

平成 21 年度プロジェクト実習 ＜アジア地域における地盤・地下水環境問題＞

報告書



平成 22 年 2 月

岡山大学大学院環境学研究科

目次

頁

1. はじめに	1
2. 学内レベル	3
2.1 地盤・地下水環境特性の計測方法に関する研究事例の紹介	3
2.2 地盤・地下水環境特性の室内試験方法に関する実習	4
3. 地域レベル	6
3.1 デジタル画像を用いた橋梁の調査技術 = 光学的全視野計測技術の現状と展望 = ..	6
3.2 デジタルカメラによる三次元写真計測システムについて	7
3.3 河川堤防調査における地盤調査方法および原位置不飽和透水試験	8
3.4 産業副産物の地盤工学的有効利用における地盤環境影響調査	9
4. 国際レベル	11
4.1 誘電率計測による地盤・地下水環境特性の計測方法の現状と問題点	11
4.2 アジア地域における不飽和土に関する地盤環境問題	12
4.3 アジア地域における地盤・地下水環境保全のための環境技術セミナー 〜次世代の地盤・地下水環境教育と研究のアプローチを考える〜	16
4.4 中国上海における地盤・地下水環境の実習	18
4.4.1 上海市内の地盤掘削工事現場の視察	18
4.4.2 上海市郊外の地盤・地下水環境状態の視察	20
4.4.3 中国上海粘性土の水分特性曲線の計測実習	22
5. プロジェクト実習を受講して	27
謝辞	28

1. はじめに

文部科学省大学院教育改革支援プログラム『アジア環境再生の人材養成プログラム—循環型社会形成学と持続発展教育(ESD)の融合—』の一環として、本プロジェクト実習では、アジア地域における地盤・地下水環境問題をテーマに学内レベル2件、地域レベル4件、国際レベル4件の計10件の実習を実施した。その概要は下記のとおりである。実習に際して多大なご尽力をいただいた関係者各位に深甚なる謝意を表します。

1. コース履修者（2名）

34421118 山下太久（社会基盤環境学専攻）、34421316 藤田知大（資源循環学専攻）

2. 実施状況

2.1 学内レベル

【アジア地域における地盤・地下水環境問題の理解に必要な知識の修得】

- (1) 7月21日（火）2時限；総合研究棟6F双方向通信教育システム室
内容：地盤・地下水環境特性の計測方法に関する研究事例の紹介
講師：榊 利博助教授（コロラド鉱山大学）
- (2) 10月～2010年2月（火）4～5時限（8回実施）；工学部13号館・環境棟108号室
内容：地盤・地下水環境特性の室内試験方法に関する実習
講師：竹下・小松

2.2 地域レベル

【地盤調査方法および室内土質試験方法の現状と問題点（実務レベル）の理解】

- (1) 5月11日（月）18時～20時；総合研究棟6F双方向通信教育システム室
内容：デジタル画像を用いた橋梁の調査技術＝光学的全視野計測技術の現状と展望＝
- (2) 6月8日（月）18時～20時；総合研究棟6F双方向通信教育システム室
内容：デジタルカメラによる三次元写真計測システムについて
- (3) 5月22日（金）10時20分～13時40分；岡山県倉敷市高梁川
内容：河川堤防調査における地盤調査方法および原位置不飽和透水試験
- (4) 5月29日（金）、30日（土）；山口県宇部市
内容：産業副産物の地盤工学的有効利用における地盤環境影響調査(1)
高炉水砕スラグで施工した盛土地盤での地中レーダ探査実習
- (5) 7月31日（土）、8月1日（日）；山口県宇部市
内容：産業副産物の地盤工学的有効利用における地盤環境影響調査(2)
高炉水砕スラグで施工した盛土地盤での原位置透水試験

2.3 国際レベル

【アジア地域における地盤・地下水環境問題に関する国際セミナー（シリーズ企画）】

- (1) 7月21日（火）14時～17時；総合研究棟208室
内容：誘電率計測による地盤・地下水環境特性の計測方法の現状と問題点
榊 利博助教授（コロラド鉱山大学），竹下，小松，諸泉，岩田
- (2) 9月11日（金）10時～18時；檀国大学（韓国，龍仁市）
内容：アジア地域における不飽和土に関する地盤環境問題
Seong-Wan Park 准教授（檀国大学土木工学科），竹下，山下，藤田
- (3) 2010年1月13日（水）～14日（木）：岡山大学大学院自然科学研究科棟小会議室
内容：アジア地域における地盤・地下水環境保全のための環境技術セミナー
～次世代の地盤・地下水環境教育と研究のアプローチを考える～
- 1) 加藤正司（神戸大学） 不飽和土の力学特性と地盤環境
 - 2) 孫 徳安（上海大学） Coupled modelling of hydraulic and mechanical behaviour of unsaturated soils by elastoplastcity
 - 3) 林 正貴（カルガリー大学） Importance of surface-ground water interaction in geo-environmental practice and education
 - 4) 榊 利博（コロラド鉱山工科大学） 地盤・地下水環境特性計測のためのセンサー
 - 5) 諸泉利嗣（岡山大学） 東北タイ天水農業地帯の地水環境調査
 - 6) 黒田清一郎（農村工学研究所） 地中レーダによる地盤環境の非破壊調査方法
 - 7) 神谷浩二（岐阜大学） 地下水活用型冷房機器による有益性と環境影響の評価事例
 - 8) 河合隆行（鳥取大学） 地下流水音を利用した浅層地下水の探査方法
 - 9) 森井俊広（新潟大学） 土の毛管障壁機能を利用した雨水資源の活用技術
 - 10) 総合討論「環境教育，研究，人材養成に関する意見交換」
- (4) 2010年1月22日～1月27日：中国上海市
内容：中国上海粘性土の地盤工学特性の計測評価
上海市内の地盤掘削工事現場，上海市郊外の地盤・地下水環境状態の視察，および上海大学の土質試験室にて中国上海粘性土の不飽和地盤特性である水分特性曲線の計測実習を行った。
参加者：孫徳安 教授（上海大学土木工学科），竹下，小松，山下，藤田

岡山大学大学院環境学研究科教授 竹下祐二
岡山大学大学院環境学研究科准教授 小松 満

2. 学内レベル

2.1 地盤・地下水環境特性の計測方法に関する研究事例の紹介

34421316 藤田 知大

(1) はじめに

米国コロラド鉱山大学の榊利博助教授が誘電率計測に関する講義と大学での修士、博士の学生の研究活動や日本からの留学について説明が行われた。また岡山大学の研究に関わる教員と誘電率計測による地盤・地下水環境特性の計測方法の現状と問題点についてディスカッションが行われた。



写真4.1-1 コロラド大学キャンパス

(2) 日時及び場所

日時：7月21日(火)14時～17時

場所：総合研究棟208号室



写真4.1-2 実験室

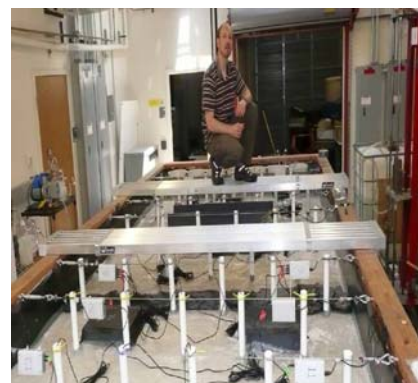


写真4.1-3 原位置センサー装置

(3) 概要

コロラド鉱山大学の地盤・地下水環境研究室では地盤に関する様々な研究がなされている。個性ある学生たちが様々な研究を行っているとのことである。土中の水分特性を知るために誘電率を用い

る装置も研究で利用されていた。普段はなかなか触れることのできないアメリカでの最新の研究やアメリカ独特の研究のバックグラウンド、さらには日本とアメリカの大学の違いなどの話を聞くことができた。

(4) 講義を受講して

誘電率から供試体の特性を計測する装置は私も研究で利用したことがある。しかし室内試験を行う場合のみで大きなフィールドで原位置計測や長期間のモニタリングで使用できるかは抱える問題が多く難しいように感じていた。しかし、自立した原位置センサーの研究について聞いたときとても興味が湧いた。通常は休止状態で、地盤内に何か変化があると計測を開始する。また周辺のセンサー同士がコミュニケーションし、変化を察知したセンサーの周辺のセンサーも起動する。この装置を用いれば、地盤の含水状態を長期的にモニタリングし、土砂崩れなどの地盤災害を発生前に予測することができると思った。その他にもたくさんの国々からマスターやドクターの研究者が自分の研究を進めていた。一番印象深かったのは、アメリカの最前線の研究を紹介しながらも日本の研究環境はすばらしいが、研究を進めていく中でその成果を世界に発信できなければならない。その時に英語力が大切になるということだった。世界に発信することでいろいろな人たち、中にはその分野での第一人者と会話できることは少なくない。そのような話を聞いて私は、研究をする上で多国の研究を調べることはもちろんのこと、それを世界に発信できる能力も身に着けなければならないと感じた。

2.2 地盤・地下水環境特性の室内試験方法に関する実習

34421118 山下 太久

(1) はじめに

本実習では学内で室内土質試験を行い、アジア地域における地盤・地下水環境問題の理解に必要な知識の修得することを目的とした。

(3) 実習内容

本実習では、一軸圧縮試験を行った。一軸圧縮試験はJIS A 1216で規定されており、直径3.5cmまたは5.0cm、高さを直径の1.8～2.5倍に成形した円柱供試体に毎分1%の圧縮ひずみが生じる割合を標準として連続的に圧縮を加える。圧縮中は、変位計で圧縮量 $\Delta H(\text{cm})$ と荷重計で圧縮力 $P(\text{N})$ を測定する。その結果から圧縮応力 $\sigma(\text{kN/m}^2)$ と圧縮ひずみ $\varepsilon(\%)$ を算定して応力-ひずみ曲線を描き、最大圧縮応力から一軸圧縮強さ $q_u(\text{kN/m}^2)$ を決定する。

(4) まとめ

一軸圧縮試験は土質試験の力学特性を知るものの中でも試験方法、データの整理方法ともに非常に簡便で分かりやすい。今回行った試験の不攪乱の供試体の圧縮応力が $200(\text{kN/m}^2)$ 程であることから、一軸圧縮試験の目安からは沖積粘土にあたることがわかった。破壊形態は縦割れであり、ひずみ3.5%ほどのところで圧縮が終了した。

今回の土質試験を行い、地盤の性質を決めるパラメータの一つを自ら求めることによって、地域レベル・国際レベルでの地盤地下水環境問題を理解する上での下地を作ることが出来た。

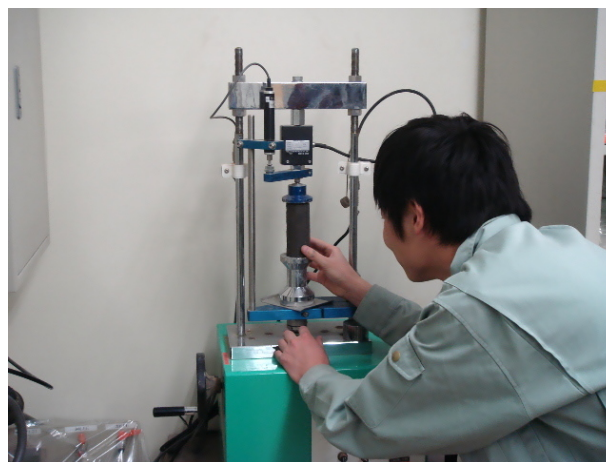


写真-2.2.1 実験の様子

(1) はじめに

実際に実務で行われる土質実験を行い，結果を整理する中で地下水環境問題や建設，施工の現状について考察した。

(2) 実施試験

- ① 土の締め固め試験・密度試験
- ② 地下水流動評価試験（構造物による流況阻害）

(3) 試験内容

① 土の締め固め試験・密度試験

土構造物造成で行われる締め固めの施工のためには，室内試験で土の締め固め特性を把握する必要がある。規格化された手順にて土の締め固めを行い，モールド内の乾燥密度と含水比の関係を求め，最大乾燥密度とその時の最適含水比を算出する。同時に使用した土試料の密度をピクノメーターを使い求め，ゼロ空気間隙曲線を描く。

② 地下水流動評価試験

仮想地盤を用いて地下水の流れを遮断するとどのようにポテンシャルや流線が変わるのか確認する。ポテンシャルはマンオメータで，流線はトレーサーで確認する。等ポテンシャル線を描き，流戦網から推定される排出流量と仮想地盤から実際に得られる排水流量を比較する。

(4) まとめ

実施した試験結果は社会資本などの重要な構造物を造る際に重要なデータであり，自分たちの足元の地盤の特徴を知ることが重要であると認識した。行う試験のバックグラウンドにはどのような施工があって，どのような問題を解決するためのものか，具体例の調査をした上で実習した。実習を通して地盤環境の問題，構造物の施工管理に必要なことなどが整理され，試験の内容をより深く理解することができた。また今まで土木技術者がどのように地盤と向き合い，どのように地盤環境と付き合ってきたのか知ることができた。



写真 2.2-1 土の締め固めの様子



写真 2.2-2 地下水流動阻害試験の様子

3. 地域レベル

3.1 デジタル画像を用いた橋梁の調査技術＝工学的全視野計測技術の現状と展望＝

34421316 藤田 知大

(1) はじめに

岡山大学で行われた地盤工学会中国支部岡山地域セミナーに参加した。コンサルタントなどの関係業種の技術者や大学の研究者，学生などが多く参加していた。

(2) 日時場所及び講師

日時：5月11日（月）18時～20時

場所：総合研究棟 6F 双方向通信教育システム室

講師：岡本卓慈（(株)計測リサーチコンサルタント 社長）

(3) セミナーに参加して

対象物のモニタリングをするためには，センサーを用いてそれによって得られるデータの蓄積や，サンプリングした供試体から物性を調べるという方法があることは知っていた。しかし対象の構造物を現地で，かつ非破壊でその状態を調査できる光学的全視野計測については知ることはなかった。講演を通して現代の人工構造物の抱える問題や，その将来の動向から構造物の安全性の評価技術や保存技術が必要なこと，を多くの経験と広い知見からの説明はとても勉強になった。特に全視野計測の高い技術，（例えばサーモグラフィー，電磁場レイダー，3Dレーザースキャナー，レーザードップラ速度計を用いた計測法）を様々な事例とともに知ることができたことは，私にとって最新の社会の状況情勢に対して無知であることを実感ができ，勉強になったと思う。

今回のセミナーを通じて，完成し使用されている構造物の状態を把握し続けることの重要性と，その技術の最前線を知ることができた。全視野計測技術によって構造物の安全診断が容易に行うことができることはすばらしいことだと思う。また構造物を作る前に，それが安全にかつ安定に存在するために，様々な影響を予測想定し，対策を行うための基礎的研究の重要性も再認識した。



写真 3.1-1 セミナー参加者の様子



写真 3.1-2 講師（岡本卓慈氏）

3.2 デジタルカメラによる三次元写真計測システムについて

34421118 山下 太久

(1) はじめに

本実習ではデジタルカメラによる三次元写真計測システムに関する講演を聴講して、地盤調査方法の問題点（実務レベル）を理解することを目的とした。

(2) 日時及び実習場所

日時：2009年6月8日（月）18時～20時

場所：総合研究棟 6F双方向通信教育システム室

(3) Kuraves-G²について

Kuraves-G²は、三次元写真計測システムの一つである。Kuraves-G²は市販デジタルカメラを用いることが可能であり、撮影画像の歪み補正をユーザで行うことができる。写真計測は、土木計測や遺跡調査、地図の作成等に活用されている。

(4) まとめ

今回の講演を聴講し、写真計測は視覚的に訴えることに非常に優れたツールであるということを感じた。デジタルカメラとパソコンの操作のみで現場の三次元化が可能なので、プレゼン等での資料作成の際に、聴き手側により伝わりやすい説得力のある資料を作成することができる。土木計測としても単純な地形調査だけではなく、土量算出にも応用可能なので、簡便な計測方法として用いられやすいように思う。更に時間経過による形状変化等を、このシステムを用いて計測することにより定性的な評価を行うことができる。

Kuraves-G²の用途は、ユーザによって様々なものが考えられる。自分の研究分野では、機器の機能をいかにツールとしてうまく使いこなすかということが課題となってくるので、今回のような機器の講演を聴講し、自分の研究に生かしていきたい。

3.3 河川堤防調査における地盤調査方法および原位置不飽和透水試験

34421118 山下 太久

(1) はじめに

本実習では応用地質株式会社の行っている河川堤防調査における地盤調査方法および原位置不飽和透水試験を見学し、地盤調査方法の問題点（実務レベル）を理解することを目的とした。

(2) 日時及び実習場所

日時：2009年5月22日（金）10時20分～13時40分

場所：岡山県倉敷市高梁川

(3) 高梁川堤防詳細点検業務の概要

高梁川の堤防でボーリングを行い、サンプリングと不飽和透水試験を行う。不飽和透水試験の方法を以下に記す。先端にストレーナ区間を持つ透水試験の管を所定の深度まで打ち込む。注入試験装置を用いて、透水試験管に水を注入し、一定水位が保持できる一定注入量を求める。透水試験管の水位は水位計によってリアルタイムに測定し、コントローラーを介して水位を一定に保てるように電磁流量計を制御する。試験はほぼ注入量が一定になったと判断できる流量を定常流量とする。

(4) まとめ

今回の高梁川堤防詳細点検業務の見学の見学によって、大学院の講義で聴講した内容が業務レベルではどのように行われているのかを理解することに役立てることができるように思う。また、業務では現場で求めなければならないパラメータは決まっており、期限や予算にも制限がある。当然、大学院で行っている研究にも期限や予算は限られており、その中で如何にして良い結果を出すかということは共通している。しかし、やはり業務では期限や結果を重視する為に研究より厳しいことも多く、妥協しなければならないこともあるだろう。現場で挑戦したくてもリスクが高くて行えない、もしくは時間的に余裕がなくて行えないことを補完する為に大学院での研究はあると思うので、今回の見学を自分の研究に役立てていきたいと感じた。



写真-2.2(3).1 透水試験の試験孔



写真-2.2(3).2 透水試験に用いるストレーナー

3.4 産業副産物の地盤工学的有効利用における地盤環境影響調査

34421118 山下 太久

(1) はじめに

本実習では高炉水砕スラグを盛土材料とした試験盛土（幅17m、長さ23m、高さ2m）で地表型地中レーダ（Ground Penetrating Radar:GPR）を用いて盛土内の状態を非破壊で計測し、地盤調査方法の問題点（実務レベル）を理解することを目的とした。写真-2.2(4)(5).1に現場風景写真を示す。

(2) 日時及び実習場所

日時：2009年5月29日（金）、30日（土） 7月31日（土）、8月1日（日）

場所：山口県宇部市



写真-2.2(4)(5).1 現場風景写真

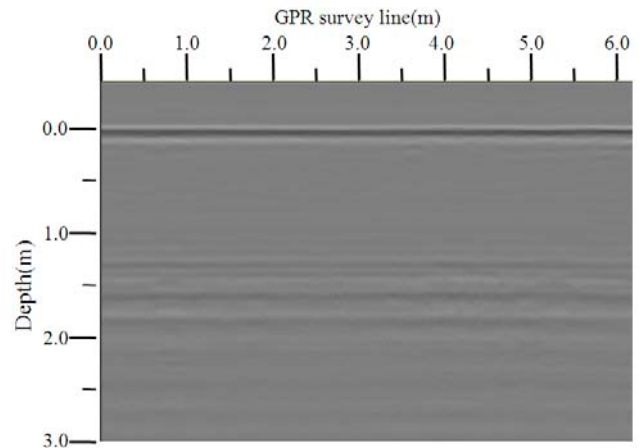


図-2.2(4)(5).1 盛土内の断面画像

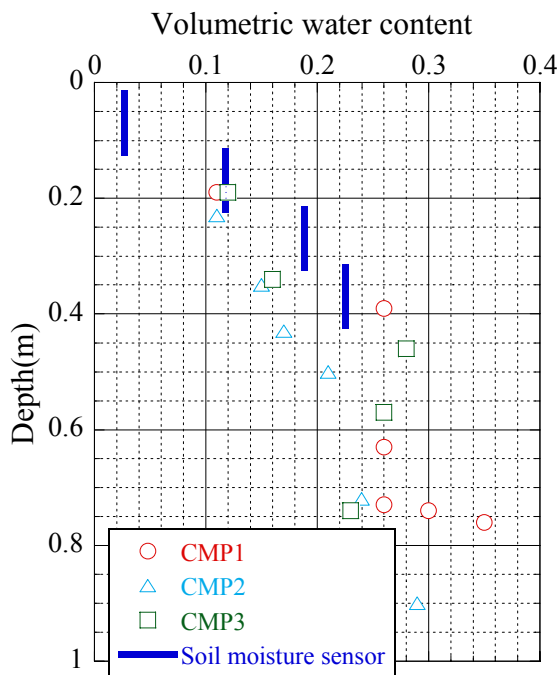


図-2.2(4)(5).2 盛土内の体積含水率

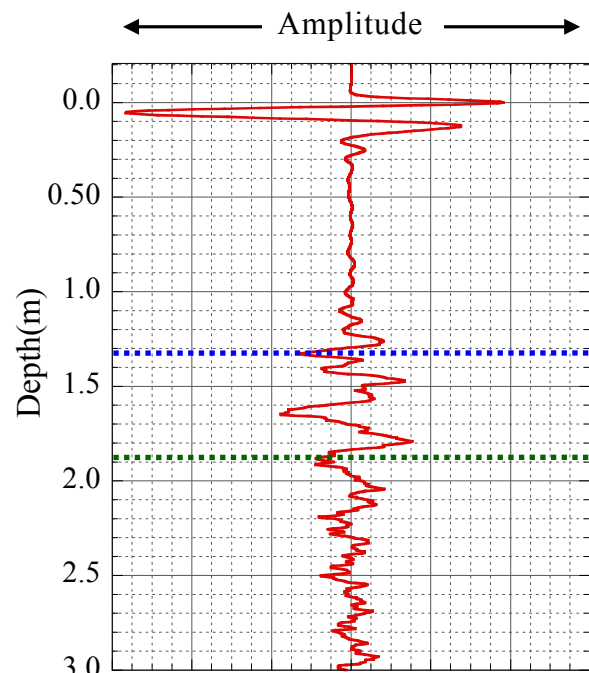


図-2.2(4)(5).3 電磁波反射波形

(3) 計測結果

1) プロファイル計測による地盤盛土内の可視化

アンテナ周波数400MHzのGPRを用いて行ったプロファイル計測によって得られた盛土内の断面画像を図-2.2(4)(5).1に示す。プロファイル計測から得られる断面画像の縦軸の往復走時(ns)から深度への変換に必要な電磁波伝播速度には、今回行ったCMP計測から得られた電磁波伝播速度0.075m/nsを用いた。断面画像からは埋設物や空洞等の目立った反応は見られず、スラグ盛土は水平方向に均質な地盤構成をしていることが確認された。

