

# 斜面安定対策工としての水平排水管設置の最適設計

## PROBABILISTIC OPTIMUM DESIGN OF DRAINAGE PIPES ON SLOPE STABILITY

鈴木 誠\*・石井 清\*\*

By Makoto SUZUKI and Kiyoshi ISHII

This paper describes a reliability-based procedure for selecting a countermeasure against a failure of a slope. The type of failure considered in this paper is a sliding slope failure due to a ground water flow during dry-up operation of the graving dock. Firstly, a proposed countermeasure consists of a series of horizontal drainage pipes. Optimum design is selected among relevant alternatives with various horizontal drainage pipe spacings. A widely accepted criterion for optimum decision is the minimum expected cost, which directly incorporates qualitative evaluation of safety in terms of failure probability.

### 1. ま え が き

本研究は、構造信頼性理論に基づき、地下水流の作用する斜面の安定対策工としての水平排水管設置の最適設計を行ったものである。このような構造物の一例として、側面の1辺を止水ゲート、他の3辺を自然地盤を切り取ることにより作られた斜面より構成されているドライドックを対象とした。ここで、斜面の総延長は1 kmとした。この形式のドックは、コンクリートあるいは鋼矢板の渠壁<sup>1)</sup>などに比べて、建設費用が安くなるという利点があるが、その構造から周辺斜面の安定性に関して、次に述べるような問題点がある。

ドックはその使用に先立ち、前面の止水ゲートをとぎし、内部に満たされている水をポンプで汲み出して、内部を空にする。この排水に要する時間は、ポンプの性能によって異なるが、本解析では72時間とした。

いま、ポンプによる水の汲み出しが始まると、内部の水位が低下し、これに伴って、止水壁の内側にある斜面内の地下水位も低下する。このとき、斜面には地下水流

が発生するため、斜面内の一部の地盤においてせん断応力が增大し、ドックの満水状態、あるいは、排水後十分時間が経過した後の安定状態と比べて、斜面が一時的に著しく不安定になる期間が発生する。本対象構造物の場合には、先の条件によりドック内の水位低下に伴って、斜面の中央安全率 F.S. が1.0よりも小さくなるので、何らかの対策工が必要になる。

さらに、このような事例は、ドックのみに限らずフィルダム等においても、程度の差はあるが発生する可能性があり、本研究はこのような場合にも適用可能である。すなわち、フィルダムの貯水位が満水位から低水位まで急速に低下する場合である<sup>2)-4)</sup>。この問題に対して、BergadoとAnderson<sup>5)</sup>は、フィルダムなどの盛土の透水係数の空間的なばらつきが、間隙水圧や斜面の安定性にどのように影響するかをシミュレーションによって、確率論的に検討している。

さて、本研究における斜面の安定問題は、地下水の浸透流を含めた斜面の安定解析問題であり、この安全度を確率論に基づいて、より定量的に評価し、安定対策工(代替案)を合理的に比較検討することをねらいとした。ここで、浸透流解析には、二次元平面モデルに対する有限要素法を、また、破壊確率の算定には、著者らによって開発されている二次元平面モデルによる確率有限要素法<sup>6)</sup>

\* 正会員 清水建設(株)土木本部開発部  
(〒108 港区三田3-13-16 三田43森ビル)

\*\* 正会員 工博 清水建設(株)大崎研究室  
(〒100 千代田区内幸町2-2-2 富国生命ビル)

の適用を試みた。この場合、破壊確率は、仮定された円弧すべり面におけるモーメントのつり合い式に基づき算定され、浸透流による影響は、流体が各要素に作用する物体力として考慮することにする<sup>7),8)</sup>。これより、残留間隙水圧の増加時には、斜面が破壊する可能性が増大し、破壊に対する安全性が低下することが、破壊確率という定量的な尺度で表現できることになる。

次に、この斜面に対する安定対策工は当初、斜面の勾配を緩くしたり、水平排水管あるいは鉛直排水管（ポンプによる強制排水）などの設置が考えられていた<sup>9)~11)</sup>。このような対策工については、すでにLauとKenney<sup>12)</sup>が河川の斜面に水平排水管を設置し、計測と解析を行い、排水管の径や長さ、水平間隔が、安全率にどのように影響するかを確定論的な立場から検討している。また、Michellら<sup>13)</sup>も同様に確定論的な立場から、盛土に排水管を設置し、その管に負圧を加え、強制排水させると盛土の安全性が増加することを示している。以上いくつかの対策工のうち、本対象に対しては、水平排水管の設置案を採用することとし、対策工に対する代替案は、水平排水管の間隔をパラメータとしたものとした。本研究では、破壊確率と初期建設費、破壊時損失費を考慮して算定される期待総費用最小化の原則に基づき、これらの代替案の中から最適案を選択する<sup>14)~16)</sup>。

