

5. 地盤中の物質移動 侵食・浸透・遮水

熊谷 浩二
八戸工業大学

1. はじめに

本報告では、地盤中の物質移動（侵食・浸透・遮水）セッションで発表された合計9編の論文No.432-440について総括する。このセッションの各論文の主題は様々であるが、地盤災害への対応および放射性廃棄物処分に關する新しくユニークな研究成果であり、安心安全な生活への積極的なアプローチと考えられる。

2. 研究及び技術動向

都市型水害への対応として広域地下水流動解析を行い実測データとの比較を行い、その有効性を示している。広域におけるデータの収集は容易ではないとしているが、災害予防に役立つと考えられ、研究の展開に期待したい(432)。また、揚水量規制以降の地下水位回復による障害の対策として、涵養量と揚水量の水収支バランスを実測に基づき、森林の地下水涵養の機構を検討した基礎的な重要なアプローチである(433)。

継続して研究している内部に円形の空洞を有する多孔質体を流れる流体計算では、空洞部への流速の集中が限られたダルシー数の範囲で急激に生ずることを確認している。浸透による破壊のメカニズムにつながる、精緻な検討になっている(434)。また、パイピングや後退侵食の現象へのアプローチとして盛土内部の細粒土分布の経時的空間的变化を模型実験で検討している。実験条件についての質疑が活発に交わされ、ユニークなアプローチの今後への期待が感じられた(435)。

集中豪雨による雨水と河川水の複合浸透による堤防の破壊について、粘性土が有するコンシステンシー特性が

パイピングに対する抵抗性に及ぼす影響を検討し、粘性土の種類や粒度組成なども加味した研究の継続画も望まれる(436)。また、不飽和な河川堤防が豪雨時に急激な浸水を受けたときの間隙空気圧の増大による破壊現象について、土の種類による間隙空気圧の発生条件を検討し、今後の設計・施工に役立てる成果を期待したい(437)。

高含水比の汚染粘土などの有効利用のため、クリーンエネルギーとしてサイフォンによる吸引力を利用して脱水、圧密排水させる技術の可能性を示している。汚染物質の吸着効果などの検討も期待したい(438)。高レベル放射性廃棄物地層処分のための国際共同研究の一環で行われているベントナイト緩衝材と母岩との境界における地下水流動に関する予測解析を行い、緩衝材の飽和速度に岩盤割れ目が与える影響を明らかにしている。(439)。低レベル放射性廃棄物処分におけるピット処分施設において使用が考えられている締固めたベントナイト混合土のガス移行性と透水性の変化について検討している。透水性はほとんど変化しないことを示している(440)。

安全な施設構築のための様々なアプローチを期待したい。

3. まとめ

様々な主題での論文のため、論文ごとの総括になってしまいましたが、当日のセッションにおいては、新しいアプローチへの確認・アドバイスを含め活発な質疑が交わされ、安心安全な社会の構築に向けた取組みの発表であることを総括して終了することかできました。発表者・参加者の方々の感謝の意を表します。

5. 地盤中の物質移動 地盤内物質移動および水の浸透

日 比 義 彦
名城大学 理工学部

1. はじめに

本報告では、地盤中の物質移動-地盤内物質移動および水の浸透のセッションについて総括する。本セッションでは、トンネル掘削に伴う地下水低下、降雨浸透、地下水中の物質移動の数値シミュレーションに関する発表が主な内容であった。これらの問題はこれまでも研究されてきているが実務上非常に重要である。しかし、このセッションの中で、これまでにあまり研究されていない注目すべき論文が、京都大学農学研究科辻村康佑、藤澤和謙、村上章、坂井孝太郎により発表された「CWENOスキームを用いた浸透作用による砂の流動化シミュレーション」である。辻村らの発表では、砂の流動化に伴う土粒子流出現象の数値解析手法の開発をし、単純なケースであるが実際に数値シミュレーションを行っている。私の独断であるが、このシミュレーションは、流動化する砂を固相とし、さらに、地下水を水相とする2相の混相流モデルに相当すると考えることもできると思う。混相流分野では度々扱われることがあるかもしれないが、地盤工学の分野では、数少ない先進的な研究であり、最近頻発する土石流や斜面崩壊の問題に適用できると考えられる。

2. 注目した研究発表の斬新性

辻村らの発表内容では、流体（流動化した砂も含む）の流れの運動方程式に、保存型のオイラーの式を用いている。ナビエ・ストークスの運動方程式では、粘性項（せん断項）は動粘性係数 ν 、流速ベクトル \mathbf{u} と微分演算子 Δ を用いて $\nu \Delta \mathbf{u}$ と表わされる。辻村らの発表内容で扱われている流体は地下水と流動化した砂となるために粘性を無視するわけにはいかない。また、辻村らの発表で扱っているのが多孔質体であることも考慮しなければならない。そこで、この発表では、透水性に関する項目に地盤工学ではなじみのない以下の式を導入している。

