

堤防天端の縦断亀裂と堤体基礎の粘土層分布の関係

1.研究背景と目的

2011 年の東北地方太平洋沖地震により海洋型地震の特長である揺れの継続時間が 178 秒と長く、多くの土構造物が液状化の被害を受けた。特に堤防の被害が多く、礎上の堤体内で内部液状化が発生した。堤体基礎が粘性土層を含むことで、堤体が圧密沈下し堤体がめり込み、河川水や雨水が溜まり、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ている(図-1)。これまで、本研究室では堤体内部液状化の発生が懸念される堤体めり込み箇所の特定化に天端舗装の縦断亀裂の情報が使用できないか検討を行ってきた。そこで、堤体基礎にある一定以上の粘土層厚がある場合に縦断亀裂が発生すること<sup>1),2)</sup>、特に粘土層が非対称に分布することに起因している可能性が示唆された(図-2)<sup>3)</sup>しかし、その閾値を越えても縦断亀裂が見られない箇所もあり、堤防の横断方向の粘土層の分布をも考慮することが必要であることも明らかとなった。そのため、粘土層の非対称性を表すには、2次元断面情報として画像分析が適しているものとの発想から、深層学習による分析に着目するものである。粘土層から亀裂が発生しているか判断できるようにするのを目的とする。

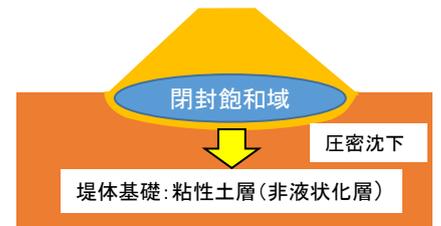


図-1 堤体内部の液状化

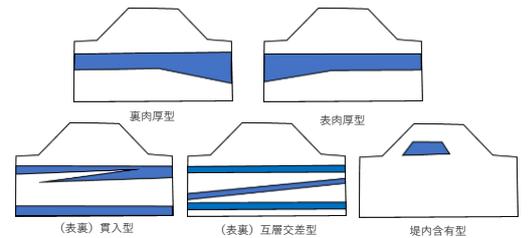


図-2 年度粗分布のパターン分け

2.研究方法

CNN(畳み込みニューラルネットワーク)による天端の舗装亀裂の有無を検討する。図-3、図-4のように、Google ストリートビューを利用することで堤防の亀裂箇所の有無の箇所判断、国総研 HP にある河川堤防の浸透に対する安全性の詳細調査点検結果の堤体地層断面を使用して、亀裂の有無と地層断面を数百以上のデータ組を収集、その際、不要な柱状図や N 値の記述を削除しトレースし粘性土層を黒に着色し 2 値のデータとする。畳み込み層、正規化層、最大プーリング層を繰り返し全結合層から亀裂の有無の可能性を抽出する。また、Grad-CAM アルゴリズム(一種の感度分析)により、堤防横断面図において注目領域がどこであるかを求め、共通項を人間の目で確認することで亀裂発生要因の検出を行う。

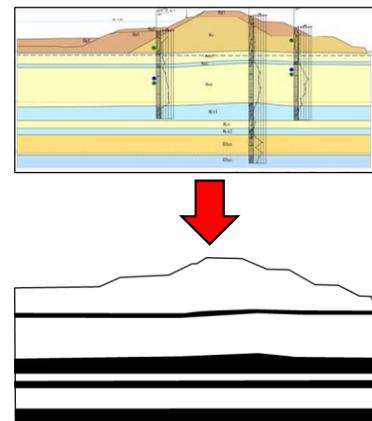


図-3 データトレースの例



図-4 GoogleMap ストリートビューでの亀裂確認

### 3.教師データの作成

全国河川の詳細調査点検結果にある横断面図をトレースして粘土層を着色して jpg ファイルとして加工する。縦断亀裂の有無に分けて、それぞれの断面データを分類して同数を教師データとする。一般に、深層解析における顔認識などの画像解析では少なくとも 500 以上のデータが必要となる。今回はトレースして粘土層のみを着色したものでシンプルな画像であることから、データは少ないが、試験的に実施することとした。

使用したデータを表 1 に示す。

表 1 学習に用いた教師データと適用データ

	教師データ		適用データ	
	亀裂あり	亀裂なし	亀裂あり	亀裂なし
魚野川	0	3	0	3
木曾川	2	1	0	2
庄内川	6	8	10	4
長良川	5	1	0	0
矢田川	2	2	1	2
計	15	15	11	11

### 4. 解析結果

構築したアルゴリズムを用いて、表 1 の適用堤防断面データの推定結果を図 5 に示した。「亀裂あり」データ 11 断面中 6 断面的、「亀裂無し」データ 11 断面中 10 断面的、的中率は 77%であった。データ数が少ない点もあり的中率は高いと言えないが、深層学習の適用の可能性が得られた。また、アルゴリズム作成時にどのような着目点で判別しているかを明るい色付けで示した 1 部の結果を図 6 に示す。すべてのデータに共通する着目点を調べることで、判別要因を明らかにすることが期待できる。

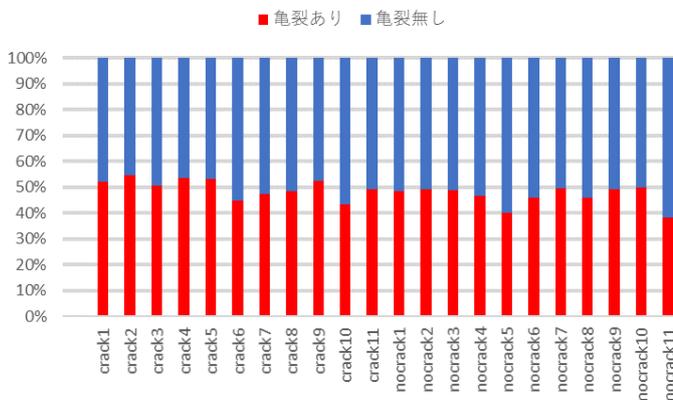


図 5 適用結果

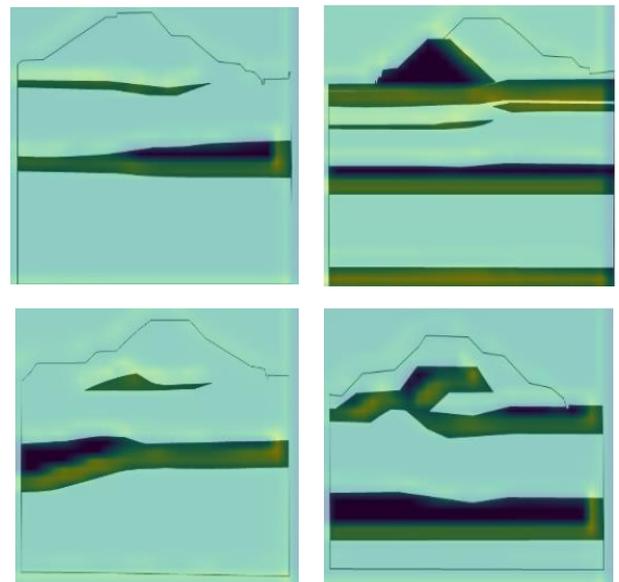


図 6 判別に着目した点 (Grad-CAM)

### 参考文献

- 1)山田雄大：堤体基礎の支持力と天端舗装の亀裂の関係，2019 年度中部大学卒業論文，pp.2-31，2020.1
- 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)高田 彬宏：堤体基礎の層構造と天端舗装亀裂の関係について，2020 年度中部大学卒業論文
- 4)土技術政策総合研究所河川研究室：河川堤防の浸透に対する安全性の詳細点検結果情報研究成果・データ，<http://www.nilim.go.jp/lab/fbg/download/download.html>，(参照 2021-8-27)

# 団粒化技術の透水性に関する耐久性評価

EC18004 石松直幸

## 1. 研究背景と目的

近年、温暖化の影響により都市では集中豪雨やヒートアイランド現象など都市における諸問題など様々な場所で問題発生している。図 1.1、図 1.2 のグラフから近年の平均降水量の増加、集中豪雨の発生件数の増加が分かる。このままでは、都市における諸問題など多くの問題に悪影響が出るかも知れない。こうした中、降水の地盤への浸透を向上させることで、河川への負担を減らす事や、降雨時の雨を透水後、保水力を向上させること事で晴天時の気化熱効果で熱中症対策をするなど団粒化剤を用いた地盤改良が実施されるようになってきている。団粒化構造は多くの問題を改善・解決・対策する事ができる技術である。従来の植生を目的に使用されるものではなく、工学用に使用するものである。特に後者の場合には、その耐久性について評価が必要となる。耐久性（使用限度年数）が分かれば計画的に維持管理ができることにも繋がる。このため本研究では団粒化技術を透水性の耐久性を実験により評価することを目的としている。

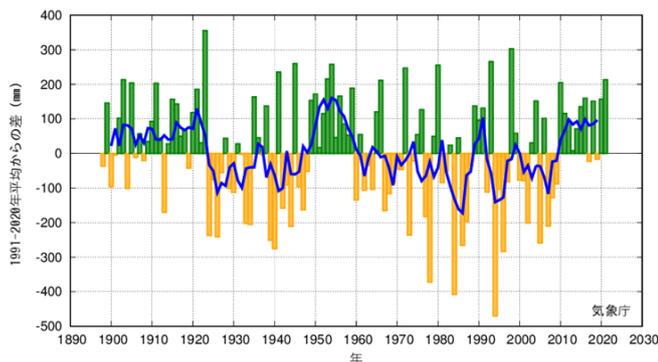


図 1.1 日本の平均降水量偏差

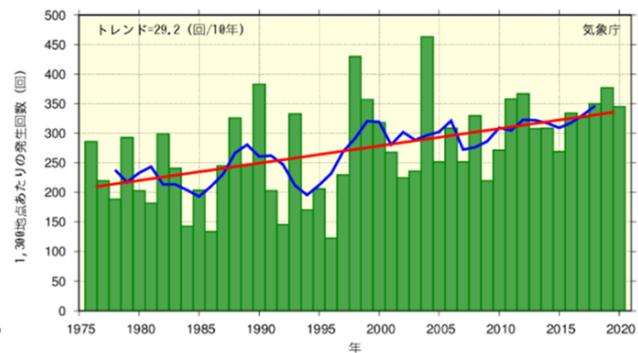
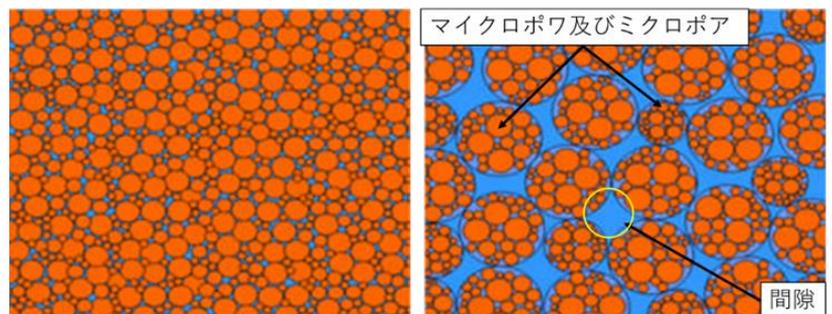


図 1.2 日本の年間集中豪雨発生件数の経年変化

図 1.1 の棒グラフは各年の降雨量の基準値（1991 年～2020 年の 30 年平均値）からの偏差、太線（青）は偏差の 5 年移動平均を示す。図 1.2 の棒グラフは集中豪雨（ここでは、1 時間あたり 50mm の降雨量を集中豪雨と定義している）の年間発生回数、太線（青）は 5 年移動平均値、直線（赤）は長期変化傾向を示す。

## 2. 団粒構造について

団粒構造とは土に添加物を配合し各粒径の土粒子を結合させ、より大きな粒状にグルーピングすることである。図 2.1 に表しているように、団粒構造を有する土は、各粒径の土粒子グルーピングされた粒子群の間に、単粒構造と比べ、相対的に大きな連続の間隙が形成している。こ



単粒構造

団粒構造

図 2.1 単粒構造と団粒構造

の間隙が団粒構造の持つ高い透水効果を果たしている。また、各グルーピングされた粒子群の中には、単粒構造のように各粒径の土粒子が緊密に結合しているため、間隙水に強い吸着力が働き、地下水位に連動させ、長期間で湿潤状態を維持することができる。すなわち、団粒構造は透水性が高いとともに、必要な程度の保水性もあり、透水特性を両立させることができる。

### 3. 研究方法

本研究では、工学用に使用されている団粒化技術の耐久年数を透水性により評価する研究である。団粒化試料として河口建設株式会社による改良土(団粒化剤に GB2000 を使用)を使用する。また、試験方法として、透水性を長期的に測定可能な通水促進試験を考案し採用している。

#### 通水促進試験について

通水促進試験とは、定水位透水試験をベースにした室内透水試験である。特徴としては動水勾配の調整が可能であり、動水勾配を大きくすることで試験時間を短縮することができる。試験方法は、通水前に飽和透水係数を測定しておき、年間平均雨量を1年分、2年分、3年分・・・50年分と通水させ、1年ごとに透水係数を測定す

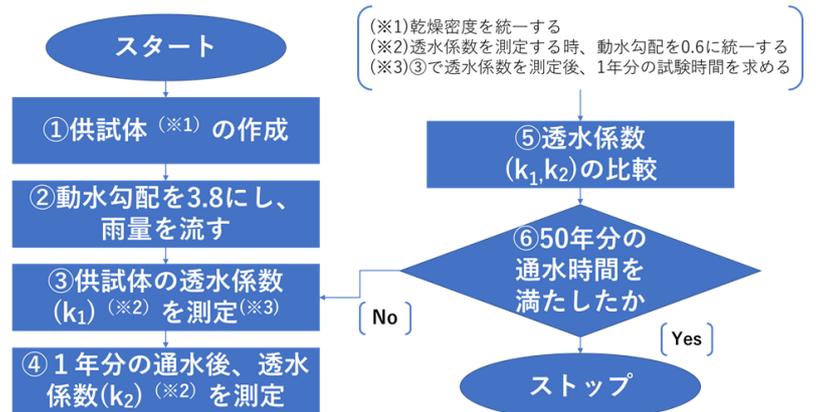


図 3.1 通水促進試験のフロー図

ることによって50年間の透水係数を測定する。その時の、透水係数から透水係数の低下による劣化を調べ評価する。50年分と選定した理由として土木構造物などは50年を老朽化の基準としているため、50年を評価対象に選定した。また、具体的な通水促進試験のフロー図を図3.1に示す。

- ・年間平均雨量≒1年分の通水量と仮定
- ・流量=透水係数×動水勾配×試験時間 (ダルシーの法則  $v = ki$  より)
- ・アメダスデータ<sup>1)</sup>より、年間平均雨量が1781.3mmである、計算上1800mmで考える

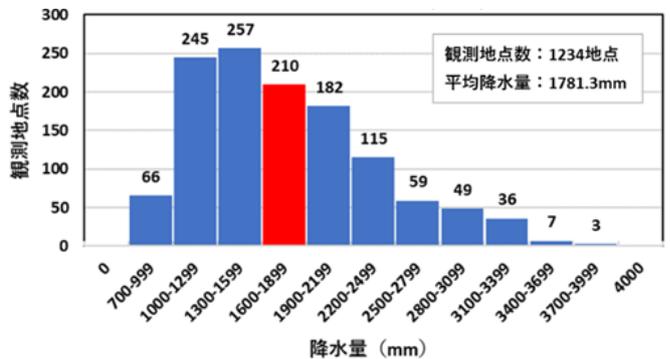


図 3.2 全国年間平均雨量

#### 1) 動水勾配の選定方法

図3.3は流量が1800mm、動水勾配を1~10、透水係数を  $5 \times 10^{-5}(\text{m/s})$ としたときの動水勾配と試験時間の関係を示している。

- ・動水勾配1は、長期にわたる実験になる。
- ・動水勾配10は、短期の実験になるが、水を流す管路に負担が大きくなり管路損失の恐れがある。

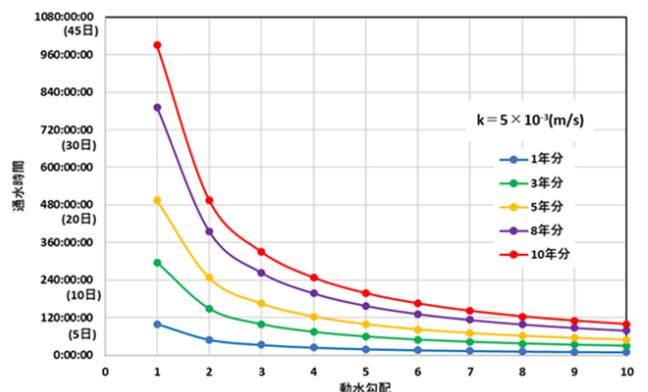


図 3.3 動水勾配と試験時間

これらの点を考慮した上、実験の性質上1年ごとの透水係数を測定する必要があるため、動水勾配は4にするのが良いと考えた。

実際の試験では、試料の透水係数が未知であるため今回の仮データを参考にしている。実験装置の仕様上、動水勾配を3.8としている。

## 2) 通水促進試験装置

透水試験装置を改良し、通水促進試験ができるように改良した実験装置図を図3.3に示す。動水勾配が大きく、流速が早くなるため管路の水頭損失が懸念されることから、供試体の上下にピエゾメータを立て、実際の供試体にかかる全水頭差を求めることとする。

