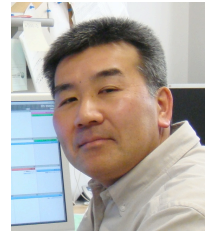


不飽和地盤の調査・試験方法の開発

竹下 祐二¹

¹岡山大学大学院環境学研究科（〒700-8530 岡山市北区津島中3-1-1）



近年、斜面および河川堤防の安全性、地盤の陥没や空洞の形成といった地盤災害問題の多くは、不飽和地盤で生じていることが広く認識されるようになってきた。しかし、従来の土質力学における研究対象は、そのほとんどが飽和土であり、不飽和土や不飽和地盤に関する研究は著しく遅れており、不飽和地盤の調査・試験法も確立されていない。本研究では、不飽和地盤の調査・試験システムの構築を目的として、砂質土地盤における浅層領域での不飽和浸透挙動の計測方法として、地表設置型の地中レーダを用いた方法を提案し、原位置不飽和浸透試験を実施した結果に基づいて、その適用性および有用性について述べている。

キーワード 不飽和土, 原位置試験, 地中レーダ, 浸透流, 非破壊計測

1. はじめに

不飽和地盤における浸透挙動に起因した地盤工学的な諸問題の解決や浸透特性値の原位置測定に際しては、不飽和浸透挙動を原位置にて精度良く計測することが重要である。従来、不飽和浸透挙動の原位置計測方法としては、不飽和地盤内の間隙水圧（サクション）と土中水分量を計測対象として、誘電式土中水分計やテンシオメータによる間隙水圧計等の挿入型センサーを複数本、所定深度に埋設設置する方法が用いられている¹⁾。これらの挿入型センサーは設置深度近傍の局所的な領域での連続的な定点計測に優れているが、固結した地盤や礫を多く含む地盤等、挿入設置が困難な地盤条件や計測対象深度が深くなる場合には、その適用は必ずしも容易ではない。また、センサーの挿入設置時の地盤の乱れや、周辺地盤とセンサーの密着状態等、センサーの設置技術が測定精度に大きな影響を及ぼすことも指摘されている²⁾。

一般に、河川堤防や斜面などに代表される重要な土構造物においては、計測対象領域が広域に及び、3次元的な浸透挙動の調査や計測が必要とされる場合が多い。また、不飽和地盤の数値シミュレーションモデルの構築においては、解析領域、地層構成と地盤定数、初期条件、そして境界条件等の精度向上が重要な課題であり、今後は、挿入型センサーによって得られる局所的な調査データのみならず、フィールドスケールあるいは広域地盤のモデリングためには、10m 四方程度ないしはそれ以上の領域における不飽和地盤の定量的な評価が可能な地盤調

査方法の開発が必要である。そのためには、地盤構造をかく乱することなく、非破壊状態において、シンプルかつ迅速に広域の浸透挙動を計測・評価することが可能な現場調査方法の確立が望まれる。

著者は、不飽和地盤におけるシンプルでコンパクトな地盤調査方法の開発を目的として、地表設置型地中レーダ（Ground-Penetrating Radar；以後、GPR と記す）に着目し、砂質土地盤における浅層領域の土中水分量および地下水面の非破壊計測方法を提案している^{3),4)}。本文では、不飽和砂質土地盤の浅層領域において、降雨浸透や原位置透水試験等によって生じた不飽和浸透挙動を GPR によって断面的に計測する方法の開発を目的として、均質な砂丘砂地盤にて不飽和浸透試験を行い、浸潤前線の挙動を追跡した結果について述べる。GPR を用いて浸潤前線等の不飽和浸透挙動を地表面上から非破壊計測できれば、浸潤領域の平均的な浸透特性値を評価し、広域地盤の浸透特性値のモデリングに有用であると思われる。GPR によって計測された浸潤前線の妥当性は、飽和・不飽和浸透流解析手法による数値シミュレーションおよび土中水分計による計測データによって検討した。

2. GPR による不飽和浸透挙動の非破壊計測方法

(1) GPRプロファイル測定による浸潤前線位置の計測

GPR では送信アンテナから地盤内に発射した電磁波が地盤内で反射して受信アンテナに戻るまでの反射時間（往復走時）と反射波の強さを計測し、反射波を列記し

た断面図に画像処理を施して、地盤構造、埋設物の位置や形状を推定評価する⁵⁾。GPR プロファイル測定は図-1に示すように、送信アンテナ (TX) と受信アンテナ (RX) の間隔 x_0 を一定に保持した GPR を地表面上の測線に沿って移動させる計測方法であり、測線直下において、地盤内の誘電率が異なる境界面からの電磁波の反射記録が計測できる。

