

防波堤の支持力安定性に関する信頼性評価

Reliability evaluation of bearing capacity of breakwater foundation

井上修一*・佐藤尚次**

Shuichi INOUE*・Naotsugu SATO**

*中央大学大学院 理工学研究科土木工学専攻(〒112-8551 文京区春日 1-13-27)

**工博 中央大学教授 理工学部土木工学科

Reliability analysis of bearing capacity of breakwater foundation is carried out concentrating on circular slip failure mode in this study. In early part of this study, simple MonteCarlo-simulation, in which the circular slip line corresponding to the minimum factor of safety (safety margin) is detected, is chosen to calculate probabilities of failure for various design conditions. This algorithm shows good agreement of tendency between the pf and central safety margin which is commonly used in the traditional design codes. This result can be regarded as better application of reliability method comparing with foregoing studies. In the later part of this study difference between theoretical result and real accident experience is investigated. Several points are possibly given to suggest reasons. In the end, obtained results are summarized and discussed.

Key words: Reliability-Based Design, Performance-Based Design, breakwater foundation

1. はじめに

性能設計の導入に伴って目標性能の設定や保有性能の評価手法として信頼性設計の有用性が再認識されている。信頼性設計を導入することで破壊を定量的に評価しコントロールすることは LCC の観点からも重要であり、近年注目を集めているリスクマネジメントにも有力な手法である。しかし、破壊の可能性の定量的評価は信頼性設計の最大の魅力ではあるものの、性能関数の定義や不確定因子のばらつきの大きさなど、この部分がなかなかうまくいかずに問題が生じることも少なくないのが現状である。

鋼構造及びコンクリート構造物については、これまでも多くの研究がなされ、発表されている。これに対して土質・地盤工学的分野においてはむしろ疑問視する意見が少

なくない。これは土質・地盤が鋼・コンクリートに比べて、ばらつきも大きく P_f と被災例との整合性が得られないことや、実験・経験を重視し、実際に成果を上げてきた分野であることが原因として大きなものの一つであることは周知のとおりである。ただ、上述の LCC 等に加え、国際標準化への対応という点においても、従来の安全率による評価から破壊確率による評価へと移行できるように準備を整えておく必要がある。とはいうものの、真の破壊確率を評価することは非常に困難であるから、似たようなテーマの研究成果や被災例を照らし合わせそれらを調和させていき、各分野間においても整合性を持つように P_f を求める、という方法が現段階では有力ではないだろうか。

また規制緩和、仕様規定から性能規定への流れは社会全

体の潮流となっている。1999 年の海岸法改正でこうした流れが反映され、一律な海岸及び海岸構造物の管理から脱して、目的に応じた設計が許されるようになりつつある。

このような観点から、本研究は防波堤の支持力安定性を例にとり信頼性評価および既往の研究成果との比較考察を行い性能設計法確立のための基礎となることを目的とする。

2.性能関数の性質と P_f の算定

現在の技術基準¹⁾によれば、防波堤マウンドのような偏心かつ傾斜している基礎(図-1)の支持力に関しては円弧滑り解析の一つである Bishop 法が現象をよく表現しこれを用いて評価することが基本とされている。したがって、本研究でもこれをもとに性能関数を定義し支持力破壊の生起確率 (P_f) の算定を試みた。

仮定された円弧滑り面について Bishop の安全率は式(1)によって計算される。特徴としてこの式は収束計算であるが、これによって支持力解析を行うためにはさらに解析断面内で最小安全率(F_s)を探索する。技術基準では波圧時に F_s が 1.0 以上であれば安全であるとされるため、これをもとにして性能関数を定義すると式(2)のようになる。

$$F = \frac{\sum \{c'b + \tan \phi' (W' + q)\} / ma}{\sum (W' + q) \sin \alpha + \frac{1}{r} \sum Ha} \quad \dots\dots(1)$$

$$ma = \left(1 + \frac{\tan \phi' \tan \alpha}{F}\right) \cos \alpha$$

ここに、

c' : 有効応力に基づく

見かけの粘着力 (kN/m^2)

b : 分割細片の幅 (m)

ϕ' : 有効応力に基づく

見かけのせん断抵抗角 (rad)

W' : 分割細片の重量 (kN/m)

q : 分割細片に作用するサージ (均等) (kN/m^2)

α : 分割細片の底面となす角 (rad)

