

信頼性指標による河川堤防の浸潤破壊に対する安全性評価

Evaluation of the safety of levees against seepage flow based on reliability index

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

*工修, 復建調査設計(株), 水工技術部河川技術課 (〒732-0052 広島市東区光町 2-10-11)
**工博, 復建調査設計(株), 東京支社 (〒101-0032 東京都千代田区岩本町 3-8-15)
***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, 広島工業大学, 工学部都市デザイン工学科 (〒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)

To date, the stability of levees has been evaluated by seepage flow analysis and circular arc method based on the safety factor. However, it is necessary to evaluate the safety of levees based on the reliability index if it thinks about the uncertainty of the resistance of levees. In this study, the uncertainty of the geotechnical properties of levees was quantitatively evaluated by stochastic finite element method, and the probabilistic estimates were performed for the local failure and the global failure of levees in consideration of the force of seepage flow. As a result, the safety margin was able to be clarified according to the failure probability and/or the reliability index.

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

キーワード: 河川堤防, 浸透力, 円弧すべり法, 安全率, 確率有限要素法, 信頼性指標

1. 序論

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、内部の地下水流による堤体の安定性あるいは不安定性については、本来、地下水流や堤体の盛土としての抵抗力の不確実性を定量的に評価できる手法を用いた方が望ましい。

著者らは前論文¹⁾において、浸潤破壊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。

ただ、ここでは、従来の安全率に代えて信頼性指標によって安全性を論ずることができるとの結論を得ることができたものの、浸透力が堤防の破壊確率に及ぼす影響に

ついては無視していた。

そこで本研究では、新たに浸透力を考慮した場合を加えた解析を行い、それが信頼性指標等に及ぼす影響について検討を行った。

なお、地下水流の不確実性については、堤体の安全性を確率論的に論ずる上で重要な問題のひとつではあるが、本研究では考慮していない。

2. 確率有限要素法による河川堤防の安全性評価

2.1 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特性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^{2), 3)}。

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 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 Eq. (1) で定義できる。

$$g_i = \tau_{fi} - \tau_i = c_i + \sigma_i \tan \phi_i - \tau_i \quad (1)$$

式中、 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)、 c_i : 粘着力 (kN/m^2)、(なお各変数は正規分布に従う)。

このとき、要素 i の局所破壊に対する信頼性指標は破壊まわりでテーラー展開し、二次以降の項を無視して g_i の線形近似式を得ることにより求めることができる。

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

式中、 $E[g_i]$: g_i の平均値、 $Var[g_i]$: g_i の分散である。

また、破壊確率 P_{fi} は標準正規確率分布関数 Φ によって Eq. (3) で表される。

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

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 Eq. (4) で定義する。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、Eq. (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 Δl_i の積をすべり面全体で加算することで表される。

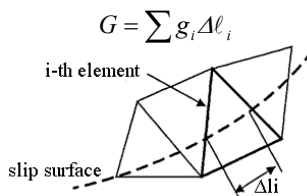
$$G = \sum g_i \Delta l_i \quad (4)$$


図 - 1 要素内を通るすべり面

信頼性指標 β は Eq. (5) によって得られる。

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

破壊確率 P_f は信頼性指標 β から Eq. (6) で表される。

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad (6)$$

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 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、Eq. (7) のようになる。

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

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

$$\left. \begin{aligned} X &= -\frac{\gamma_w}{2\Delta} \left\{ (y_i - y_m)H_i + (y_m - y_j)H_j + (y_j - y_i)H_m \right\} \\ Y &= -\frac{\gamma_w}{2\Delta} \left\{ (x_m - x_i)H_i + (x_i - x_m)H_j + (x_j - x_i)H_m \right\} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中、 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。

2.5 解析手順

解析手順は図 - 2 の通りである。まず、解析モデルと降雨モデルに対して浸透流解析の時系列解析を実施する。次にそれによって得られた各時刻歴の地下水位と流速ベクトルを考慮して、地盤パラメータの不確実性を考慮した確率有限要素法による解析を実施する。その際、本研究では、すべり円弧の中心座標及び半径については、フローの右側に示す通り、円弧すべり法により算出したものを用いている。なお、円弧すべり法による解析については、今回は信頼性の点で評価されている市販のプログラム(ニタコンサルタント開発 SAUSE)を用いている。

