

効果的な透水係数を得る締固め時の含水比の推定  
～GB2000 の場合～

EC20014 岡部彰仁

1. 研究背景・目的

土の構造を単粒構造から団粒構造にすることで、間隙が大きくなり透水性・保水性の向上がする団粒化技術がある。透水性が向上することで、豪雨時に雨水を素早く地盤に浸透させることで都市型水害の抑制が期待できる。また、土は締固め時の含水比によって透水性が変化し、透水性を求めるには適切な含水比で試料を締め固める必要がある。透水性が向上する団粒化技術を活かすには、締固め時の適切な含水比を明らかにする必要があるが、その含水比は明らかになっていない。現在、団粒化技術を扱っている現場では、施工する建設会社が経験的に団粒化に適した含水比を管理している。団粒化させた際の適切な締固め時の含水比を解明することにより、様々な現場や建設会社で扱えるようになり、都市型水害等の災害対策に役立てることが可能になる。本研究では、団粒した土が高い透水係数を得る締固め時の含水比を求めることを目的とする。

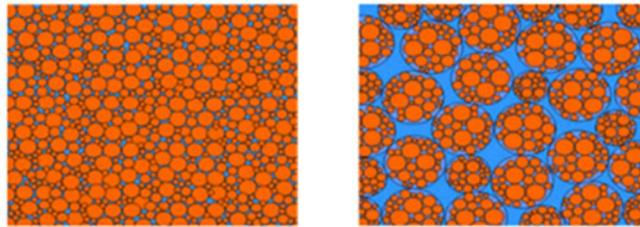


図 1. 単粒構造と団粒構造

2. 締固めによる透水係数

1) 締固め試験

突き固めによる土の締固め試験を行い、締固め曲線の作成を行う。試料の準備にあたり表 1 の試験方法を、土の種類や粒径に応じて採用する。締固めによって土粒子が粉碎され易く、粒度が変わってしまう真砂土の場合、繰り返し法を採用すると同じ土で試験をしていることにはならないため、各含水比で新しい試料を使用する非繰り返し法を採用する。また、砂質土では乾燥法を採用する。よって通常真砂土では b 法が採用される。しかし、本試験では団粒化した真砂土を使用することで、水を加えて含水比を増加させる乾燥法では団粒化剤の濃度が薄まり、含水比が増えるにつれて透水性が団粒化する前と同程度になる結果が得られた。本試験では団粒化剤の濃度を一定にするために、あらかじめ規定の濃度に設定した団粒化剤溶液を試料の含水比が 25%程度になるように加え、そこから自然乾燥させて試料の含水比を減らしていく方法で試料の準備をする。

表 1. 試料の準備方法と使用方法

組み合わせの呼び名	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

また締固め試験では式(1)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。今回の実験では表2のような条件で各層の突き固めを行った。目標とする締固めエネルギー値は約 197kJ/m<sup>3</sup> であり、これは現場で使用されるタイヤローラーから算出した値である<sup>1)</sup>。今回の試験の条件では一層あたり 8 回突き固めを 2 層行うことで締固めエネルギーは約 187kJ/m<sup>3</sup> となり、現場と近い締固めエネルギーに設定した。

$$E_c = \frac{W_R \cdot H \cdot N_L \cdot N_B}{V} \quad (1)$$

表 2. 試験条件

呼び名	A法	今回の試験
ランマー質量(kg)	2.5	1.5
ランマー落下高さ(cm)	30	20
モールド内径(cm)	10	8
モールド容積(cm <sup>3</sup> )	1000	250
突き固め層数	3	2
各層の突き固め回数	25	8
許容最大粒径(mm)	19	4.75

ここに、E<sub>c</sub>:締固め仕事量(kJ/m<sup>3</sup>)、W<sub>R</sub>:ランマーの重量(kN)、H:ランマーの落下高さ(m)、N<sub>L</sub>:層数、N<sub>B</sub>:一層当たりの突き固め回数、V:モールドの容積(m<sup>3</sup>)である。

2) 透水試験

締固めた供試体の透水係数を測定するために、飽和透水係数測定装置 KSAT を用いる。図 2 のように締固めた試料を KSAT に取り付け、変水位透水試験を行い、透水係数を測定した。

3) 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生じていることがわかる。含水比が 12%程度以下の透水係数があまり変化しておらず頭打ちしている状態であり、ある含水比以下で透水係数はほぼ一定になる結果が得られた。

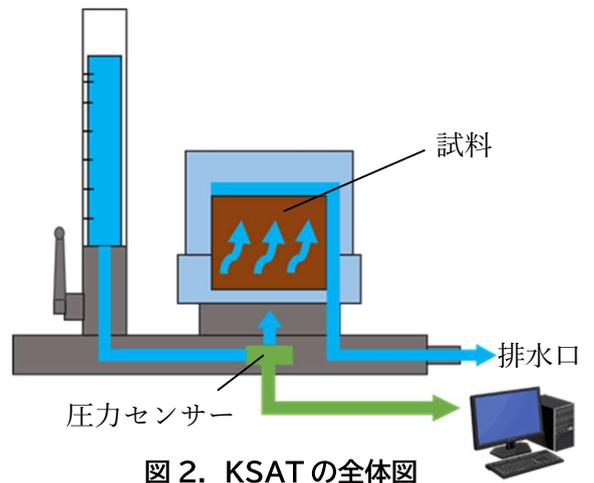


図 2. KSATの全体図

表 3. 透水試験結果

サンプル No.	含水比(%) w	15°C換算透水係数(m/s) Ks	乾燥密度 (Mg/cm <sup>3</sup> ) ρ <sub>d</sub>
21877	27.6	2.08E-07	1.516
10991	22.7	7.29E-08	1.615
15281	19.9	4.50E-07	1.636
15282	16.3	4.18E-06	1.553
21876	11.8	8.38E-06	1.491
21886	7.9	5.61E-06	1.456
21896	5.0	8.04E-06	1.432
21898	3.1	1.52E-05	1.369

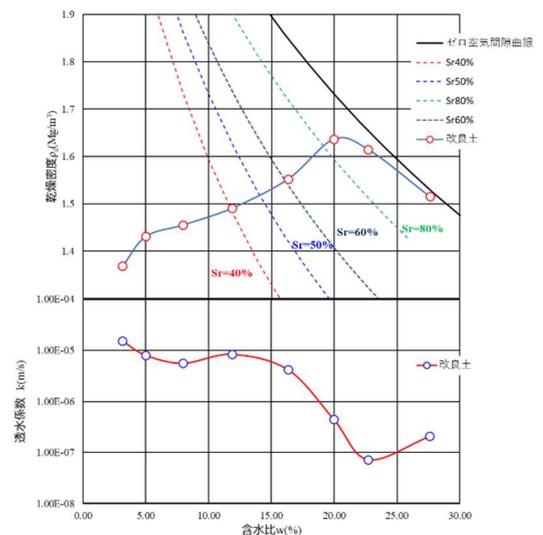


図 3. 締固め曲線及び透水係数と含水比の関係

4)水分特性曲線

土の間隙には負圧が発生しており、土粒子同士を吸引している。飽和度により間隙の負圧が変化することを示す水分特性曲線が保水性試験より算出できる<sup>2)</sup>。図4には団粒化した土の水分特性曲線と、締固めエネルギーを水頭に変換したものを示す。締固めた際に飽和度40%以上で間隙は正圧にあるとすると、細粒分の流動化によって団粒構造が崩壊していることが考えられる。団粒構造を維持して高い透水係数を得るには、間隙に負圧が残る飽和度40%以下が適していると判断できる。

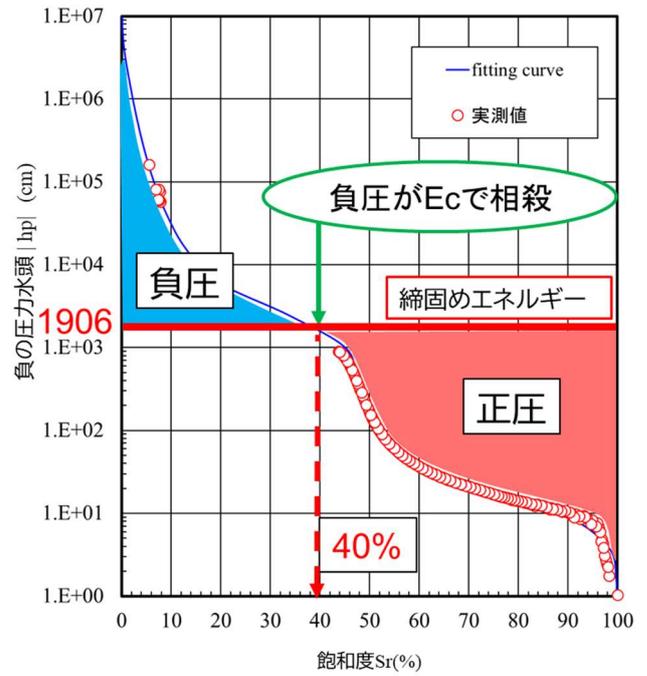


図4. 水分特性曲線

5) 締固め度

最大乾燥密度に対する乾燥密度の割合を表す締固め度は、土構造物における締固め時の強度の指標として用いられる。締固め度は次の式(2)で表される。

$$Dc = \frac{\rho d}{\rho d_{max}} \times 100 \quad (2)$$

ここに Dc:締固め度、 $\rho d$ :現場で締め固めた乾燥密度、 $\rho d_{max}$ :ある含水比での最大乾燥密度である。

表4に各含水比での締固め度、図5に締固め度と透水係数の関係を示す。4)より飽和度40%以下で高い透水係数を得られると考えられるが、図3より飽和度40%のときの含水比は12%程度である。図6より含水比が12%のときの締固め度は75%程度であることがわかる。図5では締固め度が75%前後で透水係数が大きく変化しており、高い透水係数を得るには締固め度75%以下で締め固めることが適している。

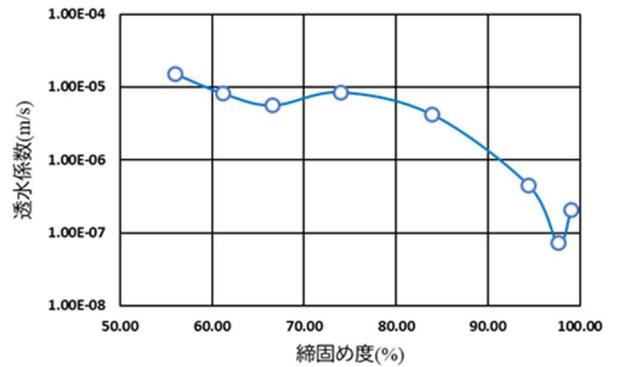


図5.締固め度と透水係数の関係

表4. 各含水比における締固め度

サンプル No.	含水比(%) w	15°C換算透水係数(m/s) Ks	締固め度(%) Dc
21877	27.60	2.08E-07	99.06
10991	22.69	7.29E-08	97.64
15281	19.94	4.50E-07	94.43
15282	16.32	4.18E-06	83.97
21876	11.84	8.38E-06	73.97
21886	7.95	5.61E-06	66.55
21896	4.97	8.04E-06	61.18
21898	3.13	1.52E-05	55.97

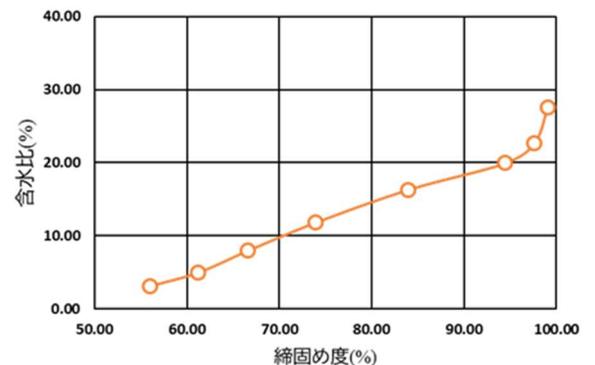


図6.締固め度と透水係数の関係

3. 団粒化前後における比較

1) 団粒化前の透水係数

団粒化することで土の透水特性が向上するが、実際に団粒化していない試料と団粒化させた試料で、どの程度透水性に差が生じるか試験を行い、結果を比較する。表5に団粒化していない試料での透水試験の結果、図7に透水係数と含水比の関係を示す。これらの結果から、団粒化させた試料は透水係数が1オーダー高くなり、透水性が良くなったということがいえる。

表 5.未改良土の透水試験結果

サンプル No.	含水比(%) w	透水係数(m/s) Ks	乾燥密度 (Mg/m <sup>3</sup> )
2	9.5	5.84E-07	1.674
3	12	5.45E-07	1.705
4	13.8	2.89E-07	1.738
5	15	8.59E-08	1.758
6	17	3.00E-08	1.78
7	20.6	6.83E-08	1.723
8	23.8	4.56E-08	1.658

2) 粒度分布

ふるいわけによる粒度試験を行い、団粒化していない試料と団粒化させた試料の粒度分布を比較することで、正常に改良土が団粒化しているかを判断する。図8に団粒化試料と未団粒化試料のふるいわけ試験結果を示す。団粒化試料は2mmふるい以下の通過質量百分率が低く、細粒分をグルーピングして団粒構造を形成しているということがわかる。

4.まとめ

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 団粒化することで団粒化する前と比較して透水性の向上が見られ、団粒化技術が都市型氾濫などの水害に有用であり、災害対策として社会に役立つと考えられる。
- 2) 水分特性曲線より締固めエネルギーを圧力と考えた時、飽和度40%以下で間隙の負圧が残ることで、団粒構造が維持され高い透水性を得ることができる。
- 3) 飽和度・締固め度からみると、団粒化させた試料の適切な締固め時の含水比は12%程度である。

【参考文献】

- 1) 全国トース技術研究組合：N23-ATTAC-製造・施工マニュアル-No.00053,p3
- 2) 杉井俊夫・半谷暢晟：団粒化した土の間隙構造の違い,第56回地盤工学研究発表会[12-3-2-06],2021

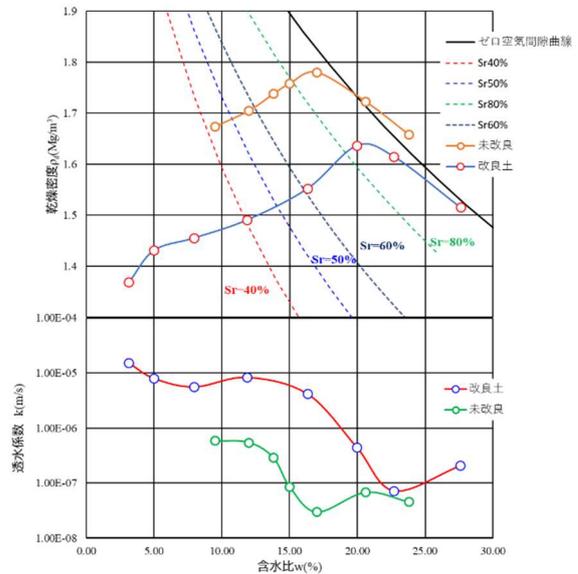


図 7.改良土と未改良土の比較

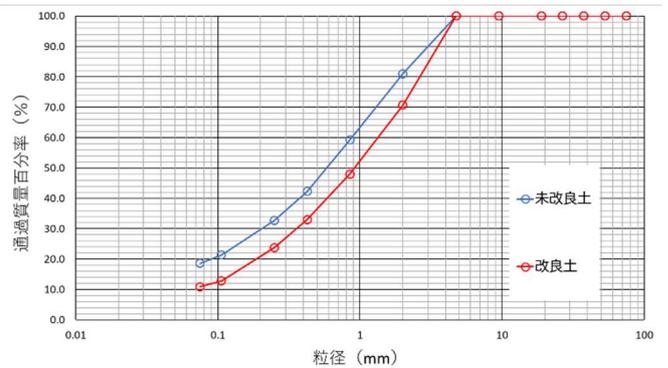


図 8.未改良土と改良土の粒度試験結果

沈降分析における Stokes の法則の適用に関する一考察

EC20026 神田啓登

1. はじめに

土の粒度試験(JIS A 1204)の沈降分析では、浮標による比重法が使用されている。その中で、Stokes の単粒子の沈降速度（終端速度）を仮定した粒径算出法となっている。しかし単粒子で沈降する場合に比べて、懸濁液のような多粒子で沈降する場合には、沈降速度は周りの多粒子の干渉により遅くなることが Richardson ら<sup>1)</sup>によって明らかにされている。また、沈降分析の結果とレーザー回折法による粒度分布の結果も異なる場合も報告されている<sup>2)</sup>。本研究では、現在市販されている自動土壤粒度分布計と Richardson の多粒子干渉速度<sup>1)</sup>を用いて Stokes 式との比較について検証することを試みたのでここに報告する。

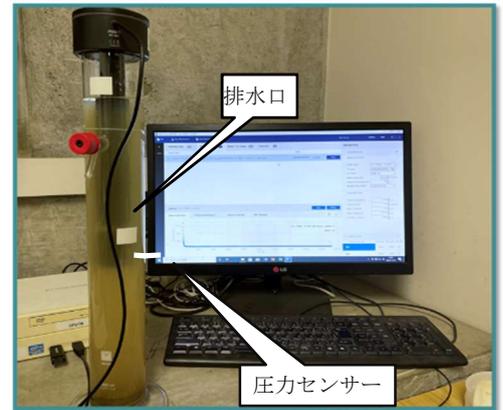


写真1 PARIO Plus 土壤粒度分布計測装置

2. 自動土壤粒度分布計（PARIO Plus : Meter 社製）の検証

土の物理試験の自動化は遅れており、土の粒度試験(JIS A 1204)の沈降分析も例外ではない。今回、圧力の時間変化を自動計測し粒度分布を測る装置であるが、国内での結果報告は未だなく、まずは浮標による比重法(以下、比重法という)との比較検証を行った。2mm ふり残留分は共通として、2mm ふり通過分を比重法と、PARIO Plus による自動計測法（以下、圧力法という）に分けて実験を行った。圧力法では、沈降分析用の回線シリンダー上部に写真1のようにバルブのついた排水口が設けられており、沈

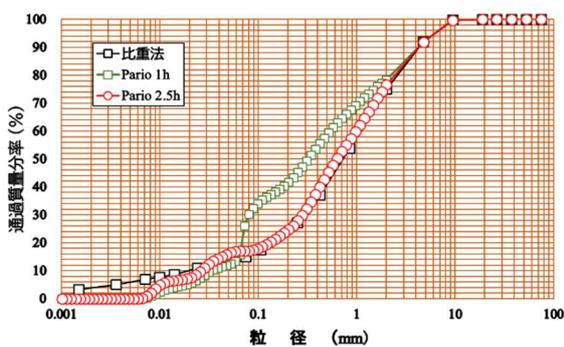


図1 真砂土の測定時間別比較 (1h, 2.5h)

