

安定化項を考慮に入れた EFGM による水～土連成解析

An Analysis of a Soil-Water Coupled Problem Using EFGM Considering a Stabilization Term

柴田 俊文*, 村上 章**

Toshifumi Shibata, Akira Murakami

1. はじめに

水～土連成問題の解析では, 圧密初期に間隙水圧が振動する現象(ロッキング)の存在が明らかになっている¹⁾. この問題の解決方法として, 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下げ的方法や, 安定化項を導入する方法などがある. 本研究では, Element-Free Galerkin Method (EFGM)²⁾を水～土連成有限変形解析に用い, 安定化項を考慮して解析を行った. 最初に Zienkiewicz et al. が用いたモデルにより安定化項の効果を示し, 次に三軸圧縮試験の解析に適用して数値妥当性を検討した.

2. EFGM の定式化と安定化項

2.1 形状関数

Fig.1 に水～土連成問題における EFGM の定式化を要約する. ここで EFGM の特徴として 移動最小二乗法 (Moving Least Squares Method; MLS) による関数近似というものがある. MLS は節点情報のみから形状関数を作成するため, 要素情報不要の解析を可能とし, 変位のみならずひずみ, 応力も連続した値で得られるという利点がある. 一方, 有限要素法では, 解を安定させるため間隙水圧に関する形状関数の次数を変位の次数よりも一次下げ的方法がとられることが多い. しかし EFG では上述したように 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を異なるものにするのは不自然であり, MLS の重み関数を変化させて安定化を図る³⁾等の対策がなされてきている. 本研究では形状関数は変位と間隙水圧で同一とし, 安定化項を考慮して間隙水圧の空間振動を抑制する.

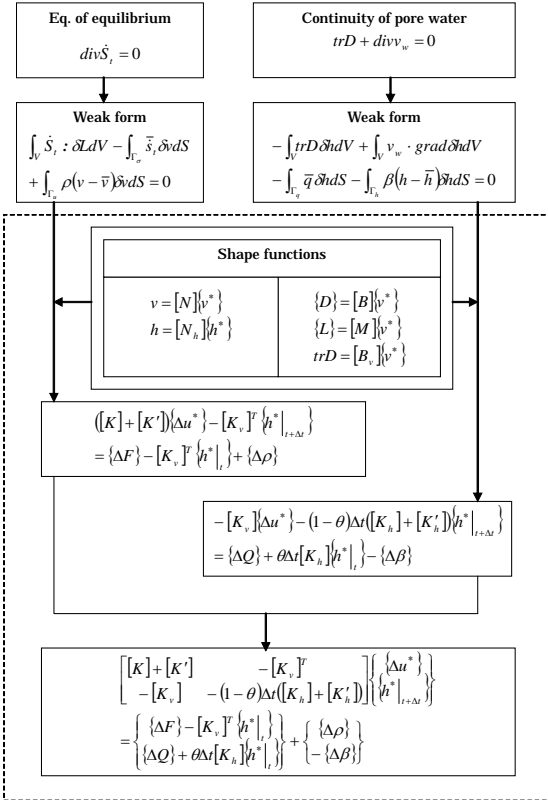


Fig.1 定式化の要約
Summary of the formulation

2.2 安定化項

本研究では, Fig.1 中右上にある連続式を弱形式で表した式に安定化項を付加する. 式(1)の左辺最終項が安定化項である.

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

ここで, 安定化項の α は安定化パラメータ, h は間隙水圧, V は体積を示す. 空間振動が生じた場合, 間隙水圧は鋸刃状の様相(図を後述)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. 数値解析例

3.1 安定化の影響

Fig.2 に示す Zienkiewicz et al. が用いたモデルで解析し, 安定化項の効果について検討を行う. ここで,

*松江工業高等専門学校, **岡山大学, Matsue National College of Technology, Okayama University

Table.1 物性値
Material parameters

圧縮指数	λ	0.11
膨潤指数	κ	0.04
限界状態定数	M	1.42
ポアソン比	ν	0.333
初期間隙比	e_0	0.83
初期体積比	$v_0 = 1 + e_0$	1.83
初期圧密応力(P_0)	p'_0	3.0

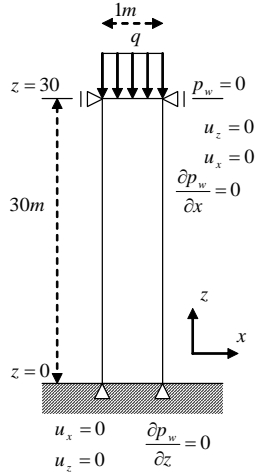


Fig.2 解析モデル
Analysis model

領域積分のバックグラウンドセルは 1.0m×1.0m (境界部では 0.5m×0.5m) で 5×5 の Gauss 積分を使用し, 境界条件の処理にはペナルティ法を用いる. 節点数は 62 (31×2) 個, 形状関数は一次基底の Quartic spline を採用し, サポート半径は 1.0 を使用する. スケールファクター (バックグラウンドセルの一辺とサポート半径の比) は 1.5 とした. Table.1 に解析に用いた物性値を示す. なお透水係数は 1.0×10^{-7} cm/sec を用いた. Fig.3 に荷重載荷直後の結果を示す. ここで図中の値は間隙水圧を表し, 式(1)の α は 1.0 を用いて解析した. 安定化項を考慮した結果, 間隙水圧の振動が抑制され, 解が安定していることが確認できる.