透水係数を計測する際には、水位差を60mm、通水時には380mmできるように給水水槽の高さを変化させることができる。透水係数は、排水槽に流れた流量を3分間計測し計算で求める。

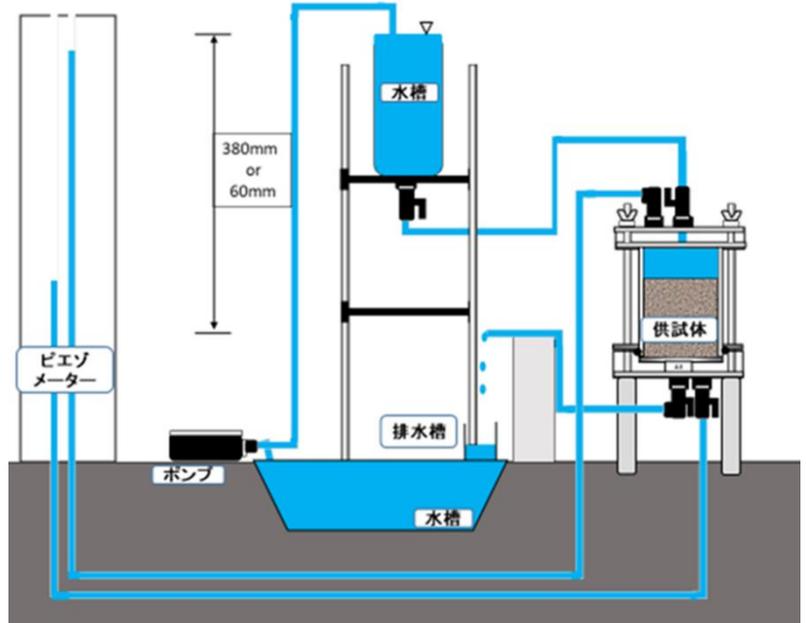


図 3.4 通水促進試験装置図

## 3) 供試体

本試験で使用する試料は、河口建設株式会社による改良土を2種類使用している。透水係数は、湯地の種類、密度、飽和度によって大きく異なるため、通水促進試験を行うにあたり乾燥密度を統一している。また、飽和度が高いほど正確な透水係数が測れることから、二酸化炭素を用いり、飽和度を高めた。以下に供試体作成の手順をまとめる。

- ① 二酸化炭素を試験容器に流し入れる
- ② 試料を少しずつ入れる
- ③ 突砂法により締固めを行う
- ④ ①～③を3度繰り返す
- ⑤ 供試体の下部から水を少量ずつ流し入れる
- ⑥ 満水になり供試体内の空気が抜けたら数日供試体を放置する

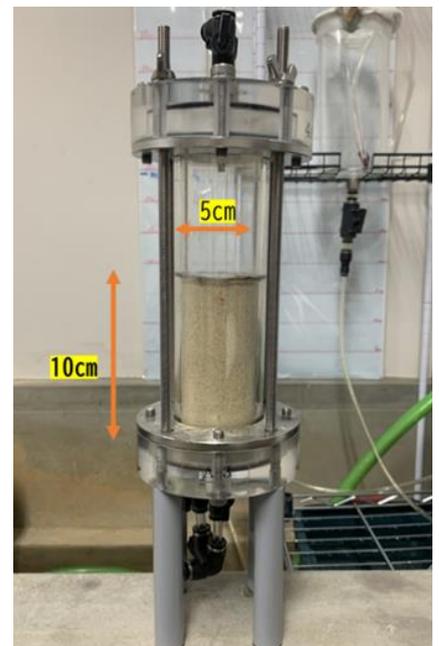


写真 3.1 供試体

⑥で数日供試体を放置するのは、二酸化炭素が水に溶けやすいという性質と飽和度を高めることを考えである。

#### 4. 試験結果

通水促進試験によって、50年分の平均降水量を団粒化した試料に流した。通水促進試験を行った試料は2種類であり、それぞれの試料で行った試験結果を図4.1、図4.2に示す。

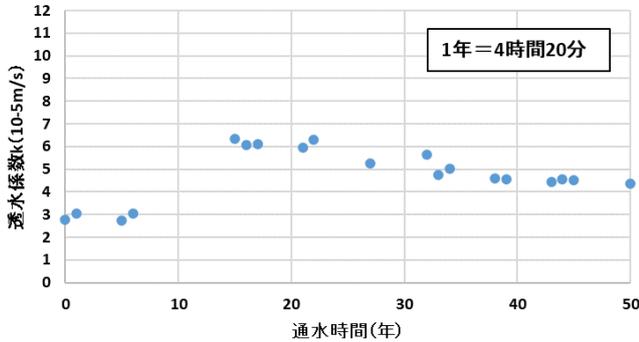


図 4.1 改良土の透水係数変化

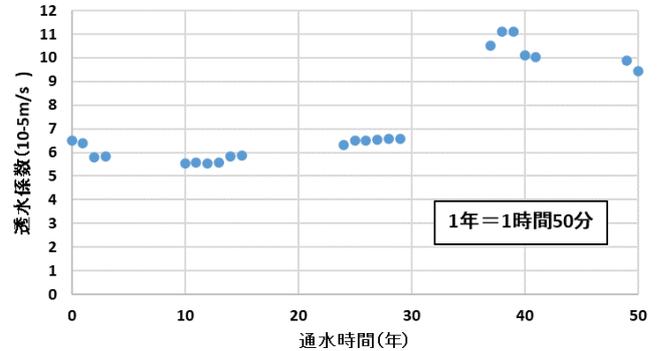


図 4.2 高蔵寺中学校改良土の透水係数変化

図4.1の改良土は乾燥密度が1.35g/cm<sup>3</sup>であり図4.2の改良土は乾燥密度が1.36g/cm<sup>3</sup>である。

2つのグラフを見ると50年後の透水係数は増加しており、耐久性は問題ないと思われる。しかし、2つのグラフ共に透水係数が急に上がり、そこから徐々に下がっているように読み取れる。このことから、団粒構造が壊れたため、急に透水係数が上がったのではないかと考える。また、目視で確認することはできなかったが、団粒構造が壊れたことにより、供試体の下部部分にある金網から細かい粒子が流れ出したことも原因ではないかと考える。

#### 5. 結論

本研究による通水促進試験で、団粒化剤GB2000を用いた団粒土を透水性から耐久性評価を行った。その結果、高い透水性を長期間維持する事は可能であるが、団粒化構造の崩壊から細かい粒子の流出により透水性以外の低下が見込まれ、安全性を考え、定期的なメンテナンスが必要である。

#### 参考文献

- 1) 気象庁ホームページ 各種データ・資料 <https://www.jma.go.jp/jma/menu/menureport.html>.(2021.07 参照)
- 2) 社団法人 地盤工学会 土質試験 基本と手引き,地盤工学会,pp.19-21,27-35,91-98,2010年
- 3) 河口建設株式会社ホームページ ATTAC トースクレイ工法 <http://www.kawaguchi-kk.co.jp/tousui.html>
- 4) 伊藤教授の土質力学講座 第2章 土の基本的性質及び物理的性質 <https://www.con-pro.net/readings/soil/chapter02-01.html>
- 5) ヘルシー・スポーツ建設株式会社ホームページ <http://www.healthy-clay.com/blog2/3259/>
- 6) 杉井俊夫、岡本英朗：団粒化構造による透水性保水型土系舗装の評価,土木中部支部研究発表会,2010.3
- 7) 長島修司：団粒化された路盤材料の浸透・力学特性に関する研究,平成25年度卒業論文,2013
- 8) 伊藤友成：路床路盤材への団粒構造土の適用,平成24年度卒業論文,2012

# 新たな保水量試験の提案

EC18006 伊藤 健登

## 1.研究目的

現在、路面温度上昇抑制舗装研究会によるインターロッキングブロックの保水量試験が提案されている。しかし、団粒化を利用した保水性舗装の保水量試験方法を適用とすると、団粒化した土の方が、明らかに保水量が小さくなるという課題があった。試験の過程の中で水浸試料を水から出して、試験内の水分量を計測するために、大きな間隙がある団粒化した材料は水中から取り出すことで排水を始めてしまうことに起因しており、保水量計測方法の改善が求められていた。

本研究では2課題を設定しており、それは以下である。1)団粒化した際に大きな間隙から排水される前に保水量を測ることができないか新たな試験方法の提案を行う。2)ヒートアイランド防止には、蒸発していく速度に依存する。そのために蒸発速度試験を実施し、団粒土と単粒土の表面における蒸発速度の違いはあるのか測定する。

2つの課題を実験(保水量試験、蒸発量試験、土の保水試験)によって、それぞれの相互関係について明らかにふることが本研究の目的である。

## 2.試料

高蔵寺中学校のグラウンドの土を試料として用いた。未改良土と改良土の2つの試料を用いる。改良土の方は団粒化剤(GT-2000)を使用して団粒構造に変え改良した。団粒化することで細かい粒径がまとめられるため、粒径の分布に変化が見られる。

## 3. 研究方法

バルブ付き給水タンクに蒸留水を満たす。

次にモールドの質量を電子秤で測った後、供試体を充填せずに、モールドをビーカーに入れる。バルブ付き給水タンクを給水タンク用スタンドに取り付け、バルブ付き給水タンクの口はモールド高さと同じになるように、スタンドの高さを調整する。注水が止まったら、バルブを閉めモールドおよび周りに入った水の体積(V1)を測る。今回は電子秤でも測るため質量(M1)ともする。

続いて供試体を作成する。供試体を1.5kgランマーを用いて、3層に分け4回ずつ計12回モールドに入れて締め固める。湿潤した試料を用いる場合には含水比を別途計測しておく。

そして供試体へ浸水していく。バルブ付き給水タンクを蒸留水で満たす。締め固めた供試体を、ビーカーに入れ、先程の同じようにモールドの高さと給水タンクの口が同じ高さになるようスタンドの高さを調節し注水する。モールド内の水位がモールド外側の水位と等しくなっていることを確認し、バルブを閉じ、注水を終える。その後、土中および周りに入った水の体積(V2)を図る。今回は電子秤でも測るため質量(M2)ともする。

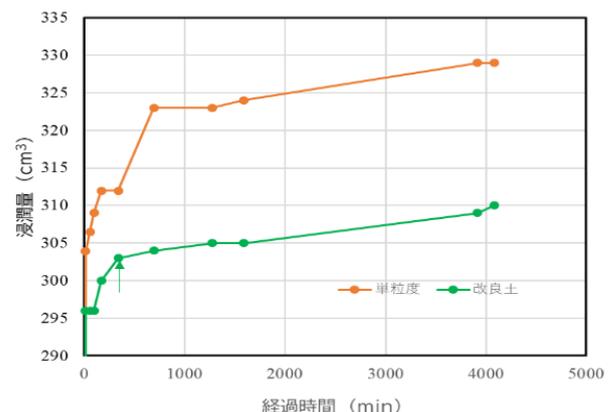


図1 経過時間と湿潤量のグラフ

図の矢印の部分がモールドの重さが最大値になった部分であり、経過時間でいうと335分が経過した時である。この値で保水量を後に計算した。理由はモールド内の水が蒸発していくせいでV2が大きくなっていき飽和度が100%を超えてしまうため。

4. 計算

保水量 VR (ℓ/m<sup>3</sup>) の計算は、次のとおり行う。  
 湿潤した試料を用いる場合には、含水比 w (%) を用いる。

5.結果

表1 実験結果

土の保水量試験				
調査件名	改良土		試験年月日	
試料番号			試験者	
供試体の突き固めの方法		土粒子密度 ρs g/m <sup>3</sup>	2.639	内径 cm
ランマー質量 kg	1.5	突固め回数 回/層	4	高さ <sup>(1)</sup> cm
落下高さ cm	20	突固め層数 層	3	容量 V cm <sup>3</sup>
締固めのエネルギー Ec			179.7	質量 m <sub>1</sub> <sup>(2)</sup> g
測定 No.	1	2	モールド+供試体	モールドのみ
(試料+モールド)質量 m <sub>2</sub> <sup>(3)</sup> g	386.454	給水タンク初期 M <sub>a</sub> g	455.0	489.0
湿潤密度 ρt g/cm <sup>3</sup>	1.764	給水タンク残量 M <sub>b</sub> g	152.0	9.9
平均含水比 w %	13.5	流入量(供試体+モールド+容器) M <sub>1</sub> =M <sub>2</sub> -M <sub>a</sub> g		303.0
乾燥密度 ρd g/cm <sup>3</sup>	1.554	流入量(モールド+容器) M <sub>2</sub> =M <sub>2</sub> -M <sub>a</sub> g		479.1
初期水分量 m <sub>w</sub> g	41.1	流入量(供試体) M <sub>3</sub> =M <sub>1</sub> -Vρ <sub>w</sub> g		20.2
乾燥土の質量 ms cm <sup>3</sup>	305.2	給水後の供試体内水分量 M <sub>4</sub> =M <sub>3</sub> +m <sub>w</sub> g		61.3
乾燥土の体積 Vs cm <sup>3</sup>	115.7	lm <sup>3</sup> 当たりの保水量 g/m <sup>3</sup>		312.3
容器 No.	112	68	水位 H cm	10.5
m <sub>a</sub> g	100.83	106.84	閉鎖比 e	0.698
m <sub>b</sub> g	96.51	101.85	給水後の含水比 w %	20.1
m <sub>c</sub> g	64.90	64.15	給水後の飽和度 Sr %	76.0
w %	13.7	13.2		-

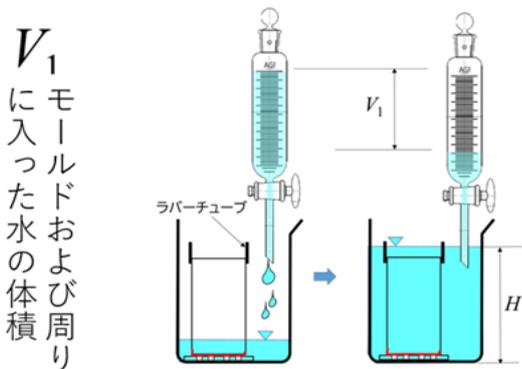


図2 V1の簡略図

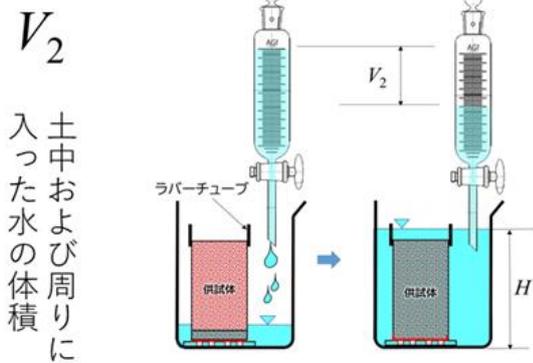


図3 V2の簡略図

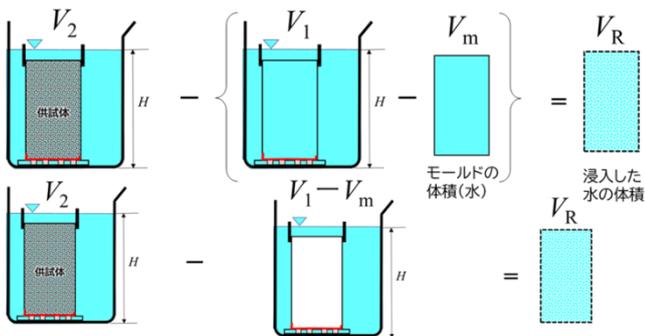


図4 VR保水量の計算方法の簡略図

6.おわりに

本研究の結果以下のことが得られた。改良土ではやはり空気の間隙により排水を無くして測定することで保水量は背景にも述べた問題を解決し測定することができ、短粒土よりもしっかりと値が大きく出ることがわかった。

また空気の間隙による排水は防げたがモールドの水面からの蒸発は防ぐことはできなかったため新たな改善策が求められる。

水面を合わせておかないと流入量は水面の高さの変わった体積分ズレしてしまうためしっかりと毎回意識する必要があると考える。

謝辞：本研究室の佐竹凌弥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) 路面温度上昇抑制委員会：保水性舗装, pp. 1 - 3, 平成 23 年 7 月  
[http://www.coolhosouken.com/images\\_h2/data02.pdf](http://www.coolhosouken.com/images_h2/data02.pdf)
- 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, pp. 3-30, 2019

## 分割法に基づく土圧計算評価

EC18028 小泉 詩織

### 1. はじめに

現在、擁壁の主働土圧合力計算は極限平衡状態にある剛体壁面の背面土の土くさびを考え、その土くさびが剛体壁面に沿って滑り出すという仮定のもと計算される。すなわち、図1のABC土くさびの自重、剛体壁面およびすべり面に作用する力からなる力の三角形を描き、力のつりあいをもとに土圧を求めるクーロン土圧が用いられている。

