

浸透流の動的挙動に関する数値解析

Numerical Analysis of Dynamic Behavior of Seepage Flow

○福田啓五*, 藤澤和謙*, 西村伸一*

Keigo Fukuda, Kazunori Fujisawa, Shin-ichi Nishimura

1. 研究背景と目的 土の内部を流れる浸透流の数値解析では、浸透流が層流かつ定常な時に成立するダルシー則¹⁾を連続式に適用した解析が行われてきた。地震時の地盤解析においても、浸透流は準定常状態にあると（土骨格と同じ加速度を持つ）仮定して取り扱われることが多く、浸透流自体の動的な挙動は不明な点が多い。本研究では、ダルシー則を土骨格と浸透流の摩擦則と考えて、浸透流の運動方程式をたて、連続式と共に解析することで浸透流の動的な挙動を明らかにした。本論では解析方法を簡潔に説明し、その手法によって得られる解析例を紹介することとする。

2. 研究内容 浸透流の動的挙動を解析するにあたり、その支配方程式（2次元）は式(1)と表される。本研究では解析方法として有限体積法を適用し、式(1)の移流項を安定的に解くために近似リーマンソルバーを用い、TVD ルンゲクッタ法から浸透流速分布、間隙水圧分布の時間変化を解くこととした。

$$\frac{\partial \rho n}{\partial t} + \frac{\partial \rho v_j}{\partial x_j} = 0, \quad \frac{\partial \rho v_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\rho v_i v_j}{n} \right) + n \frac{\partial p}{\partial x_i} = n \rho g_i - \frac{n \rho g}{k_s} v_i \quad (1)$$

g_i は重力加速度の x_i 成分を示し、式(2)では j について総和規約を用いている。

3. 解析条件 解析対象となる領域は横幅1.0m、縦幅0.5mの多孔質体であり、800個の三角形セルにより分割されている。また解析は a_x 、 a_y ともに $2.0\sqrt{2} \sin(2\pi \cdot 4t)$ の加速度（単位は m/s^2 ）を受ける浸透水を想定しその動的挙動を解析した。ここに a_x 、 a_y は加速度の x 、 y 成分であり、 $(x, y)=(1, 1)$ 方向、大きさが $4.0 \sin(2\pi \cdot 4t)$ の加速度を表している。入力された加速度の大きさ（符号付き）の時間変化を図1に示す。以下に載せてある解析結果は $t=0.050$ 、 0.157 秒における浸透流の挙動の分布図である。

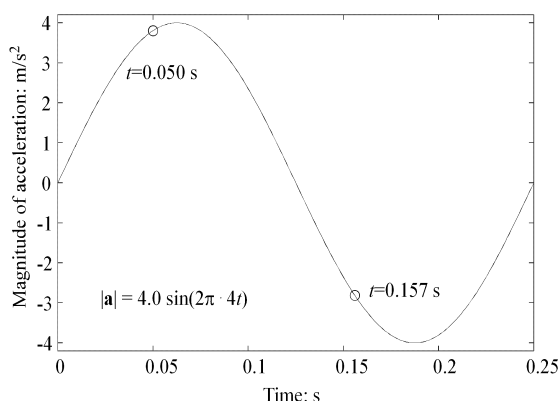


図1 入力加速度の大きさ

Figure 1 Magnitude of input acceleration

加速度の大きさはそれが $(x, y)=(1, 1)$ 方向に作用する時を正、 $(-1, -1)$ 方向に作用する時を負としている。

初期条件には多孔質全体で $p=0\text{kPa}$ 、 $v_1=v_2=0\text{ m/s}$ とし、境界条件としてすべての境界で浸透水の流入出がないとした。この解析条件は水で飽和され、密閉された多孔質体の45度方向に図1に示された大きさを持つ加速度が作用することに対応する。材料定数として、透水係数 k_s に $2.0 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ 、体積圧縮係数 K_w に 1000MPa を与え、加速度 g を 9.8m/s^2 間隙率 n は解析領域全体で一様に 0.5 とした。

* 岡山大学大学院 Okayama University

Key word: 浸透流, 数値解析, 有限体積法

4. 解析結果 ここに図 2, 3 はそれぞれ 0.050 秒経過後の間隙水圧分布, 浸透流速分布を示している. 図 2 からは(1, 1)方向の加速度が作用し始めると浸透水は慣性力として(-1, -1)方向の力を受けることで $(x, y)=(0, 0)$ 付近の水圧が上昇している. しかし, $(x, y)=(1.0, 0.5)$ 付近では圧力が減少しているのが見てとれる.

