

原位置における不飽和浸透特性値の非定常算定方法

岡山大学環境理工学部 正会員 竹下祐二
 応用地質 (株) 正会員 八木一雄
 新潟大学農学部 正会員 森井俊宏
 鳥取大学乾燥地研究センター 井上光弘

1. はじめに

不飽和地盤における浸透問題や物質輸送問題の定量的評価において、不飽和領域での浸透挙動を支配する不飽和浸透特性値は重要なパラメータである。ここで、不飽和浸透特性値とは、水分特性曲線および体積含水率と不飽和透水係数の関係であると定義する。しかし、原位置における不飽和浸透特性値の計測方法は確立されておらず、迅速かつ簡便な試験方法の開発が望まれている。本文では砂質土地盤における不飽和浸透特性値の迅速かつ簡便な原位置測定法の開発を目的として、原位置定水位透水試験にて計測された体積含水率と浸透流量の非定常データを軸対称浸透流解析によってシミュレートし、不飽和浸透特性値の関数モデルを同定することによって、不飽和浸透特性値を算定する方法を提案する。本研究で提案する方法の妥当性は、数値モデルおよび鳥取砂丘砂による実測データによって吟味した。

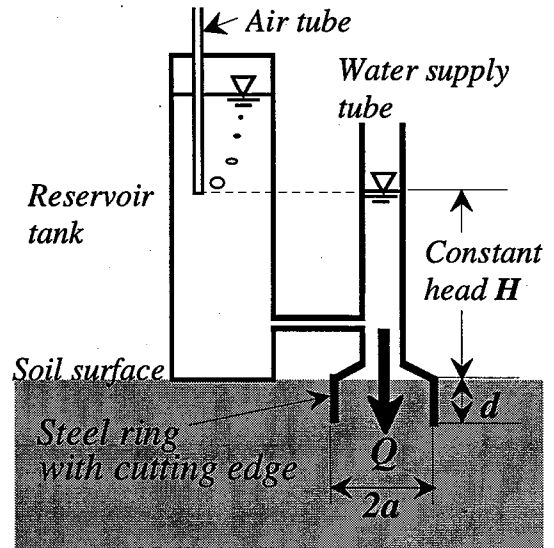


図1 Guelph Pressure Infiltrator

2. 原位置透水試験システム

不飽和地盤における透水試験方法として、Elrickらが開発したGuelph Pressure Infiltrator (原位置定水位透水試験法、以後、GPIと記す。)を採用した。本試験方法は、図1に示すように不飽和地盤に数cm程度静的に貫入された単一リングから定水位浸透を生じさせ、計測された定常浸透流量の値から、透水係数を算出する簡便な透水方法である^{1),2)}。

GPIにより不飽和地盤内に発生する浸潤領域は、不飽和状態から飽和状態へと遷移する過程において間隙中に取り込まれた空気(entrapped air)の存在により、完全な飽和状態ではなく、それに近い状態である。したがって、GPIによって計測される透水係数は *field-saturated hydraulic conductivity, K_{fs}* と呼ばれ、完全な飽和状態における透水係数(*truly saturated hydraulic conductivity*)と比較して小さな値を示すことが指摘されている。しかし、不飽和地盤における浸透現象を評価する上では、原位置で得られた K_{fs} を設計定数とすることが実際的であると思われる。そこで、本研究では、不飽和地盤の飽和透水係数として、GPIによって算出される透水係数 K_{fs} (以後、便宜的に現場飽和透水係数と記す)を採用する。

