

III-411 不飽和浸透解析のパラメータの同定手法

京都大学工学部 正会員 青木一男、嘉門雅史
大成建設 村上公一

1. まえがき 不飽和浸透の解析手法は、飽和-不飽和の区別なく解析できる手法等、種々の研究が行われており、解析手法の面では完成されていると見なせる。この解析には、圧力水頭-体積含水率関係、圧力水頭-不飽和透水係数関係を規定しなければならないため、数多くのパラメータが必要となる。これらのパラメータを室内実験、原位置試験に基づいて直接求める研究が行われているが、逆問題として捉え同定する研究はあまり見あたらない。そこで本研究では、観測値として圧力水頭を用いるものと地下水位変動を用いるものとの2通りの同定手法を提案し、解析モデルによりこれらの手法の妥当性を検討する。

2. 間接法逆問題による定式化 鉛直1次元不飽和浸透解析の基礎方程式は、式(1)に示すRichardsの式を用い、有限要素法を用いて定式化した。

$$C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \quad (1)$$

ここに、 ψ ：圧力水頭、 $k(\psi)$ ：不飽和透水係数、 z ：上向きを正とする鉛直座標、 t ：時間、 $C(\psi)$ ：比水分容量である。

また、圧力水頭-体積含水率関係および圧力水頭-不飽和透水係数関係はそれぞれ Brooks & Corey の式(2)、Irmayの式(3)を用いた。

$$\left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_{sat} - \theta_r} \right) = \left(\frac{\psi_r}{\psi} \right)^\lambda \quad (2)$$

$$k = k_{sat} \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_{sat} - \theta_r} \right)^n \quad (3)$$

ここに、 θ ：体積含水率、 θ_{sat} ：飽和体積含水率、 θ_r ：最小容水量、 ψ_r ：限界毛管水頭、 λ 、 n ：定数、 k_{sat} ：飽和透水係数である。

これらの関係を規定するのに必要なパラメータは、 k_{sat} 、 ψ_r 、 θ_{sat} 、 θ_r 、 λ 、 n の6個である。この内、 k_{sat} に関しては、揚水試験等から推定することができる。また、 ψ_r は実験的に測定することが可能である。次に、 n については砂質土で $n=3 \sim 3.5$ と言われていることから、ここでは $n=3$ とする。さらに、 θ_r については解析上 $(\theta_{sat} - \theta_r)$ の形でしか現れてこないで、これらを同時に同定することは不可能である。従って、本研究では $(\theta_{sat} - \theta_r)$ 、 λ の2個のパラメータをGauss-Newton法を用いて同定する。

3. 観測値として圧力水頭を用いる同定結果

解析モデルとして50cmの砂柱を考え、31節点に分割した。境界条件は上端からは表-1に示す浸透量を与え下端は圧力水頭を0cmで固定するものである。また、不飽和浸透解析のパラメータの真値は表-2に示す値を用いた。圧力水頭

の初期条件として0.5mm/dayの定常降雨後の圧力水頭を設定した非定常解析による上端から10cmの地点における5日間の圧力水頭値の変化を観測値として用いた。逆解析は、Case①初期条件が既知の場合、Case②初期条件として0mm/dayの定常降雨後の圧力水頭を設定した場合、Case③初期条件として0mm/dayの定常降雨後の圧力水頭を設定し5日間の緩和期間を設けた場合の3通りについて行った。表-3に示した同定結果によるとCase①、③では、かなりの精度で同定されており同定手法の妥当性が明らかになった。また、Case

表-1 地表面からの浸透量

	1日目	2日目	3日目	4日目	5日目
浸透量(mm)	14.474	7.1704	0.0	0.0	0.0
	6日目	7日目	8日目	9日目	10日目
浸透量(mm)	0.0	2.5	1.5	1.5	0.6480

表-2 不飽和浸透解析のパラメータ

飽和体積含水率	0.326
最小容水量	0.075
飽和透水係数(cm/sec)	2.78×10^{-4}
限界毛管水頭(cm)	13.061
λ	1.279

表-3 圧力水頭による同定結果

	$\theta_{sat} - \theta_r$	λ	残差2乗和
真 値	0.251	1.279	—
初期値	0.5	1.5	—
Case①	0.25100	1.2790	3.4504×10^{-8}
Case②	0.24999	1.2801	1.2750×10^{-4}
Case③	0.25100	1.2790	1.3983×10^{-9}

