

不飽和地盤の浅層領域における浸透特性値の測定方法

竹下 祐二

岡山大学大学院
環境学研究科 教授



【竹下委員】 岡山大学の竹下でございます。よろしくお願いいたします。

今日は、「不飽和地盤の浅層領域における浸透特性値の測定方法」ということでご発表させていただきます。不飽和地盤の特に浅いところ、地表面近傍のモニタリングですとか、物性値をどのように求めるかという研究をやっておりまして、今日はその話をさせていただきたいと思っています。



不飽和地盤における浸透特性値の特徴と問題点をご説明した後、現在我々の研究室でやっております原位置での浸透特性値の調査・試験方法を2つ説明させていただいて、皆様方からご指摘をいただければと思っております。1つは、土中水分計を用いて原位置定水位透水試験を行う方法。もう一つは、地中レーダーを使って、不飽和地盤中に発生した浸透挙動を非破壊で地表面から計測する方法です。

我々が用いております不飽和の浸透方程式は、Richardsの式と呼ばれているものです。左辺が体積含水率の時間微分、右辺に透水係数が水分量の関数として入っております。 θ は体積含水率で、ここに定義してあるような物性値です。飽和土の場合には間隙率と等し

第11回 検討委員会 2011.8.12

不飽和地盤の浅層領域における浸透特性値の測定方法

岡山大学大学院環境学研究科 竹下祐二

- (1) 不飽和地盤における浸透特性値
その特徴と課題
- (2) 浸透特性値の調査・試験方法の提案
→土中水分計を用いた原位置透水試験方法
→地中レーダによる浸透挙動の非破壊計測

不飽和浸透支配方程式 (Richards の式)

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[k(\theta) \left(\frac{\partial h_p}{\partial z} + 1 \right) \right]$$

体積含水率
 $\theta = \frac{V_w}{V} = n S_r$
 Volumetric water content

水分特性曲線($\theta-h_p$)の勾配:
 → 比水分容量 (specific water capacity)
 $C = d\theta / dh_p$

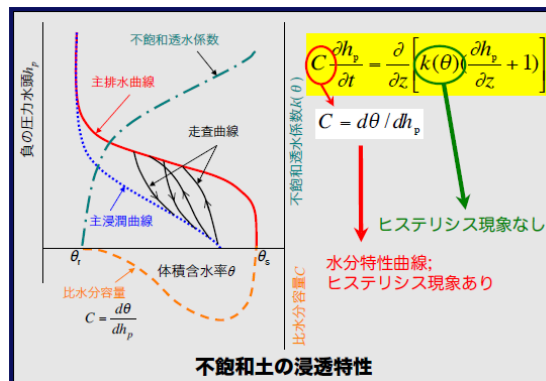
飽和・不飽和浸透流の支配方程式

$$(C + \beta S_r) \frac{\partial h_p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[k(\theta) \left(\frac{\partial h_p}{\partial z} + 1 \right) \right]$$

飽和 : $\beta = 1$
 $C = 0$
 不飽和 : $\beta = 0$
 $C > 0$

くなります。この方程式では、未知数が体積含水率と圧力水頭と2つあります。水分特性曲線というのは、体積含水率と圧力水頭の勾配の関係ですけれども、その勾配の比水分容量というものをRichardsの式に代入して、ここにあるような支配方程式を導いています。

我々が求めないといけない物性値というのは、不飽和浸透の場合にはCと、体積含水率の関数で表す透水係数 $K(\theta)$ の2つということになります。不飽和土の浸透特性値というのは、こういう図を書いて説明をしているのですけれども、横軸に体積含水率、右側が飽和で、左が乾燥という形です。縦軸に負の



圧力水頭値をとっておりまして、サクションと呼んだりします。この水分特性曲線の特徴は排水時の曲線と浸潤時の曲線と2つがある、ヒステリシスを持っているということであり、こちら側の軸は不飽和の透水係数で、体積含水率の関数として不飽和の透水係数を定義しているということです。

先ほどの式ですけれども、このところにCが入っています。時間項の前に入っていますから、数値シミュレーションをやるときの収束性に結構効いてきます。この水分特性曲線の傾きということで、形状によっては非常に強い非線形の問題になって、数値シミュレーションがうまくいかないことがあります。

透水係数は、体積含水率の関数にしますと、浸潤過程と排水過程のときのヒステリシス現象はないというふうに言われています。透水係数を室内試験で求めるときには、例えば定水位の透水試験を考えますと、供試体を浸水させた状態で通水したり、加圧したりして飽和度を100%にする努力を行います。



この状態の透水係数は完全飽和の透水係数で、英語でいうと、Truly saturatedと言われています。この状態の透水係数を室内試験で求めてきたわけです。今日の話で、原位置で透水係数を不飽和地盤で求めるといったときには、完全飽和状態にすることはなかなか難しいので、我々は現場飽和透水係数というふうな呼び方で、室内で求められる透水係数と少し区別するということをしております。

欧米ではField-Saturated Hydraulic Conductivityと言われているのですが、適切な訳語がないものですから、「現場飽和透水係数」と呼んでおります。現場飽和の定義は明確なものはありませんが、飽和度が80%程度での透水係数ではないかと考えています。これは、例えば斜面とか地表面に雨が降ったときに、

間隙の中に空気がエントラップされて完全な飽和にならないことがその理由になっております。

洋書などを見ますと、こういった図が出ております。横軸にプレッシャーヘッドをとって、縦軸に透水係数をとって、透水係数を圧力水頭の関数でとっています。彼らは不飽和の透水係数と言わずに、near-saturated hydraulic conductivityという用語を使って、あまり不飽和、不飽和と言わずに、飽和の近傍で現場の透水係数を求めています。我々がやっている研究の中でも、現場飽和の透水係数という発想で物性値を評価しております。

不飽和地盤での原位置試験を考えるときには、飽和地盤のように水をくみ上げるということは難しいので、何らかの形で地表面から散水するとか、浸透させるようなことをインパクトとして考えます。土中水分計を設置したり、テンシオメータを複数、多深度に設置をして、土中の水分状態を計っています。

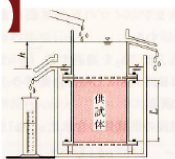
テンシオメータというのはなかなか取り扱いが難しく、先端のポーラスカップは、間隙水圧の連続性だけを確保して、間隙空気が連続してはいけないので、水は通すけど、空気は通さないセラミックのカップを使っています。このポーラスカップの飽和とか脱気とか、地盤の中に挿入したときの設置方法などが問題点です。