従来、GPIによって計測されるデータは、定常浸透流量値のみであり、不飽和浸透特性値を算定するためには非定常

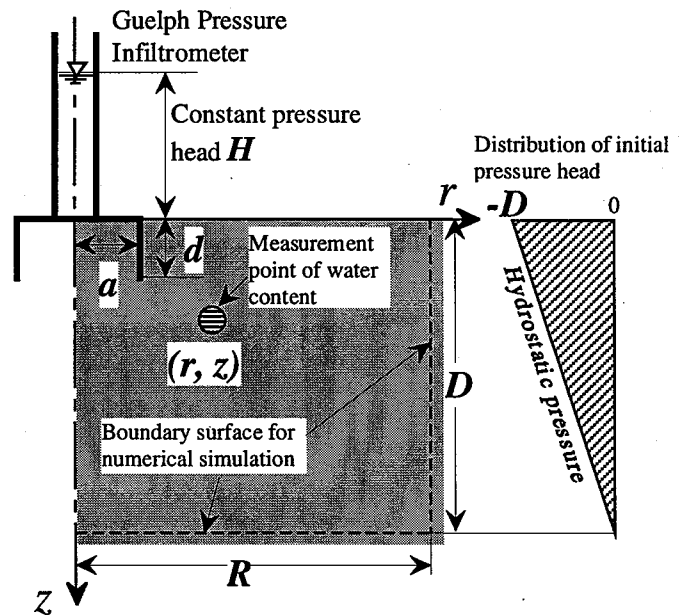


図2 GPIを用いた原位置透水試験の概念図

浸透挙動のデータが必要である。そこで、本研究ではGPIによる浸透流量の経時変化を記録し、電磁波式土壌水分計測センサーを設置して発生した浸潤領域の体積含水率の経時変化の計測を試みた。本研究で提案する透水試験方法の概要図を図2に示す。

Determination of unsaturated soil hydraulic properties by using in situ transient permeability tests data ; Y.Takeshita (Okayama Univ.), K.Yagi (Oyochishitu Corp.), T.Morii (Niigata Univ.), M.Inoue (Tottori Univ.)

3. 不飽和浸透特性値の推定方法

3.1 不飽和浸透特性の関数モデルの同定

不飽和浸透特性値を算定方法として、透水試験によって計測された不飽和浸透挙動を数値解析による浸透流解析によってシミュレートし、その浸透挙動を最も良好に表現できる不飽和浸透特性の関数モデルを同定する、いわゆる逆解析的な方法が提案されている³⁾⁷⁾。この方法の利点は、計測データを浸透流解析によって数値解析的に評価するため、理論的な解析手法に比べて種々の初期条件、境界条件の導入が容易であり、複雑な試験条件に対応できること、また、水分平衡状態に達するまでの長時間の計測を必要とせず、試験時間の短縮が期待できる点にある。本研究においても、逆解析手法を採用し、体積含水率および浸透流量を用いて、*van Genuchten*によって提案された不飽和浸透特性の関数モデル⁸⁾(以後、VGモデルと記す)の同定を試み、不飽和浸透特性を算定する。VGモデルは次式で示される。

$$Se = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + (\alpha h)^n} \right]^m \quad (1)$$

$$K(Se) = K_s Se^{0.5} [1 - (1 - Se^{1/m})^m]^2 \quad (2)$$

$$C = \alpha (n-1)(\theta_s - \theta_r) Se^{1/m} (1 - Se^{1/m})^m \quad (3)$$

ここで、 Se :有効飽和度、 $K(Se)$:不飽和透水係数、 $C(\theta)$:比水分容量、 θ_s :飽和体積含水率、 θ_r :残留体積含水率、 K_s :飽和透水係数、 α 、 n :水分特性曲線の形状を支配する土に固有のパラメータ、 $n > 1$ 、 $m = 1 - 1/n$

VGモデルに含まれる未知パラメータは K_s 、 θ_s 、 θ_r 、 α 、 n の5パラメータである。ここで、 K_s は、GPIによって独立に算定される現場飽和透水係数 K_{ps} によって与えられる。また、今回は、砂質地盤を対象としたために、 θ_r の値は零として既知量と考えた。したがって、形状パラメータ(α 、 n)および θ_s を推定することによって、VGモデルの同定を行う。

3.2 遺伝的アルゴリズムによる不飽和浸透特性パラメータの推定

不飽和浸透挙動は強い非線形性を有することから、不飽和浸透特性の関数モデルに含まれるパラメータの推定は必ずしも容易ではない。これらは、いずれも逆問題に特有の不適切性 (ill-posedness)によるものである。一般に、不飽和透水試験データの工学的評価という観点に立てば、真値に十分近いと考えられ、実用上問題ないと思われるパラメータの算定が要求される場合が少なくない。このような場合に

は、厳密な意味での最適解は得られなくとも、非線形性の強い広域な未知パラメータの探索空間を効率よく探索し、実用上の実行可能解を速やかに発見するアプローチが必要とされる。

