【建設工学研究所論文報告集第 66 号〔論文〕2024 年 11 月】

盛土材料の水分保持特性を考慮した
盛土内「宙水」の形成条件の解明に向けた解析的検討

Analytical Study to Identify the Factors that Form “Perched Water” in Embankment Considering Water Retention Characteristics of Embankment Materials

山 本 眞 暉　　齋 藤 雅 彦　　澁 谷 啓
Masaki Yamamoto　　Masahiko Saito　　Satoru Shibuya

１．はじめに

近年，盛土法面に発生した湧水によって法面の表層崩壊が発生した事例が報告されており [1)-3)]，この原因として盛土内部に形成された「宙水」の影響が指摘されている．宙水とは，「局所的に存在する難透水層の上にレンズ状にたまった地下水 [4)]」または「不圧地下水の一種．地表からの浸透水が比較的浅い地層中の，泥質のはさみ層などの上に捕捉されたもの．（中略）不圧地下水本体（本水）との間に不飽和体が存在することが特徴．（以下略）[5)]」と定義される高飽和度領域を指す．宙水は本水と分離して存在することから，従来の地下水位低下工法による排水が難しく，盛土の性能を低下させる要因の一つとなっている．宙水が形成された盛土の維持管理手法を検討する上で，宙水の形成メカニズムを把握することは重要であるが，宙水の形成条件については未解明のことが多く，当該研究分野は基礎研究の段階にある．

不飽和降雨浸透解析によって宙水の発生条件を調べた研究 [6),7)]では，透水係数の異なる層が重なって存在する場合，上層と下層の透水係数の平均値が 1.0×10^{-7}(m/s)オーダー以下で，かつ下層の透水係数が上層の 1000 分の 1 から 100 分の 1 程度である場合，透水係数の小さい層が下方への水の浸透を妨げ，宙水が形成され得ることを述べている．また，透水係数の異なる層を有する供試体を用いて通水試験を行った事例 [8)]では，上端面から供試体に水を供給して養生すると，透水係数の不連続面直上の含水比が局所的に大きくなったことが確認され，宙水が形成されたと解釈している．

こうした先行研究の知見から，宙水の形成要因の一つに透水係数の不連続性が含まれることは明らかである．一方で，土の水分保持特性（以下，保水性と表記）も土中の浸透現象に密接にかかわる重要な性質であり，宙水の形成と何らかの関係があると考えられる．しかし，盛土材料の保水性が宙水の形成に及ぼす影響について検討された事例は，著者らの知り得る限り存在しない．宙水は不飽和状態における盛土の内部に局所的に飽和領域が形成される現象であり，宙水の形成条件を解明する上で，不飽和土の特性を考慮した検討は不可欠である．

本研究では，細粒分含有率を変えた異なる保水性を有する 3 種類の試料を対象に，締固め度を変えて保水性試験を実施して種々の水分特性曲線を得た．また，得られた水分特性曲線を適用した 1 次元飽和－不飽和浸透流解析を実施し，盛土材料の保水性が宙水の形成に及ぼす影響を調べた．一連の解析結果を踏まえ，盛土内宙水の形成条件を解明するために今後必要な検討事項を示し，当該研究分野における展望を示した．

２．保水性試験

２．１．供試体の作製方法と試験方法

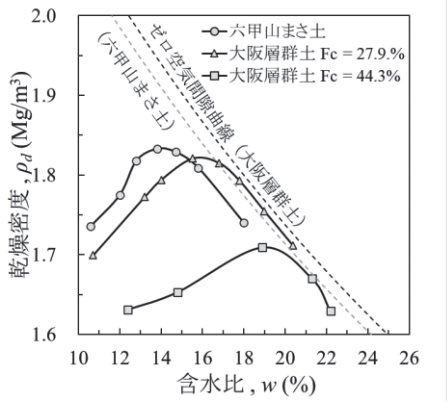
本研究では，異なる保水性を有する試料の水分特性曲線を得るため，それぞれ細粒分含有率F_cの異なる，六甲山まさ土（F_c = 5.6%）と大阪層群土（F_c = 27.9，44.3%）を用いて保水性試験を行った．六甲山まさ土は，六甲山の複数の斜

面崩壊地より採取した崩土を混合攪拌したものである．また，大阪層群土は宙水が発生した盛土から複数回にわたって採取しており，異なる 2 地点から採取した試料群を 9.5 ㎜ふるいにかけて得た試料である．試料の物性値を表－１に，締固め曲線と粒径加積曲線を図－１および図－２にそれぞれ示す．

