

## 浸透による河川堤防の安全性に関する確率論的アプローチ

Probabilistic approach to evaluate the safety of a levee for the seepage at the torrential rain

清水 豊\*, 吉浪康行\*\*, 市川勇人\*\*\*, 中山隆弘\*\*\*\*, 鈴木 誠\*\*\*\*\*  
Yutaka Shimizu, Yasuyuki Yoshinami, Hayato Ichikawa, Takahiro Nakayama, Makoto Suzuki

- \*工修, 復建調査設計(株), 地盤環境部地盤環境課 (〒732-0052 広島市東区光町 2-10-11)
- \*\*工博, 復建調査設計(株), 水工技術部 (〒732-0052 広島市東区光町 2-10-11)
- \*\*\*広島工業大学大学院博士前期課程 (〒731-5193 広島市佐伯区三宅 2-1-1)
- \*\*\*\*工博, 広島工業大学, 工学部都市建設工学科 (〒731-5193 広島市佐伯区三宅 2-1-1)
- \*\*\*\*\*工博, 清水建設(株), 技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17)

At the present time, the safety of a levee for the seepage at the torrential rain is generally evaluated by a safety factor based upon the deterministic slope failure method. In the method, the physical parameters of soil of the levee are treated as deterministic values. However, it is very difficult to determine the parameters deterministically because of uncertainty. In such case, it is desirable to consider the parameters as random variables, and moreover to evaluate the safety using the safety index instead of using the safety factor.

In this study, two approaches were adopted. One is the traditional deterministic method and the other is the probabilistic method based upon the stochastic finite element method.

As a result, it was shown that the probabilistic approach is a efficient way to estimate the safety of the levee compared to the deterministic approach.

*Key Words: River dike, seepage flow analysis, reliability based design, safety index*

キーワード: 河川堤防, 浸透流解析, 信頼性設計, 安全性指標

### 1. はじめに

豪雨時等の河川水位上昇等に伴う河川堤防の浸透に対するすべり破壊の安全性照査においては、現行設計では土質定数等のパラメータを確定値として取り扱うことが一般的であり、その安全性も安全率で評価されている。また、照査される限界状態も明確でないことから堤防の安全性を定量的に評価しているとは言い難い。

これに対して、信頼性設計法は、各種パラメータを確率変数として取り扱い、照査すべき限界状態を明確にすることで、想定する破壊が発生しないことを確率的に定量的評価ができる。加えて、国際規格に対する整合性も求められており、港湾基準<sup>1)</sup>等においても既に導入が図られている。

よって、河川堤防の浸透に対するすべり破壊安全性照査に信頼性設計法を導入することは有意義なことである

と考えるが、破壊確率と現行の安全率との関係についてはいまだ不明確な部分が多く、また、信頼性設計法の河川堤防への適用についても、これまでほとんど議論されていないのが現状である。

本研究では確定論的手法と確率論的手法の両手法により安全性の検討を行うことで、今後、河川堤防の浸透すべり破壊の安全性照査に対する確率論的評価の適用性について検討を行う上での基礎資料とすることを目的とした。

### 2. 解析方法

#### (1) 円弧すべり法(簡便分割法)

河川堤防の浸透すべり破壊における安全率  $F_s$  を算定する方法として、現行設計では図-1 と式(1)に示す簡便分割法(以下、従来法と称す)を用いている。

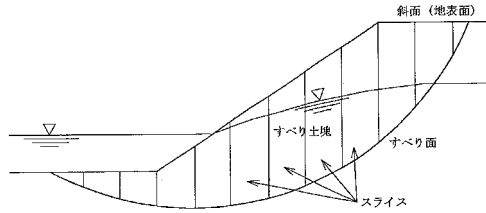


図-1 円弧すべり面

$$Fs = \frac{c \cdot l + (W - u \cdot b) \cdot \cos \alpha \cdot \tan \phi}{W \sin \alpha} \quad (1)$$

$Fs$ : 安全率,  $c$ : 土の粘着力,  $\phi$ : 土の内部摩擦角,  
 $W$ : スライス全重量,  $b$ : スライス幅,  
 $u$ : スライス底面に作用する間隙水圧,  
 $\alpha$ : スライス底面に立てた垂線と鉛直線のなす角,  
 $l$ : すべり円弧の半径,