本研究では、複数個の不飽和浸透特性パラメータを同時に、安定かつ簡便に推定する手法として、遺伝的アルゴリズム⁹⁾(Genetic Algorithms, 以下GAと記す)を採用した。GAは生物の進化の過程である自然淘汰・交叉・突然変異を模した多点探索法である。GAではパラメータの探索問題を組み合わせ最適化問題として取り扱うことにより、解析者が事前に用意した非常に多数の解集合の中から、実行可能解を迅速に見出すことができる。GAの特徴は以下のようなものである。

(1) 複数の探索点から同時に探索を行い、互いに協調または競合することによって局所的な安定点を避ける機能があるので、初期値に比較的依存しにくい。

(2) 次の探索点を設定するために、現在の探索点における評価値(適応度)だけを用いており、目的関数の微係数など、他の情報を用いないので、不連続もしくは離散的な評価関数の性質が不明確な問題にも適応でき、プログラミングが簡単である。

(3) 確率的な遷移ルールに従って挙動するので、局所解にとどまらずに大局的な解に到達し得る可能性が高い。

GAによるパラメータの探索過程では、式(4)に示す重み付き残差平方和 $OF(b)$ を最小にするパラメータの組み合わせを探索する。

$$O(b) = \omega_\theta \sum_{i=1}^N (\theta_m(t_i) - \theta_c(t_i, b))^2 + \omega_Q \sum_{j=1}^M (Q_m(t_j) - Q_c(t_j, b))^2 \quad (4)$$

ここに、 ω は重みであり、記号および添え字における θ 、 Q はそれぞれ、体積含水率{無次元}と累積浸透流量{次元は(長さ)³}を意味する。 b は推定すべき未知パラメータ、添え字 m, c はそれぞれ、計測データと浸透流解析によって得られた解析値を表す。また、 N, M は計測データ数であり、 t は計測時間である。

式(4)における各測定値の重みの設定方法は基本的な問題であり、一般には、各測定値に対する誤差の分散値を用いる方法などが提案されている。ここでは、体積含水率と累積浸透流量という単位の異なる物理量の計測精度およびそれらの絶対値の較差が残差平方和に与える影響を簡便に補正すること目的として、各計測データの平均値に基づき、次式に示すような設定を行った。ただし、各計測時間における計測データについては、すべて同程度の誤差を含むと考えて、各計測データごとの重み付けは考えない。

$$\omega_\theta = 1.0 \quad (5)$$

$$\omega_\rho = \frac{\sum_{i=1}^N (\theta_m(t_i))^2 / N}{\sum_{j=1}^M (Q_m(t_j))^2 / M} \quad (6)$$

GAの実行においては、個体数50、交叉率0.6、突然変異率0.1とし、30世代の世代交代シミュレーションで強制終了とした。また、推定すべき各未知パラメータの値は、 $0.005 \leq \alpha \text{ (cm}^{-1}\text{)} \leq 0.068$ の範囲を64、 $1.1 \leq n \leq 7.4$ の範囲を64、 $0.3 \leq \theta s \text{ (cm/s)} \leq 0.45$ の範囲を16にそれぞれ等分割した値の内、いずれかの値を取り得るものと設定した。そのため、 $64 \times 64 \times 16 = 65,536$ 通りの未知パラメータの組み合わせの中から実行可能解の探索を行う問題となる。

4. 解析例

4.1 数値モデルによる検証

砂地盤を想定したシミュレーションモデルを用いて、軸対称浸透流解析を実施し、GPIにより計測される浸透流量および体積含水率の非定常計測データを算出した。解析モデルは、図2において、 $a=5\text{cm}$ 、 $d=3\text{cm}$ 、 $H=14.9\text{cm}$ 、 $R=100\text{cm}$ 、 $D=300\text{cm}$ 、 $K_{fs} = 3.0 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ を設定した。地盤の初期水頭分布は負の静水圧分布を仮定した。また、不飽和浸透特性はVGモデルに $\alpha = 0.02 \text{cm}^{-1}$ 、 $n=4.0$ 、 $\theta s=0.4$ を与えて算出した。