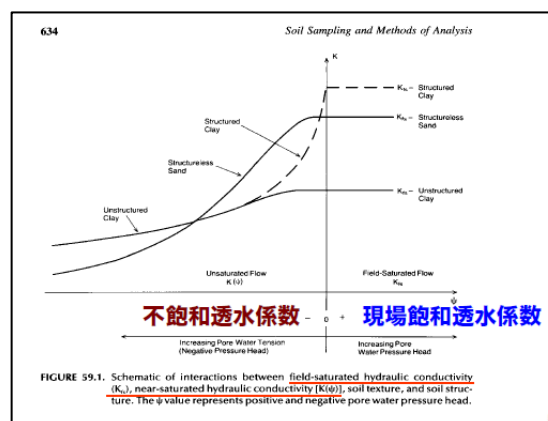
やってみると、なかなか原位置の透水試験というのは簡単ではありません。こういったところが問題かといいますと、1つ目は、気象条件に当然左右されますので、高価で壊れやすい装置は使えないということが室内試験とは違う点です。2番目は、初期条件、境

【室内試験： $S_r=100\%$ 】
完全飽和透水係数

不飽和地盤での設計定数は？

【原位置試験： $S_r=80\%$ 程度？】
現場飽和透水係数 k_{fs}
Field-Saturated Hydraulic Conductivity





界条件の測定とかコントロールが非常に難しいということでもあります。あるインパクトを与えて、そのときの非定常の状態のデータを計測するときには初期条件が重要になってきますし、ある一定状態に落ち着いた定常状態のデータを議論するときには、境界条件が効いてきますけれども、現場実験ですから、こ

ういった測定条件の制御等が難しいということです。3番目は、挿入型センサーの多数設置は難しいということです。1回1回穴を掘って設置するというのはかなり労力がかかりますし、センサーと地盤とのコンタクトが非常に難しいのです。

しかし、やってみると、意外に楽しいこともあったりしまして、何が楽しいかという、1つ目は、ベストな試験方法はないということで、こういった言葉が適切かどうかわかりませんが、不飽和土質力学の黎明期というようなことがありますから、歴史の証人になれるチャンスがあること。2つ目は、

地表面からいろいろな実験を試みるわけですから、地盤特性の空間分布の測定とか、特に我々が興味ある不均質性とか異方性の評価に少しでも近づけるのではないかと。3つ目は、非破壊計測が適用できる可能性が高いのではないかと。このようなことです。

それでは、不飽和地盤での定水位の透水試験について基本的な事項をご説明させていただいて、我々が今やっていることをご紹介させていただきたいと思います。不飽和地盤で地表面から原位置の定水位透水試験をやるときにどういう方法が考えられるかということですけれども、ここに4つの例を挙げております。1番目の方法は、地盤に地表面から穴を掘って、そこに定水位で水を浸潤させていく。これは変水位でもいいですけれども、定水位の境界条件を用いたほうが解析が楽になるものですから、定水位の試験を考えています。オーガー孔ですから、あまり大きな穴は掘れないのですが、最低でも直径が5センチ

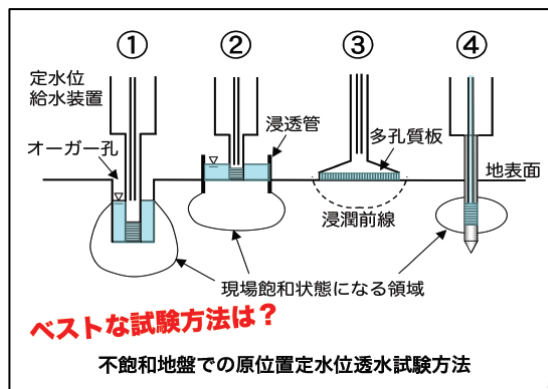
不飽和地盤での原位置透水試験では

- ①高価で壊れやすい装置は使えない
- ②初期／境界条件の測定・制御が困難
- ③挿入型センサーの多数設置はつらい

いつか、きっと基準化...

不飽和地盤での原位置透水試験では

- ①ベストな試験方法はない
不飽和土質力学の黎明期
- ②地盤特性の空間分布の測定
不均質性・異方性の評価
- ③非破壊計測の適用性



以上ぐらいの穴を掘らないと実験が難しくなります。

2 番目の方法は、直径が大体 5 センチから 20 センチぐらいの円筒のリングを地表面から打設して、この中に定水位の境界条件をつくる。この定水位給水装置と書いているのは、マリオット式のサイフォンを通常使います。このあたりの領域のところに現場飽和状態が発生して、不飽和地盤での現場飽和透水係数が測定できる可能性があります。

3 つ目の方法は、地表面に多孔質板を置く方法です。これはちょっとやり方が前の 2 つとは違いますが、負圧を発生させる装置をここに取りつけて、負圧状態で水を浸透させる方法です。①と②の方法は、ある正の水圧をかけて浸潤させますが、こちらは水を少し吸引するような形で浸潤させる方法です。これはテンション・ディスク、ディスク・パーミアメータ、テンション・インフィルトロメータといった名前で諸外国では実施されていますが、日本ではあまり普及している方法ではありません。

4 番目はコーンを地盤の中に打設して、所定の深度で水を注水していくというやり方があります。

それぞれ一長一短あって、これがベストという方法はなかなか難しいですが、比較をしてみますと、こういった形になります。

1 番目にご紹介しました試験孔を掘削する方法というのうは、オーガー孔が掘削できる地盤でないとだめで、非常に固結した地盤は難しいですし、レキがたくさんあるような地盤ではなかなか難しい。ぼろぼろ崩れるような自立しない地盤でも難しいということです。今、地盤工学会の基準にな

っている E 19 法というのはオーガー孔を掘って行いますが、初期の浸潤流量を減少させるために、オーガー孔内にレキを投入するようなことが書かれていまして、ちょっと面倒かなという感じがします。ただ、傾斜地でも可能ですし、この穴がうまく掘れれば、安定した方法ではないかなと思います。オーガー孔の近傍の局所的な透水係数が評価できますので、オーガー孔をだんだん掘り進んでいきますと、鉛直方向に対する透水係数の分布が求まるといった展開が期待できるということです。

2 番目は浸潤リングを打設する方法。これも地盤があまり硬過ぎますと打設できませんが、植生があってもやれるわけです。地表面に芝が生えているとか、草が生えているとか、

特徴比較

①試験孔掘削

- ▲オーガー孔が削孔・自立する地盤
- 傾斜地でも可
- 局所的な透水性を評価→鉛直分布への展開

②浸潤リング打設

- 打設可能な地盤、植生可
- 地表面近傍の透水性→平面分布への展開
- ▲リングからの側方漏水

③浸潤ディスク設置

- 固結・未固結地盤、植生可、非破壊試験
- 地表面近傍の透水性→平面分布への展開
- ▲負圧浸潤→飽和近傍の不飽和透水係数を評価
- ▲ディスク特性(K と AEV)と地表面との接触性

そういった植生を加味した形でリングを打設して実験することができるところがメリットかなと思います。評価される透水性というのは地表面の近傍でありまして、大体地表面から20～30センチぐらいのところの平均的な透水係数が求まる。これは非常にシンプルな方法なので、多点で実施して、透水性の平面分布を求めることができることが特徴だと思います。ただ、浸潤リングの打設が不十分ですと、横から浸透水がリークしていきますので、解析精度に影響を及ぼすデメリットになります。