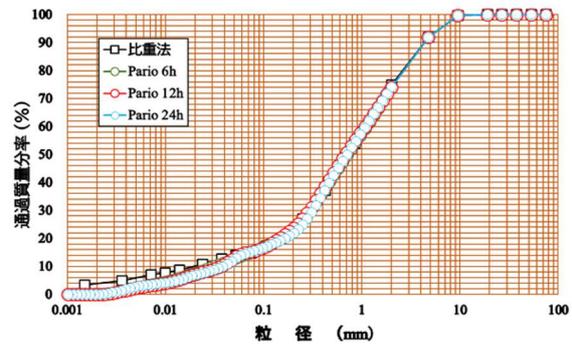


図2 真砂土の測定時間別比較 (6h, 12h, 24h)

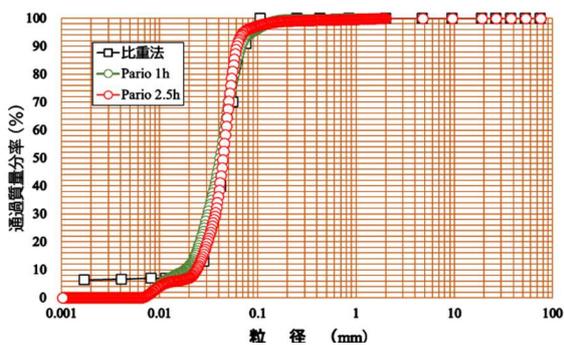


図3 mk クレー測定時間別比較 (1h, 2.5h)

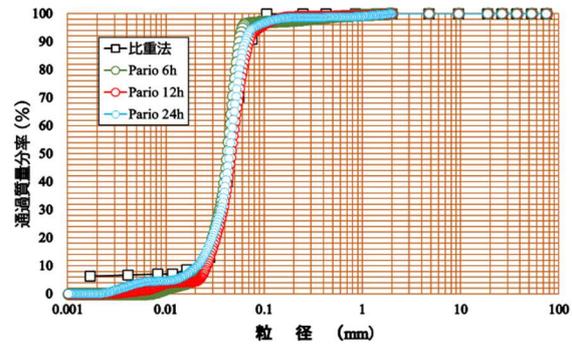


図4 mk クレーの測定時間別比較 (6h, 12h, 24h)

降時間が遅い細かい粒子を含む懸濁液を流出させて乾燥質量を測ることで、最短 2.5 時間で計測できる仕組みになっている。なお、本方法ではデータを取り込み統計的処理によって求められている。

今回、土試料には園芸用に販売されている「真砂土」と粘土質の「mk クレー」を使用した。まず、真砂土では図 1 に比重法と圧力法（1、2.5 時間）の結果、図 2 に同じく比重法と圧力法（6、12、24 時間）の結果を示す。比重法と圧力法のいずれの結果からも約 0.05mm 以下で若干の乖離が見られるものの、概ね 2.5 時間でも計測可能で、6 時間以上が適正で比重法の 4 分の 1 の時間で計測可能である。mk クレーも同様に、図 3 に比重法と圧力法（1、2.5 時間）の結果、図 4 に比重法と圧力法（6、12、24 時間）の結果を示す。比重法と圧力法のいずれの結果も 0.01mm 以下で乖離がみられるものの、測定時間 1 時間の場合でも真砂土のような動きは見られない。しかし、24 時間では 1 時間に比べ 0.05mm 以下の粒子まで計測されていることから測定時間の増加とともにより細かい粒子まで測定される結果となり 24 時間が適正時間と判断できる。これは PARIO Plus の測定限界時間であるが、さらに時間をかけることで精密な結果を得ることが可能と考える。

### 3. 多粒子干渉沈降速度の導入

#### 3.1 Richardson らの多粒子干渉沈降速度<sup>1)</sup>

Richardson らは流動層において多粒子が沈降する速度が、互いの粒子間の干渉により遅くなることを示している。また、杉井らは固相と液相の相対速度にこの考えを用いて浸透破壊時の多粒子限界流速式を提案している<sup>3)</sup>。今回、式(1)に示す Richardson らの多粒子干渉速度式を用いることとした。

$$\frac{V_c}{V_0} = \varepsilon^n = (1 - C)^n \quad (1)$$

ここに、 $V_c$ ：多粒子干渉沈降速度、 $V_0$ ：単粒子沈降速度、 $\varepsilon$ ：空隙率（間隙率）、 $C$ ：濃度である。補正係数  $n$  は粒子レイノルズ数の関数式(2)で表される。今回は、 $Re' < 0.2$  として  $n=4.65$  とした。

$$\begin{aligned} Re' < 0.2 ; n &= 4.65 + 19.5 d/D \\ 0.2 < Re' < 1 ; n &= (4.36 + 17.6 d/D) Re'^{-0.03} \\ 1 < Re' < 500 ; n &= 4.45 Re'^{-0.1} \\ 500 < Re' < 7000 ; n &= 2.39 \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、 $Re'$ ：粒子レイノルズ数 ( $Re' = V_0 d \rho / \mu$ )、 $\rho$ ：液体の密度、 $\mu$ ：粘性係数、 $d$ ：粒子径、 $D$ ：管径である。

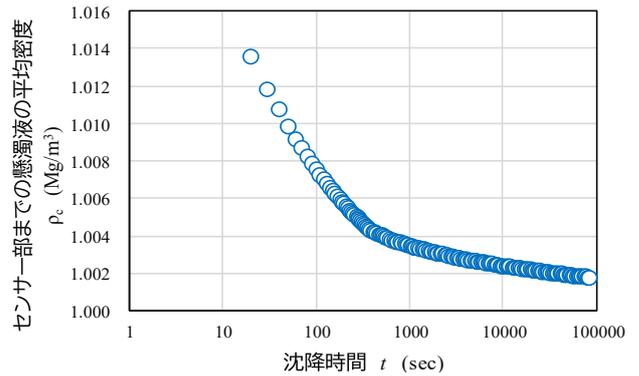


図 5 真砂土の懸濁液の平均密度

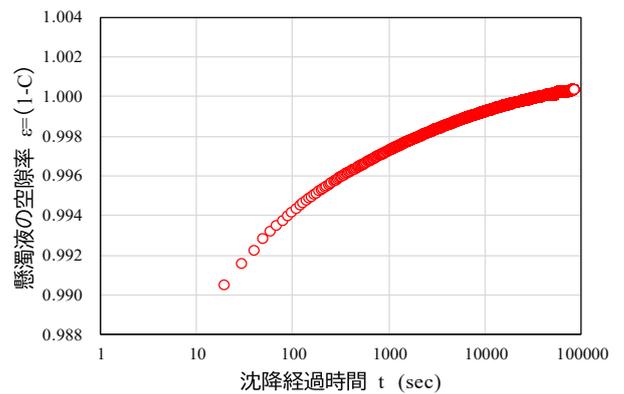


図 6 真砂土の懸濁液の空隙率（間隙率）

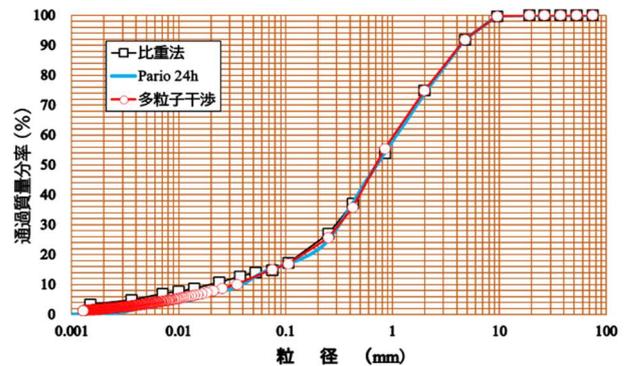


図 7 真砂土の多粒子干渉沈降速度による結果の比較

### 3.2 粒径計算と通過質量分率の求め方

水温  $T^{\circ}\text{C}$  に統一、センサー深さでの圧力 ( $P_c(T)$ ) を計測していることから、その深さまでの懸濁液の平均密度  $\rho_c$  を同じ水温に換算した蒸留水のみの圧力 ( $P_w(T)$ ) で除し、蒸留水の密度 ( $\rho_w(T)$ ) を乗じて算出する。

また、 $\rho_c = \rho_s(1 - \varepsilon) + \rho_w \cdot \varepsilon$  より、空隙率 (間隙率) を次式のように求めることができる。

$$\varepsilon = \frac{\rho_s - \rho_c}{\rho_s - \rho_w} = 1 - C \quad (3)$$

ここに、 $\rho_s$  : 土粒子の密度、 $\rho_w$  : 水の密度  
 $\varepsilon$  : 空隙率 (間隙率) である。

有効深さ  $L(\text{mm})$  の懸濁液中の土粒子径  $d(\text{mm})$  は一般に式(4)を用いて計算されるが、このときの有効深さ  $L$  をセンサーまでの深さ、 $L/t$  を沈降速度とみなして多粒子干渉沈降速度に置き換えると式(5)となる。

また、土粒子径  $d$  に対する通過質量分率  $P(d)$  は式(6)を用いて算出される。

$$d = \sqrt{\frac{30}{g_n(\rho_s - \rho_w)} \cdot \frac{L}{t}} \quad (4)$$

$$d = \sqrt{\frac{30\eta}{g_n(\rho_s - \rho_w)} \cdot \frac{L}{t} \cdot \varepsilon^n} \quad (5)$$

$$P(d) = \frac{m_s - m_{s0}}{m_s} \cdot \frac{V}{m_{s1}} \cdot \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_w} \cdot (\rho_c - 1) \cdot \rho_w \times 100 \quad (6)$$

ここに、 $\eta$  :  $T^{\circ}\text{C}$  の水の粘性係数、 $g_n$  : 重力加速度、  
 $t$  : 経過時間、 $V$  : 懸濁液の体積、  
 $m_s$  : 全炉乾燥試料、 $m_{s0}$  : 2mm ふり通過炉乾燥質量、 $m_{s1}$  : 沈降用炉乾燥質量 である。

図 5 にはセンサー部における懸濁液の平均密度  $\rho_c$ 、

図 6 には空隙率の時間的変化を示した。

### 4. 多粒子干渉沈降速度と単粒子沈降速度の違いによる結果

図 7 に多粒子干渉沈降速度による圧力法と従来の比重法での粒度分布を示す。「真砂土」では単粒子の沈降速度の Stokes 式と多粒子干渉沈降速度を用いた結果はほぼ一致する結果となった。このことは、図 6 に示したように懸濁液の空隙率  $\varepsilon$  が 0.99 以上で大きく多粒子干渉の影響が小さいことが原因と考えられた。「mk クレー」では図 8、図 9 とともに 400 秒以降の変化が少ないことから比較的大きい粒子が沈降した後、より沈降に時間がかかる小さい粒子が懸濁液中に充満していることが分かった。また、比重法、圧力法に比べ 0.02mm 以下がほぼ存在しない結果となった。

### 5. レーザー回折散乱法を用いた比較

#### 5.1 レーザー回折式粒子径分布測定装置(SALD-2300 : 島津製作所社製)の検証

レーザー回折散乱法は粒子群にレーザー光を照射し、そこから発せられる回折散乱光の強度分布パターンから計算によって粒子径分布を求める方法で、土の粒度試験の自動化における成果報告や技術的資

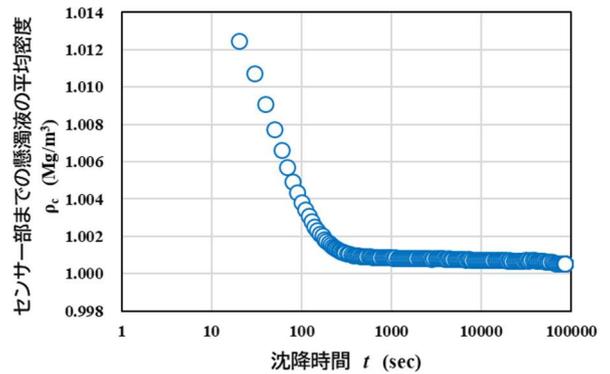


図 8 mk クレーの懸濁液の平均密度変化

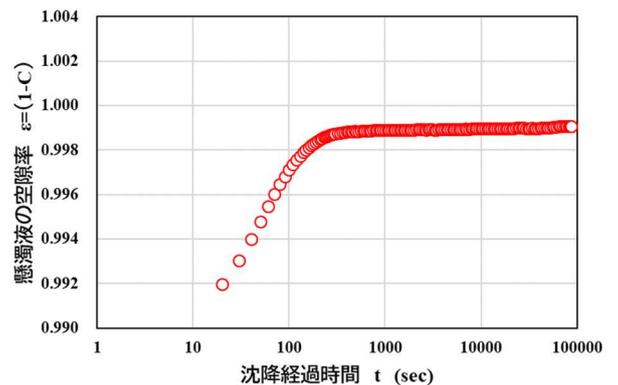


図 9 mk クレーの懸濁液の空隙率 (間隙率)

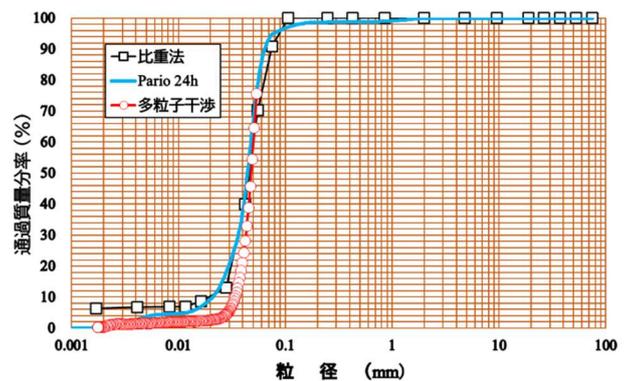


図 10 mk クレーの多粒子干渉沈降速度による結果の比

料の少ない試験方法のうちの 1 つである。測定範囲が広い、測定時間が短い、湿式測定も乾式測定も可能などの優れた特長を持っており、現在では粒子径分布測定装置の主流となっている。

### 5.2 真砂土の場合

図 11 より真砂土ではレーザー回折散乱法による粒度分布が 0.1mm 以上でほかの測定法に比べて大きく乖離する結果となった。レーザー回折では測定に使う試料が少量なため 0.1mm 以上の土を含む割合が偏ることが考えられた。

### 5.3 mk クレーの場合

図 12 より mk クレーでは多粒子干渉速度の結果とほぼ変わらない結果となり比重法、圧力法とは 0.04mm 以下に乖離がみられる。毛利らによれば比重法では 10 $\mu$ m 以下の細粒分の割合を大きく測定していることが分かっており、ストークスの法則を適用している圧力法でも同様にその傾向がみられた。ほとんどが細かい砂と粗いシルトで構成されている mk クレーでは 0.1mm 以下の土が多く正確な測定結果が得られたと考えられる。

## 6. おわりに

本研究の結果、以下の知見を得た。「真砂土」においては、細粒土が少なく懸濁液濃度が薄いため圧力法では比重法の 4 分の 1 である 2.5 時間で測定が可能であった。また、空隙率  $\varepsilon$  が 0.99 以上と大きく単一粒子の沈降速度で考えられ、ストークスの法則が適用できるため多粒子干渉の影響が少ないことが分かった。レーザー回折では測定用試料が少量になってしまうことから(今回は 0.039g)、0.1mm 以上の粒子でサンプルごとに偏りが出やすくなり粒度分布に乖離が生じる結果となった。「mk クレー」においては、細粒土を多く含み沈降に時間がかかる

ことから圧力法では 24 時間以上が最適時間であった。測定時間を長くすることでより正確な結果が得られることから、PARIO Plus より安価で長時間の測定が可能なデジタル圧力計を代用品とできる可能性を得られた。今回、圧力計測型の沈降分析手法の有効性が明らかとなり、自動化に向けた沈降分析の試験技術の開発の切っ掛けを得ることができた。

### 【参考文献】

- 1) J. F. Richardson : Sedimentation and Fluidization Part III, The Sedimentation of Uniform Fine Particles and of Two-Component Mixtures of Soils, Trans. Instn Chem. Engrs, Vol.39, pp.348-356, 1961.
- 2)毛利光男:沈降分析法とレーザー回折散乱法による土壌細粒分の粒度分布測定値の比較,土木学会論文集 C, Vo.77, No.1, pp.59-69, 2021.
- 3)杉井俊夫ら:浸透破壊の発生プロセスと土の非均質性,土と基礎, Vo.37, No.6, pp.17-22, 1989.