GAによるパラメータの探索は3回行った。パラメータの探索過程における目的関数値の変化を図3に示した。3回の試行において、目的関数値の減少挙動が異なる原因は、GAが乱数を多用しているためであると考えられる。しかし、いずれの試行においても10世代程度の世代交代シミュレーションにて目的関数値は大きく減少し、1回目および2回目

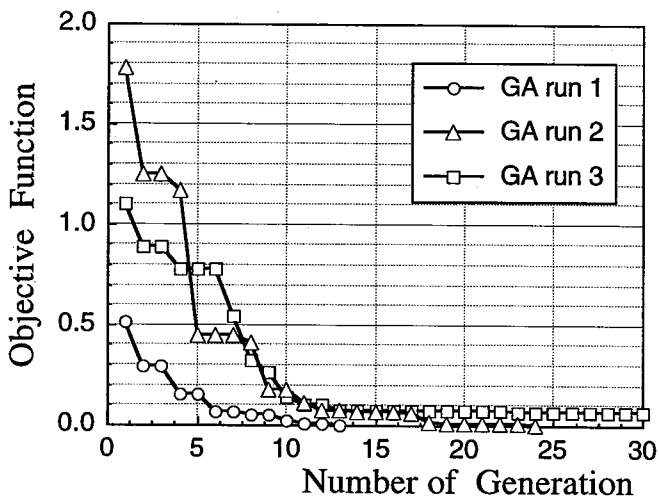


図3 目的関数値の変化 (数値モデル)

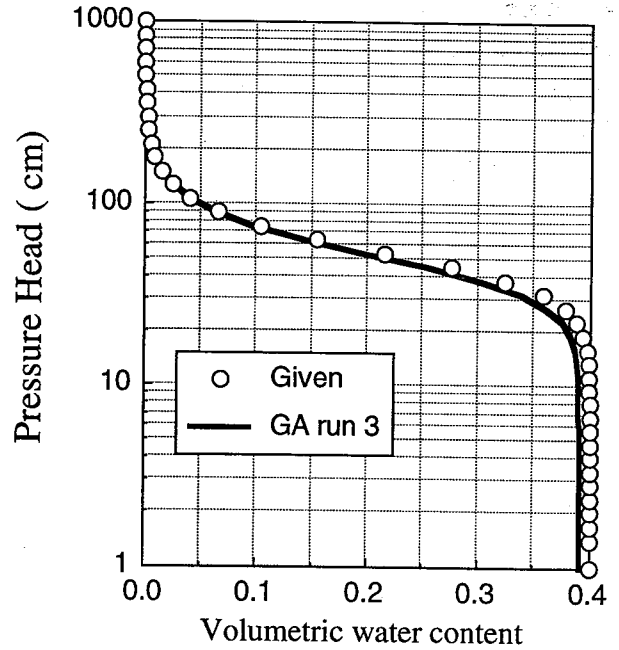


図4 水分特性曲線の推定精度 (数値モデル)

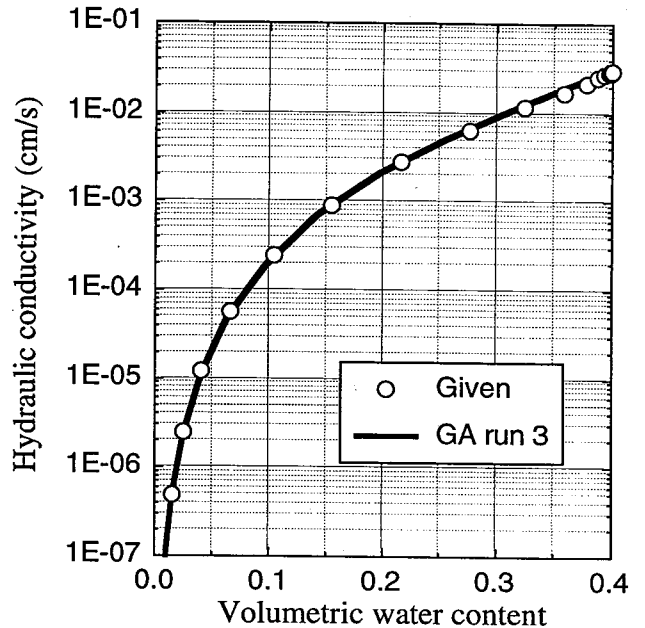


図5 不飽和透水係数の同定精度 (数値モデル)

