

阪 神 電 鉄 正会員 浅野陽一

京都大学工学部 正会員 青木一男、嘉門雅史

1. はじめに ---- 浸透能のモデル化には, Horton 式を用いる方法, Philip の式を用いる方法, 不飽和浸透理論に基づく有限要素解析による方法等が従来より用いられてきた。しかし, それぞれの手法を用いてモデル化を行っても, そのモデルの構造を決定しなければ, 真のモデル化と言い難い。そこで本論文では, 不飽和浸透理論に基づく浸透能モデルの同定手法について述べ, さらに同定時に用いるべき観測値について若干の考察を加えた。

2. モデル構築に必要なパラメーターと解析条件 ---- 有限要素法を用いて非定常不飽和浸透解析を行う場合, 必要となる条件として, 土質条件を規定するパラメーター, 境界条件, 初期条件等が考えられる。これらの項目に対して, 妥当な値を設定しなければ真のモデル化を行ったとは言えない。そこで, 以下の方法に従ってモデル化を行った。

まず, 不飽和浸透解析時に必要となる土質条件として, 体積含水率-圧力水頭関係および体積含水率-不飽和透水係数関係が必要となる。ここでは, 次に示すような Van-Genuchten の式をそのまま用いた。

$$Se = \left(\frac{1}{1 + |\alpha \psi|^n} \right)^{1-1/n} \quad (1), \quad kr = Se^{1/2} \{1 - (1 - Se^{1/n})^m\}^2 \quad (2)$$

ここに, $Se = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$: 飽和度, θ : 体積含水率, θ_s : 飽和体積含水率, θ_r : 最小含水量, ψ : 圧力水頭, kr : 飽和透水係数 ks に対する不飽和透水係数の比, α , n : 係数である。

Van-Genuchten の式を用いる場合その未知パラメーターとして, ks , α , n , θ_s , θ_r が必要となる。これらの全てのパラメーターを同時に同定することも可能かもしれないが, 現地計測, あるいは室内実験から容易に求められるパラメーター, または他の物理定数との関係から推定できるパラメーターは, 同定する必要がないと考えられる。飽和透水係数 ks は, 原位置揚水試験から得ることができるが, 岡ら¹⁾らが指摘しているように表層の飽和透水係数はそれより深い値より数オーダー小さい値であると報告している。従って, 揚水試験で得られる帯水層での平均的な値では, 十分と言えない。 α , n に関して, 均等係数, 曲率係数との関係から推定する研究²⁾もなされているが, 十分な精度で推定できるまでには至っていないのが現状である。 θ_r は対象としている土質が砂の場合ではほぼゼロと見なすことができる。 θ_s は θ_r をゼロとした場合, 地盤の有効空隙率に等しい値となる。以上に述べた事項から判断して, 本論文においては ks , α , n の3個のパラメーターを同時に同定する。

また, 土質条件が浸透能に大きく影響を与える深さは, 3. で示すようにほぼ 50cm で, その範囲外のパラメーターは, 浸透能にほとんど影響を与えない。従って本論文では 3m の不飽和領域を想定しているがパラメーターに関しては表層部分の土質条件が全層にわたり均質に示されるものとして取り扱うことにする。

さらに, 同定手法は間接法逆問題として捉え, 最適化手法として Gauss-Newton 法を採用し, 目的関数としては地表面から不飽和領域へ流入する浸透強度を用いた。

3. 観測時刻の選択方法と同定結果 ---- 観測時刻は, 観測値の中に含まれる各パラメーターの情報量を支配するもので, その選択方法は精度の良い同定を行うために重要な要素である。そこで, 表-1の示すような解析モデルに対して感度分析を行った結果を表-2, 3に示す。まず表-2は, ks に対する浸透強度の深さ方向の感度値を示したものである。これによると地表面から 25cm までの深さでは, 大きい感度値を示しているが, 25~50cm になると観測時刻が 30min 以後にならないと ks の影響が現れない。これより浸透能に大きく影響を与える深さは地表面から 50cm であることがわかる。次に, 表-2は, ks , α , n に対する浸透強度の感度値の時間分布を示したものである。これによると ks の感度値は, 他のパラメーター

と比較して全ての時刻において1～2オーダー大きい。従って、 α 、 n の同定はかなりの困難が予想される。

表-1 解析モデルのパラメータ値³⁾

ks (cm/sec)	α (cm ⁻¹)	n	θ_s	θ_r
4.0×10^{-3}	0.0242	1.5476	0.410	0.0

そこで、同定手法の妥当性を検討する目的から表-1に示すパラメータを真値と見なし、その値と異なる初期値から出発して、同定されるパラメータがいかに真値に近づくかで検討した。その同定結果を表-4にまとめた。これによると残差二乗和が 8.274×10^{-5} となり、かなりの精度で同定が可能となっていることが分かる。従って、本論文で示した同定手法の妥当性が明らかになった。