以上、本研究の必要性、既往の研究の一部、また、本研究における解析方法の概要を示した。ここで、本研究は斜面の安定対策工の最適設計を確率論（構造信頼性理論）に基づき実施するものであり、その解析の内容は従来の最適設計の流れに沿ったものである。本研究の特徴は、①斜面の安定解析に浸透流解析および確率有限要素法解析を組み合わせ、破壊確率という定量的な尺度で斜面の安全度を示したこと、②設計代替案の評価は、従来は設計技術者の判断により中央安全率F.S.のみを用いて行われていたのに対して、破壊確率と経済性（期待総費用）の面から検討を行う構造信頼性理論に基づく最適設計の有効性を示したこと、にある。結果の考察においては、従来の方法と本方法による評価の差異についても、検討を行った。

## 2. 検討フロー

全体の検討フローを図-1に示す。まず、斜面の形状と土質定数が作成された時点で、いくつかの代替案を作成する。本研究では、水平排水管の設置間隔をパラメータとして代替案を設定している。次に、これらの代替案の破壊確率を計算する。計算は、非定常浸透流解析と確率有限要素法を併用して行う。また、その解析と並行して、代替案の建設費と斜面が破壊したときの損失費（今回は再建費のみ）を算定する。さらに、これら初期建設

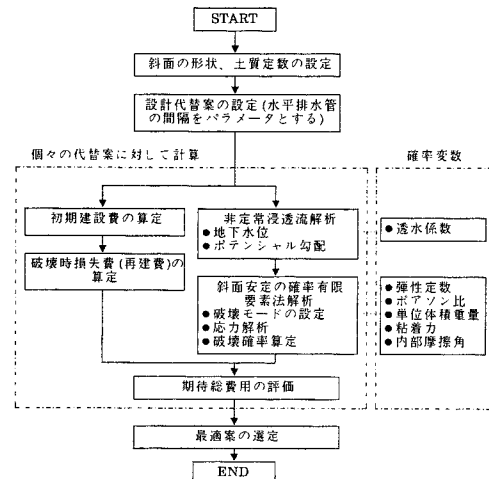


図-1 検討フロー

費および破壊時損失費と破壊確率をもとに期待総費用を算定する。最後に代替案の中から算定された期待総費用と中央安全率（破壊確率）などを考慮して最適案を選定する。

## 3. 斜面モデルの諸元と代替案の設定

### (1) 解析の対象とする斜面モデル

解析の対象とした斜面の断面形状を図-2に示す。また、浸透流解析および破壊確率の計算に用いた土質条件を表-1に示す。この斜面は、沖積砂質土層で構成されており、その下部は洪積粘性土層、洪積砂質土層より構成されている。解析において、確率変数としたものは、透水係数、弾性係数、ポアソン比、単位体積重量、粘着力、内部摩擦角である。このうち、地盤の透水係数は、感度解析の結果として、本解析では、その値を中央値に固定し確定値としている。また、弾性係数は実測値がないことおよび今回の解析では影響が小さいことから同一の値を仮定した。

さらに、ドックの内部水位は72時間でGL-4 mか

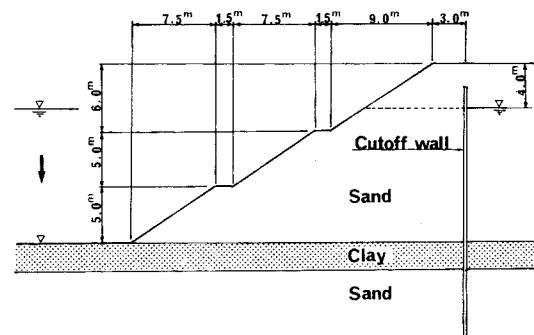


図-2 断面形状

表一 土質条件

材料特性		沖積砂質土層	沖積粘性土層	洪積砂質土層
弾性係数*	平均値	500.0	500.0	応力解析では モデル化して いない
	変動係数	0.3	0.3	
ポアソン比*	平均値	0.3	0.35	
	変動係数	0.3	0.3	
単位体積重量*	平均値	1.8	1.7	
	変動係数	0.05	0.05	
粘着力*	平均値	0.0	6.0	
	変動係数	—	0.3	
内部摩擦角*	平均値	35.0	0.0	
	変動係数	0.2	—	
透水係数**	平均値	$5.0 \times 10^{-4}$	$2.0 \times 10^{-5}$	$2.0 \times 10^{-5}$
	変動係数	1.5	1.5	1.5
間隙率	平均値	0.3	0.39	0.39
	変動係数	—	—	—

\* 分布形は正規分布  
\*\* 分布形は対数正規分布

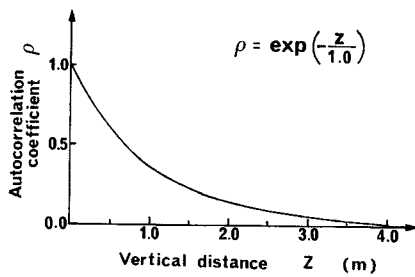


図-3 自己相関係数

ら GL-16 m まで低下させられるものとする。

また、土質条件は、土層が水平に堆積していることを考慮して、表に示される弾性係数、ポアソン比、単位体積重量、粘着力、内部摩擦係数に対して水平方向には相関係数 1（完全相関）として、鉛直方向には図-3 に示す関数により、距離が離れるに従ってその相関が小さくなり、また距離が近づくに従ってその相関が大きくなると仮定する<sup>15), 17), 18)</sup>。