写真2 レーザー回折式粒子粒径測定装置

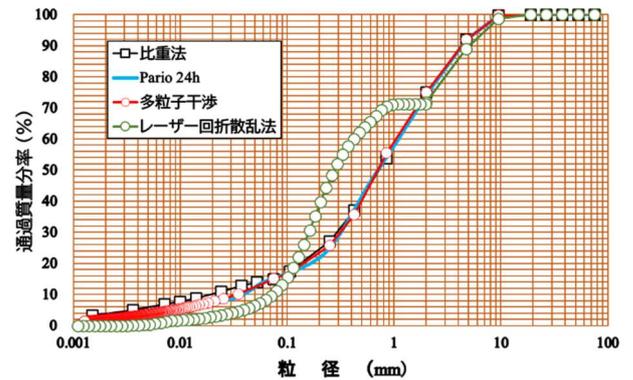


図 11 真砂土のレーザー回折散乱法による比較

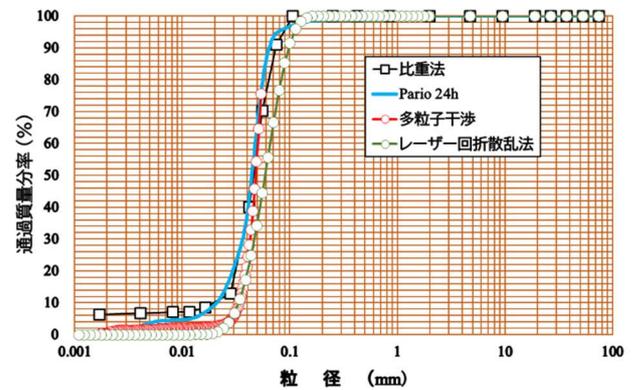


図 12 mk クレーのレーザー回折散乱法による比較

飽和度からみた締固め曲線と透水係数との関係

EC20034 佐々直人

1. 研究の背景と目的

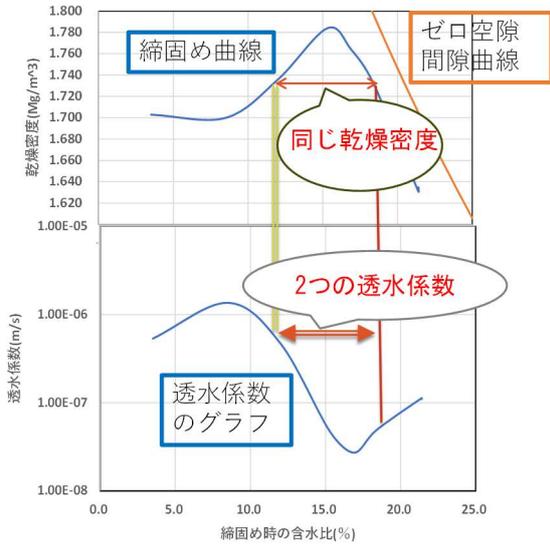


図 1 締固め曲線と(透水曲線)

同一乾燥密度中で締固めと透水係数の関係において、締固め時の含水比の違いにより乾燥密度と透水係数は一対一の関係にはならず透水性の変化がみられる。この変化が起きる理由について、空隙構造の違いが影響していると考えられている。そのため昨年野川らが研究を行うことにより、メカニズムの解明に努めた。だが締固め回数を変え、締固めエネルギーを変化させると締固めと透水係数の関係は保つのかということは推測する状態にある。本研究では締固め回数を変え、締固めエネルギーに変化をもたらすことで、締固め曲線および透水係数のグラフがどう推移し締固めエネルギーと締固め曲線や透水係数はどう関係するのか、飽和度の観点から考察することを目的とする。

2. 締固め曲線の作成

締固め曲線を作成するために昨年と同様 2 つの試験を行った。まず 1 つ目に、土の締固め試験を行った。次に行う変水位透水試験のために土が崩れないように固めるために行った。今回は 1.5kg のランマーを使用し、落下高さ 20cm として試験を行った。ここで締固め回数を 1 層 27 回、8 回、3 回に変化させてエネルギーを変えることで、締固め土の乾燥密度と透水係数の変化について調べる。もう一つ、透水試験を行った。透水試験は第 2 章で行った土の締固め試験で締固めた試料および乱さない試料を対象に、飽和状態における透水係数を求めることを目的とする。今回の試験では、図 3 の KSAT 飽和透水係数測定装置を使って試験を行う。この装置の特徴は飽和透水係数を完全自動で測定するので時間の節約を行うことができ、リアルタイムでデータの可視化を行うことができ、評価して保存することができる。また試験器具が少ないため大きな実験室で行う必要が無いことも利点である。

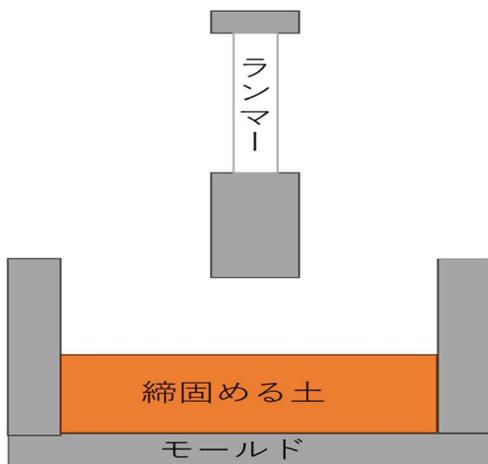


図 2 ランマーによる土の締固め

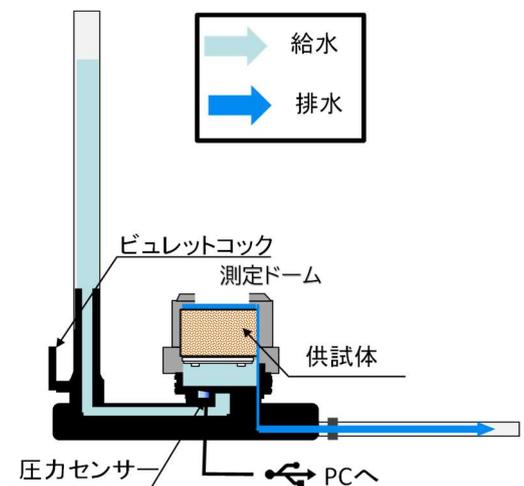


図 3 KSAT 試験装置の全体図

締固めエネルギー  $E_c$

$$E_c = \frac{W_R \cdot H \cdot N_L \cdot N_B}{V} \quad (2.1)$$

$W_R$ : ランマーの重量 (KN) (1.5kg)    $H$ : 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 ( $m^3$ )

図 4 締固めエネルギーの公式

土を締固めることによって締固め曲線は、土固有の特性ではなく、締固めエネルギーの影響を大きく受ける。締固めエネルギーは振動や転圧、衝撃によって与えられる。具体的な定義については式 2.1 で表すことができる。一般には、締固めエネルギーが大きいほど締固め曲線は左上方に移動し、最適含水比は低く、最大乾燥密度は高くなり、土の強度は強くなる。今年度は各層突き固め回数を 23 回、8 回、3 回に変化させて、締固めエネルギーをそれぞれ  $542.8(kJ/m^3)$ 、 $187.2(kJ/m^3)$ 、 $70.2(kJ/m^3)$  に変えて試験を行った。

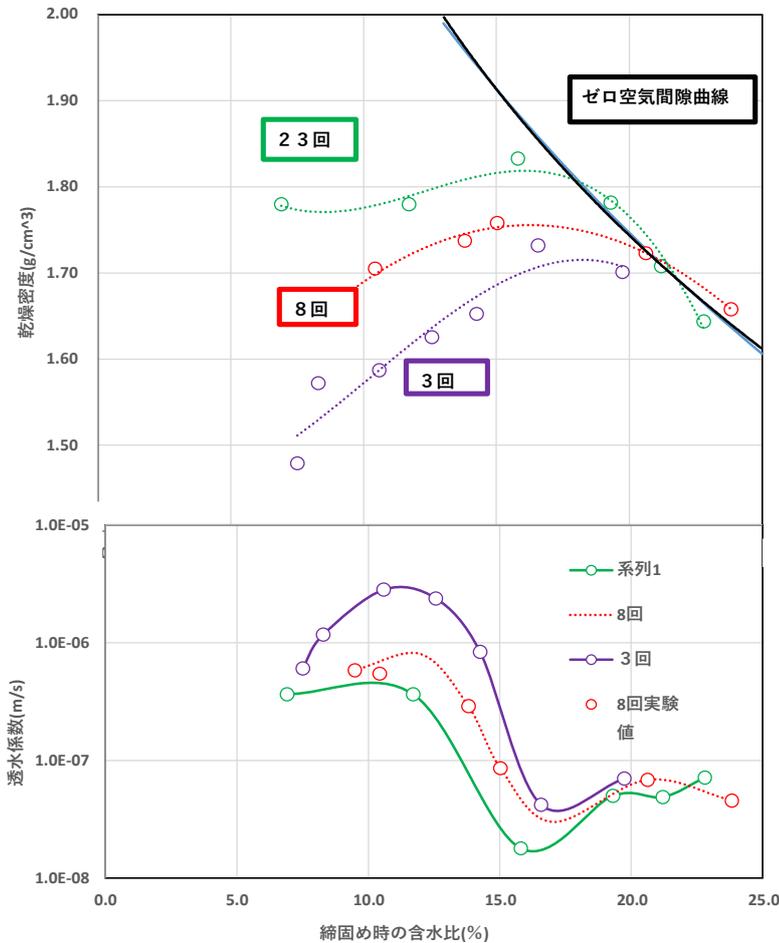


図 5 は土の締固め試験と透水試験の二つの試験を行った結果、得られたデータより作成した締固めエネルギーを考慮した締固め曲線と(透水曲線)である。今回は透水係数のグラフのことを(透水曲線)とする。図 5 の締固め曲線より、締固め回数が増加すると乾燥密度の最大値を最大乾燥密度とすると、最大乾燥密度は左上に移動するので、締固めエネルギーが大きいほど、土の乾燥密度が強くなることが確認できた。

図 5 締固めエネルギーを考慮した締固め曲線と(透水曲線)

4. 飽和度

飽和度  $S_r$  (%)

$eS_r = wG_s$  より、

$$S_r = \frac{wG_s}{e} \left( G_s = \frac{\rho_s}{\rho_w} = \rho_s, e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 \text{ より} \right)$$

$$= \frac{w \rho_s}{\frac{\rho_s}{\rho_d} - 1} \quad (5.3)$$

$w$ : 含水比 (%)    $G_s$ : 土粒子の比重    $e$ : 間隙比  
 $\rho_s$ : 土粒子の密度 ( $g/cm^3$ )    $\rho_d$ : 乾燥密度 ( $g/cm^3$ )  
 $\rho_w$ : 水の密度 ( $=1.0(g/cm^3)$ )

図 6 飽和度を求める式

今までは含水比の観点から締固めエネルギーを見てきたが、5 の飽和度では飽和度の観点から締固めエネルギーを考える。今回は左図に示した、式 5.3 の飽和度を求める式を使って飽和度を計算し、飽和度からみた締固めエネルギーを変化させたときの締固めと透水係数の関係について考えた。

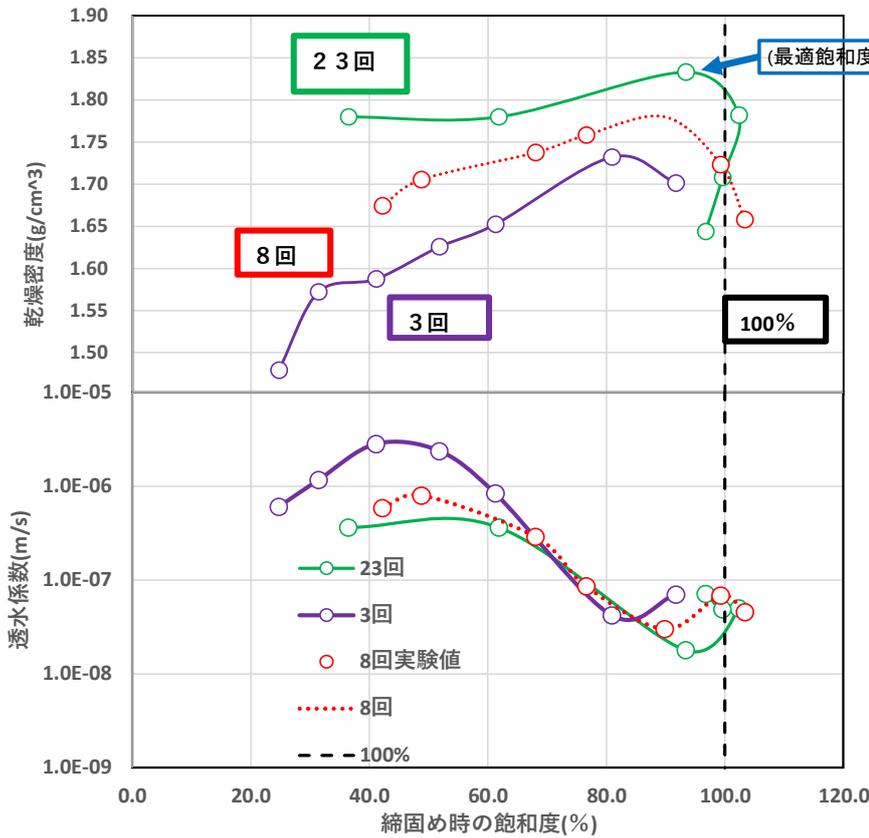


図 7 飽和度からみた締固め曲線と(透水曲線)

式 5.3 の飽和度を求める式を使って求めた飽和度を使用し、締固め時の飽和度からみた締固めエネルギーを考慮した締固め曲線と(透水曲線)を右図の図 7 に示す。グラフより、締固め曲線に関しては、乾燥密度が最大の時の飽和度を最適飽和度とすると、締固め回数が増えると最適飽和度は右上に移動することから、締固めエネルギーが大きくなると、土の乾燥密度が大きくなることが飽和度の観点からでも確認できる。しかし、(透水曲線)は含水比の時のグラフと違って飽和度が高い(飽和度が 60%以上)ときは締固め回数が変わっても透水係数は一致しており、乾燥密度で透水係数が決まっており、乾燥密度が大きいほど透水係数が小さくなることがわかった。しかし、不飽和(飽和度が 60%

以下)のときは締固めエネルギーによって差異が生じていることが確認できる。この現象が起きる理由は水の吸引圧、間隙の構造が影響しているのではないかと考えた。また飽和度が 65%~75%の締固めエネルギーによらず飽和度が一致しているところから締固め曲線をみると、締固めエネルギーによって乾燥密度が異なることがわかる。よって、同じ透水係数でも締固めエネルギーが異なれば、乾燥密度が異なる事がわかった。

5. 水分特性曲線

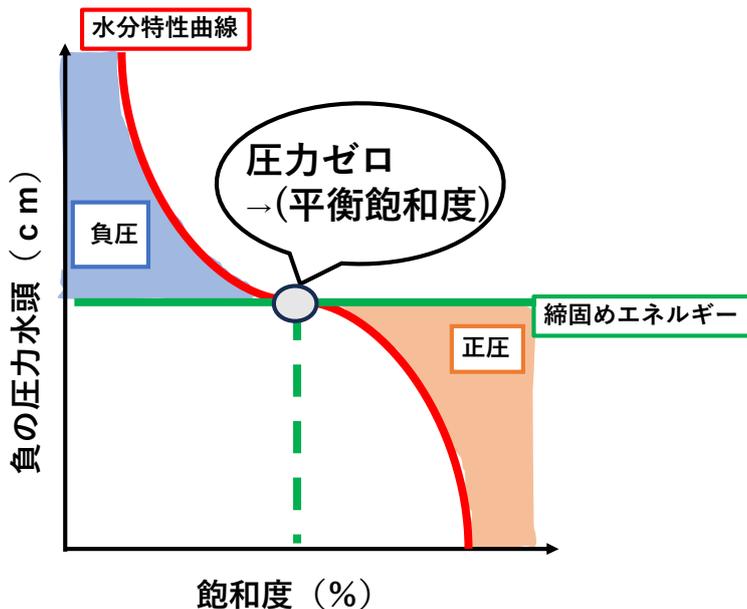


図 8 水分特性曲線 (イメージ図)

透水係数の差異のメカニズムについて水分特性曲線から見ていきたいと思う。土の粒子間には負の圧力が存在している。水分特性曲線は飽和度を大きくすると、負の圧力水頭が小さくなると考えられることを示している。水分特性曲線は横軸に飽和度、縦軸に負の間隙水圧を軸としてグラフに示したグラフである。図 8 のグラフは仮説であるが、水分特性曲線と締固めエネルギーを正の圧力として、水頭に直してグラフに示したものをイメージした図である。仮説として締固めエネルギーを正の圧力として加えたとき、飽和度が低いときは正の圧力を加えても元々持っていた負の圧力を相殺することができず、負

の圧力が残った状態になると考える。逆に飽和度が高いときは、正の圧力が負の圧力を相殺し、正の圧力の負荷がかかると考える。水分特性曲線と締固めエネルギーの線の交点は負の圧力と正の圧力が互いに打ち消し合い、圧力がゼロになると考えられる点を示している。この点を平衡飽和度とする。負の圧力状態の時は、水の吸引圧が強く粒子間をくっつける力が働き、団粒化現象が起きる。そのため間隙が大きくなり、透水係数が高くなると推論できる。正の圧力状態の時は、水を排水する力が強く粒子間に働く力を引き離す力が強く、団粒化を壊していく。さらに正の圧力が強いと、土の粒子が強い水の力によって小さい粒子から押し流され流動化し間隙を埋めていく。そのため間隙が小さくなり、透水係数が小さくなると推論できる。

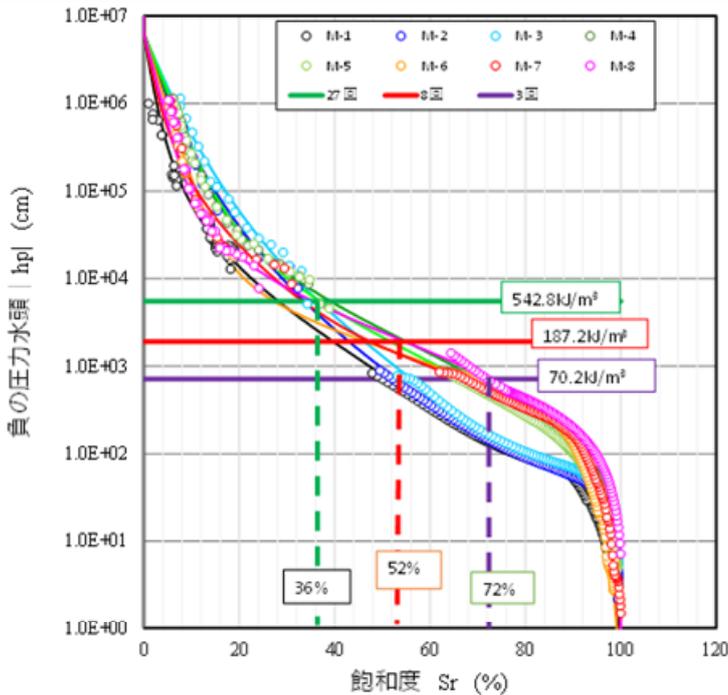


図9 締固めエネルギーを考慮した水分特性曲線

図9は仮説を利用して作成した締固めエネルギーを考慮した水分特性曲線である。締固めエネルギーを大きくすると、締固めエネルギーの線が上に移動していくことから、締固めエネルギーを大きくすると平衡飽和度が左に移動します。よって、締固めエネルギーを大きくすると、平衡飽和度が小さくなり、より少ない水分量で団粒化が壊れることが読み取れる。また、図7のグラフと図9のグラフより、例えば紫色の3回のグラフでいうと、図9のグラフでは、平衡飽和度が72%のときである。図5の72%の時を見ると、飽和度が72%以下の時に透水係数が大きくなっている。これは団粒構造が維持され、間隙が大きくなっていることからである。逆に飽和度が大きいときは団粒かが壊れ、細かい土が流動化することによって間隙が埋まっていく

ことから、間隙が小さくなり、透水係数が小さくなっていく。その時は土が密になるので、締固めエネルギーが大きい順に透水係数は小さくなる。

## 6. 結論

本研究では、締固め時の飽和度からみた締固めエネルギーを考慮した締固め曲線と透水係数の変化についてみてきた。ここに、今回の研究でわかったことをまとめる。

1. 飽和度で表した締固め曲線は締固めエネルギーを大きくすると、乾燥密度が最大値の時の飽和度(最適飽和度)が右上に移動する。
2. 負圧と正圧が相殺する飽和度(平衡飽和度)より小さい時は、締固めエネルギーを正の圧力として加えると、団粒化構造が維持されて間隙が大きくなり、透水係数が大きくなる。
3. (平衡飽和度)より大きい時は、締固めエネルギーを正の圧力として加えると、団粒化が壊れ、強い水の力によって細かい粒子が流動化し、間隙が埋まっていくため、透水係数が小さくなる。

## 7. 参考文献

1. 杉井俊夫、野川敦史、古川泰之：地盤粒状材料の間隙径分布は新たな土質力学の扉を開けることができるのか ～間隙径分布から見た締固め時の含水比が及ぼす間隙構造の違い～報告書 2022年
2. 地盤工学会「土質試験—基本と手引き」第二回改訂版 2010年

