

GPR による地盤剛性の空間分布推定を利用したため池堤体の三次元地震応答解析
(シンポジウム講演概要)

Seismic Response Analysis of Earth-fill Dam with Use of GPR to Estimate Spatial Distribution of Ground Stiffness (Proceedings of Symposium on Applied Mechanics)

大橋 亮太 (清水建設) 任 宇翔 (岡山大・環境生命科学)
西村 伸一 (岡山大・環境生命科学) 金重 稔 (ラグロフ設計工房)
柴田 俊文 (岡山大・環境生命科学) 珠玖 隆行 (岡山大・環境生命科学)
Ryota OHASHI, Shimizu Corp. Yuxiang REN, Okayama University
Shin-ichi NISHIMURA, Okayama University Minoru KANESHIGE, Lagrof Civil Design Ltd
Toshifumi SHIBATA, Okayama University Takayuki SHUKU, Okayama University
E-mail: thegl786@okayama-u.ac.jp

A three-dimensional survey has recently been developed, using an unmanned aerial vehicle (UAV), which has made the rebuilding of the three-dimensional shape of structures easier. Despite the development of this technique, it has not been adopted for the design of geo-structures. In this study, for the purpose of incorporating the three-dimensional survey technique into the design of geo-structures, an earth-fill dam is surveyed three-dimensionally by a drone, and a three-dimensional finite element model (FEM model) of the dam is made based on the survey results. The spatial distribution of the ground rigidity is estimated based on screw weight sounding (SWS) test results, and then applied to the 3-D FEM modeling. The Gaussian process regression (GPR) is used to model the random field for the subsurface ground. Finally, the FEM model is applied to a seismic response analysis, and the locations of high acceleration and high shear stress inside the earth-fill dam are identified.

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 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、これらの技術を開発に貢献させる目的で、三次元計測結果からため池堤体の三次元有限要素モデルを構築し、地震応答解析を実施している。また、三次元モデル化においては、地盤物性の空間分布推定が必須となるため、本研究では地質統計手法に基づき、現地で行ったサウンディング試験結果を補間し、ため池堤体内の地盤物性の空間分布を推定している。最終的に、推定した空間分布を三次元有限要素モデルに適用し、地震応答解析を行うことで、ため池堤体の弱点箇所を同定することが本研究の目的である。

2. 解析方法

第一に、ため池堤体を対象にドローンによる三次元計測を行い、静止画像から三次元点群データを作成し、それを用いて三次元有限要素モデルを作成する。作成手順を Fig. 1 に、作成した三次元有限要素モデルの全体図を Fig. 2 に示す。次に対象地で行ったスクリーウェイト貫入試験 (SWS) 結果に基づいて、堤体内剛性の空間分布を推定した。SWS 結果は点推定値であるため、統計モデルに基づいてデータを補間する必要がある。本研究では補間法として、地質統計学手法である三次元クリギングを利用した。また地盤の統計モデル推定に、ガウス回帰過程 (the Gaussian Regression Processes (GPR))¹⁾ を使用する。地盤物性値の空間分布はトレンド成分とランダム成分に分離し、トレンド成分から地盤の層区分、ランダム成分から層内でのばらつきを把握することが行われる。観測量ベクトル s はトレンド成分とランダム成分の確率分布の重ね合わせに拡張できる。添え字 1 は 1 をトレンド成分、2 をランダム成分とし、それぞれのベクトル $w_{l,2}$ の推定式を式(1)に示す。

$$w_{l,2} = M_{l,12}^T [M_{1,11} + M_{2,11}]^{-1} s \tag{1}$$

ここで、 $M_{l,ij}$: 共分散行列である。添え字 i, j は 1 を観

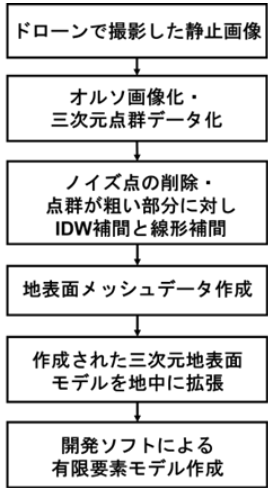


Fig. 1 Algorithm of 3-D modelling.

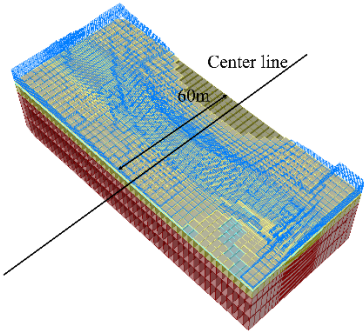


Fig. 2 3-D model of embankment area.

測値、2 を推定値とする。共分散行列の各要素は、標準偏差 σ と自己相関関数 $k(d|\delta)$ からなる式(2)より求める。
$$cov_l = \sigma_l^2 \times k_l(d_h|\delta_{l,h})k_l(d_v|\delta_{l,v}) \tag{2}$$

ここで、 d : 2 点間距離、 δ : scale of fluctuation (以下 SOF)

Table 1 Estimated parameters.

