

有限要素法によるため池堤体の地震時信頼性解析

Reliability analysis of irrigation tank embankment for earthquakes by finite element method

西村伸一 松浦 健

NISHIMURA Shin-ichi and MATSUURA Ken

1. はじめに

本報告では、有限要素法を利用したため池堤体の信頼性設計を行う。具体的には、ため池の改修（前刃金工法）を例とし、地震時の改修による防災効果について検討している。この課題に関して、有限要素法にモンテカルロ法を適用した方法を用いており、これまでは、非連成解法を用いてきた¹⁾。この方法は、モンテカルロ法等の計算負荷の大きい解析では有効であるが、地盤物性値の設定において、非排水・排水状態の別を厳密に規定できないため、曖昧さを生じる。従って、今回は、水・土連成解法を適用している。

表 - 1 N 値の空間的な統計モデル

Statistical models of spatial distribution of N-values

Parameter	Mean function	S.D.	N_e	C. D. (m)
N	$2.44 - 0.315 z$	1.26	0.77	$l_x = 9.26, l_z = 0.46$

x, z : horizontal and vertical coordinates.

S.D. = Standard deviation C. D. = Correlation distance

2. 強度定数の統計モデル

ここでは、解析対象ため池におけるスウェーデン式サウンディング試験結果を N

値に換算し、この結果を用いてパラメータの統計モデルを推定する。今回は、赤池の情報量基準AICを最小化する方法(MAIC)によって、N値の空間分布に関する統計モデルを求めている。岡山県内のため池で実施した試験結果を解析した結果、式(1)の、金塊効果を考慮した共分散関数が、最適な関数として選択された。決定された関数を表-1に示す。

$$C = [C_{jk}] = \left[N_e \sigma^2 \exp\left(-|x_j - x_k|/l_x - |z_j - z_k|/l_z\right) \right] \begin{cases} N_e = 1 & (j = k) \\ N_e \leq 1 & (j \neq k) \end{cases} \quad (1) \quad N_e: \text{金塊効果を表現する定数}$$

3. 弾粘塑性有限要素解析

本研究では、ため池の安定を評価する数値解析手法として、弾粘塑性有限要素法 (EV-FEM) を用いている。ここでは、支配方程式として、非関連流れ則に従う弾完全塑性モデルを用いることとする。また、要素の破壊条件として次のモール・クーロンの破壊基準を用いることとする。

$$\tau_f = c' + (\sigma - u) \tan \phi' = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (2)$$

ここで、 τ_f はせん断強度、 c' は有効粘着力、 σ は垂直全応力、 σ' は垂直有効応力、 u は間隙水圧、 ϕ' は有効内部摩擦角である。超過応力モデルに基づくと、粘塑性ひずみが式(3)で与えられる。

$$\dot{\epsilon}_{vp} = \gamma \langle \Phi(F) \rangle \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \quad (3) \quad \begin{cases} \langle \Phi(F) \rangle = 0 & (F < 0) \\ \langle \Phi(F) \rangle = \Phi(F) & (F \geq 0) \end{cases} \quad F = \tau - \tau_f \quad Q = k + \sigma' \tan \psi$$

表-2 解析に用いた材料定数 (Material parameters for analysis)

材質	湿潤密度 (kN/m ³)	粘着力 (kPa)	内部摩擦角 (°)	透水係数 (m/d)	ヤング率 (kPa)	ポアソン 比	ダイレイタ ンシー角(°)
f	20.0	12.45	$\phi = \sqrt{20N + 15}$	2.88×10^{-1}	$2,800N$	0.3	0.0
As	18.0	38.2	24.4	1.18×10^{-1}	12.0×10^3	0.3	0.0
Ac	15.0	12.5	19.5	1.47×10^{-1}	28.0×10^2	0.3	0.0
Ag-1	18.0	177.5	36.4	9.50×10^{-2}	66.4×10^4	0.3	6.4
Ag-2	18.0	515.0	50.0	9.50×10^{-2}	19.0×10^4	0.3	20
Gr	18.0	755.0	50.0	2.88×10^{-1}	28.0×10^4	0.3	20
Core	17.6	20.0	27.0	1.00×10^{-4}	28.9×10^2	0.3	0.0
f-2	17.1	19.0	26.0	8.76×10^{-2}	28.9×10^2	0.3	0.0
Drain	19.0	20.0	27.0	8.0	10.0×10^6	0.3	0.0
Block	24.0	3.0×10^8	38.0	1.00×10^{-6}	22.6×10^6	0.2	8.0

岡山大学 Okayama University

キーワード：信頼性解析，ため池，有限要素法

ここで、 γ は流動性パラメータ、 $\Phi(F)$ は流れ関数、 F は降伏関数、 Q は塑性ポテンシャル、 τ はせん断応力、 k は塑性ポテンシャル面の位置を規定する定数、 ψ はダイレイタンシー角、 σ は応力テンソルである。EV-FEMによる堤体盛り土の破壊の判定は、式(3)で与える相当粘塑性ひずみ速度から判別することにする。 n は解析のタイムステップ数、 $(\dot{\epsilon}_{ij})_{vp}^n$ は、粘塑性ひずみ速度の*i-j*成分である。

$$\bar{\dot{\epsilon}}_{vp}^n = \sqrt{\frac{2}{3}} \left\{ \left((\dot{\epsilon}_{ij})_{vp}^n \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (3) \quad TSR = \sum_{A.G.P} \bar{\dot{\epsilon}}_{vp}^n \geq TOLER \quad (4) \quad RSR = \begin{cases} TSR/TOLER & (TSR \leq TOLER) \\ 1 & (TSR > TOLER) \end{cases} \quad (5)$$