地盤内の誘電率は土中水分量、鉱物、膨張性粘土の存在などに依存して変動するが、水の誘電率の値は他の物質に比較して非常に大きいため、比較的均質な不飽和砂質土地盤においては、地盤中の誘電率の変動を支配する主要因は土中水分量であると言える。そのため、不飽和地盤内に発生した浸透流において、その浸潤前線は浸潤領域と未浸潤領域との境界であり、誘電率の大きく異なる境界面として、GPR プロファイル測定による検出が可能であると考えられる。

図-1 において、地表面から誘電率の異なる境界面までの距離 D は次式で算出される。

$$D = \frac{\sqrt{(TV)^2 - x_0^2}}{2} \quad (1)$$

ここに、 T : 電磁波の反射時間 (往復走時), V : 地盤中の電磁波伝播速度

地盤中の電磁波伝播速度は地盤の比誘電率 ϵ_r の空間分布に大きく依存していることが知られており、次式で表される。

$$V = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2)$$

ここに、 c は空気中における光の速度 ($=3 \times 10^8$ m/s) であり、比誘電率は物質の誘電率と真空の誘電率の比として定義される。そこで、図-1 において、送信アンテナと受信アンテナ間隔 x_0 が D に比べて十分に小さいと仮定すれば、式(1)、(2)より式(3)が誘導できる。

$$D = \frac{Tc}{2\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3)$$

(2) 反射電磁波における反射ピークの測定方法

地表面から不飽和地盤内に発生した浸透流に対して GPR プロファイル測定を実施した場合、計測されると考えられる電磁波の反射強度と反射時間の関係を模式的に描いたものを図-2 に示す。送信アンテナから発射された電磁波は、まず、地表面部分で大きく反射した後、誘電率が異なる境界面である、不飽和浸透流の浸潤前線位置において有意な反射を生じると思われる。そのため、この反射波の大きな振幅 (波形のピーク) 位置を適切に選択し、往復走時 T を読み取る必要がある。

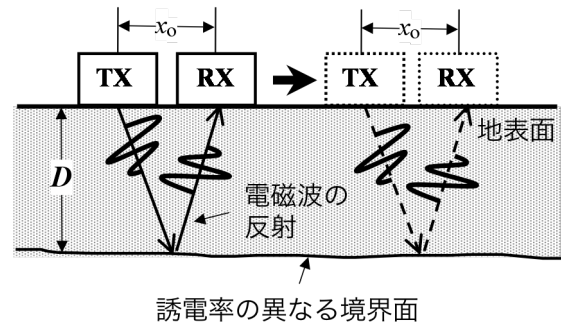


図-1 GPR プロファイル測定

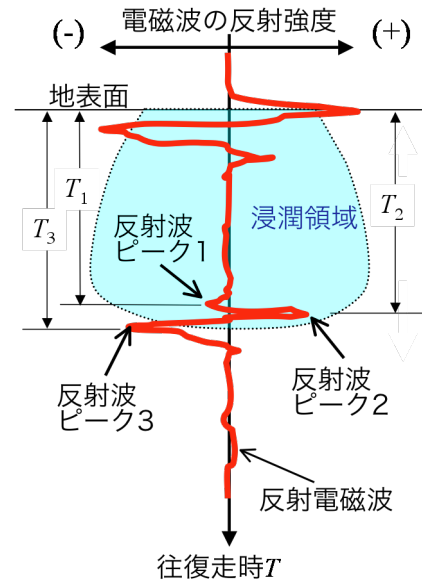


図-2 不飽和浸透流における GPR プロファイル測定によって計測される電磁波の反射強度と反射時間

本研究では、均質な砂質土地盤の浅層領域において、地表面からの一定量の散水による浸透試験を行った。このように浸透量が制御された条件下で発生した不飽和浸透流による浸潤前線は、急激に変化することなく、重力の作用によって、透水係数に依存した浸潤速度により地盤内を下方へ移動するものと考えられる。そこで、地盤内に浸透流が発生後、表層部近傍に新しく現れた反射波のピークを浸潤前線であると判断し、以後、この反射波ピークを追跡する方法を用いた。ここで、反射波のピーク位置の選定に際しては、ピーク波形の読み取り作業における主観的な要素を考慮し、図-2 に示すように3点のピーク位置について、それぞれの往復走時 $T_1 \sim T_3$ を測定し、浸潤前線位置の算定を試みた。