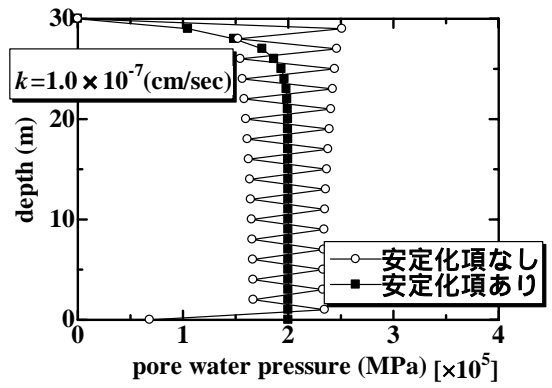


Fig.3 安定化項の影響
Effect of the stabilization term

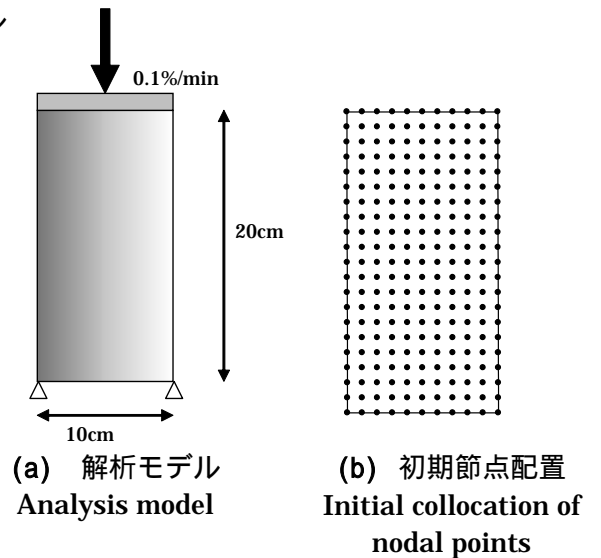


Fig.4 三軸圧縮試験の解析モデル
Analysis model for triaxial compression test

3.2 三軸圧縮試験の解析

地盤工学の問題に対する本研究の適用性を検討するため, 三軸圧縮試験の解析を非排水条件で変位制御により行った. Fig.4(a), (b)に解析モデルと初期節点配置を示す. バックグラウンドセルは 1.0cm×1.0cm (境界部は 0.5cm×0.5cm) とし, 他のパラメータは先の解析と同様の値を用いている. Fig.5(a), (b)に安定化項を考慮していない結果 (節点配置) と考慮している結果を示す. ここで, この結果は軸ひずみ 6% の際のものであり, 安定化項を考慮して三軸圧縮試験の解析を行った場合, 良好な結果が得られていることが確認できる.

謝辞

本研究を行うにあたり, Northwestern University の Ted Belytschko 教授に多大なるご支援を頂いた. ここに記して謝意を表する.

参考文献

- 1) 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.
- 2) Belytschko, T., Lu, Y.Y. and Gu, L.: Element-free Galerkin methods, *Int. J. Numer. Meth. Engrg.*, 37(5): 229-256, 1994.
- 3) 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.

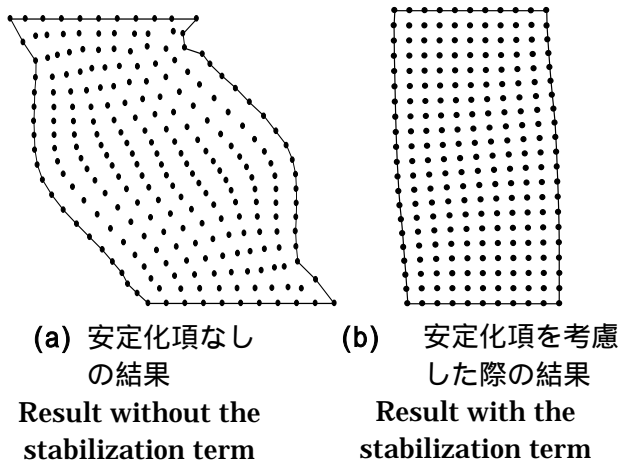


Fig.5 三軸圧縮試験の解析結果
Numerical results for triaxial compression test