広島工業大学紀要研究編
第44巻（2010）pp.69-76
論　　　　　　　文

構造信頼性理論と確率有限要素解析による河川堤防の浸透破壊確率の評価

市川　勇人＊・中山　隆弘＊＊

（平成21年10月31日受理）

Probabilistic Evaluation of Seepage Failure of a Levee Based upon Structural Reliability Theory and Probabilistic Finite Element Analysis

Hayato ICHIKAWA* and Takahiro NAKAYAMA**

(Received Oct. 31, 2009)

Abstract

To date, the stability of levees has been evaluated using the safety factor by seepage flow analysis and circular arc method. Because the safety allowance is estimated from the stability of levees which depend on the underground waters, it is necessary to evaluate the probability of seepage flow and the uncertainty of the resistance of levees quantitatively. In this study, the uncertainty of the geotechnical properties of levees was quantitatively evaluated, and the probabilistic estimates were made for the local failure and the global failure, assuming a circular slip surface. Specifically, the safety margin was evaluated by the failure probability and/or the reliability index by expressing the geotechnical parameters using the probabilistic model and the stochastic finite element method. The action of seepage flow and the rise of water level of the river caused by rainfall were deterministically calculated by the transient analysis.

Key Words: seepage flow analysis, circular arc method, safety factor, stochastic finite element method, reliability index

1．序　論

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。

＊ 広島工業大学大学院工学研究科建設系工学専攻
＊＊ 広島工業大学工学部都市建設工学科

2．解析方法

解析方法は Fig. 1 の通りである。まず，浸透流解析の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。

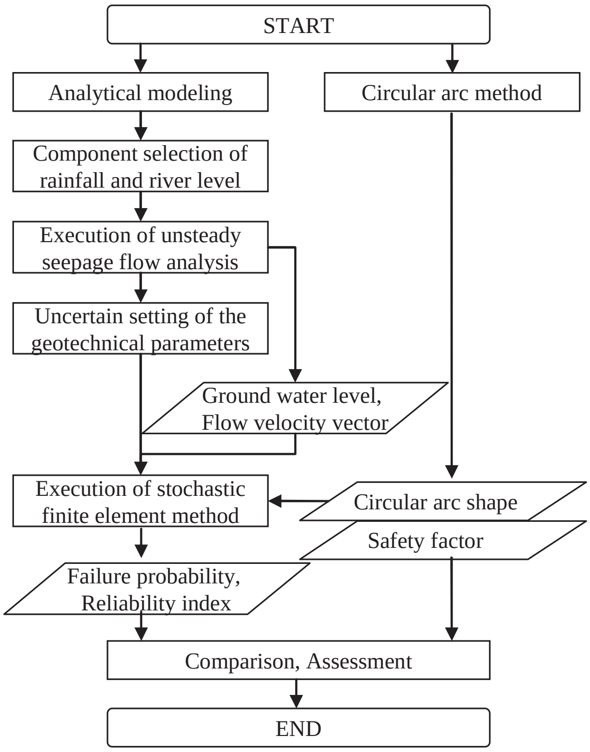


Fig. 1　Flowchart of the analysis

2.1　浸透流解析

浸透流解析は，実際に近い現象が再現できる非定常の飽和・不飽和浸透流解析とした。

非定常の飽和・不飽和浸透流解析の基本式は Ep.(1)のとおりである。

$$\frac{\partial\psi}{\partial x}\left(k\frac{\partial\psi}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k\frac{\partial\psi}{\partial z}+k\right)=(C+\alpha\cdot S_s)\frac{\partial\psi}{\partial t} \tag{1}$$

ここで，x：堤防横断面の水平方向の軸，z：堤防横断面の鉛直方向の軸，k：透水係数(m/hr)，ψ：圧力水頭(m)，C：比水分容量(l/m)，α：１の場合飽和領域，０の場合不飽和領域，S_s：比貯留係数(l/m)，t：時間(hr)

ここで，比水分容量 C は水分特性曲線の接線勾配として与えられ，比貯留係数 S_s については，砂質土については $S_s=1\times10^{-4}$(l/m)，粘性土については $S_s=1\times10^{-3}$(l/m）とした。

非定常の飽和・不飽和浸透流解析は，モデル化した堤防（堤体および基礎地盤）を対象に，土質定数，初期条件および外力条件（降雨，河川水位）を設定するとともに，境界条件等を入力して実施する。