## 深層学習による庄内川堤防の予測危険箇所の可視化

EC20037 荘加 港

### 1. 研究背景と目的

2011年の東日本大震災では堤防の災害が多く、堤体内部の液状化も多く確認された。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と考えられている<sup>1)</sup>。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ため閉封飽和域の発生箇所の特定化を考えてきたが、厚い粘性土層が含まれても縦断亀裂が見られない場合があった。そこで、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<sup>2)</sup><sup>3)</sup>。そこで、危険な箇所を明らかにすることで前もって補修をし、被害を最小限に抑えることが必要であると考えられる。そのため本研究では、粘性土を対象とした非対称性を二次元断面情報である画像分析により行い、土質構成と天端亀裂の判別モデルを構築することで、共通で考えられる判別要因を明らかにする。そして、天端に発生している亀裂の状態から内部液状化の危険性について正確な判断を行い、危険箇所を地図上に可視化させることを目的とする。

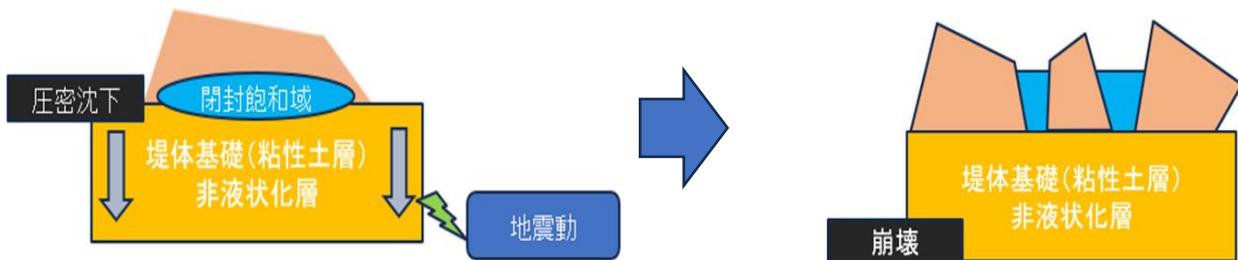


図1. 液状化のメカニズム

### 2. 研究方法

#### 2.1 CNNによる画像の深層学習

粘性土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2のように国土総研の堤防断面図を、ボーリング柱状図等解析に不要なデータを外すためトレースし直し、土質の種類ごとに色分けし、AIに学習させることで判定を行う。また、ここで扱う河川堤防についてはGoogleストリートビューで亀裂の有無を確認するため一級河川を中心とする。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る。

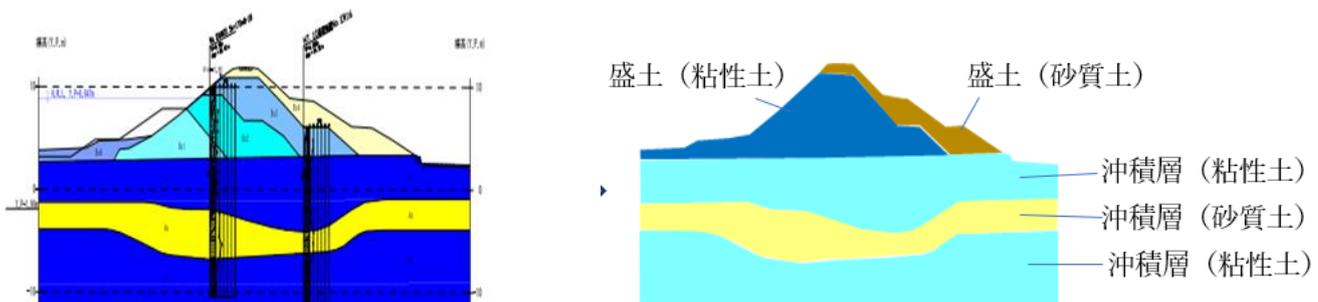


図2. 断面データ作成の例（江戸川右岸22.6km地点）



図3. 図2の地点における縦断亀裂



図4. これまでにデータを集めた河川

## 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。この亀裂の有無は Google ストリートビューで判断をするものとする。

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。まず、教師データを用いて画像の特徴を学ぶ。次に AI に学習をさせすぎると、過学習という急激に精度が低くなる現象を引き起こすことがあるため、テストデータに対して学んだことを当てはめることでの的中率が高くなる学習回数を求める。そして、その中で再現率（的中率）が1番高い学習回数を得た上で、その学習回数を用いて適用データに適用をする。

## 2.3 解析で使用するデータ

表1 解析で使したデータ

	亀裂あり	亀裂なし	合計
教師データ	106断面	106断面	212断面
検証データ	14断面	14断面	28断面



図5 テストデータで使した河川（西日本）

教師データで用いた画像データは、表1のとおり「亀裂あり」と「亀裂なし」とともに106枚の画像データを使用した。ここで、教師データとして使用した画像データは図4で示した河川のデータを使用している。テストデータで用いた画像データは、表1のとおり「亀裂あり」と「亀裂なし」とともに14枚の画像データを使用した。ここで、テストデータとして使用した画像データは図5で示した河川のデータであり、同研究を西日本について行っている中村が収集したものである。東日本と西日本で地理的に大きく異なり地層の形状も異なると考えられるが、異なる地域のデータでも高い正解率を得ることができれば日本各地の河川堤防について、高い精度でAIが縦断亀裂の有無を予測することができると考えた。そのため、教師データで使用した画像データの河川とテストデータで使用した画像データの河川は東日本と西日本で分類した。

## 2.4 解析結果

表2 バッチ数 10 で得られた解析結果

バッチ 10	学習回数	的中率	適合率	再現率	F値	亀裂ありの中	亀裂有ハズレ	亀裂なしの中	亀裂なしハズレ
	5	0.64286	0.6	0.85714	0.70588	12	2	6	8
	10	0.60714	0.61538	0.57143	0.59259	8	6	9	5
	15	0.82143	0.84615	0.78571	0.81481	11	3	12	2
	20	0.5	0.5	0.35714	0.41667	5	9	9	5
	25	0.75	0.76923	0.71429	0.74074	10	4	11	3
	30	0.64286	0.75	0.42857	0.54545	6	8	12	2
	35	0.89286	0.86667	0.92857	0.89655	13	1	12	2
	40	0.67857	0.77778	0.5	0.6087	7	7	12	2
	45	0.57143	0.57143	0.57143	0.57143	8	6	8	6
	50	0.57576	0.5	0.5	0.5	7	7	12	7

画像分析で学習する画像は無作為に抽出するものであり、バッチ数とは1度に何枚の画像データを学習するかである。学習回数とは、その作業を何度繰り返すかを表している。解析を行った結果バッチ数10で学習回数が35回のときに1番精度が高い結果を得ることができたためバッチ数が10、学習回数が35回で庄内川に適用データを適用する。バッチ数が20回、30回、40回、50回でも同様に解析を行ったが、これ以上に精度が高いといえる結果を得ることはできなかった。

「的中率」とは、全体における正解率を表している。「適合率」とは、亀裂ありと予測した中で実際に亀裂ありの割合を表している。「再現率」とは、亀裂ありの中で実際に亀裂ありと予測できた割合を表している。「F値」とは、適合率と再現率の調和平均を表すものでありF値が高いほど精度が高いといえ、次の式(2.4.1)で表される。

$$F \text{ 値} = 2 \times \text{適合率} \times \text{再現率} / (\text{適合率} + \text{再現率}) \dots\dots\dots (2.4.1)$$

### 3. 庄内川に対する適用とその結果

#### 3.1 使用したデータの内訳と適用結果

表3 庄内川への適用で使用するデータの内訳

	亀裂あり	亀裂なし	合計
教師データ	106断面	106断面	212断面
適用データ	37断面	11断面	48断面

表4 適用データの亀裂有無判定結果

	正	誤	合計
亀裂あり	28断面	9断面	37断面
亀裂なし	4断面	7断面	11断面

表3で示したとおり、教師データについては亀裂有無ともに106枚の画像データを使用し、適用データは亀裂ありで37枚、亀裂なしで11枚の画像データを使用した。表4で示したとおり、亀裂ありで正解した断面数が28で不正解の断面数が9であった。それに対して、亀裂なしで正解した断面数が4で不正解の断面数が7であった。「的中率」が0.667、「適合率」が0.8、「再現率」が0.757、「F値」が0.778であり、精度の高い適用結果を得ることができた。

#### 3.2 GISを用いた危険箇所の可視化

GIS（地理情報システム）を用いて実際に庄内川の右岸について亀裂の有無を地図上に示したものを図6、またAIに庄内川右岸の亀裂有無を予測させた結果を地図上に示したものを図7として以下に示す。図6において赤色で塗りつぶされている部分は実際に亀裂がある箇所を示しており、青色で塗りつぶされている部分は実際に亀裂が無い箇所を示している。図7において赤色で塗りつぶされている部分はAIが50%以上の確率

で亀裂があると判断した箇所を示しており、青色で塗りつぶされている部分は AI が 50%以上の確率で亀裂がないと判断した箇所を示している。

また、Grad\_Cam を用いて判断理由を可視化した画像を図 8 で示す。



図 6 庄内川右岸 実際の亀裂有無



図 7 庄内川右岸 AI による亀裂有無予測

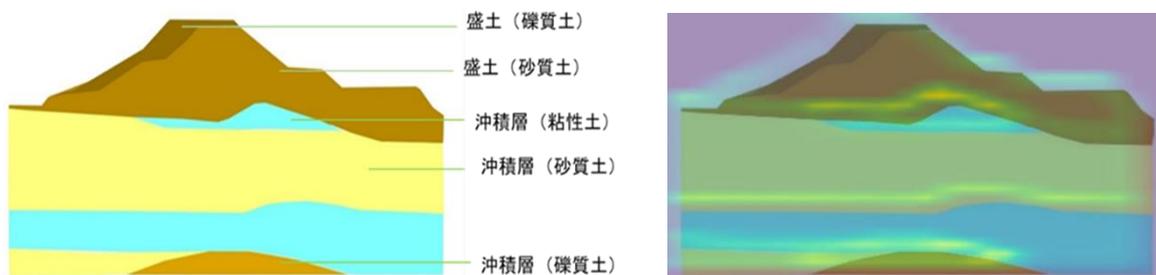


図 8 庄内川右岸 8.5km 亀裂なしを亀裂なしと判断 (正解)

Grad\_Cam の画像より AI は「粘性土の部分」、「粘性土と接している部分」が明るく発光しているため、このような箇所が亀裂有無の判断材料と一番用いられていることがわかる。また、粘性土だけでなく砂質土や礫質土も判断材料であることがわかる。

また、精度を更に高めるために亀裂と閉封飽和域の形成状況の関係を明らかにすること、工事でアスファルト舗装が行われている可能性を考慮し Google ストリートビューで確認できる画像の時期と堤体内の土質構成を捉えた画像の時期が近いデータを用いることなどが挙げられる。

#### 4. 結論

- 1) 多くの学習データを用い、学習を繰り返すことで AI の亀裂有無予測の精度は高くなる。
- 2) 実際に現地を訪れ、何センチ以上のものを縦断亀裂とするか正確な定義を行うことで精度の高い結果を得られるようになるのではないかと考えられる。
- 3) さらに教師データの断面数を増やし、堤体の高さ (規模) も AI に学習をさせることで精度がさらに高くなるのではないかと考えられる。

#### 【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 年中部大学卒業論文

# 団粒化剤の耐用年数の評価に関する研究

EC20040 杉山 慧士

## 1. 研究背景と目的

近年、地球温暖化の影響により地方や都市部では集中豪雨やヒートアイランド現象といった諸問題が発生している。こうした中、降水の地盤への浸透の向上により河川への影響を少なくする事や、保水性を向上させる事で晴天時の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することができるが、従来は農業用として用いられてきた。農業用では耐久性を評価していなかったが、工学用では耐久性を評価する必要がある。本研究では農業用団粒化剤を用いた土壌と工学用団粒化剤を用いた土壌の耐久性を透水性により比較し、透水性の違いを実験により評価することを目的としている。

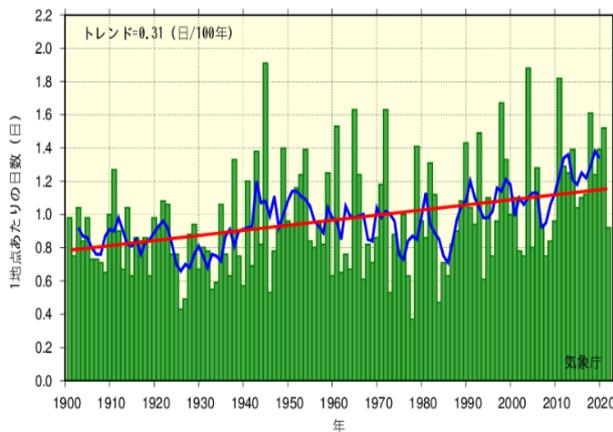


図 1.1 日本の年間集中豪雨発生件数の経年変化

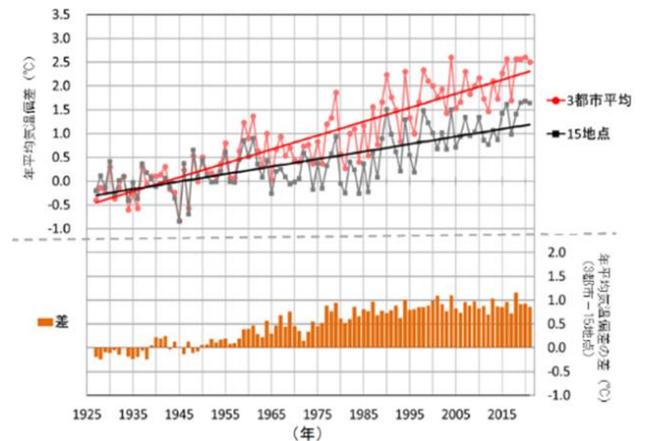
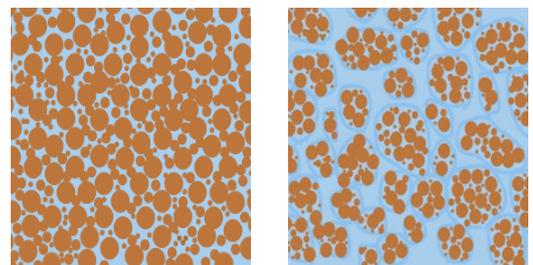


図 1.2 日本の年平均気温偏差の経年変化

図 1.1 の棒グラフは、全国の集中豪雨(日降水量 100mm 以上の大雨)の年間発生回数、太線(青)は 5 年移動平均値、太線(赤)は長期変化傾向を示す。図 1.2 の太線(赤)と太線(黒)は 3 都市平均と 15 地点の年平均気温偏差、棒グラフは 3 都市平均の偏差と 15 地点平均の偏差の差を示す。

## 2. 団粒構造

団粒構造とは、土に団粒化剤などの添加物を配合し、より大きな粒状にすることである。図 2 に表しているように、自然堆積した土は単粒構造を有しているが、添加剤を配合することにより細かい粒子がまとまり団粒構造を形成する。単粒構造と比べ、間隙が大きくなるため高い透水効果を果たすことができる。また、粒子群の形成により各粒径の土粒子が緊密に結合しているため間隙水に吸着力が発生し、湿潤状態を長期間維持することができる。このことから、透水性と保水性を両立させることができる。



単粒構造

団粒構造

図 2 単粒構造と団粒構造

### 3. 研究方法

本研究では団粒化技術の耐久性を透水性により評価する研究である。透水性を長期的に測定する必要があるため定水位透水試験を基にした通水促進試験を採用している。通水促進試験とは長期間の通水が可能であること、動水勾配を調整できることが特徴である。試験方法は、通水前に透水係数を測定し年平均降水量<sup>1)</sup>を1年分、2年分、・・・と通水させ、1年ごとに動水勾配を小さくして透水係数を測定することで50年間の透水係数を測定する。その後、50年分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。土木構造物は50年を設計耐用年数の基準としているため、評価対象を50年とした。

#### 1) 通水量の選定

年平均降水量を1年分の通水量と仮定して通水促進試験をする。図3.1の棒グラフは日本の年平均降水量分布を示している。年平均降水量が1848.23mmであるため、計算上1800mmと考える。

・通水量=透水係数×動水勾配×試験時間  
(ダルシーの法則  $v=ki$  より)

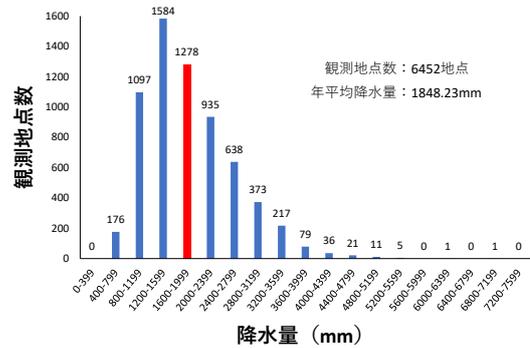


図 3.1 日本の年平均降水量

#### 2) 動水勾配の選定

図3.2は流量が1800mm、透水係数を $1 \times 10^{-5} \text{m/s}$ と固定した場合の動水勾配と試験時間の関係を示している。動水勾配1は長期的な実験となり、動水勾配10は通水促進試験に用いるアクリルチューブの管路損失が懸念される。これらの点に加え、1年ごとの透水係数を測定すること、通水促進試験装置の可動範囲などを考慮し、動水勾配5が最適だと考えた。

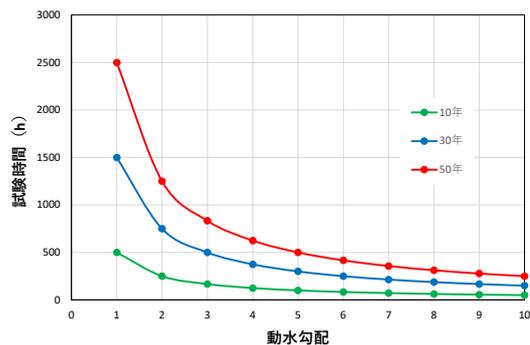


図 3.2 動水勾配と試験時間の関係

#### 3) 通水促進試験装置

本研究では年平均降水量を50年間通水し透水係数の変化を調べるため、長期間の通水を行う必要がある。そのため、通水促進試験時はポンプを用いて貯水槽から水を汲み上げ、給水槽から排水槽へ流すことによる水循環を用いた。給水槽の中に排水槽を設置することにより、越流時に排水を行い、水位を一定に保つことで動水勾配の維持を可能としている。また、通水促進試験装置の水槽はスタンドに取り付けられている。そのため、水槽の上下移動が可能となり、水位を変更することによる動水勾配の変更を可能としている。また、水槽間をアクリルチューブで繋いでいるため、動水勾配を大きくして通水を