3. 砂丘砂地盤における不飽和浸透試験

(1) 試験手順と計測方法

鳥取大学乾燥地研究センター内の砂丘砂地盤において、原位置不飽和浸透試験を実施した。不飽和浸透試験では、

幅0.6m, 長さ4mの平面領域に人工的な散水を行って断面2次元不飽和浸透流を生じさせ, GPRプロファイル測定と1本の挿入型土中水分計を用いた土中水分量および誘電率の非定常計測を行った. 図-3に不飽和浸透試験の平面図およびGPRの測線に沿った断面図を示す. GPRの測線は断面2次元不飽和浸透流を計測できるように, 散水領域中央において短辺方向に5mの測線を設けた.

試験を実施した砂丘砂地盤は乾燥密度が 1.48g/cm^3 で深さ方向にほぼ様な地盤であり, 現場飽和透水係数 $2.0 \times 10^{-2}\text{ cm/s}$, 現場飽和体積含水率0.38, 初期体積含水率0.01~0.06程度であった. 砂丘砂は細粒分をほとんど含まない最大粒径2mm程度のきれいな砂(S)に分類され, 非常に乾燥した均質な地盤であると言える.

不飽和浸透試験は水道水のスプレー散水を5分間行い, その後の3分間は散水を中断して, GPRプロファイル測定を行う一連の計測作業を10回連続して実施し, 80分間(散水時間50分, 計測時間30分)の計測を行った. 総散水量は 0.794m^3 であった. 使用したGPRシステムは送・受信アンテナ一体型パルス波レーダ (SIR-3000, Geophysical Survey Systems, Inc製) で, そのアンテナ周波数は900MHzである. 繰り返しGPRプロファイル測定を行うことによる散水領域表面の乱れを防止するため, GPR測定時には地表面に塗装合板を敷設し, その上に描いた測線上でGPR測定を実施した.

(2) 不飽和浸透領域の定性的評価

GPRプロファイル測定によって得られた電磁波の反射記録に画像処理を施して, GPR測線直下の2次元断面画像を作成した. それらの一例として, 不飽和浸透試験開始前, および散水開始後において作成された断面画像をそれぞれ図-4に示す. これらの断面画像によれば, 散水領域の直下においてのみ土中水分量の変化に起因する画像の変化が認められており, GPRプロファイル測定による不飽和浸透領域の定性的な評価が可能であると思われる. 本試験において, 1回のGPRプロファイル測定に要した時間は30秒程度であるため, 同一測線上において迅速かつ簡便に繰り返し計測を行うことが可能である. したがって, GPRプロファイル測定を複数回繰り返し実施し, 得られた電磁波の反射記録を画像化して相対的に比較すれば, 不飽和浸透領域を可視化し, その経時変化を定性的に評価することが可能であると考えられる.

(3) 浸潤前線位置の定量的評価

図-4にはGPRプロファイル測定によって計測された散水領域直下での反射電磁波記録の経時変化を併記している. 図中に示した①~③の反射波ピーク位置を浸潤前線による電磁波の反射によるピーク位置の候補点であると判断し, ①~③までの往復走時を算出した. 不飽和浸透試験時に土中水分計によって計測された各計測深度での誘電率の経時変化を用いて浸透領域における誘電率