2) CMP計測による地盤内の体積含水率の測定

アンテナ周波数 400MHz の GPR を用いて CMP 測定を行い、地盤内の体積含水率の測定を行った。図-2.2(4)(5).2に深度と体積含水率の関係を示す。3度行ったCMP計測の値と土中水分計から得た体積含水率の値をプロットした。使用した土中水分計の探査可能深度は42cmであり、土中水分量の計測範囲は地表面から2cm～12cm, 12cm～22cm, 22cm～32cm, 32cm～42cmの4区間である。CMP計測から得られた体積含水率は20cm付近では土中水分計と非常に近い値を取っており、それ以深でも深度の増加とともに体積含水率は増加しており、地盤内の体積含水率変化の特徴を捉えられていると考えられる。

3) GPRの電磁波反射の波形化

スラグ盛土内の地盤構造をより定量的に評価する為に、GPRの電磁波反射の波形化を行った。GPRの発射した電磁波は誘電率の異なる境界で反射する。この特性を利用し、地盤内の物性値の異なる層の特定を行うことが出来る。今回の試験地盤から得られた電磁波反射波形を図-2.2(4)(5).3に示す。GPRが電磁波から発射されてすぐに現れる大きな振幅は電磁波が地表面から地盤に入射するときにかかる地表波であると考えられる。地表波の位置から深度1.3mまでは特に反応がなく、均質な層であることが分かる。1.3m付近(図-2.2(4)(5).3中に青点線で図示)からは、それ以浅までの反射波形とは異なっており、地盤の物性値が違う層が存在していることが予想される。更に反射波形は1.8m付近(図-2.2(4)(5).3中に緑点線で図示)でも変化しており、盛土内は物性値のことなる3層の地盤で構成されていると考えられる。盛土の高さが2mであるということから、1.8m付近で現れる反射波形の変化がスラグ地盤と自然地盤の境界をGPRが捉えたものだと考えられ、1.3m付近の反射波形の変化は同じスラグでも水分量等の違いによって物性値が異なって現れた境界であると考えられる。

4. 国際レベル

4.1 誘電率計測による地盤・地下水環境特性の計測方法の現状と問題点

(1) はじめに

榊 利博 助教授（米国・Colorado School of Mines）を特別講師に招き，誘電率計測による地盤・地下水環境特性の計測方法の現状と問題点について，話題提供と討議を行った。

(2) 日時および場所

日時：平成21 年7 月21 日(火) 14：00～17：00

場所：総合研究棟208 号室

講師：榊 利博 助教授（米国・Colorado School of Mines）

討議参加者：竹下祐二教授，諸泉利嗣 准教授，小松 満 准教授(岡山大学大学院環境学研究科)

(3) 話題提供および討議内容

土中水分量や汚染土壌の計測等，地盤・地下水環境特性の定量的評価方法として誘電率計測技術は有用であるが，誘電率計測センサーの校正曲線の作成方法や地盤内への設置方法などの問題点について意見交換を行った。

4.2 アジア地域における不飽和土に関する地盤環境問題

34421118 山下 太久

(1) はじめに

本実習では韓国の檀国大学で行われた「アジア地域における不飽和土に関する地盤環境問題 (The 1st Korea-Japan Joint Workshop on Unsaturated Soils)」に関するワークショップに参加し、アジア地域における地盤・地下水環境問題を理解することを目的とした。

(2) 日時及び実習場所

日時：2009年9月11日（金）10時～18時

場所：檀国大学(韓国，龍仁市)

(3) 発表プログラム

Time	Title	Speaker (Affiliation)
10:30 ~ 10:45	Opening Ceremony	
10:45 ~ 12:20	Technical Session 1	
10:45~11:00	Consolidation analysis of a real fill dam during construction and impounding	Yuji Kohgo (Tokyo Univ. of Agriculture and Technology)
11:00~11:15	Effect of void formation on strength of gas hydrate bearing sediments	Sung-sik Park (Wonkwang Univ.)
11:15~11:30	Non-destructive measurements of unsaturated seepage flow by using Ground-Penetrating Radar	Yuji Takeshita (Okayama Univ.)
11:30~11:45	Characteristics of small strain stiffness according to capillary force	Q. Hung Truong (Korea Univ.)
11:45~12:00	Relationship between cohesion and tensile strength in wet sand at low normal stress	Tae-Hyung Kim (Korea Maritime Univ.)
12:00~12:20	Discussion (Q&A)	Korean/Japanese
12:20 ~ 14:00	Lunch	
14:00 ~ 15:30	Technical Session 2	
14:00~14:15	Determination of divergence length of capillary barrier based on field measurement of rainfall infiltration in slope soil	Toshihiro Morii (Niigata Univ.)
14:15~14:30	Unsaturated characteristics of the modulus for compacted soils by the post-compaction method	Sei-Hyun Lee (KAIST)
14:30~14:45	Direct shear test under constant volume state for unsaturated soil	Shoji KATO (Kobe Univ.)
14:45~15:00	Critical state behaviors of unsaturated soil in the direct shear test under constant pressure	Byeong-Su KIM (Kobe Univ.)
15:00~15:15	Analytical study to predict soil-water response against rainfall using spatially distributed tank model	Asako Togari-Ohta (East Japan Railway Company)
15:15~15:30	Discussion (Q&A)	Korean/Japanese
15:30 ~ 16:00	Coffee Break	
16:00 ~ 17:30	Technical Session 3	
16:00~16:15	Effect of clay contents on the stability of unsaturated soil slopes	Sangseom Jeong (Yonsei Univ.)
16:15~16:30	Study on hydraulic properties of aggregated Masa soil	Toshio SUGII (Chubu Univ.)
16:30~16:45	Suggestion of safety standards in railway slopes	Hyun-ki Kim (Korea Railroad Research Institute)
16:45~17:00	Soil-water-air coupled analysis of seepage and seismic behavior of unsaturated fill slope	Ryosuke Uzuoka (Tohoku Univ.)
17:00~17:15	Effects of hydraulic conductivity of soil and rainfall characteristic on slope instability	Yun Ki Kim (KAIST)
17:15~17:30	Discussion (Q&A)	Korean/Japanese
17:30 ~ 18:00	Closing Ceremony	
18:00 ~ 20:00	Banquet	

(4) 発表内容要旨抜粋

1) タイトル : Determination of Divergence Length of Capillary Barrier Based on Field Measurement of Rainfall Infiltration in Slope Soil

発表者 : Toshihiro Morii

要旨 : キャピラリー・バリアは、砂層とその下部に礫層を重ねて傾斜させた単純な構造の土層地盤をいう。境界面の上部では、土粒子の保水性の違いにより、浸潤してきた雨水が集積し、境界面に沿って傾斜方向に流下していく。両層の境界面はあたかも不透水性の障壁として機能し、地盤深部への降雨浸潤が抑えられるため、斜面のすべり安全率の向上を図ることができる。斜面に造成した地盤での観測に基づき、キャピラリー・バリアのもつ降雨浸潤に対する遮断機能を調べた。合わせて、この機能を最も効果的に発揮させるために必要となる限界長 (Divergence length) の推定法を検討した。

2) タイトル : Effects of Hydraulic Conductivity of Soil and Rainfall Characteristic on Slope Instability

発表者 : Yun Ki Kim and Seung Rae Lee

要旨 : 本論文では透水係数と降雨強度の雨が斜面の安全率の変化に及ぼす影響を調べている。また、同じ透水係数を持つ地盤の降雨強度が斜面の安全率に及ぼす影響を評価している。一連の結果を基に、降雨強度と透水係数の相関関係によって斜面の安全率の減少が予測できる降雨強度－透水係数－安全率減少の関係式を提案した。これらの結果から、斜面の透水係数と確率論的な降雨強度特性を利用して斜面の安全率が減少する傾向を予測できる。

(5) まとめ

日韓の地盤の研究者が自国での不飽和土に関する研究内容の紹介を行い、アジア地域における環境問題解決のための技術交流を行う企画であった。今回のワークショップが自分にとって、初めての国際的な研究交流の場への出席だった。研究発表は行わなかったが、普段の大学院の講義や研究では経験出来ないことを学ぶことが出来、多くの刺激を受けた。

最も強く感じたことは、国際交流の場での英語の重要性である。発表は英語で行われ、配布されたレジュメも英語である。発表内容を正確に理解する為には専門的な知識も重要だが、ある程度の英語力も必要となってくる。出席者とのコミュニケーションを図る為の日常会話に加え、科学論文や発表によく使われる単語や言い回しに慣れる必要もあると感じた。

発表のスタイルにも、発表者によって様々であり興味深かった。自分も今後、研究内容や自分の意見を発表する機会は多くあると思うので、参考に出来る部分は自分の発表にも取り入れていきたいと思った。個人的には多くを説明する発表よりも、短いキーワードや図・グラフを用いて端的に説明する発表の方が聴講している側にも理解しやすく、記憶にも残るのではないかと感じた。もちろん発表内容や発表時間、どのような場で発表をするかというようなことにもよって、発表のスタイルは変えてゆかなければならない。その為、今回のワークショップ含め様々な講演や発表の場に参加する経験を、自分の発表やプレゼンの技術を磨く上で役立てていきたい。

4.2 アジア地域における不飽和土に関する地盤環境問題

34421316 藤田 知大

(1) 実習日時・場所

2009年9月10～12日，ソウル，檀国大学(韓国，龍仁市)

(2) ソウル市内視察(9月10日)

ソウル市内を歩き，都市の構造や公園などを観察した。都市の中心ではあるが，まだまだ開発が進んでおり，建設現場もあった。韓国地盤は日本と同じで岩が風化したまき土であるので，現場で見た土も日本でよく見る土のように見えた。夜は都市計画の教科書にも出ていた高速道路を壊し，埋もれていた河川を再生させた清溪川を見学した。都市のアメニティとして大きな役割を果たしているように見えた。しかし川といっても他の川から水を汲みとって流していることを聞き，見かけに惑わされず，抱えている問題について考える必要があると感じた。



写真 4.2-1 ソウル市内の道路



写真 4.2-2 清溪川

(3) ワークショップ参加

実習テーマ： アジア地域における不飽和土に関する地盤環境問題 (The 1st Korea-Japan Joint Workshop on Unsaturated Soils)

発表内容要旨抜粋

(1) : Determination of Divergence Length of Capillary Barrier Based on Field Measurement of Rainfall Infiltration in Slope Soil(Toshihiro Morii, Niigata University,Japan)

キャピラリー・バリアは，砂層とその下部に礫層を重ねて傾斜させた単純な構造の土層地盤をいう。境界面の上部では，土粒子の保水性の違いにより，浸潤してきた雨水が集積し，境界面に沿って傾斜方向に流下していく。両層の境界面はあたかも不透水性の障壁として機能し，地盤深部への降雨浸潤が抑えられるため，斜面のすべり安全率の向上を図ることができる。斜面に造成した地盤での観測に基づき，キャピラリー・バリアのもつ降雨浸潤に対する遮断機能を調べた。合わせて，この機能を最も効果的に発揮させるために必要となる限界長 (Divergence length) の推定法を検討した。

(2) : Effects of Hydraulic Conductivity of Soil and Rainfall Characteristic on Slope Instability(Yun Ki Kim and Seung Rae Lee,)

本論文では透水係数と降雨強度の雨が斜面の安全率の変化に及ぼす影響を調べている。また，同じ透水係数を持つ地盤の降雨強度が斜面の安全率に及ぼす影響を評価している。一連の結果を基に，降雨強度と透水係数の相関関係によって斜面の安全率の減少が予測できる降雨強度－透水係数－安全率減少の関係式を提案した。これらの結果から，斜面の透水係数と確率論的な降雨強度特性を利用して斜面の安全率が減少する傾向を予測できる



写真 4.2-3 開会式



写真 4.2-4 発表の様子



写真 4.2-5 檀国大学キャンパス



写真 4.2-6 閉会式



写真 4.2-7 集合写真



写真 4.2-8 発表会後の会食

(4) セミナーに参加して

海外での研究発表会は初めての私にとって今回のセミナーは貴重な体験の一つになった。自分がいつも触れている研究分野は地盤の不飽和部分であり、基礎的な研究といえる。実際に海外の都市の構造物を見、そしてその国の研究を聞いたことで、自分の研究分野のバックグラウンドを再認識することができた。

またコミュニケーション能力の重要性を再認識した。自分の研究を多くの人にアピールするためには英語のプレゼンができなければならないと感じた。自分の研究が基礎的な事象を対象にしているからこそ、日本だけでなく世界各国に情報を発信できなければならない。また研究を進めるためにもたくさんの方の情報を吸収する必要がある。今回のセミナーはそのチャンスでもあった。しかし自分に英語力がないこと実感することのほうが多いように思った。

最後に国同士がお互い同じ研究分野でなら対等な議論ができると感じた。韓国も中国も表向きは日本と仲良くしているように思えるが各国が互いに抱える遺恨は根強い。しかしそのような問題をすべて置いておいて地盤環境の研究で互いに刺激しあい研究を進めることができると私は感じた。

4.3 アジア地域における地盤・地下水環境保全のための環境技術セミナー ～次世代の地盤・地下水環境教育と研究のアプローチを考える～

34421118 山下 太久

(1) はじめに

本実習では、アジア地域における地盤・地下水環境保全のための環境技術をテーマに国内外の研究者による意見交換を行い、人材養成のための環境教育に関する討議を行う。発表・討議内容を編集して、「アジア地域における地盤・地下水環境問題の教材」を作成する。

(2) 日時及び実習場所

日時：2010年1月13日（水）～14日（木）

場所：岡山大学大学院自然科学研究科棟2F

(3) 発表プログラム

～次世代の地盤・地下水環境教育と研究のアプローチを考える～

- 1) 加藤正司（神戸大学） 不飽和土の力学特性と地盤環境
- 2) 孫 徳安（上海大学） Coupled modelling of hydraulic and mechanical behaviour of unsaturated soils by elastoplasticity
- 3) 林 正貴（カルガリー大学） Importance of surface-ground water interaction in geo-environmental practice and education
- 4) 榊 利博（コロラド鉱山工科大学） 地盤・地下水環境特性計測のためのセンサー
- 5) 諸泉利嗣（岡山大学） 東北タイ天水農業地帯の地水環境調査
- 6) 黒田清一郎（農村工学研究所） 地中レーダによる地盤環境の非破壊調査方法
- 7) 神谷浩二（岐阜大学） 地下水活用型冷房機器による有益性と環境影響の評価事例
- 8) 河合隆行（鳥取大学） 地下流水音を利用した浅層地下水の探査方法
- 9) 森井俊広（新潟大学） 土の毛管障壁機能を利用した雨水資源の活用技術
- 10) 総合討論「環境教育，研究，人材養成に関する意見交換」

(4) まとめ

本セミナーでは、地盤や地下水に関する研究を日本国内外で行っている研究者の方々の研究発表を聴講した。発表された研究内容は様々であり、自分の研究内容と異なる研究も多くあった。特に加藤正司氏や孫徳安氏の不飽和土の力学分野に関する研究は理解することが難しかったが、普段あまり触れることのない内容であった為、良い経験になった。他に海外の大学で研究をされている林正貴氏や榊利博氏の研究発表は、研究内容に加えて海外の研究環境のことも知ることが出来た。自分とは違う研究環境を知ることが、研究内容が違ってもいい研究に関するモチベーションを高めることに繋がった。黒田清一郎氏の研究内容は自分と同じ研究テーマである為にも内容も参考になったが、プレゼンテーションの方法についても学ぶべきことが多くあった。

本セミナーで聴講した研究発表から得たものを今後の自分の研究に生かしていきたい。

4.3 アジア地域における地盤・地下水環境保全のための環境技術セミナー ～次世代の地盤・地下水環境教育と研究のアプローチを考える～

34421316 藤田 知大

(1) はじめに

本セミナーは、文部科学省大学院教育改革支援プログラム『アジア環境再生の人材育成プログラム－循環型社会の形成と持続発展教育（ESD）の融合－』の一環として行われた。

(2) 日時及び実施場所

日時：2010年1月13日（水）～14日（木）

場所：岡山大学大学院自然科学研究科棟2F

(3) セミナー概要

地盤、地下水環境に関する研究を行っている研究者が集まり、自分の研究を発表すると共に教育に関しても深くディスカッションが行われた。研究内容はアメリカ、カナダ、中国、モンゴル、日本と世界各国の地盤環境に関するものであった。学生も何人か参加したが全体的にアットホームな空気の中発表が行われたので学生からも質問があり、盛んなディスカッションが行われた。

(4) まとめ

世界各国で抱える地盤問題は異なり、求められる研究成果も異なってくる。日本では見られないような研究や、大学院の授業や研究室の研究活動では触れることのできない試験や実験などを知ることができた。しかし異なる研究であっても得られた成果をどのように教育に生かしていくのか、また大学院の教育とはどうあるべきかというテーマにたくさんの議論がなされた。カナダやアメリカの講義ではスターインストラクターの存在が大きいという話がでた。確かに私を含め他の学生も



写真4.3-1 セミナーの様子

講義の内容や進め方にはもっと改善すべきところがあるという考えだった。スターインストラクター（私の理解では講義が上手な先生）の講義は充実したものになるだろうと感じた。私は日本の大学院生は自分の研究活動もあるので、そのほかの学習に力を注がないのではと思う。しかし、私は自分の研究テーマにあまり関係ない現場見学や、セミナーなどに参加することで広い知見を獲得してきているように思う。大学院の講義も同じで充実した内容になれば、各大学院生に良い刺激を与えることができるのではと考える。また地域の企業と大学が一体となり短期間の研修などを行うことも議論された。地盤や地下水環境問題に触れることのできる企業で仕事を体験できれば、自分の研究のバックグラウンドや就職活動の参考にもなると私は思った。私なりの結論として、大学院の目指すような専門性と広い知見をもった人間は育てるために、もっと大学院生はキャンパスの外に出ているいろいろなものを見て、体験しなければいけないと考えた。

4.4.1 上海市内の掘削工事現場の視察

34421118 山下 太久

(1) はじめに

本実習では上海市内の地盤掘削工事現場の見学を行い、アジア地域における地盤・地下水環境問題について理解することを目的とした。

(2) 日時及び実習場所

日時：2010年1月23日

場所：中国上海市内

(3) まとめ

見学した建設現場の地盤は軟弱な粘土層で構成されていた。400mまでは堆積土で、7層目約40mのところ粘土層の色とは異なる薄茶色のシルトの層がある。建設工事の支持杭はこの層の支持力に頼っている。杭の種類は場所打ち杭を用いて、フリクションで持たせているとのことだった。また地下水位は地表面から1m程度と非常に高く、地下水位低下工法を用いて施工を行っている。以前は地盤沈下や地域住民とのトラブルが建設現場では多く起こっていたそうだが、技術力の向上とともに問題は減っているようだ。しかしこのような軟弱地盤で尚且つ地下水位の高い地域での施工は、地盤改良や施工技術の向上といった検討、改善していくべき点は多くあるのではないかと感じた。上海に滞在中は高層建築の規模や数の多さに驚かされたが、建設ラッシュは現在進行中のようで、多くの建設現場を目にした。このような建設ラッシュは現在の中国の目覚ましい近代化を象徴しているが、発展のみを追求しているようにも思う。上海万博に向けて建設ラッシュは続いていくだろう。この建設ラッシュがそこに住む住民たちにとって良い効果をもたらしていくためにも、地域住民の安全性や環境に配慮した施工が行えるように、更なる地盤や施工法の研究・改良が必要であると感じた。



写真-4.4.1.1 工事現場写真



写真-4.4.1.2 掘削した粘土

4.4.1 上海市内の地盤掘削工事現場

34421316 藤田 知大

(1) はじめに

上海初日、孫教授に上海の建設現場と市内を案内してもらった。実際に稼働している現場と工事現場関係者の解説を聞くことができた。

(2) 日時及び場所

日時：1月23日（土）午後

場所：上海市内



写真 4.4.1-1 掘削現場視察の様子

(3) 概要

写真 4.4-1 は上海市内の歴史博物館建設予定地である。上海独特の粘土層や建設物の基礎工事の概要を知ることができた。超高層マンションの建設が続く上海は基礎地盤としては軟弱な粘土層がかなりの深いところまである。孫教授の話では、400mまで堆積土で7層目約40mのところに粘土層の色とは異なる薄茶色のシルトの層がある。支持の決め手となる層が無く、粘土層全体で支持杭支える。支持杭は構造物によって40m～60mの深さまで打ち込む。決して技術力の高くない中国において以前は構造物へのトラブル（手抜き工事、地盤沈下）が多くあったが、経験を重ねて近年ではそのような問題が少なくなってきたとのことだった。