## (2) 確率有限要素法(SFEM)

FEM 解析は各要素間の応力の伝達を考えた解析法であり、複数の材料特性あるいは境界条件の複雑な変化等を容易に取り扱うことができるので、地盤工学においても有効な手法として広く一般に用いられている。ただ、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計算している。しかしながら、安定問題などでは材料強度など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(SFEM)が開発された。この方法によれば、破壊を定義する性能関数を定めることにより、各要素の破壊確率及び単一すべり面における全体破壊確率を求めることができる。

さて、単一すべり面に対する全体破壊の性能関数  $G$  とその際に用いる局所破壊に対する性能関数  $g_i$  を式(3)と式(2)で定義する。まず、要素  $i$  のせん断破壊に関する性能関数  $g_i$  については、よく用いられている方法であるすべり面上の垂直応力  $\sigma$  が変化しないと仮定する方法、すなわち、すべり面の方向を定めるために水平面からの角度を用いれば、クーロンの破壊基準により式(2)で定義できる。

$$g_i = \tau_{fi} - \tau_i = c_i + \sigma_i \tan \phi_i - \tau_i \quad (2)$$

ここに、

$f_i$ : 破壊面でのせん断強さ(kN/m<sup>2</sup>)

$i$ : 潜在すべり面としての層理面上のせん断強さ(kN/m<sup>2</sup>)

$i$ : 潜在すべり面としての層理面上の垂直応力(kN/m<sup>2</sup>)

$c_i$ : 粘着力(kN/m<sup>2</sup>),  $\phi_i$ : せん断抵抗角(rad)

また、仮定した単一すべり面に対する全体破壊の性能関数  $G$  は、式(3)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  $g_i$  とすべり面の長さの積をすべり面全体で加算することで表し、安全性指標  $\beta$  は式(4)によって求める。

$$G = \sum g_i A \ell_i \quad (3)$$

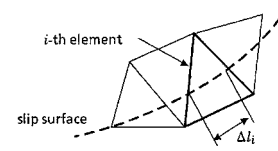


図-2 要素を横切るすべり面

$$\beta = E[G] / (\text{Var}[G])^{1/2} \quad (4)$$

ここに、 $E[G]$ :  $G$  に対する平均値

$\text{Var}[G]$ :  $G$  に対する分散

## 3. 解析内容

### 3.1 解析概要

本研究では、河川堤防の浸透すべり破壊の安全性に対する確率論的評価を行うため、以下の2ケースの解析を行った。

CASE1: 簡易モデルに対する解析

CASE2: 実堤防モデルに対する解析

CASE1 は解析手法の適用性を確認するためのもので、基礎地盤と堤体の2層構成からなる簡易モデルに対する解析である。従来法と FEM との安全率の比較を行うとともに、SFEM を用いて安全性指標  $\beta$  による評価も行った。

一方、CASE2 は実際の堤防モデルに対する同様の解析である。

なお、両ケースとも、後述する降雨及び河川水位の経時変化を外力条件として浸透流解析を行い、得られた任意時間の地盤内水位を水位条件として、すべり破壊解析を行った。また、今回は、すべり方向として、裏のり(堤内地側)に対する解析を行った。

### 3.2 解析条件

#### (1) 解析モデル

各解析に用いる解析モデルを図-3、4に示す。

図-3の簡易モデルは、堤体を砂、基礎地盤を砂礫と設定し、土質定数も一般的な値を設定した。図-4の実堤防モデルについては、実際の堤防モデルに対して設定した土質定数を用いた。なお、図中の土質定数(単位体積重量  $\gamma$ 、粘着力  $c$ 、内部摩擦角  $\phi$ )の値はすべて平均値であり、従来法と FEM で同じ値を用いた。また、変動係数については次の通りである。単位体積重量については、一般にバラツキが小さく、 $V_\gamma = 0.02 \sim 0.08$  程度といわれている<sup>2)</sup>ことから平均値  $V_\gamma \text{ave} = 0.05$  及び最小、最大値  $0.02, 0.08$  とし、粘着力  $c$  については、 $V_c = 0.2 \sim 0.4$  程度といわれている<sup>2)</sup>ことから平均値  $V_c \text{ave} = 0.3$  及び最小、最大値  $0.2, 0.4$  とした。最後に、内部摩擦角  $\phi$  については、 $V_\phi = 0.1 \sim 0.2$  程度といわれている<sup>2)</sup>ことから平均値  $V_\phi \text{ave} = 0.15$  及び最小、最大値  $0.1, 0.2$  とした。

