復建調査設計株式会社	正会員	〇市川	勇人
復建調査設計株式会社	正会員	清水	豊
復建調査設計株式会社	フェロー会員	吉浪	康行
清水建設株式会社	フェロー会員	鈴木	誠
広島工業大学工学部	フェロー会員	中山	隆弘

2.1 確率有限要素法 (SFEM)

有限要素法は構造工学のみならず地盤工学の分野 においても用いられているが、多くの場合、土の材 料特性のもつ確率変動を無視して確定値として扱っ ている.しかし、盛土等の安定問題では材料定数の 確率変動が解析結果に大きな影響を与えることから、 確率変動を考慮できる確率有限要素法が開発された 1),2),3)



Fig. 1 Flowchart of the analysis

本研究で用いた確率有限要素法では,破壊点まわ りのテーラー展開による線形一次近似理論を適用し, さらに正規分布以外の確率変数に対しては破壊点に おいて正規近似化が行われているので,性能関数の 定義式によらず,算定される破壊確率は不変性を有 している.

解析において確率変数としたパラメータは,単位 体積重量γ,粘着力cおよび内部摩擦角φであり,性

1. 緒言

近年,わが国では,1時間降水量 50mm を越える 大雨が増加傾向にある.そのため,長年に亘る河川 改修によって全般的な治水安全度は上がりつつある ものの,崩壊に起因する洪水の危険性が従来にも増 して高まってきた堤防も依然として数多く存在して いる.

周知の通り,これまでの設計指針における浸透に 対する堤体の安定性評価は,浸透流解析と円弧すべ り法による安全率で行なわれてきた.しかし,本来, 堤体内の地下水流による盛土の安定性については, 地下水流の発生確率および堤体盛土の抵抗力の不確 実性を定量的に評価する必要がある.また,安全率 を用いた評価でも,ある程度堤防の安全性を判定す ることは出来るが,安全性の余裕,すなわち信頼度 について定量的な評価を求めることは困難である.

そこで、本研究では豪雨に対する堤体の安全性余 裕を、堤体盛土の地盤物性値の不確実性を定量的に 評価し、局所破壊とすべり円弧を仮定した全体破壊 に対して、確率有限要素法を用いて破壊確率や信頼 性指標で評価することを試みた.なお、降雨と河川 水位上昇による地下水浸透流は非定常浸透流解析で 確定的に求め、各時刻歴における浮力と流体力につ いては外力として扱った.

2. 解析方法

解析方法は Fig. 1 の通りである.まず,浸透流に 対する時系列解析を実施する.次に解析結果である 各時刻歴の地下水位と流速ベクトルを外力にとり, 地盤パラメータの不確実性を考慮した確率有限要素 法を実施する.解析の結果得られた局所破壊と全体 破壊に対する安全性余裕を確率論的に評価するとと もに,円弧すべり法により算出した安全率との比較 検討を行う. 能関数は各要素の破壊確率と単一すべり面における 全体破壊について想定している.

2.2 局所破壊

要素 i のせん断破壊に関する性能関数 g_iについて は、同一要素内ではすべり面上の垂直応力 σ_i が変化 しないと仮定する.また、内部摩擦角を ϕ_i とすれば クーロンの破壊基準により Ep. (1)で定義できる.

$$g_i = \tau_{ii} - \tau_i = c_i + \sigma_i \tan \phi_i - \tau_i \tag{1}$$

ここに、 τ_{fi} :破壊面のせん断抵抗(kN/m²)、 τ_i :潜在 すべり面における作用せん断力 (kN/m²)、 c_i :粘着力 (kN/m²)である.

このとき要素iの局所破壊に対する信頼性指標は

$$\boldsymbol{\beta}_i = E[\boldsymbol{g}_i] / (Var[\boldsymbol{g}_i])^{1/2}$$
⁽²⁾

で与えられる. ここに, E[g_i]: g_i の平均値, Var[g_i]: g_i の分散である.

さらに,破壊確率 P_{fi}は Ep. (3)で表される.

$$P_{fi} = \Phi(-\beta_i) \tag{3}$$

ここに、 Φ:標準正規確率分布関数である.

2.3 全体破壊

まず、単一すべり面に対する堤体の全体破壊に対 する性能関数 G を局所破壊に対する性能関数 g_i を用 いて Ep. (4)で定義する. すなわち、想定した単一す べり面に対する全体破壊の性能関数 G は、Ep. (4)に 示すように、すべり面が存在する場合の各要素の性 能関数 g_i と各要素のすべり面の長さ $\Delta \ell_i$ の積をすべ り面全体で加算することで表される.