の試行においては、それぞれ13世代と24世代目で真値を探索している。3回目の試行においては、真の値には到達していないが、30世代目に推定されたパラメータの値は、 $\alpha = 0.021 \text{cm}^{-1}$ 、 $n=3.8$ 、 $\theta s=0.39$ であった。図4,5はこれらのパラメータによって算定された不飽和浸透特性値を設定した値と比較した結果であるが、その差は実用上問題のない精度であると思われる。以上のことから、本解析方法の妥当性を確認した。

4.2 実測データへ適用

鳥取大学乾燥地研究センター内の砂丘砂地盤実験施設(乾燥密度 1.55g/cm^3)において、GPIを実施した。その試験条件は図2において、 $a=5.5\text{cm}$ 、 $d=3.0\text{cm}$ 、 $H=9.7\text{cm}$ である。体積含水率の計測には、Delta-T Devices社製のTheta Probeを用い、GPIの浸潤リング中心より水平方向に $r=10\text{cm}$ 、鉛直方向に $z=20\text{cm}$ の位置に静的に貫入させて設置した。GPIの計測に要した時間は10分間であり、算出された現場飽和透水係数は $K_{fs}=2.74 \times 10^{-2}\text{cm/s}$ である。

浸透流解析は図2において $R=40\text{cm}$ 、鉛直方向に $D=60\text{cm}$ の範囲を計算領域とした。また、非定常計測データのシミュレーション結果を左右する初期圧力水頭分布は、静水圧分布を仮定し、事前に埋設しておいた間隙水圧計によって計測された4点の間隙水圧値を直線回帰して、図6に示す値を得た。

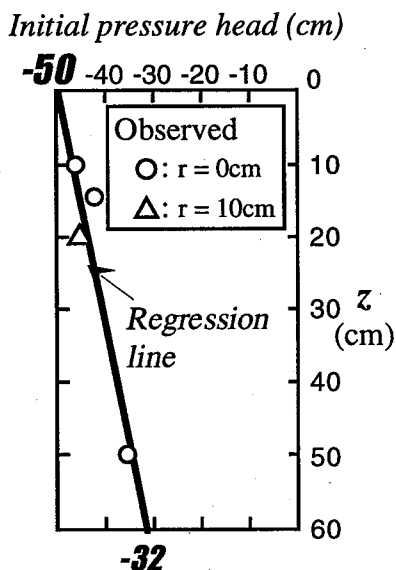


図6 地盤内の初期間隙水圧分布

表1にパラメータの推定結果を図7に目的関数値の変化を示す。また、GAによる3回のパラメータ探索状況を図8~10に示した。推定されたパラメータ値は、試行ごとにわずかな差が見られるが、目的関数値はほぼ同一の値で試行ごとの差異はなく、最適値に十分近い実行可能解が算定されていると考えられる。図11,12に計測データと推定されたパラメータによる数値解析結果の比較を示す。体積含水率および累積浸透流量ともに計測時間の全体に渡って、その非定常挙動がシミュレートされていると思われる。

GAによって推定されたVGモデルパラメータの妥当性を比較するために、井上によって報告されている砂丘砂の不飽和浸透特性値¹⁰⁾を用い、水分特性曲線を図13に、透水係数と体積含水率の関係を図14に比較した。これらの図によれば、本解析方法によって推定された不飽和浸透特性の妥当性は高いと考えられる。

表1 不飽和浸透特性パラメータの推定結果

GA run	α (1/cm)	n	θ_s	OF(b)
1	0.034	4.6	0.37	2.963
2	0.033	5.0	0.38	2.938
3	0.033	4.9	0.38	2.956

