#### 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。本研究は防波堤の支持力安定性を例にとり信頼 性評価および考察を行い信頼性設計法確立のための基 礎となることを目的とする。

00 現在の技術基準によると防波堤マウンドのような 偏心かつ傾斜している基礎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 て本研究の流れとしてはまず確定論的設計の立場から Bishop 法の解析プログラム(以下 Bishop.exe)を作成し、 遠心場実験モデルデータとの比較を行いその適用性を 確認し、これを基本とした性能関数を用いて信頼性解 析を実施、破壊確率の算出を行った。なお、遠心場実 験モデルおよび実際の防波堤のデータは(旧運輸省)港 湾技術研究所のものを引用させていただいた。

## 2. Bishop.exe の適用性の確認

Bishop の安全率 F<sub>s</sub>は以下に示す式(1)によって計算 される。まず滑り円弧の半径および中心点を仮定し式 (1)によって安全率を求める。次に半径をいろいろと変 化させ仮定された中心点における最小の安全率を求め る。さらに他にも円弧中心点を仮定して、同様の計算 を行い、これらを比較し与えられた条件のもとの最小 安全率円とF<sub>s</sub>を探索する。現行設計法では波圧作用時 の許容安全率は1.0としている。

$F = \frac{\sum \left\{ \left[ c'b + \tan \mathbf{f}'(W' + q) \right] / ma \right\}}{\left[ c'b + \tan \mathbf{f}'(W' + q) \right] / ma}$
$\sum (W'+q)\sin a + \frac{1}{r}\sum Ha \qquad \dots (1)$
$ma = \left(1 + \frac{\tan f \tan a}{F}\right) \cos a$
ここに、
c' : 有効応力に基づく
見かけの粘着力 (kN / m²)
b :分割細片の幅 (m)
f : 有効応力に基づく
見かけのせん断 抵抗角( <i>rad</i> )
W' :分割細片の重量 (kN/m)
$q$ :分割細片に作用す るサーチャージ $\left(kN / m^2\right)$
a :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 ( <i>m</i> )

キーワード:信頼性設計、破壊確率、安全率、性能関数

中央大学理工学部土木工学科 学生会員 井上 修一 中央大学理工学部土木工学科 正会員 佐藤 尚次

Bishop.exe の算出する値についてはすでに適用性が 確認されている港湾技術研究所の遠心場実験データと 同じ条件で解析を行いこれと比較することでその検討 を行った。表に示すとおり、本研究が算出した Fsは港 湾技研のものと近い値となっておりこれにより Bishop.exeの適用性が確認された。



表-2 Bishop.exe による計算結果									
Case	b (m)	q ( <b>k</b> N/m²)	H( <b>k</b> ÎN/m)	H/bq	Fs(港湾技研)	Fs( <b>本研究</b> )	両研究の著		
Case1	2.4	196	295	0.627	1.002	1.014	1%		
Case2	2.4	392	325.4	0.346	0.999	1.01	1%		
Case3	2.4	588	272.4	0.193	1	1.016	2%		

#### 3. 破壊確率の計算方法

既存の研究や文献 1)2)によれば円弧滑り解析に信頼性 手法を導入する場合、まず各種パラメータの平均値を 用いて確定論的解析を行い滑り円弧を決定し、この円 弧について FORM などの計算手法を用いて破壊確率 Pf または安全性指標 を算出するとされているものが 多く、滑り円弧を固定することについて工学的には問 題ないとしている。また FORM やガウス近似法といっ た方法で Pfを求める場合には性能関数をある程度きれ いな形で数式として表す必要がある。これに比べ式(1) は繰り返し計算を含んでおり、また仮定された円弧中 心点によっても値は変わってくるためにこのような性 質の解析手法をもとに性能関数を定義し Pfを求めるた めには滑り円弧の固定といった仮定が必要である。し かし、このような仮定を行った結果、中央安全率が 増加するにもかかわらず が減少してしまった例(図 -2)もあり、常識的にはこのような結果はおかしい。 本研究では想定された条件に対して常に最小安全率円 を探索できるようにモンテカルロシミュレーション法 (MC法)を用いて破壊確率を算出した。 性能関数は Z=Fs - 1.0 とし Z<0 で破壊をカウントする こととした。

## 4. 解析結果

# 4.1 既存の研究との比較

MC 法が既存の研究の抱える問題点に対してよい結 果を出せるかどうかを検討するために文献 1 と同じ条 件で破壊確率を算出した。解析断面は図-1 と同じであ リパラメータ等は表-3,4 のようにあるとおりである。 なお、確率変数は互いに独立とし土質強度の自己相関 性についても簡略化し一定とした。表-5,6 及び図-2 に 示されるとおり本研究が算出した Pf と の関係は良い 傾向を示しており、MC法の有用性が示された。