(2) 代替案の設定

対策工としてはいろいろな代替案があるが、ここでは水平排水管を設置することとし、位置はできるだけ低い方が有効に作用するため、のり尻より 50 cm 上部とした。長さについては、潜在すべり円弧を考え 23 m と決定し、管の径は結果に与える影響が少ないため 8 cm とした。また、設置する排水管の水平間隔は @ 10 m, @ 5 m, @ 4 m, @ 3 m, @ 2 m, @ 1 m とし、それぞれを代替案とする。

4. 地下水の浸透流解析

ドックの内部水位の低下に伴い、地下水は斜面から浸出し、地下水流が生じる。また、このため斜面内では地下水位が低下し、土の有効応力が増加する部分と、残留間隙水圧が発生する部分が現われる。これらの影響を評価するために、非定常浸透流を考慮できる二次元有限要素

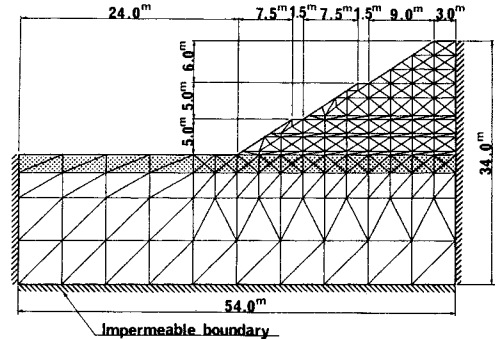


図-4 解析モデル

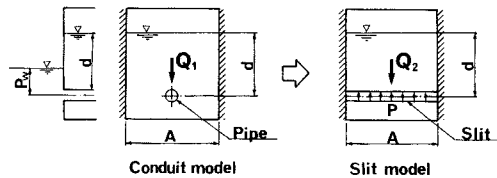


図-5 水平排水管のモデル化

素解析法を用いる<sup>19)-21)</sup>。

図-4 に、浸透流解析に用いた解析モデルを示す。ここで止水壁は不透水境界とし、下部は斜面内への影響が十分に小さくなる深さ (GL-34 m) までをモデル化した。さらに、ドック内も斜面内への影響が十分に小さくなるまでモデル化し、最終的に周辺の境界はすべて不透水境界とした。

水平排水管設置の解析を行う場合、二次元解析では排水管による効果を評価することはできない。そこで、図-5 に示されているように排水管と流出量が等価となるスリットにより、その効果を考慮するものとした<sup>22)</sup>。

等価となるスリットモデルは以下のように求めたものである。すなわち、半径  $r$  の円孔モデルによる流出量  $Q_1$  とスリットモデルによる流出量  $Q_2$  は、地盤内の水頭を  $d$  としモデルの幅を  $A$  とすると、それぞれ次のように表わせる。ここで、 $P_w$  は排水管内の水圧である。

$$Q_1 = \frac{2\pi k(d - P_w)}{2\pi d + \ln\left(\frac{A}{2\pi r}\right)} \dots\dots\dots(1)$$

$$Q_2 = k \frac{d - P_w}{d} A \dots\dots\dots(2)$$

上記の 2 式の流量を比較すると  $Q_1 < Q_2$  である。これより、 $Q_1 = Q_2$  としてモデル化するためにスリット内に仮想の水頭  $P$  を考えると、 $Q_2$  は

$$Q_2 = k \frac{d - (P_w + P)}{d} A \dots\dots\dots(3)$$

で表わされ、 $Q_1 = Q_2$  として仮想の水頭  $P$  について解くことにより、 $P$  は次のように表わすことができる。

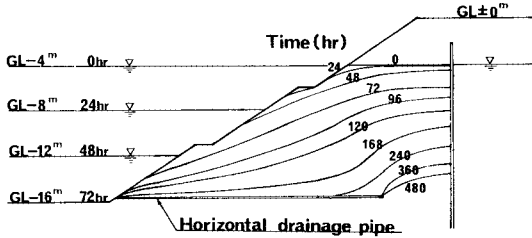


図-6 水位変動図

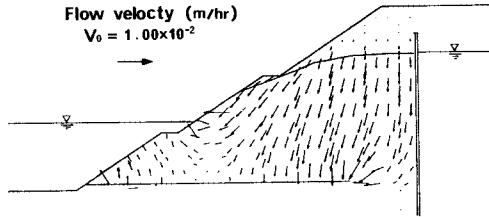


図-7 流速分布図 (36時間経過後)

$$P = d - P_w \frac{2\pi d(d - P_w)}{2\pi d + A \ln \left( \frac{A}{2\pi r} \right)} \dots \dots \dots (4)$$

