

ため池堤体のリスク評価と信頼性設計

岡山大学大学院環境学研究科 正会員 西村伸一
岡山大学大学院環境学研究科 松浦 健

1. はじめに

ため池防災のため、各地では改修が進められつつあるが、それらの改修に際しては低コスト化が望まれている。そこで、本研究では、コストを最小化するための最適改修計画の決定手法の開発を最終目的とする。特にここでは、堤体材料の確率特性を考慮し、信頼設計を実施している。今回は、その第一段階として、ため池堤体の塑性領域の広がり想定被害総額からリスクを評価し、その値と堤体の更新費用からため池改修に関わる期待総費用を求めている。ため池の前刃金工法による改修を例とし、地震時の改修による防災効果について検討している。

2. 弾粘塑性有限要素解析

今回の解析では、ため池の安定解析を対象にするが、安定解析のための数値解析手法として有限要素法を用いている。材料の構成式としては、モール・クーロン則を仮定し、強度定数としては、粘着力 c' および内部摩擦角 ϕ' を考える。ここでは、破壊の判定に式(1)を用いることとする。即ち、式(1)の左辺に与える相当粘塑性ひずみ速度の加算値 TSR が、許容値 $Toler$ 以下であるとき、構造物は全体的な破壊には及ばないものとする。ただし、 $Toler > TSR > 0$ のとき局所的な破壊が生じるものと考えられる。

$$TSR = \sum_{\text{All Gauss points}} \bar{\epsilon}_{vp}^n \leq Toler \quad (\text{Stable}) \quad (1)$$

$$\bar{\epsilon}_{vp}^n = \sqrt{\frac{2}{3}} \left\{ \left(\dot{\epsilon}_{ij} \right)_{vp}^n \left(\dot{\epsilon}_{ij} \right)_{vp}^n \right\}^{1/2} \quad (2)$$

$\bar{\epsilon}_{vp}^n$: 時間ステップ n における相当粘塑性ひずみ速度,
 $\left(\dot{\epsilon}_{ij} \right)_{vp}^n$: 時間ステップ n における粘塑性ひずみ速度成分

3. 土構造物の統計モデル

土構造物の特色として、土質定数の空間的な相関性を規定する必要がある。今回は、堤体断面の水平方向と鉛直方向に対して、二次元の相関モデルを考慮している。相関性を評価する共分散関数として式(3)の指数型の相関関数を仮定する。相関関数としては様々なものが考えられるが、ため池や堤防等の土構造物では比較的式(3)の適合度がよい^{1),2)}。

$$C(\Delta x, \Delta z) = \sigma^2 \exp(-\Delta x/l_x - \Delta z/l_z) \quad (3) \quad \sigma \text{ は標準偏差, } \Delta x, \Delta z \text{ は水平・鉛直方向の2点間の距離, } l_x \text{ および } l_z \text{ は水平, 鉛直の相関距離である。}$$