また、堤体盛り土の全体破壊は式(4)で規定するものとする。 $\bar{\dot{\epsilon}}_{vp}^n$ は、タイムステップ*n*における相当粘塑性ひずみ速度、*TSR*は、すべてのガウス点における $\bar{\dot{\epsilon}}_{vp}^n$ の和、また、*TOLER*は*TSR*の限界値である。さらに、損傷レベル*RSR*が式(5)において定義される。

4. 解析結果および考察

解析に用いた改修前後の堤体モデルを図-1(a),(b)に示す。また、堤体の内部摩擦角 ϕ は、*N*値からは大崎の式($\phi = \sqrt{20N + 15}$)を經由してを經由して換算した。粘着力*c*は、土質試験結果から求めた比較的小さな値を仮定している。その他の材料は、*N*値からの換算、もしくは類似材料の土質試験結果から推定した。材料定数を、表-2に示す。ここでは、地震時(震度0.15)の改修前後のため池のリスクを検討するものとする。*c'*および ϕ を確率変数と考え、その変動計数をそれぞれ0.2および0.1とし、パラメータの空間的相関性特性は表-1の値を用いる。これらの統計量を満たすように乱数を作成し、モンテカルロ法を1000回繰り返した。図-2には、全体破壊が生じた場合の相当粘塑性ひずみ分布の例を示している。

円弧状すべり面が現れており、この状態を全体破壊と見なすものとする。さらに、このときの*TSR*を*TOLER*と定義する。

モンテカルロ法を適用した結果、*RSR*の期待値 $E[RSR]$ は、次のように算定された。

改修前:0.095 改修後:0.0145

決壊による想定被害額を、574,769千円とすると、改修によって減少するリスクは、次式で算定される。

$$574,769 \times (0.095 - 0.0145) = 46,269$$

(千円)

5. まとめ

水・土連成解法および非関連流れ則に従った弾粘塑性有限要素法を用いた信頼性解析を行い、ため池の改修を例に、リスク評価を行った。

参考文献: 1) 西村伸一・松浦 健:ため池のリスク評価と信頼性設計,平成18年度農業土木学会大会講演会講演要旨集, pp.54-55 (2006)

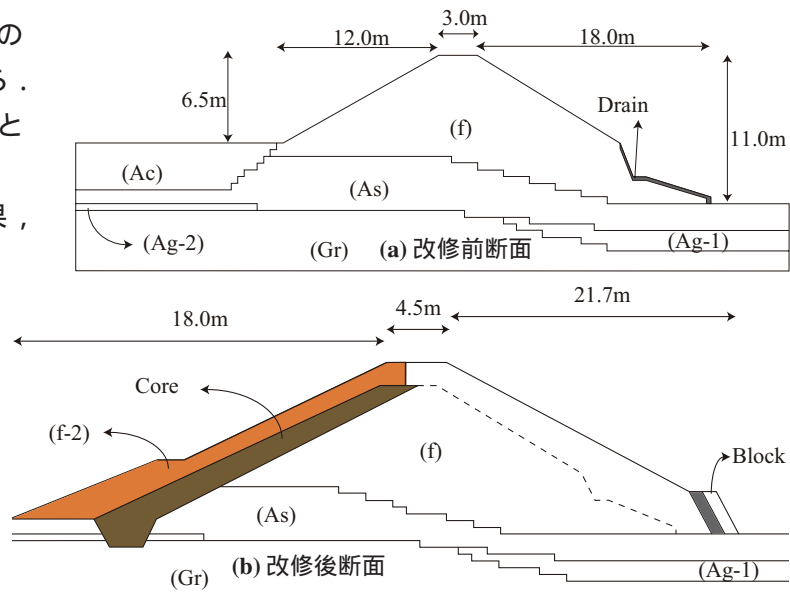


図-1 解析対象のため池堤体断面
Analytical cross sections of embankments

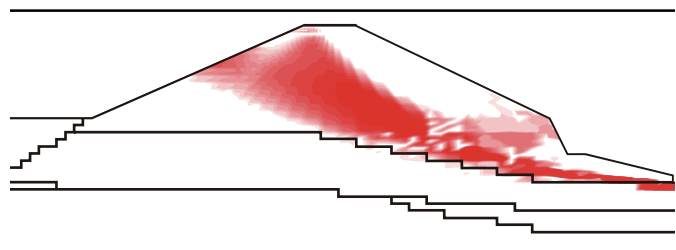


図-2 全体破壊の場合の粘塑性ひずみ速度分布
Distribution of visco-plastic strain rate for over all failure mode