H : 水平荷重 (kN/m)

a : 水平荷重のアーム長 (m)

r : 滑り円弧の半径 (m)

$$Z = F_s - 1.0 \quad \dots\dots(2)$$

ところで P_f の算定法として現在有力なものに FORM

(First-Order Reliability Method) や 1 次ガウス近似法といったものがあるが、上述のような性質をもつ解析方法を性能関数に取り込んだ場合には性能関数が陽な形で表現できないために、これらの方法をそのまま用いることは困難である。これに対して既存の研究・文献等^{2),3)}によれば滑

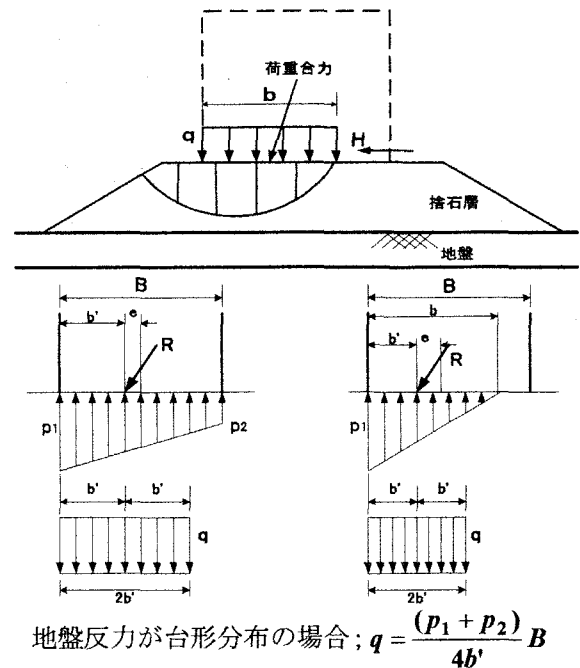


図-1 偏心荷重を受ける捨石斜面

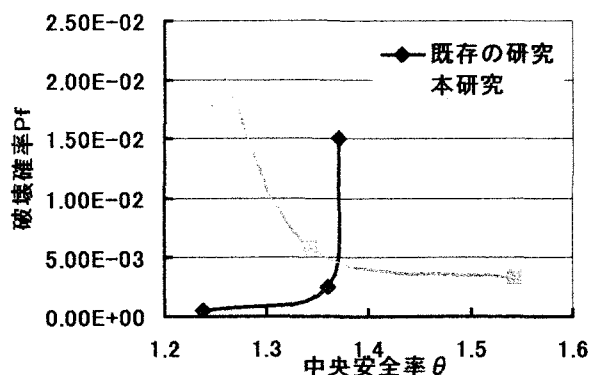
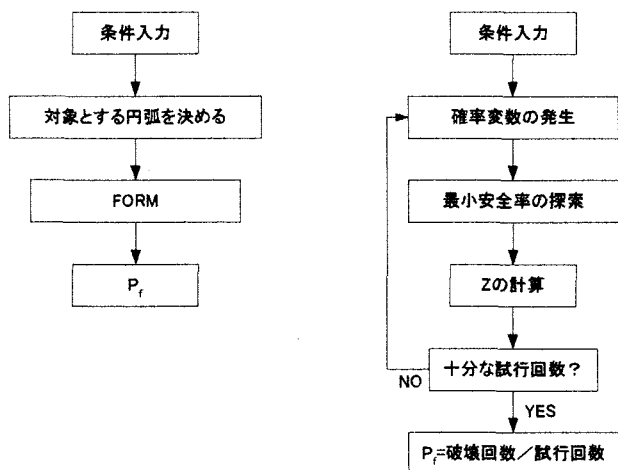


