

【建設工学研究所論文報告集第 64 号〔論文〕 2022 年 11 月】

盛土内宙水の形成メカニズム解明に向けた実験的検討

Experimental Study for Elucidating Factors influencing the formation of Perched Groundwater in the Embankment

片岡 沙都紀
Satsuki Kataoka

瀬古 一樹
Kazuki Seko

友近 温人
Haruto Tomochika

澁谷 啓
Satoru Shibuya

1. はじめに

自然災害による盛土被害の要因の一つとして、盛土内の水分量増加に伴う盛土自体の強度低下が知られている。例えば、1995年に発生した兵庫県南部地震で報告された宅地盛土の被災箇所に関しては、十分な締固めが行われず、排水施設が不十分で地下水位が高かったことが報告されている¹⁾。この他にも、盛土内に水が浸入することで地下水位が上昇し、崩壊に至った事例が数多く報告されている²⁾。

盛土の安全性確保のためには、盛土内に滞水しないように排水工を設置することが重要であるが、中

には排水工を設置し十分な対策を施しているのに、地震による盛土の変形等の被害が報告されている例もある³⁾。この要因の一つとして「宙水」の可能性が示唆されている。宙水とは、主たる地下水面と不連続で、局所的に存在する帯水層のことである(図-1)。宙水は、盛土内に透水性の不連続面が存在している場合にはどこにでも発生しうる現象であり、降雨などによって盛土のり面や自然斜面などの表層近傍に形成された場合、近年多発する豪雨やレベルⅡ相当の地震などが発生した際に容易に表層すべり等の被害を誘発する恐れがある。宙水の形成要因や宙水による盛土変状への影響に関しては、宙水が発生した既設盛土での原位置試験および室内試験による宙水形成要因の特定⁴⁾や、不飽和浸透解析による宙水発生の再現性の検証⁵⁾がこれまで行われてきているが、これらは特定の盛土に発生した宙水に対する検証が主であったため、盛土内に宙水が形成される要因の特定に関する詳細な検討までは行われていないのが現状である。

本研究は、宙水形成要因の把握を目的として、多様な土試料を対象に室内透水試験を実施し、盛土材料の粒度や締固め度が透水特性に与える影響についての実験的検討を行った。さらに、透水性が異なる層を有した供試体の通水試験による含水比の分布等から、宙水発生要因についての検討を行った。

2. 室内透水試験

2. 1 使用した土試料と試験方法

透水試験には、最大粒径を 9.5mm とした 3 種類の土試料と、最大粒径を 4.75mm とした 1 種類の土試料の計 4 試料を使用した。最大粒径が 9.5mm の試料の内訳は、①ある宅地造成現場にて実際に宙水発生が確認された盛土から採取した土(以下、「大阪層群土」と示す)、②六甲山より採取したまさ土(以下、「六甲山まさ土」と示す)、③①、②の 2 試料

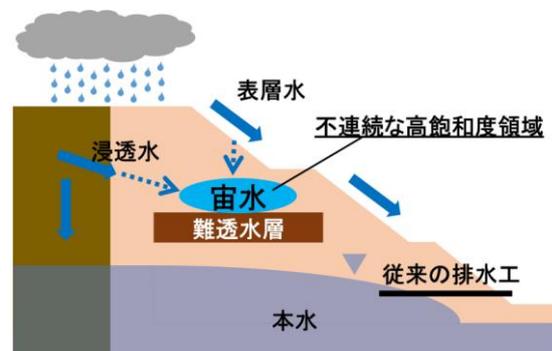


図-1 盛土内に形成される宙水のイメージ

を自然乾燥時の質量比で 1 : 1 にて混合させた土（以下、「混合土」と示す）である。一方、最大粒径が 4.75mm の土試料には、④市販の購入したまさ土（以下、「まさ土」と示す）を使用した。各土試料の自然乾燥時の状態は、写真-1 に示す通りである。

図-2 および図-3 は、これら 4 試料の粒径加積曲線および締固め曲線である。また、各試料の物性に関しては、表-1 にもまとめている。粒径加積曲線より、六甲山まさ土とまさ土の 2 試料の細粒分含有量は $F_c=10\%$ 以下であるのに対し、大阪層群土の細粒分含有量は $F_c=27.9\%$ と細粒分を多く含有していることがわかる。また締固め曲線から、どの土試料も最適含水比が概ね 13~14% であるのに対し、大阪層群土の最適含水比は $w_{opt}=15.8\%$ となっており、細粒分含有量が多いことで最適含水比も高い傾向にあることが伺える。