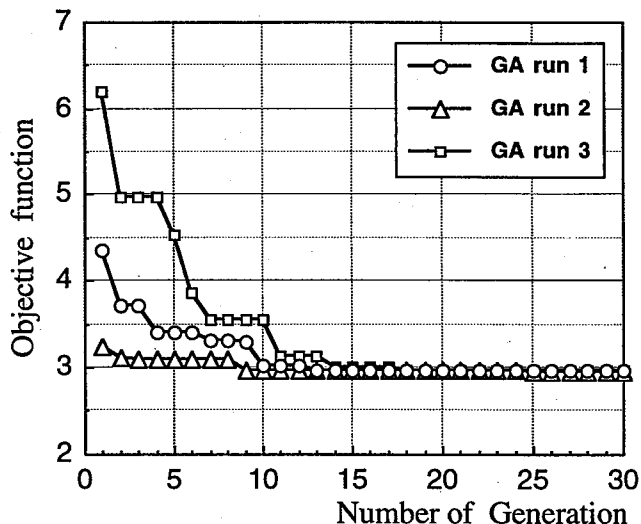


図7 目的関数値の変化(実測データ解析)

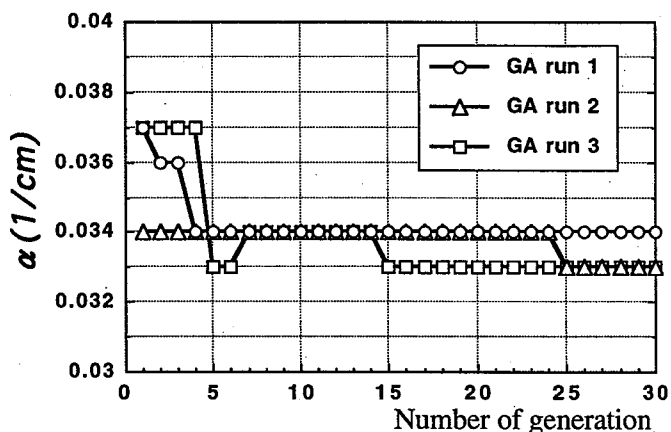


図8 パラメータ α の探索状況

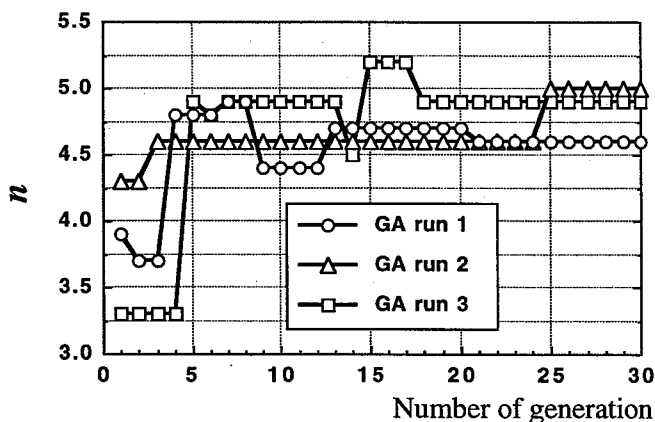


図9 パラメータ n の探索状況

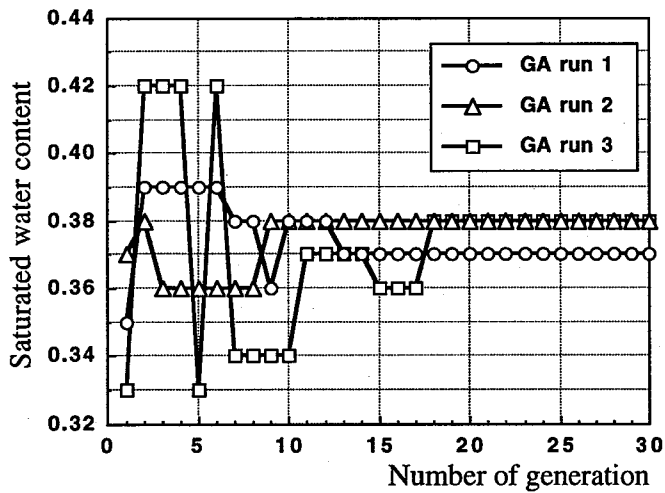


図10 θ_s の探索状況

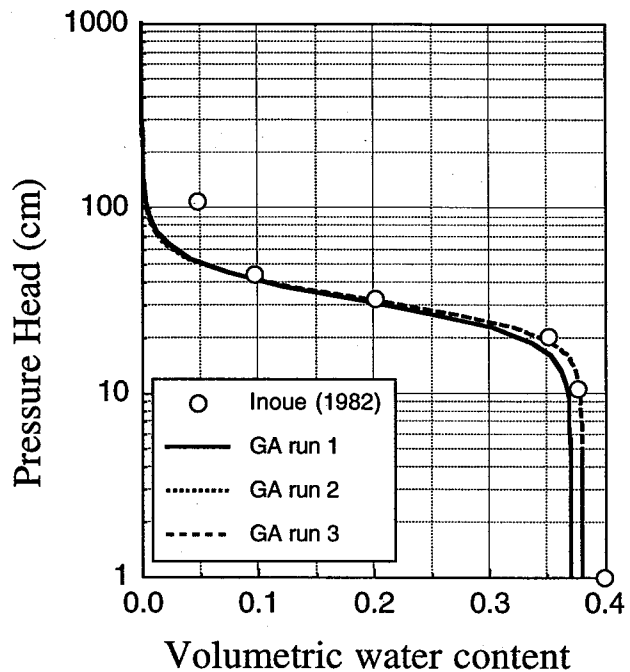


図13 算定された水分特性曲線と実測値の比較

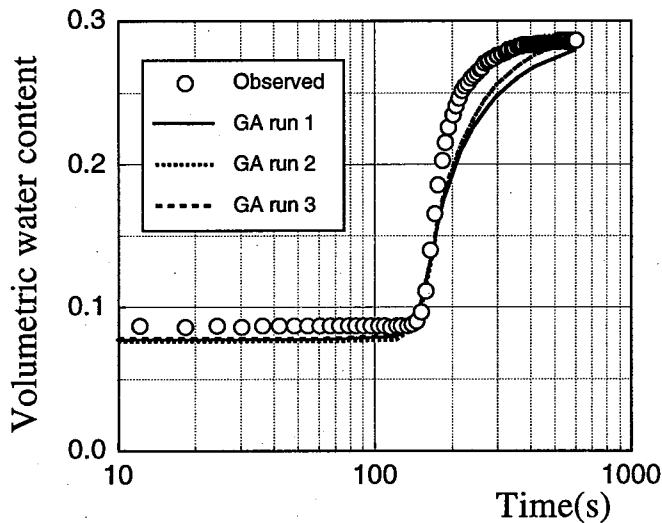


図11 体積含水率のシミュレート結果

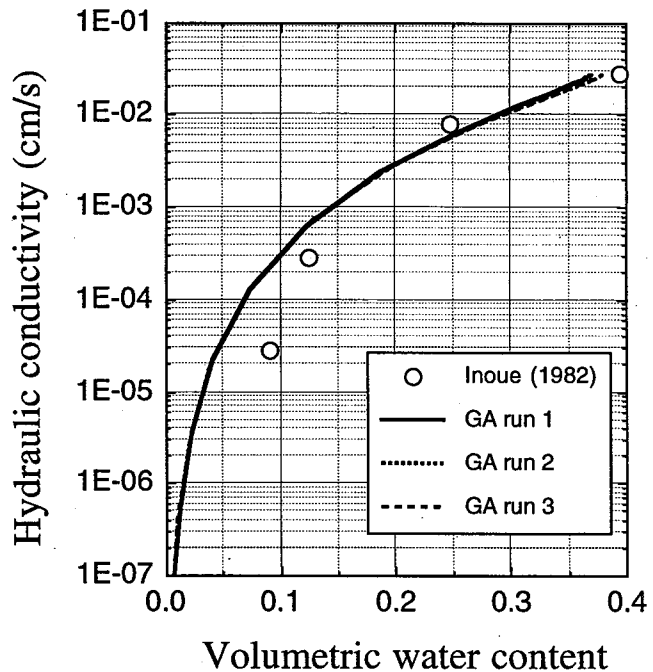


図14 算定された不飽和透水係数と実測値の比較

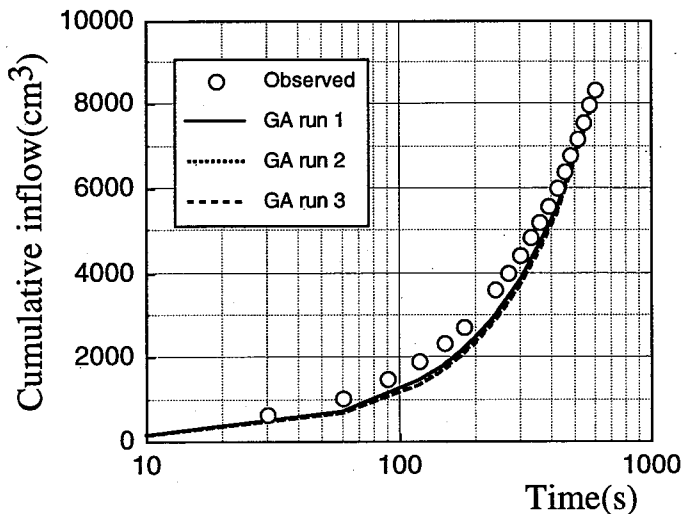


図12 累積浸透流量のシミュレート結果

5. おわりに

砂質土地盤における不飽和浸透特性値の迅速かつ簡便な原位置測定法の開発を目的として、原位置定水位透水試験にて計測された体積含水率と浸透流量の非定常データを軸対称浸透流解析によってシミュレートし、不飽和浸透特性値の関数モデルを同定することによって、不飽和浸透特性値を算定する方法を検討した。本研究により得られた成果を要約すれば、以下のようになる。

(1) Guelph Pressure Infiltrometerと電磁波式土壤水分計測センサーを用いて、体積含水率と浸透流量の非定常計測データの計測する透水試験方法を提案した。本方法によれば簡便な計測システムによって迅速に原位置透水試験を行うことが可能である。