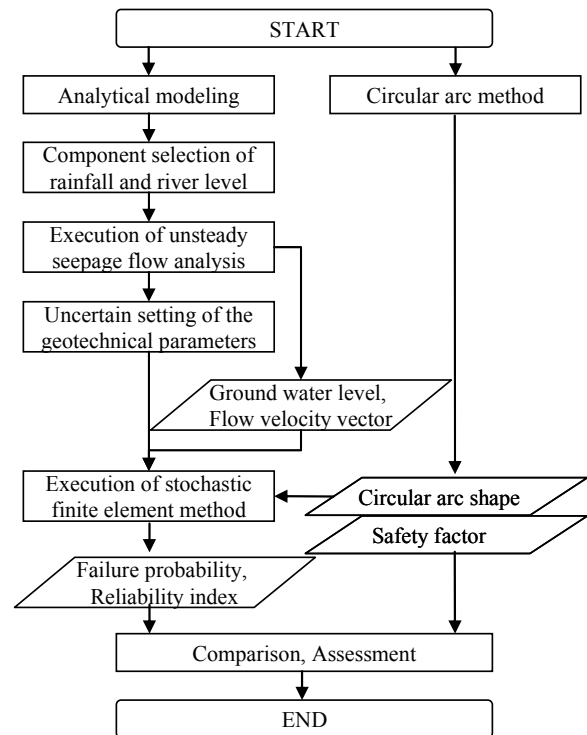


図 - 2 解析フローチャート

このフローにより、局所破壊と全体破壊に対する安全性余裕を、破壊確率 P_f あるいは信頼性指標 によって確率論的に評価できる。同時に、地盤パラメータの平均値を用いた解析により、堤防の中央安全率 も評価できる。なお、本論文では、この中央安全率に対して、円弧すべり法により算出した従来の安全率を F_s とし、両者を区別している。

3. 解析概要

3.1 解析モデル

解析モデルは簡易モデルと実堤防モデルの二つである。まず、簡易モデルを用いて本研究の解析プログラムの有効性を示し、実堤防についても有効であるか検証するために実堤防モデルも用意した。

(1) 簡易モデル

簡易モデルを図 - 3 に示す。堤体・基礎地盤共に一層の単純なモデルである。また、地盤物性値の平均を図中に示す。有限要素は三角形定ひずみ要素で、要素数は 2475 である。今回確率変数とした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⁾を参考にして表 - 1 の通り設定した。

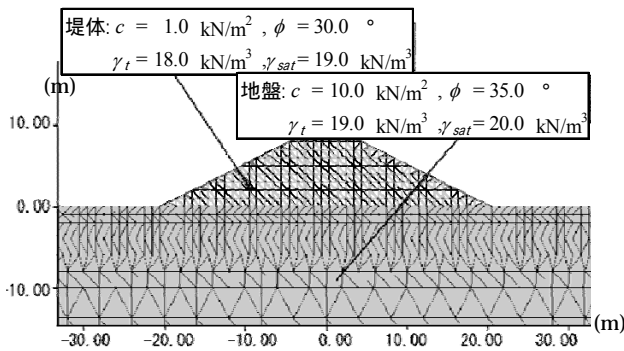


図 - 3 簡易モデル

表 - 1 各地盤物性値の変動係数

	変動係数
単位体積重量()	0.05
粘着力(c)	0.3
内部摩擦角()	0.15

(2) 実堤防モデル

図 - 4 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、表 - 2 は各地盤物性値の平均値である。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簡易モデルと同様、表 - 1 を用いた。

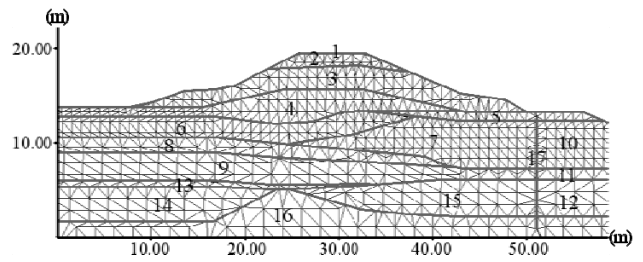


図 - 4 実堤防モデル

表 - 2 地盤物性値

	γ_t (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	c (kN/m ²)	ϕ (°)	k (kN/m ³)
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	18.0	18.0	30.0	0.0	1.0×10^{-1}
17	20.0	21.0	0.0	40.0	1.0×10^{-6}

