

# 安定化メッシュフリー法を用いた地盤解析への適用性

松江工業高等専門学校 柴田 俊文  
岡山大学環境学研究科 村上 章

## 1. はじめに

水～土連成問題の解析では、ロッキングによる圧密初期の間隙水圧空間振動という問題がある<sup>1-4)</sup>。この問題の対処方法として、FEMでは間隙水圧に関する形状関数の次数を変位のそれよりも一次以上上げる方法や、安定化項を導入する方法、形状関数が同次の場合に安定化要素を用いる方法などがある。著者らは、これまでに、メッシュフリー法を水～土連成有限変形解析に適用し、安定化項を付加してロッキングを抑制する効果を示している。本研究では、この安定化項を用いたメッシュフリー法を基礎押し込みの問題に適用し、その数値妥当性を検討する。

## 2. EFGM と安定化項

本研究ではメッシュフリー法の一種であるElement Free Galerkin法 (EFGM) <sup>5)</sup>を用いて水～土連成有限変形解析を行う。先に述べたように、水～土連成解析では、間隙水圧の空間振動という問題が圧密初期に発生する。この振動を抑え解の安定性を確保するために、FEMでは間隙水圧に関する形状関数の次数を変位よりも一次下げる方法を採用することが多い。しかしEFGMではMLSによって形状関数を求めているため、変位と間隙水圧の節点数を異なるものにして形状関数の次数を変化させるのは不自然である。以上の理由より、EFGMに安定化項を付加して解析を行う。

安定化項は、連続式を弱形式で表した式に付加する。下式の左辺最終項が安定化項である。

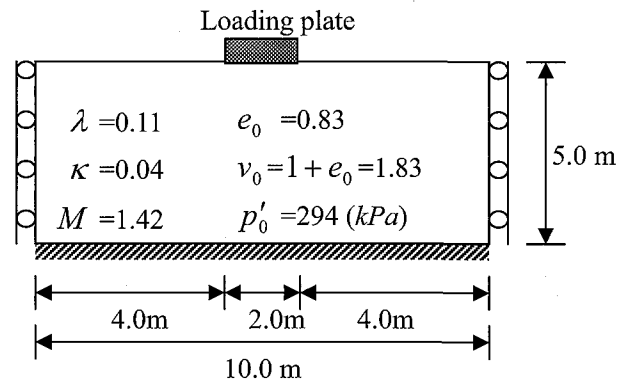
$$-\int_V (trD)\delta h dV + \int_V v_w \cdot grad \delta h dV - \int_{\Gamma_q} \bar{q} \delta h dS - \int_{\Gamma_h} \beta(h - \bar{h}) \delta h dS + \frac{\alpha}{2} \cdot \delta \int_V h^2 dV = 0 \quad (1)$$

ここで、 $\delta$ は変分、安定化項の $\alpha$ は安定化パラメータ、 $h$ は間隙水圧、 $h$ のドットは空間微分、 $V$ は領域を示す。空間振動が生じた場合、間隙水圧は鋸刃状の様相を示すため、各節点で微分値を得ることができない。式(1)の安定化項は間隙水圧の微分値を拘束することで、各節点の勾配を滑らかにし、振動を抑制することを目的としている。

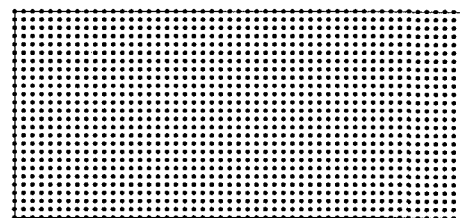
## 3. 基礎押し込みの解析

飽和地盤における基礎押し込みの解析を行った。

図-1(a)に解析諸元と境界条件、(b)に初期節点配置を示す。ここで、境界部は、モデルの下部で完全固定、側部では水平方向を拘束している。また、载荷スピード0.01cm/secの変位制御とし、基礎部は端面摩擦を考慮している。ここで、節点は0.2m間隔に配置して、縦26個×横51個の合計1326個としている(図-1(b))。また、上面のみ排水を許容し、側面と底面では非排水条件として解析を行った。なお、式(1)で示す安定化パラメータ $\alpha$ は0.01を用いて解析を行った。なお、形状関数は変位・間隙水圧ともに一次基底のQuartic spline型を採用し、サポート半径は1.0を使用する。境界部の処理はペナルティ法を用い、ペナルティ数は $1.0 \times 10^6$ を用いた。図-2(a)-(b)に安定化項を考慮していない結果、図-3(a)-(b)に安定化項を考慮している結果を示す。(a)にひずみ分布図、(b)に変形図をベクトルで表す。ここで、ひずみを表す指標として式(2)の正規化した値を用いて結果を整理している。