3番目の浸潤ディスクと呼ばれるものを置く方法ですけども、これはディスクを地表面に置くだけです。固結してようが、未固結であろうが地盤を選ばないということです。当然、植生もオーケーですし、穴を掘ったり、リングを打設しませんので、きわめて非破壊試験に近い。ただし、大きなインパクトを与えることができませんので、地表面の近傍の透水係数に限定されますが、平面分布への展開という点では、浸潤リング打設する方法と同じです。この方法は負圧で、浸潤をかけていくことができるので、飽和近傍の不飽和の透水係数を評価できるというところが特徴です。ただ、置くディスクの特性として、透水性ですとか、エアエントリーバリューなどの物性によっては評価が変わるでしょうし、地表面との接触性が非常に問題になってくるところがデメリットです。

我々のほうで今使っているのは、市販されているGUELPH PERMEAMETERというもので、オーガー孔を掘ってやるタイプで、Soil moistureというところが製品化しておりまして、Product Number 2800K1という型番で市販されております。GUELPHはカナダのオンタリオ州にある大学でありまして、ここの先生が開発されたということでGUELPHという名前がついて商品化されています。これは大体1メートル80センチぐらいのスーツケースのようなものにコンパクトに入っていて、これがマリOTTタンクで、ここにストレーナパイプがあります。これが、オーガーです。5センチのオーガーが2つ附属しております。これを現場に持っていけば実験が簡単にできるオールインワンの形になっております。これはマニュアルで、これはキャンプで使うようなポリエチレンのタンクで



す。4リットルの水タンクがホースと一緒に収納されております。オーガーを掘った後の壁面をリフレッシュするようなブラシもついております。今から15年ぐらい前にカナダで

教えてもらったときには2,000ドルだと言われて、日本で買ったなら50万円ぐらいでしたが、この前の見積もりでは80万円と言われました。

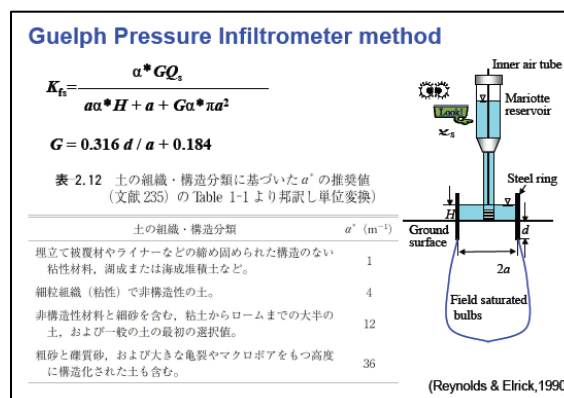
もう一つ、GUELPH PRESSURE INFILTRMETERというのがありまして、これは2番目の方法です。浸潤リングを打設して、上に定水管をつけてやるという方法です。これはオーガーが要りませんので、非常にコンパクトな、こんな書類を入れるようなケースにマリOTTタンクが収納されています。先端のリングは10センチと20センチのものがありまして、こういうふうな形で使います。ここのところが1センチ刻みで溝が彫ってありまして、何センチ挿入させたかということがすぐわかるようになっています。

組み立てますとこんな形になります。左側がオーガーを掘ってやるタイプです。三脚で支持しております。こちらはリングを打設するタイプで、リングの上に直接定水管を取り付けて自立させているという形です。オーガーは、直径5センチで、掘っていくためのオーガーと、ある程度掘ったら、孔底を磨くようなオーガーの2つがあります。



こちらはリングを取り外した後です。実験が終わった後、地盤の上をさわってみると、手がべとべとしないということです。これが、Field saturatedだというふうに説明を受けました。実験が終わった後の地表面に水があふれていない。この状態がTruly saturatedではなくて、現場で起きている飽和状態だということでもあります。

基本的には入っていく水の量を見るだけなので、1人でもできるという方法です。地盤工学会の書籍にも紹介させていただいておりまして、Guelph Pressure Infiltrometerという名前で紹介させていただいています。基礎式はこんな形です。透水係数、



現場の飽和透水係数を求める式はこういった形で、非常にシンプルな形で誘導されています。ReynoldsとElrick先生がたくさん論文を書いておられまして、1990年代に開発された装置です。

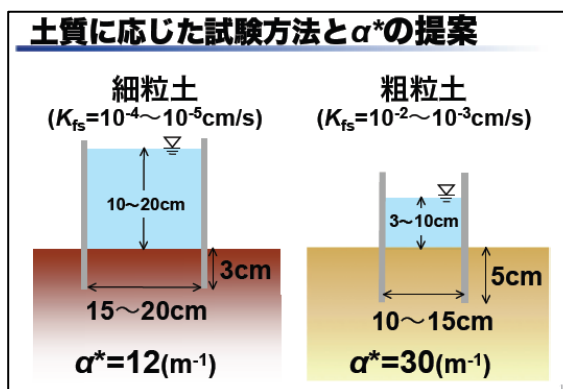
これのおもしろいところは、1点から注水された水の3次元的な広がりを考慮していることです。不飽和浸透特性モデルの一つであるガードナーモデルに浸透挙動が支配されるという仮定に基づいて、数値解析を組み合わせるこのような式を提案されています。直径が2aのリングをdだけ打設して、その中にHの水位を保持して、定水位の浸潤を行います。そして、定常の浸透流量をはかるだけです。透水性が良好な地盤ですと10分程度で定常に達しますので、非常に簡便に終わります。

この現場飽和の透水係数の式が非常にシンプルになっているのは、このGという関数と α^* というパラメータがポイントでありまして、Gというのは、彼らがdとaの関係を数値シミュレーションによって提案しているわけです。 α^* は、土の組成とか構造分類に基づいた推奨値で、次元は長さの逆数を持っております。一般の土の最初の選択値が12だと言われています。

Elrick先生にカナダでお会いしたときに、なぜこの値になるのですかと質問したら、エンジニアリング・ジャッジメントだと言われたんですね。このあたりは結構感度があって、 α^* の値が変わりますと K_{fs} の値が変わります。これ以上になりますとあまり変わらないような状態になっていて、これでいいんだとElrick先生はおっしゃいました。

我々研究室では、van Genuchtenのモデルを使って、いろいろ数値シミュレーションを行っています。浸潤リングを打設する方法に対する案です。透水係数がこのぐらいの細粒土、については、直径が大体15センチから20センチぐらいのリングを3センチ打設して、10～20センチぐらいの水位で浸潤を行う。その時に使う α^* の値は12。もうちょっと透水性がよくなりますと、水がたくさん入っていきますので、リングの直径は少し小さ目にして、定水位も小さくていいと思います。ただ、根入れ長を大きく

しないと側方からリークしてしまいますので、5センチぐらい打設したらどうかなと。このときの α^* は30ぐらいを使うと、いい値が得られるのではないかなと考えております。



