

確率有限要素法による防波堤の支持力安全性の評価

国土技術政策総合研究所 正会員 長尾 毅
復建調査設計（株） 正会員 吉浪康行
正会員 向井雅司
正会員 ○清水 豊

1. まえがき

設計計算においてパラメータを確定的に扱うこれまでの設計法では、安全率を安全性の判断基準としている。しかしながら、安全率と破壊確率の関係は必ずしも明確でないため、設計法を合理化する観点からは信頼性設計法の適用が考えられる。港湾構造物への信頼性設計法の適用については、これまで、比較的扱いが容易であることから、防波堤の外的安定照査のうち、滑動及び転倒破壊が主に議論されてきたが、本報告では支持力の安全性照査に対する適用性について検討した。

現在の港湾技術基準においては、Bishop 法を用いて波圧作用時の支持力安全性を評価することを標準としている。このため、防波堤の支持力安全性照査に信頼性設計法を適用する際にも、Bishop 法をベースとした信頼性設計法の導入が有力である。一方、Bishop 法以外の支持力安全性照査手法のうち確率論的解析を行うことが可能な解析法として有限要素法（以下、FEM）が挙げられる。そこで、本研究においては Bishop 法及び FEM のそれぞれについて確定論的解析及び確率論的解析(S-Bishop,SFEM)を実施し、安全性の定量的評価を行うとともに、設計法の適用性について評価を行った。

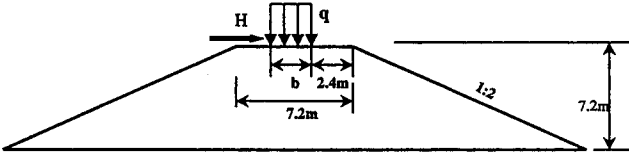
2. 解析条件

本解析に用いる解析モデルを図－1に示す。また、土質定数を表－1に示すが、すべて現行設計法（Bishop 法）で用いられる設計用値である。なおポアソン比 ν はすべて 0.3 とした。

各解析に用いる荷重条件を表－3に示す。荷重条件は、支持力破壊局面上の複数の状態を再現する観点から、水平荷重 H と鉛直荷重 q の比の値を 0.2～0.6 程度の間で変化させ、Bishop 法において安全率が 1.0 程度になるような値を探索して設定した。なお、防波堤の通常の構造形式であるケーソン式混成堤の場合、波力の平均値と設計用値の比の値が概ね 0.8 程度であることから、S-Bishop 及び SFEM に用いる水平荷重の平均値は、Bishop 法及び FEM に用いる水平荷重の 0.8 倍とした。また、各荷重の変動係数については、筆者らの検討結果（表－2）を基にした。

3. 解析結果

荷重傾斜率の違いが解析結果に与える影響を検討するため、Bishop、FEM（解析①）及び S-Bishop、SFEM（解析②）による解析を行った。検討結果の総括表を表－4に、各解析における最小の安全率または安全性指標を与える円弧すべり形状を図－2に



図－1 解析モデル

表－1 土質定数

Analysis	Soil Layer	Unit weight γ (kN/m ³)	Cohesion c (kN/m ²)	Internal friction angle ϕ (°)	Modulus of elasticity E (kN/m ²)	Height (m)
Analysis①	Mound	19.6	19.6	35	2300	7.2
Analysis	Soil Layer	Unit weight μ_γ (kN/m ³)	Cohesion μ_c (kN/m ²)	Internal friction angle μ_ϕ (°)	Modulus of elasticity μ_E (kN/m ²)	Height (m)
Analysis②	Mound	19.6	19.6	35	2300	7.2

表－2 変動係数

	Coefficient of Variation (V)
Unit weight (γ)	0.03
Internal friction angel (ϕ)	0.1
Cohesion (c)	0.1
Modulus of elastictiy (E)	0.1
Poisson's ratio (ν)	0.1
Horizontal load (H)	0.24
Vertical load (q)	0.05

示す。荷重傾斜率(H/v)は、Case1, Case2, Case3, Case1S, Case2S, Case3S の順にそれぞれ 0.63, 0.35, 0.19, 0.50, 0.28, 0.15 である。また、表-4 中の括弧内の θ は、すべてのパラメータの値を平均値とした場合の抵抗モーメント平均値と滑動モーメント平均値の比（中央安全率）であり、表中に示した最小安全性指標 β を与える円弧に関する値である。