2.2　確率有限要素法

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)]。

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，性能関数は，各要素で潜在すべり面としての層理面が存在しない場合と層理面が存在する場合を想定している。また，層理面に沿った単一すべり面を想定したすべり面上における全体破壊についても定式化を行っている。

2.2.1　要素の変位および応力に関する計算

有限要素法において，節点変位と節点荷重との関係は次の剛性方程式によって与えられる。

$$[K]\{u\}=\{P\} \tag{2}$$

ここで，$[K]$は剛性マトリックス，$\{u\}$は節点変位ベクトル，$\{P\}$は節点荷重ベクトルである。

また，要素の応力と節点変位ベクトルとの関係は次のようになる。

$$\{\sigma\}=[D][B]\{u\} \tag{3}$$

ここで，$[D]$および$[B]$は，それぞれ応力とひずみ，ひずみと節点変位を結びつけるマトリックスである。

１）変位の計算

各要素の節点変位の期待値 $E[u_i]$，分散 $Var[u_i]$ および共分散 $Cov[u_i,\ u_j]$ ，は次のように計算される。まず，u_i を確率変数 x_k の破壊点まわりでテーラー展開し，２次以降の項を無視して線形近似する。

$$u_i=u_i(x_1^*,\ x_2^*,\ \cdots,x_m^*)+\sum_{k=1}^{m}(x_k-x_k^*)\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_k}\right)_* \tag{4}$$

ここで，x_k は確率変数であり，m はその個数である。また，x_k^* は x_k の破壊点，$(\partial u_i/\partial x_k)_*$ は破壊点における偏導関数の値を示す。

Ep.(4)より u_i の期待値と分散が次のよう与えられる。

$$E[u_i]=u_i(x_1^*,\ x_2^*,\ \cdots,x_m^*)+\sum_{k=1}^{m}(\mu_{x_k}-x_k^*)\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_k}\right)_* \tag{5}$$

$$Var[u_i]=E[\{E[u_i]-u_i\}^2]$$
$$=E\left[\left\{\sum_{k=1}^{m}(\mu_{x_k}-x_k)\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_k}\right)_*\right\}^2\right]$$
$$=\sum_{k=1}^{m}\sum_{l=1}^{m}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_k}\right)_*\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_l}\right)_*E[(\mu_{x_k}-x_k)(\mu_{x_l}-x_l)]$$
$$=\sum_{k=1}^{m}\sum_{l=1}^{m}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_k}\right)_*\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_l}\right)_*Cov[x_k,x_l] \tag{6}$$

ここで，μ_{x_k} は x_k の平均値，$Cov[x_k, x_l]$ は x_k と x_l の共分散である。

また，変位 u_i と u_j の共分散は次のように表される。

$$Cov[u_i,u_j]=E[\{E[u_i]-u_i\}\{E[u_i]-u_j\}]$$
$$=\sum_{k=1}^{m}\sum_{l=1}^{m}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_k}\right)_*\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_l}\right)_*Cov[x_k,x_l] \tag{7}$$

また，確率変数 x_k と x_l の共分散マトリックスを含むことにより，土質定数間の相関あるいは空間的な位置による土質定数の相関を考慮することができる。

a）$u_i(x_1^*, x_2^*, \cdots, x_m^*)$ の算定

有限要素法において変位と荷重の関係は Ep.(2) によって与えられる。ここで，Ep.(2) は未知の変数と既知の変位に分けることにより次のように表される。

$$\begin{bmatrix}[K_{11}] & [K_{12}]\\ [K_{21}] & [K_{22}]\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\{u_{未}\}\\ \{u_{既}\}\end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix}\{P_1\}\\ \{P_2\}\end{Bmatrix} \tag{8}$$

$$\begin{bmatrix}[K_{11}] & [0]\\ [0] & [I]\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\{u_{未}\}\\ \{u_{既}\}\end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix}\{P_1\}-[K_{12}]\{u_{既}\}\\ \{u_{既}\}\end{Bmatrix} \tag{9}$$

