

高透水性土供試体内における間隙水の動的 migration の $u-w-p$ formulation に基づく水～土骨格連成有限変形解析

$u-w-p$ formulation 水～土骨格連成解析 高透水性

名古屋大学 学生会員 ○豊田 智大
国際会員 野田 利弘

1. はじめに

飽和土の水～土骨格連成解析手法には、混合体としての土と間隙水の運動方程式に質量保存則より導かれる水～土骨格連成式を連立して厳密な方程式形を解く手法がある。この手法は「 $u-w-p$ formulation」と呼ばれるが、このような定式化に基づいて直接求解されることは稀であり、大抵は「間隙水の静的浸透」を仮定することで方程式系を縮約してから解く「 $u-p$ formulation」と呼ばれる近似解法により代替される。いわば $u-p$ formulation は、計算コスト削減の代償として間隙水の動的浸透を解くことを放棄する手法であり、事実、この手法を間隙水が加速度的にも浸透する高透水性土の連成問題に適用すれば計算が破綻してしまう。そこで著者らは、この近似を導入しない $u-w-p$ formulation に回帰・立脚し、水～土骨格連成計算の支配方程式の原型を直接離散化して解く手法を開発してきた。これまでに、理論解との比較や、低透水性土における $u-p$ formulation との解の一致の確認を通して Verification を行い、 $u-p$ formulation では求解不能に陥る高透水性土の連成問題が求解可能となることを確認してきた¹⁾。本稿では、 $u-w-p$ formulation によって初めて解かれ得る間隙水の動的応答とはどのようなものか、また、それが連成問題の解にどのような影響を及ぼすのかについて、高透水性飽和土供試体の二次元平面ひずみ非排水条件下での急速変形問題を例にとり検討した結果を示す。

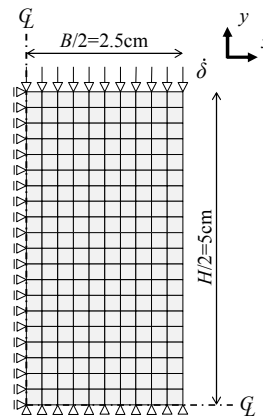


図1 有限要素メッシュ

2. 解析条件

本稿では、透水係数の異なる 4 種の高透水性材料 ($k = 10^1, 10^0, 10^{-1}, 10^{-2}$ cm/s) からなる図 1 の上下・左右対称性を仮定した平面ひずみ矩形供試体の 1/4 断面を解析領域にとり、その上端に高速な載荷速度 ($\dot{\delta} = 0.1$ cm/s) を与える。ただし、供試体上端での端面摩擦を考慮し、上端における x 方向変位を拘束した。また、側圧一定非排水条件下での解析を実施するため、境界全体に流量ゼロを与えた。弾塑性構成式 SYS Cam-clay model のパラメータ群は紙幅の都合上省略するが、初期状態は最も簡単なものとして等方練返し正規圧密状態を想定した。供試体の自重は考慮せず、初期拘束圧として一様に 294.3kPa を与えた。時間刻み幅は $\Delta t = 2 \times 10^{-5}$ sec としたが、この条件下で $u-p$ formulation により求解しようとするとき、上記のいずれの透水係数に対しても計算が破綻することを確認している。