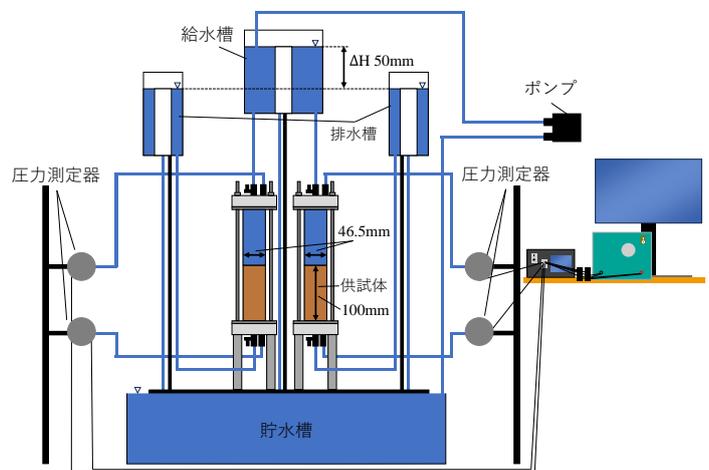


図 3.3 通水促進試験装置

行う際にアクリルチューブの管路損失が懸念される。そのため、通水促進試験装置の両隣に圧力測定器を設置し、実際の供試体にかかる全水頭を測定することによって動水勾配を求める。通水促進試験装置の透水係数測定時を図 3.3 に示す。また、透水係数は式(3.1)を用いて通水量を計測し、算出する。

$$k(m/s) = \frac{q(m)}{i(-)t(s)} \quad (3.1)$$

#### 4) 試験試料

本試験で用いる試料は写真 3.1、写真 3.2 の団粒化した土である。写真 3.1 は工学用団粒化剤と蒸留水を加えた工学用団粒化土、写真 3.2 は農業用団粒化剤と蒸留水を加えた農業用団粒化土である。2 つの試料の団粒化剤の希釈率は 30 倍と統一した。



写真 3.1 工学用団粒化土

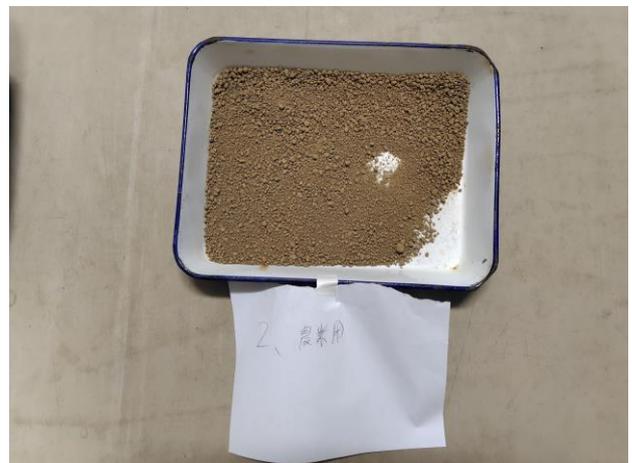


写真 3.2 農業用団粒化土

#### 5) 供試体

本試験の供試体作成にあたって、養生期間の統一を行った。これは団粒化剤の違いによる透水係数の変化の比較が容易になるからである。また、供試体の飽和度を高めるため、供試体作成時に二酸化炭素を注入した。透水係数は土の飽和状態によって変化するため、供試体を飽和させることが重要である。二酸化炭素は空気よりも密度が大きく、水に溶けやすい性質があるため供試体に注入した。試料を入れる工程は 3 回に分け、突砂法による締固めを行った。締固め後、毛細管現象を用いて注水を行い、供試体を飽和させた。毛細管現象を用いて注水を行うことにより、土中の間隙にある空気を水が押し出し、飽和状態を高めることができる。作成した供試体の様子を写真 3.3 に示す。



写真 3.3 供試体

#### 4. 試験結果

通水促進試験によって50年分の年平均降水量を団粒化土に通水した。通水促進試験を行った試験結果を図4.1に示す。図4.1の工学用団粒化土は乾燥密度が $1.44\text{g/cm}^3$ であり、農業用団粒化土は乾燥密度が $1.50\text{g/cm}^3$ である。工学用団粒化土では通水開始時から5年後、農業用団粒化土では1年後に値が上昇し、その後徐々に減少する結果となった。このことから、通水開始時から数年後の上昇では、供試体内に残った空気が通水によって流出したため透水係数が上昇したのではないかと考える。そのため、実務基準である透水係数 $5 \times 10^{-5}\text{m/s}$ 以上の値は工学用団粒化土の供試体内の空気が流出したと考えられる5年後から33年後の28年は維持できると考えられる。しかし、農業用団粒化土では実務基準を満たさない結果となった。

また、通水後の供試体をふるい分け試験を行った。ふるい分け試験結果を図4.2に示す。ふるい分け試験は供試体を3分割し、それぞれの層での粒度分布を測定した。図4.2から、50年通水した団粒化土では通水していない真砂土に比べて粒径が大きい試料が多く、粒径が小さい試料が少ない結果となった。また、通水後の団粒化土では上層に比べて下層の粒径が大きい試料が多い結果となった。

#### 5. 結論

本研究による通水促進試験から、工学用団粒化土と農業用団粒化土の透水性には差があり、工学用団粒化土は実務基準を満たす透水係数の維持は28年、農業用団粒化土は実務基準を満たさない結果となった。また、ふるい分け試験結果から団粒化土を通水することによって上層の細粒分が間隙に流入し下層に堆積するのではないかと考えられる。しかし団粒化土の通水による体積変化や通水前と通水後の供試体の間隙や粒径の違いが未解明である。そのため通水前の団粒化土と通水後の団粒化土を比較する必要がある。また、含水比が異なる団粒化土を用いて通水促進試験を行ったため、含水比の調節による透水係数の変化についても比較する必要があると考えられる。

#### 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> (参照 2023-07-13)
- 2) 杉井俊夫, 山田公夫, 方方, 馬貴臣: 団粒化した土の物性と舗装技術への適用 [https://www3.chubu.ac.jp/documents/faculty/sugii\\_toshio/content/894/894\\_d8db8ac54ce89e3461a2ca4e447430f3.pdf](https://www3.chubu.ac.jp/documents/faculty/sugii_toshio/content/894/894_d8db8ac54ce89e3461a2ca4e447430f3.pdf) (参照 2023-07-28)
- 3) 河口建設株式会社ホームページ <https://www.kawa-ken.co.jp/> (参照 2023-07-28)
- 4) ヘルシー・スポーツ建設株式会社ホームページ <https://www.healthy-clay.com/> (参照 2023-07-28)
- 5) 公益社団法人 地盤工学会 土質実験 基本と手引き 第二回改訂版, 地盤工学会, pp.91-100, 2010年
- 6) 石松直幸: 団粒化技術の透水性に関する耐久性評価, 令和3年度卒業論文, 2021

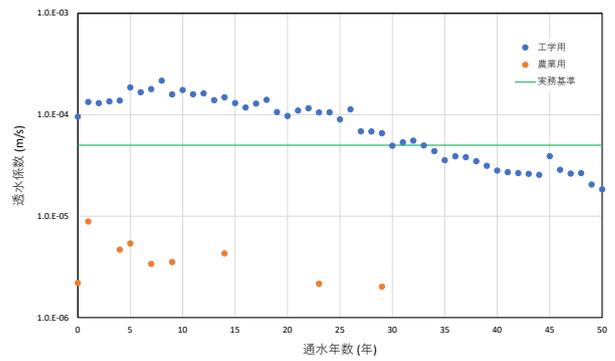


図 4.1 団粒化土通水促進試験結果

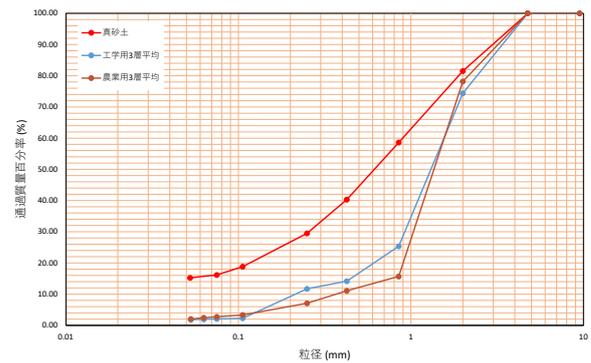


図 4.2 ふるい分け試験結果

## 締固めエネルギーを考慮した締固め時の含水比と透水係数の関係

EC20047 柘 虎之介

### 1. 研究背景と目的

間隙構造の違いが透水係数の違いにあたる原因について明らかにするため、同じモールドで実施する保水性試験と透水性試験から締固め時の含水比と透水性の関係を明らかにする。図1では、昨年に締固め試験を行った野川敦史のデータから、締固め曲線と透水係数をグラフに表した。図1では、突固め回数47回とした締固め試験であった。本試験では、突固める回数を変え、グラフの変化を見る目的としている。

### 2. 試料

昨年とデータを比べるため、同じ試料である真砂土を使用した。

### 3. 方法

#### 3.1 突固めによる土の締固め

保水性と透水性の一連の試験を実施するため、図2のように、同一の供試体（内径8cm、高さ5cm）を使用した。A法の締固めエネルギー $E_c=550\text{kJ/m}^3$ に合わせ、ランマー重量1.5kg、落下高さ20cm、突固め層数2層、各層の突固め回数47回とした。

#### 3.2 変水位透水試験

本試験において締固めた供試体6個を定水位・変水位対応型の透水試験装置（KSAT：Meter社製）にセットし変水位透水試験により透水試験を求めた。図3にあるように締固めた試料を飽和させ、KSATに試料を取り付ける。供試体下部にある圧力センサーにより、流量を自動計算でき、透水係数を求める。

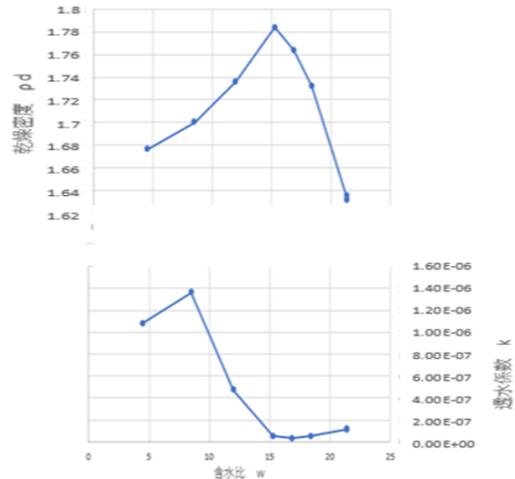


図1 締固め時の含水比と透水係数

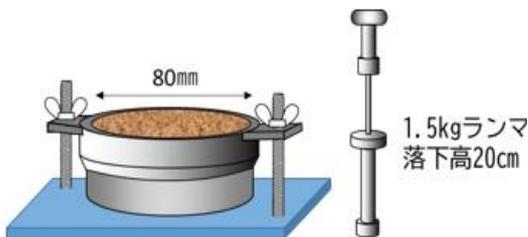


図2 モールドと締固め用具

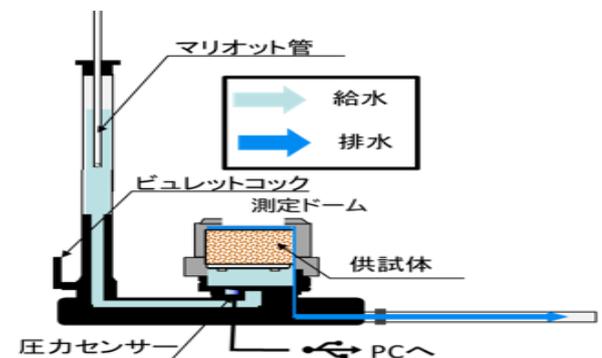


図3 定水位・変水位型透水試験装置(KSAT)

### 3.3 土の保水性試験

水分特性曲線・不飽和透水係数測定装置（HYPROP：Meter 社製）図4から2つの試料を取り出し、チルドミラー式サイクロメーター（MP4-T：旧 Decagon 社製）図5から高ポテンシャル領域を測る。

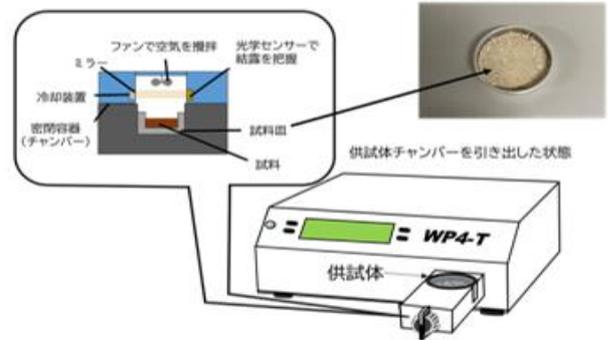
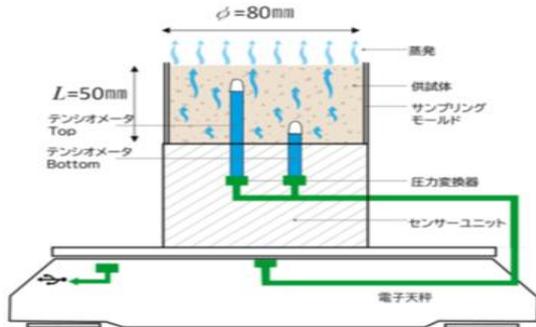


図4 水分特性曲線・不飽和透水試験装置(Hyprop)

図5 サイクロメーター

## 4. 間隙と締固め

### 4.1 顕微鏡で間隙を観察

それぞれ含水比が異なる6つの試料を資料皿にとった。6つの試料を乾燥剤の入った容器に入れ、乾燥させた。図6は、乾燥密度と含水比の関係を表している。図7は、含水比を調整し、乾燥させた6つの試料の土粒子の間隙を顕微鏡で撮った白青写真である。

### 4.2 締固め曲線

図7を見ると、No.5、No.6、と含水比が増えるたび間隙が大きくなるのが分かる。図6からは、含水比が大きくなるたび乾燥密度が小さくなるのが分かる。  
図7を見ると、No.10、No.15、No.20 と含水比が増えるたび間隙が小さくなるのが分かる。図6からは、含水比が大きくなるたび乾燥密度が大きくなるのが分かる。

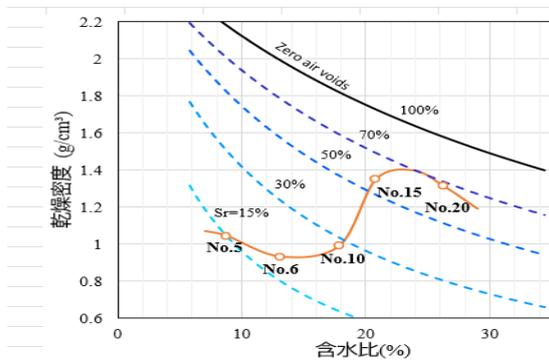


図6 締固め曲線と透水係数

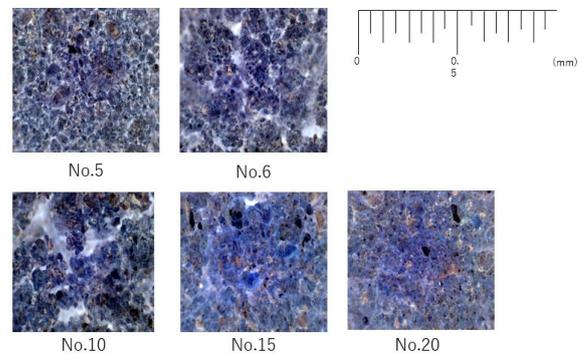


図7 6つの試料の顕微鏡写真

5. 透水係数

透水係数は土粒子の大きさや間隙を流れる水質、土の間隙の構成により変化することが知られている。図3のように、定水位・変水位対応型の透水試験装置（KSAT：Meter社製）に供試体6個をセットし変水位透水試験により透水試験を求めた。全体的には、含水比が大きくなると透水係数の値は小さくなる。しかし、含水比8%あたりで、透水係数の値が最大となっている。その理由としては、上記で説明した4.2 締固め曲線で説明した間隙が大きく関係していると考えられる。

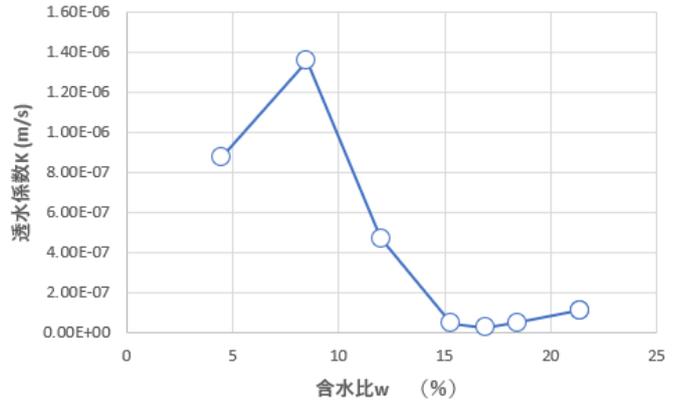


図8 透水係数のグラフ

6. 締固め曲線と透水係数

図9のように、M-1からM-4まで乾燥密度が上がり、M-4を最大にM-8まで乾燥密度が下がる上に凸のグラフとなっている。透水係数はM-2で透水係数が最大となるものの、M-1からM-5まで透水係数が下がり、M-5を最小にM-8まで透水係数が上がる下に凸のグラフとなっている。締固め曲線（乾燥密度と含水比のグラフ）と透水係数のグラフの関係性として反比例のようなグラフを表した。しかし、最大、最小の値にずれが生じる。図9のように締固め時の含水比と透水係数やせん断強さ、また変形特性との間にも関係があることが知られている。これは、同じ乾燥密度において透水係数が異なるように、乾燥密度と透水係数は一対一の関係にないことを示している。ずれが生じる原因については、昨年の野川らが行った研究で間隙径分布、水分特性曲線から明確なものとしている。

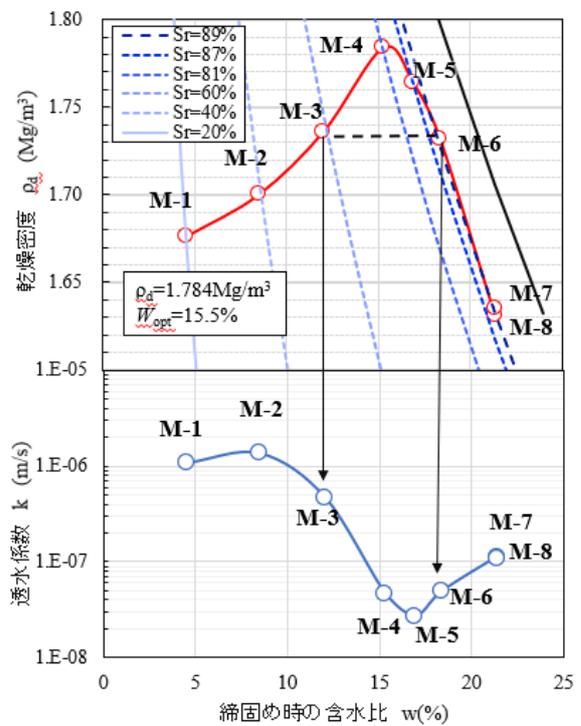


図9 締固め曲線と透水係数の関係

7. 締固めエネルギー

土構造物を作製するにあたり、締固め土の強度や支持力、遮水性を安定に保つ基準を設定しなければならない。その中で、現場に適する締固め度を推定するため、締固めエネルギーと締固め曲線の関係を明らかにする。突固め試験では式(1)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。また、一層あたり23回、8回、3回の突き固めを行い、試験に取り組んだ。

$$E_c = \frac{W_R \cdot H \cdot N_L \cdot N_B}{V} \quad (1)$$

ここに、 $E_c$ :締固めエネルギー(kJ/m³)、 $W_R$ :ランマー重量(kN)、 $H$ :ランマーの落下高さ(m)、 $N_L$ :層数、 $N_B$ :一層当たりの突固め回数、 $V$ :モールドの容積(m³)である。