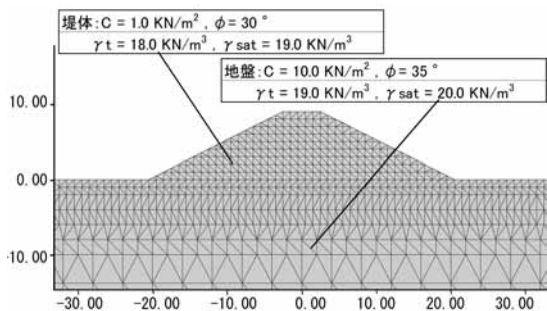


図-3 解析モデル(CASE1)

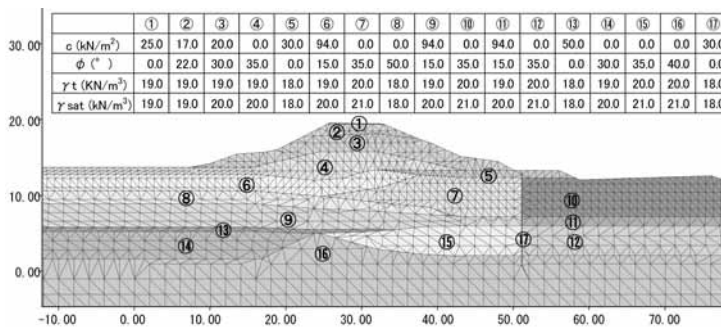


図-4 解析モデル(CASE2)

## (2) 外力条件

各ケースの水位条件を決定するための浸透流解析を行う上で、必要な外力条件（水位、降雨）の時刻歴を図-5, 6 に示す。水位は約 200hr かけて最高水位に上昇し、その後約 14hr かけて初期水位へ下降する条件とした。また、降雨は約 200hr 程度、1mm/hr の降雨とした後、約 30hr 程度、10mm/hr の降雨を設定した。

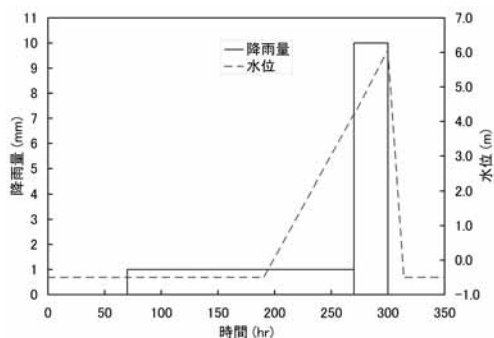


図-5 外力条件(CASE1)

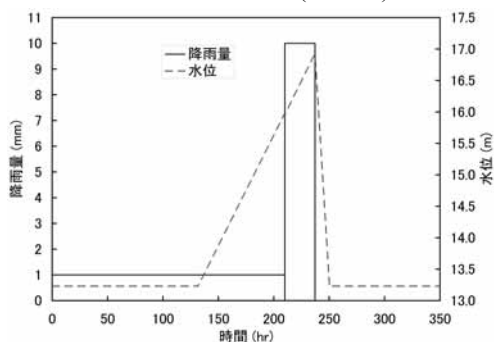


図-6 外力条件(CASE2)

## 4. 解析結果

各ケースの解析結果を以下に示す。

### 4.1 簡易モデルに対する解析結果

簡易モデルである CASE1 について解析した結果を以下に示す。

#### (1) FEM による安全率 $F_s$ と SFEM による安全性指標 $\beta$ の算出結果

図-7 に CASE1 の簡易モデルにおける代表的な3つの水位状態（河川水位上昇前(t=190hr)、河川水位最高時(t=300hr)、河川水位下降後(t=320hr)）と、その水位状

