標には正の相関があることが分かる. これは円弧深さが増すと地盤の自己相関性が強まり, 地盤強度の分散が小さくなるため安全性指標が大きく算出されたものと考えられる.

図-2 は各土層内で最小安全率が得られるすべり円弧も示している. 円弧 I は全土層を考えた場合で, 最小安全率 1.3 となる. 円弧 II, III は第 2 層, 第 1 層までの土層を考えた場合の最小安全率（それぞれ 2.46, 2.95）をとる円弧である. 円弧 I は安全性指標 $\beta = 5.11$ (破壊確率 $P_f = 1.614 \times 10^{-7}$), 円弧 II では $\beta = 16.09$ ($P_f = 0.0$), 円弧 III では $\beta = 13.53$ ($P_f = 0.0$) となり, 堤体全体系のシステム破壊確率は円弧 I での破壊確率と等しくなる. 表-2 にも示されるように, 防波堤の円弧すべりの破壊確率が非常に低く, 各土層ごとの破壊確率はさらに小さくなるためであると言える. この傾向は他の断面についても同様であり, システム破壊確率は全土層を考慮した単一モードでの破壊確率と等しい結果となった.

図-4 に表-2 の結果とともに, いくつかの断面で実施した各土層での円弧すべり破壊モードの安全率, 円弧深さ, 安全性指標の関係を示す. 図は横軸に円弧深さ, 縦軸に安全率を取り, 図中の円の大きさを安全性指標を表す. 本図より, 円弧深さが浅くても安全率が大きくなれば, 安全性指標は大きいことが分かる. つまり, 円弧の浅い破壊モードは堤体全体のシステム破壊確率には大きな影響を及ぼさないと考えられる.

4. まとめ

本研究は, 防波堤を対象とした円弧すべりの信頼性設計法の導入について検討した. 円弧すべりの現行設計法で標準とされる最小安全率 1.3 となる断面は, 安全性指標が大きく非常に安全であると推測される. そのため, 信頼性設計法の導入によって, 現行設計法より合理的な設計が可能になると考えられる.

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)国土交通省: 土木・建築にかかる設計の基本, 2002.
3)星谷 勝, 石井 清: 構造物の信頼性設計法, 鹿島出版会, 1986.
4)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.

表-1 パラメータの従う確率分布⁴⁾

	平均値の 偏り	変動係数
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	1.00	0.10

注)平均値の偏り=平均値/設計用値

表-2 各断面での検討結果

安全率	円弧深さ (m)	安全性 指標	破壊確率	マウンド 高さ(m)
1.310	16.9	5.11	1.61E-07	2.7
1.301	23.9	8.69	0	8.8
1.308	23.1	8.38	0	2.5
1.308	9.9	4.29	8.80E-06	7.2
1.307	17.0	6.65	1.52E-11	4.4
1.308	16.6	8.82	0	8.0
1.310	16.1	7.94	1.11E-15	8.0

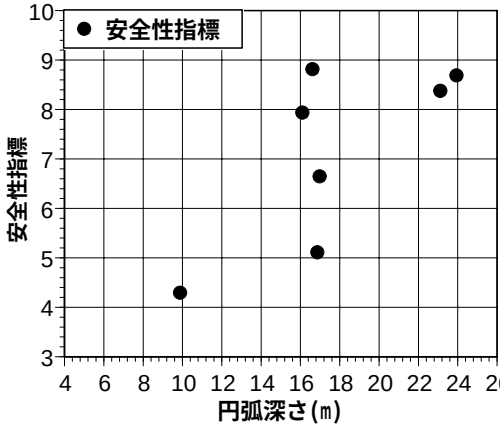


図-3 円弧深さと安全性指標の関係

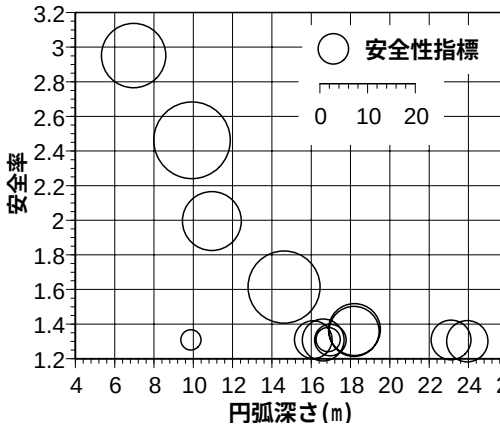


図-4 円弧深さと安全率および
安全性指標の関係