写真-1 試験に使用した土試料の様子（①大阪層群土、②六甲山まさ土、③混合土、④まさ土）

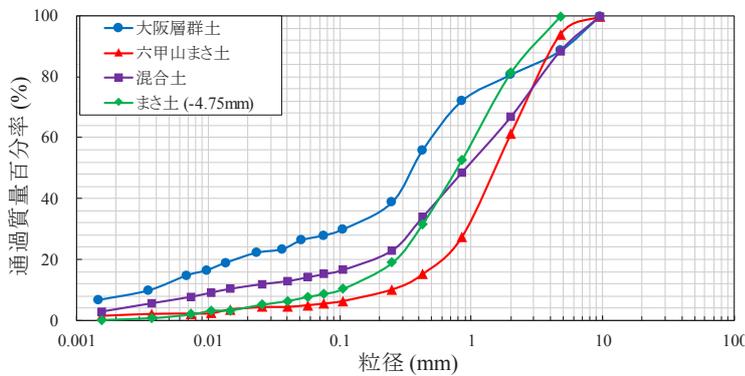


図-2 粒径加積曲線

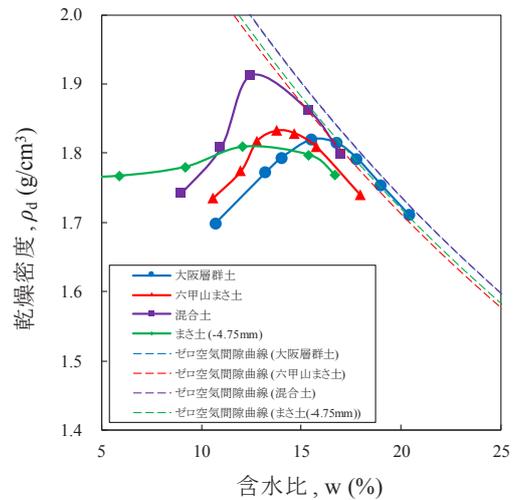


図-3 締固め曲線

表-1 透水試験に使用した各種土試料の物性値

			大阪層群土	六甲山まさ土	混合土	まさ土
最大粒径	D_{max}	(mm)	9.5	9.5	9.5	4.75
土粒子密度	ρ_s	(g/cm ³)	2.66	2.61	2.67	2.62
最大乾燥密度	$\rho_{d max}$	(g/cm ³)	1.82	1.83	1.93	1.81
最適含水比	w_{opt}	(%)	15.8	13.8	13.5	13.6
礫分含有量	G_s	(%)	19.3	38.7	33.1	18.5
砂分含有量	S_c	(%)	52.8	55.7	51.7	72.8
細粒分含有量	F_c	(%)	27.9	5.6	15.2	7.5
工学的分類			細粒分質礫質砂 SFG	細粒分まじり 礫質砂 SG-F	細粒分質礫質砂 SFG	細粒分まじり 礫質砂 SG-F

室内透水試験は、土の透水試験方法 (JISA 1218) ⑨に準じて、定水位透水試験 (10^{-5} m/sec 以上の供試体を使用) および変水位透水試験 (10^{-5} m/sec 以下の供試体を使用) を実施した。透水試験用の供試体は、透水試験用モールド (内径 10cm、高さ 12.7cm) を用いて作製した。供試体作製時の初期含水比は、各土試料の締固め試験により得られた最適含水比に調整しており、密度は最大乾燥密度をもとに、締固め度が $D_c=75$ 、80、85、90、95、100、105%となるように各々調整した。なお、 $D_c=75\sim 100\%$ の供試体は、写真-2 に示す油圧ジャッキを用いて3層で静的締固めを行い作製したが、 $D_c=105\%$ の供試体は、上記手法では密度を高めることが困難であったため、各層締固め時に質量 2.5kg のランマーを用い、落下高 30cm で 75 回の動的突き固めを行った後、油圧ジャッキで所定の体積まで締固めて作製した。なお、動的突き固めによる粒子破碎はなかったことを、締固め試験後に別途実施した粒度試験より確認している。各供試体の飽和方法として、定水位透水試験用供試体は、写真-3 (a) に示すように供試体の入った透水円筒を完全に水浸させた上で 24 時間以上放置させた。一方、変水位透水試験用供試体は、写真-3 (b) に示すように、透水円筒を脱気水で満たした水浸減圧容器に静かに入れた後に真空ポンプを用いて容器内を減圧することにより、容器内の水を透水円筒内に給水することで、供試体内の飽和度を高めた。この方法により、各供試体の初期飽和度を飽和状態 ($S_r=100\%$) に近づけられた。

2. 2 試験結果および考察

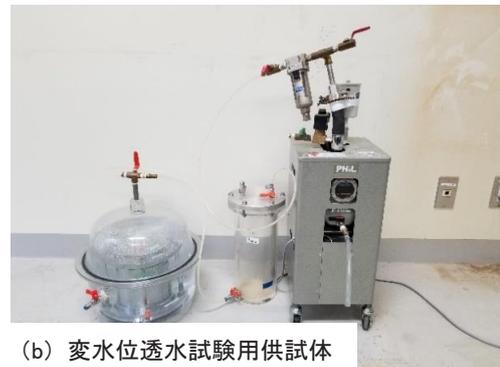
最大粒径が 9.5mm の大阪層群土、六甲山まさ土、混合土の各試料で実施した透水試験に関して、各試料の供試体作製時の締固め度と透水係数との関係を図-4 に示す。なお、図中に