(2) 体積含水率および浸透流量の非定常計測データを飽和～不飽和浸透流解析によってシミュレートし、遺伝的アルゴリズムを用いて不飽和浸透特性の関数モデルの同定を行うことにより、不飽和浸透特性値を算定する方法を開発した。本方法の妥当性は、数値モデルデータおよび砂丘砂地盤における実測データによって吟味した。

(3) 本研究で提案する不飽和浸透特性の原位置測定方法の算定精度は対象領域の初期条件(初期間隙水圧分布)に大きく依存するため、初期間隙水圧分布の精度良い計測方法について、今後検討を行う必要がある。

<参考文献>

- 1) Reynolds, W.D. and Elrick, D.E. (1990): Ponded infiltration from a single ring, Soil, Science Society of America Journal, 54, pp.1233-1241.
- 2) 森井俊広・井上光弘・竹下祐二: プレッシャーインフィ

ルトロメータ法を用いた土の原位置透水試験方法, 農業土木学会論文集, No.204, pp.149-158.1999

- 3) Kool, J. B., Parker, J. C. and van Genuchten, M. T. : Determining soil hydraulic properties from one-step outflow experiments by parameter estimation, I, Theory and numerical studies, Soil Sci. Soc. Am. J. 49, pp.1348-1354, 1985.

