

堤防維持管理のための強度分布推定と安定性評価

岡山大学大学院環境学研究科 正会員 ○西村伸一・藤澤和謙

清水建設技術研究所 フェロー会員 鈴木 誠

京都大学大学院農学研究科 フェロー会員 村上 章

(株)フジタ

高山裕太

1. はじめに 近年、老朽化したため池や河川の堤防のような構造物の維持管理の重要性が指摘されている。このような背景のもと、老朽化した堤防の管理手法を確立することを本研究の最終的な目的としている。一般的に様々な地盤係数を決定するために、よくN値が使用されており、本研究ではスウェーデン式サウンディング(SWS)試験からN値を測定し統計モデルを決定している。さらに、その統計モデルに表面波探査から得られた情報を組み合わせることによって、より信頼性の高いN値の強度分布を推定しようとしている。推定法としては、地質統計学の一手法であるインディケータシミュレーション法(IS)¹⁾を利用している。また、本研究では決定したN値の統計モデルを利用して堤防の安定解析を行っている。堤防の改修前と改修後の破壊確率を求め、信頼性解析を行うことで改修の効果を評価する。

2. 現地試験結果 ため池の堤体であるサイトHにおいて、サウンディングと表面波探査を実施した。図-1に示すようにため池堤体の縦断方向に沿って5m置きに9箇所、サウンディングを実施し、同じ箇所でも表面波探査を実施した。式(1)は、稲田によって示された、砂質土を対象とした標準貫入試験結果 N_{SPT} とスウェーデン式サウンディング試験(SWS)結果との回帰式²⁾であり、換算N値 N_{SWS} が得られる。回帰式のばらつきを考慮するために、確率変数 ε_r を導入し、最終的に式(2)で N_{SPT} を得る。

$N_{SWS} = 0.67N_{SW} + 0.002W_{SW}$ (1) N_{SW} : 半回転数 W_{SW} : 重錘の重さ

$N_{SPT} = (1 + 0.354\varepsilon_r)N_{SWS}$ (2) ε_r : $N(0, 1)$ の正規確率変数

図-2に、現地における標準貫入試験結果とSWSによる換算N値が示されており、比較的適合度が良いことが分かる。一方、図-3には、現地において実施した表面波探査によるN値分布を示している。サウンディングと比較すると、局所的な変化には追従できないが、平均的なN値の分布が表現されている。

3. 地盤パラメータの統計モデル サンプル値(ここではN値)

を $\Xi = (\Xi_1, \Xi_2, \dots, \Xi_M)$ と定義する。ここで、 M はサンプリング点数を表し、ベクトル Ξ は変数 $\xi = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_M)$ の実現値(試験結果)である。変数 ξ が M 次元正規分布だと仮定すると、その確率密度関数は次式で与えられる。

$$f_{\Xi}(\xi) = (2\pi)^{-M/2} |\mathbf{C}|^{-1/2} \exp \left\{ -\frac{1}{2} (\xi - \boldsymbol{\mu})^T \mathbf{C}^{-1} (\xi - \boldsymbol{\mu}) \right\} \quad (3)$$

ここで、 $\boldsymbol{\mu} = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_M)$ は確率変数 $\xi = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_M)$ の平均値関数である。 $\mathbf{C}$ は $M \times M$ の共分散行列であり、地盤定数の空間的な繋がりの強さを表す。本研究では情報基準量AICを最小化する方法MAICを利用して、確率密度関数を決定する。決定された平均値関数と共分散関数は