すなわち、解析はスリット内にここで得られた仮想の水頭  $P$  を作用させることにより、実際の排水管の場合と同様の水位低下が生じるようにできる。

上に述べたモデルを用いて、各層の透水係数のばらつきを考慮して、その分布形を離散的に扱って浸透流解析を行う。ここでは、離散化した解析結果の一例として、各層の透水係数の中央値を用いたものを示す。この例では排水管の設置間隔が 5 m の場合である。また、図-6 は、地下水面の経時変化を示したものであり、図-7 は、排水開始後 36 時間経過した時点における流速の分布図である。

図-6 では、排水が進んで地下水面が降下するに従って、地下水面の降下速度が遅くなるのがわかる。

浸透流解析の結果は、確率有限要素法解析で次のように考慮する。すなわち、浸透流解析により計算されたポテンシャル勾配と水の単位体積重量を掛けた物体力を、各要素に作用させる。さらに、地下水位の低下に伴い水中重量から空中重量になるため、その差を物体力として各要素に加える。ただし、対象とする地盤が砂質土層であるため、地盤の応力変形が浸透流解析に及ぼす影響は小さいと判断して、この影響は無視した<sup>23)</sup>。

### 5. 破壊確率の算定

図-8 に示される解析モデルに、確率有限要素法を適用することにより、各代替案の破壊確率を算定する<sup>6)</sup>。ここで、確率有限要素法とは、有限要素法に確率論手法を導入した解析法であり、本研究では、斜面の安定解析

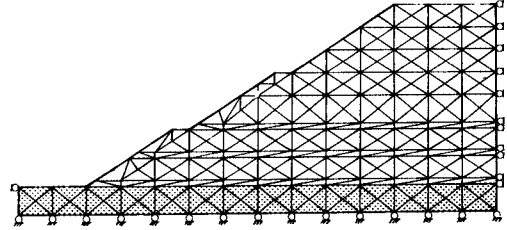


図-8 解析モデル

においてそのすべり破壊を与えるものである。解析手法の詳細については文献 6) を参照されたいが、手法の特徴は次のとおりである。すなわち有限要素法に線形一次近似理論と正規化近似を適用して、確率変数が任意の確率分布形の場合にも破壊確率が求められるようにしたものを用いている。また、浸透流解析の結果は、上に述べたように各要素に作用する自重の増加、あるいは流れによる物体力として考慮する。

#### (1) 破壊の定義

斜面の破壊は円弧すべり面におけるモーメントのつり合いによって次のように定義される<sup>6), 24)</sup>。すなわち、中心  $(x_0, y_0)$ 、半径  $r_0$  の円弧すべり面上における、発生せん断応力による滑動力  $S$  と抵抗力  $R$  の差をもって、円弧すべり面全体の破壊を定義する性能関数  $\tilde{Q}_s(x_0, y_0, r_0)$  とする。これを式で表わせば、次のようになる。

$$\begin{aligned} \tilde{Q}_s(x_0, y_0, r_0) &= R(x_0, y_0, r_0) - S(x_0, y_0, r_0) \\ &= r_0 \int_0^{\theta_0} Q_{si} d\theta \dots \dots \dots (5) \end{aligned}$$

ここで、 $\theta_0$  はすべり円弧の中心角を示す。また、 $Q_{si}$  は円弧すべり面上における各要素に対する安全性の余裕を示す。いま、すべり面がモデルの  $N$  個の要素を横切っているとすると、式 (5) を離散化して、

$$\tilde{Q}_s(x_0, y_0, r_0) = \sum_{i=1}^N Q_{si} \Delta l_i \dots \dots \dots (6)$$

と表わす。ここで、 $Q_{si}$  は要素  $i$  の性能関数の値、 $\Delta l_i$  は要素  $i$  をすべり面が切る長さである。

$Q_{si}$  は確率変数であるので、当然、 $\tilde{Q}_s(x_0, y_0, r_0)$  も確率変数となり、その期待値および分散はそれぞれ次式より与えられる。

$$E[\tilde{Q}_s(x_0, y_0, r_0)] = \sum_{i=1}^N E[Q_{si}] \Delta l_i \dots \dots \dots (7)$$

$$\begin{aligned} Var[\tilde{Q}_s(x_0, y_0, r_0)] &= \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \Delta l_i \Delta l_j Cov[Q_{si}, Q_{sj}] \\ &\dots \dots \dots (8) \end{aligned}$$

ここで、 $Cov[Q_{si}, Q_{sj}]$  は要素  $i$  と要素  $j$  との性能関数の共分散関数である。この関数は、要素の位置と  $x_0, y_0, r_0$  が定まれば、計算できる。

#### (2) すべり円弧の選定法

破壊確率を算定するために、斜面のすべり円弧 (中心

位置、半径)を決定する必要があるが、ここでは、土質定数を平均値あるいは中央値に固定して、その中で破壊確率が最大となるすべり円弧を求め、その円弧を固定して破壊確率を計算する方法を用いた<sup>15)</sup>。破壊確率を最大にする円弧は同時に一般のFEM解析による安全率最小の円弧に一致する。また、今回のような非正常な問題の場合、時刻に応じてすべり円弧が変化することが考えられる。このことから、排水時の経時変化を考慮して、破壊確率を評価することにした。また、本研究では、その目的から、経時変化を考慮して求められる破壊確率のうち、最大のものをもって、各代替案の破壊確率とする。