$$\frac{n^2 \rho g (q-v)}{k} \quad (1)$$

ここで、 n は間隙率、 ρ は水の密度、 q は浸透流速、 v が土粒子速度、 g が重力加速度、 k は透水係数である。 $(q-v)$ は土粒子に対する流体の相対速度である。おそらく、この式は Darcy-Brinkman モデルではないかと思う。一方、Darcy-Brinkman モデルの別な表現として、Hill and Straughan¹⁾は以下のような式を示している。

$$\frac{n \mu q}{K} \quad (2)$$

ここで、 μ は流体の粘性係数、 K は固有透過度である。いずれにしても、この式は、辻村らの発表内容に示されるようにオイラーの運動方程式またはナビエ・ストークスの運動方程式で用いられ、全体として Darcy-Brinkman モデルと呼ぶ場合もある。当然、オイラーの運動方程式またはナビエ・ストークスの運動方程式は流体の運動として慣性項を考慮することになり、一般的によく用いられるダルシーの式（地下水の運動方程式）とは異なる。ダルシーの式は、無限に長い円筒管中を想定し、その中を流れる流体について、定常状態および慣性項を無視したナビエ・ストークスの運動方程式から求められることができることはよく知られている²⁾。従って、ダルシーの式は慣性項を無視できる程度の速度までが適用範囲であり、また、Darcy-Brinkman モデルは早い流速に適用可能である。おそらく、遅い流速の地下水の数値解析に Darcy-Brinkman モデルを適用した場合に、慣性項を正確に計算できないために生じる累積誤差により速い速度を算出する可能性があると思われる。Darcy-Brinkman モデルを考慮したオイラーの運動方程式またはナビエ・ストークスの運動方程式にストークス近似（慣性項を無視）を適用した場合の結果がダルシーの式の結果とどのような関係になるか興味深い。

辻村らの発表内容では、土粒子間の有効応力の影響を考慮するために土粒子の移動式に有効応力の項を加味し、その有効応力は弾完全塑性構成式により求めるようになっている。

3. 注目した研究発表の今後の展望

辻村らが発表した砂の流動化シミュレーションでは、流動化した土粒子と地下水のながれの2相流であるが、流動化していない遅い地下水の流れを取り扱うように開発を進めれば汎用性が高く、実際の現場でも適用可能となると思われる。また、浅水流方程式（浅水波方程式）または自由水面を有する混相流により表流水も含めて解析できるようになれば、さらに画期的となる。

参 考 文 献

- 1) A. A. Hill and Straughan B.: Poiseuille flow in a fluid overlying a highly porous material, *Advances in Water Resources*, Vol.32, pp.1609~1614, 2009.
- 2) 今井功：流体力学，岩波書店， pp.189~192, 1999.

5. 地盤中の物質移動 地盤中の水の浸透（実験）

河 井 克 之
神戸大学

1. はじめに

本報告では、地盤中の物質移動—地盤中の水の浸透（実験）のセッションで発表された合計 8 編の論文（No.449-456）について総括する。本セッションは、浸透による地盤の劣化に関する実験的研究に関する報告としてまとめられる。

2. 研究及び技術動向

地盤材料は、岩盤も含めて間隙流体の圧力、体積や相の変化によって状態を変化することは、一般的に知られていることである。本セッションで発表された研究は、すべて間隙流体による土塊の状態変化を取り扱ったものでありながら、そのメカニズムは異なったものであり、有効応力の消失が引き起こす破壊とまとめられない。最初の 2 編(449, 450)は、岩盤の分野で用いられてきたハイドロフラクチャリング(水圧破碎)技術を、通常の地盤に用い、間隙比の大きな割裂脈を地盤内に発生させ、透水性を高めることを目的とした研究である。土質材料の透水係数はダルシー則を受け入れて初めて成立するものであり、ある領域の透水性を平均化したものである。ここで、注目しているのは局所的な弱部(透水性の高い部分)である。発表内容は、その弱部に効果的に水圧を作用させる方法についてのものであり、用いる材料とその効果について報告された。451, 454 ではボイリング破壊に関するものであり、いずれも模型実験によって破壊の進

行過程について観察を行い、地盤構成や幾何的な境界条件の違いを考慮している。ここでは、局所的な有効応力の消失が引き起こす進行的破壊として捉えられている。453, 456 は、浸透力による土塊内に微細な土粒子の移動に注目した実験であり、内部浸食という言葉で表現されている。ここでは、粒度特性による内部浸食の発生のしやすさと、内分浸食の土塊の物性に与える影響について、報告されている。455 は、地盤に接する自由水の流れが引き起こす洗掘について注目したものであり、捨石マウンドと原地盤の様に透水係数の異なる異種材料間では浸透力とともに、局所的な動水勾配を考慮する必要があることを示している。452 は、これら間隙水挙動による地盤の破壊とは異なって、浸透流が内部で封入された間隙空気に及ぼす影響について報告されている。