態における FEM 解析による安全率  $F_s$ , SFEM 解析による安全性指標  $\beta$  の結果を示す。

なお、堤体内の水位状態については、堤体の透水係数が  $k=10^{-1} \text{cm/s}$  と設定していることから、河川水位の上昇に伴い堤体内の水位も上昇し、河川水位の下降に伴い、即座に堤体内の水位も下降している。

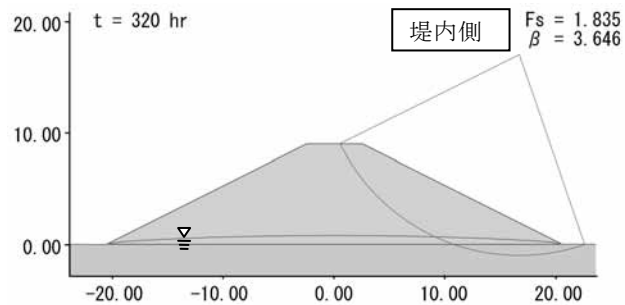
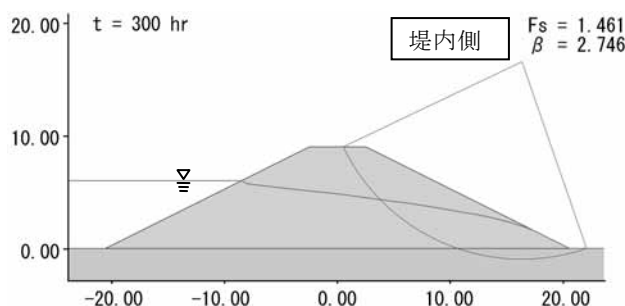
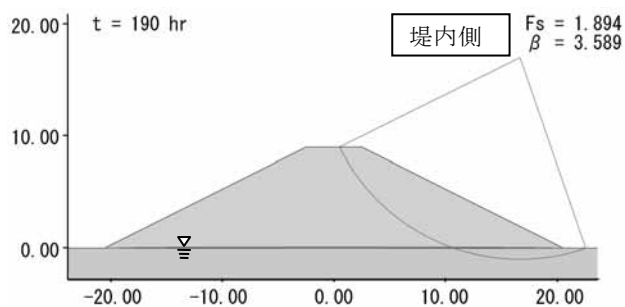


図-7 すべり破壊解析結果(CASE1)

同図によると、安全率  $F_s$  については、堤体内水位の上昇に伴い  $F_s$  は小さくなり、下降すると大きくなる傾向にある。一方、安全性指標  $\beta$  についても、 $F_s$  と同様の傾向を示している。

**(2) FEM 及び従来法から得られた安全率  $F_s$  の比較**

図-8 に従来法と FEM から求めた  $F_s$  の経時的な比較結果を示す。なお、従来法と FEM の円弧すべりは同じ形状とした。

全解析時間をとおして、FEM から得られた  $F_s$  の方が従来法より得られた  $F_s$  より若干大きいものの、 $F_s$  の挙動については同様の傾向を示している。これにより、すべり破壊に対する安全率の算定における FEM の適用性が確認される。

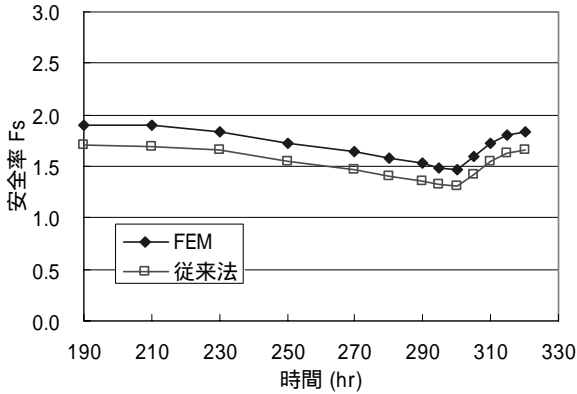


図-8 FEM と従来法の比較(CASE1)