図-2 中央安全率と破壊確率の関係

表-1 確率変数と変動係数

単位体積重量: γ	0.03
粘着力: c	0.1
内部摩擦角: ϕ	0.1
鉛直方向分布荷重: q	0.05
水平荷重: H	0.24



i) FORM

パラメータの変動に伴って出現する円弧は異なるはずであるが、これが反映されない

ii) MC 法

円弧滑り解析の特徴を損なうこと P_f を求めることが可能

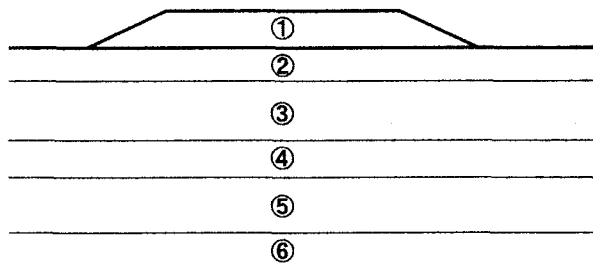
図-3 解析方法の比較

り面を固定するなどの工夫をして P_f を求めるという方法がとられてきた。しかしながらその結果として中央安全率 θ が異なる荷重条件で P_f の算定を行うと、同じ断面であっても P_f と θ の関係が不可解な傾向を示す例が生じており²⁾ 多少の問題を抱えているといえる。また長尾らによれば防波堤の外的安定性について検討される滑動・転倒・支持力のうち、滑動・転倒については θ と P_f の間に相関が見られるものの、支持力については相関が見られないとされている³⁾。このような観点から本研究ではモンテカルロシミュレーション(以下MC法と記す)による P_f の算定を試みた。MC法は計算時間が非常に長くなるという欠点を有してはいるものの式(2)を計算するときに常に最小安全率円を追跡することが可能であり得られた結果の傾向としては、図-2のように θ と P_f に良い対応関係を示すことができた。よってこのような問題に対してはMC法の方が、利点が大きいと考え本研究ではこれを用いて P_f の算定することとした。

P_f の計算に際して確率変数として扱うパラメータは表-1に示す5つでそれぞれ正規分布に従うとし、設定した変動係数でばらつかせた。また換算鉛直分布荷重の載荷幅 b も、本来荷重の変動による堤体の偏心に伴い変動する値であるが、得られたデータの性質上平均値を確定値として用いた。なお、ここでいう P_f とは再現期間50年設計波作用時の条件付き確率のことをさす。

3.破壊確率の実態との比較

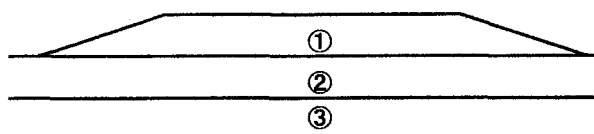
円弧すべり解析を基にした信頼性評価にMC法を用いることの有用性については先に述べたとおりであるが、次に算出された P_f について、実際の破壊事例とも対比させつつ考察していくことにする。図-4に示す断面と条件のもと P_f を求めると表-10のようになった。なお解析条件の設定にあたってマウンドに用いる捨石の強度定数については技



No.	Soil Layer	Unit weight μ_γ (kN/m ³)	Cohesion μ_c (kN/m ²)	Internal friction angle μ_ϕ (°)	Height or Thickness (m)
①	Mound	19.6	19.6	35	11.5
②	Sand1	19.6	-	40	4.0
③	Sand2	19.6	-	45	12.4
④	Clay1	14.2	63.8	-	2.1
⑤	Clay2	16.2	63.8	-	16.2
⑥	Sand3	19.6	-	40	1.7

b (m)	μ_q (kN/m ²)	μ_H (kN/m)
10.095	497.25	1808.3

(i)小名浜港



No.	Soil Layer	μ_γ (kN/m ³)	μ_c (kN/m ²)	μ_ϕ (°)	Height or Thickness (m)
①	Mound	19.6	19.6	35	3.5
②	Sand1	19.6	-	40	3.5
③	Sand2	19.6	-	45	14.5

b (m)	μ_q (kN/m ²)	μ_H (kN/m)
14.78	338.49	2594.75

(i)秋田港

図-4 解析対象断面とパラメータ

表-2 P_f と θ (設計用値)

	P_f	θ
小名浜港	6.64×10^{-2}	1.27
秋田港	8.10×10^{-2}	1.37

術基準¹⁾に示されている値を用いた。

算出される P_f がどうかを検討するために、実際の防波堤の被災例よりまとめた被災遭遇確率と比較してみる。防波堤の被災は年に数回おきているとされているが、この中で支持力が原因となるような被災は非常に少ない。破壊モードとしては滑動が一番多く、ついで転倒によるものが多くなっている⁴⁾。このような調査結果から供用期間中の支持力破壊による被災遭遇確率は $P_E = 3.5 \times 10^{-4}$ と推定されている²⁾。

