

POD に基づいた液状化解析の代替モデル Surrogate model for liquefaction analysis based on POD

○西村伸一*, 新田智大**, 柴田俊文*, 珠玖隆行*

○Shin-ichi NISHIMURA, Tomohiro Nitta, Toshifumi SHIBATA and Takayuki Shuku

1.はじめに 構造物のレベル II 地震に対する耐震照査が進められてきたが、その中でも、海岸堤防に対しては、液状化解析が重要な位置を占める。本研究は、液状化解析の簡易的手法を提案することが目的である。液状化 FEM 解析では、多くのパラメータを必要とするが、当然少ない方が実用的である。そのため、ここでは、固有直交分解(Proper Orthogonal Decomposition, POD)に基づいたモデル化¹⁾を行い、その精度について検討を行っている。

2. POD による代替モデル液状化解析

Table 1 に代替モデル z' を作成するための手順を示している。 z' は、変位および間隙水圧を表す。この方法は、観測値 z をモード分解することで、挙動の特色を抽出するのが特色である。すなわち、代替モデル z' は観測挙動の固有ベクトル \mathbf{U} と解析パラメータ p (材料定数, 境界荷重など) を含んでおり、観測値と代替モデル値が一致するように、最小二乗法で係数 a_{kl} を決定する。なお、今回の解析では、固有ベクトルの次元を $r=4$ に縮約している。

3. 実験概要 本研究では、液状化模型実験を実施し、解析手法に適用している。使用した試験機の概要を Fig.1 に示す。また、実験と解析の境界条件を Fig.2 に示す。本試験機は、空圧制御装置によ

Table 1 代替モデルの作成手順
Procedure to create surrogate model

<p>1) 評価すべき変数の観測値 z を整理 $z(x_i, t_j)$: 変位・間隙水圧の観測値 x_i, t_j ($i=1, 2, \dots, n_o; j=1, 2, \dots, m$): 観測地点および観測時間 n_o: 観測地点数, $n = 2 \times n_d + n_e$: 観測値の自由度 n_d: 変位観測節点数, n_e: 間隙水圧観測要素数, m: 時系列数</p> <p>2) z をマトリクス \mathbf{Z} で定義する $\mathbf{Z} = [z(x_i, t_j) - \bar{z}(x_i, t_j)]$: $z(x_i, t_j)$ の $n \times m$ マトリクス表示 $\bar{z}(x_i, t_j) = \frac{1}{m} \sum_k z(x_i, t_k)$: $z(x_i, t_j)$ の時間方向の平均値</p> <p>3) \mathbf{Z} の固有値分解 $\mathbf{Z}\mathbf{Z}^T = \mathbf{U}\mathbf{\Lambda}_n\mathbf{U}^T, \mathbf{Z}^T\mathbf{Z} = \mathbf{V}\mathbf{\Lambda}_m\mathbf{V}^T$, \mathbf{U} ($n \times m$), \mathbf{V} ($m \times n$): 固有ベクトル, $\mathbf{\Lambda}_n$ ($m \times m$), $\mathbf{\Lambda}_m$ ($n \times n$): 固有値対角マトリクス \mathbf{Z} の縮約した固有値分解: $\mathbf{Z}\mathbf{Z}^T \approx \mathbf{U}_r\mathbf{\Lambda}_r\mathbf{U}_r^T, \mathbf{Z}^T\mathbf{Z} \approx \mathbf{V}_r\mathbf{\Lambda}_r\mathbf{V}_r^T$ \mathbf{U}_r ($n \times r$), \mathbf{V}_r ($m \times r$): 縮約した固有ベクトル ($r < n, m$) $\mathbf{\Lambda}_r$ ($r \times r$): 縮約された固有値マトリクス</p> <p>4) \mathbf{Z} の特異値分解 $\mathbf{Z} \approx \mathbf{U}_r\mathbf{D}\mathbf{V}_r^T, \mathbf{\Lambda}_r = \mathbf{D}^2$</p> <p>5) $z(x_i, t_j)$ の代替モデル z' の定義 $z'(x, t) = \sum_c \sum_s a_{kl}(t) p_l \mu_k(x)$ $u_k: \mathbf{U}_r = [u_k(x)]$ の成分, p_l ($l=1, 2, \dots, s$): 解析パラメータ a_{kl}: チューニングのための係数, s: 解析パラメータ数</p>

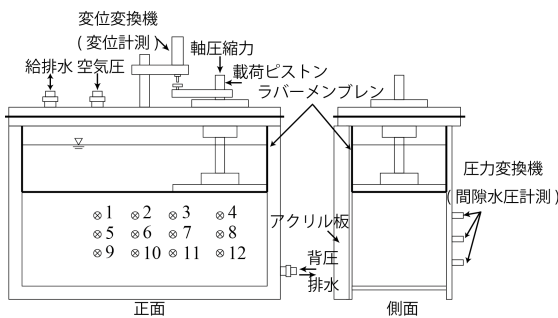


Fig.1 模型実験装置の概要
Outline of model test equipment.