図-2 中央安全率と破壊確率の関係

## 表-3 確率変数の変動係数

	0.03
с	0.1
	0.1
q	0.05
Н	0.24

### 表-4 荷重条件

Case	μ <b>(k</b> N/m²)	μ <sub>c</sub> (KN/m <sup>2</sup> )	μ (°)	b (m)	$\mu_q$ ( <b>k</b> N/m <sup>2</sup> )	μ <sub>Η</sub> ( <b>k</b> N/m)	$\mu_{H/bq}$
Case1S				3.5	134.3	236	0.5020742
Case2S	19.6	19.6	35	3.5	268.5	260.3	0.2769886
Case3S				3.5	402.9	218	0.1545935

#### 表-5 P<sub>f</sub>と

表-6 文献1の解析結果

Case	P <sub>f</sub>			Case			P <sub>f</sub>	
Case1S	3.20E-03	1.544		Case1S	2.177	1.37	1.50E-02	
Case2S	5.67E-03	1.344		Case2S	2.795	1.361	2.50E-03	
Case3S	2.18E-02	1.25		Case3S	3.254	1.238	4.80E-04	

# 4.2 実際の防波堤に対する信頼性解析

次に実際の防波堤マウンドについて P<sub>f</sub>を計算した。 荷重の載荷幅 b は本来荷重によって変化するが得られ たデータの性質上確定値とした。計算結果(注:再現期間 50 年設計波作用時)は P<sub>f</sub>=6.64 × 10<sup>2</sup>(=1.27)となった。

ところで解析に用いたデータは設計用値をもとに作 成されたものである。したがって算出される P<sub>f</sub>は供用 期間中の設計波作用という条件付確率になる。これま で全国には約 15000の防波堤が製作されており支持力 が原因で破壊したという例は過去に 2 例のみである。 このことをふまえて日本の防波堤が支持力破壊により 被災する確率を求めると **P<sub>f</sub>=3.5×10**<sup>4</sup> となる。この値 はあくまで参考値ではあるが、これに比べて本研究の P<sub>f</sub>はかなり高く現実的とはいえない。



図-3 小名浜沖防波堤マウンド断面図

表-7 土質定数(小名浜沖防波堤)

b(m )	μ <sub>q</sub>	μ <sub>ν</sub>	μ <sub>H</sub>
	<b>(k</b> N/m²)	=μ <sub>q</sub> ×μ <sub>b</sub>	<b>(k</b> N/m)
10.0095	497.25	5019.8	1808.3

表-8 荷重条件

No.	Soil Layer	Uhit weight <b>(k</b> N/m <sup>3</sup> )	Cohesion c (kN/m <sup>2</sup> )	Internal friction angle (°)	Height or Thickness (m)
	Mound	19.6	19.6	35	11.5
	Sand1	19.6	-	40	4
	Sand2	19.6	-	45	12.4
	Clay1	14.2	63.8	-	2.1
	Clay2	16.2	63.8	-	16.2
	Sand3	19.6	-	40	1.7

#### 4.3 パラメータの修正

4.2 は現行設計法の設計用値をもとにしたデータで あったため土質強度等はある程度安全側の値となって いる可能性がある。よって、内部摩擦角、粘着力を1.2 倍しその他は 4.2 と同様の条件で Pf を計算すると **Pf=2.34×10<sup>3</sup>(=1.64)**という結果を得た。Pf に比べ依 然として高い値ではあるが設計用値の決定過程の情報 を用いることの意義は伺える結果である。

- 5. まとめ
- ・ Bishop 法のような解析方法で信頼性設計を行って いく際には MC 法の方が有用であることを示した。
- ・ 実際の防波堤断面に信頼性解析を行い、Pfを求めた。
  これについては土質強度の深さ方向の自己相関性
  等簡略化し非考慮となっている部分もあるため、今
  後さらに検討を重ねていきたい。また現行の設計用
  値では Pf が高めに算出される傾向にあるため、信
  頼設計法を導入する際にどのように処理していったらよいかを考える必要がある。

その他課題としては、今回は実際の防波堤につい ての計算結果は 1 例のみであったので、今後多くの 防波堤断面について Pfを求め、これらを比較するこ とで算出される Pfが信用できるものであるかどうか 考察を行っていきたい。

参考文献,資料

 長尾 毅(港湾技研)らによる「防波堤支持力安全性の確率論的 評価」JCOSSAR2000 論文集(2000)

2) 松尾 稔 『地盤工学~信頼性設計の理念と実際~』(1985)

- 2) 湾技術研報告
  - vol.26(No.2)(1987),vol.34(No.1)(1995),vol.35(No.1)(1996)
- 4) 星谷 勝『構造物の信頼性設計法』(1997)

5)日本港湾協会『港湾の施設の技術上の基準・同解説』(1999)