8. 結果

本研究では、一層あたり 23 回、8 回、3 回の突き固めを行った。式(1)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た場合、突き固め回数 23 回の締固めエネルギー 542.8KJ/m<sup>3</sup>、8 回の締固めエネルギー 187.2KJ/m<sup>3</sup>、23 回の締固めエネルギー 70.2KJ/m<sup>3</sup>となった。また、突き固め回数 23 回、8 回、3 回の試料と昨年の野川のデータ（2 層あたり突き固め回数 47 回）を引用し、締固め曲線と透水係数を比較すると図 10 のようになった。凡例として、緑色のグラフ：突き固め回数 23 回、黄色のグラフ：突き固め回数（2 層あたり）47 回、赤色のグラフ：突き固め回数 8 回、紫色のグラフ：突き固め回数 3 回である。図 10 の上のグラフである締固め曲線を表したグラフでは、締固めエネルギーが小

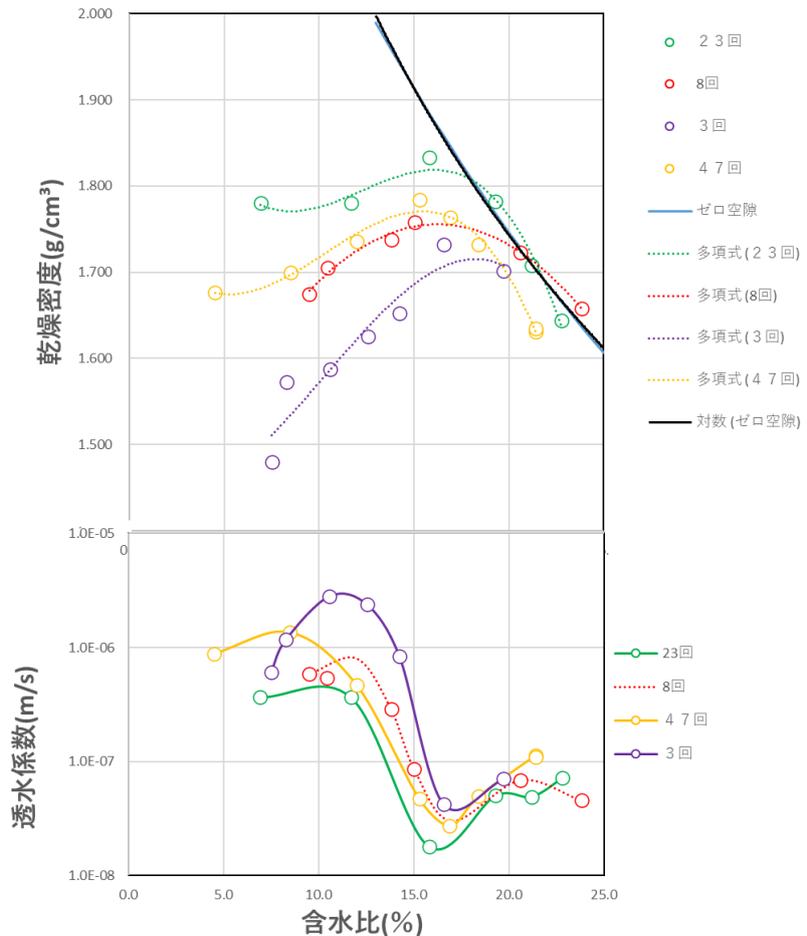


図 10 締固めエネルギーを考慮した締固め曲線と透水係数

さくなると締固め曲線が下がる結果となった。また、突き固め回数ごとの最大乾燥密度を見ると、回数を減らし含水比が増えるたび右下がりとなっている。ここから、締固めエネルギーを小さくし、含水比を増やしていくと締固め曲線は全体的に右下下がりとなった。図 10 の下のグラフである透水係数を表したグラフでは、締固めエネルギーが小さくなると透水係数が上がる結果となった。また、突き固め回数ごとの最小の透水係数を見ると、回数を減らし含水比が増えるたび右上がりとなっている。ここから、締固めエネルギーを小さくし、含水比を増やしていくと透水係数は全体的に右上上がりとなった。

9. まとめ

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 締固め曲線は締固めエネルギーが小さくなるにつれ右下がりすることが確認できた。
- 2) 透水係数は締固めエネルギーが小さくなるにつれ右上がりすることが確認できた。
- 3) 透水係数は間隙比と関係し、同じ乾燥密度で2つの透水係数ができるとともに、同じ透水係数から2つの乾燥密度ができることを示した。
- 4) 締固めエネルギーが大きくなっても、透水係数の最大値、最小値の差はほぼ同じ値を示した。

10. 参考文献

杉井敏夫, 野川敦史, 古川泰之: 地盤粒状材料の間隙径分布は新たな土質力学の扉を開けることができるか～間隙径分布からみた締固め時の含水比が及ぼす間隙構造の違い～, pp.1-4, 研究報告書

## 土の団粒化制御に関する研究 ～GB2000 の場合～

EC20056 中根 康丞

### 1. はじめに

土の団粒化とは、図 1-1 のような単粒構造である普通の土に団粒化剤やセメントを混ぜ、図 1-2 のような団粒構造の土へと変えることである。土を団粒化することで透水性・保水性が向上する。そのため、近年の異常な猛暑に対する温度上昇の抑制や、頻発する大雨に対して雨水流出の抑制などといった防災・減災へつなげる活動が期待されている。また、本研究で行う土の団粒化を制御することで、透水性や保水性をコントロールさせられる可能性がある。

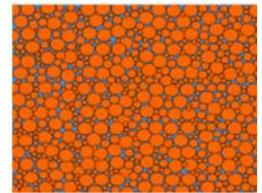


図 1-1 土の単粒構造

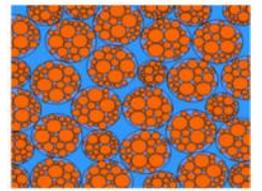


図 1-2 土の団粒構造

本研究で行う土の団粒化制御は、団粒化を促進させることを目的とする。団粒化を促進させることで、防災や減災に使用する際に、予想される降水量によって団粒化の促進を制御することで、雨水の流出量を制御することが可能になることを期待している。また、団粒化の促進を変えることで、フィルターとしての用法や埋設物の周りに大きさを制御して使うことで液状化防止に役立てることなど同じ土の使用範囲を広げられることを期待して研究を行う。また、全国トース技術研究組合では団粒化させる際に団粒化剤を水で希釈して混合させるのだが、その濃度と量は基準が設けられている。しかし、その基準より濃度を高く量を多くした場合には団粒化構造がどうなるかはあまり研究されていない。そのため、基準希釈濃度より濃く、基準混入量より多くした場合に団粒化の制御は可能かを調べるために研究を行う。

### 2. 試験方法

本研究では、団粒化剤の希釈濃度による団粒化制御の研究と団粒化剤の混入量による団粒化制御の研究の2つに分けて、それぞれ粒度試験や透水試験を行う。2つの研究の違いは、希釈濃度による団粒化制御は改良する際に団粒化剤の入れる量を一定にし、希釈濃度を変えて行う研究である。対して混入量による団粒化制御の研究は、希釈濃度を一定にして混入量を変えて行う研究である。

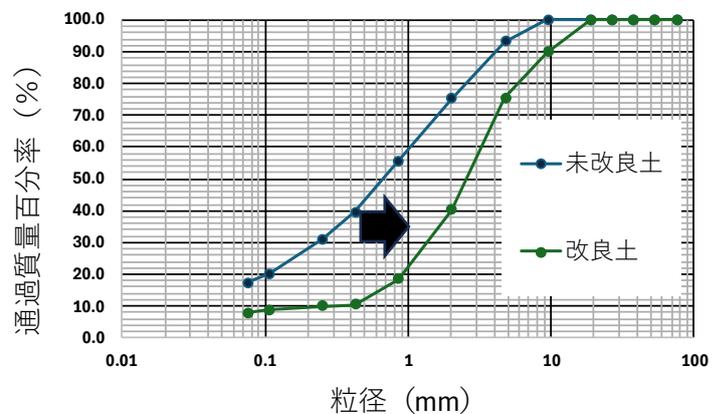


図 2-1 粒度試験の評価イメージ

(1) 粒度試験

粒度試験は、団粒化剤の希釈濃度と混入量の2つの団粒化制御の実験を行い、両方ともふるい分け分析のみ行う。作成した供試体をふるい分けして、各ふるいの残留試料から通過質量百分率を算出する。算出した値から粒径加積曲線を作図し、図2-1のように未改良の供試体と改良した供試体の粒径加積曲線がどのように変化しているかで評価をする。また、通過質量百分率から残留率を算出し、団粒化指数 $\eta$ を用いての評価も行う。

(2) 透水試験

透水試験は透水試験機(K-SAT)を使い、団粒化剤の希釈濃度による団粒化制御の実験のみで行う。希釈濃度別に含水比約20%供試体を作り、それぞれ目標の含水比まで自然状態で乾燥させて透水係数を測定する。希釈濃度別に含水比と透水係数のグラフを作成し、図2-2のようにどのように変化しているかで評価する。

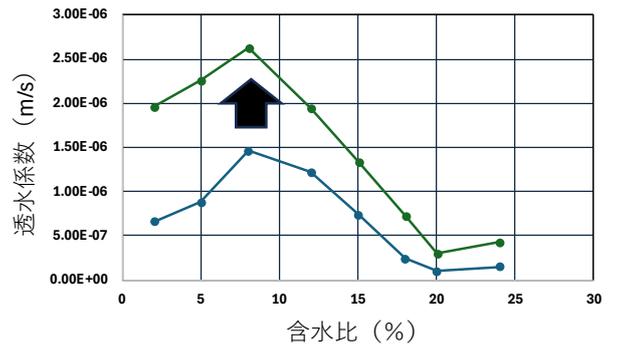


図 2-2 透水係数による評価のイメージ

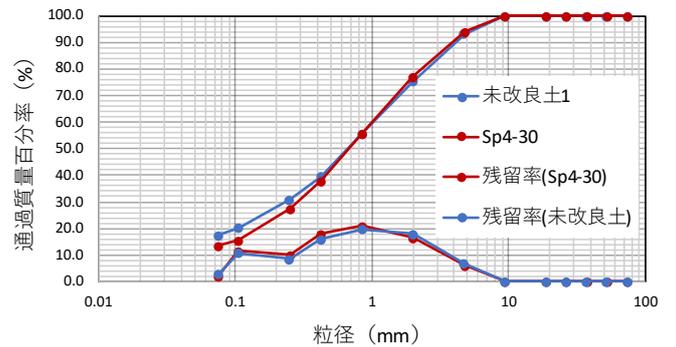


図 3-1 未改良土と Sp4-30 の粒径加積曲線と残留率

3. 実験とその結果

(1) 団粒化剤の希釈濃度による団粒化制御

土を団粒化させる際には接着剤のような役割として団粒化剤を使用するのだが、全国トース技術研究組合では団粒化剤を水で30倍に希釈をしながら土の改良を行うことを基本としている。そこで、その団粒化剤の希釈濃度を変化させることで団粒化の制御が可能であると考えため、この実験を行った。実験では、団粒化剤の希釈濃度を基準よりも濃い15倍と7倍の希釈濃度で改良することで、粒径加積曲線や団粒化指数、透水係数の値が30倍の希釈濃度よりも団粒化の促進を示すことを期待して実験を行う。

① 粒度試験

粒度試験の結果で図3-1～図3-3に最も評価のしやすい結果を示す。この結果は、希釈濃度が上から30倍、15倍、7倍の供試体と未改良土との粒径加積曲線である。

図3-1～図3-3のグラフを比較すると、希釈濃度が上がるにつれ、粒径加積曲線における細粒分の領域で未改良土と改良土の差が大きくなっている。また、残留率も未改良土との差は濃度が上がるにつれ大きくな

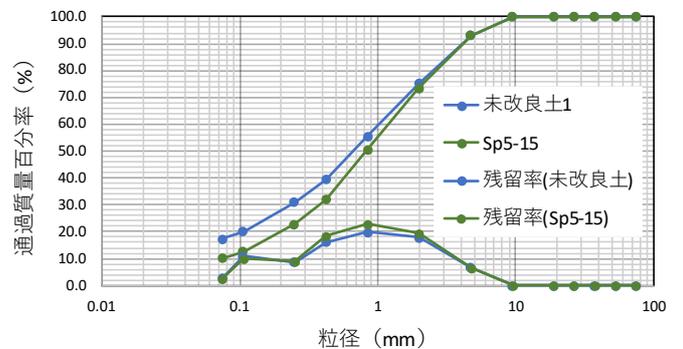


図 3-2 未改良土と Sp5-15 の粒径加積曲線と残留率

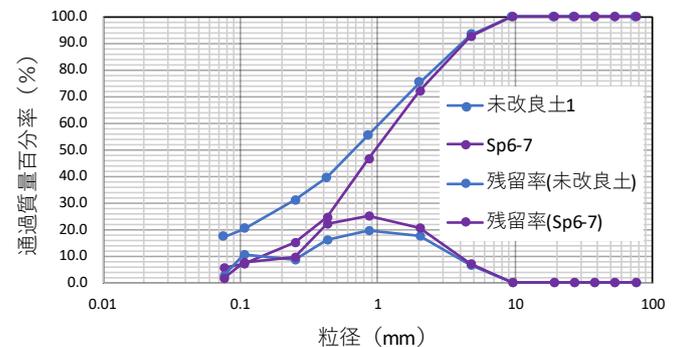


図 3-3 未改良土と Sp6-7 の粒径加積曲線と残留率

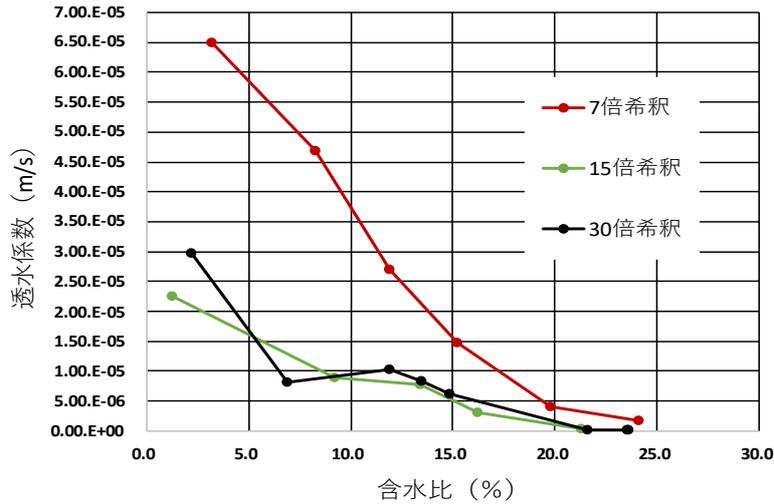


図 3-4 各希釈濃度の透水係数と含水比

ることがわかる。このことから、濃度を上げれば団粒化を促進させる可能性が大いにあることがわかる。しかし、ほかの粒度試験では希釈濃度が 30 倍と 15 倍においては差がない結果もあったため、一概に濃度を上げれば必ず団粒化を促進させるとは言えないだろう。

② 透水試験

透水試験の結果を図 3-4 に透水試験の結果を示す。この結果は、各希釈濃度で透水試験を行い、それぞれ含水比と透水係数の測定値で作図したものである。

結果から、7 倍の希釈濃度は明らかに透水性が向上している。しかし、30 倍と 15 倍の希釈濃度は含水比によって透水係数の大小が変わっており、団粒化を促進させられたとは言えないことが明らかである。そのため、団粒化の促進には一定以上の希釈濃度が必要である可能性があると考えられる。

(2) 団粒化剤の混入量による団粒化制御

団粒化剤の注入量による団粒化制御の実験は希釈濃度が 30 倍と 7 倍の団粒化剤で注入量を 30ml、50ml、70ml と変えて供試体を作成した。15 倍の希釈濃度で実験を行わなかった理由は、希釈濃度による団粒化制御の実験で 30 倍と 15 倍はあまり変わらないという結果が出たためである。行った実験のうち、希釈濃度が 7 倍の供試体の粒度試験の結果を図 3-5～図 3-7 に示す。

結果を比較すると、団粒化剤の注入量が 30ml と 50ml では明らかに粒径加積曲線の差が大きくなっており、団粒化剤の注入量が多くなれば団粒化を促進させることができると言えるだろう。しかし、50ml と 70ml では 30ml との差と比べて、大きな差がない

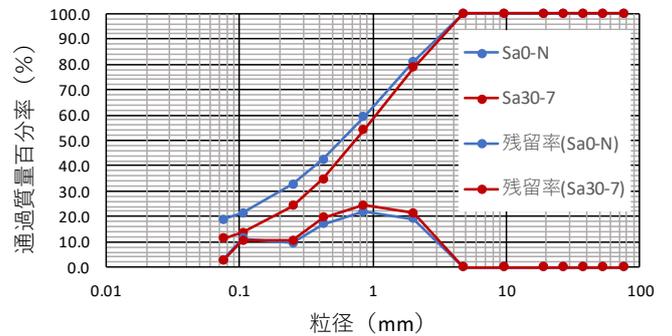


図 3-5 未改良土と Sa30-7 の粒径加積曲線と残留率

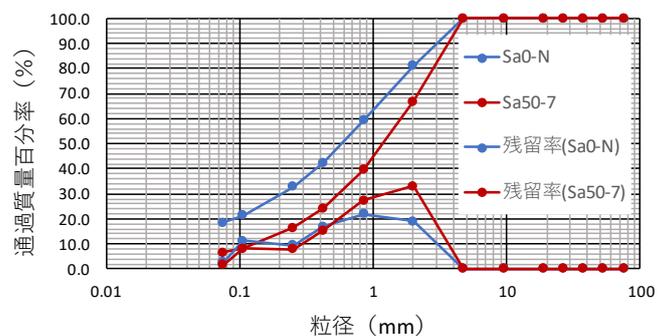


図 3-6 未改良土と Sa50-7 の粒径加積曲線と残留率

ことがわかる。そのため、団粒化剤の注入量を多くすれば団粒化を促進させることはできるが、70ml よりも多くすればより促進させることができるかは明らかでない。

#### 4. まとめ

本研究で分かったことおよび考察を以下に示す。また、実験を行うにあたっての問題点も示す。

(1) 団粒化剤の希釈濃度による団粒化制御の実験から、

団粒化剤の希釈濃度を一定以上の高濃度で改良させた場合、

粒径加積曲線の推移や団粒化指数、透水係数の値から団粒化を促進させることができる可能性があることがわかった。だが30倍と15倍希釈濃度を比較したとき、必ずしも15倍の希釈濃度の方が団粒化を促進させられるという結果ではなかったため、引き続き研究を行う必要がある。