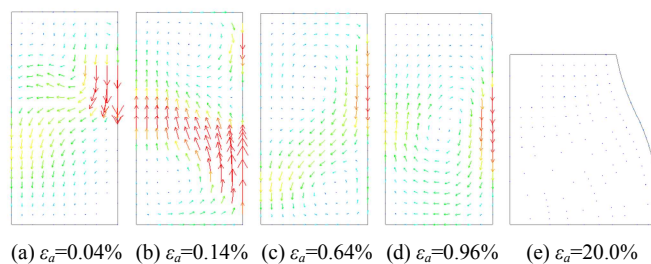


図2 相対平均流速分布

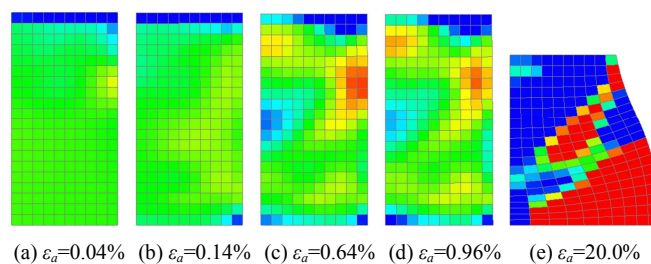


図3 比体積変化量分布

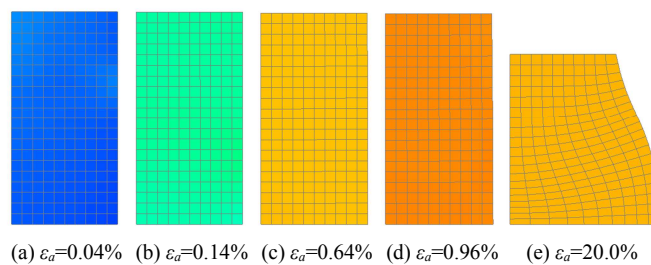


図4 過剰間隙水圧分布

3. 解析結果

透水係数 $k = 10^1$ cm/s の供試体内での間隙水の相対平均流速分布、比体積分布、間隙水圧分布の推移をそれぞれ図 2、図 3、図 4 に示す。まず、図 2 において、供試体内での間隙水の動的な migration、すなわち、同図(a)~(b)のような反射する流速場や同図(c)~(d)のような回転する流速場が解かれていることがわかる。このような間隙水の動的応答は Darcy 抵抗により時間経過とともに減衰し、やがては同図(e)のように完全に消滅する。図 3 においては、間隙水の動的応答に起因して、大域的には非排水条件であ

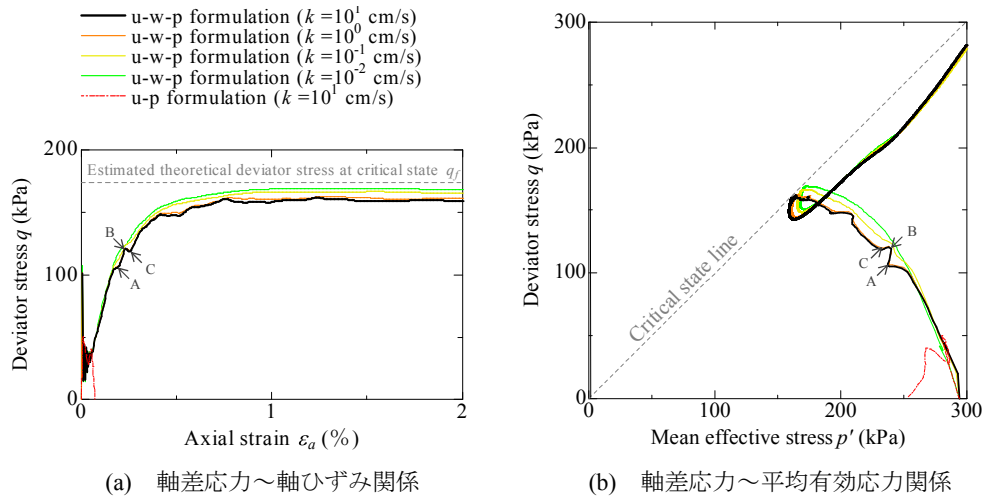


図5 供試体のみかけの応答

るにもかかわらず、要素毎には吸排水して比体積が非一様に変動する様子が解かれている。これに対し、図4では間隙水圧が一様に分布していることが確認されるが、これは非一様変形により生じた動水勾配が、高透水性条件下で速やかに解消されることによる。