検討の結果として、水平排水管の設置間隔を1m~5mとした場合は、最大の破壊確率となるのは、排水開始後36時間経過した時点となった(対策工のない場合には54時間)。

また、解析より求められたすべり円弧の一例を図-9に示す。図-10は、排水前の状態において求められた円弧である。通常、砂質土層の場合は図-10に示すように、破壊が最大となる円弧はのり面の浅いところに存在する。これは、円弧が深くなるとすべり面の垂直応力が増加し、せん断耐力自体が増加するためである。しかし、図-9のように外力として流れによる物体力が作用すると、その影響によりすべり円弧はのり面の深いところ求められることになる。さらに、円弧が粘性土層を通らないのは、粘性土層の粘着力が十分に大きいためである。

(3) 破壊確率の算定結果

水平排水管を設置する代替案および対策なしの斜面に対して求められた破壊確率を表-2に示す。表-2には、破壊確率、中央安全率、それらが発生する時刻を示している。これらの値は、図-11に示されるように代替案の破壊確率の経時変化を求め、そのうち最大となる破壊確率をもって、その代替案の破壊確率としたものである。

図-11からは、水平排水管の設置間隔を小さくすると、排水期間中の破壊確率が全体に小さくなること、また、最大の破壊確率が発生する時刻が徐々に早くなることわかる。

(4) 透水係数の影響

表-2に示される破壊確率は、地盤の透水係数を中央値として計算したものである。ここで、透水係数自体も当然、他のパラメータと同様にばらつきをもつことから、この影響を検討しておく必要がある<sup>25)</sup>。本研究では、この影響を次のように検討した。すなわち、透水係数を

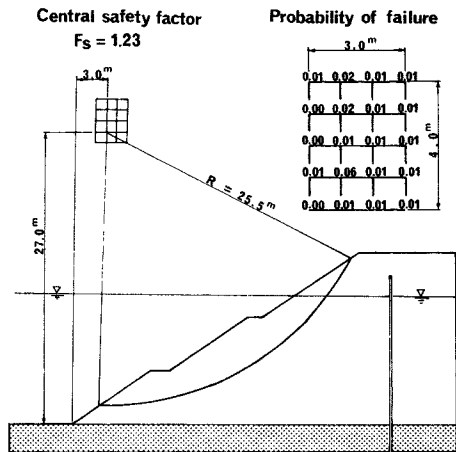


図-10 すべり円弧と破壊確率(排水開始前)

表-2 破壊確率と中央安全率

代替案	破壊確率	中央安全率	時刻 (hr)
対策なし	0.899	0.87	54
@ 10 m	0.868	0.89	42
@ 5 m	0.466	1.01	36
@ 4 m	0.381	1.04	36
@ 3 m	0.304	1.06	36
@ 2 m	0.219	1.10	36
@ 1 m	0.171	1.12	36

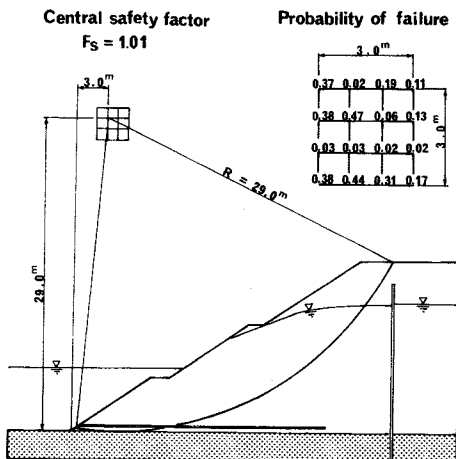


図-9 すべり円弧と破壊確率(36時間経過後)

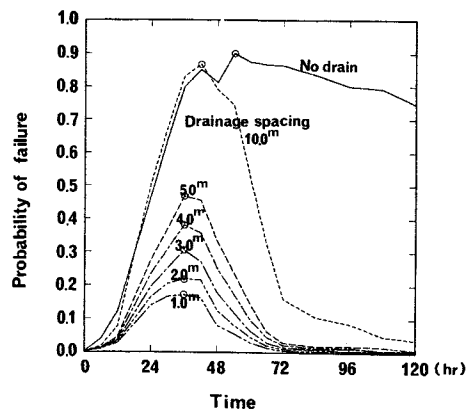
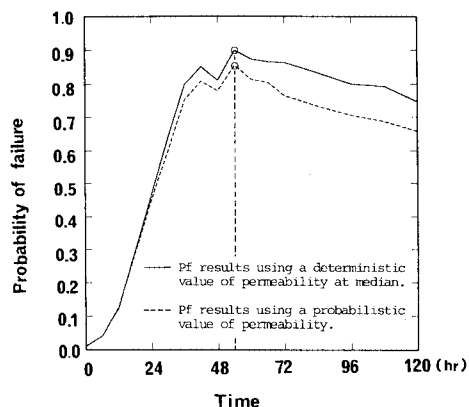


