

二相流としての鉛直浸透実験

山口大学大学院 学生会員 ○有井隆秀 伊藤満富
山口大学大学院 正会員 中田幸男 兵動正幸 吉本憲正

1. はじめに

近年、豪雨による土砂災害、洪水時の河川水位上昇による堤体の決壊などが問題となっている。これらの現象は、地盤内に水が浸透することにより土のせん断強度が低下することで発生すると考えられている。したがって、地盤内での水の浸透挙動を正しく把握することが重要となる。近年、発生している集中豪雨などを鑑みると急激な水の浸透、水位上昇が考えられ、その際には、空気の影響も重要な因子と考えられる。

本研究では、不飽和土に対して、上部から定水位条件での鉛直浸透実験を実施した。この際、下部からの排水・排気を許す場合と許さない場合について実験を実施し、間隙水圧および間隙空気圧の変化がどのように起こるかを検討した。

2. 水分特性曲線

土中水の化学ポテンシャルのうち、不飽和土においてマトリックスポテンシャル（以下 ψ_m ）（ $\psi_m = u_w - u_a$ ）は重要な考え方の一つである。したがって、土の含水量と土中水の ψ_m の関係が必要となる。水分特性曲

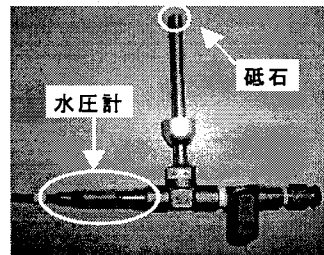


写真-1 開発したテンシオメーター

線の作成にあたっては、豊浦砂を用い $Dr=80\%$ で ψ_m の測定を行った。 ψ_m の測定において、間隙空気圧は0とし、間隙水圧の測定から ψ_m としている。測定器は、三軸試験機を利用し、ペDESTALにセラミック板（AEV:100kPa）を埋め込んだものと浸透実験用に開発した先端に砥石を装着したテンシオメーター（写真-1）（AEV:50kPa）を用いた。セラミックの場合は、測定面上で任意の飽和度に調整した試料を所定の密度になるように締め固め、供試体が完成した時点から、測定を開始している。一方、テンシオメーターの場合は、任意の飽和度に調整された試料を所定の密度になるように容器内に詰め、その後、テンシオメーターを挿入し、挿入後すぐに測定を開始している。図-1に ψ_m の反応時間を示す。この結果より、砥石を付けたテンシオメーターは、セラミックとほぼ同じ ψ_m 値を測定でき、また反応時間が早いため、豊浦砂を試料とした後述する鉛直浸透実験において、瞬時に間隙水圧の変化を測定する事が可能であることがわかる。図-2に豊浦砂の水分特性曲線を示す。2つの測定器は若干のばらつきはあるものの、ほぼ同値を示すことがわかる。

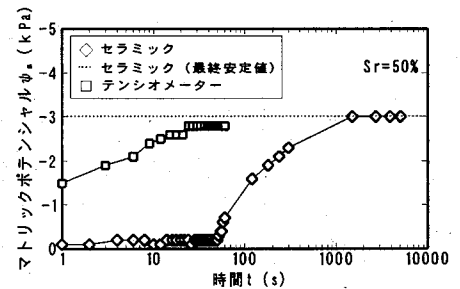


図-1 マトリックスポテンシャルの反応時間

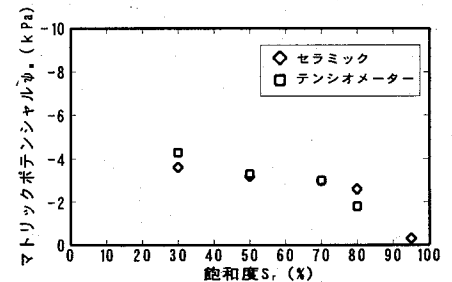


図-2 水分特性曲線

3. 鉛直浸透実験

不飽和地盤中の流体の流れを把握するために、鉛直浸透実験を行った。図-3に用いた実験装置の模式図を示す。実験装置下部には排水コックがあり、排水・非排水条件での実験が可能である。本研究では表-1に示す実験条件および、排水・非排水条件下で所定の表面貯留水位を維持しつつ加水し、間隙水圧の時間変化を測定した。また、 ψ_m および間隙空気圧を推定するために、流入開始から所定の時間で実験を中断し、各測定点での水分量を測定した。図-4に排水条件下の間隙水圧と時間の関係を示す。初期飽和度30%、水位2cmで100秒経過後に①の箇所で、含水比を測定すると4.9%、間隙水圧が3.0kPaであった。その含水比から求めた飽和度を用いて、水分特性曲線から

表-1 実験条件

初期飽和度	水位 (cm)			
	0.5	2	4	10
30%	0.5	2	4	10
50%	0.5	2	4	10

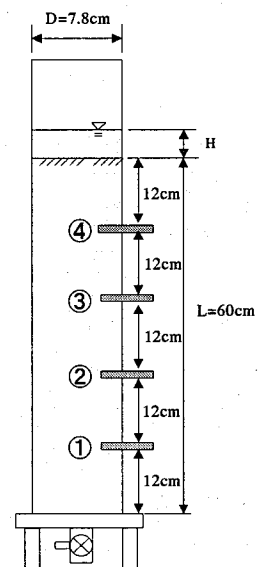


図-3 鉛直浸透実験装置

求められる $\psi_m (= -3.2 \text{ kPa})$ と間隙水圧の値がほぼ同値であることが確認できたため、排水条件下では空気圧の変化は無視できる程小さいものであるといえる。また、上から順に間隙水圧が $0 (\psi_m = 0)$ となり、浸透によって上から順に飽和していくことがわかる。