3.2 降雨モデル

図 5 および図 - 6 に示した浸透流解析に必要な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。

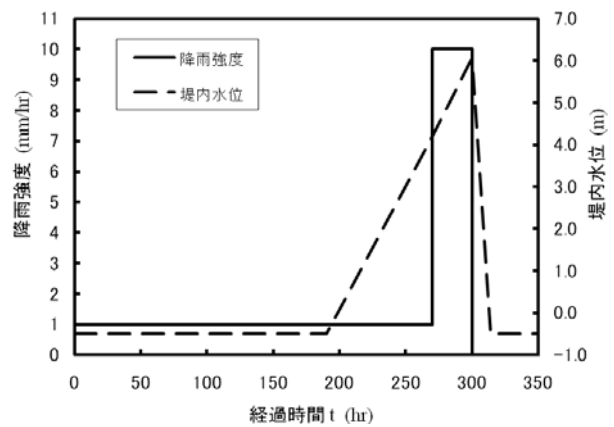


図 - 5 簡易モデルの降雨モデル

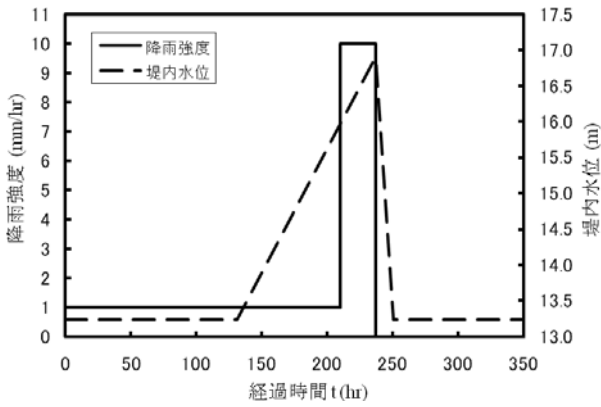


図 - 6 実堤防モデルの降雨モデル

4. 解析結果

4.1 実堤防モデルの局所破壊確率とすべり円弧

図 - 7 に実堤防モデルにおける $t = 237\text{hr}$ の局所破壊確率の分布のコンター図を示す。図中、実線で示した円弧は、円弧すべり法において安全率が最小となる時の円弧で、破線の円弧は、浸透力を考慮した確率有限要素解析（本論文では SFEM2 と称している）において、同じく安全率が最小となる時の円弧である。円弧の中心の座標 (X,Y), 半径(m), 安全率はそれぞれ次の通りである。

円弧すべり法：

(13.31, 33.85), 21.00, 2.289

SFEM2 による方法：

(13.81, 34.35), 21.50, 2.164

同図より、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、最小値となる円弧の形状（中心座標・半径）にもあまり差がないことがわかる。

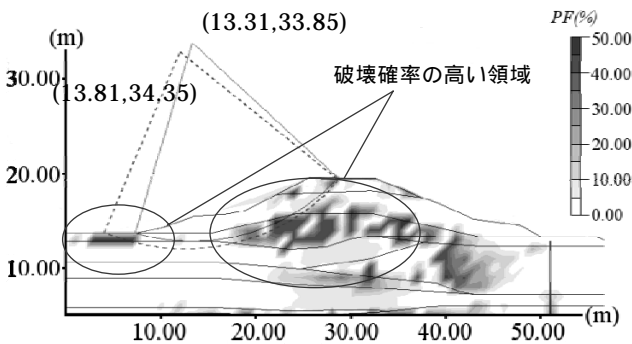


図 - 7 局所破壊確率のコンター図 ($t = 237\text{hr}$)

4.2 簡易モデルに対する解析結果

図 - 8 に降雨時における堤防の円弧すべり法による算出された安全率 F_s と確率有限要素法により算出された中央安全率 θ の経時変化を示す。図中の SFEM1 が浸透力を考慮しない場合、SFEM2 が浸透力を考慮した場合の解析結果である。図より、円弧すべり法と SFEM1 につ