図-11 各代替案に対する破壊確率の経時変化



図—12 破壊確率の経時変化

その中央値  $\lambda$  と標準偏差  $\xi$  を用いて、 $\lambda, \lambda \pm \xi, \lambda \pm 2\xi$  の5つの点により対数正規分布を離散化して求められた破壊確率と、透水係数を中央値に確定値として固定して求められた破壊確率を比較することにより検討を行った。結果として、多くの場合、両者の誤差は、5%以内にとどまり、透水係数を確定値とすることは実用上、問題ないと判断し、その値を確定値(中央値)としたものである。

結果の一例として、標準的な斜面、すなわち、水平排水管を設置しない斜面について、この比較結果を示したものが図—12である。両者の誤差は十分に小さいことがわかる。

## 6. 期待総費用の評価と最適案の選定

最適案は、安全性と経済性の面から選択するため、基本的に代替案の破壊確率と初期建設費、破壊時損失費を考慮して算定される期待総費用を最小にするものから選択する評価基準を用いる。さらに、中央安全率が1.0を上回ることも評価基準とする(この基準の採用理由は後で述べる)。まず初期建設費と破壊時損失費を評価し、これらの結果と前章で求めた破壊確率を組み合わせる期待総費用を算出する。最後に、この期待総費用を最小なものとし、さらに中央安全率が1.0を上回る代替案をもって最適案とする。

### (1) 初期建設費、破壊時損失費の算定

初期建設費および破壊時損失費は金額であるが、ここでは10m間隔の対策工の建設費を100として、各建設費および損失費を相対的な尺度で示している。したがって単位は無次元となるが、ここでは読者に誤解を与えることはないと考えられるので、慣用的に初期建設費、破壊時損失費とよぶことにする。初期建設費の算定は、材料費、ボーリング費、運搬費、加工費および工事に伴う諸経費を考慮して表—3のように算定した。

破壊時損失費の算定は、基本的に再建費を考慮して、以

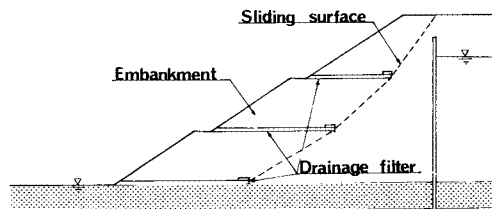
表—3 初期建設費

代替案	初期建設費
対策なし	0
@ 10 m	100
@ 5 m	200
@ 4 m	250
@ 3 m	330
@ 2 m	500
@ 1 m	1,000

下の条件をもとに行った。

- ① 本構造物は、広大な敷地内にあり、破壊に対して他の構造物や敷地に影響を与えない。
- ② 排水時には、ドック内部に人間は入らないため、破壊により人身事故は発生しない。
- ③ 計算は二次元で行っているため、断面が破壊するということはのり面がすべて破壊すると考えることになる。しかし、現実的には総延長1kmすべてにわたって斜面が破壊するとは考えられないため、破壊する延長をパラメーターとして検討する。具体的には、破壊延長を50m, 100m, 200m, 300m, 500m, 1000mとして算定する(この考え方については後述する)。
- ④ 復旧にあたっては、種々の工法が考えられるが、ここでは現状と同様ののり面形状となるように良質の現地で発生する土砂で盛り直すものとする。さらに、再建された斜面が排水時に再度破壊することがないように、図—13に示すように新たに排水フィルターを設置するものとする。

これより、材料費、撤去費および転圧費などそれぞれにかかる諸経費を考慮して、破壊延長ごとに破壊時損失費を表—4に示されるように算定した。ここで、破壊延長が50mより短い場合の破壊時損失費は、施工性の関係か



図—13 復旧後の断面形状

表—4 破壊時損失費

破壊延長 (m)	破壊時損失費
50	160
100	310
200	620
300	940
500	1,560
1000	3,120

ら線形的には減少しない。

(2) 期待総費用の算定

初期建設費と破壊時損失費および破壊確率を考えると各代替案の期待総費用は次の式で表すことができる。

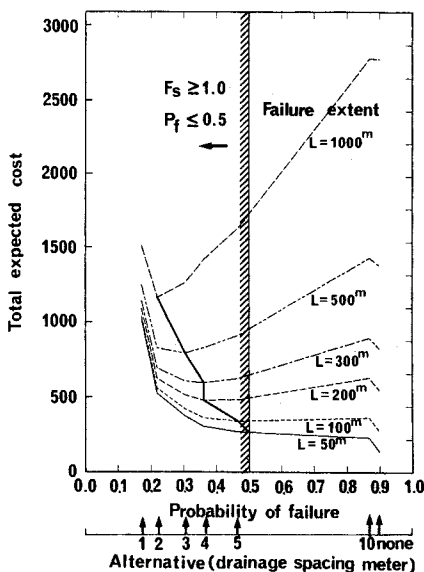
$$C_T = C_i + C_f \cdot P_f \dots\dots\dots (9)$$