解析①の結果より、FEM の安全率は Bishop 法による安全率とほぼ一致し、いずれも 1.0 に近い値が算出された。最小安全率を与える円弧の形状もほぼ一致する。したがって、確定論的解析における両手法の対応性の良さが確認された。

次に解析②の結果を見ると、安全性指標 β の値は 1.8~3.3 程度であり、中央安全率 θ は 1.2~1.4 程度の値を持つ。水平荷重の平均値は設計用値の 0.8 倍であり、かつこのためにサーチャージの載荷幅平均値は現行設計法による載荷幅よりも広くなるため、実際の支持力安全性は現行設計法により算出される安全率より想定されるレベルよりも高いことがわかる。

各手法による値を比較してみると、SFEM においては荷重傾斜率の低下につれて中央安全率が低下し、同時に安全性指標も減少する。一方、S-Bishop においては、荷重傾斜率の減少に伴って中央安全率は減少するものの、安全性指標は逆に増加する傾向が見られる。しかし、一般的な荷重傾斜率(0.45~0.5 程度)では、比較的よい一致を示した。

4. まとめ

本報告は、防波堤の支持力安全性照査への信頼性設計法の適用性を検討するため、SFEM 及び S-Bishop を用いて安全性指標による評価を行った。結果を以下にまとめる。

(a)支持力安全性の検討に対して、確定論的な Bishop 法と FEM の対応性の良さを確認した。

(b)S-Bishop 及び SFEM により算出した安全性指標は、一般的な荷重傾斜率で比較的よく一致した。

[参考文献]

- 1)長尾 毅, 門脇陽治, 土田 孝, 寺内 潔: 信頼性設計法による防波堤の全体安全性 (第 2 報), 港湾技術研究所報告, Vol.36, No.1, (1995), pp25-55.

表-3 荷重条件

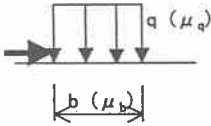
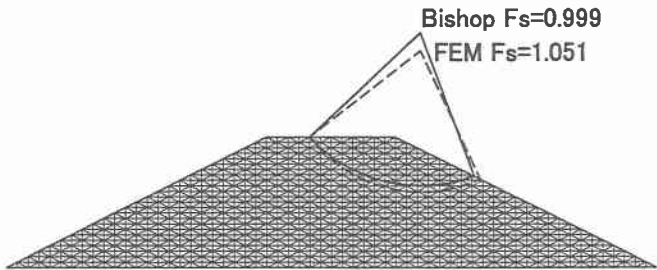
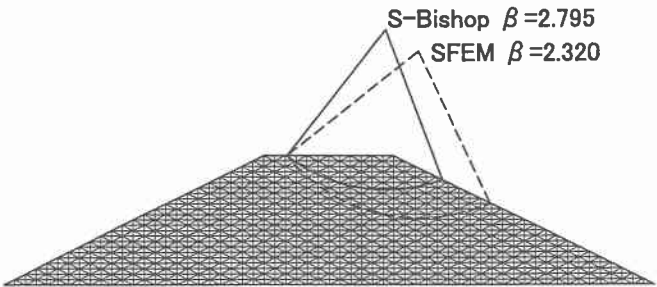
Load Form						
Analysis No.	Analysis Method	Case	b (m)	q (kN/m ²)	v = q × b	H (kN/m)
Analysis ①	Bishop FEM	Case1	2.4	196.0	470.4	295.0
		Case2	2.4	392.0	940.8	325.4
		Case3	2.4	588.0	1411.2	272.4
Analysis No.	Analysis Method	Case	μ _b (m)	μ _q (kN/m ²)	μ _v = μ _q × μ _b	μ _H (kN/m)
Analysis ②	S-Bishop SFEM	Case1S	3.5	134.3	470.4	236.0
		Case2S	3.5	268.5	940.8	260.3
		Case3S	3.5	402.9	1411.2	218.0

表-4 検討結果

Analysis ①	Case	Case1	Case2	Case3
	Bishop	Fs=1.002	Fs=0.999	Fs=1.000
	FEM	Fs=1.064	Fs=1.051	Fs=1.023
Analysis ②	Case	Case1S	Case2S	Case3S
	S-Bishop	β=2.177 (θ=1.370)	β=2.795 (θ=1.361)	β=3.254 (θ=1.238)
	SFEM	β=3.006 (θ=1.417)	β=2.320 (θ=1.297)	β=1.778 (θ=1.218)



(i)Case2



(ii)Case2S

図-2 円弧形状