Fig. 2 Slip surface passing the i-th element.

信頼性指標 βは Ep. (5)によって得られる.

$$\boldsymbol{\beta} = E[G]/(Var[G])^{1/2}$$
⁽⁵⁾

破壊確率 P_f は信頼性指標 β から Ep. (6)で表される. $P_f = \Phi(-\beta)$ (6)

2.4 地下水流の影響⁴⁾

浸透流を受ける堤体内の応力は,有効応力と浸透 流による土に働く応力(浸透力)とに大別される.

次に,浸透力は要素物体力として作用させる.物 体力は,その点における動水勾配に水の単位体積重 量 γ_W を乗じた値として与えられる. すなわち,座 標方向成分で表示すれば, Ep. (7)のようになる.

$$X = -\gamma_{w} \frac{\partial H}{\partial x}, Y = -\gamma_{w} \frac{\partial H}{\partial y}$$
(7)

有限要素法で求める場合の任意三角形要素内では, Ep. (8)のように表される.

$$X = \frac{\gamma_{w}}{2\Delta} \{ (y_{i} - y_{m}) H_{i} + (y_{m} - y_{i}) H_{j} + (y_{i} - y_{j}) H_{m} \} \}$$

$$Y = \frac{\gamma_{w}}{2\Delta} \{ (x_{m} - x_{i}) H_{i} + (x_{i} - x_{m}) H_{j} + (x_{j} - x_{i}) H_{m} \}$$
(8)

ここに, Δ:三角形要素の面積, x_i, y_i:その要素の *i*節点での座標,以下同様, H_i, H_j, H_m:三節点の 水頭値である.

3. 解析概要

Fig.3 に示す堤防モデルは実際の堤防をモデル化したものである.数字は層番号を表しており,Table.1は各地盤物性値である.また,有限要素は三角形定ひずみ要素であり,要素数は4991である.堤体の単位体積重量,粘着力および内部摩擦角の変動係数については既往の文献⁵⁾を参考にしてTable.2のように設定した.

また,浸透流解析で用いた降雨量と河川水位に対 するモデル(降雨・水位モデル)を Fig.4 に示す.



Fig. 3 Analytical model

Table.1 Soil parameters

	$\gamma t (kN/m^3)$	ysat (kN/m ³)	$c (kN/m^2)$	φ (°)	k (cm/s)
1	19.0	19.0	25.0	0.0	1.0×10^{-3}
2	19.0	19.0	17.0	22.0	1.0×10 ⁻⁵
3	19.0	20.0	20.0	30.0	3.0×10 ⁻³
4	19.0	20.0	0.0	35.0	2.0×10 ⁻¹
5	18.0	18.0	30.0	0.0	2.0×10 ⁻⁵
6	19.0	20.0	94.0	15.0	3.0×10 ⁻³
7	20.0	21.0	0.0	35.0	2.0×10 ⁻⁵
8	18.0	18.0	0.0	50.0	1.0×10^{-2}
9	19.0	20.0	94.0	15.0	5.0×10 ⁻³
10	20.0	21.0	0.0	35.0	1.0×10^{-1}
11	19.0	20.0	94.0	15.0	3.0×10^{-4}
12	20.0	21.0	0.0	35.0	1.0×10 ⁻⁵
13	18.0	18.0	50.0	0.0	2.0×10^{-1}
14	19.0	20.0	0.0	30.0	3.0×10 ⁻³
15	20.0	21.0	0.0	35.0	5.0×10 ⁻³
16	20.0	21.0	0.0	40.0	1.0×10^{-6}
17	18.0	18.0	30.0	0.0	1.0×10 ⁻¹



Table 2 Coefficient of variation

Fig. 4 External force model

なお、この降雨・水位モデルについては、河川堤防の浸透に対する安全性検討を行う際に用いられる 『河川堤防の構造検討の手引き』⁶を参考にした.

4. 解析結果

4.1 中央安全率と信頼性指標

Fig. 5にFsとθの経時変化図を示す.ここでSFEM2 は浸透力の影響を無視した解析結果である.SFEM2 でのθとFsの挙動についてはよく一致している.し かし,浸透力を考慮したSFEMでのθとでは数値に 差がある.特に河川水位が上昇するまでの時間帯の 方が顕著であり,これは,浸透力を要素物体力とし て作用させるSFEMと円弧すべり法との解析手法の 違いによるものである.