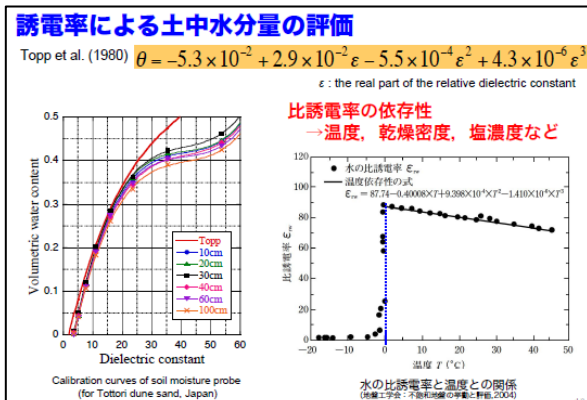
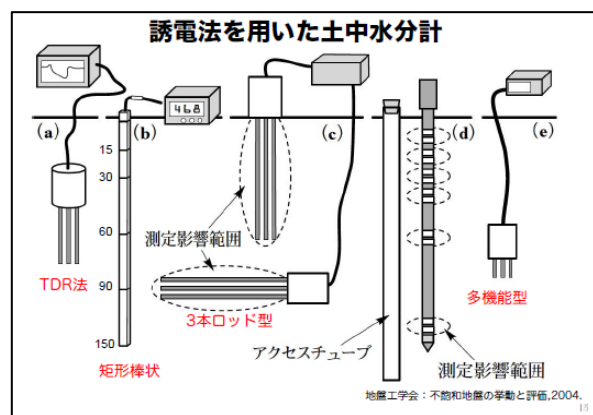
これは実験データによる検証がないので、もう少し検討が必要だと思っています。

次は、今ご紹介したような原位置透水試験方法に対して、土中水分計を入れてみたらどうかという提案です。当時、誘電率を土中水分計というのが市販され始めておりまして、TDR法というのをお聞きになったことがあると思いますが、誘電率を用いた土中水分計測は、土壌物理とか、農業土木のほうで盛んにやられていましたので、その装置を使ってやろうと思ったわけです。今、我々が使っているのはこのタイプです。アクセスチューブと呼ばれるものを事前に設置しておいて、その中にこういったプローブを差し込んでいく。同一地点で多深度に水分量をはかることができます。

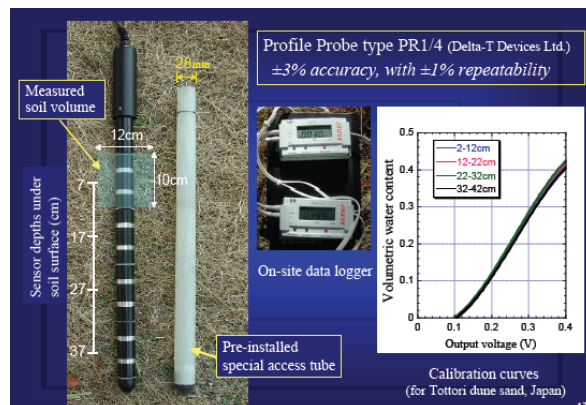
これは測定長が1メートル物の図ですけども、1メートル掘るといのはなかなか大変で、我々が使っているのは40センチのものです。誘電率による土中水分量の評価のときに問題になるのは、誘電率と水分量の校正式で、Toppの式が北米のほうでは盛んに使われております。誘電率の3乗で体積含水率が決まる式で、

これがすごくリファレンスされています。先ほどのセンサーを使ってキャリブレーションをとって見ますと、赤い線がToppの式ですけども、まあまあこのあたりのところが近似している。誘電率が大きくなる、飽和に近づくとちょっと離れていきます。キャリブレーションをやってみますと、供試体が飽和に近づくと、どうもうまく誘電率がはかれません。ある水分量以上になると、誘電率の計測が困難になる場合が多いです。

横軸に温度をとって、縦軸に非誘電率をとりますと、大体15度ぐらいの水温のときに81。温度が大きくなると下がってって、0度より下回るとこういう感じで下がっていく。また、含水量が多くなるほど誘電率が大きくなっていきます。

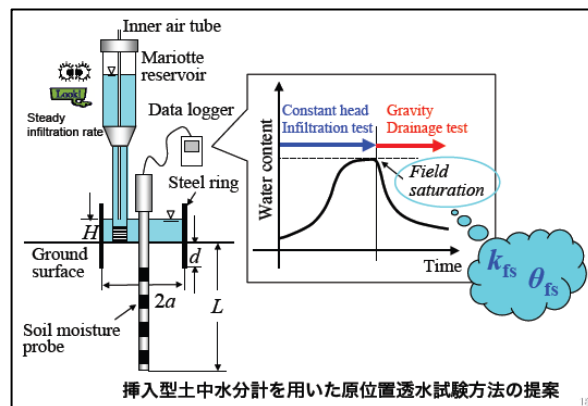


我々が使っているのはこの40センチのプロブでありまして、上から4カ所の計測ポイントがあります。計測範囲はセンサーを中心にして、円周方向に直径12センチ、鉛直方向に10センチの円筒形の平均的な水分量が計測できることがキャリブレーションでわかりました。これはアクセス



チューブと呼ばれるものですが、オーガーで、直径28ミリの穴を掘っておいて、これを打設して、その上からプローブを挿入していきます。データはデータロガーで収録します。DC12ボルト負荷すると、0から1ボルトで出力されます。体積含水率のキャリブレーションはこの図のようになりました。メーカーのマニュアルには精度が $\pm 3\%$ 、リピータビリティが $\pm 1\%$ だと書いてあります。

先ほどご紹介しました浸潤リングを打設する方法に活用しています。直径が2aのリングをdだけ打設して、Hだけ水位を保つという方法ですけど、その真ん中に土中水分計を打設する。真ん中に持ってきたのは、軸対称の問題を解くときに、真ん中にあるほうが計算が楽になるからです。定水位の透水試験をやるときに、それぞれの深度での水分量を計測します。横軸が時間で、縦軸に水分量をとりますと、初期の水分量から飽和の状態に上がって行って、Field saturationと書いていますが、現場飽和の状態になったら実験をやめて、あとは排水実験を行う。浸潤だけじゃなくて排水過程もデ



ータをとるという発想です。土中水分量の経時変化を使って、従来、現場の飽和の透水係数だけしか計測できなかったのですが、不飽和の透水係数も測定する方法を考えています。

我々は、非常にクリーンでユニフォームな砂地盤での実験をやっています。乾燥地研究センターの粒径加積曲線はこれです。非常に均一な最大粒径が2ミリぐらいの均等な砂です。間隙比率は0.4で、現場飽和の透水係数が $2 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ ぐらいの砂です。そこでデータをとったものがこれでありまして、横軸が時間で縦軸が水分量です。非常に乾燥している砂ですから、初期の体積含水率が0.05ぐらいでして、そこで定水位の透水試験を

やりますと、各センサーの水分量が上がっていった、30分ぐらいで飽和します。30分の定水位透水試験が終わったら、排水試験をします。

2つの方法がありまして、その1は、動水勾配を1.0と仮定する。要するに透水係数を求めるときには流量と動水勾配が必要ですが、動水勾配の計測は困難ですから、これを簡便にしたかどうかという大胆な提案であります。それで透水係数と体積含水率の関係を簡便に計算できないかということとです。