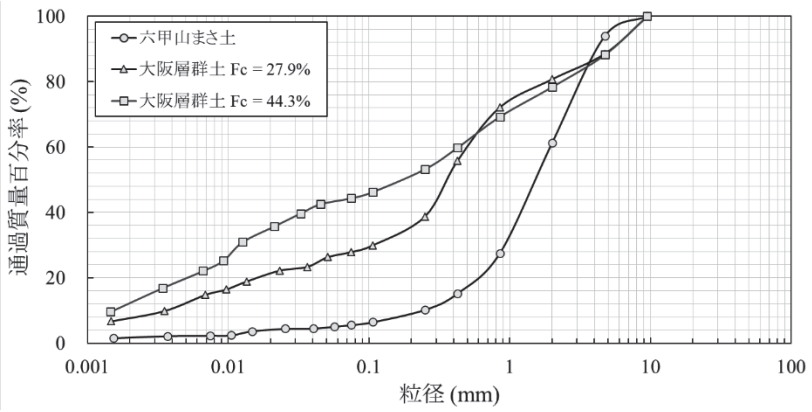
これらの試料を用いて，締固め度D_c = 80，90%の条件下で保水性試験を実施した．なお今回の試験では，3 種類の試料それぞれに 2 ケースの締固め度の条件で試験を行うため，効率性を重視し，保水性試験の中で最も簡易的である吸引法（土柱法）を採用した[9),10)]．土柱の容器には，内径 61 ㎜，高さ 50 ㎜のアクリルパイプを 12 段に積み重ね，それをビニルテープで留めて 600 ㎜の高さにしたものを用いた．この容器に，最適含水比に調整した試料を所定の締固め度（D_c = 80，90%）が得られるよう計量して投入し，1 層を 25 ㎜として 24 層に分けて締固めた．土柱の下端部はろ紙とネットを用いて供試体を押さえ，試料の流出を防いだ．また供試体上端面の乾燥を防ぐため，土柱の上端部を密閉しないようにラップで覆い，排気条件下で湿潤空気に触れている状態とした．この土柱を，水を張った 2 重底構造の容器に入れ，下端から 100 ㎜を大気圧下で水浸させて供試体に水を供給した．既往の研究事例[11),12)]を参考に，2 週間で十分平衡状態に至ると仮定し，水浸後 2 週間が経過した供試体について，100 ㎜間隔で含水比を測定した．

表－１　物性値

物性	六甲山まさ土	大阪層群土	
		F_c = 27.9%	F_c = 44.3%
最大乾燥密度（Mg/m³）	1.833	1.822	1.709
土粒子密度（Mg/m³）	2.606	2.662	2.662
最適含水比（%）	13.8	15.8	18.9
最大粒径（㎜）	9.5	9.5	9.5
細粒分含有率（%）	5.6	27.9	44.3



図－１　締固め曲線



図－２　粒径加積曲線

２．２．水分特性曲線の求め方

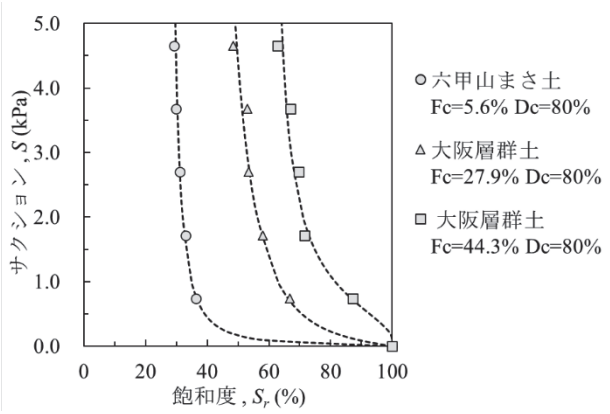
含水比を測定した箇所の飽和度を算出し，その位置に作用するサクションと対応させて，飽和度～サクション関係を得た．なお，サクションは含水比測定位置と自由水面間の距離に対応して，水の比重を 1 として 1(H$_2$Om) = 9.807(kPa)を基準に算出した．この関係について，式(1)に示す van Genuchten 式[13)]（VG 式）を用いて回帰曲線を求め，水分特性曲線を得た．なお，サクションが 0 を示す点の飽和度はS_r = 100%となるように回帰している．

$$S_e = \frac{S_r - S_{rR}}{1 - S_{rR}} = \{1 + (\alpha\Psi_c)^n\}^{-m} \tag{1}$$

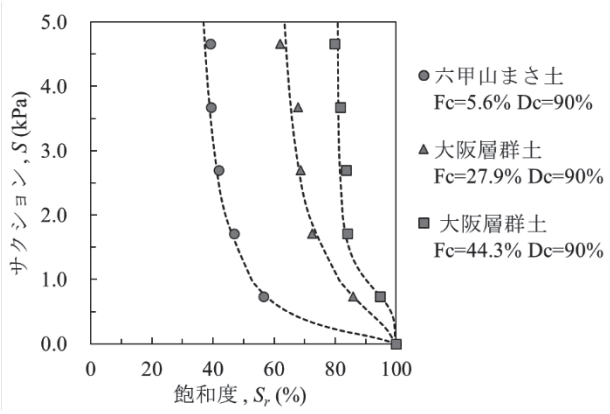
ここで，S_e：有効飽和度(%)，S_r：飽和度(%)，S_{rR}：残留飽和度(%)，Ψ_c：マトリックポテンシャル(kPa)，α, n, m：フィッティングパラメータ（VG パラメータ）である．VG パラメータの同定には，Seki *et al.* によって公開されている SWRC Fit[14),15)]を用いた．得られた水分特性曲線について，D_c = 80%と 90%に対応するものをそれぞれ図－３と図－４に示し，

対応するVGパラメータを表－２に示す．

各水分特性曲線において，作用するサクションが同程度でも細粒分含有率が高いケースほどそれに対応する飽和度は大きく，細粒分含有率の大きい試料ほど大きな保水性を示すという一般通念に整合する傾向が得られた．また，同じ細粒分含有率で締固め度が異なる水分特性曲線同士を比較すると，締固め度がD_c = 90%のケースの方がD_c = 80%のケースよりも大きな保水性を示すことは明らかで，密な試料ほど大きな保水性を示すという一般的な傾向が確認できた．