いては安全率に差はあるが、その時間的変化の傾向についてはよく一致している。なお、SAUSE による解析に対し、SFEM2 によれば、水位上昇に伴う安全率の低下が顕著である。したがって、本解析モデルに関する限り、その安全性評価において浸透力の影響を無視し得ないと言える。

次に図 - 9 に、SFEM1 と SFEM2 で評価した信頼性指標の経時変化を示す。この図からも、特に水位の上昇における信頼性指標の降下に浸透力が及ぼす影響が顕著であることが分かる。

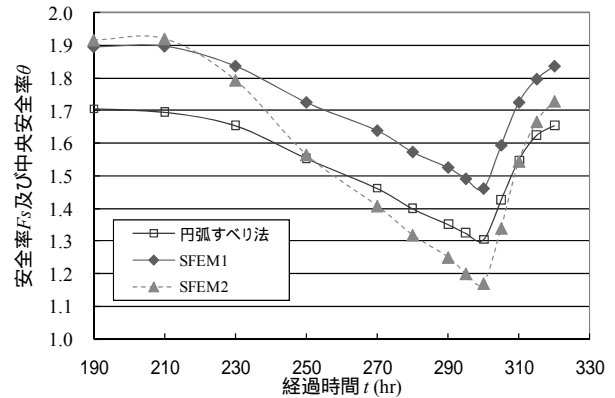


図 - 8 安全率の経時変化

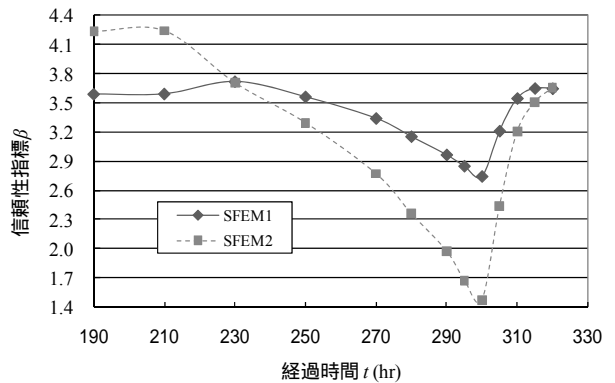


図 - 9 信頼性指標の経時変化

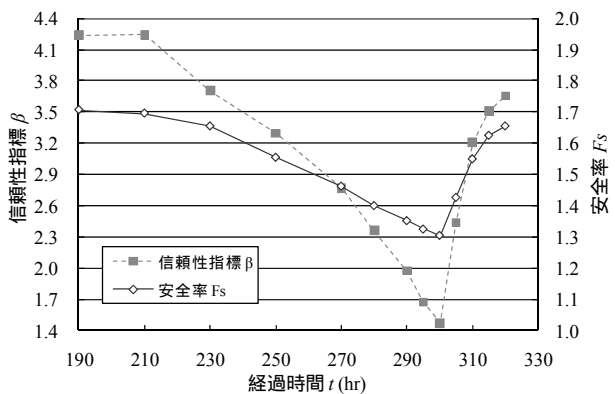


図 - 10 安全率と信頼性指標の比較

図 - 10 は、円弧すべり法による安全率 F_s と SFEM2 による信頼性指標の経時変化を示す。図より、従来の安全率 F_s と信頼性指標との経時変化の傾向がよく一致し

ていることが理解できる．このことは、安全率に頼らず信頼性指標によって堤体の安全性を十分に評価できることを表しているといえる。

4.3 河川水位と堤防の信頼性指標および安全率の関係

図 - 12 に簡易モデルに対する信頼性指標と河川水位/堤防高の関係を示す．解析に用いた降雨モデルは図 - 11 示す通りである．図より、この簡易モデルでは、堤防高まで河川水位が上昇した時、信頼性指標が大きく低下することが分かる．

SFEM2 による信頼性指標と円弧すべり法による安全率との関係については図 - 13 に示す．同図より従来から行われてきた円弧すべり法による安全率 F_s が 1.3 程度の場合、その信頼性指標は 1.4 程度となった．また、図 - 12, 13 より信頼性指標と安全率には高い相関性があることは明らかである．この結果は、従来の安全率に替えて信頼性指標によっても堤体の安全性を評価できることを意味している．