写真-2 油圧ジャッキによる静的締固めの様子



(a) 定水位透水試験用供試体



(b) 変水位透水試験用供試体

写真-3 透水試験前の供試体飽和の様子

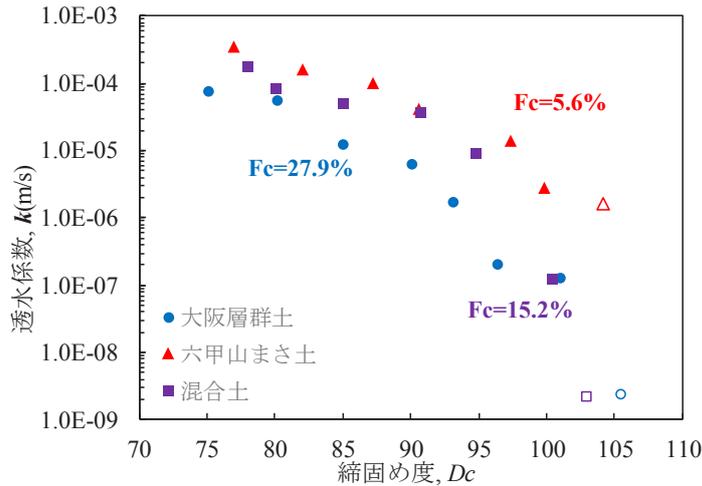


図-4 各土試料における締固め度と透水係数との関係（大阪層群土、六甲山まさ土、混合土）

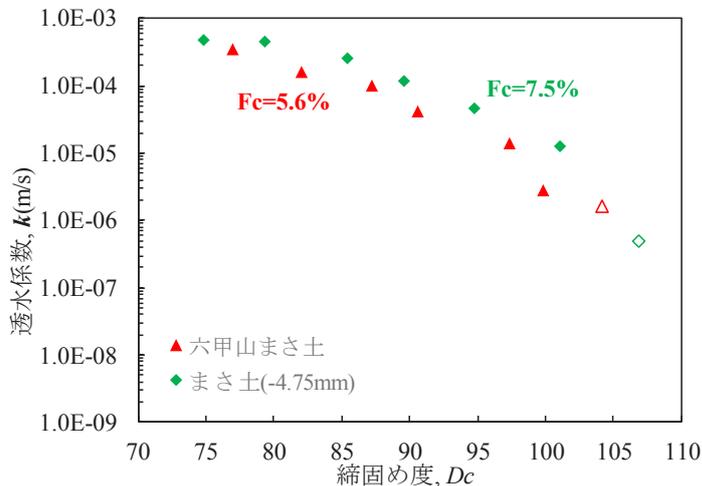


図-5 各土試料における締固め度と透水係数との関係（六甲山まさ土、まさ土）

は各土試料の細粒分含有量も示している。また、供試体作製方法の異なる $D_c=105\%$ での試験結果に関しては凡例を白抜きで示している。どの試料においても、締固め度が大きくなるほど透水係数は小さくなり、同じ締固め度であっても細粒分含有量が大きいかほど透水係数が小さくなるということが確認できる。

図-5には、細粒分含有量が近い2種類の土試料（六甲山まさ土 ($F_c=5.6\%$)、まさ土 ($F_c=7.5\%$)）で締固め度と透水係数との関係を示しているが、細粒分含有率の小さい六甲山まさ土よりも細粒分含有率の大きいまさ土のほうが、全体的にグラフ上方に位置していることが確認できる。これは、細粒分含有率の大きい試料は低い透水性を示すという、一般的によく知られた挙動から逸脱した結果となった。この原因として、まさ土は最大粒径4.75mmと粒径幅が狭く、砂分含有率72.8%と比較的分級された土であることから、粒子同士のかみ合わせが悪く、間隙径が大きくなって水の通り道となる間隙が存在したためと考えられる。なお、今回使用した土試料のような細粒分含有量の少ない土に関しては、粗粒分含有率が同じであっても粗粒分の中の礫分と砂分の割合によって締固め特性が異なることがわかっている⁷⁾。すなわち、細粒分の少ない土では礫相互の間隙を砂分が充填するため、砂分の混入量による土の透水性への影響が顕著に出る結果となった。これより、粗粒分の粒度構成や土全体の乾燥密度に着目して透水係数を把握することが有用であると考える。

図-6には、大阪層群土、六甲山まさ土、まさ土の各試料における $e-\log k$ の関係を示し、各土試料における間隙比 e と透水係数 k との関係性について検討した。図より、間隙比が大きくなるほど透水係数の増加量は徐々に減少する傾向が