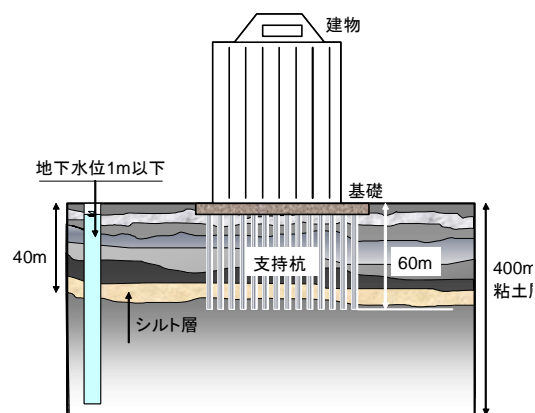


図 4.4.1-1 上海市内の構造物と地盤図

(4) 私の感じたこと

発展の進む中国で大きな構造物が次々と建設されているそのスピードやエネルギーに驚いた。それと同時にその急激な変化に不安を感じた。失敗の中で経験を積み現代に活かされているというものの、その経験はあくまでも近年の地震などのイレギュラーなトラブルを含んでいない。また、地下鉄なども同時にかかなりのスピードで増設されており、それによる地下水流況阻害問題なども考えると上海の地盤が抱える問題は計り知れないものがある。たくさんの人たちを支える中国では建設活動によって支えられている雇用や経済があるため発展速度を緩めることは難しい。しかしながら持続的な発展のためには上海市が抱える基礎地盤の問題を解決する必要があると思った。そのために上海粘土の特性を知り、最も適した地盤改良工法の確立が急務ではないかと上海の現場を見、孫教授の話を聞いて感じた。

4.4.2 上海市郊外の地盤・地下水環境状態の視察

34421118 山下 太久

(1) はじめに

本実習では上海市郊外にある江南水郷の町「周荘」で地盤・地下水環境状態の視察を行い、アジア地域における地盤・地下水環境問題について理解することを目的とした。

(2) 日時及び実習場所

日時：2010年1月24日

場所：中国江蘇省昆山市周荘

(3) まとめ

900年以上の歴史を誇る江南水郷の代表的な名勝である周荘の見学を行った。周荘は上海から約70キロのところに位置し、かつては江南の水運、商業の要衝として栄えた街である。

200年以上前の街並みが残されており、街中に水路が張り巡らされている。住民たちにとって水路は生活の一部として定着しているようで、住民たちが水路で衣類や食べ物を洗っている姿が見受けられた。昔の街並みを残している一方で、生活排水の処理や衛生管理は余り行き届いているようには思えなかった。

急成長を続けている中国では、周荘に限らず国内で観光客が増加していくだろう。周荘のような歴史的観光地では、歴史的な風景を残しつつ下水道や公衛生に考慮した街づくりが必要なのではないかと感じた。



写真-4.4.2.1 周荘内に多くある橋



写真-4.4.2.2 周荘内に流れる川

4.4.2 上海市郊外の地盤・地下水環境状態の視察

34421316 藤田 知大

(1) 日時及び場所

日時：1月24日（日）

場所：上海市周壮

(2) 周壮について

江南水郷を代表する運河と橋の町。北部には、江西や蘇州、上海方面を結ぶ水路があり、街は古くから物資の集散拠点として栄えてきた。元代末期には江南地方の大富豪であった藩祐・藩万親子が移り住み町はさらに発展した。町の中を運河が『井』の字形に交差して

いて、その脇には、明・清代に建てられた民家が建ち並んでいる。400年以上も前に架けられたとされるアーチ型の石橋は現在14カ所残っており、水郷の商都としての面影を色濃く残している。



図 4.4.2-1 周壮の位置

(3) 視察の様子



写真 4.4.2-1 水郷の様子



写真 4.4.2-2 明代のアーチ橋



写真 4.4.2-3 古代の井戸

(4) 周壮を視察して（地盤環境と水資源）

周壮は現場見学した上海の上流部にあたり、地下水や河川の供給源である。上海とは逆に周壮は古い建物や町並みを保存している。明代から景観や建造物が変わらないので抱える地盤問題は無いように思えた。急速に発展し地盤環境にたくさん問題や、高層建造物の倒壊事故などを抱えている上海と伝統的な構造物や文化を有している周壮を訪れ、人間生活を支えている地盤、その上にある道路、橋、建物のあり方について多く考えさせられた。上海では見学に訪れた時も次々に昔の住居が建ち退き超高層ビルが建設されている。これはやはり急激な変化である。何百年と存在した構造物はそれを支える地盤と一体化していると考えていいのではないかと考えた。それをいったん破壊して劇的に環境を変化させるということは支える地盤にも変化をもたらす必要がある。中国の破壊と発展や文化の保存については私的な意見はないが、今発展している上海も、周壮のように悠久の街として遠い将来も大きな事故もなく存在してほしいと思った。持続可能性を考えた時に上海は中長期的な地盤の改良が必要なのではないかと考えるようになった。

4.4.3 中国上海粘性土の水分特性曲線の計測実習

34421118 山下 太久

(1) はじめに

本実習では、上海大学の土質試験室にて中国上海粘性土の不飽和地盤特性である水分特性曲線の計測実習を行い、アジア地域における地盤・地下水環境問題について理解することを目的とした。

(2) 日時及び実習場所

日時：2010年1月25日～26日

場所：上海大学延長キャンパス

(3) まとめ

1) 概要

2010年1月25日、上海大学にて土木工学科孫徳安教授の御指導の下、加圧板法を用いて上海シルトの水分特性曲線を求める試験実習を行った。

2) 試験方法

本試験で使用した資料は上海シルトである。本試験では初期の含水比を変化させ、2度の試験を行った。

① 試験 1

初期含水比 21.9%の供試体を作成し、加圧板法を用いて 50kPa から 100kPa まで変化させて排水を行う。次に、100kPa から圧力を 2kPa まで下げて浸潤を行う。2kPa まで圧力を下げた後、再び圧力を上げて排水試験を行った。380kPa まで圧力を上げて、排水試験を終了した後に供試体を取り出し、炉乾燥試験によって含水比を測定した。図-2.3(4).1 に試験 1 に結果を示す。

② 試験 2

初期含水比 29.6%の供試体を作成し、4kPa から 480kPa まで変化させて排水試験を行った。排水試験終了後に試験①と同様に炉乾燥試験によって含水比を測定した。図-2.3(4).2 に試験 2 に結果を示す。

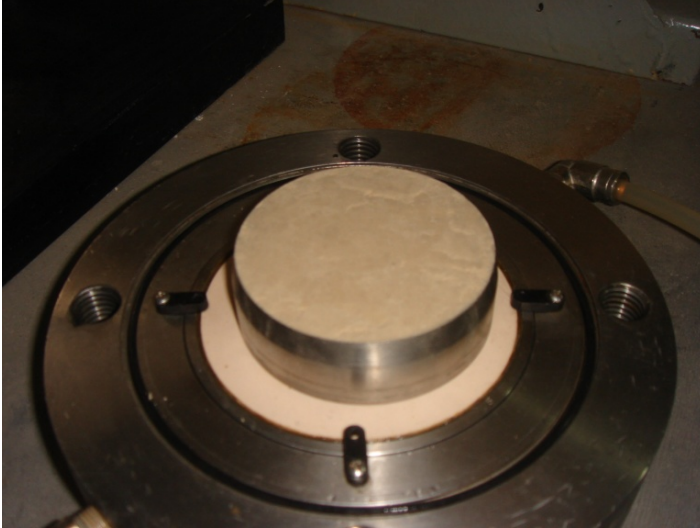


写真-4.4.3.1 試験1で使用した試料



写真-4.4.3.2 使用した試験機

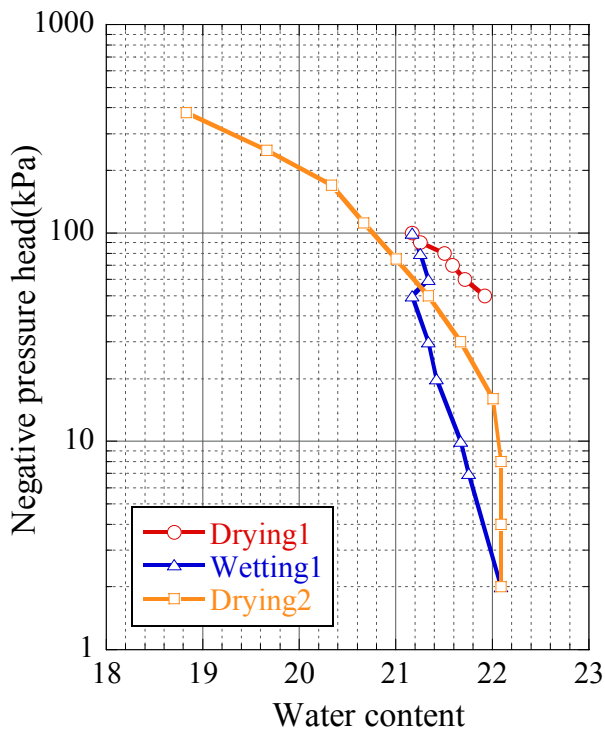


図-4.4.3.1 試験1で得られた水分特性曲線

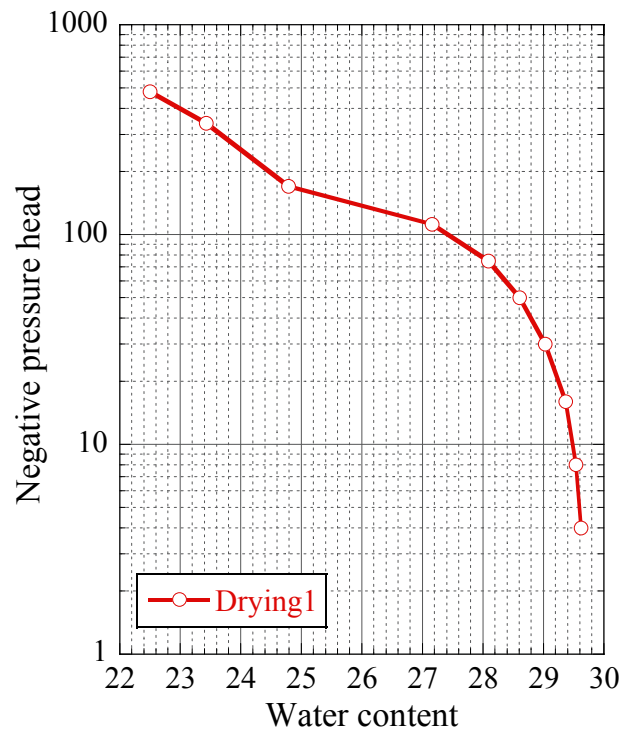


図-4.4.3.2 試験2で得られた水分特性曲線

4.4.3 中国上海粘土の水分特性曲線の計測実習

34421316 藤田 知大

(1) はじめに

上海大学の孫教授の実験室で加圧板法を用いて上海シルトの水分特性曲線を求める試験実習を行った。

(2) 日時及び場所

日時：2月25日（月）～26日（火）

場所：上海大学

(3) 試験内容

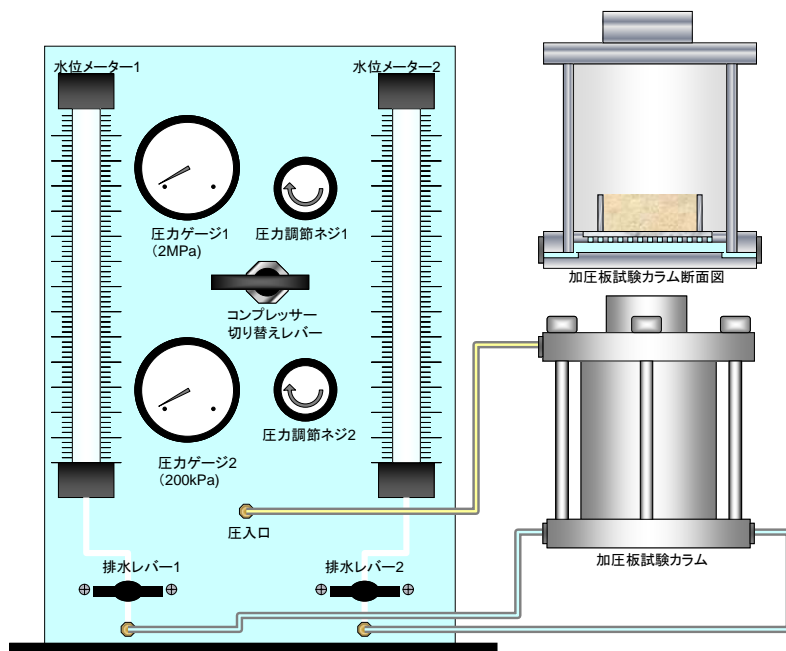


図 4.4.3-1 加圧板法試験装置外略図



写真 4.4.3-2 供試体作成

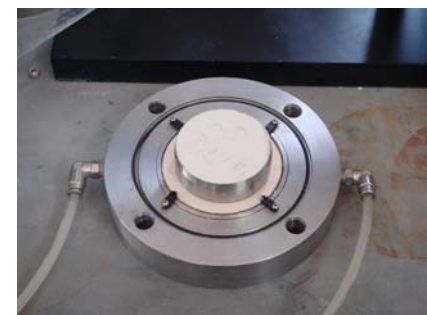


写真 4.4.3-3 セラミック台に設置



写真 4.4.3-4 処置の説明

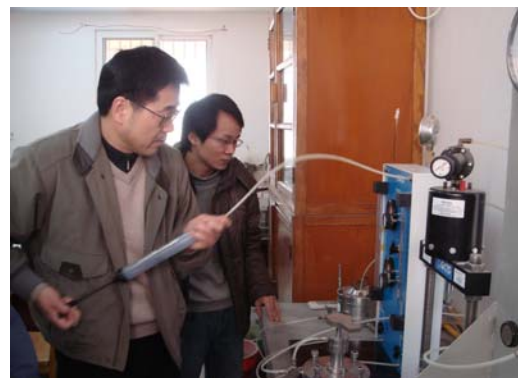


写真 4.3.3-5 装置の気泡を除去

試験①：初期含水比 21.9%の供試体を作成し，加圧板法を用いて 50kPa から排水をスタートさせ，100kPa まで変化させる。次に，100kPa から圧力を 2kPa まで下げて浸潤させる。次に，孫教授のアドバイスで圧力を 380kPa までの排水試験を行い，供試体を取り出し含水比を測定する。結果を図 4.4.3-2 に示す。

試験②：初期含水比を 29.6%の供試体を用い，4kPa から 480kPa まで変化させ，排水を行った。

結果を図 4.4.3-3 に示す。

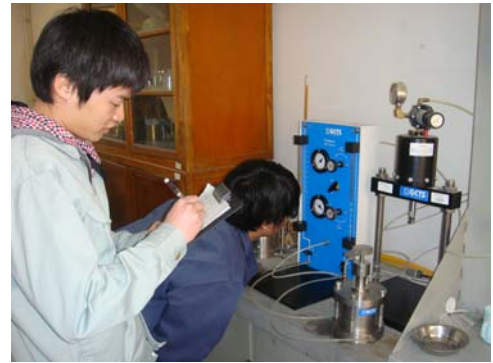


写真 4.3.3-6 排水量を目視で読み取る

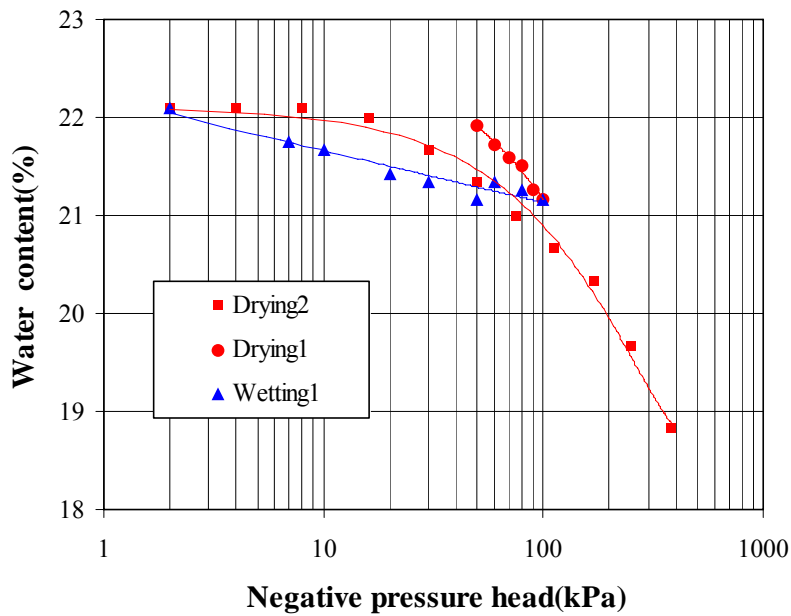


図 4.4.3-2 計測された SWCC (試料 1)

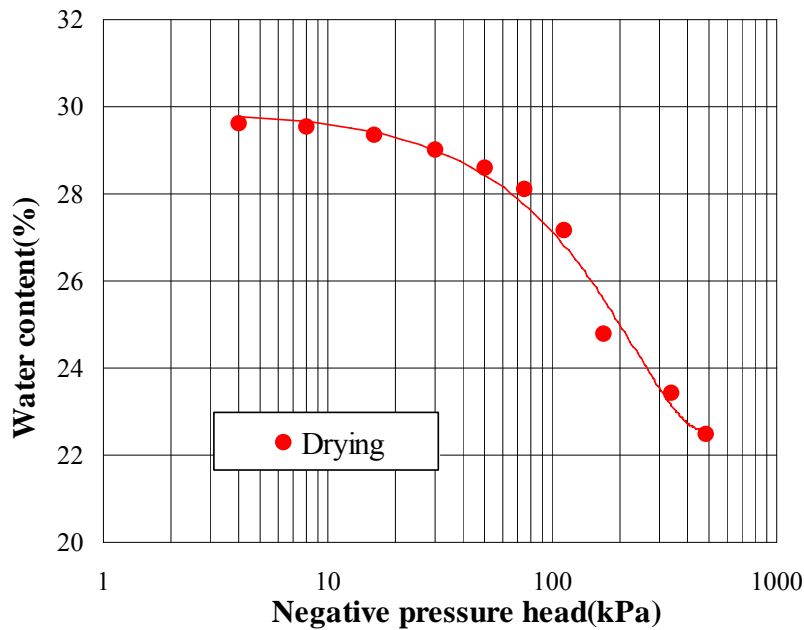


図 4.4.3-3 計測された SWCC (試料 2)

(4) 考察

図 4.4-4 から分かるように浸潤過程と排水過程では浸潤過程の方が間隙水の収支が少なくなる。試料の含水比を変えて 2 回試験を行ったが、得られた水分特性曲線は上海シルトの特徴をとらえていると思う。本来なら上海の地盤の特徴でもある上海粘土で試験を行いたかったが、粘土の場合試験にかなりの時間を必要とするとのことだったので残念であった。孫教授から上海粘土を分けてもらったのでこの試験の経験を生かし、日本でも試験を行ってみたい。



写真 4.3.3-7 試験結果についてのレクチャー

(5) 試験を体験して

試験装置はかなりシンプルな構造で、試験で何を求めているのか、土供試体にどのようなアクションをしているのかよくわかった。

本来はもっと時間をかけて行う試験なので、試験結果の精度には疑問があるが、上海の大学の実験室で、上海の土を用い、上海の大学生と教授と一緒に実験ができたことは良かった。なぜならば、もし他国のデータを論文などで読むときや、社会人になり海外で働く時など、日本の実験のイメージだけでは、試験結果から得られる情報にずれが生じることがあると考えられるからである。実際に上海の試験では、実験を行う際、かなりアバウトなところがあった。供試体の作成や排水量の測定や圧力の値である。それでも特徴を見ることができ、データの信頼性を見るためには日本で行っているように一つ一つの計測や、作業を丁寧にする必要があると感じた。

圧力板法の試験装置はシンプルなので日本でも改良したものを作って実際に実験してみたいと思った。



写真 4.3.3-8 試験報告書作成

5. プロジェクト実習を受講して

この実習で獲得できたものは私たちにとって大変重要なものであった。大学院生に求められるものは、広い分野の知識と、高い専門的知識と、それらを統合して理解できる能力であると思う。学内では学内の整った設備や環境で専門的な研究を行うことができた。また、地域の企業の技術者や、大学の研究者とのセミナーに参加し、実用化されている技術やそれを支えている研究を知った。私たちが岡山大学で研究していることは、いつかは社会で使われ、地盤・地下水環境問題解決のために行っていることである。それは大前提の事柄ではあるが、とても重要だと自覚することができた。

海外に出て行けたこと、海外の研究者の研究を開けるセミナーに参加できたことは、とても良い経験になった。私たちの研究分野は、国や地方によって抱える問題や研究の目的が異なってくる。したがって私たちには、その国の研究者の話聞き、現場を見る中で当然疑問が湧いてくる。その疑問を質問し、そしてその答えを聞き、疑問を解決する。それだけでも自分たちの研究に関する知見が深いものになったように感じた。

実習に参加することで、得られたものは地盤・地下水環境問題の知識は確かにあるが、大学院生として重要な価値観を得たのだと私たちは思う。研究を進める上でも、その成果を世界に発信する上でも、自分たちの研究を支えているバックグラウンドがいったい何なのか深く理解していなければならない。学内、地域、そして世界と実習していく中で、地盤・地下水環境研究を支える広い知見と実践的な視野を獲得できた。今までは自分の中の世界で地盤・地下水環境問題とその研究に向き合ってきたが、現実の世界の中にそれを知覚することができた。社会に出ても、この経験は技術者、専門家、研究者として重要なものであると思う。プロジェクト実習を通して研究者として大切なことを私たちは経験したのだ。

岡山大学大学院環境学研究科 34421316 藤田 知大
34421118 山下 太久

謝辞

本実習の遂行にあたり、岡山大学大学院環境学研究科長 阿部 宏史教授より常時適切なお指導を賜りました。また、下記の方々より多大なご協力と貴重なご意見を賜りましたことをここに記して謝辞といたします。