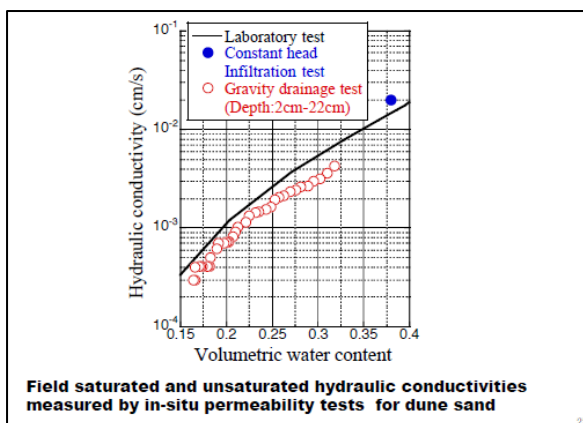
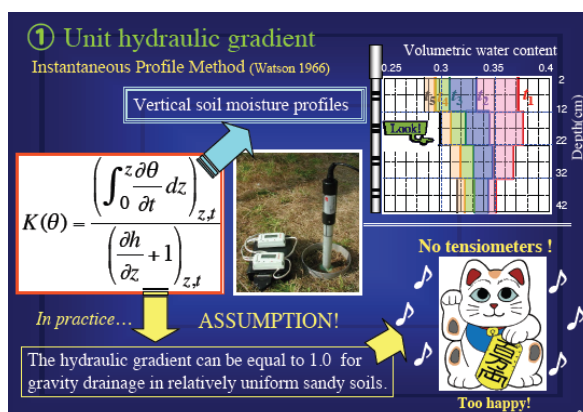
これは室内試験ではInstantaneous Profile Methodというふうに呼ばれていまして、日本語では瞬時水分計測法と訳されています。これがInstantaneous Profile Methodで提案されている透水係数の算出式でありまして、分子が任意の時間に、ある区間を通過した水の量になっております。分母が動水勾配の項です。普通、Instantaneous Profile Methodでやるときには、水分のプロファイルも計測しますが、動水勾配をはかるために、テンシオメータを2点以上に挿入してやらないといけない。これを何とか割愛できないかということとです。均質な砂質土だったら、動水勾配は1.0とみなしてはどうかという提案です。

こういうような水分計を挿入して、縦軸に深度で横軸に水分量をとりますと、 t_1 から t_2 、 t_3 という形で対象現場の水分量が変化しますので、それを計測します。この色で塗った部分が t_1 から t_2 に移動した水分量ということで、これが分子になっていきますので、それで透水係数が求められるという方法であります。計測されたデータがこれで、横軸が体積含水率で縦軸が不飽

透水試験方法【その1】

排水試験において、

- ①水分プロファイルの変化を計測
- ②動水勾配を1.0と仮定
- ③透水係数と体積含水率の関係を簡便に計算



和の透水係数です。このLaboratory testと書いてあるのは、鳥取大学の井上先生が加圧板法で求められたデータを数値化したものであります。これは排水過程でしかできませんけれども、簡便に不飽和の透水係数を求める場合、動水勾配が1と仮定できるのであれば、この方法が提案できます。

2番目の方法は、浸潤試験のデータも使う方法です。両方の試験において土中水分量の経時変化を計測しているわけですから、これを利用して、浸透流解析をやって、浸透特性の関数モデルを同定する。浸潤過程と排水過程の両方の実験データをもとに水分特性曲線のヒステリシスを求める方法です。

これがvan Genuchten's modelと呼ばれるモデルであり、これが水分特性曲線をあらわす式で、こちらが不飽和の透水係数であります。計測された水分量とコンピュータで算出された値の残差平方和が最小になるときのパラメータベクトルを求める方法です。このパラメータベクトルとは、このvan Genuchten's modelを構成している、赤で塗ったパラメータです。

水分特性曲線にヒステリシスがあるというお話ししました。非常にドライな状態からゆっくり浸潤すると主浸潤曲線上を移動して、間隙の中にエントラップされている空気がない状態になると飽和状態に移行する。ここから排水が生じると、主排水曲線上を移動する。

透水試験方法【その2】

浸潤試験と排水試験において

- ①土中水分量の変化を計測
- ②浸透流解析により、浸透特性の関数モデルを同定
- ③水分特性曲線のヒステリシスを考慮

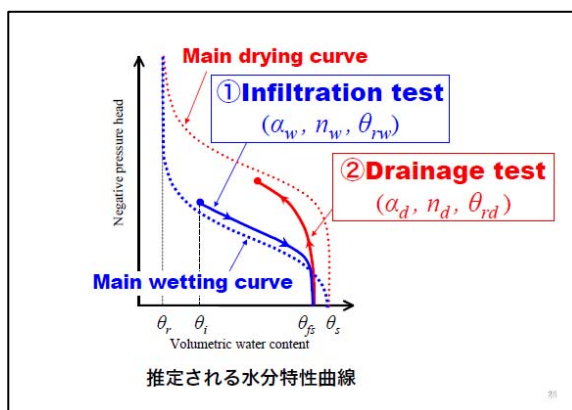
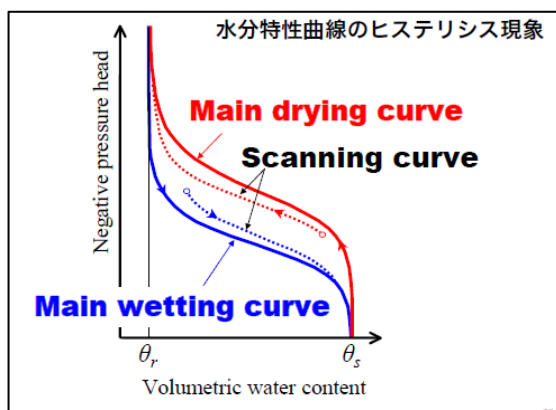
van Genuchten's model

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + (ah)^n} \right]^{1-1/n}$$

$$k(S_e) = k_s S_e^{0.5} \left[1 - \left(1 - S_e^{\left\{ \frac{n}{n-1} \right\}} \right)^2 \right]^2$$

Inverse analysis by HYDRUS-2D

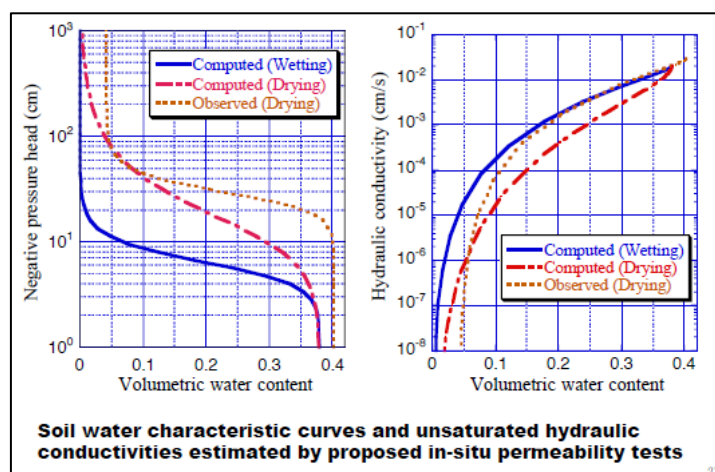
$$OF(\hat{b}) = \sum_{j=1}^N \left[w_j \left\{ \theta_m(t_j) - \theta_c(t_j, \hat{b}) \right\}^2 \right] \rightarrow \min.$$



