

アーバン・グリーンダムプロジェクトによる透水特性の効果

EC19004 石川敬就

1. 研究背景と目的

近年、気候変動による豪雨災害が多発し、都市化によるコンクリート・アスファルト化が進むことによる河川への雨水流出量の増加やヒートアイランド現象といった問題が深刻化している。これらの問題に対し、土や路盤材に団粒化剤を配合することで、従来の単粒構造を団粒構造に変える団粒化技術(図 1-1)と植生を組み合わせた「アーバン・グリーンダムプロジェクト」を実施することにより、地盤の透水性能、保水能力を高め、河川の負担を減少し、気温上昇を抑制させることができる(図 1-2)。しかし、アーバン・グリーンダムプロジェクトについての研究は進んでおらず、定量的な評価は行われていない現状である。

そこで、本研究では、アーバン・グリーンダムプロジェクトについての検討を行うために透水特性から見た効果を定量的に評価することで、アーバン・グリーンダムプロジェクトによる地盤改良の効果を明確にし、技術導入の促進を目指すことを目的とする。

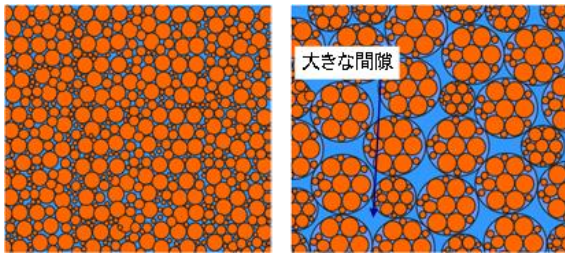


図 1-1 単粒構造の様子(左)と団粒構造の様子(右)

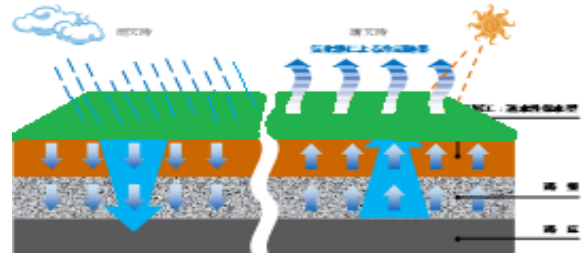


図 1-2 雨天時(左)と晴天時(右)のアーバン・グリーンダムプロジェクトの様子

2. 研究方法

1) 現場試験サイトの概要

滋賀県米原市柏原に土壌サイトを作成し、各現場試験・現地観測を行う。試験サイトは 8 地点であり、1 区画 2m×2m とし、土壌層と路盤層の土質や厚さがそれぞれ異なる(図 2-1)。実証区は 6 地点であり、対象区は 2 地点とした。

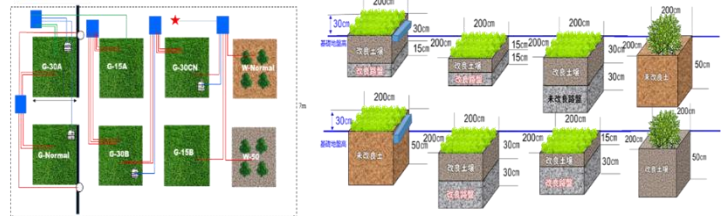


図 2-1 現場試験サイト(8地点)概要

2) 透水試験

地表面で実施する場合の負圧で浸潤させる方法による現場透水試験を現地で行う。負圧浸入計を用いて、負圧を設定した浸潤水頭に調整し、各地点及び各土質で時間経過ごとの浸潤流量を計測する(図 2-2)。



図 2-2 負圧浸入計による現場透水試験

3) 現地観測

現場及び各試験サイトで現地観測を行う。計測量は降雨量、温度、湿度、日射量、風速等の気象データと土中水分量、土中温度であり、気象観測装置、土壌水分センサー、水ポテンシャルセンサー、温度センサー等を現場に設置し計測する。

4) 流出試験

実証区と対象区を対象として、雨樋を用いて、雨量計にたまった雨量及び流量計で雨樋に流出した流量をもとに流出量を計測する現場流出試験を行う(図 2-3)。



図 2-3 雨樋を用いた現場流出試験

3. 試験の結果

1) 現地観測

①観測結果

各試験サイトの土中水分量の分布を図 3-1 に、実証区(G-15A)と対象区(G-Normal)の土中水分量と現地の降雨量の関係性を図 3-2 に、気温と土中水分量の関係について図 3-3 に示す。

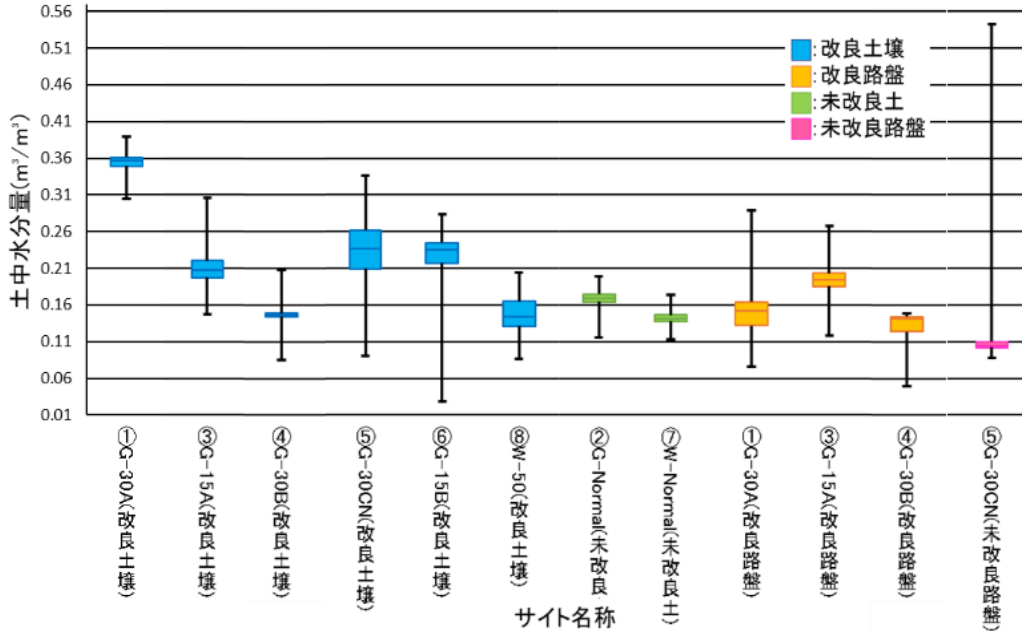


図 3-1 各試験サイトの土中水分量分布

図 3-1 より、土中水分量は土壌・路盤共に、対象区に比べ実証区の方が大きい値を示していることがわかる。よって、土中水分量はアーバン・グリーンダムプロジェクトにより増加していると考えられ、保水性の向上が見込めた。

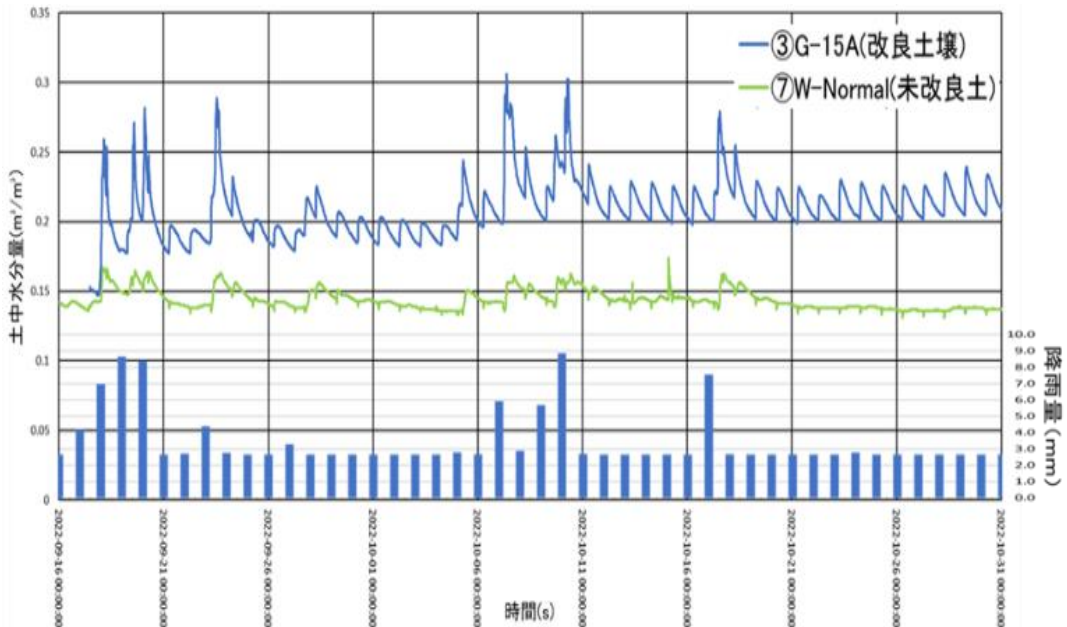


図 3-2 実証区と対象区の土中水分量及び降雨量推移

図 3-2 より、降雨量が大きい値を示す時間において、未改良土に比べ改良土壌では大きく土中水分量が増加していることが確認でき、雨水の吸収力及び保水能力が上昇しているとわかる。

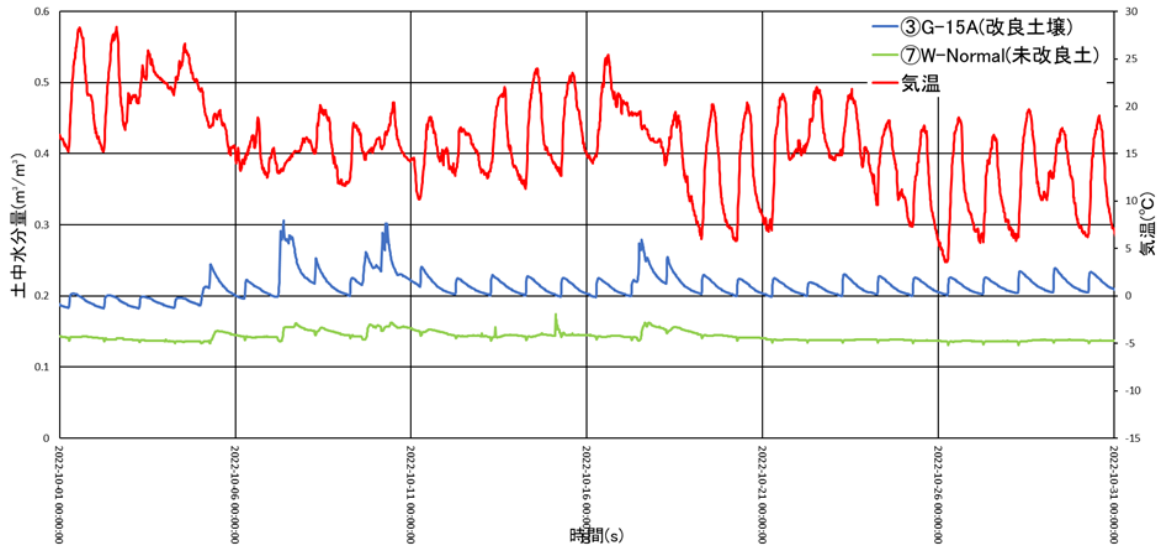


図 3-3 気温と土中水分量（改良土壌・未改良土）の推移

図 3-3 より、気温のグラフは昼と朝夜での温度差によって上下に振れながら推移している。ここで、改良土壌の土中水分量は、未改良土とは異なり気温の昇降に合わせて反比例に推移していることがわかる。このことから団粒化後の改良土壌は気温上昇に合わせて土中水分量が減少しており、気化熱による冷却効果を期待でき、気温上昇の抑制を見込めるのではないかと考えられる。

2) 流出試験

①試験結果の算定

1ヶ月ごとに得られたデータについて、降雨量計及び雨樋からの流量計のデータを用い流出量を算出する。降雨量計では降雨量計内に降った雨量を計測し、流量計では雨樋に流出した流量と雨樋に直接入った雨量を合計した量を計測する。流量計での計測量は、土壌サイトから雨樋への流量であるため、計測した雨量について雨樋の面積(長さ 234cm×幅 10cm)で乗じた値が流量計に直接入った降雨量であり、流量計の計測量から流量計に直接入った降雨量を減じた値が土壌サイト(2m×2m)での体積流出量となる。

②試験のまとめ

流出量について、実証区 (G-30A) と対象区 (G-Normal) の時間推移を図 3-4 に示す。

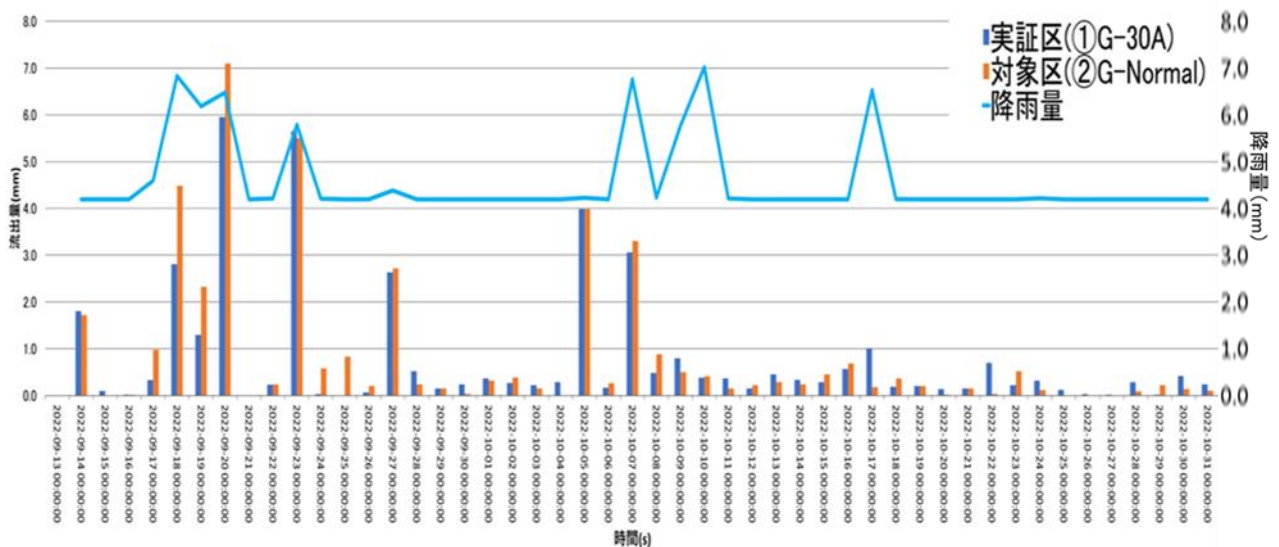


図 3-4 降雨量と流出量の推移

図 3-4 より、実証区と対象区の流出量を比較すると、降雨量が増加している時刻に伴ってどちらも流出量は増加しているが、ほとんどの時刻で対象区の流出量の方が大きい値を示していることがわかる。また、図 3-5 に示した、実証区と対象区の流出量の分布より、流出量の最大値は対象区の方が実証区よりも大きい値を示しており、分布も対象区の方が大きい値に広がっていることがわかる。これらの結果から、アーバン・グリーンダムプロジェクトの導入により、流出量の抑制効果が見込め、繰り返しの降雨にも効果を発揮することが可能であるとわかった。そのため、豪雨時にも降雨の河川への流出を防ぎ、河川の氾濫や増水被害の対策につながると期待できる。

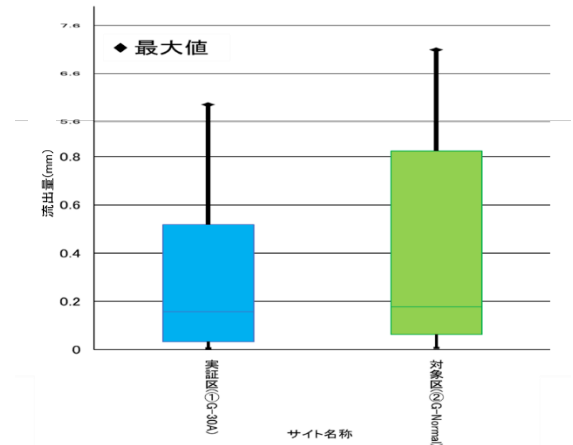


図 3-5 実証区と対象区の流出量分布

4. まとめ

本研究で得られた結果を以下に示す。

- 1). 現地観測の結果より、土中水分量は土壌・路盤共に、実証区の方が対象区より大きい値に分布しており、降雨量の増加に伴い実施区のみ土中水分量の増加が見込めたことから、アーバン・グリーンダムプロジェクトによって保水力の向上及び透水能力の上昇が見込めると考えられる。
- 2). 土中水分量と気温の関係性について、実証区の土中水分量は気温上昇に伴って減少し、気温下降に伴って増加したことから、アーバン・グリーンダムプロジェクトによって、気温上昇時に土中内の水分が蒸発することで冷却効果が得られると推測でき、ヒートアイランド現象の対策として期待できると考えられる。
- 3). 現場流出試験の結果より、流出量は実証区よりも対象区の方が大きい値を示す傾向であったことから、団粒化によって雨水の流出量を抑制する効果が見込めるとわかった。また、定植後の試験実施であったことから、アーバン・グリーンダムプロジェクトにおける雨水流出量の抑制効果を期待できると考えられる。

以上の結果より、アーバン・グリーンダムプロジェクトによって透水性・保水性の向上が見込め、雨水を多く土中内に浸透させ、雨水の流出を抑制し、土中内に多くの水を保有できるようになることで、河川の負担の減少や気温上昇の抑制、緑化等に非常に有効的であることが示された。そのため、水害対策・ヒートアイランド現象の対策として効果が期待できるのではないかと評価できた。

謝辞

本研究を進めるにあたり、実験指導をいただいた中部大学教授杉井俊夫先生および実験協力・試験サイトの作成をいただいた株式会社成建の皆様、共同研究者の小林岳斗氏に記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 杉井 俊夫：ATTAC 工法による改良グラウンドの流出係数に関する研究，2021 年度全国トース技術研究組合研究報告集，pp1～4，2021
- 2) 西垣誠・杉井俊夫・細谷真一 ほか：新規制定地盤工学会基準・同解説地下水面より上の地盤を対象とした透水試験方法(JGS 1319-2017)，公益社団法人地盤工学会誌，pp9～17，2018.