図－３　水分特性曲線（D_c = 80%）



図－４　水分特性曲線（D_c = 90%）

表－２　試験ケースごとのVGパラメータ

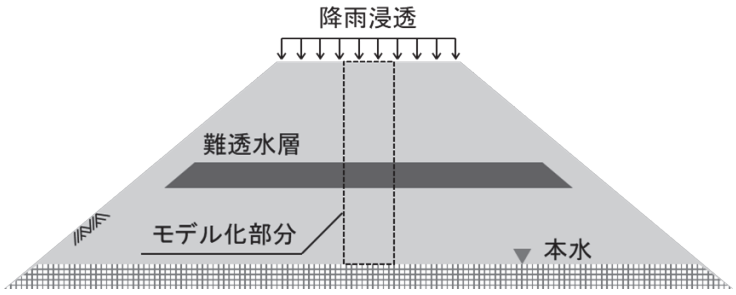
試験ケース	残留飽和度 (%)	α	n
六甲山まさ土 (F_c = 5.6%, D_c = 80%)	26.2	40.135	1.5807
六甲山まさ土 (F_c = 5.6%, D_c = 90%)	27.5	5.4415	1.6175
大阪層群土 (F_c = 27.9%, D_c = 80%)	25.9	9.6088	1.2975
大阪層群土 (F_c = 27.9%, D_c = 90%)	57.2	1.4772	1.9417
大阪層群土 (F_c = 44.3%, D_c = 80%)	60.5	1.4588	2.1966
大阪層群土 (F_c = 44.3%, D_c = 90%)	80.8	1.1291	3.9099

３．１次元飽和－不飽和浸透流解析

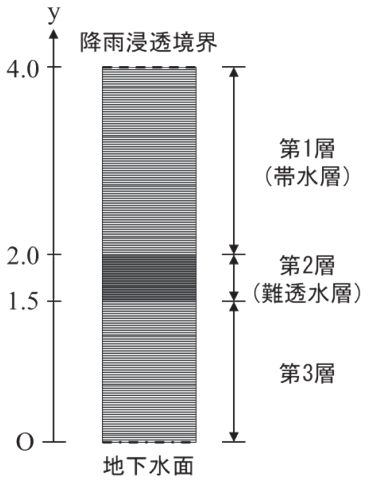
３．１．解析手法

盛土内「宙水」が形成される要因として，降雨や地山背面からの浸透水など様々なものが挙げられるが，本研究では降雨によって宙水が形成されるケースを対象とした．均質な盛土の内部に１層の難透水層が存在する状況（図－５）を想定し，盛土天端から浸透した降雨が本水に合流する前に難透水層に捕捉される挙動を再現することを目的とした．盛土中央部においては天端から浸透した水は鉛直方向に浸透すると仮定し，図－５に点線部で示す領域をモデル化して，1次元飽和－不飽和浸透流解析を実施した．

浸透流解析には有限要素法を用い，図－６に示す 1×160 のメッシュで区切られたモデルに，所定の間隙率，透水係数，保水性（VGパラメータ）を設定して実施した．図－６は全長4.0 mの一次元地盤のモデルで，第１層～第３層の３層構造とした．このモデルの第２層は難透水層を模擬しており，第１層と第３層よりも小さい透水係数を与えた．また第２層は第１層と第３層よりも透水係数が小さい密な層であると仮定し，保水性の密度依存性を考慮してVGパラメータを設定した．また第１層は宙水が形成される帯水層を模擬し，第３層は宙水と本水の間に存在する不飽和帯と位置付けた．



図－５　本解析におけるモデルの部分



図－６　解析に用いたメッシュ

この解析は第 1 層に宙水が形成されることを予期して実施したが，形成される宙水の厚さをある程度定性的に評価する上では，宙水の直上が不飽和領域となることが望ましい．先行研究[2)]で観測された宙水の厚さが 1.0 m ほどであったことから，本解析モデルの第 1 層の厚さは，宙水の直上に十分な厚さの不飽和領域ができることを期待して 2.0 m とした．また，この事例[2)]では宙水の直下に透水係数が 1.0×10^{-8}(m/s)オーダーの層が深度方向に 0.5 m 程度分布していたことから，難透水層を模擬した第 2 層の厚さは 0.5 m に設定した．宙水と本水の間には不飽和領域が位置することから，第 2 層から排水された水が地下水面に至るまでに通過する十分な長さとして，第 3 層の厚さを 1.5 m とした．

本研究の解析は，既往の飽和－不飽和浸透流の解析手法[16)]に基づいており，支配方程式は Richards の式[17)]を拡張した式(2)とした．

$$(C(\Psi)+\beta S_s)\frac{\partial \Psi}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial z}\left[k_r(\theta)k_s\left(\frac{\partial \Psi}{\partial z}+1\right)\right] \qquad (2)$$

$$\beta=\begin{cases}0\text{: 不飽和領域}\\1\text{: 飽和領域}\end{cases}$$

Ψ：毛管ポテンシャル，S_s：比貯留量，θ：体積含水率，$k_r(\theta)$：比透水係数，k_s：飽和透水係数，$C(\Psi)$：比水分容量である．ただし，ここでは地盤の圧縮性を考慮しないため，比貯留量S_sは 0 とした．不飽和領域における透水係数の飽和度依存性は，式(1)の VG 式と，式(3)に示す Mualem 式[18)]から不飽和透水係数k_uを求めることで考慮している．

$$k_r(\theta)=\frac{k_u}{k_s}={S_e}^{0.5}\left[1-\left(1-{S_e}^{1/m}\right)^m\right]^2 \qquad (3)$$