(2) 団粒化剤の混入量がある程度多く注入することで、団粒化の促進をさせることができる可能性がある。

しかし、どこかに限度があり単純に多くすれば促進できるわけではない。だが、70ml より多く注入した際にはどうなるかは不明であるため、70ml より多くした実験をいくつか行う必要がある。

(3) 実験を行う中で、測定値から供試体が団粒化していないという問題があった。また、団粒化指数が20%を超えるようによく団粒化が進んでいる供試体を作成することができなかった。そのため、団粒化構造が供試体を作成する際に崩壊しているか、水洗いする際に崩壊している可能性がある。

以上のから、団粒化剤の希釈濃度および混入量を変えることで団粒化の制御ができるということが分かったが、上記に述べたような問題が出ることもあった。これらの問題点を改善するため、改良の際の手順やふるい分け分析の際の水洗い方法など、団粒化の方法や供試体に対する実験の方法を見直し、引き続き研究を行っていく必要がある。また、新たにほかの団粒化制御の方法を考えて研究を行い、よりこの研究の結果が社会での活用の幅が広がるように研究を行わなければならない。

#### 謝辞

本研究を進めるにあたり、中部大学工学部都市建設工学科教授杉井先生には、指導教員として研究方法や団粒化に関する知識の教授をはじめとする多大なるご指導を頂きました。心から感謝いたします。また、同研究室の岡部君には実験の助言や実験データの共有をしていただきました。お礼申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 全国トース技術研究組合 研究報告編集委員会：全国トース技術研究組合研究報告, Vol.2, pp.17-22, 国土交通省認可 全国トース技術研究組合, 令和3年度
- 2) 全国トース技術研究組合：N23-ATTAC ー製造・施工マニュアルー, No.00053
- 3) 公益社団法人 地盤工学会 土質試験 ー基本と手引きー 第二回改訂版 pp91-102, 2019
- 4) 杉井俊夫, 山田公夫, 方 方, 馬 貴臣, : 団粒化した土の物性と舗装技術への適応, 総合工学, 第25巻(2013), 39頁~46頁
- 5) 杉井俊夫, 野川敦史, 古川泰之: 地盤粒状材料の間隙分布は新たな土質力学の扉を開けることができるのか~間隙径分布からみた締固め時の含水比が及ぼす間隙構造の違い~

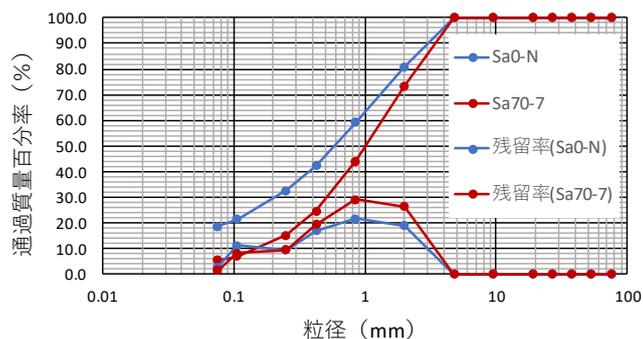


図 3-7 未改良土と Sa50-7 の粒径加積曲線と残留率

## AI による堤体内液状化の危険度予測

EC20058 中村優太

### 1. 研究目的と背景

日本における地震災害によって発生する被害は多岐にわたる。中でも液状化現象は地盤全体に大きな被害を与えるものである。粘土層の上に砂質土の堤防が築堤された場合には、堤体の下部にめり込み、堤体のすべりや亀裂、陥没が発生すると考えられている。液状化した堤体は図 1 のように堤体の陥没、のり尻の側面の流動などにより堤防がその役割を果たすことができなくなる状態に陥ってしまう。<sup>1)</sup> また、従来考えられてきていた基礎基盤の液状化だけではなく、非液状化層からなる堤体基礎の支持力が不足する箇所でも堤体自身が沈下し、図 2 のように雨水や河川水が浸透し閉封飽和域が形成されて地震動によって液状化することが原因として考えられている。<sup>2)</sup> 本研究では、亀裂の画像から、閉封飽和域を特定することを最終目的としている途中で、圧密沈下を起こしているとされる非対称な粘性土層と亀裂の関係性を AI を利用して確認するとともに、AI の予測の基準を可視化

できるソフトを使用して人間の目では判明しなかった共通点などが無いことを確認することを目的とする。



図 1 液状化現象によって陥没した堤体  
(阿武隈川)

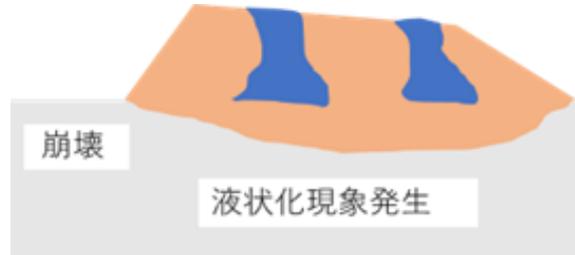


図 2 閉封飽和域が形成されるメカニズム

### 2. 研究方法

#### (1) 河川データの作成

図 1 のような調査対象とする河川の堤防の土質調査結果から堤体の土質断面を各地質に色分けを行ったデータを作成し google ストリートビューを用いて縦断亀裂が発生しているかどうかを確認し、亀裂の発生の有無でデータを分類する。

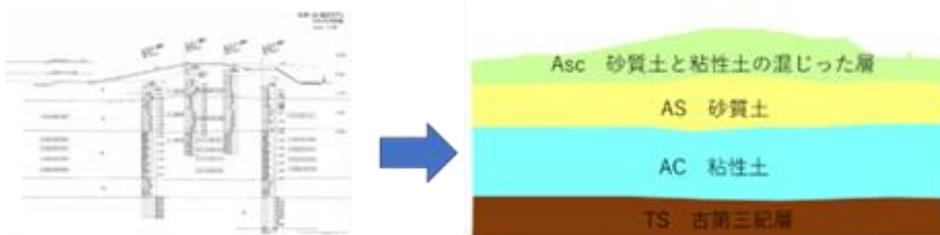


図 1 土質断面と色分け分類した画像データ

(2)河川データの解析

作成した河川データベースを CNN(畳み込みニューラルネットワーク)によって堤防天端に亀裂が発生しているかどうかを予測させる。(1)で作成したデータを教師データと検証データに分けてモデルを構築する。

(3) 対象河川への適応

河川データの解析で作成した深層学習モデルを予め作成してある庄内川の河川データを教師データとして使用し、深層学習モデルに予測させる。この際、教師データ、検証データ、試験データの比率を 7:2:1 の比率とし、モデルの評価を ROC 曲線という曲線図 2 の面積で評価する。また、ROC 曲線図の左上の座標 (0.1) の位置から最も近い曲線との距離を閾値といい、本研究で使用したような正か負かの二択を選ぶ二値分類型の AI は、予測数値を正か負かに分けるための数値を必要とし、その数値のことを閾値という。閾値を決定することは AI の二値分類の基準を決定することなので非常に重要である。今回のモデルでは閾値を 0.56 として適応を行った。今回は教師データ 336 個、検証データ 96 個、試験データ 48 個を使用した。また、亀裂の有無は亀裂ありのデータが 73 データ亀裂なしのデータが 359 データである。適応された予想の危険性を色ごとに分類し、庄内川の実地の地図に反映させる。そしてあらかじめ亀裂の有無を確認している庄内川の実地の亀裂の有無を反映させている地図と比較を行い AI の予測の精度を確認する。また、Grad\_CAM (Gradient-weighted Class Activation Mapping) 図 4 と呼ばれる深層学習モデルが予測を行った際に何を基準として予測を行ったかを可視化できるソフトを用いて AI が亀裂の有無を判断する際にどのような特徴の地層に強く反応を示すのかを確認する。先行研究の結果では、非対称の粘性土層がある地点において圧密沈下、閉封飽和域が形成されることがわかっているが、どの程度の非対称性を持つと AI が反応を示すのかまた、人間が見落としている特徴が存在する可能性があるので、AI によって新しい特徴があるのかの確認を行う。

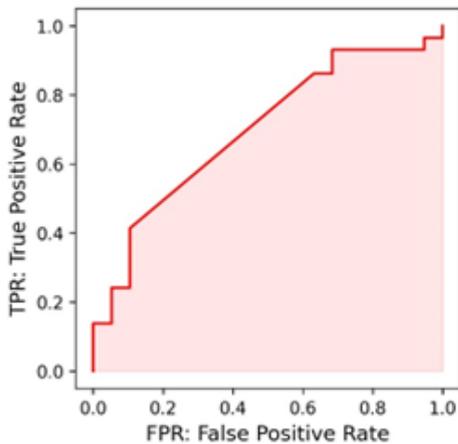


図 2 ROC 曲線の画像

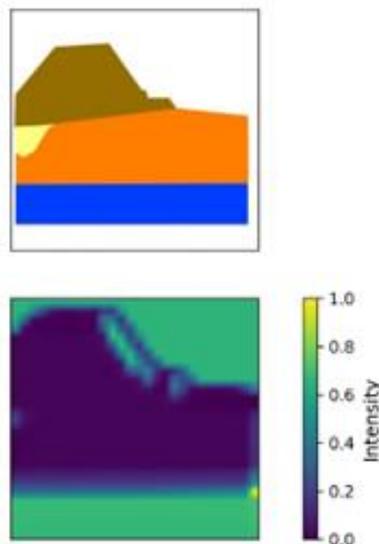


図 3 Grad\_CAM (庄内川右岸 32.5 km地点)

表 1 使用したデータの内訳

	教師データ	検証データ	試験データ	合計
亀裂あり	280	17	37	334
亀裂なし	56	79	11	146
合計	336	96	48	480



図4 AIによる右岸亀裂の有無予測の地図



図5 実際の右岸の亀裂の有無の地図



図6 AIによる左岸亀裂の有無予測の地図

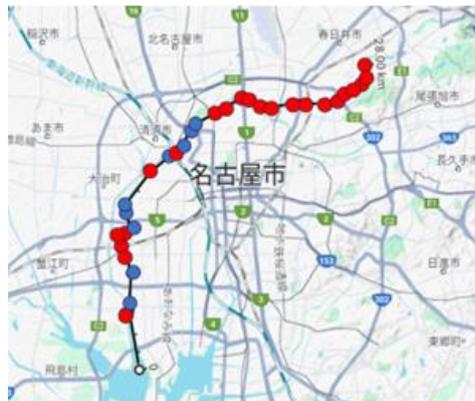
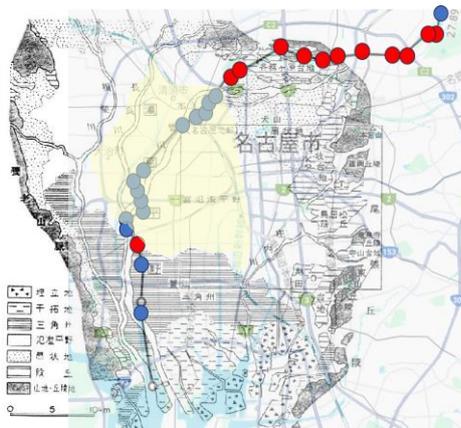


図7 実際の左岸の亀裂の有無の地図



第1図 濃尾平野の地形概念図 (原図、1/25kに1/25k縮小) K:小牧、T:田原の池、O:大曽根駅  
坂本他(1984)より  
濃尾平野の地形概念図

図8 一宮氾濫平野の位置と AI による亀裂の有無の予測の重ね合わせ

図4～図7はAIによる亀裂有無の予測智頭と実際の亀裂の有無の地図となっている。比較した際に名古屋市北東部では亀裂の予測と結果が一致しているため、深層学習による亀裂の有無の判断は可能である。また、河口付近では正解率が著しく低下するが、原因としては、図8の地層概念図の黄色の場所が一宮氾濫平野と呼ばれる場所であり、地層の深い部分に粘性土層があり、この地層付近の粘性土層にAIが強く反応してしまったために実際には亀裂があるがAIの予測では、「亀裂なし」と判断されてしまっていることが原因であるという先行研究の考察と一致した。

#### 4.まとめ

本研究で得られたことを以下に示す。

- 1) 他の実用化されている画像診断 AI に比べ学習データ数が少ないものの、的中率が高くモデルの精度がある程度信頼されるものであることが分かったため、本研究目的の深層学習 AI の画像診断によって堤体内液状化現象の発生する危険性がある地点の特定は可能であることが分かった。
- 2) 付近の予測の精度が極端に低い理由としては、地層として一宮氾濫平野と三角州があり、これらの対称性のある粘性土層に AI が反応してしまい、亀裂なしと判断してしまったために本来亀裂ありの地点において「亀裂無し」と判断してしまったことが原因である。
- 3) Grad\_CAM は、先行研究の結果と同様に非対称性のある粘性土層に反応を示したため非対称性の粘土層と堤防天端の亀裂は関連性があることが証明された。

#### 参考文献

- (1) 佐々木哲也 河川堤防における液状化被害と対策  
一般社団法人九州地方計画協会公益自主事業（九州技報）第 53 号 2013.07
- (2) 東日本大震災を踏まえた今後の河川堤防の耐震対策の進め方について報告書  
河川堤防耐震対策緊急検討会議
- (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
- (4) 浅井駿輝 縦断亀裂と堤体基礎の粘土層分布の関係
- (5) 高橋蒼 深層学習を用いた堤防土質構造物からの天端亀裂の発生判別
- (6) 畳み込みニューラルネットワーク (CNN) をわかりやすく基本から実装まで解説  
<https://zero2one.jp/learningblog/cnn-for-beginners/> (参照 12 月 14 日)
- (7) 人工知能であそぶ <https://nkdkccmbr.hateblo.jp/entry/2016/10/06/222245> (参照 12 月 4 日)
- (8) 機械学習 / ディープラーニングにおけるバッチサイズ、イテレーション数、エポック数の決め方  
<https://qiita.com/kenta1984/items/bad75a37d552510e4682> (参照 12 月 16 日)
- (9) 【初心者】ネコでも分かる「学習回数」ってなに？【図解】  
<https://zenn.dev/nekoallergy/articles/ml-basic-epoch> (参照 12 月 16 日)
- (10) 過学習とは？初心者向けに原因から解決法までわかりやすく解説 <https://data-viz-lab.com/overfitting> (参照 12 月 16 日)
- (11) エポック (epoch) 数とは【機械学習 / Deep Learning】 <https://www.st-hakky-blog.com/entry/2017/01/17/165137> (参照 12 月 16 日)
- (12) 損失関数 (Loss function) とは？ 誤差関数 / コスト関数 / 目的関数との違い  
<https://atmarkit.itmedia.co.jp/ait/articles/2104/15/news030.html> (参照 12 月 16 日)
- (13) 【評価指標】ROC 曲線と AUC についてわかりやすく解説してみた  
<https://blog.kikagaku.co.jp/roc-auc/> (参照 12 月 16 日)

## 改良地盤のコウライシバの生育評価

森本 魁心

### 1. 背景・目的

社会的に問題視されているゲリラ豪雨等の気候変動による風水害,また人工被覆の増加に伴う都市圏でのヒートアイランド現象の問題は互いに独立に存在するものではなく,関連しているものと考えらるべきである.本研究は,2022年度から実施している都市圏にダムと緑をという発想の<sup>1)</sup>「アーバン・グリーンダムプロジェクト」として,実用化されている団粒化技術と植生を融合させることによる相乗効果の評価を目的とする.

### 2. アーバン・グリーンダムプロジェクトの概要

現在,グラウンドや舗道の路盤に団粒化技術を取り入れた工法が既に実用化されており,NETIS登録されている.人工的に団粒化させる技術は,細粒分を団粒塊に拘束することで間隙が大きくなり透水性が向上し,団粒塊内に水分を保持することで保水性も向上させることが可能である.団粒化剤を混合させ固化材の量を変えることで硬さを調節でき,あらゆる現場で使用が考えられる技術である.農学分野では,団粒化は植物への効果が高いことから使用されてきており,本プロジェクトでは植生とくに芝生の地盤に団粒化させることでの効果を測るといったものである.

#### (1) 研究サイトとデータ管理

非団粒化地盤と土壤・路盤の厚みの異なる団粒化地盤のサイト(図1)を作成し,それらの対比評価により研究を進める.植生には日本の温暖な気候に適したイネ科の「高麗芝」を採用した.また一部のサイトで地表面を傾斜させ雨樋を利用したトレンチと雨量計を組み合わせ,流出量解析に用いた.データ管理にはメーカー製のロガーと同社の

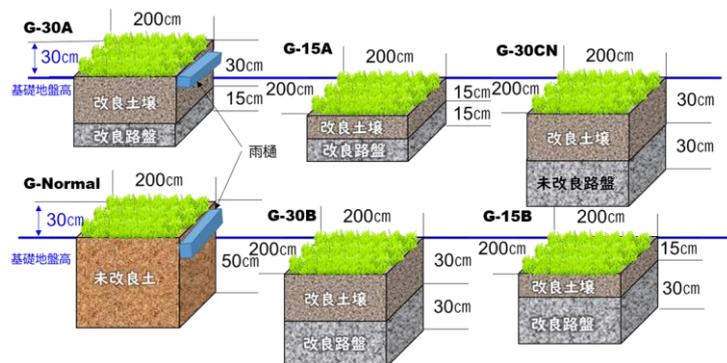


図1 サイト詳細

「ZENTRAクラウド」を用いて,クラウド上の管理を可能とした.計測量としては,降水量や外気温,湿度等の気象データや土壌水分量及び水ポテンシャルであり,これらの諸データを活用することで定量的評価を行った.

#### (2) その他の計測設備

団粒化地盤の透水性の向上はこれまでも明らかになっていたが,芝生がある場合について調べるため,G-30A(実証区:団粒化土壤)とG-Normal(対象区:未改良土壤)の表面流出量を計測できるよう表面を5%傾斜させ,オーバーフローして流れ出てくる量を雨樋で集め,写真1に示すように雨量計でモニタリングする設備を取り付けている.そのため,G-30A(団粒化土壤)とG-Normal(非団粒化土壤)は周りの地表面より15cm程高くなっている.また,すべてのサイトにおいて芝生の根茎部の生育状況を確認できるよう側面の1面だけを透明な塩ビ板で,他は杉板で周辺を囲っており,通常は土で埋めて光を遮断している.