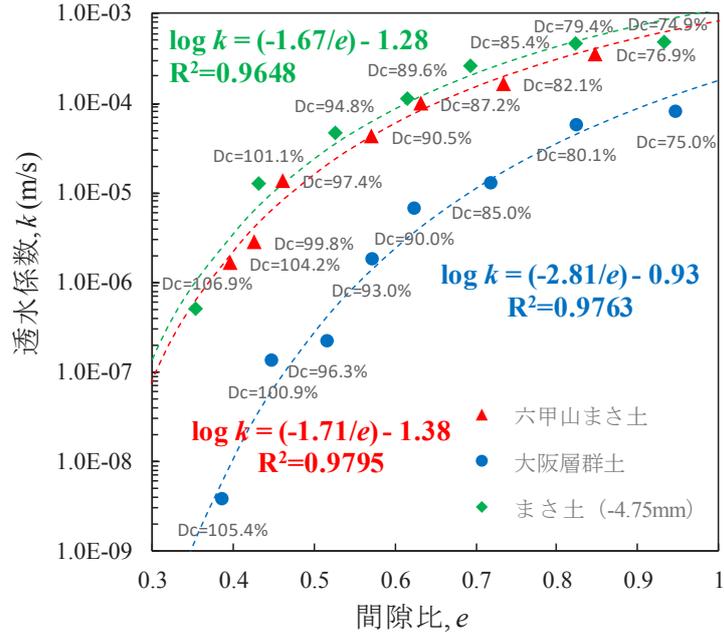


図-6 e - logk 関係 (大阪層群土、六甲山まさ土、まさ土)

確認できる。

ここで、これら3種類の土試料における e -logk 関係の回帰式は、式 (1) ~ (3) に示す通りとなった。

大阪層群土

$$\log k = -\frac{2.81}{e} - 0.93 \quad (R^2 = 0.9763) \quad (1)$$

六甲山まさ土

$$\log k = -\frac{1.71}{e} - 1.38 \quad (R^2 = 0.9795) \quad (2)$$

まさ土

$$\log k = -\frac{1.67}{e} - 1.28 \quad (R^2 = 0.9648) \quad (3)$$

なお、式中に示す R^2 は決定係数であり、どの式からも非常に高い決定係数が得られていることが確認できる。以上より、これら土試料における間隙比と透水係数との関係性は、定数 a 、 b を用いて、式 (4) のようにまとめられることがわかった。

$$\log k = \frac{a}{e} + b \quad (4)$$

ここで、各土試料での回帰式を見ると、六甲山まさ土とまさ土に関しては回帰式における定数 a 、 b の値が近いことが伺える。双方の土試料とも、細粒含有量や含有する粒子の形状が近似していることが起因しているものと考えられる。したがって、この定数 a 、 b は粒度分布や粒子形状の影響を受けることが示唆されるため、これらを定量的に評価していくことが、今後の課題と考えている。

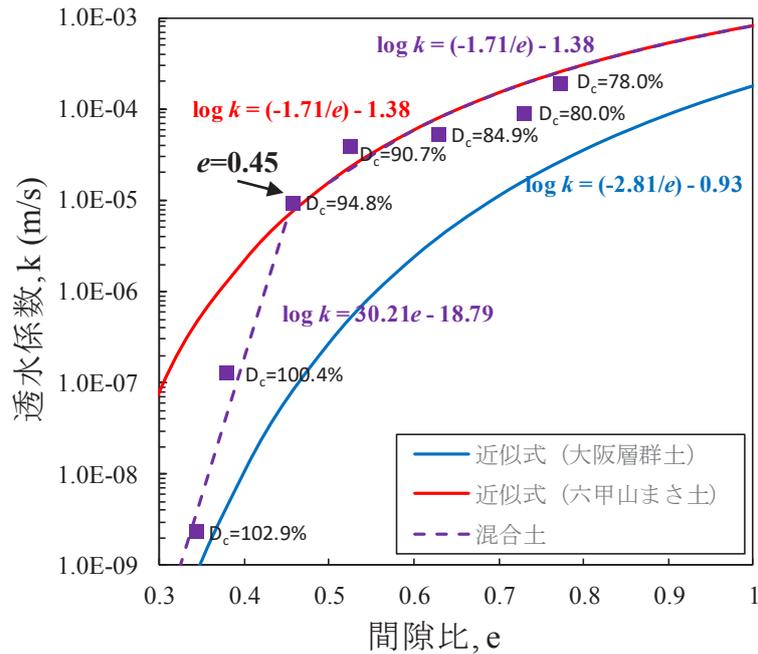


図-7 e - logk 関係 (混合土)