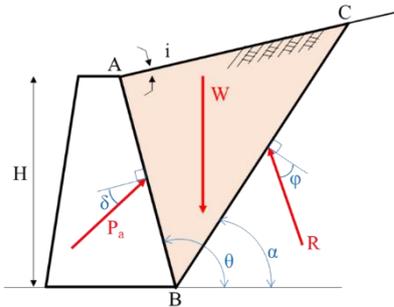


図1 クーロンの土くさび

しかし、クーロン土圧は背面土の層が互層である場合や、地下水面がある場合、壁面摩擦角  $\delta$  というものに対応することができないが、本来は斜面安定計算に用いる分割法を利用することで、それらに対応した主働土圧合力が計算可能となるという仮説を立て、円弧半径・主働土圧合力・壁面摩擦角の関係を図に示すことを目的とする。

### 2. マクロ(VBA)の作成

本研究では Excel の VBA によりプログラミングを行い図2の手順でマクロを作成して解析を行う。

主働土圧合力の算出方法は、円弧の角度が  $90^\circ$  を超える場合は、x座標を鉛直に裏込め土と重なるまで伸ばし、擁壁裏のかかと点Bが原点(0,0)となるように図を作成し、x=0より左側を擁壁側、右側を裏込め土側として計算を行う。

相対誤差の等高線マップ作成は、相対誤差  $v$  をグリッド点上の中心点で求め、等高線マップを作成することで、円弧の中心の推察を行う。

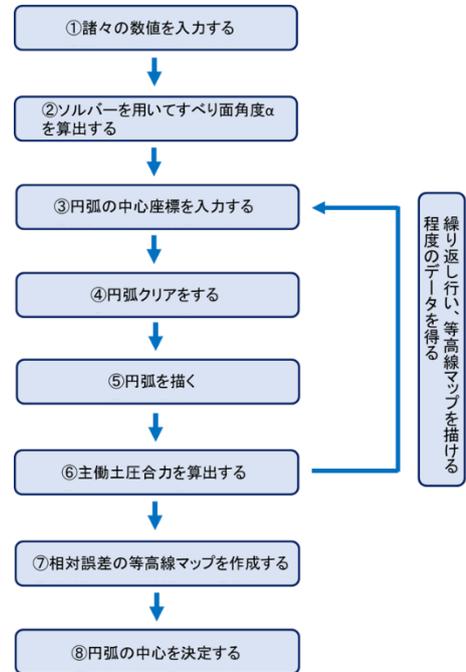


図2 マクロ作成の手順

### 3. 円弧の中心の推察

相対誤差  $v$  を式(1)のように定義し、図3のように相対誤差の等高線マップを作成する。紫色の部分がかクーロン土圧で求めた主働土圧合力と分割法で求めた主働土圧合力の相対誤差が0になる箇所である。

$$v = \frac{|P_a - P'|}{P_a} \quad (1)$$

ここに、 $v$ : 相対誤差(-),  $P_a$ : クーロン土圧で求めた主働土圧合力(kN/m),  $P'$ : 分割法で求めた主働土圧合力(kN/m)である。

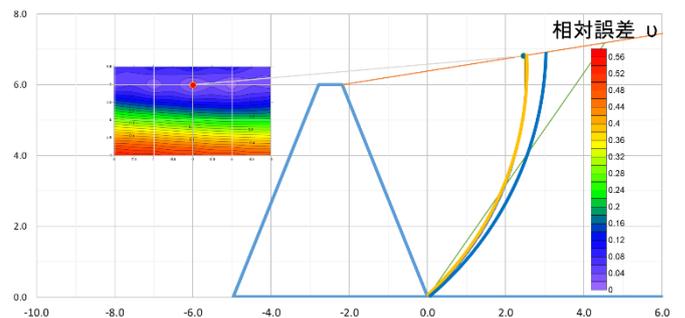


図3 円弧の中心

図3の場合、主働土圧合力の相対誤差が0になる箇所は2か所存在する。このような場合は、実際に円弧を描き、よりすべり面に沿う円弧になる場合を中心座標とする。図3では、中青色の(-5.0, 6.0)と黄色の(-6.0, 6.0)という2箇所の中心座標があるが、黄色の方がよりすべり面に沿う円弧となるため、黄色をこの場合の中心座標とする。

#### 4. 解析ケース

擁壁の高さ  $H$  や、壁面摩擦角  $\delta$  が円弧半径、主働土圧合力に何かしらの影響を与えることは容易に予測することができるため、擁壁の高さ  $H$  と壁面摩擦角  $\delta$  を変えた9ケース表1について検証を行う。これらの結果から、円弧半径、主働土圧合力、壁面摩擦角の関係性を示すこととする。

	擁壁の高さ $H$ (m)	壁面摩擦角 $\delta$ (°)
ケースA	3	10
ケースB	3	20
ケースC	3	30
ケースD	6	10
ケースE	6	20
ケースF	6	30
ケースG	9	10
ケースH	9	20
ケースI	9	30

表1 解析ケース

また、マクロの作成において初めに諸々の数値を入力する必要がある。擁壁の高さ  $H$  と壁面摩擦角  $\delta$  を変化させて検証を行うが、その他の値は同じであり、表2に本解析で使用了した諸々の数値を示す。

表2 本解析で使用了した諸々の数値

裏込め土の湿潤単位体積重量 $\gamma_t$	18KN/m <sup>3</sup>
裏込め土の内部摩擦角 $\phi$	30°
背面土の傾斜角 $\theta$	110°
裏込め土の傾斜角 $i$	10°

#### 5. 解析結果

擁壁の高さ  $H$ 、壁面摩擦角  $\delta$  を変化させていくと表3の結果が得られた。これを基に、壁面摩擦角  $\delta$  と、円弧中心  $x$  座標、円弧中心  $y$  座標、円弧半径  $R$ 、主働土圧合力  $Pa$  の関係を可視化する。

表3 解析結果

	擁壁の高さ $H$ (m)	壁面摩擦角 $\delta$ (°)	円弧中心 $x$ 座標 (m)	円弧中心 $y$ 座標 (m)	主働土圧合力 $Pa$ (kN/m)	円弧半径 $R$ (m)	すべり面角度 $\alpha'$ (°)
ケースA	3	10	-1.5	3.4	45.191	3.716	23.210
ケースB	3	20	-3	3	45.977	4.243	45.023
ケースC	3	30	-4	3	48.803	5.000	53.157
ケースD	6	10	-4	6.5	180.762	7.632	31.624
ケースE	6	20	-6	6	183.908	8.485	45.023
ケースF	6	30	-7	6	195.211	9.220	49.424
ケースG	9	10	-6	10	406.715	11.662	30.980
ケースH	9	20	-8	9	413.793	12.042	41.655
ケースI	9	30	-11	9	439.224	14.213	50.736

以下に図4,図5として壁面摩擦角  $\delta$  と円弧中心  $x$  座標、円弧中心  $y$  座標の関係を示す。

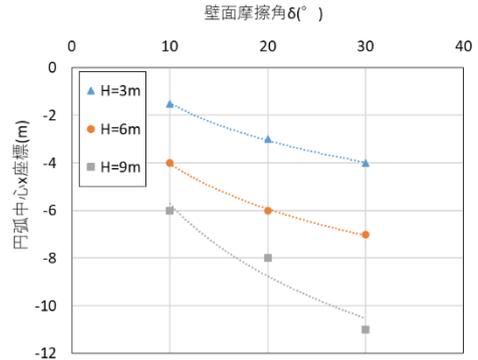


図4 円弧中心  $x$  座標と壁面摩擦角  $\delta$

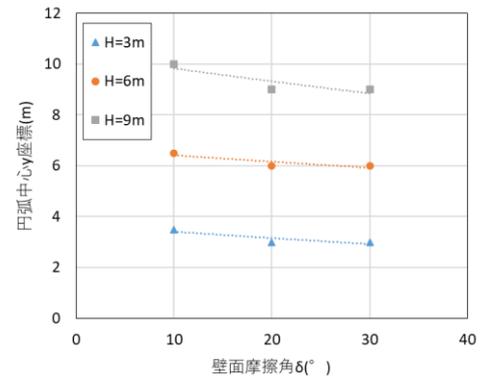


図5 円弧中心  $y$  座標と壁面摩擦角  $\delta$

#### 6. まとめ

クーロン土圧と同じ結果を得る分割法を実施した結果、得られた知見を以下にまとめる。

- 1)円弧中心  $x$  座標は、擁壁の高さ  $H$  が高くなればなるほど、壁面摩擦角  $\delta$  が大きくなればなるほど、擁壁から離れていく。
- 2)円弧中心  $y$  座標は、壁面摩擦角  $\delta$  が  $10^\circ$  の時は擁壁の高さよりも上にあるが、 $20^\circ$  以降は擁壁の高さにかかわらず、擁壁と同じ高さに収束する。
- 3)円弧半径  $R$  は擁壁の高さ  $H$  が大きくなればなるほど、壁面摩擦角  $\delta$  が大きくなればなるほど大きくなる。
- 4)主働土圧合力は擁壁の高さ  $H$  が大きくなればなるほど大きくなる。また、壁面摩擦角  $\delta$  が大きくなればなるほど大きくなるがその程度は若干である。

【謝辞】本研究において、岐阜大学名誉教授佐藤健先生のご協力いただきました。ここに謝意を表します。

【参考文献】1)西村友良,藤研一,杉井俊夫,小林康昭,規矩大義,須網功二:基礎から学ぶ土質工学,朝倉書店,pp103-105.2007年

# 原位置における地盤の水理特性の評価に関する研究

EC18035 佐竹 凌弥

## 1. 研究目的

土の水理特性を計測することにより、安全な生活をする上で欠かせない災害防止や危険予知など様々なことが分かる。地盤工学会において「地下水面より上の地盤を対象とした透水試験方法」が設定された。この方法は、不飽和状態にある地盤が、降雨や地下水位上昇により現場飽和状態に達したとき、現地での最も大きい透水係数を求めることを目的としたものであった。現在、その中の一つの負圧浸入計を使った試験方法は実務でも利用されるようになった。しかし、降雨後の地盤の浸潤状態が高い場合など計測が困難になる場合があった。またこれまで保水性について計測する試験は装置が高価となることから実務での実施現実的でなく室内での実施しかなかった。そこで本研究は負圧浸入系を用いて、その過程で得られるデータから、これらの問題を解決しようとするものである。

## 2. 負圧浸入系

負圧浸入計 (図 1) は、一定の負圧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、経過時間あたりの湿潤量から透水係数を求める試験器具である。原理は Wooding の浸入速度と Gardner の不飽和透水係数式を用いたものである。実験方法は、負圧浸入計の貯水タンクと圧力調整タンクに水を入れる。次に圧力調整管を使って浸潤水頭 (負圧) を調整しゴム管でふたをした。水を入れた負圧浸入計をあらかじめ決めておいた地点に持っていき支柱で支えながら計測をし、水の浸透量を確認しながらストップウォッチで時間を測り 30 秒ごとの貯水タンクの残りの水の量を計測するやりかたである。その負圧浸入計を使い実際に小学校グラウンドで負圧を複数段階に変えて実施し、透水試験を行った。また、今回の現場透水試験は二箇所に分けて実験を実施した。一か所目の地点では負圧のみを与えて実験を行ったが二か所目の地点では飽和状態の浸透量を計測するた

め、負圧と正圧を与えて試験をおこなった。本来、負圧浸入計は負圧水頭を

地盤に浸潤していく試験器具であるが (図 1)、負圧浸入計で正圧を発生させ浸潤させるために (図 2) のように負圧浸入計を設定した。通常、図 1 のような  $-h_a + h_b \leq 0$  により負圧は求められるが正圧を発生させるため図 2 のように  $h_b$  の長さを  $h_a$  よりも長くすることで  $-h_a + h_b \geq 0$  になり正圧を発生させた。

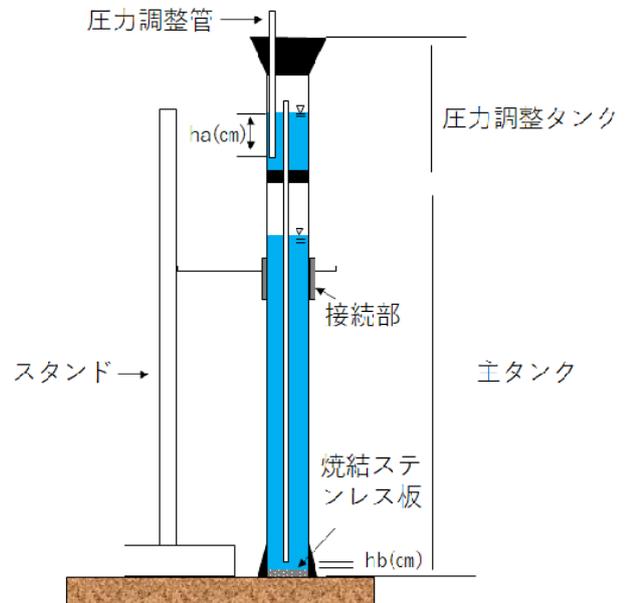


図 1 負圧浸入計

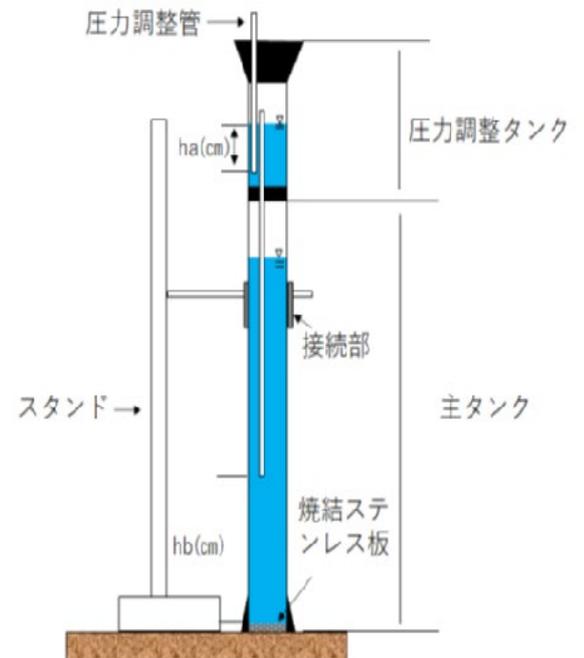


図 2 改良型負圧浸入計

### 3. 透水試験の結果

実際に小学校グラウンドの負圧浸入計による透水試験を実施した。実験をグラウンドの二箇所で行いそれぞれの地点で与える湿潤水頭を複数段階に分けて実施し、浸透流量を測った。1か所目の地点 *a* では湿潤水頭を三段階に分けて行った。二つ目の地点 *b* では湿潤水頭を負圧と正圧の七段階に分けて行った。図 3 は地

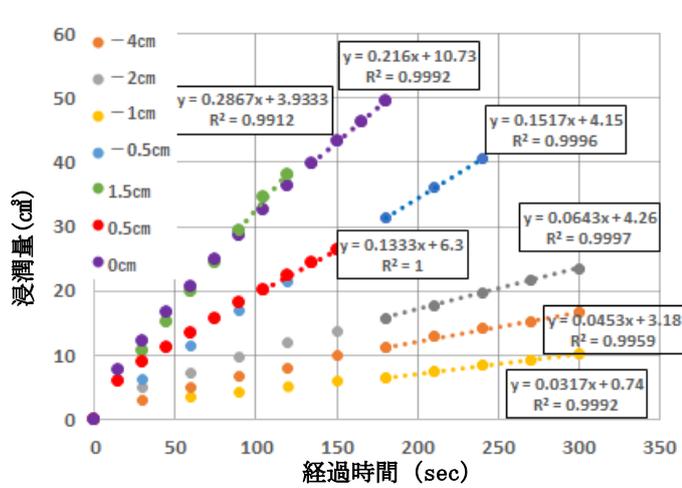


図 3 地点 B の透水試験結果

点 *b* の浸潤量と経過時間のグラフである。どちらの地点も初期の不飽和状態である場合には不飽和透水数よりも吸引圧による動水勾配が大きく非常常流であるが、飽和になると浸潤流速（グラフの勾配）が一定の定常流となった。また各地点の透水係数を式 1 より求めた。

$$K_{fs} = \frac{2.3 \times b}{\pi \times R^2 + \frac{4R}{1/a}} \quad (1)$$

ここに *R* : 給水ディスク半径 *b* : 切片 *a* : 土壌パラメータである。図 4 は地点 *b* の浸潤水頭と定常浸透量の関係をグラフで表した。

正圧を与えた場合でも負圧データと合わせることで線形回帰することができ、*a* と *b* を求めることができたことから透水係数を求めることができた。負圧を与えた地点 *a* も同様に透水係数を求めた。

地点 *a* での透水係数は  $1.38 \times 10^{-3}$  (cm/s) となり地点 *b* では、 $4.77 \times 10^{-3}$  (cm/s) となった。このことから線形回帰できたことから正圧でも透水係数を求めることができた。また負圧浸入計を用いて、飽和度が高い地盤での試験も改良を加えた負圧浸入計を用いて正圧を発生させることにより試験が可能になると考える。

