

地質統計手法と三次元計測に基づくため池堤体の地震応答解析  
 Seismic Response Analysis of Earth Dam  
 with Geostatistical Method and 3-D Measurement

○大橋亮太\*, 西村伸一\*, 柴田俊文\*, 珠玖隆行\*

OHASHI Ryota, NISHIMURA Shin-ichi, SHIBATA Toshifumi and SHUKU Takayuki

### 1. はじめに

現在, 大規模地震に備えたため池の耐震性能照査が急務となっている. 一方, UAV(unmanned aerial vehicle)の進化により, 三次元計測が容易になりつつあるが, 設計には取り入れられていないのが現状である. そこで本研究では, これらの技術を設計に貢献させる目的で, 実際の地盤情報を適応させたため池堤体の三次元有限要素モデルで, 地震応答解析による弱部の同定を行う.

### 2. 現地試験

図-1 に, 本研究対象である岡山県内のアースダムの平面図を示す. ここで, 図中の印(黄)は, SWS 試験の実施場所(16 地点)を示している. また図-2 は, 堤体中央部における代表断面図である. 地質を B1, B2, B3(盛土), Ac1(沖積粘土層), Ag(有機質土層), Ac2(沖積粘土層), Tg(第 3 紀砂礫層)および基礎岩盤に分類している.

また, 地盤情報を得るために行った SWS 試験は, 試験効率が良くかつコンパクトであるため, 狭小なサイトでも効率的に情報を得ることができる. 式(1)は, 稲田(1960)<sup>1)</sup>において示された, 砂質土を対象としたスウェーデン式サウンディング試験(SWS)結果の式であり, 換算 N 値  $N_{SWS}$  が得られる.

$$N_{SWS} = 0.002W_{SW} + 0.067N_{SW} \quad (1)$$

$N_{SW}$ : 半回転数,  $W_{SW}$ : 重錘による重力 (単位: N)

### 3. 統計モデル化と堤体内剛性の補間

地盤剛性の空間分布を表現するために, 統計モデルを用いる. サウンディング試験で得られる情報は点推定であるため, 統計モデルによって空間的な補間を行う必要がある. ここでは, 補間推定された  $N_{SWS}$  が 0 を下回らないようにモデル化するため, 対数をとった  $\log N_{SWS}$  を統計モデル化している. ただし, 堤体の縦断面方向(堤体軸方向  $x$ -深度方向  $z$ )に限定した 2 次元モデルとしている. 地盤定数を代表する変数を  $g = \log N_{SWS}$  とし, これが空間座標  $u=(x, z)$  の関数であるとする,  $g$  は, 空間座標の関数として次式(2)で与えられる.

$$g(u) = m(u) + U(u) \quad (2)$$

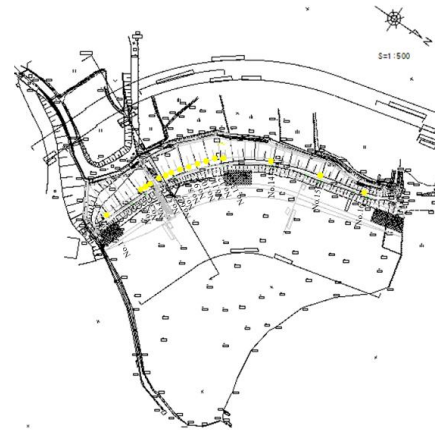


図-1 K 池平面図  
Top view of K pond

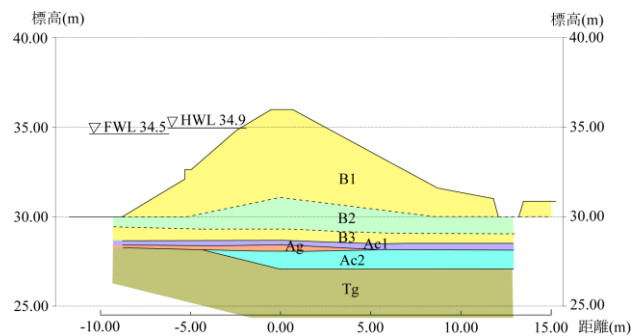


図-2 地質推定断面図  
Geological estimation cross section

\*岡山大学大学院環境生命科学研究科 (Graduate School of Environmental and Life Science, Okayama University)  
 キーワード: 三次元計測, 地質統計手法, 地震応答解析

ここで、 $g(u)$ は、平均値成分  $m(u)$ と確率成分  $U(u)$ の線形和と仮定している。ここでは、赤池情報量規準 AIC を最小とするモデル (MAICE)<sup>2)</sup> を最適なモデルと考え、平均値関数  $m(u)$ や、 $U(u)$ の共分散関数  $C$  を決定している。この方法とバリオグラムを組み合わせる方法によって統計モデルを決定している。この手法の詳細は、今出ら(2019)<sup>3)</sup>に示されている。決定されたパラメータを表-1 に示す。また、点として得られている地盤剛性(換算 N 値  $N_{SWS}$ )値を補間する手法として、地質統計学手法の一つであるクリギング<sup>4)</sup>を用いている。