加藤 正司（神戸大学大学院工学研究科 准教授）

孫 徳安（上海大学土木工学科 教授）

Seong-Wan Park（壇国大学土木工学科准教授）

林 正貴（カルガリー大学地球科学科 准教授）

榊 利博（コロラド鉱山工科 助教授）

諸泉 利嗣（岡山大学 大学院環境学研究科 准教授）

黒田 清一郎（農村工学研究所 施設資源部基礎地盤研究室 主任研究員）

神谷 浩二（岐阜大学 工学部社会基盤工学科准教授）

河合 隆行（鳥取大学 乾燥地研究センター研究員）

森井 俊広（新潟大学 自然科学系教授）

石藏 良平（山口大学 大学院理工学研究科助教）

上熊 秀保（応用地質株式会社中国事業部）

西村 輝（岡山地下水調査有限会社）

順不同，敬称略

平成21年度プロジェクト実習 (アジア地域における地盤・地下水環境問題)

岡山大学大学院環境学研究科社会基盤環境学専攻

34421118 山下 太久

1. はじめに

本プロジェクトでは「アジア環境再生の人材育成プログラム-循環型社会形成学と持続発展教育(ESD)の融合-」の一環として行われた。実習では学内レベル2件、地域レベル4件、国際レベル4件の計10件の実習を実施した。

2. 学内レベル

学内レベルで行った実習の事例を示す。写真-1は室内土質試験として一軸圧縮試験を行った様子である。この室内土質試験を行ったことによって、本プロジェクトを履修するにあたって地盤・地下水環境問題を理解するのに必要な基礎知識を得ることが出来た。

また、講義の一環としてコロラド鉱山工科大学の榊助教授に、研究活動の様子や研究内容についてのお話を伺った。海外の研究や研究室の様子を知ることによって日本の大学院との研究室の違いを理解することが出来た。

3. 地域レベル

地域レベルで行った実習の事例を示す。写真-2は応用地質株式会社の行っている河川堤防調査における地盤調査方法および原位置不飽和透水試験を見学した様子である。現場見学を行うことによって、自分が大学院で学んでいる専門知識が業務レベルではどのように生かされているのかを理解した。

写真-3は高炉水砕スラグを盛土材料とした試験盛土で地表型地中レーダを用いて盛土内の状態を計測した様子である。地中レーダ計測を行い、地盤内の構造を非破壊で計測することが出来た。この計測は地中レーダ計測の妥当性を示すという基礎的な研究であるので、今後は目標である業務レベルで行える計測方法を意識して研究を進めていきたい。

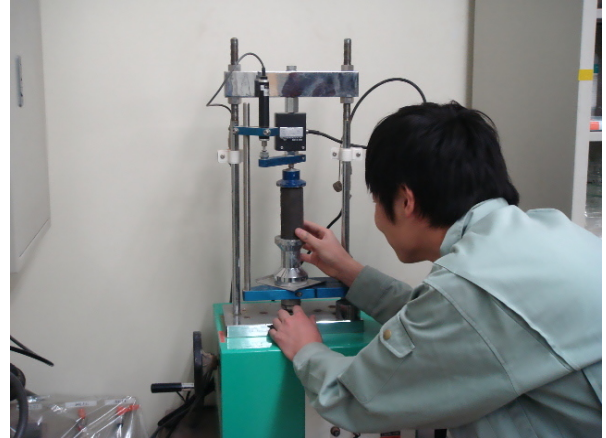


写真-1 一軸圧縮試験の様子



写真-2 高梁川透水試験の様子



写真-3 盛土地盤での地中レーダ測定

4. 国際レベル

国際レベルで行った実習の事例を示す。写真-4は韓国の檀国大学で行われた「アジア地域における不飽和土に関する地盤環境問題」に関するワークショップに参加した様子である。国際的な研究交流の場では専門的知識に加え、英語力やプレゼン能力を身につけることが、必要になることを認識した。

また「中国上海粘性土の地盤工学特性の計測評価」として、中国の上海にて視察を行った。写真-5は中国の上海市内の建設現場を視察した様子である。上海の地盤・地下水環境問題、中国の建設事情について学んだ。写真-6は上海大学で行った土質試験の様子である。上海大学において孫教授のご協力の下、上海シルトを用いて水分特性曲線を算出する試験を行った。この視察を行うことにより、中国の地盤・地下水環境問題を理解することが出来た。また上海大学工学部の実験室で実験したことによって、自分達が日本で行っている研究・実験環境との違いを認識した。

5. まとめ

今回の実習を通して、大学院の講義・研究だけでは得られない多くの刺激を受け、広い視野を得ることが出来た。大学院で学ぶ講義の内容が業務レベルではどのように行われているか理解することによって、講義がただの知識の獲得のみにならないように意識することが出来た。また、海外の環境問題や研究事例・教育機関の様子を知ることによって、自分の所属する研究室や自分の行っている研究を客観的に見られるようになった。

大学院の講義と業務レベルの技術の違い、自分の行っている研究の客観視、この2つを意識して今後の自分の研究に役立て、充実した大学院生活を送りたい。



写真-4 韓国で参加したワークショップ



写真-5 上海市内の建設現場



写真-6 上海大学で行った土質試験

平成 21 年度プロジェクト実習 (アジア地域における地盤・地下水環境問題)

岡山大学大学院環境学研究科資源循環学専攻

34421316 藤田 知大

1. はじめに

本プロジェクトは『アジア環境再生の人材育成プログラムー循環型社会形成学と持続発展教育(ESD)の融合ー』の一環として行われた。実習では学内レベル 2 件、地域レベル 4 件、国際レベル 4 件の計 10 件の実習を実施した。

2. 学内レベル

学内において地盤・地下水環境問題をテーマに講演を聞いたり、土質の室内実験を行ったりした。**写真-1** はその中の一つの地下水流動阻害実験である。講演では、コロラド鉱山工科大学の榊助教授の米国での研究活動の様子や、最新の研究を紹介していただいた。この学内レベルの実習において①地盤・地下水環境問題の基礎知識、②試験のバックグラウンドの知識、③試験に必要な力学・浸透理論の理解、の主に 3 つの重要な知識を身につけることができた。



写真-1 地下水流動阻害試験の様子

3. 地域レベル

大学で行われた地域セミナーに参加した。地盤工学会に所属する企業の研究者の発表を聞いた。内容はデジタル画像を用いた橋梁の調査技術（光学的全視野計測技術の現状と展望）で実際に実務レベルでの貴重な研究を知ることができた。地域のセミナーに参加することで①大学の基礎的研究とは異なる、実務レベルの研究を知ることができたこと、②大学の研究と実務へのつながりを理解すること、という大学の研究の立ち位置を理解することができた。



写真-2 地盤工学セミナー

4. 国際レベル

国際的実習では韓国の檀国大学でのワークショップに参加したり、上海市の建設現場視察、上海大学での室内試験実習をしたり、岡山大学で世界各地の研究者が地盤・地下水問題について話し合うセミナーに参加したりした。**写真-3** のように檀国大学で行われたワークショップでは韓国、中国、日本の不飽和土研究の第一人者が参加し、熱く自分の研究について講演した。上海市の建設現場視察では**写真-4** のように次々と高層建設物が造られている中で現場の職員に直接質問や工事の話聞くことが



写真-3 ワークショップ（韓国）

できた。上海大学では孫教授に実際に試験や、結果のデータ解析を指導していただいた。岡山大学で行われたセミナーでは、専門研究の講演はもちろんのこと、将来の研究者の育成のために大学院教育とはどうあるべきかという内容のテーマでディスカッションが行われた。**写真-5**に示すようにとてもアットホームな雰囲気で行われた。この国際レベルの実習を通して、①世界の地盤・地下水環境問題の現状を知ることができたこと、②たくさんの人々と実際に研究や試験や教育について話し合うという経験ができたこと、はとても重要なものであった。

5. まとめ

実習を通して私が獲得したものは、今後、研究をする上で重要な実践的な価値観である。今まで一般的な教養的知識の上に専門的知識があるT型の構造を、大学教育を通して培ってきた。それが実習をする中で、様々な分野の知識と専門的な研究を繋ぐことのできる知識、国際的視点に立った経験、実際に自分の体で体験したことが自分の研究をより深く理解することのできるバックグラウンドとして息づいていることに気づいた。このことは大学院生にとっても、研究者や技術者になる上でも重要な経験になったと思った。



写真-4 上海市の建設現場



写真-5 環境技術セミナー

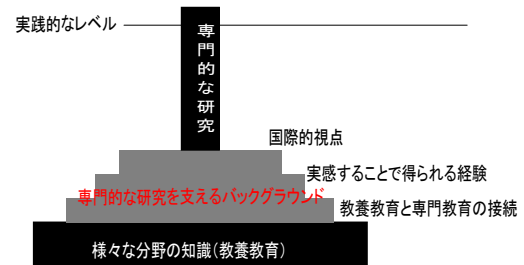


図-1 実習を通して獲得したもの

地盤・地下水環境問題の実習

竹下祐二・小松 満

履修学生: 山下太久、藤田知大

実習内容

I. 学内レベル

アジア地域における地盤・地下水環境問題の理解

II. 地域レベル

実務レベルにおける地盤調査方法・室内土質試験

III. 国際レベル

中国上海市における地盤環境問題の実習

I. 学内レベル

アジア地域における地盤・地下水環境問題の理解に必要な知識を修得する

- (1) 不飽和土に関する土質力学
- (2) 地下水環境工学
- (3) 土質試験法

II. 地域レベル

実務レベルにおける地盤調査方法および室内土質試験方法を理解する

- (1) 河川堤防での原位置透水試験
- (2) 盛土地盤での物理探査方法

地盤技術者による指導

上熊秀保(応用地質)

黒田清一郎(農村工学研究所)

III. 国際レベル

中国上海市における地盤環境問題の実習

- (1) 上海市内の建設工事現場の見学
- (2) 軟弱な上海粘土の力学特性と浸透特性と計測評価
- (3) 上海大学での室内土質試験の実習

指導: 孫徳安 教授(上海大学)

平成21年度プロジェクト実習 (アジア地域における地盤・地下水環境問題)

岡山大学院環境学研究科社会基盤環境学研究科
34421118 山下 太久

アジア地域における地盤・地下水環境問題

学内レベル

- ・室内土質試験
- ・海外の大学での研究事例の聴講

地域レベル

- ・河川堤防調査の見学(倉敷市高梁川)
- ・盛土地盤のレーダ調査(山口県宇部市)

国際レベル

- ・不飽和土の地盤環境問題に関するワークショップ(韓国檀国大学)
- ・地盤地下水環境の視察(中国上海)

学内レベルでの実習



室内土質試験

海外の大学での研究事例の聴講



アジア地域における地盤・地下水環境問題

学内レベル

- ・基礎知識の確認、習得
- ・日本の大学院教育とは・・・？

地域レベル

- ・河川堤防調査の見学(倉敷市高梁川)
- ・盛土地盤のレーダ調査(山口県宇部市)

国際レベル

- ・不飽和土の地盤環境問題に関するワークショップ(韓国檀国大学)
- ・地盤地下水環境の実習(中国上海)

地域レベルでの実習

河川堤防調査の見学

日時: 2009年5月22日(金) 10時20分～13時40分

場所: 岡山県倉敷市高梁川



ボーリングによって採取された現場試料

地域レベルでの実習

河川堤防調査の見学

日時: 2009年5月22日(金) 10時20分～13時40分

場所: 岡山県倉敷市高梁川



地域レベルでの実習

河川堤防調査の見学

日時: 2009年5月22日(金) 10時20分~13時40分

場所: 岡山県倉敷市高梁川



地域レベルでの実習

盛土地盤のレーダ調査

日時: 2009年7月31日(土), 8月1日(日)

場所: 山口県宇部市

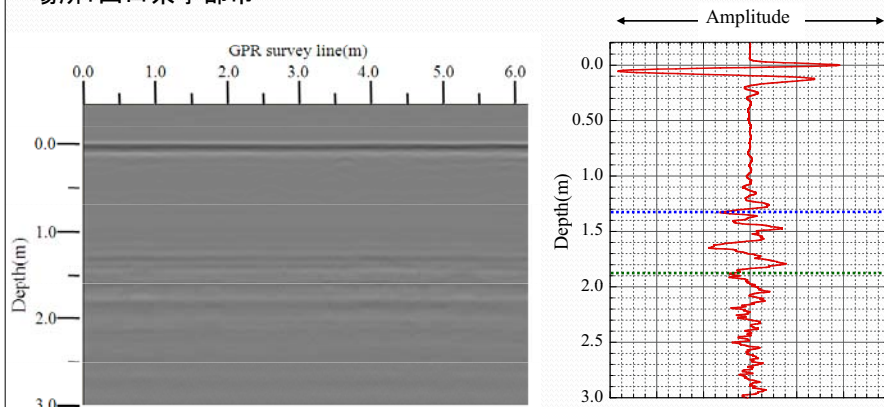


地域レベルでの実習

盛土地盤のレーダ調査

日時: 2009年7月31日(土), 8月1日(日)

場所: 山口県宇部市



地中レーダで捉えた断面画像

地盤構造の推定

アジア地域における地盤・地下水環境問題

学内レベル

- ・基礎知識の確認、習得
- ・日本の大学院教育とは・・・？

地域レベル

大学院の研究と業務の違いを理解

国際レベル

- ・不飽和土の地盤環境問題に関するワークショップ(韓国檀国大学)
- ・地盤地下水環境の実習(中国上海)

国際レベルでの実習

不飽和土の地盤環境問題に関するワークショップ
日時: 2009年9月11日(金)10時~18時
場所: 檀国大学(韓国, 龍仁市)



発表の様子

日本・韓国・中国の研究者が参加



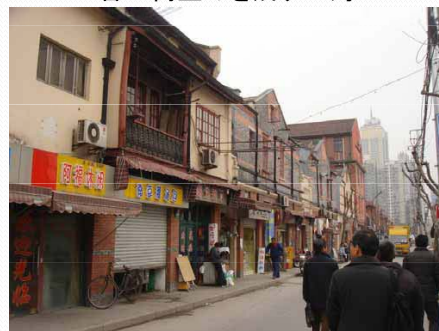
国際レベルでの実習

地盤地下水環境の視察
日時: 2010年1月22日~1月27日
場所: 中国上海市



発展著しい上海の高層ビル群

昔の街並みを残す上海



国際レベルでの実習

地盤地下水環境の視察

日時: 2010年1月22日~1月27日

場所: 中国上海市



上海市内の建設工事現場

掘削した粘土

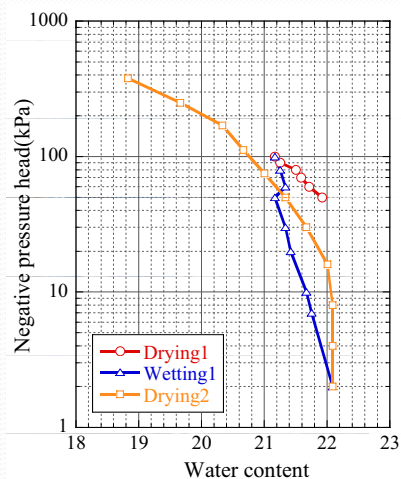


国際レベルでの実習

地盤地下水環境の視察

日時: 2010年1月22日~1月27日

場所: 中国上海市



アジア地域における地盤・地下水環境問題

学内レベル

- ・基礎知識の確認、習得
- ・日本の大学院教育とは・・・?

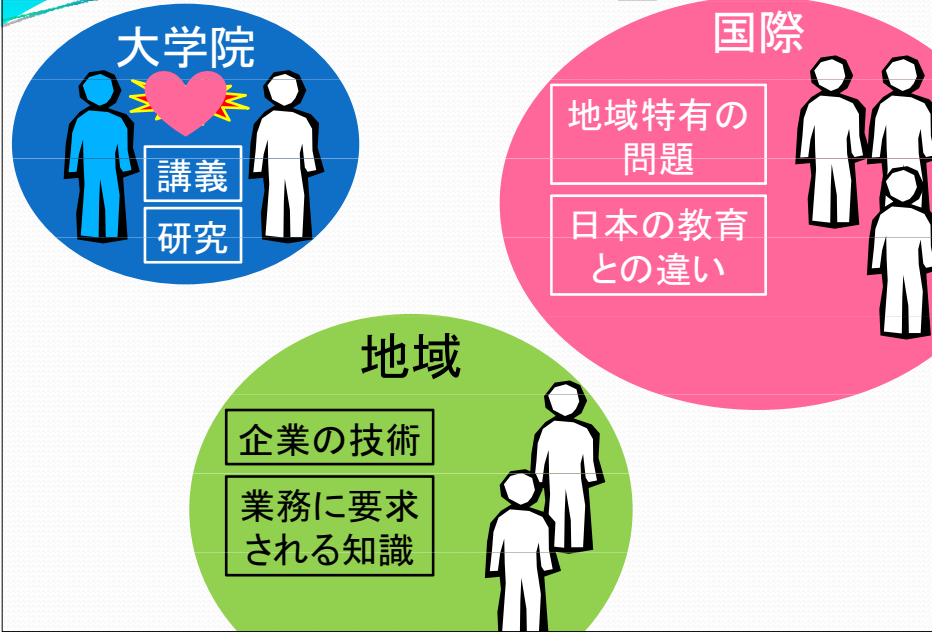
地域レベル

大学院の研究と業務の違いを理解

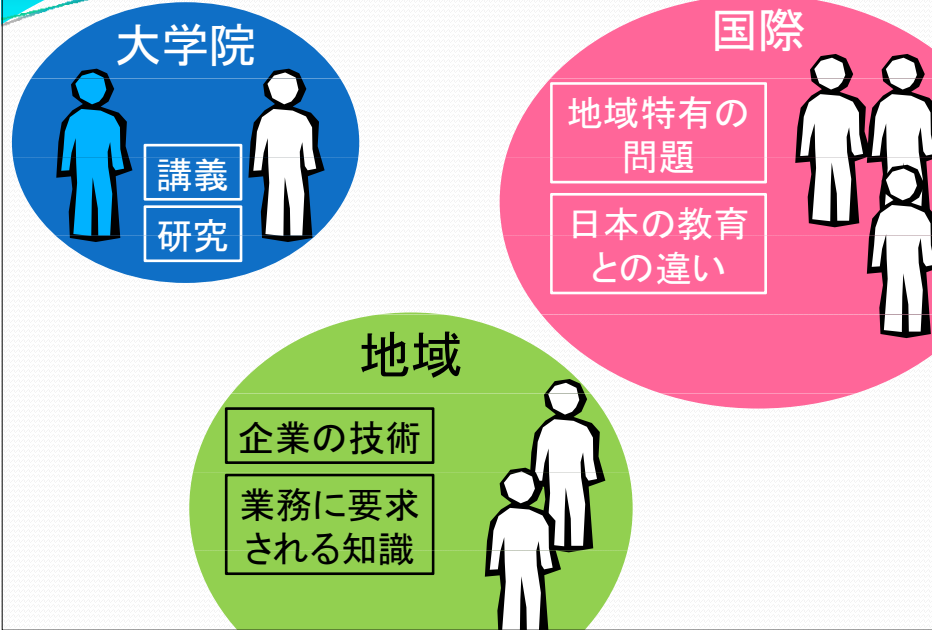
国際レベル

- ・歴史や風土の違い
- ・地域特有の問題
- ・英語の重要性

大学院GPを履修して



大学院GPを履修して



プロジェクト実習を受講して

～アジア地域における地盤・地下水環境問題～

岡山大学大学院環境学研究科資源循環学専攻
34421316 藤田 知大

2010/2/10

1

イントロダクション

1. 学内実習とその成果
2. 大学と地域とのつながり
3. 国際的視野と大学院教育
4. 実習を通して

2010/2/10

2

1.学内実習とその成果



写真-1 地下水流動評価試験(構造物による流況阻害)

2010/2/10

3

室内試験により地盤の基礎的知識

試験のバックグラウンドの知識

力学的な理論の理解

2010/2/10

4

good practice

2. 大学と地域のつながり

日時: 5月11日(月) 18時~20時

内容: デジタル画像を用いた橋梁の調査技術=光学的全視野計測技術の現状と展望



写真-2 地盤工学会岡山地域セミナーの様子



写真-3 講師(岡本卓慈氏)

