

水平成層地盤の液状化挙動に及ぼす地盤物性の空間的不均質性の影響  
Effects of soil spatial variability on liquefaction behavior of horizontally layered ground

○上田恭平  
○Kyohei UEDA

Effective stress analyses based on the finite element method are often used as a reliable tool to predict liquefaction occurrence in soil-structure systems during earthquakes. In the analyses, the soil properties are typically specified by using a deterministic model although they intrinsically have spatial variability even in the case of horizontally layered ground. In this study, nonlinear finite element analyses under undrained conditions are performed to investigate the effects of soil heterogeneity on the liquefaction behavior of stochastically heterogeneous soil deposits subjected to seismic loading through a Monte Carlo simulation approach. A series of analyses has revealed that the heterogeneity of the shear wave velocity (or initial shear modulus) has no significant effect on the distribution of the computed excess pore water pressure (EPWP); while the mean value of the maximum EPWP ratio is partially influenced and becomes up to 20% less (in comparison with the deterministic case) by considering the spatial variability in the internal friction angle and the  $N$  value under the given seismic loading.

### 1. はじめに

地震時における地盤・構造物系の液状化被害を推定するため、有限要素法による有効応力解析が用いられることが多い。有効応力解析では、液状化地盤の適切なモデル化とパラメータ設定が重要となるが、同じ土質と判断された領域内では均一な地盤物性が仮定されることが一般的である。一方、実際の地盤では水平成層の条件であっても地盤物性の空間的なばらつきが存在する。そこで本研究では、そのような地盤の空間的な不均質性が液状化挙動に及ぼす影響を明らかにするため、水平成層地盤を対象に地盤物性のばらつきを考慮した2次元有効応力解析を実施した。

### 2. 地盤物性の不均質な空間分布のモデル化

本研究では、地盤の  $N$  値を空間的に分布する確率変数とし、その他の地盤物性は  $N$  値を基にして設定した(三上ら, 2011)。なお、比較検討として、地盤のせん断波速度もしくは内部摩擦角のみを確率変数とした解析も併せて実施し、内部摩擦角の変化が液状化挙動に及ぼす影響は大きい(過剰間隙水圧比で20%程度の差)反面、せん断波速度の影響は小さいことが明らかとなっている。

地盤物性の不均質な空間分布  $F$  は、以下のように平均成分  $f_m$  と確率過程  $f$  の和として与える。

$$F(x, y) = f_m + f(x, y) \quad (1)$$

ここに、 $f$  は次式で与えることとする(詳細は、Shinozuka & Deodatis (1996)を参照)。

$$f(x, y) = \sqrt{2} \sum_{k=1}^{K_x} \sum_{l=1}^{K_y} A_{kl} \times [\cos(\kappa_{xk}x + \kappa_{yl}y + \Phi_{kl}^{(1)}) + \cos(\kappa_{xk}x - \kappa_{yl}y + \Phi_{kl}^{(2)})] \quad (2)$$

$$A_{kl} = \sqrt{2S(\kappa_{xk}, \kappa_{yl})\Delta\kappa_x\Delta\kappa_y} \quad (3)$$

式(3)のスペクトル密度関数  $S$  は、相関距離(ここでは、 $d_x=10.0$  m,  $d_y=1.0$  m) および標準偏差(変動係数10%として算定)に応じて算定される。例えば、Gaussian分布の場合は以下となる。

$$S = \sigma^2 \cdot \frac{d_x d_y}{4\pi} \cdot \exp\left\{-\left(\frac{d_x^2}{4}\kappa_x^2 + \frac{d_y^2}{4}\kappa_y^2\right)\right\} \quad (4)$$

このようにして作成された  $N$  値(平均5)の不均質な空間分布の一例を図1に示す。

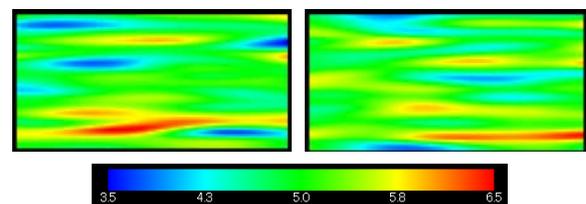


図1 N値の空間分布 (Gaussian)

### 3. 数値解析の概要

有効応力解析に用いた FEM メッシュを図 2 に示す。液状化地盤の構成モデルにはひずみ空間多重せん断モデル (Iai et al., 1992) を用い、解析に必要なパラメータは N 値、細粒分含有率 (=0%と仮定)、有効上載圧により設定した(三上ら, 2011)。