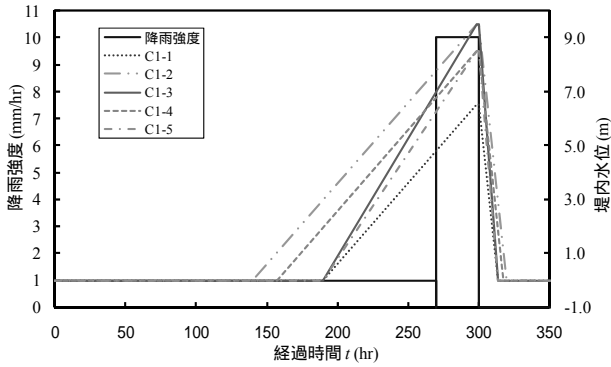


図 - 11 降雨モデル

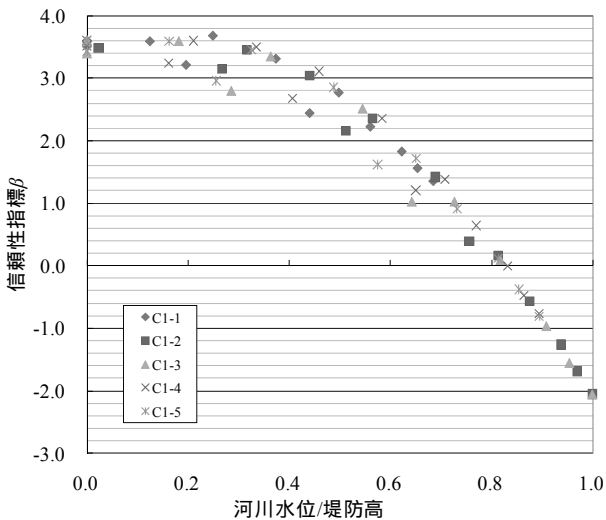


図 - 12 破壊確率と河川水位/堤防高の関係

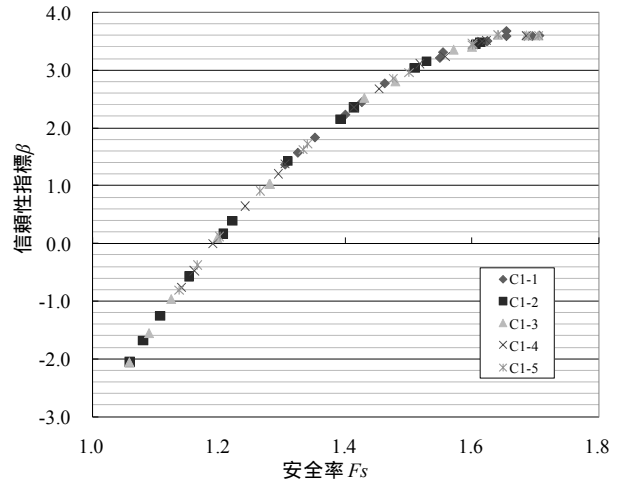


図 - 13 安全率と破壊確率の関係

4.4 実堤防モデルに対する解析結果

図 - 14 に安全率 F_s と中央安全率 θ の経時変化を示す．こちらでも簡易モデル同様、円弧すべり法と SFEM1 については安全率に差はあるが傾向についてはほぼ一致している．しかし、浸透力を考慮した SFEM2 での中央安全率 θ については、河川水位上昇時の傾向や安全率が最小となる時刻がやや異なっている．この原因としては、簡易モデルと違い、実堤防の場合は構成する地質分布が複雑であることに起因するものと考えている．

図 - 15 に SFEM1 と SFEM2 による信頼性指標 β の経時変化を示す．両者の傾向はよく一致しているが、図 - 14 同様に信頼性指標 β が最小となる時間がやや異なる結果が得られている．また、浸透力が信頼性指標に及ぼす影響が、簡易モデルほどには大きくないことが理解できる．この原因についても、実堤防の複雑な地質分布によるものと考えられる．

図 - 16 には円弧すべり法による安全率 F_s と SFEM2 により得られた信頼性指標の経時変化を示す．前述のように、信頼性指標が最小となる時刻にはやや差があるが、それぞれの経時変化の傾向はほぼ一致している．この結果より実堤防であっても、安全率に頼らず信頼性指標によって堤体の安全性を十分に評価できることを表しているといえる．