2010/2/10

5

good practice

社会の中の地盤・地下水環境研究の重要性

大学の研究と企業の実務のつながりを理解

2010/2/10

6

good practice

3. 国際的視野と大学院教育



写真-4 上海市内の建設現場

good practice

2010/2/10

7

3.1 国際セミナーに参加



写真-5 学会参加者の集合写真

good practice

2010/2/10

8

ディスカッションのやり方

研究者や技術者の熱い気持ちが伝わってきた

good practice

2010/2/10

9



写真-6 檀国大学キャンパス



写真-7 発表の様子

アジア地域における地盤・地下水環境問題の研究を実際に聞くことができた。

good practice

2010/2/10

10

3.2 上海市視察



写真-8 上海市内建設現場前



写真-9 建設現場内で質問

good practice

2010/2/10

11

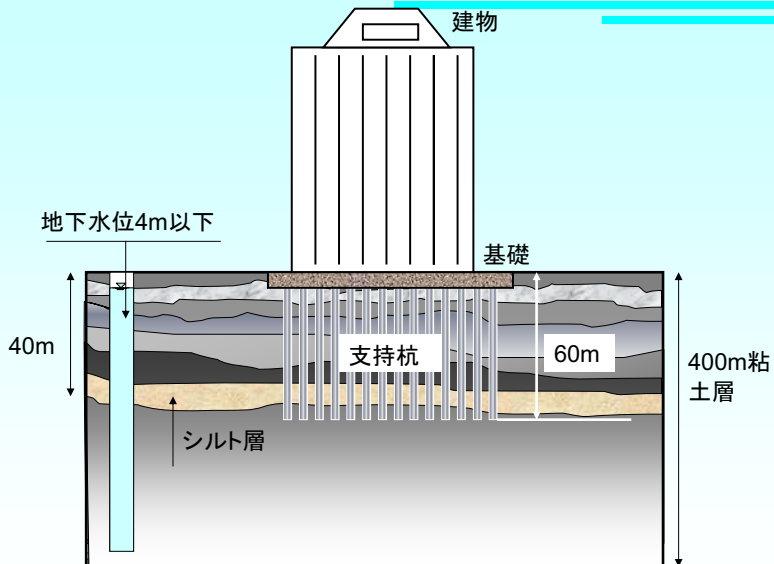


図-1 上海の建設物外略図

good practice

2010/2/10

12



写真-10 建設現場の上海粘土

good practice

2010/2/10

13

上海大学での室内試験実習



写真-11 上海大学工学部棟前



写真-12 実験室で試験準備

good practice

2010/2/10

14

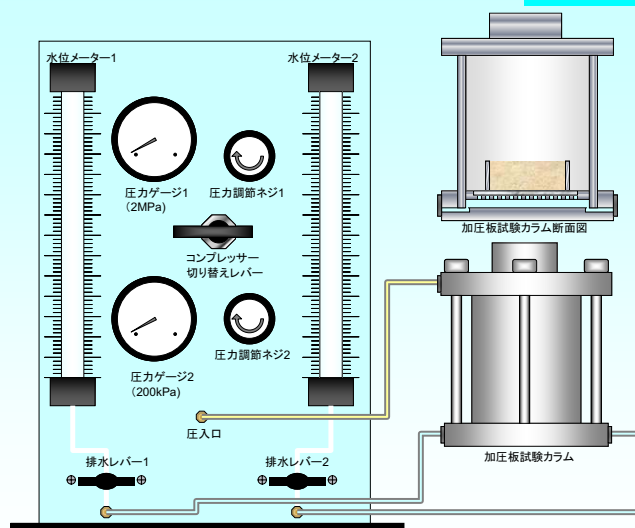


図-2 圧力板法試験装置外略図

good practice

2010/2/10

15



写真-13 計測の様子



写真-14 試験報告作成

good practice

2010/2/10

16



写真-15 孫教授によるデータ解析の指導

good practice

2010/2/10

17

水分特性曲線

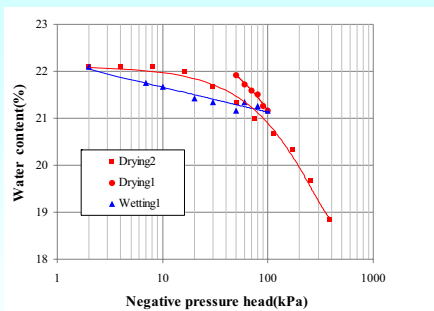


図-2 計測されたSVCC(試料1)

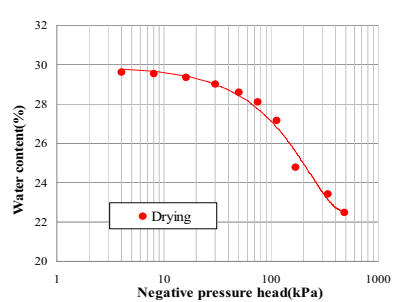


図-3 計測されたSVCC(試料2)

good practice

2010/2/10

18

土の水を保持しようとする能力が分かる。

土の含水状態は外部のアクション(降雨, 建設工事)で変化する。

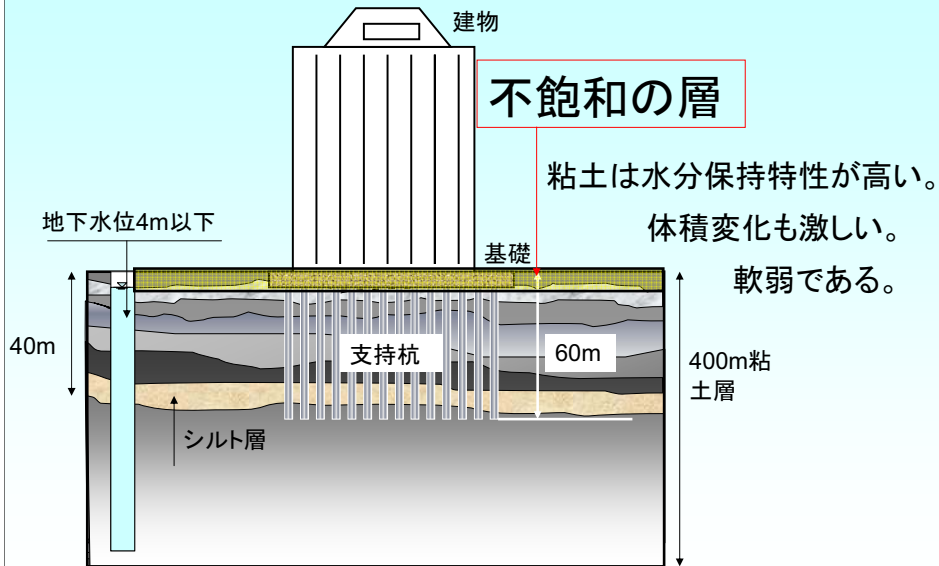
土は含水状態で物性が変化する。

構造物を安全に造る, 自然災害の危険性を評価することができる。

good practice

2010/2/10

19



good practice

2010/2/10

20

大学院教育を考える

アジア地域における地盤・地下水環境保全のための環境技術セミナー
～次世代の地盤・地下水環境教育と研究のアプローチを考える～



写真-16 セミナーの様子 榊利博助教授(コロラド鉱山工科大学)

good practice

2010/2/10

21



写真-17 セミナーの様子 林正貴准教授(カルガリー大学)

good practice

2010/2/10

22

4. 大学院GPを通して

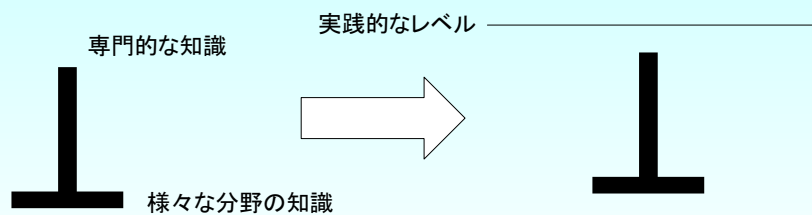
実践的な価値観を獲得することができた。

T

good practice

2010/2/10

23



good practice

2010/2/10

24

実践的なレベル

専門的な研究

国際的視点

実感することで得られる経験

専門的な研究を支えるバックグラウンド

教養教育と専門教育の接続

様々な分野の知識(教養教育)

good practice

2010/2/10

25



good practice

2010/2/10

26

アジア地域における地盤・地下水環境問題

教 材

平成 21 年度プロジェクト実習成果

平成 22 年 3 月

岡山大学大学院環境学研究科

目次

頁

第1章 不飽和土の力学特性と地盤環境	1
1.1 不飽和土におけるサクシジョンの役割	1
1.2 土のせん断強度の考え方	2
1.3 不飽和土の強度へのサクシジョンの影響	5
第2章 地盤環境実習および教育における地表水-地下水相互作用の重要性	7
第3章 地盤・地下水環境特性計測のためのセンサー技術	12
3.1 CSMの研究紹介	12
3.2 地雷探査技術への応用	12
3.3 土中水分計	13
3.4 土中の間隙空気圧の測定方法	19
3.5 高分解能の水分保持特性	21

第1章 不飽和土の力学特性と地盤環境

1.1 不飽和土におけるサクシジョンの役割



Near ground surface, engineered structures become unstable in response to extreme changes in moisture flux boundary conditions

左の写真は雨が降って、擁壁内側の乾いた土のところへ水が入って崩れたという海外の例である。当然、別に海外特有ではなく日本のあちこちでも起こっている。



洲本市内での表層崩壊事例

もう少し規模が大きくなり、2004年の台風で淡路島の中の洲本市のところで生じた大規模な土砂崩れである。乾いた状態の地盤(斜面)において水が浸入することで崩れてしまうということである。

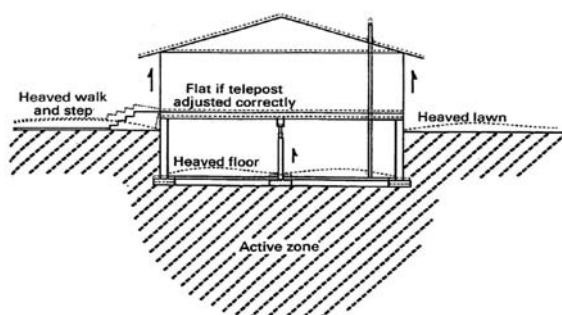


平成16台風21号による斜面崩壊

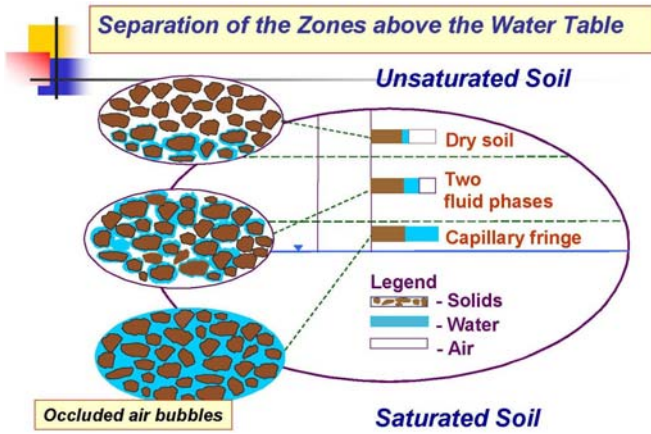
より有名な例で、平成16年の台風21号により宮城県の築館で大規模な土砂崩れが起こった、高速地すべりと呼ばれているものである。このように、我々の住んでいる住環境に対して、災害の影響があるということであり、地盤が乾いた状態から環境が変わることで災害が起こるということ、当然日本の中では知られていることである。

EXPANSIVE SOILS PROBLEMS

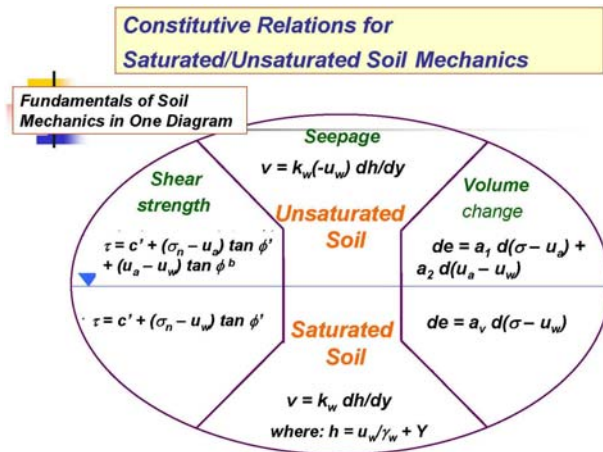
Ground movements associated with the construction of shallow footings on an expansive soil



Expansive Soilsは膨張性という意味であり、極度に乾いた状態の土が何らかの影響(蒸発散が防げられる等)を受ける場合、付近の水分量に変化してバランスが崩れるということで、少し湿った状態になると、その土がヒービング(Heaved は膨れるという意味)を生じたりする。特に、乾燥地帯ではこのようなことが起こっている。要するに、それ自体がダメージを受けるとか、実際崩れるということではないが、建物に被害が出るということで、やはり雨がこないような地域でもこのような乾いた状態の土の力学挙動というのが関係していることが分かる。



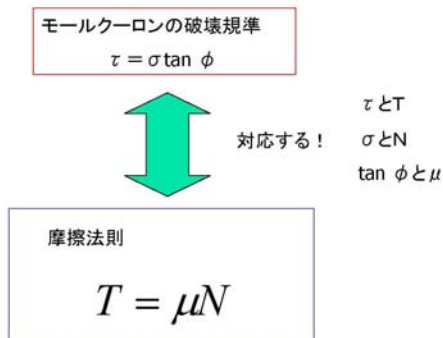
それぞれ、微小要素に影響しているが、不飽和土も、乾いているといってもその程度がいろいろあるということである。水面からわずかに高い部分は一般に毛管帯と呼ばれる部分で、その部分はほぼ飽和(ほぼ飽和状態、要するにわずかな空気を含む)状態である。そこから非常に乾いた状態に向けて内部の水分状態によって変化する。そのような点を考慮して、不飽和土の挙動を考える必要がある。



現状では、地盤の力学特性というのは、せん断強度と浸透問題、体積変化問題であり、体積変化の圧密や体積変化の問題が重要なテーマである。それに対してさらに不飽和の状態と飽和の状態の問題が出てきており、現在研究が行われているが、それぞれこういう構成式のようなものが考えられている状態にある。

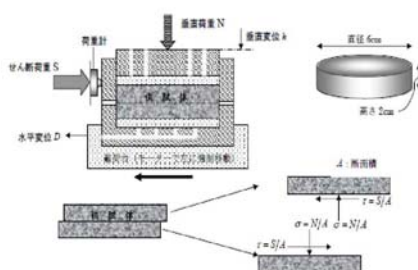
1.2 土のせん断強度の考え方

土のせん断強度の考え方



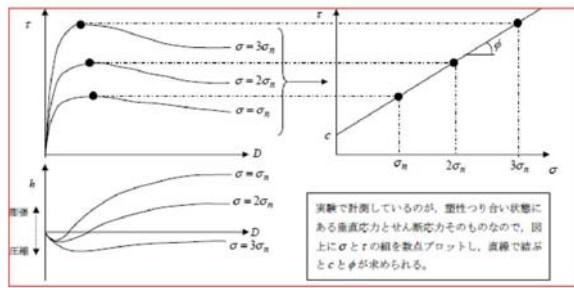
土のせん断強度は、基本的にはモールクーロンの破壊基準に従うと言われている。この式で τ がせん断応力、 σ が垂直応力、 $\tan \phi$ というのが係数である。これはよく知られている摩擦と対応している。横向きに滑らそうとする力が、物体に対する垂直力と摩擦係数で結ばれている。

一面せん断試験装置



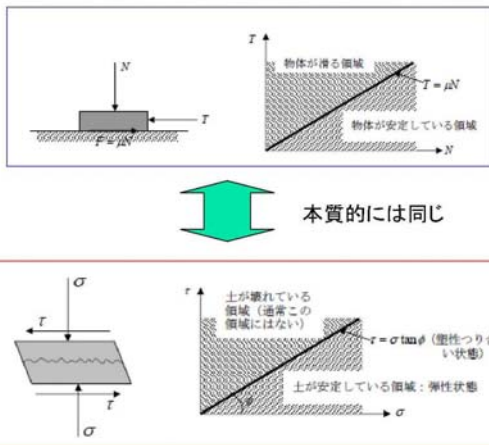
土の試験として、摩擦試験によく似たものが一面せん断試験がある。これは円盤状の土の供試体(土の塊を円筒の中に入れて)が2つ割りになっており、横から垂直荷重をかけながら横から押す原理となっている。まさに通常の物体のすべりに対応する試験である。

一面せん断試験結果



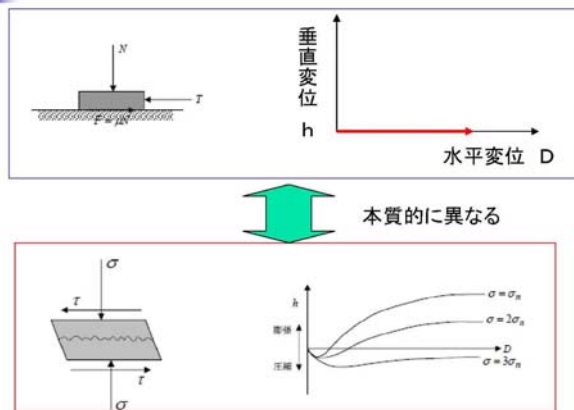
上述の試験を実施して摩擦係数を決めていくということである。一面せん断試験結果と書いてあるが、この横軸は供試体の横の移動量である。縦軸はそのときのせん断抵抗力である。上載荷重として垂直応力を変えながら実験を行うと、このような関係が得られ、このピーク強度を結ぶと、摩擦係数に対応する内部摩擦角が決められる。土の材料によって、原点を通る直線である場合と、原点を通らない場合がある。そのため、物体のすべりと土の破壊というのは本質的に対応していることが分かる。

物体のすべりと土の破壊



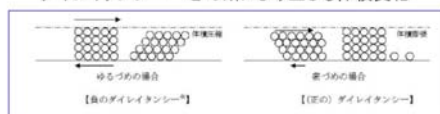
すべりと土の変形で根本的に違うのが、物体のすべりの場合は横にずらしても、垂直方向の変異というのは起こらないことである。板をすべらせても板の厚さが変わらない。ところが、土の場合は横にずらせばずらすほど高さが変化していく、要するに緩い状態、隙間がある状態の土を横にずらしてやると、粒子がどんどん隙間に落ち込むことで高さが減る。逆に、密な状態をずらしてやると、粒子が乗り上がって、高さが変化する。このような性質を粒状材料のダイレイタンスと呼ぶ。

物体のすべりと土の変形



せん断変形とダイレイタンス

ダイレイタンス＝せん断により生じる体積変化



身近なダイレイタンスの例

- ・砂浜の板打ち席で砂を踏みと一脚靴のように（水が吸い込まれていくように）見える。
- ・小麦粉などの粉を器に入れるときに、ゆするとたくさん入るようになる。
- ・コーヒー豆をミルで挽くとき、抑えるものが無くてもコーヒー豆は粉になる。
- ・金属の玉がたくさん入った箱の中にむやみに手をいれようとすると、あふれてしまう。
- ・調剤電車で降りるために動くと、大きな振動を受ける。

ダイレイタンスの性質は、身近な例があり、例えば粉を容器に入れるときに揺すりながらやるとたくさん入るといのは、間に落ち込ませて、容積を減らしている、というのがダイレイタンスと呼ばれる粒状材料の体積変化の特性である。本質的にモールクローン、土の破壊基準が摩擦則と対応する摩擦係数の物理的な意味というのは、粒状材料の場合、物理摩擦的なものとダイレイタンスが含まれていることになる。その点が物体のすべりとは大分異なるということである。



モールクーロンの破壊規準
 $\tau = \sigma' \tan \phi'$

ϕ' には
 物理摩擦の影響
 +
 ダイレクタンシー



対応する！

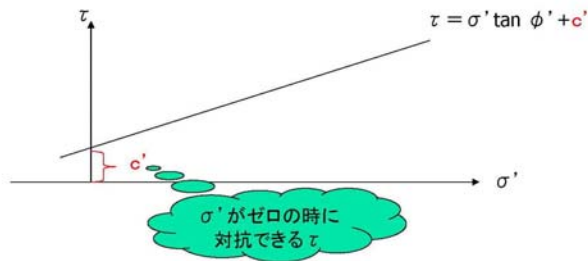
摩擦法則
 $T = \mu N$

μ には
 物理摩擦の影響



粘着力について

モールクーロンの破壊規準
 $\tau = \sigma' \tan \phi' + c'$



原点からずれる理由には、粘着力と呼ばれる部分
 が関係している。これは、一応 σ がゼロのときの抵抗力
 と考えられるが、例えば、物体のすべりに戻して考える
 と、上に物が乗っていない、荷重がない状態で横に力
 をかけた場合でも抵抗力があることを示しており、これは
 例えば、物体と床の間にボンドのような粘着力があるも
 のがついている状態と理解することができる。そういう意
 味でこれを粘着力と呼ぶことができる。

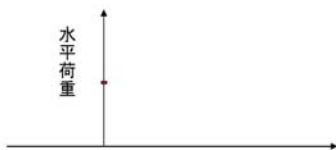
そのような状態で垂直力を加えながら実験をやると、
 切片を持った形の破壊基準が得られる。つまり、この
 c というのは σ がゼロのときの τ の大きさである。



物体のすべりで粘着力を考える

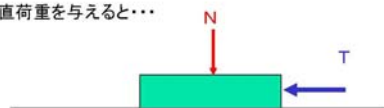


垂直荷重がないのに、水平荷重を与えても物体がすべらない状況
 たとえば、物体と床の間に接着剤が付いている？



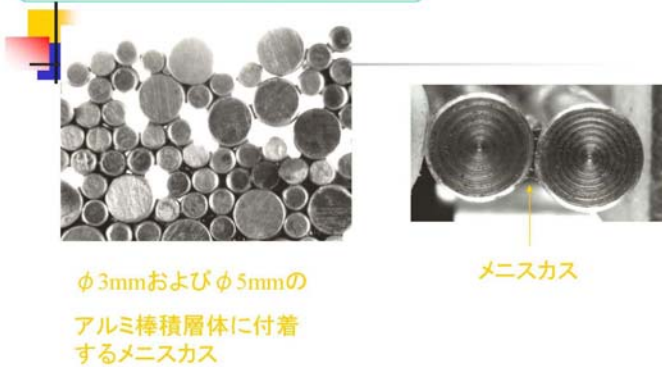
物体のすべりで粘着力を考える

その後に垂直荷重を与えると...