表-1 統計モデル  
Statistical model

平均値関数	共分散関数( $i, j = 1, 2, \dots, M$ )
$m = 0.987 - 5.97 \times 10^{-3}x + 1.45 \times 10^{-3}z + 3.91 \times 10^{-5}x^2 + 6.31 \times 10^{-3}z^2 + 2.48 \times 10^{-3}xz$	$C = [C_{ij}] = N_e \cdot s^2 \exp\left(-\frac{ x_i - x_j }{15.7} - \frac{ z_i - z_j }{1.24}\right) \quad (i \neq j)$
標準偏差	$N_e = 0.409 \quad ( x_i - x_j  \neq 0,  z_i - z_j  \neq 0)$
$s = 0.3828$	$N_e = 0.593 \quad ( x_i - x_j  \neq 0,  z_i - z_j  = 0)$
	$N_e = 0.69 \quad ( x_i - x_j  = 0,  z_i - z_j  \neq 0)$
	$C = s^2 \quad (i = j)$

$M$ : 調査地点数,  $N_e$ : ナゲットパラメータ

#### 4. 解析結果

解析には作成した 3 次元有限要素モデルを用いている。また 3 次元地震応答解析には LIQCA3D20<sup>5)</sup>を用いた。本研究では、図-2 を参考にした堤軸方向均一モデルと、SWS 結果を利用した不均質モデルをそれぞれ作成し、地震解析を行った。

南海トラフ地震波を入力地震動とし、そのピークである地震開始から約 25 秒後の加速度成分のコンター図を、不均質モデルについて図-3(a)に、堤軸方向均一モデルについて図-3(b)にそれぞれ示している。加速度ベクトルの大きさの分布図から、堤軸方向均一モデル、不均質モデルともに深度の浅い部分、とくに、堤体の天端部分に、大きい加速度の集中がみられる。また、不均質モデル(図-3(a))のほうが、堤体左岸の洪水吐付近に加速度の高い領域が集中しており、分布のばらつきが少ないことが分かる。この理由として、洪水吐によって堤体が分断されているのと、この周辺の地盤の剛性が比較的小さいことが要因と考えられ、空間的不均質性なモデル化が、適切に地震応答に影響していると考えられる。また、不均質モデルに対し、加速度の集中している断面の偏差応力の第 2 不変量による応力値 ( $\sqrt{2J_2}$ ) 分布図 (図-4) を示す。特に深度の浅く、加速度の集中している天端部分から、円弧を描くように大きな  $\sqrt{2J_2}$  が生じている。すなわち、堤体のせん断に対する弱部は、堤体左岸の洪水吐付近と想定される。

#### 5. まとめ

スウェーデン式サウンディング試験を利用し、3次元モデルに対応できる詳細な地盤調査を実施し、堤体および地盤剛性の空間分布を同定することができた。また、その結果を用いることで、堤体応答加速度の集中箇所を適切に推定することができた。

- 1) 稲田倍穂: スウェーデン式サンディング試験結果の使用について, 土と基礎, Vol.18, No.1, pp.13-18, 1960.
- 2) Akaike, H.: A new look at the statistical model identification, IEEE Trans. On Automatic Control, AC-19(6), pp.716-723, 1974.
- 3) 今出和成・西村伸一・柴田俊文・珠玖隆行: 地質統計手法に基づくため池堤体強度の空間分布評価, 農業農村工学会論文集, No. 308 (87-1), pp.II\_29-II\_38, 2019.
- 4) Journel, A.G. and Huijbregts., Ch. J.: Mining geostatistics, Academic Press, 1978.
- 5) LIQCA 液状化地盤研究所: LIQCA2D20・LIQCA3D20 (2020 年公開版) 資料, 一般社団法人 LIQCA 液状化地盤研究所, 2020.

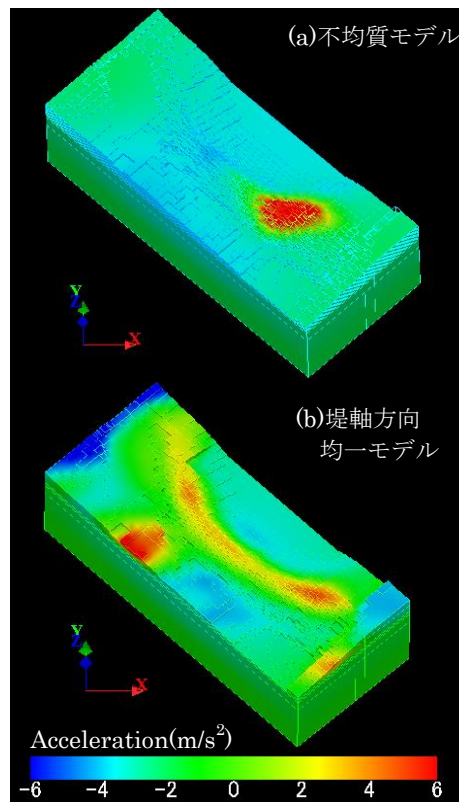


図-3 加速度分布図  
Acceleration distribution map

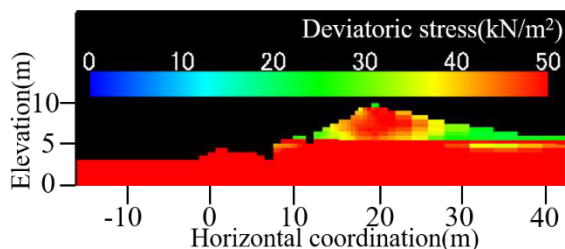


図-4  $\sqrt{2J_2}$  分布図(加速度集中箇所断面)  
 $\sqrt{2J_2}$  distribution map (Acceleration concentrated)