原位置透水試験からの水分特性曲線の推定

EC19006 伊藤 海斗

1. はじめに

透水性及び、保水性は室内実験により得られてきた。しかし、室内実験では現場での試料のサンプリングや整形、乾燥密度の違い、境界条件の違いなどから、現場条件を十分に再現できないことがあり、現場での実験方法、評価方法が求められてきた。

2017年には、地盤工学基準(JGS1319-2017)¹⁾が制定されたが現場での「保水性」を測る方法がない現状にある。本研究では現場透水試験の結果を用いて水分特性曲線を推定し、現場での保水性評価の確立を目的とする。

2. 水分特性曲線と van Genuchten モデル

本研究では、現場での保水性評価を行うために現場透水試験の結果を用いて、保水性評価を行う。この保水性の評価には土中水の吸引圧と水分量の関係を表す水分特性曲線で評価することにした。水分特性曲線は負の圧力水頭 h_p (cm)と有効飽和度 Se (-)の関係を表したもので、曲線の内側の面積の大きさを保水性を評価することが可能である。

水分特性曲線の関数として式(1)に示す van Genuchten モデル(以降 vG モデル)がよく使用されており、vG モデルのパラメータである α と n を求めることで水分特性曲線を推定することができる。

$$Se = \frac{1}{(1 + |\alpha_w h|^n)^{\frac{1}{n}}} \dots (1)$$

ここに、 Se ：有効飽和度(-)、 h ：負の圧力水頭(cm)、 α_w 、 n ：vG パラメータとする。

α_w と n は水分特性曲線の形状に影響を与える。本研究では吸水過程であるため、 α_w は水浸入値の逆数であり(図1参照)、 n は水分特性曲線の勾配に影響を与えるパラメータとなっている。負圧浸入計を用いた現場透水試験の結果から、水浸入値の逆数が α_w に相当すると石井ら²⁾の研究で得られている。

3. n の推定

本研究では、vG モデルのパラメータである n を推定していく。ただし、本研究より推定した n は n' と称した。本研究の n' の推定方法は、間隙径分布と粒度分布、90度傾けた水分特性曲線と間隙径分布の形状がほぼ一致していると川部らの研究³⁾により得られていることから、90度傾けた水分特性曲線と粒度分布の形状と勾配もほぼ一致するものと仮説を立てた。(図2、図3参照)

水分特性曲線は大きな粒径に影響を受けやすいことや実験データの信頼性もあり、 D_{50} 以上の粒度分布で卓越した勾配を基準として D_{100} と D_0 を推定し、式(2)のような形で n' を求めた。

$$n' = \frac{1}{\log\left(\frac{D_{100}}{D_0}\right)} \dots (2)$$

ここに D_{100} ：100%粒径(mm)、 D_0 ：0%粒径(mm)とする。

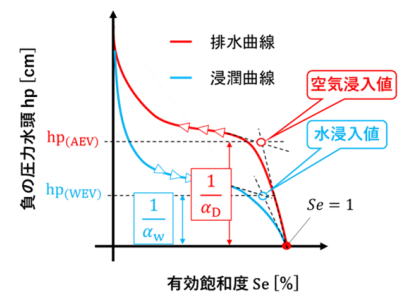


図1 水分特性曲線

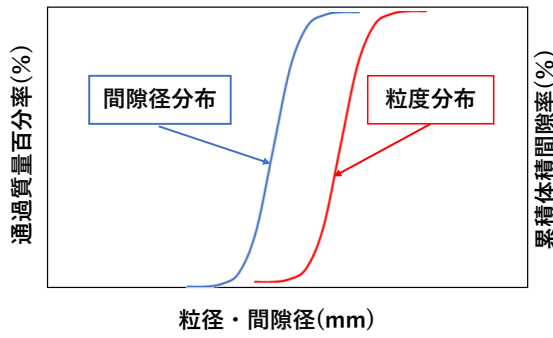


図2 間隙径分布の粒度分布の形状

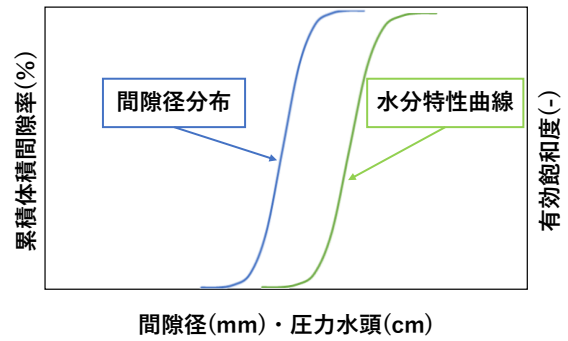


図3 間隙径分布の水分特性曲線の形状

3. 負圧浸入計を使用した室内保水性試験の結果からの検証

負圧浸入計を用いて現場を模擬した室内保水性試験を行った。負圧浸入計とは、一定の圧力を負荷しながら試験地盤を湿潤させ、湿潤開始からの経過時間と、経過時間あたりの浸潤流量から透水係数を求める試験機である。図4に示す負圧浸入計は、上部が圧力調整タンク、下部が浸潤させる水を入れる主タンクとなっている。圧力調整タンクでは、試験地盤に負荷する浸潤水頭の大きさを調整することができ、主タンクの残量に関わらず、常に一定の浸潤水頭を保ったまま試験を行うことが可能である。したがって、大きな圧力を掛けずに浸潤可能なため、軟弱地盤に対しても適用可能である。しかし、従来の負圧浸入計では圧力水頭の大きさが足りていなかったため、負圧浸入計に改良を加えた。(図5参照)

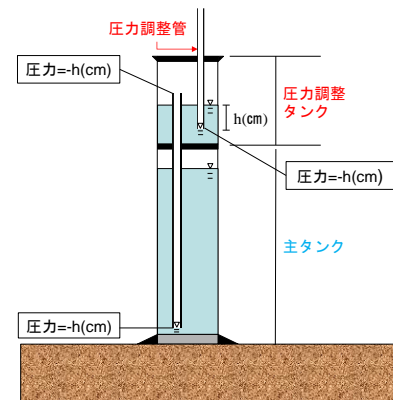


図4 負圧浸入計

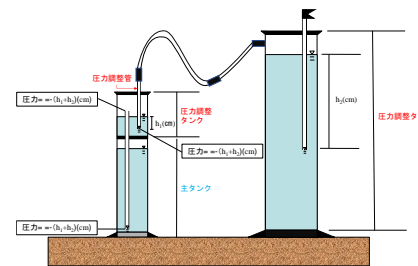


図5 改良型負圧浸入計

本研究では、三河珪砂4号、6号、8号を使用し、水頭を変化させて試験を行った。試験の測定場所は各地点場所同士で影響を与えないようにするため、図6のように配置して行った。石井らによると現場飽和透水係数を算出する過程で、得られる飽和湿潤水頭が水浸入値となり、また、vGモデルのパラメータ α の逆数になることは一般的に知られており、図7のように各砂の α_w を算出した。

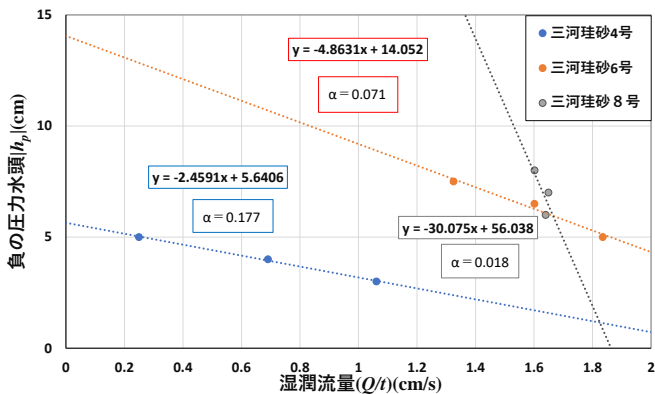


図7 潤流量 Q/t (cm^3/s) と 湿潤水頭 h_p (cm) の関係

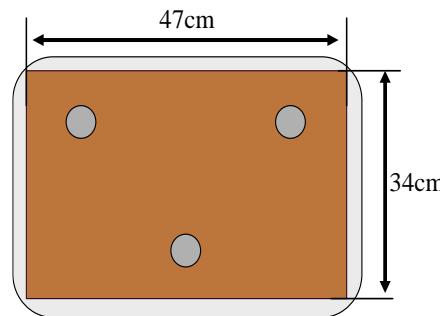


図6 試験場所

続いて vG モデルのもう一つのパラメータである n' の推定を行っていく。粒度試験の粒度分布(図8参照)を用いて、 n' を求めていく。森ら⁴⁾の研究によって勾配から n を推定するには近似直線の傾きの逆数である1.8倍することで n' が推定できると得られている。求めた α_w と n の値を表1に示す。

本研究と室内試験の水分特性曲線の比較を行うために式(3)を用いて乾燥密度を求めていく。求めた乾燥密度を表2に示す。

$$\rho_d = \frac{m_s}{V} \dots (3)$$

ここに、 ρ_d : 乾燥密度(g/cm^3)、 m_s : 土粒子質量(g/cm^3)、 V : 体積(cm^3)である。

4. 室内試験からの検証

負圧浸入計を用いた試験の結果と比較するために室内試験を行った。試験装置は図9示すように2連式で、主に供試体を格納して加圧するチャンバーの他、電子天秤、コンプレッサー、テンシオメータ、空気圧センサー、電磁弁、PLC(プログラムロジックコントローラ)、パソコンからなっている。供試体用モールドは、体積変化を外から確認できるように透明の亚克力を使用している。飽和体積含水率から、各時間の供試体の水分量を求め、供試体内の水の体積を V_w 、供試体の体積を V として算出し、各時間における式(4)より、体積含水率 θ を算出した。また、空気圧センサーで求めた間隙空気圧 u_a とテンシオメータで計測された間隙水圧 u_w から式(5)より負の圧力水頭 h_p を求めた。

$$\theta = \frac{V_w}{V} \dots (4) \quad h_p = |u_a - u_w| \dots (5)$$

式(4)より算出した体積含水率 θ を用いて、式(6)より、有効飽和度 Se を算出した。

$$Se = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \dots (6)$$

ここに、 Se : 有効飽和度(-)、 θ : 体積含水率(-)、 θ_r : 残留体積含水率(-)、 θ_s : 飽和体積含水率(-)である。

続いて求めた負の圧力水頭 h_p と有効飽和度 Se を用いて数値解析を行い α_w と n を求め、値を表3に示す。

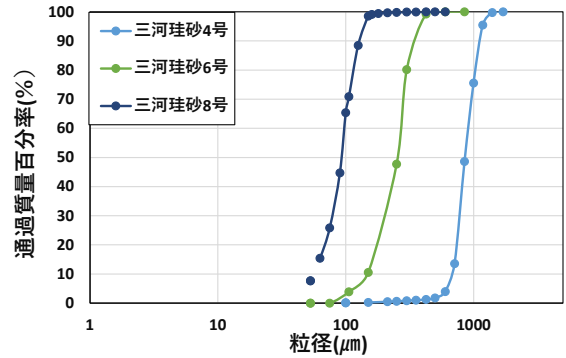


図8 三河珪砂の粒度分布

表1 三河珪砂の α_w と n

試料名	α_w	n
三河珪砂4号	0.177	6.929
三河珪砂6号	0.071	4.562
三河珪砂8号	0.018	5.353

表2 三河珪砂の乾燥密度

	三河珪砂4号	三河珪砂6号	三河珪砂8号
乾燥密度 ρ_d (g/cm^3)	1.42	1.35	1.41

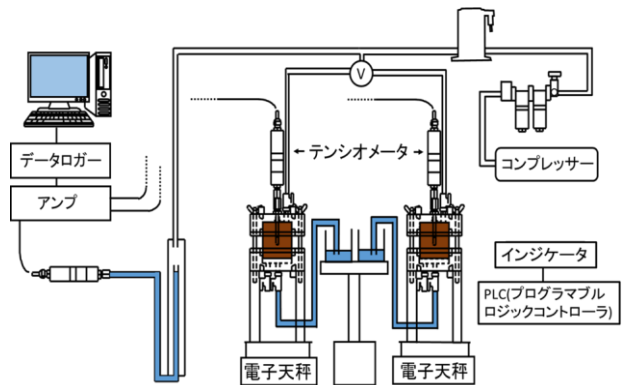


図9 室内試験の概略図

表3 三河珪砂の α_w と n

試料名	α_w	n
三河珪砂4号(室内試験)	0.152	8.309
三河珪砂6号(室内試験)	0.046	5.785
三河珪砂8号(室内試験)	0.011	9.851

室内保水性試験で求めた α と n' を用いて、vG モデルの式に代入し、有効飽和度 Se を求める。縦軸に負の圧力水頭 $|h_p|$ (cm)、横軸に有効飽和度 $Se(-)$ を取り、水分特性曲線を作成し、室内試験の水分特性曲線との比較を行った。図 10 の室内試験の水分特性曲線と現場を模擬した室内保水性試験の水分特性曲線の形状を比較すると、三河珪砂 4 号、6 号は類似していることがわかる。8 号は室内試験において供試体作成時に水中落下により密になってしまい乾燥密度と水浸入値が高くなってしまったことが原因であると考えられる。また、室内試験と現場を模擬した室内保水性試験の試料は乾燥密度が同じであるため、この結果より負圧浸入計を用いて地盤工学会基準(JGS1319-2017)に従って行った現場を模擬した室内保水性試験の結果から本研究で提案する水分特性曲線を推定することができ、提案する方法の検証を得られた。参考までに、図 11 は現場透水試験で求めたマサ土の水分特性曲線である。マサ土でも適用可能であった。

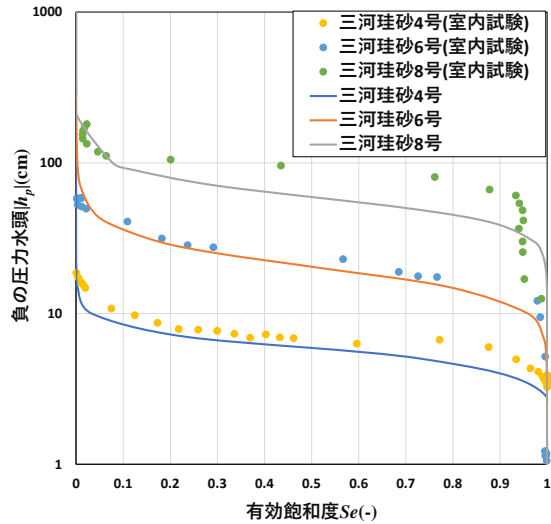


図 10 水分特性曲線の比較

5. おわりに

現場を模擬した室内保水性試験と粒度分布の結果が、vG モデルのパラメータを求めることができ保水性を示す水分特性曲線を求めることができた。また、室内試験の水分特性曲線と比較し、三河珪砂 4 号、6 号の水分特性曲線の形状がほぼ一致したため、本研究で提案する方法の検証を得られた。

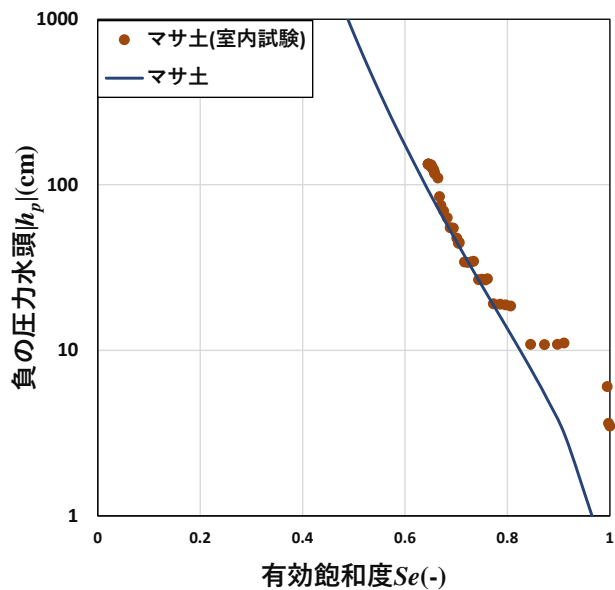


図 11 マサ土の水分特性曲線の比較

【謝辞】

本研究室の山田紘輝氏の協力を得ました。ここに記して誠意を表します。

【参考文献】

- 1) 地盤工学会：新規規定地盤工学会基準・同解説 地下水面より上の地盤を対象にした透水試験方法(JGS 1319-2017)
- 2) 石井雅都・杉井俊夫：原位置における透水性・保水性に関する研究，土木学会中部支部研究発表会，pp3-30，2019
- 3) 川部らら・杉井俊夫：土の間隙構造を評価するための間隙径分布の計測，土木学会中部支部研究発表会，pp.17-18，2019
- 4) 森太俊：原位置での保水性試験に関する研究，2019 年度卒業研究論文概要

アーバン・グリーンダムプロジェクトによる緑化への効果

EC19035 小林 岳斗

1. 研究背景、目的

近年日本では短時間に記録的な豪雨が頻発し、甚大な水害をもたらすことが増加している。更に都市全体の気温が上昇するヒートアイランド現象が問題になっており、早期の解決が求められている。これらの対策として、団粒化技術に着目する。この団粒化技術(図-1)¹⁾で地盤改良を行うことで地盤の透水性能、保水能力の向上により河川流入量の低減や、地表面の温度上昇の抑止が期待できる²⁾。更に土の団粒化技術と植生を組み合わせることで、双方の利点を活かし都会に緑とダム機能を両立させ、治水と温暖化防止を目的とする発想が「アーバン・グリーンダムプロジェクト」(図-2)である。

本研究では団粒化技術と植生を融合することにより流出量と浸透量の変化や植物の生育への影響を定量的に評価することを目的とする。

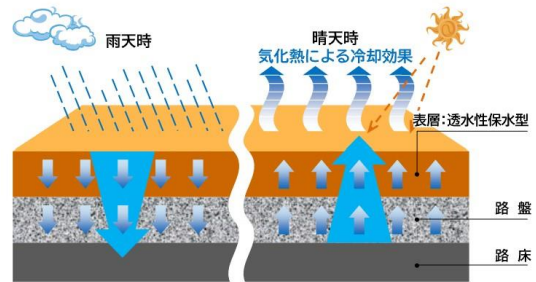


図-1. 団粒化の効果



図-2. アーバン・グリーンダムプロジェクト

2. 実験

1.) 流出試験

目的: 米原市柏原にて設置したケースにて降雨量と流出量を比較することで、植生を行った団粒化地盤と非団粒化地盤の流出量及び土中浸透量の評価をする。

方法: 9/13 19:00 から 10/24 24:00 までの 966 時間で降った雨を対象に、体積流出量と体積地盤浸透量を求める。実験には 2 つのケース(図-3)(図-4)を用いる。2 つのうち G-30A は団粒化改良した土壌と団粒化した土壌を持ち、G-Normal は未改良の土壌を持つ。それぞれのケースは 5 度傾斜させており、降水により地盤に浸透せず流出した水が下部に設置した樋に流れるようにし、流れた流出量を計測する。また、ケースの横には雨量計を設置し、ケースに降る雨量と同じ条件の単体の降水量を計測できるようにする。それぞれのデータは 15 分ごとにクラウド上にアップされ、遠隔地でも取り扱えるようにした。

結果: 流出量が G-Normal > G30A、つまり団粒化が流出量を抑える効果が発揮されているのは 124 時間であった。流出量が G-Normal < G30A、つまり改良の効果が無かったのは 80 時間であった。(図-5) 浸透量が G30A > G-Normal、つまり団粒化が流出量を抑える効果が発揮されているのは 124 時間であった。流出量が G30A < G-Normal、つまり改良の効果が無かったのは 79 時間であった。(図-6) よって、約 40 日の期間内で団粒化地盤の方が 1.55 倍流出量を低減し、1.56 倍浸透量が増加した。