次に、混合土における e - $\log k$ 関係を見ると図-7 のようになり、図-6 に示す 3 試料とは異なる挙動となった。特に、締固め度 $D_c=94.8\%$ を示す間隙比 $e=0.45$ を境界に、混合土の透水性は急激に変化していることがわかる。ここで、混合土の試験結果を他の試料のように 1 つの曲線で近似するのではなく、 $D_c=94.8\%$ を境界にして近似式を分けて検討した。まず、 $D_c=78.0\% \sim 94.8\%$ と間隙比 e が大きい区間には、六甲山まさ土 (図-7 中、赤線で示す) に近い透水特性を示しており、六甲山まさ土の近似式 ($\log k = (-1.71/e) - 1.38$) が適用可能であることが示唆される。一方、 $D_c=94.8\%$ 以上 ($e \leq 0.45$) になると、徐々に大阪層群土 (図-7 中、青線で示す) に近接していくような透水特性となっており、概ね直線で近似できることがわかる ($\log k = 30.21e - 18.79$)。この「 $e=0.45$ 」前後で混合土の透水特性が変化する要因として、混合土として使用した 2 種類の母体土の土粒子がそれぞれ異なった形状をしていたためと考えている。間隙比が大きい時には、粗粒土の粗密の程度が間隙径の支配的要因となるため、六甲山まさ土に近い透水特性を示している。一方、間隙比が小さいと細粒分含有量が間隙径の支配的要因となるため、大阪層群土の透水特性に近づいていくものと思われる。以上のことから、混合土の e - $\log k$ 挙動は、間隙比が小さくなるにつれて、六甲山まさ土の透水特性から大阪層群土の透水特性に遷移したものと考えている。

本実験で使用した 4 種類の土試料では、粒子形状・粒度分布など条件が異なるため、これらの因子が透水性に与える影響を正確に評価することができていない。そのため、例えば今回用いた大阪層群土と同程度の細粒分含有率となるよう粒度調整した六甲山まさ土や、今回の六甲山まさ土と同程度の細粒分含有率となるよう粒度調整した大阪層群土に対しても、今回推定した式が適用できるかを検討する必要がある。また、異なる粒子形状をした 2 種類の母体土に対する e - $\log k$ 関係の推定手法の検討や同形状の 2 種類の母体土に対する e - $\log k$ 関係の推定なども検討する必要がある。

次に、これら 4 種類の土試料を盛土材とした際に、盛土を所定の締固め度で施工した場合に宙水が形成する可能性があるかを検討した。検討にあたり、深田ら⁸⁾の研究結果を参考にして、透水係数が $k=10^{-7} \sim 10^{-8}(\text{m/s})$ の土層を難透水層、 $k=10^{-5}(\text{m/s})$ 以上の土層を帯水層とした。また、締固め度の観点から現実的な間隙比の範疇において、難透水層となりうる間隙比の値と、帯水層となりうる間隙比の値の双方が存在する場合には宙水を形成する可能性がある盛土材料と判断した。

図-8 に今回判定に使用した条件をまとめた図を示す。これより、宙水を形成する可能性がある盛土材料は大阪層群土と混合土の 2 種類となることが伺える。なお、六甲山まさ土とまさ土は当該条件では間隙比 $e < 0.3$ の区間で難透水層となりうるが、その場合にかかなりの締固め度を有する必要があるために施工上現実的でない判断し、考慮していない。

大阪層群土において、透水係数が $k=10^{-7}\sim 10^{-8}$ (m/s)の難透水層となる間隙比 e の値は、式 (1) を用いると $e=0.39\sim 0.46$ の範囲と推定される。当該試料の土粒子密度および締固め試験時の最大乾燥密度は、表-1 よりそれぞれ、 $\rho_s=2.66(\text{g}/\text{cm}^3)$ 、 $\rho_{d \text{ max}}=1.82(\text{g}/\text{cm}^3)$ であるため、計算上では $D_c=99.8\%\sim 104.6\%$ の範囲に対応することがわかる。同様に、 $k=10^{-5}(\text{m}/\text{s})$ 以上の帯水層となる間隙比 e の値は $e<0.69$ の範囲と想定されるため、 $D_c=86.5\%$ 以下の範囲に対応することがわかる。したがって、盛土内の密度深度分布を計測し、 $D_c=99.8\%\sim 104.6\%$ の範囲と $D_c=86.5\%$ 以下の範囲の双方が盛土内に存在した場合には、その境界付近にて宙水を形成する可能性があるとして示唆される。

なお、混合土においても大阪層群土と同様の手法で考えていくと、難透水層形成のための締固め度の範囲が $D_c=99.5\%\sim 102.1\%$ となり、帯水層形成のための締固め度は $D_c=94.0\%$ 以下となるため、このような締固め度が盛土内に存在していた場合には、大阪層群土同様に、その境界付近で宙水を形成する可能性があるとして示唆される。