写真1 雨樋による表面流出量の計測

### 3. 観測結果

#### (1) 芝生の活性度の評価

RGB カラーバンドを用いた Esri 社の ArcGIS の可視大気抵抗指数<sup>2)</sup> ( $VARI = (Green - Red) / (Green + Red - Blue)$ ) で植生を評価した。この指標は-1~1 の値で示され、1 に近いほど活性度が高いことを表す。今回は対象区に G-Normal, 実証区に G-30A を対象に比較検証を行う。選定理由は、改良地盤内で最も高い保水性で団粒化効果を示した G-30A と未改良地盤を比較評価することで対比が容易いと考えたからである。結果を示す(図 2)。昨年度では実証区の VARI 値が対象区に比べ大きい値を示しているが、今年度の8月下旬では対象区の方が大きい値を示している。これは今年度の8月上旬の施肥が起因すると考えられ局所的に VARI 値に差異が生じた結果であり植生に問題はない。また写真2に示す根部の生育状況から土壌部はもちろん、さらには路盤部まで根が進行しており養分伝達、保水等の役割にも問題はないと評価できる。地表面温度の抑制に関してサーモグラフィを用いて地表面温度を計測したところ、実証区では対象区に比べ 3.7°C の抑制効果があることも得られている。これは実証区と対象区の体積含水率の保有量に約 1.6 倍の違いが見られたことに起因していると考えられ実証区における保水特性も確認できている。

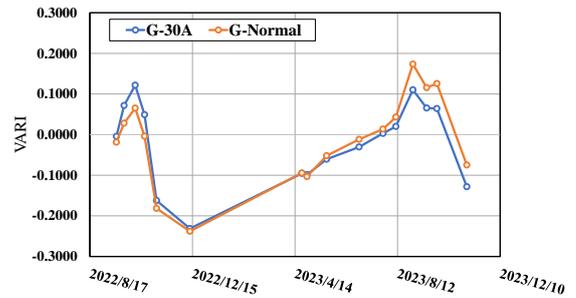


図 2 G-30A と G-Normal の VARI



写真 2 根部の生育状況 (実証区)

(2)透水性・保水性評価

図 3 に降雨時における実証区 (G-30A) と対象区 (G-Normal) の体積含水率変移を示す。11 月 7 日 AM2:00 に 30mm/h の降雨を観測しており、実証区と対象区で異なる体積含水率変移の傾向がみられる。ここで同研究の安江により降雨時における表面流出量解析において対象区に比較し、実証区の表面流出の抑制効果が見られることが示されている点を踏まえる。透水から排水に要する時間を透水性評価の因子にした場合、地表面流出量を考慮すると一概には言えないが対象区比 200%の透水性を示すことになる。すなわち対象区に比較し実証区では透水から排水に要する時間を半減できている。他の実証区と対象区も同様の透水性評価においても実証区の方が高い透水性を得られている。また、図 3 に示すように実証区 5 サイトの中でも G-30A では対象区に比較し高保水性を示す結果も見られる。これら透水性評価を踏まえ改めて団粒化技術における団粒化構造の形成また維持において減災に努める可能性を示した。

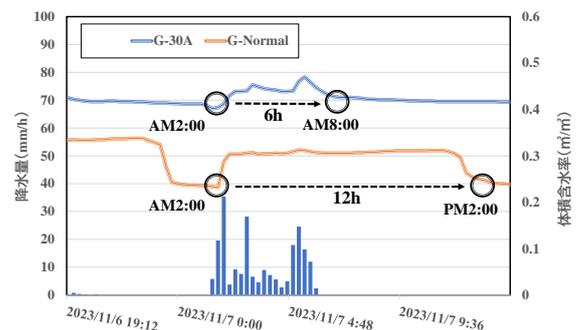


図 3 降雨時における透水性

現在経験的に用いられている団粒化技術であるが、適用事例としてはグラウンドや芝生公園、園路などが挙げられ徐々に領域を広げつつあるのが現状である。今後期待されるのは、団粒化技術の思索的社会的実装であり、スマートシティや新モビリティが関心を高める中で魅力的で持続可能な都市の形成の一助になることを期待している。

現在経験的に用いられている団粒化技術であるが、適用事例としてはグラウンドや芝生公園、園路などが挙げられ徐々に領域を広げつつあるのが現状である。今後期待されるのは、団粒化技術の思索的社会的実装であり、スマートシティや新モビリティが関心を高める中で魅力的で持続可能な都市の形成の一助になることを期待している。

謝辞：本研究は国土交通省、各会社また指導教授の杉井教授、同研究の安江氏からの支援を賜りました。

【参考文献】1)杉井：アーバン・グリーンプロジェクト，全国トース技術研究組合研究報告書 Vo.3, pp.1-12, 2022. 2) Vegetation and soil lines in visible spectral space: A concept and technique for remote estimation of vegetation fraction: International Journal of Remote Sensing: Vol 23, pp.2537-2562.2002.

ATTAC 工法による改良地盤への浸透効果の評価  
 ～アーバン・グリーンダムプロジェクト～

EC20084 安江遼太郎

1. 研究目的と背景

現代の日本は様々な環境問題を抱えている。特に近年は都市化が進んだ影響により、地面がアスファルトやコンクリートに覆われ、雨水が地面に浸透せず内水氾濫が発生することが多くなっている。また雨水が河川に直接流入することにより、洪水などが発生しやすくなるといった問題がある。

そのため雨水がより早く地面に浸透することでこれらの問題を防ぐために、土や路盤材へ団粒化剤を配合し、透水性や保水性といった機能を向上させ、未改良の地盤と比べることで効果を確認することが本研究の目的である。

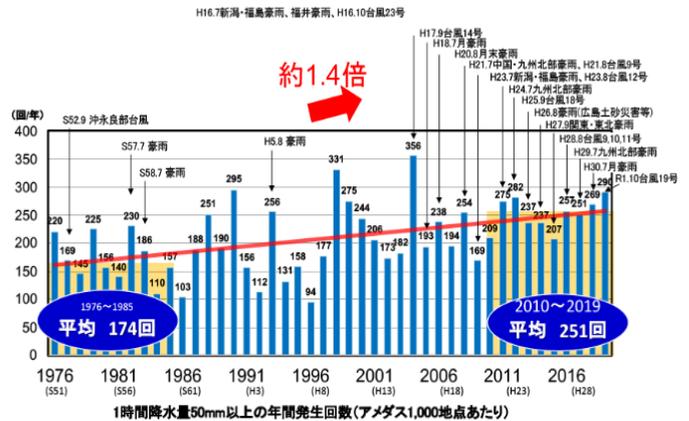


図 1.1 時間雨量 50mm 以上の発生回数

2. 研究方法

2.1 試験サイトの説明

滋賀県米原市にある実験サイトを利用して試験を行う。試験サイトは 8 地点あり、1 区画 2m×2m、土壌層と路盤層の層厚は各区画で異なる。

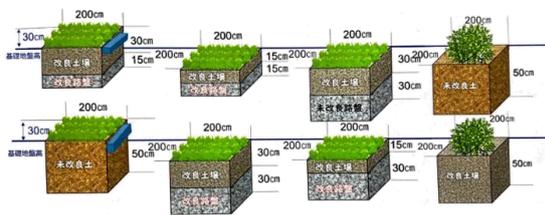


図 2.1.1 試験サイトの概要

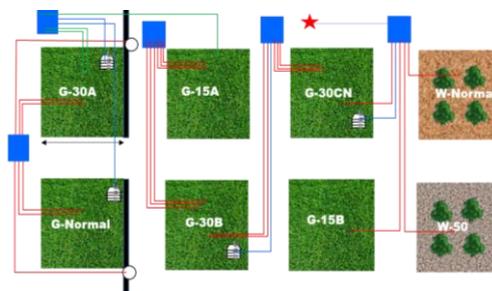


図 2.1.2 試験サイトの呼称

今回の研究では G-30A、G-Normal、G-30B、G-30CN、W-Normal、W-50 のサイトを使用する。図 2 と図 3 は対応する実験サイトとなっている。表面流出量の比較は高麗芝を植生した G-30A、G-Normal を使用する。そして団粒化技術は再生路盤材に添加することにより保水性能や透水性能が向上するのを検証し、同時に再生路盤材に含まれるセメントの粉末が水と反応することで凝固すると考えられるため、団粒化をすることにより凝固を防ぐことができるのかを確認する。

## 2.2 流出量の比較

実験サイトの実証区(G-30A)、対象区(G-Normal)には既設の雨樋と流量計があるため、これらの設備と気象観測装置の降水量から表面流出量を求めていく。この2つの試験サイトは5%の傾斜がついている。

## 2.3 表面流出量の算出方法

表面流出量を計算する際に、雨樋に直接入った雨量について考慮する必要がある。そのため流量計で観測した流出量に流量計の断面積を乗じ、降水量に雨樋の面積を乗じてその差分として出した値から地表面から流出した水量を求める。



図 2.2.1 現場流出試験装置の様子

## 2.4 RC 路盤材に透水性能の比較

実験サイトにはコンクリートをリサイクルした RC30 路盤が施工してある。そのため実験サイト G-30B の改良路盤、G-30CN の未改良路盤をそれぞれの層に埋設されている土壤水分センサーから透水量を比較して RC 路盤材を団粒化した際の性能を評価する。また各試験サイトの側面には透明な塩ビ製の板が設置されているため、地盤を確認するには試験サイト側面の土を掘削して目視で確認を行う。

## 3. 試験結果

### 3.1 表面流出量の試験結果

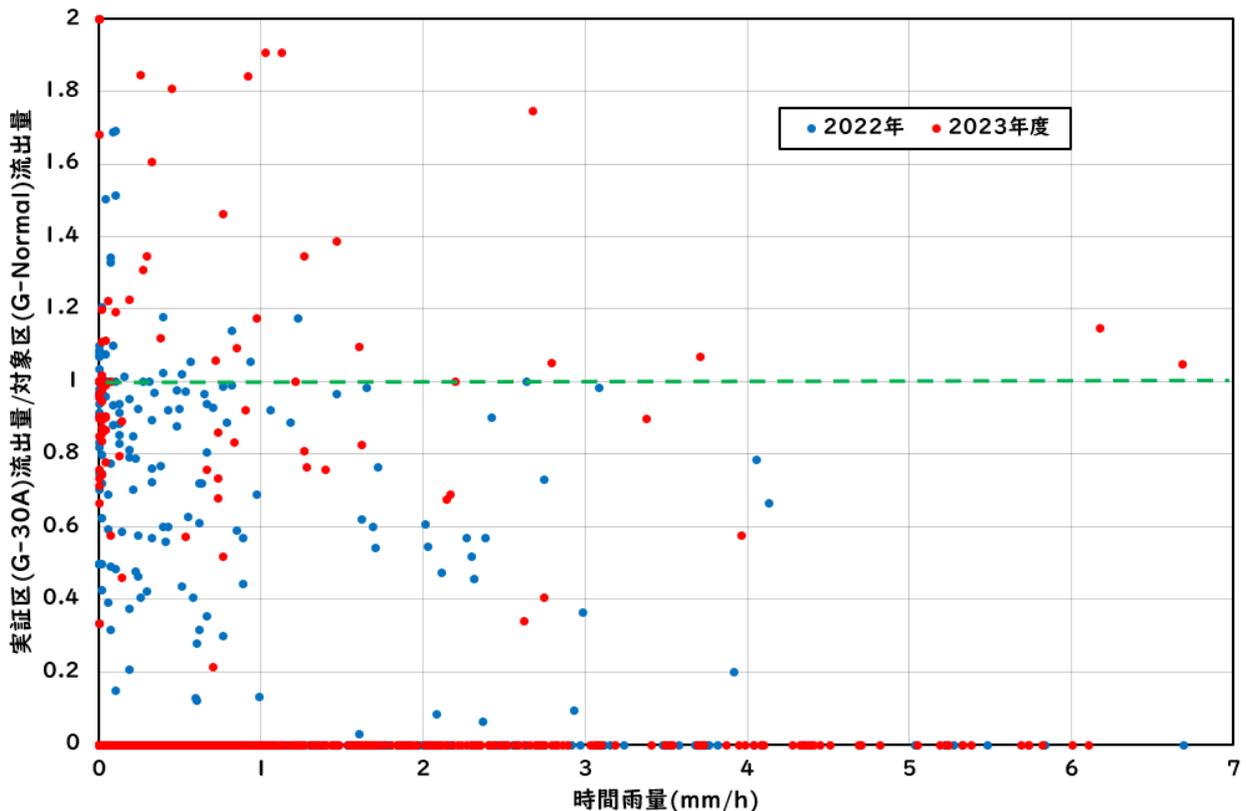


図 3.1 実証区と対象区からの表面流出量の比

先行研究では実証区と比べ対象区の表面流出量が多かったことが分かっている。本研究での結果は図 3.1 に示す。図中に示した緑の破線は実証区と対象区の流出量比が 1.0 となる境界線である。図 3.1 を見ると実証区の流出量は右肩下がりに減少していることが分かる。具体的に数字で表すと表 3.1 の結果となった。本研究における表面流出量の目標値は実証区での流出量が対象区の半分の値となることである。そのため表 3.1 から実証区と対象区の比を計算すると 0.917 という結果となった。このことから表面流出量は減少しているが、目標値には届かないという結果が出た。このような結果の原因として試験設備の不備が結果に大きく寄与していることが考えられた。そのため 2023 年 5 月 23 日～9 月 27 日の期間におけるデータは除外して計算している。1年を通じて降水量が最も多い機関の試験結果が使用できなくなってしまったことは非常に痛手となってしまった。そのため本試験においては来年度再試験を行い、検証を行っていく。

表 3.1 G-30A と G-Normal の表面流出量の合計

実証区 (G-30A)	降水量(mm)
表面流出量	264.631

対象区 (G-Normal)	降水量(mm)
表面流出量	288.739

### 3.2 RC 路盤材に透水性能の比較の試験結果

表 3.2.1 には観測期間(2022 年 11 月 1 日～2023 年 11 月 30 日)での平均土壌水分量を示す。実証区は改良土壌と改良路盤の土壌水分量が同程度だが対象区では改良土壌と改良路盤の含水量が  $0.147(\text{m}^3/\text{m}^3)$  と大きく差が開いている。これは対象区の土壌と路盤の境界面に”膜”のようなものが形成されているからだといえる。

写真 3.2.1 と写真 3.2.2 では改良土壌と未改良路盤、改良路盤の境目を断面から見た写真である。赤い破線で示した楕円に注目する。写真 3.2.1 にある G-30CN の断面では改良土壌と未改良路盤との境界に灰色の線のような模様が横に走っていることが確認できる。しかし写真 3.2.2 の G-15B でも同じように断面を確認したところ G-30CN で確認された灰色の線のような模様は確認されず、土壌の茶色と路盤の灰色がグラデーションのようになっていることが確認できた。比較の試験サイトが G-30B ではないが、改良土壌と改良路盤の境目では G-15B 以外の試験サイトでも同様の様子確認できたため、再生路盤に団粒化剤を添加することで G-30CN で確認されているセメント粉末が水と反応することで形成される”膜”のようものの発生を抑制することができることが分かった。

表 3.2.1 G-30B と G-30CN の平均土壌水分量

実証区 (G-30B)	$\theta(\text{m}^3/\text{m}^3)$
改良土壌	0.158
改良路盤	0.155

対象区 (G-30CN)	$\theta(\text{m}^3/\text{m}^3)$
改良土壌	0.257
未改良路盤	0.110

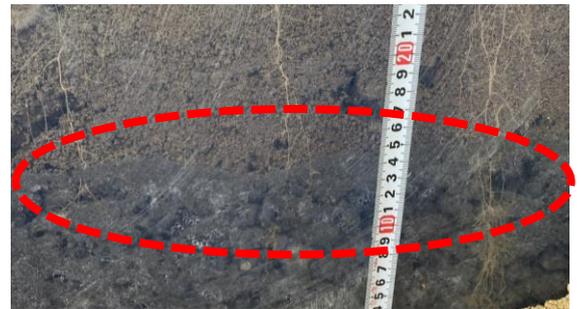


写真 3.2.1 G-30CN での改良土壌と未改良路盤の断面

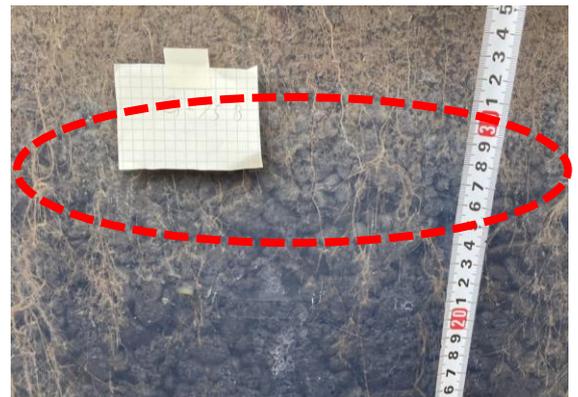


写真 3.2.2 G-15B での改良土壌と改良路盤の断面

#### 4.まとめ

- 1) 流出試験の結果では実証区(G-30A)と対象区(G-Normal)の観測結果として実証区が対象区よりも流出量が減少していることが確認できた。しかし2023年5月23日～9月27日のデータが使用できなくなり1年を通して降水量が多い季節のデータが使用できなくなってしまったため、データが不足してしまった。先行研究や今年度の研究結果からさらなる流出量の減少が期待できると予想されるため、来年度に引き続き観測を行っていく予定である。
- 2) 再生路盤へ団粒化剤を配合すると保水性能、透水性能が向上することが分かった。これは写真 3.2.1 と写真 3.2.2 との比較で分かる通り、再生路盤を団粒化することでセメント粉末が纏まるため水と触れた際に反応が起こりにくくなり、土壌との境界面に”膜”の発生を抑制できると考えられる。そのため土壌から路盤への透水性能が向上し、それに伴い保水性能も向上している。また路盤まで水を浸透させることができるため、総合的に保水できる水量が大きく伸びていることが分かった。

以上の結果から、団粒化施工を行うことで透水性能や保水性能の向上が期待できることが分かった。また再生路盤へ団粒化剤を添加することで、再生路盤に含まれるセメント粉末と水が反応して形成される”膜”の発生を防ぐことができるため透水性能と保水性能が大きく改善されることが分かった。これにより再生路盤を団粒化させることで大きな効果が得られるため、再生路盤材の普及や団粒化施工の有用性が証明できたといえる。

#### 参考文献

- 1) 杉井俊夫, 井原 徹, 平 瑞樹, 岡部竜一, 鏑田一治, 栗山和道 : アーバン・グリーンダムプロジェクト (中間報告),全国トース技術研究組合研究報告集(2022 年度), 2022.
- 2) 石川敬就, 杉井俊夫 : 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, 2023.
- 3) 国土交通省 : 近年の水災害発生状況 <https://www.mlit.go.jp/river/kawanavi/prepare/pdf/vol11-card.pdf> (参照 2023-07-25)
- 4) 気象庁 : [https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/index\\_himr.html](https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/index_himr.html), (参照 2023-11-23)
- 5) 国立研究開発法人 国立環境研究所 : <https://tenbou.nies.go.jp/science/description/detail.php?id=18> (参照 2023-05-09)