### 4. 水分特性曲線と van Genuchten モデル

本研究では現場透水試験の結果から水分特性曲線を作成し保水性の評価を行った。保水性は、水分特性曲線の内側の面積により評価される。水分特性曲線を表すモデルとして式 2 に示す van Genuchten モデルを使用した。

$$S_e = \frac{1}{(1 + |\alpha h|^n)^{-\frac{1}{n}}} \quad (2)$$

ここに、*S<sub>e</sub>* : 有効飽和度(-)、*h* : 負の圧力水頭(cm)、*α<sub>w</sub>*, *n* : van Genuchten モデルパラメータである。

また地点 *a*・*b* での定常流となったこの勾配である浸潤フラックスの大きさは負荷する浸潤水頭によって異なる。

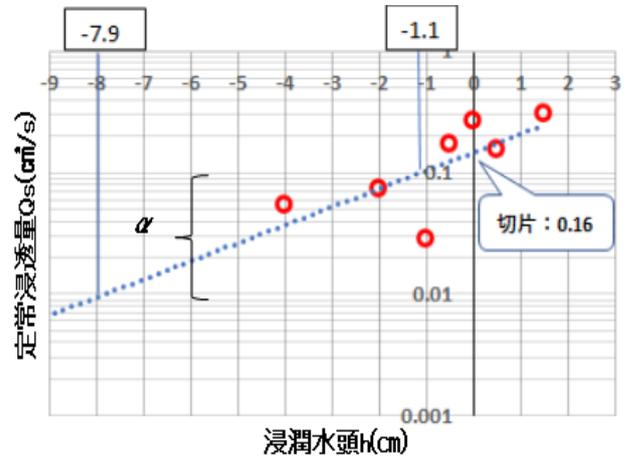


図 4 地点 *b* の浸潤水頭と定常浸透量

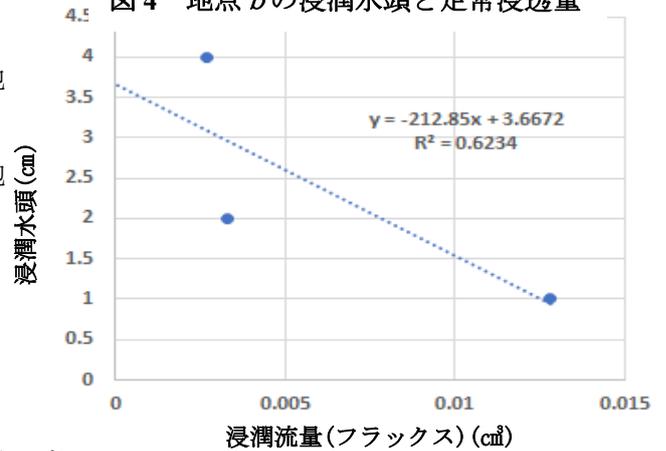


図 5 地点 *a* 浸潤フラックスと圧力水頭

ることが分かる。(図5)(図6)これより理論上、浸潤速度がゼロとなりうる負圧水頭に相当し、図5図6の切片が負圧浸入計の負圧水頭と飽和地盤の吸引圧が平衡する水頭であることが図7のイメージ図のようにいえるものと考えられた。この水頭は、地下水の毛管帯のように飽和であるが負圧である状態の最も大きい値と考えられるために、浸潤過程における水浸入値に等しいと考えられる。

そのことは別途の研究で水分特性曲線のVGモデルの水浸入値の逆数と言われている  $1/aw$  と平衡の負圧水頭の関係が一致していることを得ており図5より  $aw=1/1.837=0.544$ 、図6より  $aw=0.358$  を得た。

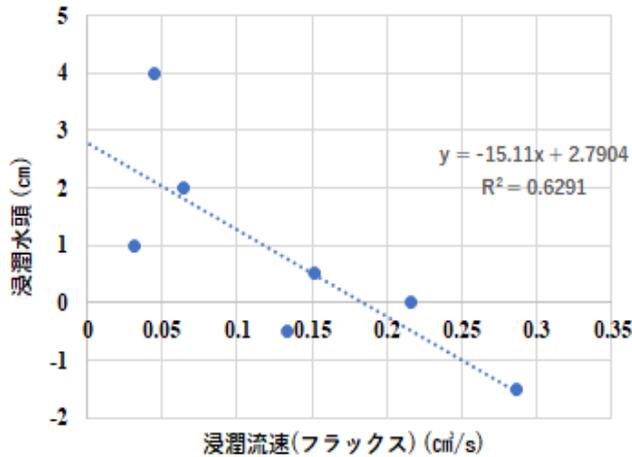


図6 地点 a 浸潤フラックスと圧力水頭

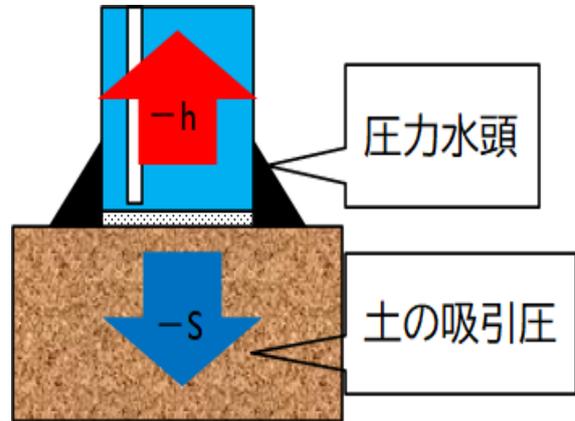


図7 負圧水頭の平衡イメージ

#### 4. 粒度分布と水分特性曲線

水分特性曲線を決定するVGモデルにはもう一つありそれは、傾きに関するパラメータ  $n$  である。粒度分布と間隙径分布の形状、間隙径分布と水分特性曲線を反時計回りに90度回転させたものとの形状がほぼ一致することが別途の研究によって証明されている。この二つの証明から、粒度分布と水分特性曲線の形状も一致するのではと考え検証をおこなった。方法としては、約800種類の不飽和土の土壌貯留、油圧伝導率、水拡散率データなどが記載されているデータベースであるUNSODA(不飽和データ)を用いた。van Genuchtenモデルのパラメータの  $n$  は勾配に影響を与えるパラメータとなっているのでvan Genuchtenモデルの  $n$  と粒度分布の勾配が一致すると考えた。粒度分布から求める  $n$  を  $n'$  とおき、 $D_{100}$ 、 $D_0$  を推定し、式3のような形で  $n'$  を求めた。

$$n' = \frac{1}{\log(D_{100}/D_0)} \quad (3)$$

ここに  $D_{100}$  : 100%粒径(mm)、 $D_0$  : 0%粒径(mm)である。

本研究では11種類のデータを用いて浸潤過程のvan Genuchtenモデルのパラメータ  $aw$  と  $n$  を求めた(図8) また、11種類の粒度分布をデータから作成した(図9)。以上のようにUNSODAから得られた粒度分布の勾配  $n'$  とvGパラメータ  $n$  との関係を図10に示す。水分特性曲線のvGモデルの  $n$  と粒度分布より求めた勾配  $n'$  は相関がいいことがわかる。しかし相関はいいが、 $n'$  と  $n$  の値に多少のズレが生じている。相関が良いことからズレ幅がほぼ一定になっているため、 $n'$  の値に回帰直線の傾き(0.5339)の逆数である、1.9をかけた。 $n'$  の値に回帰直線の傾きの逆数をかけることにより、 $n$  と  $n'$  の値がほぼ等しくなった。この結果から本研究で提案する粒度分布の勾配から求めた  $n$  の値を1.9倍することによって、vGモデルのパラメータである  $n$  の推定をおこなうことができると考えられる。

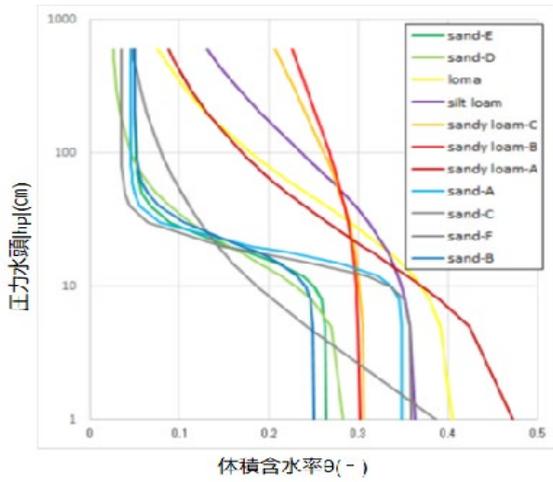


図 8 11 種類の水分特性曲線

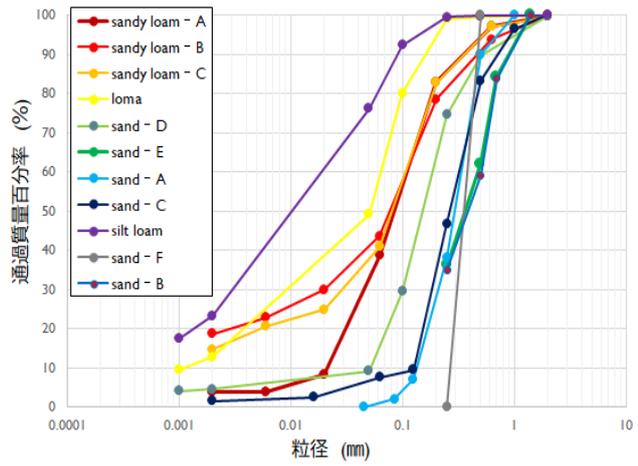


図 9 11 種類の粒度分布

よって図 11 に示す粒度試験結果から  $n^*=1.245$  が得られた。また図 5 および図 6 から  $aw$  の値を得ておりこれらの情報から vG モデルで示した水分特性曲線を図 12 に示す。

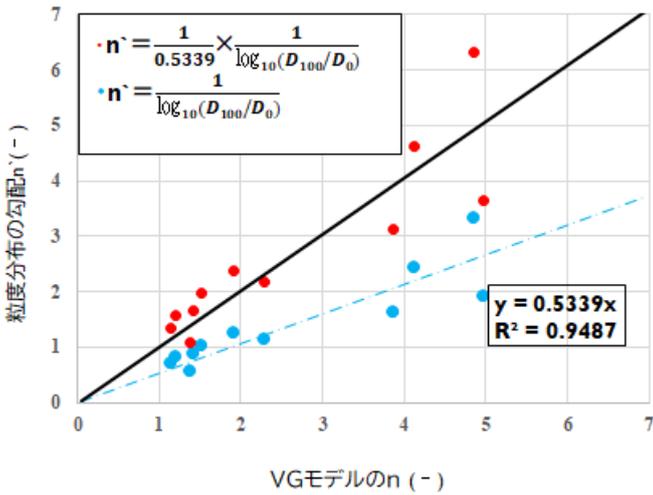


図 10 粒度分布の勾配  $n^*$  と vG モデル  $n$

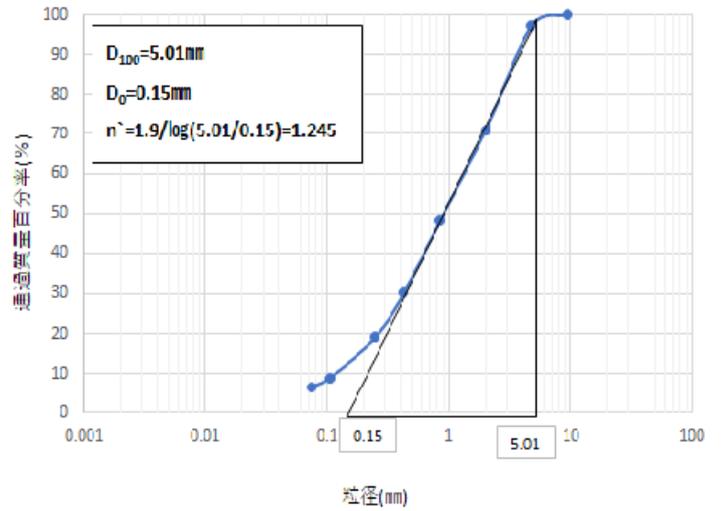


図 11 粒度分布と  $n^*$

### 5. 室内試験との比較

各地点と室内試験の水分特性曲線を比較し、ほとんど形状が一致した。また地点 B の水分特性曲線が地点 A とほぼ一致していることから、透水試験より浸潤流速と浸潤水頭の切片  $aw$  を求める事によって現場で水分特性曲線が求められると考える。

**謝辞：**実験の実施において、本研究室の伊藤建登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) 松原祥平・杉井俊夫・浅野憲雄：水分特性曲線からの保水性指標の提案，土木学会中部支部研究発表会Ⅲ036, pp. 259 - 260, 2011 年 3 月
- 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

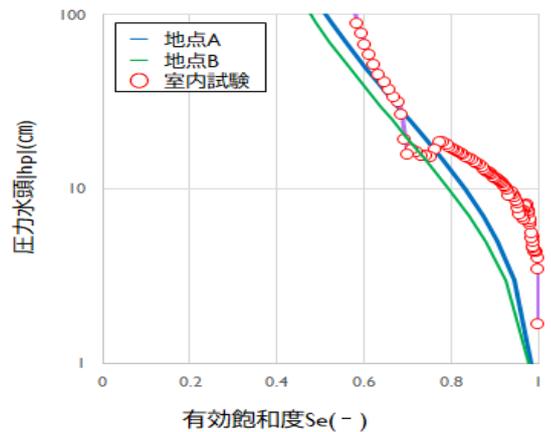


図 12 各地点の水分特性曲線の形状

## 団粒化した土の浸透破壊について

EC18037 佐藤駿太

### 1. はじめに

平成 24 年の矢部川で浸透による堤防の決壊が発生し周辺の地域に大きな被害を与えた。この災害は「越水なき破堤」と言われており、浸透による堤防の決壊であり、浸透破壊の一つであるパイピング現象が原因である<sup>1)</sup>。浸透破壊とは、間隙水圧の上昇による有効応力の喪失による土の破壊である。

本研究では浸透による堤防決壊の新しい対策として団粒化技術が有効ではないかと考えた。団粒化技術は材料に団粒化剤を加えることで透水性、保水性を上げることができる技術である。団粒化により透水性が上がると、間隙水の損失エネルギーが大きくなるので有効応力の減少が少なくなる。そのため浸透破壊の対策になる。

浸透破壊の発生を判断するテルツァーギの限界動水勾配<sup>3)</sup>は土全体の体積に対する総間隙の体積の割合の平均的な間隙比のみであらわされている。団粒化することにより図 1、図 2 に示すように間隙径の大きさの分布は異なる。そのため平均値である間隙比が同じであっても限界動水勾配は適用できるか不明である。本研究は鉛直次元浸透破壊実験を行い、団粒土のテルツァーギの限界動水勾配と浸透破壊発生時の動水勾配の関係を調べる。

### 2. 団粒化技術

団粒化技術は単粒構造の土（単粒土）に添加物（本研究では高分子ポリマー）を配合し各粒径の土粒子を結合させ、単粒土を団粒構造の土（団粒土）にする技術である<sup>3)</sup>。団粒化技術により、図 3 のように単粒構造が細かい粒子がまとめられた粒子群となり、大きな間隙（マクロポア）と小さな間隙（ミクロポア）へと改良される。マクロポアにより余計な水が排水され、ミクロポアにより水を保水するため、透水性と

保水性が向上する。

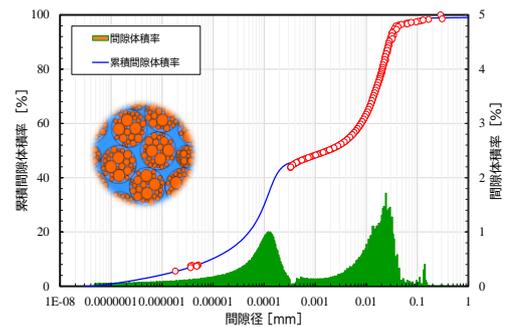


図 1 団粒土の間隙径分布

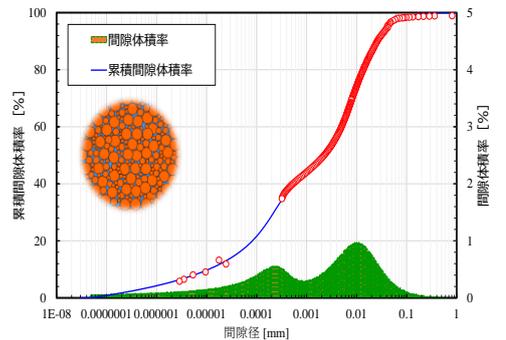


図 2 単粒土の間隙径分布

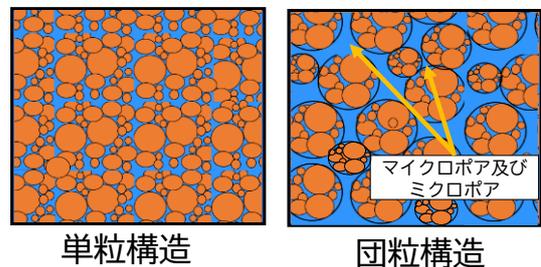


図 3 単粒構造及び団粒構造

### 3. 団粒化指数

団粒化技術により、団粒化の程度を適量的に表す指標として全国トース研究組合が定めた「団粒化指数」<sup>3)</sup>を用いる。団粒化が進むのは、主に原土中の粘