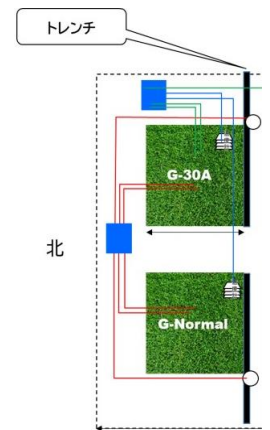


図-3. 配置図



図-4. 流出試験の様子

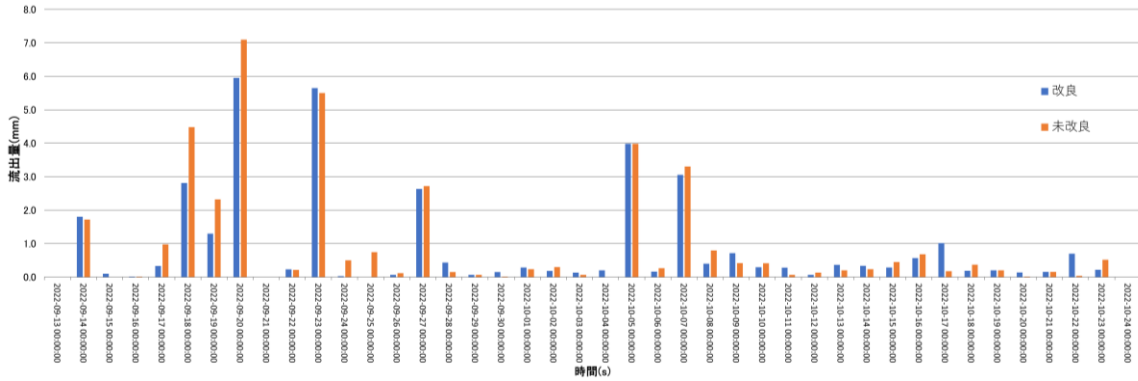


図-5. 流出量比較グラフ

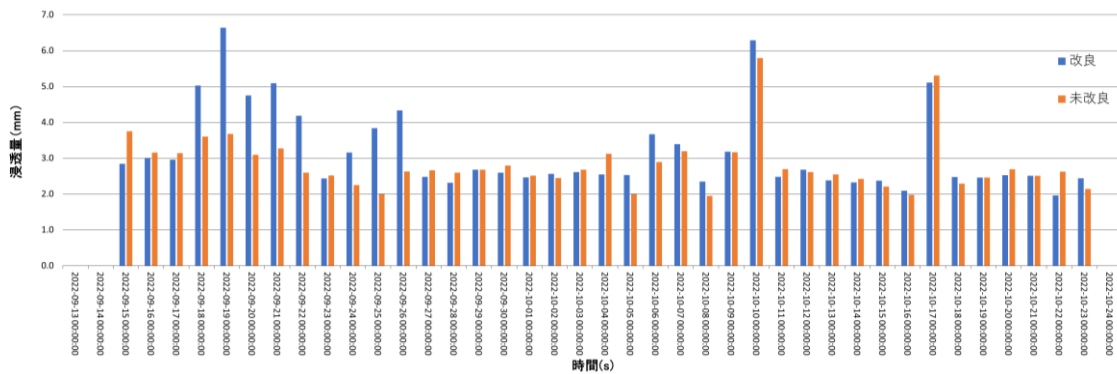


図-6. 浸透量比較グラフ

雨量ごとの改良前後の流出量及び浸透量の差の平均を比較すると、雨量が増加するにつれて加速度的に差の数値が増加してことがわかる。雨量が 1.00mm/h のときは改良前後の流出量差が 0.06mm/h なのに対し、雨量が 6.00mm/h のときは流出量差が 1.37mm/h になっており、約 22.83 倍の差があることがわかる。(図-7) また、浸透量は雨量が 1.00mm/h のときは改良前後の浸透量差が 0.03mm/h なのに対し、雨量が 6.00mm/h のときは浸透量差が 1.70mm/h になっており、約 56.67 倍もの差があることがわかる。(図-8) よって、雨量が増加するほど団粒化改良が持つ浸透量増加作用が発揮され、流出量の抑制につながっていると考えることができる。

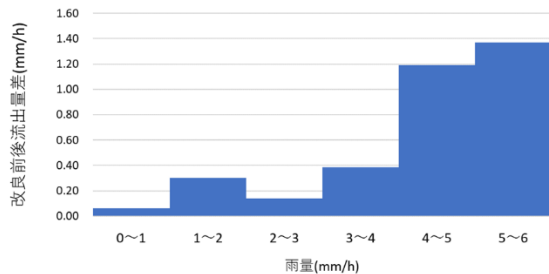


図-7. 改良前後流量差

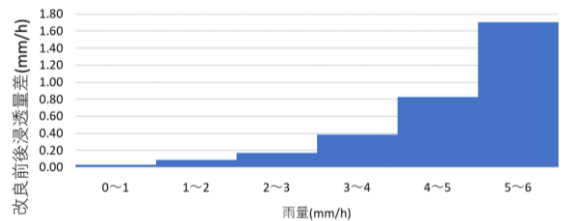


図-8. 改良前後浸透差

流出量・浸透量共に最も差があったのは9月19日の13:00であり、改良土流出量 0mm/h に対し、未改良地盤流出量が 2.3mm/h であった。また、改良地盤浸透量が 6.6mm/h に対し未改良地盤浸透量は 3.7mm/h であった。よって、団粒化改良により流量当たり最大約 2.3 倍流出量を抑えられ、最大約 1.8 倍水の浸透が出来ることがわかった。以上の点より団粒化改良に期待する流出量の減少、浸透量の増加の効果が表れていることがわかる。よって今回は植生をしたケースにて実験を行ったので、

植生は団粒化の持つ効果を阻害しないことがわかった。よって、植生と団粒化技術の治水的利用における融合は可能であるといえる。今後の展望として、今回は植生をした2ケース間で実験をしたが、植生をしていない改良ケース、未改良ケースを実験対象として実験することで植生が団粒化改良にどの程度影響しているのかを検証することができると考える。

2.) 植生の育成状況の観察

目的：実験現場に設置した6つのケース上(図-9)(図-10)にて、団粒化の有無により植物の生育にどのような影響を及ぼすのかを比較し観察する。試験により得られたデータから実際にアーバン・グリーンダムプロジェクトを都市で実施する際に適切な土壌厚さ、地盤厚さで施行することで、植生の効果を最大限活かし、施工費用の削減や工期の短縮も見込めると考える。

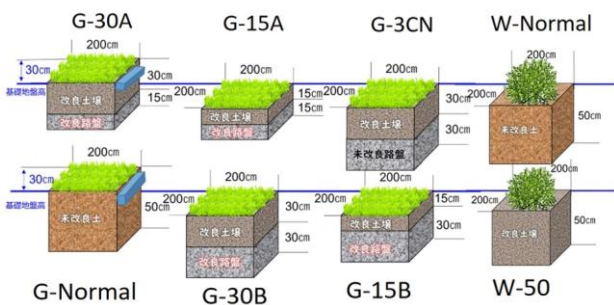


図-9. 各ケースの寸法および層の種類



図-10. 9月17日の植生の生育状況

方法：コウライシバを定植した6つのケースの生育状況を写真で撮影し、画像全体の平均RGBをAdobe Photoshopを用いて解析する。RGBとはRed Green Blueの頭文字であり、それぞれ256の段階がある。この3色組み合わせることにより多くの色を表現することができ、パソコンなどの液晶パネルに使用されている。算出されたRGB(図-11)を用いて、VARI⁴⁾を算出することで植生の活性度が検証する。VARIとはRGBを用いた計算をすることで植生の部分活性度を算出できる指標であり、算出は画像の各RGBの値を用い、 $VARI = (Green - Red) / (Green + Red - Blue)$ である。算出される値は1~-1であり、この値が大きいほど植生の活性度が高いことがわかる。

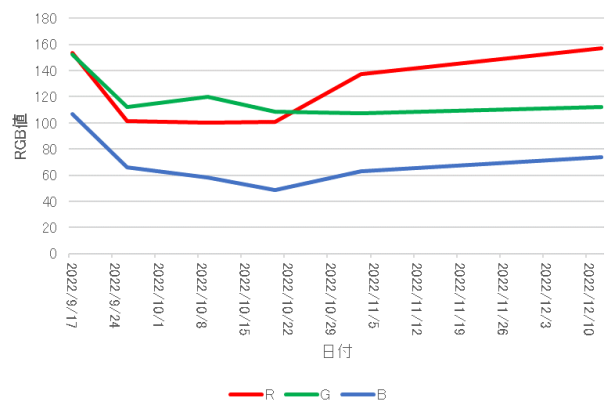


図-11. G30AのRGBの変移

結果：生育期の活性度の上昇は生育期の中に土中または路盤に団粒化改良をしているグループ(G30A,G15A,G30CN,G30B,G15B)のVARIの値が平均して約0.139上昇したのに対し、未改良のG-NormalのVARIの値の上昇はわずか約0.084であった。この結果から、団粒化しているグループは生育期に1.650倍VARIの上昇が早く、団粒化改良が植生の活性度に好影響を与えていることがわかった。

次に30cmの土壌を持つG30Aと15cmの土壌を持つG15Aを比較する。G30AはG15Aよりも1.735倍高い土壌土中水分量をもつことから保水効果によりG15AよりもVARIの減少が穏やかであることがわかった。よって厚い土壌は保水により植生の活性度の上昇に好影響を及ぼすことがわかった。

次に 15cm の路盤を持つ G30A と 30cm の路盤を持つ G30B を比較する。G30A の路盤土中水分量は平均して 0.146mm^3 であり、G30B の路盤水分量は 0.134mm^3 である。土壌では厚い方が土中水分量は高かったのに対し、路盤では厚い方が路盤土中水分量は低い結果となった。以上の結果より、厚い土壌と薄い路盤をもつ G30A は団粒化構造の持つ保水作用を効率よく発揮し、活性度の上昇は緩やかであるが、活性度の減少は最も緩やかであり、枯れにくい特性を持つことがわかった。

植生の枯れる速度が遅いということは団粒化構造の作用を発揮し保水をし、植物に水を与えている証拠であると考えられる。アーバン・グリーндаムプロジェクトでは植生の持つ緑がより長く続いた方が、地表温度の上昇の抑止が出来ると考えられる。よって今回の実験では G30A の条件が最も団粒化構造の利点を引き出すと共に植生の生育に適している条件であることがわかった。

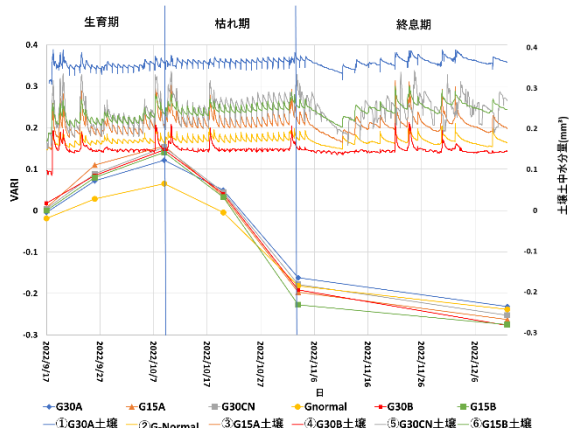


図-12. VARI の変移と土中土壌水分量

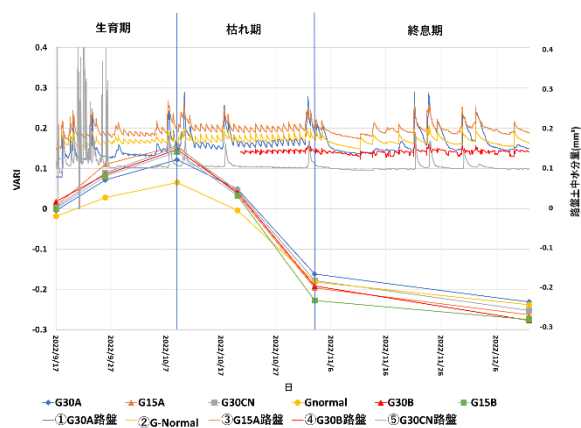


図-13. VARI の変移と土中路盤水分量

3. 終わりに

本研究の目的は団粒化技術と植生を融合することにより流出量と浸透量の変化や植物の生育への影響を定量的に評価することであった。流出試験を通して植生をした地盤でも団粒化構造の持つ透水性・保水性は保持されることがわかった。また、団粒化地盤と非団粒化地盤では団粒化地盤の方が植生の活性度が高く、団粒化が植生に好影響を及ぼすことがわかった。また、土壌及び路盤の土中水分量により植生の活性度が変化することを得られたので、アーバン・グリーндаムの実現に向けての可能性を得ることが出来た。植生の生育状況については本研究にて使用した VARI の他にも赤外線機器を利用した活性度評価方法もあるので、今後の検討課題である。今後の研究の発展により更に効率の良い地盤厚さと植生の関係や、植生と団粒化構造の組み合わせによる相乗効果を調査することでアーバン・グリーндаムプロジェクトが現実味を帯び、より暮らしやすく安全なまちを作ることに繋がると考える。

【謝辞】

滋賀県米原市柏原にて現地観測及び実験の協力をしていただいた株式会社成建及び、ご指導いただきました中部大学杉井俊夫教授と共同研究者の石川敬就氏に記して感謝申し上げます。この研究は国土交通省・公益財団法人都市緑化機構、グリーンインフラの普及に資する緑化関連技術の「先駆的な緑化技術開発のための実証調査」の公募研究の補助を受けて実施しています。ここに記して感謝申し上げます。

【参考文献】

- 1) 全国トース技術研究組合マニュアル：2016.
- 2) 杉井 俊夫：ATTAC 工法による改良グラウンドの流出係数に関する研究，2021 年度全国トース技術研究組合研究報告集，pp.1-4，2021.
- 3) Gitelson, A., et al. "Vegetation and Soil Lines in Visible Spectral Space: A Concept and Technique for Remote Estimation of Vegetation Fraction." *International Journal of Remote Sensing* 23 pp. 2537-2562, 2002.

堤防越流を考慮した間隙空気圧を把握するための気液 2 相流解析に関する研究

EC19043 鈴木 啓生

1. 研究背景と目的

近年、気候変動の影響で、スーパー台風や豪雨が頻発し、災害の規模が激甚化している。これに伴って河川では越水することが増加している。国土交通省は、越水に対して粘り強い堤防に取り組んでいる。そこでは、越水した場合でも決壊までの時間を少しでも長くする粘り強い性能が求められている。しかし、堤防決壊メカニズムの解明や、越流した際に決壊・非決壊を分ける要因の分析が不十分であることが現状である。今まで空気は水よりも土の中をすばやく移動できるとして、その影響を無視されて解析されてきた。そのため、雨やのり面被覆などで空気の逃げ道が制限され、越流にいたるまで堤体内に残った空気圧が堤防にどのような影響を及ぼすか把握しきれていない。そこで本研究は、越流時における堤体内の間隙空気圧の挙動を解明するために、その基礎として有限要素法による気液二相流の解析コードを作成し、発生する空気圧の大きさを調べることを目的としている。

2. 研究方法

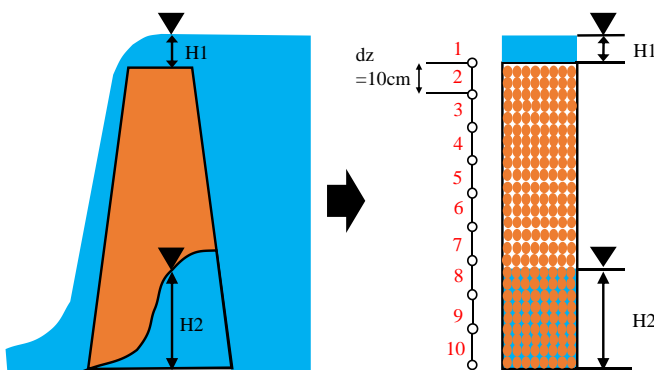


図 2.1 実際の堤防と解析モデル

解析を行う上で解析モデルは図 2.1 のような接点 10、dz=10cm、高さ 90cm の鉛直 1 次元の土柱を考え、越流浸透の解析を行なう。しかし、初期条件に不飽和状態での間隙水圧と間隙空気圧を知る必要がある。よって、越流浸透の解析の前に、重力のみで排水する重力排水と空気圧を加えて排

水する強制排水の解析も行う。解析で求めるものは、間隙水圧と間隙空気圧を水頭換算したものである。

2.1 支配方程式の誘導

水と空気の支配方程式は、リチャーズの式と連続の式を組み合わせ誘導を行い、これを連立して解く。

(水相)

$$nC \left(\frac{\partial p_a}{\partial t} - \frac{\partial p_w}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial x_z} \left\{ k_{rw} \frac{K_{ij}}{\mu_w} \left(\frac{\partial p_w}{\partial x_z} + \rho_w g \right) \right\} \quad (1)$$

(空気相)

$$n \left\{ (1 - S_w) B - \frac{c}{\beta_a} \right\} \frac{\partial p_a}{\partial t} + n \frac{c}{\beta_a} \frac{\partial p_w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_z} \left(\frac{1}{\beta_a} k_{ra} \frac{K_{ij}}{\mu_a} \frac{\partial p_a}{\partial x_z} \right)$$

$$B' = \frac{\partial}{\partial p_a} \left(\frac{1}{\beta_a} \right), \quad C' = \frac{\partial S_w}{\partial p_c} \quad (2)$$

K_{ij} が等方性 ($K_{11} = K_{22} = K_{33} = K_{44} = k$) かつ、 $i \neq j$ のとき $K_{ij} = 0$ の場合は、

$$\mu'_w = \frac{\mu_w}{\rho_w g}, \quad \mu'_a = \frac{\mu_a}{\rho_w g},$$

$$K_w = \frac{K_{ij}}{\mu_w'} = \frac{k}{\mu_w}, \quad K_a = \frac{K_{ij}}{\mu_a'} = \frac{k}{\mu_a} \quad (3)$$

ここに、 n は空隙率、 S_w は水の飽和度、 p_w は圧力水頭、 p_a は空気圧を圧力水頭に換算したもの、 p_c は毛管圧を圧力水頭に換算したもの、 t は時間、 β_a は構成体積率、 k_{rw} は相対透水係数、 k_{ra} 相対透気係数、 K_{ij} は地盤の固有透過度テンソル、 μ_w は水の粘性係数、 μ_a は空気の粘性係数、 ρ_w は水の密度、 g は重力加速度である。

水相と空気相の支配方程式に関係を持たせるために式(4)のサクシヨンの関係を用いる。

$$p_c = p_a - p_w \quad (4)$$

さらに、飽和度とサクション p_c の関係には、式(5)の Van Genuchten モデルの式を用いる。

$$S_e = \{1 + |\alpha p_c|^l\}^{-m} \quad (5)$$

$$S_e = \frac{S_w - S_r}{1 - S_r} \quad (6)$$

$$m = 1 - \frac{1}{l} \quad (7)$$

ここに、 S_e は有効飽和度、 α 、 l 、 m は形状パラメーター、 S_r は残留飽和度である

2.2 エクセルを用いた FEM

Python で解析コードを作成する前段階としてエクセルで FEM を作成した。しかし解析に時間がかかりすぎたため、重力排水のみ解析を行なった。

2.3 Python を用いた解析コードの作成

解析のプログラム言語は python を用いる。PC スペックに依存することなく解析を行なうことができる「Google Colaboratory」というアプリを用いた。