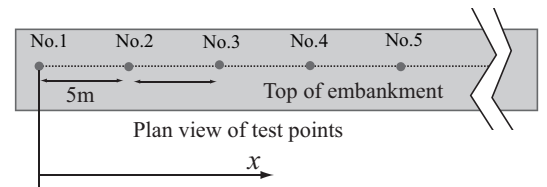


図-1 ため池堤体の平面図と調査地点

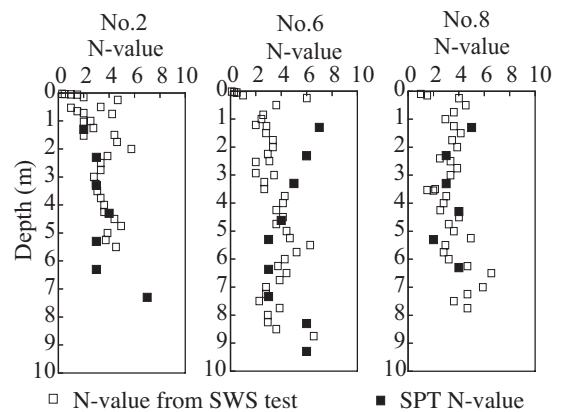
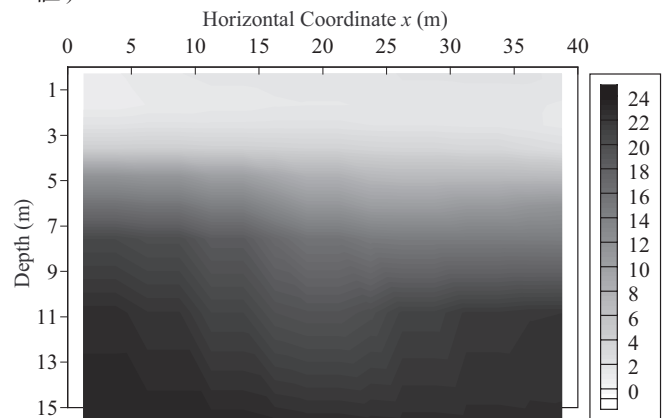


図-2 SPTとSWSによるN値の比較

図-3 表面波探査によるN値の推定結果 $V_s = 89.8N^{0.341}$ ³⁾

キーワード：信頼性設計，アースダム，サウンディング，表面波探査，インディケータシミュレーション

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

式(4), (5)である.

$$\mu = 1.98 + 0.816 \sin \left[\left(\frac{x}{5} - \frac{1}{2} \right) \pi \right] + 0.157z \quad (4)$$

$$C_{ij} = (0.75)^2 \exp \left(-|x_i - x_j|/6.14 - |z_i - z_j|/0.63 \right) \quad (i \neq j) \quad (5)$$

$$C_{ij} = (1.24)^2 \quad (i = j)$$

4. インディケータシミュレーション 本報告では, ISを用いて, SWSによるN値と表面波探査によるN値の合成を試みている. この手法では, 補助データ(ソフトデータ)を用いることができ, 主なデータ(ハードデータ)の分布が更新される. ここでは, SWSによるN値をハードデータとして, 表面波探査によるN値をソフトデータとして用いている. シミュレーションによって, 空間の各点において, N値が乱数として生成される. 図-4, 図-5は, サイトHにおける縦断方向のN値の平均値とN値が2以下となる確率を示している. 図-5の経年変化を見ることで, 堤体内部での強度劣化部分を判断する材料になると考えている.

5. 安定解析と信頼性設計 堤体横断面について安定解析を実施し, リスク評価を行う. 本研究では, 円弧すべり解析にモンテカルロシミュレーション法を適用し, 破壊確率を得ている. 内部摩擦角 ϕ' を確率変数として取り扱うが, ϕ' は, 式(6)で示すように, N値から換算している⁴⁾.

$\phi' = (20N_1)^{0.5} + 20 + 5.3\varepsilon_f$ (6) $N_1 = N/(\sigma'_v/98)^{0.5}$ $\varepsilon_f: N(0, 1)$ の確率変数
 σ'_v : 拘束圧 (kPa) である. 本研究では換算誤差 $5.3\varepsilon_f$ も考慮したシミュレーションを行っている. ただし, 安定解析は, 堤体の横断面に関する解析であるため, 式(4)のN値の平均値関数をx軸(堤軸方向)方向に平均化した次式を用いている. $\mu = 1.89 + 0.175z$ (7) ここでは, 図-6, 7のような改修前と改修後のモデルの解析を行い比較を行っているが, 荷重として設計震度0.15を考慮している. 図中には, 安全率が最小となった代表的なすべり面を示している. 表-1には解析結果を纏めており, F_s は平均安全率, P_F は破壊確率, C_F は期待損失費用, C_F は破壊損失費用を表している. 安全率の平均値を求めた結果, 改修前断面では, 1.0を若干上回る程度の安全率であり, 破壊確率(安全率が1を下回る確率)も, 20%程度のかかなり高い値である. 改修後断面では, 破壊確率がほぼ0で, 安定性が大幅に改善されている. また, 改修前後の C_F を比較によると, 改修効果として, 3,940万円のリスク低減が得られている.