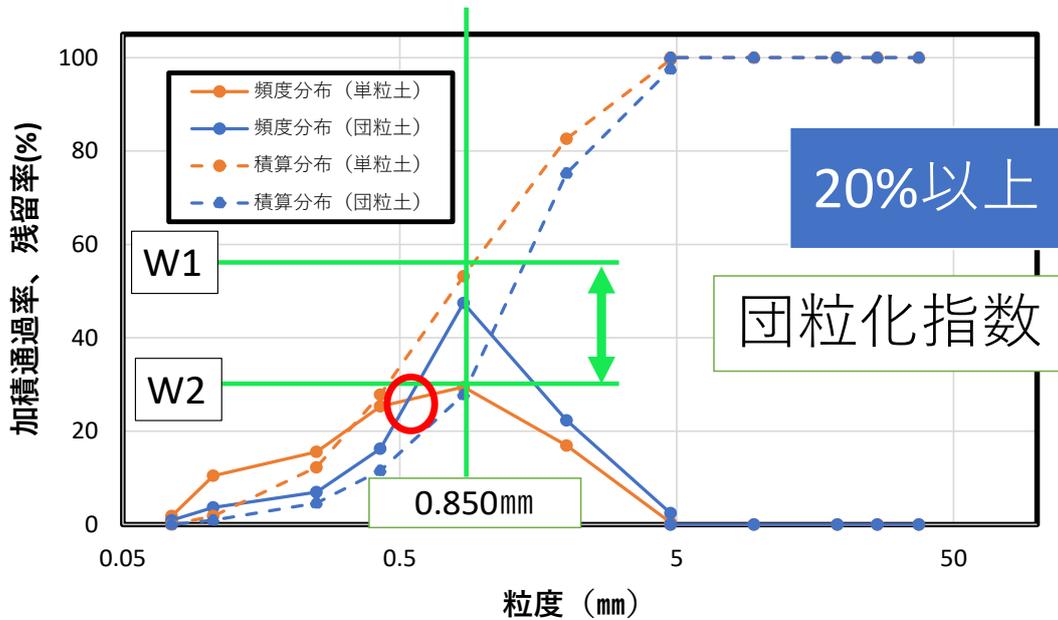


図4 団粒化指数の測定

土やシルト及び細砂からなる微細粒子部分であり、処理により、微細粒子相互の終結による団粒・粗粒子化と既存粒子表面への固着による粗粒子化が進むものと考えられる。団粒化指数が20%以上で十分に団粒化していると判断される。

測定・評価方法(手順)はJISA1204を基準とし、以下に示す。

- 1) 風土を風乾(バットに薄く広げ、1昼夜以上放置し恒量化を確認)して、風乾試料を1kg準備する。
- 2) 風乾試料を2分割し、一つに団粒化改良を加え①未処理原土、②改良土のふるい分け試料を得る。ただし、②は3日から1週間程度の養生期間を要する。
- 3) ふるい分け試料は各々300g~500gとし、①は「湿式ふるい分け試験」、②は「乾式ふるい分け試験」により粒度分布を測定する。(JIS Z8801規定のふるいをを用い、最小目開きを0.075mmとし、最大目開きは20mm程度とする。)
- 4) 各々の測定結果について、粒度区毎のふるい上残留率と積算ふるい下含有率を求める。
- 5) 団粒化限界粒度前後における、積算ふるい下含有率の差を求め、大きいほうを団粒化指数とする。

3. 鉛直一次元浸透破壊

(1) 目的

団粒化技術が浸透破壊の対策になるかどうかを調べるために、団粒化前後で鉛直一次元浸透破壊実験を行う。本研究は団粒土の限界動水勾配の実験値とテルツァーギの限界動水勾配から求めた理論値の差から透水性を評価し団粒化技術が浸透破壊の対策になることを確認する。

(2) 使用した試料

柏原小学校の土を未改良(単粒土)と団粒化改良した土(団粒土)に分けて使用した。団粒土は実験を行う前に団粒化指数をそれぞれ計測した。土質試験として粒度試験<sup>4)</sup>と密度試験を表1に記す。

表1 土質試験結果

	60%粒径	10%粒径	均等係数	土粒子の密度
	$D_{60}$ mm	$D_{10}$ mm	$U_c$	$\rho_s$ g/cm <sup>3</sup>
単粒	0.925	0.270	3.426	2.631
団粒	0.850	0.340	2.500	2.654

(3) 試験方法

- 1) 図5に示すように試験機を作成した。本試験では昇降式タンクによって、水位差(間隙水圧)の調整をした。さらに、ピエゾメーターを供試体と

つなげ、水位差の測定、浸透破壊発生の確認を行った。供試体内は全水頭が位置水頭のみであるのでピクノメーターで水位差の測定を行うことができる。また、流量を測定し、ダルシー則より透水係数を測定した。

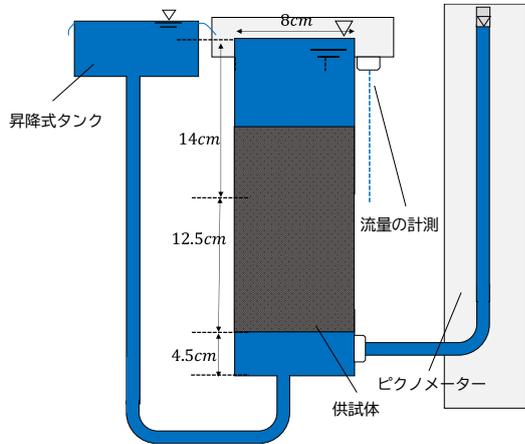


図5 試験器具

- 2) 供試体を作成した。本研究では試料を三層にわけ、それぞれ同じように締め固めることで、供試体内の間隙比を一定にした。そして、供試体に昇降式タンク、ピエゾメーターをつなげ水を流した。この時、供試体内の空気を二酸化炭素に置換することで、試料を完全に飽和させた。これは、二酸化炭素の空気より重く、水に溶けるといいう性質を利用している。
- 3) 昇降式タンクで水位差を調節し、30秒間、流量をそれぞれ三回ずつ測定した。測定した流量の平均値を試験データとして、採用した。供試体内に水道が発生、拡大し供試体が破壊するまで水位差を上げた。

## 4. 試験結果

### 4.1 透水性

本研究のデータケースを表2に示す。横軸に動水勾配、縦軸に流速cm/sをとり、間隙比と団粒化指数ごとの単粒土と団粒土における透水性をダルシー則により測定した結果を図6に示す。ダルシー則により動水勾配と、流速cm/sは比例の関係にありこの時の傾きを透水係数とし、土の透水性を示す。しかし、動水勾配が大きくなり、浸透破壊が発生すると流速cm/sが急激に大きくなりダルシー則が適用できない。こ

の、流速cm/sが急激に早くなる時の動水勾配を限界動水勾配とし、図6では赤い丸で示している。

表2 データケース

実験ケース	間隙比 (e)	団粒化指数 ( $I_d$ )
単粒土	A: 0.463	
	B: 0.536	
	C: 0.634	
団粒土	D: 0.56	21
	E: 0.623	22
	F: 0.75	27
団粒化失敗	0.84	14

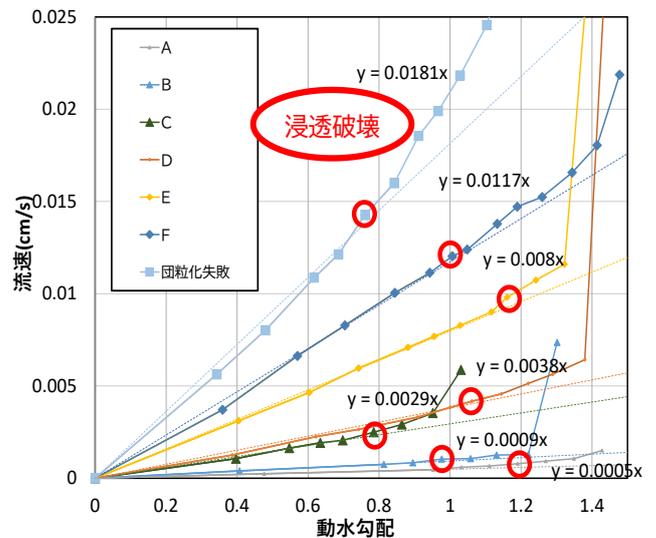


図6 透水性の評価

### 4.2 限界動水勾配

横軸に間隙比、縦軸に図6より求めた浸透破壊発生時の導水勾配をテルツァーギの限界動水勾配の計算値で割った数値をとり、間隙比とテルツァーギの限界動水勾配の関係を図7に示した。縦軸が1.0に近づくほどテルツァーギ式で求めた限界動水勾配で浸透破壊が発生する。そのため、縦軸の値が1.0より大きくなるほど、テルツァーギ式で求めた計算値よりも大きな動水勾配で、浸透破壊が発生し、1.0より小さくなるほど計算値より小さい動水勾配で、浸透破壊が発生する。図7の団粒土の上にある数値はそれぞれの団粒土の団粒化指数を示している。

### 4.3 実験結果の考察

図7が示すように、単粒土はテルツァーギ式で求めた限界動水勾配よりも小さな値で浸透破壊が発生

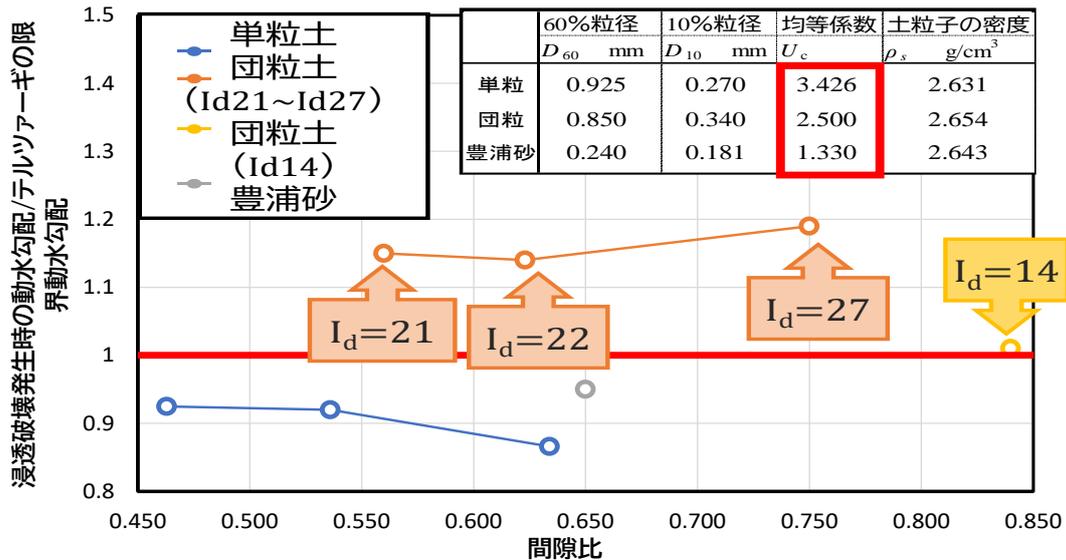


図7 浸透破壊発生時のテルツァーギの限界動水勾配

している。これは、本研究で使用した柏原小学校の土の均等係数は大きく、粒度にばらつきがあるため、小さい間隙で水が詰まり、間隙水のエネルギー損失が大きくなり、さらに、大きい間隙から細かい粒子が流失し局所的な浸透破壊が発生することが理由である。豊浦砂は柏原小学校の土よりも均等係数が小さく粒度にばらつきが少ないため、間隙径分布にばらつきがなく間隙水のエネルギー損失が小さくなっている。そのため、テルツァーギ式で求めた動水勾配と近い値で浸透破壊が発生している。

図7が示す通り間隙比と縦軸の関係は変わらない。単粒土は横軸の間隙比をおおきくすると、間隙比が小さいときよりも小さい動水勾配で浸透破壊が発生している。これは、間隙比を大きくするときは締固めを緩くする必要があり、緩い締固めだと大きい間隙がより多くできてしまうため空気が入りやすくなってしまったことが原因として考えられる。団粒土は団粒化指数が大きくなるごとに縦軸の値が大きくなり、同じくらいの団粒化指数では縦軸の値はそれほど変わらない。これらのことから、同じ間隙比でも団粒化が進むほど透水性がよくなり、より大きい動水勾配で、浸透破壊が発生することが分かる。

### 5. まとめ

団粒土の団粒化指数を大きくするほど、限界動水勾配が大きくなった。そして、団粒化指数が20を超える(十分に団粒化した)と、テルツァーギ式で求め

た限界動水勾配よりも大きな動水勾配で、浸透破壊が発生することを得た。しかし、今回行った試験は室内試験であり、実際の環境とは異なるため実際の堤防で浸透破壊の対策になるかわかっていない。そのため、浸透による堤防の決壊の対策になるか検討するためには、実際の堤防に近づけた模型実験を行う必要がある。

### 6. 参考文献

- 1) 国土交通省 国土技術政策総合研究所 河川研究部 河川研究室 福島雅紀:”破堤現象と堤防強化”,基礎水理シンポジウム 2020
- 2) 杉井俊夫、山田公夫、名倉晋:限界流速から見た浸透破壊の発生と進行,地盤工学会誌 57 (9) , 2009-00-01
- 3) 西村友良、佐藤研一、杉井俊夫、小林康昭、規短大義、須綱功二:“基礎から学ぶ土質工学”,朝倉書店, pp. 44-56,
- 4) 細野康代、吉嶺充俊:豊浦砂の粒度分布,土木学会第 64 回年次学術講演会(平成 21 年 9 月), III-168

## 自由度の高い水分特性曲線モデルの構築

EC18045 種瀬 香凜

### 1. はじめに

土中水の挙動をシミュレーションする際に欠かせない水分特性曲線は、これまで van Genuchten モデルを代表に多くの研究者らが提案してきた。一方、杉井ら<sup>1)</sup>は水分特性曲線から粒状材料の間隙くびれ径の分布を示すことを得てきたが、提案されている水分特性曲線モデルは、団粒化した土など双峰性を有する間隙径分布の場合や最小の間隙径までを示すことができなかった。つまり、水分特性曲線モデルからの間隙径の推定を行う場合、モデル形状の影響を受けていた。そこで本研究は、実験データを忠実に再現できる水分特性曲線モデルの構築を目的に、杉井・宇野が提案したロジスティック曲線を用いたモデル（以下 SU モデル）<sup>2)</sup>を改良することを目的としている。

### 2. SU モデル（オリジナルモデル）の概要

SU モデルはロジスティクス曲線を利用したモデル(式(1))であり、本研究ではオリジナルモデルとして用いることとする。本モデルは、0~1 までを連続関数として2つのパラメータで表現できること、パラメータの推定も線形回帰で行えることから容易である特徴を有する。

$$Se = [1 + \exp(A + B \log_{10}|h|)]^{-1} \quad (1)$$

$$Se = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (2)$$

ここに、 $Se$ : 有効飽和度、 $\theta$ : 体積含水率、 $\theta_r$ : 最小水分容量、 $\theta_s$ : 飽和体積含水率、 $h$ : サクション水頭、 $A$ 、 $B$  はフィッティングパラメータである。

式(1)を変形して式(3)の負の圧力水頭  $hp$  の 1 次式が得られ、このときパラメータ  $A$  と  $B$  を容易に回帰して求めることができる。

$$\log_e \left( \frac{1}{Se} - 1 \right) = A + B \log_{10}|h_p| \quad (3)$$

図 1 には、単峰性の試料 (Sample-1) と双峰性の試料 (Sample-2) の試験データに式(3)のモデルをフィッティングした結果を示している。通常の土試料のような単峰性の Sample-1 の水分特性曲線は、SU モデル

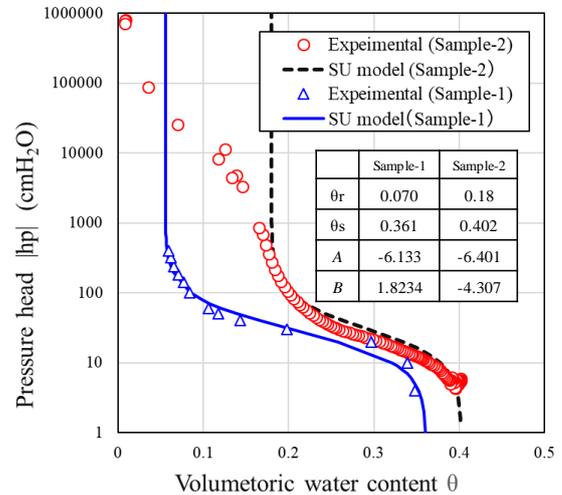


図 1 SU モデルによる実験値のフィッティング

で十分表現できているが、Sample-2 の双峰性の実験結果には一部しか再現できていないことが明らかである。

### 3. 低飽和域（吸着水分領域）に対応したモデル

Peter, Durner and Iden<sup>3)</sup>らは、吸着水だけとなる低水分量域を考慮した PDI model を提案した。これまでのモデルでは、吸着水だけの低水分量域は最小水分容量 ( $\theta_r$ ) 以下については表現できておらず、体積含水率  $\theta=0$  にはならなかった。本モデルでは  $\theta_r$  よりも低い水分領域を関数で表し、最終的には  $\theta=0$  となる形をとっており、自由度が増やすとともにより正確に物理現象を表すものとなっている。

$$\theta(h) = \theta^{cap}(h) + \theta^{ad}(h) = (\theta_s - \theta_r)S^{cap} + \theta_r S^{ad} \quad (4)$$