2.4 解析ケース

3種の解析ケースをそれぞれ図 2.2、図 2.3、図 2.4 に示す。また、各ケースの境界条件を以下のようにした。土中の上端が $x = 0$ 、下端が $x = L$ である。

(Case1) 重力排水：重力のみで排水する。

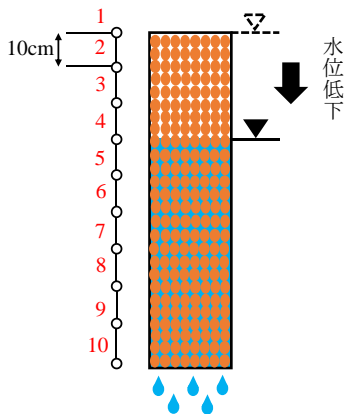


図 2.2 重力排水

$$\begin{aligned} p_w(0, t) &= p_c(0, t) - p_c(dz, t) \\ p_w(L, t) &= 0 \\ p_a(0, t) &= 0 \\ p_a(L, t) &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

(Case2) 強制排水：上端から空気圧を水頭換算値 30cm で負荷する。

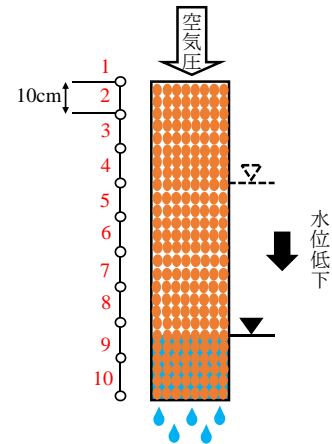


図 2.3 強制排水

$$\begin{aligned} p_w(0, t) &= p_c(0, t) - p_c(dz, t) \\ p_w(L, t) &= 0 \\ p_a(0, t) &= -30 \\ p_a(L, t) &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

(Case3) 越流浸透：上端に越水深 30cm、下端からの浸透、供試体の長さ(90cm)+越水深(30cm)の 120cm の水圧で負荷する。

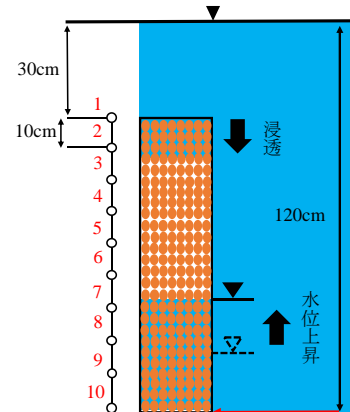


図 2.4 越流浸透

$$\begin{aligned} p_w(0, t) &= 30 \\ p_w(L, t) &= 120 \\ p_a(0, t) &= 0 \\ p_a(L, t) &= 0 \end{aligned} \quad (10)$$

3.解析結果

(Case1) 重力排水の場合の間隙水圧、飽和度の時系列分布を図 3.1 および図 3.2 に示す。なお、重力排水時の間隙空気圧は常に大気圧に触れているため全てゼロである。図 3.1 の 1 秒後の土柱内に

間隙水圧の高い箇所が残るが、徐々に減少している。

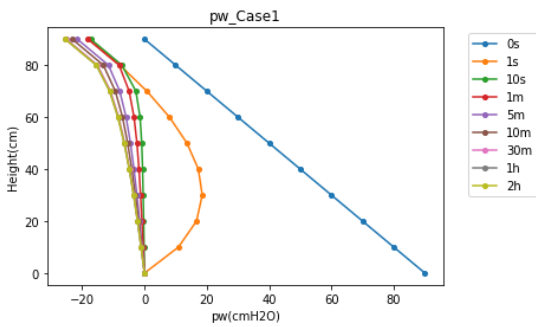


図 3.1 間隙水圧(重力排水)

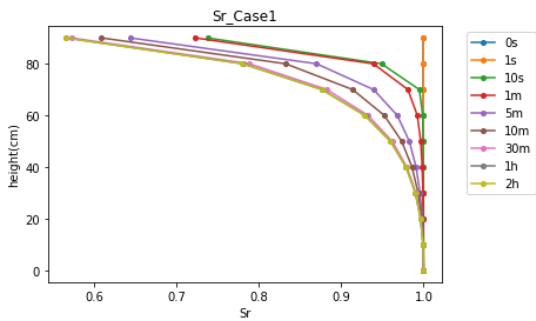


図 3.2 飽和度(重力排水)

(Case2) 強制排水時の間隙水圧、飽和度、間隙空気圧の時系列分布を図 3.3~3.5 に示す。間隙水圧と飽和度が上部で一部揺らぐが排水している。

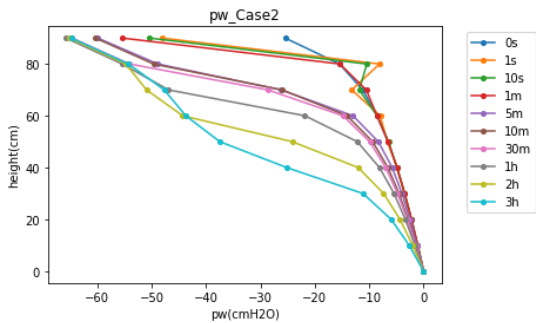


図 3.3 間隙水圧(強制排水)

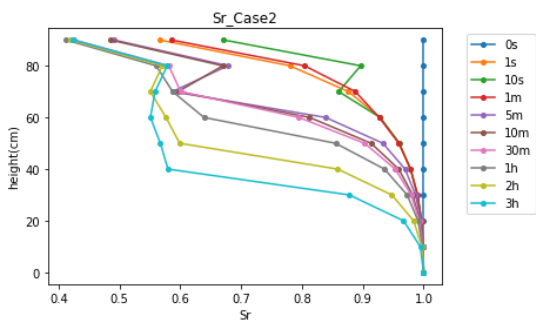


図 3.4 飽和度(強制排水)

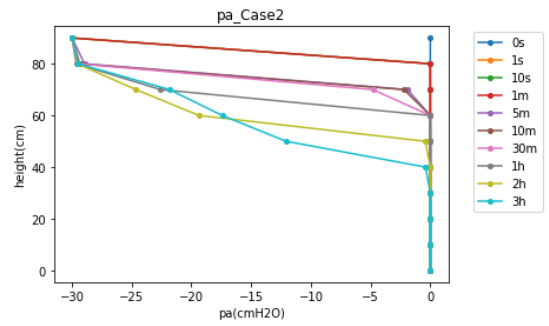


図 3.5 間隙空気圧(強制排水)

(Case3) 越流浸透時の間隙水圧、飽和度、間隙空気圧の時系列分布を図 3.6~3.8 に示す。図 3.6 では下端から 30cm までは間隙水圧が大きく上昇するが、40cm~80cm までは大きな変化は見られない。図 3.7 では下端から 30cm までは飽和度が上昇するが、40cm~80cm までは上昇しない。図 3.8 では下端から 40cm で 4.46cm、80cm で 2.50cm の間隙空気圧が発生している。そこで、図 3.7 の飽和度を確認すると下端から 40cm と 80cm で低くなっている。よって、間隙空気圧によって水の浸透が阻害されていると考えた。

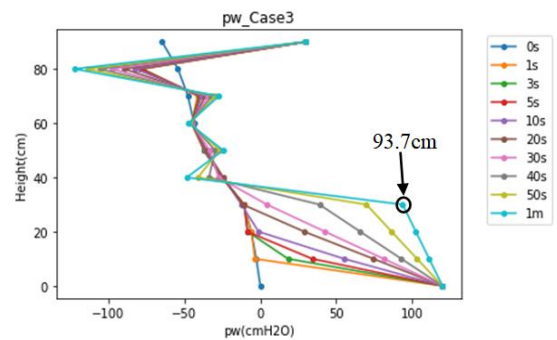


図 3.6 間隙水圧(越流浸透)

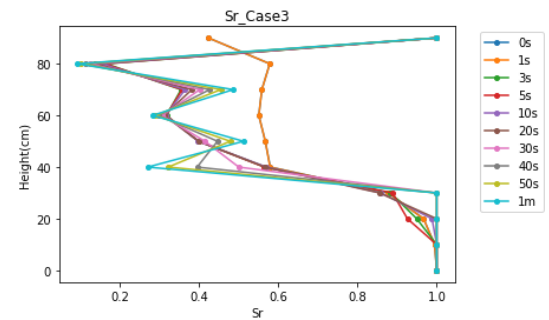


図 3.7 飽和度(越流浸透)

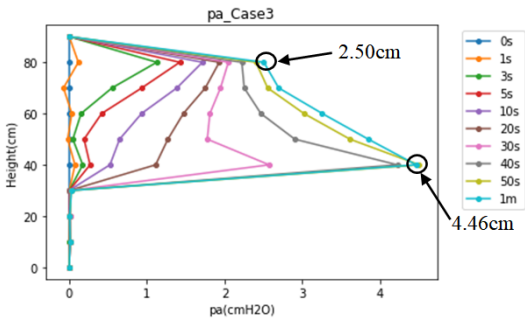


図 3.8 間隙空気圧 (越流浸透)

4.実験結果との比較

同研究室の伊藤恋から頂いた実験結果の間隙水圧、飽和度、間隙空気圧を図 4.1~4.3 に示す。

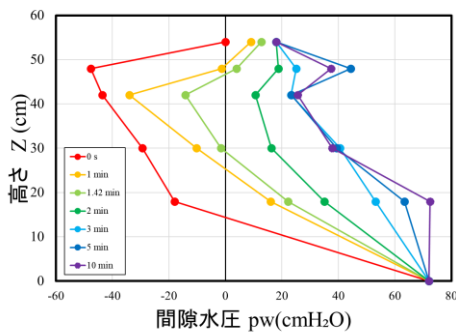


図 4.1 間隙水圧

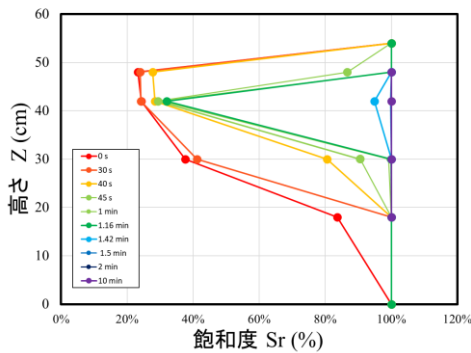


図 4.2 飽和度

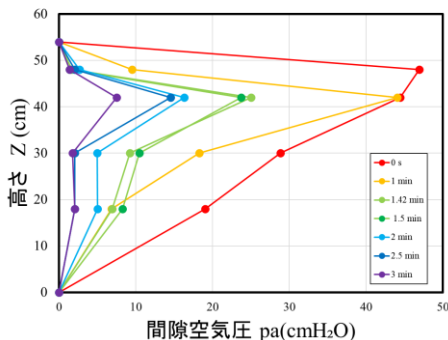


図 4.3 間隙水圧

実験結果の土質パラメーターと解析モデルの高さに合わせると、発散しやすく解析に時間がかかるため合わせていない。そのため詳しい比較はできなかった。

間隙水圧と飽和度を比較すると、図 3.6 と図 3.8 の解析結果では水の浸透が阻害されているのに対して、実験結果の図 3.1 と図 3.2 では解析モデルの中間部で上昇し水が浸透している様子がわかる。また、間隙空気圧を比較すると図 3.8 では増加しているのに対して、図 4.3 では減少していることがわかる。この違いは解析では 1 次元であり、実験では 3 次元であることが関係していると考えられる。解析では 1 次元であるため閉塞条件で空気が通らなくなり土柱に空気が残留し続ける。一方で実験では土柱に気泡や亀裂が発生し空気の通り道が形成されて空気が抜ける。そのため間隙空気圧が減少しこのような違いが生まれたと考えた。

5.結論

- (1)越流状態の土柱では間隙空気により水の浸透が阻害され、間隙空気圧が最大で水頭換算値 4.46cm 発生していることが得られた。
- (2)堤防越流を気液 2 相流により解析を行うことは間隙空気圧の影響を調べることに有効であると考えた。
- (3)実験結果との比較から、1 次元での解析では間隙空気圧の発生を調べることに限界があるため、2 次元や 3 次元に拡張する必要があると考えた。

6.参考文献

- 1) Pinder, G. F. and Gray, W. G.: Finite element simulation in surface and subsurface hydrology, Academic Press, pp.184-190, 1977.
- 2) Meiri, D.: Two-phase flow simulation of air storage in an aquifer, Water Resources Research, Vol.17, No.5, pp.1360-1366, 1981.

深層学習を用いた堤防土質構造からの天端亀裂の発生の判別

EC19045 高橋 蒼

1. 研究背景と目的

東北地方太平洋沖地震では堤防の被災が多く、堤体内で内部液状化が多く発生していたことが確認された。堤体基礎に粘性土層が含まれることにより圧密沈下をして堤体基礎にめり込む。そこに雨水や河川の水が溜まることによって閉封飽和域が形成され、地震により液状化が発生したことが明らかとなった¹⁾。堤体基礎に粘性土層が含まれると天端舗装に縦断亀裂が発生することから、閉封飽和域の発生個所の特定化を考えてきた。しかし、厚い粘性土層が含まれても亀裂が見られない場合があり、粘性土の分布の非対称性も考慮する必要があることがわかってきた²⁾³⁾。そこで本研究では、粘性土を対象とした非対称性を画像による深層学習を用いて、客観的な土質構成と天端亀裂の判別モデルを構築することで、共通する判別要因を明らかにすることを目的としている。

2. 研究方法

2.1 CNN による画像の深層学習

粘土層の分布の非対称性と縦断亀裂の有無について、CNN（畳み込みニューラルネットワーク）を用いて解析を行う。図1のように国土総研の堤防断面図を、ボーリング柱状図などを外すためトレースし直し、土質の種類によって色分けし、AIに学習させることで判定を行う。

天端に亀裂がある断面のデータと亀裂がない断面のデータを同じ数だけ学習させたのち、適用データとして同じように断面データを読み込ませ、その断面の天端に亀裂があるか無いかを判断させる。

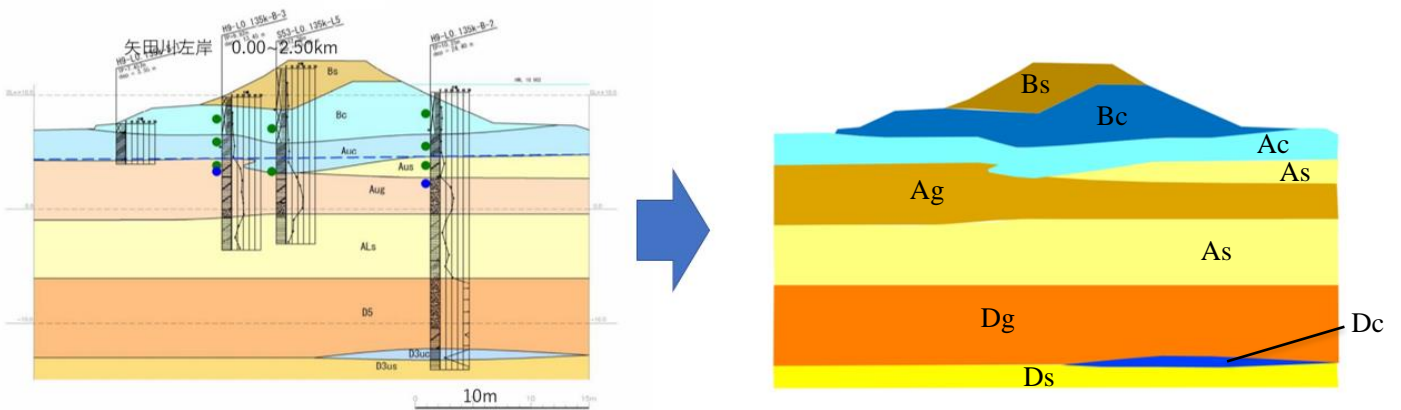


図1 断面データの例

2.2 手法

亀裂の有無が分かっている断面のデータを教師データとして解析する。教師データとして用いた堤防は中部地整の管轄かの4つの河川から亀裂あり断面を76断面、亀裂無し断面を76断面使用した。なお、亀裂の有無はGoogleストリートビューで判断した。

CNNで使用するデータは3種類あり、それぞれ「教師データ」「テストデータ」「適用データ」である。教師データで画像の特徴を学び、テストデータに対して学んだことを当てはめることでどれだけの精度で判定ができるか再現を行い、再現率が高かった学習回数を得た上で適用データに適用をする。使用したデータ数の内訳と再現率のグラフを以下に示す。

表1 使用したデータ数の内訳

	亀裂あり	亀裂なし	合計
教師データ	76	76	152
テストデータ	8	8	16
適応データ	30	19	49

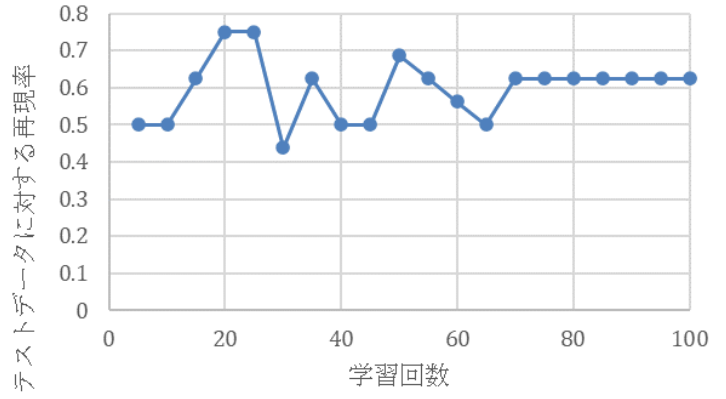


図2 学習回数と的中率のグラフ

今回のモデルでは20回、25回の学習回数において再現率が高くなっており、この解析では学習回数を20回に設定した。なお、バッチサイズ（データをどれだけ小分けにして学習を行うか）は30に設定をした。

