

土の水分特性のヒステリシスを考慮した地表面付近の土中水分移動の再現

東北大学 学 ○ 佐々木 航平 正 風間 基樹・渦岡 良介・森 友宏

1. 研究の背景と目的

谷埋め盛土の耐震性を検討するには、地震動を受ける前の土の水分状態の把握が必要である。地盤内の水分分布を推定するために、室内試験（加圧法）に基づく土の水分特性が用いられるが、これにより推定した水分分布は原位置観測結果と異なる結果となった。原位置観測結果では地表面下-2.0 m 付近であっても常時高い飽和度を示していたが、これまでの研究ではこの状態を解析的に再現できなかった。

そこで本研究は、地表面付近の水分移動を詳細に観察するため、 $h=2.0$ m の円筒供試体を用いた土の水分特性試験を行った。また、その観測結果を再現するために、水分特性のヒステリシスを考慮した不飽和浸透流解析を行い、地盤内の水分移動について検討した。

2. 土柱法による土の水分特性試験

2.1 試験条件

本研究では、原位置観測サイトと同じ宮城県仙台市内の大規模造成宅地の谷埋め盛土の土を用いた。試験は礫分を除いた 2 mm 以下の細粒分のみで行った。

試験供試体は、 $\phi = 0.2$ m、 $h=2.0$ m のアクリル円筒に試料を入れて突き固めを行い作成した。供試体の作成にあたって、土の乾燥密度を約 1.05 g/cm^3 としたため、突き固め用のランマーを新たに作成した。ランマーの重さは 1.0 kg とし、各層 3 分割、突き固め回数 50 回、落下高さ約 0.2 m で突き固めを行った。供試体内の飽和度の経時変化を計測するため、G.L.=-1.9 (No.1)、-1.7 (No.2)、...、-0.1 m (No.10) に土壌水分計 (Decagon 社製 EC-5) を設置した。

2.2 試験方法とその流れ

土柱法による試験は以下の手順で行った。

1. 下方からの吸水 (6 日間)

図-1 のように土柱の下端を地下水面と仮定し、サクシジョンのみによる下方からの吸水を行った。これより水分特性曲線の主吸水曲線を得る。

2. 上方からの降雨の入力 (8 日間) Rain

約 10 mm/h の降雨を模擬するように水を滴下した。この過程は、乾燥状態における水の不飽和浸透速度を算定するために行う。

3. 飽和透水試験 (2 日間)

図-1 のように土柱の下から上へ透水させ、上部から排水を行った。ここで求まる飽和透水係数を不飽和浸透流解析で用いた。

4. 下方からの排水 (6 日間) Drainage

飽和透水試験によって土柱全体が飽和した状態から、上部は大気開放として下方から排水を行った。これより水分特性曲線の主脱水曲線を得る。

5. 上方からの降雨の入力 (7 日間) Rain Part2

降雨条件は 2. のときと同様である。ここでは湿

潤状態における不飽和浸透速度を計測するために行う。

供試体解体時に土壌水分計付近の土の含水比を計測し、水分計の電圧値から算出される含水比との差を観察した。

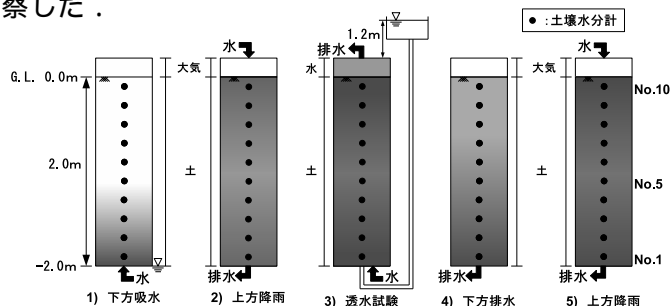


図-1 土柱法による試験手順の模式図

2.3 飽和度の時刻歴

試験における飽和度の時刻歴を図-2 に示す。ここでは、図-1 に示した No.1、No.5、No.10 について比較する。No.10 は他の層に比べ飽和度の変化が激しい。特に降雨時に顕著であり、これは水の滴下速度が大きく変動したことによると考えられる。また、2.2 の 2. における降雨では各層の飽和度上昇にタイムラグがあるが、2.2 の 5. における降雨では飽和度上昇にタイムラグはほとんど見られない。これは地表付近でも高い飽和度を保持し、土中水の移動が同時に起きたためと考えられる。