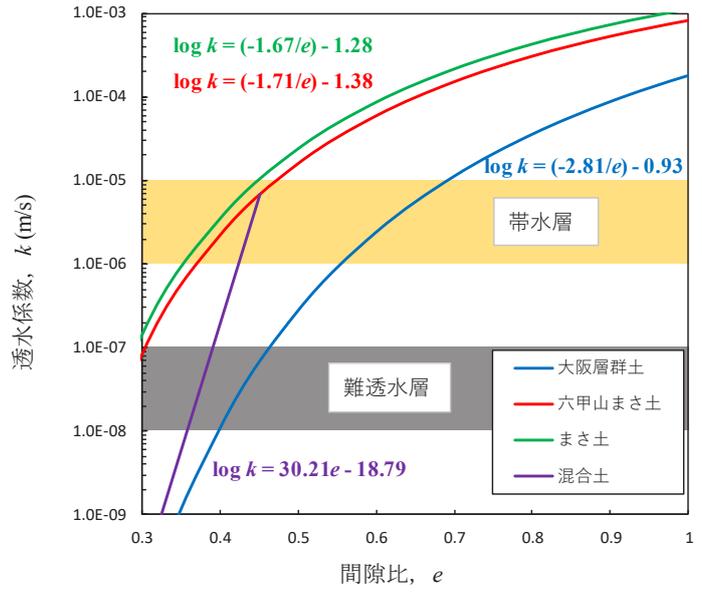


図-8 宙水形成可能性の有無を判定するのに使用した図

3. 通水試験による宙水発生の有無の検討

3. 1 使用した土試料と試験方法

前節で示した室内透水試験の結果から、盛土内における宙水の発生と、締固め度および透水係数との関係性について詳細に見ることができた。ここでは、宙水が発生するような不連続面を要する円筒供試体を作製した上で、降雨を想定した一定量の水を供給した場合における宙水発生の有無を、含水比の分布から検討してみた。

当該試験で使用した土試料は、兵庫県内より採取した建設残土2種（以下、建設残土A、Bと示す）である。各試料の粒径加積曲線および締固め曲線は図-9および図-10に示す通りであり、粒径加積曲線から各土試料の細粒分含有量は、建設残土Aが $F_c=21.2\%$ に対して建設残土Bは $F_c=37.5\%$ と高いことが伺える。

写真-4に通水試験の様子を、図-11に試験供試体の作製条件を示す。通水試験は高さ60cm、内径10cmの円筒容器内に透水係数が3層構造（図-13中、「第1、2、3層目」と示す）となるように、供試体を作製した。なお、供試体作製時は4cmごとに静的締固めを行って密度を調整しており、締固めの層境界では下部層を十分にほぐした後に上部層

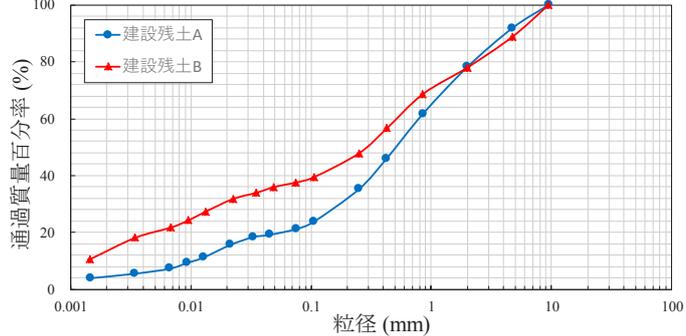


図-9 粒径加積曲線

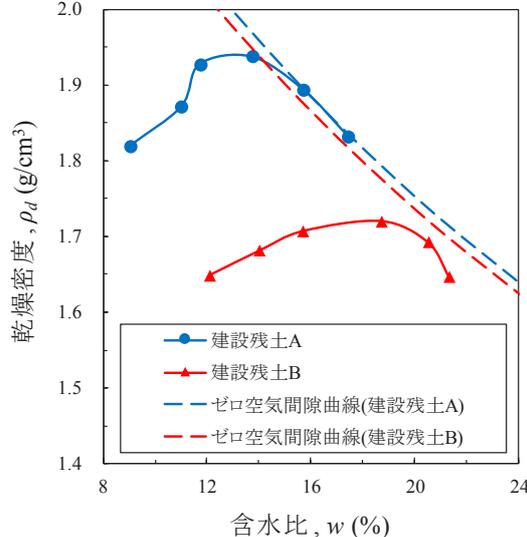


図-10 締固め曲線



写真-4 通水試験時の様子

の土を入れて締固めた。注水は円筒容器上部より霧吹きを用いて実施し、注水後は上下端面ともに非排水状態として7日間静置させた。

当該試験に用いた試料に関しては、前節同様に透水試験を行っており、建設残土 A、B ともに図-12 に示す e - $\log k$ 関係が確認できている。各試料の近似式（建設残土 A : $\log k = -2.22/e - 1.04$ 、建設残土 B : $\log k = -3.46/e - 0.53$ ）および深田ら⁸⁾が示す宙水発生条件をもとに透水係数が2オーダーずつ異なるような3層構造の円柱供試体を作製した。なお、透水係数 $k=10^{-4}$ m/sec および $k=10^{-6}$ m/sec の供試体は建設残土 A を用いて作製し、 $k=10^{-8}$ m/sec の供試体は建設残土 B を用いた。

本試験では、盛土施工時の含水比状況により、内部に浸透した水の挙動（＝宙水発生の有無）が異なるであろうことを想定し、第2層目の初期含水比を、建設残土 A の最適含水比 $w_{opt}=13\%$ から前後に3%変化させた3つのケース（ $w=10, 13, 16\%$ ）で実験を行った。注水量は120mlとし、養生後に供試体を解体して上部より2cmごとに含水比を計測することで、内部の含水分布を確認した。