3. 結果

解析の結果を図3・図4に示し、AIによる判別一致の累積断面数と河口からの距離の関係グラフを図5に示す。全体の的中率を表2に示す。

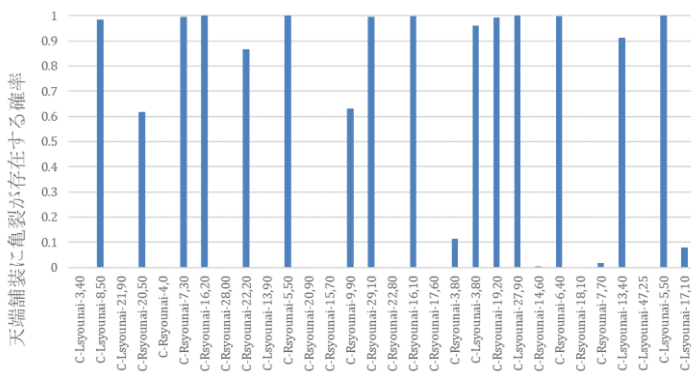


図3 亀裂あり断面に対する亀裂ありの確率

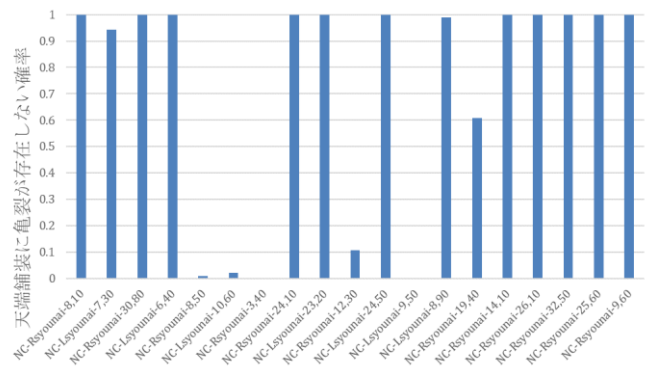


図4 亀裂なし断面に対する亀裂無しの確率

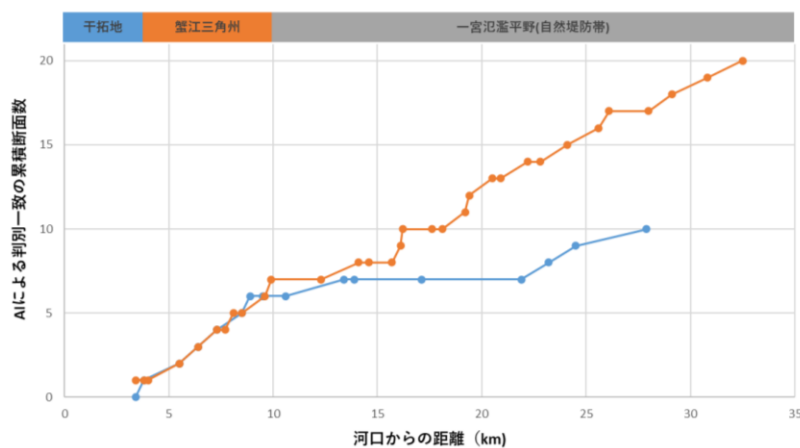


図5 河口からの距離と AI による判別一致の累積断面数の関係図

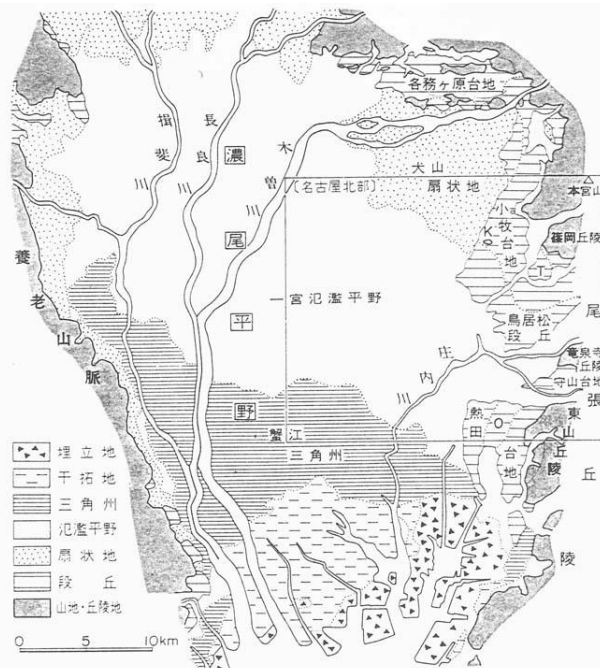
表2 正解・不正解の数と正解率

	亀裂あり	亀裂無し	
正解	15	14	
不正解	15	5	全体の的中率
的中率	0.5	0.74	61.8%

4. 考察

亀裂無しの断面が19枚中14枚正解していた一方で、亀裂ありの断面は正解・不正解共に15枚とあまりいい結果にはならなかった。河口からの距離とAIによる判別一致の累積断面数のグラフを見ると、およそ10km地点までは順調に正解を重ねていっていることが分かるが、10kmを超えたあたりから一部停滞している部分が見られる。図6の濃尾平野の概念図によると⁴⁾10km地点からは一宮氾濫平野とよばれる地層になっており、断面図を見ると深層に締め固まった粘土層が存在する場合とそうでない場合で亀裂の表れ方が違うため、精度に影響が出た可能性が考えられる。

Gradcam を見ると、亀裂ありのデータ・無しのデータともに、着目されている部分の多くは粘性土層であった。亀裂ありのデータでは、盛土の粘性土層、不規則に分布した沖積層の粘性土層、洪積層の粘性土層に強く着目が見られた。また、粘性土層と他の層の境界が大きく傾斜しているところが強く着目されていた。画像から判断すると、粘性土層の厚み、傾斜、非対称性などさまざまな要因が重なり合って亀裂が生じている可能性が得られた。また、着目の度合いは盛土の粘性土層の方が比較的強く、沖積層以下の粘性土層よりも盛土の粘性土層の方が亀裂の発生に影響を与えやすいと考えられる。



第1図 濃尾平野の地形概念図 (森原, 1975a により簡略化)。K: 小牧山, T: 田舎台地, O: 大曾根台地

図6 濃尾平野の地形概念図

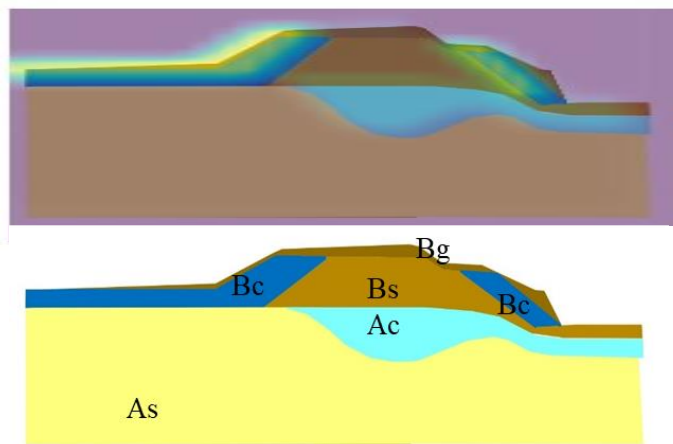


図7 盛土の粘土層が強く着目されている例 庄内川右岸 16.2km 地点

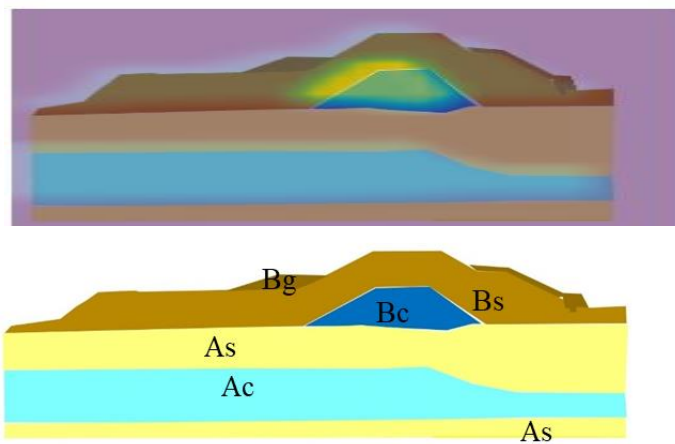


図8 盛土の粘土層が強く着目されている例 庄内川左岸 3.8km 地点

図7、8のように盛土に粘土層が含まれているものは亀裂が生じていることが多かった。

一方で亀裂ありのデータで正解率が50%になってしまったことについて、解析を行う際に画像がリサイズされてしまうことが精度低下の一因となっていると考えられた。本来であれば層の深さは判断するにあたって重要な要素となりえる。本論文では元画像との比較がしやすいように引き延ばして添付をしているが、実際には縦と横の比が1:1になって解析がされている。このように縮尺や縦横比が調整されてしまうことによって、本来重要である深さや層厚がうまく学習されていない可能性がある。

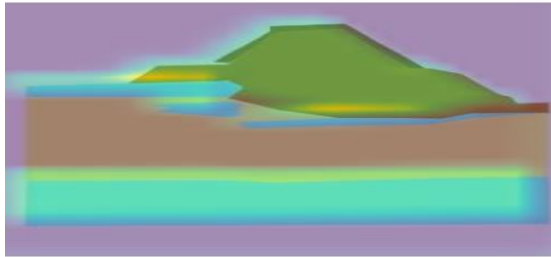


図9 リサイズによって不正解となったと考えられる断面の例 庄内川左岸 10.6km 地点

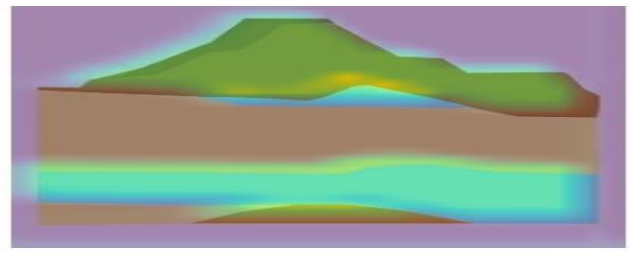


図10 リサイズによって不正解となったと考えられる断面の例 庄内川右岸 8.5km 地点

図9、図10はそれぞれ天端に亀裂の存在しない断面である。しかしAIは亀裂があると判断しており、どちらも不正解となった断面である。解析上の必要性から入力画像を同じ大きさにするリサイズが施されており、堤体の規模(高さや粘性土層の大きさ)が相対的なものとして取り扱われていることも影響していると考えられた。リサイズ時に絶対的な堤体の規模をも含めた学習を考える必要があるものとする。

5. 結論

堤防天端の亀裂と地盤状況の関係性の解明において、深層学習による画像解析を取り入れて研究を試みた結果、以下の結果を得ることができた。

- 1) 縦断亀裂の発生には堤体基礎地盤の粘性土層の厚み・傾斜・非対称性が関わるとともに、盛土の粘性土層の影響が顕著であることが、Gradcamの共通の着目点から明らかとなった。
- 2) 教師データ152枚、適用データ49枚で61%の正答率を得られたが、今後データを増やすなどしてさらなる結果が得られる可能性がある。
- 3) 構築したモデルは庄内川の結果から沖積粘土層が卓越する堤体基礎地盤に適用度が高く、洪積粘土層からなる堤体基礎のデータをも含めた学習が必要であると考えられた。
- 4) 絶対的な堤体の規模をも含めた学習を考える必要があるものとした。

6. 参考文献

- 1) 朱 発瑜, 平野浩之, 山田雄大, 杉井俊夫: 堤体基礎沈下箇所と天端縦断亀裂の関係, <https://jgs-chubu.org/wp-content/uploads/2020/07/29-9.pdf>, 2020
- 2) 朱 発瑜, 平田武史, 深見秀隆, 平野浩之, 杉井俊夫: 天端縦断亀裂による堤体基礎めり込み危険箇所の評価, 令和元年土木学会中部支部研究発表会, 2019
- 3) 浅井駿輝, 杉井俊夫, 深層学習による堤防天端の縦断亀裂を伴う粘性土分布の分析, 2022
- 4) 坂本他(1984), 2-1-1 濃尾平野の地形・地質概要, <https://www.hp1039.jishin.go.jp/kozo/Aichi6C/2-1-1.htm>

間隙径分布と締固め含水比の関係性

EC19055 野川 敦史

1. はじめに

締固めと透水係数の関係において、最適含水比を境に締固め時の含水比の違いにより著しい透水係数の変化がみられる。しかしこの変化が起きる理由について明瞭な理由は明らかになっていない。本研究では間隙径分布の容易な推定の可能性について示すことで、締固め時の含水比の違いによる著しい透水係数の変化のメカニズム解明に努めるとともに間隙径分布と締固め含水比の関係性について研究することを目的とする。

2. マサ土の諸量

本研究ではマサ土を用い、JIS1202：土粒子の密度試験方法¹⁾、JIS1203：土の含水比試験方法²⁾、JISの網ふるいの開き目を使用した粒度試験³⁾を行い、図1のようにマサ土の土粒子密度、含水比、粒度分布を算出した。

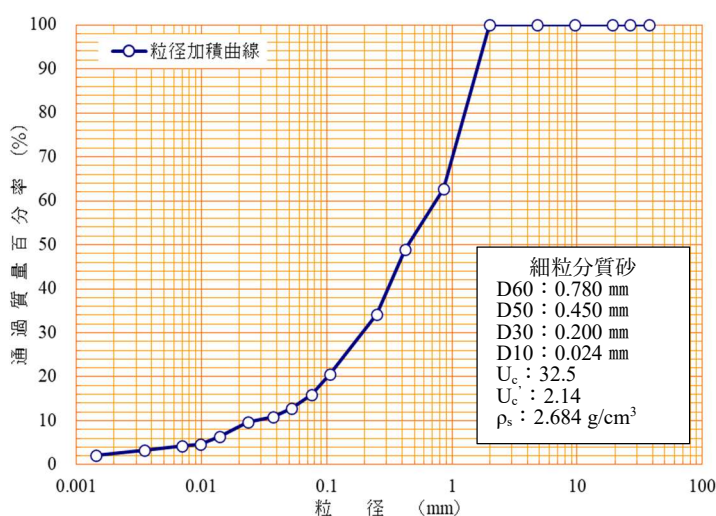


図1. マサ土の諸量

3. 間隙径分布の推定

間隙径分布の推定には間隙径を細い毛管の束と仮定し、その管径の大きさに対する毛管上昇高の考え方をを用いる。メニスカスによる吸引圧と毛管上昇高に相当する、水の体積による重量とバランスから算出される毛管上昇高の関係を用いることで、負の圧力水頭から管径を推測する方法である式(1)を用いる。また、不動水である吸着水も間隙に含まれることを考慮すると一般的な飽和度 S_r (式(2))が適切である。飽和度は移動できる間隙水の水分量の割合であり、累積間隙体積率と考えることができる⁴⁾。

$$d_m = \frac{4\sigma}{\rho_w g h_p} \quad (1)$$

$$S_r = \frac{\theta}{n} \quad (2)$$

ここに、 d_m :間隙径(mm)、 σ :水の表面張力(72dyne/cm)、 ρ_w :水の密度(g/cm³)、 g :重力加速度(m/s²)、 h_p :負の圧力水頭(cm)、 S_r :飽和度、 θ :体積含水率、 n :間隙率である。

4. 締固めと透水係数

(i) 締固め試験

試料の準備にあたりマサ土の破碎や含水比が締固め特性に影響を及ぼす。そのため試験の実施に際して、表1のような土の種類や粒径に応じて試験法を選択して採用する。マサ土は締固めによって土粒子が破碎され易く温度差に弱いいため、b

表1. 試料の準備方法と使用方法

組合わせの呼び名	準備方法—使用方法
a	乾燥法—繰返し法
b	乾燥法—非繰返し法
c	湿潤法—非繰返し法

法(乾燥法-非繰返し法)を用いて試験を行う。

また、突固め試験では式(3)で定義される締固め仕事量で締固めエネルギーを定義している。今回の試験では表2にあるような条件で各層の突固めを行った。その際、JIS 規定 A と今回の条件の締固め仕事量が等しくなる場合の各層の突固め回数を算出した。

表2. 指定条件

呼び名	ランマー質量 (kg)	ランマー落下高(cm)	モールド内径 (cm)	モールド容積 (cm ³)	突固め層数	各層の突固め回数	許容最大粒径 (mm)
A	2.5	30	10	1000	3	25	19
今回	1.5	20	8	251	2	47	19

$$E_c = \frac{W_R H N_L N_B}{V} \quad (3)$$

ここに、 E_c :締固め仕事量(kJ/m³)、 W_R :ランマーの重量(kN)、 H :ランマーの落下高さ(m)、 N_L :層数、 N_B :1層当たりの突固め回数、 V :モールドの容積(m³)である。

(ii) 透水試験

KSAT は定水位法および変水位法で飽和透水係数を計測できる装置である。図2のように締固めた試料を飽和させ、KSAT に試料を取り付けることで測定を行う。今回の試験ではKSAT を用いた変水位透水試験を行っている。

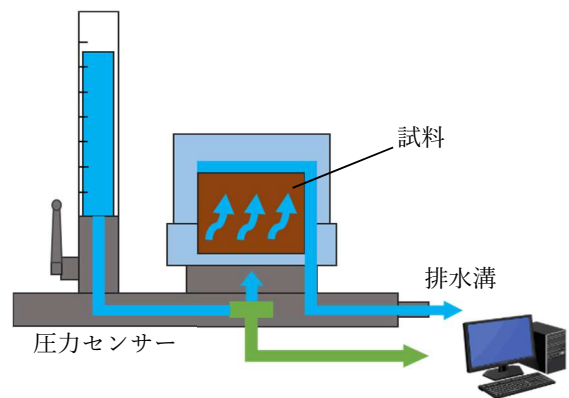


図2. KSAT の全体図

(iii) 締固めと透水係数

透水試験の結果を表3、締固めと透水係数の関係を図3に示す。図3より締固め時の含水比によって透水係数に大きな差があることが確認できる。また乾燥密度がほぼ同様の値であるにも関わらず、乾燥側と湿潤側で透水係数に差があることも確認できる。この時の差は2オーダー程度となっている。ここから、乾燥密度が一定であっても供試体作製時の含水比によって透水係数が大きく変化するという結果を得た。

表3. 透水試験データ

供試体	室内気温	透水係数(m/s)	15°C(m/s)	含水比	乾燥密度
ma1	19°C	1.20×10^{-6}	1.08×10^{-6}	4.52	1.676
ma2	16°C	1.16×10^{-7}	1.13×10^{-7}	21.35	1.631
ma3	17°C	1.16×10^{-7}	1.10×10^{-7}	21.35	1.635
ma4	17°C	4.95×10^{-7}	4.70×10^{-7}	12.01	1.736
ma5	15°C	4.69×10^{-8}	4.69×10^{-8}	15.27	1.784
ma6	16°C	2.79×10^{-8}	2.72×10^{-8}	16.90	1.767
ma7	17°C	1.43×10^{-6}	1.36×10^{-6}	8.48	1.700
ma8	19°C	5.45×10^{-8}	4.92×10^{-8}	18.36	1.732

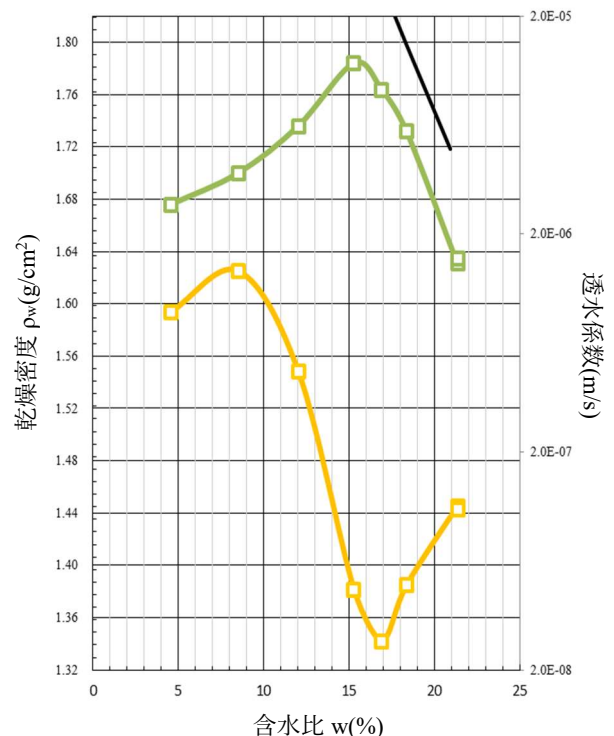


図3. 締固めと透水係数

5. 水分特性曲線と間隙径分布

広範囲のサクションを計測する必要があるため、2つの試験装置を使用する。

(i) 蒸発法

図4に示すように、テンシオメータを使用して試料内の負圧を測定するものである。体積含水率及び飽和度は電子天秤の計測による連続的な重量減少の記録で計算を行う。

(|hp|=900 水頭まで)