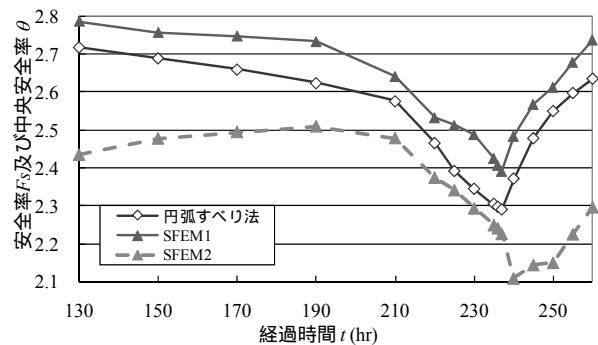


図 - 14 安全率の経時変化

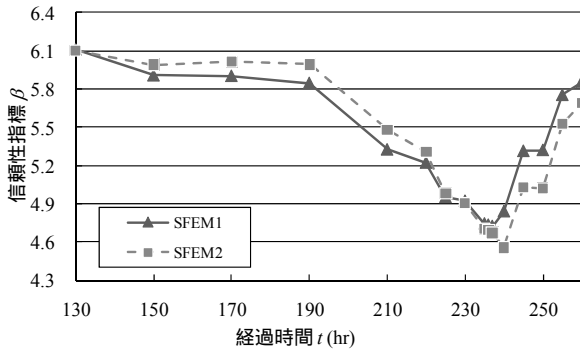


図 - 15 信頼性指標の経時変化

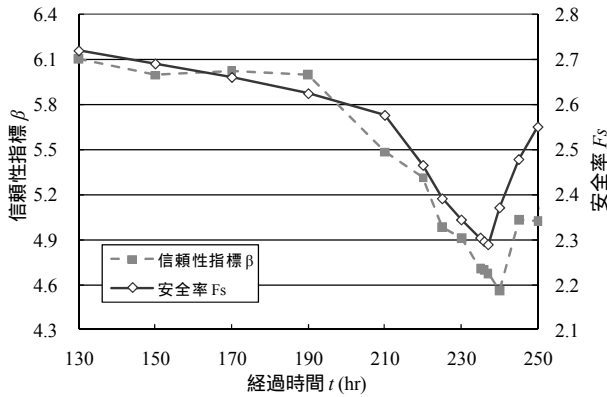


図 - 16 安全率と信頼性指標の比較

6. 結論

本研究の結論をまとめれば以下の通りである。

- (1) 堤防の局所破壊確率の分布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、円弧すべり法と SFEM で最小値となる円弧の形状（中心座標・半径）にあまり差がないことが明らかとなった。
- (2) 浸透力が堤防の安全性にかなり大きな影響を与える場合があることが明らかとなった。この影響は水位上昇時に特に顕著に表れており、浸透力を無視した解析では、堤防の安全性をやや過大に評価する場合がある。

- (3) 簡易モデルにおいて堤防の中央安全率 θ と信頼性指標 β の経時的変化を比較した結果、河川水位の上昇・下降によらず、ほぼ同じ傾向が得られた。また、信頼性指標 β と安全性 F_s には高い相関性があることが明らかとなった。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 で評価できる見通しが得られた。
- (4) 実堤防を想定したモデルでは、地質構成が複雑であるため浸透力の影響が顕著に表れる結果となった。そのため、信頼性指標 β の最小時刻は浸透力の影響で微妙に差異がでるが、堤体の安全性を十分評価できることが明らかとなった。

参考文献

- 1) 清水豊, 吉浪康行, 中山隆弘, 市川勇人, 鈴木誠: 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, 安全問題研究論文集, Vol.3, pp.29-34, 2008.
- 2) K. Ishii & M. Suzuki: Stochastic finite element method for slope stability, Structural Safety, 4, pp.111-129, 1987.
- 3) 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.
- 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, No.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) 星谷勝, 石井清: 構造物の信頼性設計法, 鹿島出版会, 1986.
- 8) 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.
- 9) 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, JCOSAR2000 論文集, pp.479-486, 2000.

(2010年8月6日受付)