ここに、 $S^{cap}$  はメニスカス水の飽和関数、 $S^{ad}$  は吸着水の飽和関数、 $\theta_r$  は吸着水のための最小水分容量である。

$h=h_0$  で体積含水比がゼロに達することを保証するために、 $S^{cap}$  は単峰性モデルでスケーリングされた式(5)とおく。

$$\theta(h) = (\theta_s - \theta_r) \frac{\Gamma(h) - \Gamma_0}{1 - \Gamma_0} + \theta_r S^{ad} \quad (5)$$

ここで、 $\Gamma(h)$  は単峰性の水分特性曲線関数モデル（ここでは、式(1)の  $Se$ ）であり、 $\Gamma_0$  は  $h=h_0$  の時の単峰性の水分特性曲線関数の有効飽和度  $Se$  の値となる。

#### 4. 双峰性モデル

団粒構造などの階段状になった水分特性曲線に対応した2つの単峰性を組み合わせた双峰性のモデル(Bimodal model)がDurnerにより提案されている。二つの山の間隙径分布を持つ水分特性曲線で導かれる。単峰性モデルよりも自由度が高いため、複雑な水分特性曲線をフィッティング精度が高くなる。

$$\theta(h) = (\theta_s - \theta_r) \sum_{i=1}^2 w_i \Gamma(h)_i + \theta_r \quad (6)$$

ここに、 $w_i$ は*i*(双峰性の場合には*i*=2)に関する重みの係数であり、 $0 < w_i < 1$ 、 $\sum w_i = 1$ である。

#### 5. 土の保水性試験(蒸発法+サイクロメータ法)

低いサクションから高いサクションまで計測する必要があるから、2つの試験装置では計測する。

##### (1) 蒸発法

図2に示すように電子バランス上に、負圧を計測できるテンションメータを挿入した供試体を載せ、蒸発していくときの負圧と供試体内の水分の経時変化を求める(| $h_p$ |=約900cm水頭まで)。

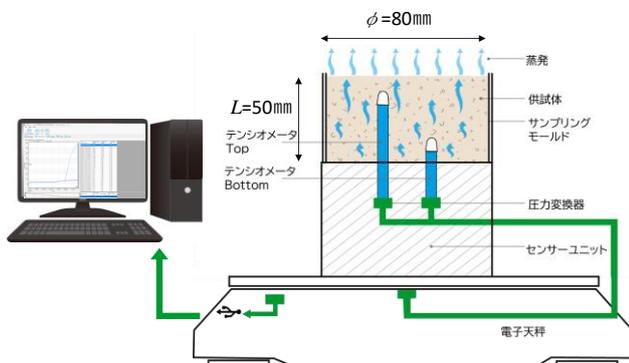


図2 蒸発法(Hyprop)装置の概要

##### (2) チルドミラー式サイクロメータ

図3のチルドミラー式のサイクロメータにより、1点ずつ水分量を蒸発させながら計測していく。サイクロメータによる土中水のポテンシャルは、式(7)で求める。

$$\phi = \rho_w \frac{RT}{M} \ln \left( \frac{p}{p_0} \right) \quad (7)$$

ここに、 $\phi$ : 土中水ポテンシャル、 $\rho_w$ : 水の密度( $g/cm^3$ )、 $R$ : 気体定数( $8.314J/(K \cdot mol)$ )、 $T$ : 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。

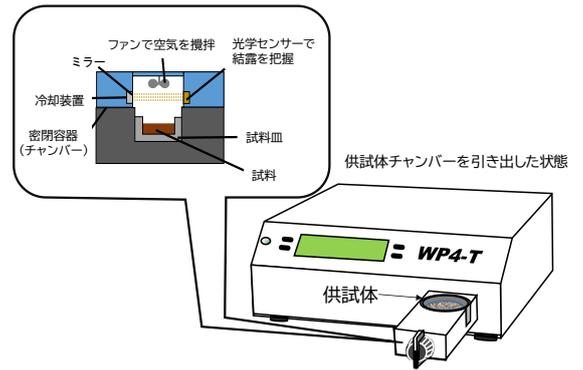


図3 チルドミラー式サイクロメータの概要

#### 6. 改良した自由度の高いモデルによる推定

今回、双峰性を示す団粒化しに対し、オリジナルモデルに2つのモデルを組み合わせる適用を調べた。フィッティング結果を図4に示す。

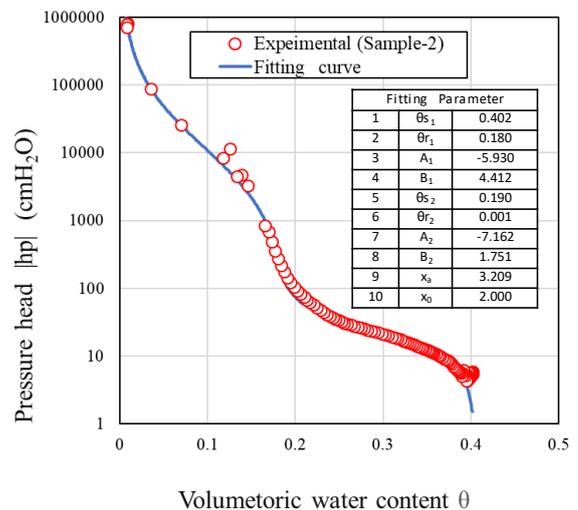


図4 実験値の提案モデルによる再現

サイクロメータでの計測範囲(| $h_p$ |=1000cm以上)では、離散的なデータとなる。今回、自由度の高いモデルにより実験データを忠実に再現することができたと同時に、10個のパラメータで推定が可能となる。

#### 7. おわりに

推定パラメータを少なくすることができた。

【参考文献】1) 杉井俊夫・川部らら：水分特性曲線を用いた砂の間隙構造の評価，地盤工学会誌，Vol.67，No.9，pp.12～15，2019。2) 杉井俊夫・宇野尚雄：簡便な不飽和浸透特性のモデル化，不飽和地盤の透水性に関わる諸問題シンポジウム発表論文集，p.179-184,1996。3) A. Haghverdi, M. Najarchi, H. S. Ozturk and W. Durner: Studying Unimodal, Bimodal, PDI and Bimodal-PDI Variants of Multiple Soil Water Retention Models: I. Direct Model Fit Using the Extended Evaporation and Dewpoint Method, pp.6-9,2020..

団粒化による液状化抑制技術の検証

EC18055 長坂 勇希

1. はじめに

埋設管の浮き上がりや埋め戻し材の沈下といった液状化の被害は、管の破損によるライフラインの停止や道路では交通障害をもたらす。また、高度経済成長期に整備された管路の老朽化が進んでおり、それに伴い管路の更新需要の増加が予想される<sup>1)</sup>。そこで本研究では埋設管の交換において埋め戻し材に団粒技術の適用を目的に、改良前の土と改良後の土の液状化モデル実験を実施する。特に実験を用いて、①加速度の変化の確認、②過剰間隙水圧比の変化の確認、③噴砂・噴水状態の確認、④体積変化(地表面変化量)の確認により液状化の抑制効果を検証する。

2. 試料

試料は現地(福岡県みやま市瀬高町)から掘削された土を現場土とする。実験では埋め戻し材に団粒化剤(GB-2000)を用いて団粒土を作成して使用する。団粒化することで細かい粒径がまとまるため、粒径分布に変化がみられる。本実験では改良前と改良後の2つの試料を使用して液状化モデル実験を実施する。

3. 方法

3.1 液状化実験による団粒化剤の評価

図1のように液状化モデル実験を実施した。同じ方法で締め固めをして現場土(単粒)と現場土(団粒)をそれぞれ作成した。現場土の中には塩化ビニル管を埋めた。また、地盤の設計は東京都品川区の道路占用配置基準<sup>1)</sup>の水道管を参考にしたHは圧力計から求めた水位で水位差から過剰間隙水圧比を計算する。

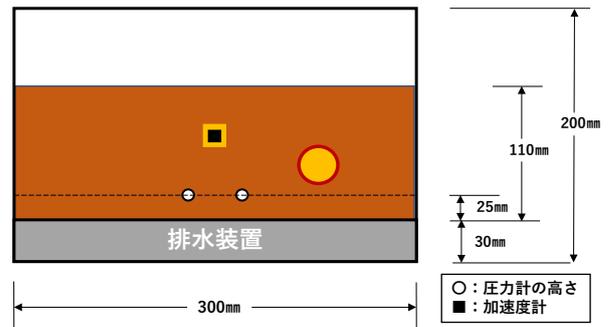


図1 液状化モデル実験

3.2 粒径による団粒化剤の評価

図2は今回使用する現場土の粒径加積曲線である。団粒土は10~30%粒径で単粒土より大きくなったため均等係数が1に近づく。よって、団粒化すると粒径幅が小さくなる。

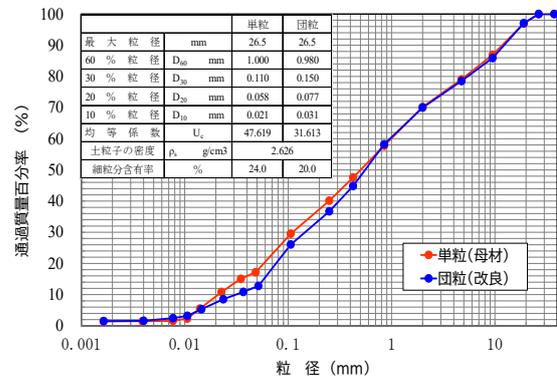


図2 粒径加積曲線

3.3 液状化実験の結果

①加速度の変化の確認

単粒土と団粒土の加速度が同じかを確認するために図4は、それぞれの振動台の周波数を示した。単粒土は2.69Hz、団粒土は2.75Hzであった。単粒土と団粒土の周波数はほぼ同じであったため、加速度は単粒土と団粒土は同じ速さで振動していることが分かった。

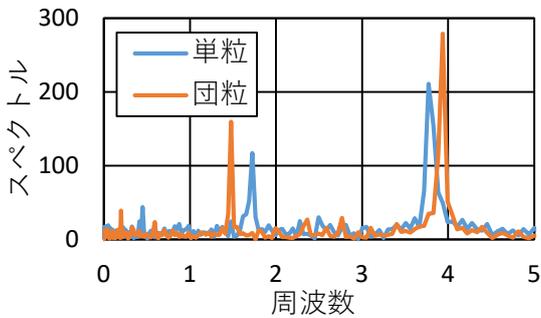


図4 振動台の揺れの周波数

②過剰間隙水圧比の変化の確認

図3は過剰間隙水圧比を示している。単粒土、団粒土それぞれの赤い丸の部分に着目すると過剰間隙水圧比の上昇の仕方に違いがみられる。それは、土中の水の動きを示して、単粒土は水位が急激に上昇したため、直角に曲がり一定になった。これに対し、単粒土は水位がゆっくり上昇していったため、円を描く感じで曲がり、一定になったと考えられる。また、団粒土は、単粒土よりも過剰間隙水圧比が上昇しにくいことが分かる。

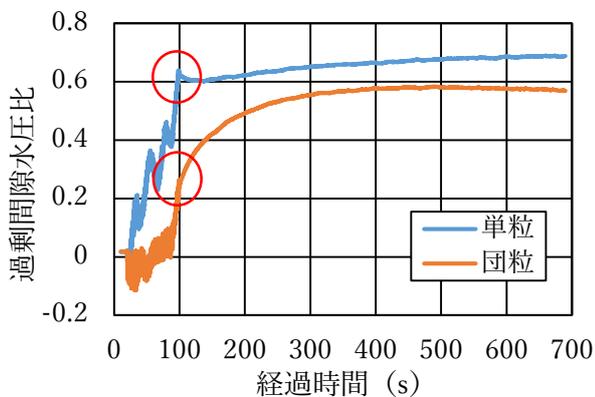


図3 過剰間隙水圧比

③液状化後の噴砂噴水状態の確認

実験後の噴砂噴水状態の結果を写真1は横からで写真2は上から撮影したものである。単粒土は振動台を揺らした数秒後に棒が沈んでいき、地表面に水が浮き上がってきた。団粒土は地表面に水がみられず、棒は5mm程沈んだことが確認された。このことから団粒土は、単粒土よりも棒の沈む量が小さいことが分かった。すなわち、有効応力が軽減され、地盤の支持力が保たれたといえる。



写真1 噴砂噴水後（横から撮影）

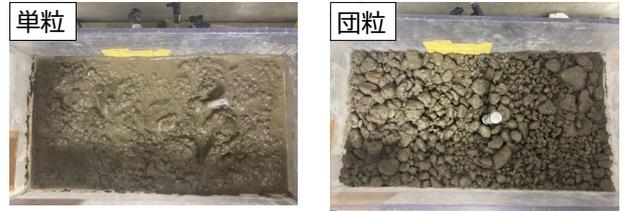


写真2 噴砂噴水後（上から撮影）

④液状化後の体積変化（地表面変化量）

本実験では、振動前、振動後の2回メジャーで地盤高さをはかり地盤沈下量を調べた。単粒土は2.4%で団粒土は1.0%それぞれ沈下した。このことから団粒土のほうが単粒よりも地盤沈下が小さいことが考えられる。



写真3 体積変化後

4. おわりに

本研究では以下の3つが得られた。1つ目は②から団粒土は単粒土より過剰間隙水圧比が上昇しにくいことが確認できた。2つ目は③から団粒土は単粒土よりも有効応力が軽減され、地盤の支持力の低下を抑えられることが確認できた。3つ目は④から団粒土のほうが単粒土よりも地盤沈下が小さいことが確認できた。

謝辞

中部大学教授杉井俊夫先生に実験の手順、論文の書き方などご指導をしていただきました。誠にありがとうございます。

【参考文献】

1) 東京都品川区：”道路占用許可基準および道路占用物件配置標準”, p.35,2016-03

越流時における堤体内の浸透流解析

EC18070 安田 健太郎

1. はじめに

近年、ゲリラ豪雨や線状降雨帯などの環境の変化が大きく災害の規模や頻度が増加している傾向にある。千曲川の破堤のように、スーパー台風や豪雨の頻発により、これまでの河川の流量を上回る流量が発生し、越水による破堤が増加している。図-1に示すように、越流時には堤体全てが水で覆われ、急激な水位上昇時には堤体内に間隙空気が閉じこめられることが予想される。間隙空気が圧縮されると間隙空気圧が上昇し、堤体内からの間隙空気圧をうけ、越水時に堤体内部から弱体化することも考えられ、間隙空気圧の増加量がどの程度になるか重要となる。本研究では、気液二層流の解析をとおして間隙空気圧の増加について調べることを目的に、1次元鉛直モデルによるプログラムの構築をおこなった。

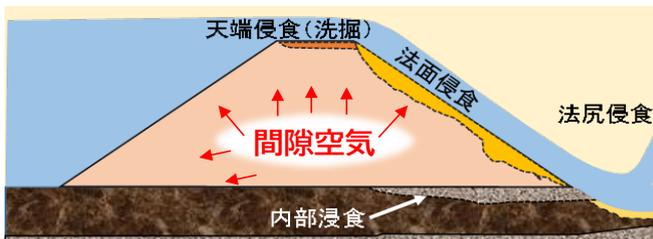


図-1 越流時の堤体と間隙空気圧

2. 研究方法

鉛直一次元の流れを時間によって流れが変化する差分法のブロック分割法による非定常解析を行う。支配方程式には、ダルシー法則と連続式を用いたRichardsの方程式を使用する。

$$c' \frac{\partial h_p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial h_p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial h_p}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial h_p}{\partial z} + k_z \right) \quad (1)$$

ここに、 $h_p$  : 圧力水頭、 $t$  : 時間、 $k_x \cdot k_y \cdot k_z$  : 透水係数、 $c'$  : 比貯留係数( $s_s$ ) × 比水分容量( $c$ )である。

式(1)を鉛直一次元の流れとすると式(2)となる。

$$c' \frac{\partial h_p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial h_p}{\partial z} + k_z \right) \quad (2)$$

これを差分法に基づいて式(3)を使って図-3のように傾きを求めるような形で差分化を行う。

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{\partial y}{\partial x} = \frac{\partial h_p}{\partial z} \quad (3)$$