図 3 に示す流速ベクトルの方向からも浸透水が $(x, y)=(0, 0)$ 付近に向かって流れている様子がわかる. また, すべての境界面が不透水で浸透水の流入出がないため, 境界付近の浸透流速が小さく中心付近が大きくなっている.

図 4, 5 はそれぞれ 0.157 秒経過後の間隙水圧分布, 浸透流速分布を示している. ここでは加速度の方向が(-1,-1)方向に変わり, 先程とは逆方向になっている. そのため $(x, y)=(1.0, 0.5)$ 付近の圧力が大きく, $(x, y)=(0, 0)$ 付近の圧力が小さくなり, これまでの領域内における圧力差は減少しているのがわかる.

図 5 でも浸透水の流れが $(x, y)=(1.0, 0.5)$ 付近に向かって流れており流速ベクトルが図 3 とは逆方向を向いているのが確認できる. また, 浸透流速の方向の時間変化を追ってみると浸透流は領域内を円を描くように領域内を循環している様子が確認できた.

5. まとめ 本論では, 浸透流の連続式に加えて運動方程式を解くことによって浸透流の動的挙動を数值的に解析した. 解析手法には移流項を安定的に計算するため, リーマンソルバーを用いた有限体積法を適用した. 得られた解析結果は震動を受ける浸透流の自然な挙動を再現しており, 同手法によって定常状態を仮定した解析では求めることのできない浸透流の動的な変化が解析可能となった.

参考文献 1)Nader, J. J.: Darcy's law and the differential equation of motion, *Geotechnique*, 59(6), pp.551-552, 2007.

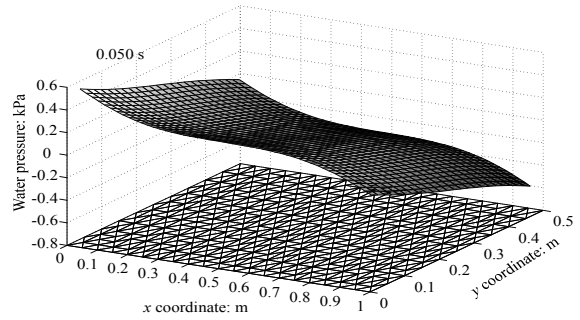


図 2 間隙水圧分布の変化
Figure 2 Response of pore water pressure

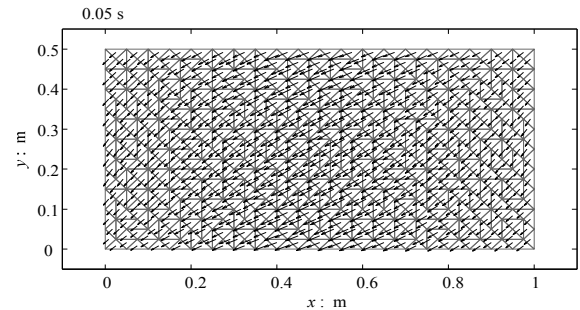


図 3 浸透流速分布の変化
Figure 3 Response of pore water velocity

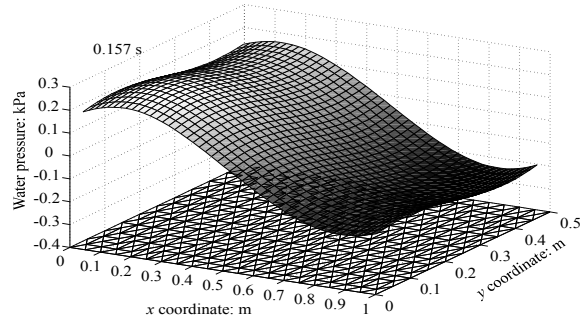


図 4 間隙水圧分布の変化
Figure 4 Response of pore water pressure

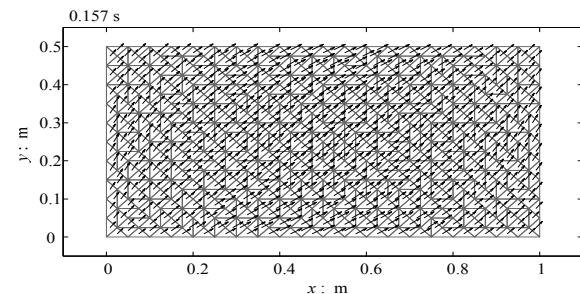


図 5 浸透流速分布の変化
Figure 5 Response of pore water velocity