表-2 ks に対する浸透強度の深さ方向の感度値

地表面からの深さ(cm)	観測時刻(min)	ks の感度値	観測時刻(min)	ks の感度値
0-25	10	1.2892	40	6.6060×10^{-1}
	20	9.1260×10^{-1}	50	4.6334×10^{-1}
	30	7.8143×10^{-1}	60	3.6938×10^{-1}
25-50	10	0.0	40	3.9095×10^{-1}
	20	0.0	50	4.9754×10^{-1}
	30	1.8757×10^{-1}	60	5.0672×10^{-1}
50-75	10	0.0	40	0.0
	20	0.0	50	0.0
	30	0.0	60	1.1661×10^{-1}

次に、この同定手法の現位置への

適用を試みるため、安藤ら⁴⁾が行った冠水型浸透能試験から得られている浸透強度を観測値と見なし各パラメータの同定を行った。その結果を表-5に示す。さらに同定によって得られたパラメータを用いて浸透能シミュレーションを行った結果と観測値を図-1に示す。これらによると、残差二乗和が

表-3 各パラメータに対する浸透強度の感度値

時刻(sec)	ks に対する感度値	α に対する感度値	n に対する感度値
30	3.7066	2.3003×10^{-1}	1.1724×10^{-1}
60	2.3411	5.0156×10^{-2}	4.3369×10^{-2}
300	2.1927	2.9680×10^{-2}	1.8522×10^{-2}
600	1.2892	1.6584×10^{-2}	1.1659×10^{-2}

4.659×10^2 となり、観測値と浸透能シミュレーション結果が近似しており、用いた観測値の情報量から考えて十分な精度で同定が可能となっていることが分かる。

表-4 解析モデルの同定結果

	観測時刻(sec)	初期値	同定値	反復回数	残差二乗和
ks (cm/sec)	30, 60	5.0×10^{-3}	4.0001×10^{-3}	13	8.274×10^{-5}
α (cm ⁻¹)	120, 180	3.0×10^{-2}	2.4200×10^{-2}		
n	200, 300	2.0	1.5476		

表-5 現地計測に基づく同定結果

	観測時刻(min)	初期値	同定値	反復回数	残差二乗和
ks (cm/sec)	1, 2	5.0×10^{-3}	0.9071×10^{-3}	19	4.6589×10^2
α (cm ⁻¹)	3, 4	3.0×10^{-2}	0.2226×10^{-2}		
n	5, 6	2.0	2.3270		

4. おわりに ---- 不飽和浸透理論に基づく浸透能モデルの構造の同定手法を示し、精

度よい同定結果が得られた。さらに同定時に用いる観測値について考察を加えた。今後はこの同定手法を数多くの原位置データに適用して行く計画である。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。

〈参考文献〉1) 岡太郎, 角屋睦: 裸地斜面域における雨水の浸入と地下水流出(2) - 流出モデルへのアプローチ -, 京大防災研究所年報, 第17号 B, pp.523-533, 1974. 2) 宇野尚雄, 佐藤健, 拓植浩史: 2, 3の砂質土の水分保持特性, 不飽和土の工学的性質研究現状シンポジウム論文集, pp.187-192, 1987. 3) 西垣誠, 楠見和紀: 不飽和土の浸透特性の評価に関する考察, 不飽和土の工学的性質研究現状シンポジウム論文集, pp.179-186, 1987. 4) 安藤義久, 菅明芳, 岡本哲夫, 浅羽晴夫: 関東ローム丘陵・台地における土地利用別浸透能, 水利科学, No.148, pp.1-23, 1982.

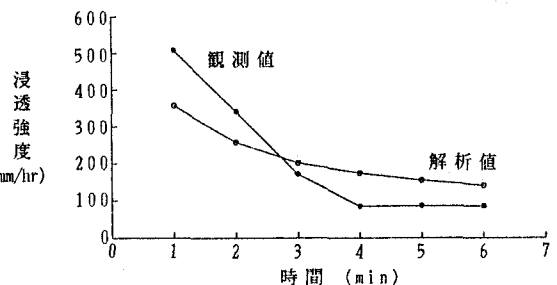


図-1 浸透強度の観測値と解析値の比較

17号 B, pp.523-533, 1974. 2) 宇野尚雄, 佐藤健, 拓植浩史: 2, 3の砂質土の水分保持特性, 不飽和土の工学的性質研究現状シンポジウム論文集, pp.187-192, 1987. 3) 西垣誠, 楠見和紀: 不飽和土の浸透特性の評価に関する考察, 不飽和土の工学的性質研究現状シンポジウム論文集, pp.179-186, 1987. 4) 安藤義久, 菅明芳, 岡本哲夫, 浅羽晴夫: 関東ローム丘陵・台地における土地利用別浸透能, 水利科学, No.148, pp.1-23, 1982.