原位置では主浸潤曲線と主排水曲線の中に存在するスキニングカーブ上を移動していると思われます。

同定した結果が、これです。左側が水分特性曲線です。この点線で書いてあるのは、鳥取大学の井上先生が室内実験で求められた排水過程からの実験データです。このブルーの実線が今回我々が求めた浸潤過程の水分特性曲線で、一点鎖線が排水過程の水分特性曲線です。この浸潤状態のときに求まった水分特性曲線というのは、主浸潤曲線に近いんじゃないかと思われるものであります。

そして、なぜかといいますと、この曲線が主排水曲線と平行しているところがポイントであります。右側のほうは体積含水率と不飽和透水係数の関係でありまして、実験結果を絡めるような形で推定されたから、妥当な結果であると考えています。

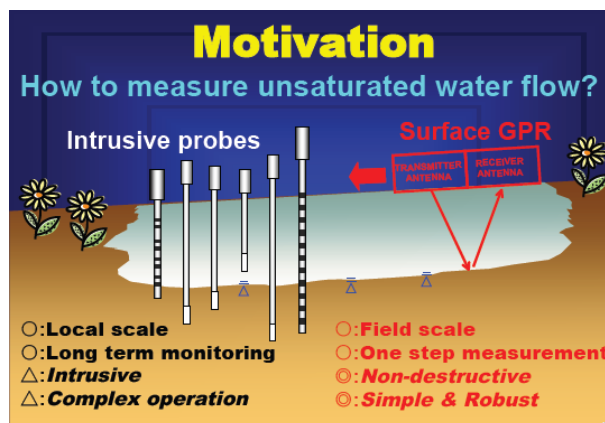


まとめです。要は土中水分計を用いた原位置透水試験をやって、土中水分量の非定常挙動をはかりますと、現場の飽和透水係数とか、現場飽和体積含水率が計測できるということ。単位動水勾配の適用が許されるのであれば、不飽和の透水係数が簡便に算定できるということ。逆解析を実施すれば、土中水分量の計測データを用いて、ヒステリシスを考慮した不飽和の浸透特性が推定できるということです。

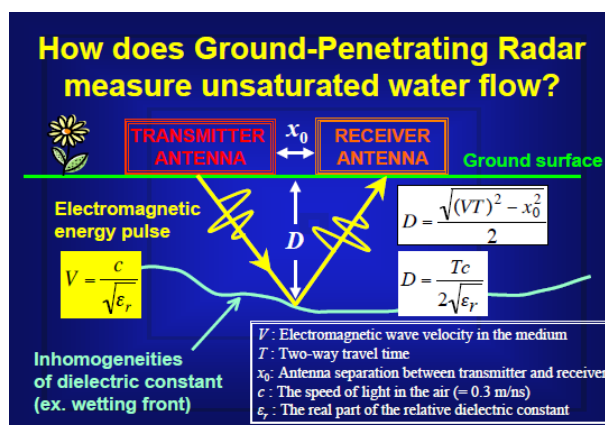
まとめ【その1】

- 1) 挿入型土中水分計を用いた原位置透水試験を実施し、土中水分量の非定常挙動、現場飽和透水係数、現場飽和体積含水率を計測する。
- 2) 単位動水勾配を適用したInstantaneous Profile 法により不飽和透水係数に簡便に算定できる。
- 3) 土中水分量の非定常計測データを用いて、数値解析による逆解析により、ヒステリシスを考慮した不飽和浸透特性の推定が可能である。

次に、地中レーダーを用いた不飽和浸透流の非破壊計測についてご説明をさせていただきます。モチベーションは、挿入型のセンサーを使わずに、不飽和の浸透挙動を計測できないかということでした。通常挿入型のセンサーを入れる方法のメリットは、ローカルなスケールで長期間のモニタリングに適していることと言えます。ただ、挿入することと操作が難しくなることが難点です。また、地盤とセンサーのコンタクトが非常に気になるところです。表層部からやる方法は、Field scaleでの計測に適していて、1回限り計測が非破壊で計測ができるというメリットがあります。

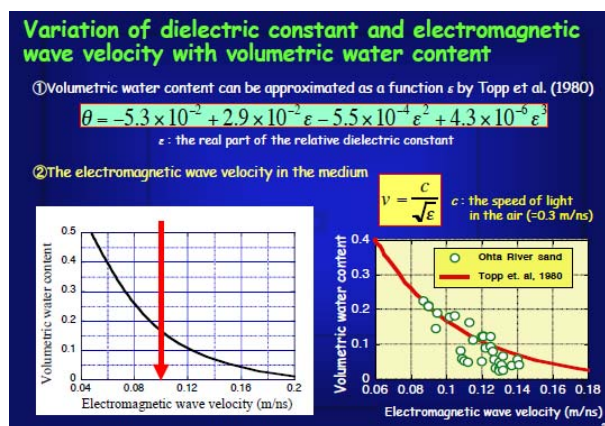


地中レーダーは、非常に単純で、送信アンテナから発射された電磁波が誘電率の異なるところで反射してはね返ってくる際の往復の走時、英語ではTwo-way travel timeといいますけれども、これを計測しているだけであります。使う式はこれだけでありまして、 V は電磁波伝播速度、 c というのは光の速度、 ϵ は誘電率です。距離 D というのは、こういった式であらわされまして、この x_0 というのはアンテナ間隔ですけれども、これが十分小さく、無視できる場合にはこういった式で書ける。



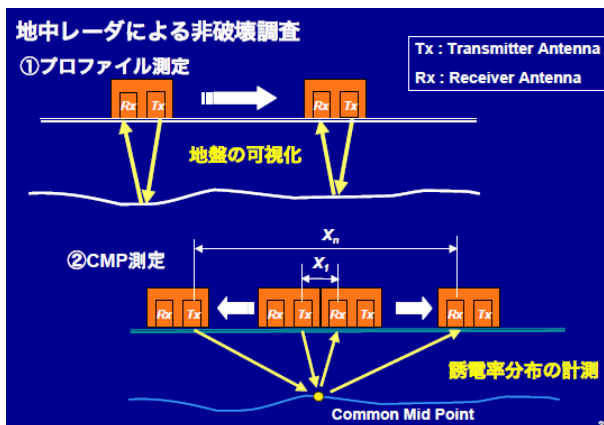
レーダー波と体積含水率の関係を見てみます。横軸にレーダー波の速度、縦軸に体積含水率です。通常、地盤の電磁波伝播速度は0.1メートル／ナノセカンドが使われていて、それをToppの式で換算しますと、体積含水率が大体0.18ぐらいになります。