**(3) FEM による安全率  $F_s$  と SFEM による安全性指標  $\beta$  の比較**

図-9 に、FEM から求めた安全率  $F_s$  と SFEM から求めた安全性指標  $\beta$  の経時的な比較結果を示す。なお  $\beta$  は土質定数の変動係数が、単位体積重量は 0.05, 粘着力  $c$  は 0.3, 内部摩擦角  $\phi$  は 0.15 の場合の結果である。

同図より、安全率  $F_s$  と安全性指標  $\beta$  の傾向は良く一致していることがわかる。また、 $F_s$  が 1.4~1.9 の間で変化しているのに対応して、 $\beta$  も 2.7~3.7 の値を示している。

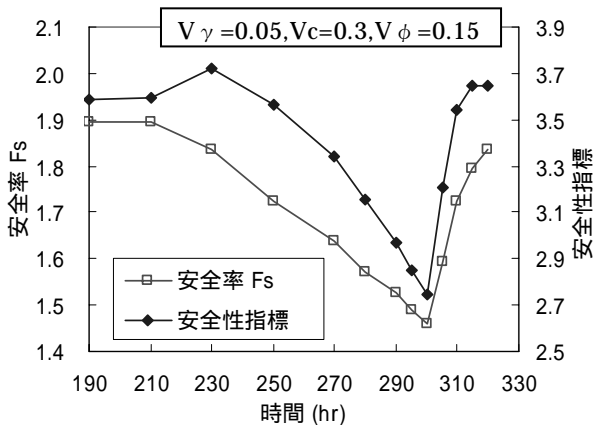


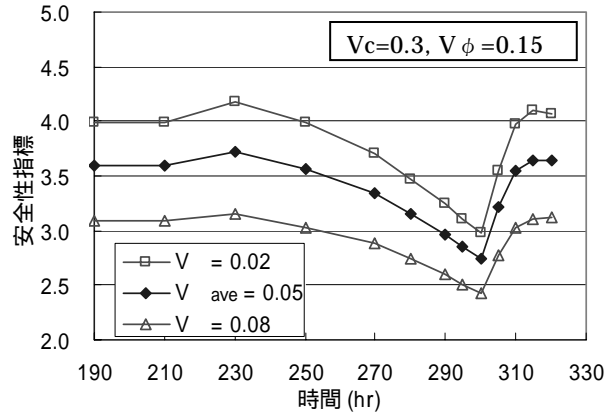
図-9 安全率  $F_s$  と安全性指標  $\beta$  の比較(CASE1)

**(4) 安全性指標  $\beta$  に及ぼす設計因子の影響**

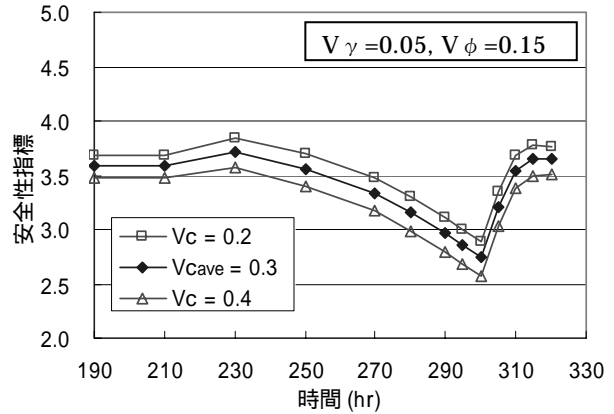
単位体積重量、粘着力及び内部摩擦角について、各々の変動係数の違いによる安全性指標  $\beta$  に対する影響度を