Ep.(9) より，未知の変位 $\{u_{未}\}$ は次のように表される。

$$\{u_{未}\}=[K_{11}]^{-1}\{\{P_1\}-[K_{12}]\{u_{既}\}\} \tag{10}$$

Ep.(10) において，確率変数である E, v は $[K_{11}], [K_{12}]$ に，また，γ, P は $\{P_1\}$ に，u は $\{u_{既}\}$ のベクトルに含まれる。したがって，後述する収束計算により，これらの確率変数の破壊点における値 x_k^*（$k=1, 2\cdots, m$）を求めれば，Ep.(10) により破壊点 x_k^* における未知の変数 u_i^* が求められる。

b）$(\partial u_i/\partial x_k)_*$ の算定

Ep.(2) の両辺を x_k で微分すると次式が得られる。

$$\frac{\partial[K]}{\partial x_k}\{u\}+[K]\frac{\partial\{u\}}{\partial x_k}=\frac{\partial\{P\}}{\partial x_k} \tag{11}$$

$$\frac{\partial\{u\}}{\partial x_k}=[K]^{-1}\left\{\frac{\partial\{P\}}{\partial x_k}-\frac{\partial[K]}{\partial x_k}\{u\}\right\} \tag{12}$$

収束計算により x_k^* を求めれば，Ep.(12) の右辺に含まれる各項は既知となり，$(\partial\{u\}/\partial x_k)_*$ を計算することができる。

2）応力の計算

各要素の応力の期待値 $E[\sigma_i]$，分散 $Var[\sigma_i]$ および共分散 $Cov[\sigma_i, \sigma_j]$ は次のように計算される。変位の計算と同様に，応力 σ_i を確立変数 x_k の破壊点まわりにテーラー展開し，二次以降の項を無視して線形近似する。

$$\sigma_i=\sigma_i(x_1^*, x_2^*, \cdots, x_m^*)+\sum_{k=1}^{m}(x_k-x_k^*)\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_k}\right)_* \tag{13}$$

Ep.(13) から，応力 σ_i の期待値，分散および応力 σ_i と σ_j の共分散は次のように与えられる。

$$E[\sigma_i]=\sigma_i(x_1^*, x_2^*, \cdots, x_m^*)+\sum_{k=1}^{m}(x_k-x_k^*)\left(\frac{\partial\sigma_i}{\partial x_k}\right)_* \tag{14}$$

$$Var[\sigma_i]=E[\{E[\sigma_i]-\sigma_i\}^2]$$
$$=\sum_{k=1}^{m}\sum_{l=1}^{m}\left(\frac{\partial\sigma_i}{\partial x_k}\right)_*\left(\frac{\partial\sigma_i}{\partial x_l}\right)_*Cov[x_k,x_l] \tag{15}$$

$$Cov[\sigma_i,\sigma_j]=E[\{E[\sigma_i]-\sigma_i\}\{E[\sigma_i]-\sigma_j\}]$$
$$=\sum_{k=1}^{m}\sum_{l=1}^{m}\left(\frac{\partial\sigma_i}{\partial x_k}\right)_*\left(\frac{\partial\sigma_i}{\partial x_l}\right)_*Cov[x_k,x_l] \tag{16}$$

Ep.(14)～(16) の計算に必要な $\sigma_i(x_1^*, x_2^*, \cdots, x_m^*)$ および $(\partial\sigma_i/\partial x_k)_*$ の誘導方法を以下に示す。

a）$\sigma_i(x_1^*, x_2^*, \cdots, x_m^*)$ の算定

Ep.(3) より要素 j について応力と変位の関係は次式で与えられる。

$$\{\sigma\}_j=[D]_j[B]_j\{u\}_j \tag{17}$$

b）$(\partial\sigma_i/\partial x_k)_*$ の算定

Ep.(17) の両辺を x_k で微分すると次式が得られる。

$$\frac{\partial\{\sigma\}_j}{\partial x_k}=\frac{\partial[D]_j}{\partial x_k}[B]_j\{u\}_j+[D]_j[B]_j\frac{\partial\{u\}_j}{\partial x_k} \tag{18}$$

ここで，$[B]_j$ は x_k とは独立であるので $\partial[B]_j\,\partial x_k=[0]$ となり，$[B]_j$ の偏導関数の項は省かれている。

$(\partial\{\sigma\}_j/\partial x_k)_*$ は $\{u^*\}_j$ および $(\partial\{u\}_j/\partial x_k)_*$ を Ep.(18) に代入することにより求められる。