レーダー波の速度は、地盤が乾くと速くなり、ぬれていくとあまり遠くまで飛ばなくて伝播しなくなるという傾向があります。つまり、地盤の中の誘電率というのは含水状態にかなり大きく影響され

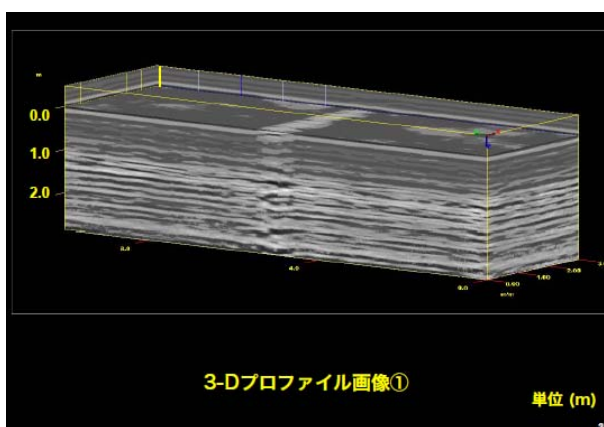
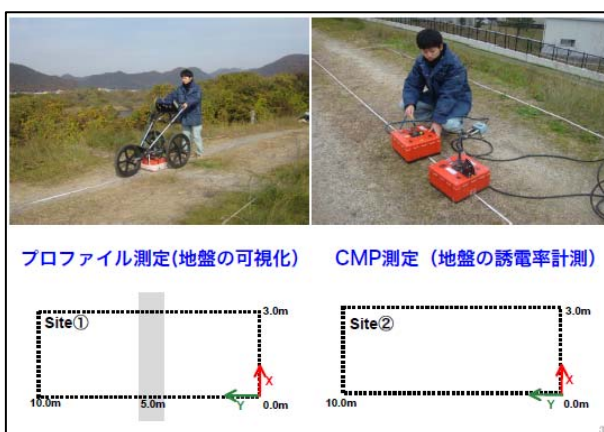


ることです。

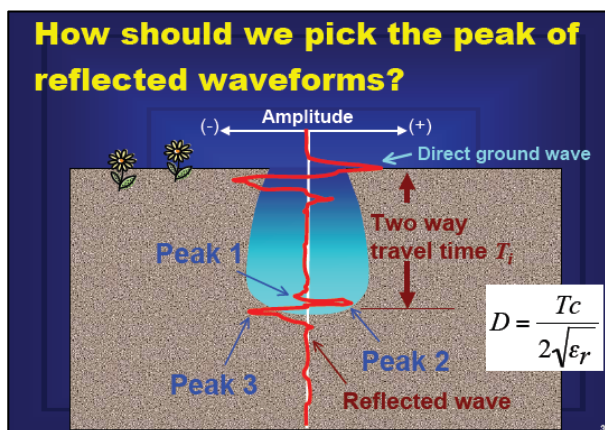
地中レーダーには、2つのアンテナオペレーションがあって、上がプロファイル測定と呼ばれるもので、地表面上を、アンテナを動かしていく方法。通常は空洞調査とか遺跡の調査で地盤の可視化のときに使われている方法です。もう一つはCMP測定といって、これはCommon Mid Pointと呼ぶ地盤の中のある1点を中心にレーダーを離して行って、ここの中の誘電率分布を計測する方法です。この2つの方法が主な方法であり、これを使って河川堤防調査をやってみました。



岡山にある、高梁川の下流から20キロ600mの地点で国交省からのご支援をいただいて計測をさせていただきました。この堤防にレーダーを持ち込みまして、プロファイル測定をやりました。こちらはCMPの測定です。今日ご紹介するサイトは、縦断方向に10メートルで横断方向に3メートルのエリアで2つサイトをつくっております。なぜ2つかといいますと、サイト1は堤防の中に導水管があるために表面がコンクリートになっているところでありました。プロファイル測定では3次元の可視化ができるわけですし、このエリアを25センチピッチで縦横、このカーをずっと押していくわけです。それでデータをコンピューターの中で合成して、こういった図を書きます。これはサイト1の状況ですけれども、ここに導水管があったので、その反射がここに出ているという形です。



それに加えて、やはり不飽和の原位置試験ということを考えると、表層に散水して、その中に発生した不飽和の浸透挙動を計測できないかということです。レーダーではわかりますこういった波形が計測されます。空中から、レーダーから発射された電磁波というのは地表面で大きく反射して、次に反射するところは誘電率が大きく異なる場所ですから、浸潤されている領域とそうでない領域、それがピーク1、ピーク2、ピーク3と書いてありますけれども、どのピークをとらえたらいいのかなということです。それがよく分からなかったので数値シミュレーションをやって確かめてみました。



Analysis of reflection coefficient to radar waveforms for two layered soils

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}}$$

400MHz antenna

TX RX

0.3m

1.2m

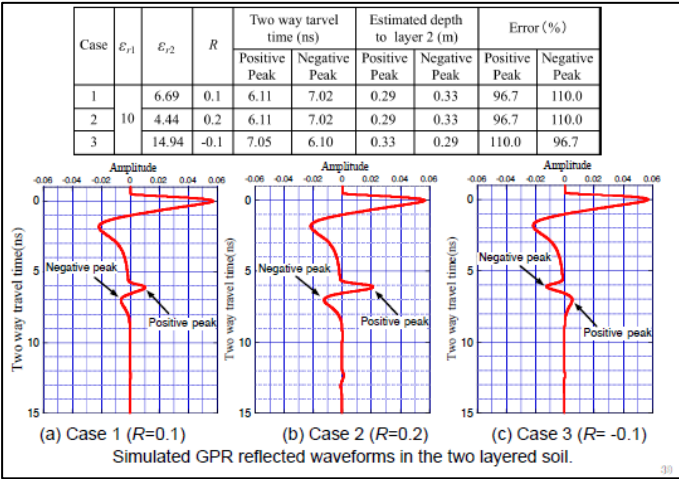
Layer 1 ϵ_{r1}

Layer 2 ϵ_{r2}

Case	ϵ_{r1}	ϵ_{r2}	R	Two way travel time (ns)		Estimated depth to layer 2 (m)		Error (%)	
				Positive Peak	Negative Peak	Positive Peak	Negative Peak	Positive Peak	Negative Peak
1	10	6.69	0.1	6.11	7.02	0.29	0.33	96.7	110.0
2		4.44	0.2	6.11	7.02	0.29	0.33	96.7	110.0
3		14.94	-0.1	7.05	6.10	0.33	0.29	110.0	96.7