これに対して本研究の算出した P_f は2オーダー以上高い値となっており、現実的とは言い難い。そこで以下では、このような結果となってしまった原因を特定すべく、考察を進めることとする。秋田港の断面について各パラメータを表-1の変動係数で1個ずつばらつかせて F_s を計算すると $F_s \leq 1.0$ となったのは内部摩擦角 ϕ と、水平荷重 H を変化させた場合のみであった。また、滑り面はほとんどがマウンド内を通る浅いものとなっている。このことから設計用値には安全性の余裕が見込まれており、信頼性解析にそのまま用いた場合、それが顕著に反映されて、 P_f としては高くなってしまったと考えられる。これに関して設計用値の決定過程を調査した。捨石の強度定数は三軸試験によって求められるが、拘束圧依存性が高く変動も大きい。これに対して小林ら⁵⁾は見かけ上の粘着力を考慮し $c = 19.6 \text{ kN/m}^2$ 、 $\phi = 35^\circ$ とすることで ϕ の拘束圧依存性がある程度反映できるとしている。図-5は文献⁵⁾の試験結果を読み取ったもので正確な値ではないが、この結果を見る限り ϕ は 35° を下回することは少なく、平均値としては $41 \sim 42^\circ$ となる。また、堤体に作用する波圧、揚圧力は合田式により算定することが標準¹⁾となっているが、この式によれば波圧、揚圧力ともに波高の関数として表される。したがって支持力解析の際に換算される鉛直荷重 v 、水平荷重 H は図-6のようなイメージの相関を考慮する必要があると思われる。

よって、マウンド捨石の強度定数を $\phi = 42^\circ$ とし、 H, v, ϕ にそれぞれに相関係数をいくつか設定して秋田港断面の P_f を試算したところ、 P_f は1オーダー程度下がり信頼性指標 β では **2.21~2.58** となった。

しかし、防波堤について P_f を算定した他研究は $\beta \geq 2.5$ となっている例が多いことと、被災例と比べても P_f はまだ高い値と思われる。上記の検討内容に加えて、 P_f が高く算出されてしまう原因としては次のような点が上げられる。

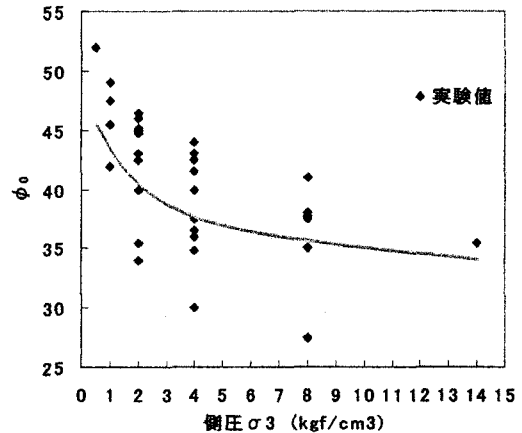


図-5 側圧と ϕ_0 の関係 (三軸試験)

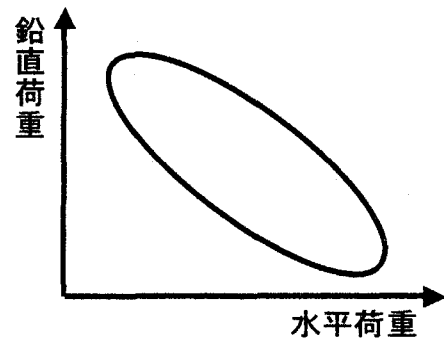


図-6 H と v の関係のイメージ

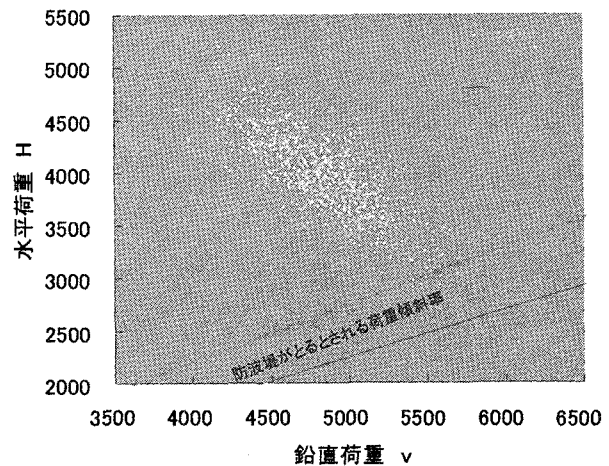


図-7 破壊時の荷重の組み合わせ

- i) Bishop 法は実験とは良い一致を示しているが、実際の防波堤では波圧作用の時間はそれほど長くないため滑り面が卓越しない可能性がある。
- ii) $F_s < 1.0$ となるときに支持力破壊よりも滑動・転倒が支配的である場合が考えられる。
- iii) 本来は載荷幅 b も変動する値である
- iv) 破壊をカウントする安全率を 1.0 としているが荷重傾斜率等の条件で破壊しないこともある。