- 4) Parker, J. C., Kool, J. B. and van Genuchten, M. T. : Determining soil hydraulic properties from one-step outflow experiments by parameter estimation, II, Experimental studies, Soil Sci. Soc. Am. J. 49, pp. 1354-1360, 1985.

- 5) 竹下祐二・中澤一磨・福田大樹・河野伊一郎: 遺伝的アルゴリズムを用いた室内非定常不飽和透水試験による不飽和浸透特性の算定方法, 土木学会論文集, No.624 / -47, pp.67-74, 1999.

- 6) Eching, S. O., Hopmans, J. W. and Wendroth, O. : Unsaturated hydraulic conductivity measurements from transient multistep outflow and soil water pressure data. Soil Sci. Soc. Am. J. 58, pp.687-695, 1994.

- 7) van Dam, J. C., Stricker, J. N. M. and Droogers, P. : Inverse method to determine soil hydraulic functions from multistep outflow experiments, Soil Sci. Soc. Am. J. 58, pp.647-652, 1994.

- 8) van Genuchten, M.Th(1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 44, pp. 892-898.

- 9) 坂和正敏・田中雅博(1995): 「遺伝的アルゴリズム」, 朝倉書店.

- 10) 井上光弘 他(1982): 土壤水分特性曲線に基づく不飽和透水係数の計算, 「土壤の物理性」, 46, pp.21-26.