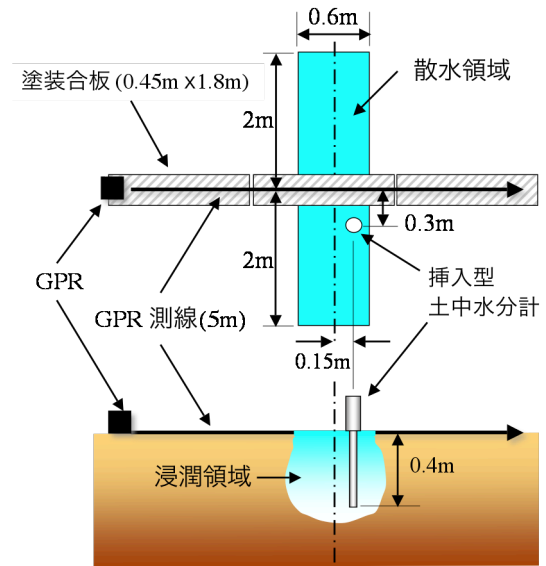
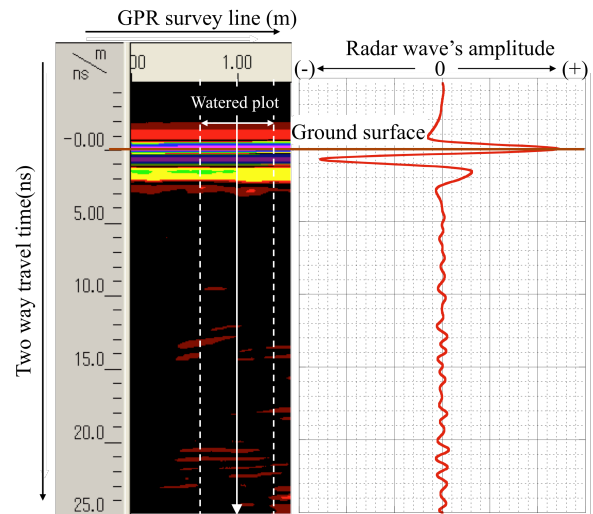
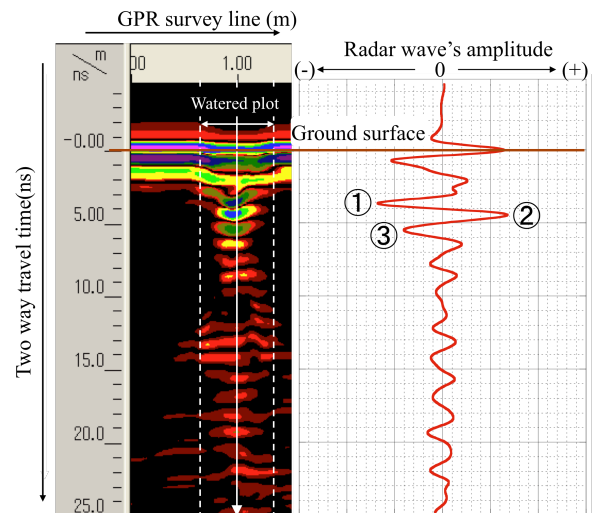


図-3 不飽和浸透試験の概要



(a) 散水開始前



(b) 散水開始後5分

図-4 浸透領域直下の断面画像および反射電磁波

の平均値を算出し、GPR プロファイル測定時における浸透領域の誘電率を推定した。そして、電磁波の反射によるピーク位置①～③のそれぞれについて、式(3)を用いて地表面から浸潤前線までの距離を算定した。

GPRプロファイル測定による浸潤前線のトレース結果の妥当性を中水分計による体積含水率の計測データと浸透流解析によるシミュレーションデータを用いて行った結果を図-5に示す。GPRにより算定した浸潤前線位置は土中水分計及び浸透流解析から算定された結果と良好な一致を示している。

4. 結論

本研究により得られた成果は以下のように要約される。

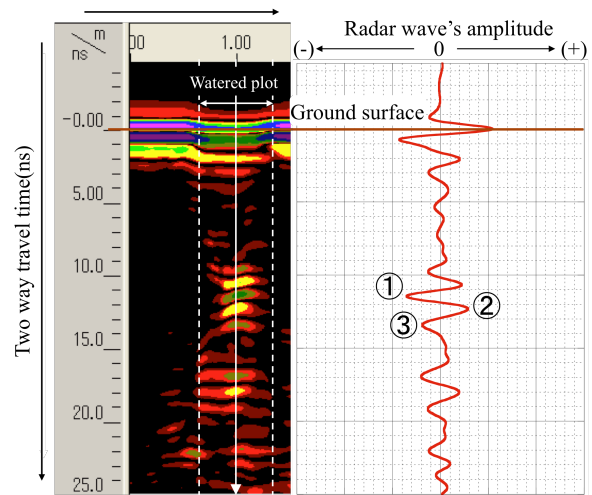
- (1) 均質な砂質土地盤の浅層領域において地表面から発生した不飽和浸透挙動は、土中水分量の変化による誘電率の変化現象として、GPR プロファイル測定により迅速かつ簡便に計測することが可能である。
- (2) GPR プロファイル測定によって計測された電磁波の反射記録より、誘電率分布に起因する2次元断面画像が作成される。これらにより、不飽和浸透流による浸潤領域を可視化し、定性的に評価することが可能である。
- (3) 浸潤領域における反射電磁波記録において、浸潤前線における電磁波の反射ピーク位置までの電磁波の往復走時を算出すれば、浸透領域の誘電率を用いて、地表面から浸潤前線までの距離を定量的に評価でき、また、GPR プロファイル測定毎に浸潤前線位置の変化を追跡できる。