把握するため、3.2 で述べた変動係数を用いた解析を行った。各解析結果を図-10 に示す。

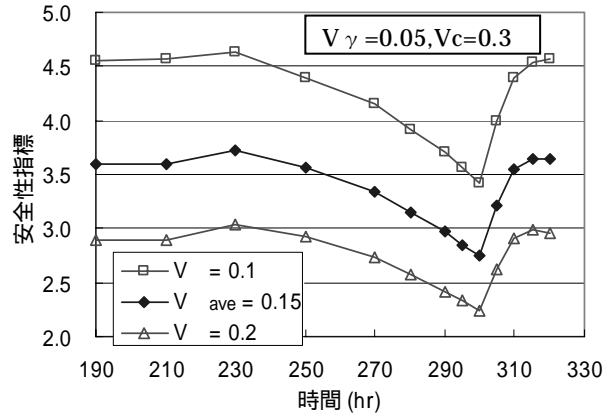
同図によると、変動係数の違いによる安全性指標  $\beta$  の変動幅は土質定数によって異なり、内部摩擦角の変動係数の違いが  $\beta$  に及ぼす影響がもっとも大きく、粘着力の変動係数の影響がもっとも小さくなっている。これは、解析モデルにおいて、すべり面がとおる土層の地盤強度がほとんど内部摩擦角  $\phi$  で決まることによるものと考えられる。



(a)単位体積重量



(b)粘着力



(c)内部摩擦角

図-10 安全性指標  $\beta$  に及ぼす設計因子の影響(CASE1)

#### 4.2 実堤防モデルに対する解析結果

実際の堤防モデルを用いた CASE2 の解析結果を以下に示す。

##### (1) FEM による安全率 $F_s$ と SFEM による安全性指標 $\beta$ 算出結果

まず図-11 に CASE2 の実堤防モデルにおける河川水位上昇前( $t=130\text{hr}$ )、河川水位最高時( $t=237\text{hr}$ )、河川水位下降後( $t=255\text{hr}$ )の水位状態と FEM 解析による安全率  $F_s$ 、安全性指標  $\beta$  の結果を示す。

同図によると、CASE1 と同様に河川水位の上昇下降に伴い、堤体内の水位も上昇下降している。また、安全率  $F_s$  についても、堤体内水位の上昇に伴い  $F_s$  は小さくなり、下降すると大きくなる傾向にあることがわかる。一方、安全性指標  $\beta$  についても、 $F_s$  と同様の傾向を示している。