3. 2 試験結果および考察

試験結果を図-13 に示す。なお、図中には各々の実験における初期含水比を破線で示しており、図中の含水比（ $w=10, 13, 16\%$ ）は第2層目の初期含水比を示したものである。まず初期含水比が $w=10\%$ のケースを見ると、2層目下部（円筒容器底部からの高さが12cm）まで含水比分布が一樣となっており、宙水の発生が確認できていないことが伺える。一方、 $w=13\%$ のケースでは第1層目下部に、 $w=16\%$ のケースでは第1層目の中間部から第2層目との境界までにかけて $w=16\sim 19\%$ と含水比が増加している深度が確認できており、供試体内部に宙水が発生していることが伺える。ここで $w=16\%$ のケースにおいて、比較的広い範囲で宙水の発生が確認できた原因としては、上部からの水の浸透に加え第2層

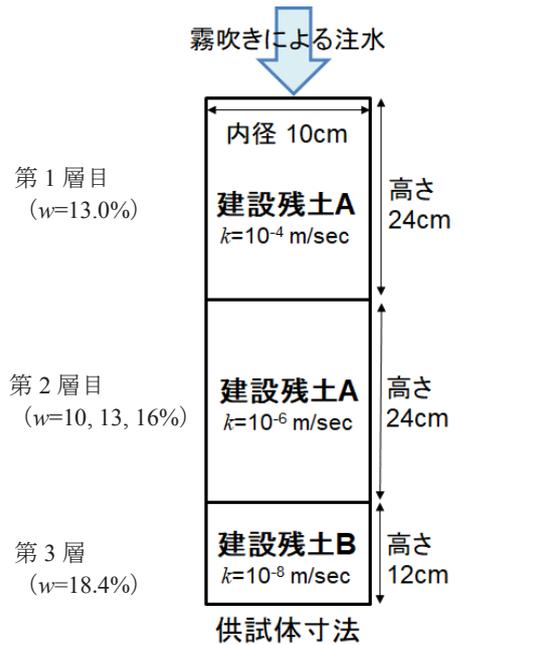


図-11 試験条件（供試体寸法と各層の透水係数）

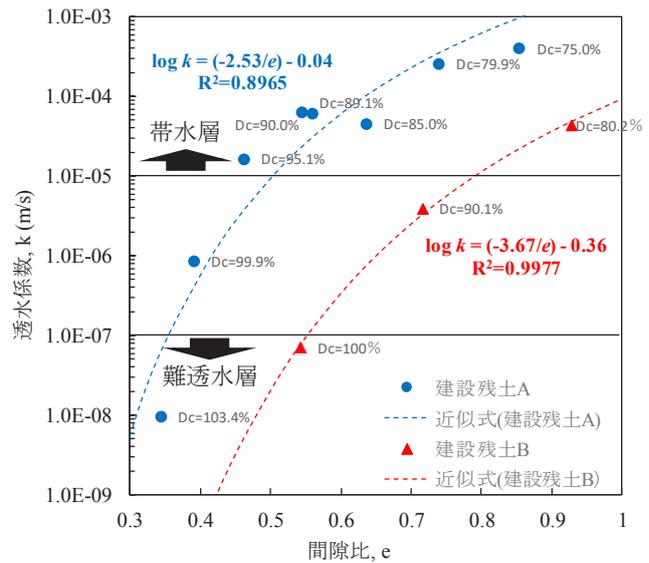


図-12 e - $\log k$ 関係（建設残土 A、B）

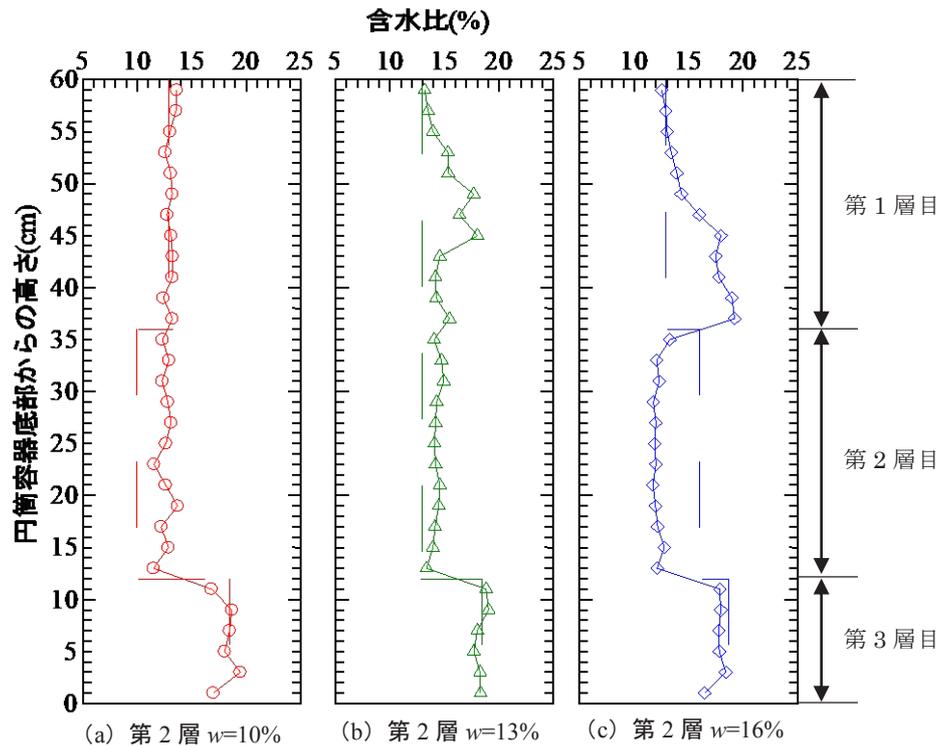


図-13 注水試験結果（深度方向における含水比の分布）

目の初期含水比が第1層目よりも高いことから、下部から上部への吸水も相まって宙水発生箇所が広範囲になったものと思われる。以上より、盛土内部の宙水発生には施工時の材料の含水比状態も影響因子として考慮する必要があり、初期含水比が盛土材料の最適含水比以上となっている場合にはより宙水が発生しやすい可能性が示唆された。なお、今回の試験は養生期間が7日間であるが、実盛土内での宙水を想定すると、降雨（給水）後の期間を長期とすることで内部の含水状況がどのように変化するか、さらに動水勾配による影響等も検討する必要があり、今後の課題と考えている。

4. おわりに

本研究では、多様な土試料を対象に室内透水試験を実施し、盛土材料の粒度や締固め度が透水特性にどのような影響を与えるかの検討を行った。さらに、宙水が発生するような透水係数の異なる不連続面を要した供試体にて通水試験を実施し、宙水発生についての検討を行った。

得られた知見は以下の通りである。

- 1) 今回使用した土試料の粒度範囲においては、締固め度が大きくなるほど透水係数は小さくなり、同じ締固め度であっても細粒分含有量が大きいほど透水係数が小さくなることを確認した。
- 2) 土試料の間隙比と透水係数の間には相関があり、 $e\text{-log}k$ 関係式で近似することが可能であることがわかった。これより、盛土材として使用する土試料の物性を予め検討することで、宙水形成の可能性が高い盛土材料か否かを事前に判定できる可能性が示唆された。