３．２．解析条件

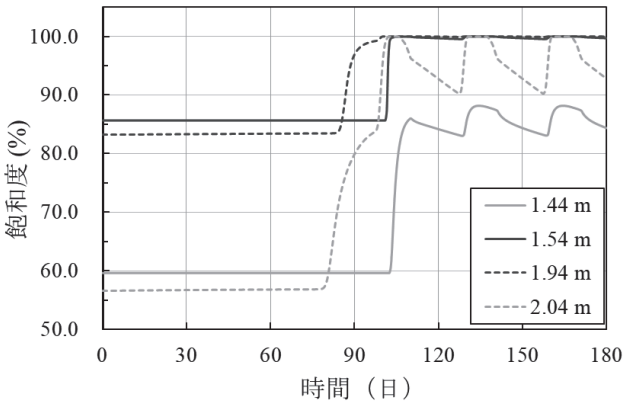
本研究で用いたモデルは，盛土天端から降雨が浸透する挙動を再現するため上端面を降雨浸透境界とした．宙水の形成は降雨強度や降雨の頻度にも影響を受けると考えられるが，本研究では簡単のため，浸透流解析で入力する降雨強度は我が国の平均年間降水量に基づき 2.0(mm/h)に設定した．

日本の年間平均降水量は 1718(mm)であり[19)]，この値を 12 で除すると月平均降水量 142.3(mm/month)が得られる．この降水量が 3 日間で降ったと仮定し，この値を 72 で除すると時間降水量 1.98(mm/h)が得られ，本研究の解析ではこれに近い 2.0(mm/h)を降雨強度に設定した．本解析では，2.0(mm/h)の降雨を 72 時間与え，その後 27 日間の無降雨期間を与えることを 1 サイクルとした．各サイクルにおける 30 日目の飽和度分布が，その一つ前のサイクルの 30 日目の分布に一致したとき，以降の解析サイクルではモデル内の飽和度分布が定常変化をするものとして解析を終了した．図－７に飽和度推移の一例を示すが，このケースでは 5 サイクル目（解析日数 121～150 日）と 6 サイクル目（解析日数 151～180 日）の飽和度推移の波形が一致したため，解析日数 180 日で解析を終了している．なお，透水係数や保水性の条件

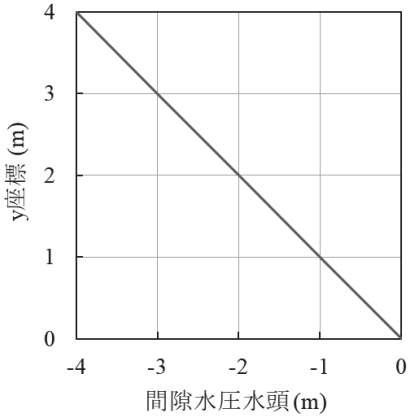
の違いに起因して，定常変化に至るまでの解析日数が異なっている．

難透水層から鉛直下方に排水された水は，宙水直下の不飽和領域を通過して本水に合流する．本解析は盛土天端から浸透した水が難透水層に捕捉される現象に焦点を当て，盛土側面からの本水の排水は良好であることを前提とする．この場合，降雨浸透に伴う第 3 層内の地下水面の変動は限定的となるため考慮せず，モデル下端を地下水面と仮定してΨ = 0 m（=大気圧）とした．また，間隙水圧の初期値は動水勾配が生じないよう図－８のように設定した．

実現象においては降雨の浸透によって本水の地下水面が上下し，それに伴い盛土内の動水勾配が変化する．特に，本水の地下水面が上昇すると第 3 層内の鉛直方向の動水勾配が下がり，下方への排水が鈍化して宙水が形成されやすくなることが考えられる．本研究では盛土材料の保水性が宙水の形成に及ぼす影響に焦点を当てているため，本水が宙水の形成に及ぼす影響を排除した検討を行った．本水の地下水面の上下変動や，宙水と本水の距離（図－６，第 3 層の長さ）が宙水の形成に与える影響については今後の課題としたい．



図－７　モデル内の飽和度推移の一例



図－８　間隙水圧の初期条件

３．３．透水係数と保水性の条件

各層に与える透水係数と保水性のパラメータの条件を表－３に示す．保水性の違いは締固め度と細粒分含有率で整理し，これらの条件に一致する表－２の VG パラメータを設定した．また飽和度を算定するために間隙率を設定しているが，これは表－１に示す最大乾燥密度，土粒子密度と，表－３に示す締固め度から算出している．

Case 1～3 では，帯水層の保水性が宙水の形成に及ぼす影響を検討するため，それぞれ第 1 層～第 3 層に与える透水係数を Case 1～3 で同じ値とし，各ケースで大中小異なる保水性を示す VG パラメータを設定した．ここでは宙水が発生した盛土の調査事例[2)]を参考に，宙水が形成された層の透水係数 k = 5.00×10^{-6}(m/s)を第 1 層と第 3 層に与え，宙水の直下に位置していた局所的に密度の大きい層の透水係数 k = 6.88×10^{-8}(m/s)を第 2 層に設定し，モデル中央部に難透水層が存在する状況を再現した．

Case 4～9 では，宙水の形成において保水性と透水係数のどちらがより支配的であるかを検討することを目的に，保水性を同じくして異なる透水係数を与えたときの解析結果を比較した．Case4, 6, 8 では，保水性試験に用いた供試体の細粒分含有率と間隙比から，式(4)に示す細粒分含有率～間隙比～透水係数の関係[20)]を用いて推定した透水係数を各層に設定した．一方 Case5, 7, 9 では，Case4, 6, 8 の透水係数を 10^{-2} 倍した値を透水係数に設定した．

$$\log k = \frac{-\left(0.0013{F_c}^2 + 1.6327\right)}{e} + (0.0314F_c - 1.7080) \tag{4}$$

また各層の保水性に関するパラメータには，表 1 に示す細粒分含有率がF_c = 5.6, 27.9, 44.3%かつ締固め度がD_c = 80, 90%の場合の計 6 種類の VG パラメータを適宜与えた．なお，いずれのケースも第 1 層と第 3 層はD_c = 80%，第 2 層はD_c = 90%に対応する VG パラメータを与えている．