主応力の期待値，分散および共分散は次のように求められる。すなわち，平面問題を考えると主応力および最大せん断力は ξ，ζ 方向の応力を用いて，次式によって与えられる Ep.(20)～(22) において，要素番号を示す添字 j は省略している。

$$\{\sigma'\}_j^T=\{\sigma_1, \sigma_2, \tau_{max}\}_j \tag{19}$$

$$\sigma_1=\frac{\sigma_\xi+\sigma_\zeta}{2}\left\{\left(\frac{\sigma_\xi-\sigma_\zeta}{2}\right)^2+\tau_{\xi\zeta}^2\right\}^{1/2} \tag{20}$$

$$\sigma_2=\frac{\sigma_\xi+\sigma_\zeta}{2}\left\{\left(\frac{\sigma_\xi-\sigma_\zeta}{2}\right)^2+\tau_{\xi\zeta}^2\right\}^{1/2} \tag{21}$$

$$\tau_{max}=\left\{\left(\frac{\sigma_\xi-\sigma_\zeta}{2}\right)^2+\tau_{\xi\zeta}^2\right\}^{1/2} \tag{22}$$

また，主応力の偏導関数は Ep.(20)～(22) を x_k に関して偏微分することにより与えられる。

Ep.(19)～(22) およびその偏導関数に１）および２）で求めた $\{\sigma^*\}_j$, $(\partial\{\sigma\}_j/\partial x_k)_*$ を代入して $\{\sigma'^*\}_j$, $(\partial\{\sigma'\}_j/\partial x_k)_*$ を計算する。さらに，この結果を Ep.(14)～(16) に代入すれば，主応力の期待値，分散および共分散も求めることができる。また，ξ，ζ 方向の応力は単に Ep.(17) および Ep.(18) を Ep.(14)～(16) に代入することにより得られる。

2.2.2　局所破壊

1）層理面が存在しない場合

せん断破壊に関する性能関数を次のように定義する。

$$g_i=\tau_{fi}-\tau_{max,i}$$
$$=c_i\cos\phi_i+\frac{1}{2}(\sigma_{1i}+\sigma_{2i})\sin\phi_i-\frac{1}{2}(\sigma_{1i}+\sigma_{2i}) \qquad (23)$$

ここで，Fig. 2の通り，τ_f：モール円の中心から破壊基準までの距離，c：粘着力（kN/m^2），ϕ：内部摩擦角(°)

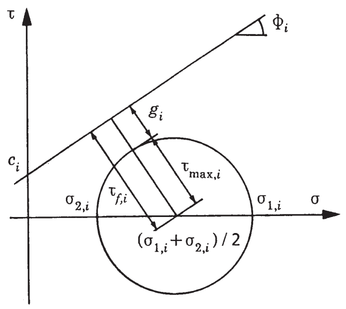


Fig. 2　With the slip surface

2）層理面が存在する場合

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し，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.(24)で定義できる。

$$g_i=\tau_{fi}-\tau_i=c_i+\sigma_i\tan\phi_i-\tau_i \qquad (24)$$

ここで，τ_{fi}：破壊面のせん断抵抗(kN/m^2)，τ_i：潜在すべり面の作用せん断力（kN/m^2）

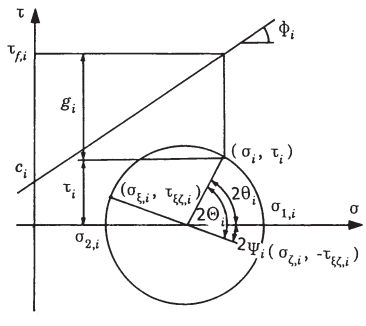


Fig. 3　Without the slip surface

ここで，Fig. 3の通り，

$$\sigma=\frac{1}{2}(\sigma_1+\sigma_2)+\frac{1}{2}(\sigma_1-\sigma_2)\cos2\theta,\ \tau=\frac{1}{2}(\sigma_1+\sigma_2)\sin2\theta$$

$\theta=\beta\cdot\psi+\pi/2$，$\beta$：水平面から層理面への角度，$\psi$：水平面から最大主応力面への角度，$\psi=\frac{1}{2}\tan^{-1}\left(\frac{2\tau_{\xi\zeta}}{\sigma_\xi-\sigma_\zeta}\right)$

このとき，要素 i の安全性指標 β_i は次式で表わされる。

$$\beta_i=\frac{E[g_i]}{(Var[g_i])^{1/2}} \qquad (25)$$

ここで，$E[g_i]$：giの平均値，$(Var[g_i])^{1/2}$：giの分散

各要素の安全性指標は破壊点における確率変数の間に依存するので，破壊点を確定するための収束計算が必要になる。破壊点を求めるにはHasoferとLindが提案している方法を用いる。この方法の概要を以下に示す。