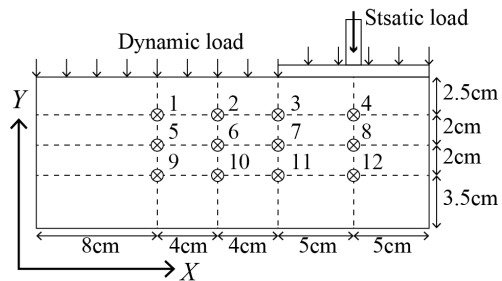


Fig.2 実験および解析の境界条件
Boundary condition for experiment and analysis.

*岡山大学, Okayama University, **西松建設, Nishimatsu Construction CO. LTD.

キーワード: 代替モデル, 液状化模型実験, 液状化解析

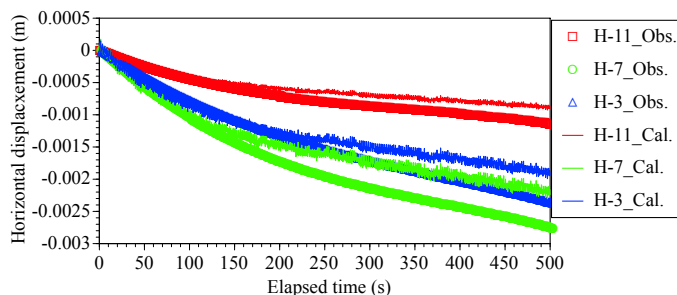
り供試体全体に圧力をかけ、背圧を調整し、排水コックの制御で供試体に拘束圧を与えている。今回の実験では、空圧制御装置による全体圧を 200kPa、背圧を 150kPa とし、供試体に 50kPa の拘束圧を与えている。動的荷重は、0.5Hz の正弦波として振幅を変えて空気圧を載荷する。盛土荷重を想定した局所静的荷重を載荷版によって加える仕組みとなっている。供試体は、珪砂をしており、相対密度 37%、間隙比 0.92 である。Table 2 には 6 種類の実験ケースを示しており、局所荷重 0.4kN および 0.8kN、動的荷重の振幅を 40kPa、70kPa、100kPa に設定している。変位観測を観測点 1~12 に設定しており、間隙水圧の観測を観測点 4、8、12 付近で行っている。

4. 解析結果 解析パターンは、実験に対応して、DE-1~DE-6 を設定している。今回の解析では、DE-1、3、4、6 の実験結果からチューニング係数 a_{kl} を決定し、確認ために DE-2、DE-5 の解析を行い、観測値と解析値の比較を行う。この解析では、解析パラメータ p は、局所荷重と振幅である。DE-2 に関する解析結果を Fig.3 に示している。結果によると、代替モデルは、液状化の傾向を模擬できているが、水平・鉛直変位に関しては、観測値を過小評価し、間隙水圧は上昇速度が若干遅れている。

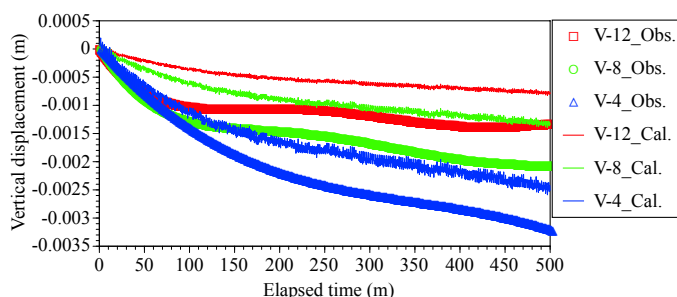
5. まとめ 有限要素法液状化解析の代替となる簡易モデルを提案した。この手法は、固有直交分解 (POD) を基本としている。液状化模型実験を実施し、手法の適用性を検討した。結果、代替モデルによって、液状化挙動の傾向を模擬できることが確認できた。これ以外に、有限要素解析結果を擬似的な観測値とし、材料パラメータや外力荷重をパラメータとした液状化予測においても、適切な予測結果が得られることを確認している。

参考文献 1) 大竹雄他：モード分解を用いた時空間の特徴抽出に基づくデータ駆動型・動的信頼性解析法：有効応力動的解析への適用，土木学会論文集 C (地園工学)，76(2)，142-157，2020。

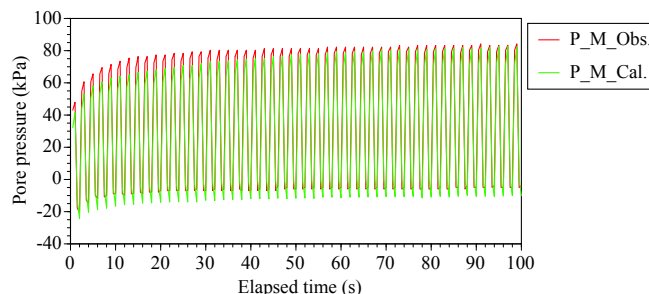
解析 No	局所荷重	振幅
DE-1	0.4kN	40kPa
DE-2	0.4kN	70kPa
DE-3	0.4kN	100kPa
DE-4	0.8kN	40kPa
DE-5	0.8kN	70kPa
DE-6	0.8kN	100kPa



(a) 水平変位 (計測点 3,7, 11)



(b) 鉛直変位 (計測点 4,8,12)



(c) 間隙水圧 (計測点 8)

Fig.3 計測結果と代替モデルによる予測結果の比較
(Obs.: 観測値, Cal.: 代替モデルによる予測値)
Comparison between measured and prediction by surrogate model.