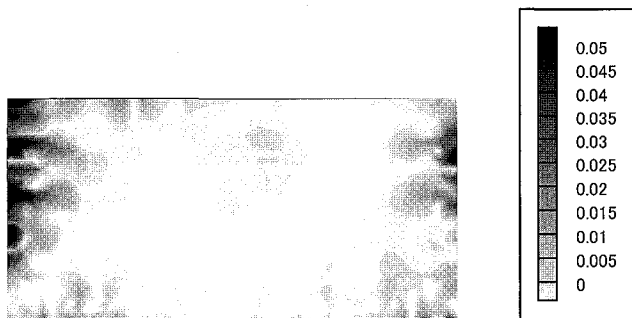


(a) 解析諸元と境界条件

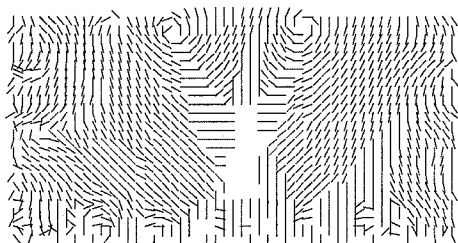


(b) 初期節点配置図

図-1 基礎押し込みの解析モデル

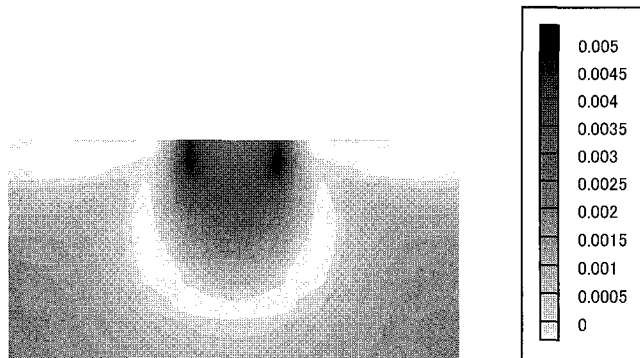


(a) ひずみ分布図

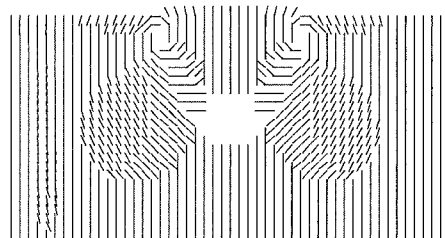


(b) 変位ベクトル

図-2 解析結果（安定化項を考慮していない場合）



(a) ひずみ分布図



(b) 変位ベクトル

図-3 解析結果（安定化項を考慮している場合）

$$\|\varepsilon\| = \sqrt{\text{tr}(\varepsilon\varepsilon^T)} \quad (2)$$

ここで、 $\varepsilon = \int D dt$ 、 $D$ はストレッチングである。また、(b)の変位ベクトルの図では、初期節点配置から、解析終了後までの変位をベクトルで表現している。(a)では特に境界部で正常ではない値が得られている。また、(b)では変形状態が正しく得られておらず、乱雑な方向を示した変位ベクトルの図が確認できる。このことから、空間振動が相互に影響を及ぼしていることがわかる。一方、図-3では(a)-(b)のいずれの図でも、載荷後の状態を良好に示しており、安定化項が振動を抑制することで、良好な結果をもたらしていることがわかる。

#### 4. まとめ

本研究では、EFGMを用いて水～土連成有限変形解析を行うにあたり、間隙水圧の空間振動（ロッキング）を軽減することを目的に、安定化項を導入して解析を行っている。基礎押し込みの地盤の解析に対し、良好な数値妥当性を示すことができた。

#### 参考文献

- 1) Murakami, A., Setsuyasu, T. and Arimoto, S.: Mesh-free method for saturated soil within finite strain and its numerical validity, *Soils and Foundations*, 45(2): 145-154, 2005.
- 2) Pastor, M., Li, T., Liu, X. and Zienkiewicz, O.C.: Stabilized low-order finite elements for failure and localization problems in undrained soils and foundations, *Comput. Meth. Appl. Mech. Engrg.*, 174: 219-234, 1999.
- 3) Mira, P., Pastor, M., Li, T. and Liu, X.: A new stabilized enhanced strain element with equal order of interpolation for soil consolidation problems, *Comput. Meth. Appl. Mech. Engrg.*, 192: 4257-4277, 2003.
- 4) Zienkiewicz, O.C., Qu, S., Taylor, R.L. and Nakazawa, S.: The patch test for mixed formulations, *Int. J. Numer. Meth. Engrg.*, 23: 1873-1883, 1986.
- 5) Belytschko, T., Lu, Y.Y. and Gu, L.: Element-free Galerkin methods, *Int. J. Numer. Meth. Engrg.*, 37(5): 229-256, 1994.