Fig. 5 Comparison between central safety factor and safety factor

また, Fig.6 に θ と β の経時変化図を示す. 同図に よると、両者の挙動は比較的に良く一致している. したがって、河川水位等が変化する堤防の安全性を β で評価する意義は大きいものと判断できる.



Fig. 6 Comparison between central safety factor and reliability index

4.2 設計因子が信頼性指標 β に及ぼす影響

粘着力,内部摩擦角及び単位体積重量の設計因子 がβに及ぼす影響を把握するため,Table.2に示した 各土質定数の変動係数の最大,平均,最小値に対し て計算を行った.その際,その他の2つの土質定数 の変動係数についてはいずれも平均値を用いた.



Fig. 7 Effects of the coefficients of variations on reliability index

Fig. 7より変動係数の小さい単位体積重量がβに 与える影響は小さいことがわかる.また,内部摩擦 角や粘着力の影響については,今回の解析モデルが 主に礫質土・砂質土で構成されているため,粘着力 の変動よりも内部摩擦角の変動がβに与える影響の 方が大きい結果となった.

4.3 局所破壊確率

Fig.8 に t=237hr の局所破壊確率の分布のコンター 図を示す. 図中, 黒線で示した円弧は, 円弧すべり 法において安全率が最小となるときの円弧で、赤線 の円弧は, SFEM による方法において、同じく安全 率が最小となるときの円弧である. それぞれの円弧 の中心の座標 (X,Y), 半径(m), 安全率, 信頼性指標 は、それぞれ次の通りである.

円弧すべり法:

(13.31, 33.85), 21.00, 1.49, 3.375 SFEMによる方法:

(13.81, 34.35), 21.50, 1.46, 3.198

どちらの円弧も局所破壊確率の高い領域付近を通っていることがわかる.また,本研究の解析モデルでは,どちらの円弧においても安全率,信頼性指標 共にあまり差が生じなかった.



5. 結言

本研究の結論をまとめれば以下の通りである.

- (1) 堤防の中央安全率 θ と信頼性指標 β の経時的変 化を比較した結果,河川水位の動向に関係なく, ほぼ同じ傾向が得られた.このことより、本手 法のような方法により,河川水位等の変化する 堤防の安全性を β で評価することの意義は大き い.
- (2) 堤防の局所破壊確率の分布のコンター図を描く ことにより、全体破壊のすべり面が、局所破壊 確率が大きい区域の境界付近を通ることを明ら かにできた。

また,SFEM による方法で安全率が最小となるときの円弧を求めた結果,こちらの円弧も局所破壊確率が大きい区域の境界付近をとおっており,安全率や信頼性指標も差が小さかった.

(3) 堤防の粘着力、内部摩擦角及び単位体積重量の バラツキがβに及ぼす影響を把握するため、各 土質定数の一般的な変動係数の変動幅を用いて βを計算した結果、バラツキの小さい単位体積 重量がβに与える影響が小さいことを数値的に 明らかにできた.一方、変動係数が比較的大き い粘着力や内部摩擦角の影響については、解析 モデルが礫質土・砂質土で構成されているため、 内部摩擦角の変動がβに与える影響の方が大き い結果となった.

なお、今後の課題として、バラツキも大きく、浸 透流解析結果(堤体内水位の時刻歴)にも大きく影 響すると考えられる透水係数の不確定性に対する 検討がある.また、本研究では地盤物性値の空間的 バラツキについては完全相関と仮定したが、その仮 定が堤防の信頼性指標に及ぼす影響についても検 討を行う必要がある.

参考文献

- K. Ishii & M. Suzuki: Stochastic finite element method for slope stability, Structural Safety, 4, pp.111-129, 1987.
- 2) 溜幸生,桜井春輔:確率有限要素法における破壊確率計 算法の提案,土木学会論文集,No.400/III-10, pp.225-231, 1988.
- 3) 星谷勝,石井清:構造物の信頼性設計法,鹿島出版会,1986
- 4) 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,土木学会論文集, 240, pp.51-62, 1975.
- 5) 松尾稔: 地盤工学 信頼性設計の理念と実際, 技報堂, pp.62-71, 1984.
- (財)土技術研究センター:河川堤防の構造検討の手引き, JICE 資料第 102002 号, 2002.
- (上・下)・社団法人 日本港湾協会,2007.
- 8) 長尾毅, 吉浪康行, 向井雅司, 清水豊: 防波堤の支 持力安全性の確率論的評価, JCOSSAR2000 論文 集, pp.479-486, 2000.