4. 信頼性設計理論

一般に信頼性設計においては、期待値総費用 C_T が次式で計算される。

$$C_T = C_I + C_F \quad (4) \quad C_F = P_f C_f \quad (5)$$

C_I : 初期費用(更新費用), C_F : 期待損失費用, P_f : 破壊確率, C_f : 破壊(すべり破壊の様な全体破壊)が生じた場合の損失費用

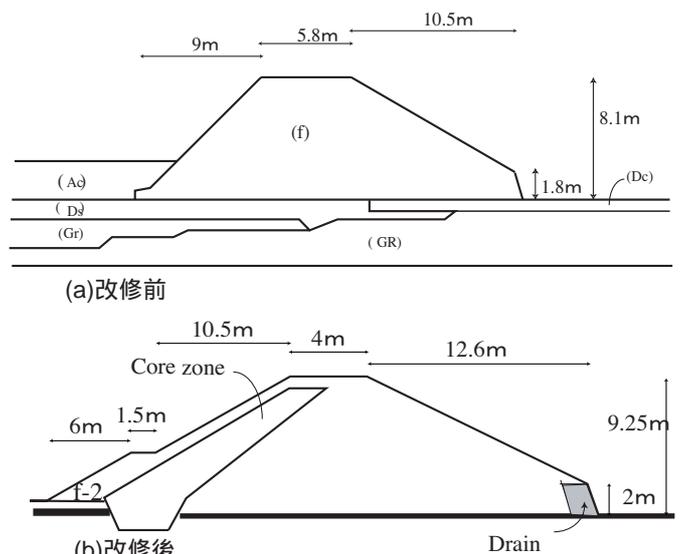


図 - 1 ため池の解析モデル

表 - 1 ため池堤体・地盤の材料定数

Material	Wet density (kN/m ³)	Cohesion (kPa)	Friction Angle (°)	Permeability (m/d)
f	19.8	6	38	3.28
Ac	14.0	10	0	8.64x10 ⁻⁵
Ds	19.0	6	38	1.64x10 ⁻¹
Dc	15.0	38	0	8.64x10 ⁻⁶
Gr	20.0	50	38	1.00x10 ⁻⁵
GR	24.0	318	50	8.64x10 ⁻⁶
Core	17.6	20	27	8.64x10 ⁻⁴
f-2	17.1	19	26	3.28

キーワード：信頼性設計, リスク評価, 統計モデル, ため池, 有限要素法, 弾粘塑性解析

連絡先 (〒700-8530 岡山市津島中3-1-1 岡山大学環境理工学部・TEL&FAX: 086-251-8162)

土構造物では、破壊の定義が容易ではなく、 P_f の計算が難しい。従ってここでは、その代替案として、破壊の程度に応じて損失費用を線形補完できるとした式(6)で C_F を計算することを提案する。解析では、構造物の強度定数に乱数を割り当て、モンテカルロ法を適用することにより、 $E[RSR]$ を評価するものとする。

$$C_F = E[RSR]C_f \quad (6)$$

$$RSR = \begin{cases} TSR/Toler & (TSR \leq Toler) \\ 1 & (TSR > Toler) \end{cases} \quad (7)$$

2. 解析モデル

ここでは、図-1に示すモデルを解析に用いており、図(a)は改修前、図(b)は改修後をそれぞれ示している。即ち、均質型のため池を前刃金工法によって改修する場合を想定している。表-1には材料定数を示す。ここでは、強度定数を確率変数と考えているが、粘着力と内部摩擦角に対して、変動係数をそれぞれ、0.2と0.1を仮定する。地盤は空間的に相関性を有しているが、それを表現する自己相関関数として式(3)を仮定し、相関距離として $l_x=10$ (m), $l_z=2$ (m)を用いた。相関距離の値は、解析対象のため池ではないが、堤体のスウェーデン式サウディングによって得られたものである²⁾。

5. 解析結果および考察

今回の解析では、洪水位の圧力水頭を前もって計算し、安定解析の間隙水圧として導入した。改修前後の圧力水頭分布を図-2に示す。また、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。強度定数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。モンテカルロ法に先立ち、パラメータの平均値を用いてせん断強度低減法による安定解析を実施し、結果が図-3に与えられている。図では、安全率に対応した相当粘塑性ひずみ速度分布が示されている。円弧状のすべり面が現れており、この状態を全体破壊と見なした。このときの TSR を $Toler$ と定義する。中央安全率は、改修によって1.35から1.52に上昇している。信頼性解析の結果を表-2に与える。結果によると、地震時の安全性に関して、ため池の改修によってもたらされる便益は、 $345,802-211,732=134,069$ (千円)である。

6. まとめ

信頼性設計理論に基づき、ため池の改修を例に、改修前後の期待総費用の比較を行い、地震時に対する改修効果を評価した。今回は、ため池の破壊をすべり破壊に限定した。実際のため池の崩壊要因としては豪雨時の浸透破壊、越流が支配的と考えられ、今後考慮していく必要がある。