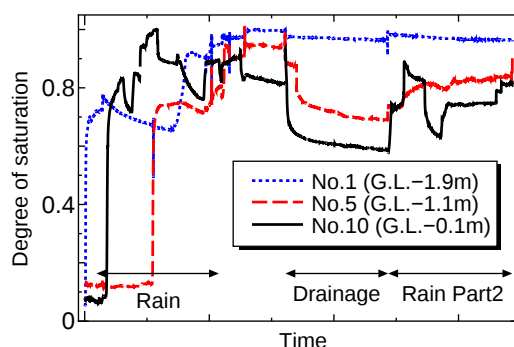


図-2 試験結果による飽和度の時刻歴

2.4 供試体内の水分特性変化

図-3、図-4 に供試体内の飽和度の経時変化を示す。降雨による経時変化からは、約 5 日かけて 2.0 m 浸透したことが分かる。同時期に下方からの排水が確認されたことから明らかである。排水による経時変化からは、排水を開始してから 1 日でほぼ収束していることが分かる。さらに、収束状態になったときの飽和度は地表付近でも 60 % 近くを保持しており、高い飽和度であることが分かる。

3. 不飽和浸透流解析による再現

3.1 解析手法

不飽和浸透流解析手法は渦岡ら²⁾の手法を用いた。

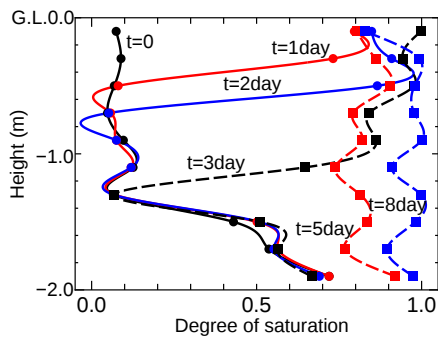


図-3 降雨による供試体内の飽和度経時変化

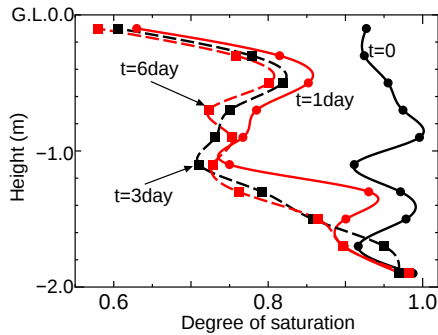


図-4 排水による供試体内の飽和度経時変化

3.2 水分特性曲線

VG モデル¹⁾ではサクシオンは非負の値として扱われ、飽和-不飽和の変化領域で比水分容量の連続性が保たれない。そのため、水分特性曲線にロジスティック関数モデル（以下 LG モデル）を用いて、さらにサクシオンの増減に応じて異なる走査曲線を辿るヒステリシスモデルを適用した。

3.3 解析条件

解析モデルは試験で用いた $\phi = 0.2 \text{ m}$, $h = 2.0 \text{ m}$ の供試体を再現したもので、1 要素 $0.02 \times 0.02 \text{ m}$ 、解析領域は $0.2 \times 2.2 \text{ m}$ 、総要素 1100 要素の 2 次元要素を用いた。解析に用いる 2 種類の材料 (A) 大気 (B) 土のパラメータを表-1 に示す。土柱法による試験では乾燥密度を 1.05 g/cm^3 と設定したため、そこから初期間隙率を算出した。土粒子密度は土粒子密度試験、飽和透水係数は土柱法で定水位透水試験と同様の条件下で求めた。 ξ , η の値は不飽和浸透速度を算出し、飽和度による浸透速度の変化を求めることで設定した。

水分特性曲線は、土柱法による試験から得られた曲線、大気要素は既存のモデル²⁾に、いずれも LG モデルにてフィッティングした。その結果を図-5 に示す。なお、大気層の飽和透水・乾燥透気係数は土要素に比べて大きな値を設定した。