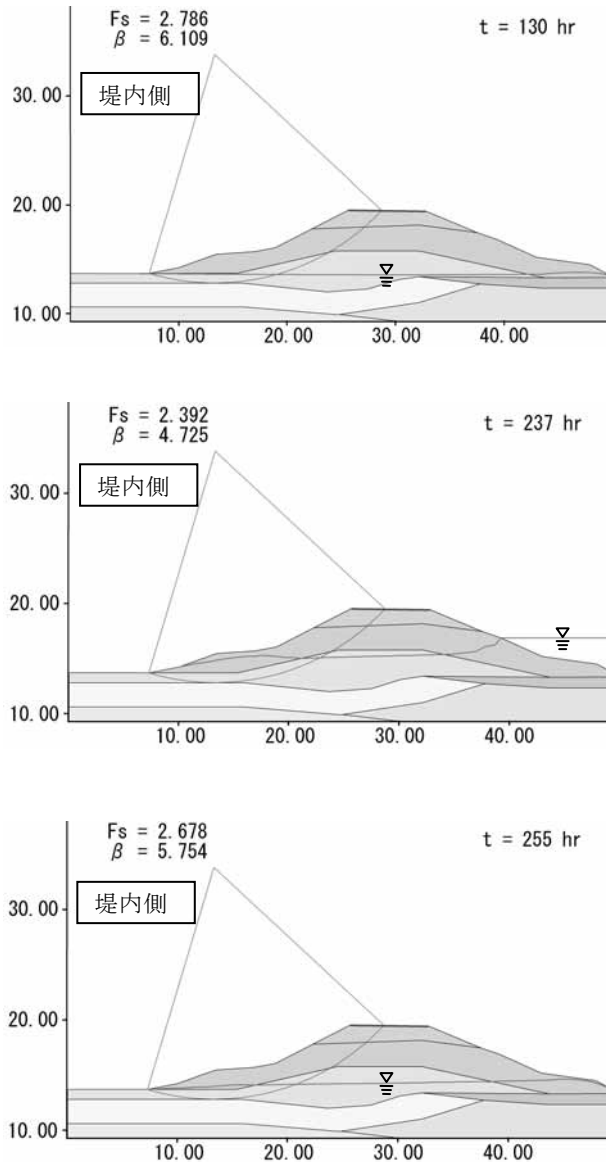


図-11 すべり破壊解析結果(CASE2) 向を示している。

##### (2) FEM 及び従来法から得られた安全率 $F_s$ の比較

図-12 に従来法と FEM から求めた  $F_s$  の経時的な比較結果を示す。

CASE1 と同様に全解析時間をとおして、FEM から得られた  $F_s$  の方が従来法より得られた  $F_s$  より若干大きいものの、 $F_s$  の挙動については同様の傾向を示している。これにより、実際の堤防に対しても、すべり破壊に対する安全率の算定における FEM の適用性が確認できたと考えている。

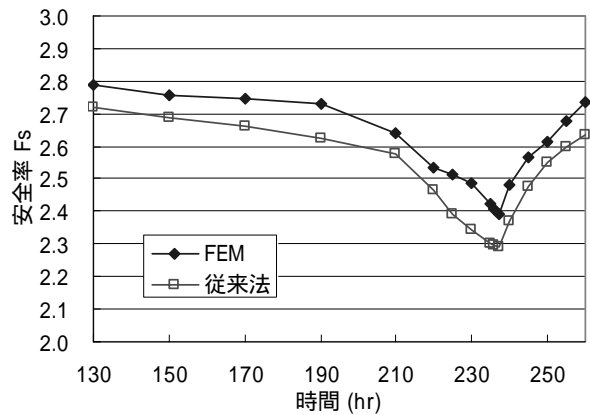


図-12 FEM と従来法の比較(CASE2)

##### (3) FEM による安全率 $F_s$ と SFEM による安全性指標 $\beta$ の比較

図-13 に、FEM から求めた安全率  $F_s$  と安全性指標  $\beta$  の経時的な比較結果を示す。

CASE1 と同様に、安全率  $F_s$  と安全性指標  $\beta$  の挙動は良く一致していることがわかる。また、 $F_s$  が 2.4~2.8 の間で変化しているのに対応して、 $\beta$  は 4.7~5.9 の値を示している。

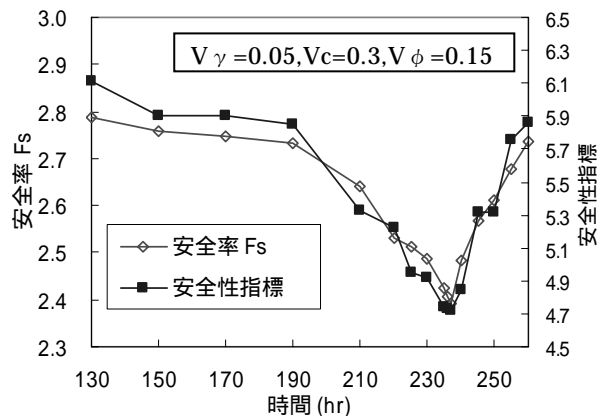


図-13 安全率  $F_s$  と安全性指標  $\beta$  の比較(CASE2)

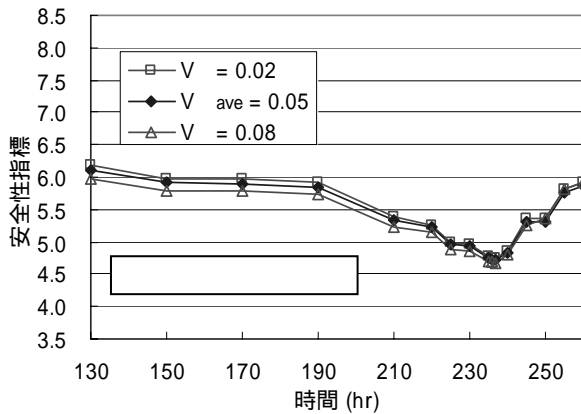
##### (4) 安全性指標 $\beta$ に及ぼす設計因子の影響

CASE1 と同様に、実際の堤防モデルに対して単位体積重量、粘着力及び内部摩擦角の各変動係数の違いが安全性指標  $\beta$  に及ぼす影響を図-14 に示す。