(ii) サイクロメーター法

図5のように密閉容器内で試料と内部の空気の水ポテンシャルを平衡させることでミラーを冷却させ、それを光学センサーで捉えその時の温度を測定する。測定した温度を基に土中水の水ポテンシャル式(4)を計算して求める⁵⁾。(|hp|=3000 水頭以上)

$$\phi = \rho_w \frac{RT}{M} \ln\left(\frac{p}{p_0} \times \frac{1}{100}\right) \quad (4)$$

ここに、 ϕ :土中水ポテンシャル、 ρ_w :水の密度(g/cm³)、R:気体定数(8.314J/(K・mol))、T:絶対温度(K)、M:水の分子量(kg/mol)、 p/p_0 :相対湿度、 p :土中水と平衡している水蒸気の圧力、 p_0 :等温大気圧下の蒸留水と平衡している水蒸気の圧力である。

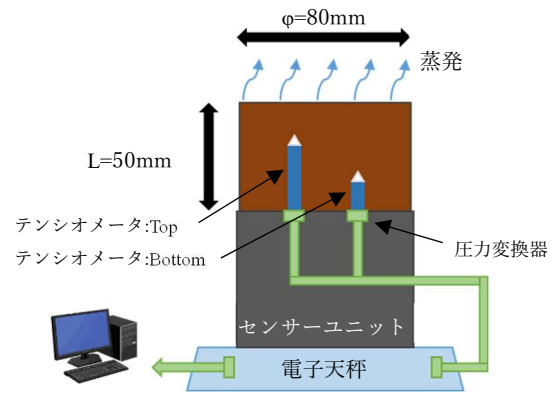


図4. HYPROPの全体図

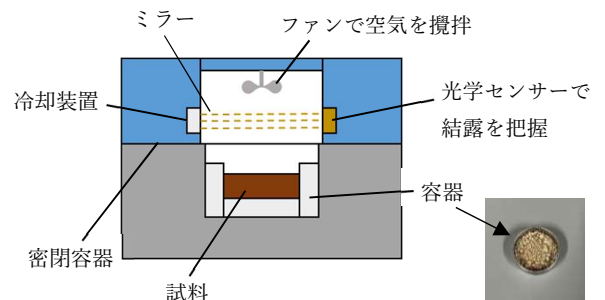


図5. WP4-Tの全体図

(iii) 水分特性曲線

サイクロメーター法と蒸発法における保水性試験の結果を図6に示す。サイクロメーター法においては可能な限り多く計測を行うことで、より正確な水分特性曲線が得られた。今回の計測では最低で7000 cm程度までデータを得られた。湿潤側と乾燥側では、一定の負の圧力水頭における飽和度の値がサイクロメーター法と蒸発法の両方において、湿潤側が高くなっていることが確認できる。これは締固め時の含水比が影響していると推測する。

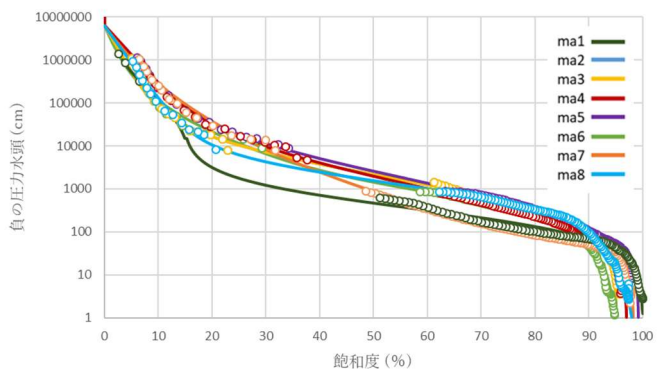


図6. 水分特性曲線

(iv) 間隙径分布

同一乾燥密度での間隙径分布を図7に示す。乾燥密度の値はほぼ一定であるにも関わらず、間隙径の分布に大きな差があることが確認できる。条件よりこれは含水比の差によって発生したものであるとわかる。透水係数も同乾燥密度であるにも関わらず締固め時の含水比によって大きく値が変化することから、間隙径分布と透水係数には関係性があると推測する。間隙径分布を推定することによって大まかな透水係数の値を導き出すことができ、逆も

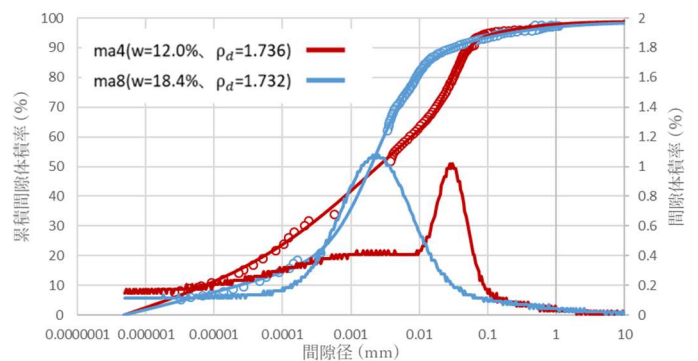


図7. 同一乾燥密度の間隙径分布(ma4, ma8)

同様に透水係数の値から大まかな間隙径分布の形を推定できると考える。

乾燥側と湿潤側の間隙径分布をそれぞれ図8、図9に示す。乾燥側では0.01~0.1mmに間隙径が集中している一方、湿潤側では0.001~0.01mmに間隙径が集中していることが確認できる。乾燥側と湿潤側では間隙径の分布が大きく異なることがわかる。また乾燥側、湿潤側ともに僅かな差異ではあるが、締固め含水比が最適含水比である15.3%から離れた値であるほど間隙体積率の頂点の値が大きくなっていることが確認できる。

乾燥側と湿潤側の間隙径分布の比較を図10に示す。乾燥側と湿潤側では分布曲線の傾きが異なることが確認できる。湿潤側と比較し乾燥側の曲線は緩やかであることから、間隙径の分布にばらつきがあることがわかる。また締固めと透水係数の関係より、最適含水比を境に乾燥側は透水係数が大きく、湿潤側は小さくなっている。図10の比較より乾燥側と湿潤側では間隙径の分布も大きく異なることから、間隙径が少なからず透水係数の値に影響を与えていることがわかる。また乾燥側と湿潤側で間隙径分布が異なるため、締固め含水比から大まかな間隙径分布の形を推定することができる。

6. まとめ

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 間隙径分布と透水係数の一方を求めることで、もう一方の大まかな分布や値を推測することができる可能性を示した。
- 2) 乾燥側と湿潤側では透水係数と同様に間隙径の分布が大きく異なることから、締固め時の含水比の違いによる著しい透水係数の変化に間隙径が少なからず影響を与えていると推測できる。
- 3) 乾燥側と湿潤側で間隙径分布が異なるため、締固め含水比から大まかな間隙径分布を推定することができる可能性を示した。

【参考文献】

- 1) 日本工業規格:JIS A 1202(土粒子の密度試験),2020.
- 2) 日本工業規格:JIS A 1203(土の含水比試験),2020.
- 3) 日本工業規格:JIS A 1204(土の粒度試験),2020.
- 4) 杉井俊夫・川部らら:堤体の浸食メカニズムに関わる砂の間隙構造の評価,総合工学第31巻,pp.12-21,2019.
- 5) 盟和商事株式会社:WP4/WP4-T 水ポテンシャル測定装置操作マニュアル,pp1-5,2000.

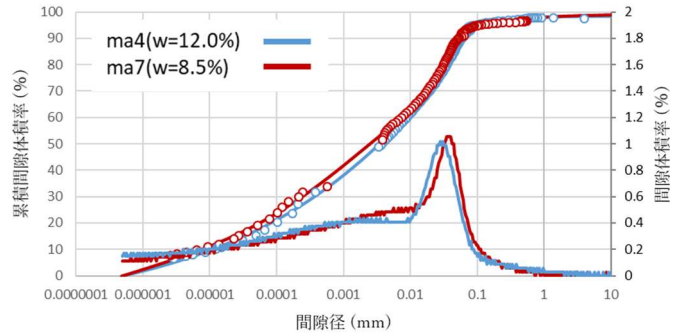


図8. 乾燥側の間隙径分布(ma4、ma7)

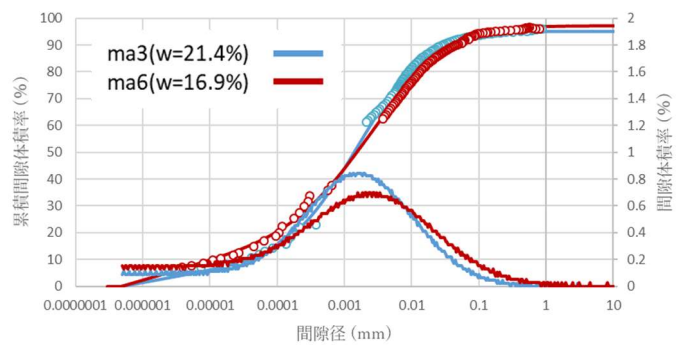


図9. 湿潤側の間隙径分布(ma3、ma6)

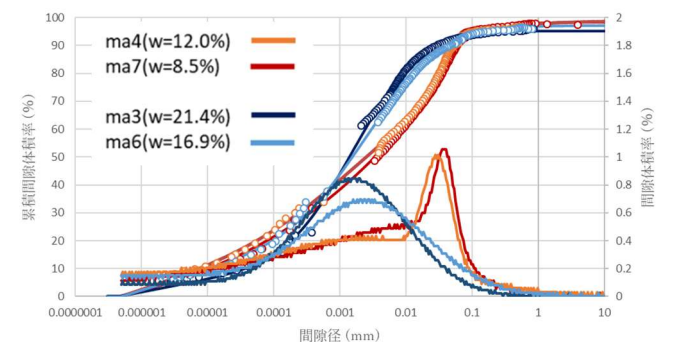


図10. 乾燥側と湿潤側の間隙径分布の比較(ma3、ma7)

間隙径分布と透水係数の関係

EC19063 古川 泰之

1. 背景・目的

土の締固めを行う際の含水比が異なる場合、乾燥密度が同じでも透水係数が大きく異なることが、これまでの研究によりわかっている。この現象が起こる原因に間隙径の大きさの分布状態（間隙径分布）が大きく影響していると考えられている。しかし、これまで間隙径分布を計測する方法が難しく、得られた結果の物理的意味も曖昧であった。杉井らが間隙が細くなる「間隙くびれ径」の分布を水分特性曲線から計測可能であることを示しており、本研究ではこれにより、透水性への影響を明らかにするものである。

2. 対象試料

密度試験と粒度試験を用いて、今回使用する真砂土の物理諸量を求めた。試験の結果、密度が 2.684g/cm^3 であり、礫分 0%、砂分 84.1%、細粒分 15.9% であり、「細粒分質砂」に分類される。試験結果から得られた物理諸量および粒径加積曲線を図 1 に示す。

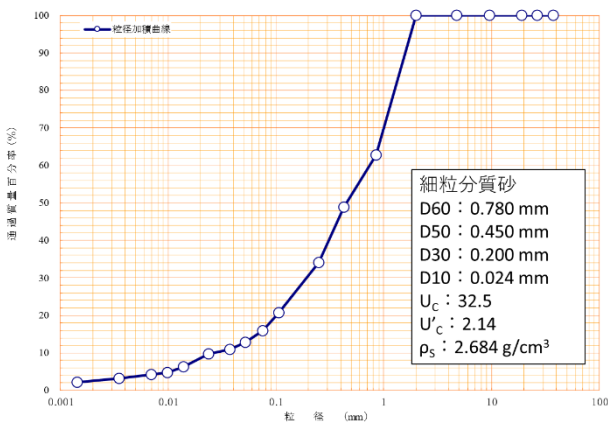


図 2.1 物理諸量および粒径加積曲線

3. 締固め時の含水比と透水係数

3.1 土の締固め試験

締固め曲線を求めるため、土の締固め試験を行った。締固め曲線とは、締固めの程度を表す曲線であり、乾燥密度が最も大きいときの含水比を最適含水比という。締固めには、準備方法は試料を

全て自然乾燥させ含水比を増加させる乾燥法、使用方法は試料を毎回新しいものを使う非繰り返し法を用いた。突固めの層数は 2 層、各層の突固め回数は 47 回で行った。

3.2 KSAT による変水位透水試験

本研究では変水位透水試験に KSAT という測定装置を用いた。KSAT は測定時の水温、透水係数、水位と経過時間を表すグラフを求めることができる。このグラフは傾きが大きいほど透水性が高いことを示しているものである。

3.3 締固め曲線と透水係数

土の締固めを行う際の含水比が異なる場合、乾燥密度が同じでも透水係数が大きく異なることが、知られている。本研究に用いるマサ土でも同様の現象が起こることが、「土の締固め試験」と「変水位透水試験」により確認できた (図 3.2)。

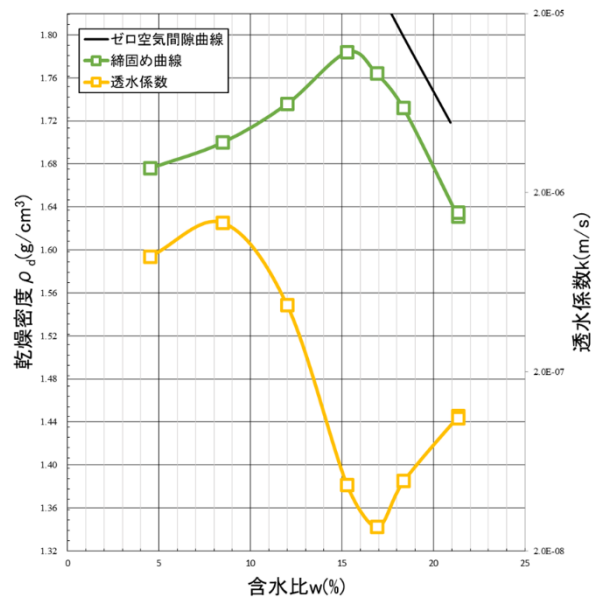


図 3.1 締固め曲線と透水係数の関係

4. 含水比ごとの土の間隙径分布の計測

4.1 土の保水性試験

保水性試験とは水分特性曲線を求めるために行う試験であり、水分特性曲線は土の保水特性を示しているものである。HYPROP を用いた試験方法

では排水過程のデータを取っている。また HYPROP では、含水量が少なく負圧が高くなっていく場合は計測することができない。よって WP4-T という高圧域を図ることが可能なサイクロメーターを使用し計測する。

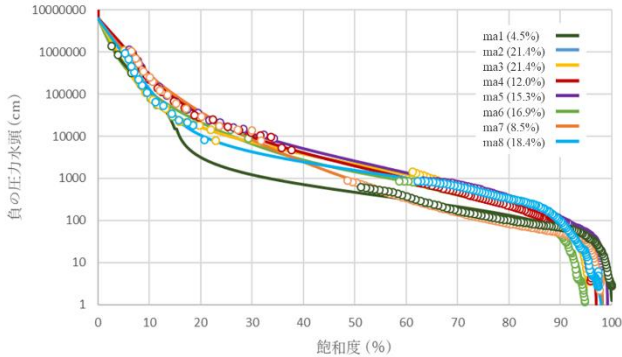


図 4.1 水分特性曲線

4.2 間隙径分布の推定方法

間隙径分布の計測法は、水銀圧入法などが一般的であるが、計測装置が高価であることや水銀を扱うこと、大きな間隙の測定に精度があるため、水分特性曲線から毛管径を利用した間隙径分布の推定を行った。

間隙径を一つの毛管径 d_m と考えると毛管に発生する負圧 h_p との関係は、次式のようにになる。

$$d_m = \frac{4\sigma}{\rho_w g h_p} \cdot 10 \quad (4.3)$$

ここに、 σ ：水の表面張力（水温 15°C で 73.48(g·cm/s²）、 ρ_w ：水の密度、 g ：重力加速度である。また、間隙径 d_m 以下に相当する累計間隙体積率 V_r は飽和度 S_r に等しいと考えられることから間隙径分布を得られる。

4.3 間隙径分布の比較

締固め時の含水比における透水係数が同一乾燥密度でも大きく異なる原因を求めるためには、同一乾燥密度における間隙径分布を比較する必要がある。締固め曲線の乾燥側 ($w=12.0\%$, $k=4.70 \times 10^{-7}$ (m/s), $\rho_d=1.736$ g/cm³)・湿潤側 ($w=18.4\%$, $k=4.92 \times 10^{-8}$ (m/s), $\rho_d=1.732$ g/cm³)における間隙径分布を 4.2 の方法により求めた。それぞれの間隙径分布を図 4.2、図 4.3、に示す。

乾燥側の間隙径分布は大きな間隙径に間隙体積率のピークがあり、小さな間隙径への散らばりがあることがわかる。対して、湿潤側の間隙径分布は小さな間隙径に間隙体積率のピークがあり、最

大の間隙体積率に集中していることがわかる。

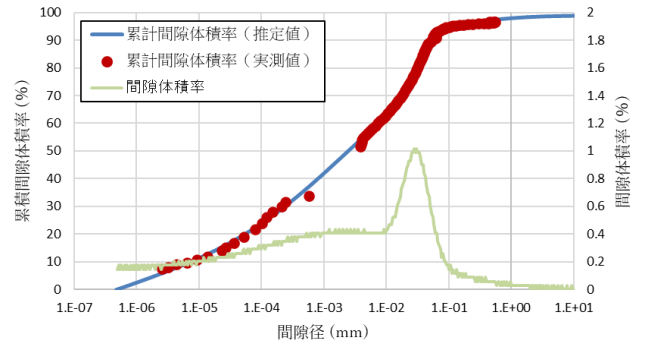


図 4.2 間隙径分布($w=8.48\%$, $k=4.70 \times 10^{-7}$ (m/s), $\rho_d=1.736$ g/cm³)

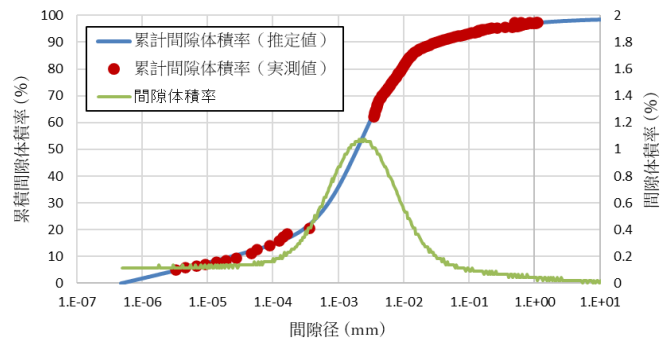


図 4.3 間隙径分布($w=18.4\%$, $k=4.92 \times 10^{-8}$ (m/s), $\rho_d=1.732$ g/cm³)

5. 結論

本研究により、同乾燥密度の透水係数が含水比により大きく異なる原因は、間隙径の大きさと散らばりによって引き起こされるということが説明できる。

【謝辞】

本研究を進めるにあたり、共同で実験を行った同研究室のメンバーに心より感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 長谷川純也・藤縄克之・江澤静一郎・豊田富晴・渡邊紹裕: 土壌水分ヒステリシスが飽和・不飽和浸透流に及ぼす影響, 地下水学会誌第 53 巻第 1 号, p.26.2010-10-8.
- 2) 竹内啓介・坪田邦治・岩田暁・清水亮太・石原聖子: 供試体作製時の含水比が透水係数と密度の分布に及ぼす影響, 中部土質試験協同組合, 2017.
- 3) 杉井俊夫・川部ら: 堤体の浸食メカニズムに関わる砂の間隙構造の評価, 総合工学第 31 巻, pp.12-21, 2019.