6. まとめ (1) サウンディング結果から, 地盤定数の統計モデルを決定する方法を示した. また, インディケータシミュレーション法を利用し, サウンディングと表面波探査の2種類の試験結果を合成した. これにより, より信頼性の高いN値の分布構造を得ることができると考えられる. (2) 得られた統計モデルを基に, 堤体の安定解析・信頼性解析を実施した. この結果に基づきリスクを計算し, 改修の効果を定量的に評価することができた.

参考文献 1) Deutsch, C. V. and Journel, A. G.: Geostatistical Software Library and User's Guide, Oxford University Press, 1992. 2) 稲田倍穂: スウェーデン式サウンディング試験結果の使用について, 土と基礎, Vol.8, No.1, pp.13-18, 1960. 3) 今井常雄, 麓秀夫, 横田耕一郎: 日本の地盤における弾性波速度と力学的特性, 第4回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.89-96, 1975. 4) Hatanaka, M. and Uchida, A.: Empirical correlation between penetration resistance and internal friction angle of sandy soils, Soils and Foundations, Vol.36, No.4, pp.1-9, 1996.

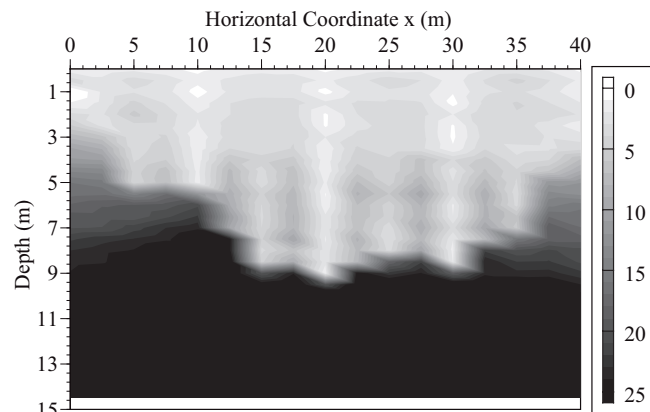


図-4 ISによるN値分布の平均値

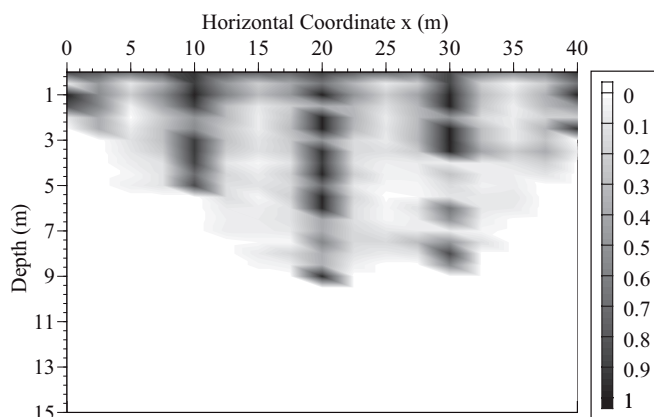


図-5 ISによるN値が2を下回る確率

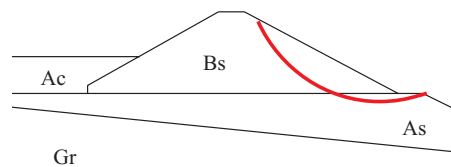


図-6 改修前断面とすべり面

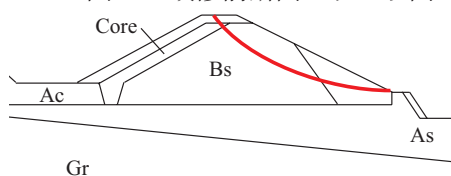


図-7 改修後断面とすべり面

表-1 越流確率の計算結果

	F_s	P_F	C_F	C_F
改修前	1.04	0.197	1999.8	3940
改修後	1.62	0	1999.8	0

$$C_F = C_F \times P_F$$

単位 (万円)