②では精度が落ちており、初期条件の影響が小さくないことがわかる。

4. 観測値として地下水位変動を用いる同定結果

不飽和浸透が地下水位変動に影響を与える要因は飽和帯水層への鉛直かん養である。しかしながら、実際に鉛直かん養量を測定することは困難である。そこで本研究では、飽和帯水層において地下水位変動から鉛直かん養量を推定し、その得られた値から不飽和浸透のパラメータを同定する手法を提案し、その概要を以下に示す。

まず、鉛直かん養量は平面2次元飽和浸透モデルを用い、地下水位変動を観測値として同定する。同定手法はGauss-Newton法を用いた。まず、第1段階として観測期間を24時間の多孔式揚水試験を実施し、地下水位変動から透水量係数、貯留係数およびその日の境界流入量と鉛直かん養量を同定する。第2段階として、観測期間を10日とし、第1段階で求められた透水量係数、貯留係数および境界流入量を用いて、揚水を行わない10日間の地下水位変動から、10日間の鉛直かん養量の日変化を同定する。

解析モデルとして、図-1に示す均質地盤を考え、以上で述べた同定手法に従って同定した結果を示す。第1段階で得られた同定結果を表-4

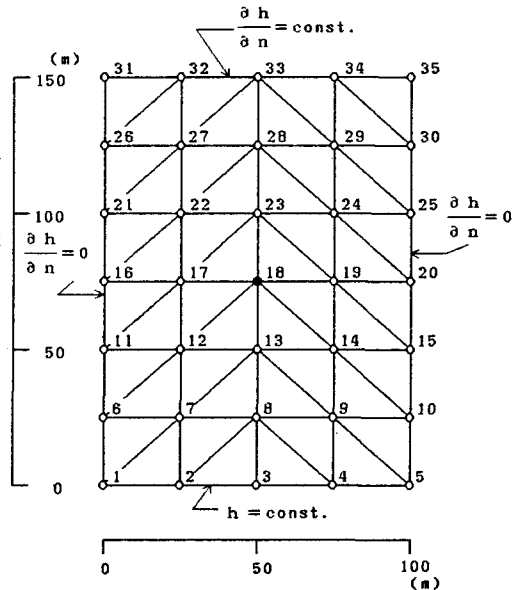


図-1 飽和浸透モデルの解析モデル

表-4 飽和浸透モデルの同定結果（第1段階）

	透水量係数 (m^2/hr)	貯留係数	境界流入量 (m^2/hr)	鉛直かん養量 (mm)	残差二乗和
初期値	1.0000	0.00100	0.00100	1.0000	—
同定結果	9.9996	0.10001	0.09999	4.9938	4.896×10^{-9}
真 値	10.0000	0.10000	0.10000	5.0000	—

表-5 飽和浸透モデルの同定の同定結果（第2段階）

	鉛 直 かん 養 量 (mm)									
	1日	2日	3日	4日	5日	6日	7日	8日	9日	10日
真 値	0.5514	1.6102	4.4561	5.8564	5.2155	5.1524	4.6370	3.5130	2.5523	1.9614
同定結果	0.5514	1.6102	4.4561	5.8564	5.2155	5.1524	4.6370	3.5130	2.5523	1.9613

にまとめた。揚水量 $5\text{m}^3/\text{hr}$ 、揚水時間を24時間とした。観測地点数が2点で、観測時刻数が3点であるが、かなりの精度で同定された。第2段階の同定結果を表-5にまとめた。同定に用いた鉛直かん養量の初期値は10日間すべて 5mm とした。観測地点数が節点番号18の1点で、観測時刻数が10点の場合であるが、かなりの精度で同定された。

次に、地下水位変動から得られた鉛直かん養量を観測値として、不飽和浸透のパラメータを同定する。解析モデルは3. で用いたの

のものと同一であるである。3. と同様に3つのCaseについて同定した結果を表-6に示す。これによるとCase①、③では、かなりの精度で同定されており同定手法の妥当性が明らかになった。

5. あとがき 本研究では不飽和浸透解析を行うにあたって必要となるパラメータを、圧力水頭あるいは地下水位変動から同定する手法を提案するとともに、その妥当性を示した。今後、実地盤への適用を目指す予定である。なお、本研究に際し多大なご援助、ご指導を頂いた京都大学赤井浩一教授に深く感謝致します。

表-6 鉛直かん養量による同定結果

	$\theta_{sat}-\theta_r$	λ	残差二乗和
真 値	0.251	1.279	—
初期値	0.5	1.5	—
Case①	0.25105	1.2789	1.4668×10^{-9}
Case②	0.26168	1.2409	4.9057×10^{-6}
Case③	0.25100	1.2789	2.9365×10^{-9}