参考文献：1) Nishimura, S. and Fujii, H.: Reliability-based design of liquefaction, Proc. of IWS Kamakura, pp.313-319(2002); 2) 松浦 健・西村伸一：ため池貫入抵抗値の空間的分布，第60回農業土木学会中国四国支部講演会，pp.82-84 (2005)

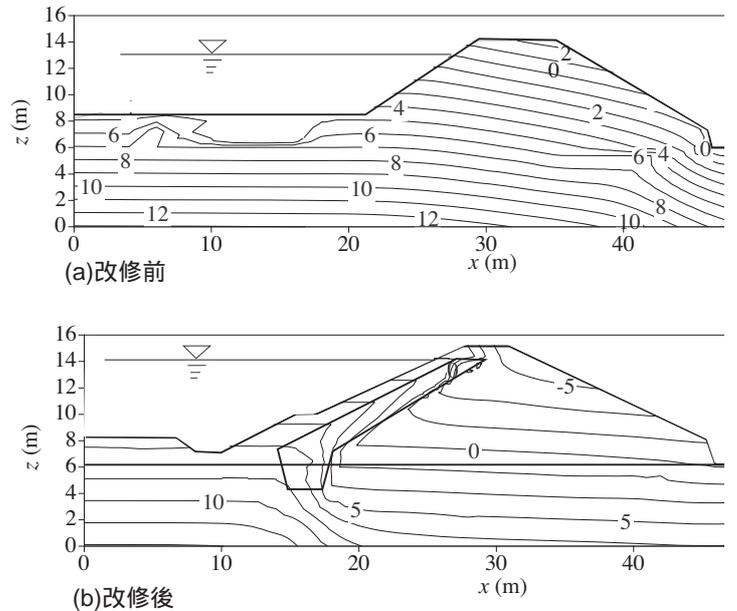


図-2 圧力水頭分布(単位:m)

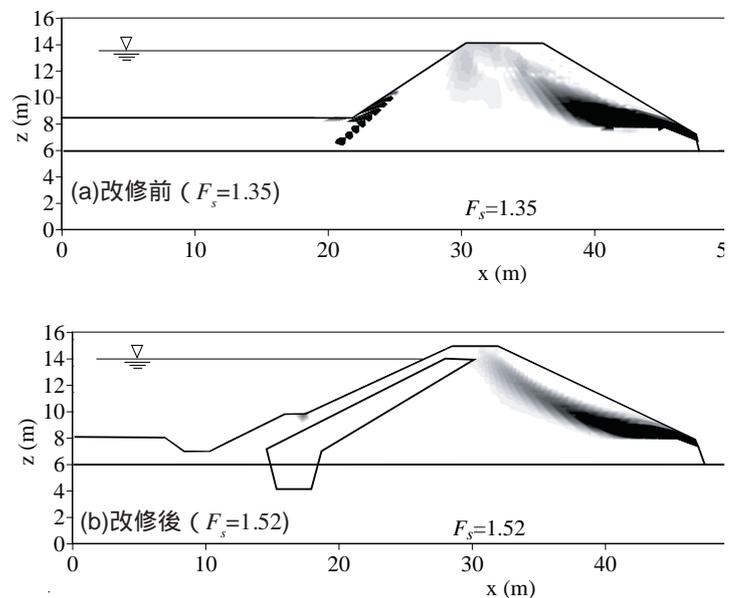


図-3 相当粘塑性ひずみ速度（塑性化領域）の分布

表-2 信頼性解析結果（金額単位：千円）

堤体	更新費用 C_i	想定被害額	破壊損失 C_f	$E[RSR]$	総費用 C_T
改修前	0	944,813	944,813	0.366	345,802
改修後	143,700	944,813	1,088,513	0.0625	211,732