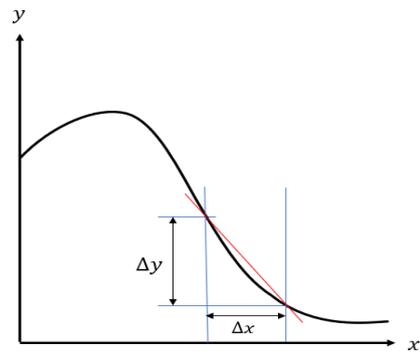


図-3 差分法

1) Richards 方程式の差分化

既知の圧力水頭である図-4の1、2、3と $\Delta t$ 後の未知の圧力水頭の4、5、6として、中心に位置する赤の点 ( $j, t+1/2$ ) を元に差分化を行うことで、式(4)を得る。

$$\frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial h}{\partial z} + k_z \right) = k_A \frac{h_4 + h_1 - h_5 - h_2}{2\Delta z^2} - k_B \frac{h_5 + h_2 - h_6 - h_3}{2\Delta z^2} + \frac{k_A - k_B}{\Delta z} \quad (4)$$

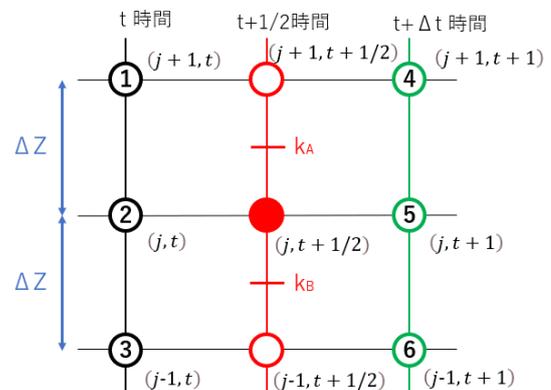


図-4 二次元の差分化と格子点

次に説明する条件の下でプログラム化することで、圧力水頭の解析を行った。解析は図-5, 6 に示す。

2) 初期条件・境界条件

- ・各点飽和しておりでの圧力水頭は静水圧とする。
- ・点1と点2の圧力水頭の関係は $\Delta z$ を10cmとするとき、全水頭が等しいため、点1の圧力水頭は点2の圧力水頭より-10cm低い水頭とする。
- ・強制排水で点10での圧力水頭は-10cmとする。
- ・上端給水での点1で圧力水頭は10cmとする。

3) 浸透特性モデル

浸透特性モデルは、van Genuchten model<sup>1)</sup>を用いた Mualem の式を使用、パラメータを表1に示す。

$$S_e = [1 + |a\phi|^n]^{-m} \quad (4)$$

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (5)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (6)$$

$$k_u = k_s \cdot S_e^{0.5} [1 + |a\phi|^n]^{-m} \quad (7)$$

$$c = \alpha(n-1)(\theta_s - \theta_r) S_e^{1/m} (1 - S_e^{1/m})^m \quad (8)$$

ここに、 $\theta$  : 測定される体積含水率、 $\theta_s$  : 飽和体積含水率、 $\theta_r$  : 残留水分(最小含水量)、 $\phi$  : 圧力水頭、 $a, n, m$  : モデル推定パラメータである。

表1 解析パラメータ

パラメータ		数値	単位
メッシュデータ	$\Delta z =$	10	cm
	接点数 N =	10	
飽和透水係数 $k_s =$		2.00E-02	cm/s
比貯留係数 $S_s =$		1.00E-05	1/cm
不飽和浸透特性	$\alpha =$	0.005	1/cm
	$n =$	2.3	
	$m =$	0.565	$m=1-1/n$
	$\theta_s =$	0.39	
	$\theta_r =$	0.03	

3. EXCELを使用した解析結果

初期条件と境界条件から鉛直一次元の土柱の飽和状態から下端から強制排水を行い、その後上部に越水深をかけた状態で上端給水の解析を行った。それぞれの時間経過による圧力水頭の時間的変化を図-5, 6 にそれぞれ示す。

強制排水

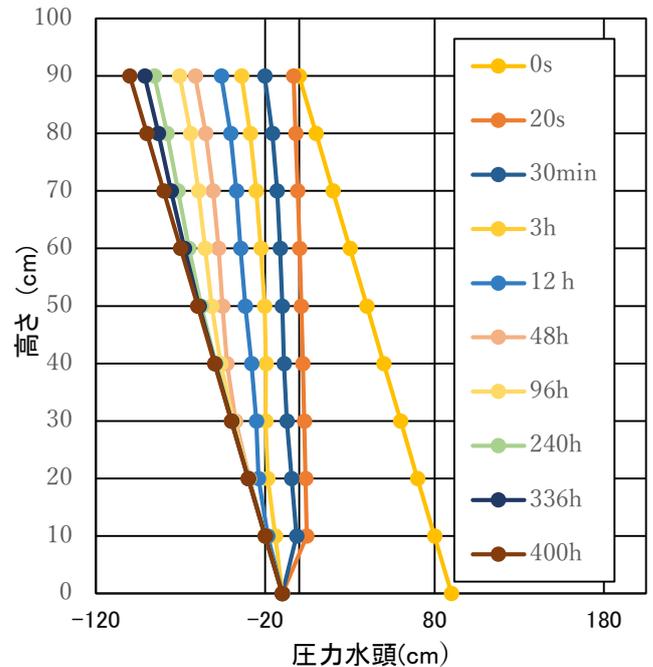


図-5 飽和状態から強制排水時の圧力水頭

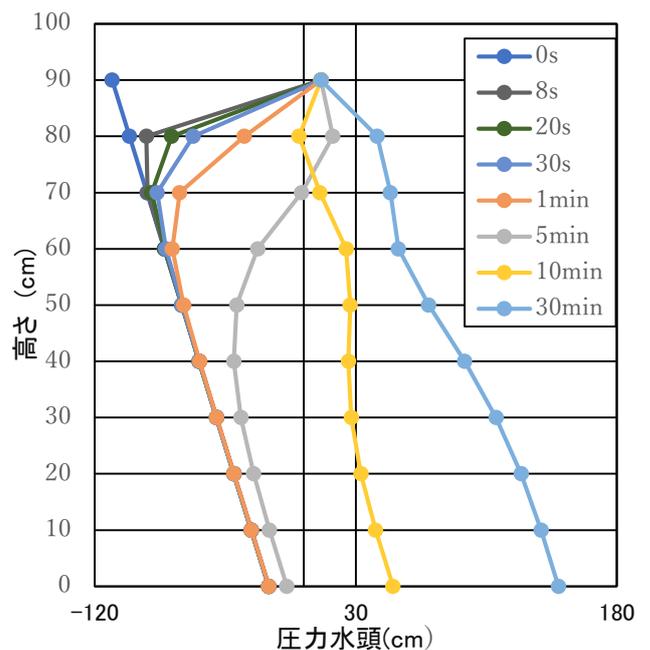


図-6 10cmの越水深を与えた時の圧力水頭

4. 気液二相流のそれぞれの支配方程式の差分化

(液相)

$$nC' \left( \frac{\partial P_a}{\partial t} - \frac{\partial P_w}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left( k_{rw} k_w \left( \frac{\partial p_w}{\partial z} + 1 \right) \right) \quad (9)$$

(気相)

$$n \left\{ (1 - s_r) B' - \frac{c'}{\beta_a} \right\} \frac{\partial P_a}{\partial t} + n \frac{c'}{\beta_a} \frac{\partial P_w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{k_{ra} k_a}{\beta_a} \frac{\partial p_a}{\partial z} \right) \quad (10)$$

ここで  $P_w$  : 圧力水頭、 $P_a$  : 間隙空気圧、 $t$  : 時間、 $c'$  : 比貯留係数( $S_s$ ) $\times$ 比水分容量( $c$ )、 $\beta_a$  : 構成体積率、 $s_r$  : 有効飽和度、 $k_{ra}$  : 相対透気係数、 $k_{rw}$  : 相対透過係数、 $B' = d(1/\beta_a)$ 、 $k_w = k/\mu_w$  : 相対透気係数の平均  $k_a = k/\mu_a$  : 相対透過係数の平均とする。そして、空気相と水相それぞれを図-4の差分格子点を作成し、差分化する。また、計算における前提条件として以下を示す。

$$k_A = k_{rw} k_w \Big|_{j-\frac{1}{2}}^{t+\frac{1}{2}} = \frac{k_{11} + k_2}{2} \quad (11)$$

$$k_B = k_{rw} k_w \Big|_{j+\frac{1}{2}}^{t+\frac{1}{2}} = \frac{k_2 + k_3}{2} \quad (12)$$

$$k_C = \frac{k_{ra}}{\beta_a} k_a \Big|_{j-\frac{1}{2}}^{t+\frac{1}{2}} = \frac{k_4 + k_5}{-2} \quad (13)$$

$$k_D = \frac{k_{ra}}{\beta_a} k_a \Big|_{j+\frac{1}{2}}^{t+\frac{1}{2}} = \frac{k_5 + k_6}{-2} \quad (14)$$

(液相)

$$nC \frac{P_8 - P_2}{\Delta t} = k_B \frac{P_3 + P_7 - P_2 - P_8}{2\Delta z^2} - k_A \frac{P_2 + P_8 - P_1 - P_9}{2\Delta z^2} + \frac{k_B - k_A}{\Delta z} \quad (15)$$

(気相)

$$n \left\{ (1 - s_r) B' - \frac{c'}{\beta_a} \right\} \frac{P_{11} - P_5}{\Delta t} + n \frac{c'}{\beta_a} \frac{P_8 - P_2}{\Delta t} = k_D \frac{P_6 + P_{12} - P_5 - P_{11}}{2\Delta z^2} - k_C \frac{P_6 + P_{12} - P_5 - P_{11}}{2\Delta z^2} \quad (16)$$

5. 差分化式のパラメータ

これらの浸透特性モデルとして、van Genuchten modelである(4)式、(5)式、(6)式を用いる。そして表2にパラメータを示す。

$$k_{rw} = k_{sa} S_e^{0.5} \left\{ 1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right\}^2 \quad (17)$$

$$k_{ra} = k_{sa} (1 - S_e)^{1/3} (1 - S_e^{1/m})^{2m} \quad (18)$$

そして、(37)式は van Genuchten model にある

$$S_e = \frac{1}{\{1 + (ap_c)^n\}^m} \quad (19)$$

の式を  $p_c$  で微分すると以下の(17)式となる

$$c = \frac{ds_w}{dp_c} = -a^n m n (1 - s_r) p_c^{n-1} \{1 + (ap_c)^n\}^{-m-1} \quad (20)$$

空気相と水相の支配方程式の関係式として、

$$P_c = h_a - h_p \quad (21)$$

を用いる。そして、(17),(18),(19),(20)の式と表2をパラメータとして用いて解析を行う。

ここに  $k_{sa}$  : 飽和透水係数、 $S_e$  : 有効飽和度、 $p_c$  : 圧力水頭、 $a, n, m$  : モデル推定パラメータである。

表2 二相流のパラメータ

パラメーター		数値	単位
メッシュデータ	$\Delta z =$	10	cm
	接点数 N =	10	—
飽和透水係数 $k_{sw} =$		1.00E-03	cm/s
飽和透気係数 $k_{sa} =$		1.28E-01	cm/s
比貯留係数 $S_s =$		1.00E-05	1/cm
不飽和浸透特性	$\alpha =$	0.05	1/cm
	$n =$	2.3	
	$m =$	0.565	$m = 1 - 1/n$
	Sr =	3	%
	$n(= \theta_s) =$	0.4	
	$\theta_r =$	0.03	
温度 t		20	°C

6. 初期条件と境界条件

- 各点飽和しておりでの圧力水頭は静水圧とする。
- 強制排水で点1での間隙空気圧を20hPaとし、圧力水頭では非排水条件とする。
- 上端給水で圧力水頭と間隙空気圧はそれぞれ非排水条件とする。

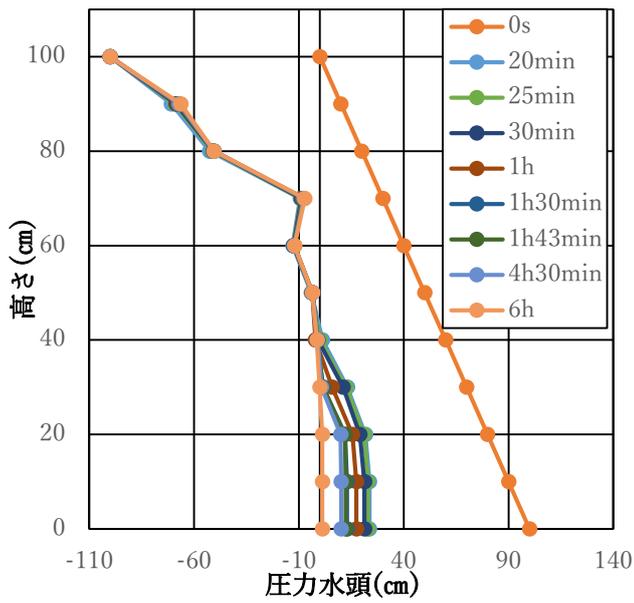


図-7 強制排水時の圧力水頭の挙動

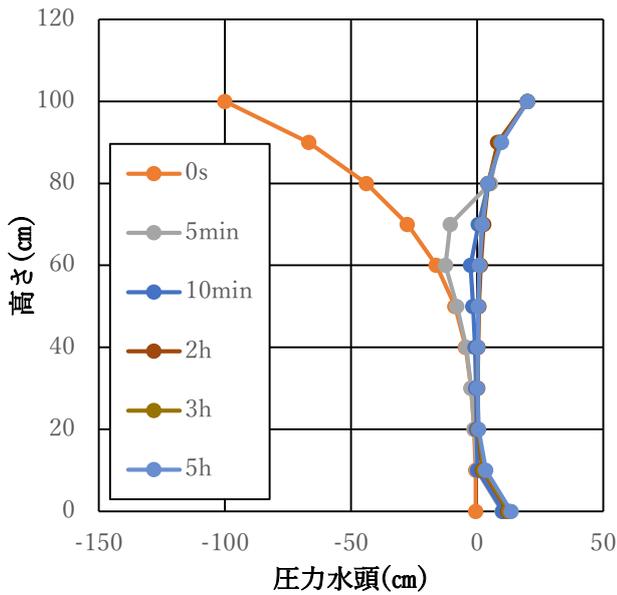


図-9 越水深 20cm 時の圧力水頭の挙動

・点1と点2の圧力水頭の関係は  $\Delta z$  を 20 cm とするとき、全水頭が等しいため、点1の圧力水頭は点2の圧力水頭より -10 cm 低い水頭とする。

7. 解析結果

初期条件と境界条件から鉛直一次元の土柱の飽和状態から上端から空気圧による強制排水を行いその後上部に水圧をかけた状態で上端給水の解析を行った。それぞれの時間経過による圧力水頭と間隙空気圧の時間的変化を図-7～10にそれぞれ示す。

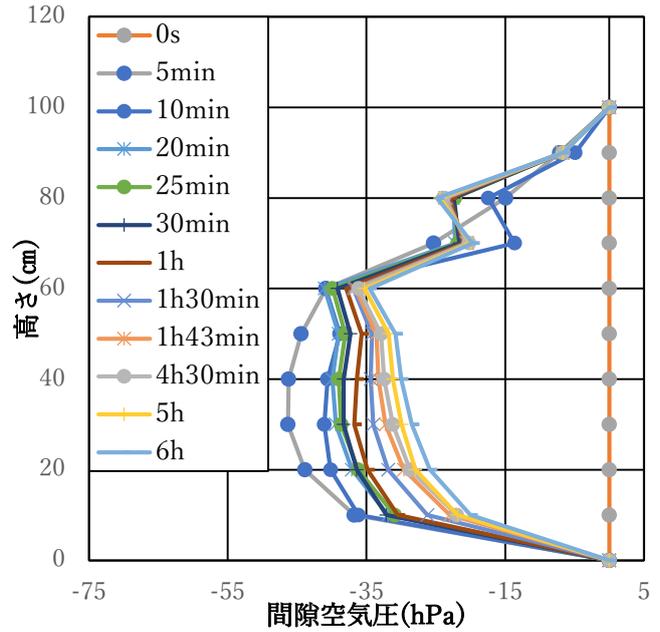


図-8 強制排水時の間隙空気圧の挙動

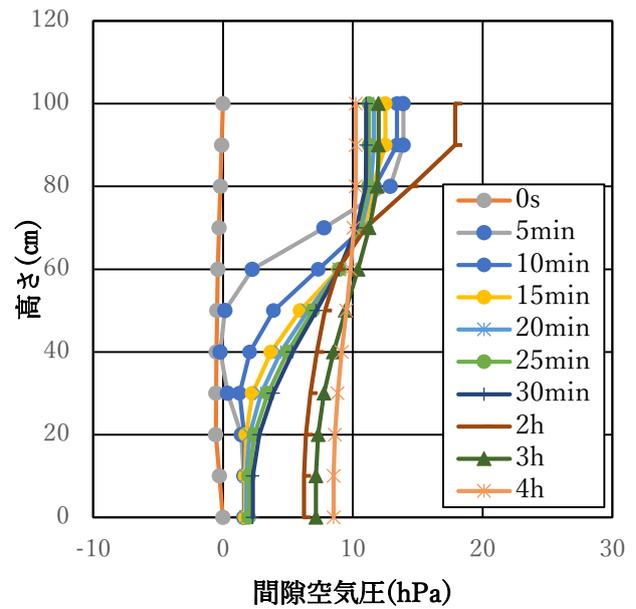


図-10 越水深 10cm 時の間隙空気圧の挙動

8. おわりに

80cm 程度の高さで最大 14hPa になり条件によっては変わるが、越水深の 65% くらいの空気圧が発生する。

参考文献

1) van Genuchten, M.: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 44:892-898, 1980.