ここで、 $C_T$ :期待総費用、 $C_i$ :初期建設費、 $C_f$ :破壊時損失費、 $P_f$ :破壊確率を表す。

結果として求められた破壊確率と期待総費用の関係を図一14に示す。破壊確率と期待総費用は、代替案ごとに与えられるので、離散値となる。図一14では、これらの離散値を便宜的に直線で結び表示したものである。

(3) 最適案の選定

図一14には、斜面の破壊延長をパラメーターとした期待総費用と破壊確率との関係が示されている。ここで、破壊確率の値は、水平排水管の有無、また、その間隔によって決定される(図の横軸目盛りの下に排水管の間隔を記入している)。また、この図では、斜面の破壊延長をパラメーターとして図中に記入しているが、その理由は次のとおりである。すなわち、本検討で用いた解析手法は、二次元平面モデルであることから、各代替案に対して、斜面はいずれの断面においても等しい破壊確率を有していることになる。したがって、解析上は斜面が破壊したとすると、1 km にわたる斜面すべてが同時に破壊することになる。しかしながら、斜面の破壊を想定したときに、1 km の斜面が同時に破壊すると考えるのは大変に不自然なことである。また、斜面の一部が破壊すれば、その部分より水が排出され幾分なりとも隣接する斜面は危険な状態から離れることができるはずである。



図一14 破壊確率と期待総費用

このことから、図一14では、斜面の破壊延長をパラメーターとした。各破壊延長により、期待総費用が最小となる代替案が存在するが、これより破壊確率が小さくなると期待総費用が急に大きくなるが、逆に破壊確率が大きくなっても期待総費用は急激には大きくならないことがわかる<sup>26)</sup>。

さらに、本斜面の場合には、確定論的な計算から、中央安全率が1.0を下回るときがあるというので、その対策工を検討しているのであるから、中央安全率は1.0を最低でも上回る必要がある。また、中央安全率1.0は、破壊確率では0.50になることから、代替案は、少なくとも破壊確率0.50以下の範囲で選択される必要がある。

いま、この条件のもとで、斜面の破壊延長をパラメーターとして期待総費用の最小値を結んだものが、図の太い実線である。この実線は、斜面の破壊延長が与えられると、期待総費用を最小にする破壊確率、すなわち、水平排水管の間隔を与えるものである。この実線より、破壊延長が1 km の場合には、水平排水管を2 m 間隔で設置するのが最適案となり、破壊延長が200 m ~ 500 m であれば、3.0 m ~ 4.0 m 間隔が最適案となることを示している。さらに、破壊延長が100 m 以内であれば、水平排水管の間隔を5 m 程度とすれば最適な配置となることがわかる。しかしながら、この場合の破壊確率は0.5に近く、施工期間に十分に余裕があれば、何ら対策工をしない、あるいは、10 m 間隔で施工して、そのあとで排水試験を行い、破壊した部分のみを再建するという施工法をとっても、よいことがわかる。

上に述べた考察から、本対象のドックの設計では、大規模な斜面破壊は、できれば避けたいとの考えから、水平排水管を3 m 間隔で設置すればよいと判断された。また、この最適案による斜面の中央安全率は1.06(破壊確率は0.304)となり、通常確定論的な設計による要求も満足している。

従来は設計者の判断により、中央安全率 F.S. のみを用いて設計代替案の評価を行っていたが、これでは、特に設計示方書で中央安全率を規定される構造物以外は、設計者の判断により代替案の評価が異なってしまうおそれがある。このことは、構造物のごく短期間における安定性の問題、たとえば、本研究の主題とする斜面の安定問題や仮設構造物を検討するときに、特に重要になる。これに対して、破壊確率と経済性(期待総費用)の面から検討を行う本方法は、このようなときに設計者の設計思想による影響が少なくなる手法であり、従来の方法より合理的な手法である。

7. 結 論

本研究は、3 辺が斜面からなるドックの斜面安定対策

工について、最適設計を行ったものである。このドックは、排水時に斜面が不安定となるため、水平排水管の設置を考え、信頼性手法を用いて排水管の設置間隔の最適案の選定を試みた。結果は以下のようにまとめられる。

(1) 排水時に斜面が不安定となるのは、内部水位の低下に伴い、水位勾配が大きくなり、地下水流が発生するためである。この問題に対して、二次元浸透流解析と確率有限要素法を組み合わせるにより、斜面の安全性を破壊確率という定量的な尺度で表現することができた。たとえば、水平排水管を5m間隔で配置すれば、破壊確率は0.466となり、3m間隔で配置すれば0.304となる。