表－３　解析条件

解析ケース	層	締固め度 (%)	間隙率 (%)	透水係数 (m/s)	細粒分含有率 (%)	解析日数 (日)
Case1	第１層	80	48.6	5.00×10^{-6}	44.3	180
	第２層	90	42.2	6.80×10^{-8}		
	第３層	80	48.6	5.00×10^{-6}		
Case2	第１層	80	45.2	5.00×10^{-6}	27.9	180
	第２層	90	38.4	6.80×10^{-8}		
	第３層	80	45.2	5.00×10^{-6}		
Case3	第１層	80	43.7	5.00×10^{-6}	5.6	240
	第２層	90	36.7	6.80×10^{-8}		
	第３層	80	43.7	5.00×10^{-6}		
Case4	第１層	80	48.6	1.84×10^{-5}	44.3	90
	第２層	90	42.2	9.11×10^{-7}		
	第３層	80	48.6	1.84×10^{-5}		
Case5	第１層	80	48.6	1.84×10^{-7}	44.3	240
	第２層	90	42.2	9.11×10^{-9}		
	第３層	80	48.6	1.84×10^{-7}		
Case6	第１層	80	45.2	9.25×10^{-5}	27.9	90
	第２層	90	38.4	8.38×10^{-6}		
	第３層	80	45.2	9.25×10^{-5}		
Case7	第１層	80	45.2	9.25×10^{-7}	27.9	240
	第２層	90	38.4	8.38×10^{-8}		
	第３層	80	45.2	9.25×10^{-7}		
Case8	第１層	80	43.7	2.06×10^{-4}	5.6	90
	第２層	90	36.7	3.82×10^{-5}		
	第３層	80	43.7	2.06×10^{-4}		
Case9	第１層	80	43.7	2.06×10^{-6}	5.6	300
	第２層	90	36.7	3.82×10^{-7}		
	第３層	80	43.7	2.06×10^{-6}		

４．解析結果と考察

４．１．解析結果の解釈

宙水は「局所的に存在する難透水層の上にレンズ状にたまった地下水[4)]」と定義されている．本研究の解析モデルにおいては，第２層の直上に間隙水圧が静水圧分布となり動水勾配が生じていない飽和領域が形成された状態が，難透水層の上に地下水が「たまっている状態」に相当すると考えられ，宙水が形成されたと解釈する．これにより，浸透に伴って一時的に飽和状態となっている領域と宙水を区別した．

解析結果はモデル中の飽和度分布と間隙水圧分布で整理し，飽和領域の厚さが最大を示したとき，または第２層の直上（y = 2.0125）の飽和度が最大値を示した時点の結果について考察する．

４．２．帯水層の保水性の影響

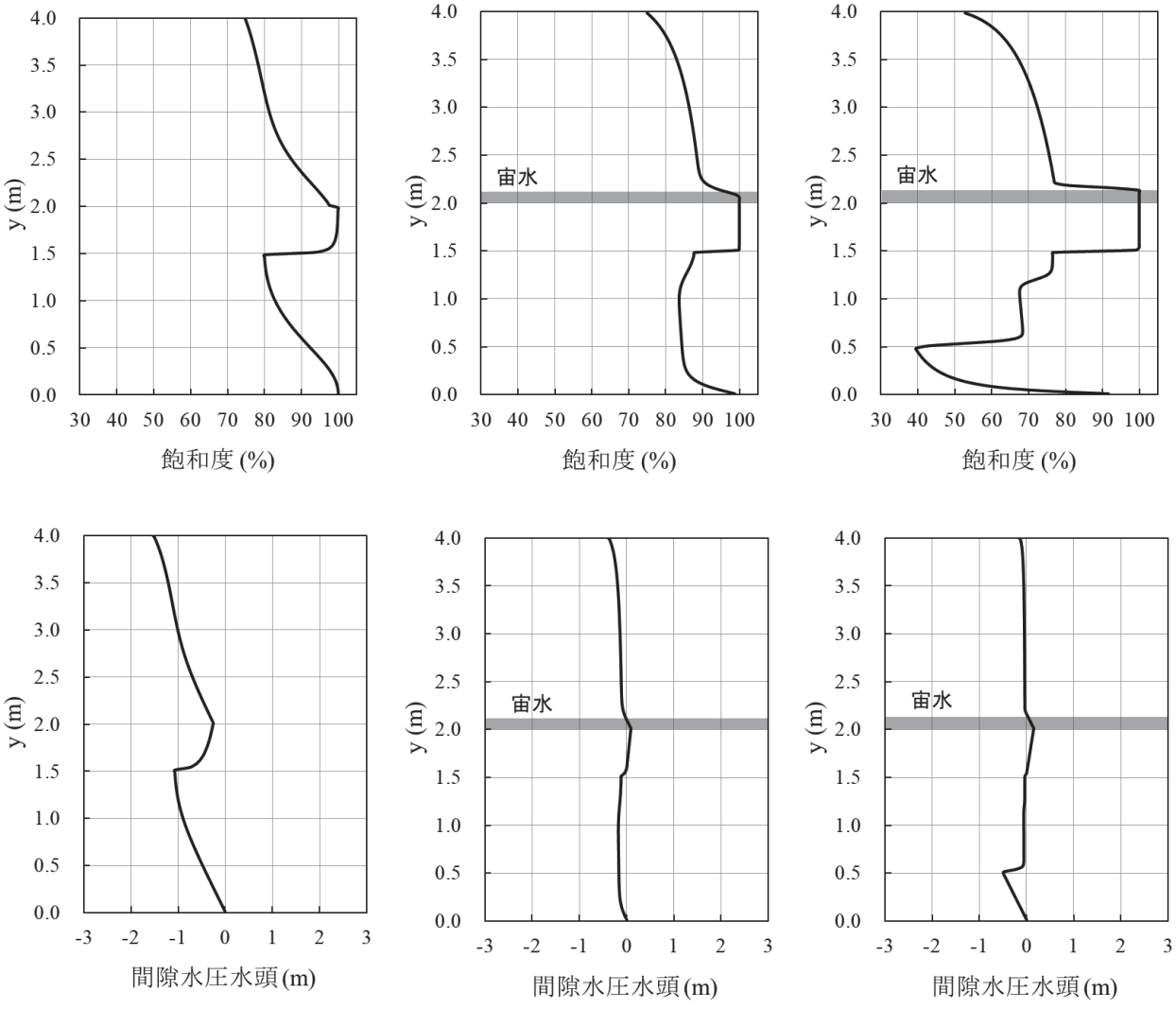
Case 1～3 の解析結果における飽和度分布と間隙水圧分布を図－９～図－１１に示す．また，静水圧分布が生じている領域を「宙水」として網掛け部で示している．なお，ここで示している飽和度分布および間隙水圧分布はそれぞれ，129 日目，162 日目，220 日目である．すべてのケースで第２層の飽和度が一時的に大きくなったものの，Case 1 では第１層内に飽和領域は形成されなかった．一方，Case 2,3 では第１層および第２層に飽和領域が形成され，第２層の直上