まず確率変数 $x_{k,i}$ による性能関数 $Q_{s,i}$ の偏導関数より次式で $a_{k,i}$ を計算する。

$$a_{k,i}=\frac{\left(\frac{\partial g_i}{\partial x_{k,i}}\right)_*(Var[g_i])^{1/2}}{\left(\sum_{k=1}^{m}\left(\frac{\partial g_i}{\partial x_{k,i}}\right)_*Var[g_i]\right)^{1/2}} \qquad (26)$$

次に要素 i の β_i を用いて，確率変数 x_k の破壊点を次のように表わす。

$$x^*_{k,i}=\mu_{k_{k,i}}-a_{k,i}\beta_i(Var[x_{k,i}])^{1/2} \qquad (27)$$

そして，この値を用いて，要素 i の β_i を計算する。また，この計算は全要素について行う。ここで，各要素の β_i の収束を判断し，すべての要素の安全性指標が収束するまで新しい $\beta_i, a_{k,i}$ を与え，収束計算を繰り返す。$\beta_i, a_{k,i}$ の初期値には平均値まわりでテーラー展開したときの計算結果を用いる。

Ep.（25）によってβiが得られれば，破壊確率 P_{fi} はEp.(28)で表される。

$$P_{f,i}=\Phi(-\beta_i) \qquad (28)$$

ここで，Φ(・)は標準正規確率分布関数を表わす。

2.2.3　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.(29)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.(29)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。

$$G=\sum_{i=1}^{m}g_i\Delta l_i \qquad (29)$$

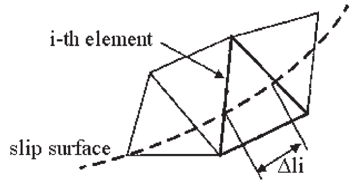


Fig. 4　Slip surface passing the i-th element.

このとき，信頼性指標 β はEp.(30)によって得られる。

$$\beta=\frac{E[G]}{(Var[G])^{1/2}} \qquad (30)$$

さらに，破壊確率 P_f は信頼性指標βからEp.(31)で表される。

$$P_f = \Phi(-\beta) \tag{31}$$

3．地下水流の影響

浸透流の作用を受ける堤体内の応力は，自重による有効応力と浸透流による土に働く応力(浸透力)に大別される[4)]。

浸透力は要素物体力，すなわち，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。座標方向成分で表示すれば，Ep.(32)のようになる。

$$X = -\gamma_w \frac{\partial H}{\partial x},\ Y = -\gamma_w \frac{\partial H}{\partial y} \tag{32}$$

有限要素法で求める場合の任意三角形要素内では，Ep.(33)のように離散的に表される。

$$\left.\begin{aligned} X &= \frac{\gamma_w}{2\Delta}\ \{(y_j - y_k)H_i + (y_k - y_i)H_j + (y_i - y_j)H_k\} \\ Y &= -\frac{\gamma_w}{2\Delta}\ \{(x_k - x_j)H_i + (x_i - x_k)H_j + (x_j - x_i)H_k\} \end{aligned}\right\} \tag{33}$$