- 3) 盛土材の初期含水比は、同じ透水係数を要していても内部の含水比分布によっては水の浸透状況が異なるため、宙水の発生有無に大きく影響することを確認した。なお、観測期間や動水勾配による含水比分布の影響に関しては今後の課題と考えている。

今回得られた結果をもとに、今後は実大スケールにて試験盛土を施工していることを計画しており、長期計測することで宙水が発生する盛土条件について詳細に検証を進めていく予定である。

謝 辞

本研究の一部は、令和3年度建設工学研究所一般研究助成によって実施したものである。また、透水試験に関する実験の協力を山本眞暉氏（京都大学大学院工学研究科）に、通水試験に関する実験の協力を中村洋斗氏（神戸大学工学研究科）に各々いただいた。ここに感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 沖村孝, 二木幹夫, 岡本敦, 南部光弘: 兵庫県南部地震による宅地地盤被害と各種要因との関係分析, 土木学会論文集, No.623/IV-43, pp.259-270, 1999
- 2) 平山淳基, 常田賢一, 秋田剛: 地下水位による道路盛土の安定性に及ぼす影響の定量的評価, 第46回地盤工学研究発表会, pp.1133-1134, 2011
- 3) 藤岡一頼, 横田聖哉, 日下寛彦, 広瀬剛: 東北地方太平洋沖地震における高速道路盛土の被害分析, 日本地震工学会論文集 第16巻, 第1号(特集号), pp.285-308, 2016
- 4) 片岡沙都紀, 澁谷啓, 肥後陽介, 野並賢: 盛土内宙水の形成メカニズムに関する事例研究, 建設工学研究所論文集第63号, pp.1-10, 2021
- 5) 肥後陽介, 南野佑貴, 加藤亮輔, 片岡沙都紀, 甲斐誠士: 道路盛土内の宙水の原位置調査および再現解析, Kansai Geo-Symposium 2016-地下水地盤環境・防災・計測技術に関するシンポジウム論文集-, pp.183-188, 2016
- 6) 公益社団法人地盤工学会: 土質試験基本と手引き, 丸善出版, pp.91-98, 2019
- 7) 久楽勝行, 三木博史, 関一雄: 締め固めた礫まじり土の工学的性質に関する実験的研究, 土と基礎 Vol.31, No.2, pp.39-45, 1983
- 8) 深田竜司, 肥後陽介, 片岡沙都紀, 大竹雄, 南野佑貴, 加藤亮輔: 不均質性を考慮した降雨による盛土内宙水の発生条件に関する研究, 第52回地盤工学発表会, pp.1057-1058, 2017

著 者

片岡 沙都紀	研究員 (非常勤), 博士 (工学), 地盤工学
瀬古 一樹	神戸大学大学院生, 学士 (工学)
友近 温人	神戸大学大学院生, 学士 (工学)
澁谷 啓	所員, 博士 (工学), Ph. D., 地盤工学