に静水圧分布が生じたため，宙水が形成されたと解釈できる．

Case 1 は Case 1～3 の中で最も保水性が大きく，降雨浸透境界から侵入した水が第 2 層へ至るまでにかかる時間が最も長い．Case 1 では 180 日間で 6 度の降雨が与えられているが，降雨期間に浸透した水が第 2 層に至り，また次の降雨が第 2 層に至るまでの間に前の降雨の水が第 2 層から排水されている．そのため本研究で設定した降雨条件では，降雨のサイクルを重ねても第 2 層の飽和度が高い状態が維持されるだけで，第 1 層内に水が滞留することはなく，静水圧分布も生じないため，宙水は形成されないものと解釈できる．

Case 2,3 は Case 1 よりも保水性が小さく，降雨浸透境界から侵入した水が第 2 層に至るまでの時間は Case 1 よりも短い．そのため Case 1 とは対照的に，第 2 層に浸透した水が排水される前に次の降雨による水が第 2 層に至り，第 2 層から第 1 層下部にかけて水が滞留して静水圧分布が生じ，宙水が形成されたと解釈できる．

これらの結果から，本研究の解析条件のように一定のサイクルで繰返し降雨が与えられる条件下では，帯水層の保水性が小さいほど宙水が形成されやすくなることが示唆された．



図－９　Case 1 解析結果
（159.0 日目）

図－１０　Case 2 解析結果
（162.0 日目）

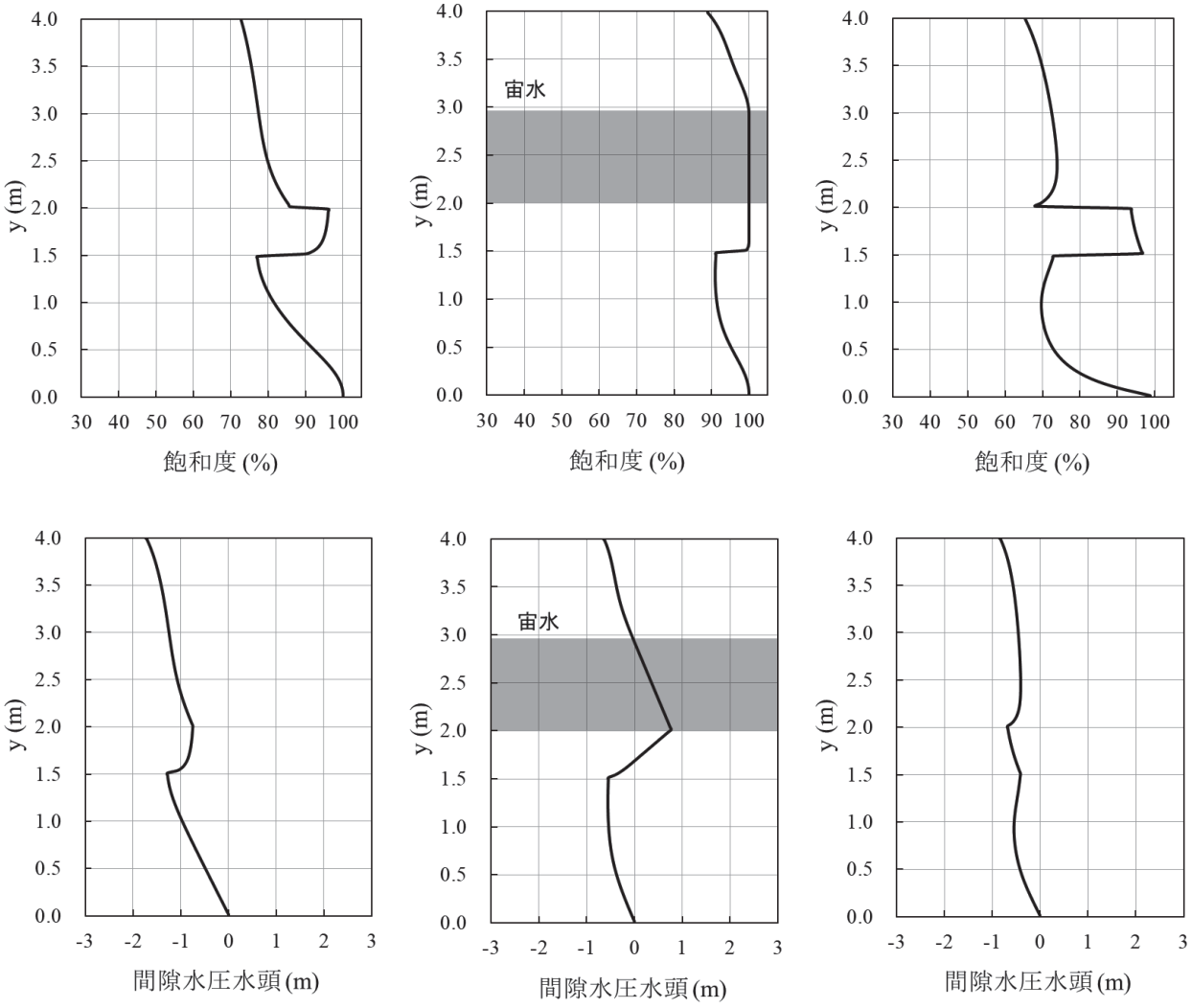
図－１１　Case 3 解析結果
（220.0 日目）

４．３．難透水層の透水係数の影響