(2) 最適案の選定にあたっては、初期建設費および破壊時損失費と破壊確率を考慮した期待総費用最小化基準を用いたが、従来の設計法に従った確定論的な計算から、中央安全率が1.0を下回る時があるというので、その対策工を検討しているのであるから、設計から中央安全率が1.0を下回る代替案は採用外とした。結果として、本検討のドックでは水平排水管を3m間隔で設置するのが最適であり、このときの中央安全率は1.06(破壊確率0.304)となった。

ここで、従来の方法と本方法を比較すると次のことがいえる。従来の設計法では、設計者の判断(設計思想)により、中央安全率F.S.を定めて、それに従って設計代替案の評価を行うことになる。したがって、設計者が代われば、その人の設計思想によって、中央安全率は違った値となることもある。さらに、同じ中央安全率をもつ斜面でも、土質定数等のばらつき程度が異なれば、当然違った破壊確率をもつため、中央安全率自体は安全度を示す定量的な尺度にはなり得ないとの指摘もある<sup>15)</sup>。したがって、破壊確率と経済性(期待総費用)の両面から検討を行う本方法は、従来の方法よりも、合理的な手法となり得る。

謝 辞：本研究をまとめるにあたって日頃より有益な助言、指導を賜わっている武蔵工業大学 星谷 勝教授に深甚なる謝意を表します。

#### 参 考 文 献

- 1) 荒谷俊司：大型ドックの構造設計と施工，鹿島出版会，1971.
- 2) 北条絃次・原田譲二：改訂ダム設計基準によるフィルダムの安定計算法，土木技術資料，Vol.14, No.4, 1972.
- 3) 駒田広也・金沢紀一：フィルダムの貯水池水位急降下時の非定常浸透流解析および安定解析，土木学会論文報告集，No.240, pp.51~62, 1975.
- 4) 駒田広也：フィルダムの浸透流に対する安定解析，電力土木，No.154, 1978.
- 5) Bergado, T. and Anderson, L. R. : Stochastic Analysis of Pore Pressure Uncertainty for the Probabilistic Assessment of the Safety of Earth Slopes, Soil and Foundations, Vol.25, No.2, 1985.
- 6) 鈴木 誠・石井 清：確率有限要素法による斜面安定解析，土木学会論文集，第364号，pp.199~208, 1985.
- 7) Gudehus, G. : Finite Elements in Geomechanics, John Wiley & Sons, London, 1977.
- 8) 川本眺万・林 正夫：地盤工学における有限要素解析，培風館，1978.
- 9) 土質工学会：切土ノリ面，土質基礎工学ライブラリー12, 1976.
- 10) 奥園誠之・緒方晴樹：地すべり地における地下水排除工の効果とその調査法，基礎工，No.5, 1985.
- 11) 松尾新一郎・河野伊一郎：地下水水位低下工法，鹿島出版会，1979.
- 12) Lau, K. C. and Kenney, T. C. : Horizontal drains to stabilize clay slopes, Geotechnical Journal, Vol.21, pp.241~249, 1984.
- 13) Mitchell, R. J., Madsen, J. D. and Crawford, T. W. : Hydraulic stabilization of earth structure, Canadian Geotechnical Journal, Vol.21, pp.116~124, 1984.
- 14) 土質工学会：土質基礎の信頼性設計，土質基礎工学ライブラリー28, 1985.
- 15) 松尾 稔：地盤工学，信頼性設計の理念と実際，技報堂出版，1984.
- 16) Ang, A. H-S. and Tang, W. H. : Probability Concepts in Engineering Planning and Design, Vol II - Decision, Risk, and Reliability., John Wiley & Sons, 1984.
- 17) Vanmarcke, E. H. : Probabilistic Modeling of Soil Profiles, ASCE, Vol.103, No. GT 11, pp.1227~1246, 1977.
- 18) Vanmarcke, E. H. : Reliability of Earth Slopes, ASCE, Vol.103, No. GT 11, pp.1247~1265, 1977.
- 19) Neuman, S. P. : Saturated Unsaturated Seepage by Elements, ASCE, Vol.99, No. HY 12, 2235~2250, 1973.
- 20) 赤井浩一・大西有三・西垣 誠：有限要素法による飽和-不飽和浸透流の解析，土木学会論文報告集，No.264, pp.87~96, 1977.
- 21) 駒田広也：飽和-不飽和土中の非定常浸透流解析，電力中央研究所報告，377015, 1978.
- 22) Muskat, M. : The Flow of Homogeneous Fluids through Porous Media, pp.524~530, McGRAW-HILL, 1937.
- 23) 大西有三・村上 毅：有限要素法に地盤の応力変形を考慮した浸透流解析，土木学会論文報告集，No.298, pp.87~96, 1980.
- 24) 桜井春輔・土居康成：有限要素法による斜面の信頼性解析，土木学会論文報告集，No.330, pp.87~97, 1983.
- 25) Hachich, W. and Vanmarcke, E. H. : Probabilistic Updating of Pore Pressure Fields, ASCE, Vol.109, No. GT 3, pp.373~387, 1983.
- 26) Construction Industry Research and Information Association (CIRIA) : Rationalisation of Safety and Serviceability Factors in Structural Codes, Report 63, 1977.