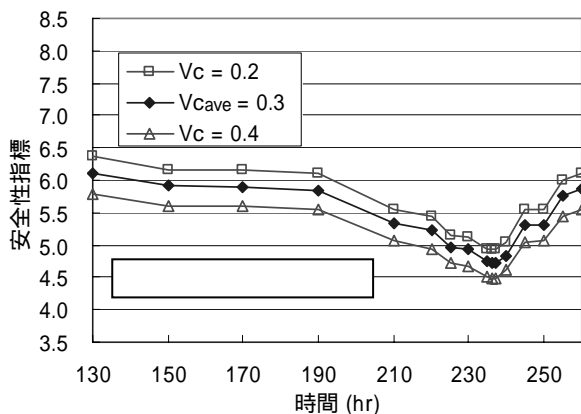
同図によると、安全性指標  $\beta$  の変動幅に及ぼす変動係

数については、内部摩擦角が一番大きく、単位体積重量が最も小さくなっていることがわかる。この理由は前述の通り、すべり面が通る土層の地盤強度がほとんど内部摩擦角 $\phi$ で決まることによるものと考えられる。

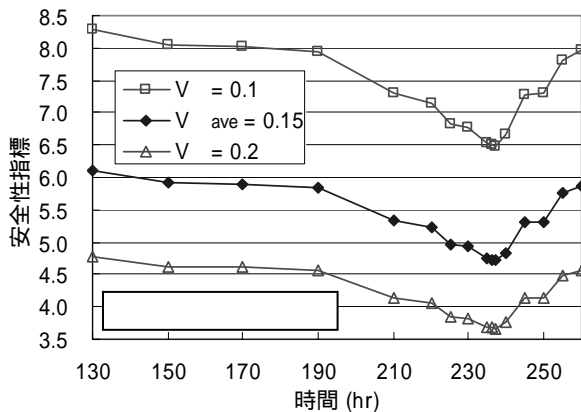
これにより、土質定数の変動係数のみを取り上げても安全性指標値に与える影響が大きいことがわかった。故に、現行法より信頼性設計法の方が堤防の安全性を評価する上で、より有効的であると判断され、導入への基礎資料となった。



(a)単位体積重量



(b)粘着力



(c)内部摩擦角

図-14 安全性指標 $\beta$ に及ぼす設計因子の影響(CASE2)

## 5. まとめ

本研究は、河川堤防の浸透に対するすべり破壊の安全性照査への信頼性設計の適用性を検討するため、SFEMを用いて安全性指標 $\beta$ による評価を行ったものである。得られた知見をまとめると以下のとおりである。

- (a)河川堤防の浸透すべり破壊に対して、従来法による安全率とFEMによる安全率はよく一致したことから、FEMによる安全率の算定法の妥当性が確認できた。
- (b)降雨及び河川水位の外力条件を経時的に変化させて行ったFEMとSFEMの計算結果より、安全率 $F_s$ と安全性指標 $\beta$ の相関は良く一致した。
- (c)安全性指標 $\beta$ に対するパラメータの変動係数の影響を把握するため、単位体積重量、粘着力及び内部摩擦角について一般的な変動係数の範囲内の値を用いて $\beta$ を算出・比較検討を行い、 $\beta$ への影響度等に関する考察を行った。
- (d)実際の河川堤防モデルを用いた解析を行った結果、簡易な想定モデルで解析した結果と同様の傾向が得られたことから、FEM及びSFEMの実際の河川堤防への適用性についても確認することができた。
- (e)今回の報告では、各種パラメータのうち土質定数のみを確率変数として取り扱い、信頼性解析を行ったが、今後の課題としては、透水係数あるいは河川水位をも確率変数として取り扱い、信頼性理論による河川堤防の安全性評価をより完全なものとして行きたい。

## 参考文献

- 1)国土交通省港湾局 監修：港湾の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。
- 2)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。
- 3)長瀬迪夫，白井勝二，瀬川明久，福成孝三：河川堤防学，山海堂，2007。
- 4)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/Ⅲ-4，pp.199-208，1985。
- 5)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。

(2008年8月22日受付)