3. まとめ

セッションを通して活発なディスカッションが行われたのは、それぞれが扱う破壊や状態変化のメカニズムが異なることによるのではないかと考える。古くから、クイックサンド、ボイリング、パイピングなど、材料や形状によって現象を表す言葉が使い分けられていることから、単純に分類できないことは明らかである。材料としての構成関係から境界条件の違いとして扱うには、まだ現象の把握が十分でないと考えられる。今後、実験的研究で解明すべき事柄は、まだ多くあると感じた。

5. 地盤中の物質移動 不飽和地盤中の水の浸透現象

荒木 功平

山梨大学 大学院医学工学総合研究部

1. はじめに

本報告では、地盤中の物質移動（不飽和地盤中の水の浸透現象）のセッションについて総括する。本セッションでは、全8編（内、優秀論文発表者賞対象4編）の発表があり、地盤中の水の浸透現象に関する模型実験や現地観測、解析手法の検討例などが紹介され、多岐にわたるテーマが取り扱われた。研究分類表は用いなかったが、多くの聴講者が関心を持ち、討議が活発に行われた。特に、「462：土中の水分状態とバルク法における蒸発効率 β の関係に関する一考察」や、「457：排水パイプの排水性能評価のための定水位浸透模型実験」・「458：排水パイプのスリットを考慮した浸透流解析モデル」をテーマとした研究について、会場から「大変興味深い研究」とのコメントがなされ、関心を引いた。

2. 研究及び技術動向

本セッションでは地層構成の影響を議論するテーマが2編あった。降雨に伴い飽和度が上昇するとき、透水性の上昇と保水性の低下が起こると考えられる。このことは、層構成を有する不飽和地盤中の水の浸透現象において、各地層の初期飽和度など初期条件の与え方と降雨の与え方により、結果が大きく異なることを意味している。例えば、弱い雨を長時間与えた場合と強い雨を短時間与えた場合などで大きく異なると推測される。この課題に対し、原位置で不飽和透水係数の変化が簡単に計測できれば多種多様な状況下での知見を多く得られることが期待できる。しかしながら、原位置で測定する多種多様な試験装置がある中、境界条件の与える影響、不飽和透水係数の算出式の妥当性が明確でないこと、不飽和地盤における原位置透水試験方法は確立されていないことが指摘された。今後の報告が大いに期待される。

地層構成についてはではないが、大気に接触する排水口におけるキャピラリーバリア現象の影響が考察された。実験を繰り返すと排水量の変化が見られたが、粒径や間隙比の影響を評価しても説明できない排水量の変化があることが指摘され、吸引圧の影響が示唆された。東日本大震災において不透水層地盤の堤防が崩壊した問題に対し、毛管現象を利用した排水システムが確立できれば、動力源なしで堤体内の低い部分から高いところへ排水できるようになるとおもわれ、有用性が高い。

また、排水パイプの排水性能に関する模型実験や解析の報告、評価手法の提案がなされていた。時間と排水量、

間隙水圧の関係や、排水パイプ周辺の密度変化、スリット部の目詰まり、粒子移動、実験結果の解析等多くの点から考察、詳しい分析がなされ、周知すべき成果といえる。間隙比変化や粒子移動に関して更なる知見が加えられれば非常に完成度の高い研究となることが期待できる。

粒子移動や侵食の評価に有用な手法として粒子法がある。東北地方太平洋沖地震時の津波による堤防の侵食・破壊が見られたが、粒子法を援用して、流体-固体を連成して解析する試みがなされ、報告された。不飽和地盤の浸透力を考慮しつつ、浸透と侵食を同時に解析・シミュレーションできれば非常に有用な研究である。

以上のように、本セッションは多種多様な構成である。不飽和地盤中の水の浸透現象において重要な間隙比変化や粒子移動、強度・剛性の変化、層構成地盤の毛管現象などを統一的に明らかにするためには、不飽和土の力学を体系化することが必要とおもわれるが、一方で、実務上における個々の問題を詳細に分析しなくてはならない。

3. 土中の水分状態と蒸発効率

462番の研究は、気象観測とともに、水槽と土槽の質量変化を電子天秤にて計測し、土壌水分計を併用して、一般的な気象観測データから蒸発量の推定を試みるものである。また、土壌水分計の有無の影響を検討し、計測される蒸発効率の値のばらつきに土壌水分計の設置条件が大きく影響することを明らかにしている。そして、初期の体積含水率の値により、蒸発効率～体積含水率関係が異なることを示している。

一方、気象観測と水槽実験で得られた結果より水面における交換速度を算出し、地表面の土粒子、水や空気の体積熱容量の違いを補正した土の表面からの交換速度から算出した蒸発効率と、バルク法から算出される交換速度を用い算出した蒸発効率を比較すると、大きく異なることを指摘している。このことは従来手法では大きな課題があり、土の特性を考慮する必要性を示している。聴講者からも土質材料の違い等の影響・検討結果に関する質疑があったが、現段階では課題となっている。今後の発展に期待したく、周知すべきと判断した。

4. まとめ

本セッションでの議論を通じ、今後の不飽和地盤中の水の浸透に伴う多種多様な現象を明らかにするためにも、体系的な研究・取組みとともに、実務上の個々の問題を詳細に分析する必要性が改めて認識された。