ここに，Δ：三角形要素の面積，x_i，y_i：その要素のｉ節点の座標，x_j，y_j 等も同様，H_i，H_j，H_k：三節点の水頭値

4．解析概要

4.1　解析モデル

Fig. 5 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。

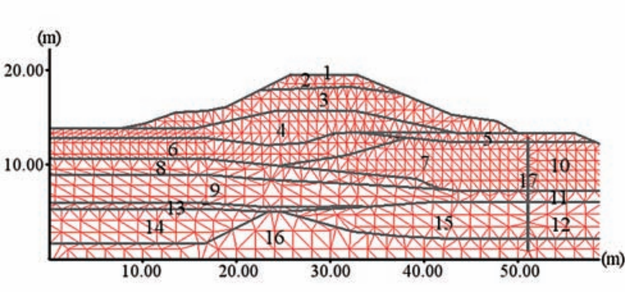


Fig. 5　Analytical model

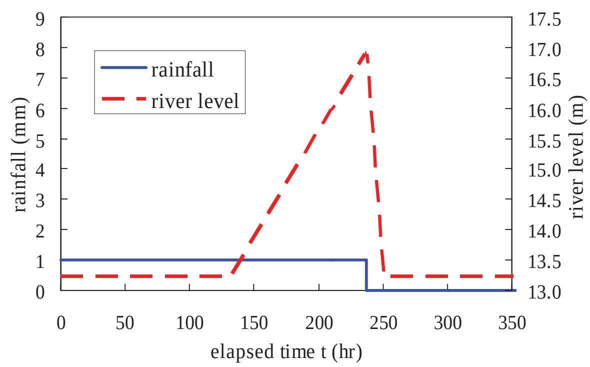


Fig. 6　External force model

次に浸透流解析に必要な外力条件（降雨，河川水位）の時刻歴変化を Fig. 6 に示す。

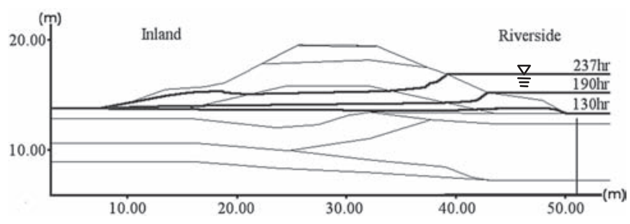
この外力条件については，河川堤防の浸透に対する安全性検討を行う際に用いられている『河川堤防の構造検討の手引き』[6)]を参考に設定した。ただ，手引きでは最高水位付近までは事前降雨として 1mm/hr，その後河川水位が急降下する時間までは 10mm/hr の強度の降雨量を与えるものと記述されているが，本解析では，河川水位の変化に伴う水位条件の時刻歴を主として考慮するため，1mm/hr の

Table.1　Soil parameters

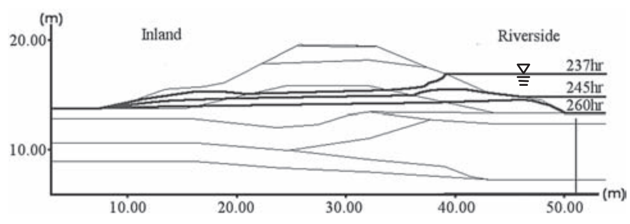
	γt (kN/m³)	γsat (kN/m³)	c (kN/m²)	φ (°)	k (cm/s)
1	19.0	19.0	25.0	0.0	1.0×10^{-3}
2	19.0	19.0	17.0	22.0	1.0×10^{-5}
3	19.0	20.0	20.0	30.0	3.0×10^{-3}
4	19.0	20.0	0.0	35.0	2.0×10^{-1}
5	18.0	18.0	30.0	0.0	2.0×10^{-5}
6	19.0	20.0	94.0	15.0	3.0×10^{-3}
7	20.0	21.0	0.0	35.0	2.0×10^{-5}
8	18.0	18.0	0.0	50.0	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

	Coefficient of variation
Unit weight（γ）	0.02～0.08
Cohesion（c）	0.2～0.4
Internal friction angle（φ）	0.1～0.2



(a) Increase



(b) Drop

Fig .7　Distribution of underground water level in levee

強度の降雨を河川水位急降下時まで設定することとした。

4.2　河川水位及び堤体内水位

浸透流解析の結果，得られた任意の時間の堤体内の水位分布図を Fig. 7 に示す。

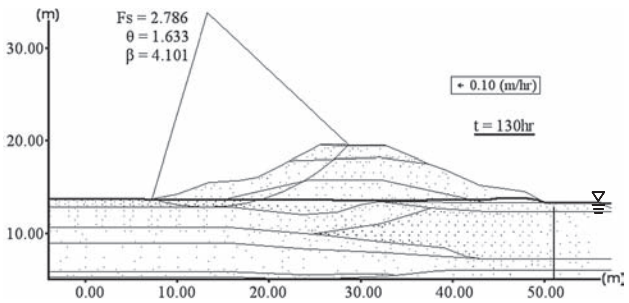
4.3　すべり円弧

全体破壊を検討するときに仮定するすべり円弧は，円弧すべり法で求まる最小安全率時のすべり円弧を用いることとした。また，高水位時の安定性を主眼とする観点から，裏のり側のすべり円弧を対象とした。