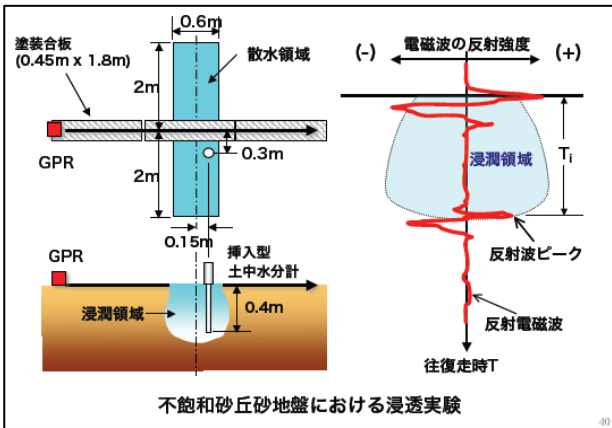
-16-

た。こういった波形が得られまして、ケース1というのは表層の誘電率が10で、下層が6.69です。ケース2は2層目の誘電率が4.44ですから、ちょっとコントラストが大きくなっている。それを見ますと、最初に出てくるポジティブのピークをとったほうが深度の精度が高いということがわかり

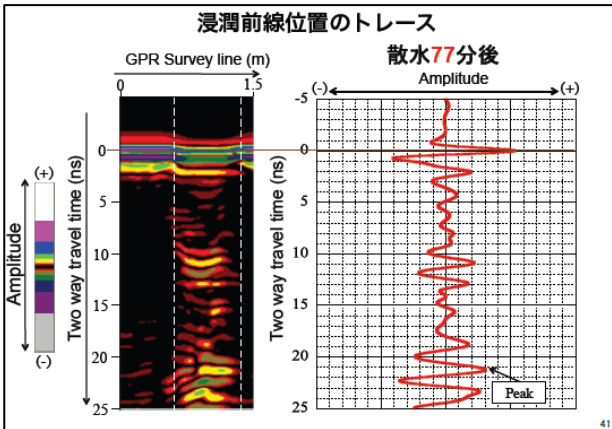


ましたので、地表面から浸潤をさせるときには、最初に表れるポジティブのピークをずっとトレースしていけばいいのではないかなということです。

鳥取大学の乾燥地研究センターに行きまして、60センチと4メートル区間に地表層から水道水をスプレー散水しまして、そこを横切るようにレーダーで計測しました。水をまいているときはレーダーではかれないので、水をまいて休んだときにレーダー計測をやって、また、水をまいてレーダー計測を行いました。鉛直の断面2次元の浸透流を発生させて、こういうふうな波形をトレースしていけば、非破壊で表層部分から浸潤領域の大きさがわかるのではないかなということをやってみたわけです。

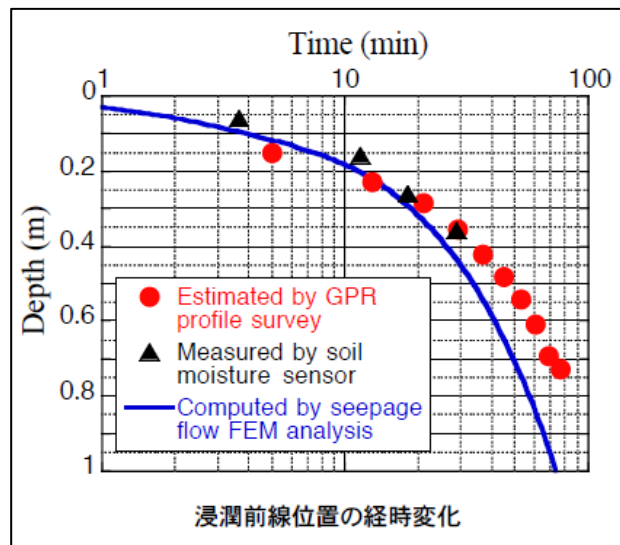


こんな浸潤波形が得られるのですけれども、こちらは画像化したものです。縦軸にはTwo-way travel timeになっています。これは散水する前なので、非常にドライな状態ですからこういった波形が出てきまして、散水5分後はこういった形です。このピークに着目して、これをずっと追いかけて、画像化しますとこう



いった形が出ますから、ここで何か起きているということがわかります。これが13分後です。こんな感じでずっと鉛直方向、下向きにピークの位置がずれていくという状況を追いかけていけば、表層から非破壊で浸潤前線の先端をとらえることができるのではないかと、いうことを今やっております。

このグラフは横軸に時間をとって、縦軸に深度をとっています。この赤丸が、今ご紹介したレーダーで計測された浸潤前線の位置、三角印は、土中水分計によって浸潤前線が到達したなと思われたときの位置、ブルーのラインは浸透流解析の結果であります。このあたりは近いのですが、このあたりがちょっと離れておりまして、このところまではうまく表現できているかなという感じがしております。



まとめとしまして、地中レーダーを使いますと、砂地盤に限ってですが、浸透挙動が追えるのではないかとことです。地中レーダーは表層からやるものですから、繰り返し同一測線上を計測できて非破壊でやれる。今後はフィールドスケールでの浸透特性値の評価の可能性があるのではないかと考えています。

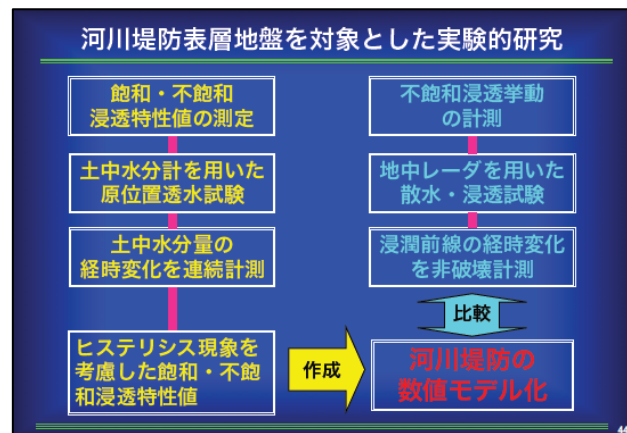
今、国交省のほうからこのようなテーマで今年最終年の研究をさせていただいています。我々がねらっているところは、表層部分のところをシンプルな方法で多点に、ある広領域でフィールドスケールで追いかけていったら、堤防のモデル化に貢献できるのではないかなということです。

まとめ【その2】



- 1) 地表型地中レーダ（GPR）により砂質土地盤内の不飽和浸透挙動の定量的評価が可能である
- 2) GPR計測は迅速かつ簡便であり、同一測線上を繰り返し・非破壊計測が可能である
- 3) GPRによる不飽和浸透挙動の計測方法はフィールドスケールでの浸透特性評価の可能性を有している

これは最後のスライドです。あえて河川堤防の表層地盤を対象とした実験的研究ということで、左側のラインは定水位の透水試験、右側のラインがレーダーを使った原位置の散水実験です。左側のほうは土中水分計を使った原位置の透水試験から、ヒステリシス現象を考慮した物性値を求める。右側のほうはもうちょっと大きな範囲で散水して、浸潤前線の挙動をはかれば、数値モデルができるのではないかと考えております。



以上で発表を終わらせていただきます。どうもありがとうございました。