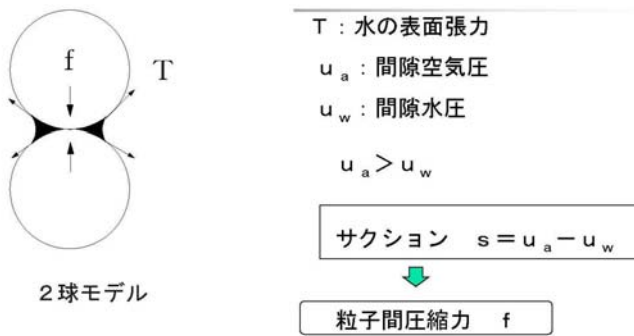
1.3 不飽和土の強度へのサクシジョンの影響

アルミ棒に付着するメニスカスの様子



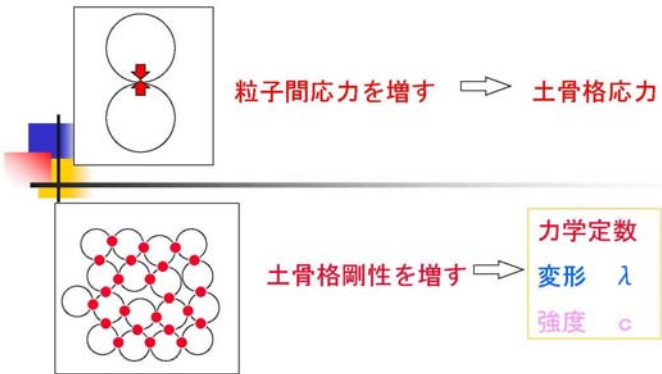
一般的な土のせん断強度の考え方に比べて不飽和土の場合、せん断強度に対してサクシジョンが影響する点異なる。図は5cm程度のアルミ棒を積んで水をかけ、横から撮ったものである。アルミ棒の接点のところに水が集まっていたり、あるいはそのアルミ棒の空隙のところが水が埋めている状況がわかる。こういう接点に集まっている水のことをメニスカス水と呼ぶが、実は不飽和の乾いた状態の土には存在しているということである。恐らく乾いた状態であれば、水分量が僅かであるため、土粒子の接点のところに集まっているということになる。

サクシジョンと粒子間圧縮力



そのようなメニスカスの水というのが不飽和土の強度に影響を与えている。この水の影響は2球モデルという非常に単純化したモデルで考えることができる。土を2つの等大の同じ大きさの球として考えた場合、この球の場合には空気圧と水の部分には水圧があるが、この水圧というのが表面張力であり、水が引っ張られている。その影響で空気圧と水圧に圧力差が生じている。つまり、圧力が下がるというのは、例えば針のついていない注射器を、先を押さえて引っ張ってやると指が吸いつく状況であり、同じように、表面張力で引っ張られて、圧力が下がるとその分球同士がくっつけられるということになる。見かけ上は、この水の影響で圧縮力、粒子間圧縮力fが作用をしている。不飽和土と呼ばれる乾いた土というのは、要するに圧縮力が作用した状態にあるということになる。

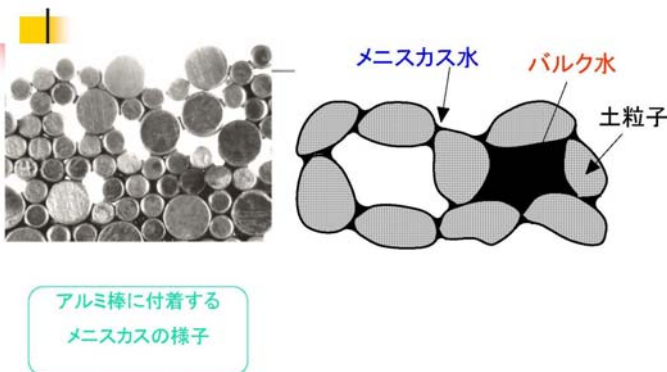
サクシジョンの影響



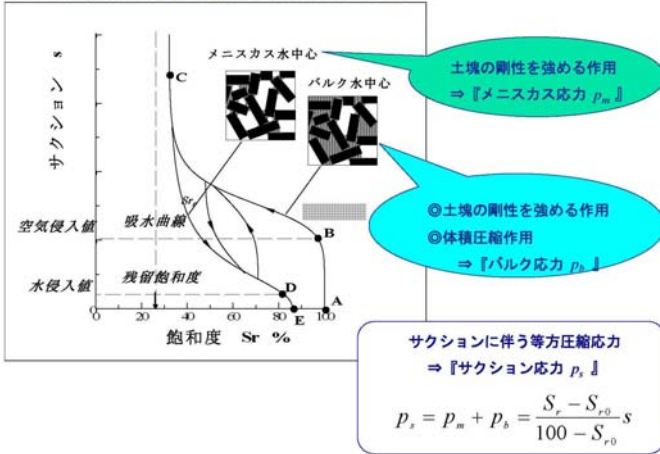
圧縮力は空気圧の圧力差の影響、サクシジョンの影響であるが、これは土粒子間の応力による影響と、全体としては各接点に圧縮力が作用することで、全体の硬さが変わることにつながる。

ただ、土粒子の接点にある水の場合はそのように表わされるが、空隙を埋めている水は異なる。これはバルク水と呼ぶが、メニスカス水とバルク水の状態では、挙動に対する影響が異なってくるということが考えられる。メニスカス水の場合、球の間に付着力があって固まった状態になっているため、骨格合成が高まっている状態となるが、バルクの水と呼ばれるのは、実はこの内部のところが圧力が下がるので、その粒子の配置によって崩れる場合が出てくるということである。つまり、粒子接点にすべりが生じるということであり、メニスカス水の場合は、粒子接点には絶対すべりが生じないが、バルク水の場合はすべりが生じる。そのような、メニスカス水とバルク水の影響が合わさって、乾いた土の粘着力というのが出ている。

バルク水とメニスカス水の概念図

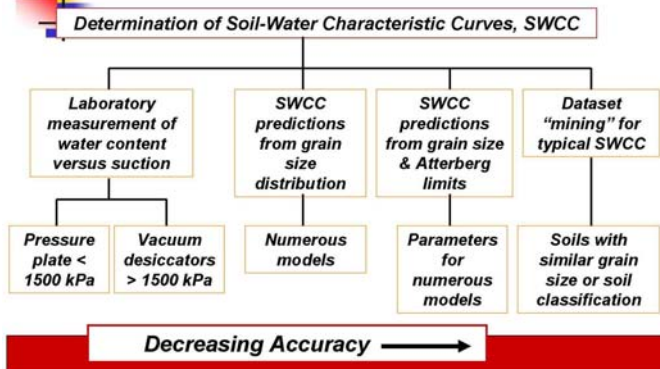


★ 水分特性曲線と不飽和土の間隙水の分布状態 ★



現在の研究では、このような粘着力や τ 軸の方向の粘着力と考えるのではなく、 σ 軸方向の等方的な応力成分としてサクションの影響を考えており、これをサクション応力と呼んでいる。つまり、サクション応力として等方応力成分を考えようとしている。前述の水のつき方というのは、実は乾いた土の強度を大きく支配している。その水のつき方を考えるときに全体的に水がどれくらいあるか、また、あるサクションに対して、水分量がどう変化するかというのが非常に重要であり、それを水分特性曲線、サクションと水分量、飽和度あるいは体積含水率の関係として表わされる。飽和状態の土を乾かしていくと、メニスカスができてサクションが増加するが、大まかな傾向としては、初めメニスカスができたくらいでは水は抜けないが、ある点から水が抜け始める。さらに脱水するとき示す曲線を脱水曲線と呼ぶ。一方、乾いた状態から例えば雨が降って、水が浸入するという場合は、サクションが落ちながら水分量が増えていくため、吸水曲線と呼ばれる。脱水曲線と吸水曲線は異なる傾向を示すことが言われており、同じサクションのもとで水分量が違う状態が存在し、例えば脱水側ではバルク水が残留し、吸水側はバルク水が少ない状態、メニスカス水が中心になった状態になっているというように理解することができる。つまり、水分量が異なるとサクションの挙動に与える影響も変わり、サクション応力という形で評価している。なお、現在、水分量は相対飽和度の形で取り入れられている。

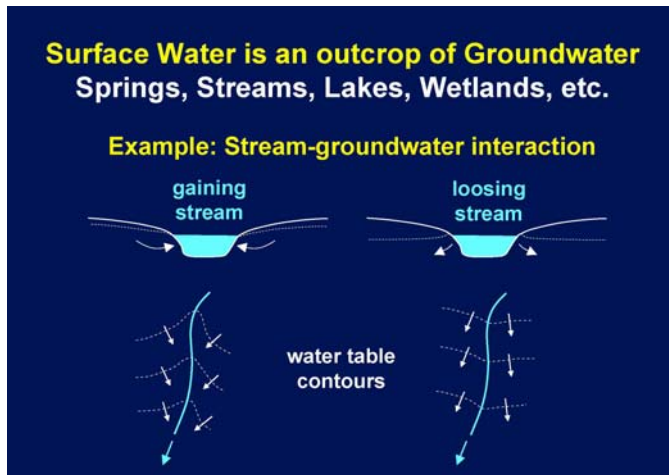
obtain the Soil-Water Characteristic curves



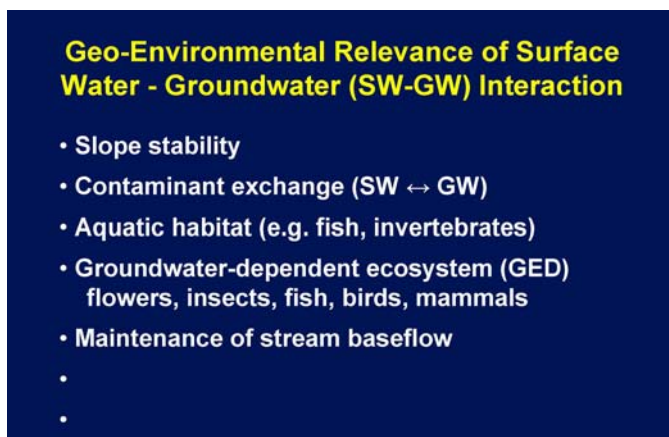
水分特性曲線の決定方法は、実際に室内で乾かすという方法をはじめ、様々な方法がある。この室内で乾かすのは時間が掛かるため、粒度分布から求める等、色々な推定方法が提案されている。

水分特性曲線は非常に重要であるが、再加圧の場合の性質に注意が必要である。同じ試料でも上部からの圧力を変化させると、水分特性曲線が変わってくる場合がある。要するに、土の間隙状態が変化することで、水分特性曲線が変わるという性質がある。現状ではこの水分特性曲線に基づいて乾いた土の強度を推定する研究が多数行われている。水分特性曲線に対して、基底応力とサクションに対して何かの係数を掛けて、サクション応力的なものと考え、それをせん断強度式に入れる方法である。つまり、粘着力の増分が追加されるため、不飽和土は、飽和状態から粘着力だけが変わっている強度特性を示すということである。

第2章 地盤環境実習および教育における地表水-地下水相互作用の重要性



一つの例として川を考えてみる。大体、川には地下水面が接しており、日本のような湿潤地域だと地下水面は、川の水面より高いことが多い。つまり、地下水が川に流れ込んでいる状態で、地下水面のコンターは逆V型になる。そのため、流線は川に向かうことになる。ところが、中国やカナダの内陸部の半乾燥地域や乾燥地域は逆にその川の水というのが季節的にしか流れない場合もあり、地下水面が川より下がってV字型になる。この場合は、地下水の流れは川から離れるようになる。



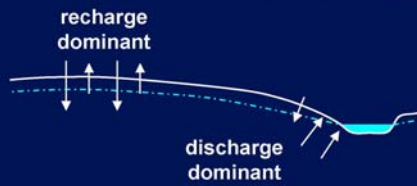
環境調査とか環境アセスメントを実施する場合に非常に重要な項目であり、これからの技術者は常に意識する必要がある。その中で、地表水と地下水との相互作用というのが、地盤環境や地下水環境を考えていく上で、どういうところに影響するのかを考えてみる。例えば、環境調査をすとか汚染の調査をすとかといった場合、工場から川に汚染物質が流れたときに、汚染の広がり方も変わってくる。北米では、湖畔の別荘で汚水がそのまま地面にしみ込むようになっており、湖では窒素とかリンによる富栄養化が問題となっている。また、地すべりが起きるときに地下水が大きく影響しており、川岸等では地下水と表流水の交換が効いてくる。地下水が表流水を汚染する場合、あるいは逆に表流水が汚れている場合はそれが逆に地下水に入って、地下水をその川の周囲から汲み上げた場合、飲料水に表流水の汚染物質が混入する場合もある。その他、汚れた地下水が川や湖の中に上がってくる場合には、生態系、例えば魚とか水生昆虫に影響を及ぼす。特に最近、欧米で言われ始めたのが、グラウンドウォーターディペンデントエコシステムであり、地下水に依存している生態系に関する事である。例えば希少植物で地下水面に非常に近いところでないと育たないというのは、もし地下水面が下がると枯死する場合がある。また、昆虫や魚でも同様である。

近年、水文学ではエコシステムサービスという言葉を使うが、川や地下水がいかにその生態系にサービスを与えているかということである。したがって、これから環境関係の仕事を見つけて働いていく場合には、やはり常に水文、水循環、水収支というのはどのように生態系に影響しているかというのを考える必要がある。

もう一つ重要な項目は、渇水期でも川の水が流れていることである。これは、地下水が川の中に出てきているからで、地下水が存在しなければ、基底流はなくなってしまふ。それもその生態系だけではなく、様々な人間が水を使う場合もあり、それらの相互作用が重要になる。

Sustainable Water Resources Development Integrated management of SW and GW

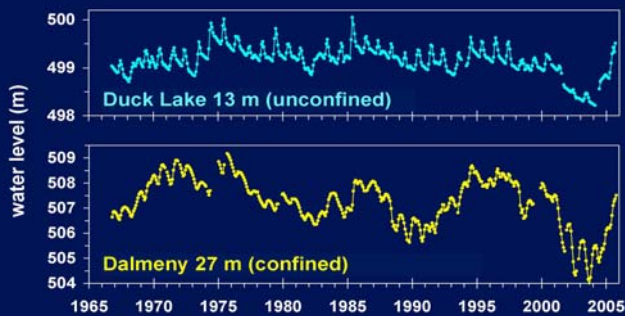
Recharge - Discharge = Storage change
(groundwater level $\uparrow\downarrow$)



最近重要視されている項目として、地表水と地下水を総合的に見ながら、サステナブル(維持可能)な水資源開発やマネジメントをしていく考え方がある。地下水面はほぼ川に似た形状になっており、涵養は高いところで起こり、低いところにいくと大体地下水が出てきていることが多い。自然状態(人の手が入ってない)だと、入っていく分(涵養)が多い場合は貯留量が増え、出ていく分(流出)が多いと貯留量が減る。地下水の場合は水位が上がったり下がったりすることで貯留量の増減が生じており、これは降雨に影響されている。

Water Level in 'Undisturbed' Aquifers

Data from GW monitoring wells in Saskatchewan



カナダ・サスカチュワン州にある地下水井における約40年の水位変化をプロットしたグラフで、増減を繰り返しながらも、長期的には一定の水位を保っている。つまり、長期的に見た場合、入出分は大体帳尻が合っているとと言える。

Long-Term Water Balance: Steady State



$$\text{Recharge} - \text{Discharge} = 0$$

On a long-term average, recharge and discharge are balanced in 'undisturbed' systems.

ところが中国や北米の乾燥地域における農業では地下水に依存している。長期的には貯留量が変わらない状態に新しい成分が入ってくるため、帳尻が合わなくなる。そこで貯留量が変わり、長期間揚水をしているとまた帳尻が合う状態になる。つまり流入は一定であるが、揚水に見合う分だけ川への流出が減る。つまり、自然流出が減っていくということである。

また、揚水量は涵養量よりもさらに低いことがわかる。もし、涵養量 = 揚水量になってしまうと、川が干上がることになる。したがって、持続可能な水資源管理のためにはそのような状態を避ける必要がある。

Pumping Disturbs the Water Balance



$$\text{Recharge} - \text{Discharge} - \text{Pumping} = \text{Storage change}$$

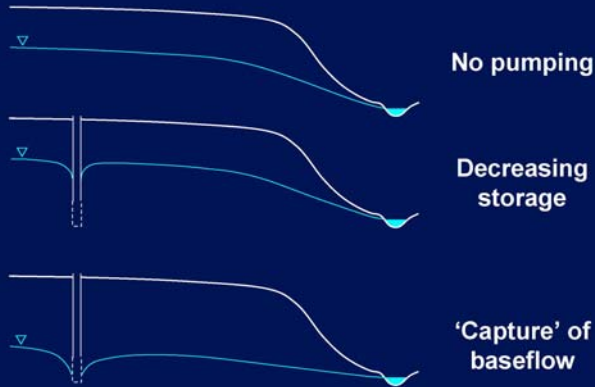
New Steady State with Pumping



$$\text{Recharge} - \text{Discharge} - \text{Pumping} = 0$$

Significant reduction in discharge.
Pumping is still smaller than recharge.

Summary of Pumping Effects



まとめると、ほとんど人の手の入っていない状態では、地下水水面が川のほうにつながって、川がまた基底量が保たれている状態である。その状態から最初、水を汲み上げ始めたところで揚水井の周りにコーンオブインプレッションという地下水が下がる現象が見られ、さらに長期的続けると、流出量が減って、また帳尻が合う状態になる。この段階では貯留されている地下水の中から汲み上げており、貯金を使っている状態である。貯金をはたいてしまって、最後に流出する量が無くなることは、その川の基底流を人間が全部取ってしまうという状態である。

SW-GW Exchange and Aquatic Ecosystems

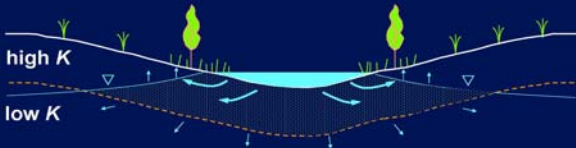
- Maintenance of baseflow during dry periods
- Temperature regulation
 - Cold water in summer, ice-free in winter
- Spawning grounds for fish
 - Nutrient and oxygen supply
- Supply steady water source for riparian plants
 - Riparian corridor provides wildlife habitats
-
-

Hayashi and Rosenberry (2002. *Ground Water*, 40: 309-316)

この問題の課題の一つとして基底流を乾期に守らなければならないということである。表流水と地下水の交換が基底流をある程度維持している。地下水は気温に比べると夏は冷たくて冬は暖かいので、地下水が湧いてくるような場所、例えば夏の間に冷たい水になっているところは、あと冬になっても凍らない。そのような場所は魚の産卵に良い状況を作り出している。

一方、川のそばのライバリアンゾーン(アシが茂っているような場所)というのは、鳥の生息地であったり、野生動物がその繁みを使いながら移動したりする。それは、地下水が地表面近くにあるので、植物が育ちやすい状況にあることを示している。

SW-GW Exchange in the High-K Zone



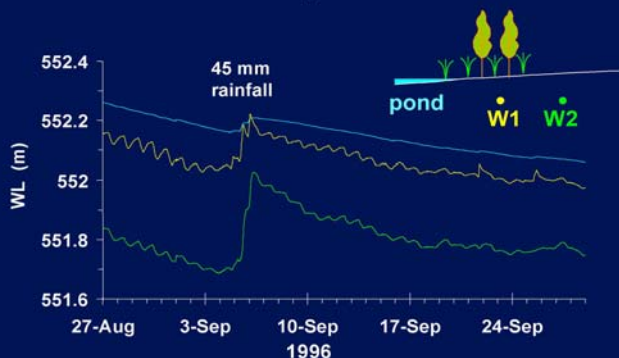
Shallow groundwater exchange is a major component of water balance.

Groundwater flow in low-K till is very slow, very minor component of water balance.

van der Kamp & Hayashi (2009. *Hydrogeol. J.* 17: 203-214)

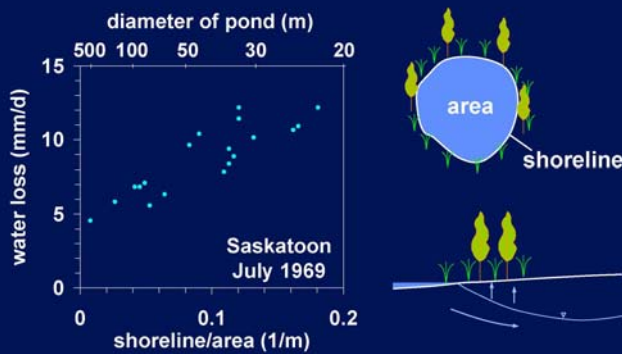
一つの湿地を拡大して取り上げると、湿地があってその周り植生が生い茂っており、さらにその周りが畑になっている。つまり、湿地の中に池があり、地表面の約5m程度は透水係数が割と高い。一方、5mを過ぎると徐々に低くなっている。その中に地下水水面がある場合は、地下水が自由に動ける範囲はわずかであり、その動きは、周りの木とか草花によってコントロールされているということがわかる。それより下については、多少地下水は移動するが、湿地の水収支を考える場合はほとんど重要でない。

Effects of Riparian Trees on Water Level Wetland S109, St. Denis NWA



池を青、黄色が池に近い観測井、緑が池から遠い観測井の水を示したものであり、池が一番高く黄色がやや低く、緑はさらに低い。また、水位は日変動を示し、昼間は下がって、夜上がっているのは、樹木が影響している。昼間は地下水を吸うため地下水水面が下がり、夜になると光合成をやめるので、水が池からリカバーする。霜がおいて樹木が休止した状態になると日変動が消えてしまう。

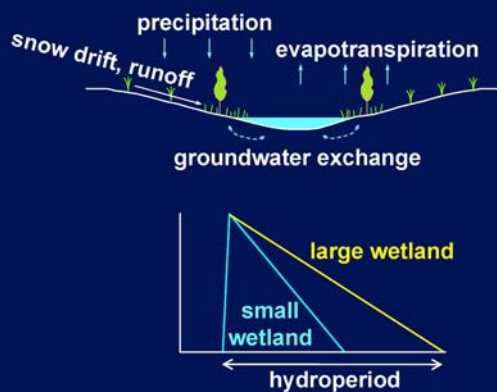
Rate of Water Loss Increases with Shoreline Re-analysis of 35 wetlands from Millar (1971)



Saskatoon July 1969
van der Kamp & Hayashi (2009, *Hydrogeol. J.* 17: 203-214)

樹木がそのように影響するので、この小さな湿地の場合、面積に対して樹木の生えている面積が大きい。逆に大きな湿地があって木が生えていると、面積に対するその割合が低い。つまり、面積に対する周の長さが大きな湿地ほど低くなるため、大きな湿地ほど水が岸辺の木によって失われる度合いが少なくなる。ということは、大きな湿地ほどハイドロピリオド：表面の水がある期間が長くなる。

Water Balance of Prairie Wetlands



したがって、湿地の生態系はその大小によって全く違うということである。生態学者によると、湿地は大小の両方が必要で、小さな湿地ですぐ乾いてしまうのは、泥の中の有機物質が酸化されて栄養になりやすく、逆に大きな湿地はいつでも水があるので、そこには鴨がおりてきて水生昆虫が食べられるなど、そのような多様性が必要との事である。例えば1haの小さい湿地が10個ある場合を1つの貯水池で置きかえたら生態的な役割が全く失われてしまう。環境コンサルタントを考えていく場合は、このような視点が大切である。

Implications of the Wetland Study

Prairie wetlands exist because of the runoff water from uplands.