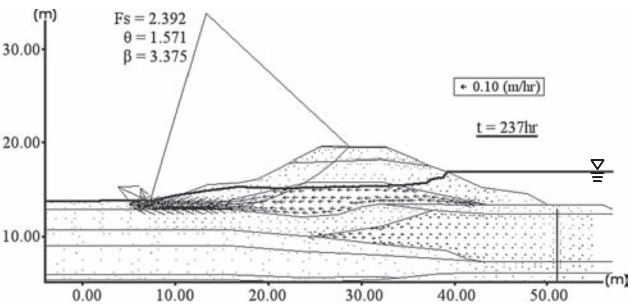
5．解析結果

5.1　中央安全率と信頼性指標

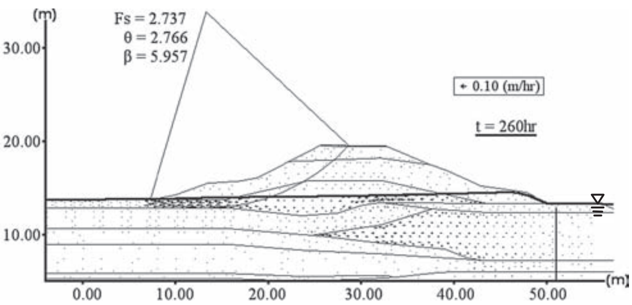
任意の時間の単一すべり面に対する全体破壊の結果を Fig. 8 に示す。Fig. 8 には，円弧すべり法より求めた安全率 Fs，SFEM により求めた中央安全率 θ（せん断強度及びせん断応力の平均値の比）及び信頼性指標 β を示す。また，浸透流解析より求めた流速ベクトルも示した，



(a) 130hr



(b) 237hr



(c) 260hr

Fig. 8　Results of SFEM analysis and flow velocity distribution

Fig. 9 に Fs と θ の経時変化図を示す。同図によると，全体的挙動についてはよく一致しているが，数値的には大きな差が見られる。その差は，河川水位が上昇するまでの時間帯の方が，下降する時間帯より顕著である。この原因は，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。

また，Fig. 10 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。

5.2　局所破壊確率

5.1 で示した時刻の局所破壊確率の分布のコンター図を，Fig.11 に示す。同図より，全体破壊のすべり面は，局所破壊確率が大きい区域の境界付近をとおることがわかる。

5.3　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を用いて Ep.(30) に従って β の経時変化を計算した。なお，計算は各土質定数の変動係数の最大，平均，最小値に対して行い，その際，その他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.12 より変動係数の小さい単位体積重量が β に与える

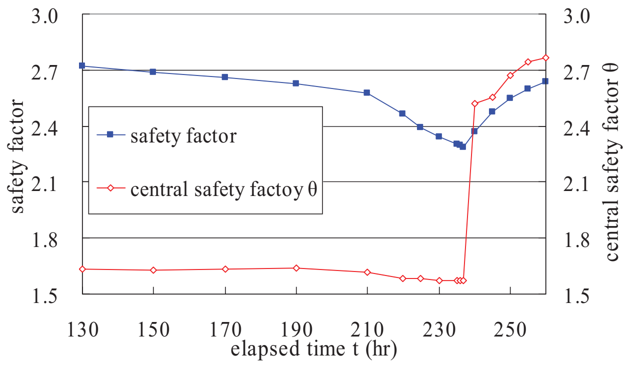


Fig. 9　Comparison between central safety factor and safety factor

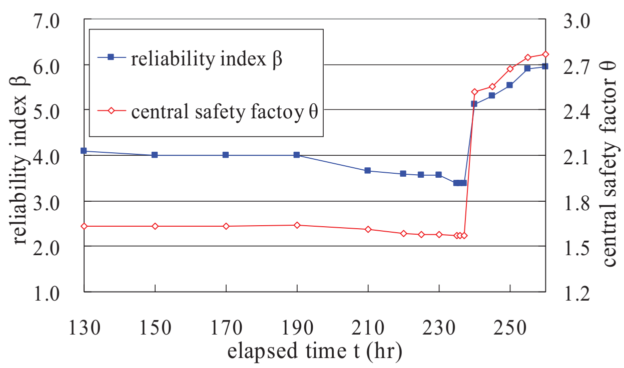


Fig. 10　Comparison between central safety factor and reliability index

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，本研究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，粘着力の変動の影響よりも内部摩擦角の変動がβに与える影響が大きい結果となった。