図 2 の側方を循環境界、底面を固定境界とし、テーパ部を有する 1 m/s<sup>2</sup> 振幅の正弦波 (1Hz, 20 波) を入力した。

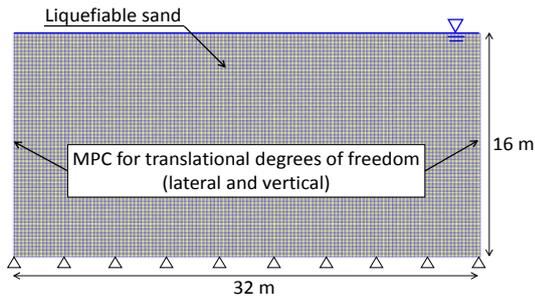


図 2 有限要素メッシュ

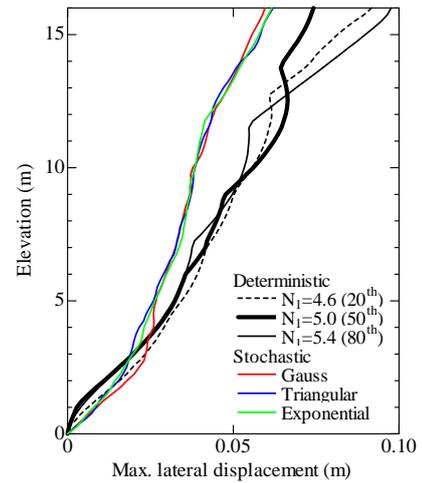
### 4. 解析結果とその考察

図 3(a)より、確率分布のタイプによらず、不均質地盤での最大水平変位量は均質地盤 (N 値 5) よりも小さくなっている。また、累積分布関数で 20%および 80%に対応する N 値 (4.6 と 5.4) を均質地盤モデルで採用した解析も併せて実施したが、均質地盤での水平変位と入力した N 値の間で明確な大小関係は見られなかった。

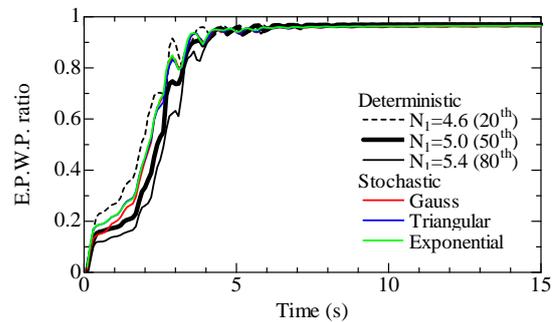
図 3(b)(c)は過剰間隙水圧比の時刻歴であり、前者が全 FEM 要素の中での最大値、後者が全 FEM 要素の空間的な平均値である。平均的な過剰間隙水圧比で比べた場合、均質地盤よりも不均質地盤では水圧比の値が 15%程度小さくなっている。このことは、図 4 に示す加振後の過剰間隙水圧比の空間分布からも理解でき、均質モデルを用いる設計は (本条件下では) 安全側と解釈できる。

#### 参考文献

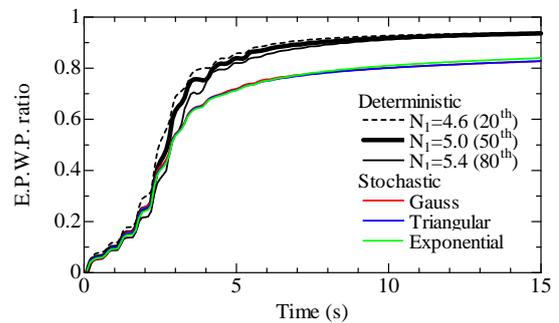
- 三上武子, 小堤治, 中原知洋, 井合進, 一井康二: 液状化解析プログラム FLIP のパラメータの簡易設定法 (再訂版) の構築, 第 46 回地盤工学研究発表会, 2011.
- Shinozuka & Deodatis: Simulation of Multidimensional Gaussian Fields by Spectral Representation, Applied Mechanics Reviews, ASME, 49(1), 29-53, 1996.
- Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, Soils and Foundations, 32(2), 1-15, 1992.



(a) 最大水平変位分布

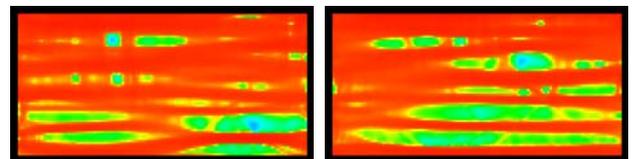


(b) 過剰間隙水圧比 (最大値) の時刻歴



(c) 過剰間隙水圧比 (平均値) の時刻歴

図 3 解析結果の比較



(a) 不均質モデル (Gaussian)



(b) 均質モデル



図 4 加振後の過剰間隙水圧比の分布