次に、供試体端面において求まる反力や間隙水圧から推計した、供試体のみかけの応答を図5に示す。ここに、みかけの軸差応力は、運動方程式より①外力、②土骨格の慣性力、③間隙水の慣性力にそれぞれ由来する項の和として求めている。まず、図5の黒線は透水係数 $k = 10^1$ cm/s の解析結果であるが、同図(a), (b)のいずれにおいても、除荷と再載荷を繰り返すように振動する応答が解かれている。しかし、実はこの現象もまた、間隙水の動的応答に起因して生じたものであると解釈できる。図6は、図5(a)黒線のみかけの軸差応力を再プロットした上で、この軸差応力に占める間隙水慣性の寄与分(上記の③に由来)のみを抽出し、灰線で表示したものである。同図は、端面で上向きの間隙水加速度が生じているときはみかけの軸差応力が増加し(時点AおよびC)、端面で下向きの間隙水加速度が生じているときはみかけの軸差応力が減少することを示している(時点B)。すなわち、間隙水がペDESTALに加速度的に衝突する/引き込むことによる反力の増減が、みかけの応答に影響を与えることが示唆された。なお、このような間隙水の加速度的応答は、先の反射や回転を伴う流れを含め、まさに $u-p$ 近似の下で切り捨てられる現象そのものであり、 $u-w-p$ formulation によってのみ解かれうる現象である。その証拠に、この問題を $u-p$ formulation で解くと図5中の赤線が得られるが、 $u-w-p$ formulation の解である黒線を大きく逸脱するばかりか、軸差応力はやがて負に転じ、そのまま発散してしまう。これは、 $u-p$ 定式化における高透水性条件下での連成式の符号反転²⁾によるものである。

さらに、図5中の4種の透水係数に対する解析結果 ($k = 10^1, 10^0, 10^{-1}, 10^{-2}$ cm/s) を比較すると、先のみかけの振動現象は透水係数が小さくなるにつれて消滅してゆき、曲線はより滑らかになることがわかる。これは、Darcyの抵抗力項が混合体の運動方程式中では(土骨格にとっては)粘性項として寄与するが³⁾、この抵抗力は透水係数が小さいほど反比例して大きくなるため、応答がより過減衰的になることと対応している。

4. おわりに

低透水性土から高透水性土まで一貫して解析可能な、 $u-w-p$ formulation に基づく二相系連成有限変形解析手法を開発し、側圧一定・非排水・高速圧縮条件下にある高透水性供試体の有限変形問題に適用することで、以下の知見を得た。

- $u-w-p$ formulation に立脚することで、高透水性供試体を急速载荷した際に生じる間隙水の動的 migration、すなわち反射や回転を含む加速度的応答の出現が解かれうることを明らかにした。
- 間隙水の加速度的応答の影響が土骨格のみかけの応答に影響すること、すなわち応力ひずみ関係やストレスパスの振動現象として計測されうることを示した。また、この影響は透水係数が大きいほど顕著に現れることを示した。

参考文献)

- 1) 豊田, 野田 (2016): Full-formulation に基づく水～土骨格連成有限変形解析コードの開発とその検証, 第21回計算工学講演会, C-2-1.
- 2) Noda, T. et al. (2008): Soil-water coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion..., *S&F*, **48**(6), 771-790.
- 3) 豊田, 野田 (2018): Full-formulation に基づく超高透水性土の動的有限変形..., 土木学会第73回年次学術講演会, III-371, 741-742.

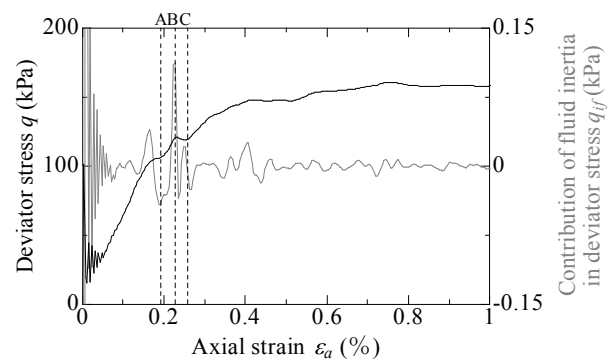


図6 みかけの軸差応力とその液相加速度寄与分の比較