3.4 解析および実験結果の比較

図-6 に土壤水分計 No.10 の実験および解析結果における飽和度の時刻歴を示す。実験結果と比較するため、土壤水分計を差込む位置と同じ部分の要素を選択している。これより、解析結果は概ね実験結果を再現できている。これは、透水係数や LG モデルのパラメータが実測値に近いと考えられる。しかし、解析結果は実験結果以上の飽和度を示しており、この現象は他の層においても同様に見られるものであった。

原因としては、降雨が一定でなかったことが考えられる。さらに排水初期の飽和度の低下を見ると、解析結果は実験に比べ緩やかな曲線を描いている。これは、透気係数 $\cdot \xi \cdot \eta$ の設定が不十分だったためと考えられる。

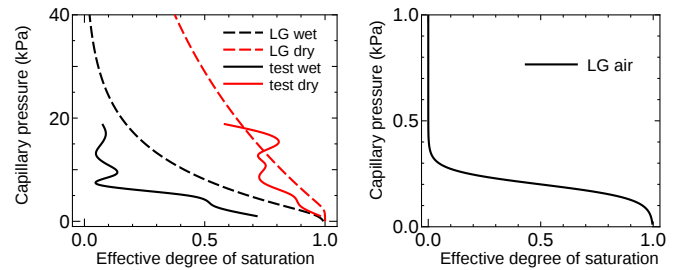


図-5 水分特性曲線

表-1 材料パラメータ

パラメータ	(A) 大気	(B) 土
初期間隙率 n_{0s}	1.0	0.584
実質土粒子密度 ρ_{0s}^{sR} [t/m^3]	0.0	2.523
実質間隙水密度 ρ_{0s}^{wR} [t/m^3]	1.0	1.0
実質空気密度 ρ_{0s}^{aR} [t/m^3]	1.23×10^{-3}	1.23×10^{-3}
透水係数 k_{0s}^{ws} [m/s]	1.0	1.5×10^{-6}
透気係数 k_{0s}^{as} [m/s]	1.0	1.5×10^{-7}
間隙水の体積弾性係数 K^w [kN/m^2]	2.0×10^6	2.0×10^6
間隙空気の状態定数 $M^a / (\Theta R)$ [$1/\text{m}$]	1.25×10^{-5}	1.25×10^{-5}
最小飽和度 s_w^w	0.0	0.01
最大飽和度 s_w^s	1.0	0.99
ロジスティックモデル定数 a_d	30.0	2.6
ロジスティックモデル定数 b_d	-6.0	-6.0
ロジスティックモデル定数 c_d	1.0	0.01
ロジスティックモデル定数 a_w	-	1.8
ロジスティックモデル定数 b_w	-	-2.0
ロジスティックモデル定数 c_w	-	0.055
不飽和透水係数定数 ξ	0.1	3.00
不飽和透気係数定数 η	10.0	0.333
ラメ定数 λ [kN/m^2]	1.00×10^{-2}	1.27×10^5
ラメ定数 μ [kN/m^2]	1.00×10^{-3}	3.18×10^4

(- : unnecessary parameter)

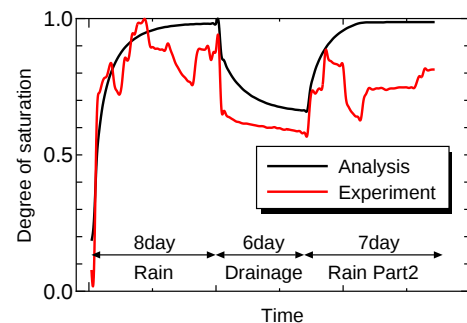


図-6 No.10 における飽和度の時刻歴の比較

4. 結論

本研究では、土柱法によるヒステリシスを考慮した実験、および解析によるその再現性について検討した。その結果、1) 湿潤状態からの降雨では、土中水の移動が全層でほぼ同時に発生したこと、2) 排水による飽和度の変化は開始 1 日でほぼ収束し、地表でも 60 % 近い飽和度を保持していること、3) 解析結果は実験結果の傾向を概ね再現できたことが分かった。

参考文献

- 1) Van Genuchten, M.T. : A closed form equation of predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Sci. Am. j.*, 44, 892-8, 1980.
- 2) 渦岡 良介, 栗原 崇, 風間 基樹, 仙頭 紀明 : 大気要素を用いた不飽和土 - 水連成場の有限要素解析, 計算工学講演会論文集, 13, 219-222, 2008.