６．結論

本研究による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。

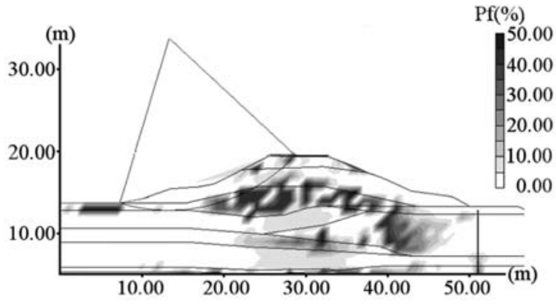
(2) 堤防の局所破壊確率の分布のコンター図を描くことにより，全体破壊のすべり面が，局所破壊確率が大きい区域の境界付近をとおることを明らかにできた。

(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。

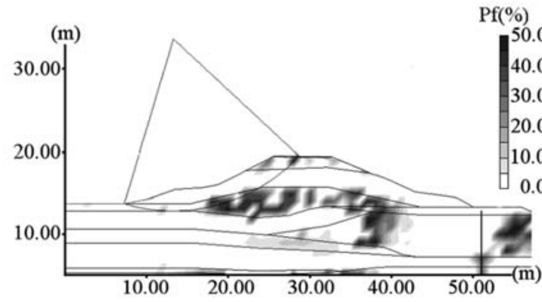
なお，今後の課題として，バラツキも大きく，浸透流解析結果（堤体内水位の時刻歴）にも大きく影響すると考えられる透水係数の不確定性に対する検討がある。また，本研究では地盤物性値の空間的バラツキについては完全相関と仮定したが，その仮定が堤防の信頼性指標に及ぼす影響についても検討を行う必要がある。

謝　辞

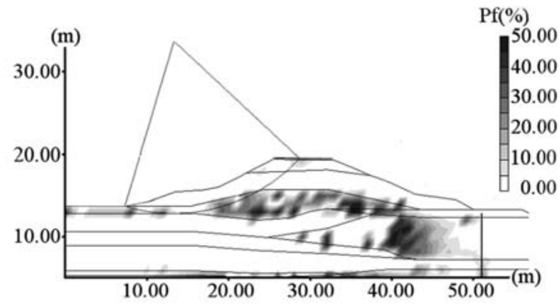
清水建設(株)技術研究所副所長　鈴木　誠氏には研究遂行上欠かせない解析プログラムを提供していただくなど，絶大なるご支援をいただいた。また，浸透流解析等においては，復建調査設計(株)東京支社支社長　吉浪　康行氏，復建調査設計(株)地盤環境部地盤環境課係長　清水　豊氏に多大なるご協力を賜った。記して深甚なる謝意を表したい。



(a) t = 130hr

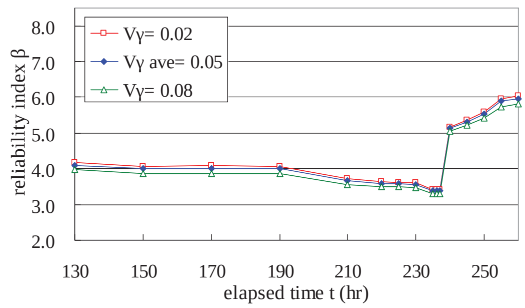


(b) t = 237hr

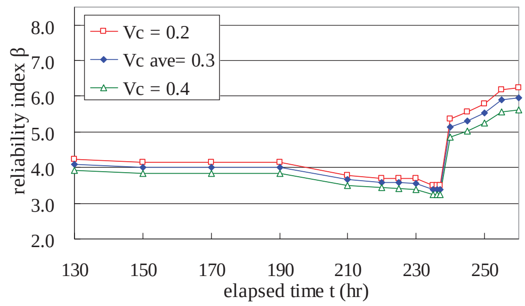


(c) t = 260hr

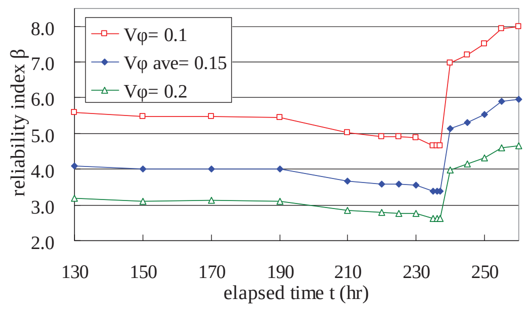
Fig. 11　Contour diagram of local failure probability



(a) Unit weight



(b) Cohesion



(c) Internal friction angle

Fig. 12　Effects of the coefficients of variations on reliability index

参考文献

1）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方，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.

6）（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.

7）国土交通省港湾局　監修：港湾施設の技術上の基準・同解説（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.