→ Restoration/preservation of wetlands should consider the wetland-upland complex beyond a narrow riparian zone.

Permanence of wetland ponds depends on:

(a) Runoff input – size of drainage basin

(b) Summer recession – groundwater exchange

→ SW-GW interaction controls the variability in wetland hydrology.

→ Biodiversity depends on “hydro-diversity”

湿地がなぜ半乾燥期に存在するかというと、融雪の流出水がその湿地の中に流れ込んでいるからである。湿地を保全したり他の湿地で置きかえる場合には湿地だけではなく、周囲の土地の状態、土地利用の状態を考慮する必要がある。ハイドロピリオド、つまり、この池が2ヶ月続くのか、10ヶ月続くのかというのは、雪解け水がどの程度流入するかということと、表流水と地下水の相互作用で決まる。バイオダイバーシティ(生物的多様性)という言葉が使われるが、生態学者によると、様々な生き物が様々な形で存在していることが必要なのである。この場合はハイドロダイバーシティであり、水文学的多様性に依存しているということである。したがって、環境問題を考える場合は、水文学的多様性を保ちながらプロジェクトを進めていく必要がある。

SW-GW Interaction in Geo-Environmental Education: Challenges and Opportunities

The subject is highly interdisciplinary.

- Hydrology, hydrogeology, micro-meteorology
- Aquatic ecology

→ Emergence of “biogeoscience” and “eco-hydrology”.

Students need to be educated in diverse fields of studies. How do we balance the depth and breadth of training?

This is an excellent opportunity to integrate geoscience with bioscience, and attract more students to geo-environmental science and engineering.

このように、この分野は従来の土木分野に比べて、新しい考え方をを持った学生を引きつけることができる。エコロジーというのは、本来は生態系の学問であり、その分野に興味のある学生を引きつける機会もある。また、研究環境の改善や研究資金をもっと得るためには、有権者を教育して、政治家を動かすことが必要である。そのためには、まずは小・中学校、高校から始める必要がある。

カナダでは地学とか水文学は中学高校のカリキュラムには無く、水の学問というのは生物学の中で教えられている。水文のことを高校生に理解させるためには生物の先生をまずトレーニングしなければいけないことから、高校教員を集めて、水文学や生態学を教えるプログラムを始めている。具体的には、近くの川に行き行って観測井を設置したりしている。また、少しでも一般の人に研究の面白さを理解してもらうことが重要である。

Summary

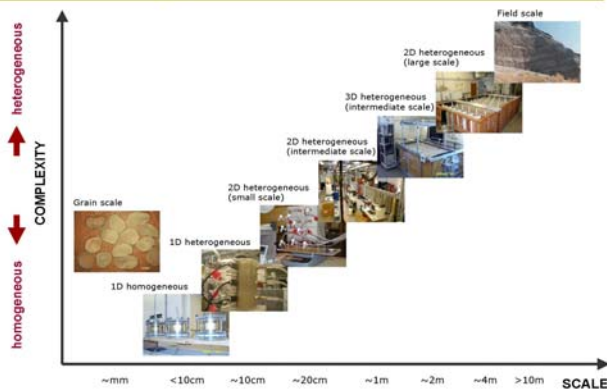
- SW is almost always connected to GW.
- SW-GW interaction has many important applications in geo-environmental engineering.
- Students need to have a broad knowledge base to understand the SW-GW interaction and its environmental implications.
- The scientific research community needs to reach out to the public to gain their support.

まとめとして、地下水と表流水の相互作用が非常に大事だという認識の基で環境問題を扱う必要があるということである。また、地下水、表流水は非常に学際的な分野である。水文学の一つをとっても表流水、土壌物理学、水文地質、や地下水学も知らなければいけない。例えば樹木の蒸発を取り扱うには、気象学的なことも知らなければいけなく、幅広い知識が要求される。その上に生態学のことわからなければならない。それゆえ面白いこともあり、例えば最近5年程で、バイオジオサイエンス(生物地球科学)、エコハイドロロジー(生態水文学)という言葉が使われている。大学教育においては、幅広い知識とある一つの分野の中でどれだけ深く習うかの両立が必要である。

第3章 地盤・地下水環境特性計測のためのセンサー技術

3.1 CSMの研究紹介

Various experimental scales

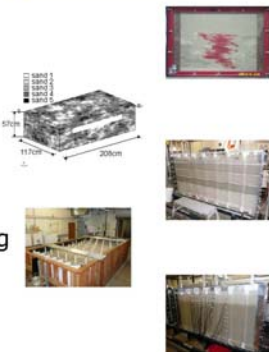


横軸に物理的なスケール、縦軸に概念的な複雑さの度合いを表している。

まず、均質な要素試験(10cm程度のスケール)から始めて、一次元の不均質、二次元の不均質、二次元の不均質で2m程度のもの、それからより大きな4~5m程度のものを進めている。最近では粒子スケールをキャットスキャン、CTスキャンのイメージを基に研究を始めている。これは均質尺度合いから行くと逆に難しくなると判断できるため、少し上に位置している。

Current research projects

- NAPL migration/removal
- Aquifer characterization
- Vapor intrusion
- Intelligent wireless sensing
- Landmine detection



プロジェクトは、NAPLや油、有機系による地下水汚染に長年取り組んでおり、地盤のキャラクタライゼーションは三次元土槽を用いている。また、ペーパー・イントルジョンというような、地盤中を有毒なガスがどのように流れていくかを解明する研究をしており、建物に流入するガスの影響を評価する事を目的としている。また、最近の研究では、インテリジェント・ワイヤレス・センシングに取り組んでいる。センサー同士がコミュニケーションし、普段は電源をオフにしてセーブしているが、一つが何かを発見した時点で、その周りのセンサーと会話しながらスイッチを自分で入れるシステムである。さらに、ランドマイン・ディテクション(地雷探査)の精度を上げるための一環としてのごく表層の地盤推定を実施している。

3.2 地雷探査技術への応用

Landmines

- The United Nations (UN) estimates that it will cost over \$33 billion to clear the approximately 100 million landmines strewn throughout 64 countries including Asia (DOD, 2002).
- The United Nations and the U.S Department of State declared that landmines are "one of the most widespread, lethal, and long lasting forms of pollution" (GICHD, 2003).

DOD (2002), Developing science and technologies list: Section 2: Armaments and energetic materials technology. In DOD (ed.) Defense Threat Reduction Agency, Ft. Belvoir.
Geneva International Centre for Humanitarian Demining (GICHD) (2003), A guide to mine action. GICHD, Geneva, Switzerland.

国連によると地雷の除去には3兆円程度の費用が掛かると言われている。カンボジアやアフガニスタンなど64の国々で計1億個の地雷が埋められているようである。つまり1つ回収するのに、平均で300~1,000ドル程度の計算になる。

また、地雷というのは非常に長期間、地盤をかなりの度合いで汚染しているものである。地盤汚染というと、薬品や油が想像されるが、地雷を地盤の汚染として考えているという文章は非常に興味深い。

Landmines

- Target size = 10~20 cm
- Depth = about 10 cm to top of mine (shallow)
- Detection methods:
 - RADAR (electromagnetic)
 - INFRARED (thermal)



対人地雷は10cm程度のものが地表面から10cm程度のところに埋まっている。発見方法については、基本的にはレーダーあるいは赤外線が用いられる。物理的には電磁誘電法であったり、熱特性を測ったりする方法も用いられている。基本的にレーダーというのは地盤中の水分がどのように時間的に、空間的に分布しているかが測定できる。赤外線は逆に、土の温度によって左右され、その土の温度は実は土の含水量に影響されている。

Shallow subsurface

- **RADAR** → affected by **spatial and temporal soil moisture distribution**
- **INFRARED** → affected by **spatial and temporal soil temperature distribution** (depends on soil moisture)
- Soil moisture/temperature → affected by **heterogeneity** such as **soil pockets, rock, other objects.**
- Need for understanding **how water is retained** in the shallow subsurface
- Under various **surface conditions** (wind, rain, heat etc.)
- **Fine resolution needed**

土の含水量と温度が何に影響するかというと、土の不均質性に影響される。そのような状態で、正しく、精度高く、地雷を発見する方法を考えたときに、どのように保水されているかを調べていく必要がある。それも地表にごく近いので、風雨や日光の影響など表面の影響を受ける。そのため、様々な条件のもとで、どのように保水されているのかを時間的かつ空間的に把握するのが目的である。ここで強調する点は、非常に小さい解像度が要求されることである。10cmぐらいのものを発見するためには、それ以下の解像度で把握する必要があるため、水文学の分野から見ると非常に特殊である。

3.3 土中水分計

Methods

- Gravimetric method
 - **destructive**
- Gamma-ray, X-ray
 - **radiation**
 - **Large probe/device**
 - **expensive**
- Dielectric methods;
 - GPR → **non-destructive**
 - **sensors** (TDR, ECH₂O sensors, Theta probe etc.)
 - **least-destructive, relatively small, inexpensive**

土の含水量を測るには、オープンに入れて重量を測る方法から始まるが、破壊的であるため再現性がない。ガンマ線、エックス線というのは、放射線の問題やプローブが大きかったり、現場への運搬が困難であったり、非常にコスト的に高い。そこで、近年よく用いられる方法が誘電法である。GPRは基本的には地表からレーダーで中を探るため非破壊で探査が可能である。センサーと誘電法を用いたものには、TDRと呼ばれるもの、最近では、エコ・プローブと呼ばれるものが商品化されている。別の会社からもシートプローブとか、多くのセンサーが発売されている。これらのセンサーは、非破壊ではないが破壊的でもないもので、リストというふうに表現した。またコスト的にも安いという利点がある。

Soil's dielectric properties

- Soil → mixture of three phases; **solid, air, & water**
- Dielectric constant K ;
 - determines electromagnetic wave **transmission velocity**
 - $K_{solid} = 4\sim 6$ (typical mineral grains)
 - $K_{air} = 1$
 - $K_{water} = \sim 81$
- Apparent dielectric constant (K_a) → strong function of water fraction

基本的に土は土粒子と水と空気の3層の混合体であり、誘電法では、誘電率という物性が基本的に大事である。そのダイレクトリック・コンスタント、 K というものは基本的には電磁波がその物質の中を伝播する速さを決めるものである。3層なので、土、空気、水の層があるが、それぞれが固有の誘電率を持っている。一般的には普通の有機土に関しては4~6のオーダーであり、空気は1、水は温度によって若干前後するが、約80である。つまり、水の誘電率はほかの2層に比べてオーダーが違うので、この3層の混合体としては、混合体としての土の誘電率というのは、水分量によって支配される。

Time domain reflectometry

- Since *Topp et al.* [1980]
- Simple probe, easy to install
- **Unique relationship** between K_a and θ
$$\theta = 4.3 \times 10^{-6} K_a^3 - 5.5 \times 10^{-4} K_a^2 + 2.92 \times 10^{-2} K_a - 5.3 \times 10^{-2}$$
- **Still widely used.**



これがTDRプローブと呼ばれるもので、1980年にToppが論文を発表して以来、急激に有名になった手法である。非常に簡単な構造で、比較的設置も容易である。この論文の特徴は、様々な土壌に対して、含水量 θ と3層としての誘電率の間には3次式の関係があるのを示したことである。それ以来、30年経つが、未だに頻繁に使われている式である。

Capacitance sensors

□ ECH₂O sensors

- EC-5 (soil moisture)
- TM (soil moisture, temp)
- 10HS (soil moisture, 10cm)
- 5TE (soil moisture, temp, EC)
- New stainless steel sensor to be released soon



最近よく使われてきているデカゴン社から発売されているセンサーがある。今のところ4種類センサーが出ている。それぞれ、含水量だけを測るもの、温度や電気伝導を測ったり、大小のパラエティーに富んだセンサーが出ている。最新の情報では、ステンレスのセンサーを発売するようである。これとは別に、キャンベルCS616というのが、かなり主流で使われてきており、こちらの最新の情報では、650, 655という長さの違う電気伝導度と温度を測るのが近日中に発売されるとの事である。

Calibrating the sensors

□ Objective:

Sensor output X → want to find water content θ

□ For TDR,

Measure $X=K_a$ and convert to θ

1) using known K_a - θ relationship

$$\theta = 4.3 \times 10^{-6} K_a^3 - 5.5 \times 10^{-4} K_a^2 + 2.92 \times 10^{-2} K_a - 5.3 \times 10^{-2}$$

2) develop your own K_a - θ relationship

センサーのキャリブレーションは、まずセンサーが何かアウトプットするが、それを求めたいものに変換する。つまり、センサーが X というアウトプットを出してきたら、この場合にはそれを水分量に変えるものである。TDRの場合には、センサーが誘電率(K_a)を出力するのがほとんどであり、その場合はToppの3次式を使うか、自分で別途求めておいた関数で含水量を求める。

Calibrating the sensors

□ What about sensors with $X \neq K_a$?

□ One-step (direct) calibration

e.g., Topp et al. [1980, WRR], Inoue et al. [2007, Am J Environ Sci], Sakaki et al. [2008, WRR]

□ Two-step (indirect) calibration

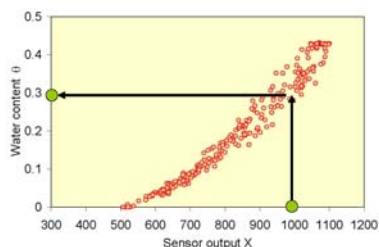
e.g., Jones et al. [2005, VZJ], Blonquist et al. [2005, VZJ], Bogaen et al. [2007, J. of Hydrology]

一方、他のセンサーで誘電率を出力してこないセンサーの場合には、ワンステップ・キャリブレーションという方法と、ツーステップ・キャリブレーションという方法の2種類が考えられる。

One-step calibration

□ Directly relate X to θ

- X - θ relationship required



ワンステップ・キャリブレーションの特徴はセンサーのアウトプットを直接含水量に変えるという方法である。センサーの出力値と含水量の関係を事前に求めておいて、センサーが例えば、1,000というアウトプットを出してきたとすると、これを含水量を直すためには、この関係を使うというものである。

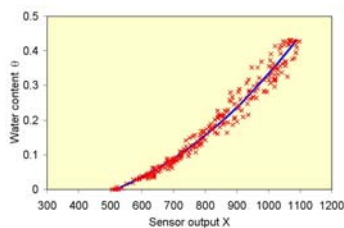
Two-step calibration

- **STEP 1) obtain X and relate to K_a**
 - Prepare **standard solutions** with known K_a
 - Develop X - K_a relationship
 - K_a cross-checked using **reference device** (network analyzer)
 - **Accuracy of K_a cross-check?**
- **STEP 2) convert K_a to θ using known K_a - θ relationship**
 - K_a - θ relationship applicable to your soil?
- We focus on **one-step** calibration.

ツーステップ・キャリブレーションは、まず最初にセンサーアウトプットと誘電率の関係を求めておいて、様々な誘電率を持った液体、標準溶液を作成して何点を取っておいて曲線を作成する。問題点としては、その標準溶液の誘電率を別の機械で測ったり、別の周波数で別の機械で測ったりするものなので、精度に若干の疑問が残ると、ステップ2として、センサーのアウトプットを K_a に直して、 K_a から θ に変換する際に3次式を用いることが挙げられる。

Conventional one-step calibration

- Record sensor output X at various θ
- Fit mathematical form (e.g., linear, quadratic, etc.)



- Time-consuming
- Sensor-to-sensor variability not accounted for [Sakaki et al. 2008, Resenbaum et al. 2009, VZJ, in press]

基本的に、ワンステップ・キャリブレーションは、多くの点を別途求めておいて、そこに関数をフィットして実際の計測で使っていく。ただし、この点を取るのに非常に時間がかかるという問題がある。

Three-phase α -mixing model

- Solid, air & water
- volume fractions
- $$K_a^\alpha = (1-\phi)K_{solid}^\alpha + (\phi-\theta)K_{air}^\alpha + \theta K_{water}^\alpha$$
- α : **geometry factor**; how three phases are geometrically mixed
 - ϕ : **porosity**
 - For typical mineral soils, $\alpha = 0.5$ (random mixture)
 - Works well for TDR ($X=K_a$)
 - Need to know K_{solid}

そこで、古くから使われている式で、土の誘電率は土粒子と空気、水の誘電率の体積百分率を掛けたものに α というパワーを掛けたもので表される3相混合モデルを用いる。ここで α というのはジオメトリ・ファクターと呼ばれている。土のように、土粒子と水と空気がランダムにまざったような場合には、一般的に α が0.5と言われており、基本的にはTDR等には精度よく使えると言われている。

Two-point mixing model

- *Robinson et al.* [2005]
- Based on **two extreme points** (K_{dry} & K_{sat})

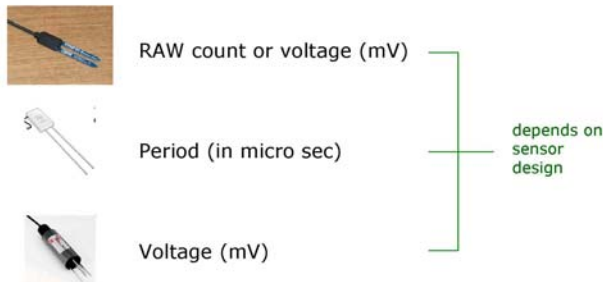
$$\sqrt{K_a} = (1-\frac{\theta}{\phi})\sqrt{K_{dry}} + \frac{\theta}{\phi}\sqrt{K_{sat}}$$

- K_{dry} & K_{sat} are readily measured
→ **More practical** than 3-phase mixing model
- K_a - θ → **sole property of soils**
- Works well for TDR ($X=K_a$)

問題点は、土粒子の K_a を求めないといけないことである。ここでロビンソンが、これを解決するために、絶乾状態と飽和状態での誘電率を求める式を提案しており、この式では α が0.5である。土粒子の K_a の項が無くなっているので、3相の式より若干使い勝手が良くなる。つまり、この2つの K_a は簡単に求まる。それから、 K_a と θ の関係は、基本的には土の特性になる。このモデルもこの論文によると、TDRには非常に精度よく使えると言われている。

Sensors other than TDR

- Often sensor output $X \rightarrow$ not Ka



現在使用しているエコ・センサーは、 Ka を出力しない。その代わりに、ローカウントと言われる値を出力したり、電圧を出したり、キャンベルの場合には、ピリオドという時間の単位で出力値を示す。シートプローブの場合にも、電圧で出力される。これらの値というのは、基本的にはセンサーがどのように設計されているかという面に依存してくる。

Sensor design

- Conventional TDR probe

- bare metal electrodes
- simply serves as waveguide
- $X-\theta$ relationship \rightarrow soil property



- ECH2O EC-5

- fiberglass-covered electrodes
- circuitry in the sensor head
- sensor head sensitivity [Limsuwat et al., 2009]
- $X-\theta$ relationship \rightarrow specific to sensor design



基本的なセンサーデザインは、TDRの場合にはメタルのロッドが完全に電極というよりは電線のイメージである。その電線に沿って電磁波が流れる、伝播するが、例えば、エコ・プローブのEC-5の場合には、青い部分の基盤の中に電極が埋設された形になっている。このセンサーヘッドの部分は電気回路が入っており、それ自体が若干の感度を持っていたりするので、そのようなものを全て包含した形でセンサー出力と含水量の関係を求めないといけない。つまり、この関係は、センサーのデザインによって変わってくるということになる。

Two-point α -mixing model

- Derived from 3-phase mixing model [Sakaki et al., 2008]

$$X^\alpha = (1-\phi)X_{solid}^\alpha + (\phi-\theta)X_{air}^\alpha + \theta X_{water}^\alpha$$

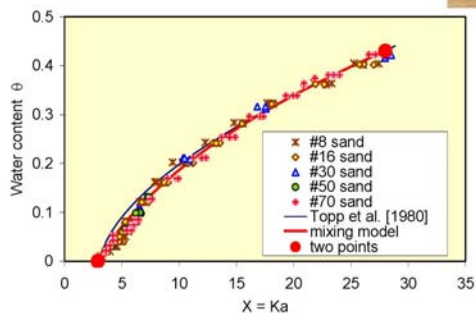
$$X_a^\alpha = \left(1 - \frac{\theta}{\phi}\right) X_{dry}^\alpha + \frac{\theta}{\phi} X_{sat}^\alpha$$

- General form of Robinson's model ($\alpha=0.5$)
 $\alpha = 0.5 \rightarrow$ soil property
- α : sensor characteristics are lumped
 \rightarrow specific to sensor type

先ほどの3相混合モデルを数学的に変形していくと左式が得られる。この形で α が0.5の場合には、ロビンソンのモデルと全く等価になるが、ここで重要なのは、 α がジオメトリ・ファクターという定義であると、土粒子や水がどのように配置しているかで決まるが、ここで言う α は完全にそれとは物理的な意味が違い、センサーのデザイン、センサーそのものが持っている特性というのが全てこの α の中にひっくるめて入っている。したがって、 α というのはもはや0.5ではなく、センサーによって値が変わってくるということになる。