トレンド成分		
水平方向 SOF, $\delta_{t,h}$	鉛直方向 SOF, $\delta_{t,v}$	標準偏差, σ_t
17.52	6.634	1.172
ランダム成分		
水平方向 SOF, $\delta_{r,h}$	鉛直方向 SOF, $\delta_{r,v}$	標準偏差, σ_r
14.08	0.728	0.504

である．本研究は三次元空間での検討であるため，自己相関関数は水平方向と鉛直方向の積を用いている．添え字 h , v はそれぞれ水平方向と鉛直方向である．推定に使用するパラメータを，最尤法を用いて算出し，最適化を行うことで統計モデルを決定した．GPR で推定した統計モデルの内，自己相関関数を式(3)に，パラメータを Table 1 に示す．

$$k = \sigma^2 \exp \left(-\pi \left(\frac{d_h}{\delta_h} \right)^2 - \pi \left(\frac{d_v}{\delta_v} \right)^2 \right) \tag{3}$$

推定した統計モデルに基づいて三次元クリギング²⁾を実施し，堤体内の地盤剛性を補間した．これらの結果に基づいて三次元地震応答解析を実施した．なお，入力地震波は，南海トラフ地震の想定波を用いている．

3. 解析結果および考察

比較のために，サウンディング結果を用いず堤軸方向に対して均一に材料分けをしたモデルと，地盤の空間分布を適用させ不均質に材料分けしたモデルをそれぞれ作成し，地盤の不均質性の影響を調べる．堤軸方向均一モデルの N 値分布を Fig. 3 に，不均質モデルの N 値分布を Fig. 4 に示す．

解析結果として，堤軸方向均一モデルの加速度分布図を Fig. 5 に，不均質モデルの加速度分布図を Fig. 6 に示す．これらは，地震動のピークである，地震開始から約 25 秒後を示している．Fig. 5, 6 によると，両モデルともに堤体の天端部分に，大きい加速度の集中がみられる．特に，不均質モデル (Fig. 6) では，天端中央から堤体左岸の洪水吐付近にかけて応答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る．

4. まとめ

本研究では，ため池堤体を対象にドローンによる三次元計測を行い，三次元有限要素モデル化を実施した．また，GPR を用いて，SWS 結果に基づいた堤体内剛性の空間分布を推定した．地表の形状と地下地盤剛性分布の情報を使用した三次元地震応答解析の結果から，不均質モデルによって，堤体の応答加速度が集中する箇所（堤体左岸洪水吐付近）が同定され，地盤の空間的な不均質性が地震応答に大きな影響を与えることが明らかとなった．

参考文献

1) Yoshida, I., Tomizawa, Y., Otake, Y., Estimation of trend and random components of conditional random field using Gaussian process regression. Computers and Geotechnics, 136, 104179, 2021.

2) Deutsch, C.V., Journal, A.G., Geostatistical Software Library and User’s Guide, Oxford University Press, 1992.

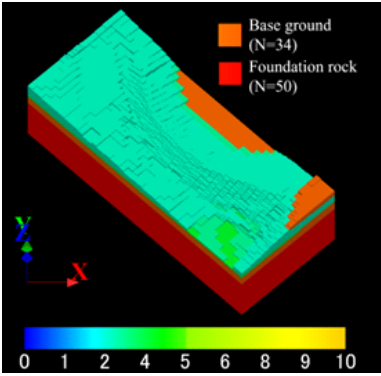


Fig. 3 N-value distribution (Homogeneous model).

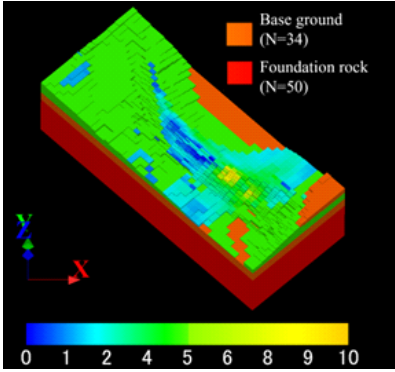


Fig. 4 N-value distribution (Inhomogeneous model).

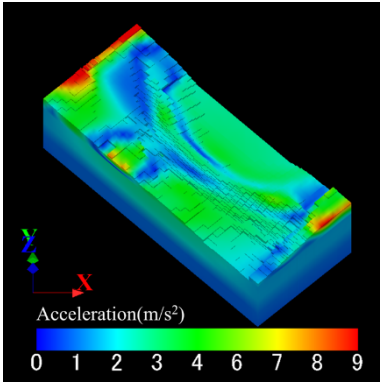


Fig. 5 Distribution of maximum acceleration (Homogeneous model).

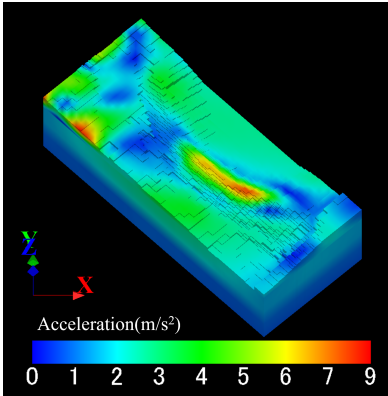


Fig. 6 Distribution of maximum acceleration (Inhomogeneous model).