GPR プロファイル計測は不飽和浸透挙動を地表面から迅速かつ簡便に、繰り返し計測することが可能であるため、原位置不飽和透水試験において挿入型センサーの代替として用いれば、地盤構造をかく乱することなく、浸透特性値を算定できる可能性を有している。また、従来法では、複数本の挿入型センサーの設置が必要と考えられるフィールドスケールでの浸透特性値の調査においても、挿入型センサーの計測データを補完し、その設置本数の削減に対して有用であると思われる。

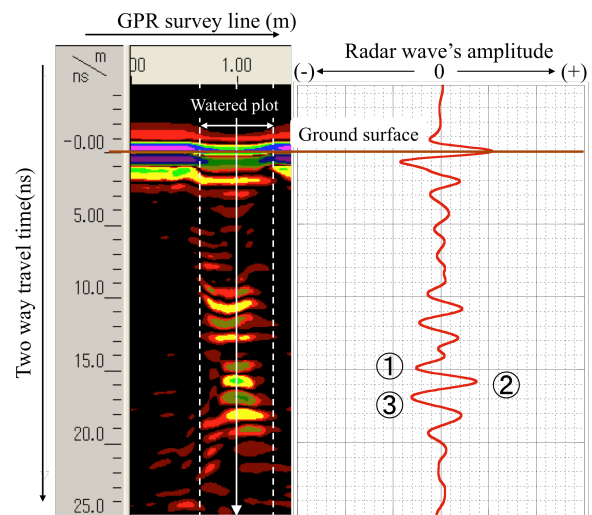
謝辞：本研究は平成20年度科学研究費補助金（基盤研究(A)18206051, (B)20360212）、平成20年度鳥取大学乾燥地研究センター共同利用研究の助成により実施した。

参考文献

- 1) 地盤工学会：不飽和地盤の挙動と評価，pp.14-25, 2004.
- 2) 竹下祐二・小松満：不飽和地盤の調査と浸透特性値の計測，地盤工学会誌，Vol.56, No.6, pp.62-69, 2008.
- 3) 竹下祐二・小林弘明・田尾一憲・田中賢次・開発一郎：地中レーダによる地盤の水分動態の非破壊計測方法，土木学会論文誌，No.729/III-62, pp.169-176, 2003.
- 4) 竹下祐二，小林延行，森井俊広，黒田清一郎，井上光弘：地中レーダを用いた浅層地盤における土中水分量の原位置計測，地盤工学会「降雨時の斜面モニタリング技術とリアル



(c) 散水開始後 37 分



(d) 散水開始後 53 分

図-4 浸透領域直下の断面画像および反射電磁波

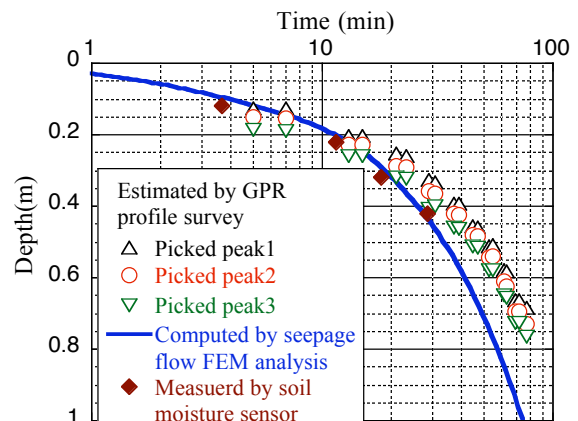


図-5 浸潤前線位置の経時変化

- タイム崩壊予測に関するシンポジウム」， pp.101-106, 2006.
- 5) 物理探査学会編：物理探査ハンドブック，第7章，地中レーダ，pp.401-421, 1998.