原位置試験における透水性・保水性評価に関する研究

EC19077 山田紘輝

1. はじめに

今日まで現場の透水性保水性を調べる方法として室内試験で行われることが多い。だが試料のサンプリングによる乱れや現場周辺の環境により、原位置地盤を再現するのが困難になるというデメリットがある。そのため現場での評価方法が求められているのが現状である。負圧浸入計を用いた現場透水試験と保水性試験を同時に行い、透水係数と水分特性曲線を求めることを目的としている。

本研究では式(1)に示す vanGenuchten モデル（以後 vG モデルと略す）という水分特性曲線を表す式を使用する。

$$s_e = \frac{1}{(1 + |\alpha h|^n)^{1/n}} \quad (1)$$

ここに、 s_e : 有効飽和度 (-) h : 負の圧力水頭 (cm) α, n : vG パラメータである。

水分特性曲線吸水過程の水浸入値について、負圧浸入計を用いた現場透水試験 (JGS 1319-2017) からの圧力水頭 (h)、湿潤量 (土が引っ張る力) (図 2) の関係から負の圧力水頭の h_p を逆数にする (図 1) ことで求めることができる。 n は水分特性曲線の勾配であり、粒径が大きいほど勾配に影響あることから、粒度分布で D_{50} 以上を卓越した勾配を基準として求めることができる。この 2 つは石井らの研究と森らの研究で判明している。本研究では現地を想定した場所をコンテナボックスで再現し、粒度試験と負圧浸入計を用いた透水試験で 2 つの先行研究を利用し透水性と保水性の評価を行う。本研究では三河珪砂 4 号 6 号 8 号マサ土で行った。概要では枚数の都合上 4 号と 8 号とマサ土を掲載する。

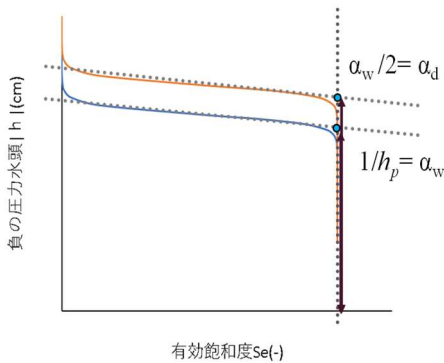


図 1 水浸入値と空気浸入値

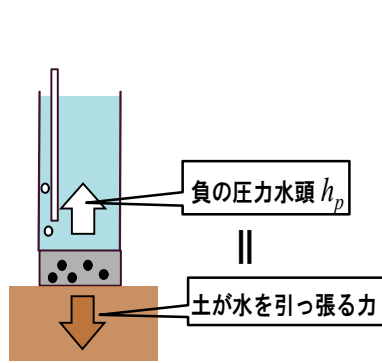


図 2 湿潤する力と負圧の関係

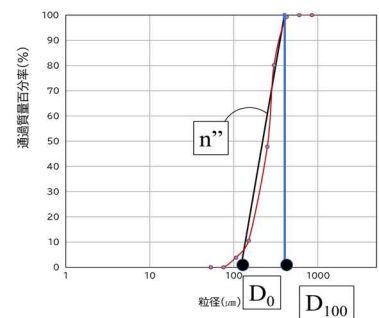


図 3 粒度分布から n の推定方法

2. 負圧浸入計を用いた透水試験

負圧浸入計は、ある一定の圧力を計測する地盤に負の圧力水頭で負圧をかけながら装置の下部から水で浸透させ、圧力開始から経過時間当たりの湿潤水面と経過時間を記録し透水係数を求めることができる。ゴム管を 0 として装置は水位が低下しても常に一定の流量で流出させるマリOTT構造を採用した。

表 1 試料の詳細

試料	三河珪砂			マサ土
	4号	6号	8号	
乾燥密度 (g/cm ³)	1.42	1.35	1.41	1.33
α_d (1/cm)	0.11	0.03	0.01	
n	6.29	10.54	8.35	

これらを湿潤水頭を変えながら行い縦軸を湿潤量 Q (cm³) 横軸を経過時間(s)で図4図5図6図7に示す。

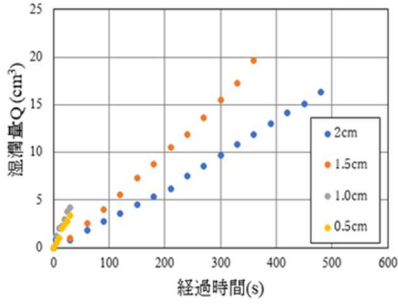


図4 マサ土の透水試験結果

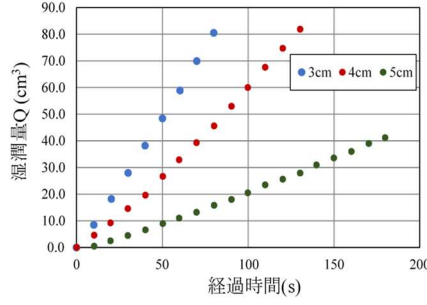


図5 4号の透水試験結果

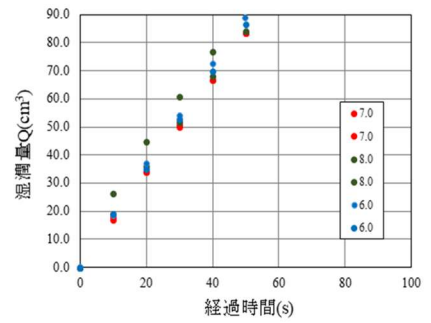


図6 8号の透水試験結果

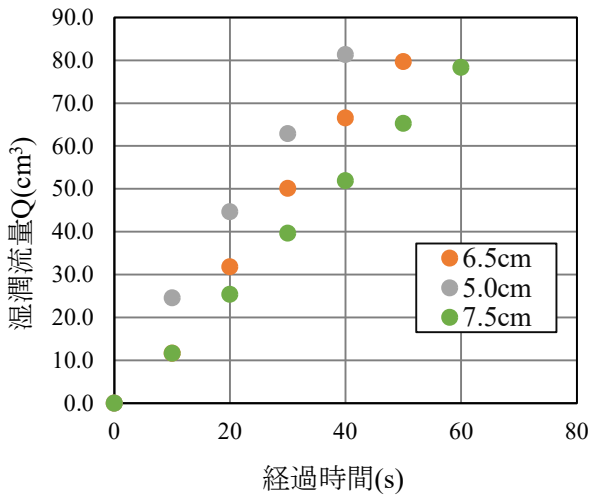


図7 6号の透水試験結果

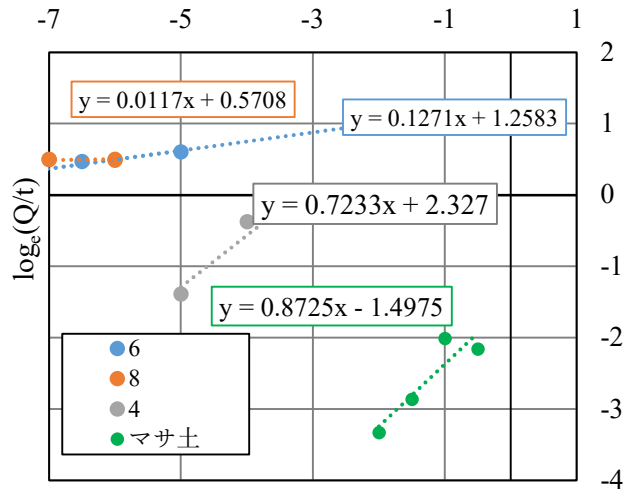


図8 log_e-圧力水頭

次に、各水頭の時間当たりの湿潤量を求めるために勾配を導き、負の圧力水頭 h の関係を表したグラフを図8に示す。

3. 透水係数の算定

計算方法は wooding (1968) の式(2)を透水係数の式に変形したもの式(3)を使用する。

$$\log_e \left(\frac{Q}{t} \right) = \alpha h_a + \log_e \left[\pi R^2 + \frac{4R}{\alpha} \right] \times k_{fs} \quad (2)$$

$$k_{fs} = \frac{e^{\log_e(Q/t)}}{\pi R^2 + \frac{4R}{\alpha}} \quad (3)$$

ここに、 h : 湿潤水頭 (cm) R : ステンレス板の半径 (cm) である。ただし α は(2)の直線方程式とした際の勾配であり vG モデルの土壤パラメータではない。

図7図8の近似線は式(2)の一次関数である。よって式(2)に代入し式(3)のように計算を行うと、珪砂4号の

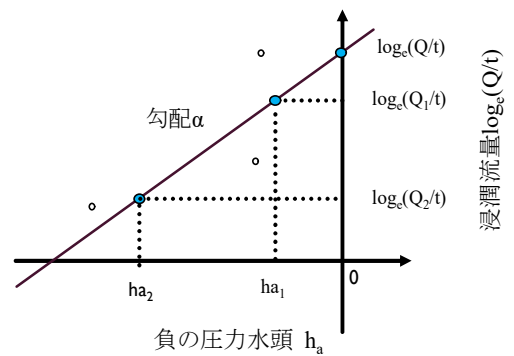


図9 圧力水頭-定常湿潤流量 log_e (Q/t) との関係

表4 過去の研究によって求められた透水係数³⁾

	試料	飽和透水係数(cm/sec)
三河珪砂	4号	1.47×10^{-1}
	6号	1.61×10^{-2}
	8号	2.21×10^{-3}

透水係数は $3.61 \times 10^{-1}(\text{cm/s})$ 珪砂 6 号は $4.06 \times 10^{-2}(\text{cm/s})$ 珪砂 8 号の透水係数は $2.26 \times 10^{-3}(\text{cm/s})$ 、マサ土は $8.53 \times 10^{-3}(\text{cm/s})$ となった。比較を行うために過去の研究で求められた透水係数を使用し判断する。(表 3 参照)

結果、試験で算定された値は近い値を得られたことが分かった。だが 8 号の試験について負の圧力水頭を上げると装置のつなぎ目や地面とステンレス板の隙間などから空気が入り、正確な測定ができない事があった為負の圧力水頭を小さくする必要があった。

そのため時間当たりの湿潤量が高くなり、飽和透水係数が計測できる前に貯水タンクの水が無くなり安定した計測を行えなかった。よって、留意点として小さい負の圧力水頭でも負圧浸入計で安定した計測するために貯水タンクを大きくする必要がある。

4. vG モデル土壌パラメータ α の推定

3. で計測したデータから水浸入値を求める。図 2 の関係から、図 9 の切片が h_p である。図 1 から珪砂 4 号 8 号の水浸入値と空気浸入値を求め、整理したものを表 4 に示す。

表 5 水浸入値と空気浸入値

		h_p	α_w	α_d
三河珪砂	4号	5.641	0.177	0.089
	6号	14.052	0.071	0.036
	8号	51.647	0.002	0.010
	マサ土	2.286	0.438	0.219

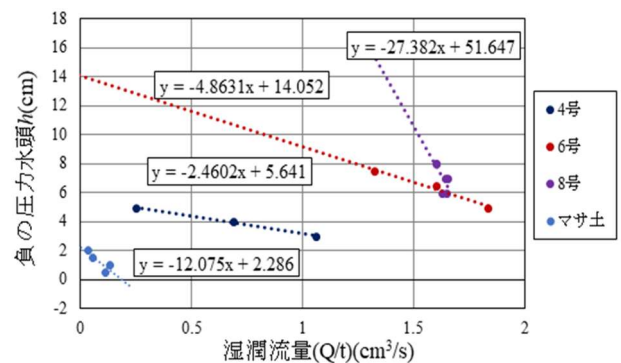


図 10 負の圧力水頭と湿潤流量 Q/t (cm^3/s)

5. vG モデル土壌パラメータ n の推定

本研究ではコンテナボックス内の珪砂で粒度試験を行い粒度分布作成、土壌パラメータの推定の手順で行う。試験方法は JIS A 1204 に基づいて行う。使用するふるいは内径 75mm のものである。(写真 1 参照) 目の間に挟まることを考慮して試料は 50g で行った。この結果(図 10 図 11 参照)から、水分特性曲線を表す vG モデルの未知数土壌パラメータを推定する。パラメータは D_{50} 以上で多く点を通る直線を引き D_{100} と D_0 を読み、式 (4) を用いて計算を行う。

$$n' = \frac{1}{\log\left(\frac{D_{100}}{D_0}\right)} \times 1.8 \quad (4)$$

ここに D_0 : 0% 粒径、 D_{100} : 100% 粒径とする。 n' は土壌パラメータ n であるが、室内試験で求められる n と区別するために n' とする。

結果、珪砂 4 号の n' は 6.93 珪砂 8 号の n' は 5.35 であった。

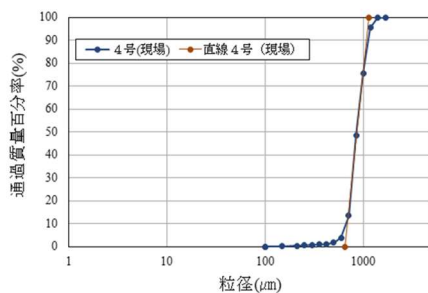


図 11 三河珪砂 4 号の現場粒度分布と直線

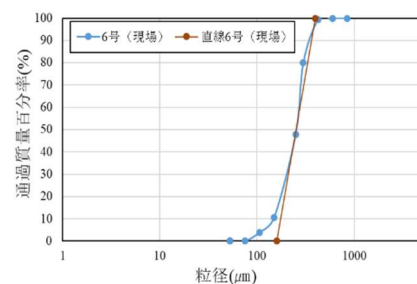


図 12 三河珪砂 6 号の現場粒度分布と直線

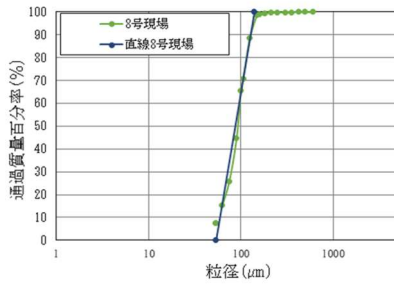


図 13 三河珪砂 8 号の現場粒度分布と直線

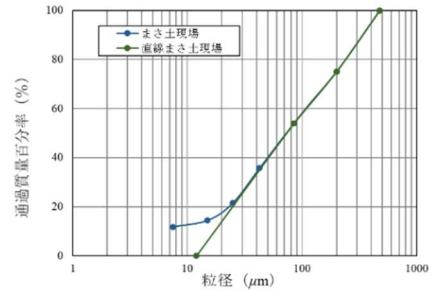


図 14 マサ土の現場粒度分布と直線

6.室内試験と現場試験の水分特性曲線の比較

4. と 5. で求めた α と n' を式(1)に代入し、水分特性曲線を作成する。同試料で室内保水性試験を行い水分特性曲線の作成し比較を行う。図 15、図 16 に水分特性曲線を示す。この結果から三河珪砂 4 号 6 号は類似していることが分かった。8 号については、排水過程のみ類似し吸水過程は形状のみ同じだと分かった。類似しなかった理由は室内試験の水分特性曲線で水による土の締固めが起き、現場試験と比較するためにあらかじめ設定した乾燥密度より大きくなったからではないかと考えた。マサ土について吸水過程においては類似していることが分かった。だが排水過程においては形状も違った。このことから、室内試験の水分特性曲線について負の圧力水頭が 10cm 付近と 100cm 付近で有効飽和度に変化しているが負の圧力水頭は停滞している所に着目した。これはマサ土の単粒構造が不均一で空気浸入値が 2 か所発生したと考えられ、これが本研究では同じ形状にならなかった要因ではないかと考えた。

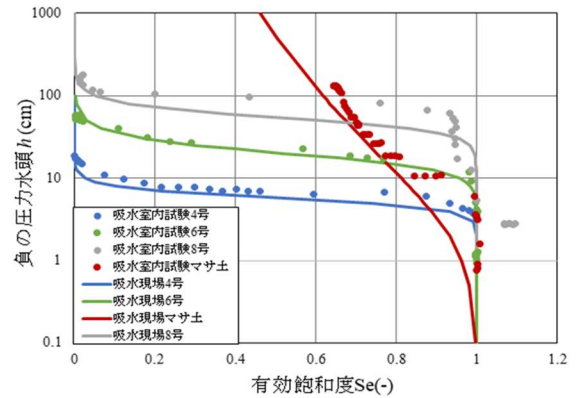


図 15 水分特性曲線(吸水過程)

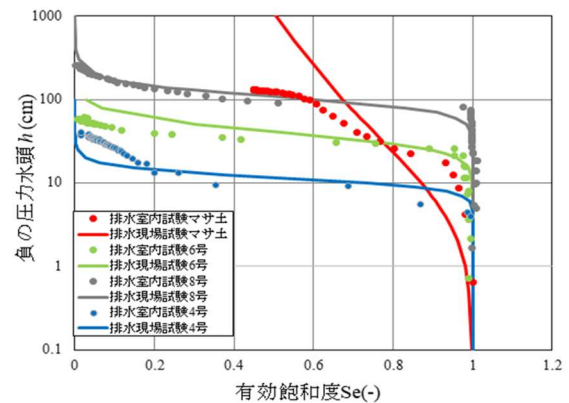


図 16 水分特性曲線(排水過程)

7.おわりに

本研究で得られたことを以下にまとめる。

- ①透水性の評価について 4 号 6 号 8 号は透水係数が近い値であることがわかりマサ土でも負圧浸入計で測定できることを確認した。
- ②保水性の評価について 4 号 6 号では類似した。8 号の吸水過程が類似しなかった理由として、室内試験で土の締固めが起きたからではないかと考えた。マサ土は単粒構造の不均一によって空気浸入値が 2 段階現れたからだと考えた。

参考文献

- 1) 地盤工学会: 新規規定地盤工学会基準・同解説 地下水面より上の地盤を対象にした透水試験方法(JGS 1319-2017)
- 2) 杉井俊夫 余川弘至 森太俊 石井雅都: 原位置における保水性評価に関する研究, 第 55 回地盤工学研究発表会, 2020 年 6 月 21 日 22 日
- 3) 奥村恭: 非正常法による不飽和透水試験法の開発と浸透特性の評価, 平成 13 年度修士論文, pp33-pp55

堤防の越流浸透時を模した間隙空気圧の挙動の計測

EC19084 伊藤 恋

1. はじめに

近年、日本では気候変動により、線状降水帯の発生や局地的豪雨が増加しており、全国では1時間降水量 50 mm 及び 80 mm 以上の年間発生回数ともに増加している。この気候変動により河川の流量が従来よりも上回り、越流する事例が全国各地で増加しつつある。直近3年間の事例では、令和元年東日本台風による千曲川の破堤や令和2年7月豪雨による球磨川の破堤が挙げられる。