ATTAC 工法により改良されたグラウンドの流出係数の変化

EC18071 山口 凱生

1.研究背景と目的

豪雨災害が多発し、都市化が進みアスファルトやコンクリートが多くなったことで、地盤内への浸透がほぼなくなり、そのまま流出することで河川に流入または湛水することになる。そうした対策として、グラウンド改良時などに団粒化舗装が施工されるようになり、地盤への浸透を増加させ、透水性を大きく改善させることができるのがわかっている。設計において、流出係数といった指標が用いられている（表1 土地利用と流出係数）。そのため、団粒化に改良することで、どの程度の流出係数に抑えられるのかが求められることになる。透水係数と流出係数の関係を明らかにした研究はこれまでになく、団粒化技術を設計に利用できないか検証する。

表1 土地利用と流出係数

地表面の種類		流出係数
路面	舗装	0.70~0.95
	砂利道	0.30~0.70
砂質土の芝生	勾配 0-2%	0.05~0.10
	勾配 2-7%	0.10~0.15
	勾配 7%以上	0.15~0.20
粘性土の芝生	勾配 0-2%	0.13~0.17
	勾配 2-7%	0.18~0.22
	勾配 7%以上	0.25~0.35
公園、広場		0.10~0.25
田,水面		0.70~0.80
畑		0.10~0.30
競技場		0.20~0.35
運動場(雨水排水施設あり)		0.80
ゴルフ場(雨水排水施設あり)		0.50

2.団粒化とは

自然堆積した土や発生した土は単粒構造(a)を有している。単粒構造の土は一つ一つの粒はとても細かく、単粒土と呼ばれている。単粒土の土粒子間に隙はない。だが僅かな水分を含むとサクシヨンの発生により、団粒構造(b)となるが、水分の増加に伴い単粒構造に戻る。

土を団粒構造に改良することで、透水性、保水性を向上させることができる。また大きな隙（マクロポア）と小さな隙（ミクロポア）の構造に変化させることで、水の通り易さである透水性が向上する。これまで透水性が高い土は、保水性に劣ることが一般的であったが、団粒化によってミクロポアに保水することで保水性も高くすることができる。さらには、細かい粒子を団粒化することは、水中でも飛散・流出することが少なく、目詰まりも起こしにくい性質に変えることができる。

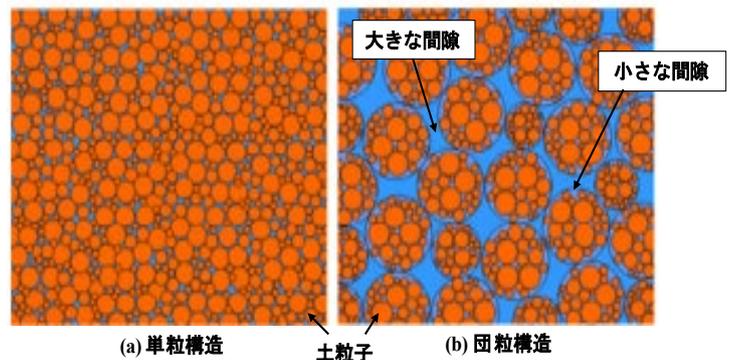


図1 単粒構造と団粒構造

### 2.1 団粒化舗装（ATTAC 工法）

国土交通省大臣認可の全国トラス技術研究組合では表層地盤の団粒化改良の普及を行っている ATTAC 工法と呼ばれる本工法は土に団粒化剤を配合し、土を団粒構造に変え、透水性と水性を向上させる工法である。硬さの調節ができ、軟らかいグラウンドから硬めの園路まで、幅広く使用することができる。

土を立体網目状の団粒構造に改良することにより雨水の透水性と保水性を高めることができる。団粒構造に改良した土は微粒子が結合し塊を作るため、水の通りがよくなり排水性が向上します。

透水性が改良され、透水機能が向上することで降雨後の水溜りの発生を抑え、保水性があるため通常のクレイ舗装と比べ、砂埃が立ちにくくなる。また、表層に保水した水の蒸発時に、気化熱の冷却効果により地表面の温度上昇を抑える効果があり、熱中症対策にも期待される。さらに、団粒構造を長期間保持することができ、降雨後も舗装材の硬度変化が少なく、泥濘化を低減することができる。現地の砂を利用したりサイクルが可能で、環境に対する負荷を軽減する効果がある。

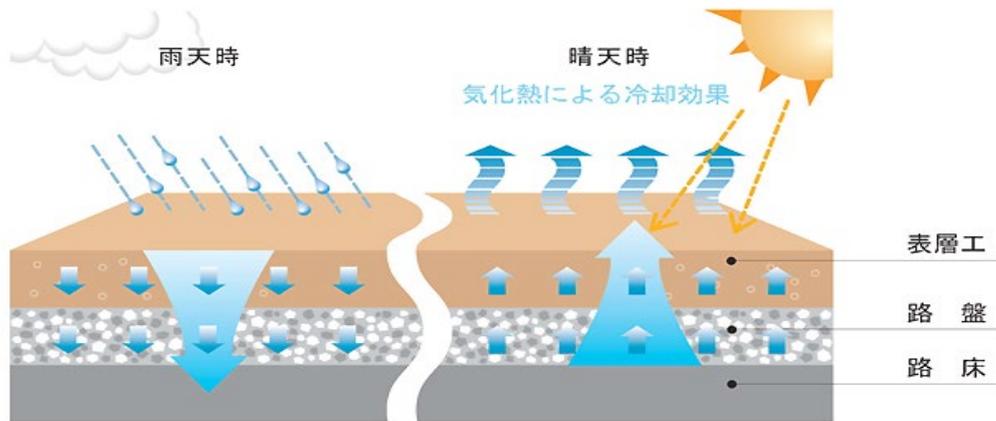


図2 ATTAC 工法の仕組み

### 3. 試料

今回実験に用いる試料を、どのような性質かを知るために、地盤材料の工学的分類(土質実験と基本の手引き)を用いて小分類を行った。

改良後(団粒土)の方が、粒径が大きかった。

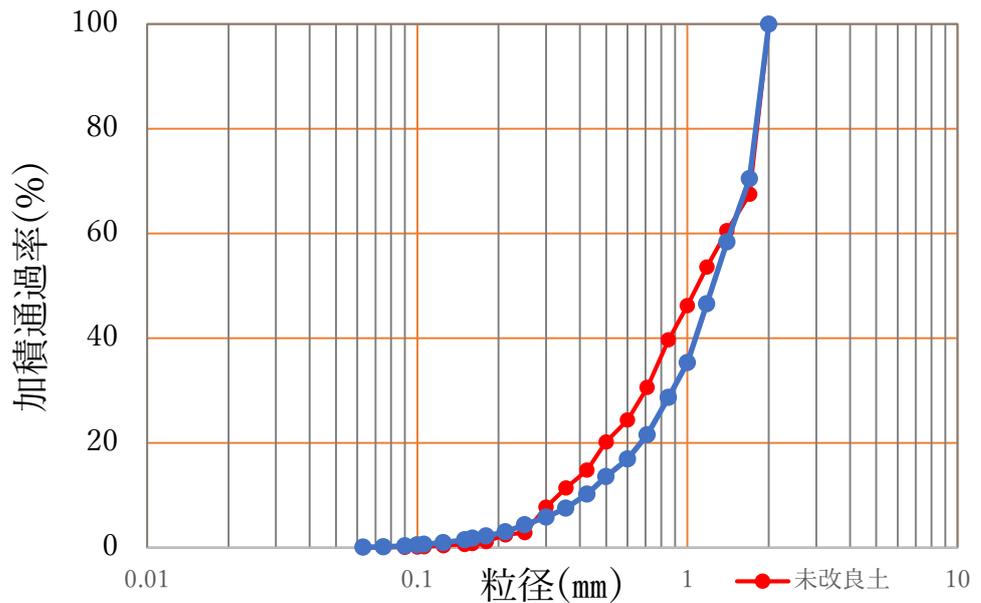


図3 粒径加積曲線

4. 検証結果

4.1 流出係数

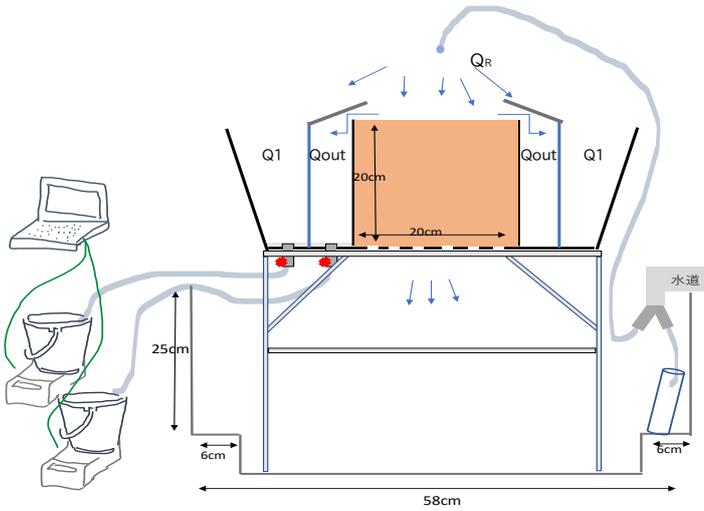


図 4-1 実験装置の概要

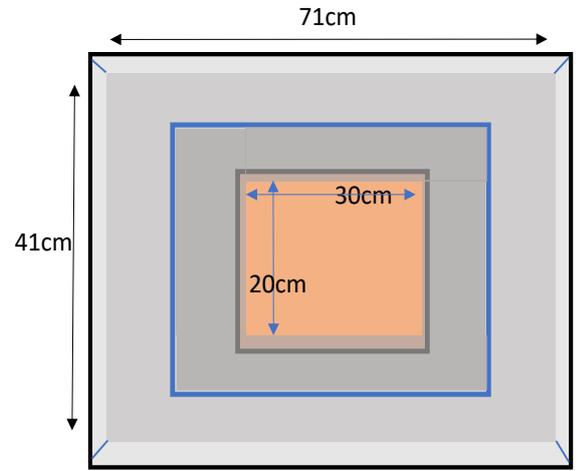


図 4-2 実験装置の概要

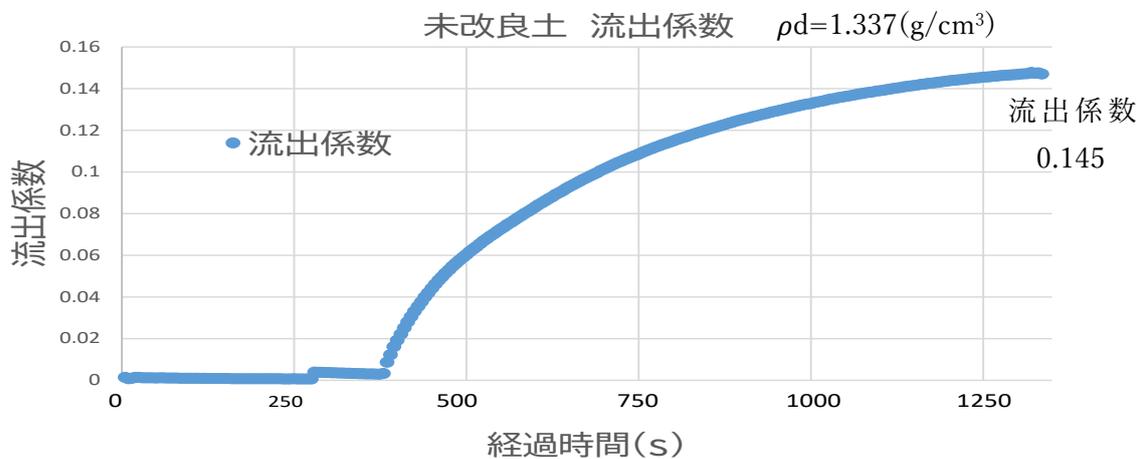
実験装置（図 4-1 実験装置 概要 図 4-2 実験装置 概要）を作成した。

実験方法

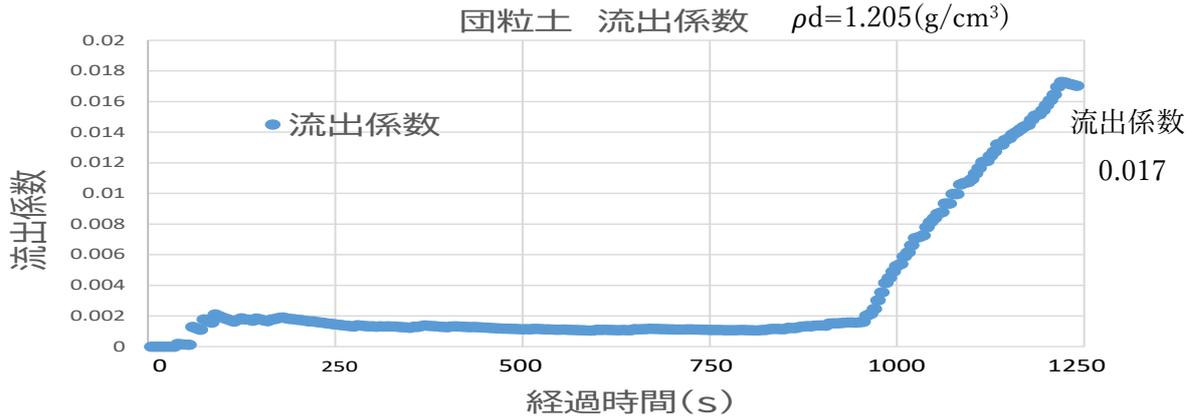
- ① 水道から2つホースをつけ最初に一つの方で降雨量を調節した、降雨量はすべて30秒間で430mLになるよう調節をおこなった。
- ② 試料に散水させ流下した流量をバケツに流れるように穴を空け、ホースでわたり質量を量りパソコンで5秒間隔に記録するようにおこなった。

この実験装置での流出係数算出方法

$$\text{流出係数} = \frac{Q_{out}}{Q_R - Q_1} \quad (4.1)$$



4-3 流出係数の時間変化



4-4 流出係数の時間変化

#### 4.2 透水係数

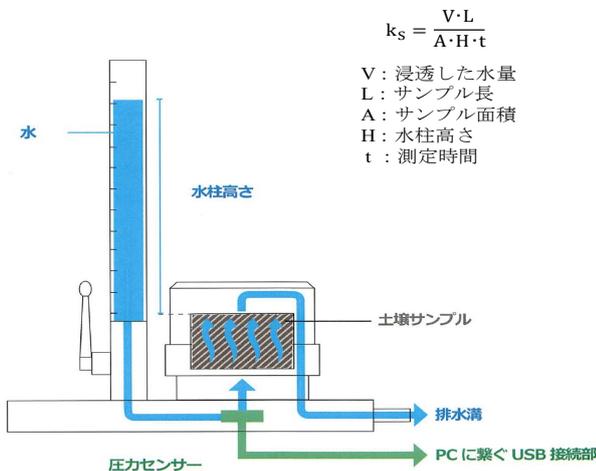


図 4-5 KSAT の機能の概要

本研究では飽和透水係数測定装置 (meter 社製)KSAT を使用することで常に変水位透水試験により透水係数を測定した。KSAT は、非常に正確な電子測定により、土の透水性に関わらず常に変水位透水試験で測定することが可能であり、透水係数の測定が完全に自動化されているため目盛の読み間違いといったヒューマンエラーをなくすることができる。

未改良土：透水係数  $1.37 \times 10^{-5} \text{m/s}$

団粒土： 透水係数  $2.15 \times 10^{-4} \text{m/s}$

#### まとめ

団粒構造の場合、未改良の試料から 10%以上、流出係数が低く、今回の降雨量では 16 分ほどでは水溜ができないということがわかった。

団粒化すると透水係数が  $10^{-5} \text{m/s}$  から  $10^{-4} \text{m/s}$  に 10 倍に変化するにしたがって流出係数は 0.145 から 0.017 と約 10 倍流出係数を抑えられることがわかった。

謝辞：杉井教授および実験を手伝っていただいた長坂勇希君に、また実験装置の作成に長い時間がかかってしまい研究室のメンバー皆様に作成のお手伝いをいただいたこと、ここに記して御礼申し上げます。

#### 【参考文献】

- 1) 岸井 徳雄・大倉 博：実験斜面に於ける表面流出の発生に関する研究，第 25 回水理講演会論文集，pp.147～152，1981.
- 2) 吉野 文雄：現地実験による表面流出の研究，土木学会論文報告集，第 330 号，pp.59～67，1983.
- 3) 森脇 寛：降雨実験による畑地模型の表面流出について，国立防災科学技術センター研究報告，第 30 号，pp.65～83，1983.
- 4) 国土交通省水管理,国土保全局：流出雨水量の最大値を算定する際に用いる土地利用形態ごとの流出係数を定める告示，平成 16 年国土交通省告示第 521 号，p.30，2004.