図-5 に、非排水条件下の間隙水圧と時間の関係を示す。非排水条件下では、排水条件と比べて間隙水圧の上昇の仕方がかなり異なることがわかる。詳しく挙動をみるため、排水条件と同様に所定の時間（100 秒、400 秒）で中断し、そのときの含水比を測定して ψ_m を推定した。図-6 に飽和度から推定した ψ_m の時間変化を示す。多少の減少はあるが、 ψ_m は長時間経過しても、初期値とあまり変わらない値を示していることがわかる。次に、間隙水圧と ψ_m の関係式を利用し、間隙空気圧を算出した。図-7 に非排水条件下の間隙空気圧と時間の関係を示す。実験開始直後から急激に圧力が増加していることがわかる。

また、非排水実験中、写真-2 のような上部土塊の浮遊現象が生じた。これは、表層部分において空気の排出よりも水の浸透の方が速く、浸透水および初期水分により間隙が充填され、水と土粒子による障壁ができ、間隙空気が上方へと移動できず、試料内部に閉じ込められ、間隙空気圧が増加したため起こったと考えられる。このことを Bishop の有効応力式（式（1））を用いて検討した。

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad \dots \dots (1)$$

ここで、 χ は Bishop の有効応力パラメーターである（飽和土 $\chi = 1$ 、乾燥土 $\chi = 0$ 、不飽和土 $0 < \chi < 1$ ）。写真-2 に浮遊土塊の高さと水位を併せて示す。土塊の飽和度は浸透水量が不明であるため初期飽和度から変化していないと仮定し全応力 σ を算出した。間隙空気圧は、前述の方法と同様の方法で算出した。ここで土塊が浮遊するので、浮遊する瞬間その境界では水の存在がなくなるため、 χ は 0 と考えた。そうすると、Bishop の式の右辺第二項は無視できる。これより算出した結果、全応力 $\sigma = 1.0 \text{ kPa}$ 、間隙空気圧 $u_a = 2.9 \text{ kPa}$ より、 $\sigma' = -1.9 \text{ kPa}$ となった。負の値を示したのは、浮遊した土塊とアクリル製円筒の間に作用する摩擦力とつりあうためと考えられる。この計算より、土塊の浮遊現象が空気圧によるものであることが理解できる。

4. まとめ

本研究では、不飽和土に対して上部から定水位条件での鉛直浸透実験を実施し、間隙水圧および間隙空気圧がどのように変化するかを検討した。得られた結果を以下に記す。①排水条件下では、空気圧の変化は無視できる程小さい。②不飽和状態かつ非排水条件下では、間隙空気の圧縮により間隙空気圧が増加し有効応力の低下を誘発する。これらより、実地盤において豪雨などの急激な水位上昇時に透水性の低い土層が地盤内に存在する場合、浸透現象に起因する間隙空気圧による地盤破壊が誘発され、非常に危険な状態になる可能性が十分に考えられる。

【参考文献】1)不飽和地盤の挙動と評価編集委員会：保水性および透水性，不飽和地盤の挙動と評価，pp.11-84，地盤工学会，2004。 2)不飽和土編集委員会：ジオテクノート 5 不飽和土，pp.9-20，土質工学会，1993。

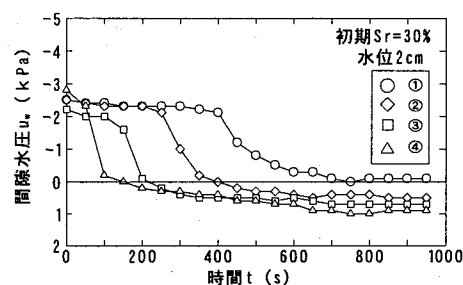


図-4 間隙水圧の時間変化（排水条件）

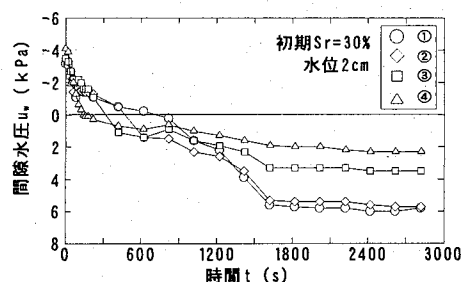


図-5 間隙水圧の時間変化（非排水条件）

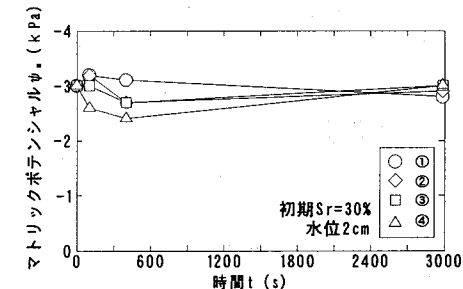


図-6 飽和度から推定した ψ_m の時間変化（非排水条件）

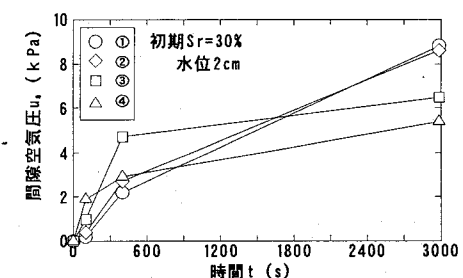


図-7 間隙空気圧の時間変化（非排水条件）