豪雨と堤防について考える際に「空気」についても考慮すべきではないかと考えた。降雨時には堤体下部からの浸透だけではなく、天端やのり面から雨の浸透により堤体上部に飽和度の高い領域が発生する。そのため、堤体内に空気が閉じ込められた状態になることが考えられる。さらに越流時には図 1.1 のように越水により、さらに飽和度の高い領域が広がり、空気が圧縮されることが想定される。

この閉じ込められた空気の挙動が堤防の安定性に影響を与える可能性があるのではないかと推察した。現在、解析において透気係数は透水係数よりも約 100 倍大きいと、空気は水よりも素早く土中を移動すると考えられ、空気の影響は無視されてきた。実験においても空気を計測したものは少ない。

しかし、堤防が越流した状態を考える上では空気の影響を無視することはできない。

そこで、当研究では堤防を模した土柱を用い越流した状態を再現し、堤体内の空気の増減や挙動の分布の観測を行う。

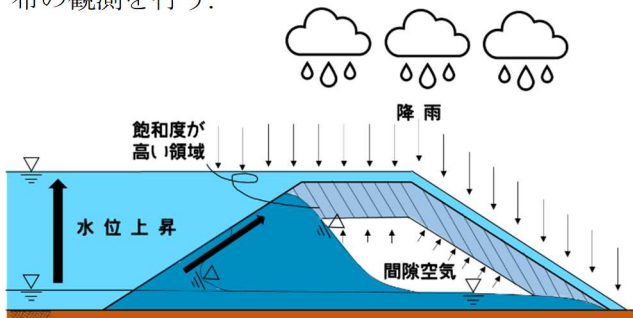


図 1.1 越水時の堤体内の間隙空気

2. 実験

2.1 実験概要

本実験での試料は三河珪砂 6 号を用いる。三河珪砂は豊浦標準砂やまさ土と比較して、軟弱であることが特徴である。図 2.1 は実験装置の概略図を示したものである。長さ 600 mm、外径 52 mm 内径 44 mm のアクリル製の円筒パイプを使用する。試料の高さは 540 mm である。測定位置は図 2.2 に示す通りであり、間隙水圧 p_w 、間隙空気圧 p_a とともに図 2.2 のようにパイプ下端から高さ 180 mm、300 mm、420 mm、480 mm の各位置 4 か所で計測を行う。間隙水圧はテンシオメーター、間隙空気圧は圧力センサーを用い計測を行った。

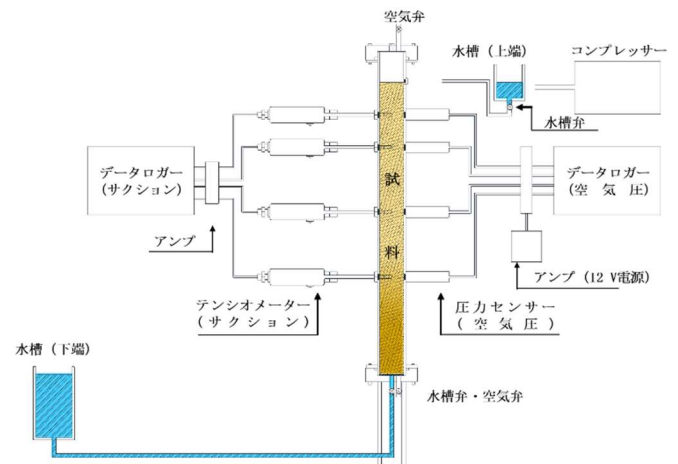


図 2.1 実験装置概略図

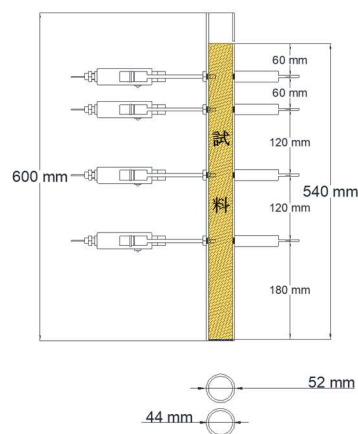


図 2.2 サクション・空気圧の測定位置

なお、テンシオメーターの先端には図 2.3 に示すようなポーラスカップがついており、飽和させたものを用いることで空気の浸入を防ぐ。圧力センサーの内部の受圧板と先端の間は水を満たし、先端には図 2.4 に示すような撥水剤を塗布したナイロンメッシュ(5 μ)を取り付け、水の浸入を防ぐ。



図 2.3 ポーラスカップ

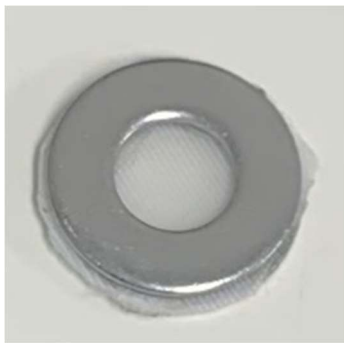


図 2.4 ナイロンメッシュ (5 μ)

また、飽和度は水分特性曲線の関数である式(1)に示す van Genuchten モデルを用いて求める。間隙水圧の値を vG モデルの式に代入することで有効飽和度を求め、式(2)に示す式を用いることで飽和度を求める。三河珪砂 6 号において、 $\alpha_n = 0.0746$, $n = 4.523$, $\theta_s = 0.466$, $\theta_r = 0.1$, $n' = 0.466$ であることが伊藤・山田らの研究で得られている。

$$S_e = \frac{1}{(1 + |\alpha_w h|^n)^{1-\frac{1}{n}}} \quad (1)$$

ここに、 S_e : 有効飽和度(-), h : 負の圧力水頭(cm), α_w, n : vG パラメータとする。

$$S_r = \frac{S_e(\theta_s - \theta_r) + \theta_r}{n'} \quad (2)$$

ここに、 S_r : 飽和度(-), S_e : 有効飽和度(-), θ_s : 飽和体積含水率, θ_r : 残留体積含水率, n' : 間隙率(-)とする。

2.2 実験ケース

本実験では以下の 3 つの現象について考える。

- 1) 重力排水 : 不飽和土柱の上下端を大気に開放
- 2) 強制排水 : 1)の条件中に上端から圧気し、強制

的に排水させる

- 3) 越流浸透 : 実験装置の上下に接続している水槽を用いて、越流した状態を再現。

2.3 実験手順

試料の作成方法として、均質になるように三河珪砂 6 号を 193 g ずつ 6 層に分けてパイプの上部から空中落下で充填した。乾燥密度は 1.41 g/cm³とした。その後パイプ下端の水槽を 54 cm まで上昇させ、試料を飽和させた。

- 1) 重力排水

実験装置の上部の空気弁を解放し、装置下端の水槽をパイプ下端の高さにまで合わせた。約 50 分時間を放置した。

- 2) 強制排水

重力排水の直後、コンプレッサーにより、21 cmH₂O の空気圧を 60 分間、土柱に加えた。

- 3) 越流浸透

重力排水状態から越流状態の再現を行った。パイプ内の土柱上端から 18 cm の位置に上下の水槽の水面を合わせ、各弁を開放し、越流時の水位を再現しながら、土柱に 10 分間圧力を加えた。

3. 実験結果

- 1) 重力排水

図 3.1 は水圧の分布を示したものである。飽和状態では静水圧の分布であるが、時間の経過とともに、低下し負圧領域が拡大することが読み取られる。宇野、小川らの研究の通り、重力排水に伴う水圧低下は上部で発生し、下方へ排水が進むにつれ、負圧領域が拡大していく²⁾ことが確認できた。

図 3.2 は空気圧の分布を示したものである。上端に注目すると 0 秒から 1 分までは土柱の上端が空気に接するため、空気が抜け、空気圧の分布が負になった。その後は空気が満たされたことにより、徐々に 0 cmH₂O (大気圧)に収束をしていくことが読み取れる。この傾向は高さ 30 cm まで認められる。さらに、図 3.3 の飽和度分布より、高さ 20 cm 以下の高さにおいて、飽和していることから、0 秒時の空気圧は測れておらず、水圧の値になっていると考えられる。なお、飽和度の分布もサクシヨンの低下とともに高さ 48 cm, 42 cm, 30 cm では減少していることが読み取れる。

2) 強制排水

強制排水において水圧は図 3.4 に示す通りになった。コンプレッサーにより強制的に与えられた正の圧力により、重力排水時よりも負の方向に分布していることが分かる。飽和度も図 3.5 に示すように全体的に時間経過とともに減少しているが、1 時間後には高さ 48 cm で 1% の減少だが、高さ 18 cm では 20% も減少している。このことより、重力排水で排水できなかった土柱下方の水が抜けたことが分かる。なお、空気圧は重力排水時と同様に圧力センサーが水圧の値になっていると考えられるため、強制排水においては省略する。

3) 越流浸透

図 3.6 は水圧分布を表したものである。越流開始とともに負の分布から正の分布へと増加している。3 分で静水圧に最も近い分布になっている。

空気圧は図 3.7 に、飽和度は図 3.8 に示したようになった。それぞれ共通している点は開始から 1 分の間で急激に変化しているが、高さ 42 cm では変化が遅い傾向があるという点である。これは空気により水の浸透が邪魔されていることや図 3.10 の亀裂によるものであると考えられる。

越流浸透中には図 3.9 や図 3.10 のような間隙や亀裂が数か所に発生していた。中でも図 3.10 は高さ 42 cm 付近で発生した亀裂である。この写真は開始から 2 分後に撮影したものであり、土柱上端からの水位がちょうど 18 cm に達した時間でもある。この亀裂が発生したとみられる 1 分～2 分の間において空気圧は 28 cmH₂O 減少しており、飽和度は 70% 増加している。このことから亀裂が生じたことにより空気圧が変化した可能性が高いことが考察される。

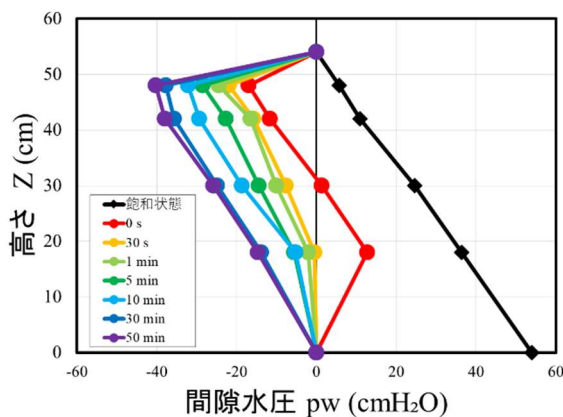


図 3.1 重力排水中の間隙空気圧の分布

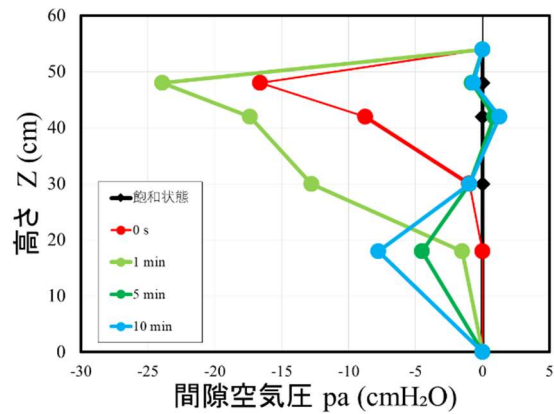


図 3.2 重力排水中の間隙空気圧の分布

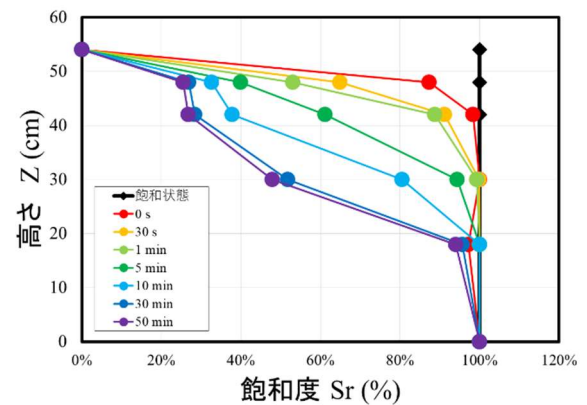


図 3.3 重力排水中の飽和度の分布

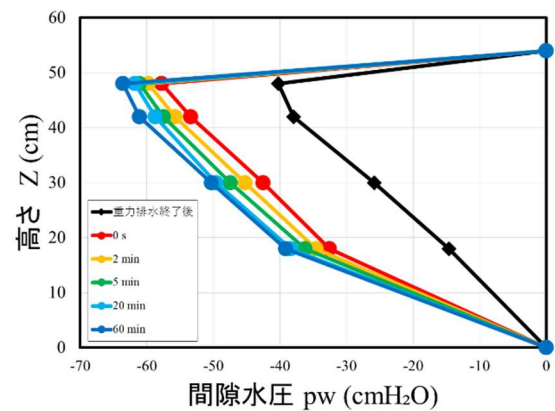


図 3.4 強制排水中の間隙水圧の分布

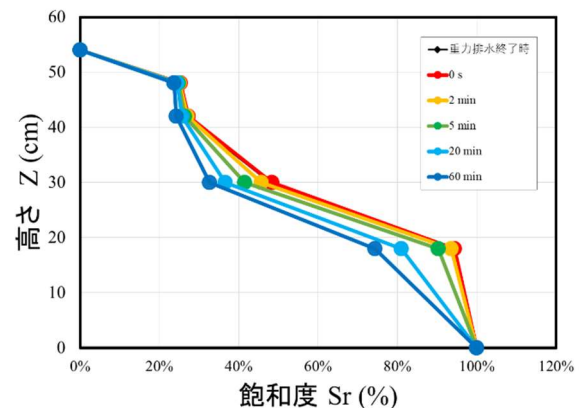


図 3.5 強制排水中の飽和度の分布

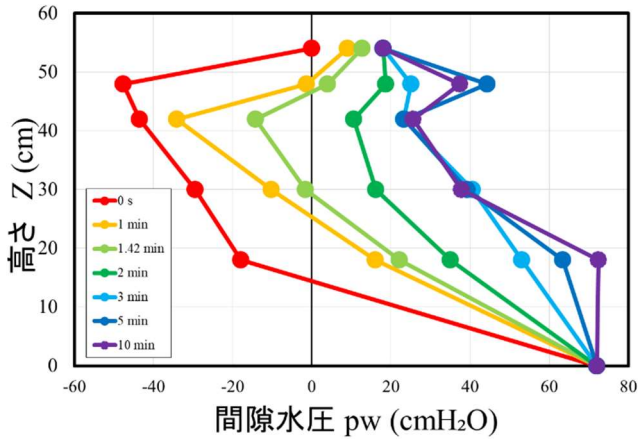


図 3.6 越流浸透中の間隙水圧の分布

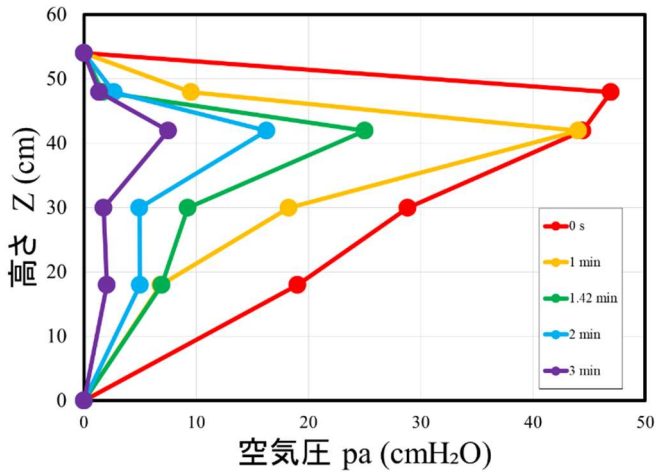


図 3.7 越流浸透中の間隙空気圧の分布

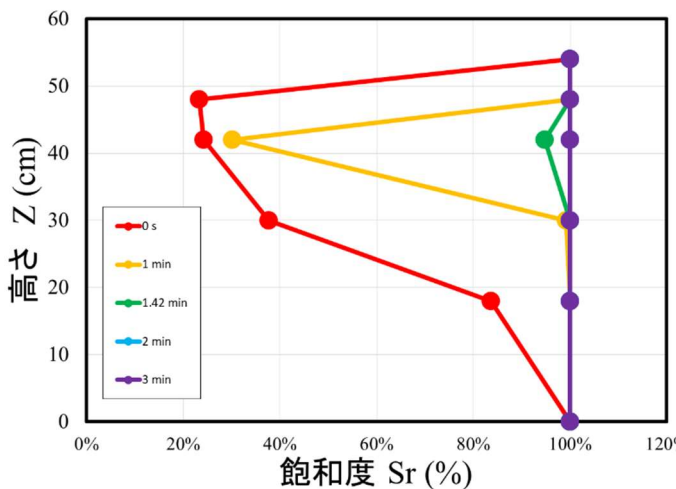


図 3.8 越流再現中の飽和度の分布



図 3.9 亀裂 1 (Z=53 cm 付近)

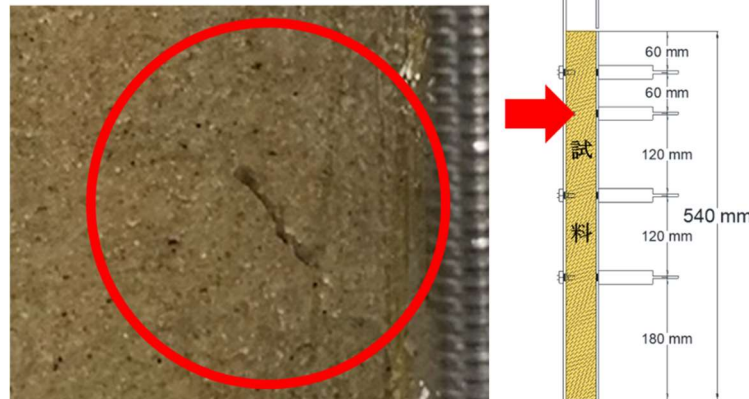


図 3.9 亀裂 2 (Z=42 cm 付近)

4. おわりに

本研究では以下の知見を得ることができた。

- 1) 重力排水において空気圧は空気が満たされるまでは負の分布となり、満たされた後は0に収束する。
- 2) 土柱を越流させた状態にすると上端や下端では素早く飽和し、空気圧も減少する。
- 3) 越流状態になった土柱には閉じ込められた空気によって亀裂が生じ、これにより空気圧や飽和度が急激に変化する可能性がある。

このことから、実際の堤防においても越水により亀裂が生じ堤体内の空気圧が低下する可能性があることが考察される。

【参考文献】

- 1) 宇野尚雄・杉井俊夫・柘植浩史, 土中の間隙水と間隙空気の流動について, 混相流シンポジウム'91 (第10回)講演論文集, pp.147~pp.150, 1991
- 2) 宇野尚雄・小川隆幸, 砂質土の透気性に関する実験的研究, 土質工学会・「不飽和土の工学的性質研究の現状」シンポジウム発表論文集, pp.229~pp.236, 1987