Case 4～9 の解析結果における飽和度分布と間隙水圧分布を図－１２～図－１７に示す．なお，ここで示す飽和度分布および間隙水圧分布が得られた解析日数を，それぞれの図のキャプションに併記している．Case 4,6,8,9 では，一時的に第 2 層の飽和度が上昇したものの，第 1 層に飽和領域は形成されなかった．一方，Case 4,6 の透水係数の 10^{-2} 倍の透水係数をそれぞれ設定した Case 5,7 では，第 2 層直上に飽和領域が形成されて静水圧分布が生じ，宙水が形成された．Case 1～3 の解析結果では，帯水層の保水性が小さいほど宙水が形成されやすくなる傾向がみられた．しかし，Case 4～9 の解析結果では，最も保水性の大きい Case5 で最も厚い宙水が形成され，最も保水性の小さい Case 9 では宙水は形成されず，Case 1～3 の解析結果と対照的な傾向が認められる．

Case 4～9 における宙水形成の有無は，第 2 層の透水係数の違いによるものと解釈するのが一般的であろう．Case 4 と Case 5,Case 6 と Case 7，Case 8 と Case 9 は，それぞれ保水性の条件を同じくして，各層の透水係数に 10^{-2} 倍の隔たりがある．そのため，第 1 層の保水性が大きく，降雨浸透境界から侵入した水が第 2 層に至るまでの時間が長くなったとしても，透水係数が著しく小さいために第 2 層から排水される時間が極めて長くなることで，第 2 層から第 1 層にかけての領域が飽和しやすくなると考えられる．

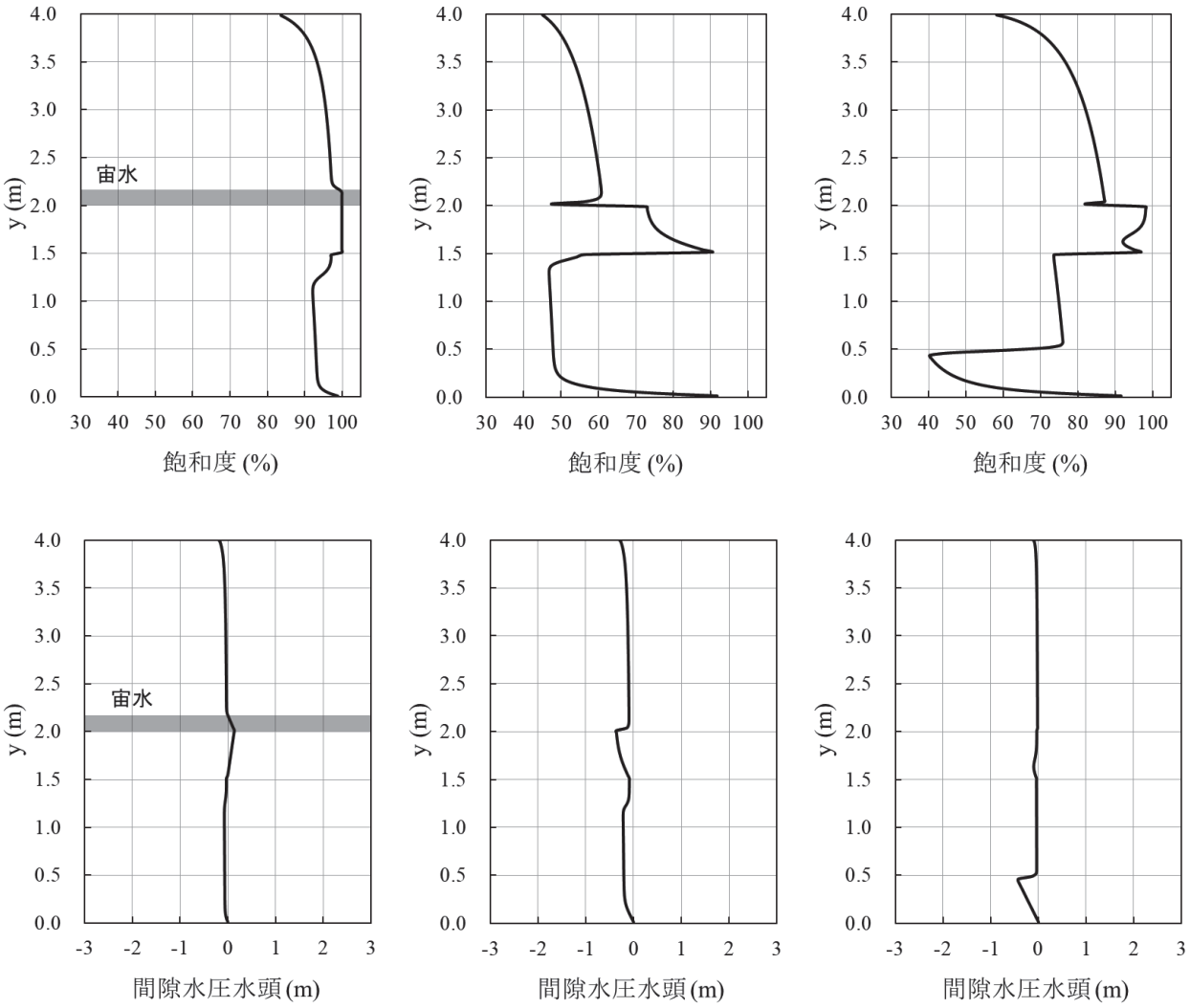
帯水層の保水性が大きい場合でも，その下の透水係数の著しく低い層から上の部分が飽和して宙水が形成されることから，宙水の形成は盛土材料の保水性よりも透水係数の方が支配的であると示唆される．