Conventional TDR

- $\alpha = 0.5$, property of soil

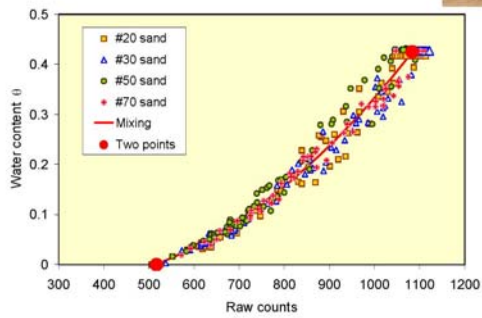


例えばTDRの場合は実際に5種類の砂を使って、センサーの出力値、つまりこの場合は Ka であるが、それと水分量の関係をプロットすると左図のようになり、赤線が $\alpha=0.5$ を使った時の式になる。

同じような砂を使って、エコ・プローブで計測すると逆の曲線となる。これはもはや、砂の特性というよりはセンサーの特性も全て含んだ結果、センサーの出力と含水量の関係がこのように示されるということである。このセンサーに限って言う α の値は2.5になる。他のセンサーに関しても全く同じような結果になり、ただしTMというセンサーに関しては α は4.0、ほかの10HSという大きなセンサーだと4.6、これも完全にセンサーによって変わってくる。より新しい5TEというセンサーだと1.2であり、キャンベルのCS616の場合には2.3である。最後にシートプローブは若干問題点もあるが空隙率45%ぐらいの

ECH2O EC-5

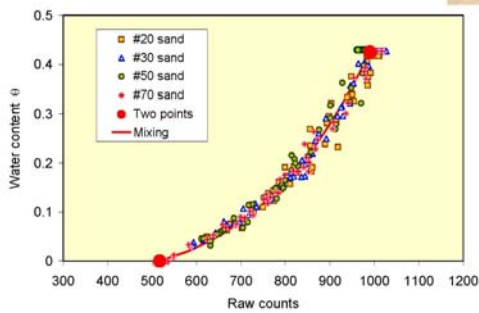
□ $\alpha = 2.5$, sensor-type specific



位置で計算すると1.2程度となる。しかし、このシータブローブというのは、空隙率が50%を超えるような土壌の場合には、精度が随分下がってくるということになる。

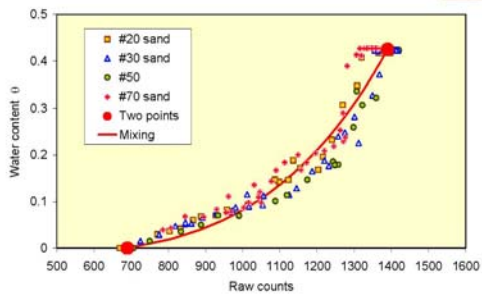
ECH2O TM

□ $\alpha = 4.0$, sensor-type specific



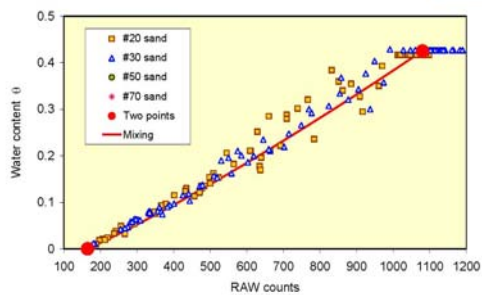
ECH2O 10HS

□ $\alpha = 4.6$, sensor-type specific



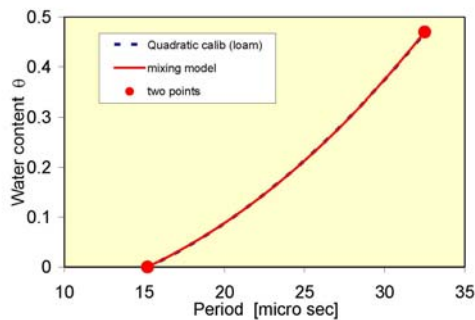
ECH2O 5TE

□ $\alpha = 1.2$, sensor-type specific



CS616

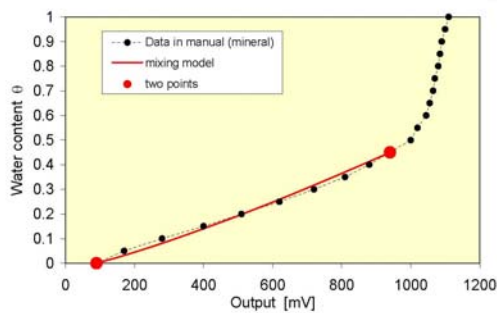
- $\alpha = 2.3$, sensor-type specific



Theta probe

- $\alpha = 1.2$, sensor-type specific

- Lower accuracy for porosity > 0.5?



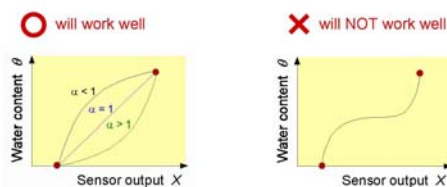
Advantages of two-point model

- Requires only **two extreme points** X_{dry} & X_{sat}
 - → easy to measure
- No intermediate $X-\theta$ data needed
 - → α describes the intermediate $X-\theta$ curvature
- **Sensor-to-sensor variation** easily implemented
 - → sensor-specific calibration

この2点モデルの長所は、絶乾と飽和状態での2点だけを測るとその途中の極率の部分は既に α という形で表されるので、ユーザー側は2点を測れば良いことである。つまり、絶乾と飽和状態のサンプルは、比較的容易に作成出来るので、キャリブレーション・モデルとしての使い勝手も比較的良いと言える。逆に、短所としては、曲率あるいは直線、逆の曲率の場合には比較的うまく乗るが、高次の曲率の場合には、余り向いていないことである。

Disadvantage of two-point model

- Not suited for $X-\theta$ with higher non-linearity



体積含水率は間隙率が直接掛かっているので、その精度がそのまま θ の精度にも効いてくるということになる。したがって、これを除いた部分は飽和なので、飽和だけを見たいときには、これだけで正確に測れるが、体積含水率を測りたいときには、間隙率を正確に測らんと精度が低下するという事である。

- Accuracy also controlled by porosity

$$\theta = \frac{X_a^\alpha - X_{dry}^\alpha}{X_{sat}^\alpha - X_{dry}^\alpha} \phi$$

3.4 土中の間隙空気圧の測定方法

Soil “water” pressure

- Tensiometry
 - “hydrophilic” ceramic cup
 - well-established
 - well-documented
 - readily available

- Water potential sensor (MPS-1)
 - relatively new
 - accuracy suited for field application

- Based on “hydrophilic” porous materials



水圧の測定はテンシオ・メーター等、様々な方法があるが、テンシオ・メーターは、素焼きのカップ、親水性（ハイドロフィリック）のカップを砂中に入れて測る方法であり、基本的にどのテキストにも載っており、商品化もされていて容易に入手でき、使用も簡単である。ただし、左図のセンサーに限っては室内実験レベルでの精度はほとんど無い。ただ、どちらも親水性の多孔質物質を使った構造になっている。

一方、湿潤した土壌中の空気圧測定については、調べてみると以外にも情報があまり無い。その理由としては、空気圧が基本的に大気圧と同じと仮定されている場合が多いというのが一つである。ただし、後述の実験では、空気圧とをいつも無視していると解けない問題があるという一例である。ここで、水圧は親水性の材料を使うが、空気圧を測る場合には、逆に疎水性の材料を土壌中に入れる必要がある。

Soil “air” pressure

- Often assumed to be atmospheric
- Under certain conditions, air cannot be neglected
- “Hydrophobic” material required
- No well-established method
- We tested a series of materials/treatments

Materials & treatments

4 materials & 4 treatments

	Porous materials			
	(1) Porous ceramic cup	(2) Sintered stainless steel cup	(3) Porous glass disc	(4) Woven PTFE* sheet
A) Lenhard & Parker [1987]	✓			
B) Silicone-based water repellent compound			✓	
C) Fluoride-based water repellent compound	✓	✓	✓	
D) Super Rain X			✓	
E) No treatment				✓

✓ Tested in this study
* PTFE sheet is hydrophobic

疎水性の材料として4つの材料を選定した。1つは、普通のセラミックのポーラスカップ、ポーラスのステンレス・カップ、ガラス・ディスク、ポリフロンペーパーである。ポリフロンペーパーはテフロンシートであり、材料特性上、もともと撥水性の材料なので、特に化学的な処理はしていない。ただし、こちらの3つは、もともとそのままだと親水性な材料であるから、それをハイドロフォビックにする必要がある。そのために、ここに示したA～Dという4つの方法を調査した。

Aはオイルの圧力等を測るために開発された方法であり、数種類の化学薬品を使って素焼きのカップを撥水加工するという方法である。それから、シリコンベースの撥水コンパウンド、フッ素ベースの防水コンパウンド、ガラスディスクには車のウインドウ・シールドに使うレインXを塗布した。これらの4種類の材料とノードリートメントで7種類組み合わせを調査した。その7種類に対して、まず接触角を測って、単純にハイドロフォビックの程度を測定した。

それから、その材料がどれだけの水圧に耐えられるかを、耐水圧試験で測定した。さらに、もともとぬれている材料が空気が入ってきたときにすぐ反応するかという点についても併せて検討した。

Performance tests

- Contact angle
 - How hydrophobic?

- Water entry pressure
 - Resistance to water pressure?

- Time lag
 - How quickly does it respond when air comes in?

Contact angle

□ Air-dry condition

(1) Ceramic



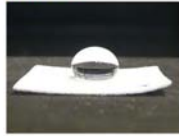
(2) Stainless steel



(3) Porous glass



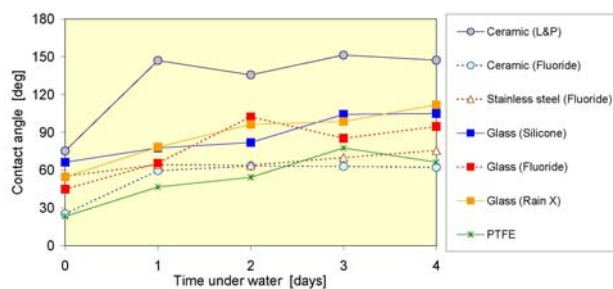
(4) PTFE



それぞれの材料(撥水加工したポーラス・カップ, ステンレス, ポーラス・ガラス, それからテフロンシート)の濡らしていない状態の写真を示す。

Contact angle

□ Under wet conditions



Results: Fluoride-treated & PTFE remained hydrophobic.

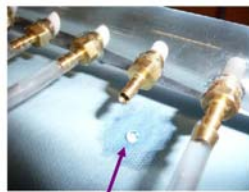
この状態で接触角を計測した後, 1回水につけて1日置く。また接触角を測るという具合に4日間繰り返した結果を示す。横軸が時間, 縦軸がコンタクト・アングルである。特筆すべき点として, 一番顕著な傾向は, セラミックでレナード・アンド・パーカーのものは, すぐに濡れて使用できないが, その他のものはあまり差異は無いが, 何とか90度前後, あるいはそれ以下程度の角度を示した。

Water entry pressure

□ Increase water pressure gradually



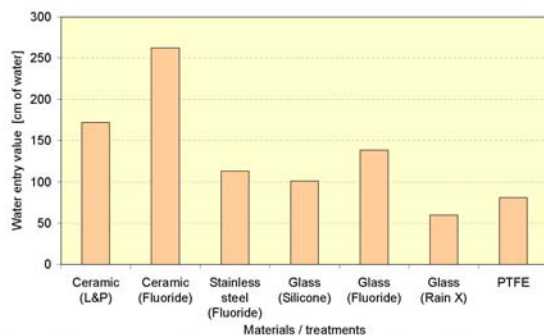
Water pressure increased gradually



Water penetrated

上述の試験で特に突出して性質の良いものは見られなかったため, 次はどの程度の水圧に耐えられるかの試験を行った。様々な材料をそれぞれ3つずつアクリルパイプに設置し, パイプ中の水圧を徐々に上昇させた。耐力を超えたところで, あるところから漏れてくるため, その際の水圧を記録していく方法で実施した。

Water entry pressure

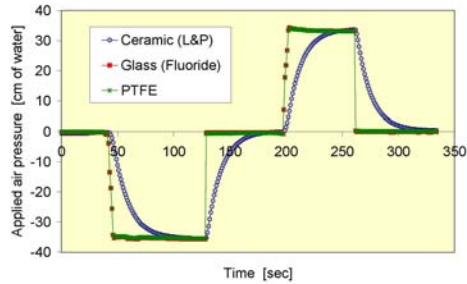


Results: Fluoride-treated & Ceramic (L&P) resisted over 100 cm of water pressure.

その結果, レインXは意外と耐力がなく, 60cm程度で水が漏れてくる。ポリフロンペーパーもそれほど耐力はなく80cm程度であった。それ以外のものは1mを超え, 顕著なのはセラミックでフッ素ベースのコンパウンド処理をした場合, 2mを超える結果となった。

Time lag

- Initially saturated soil → drain → apply +/- air pressure



Results: Under $P_{water} = 10\text{cm}$, only ceramic (L&P) showed time lag.

次に、タイムラグのテストを実施した。もともと濡れた土にこれらの材料を入れておいて、排水し、その直後に人工的に30cmの空気圧と静圧を掛けた時の挙動を観察した。大抵の材料は直ちに反応するが、セラミックだけは若干のタイムラグが見られた。

Performance test summary

- Based on performance tests and other factors, **glass+fluoride** was selected

Material (treatment)	Performance tests			Other factors		
	Test 1: Contact angle* [deg]	Test 2: Water entry pressure [cm]	Test 3: Time lag	Cost (material/treatment)	Easiness of treatment	Inside volume**
Ceramic (L&P)	147	172	large	\$\$/\$\$	difficult	medium
Ceramic (Fluoride)	62	262	small	\$\$/\$\$	easy	medium
Stainless steel (Fluoride)	76	114	small	\$/	easy	medium
Glass (Silicone)	105	101	n/a	\$/	easy	small
Glass (Fluoride)	95	138	small	\$/	easy	small
Glass (Rain X)	112	60	n/a	\$/	easy	small
PTFE	66	81	small	\$/0	n/a	minimal

* After 4 days

** Smaller inside volume preferred for higher sensitivity

3つの材料に対する接触角と、ウォーター・エントリ・プレッシャー、それからタイムラグの3試験に加え、値段と撥水加工の容易さ、材料中のポリウムをまとめる。なお、ポリウムというのは、テンシオメーターとして使うときの感度に効いてくるので、それが小さければ小さいほうが良いもので、この6項目を総合的に判断して、今回はガラスのフッ素ベースのものを選択した。そして、地雷の研究における、スケールの小さな場合の保水性のテストに用いた。

3.5 高分解能の水分保持特性

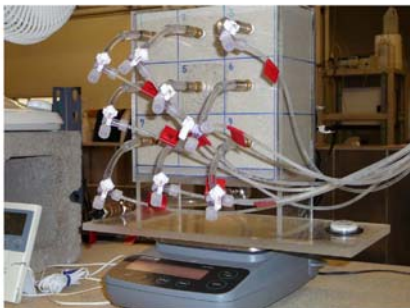
Utilizing sensors

- Soil moisture θ → EC-5
- P_{water} = tensiometer (porous cup)
- P_{air} = hydrophobic glass (fluoride-treated)

ここで計測したのは、含水量はEC-5という一番小さなセンサーを使用し、水圧に関しては通常のテンシオメーターを使用した。供試体として細砂が詰めてあるが、中央の5番のブロックだけ粗砂を詰めている。これを排水したときに、非常に興味深い挙動が得られたが、この実験を行う際に、空気圧を測る必要が出てきた。

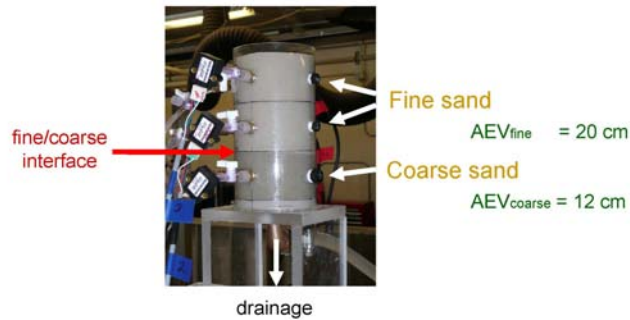
Behavior in soil pocket

- A soil block embedded in background soil



1D heterogeneous drainage

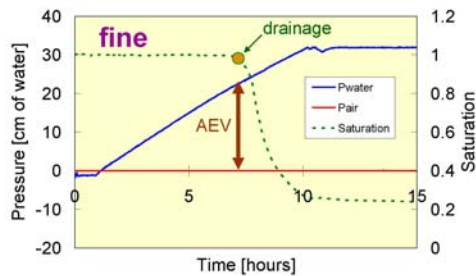
- Monitor P_{water} , P_{air} , θ
- Gradually increase suction at bottom



そこで、中央部分を取り出した一次元のカラムで実施し、空気圧に関しては先のポラスガラスを用いた。上中層には細砂、下層に粗砂が入っており、それぞれの空気侵入値は20cmと12cmである。初期状態で飽和であり、下から非常にゆっくりと排水させた。

Fine sand behavior

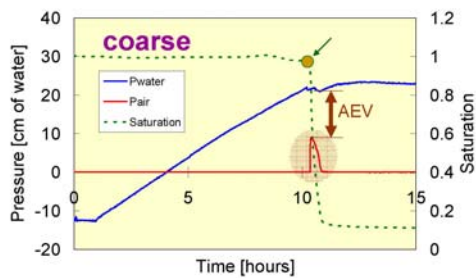
- Drained at its AEV = 20cm
- P_{air} → remained atmospheric



初期は飽和しているのので、下から排水していくに従って空気が入っていく。横軸が時間、縦軸が水圧、一方に飽和度を取っている。一番上の層の結果は、水圧が徐々に上がっていく状態が測られており、細砂の空気侵入値の20cmを超えた際に初めて排水が開始した。空気圧はゼロなので大気圧に等しく、排水中も大気圧に等しいという結果になった。

Coarse sand behavior

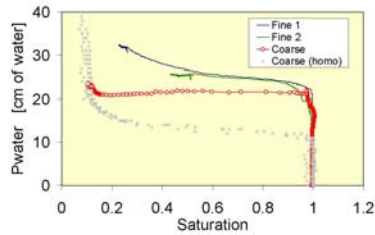
- Drained when air reached fine-coarse interface
- P_{air} showed a spike



中層でもほぼ同様の挙動が見られ、下層の粗砂については、空気侵入値が小さいので、早く排水したいができない。その理由は、空気が無いからであり、例えばチャーズの式で不飽和の浸透を解く際、空気圧は大気圧である。ただこのように特殊な場合は、空気の存在が効いてくる。この層は空気が上から入ってきて、初めて到達してから排水できる。その際の水圧の挙動を見ると、ずっと時間とともに上がっていく。上がっていった水圧が約20cm程度になったときに、非常に早い排水を示す。ただし、空気圧が非常に短い時間ではあるが、スパイク状の挙動を示す。

$P_{\text{water}} - S$ curves

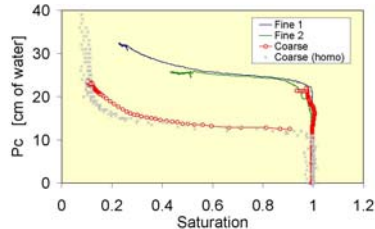
- Assuming $P_{\text{air}} = 0$
- Bulk retention behavior → quite different



- "Effective" $P_c - S$ curve → Solve Richards eq. [Vasin et al., 2007]

$P_c - S$ curves

- $P_c = P_{\text{air}} - P_{\text{water}}$
- $P_c - S$ curve follows that for the coarse sand



- Richards equation approach "fails" for some cases.

キャピラリー・プレッシャーの定義は、もともと $P_{\text{air}} - P_{\text{water}}$ なので、 P_{air} がいつも大気圧と仮定していると、その部分を無視することとなる。このグラフの縦軸は、厳密に言うと水圧だけをプロットしたものであり、グレーの点線は別の実験で計測した粗砂のリテンションカーブである。なお、赤線が先の実験で水圧のみをプロットしたときの粗砂のリテンションカーブである。青と緑は細砂のリテンションカーブで基本的に別途均質状態において測定したものと同一形になっている。水圧のみをプロットした場合の推定は容易であるが、水圧が20cmまで排水できない、つまり空気がないから排水できないという状況になり、排水後は最小含水量まで到達することになる。最近ドイツのグループが発表した論文では、粗砂の挙動をそのまま入力値として用い、それをイフェクティブ・リテンションカーブとして、基本的にリチャードの式を解いて、この挙動を再現している。一方、縦軸が P_c 、つまり $P_{\text{air}} - P_{\text{water}}$ をプロットするとより正しいキャピラリー・プレッシャーをプロットしている。つまり、ほとんどグレーの点線に沿っており、若干途中でタイムラグがあるが、要はリテンションカーブというのは構成則である。つまり、土と水で決まる特性であって、不均質だから違うというものではないことがわかる。ここで言えるのは、こういう問題に関してはリチャーズ・アプローチは使えない、つまり、2層の空気と水の式を解く必要があるということである。しかし、これぐらいのスケールの話は地雷探査というスケールで見ているから大事なのであって、恐らく水文学、農業では必要無いかもしれない。

Local water retention summary

- **Experimental method:**
 - To capture rapid air flow, hydrophobic material with a small time lag needed.
 - Glass with fluoride-based compound worked well.
- Air must be available for water to drain.
- P_{air} cannot be neglected in some cases.
 - Richards equation approach fails.
 - Two-phase flow equations must be solved.
- $P_c - S$ corrected for P_{air} is "constitutive" relationship.

まとめとして、今回開発した空気圧測定方法は良好で、水が排水するためには、無視されがちだが、空気が無いと水は排水できないということが言える。非常に稀なケースではあるが、空気圧を無視してはいけないケースがある。そういう場合には、リチャーズ式のアプローチは使わず、2層流の式を使う必要がある。それから、空気圧をきちんと考慮したリテンションカーブは、水と土とで決まる構成則であるということである。