原位置不飽和浸透試験のための水分分布推定の試み

中部大学 学生会員〇山田 雄太

中部大学 正会員 杉井 俊夫

1. まえがき

著者らは、円筒管を用いた浸透試験装置を改良し、 直接に飽和透水係数を、また逆解析を用いて水分特性 曲線、不飽和透水係数を推定できる方法¹⁾を提案して きたが、逆解析ソフト及び逆解析の知識が必要であっ た。本報告では本装置で Instantaneous Profile 法の 原理を使用して逆解析を使わない試験法を目標に、得 られている情報(浸透量、5cm 深さでの圧力水頭の時 刻歴)から水分分布の推定ができないか、数値実験の もとで検討したものである。

2. 円筒管を用いた浸透試験装置の概要と計測量

現場での実験装置は図1に示すように圧力水頭を 一定に保ったまま、水を計測開始と同時に浸透させ ることができるようにマリオットタンク及び透水管 の浸透面に栓が設置されている。マリオットタンク の水位変化より地盤への浸透流量を、深さ5cmに 設置したテンシオメータより間隙水圧を時間ごとに 読み取る。すなわち、現場で得られる情報は、浸透 流量 Q(cm³),間隙水圧 h_p(cm),経過時間 t(sec)の3 種類である。

3. 数値実験を用いた水分分布の推定

3.1 数値実験に使用した砂の浸透パラメータ

本研究では、実験装置を使っての推定を予定してい るが、数値実験を用いることで推定計算法のなどのチ ェックや様々な情報を得ることができることから、数 値実験を実際の原位置実験と同様にして計算を試みた。 解析に用いた試料は簡便化のために砂とし、不飽和浸 透モデルとして van Genuchten model を用いて表1 に示す不飽和浸透パラメータを使用した²⁾。

| 表 1 | 数値実験 | 使用 | の浸透 | パラ | × | ータ |
|-----|------|-----|---------|-----|---|----|
| 1 | | レンリ | V/1X/22 | • / | / | |

| 残 留 体 積 | 飽和体積含 | α | n | 飽和透水係数 |
|----------------|-------|--------|-------|----------|
| 含水率 θ r | 水率θs | (1/cm) | (-) | ks(cm/s) |
| 0.045 | 0.430 | 0.145 | 2.680 | 8.25E-5 |

3.2 数値実験の概要

数値実験は図1を再現するため軸対象解析を行って おり、図2示すようにメッシュ間隔を細かく5mmと した。初期条件は圧力水頭一定(-100cm)、透水管著



図4 飽和面深さ Hs と経過時間 t の関係

下においては実験時に設定される 10cm 水頭として解 析を行った。また、図3に示すように 5mm 間隔毎に 解析上の観測点を設け、水分量と圧力水頭を出力して いる。なお、解析には HYDRUS-3D を使用した。

4. 数値実験を用いた水分分布の推定

4.1 「飽和線深さ」と「浸潤前線深さ」の推定

深さ 5cm の圧力水頭と浸透流量から、水分分布を推 定するために、浸潤による飽和となる「飽和線深さ」 H_sと「浸潤前線(フロント) 深さ」H_fによって形成され る台形面積を考えた(図3)。 まず、飽和線の深さ Hs を 解析上の観測点の正圧に変 化する時間から求めて時刻 歴を表したのが図4である。 これより、飽和線の深さ Hs は、Philip らが示して いるように時間の平方根に 比例することが分かり、式 (1)で回帰した。



(1)

$$H_s = s\sqrt{s}$$

ここに、Hs:飽和前線深さ、t:時間、s:比例定数である。

さらに浸透流量データと飽和線の深さ Hs と浸潤前 線の深さ Hf で作られる台形面積(式(2))から Hf を推 定することができる(式(3))。

台形面積
$$A = \frac{\left(H_s + H_f\right)}{2} \theta_s = \frac{4Q}{\pi D^2} \qquad (2)$$
$$H_f = \frac{8Q}{\theta \pi D^2} - H_s \qquad (3)$$

ここに、 H_f :浸潤前線深さ(cm)、 θ s:飽和体積含水率、Q: 浸透流量(cm³)、D:円筒管の直径(cm)である。

4.2 水分分布関数の推定

飽和線深さ Hs と浸潤前線深さ Hf の関係から水分分 布の推定を行い算出した結果と数値解析上の観測点で の水分分布を合わせて図5に示した。図4より、初期 においては、両者はほぼ一致している傾向にあるが、 時間経過とともに今回の推定面の勾配が変化してずれ を生じていることがわかる。また、数値実験の結果か ら水分分布の勾配は鉛直一次元流れが卓越する場合に おいては、ほぼ一定であることがわかり、先行研究に おいても同様の結果を得ている。さらに、Hs と Hf か ら計算される中間の水分量 θ_m ($z_m=(H_s+H_f)/2$) は一 致していることがわかる。そこで、先行研究³⁰で用い た水分分布をフィッティングし易い式(4)で示すロジ スティック曲線で表現することを考えた。

$$\theta = \frac{\theta_s - \theta_i}{1 + \exp(a + bz)} \tag{4}$$

ここに、 θ :体積含水率、 θ s: 飽和体積含水率、 θ i: 初期体 積含水率、z: 深さ、a,b: フィッティングパラメータである。 中間水分量 θ mの深さ zmにおいては式(4)の関係から



次式が得られる。

 $a + bz_m = 0 \tag{5}$

また、水分分布の勾配が一定であることから、式(4) をzに対して微分して水分分布の勾配(式(5))を得る。

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} = -\frac{(\theta_s - \theta_i)b\exp(a + bz)}{\{1 + \exp(a + bz)\}^2} \tag{6}$$

さらに、式(5)と z_m における水分分布勾配(式(6))は $\frac{\partial \theta}{\partial z} = -\frac{(\theta_s - \theta_i)b\exp(a + bz_m)}{\{1 + \exp(a + bz_m)\}^2} = -\frac{(\theta_s - \theta_i)b}{4}$ (7)

となり、初期の水分分布の勾配を式(1)と式(3)及び(水 分変化幅 $\theta_{s}-\theta_{i}$)から計算し式(7)からbを得る。また、 式(5)からaを得ることができ、水分分布曲線式(4) が得られる。

4.3 水分分布推定結果

推定された水分分布曲線と数値実験結果を図5に示 す。図5より、数値実験上の観測点での水分分布変化 を適切に推定できていることがわかる。

5. おわりに

本報告では、簡便な観測データから水分分布の推定 法を提案した。今後、間隙水圧の観測点の深さの検討 や水分保持特性や不飽和透水係数推定、原位置実験を 行っていく予定である。本研究は、科研費(基盤研究 (B),代表:竹下祐二岡山大学教授)及び中部大学特別 研究費Aの補助を得た。ここに記して謝意を表する。 【参考文献】

- 1) 原位置不飽和透水試験装置の開発,平成 21 年度土木学会中 部支部研究発表会講演集, pp.243-244, 2010.
- 2) D. Rassam, J. Simunek, and M. Th. van Genuchten (取 出・井上監訳): HYDRUS-2D による土中の不飽和流れの計 算, 農業土木学会土壌物理研究部会 HYDRUS G., 2004.
- T. Sugii : Modeling of soil moisture profile during infiltration into vadose zone, Proc. of 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Millpress, pp.2449-2452, 2005.