i)～iv)はそれぞれの関係を切り離して考えることはできないためこれらを総合した著者らの見解を次に述べる。図-7 は P_f を試算した際のある 1 ケースについてシミュレーションの過程において $F_s < 1.0$ となった荷重の組み合わせをプロットしたものである。また、図中の 2 本線は実際の防波堤が多くとりうるとされる荷重傾斜率 H/v の範囲を示すものである。これより、 $F_s < 1.0$ となるのはほとんどが、大きな荷重傾斜率となっており、このような荷重状態では滑動・転倒が破壊要因として支配的になるのではないかと考えられる。したがって、全体系としての評価をしたときには支持力が問題になることは少ないと予想される。これはこの章の初めに述べた調査結果と合致する。ところで、河合らの調査⁴⁾によれば供用期間を 50 年と仮定した場合の防波堤の被災遭遇確率は $10^{-2} \sim 10^{-3}$ のオーダーであり、長尾ら³⁾が FORM により算出したシステム安全性指標の平均値は $\beta = 2.41$ となっている。本研究の算出した P_f は、支持力のみを対象としているのにもかかわらずこれらと調和的な値となっていることを考えると、やはり他の破壊モードをあわせて考える必要がある。また、このケースに見られるように高い H/v となる荷重の組を抽出してしまったのは、堤体の偏心に伴い変動する載荷幅 b を定数として扱ったことの影響もあると思われる。

技術基準として Bishop 法が用いられているということから信頼性解析にもこれを組み込み $F_s = 1.0$ で破壊するとしてきたが、必ず $F_s = 1.0$ で支持力破壊となっているかというと、そうではない。さまざまな支持力の検討方法が提案される中で被災した場合に $F_s = 1.0$ に近い値となることから用いられることとなったこの方法ではあるが、 $F_s < 1.0$ となるような断面でも被災していない例は多数ある⁵⁾。その原因としてマウンド材の強度定数の設定の問題等もあげられているがそもそも破壊形態が円弧であると仮定していること自体、真の破壊形態を示しているわけではなく経験的・実験的側面の強いこの分野へ信頼性手法の適用の難しさを感じざるをえない。

4.まとめ

現段階でのまとめとしては次のようになる

- MC 法を用いたことで、中央安全率と破壊確率の間に良い対応関係を持つ計算結果が得られた。
- P_f の値そのものとしては被災例と比べて高くなって

いる。

- 円弧滑り法自体、経験的側面が強いため破壊基準の設定については必ずしも正確なものとはいえない。
- 破壊の順序を考えて滑動・転倒を含めたシステムの P_f として評価した場合には被災例とある程度調和的な値が得られるのではないかと予想される。

しかし、そのような中でも相対的評価として安全性を示すことはできていると考えられるため今後全体系としての評価を行い被災例と調和的な P_f が算出されるようにできればリスクマネジメントのツールとしては有用であると考えられる。

よって今後はリスクマネジメントのための

- 安全性の相対的指標として P_f を用いること
- P_f の算定方法(精度や効率化等)

の両側面から検討を重ねていきたい。

5.謝辞

なお、研究に際して国土交通省国土技術政策総合研究所から貴重なデータを提供していただきました。また助言をいただいた同研究所、長尾毅様をはじめ、関係各位に深い感謝の念を捧げます。

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，吉浪康行，向井雅司，清水豊：防波堤の支持力安定性の確率論的評価，JCROSSAR 論文集
- 3) 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法の適用，土木学会論文集 No. 689
- 4) 河合弘康，高山知司，鈴木康正，平石哲也：潮位変化を考慮した防波堤堤体の被災遭遇確率，港湾技術研究所報告，Vol. 36，No. 4，（1997）
- 5) 小林正樹，寺師昌明，高橋邦夫，中島謙二郎，小谷拓：捨石マウンドの支持力の新しい計算法，港湾技術研究所報告，Vol. 26，No. 2，（1987）
- 6) 星谷 勝，石井 清：構造物の信頼性設計法，鹿島出版会，（1997）