図－１２　Case 4 解析結果（65.5 日目）

図－１３　Case 5 解析結果（218.5 日）

図－１４　Case 6 解析結果（70.0 日目）



図－１５　Case 7 解析結果
（218.0 日目）

図－１６　Case 8 解析結果
（65.0 日目）

図－１７　Case 9 解析結果
（278.0 日目）

４．４．宙水の形成条件

本研究で実施した一連の解析について，宙水が形成されたのは Case 2，3，5，7 である．本研究は，盛土材料の保水性が宙水の形成に及ぼす影響について検討することを目的としたが，宙水が形成された解析ケースには，大中小すべての保水性条件（F_c = 5.6，27.9，44.3%）の解析ケースが含まれていた．Case 2，3，5，7 は，保水性の条件については共通点に欠けるが，第 2 層の透水係数が 1.0×10^{-8}(m/s)オーダー以下であるという点で共通している．降雨による盛土内宙水の発生条件を検討した先行研究 [6),7)]では，盛土材料の保水性の影響を考慮しておらず，また本研究の解析とは異なる降雨条件を与えているものの，解析結果においては 1.0×10^{-8}(m/s)オーダーの層の直上に宙水が形成されており，本研究の解析結果と整合する．このことから，透水係数が 1.0×10^{-8}(m/s)オーダー以下の層が存在することが，盛土内宙水の形成条件の一つであることの確実性が強まったといえる．

５．まとめ

本研究は，盛土材料の保水性が宙水の形成に及ぼす影響を検討することを目的に一連の保水性試験を行い，そこから得られた VG パラメータを用いて一次元飽和－不飽和浸透流解析によるパラメトリックスタディを実施した．得られた

成果を以下に列挙する．

1) 本研究で実施した保水性試験から，3 種類の異なる細粒分含有率を有する試料の，D_c = 80%，90%の 2 種類の締固め度における水分特性曲線を得られた．保水性試験は実施に時間がかかることから実務上行われることは少なく，浸透流解析においては既出の文献から引用した VG パラメータを用いることも珍しくない．本研究で得られた水分特性曲線は，土の保水性における密度依存性や細粒分依存性を考慮した浸透流解析を実施する上で有用な研究資料となることが期待できる．
2) 帯水層と難透水層の透水係数が等しい条件下で保水性のみを変えて浸透流解析を実施したところ，最も保水性が大きいケース（F_c = 44.3%）では宙水が形成されず，保水性が中程度（F_c = 27.9%），または小さいケース（F_c = 5.6%）で宙水が形成された．本研究の解析条件のように一定のサイクルで繰返し降雨が与えられる条件下においては，帯水層の保水性が小さいほど宙水が形成されやすくなることが示唆された．
3) 保水性を同じくして異なる透水係数を与えた解析結果では，最も保水性の大きいケース（F_c = 44.3%）で最も厚い宙水が形成され，最も保水性の小さいケース（F_c = 5.6%）では宙水が形成されなかった．保水性の大きいケースで宙水が形成されたのは，第 2 層の透水係数が著しく小さいことが要因と考えられ，宙水の形成においては，盛土材料の保水性よりも透水係数の影響の方が支配的であると考えられる．
4) 本研究で実施した一連の解析で宙水が形成されたのは，第 2 層の透水係数が 1.0×10^{-8} または 1.0×10^{-9}(m/s)オーダーのケースであった．これは先行研究[6),7)]の解析結果とも整合しており，透水係数が 1.0×10^{-8}(m/s)オーダー以下の層が存在することが，盛土内宙水の形成条件の一つであることの確実性が強まった．

本研究で実施した浸透流解析では，日本の年間平均降水量に基づいて簡易的に設定した降雨条件を与えている．しかし，宙水の形成に降雨の強度や頻度が影響することは自明であり，降雨条件の側面から宙水の形成条件を検討する必要がある．本研究で設定した解析条件では，透水係数が 1.0×10^{-8} または 1.0×10^{-9}(m/s)オーダーの層が層厚 0.5 m で存在するときに宙水が形成されたが，層厚がこれよりも大きい場合，透水係数が 1.0×10^{-8}(m/s)オーダーより大きくても宙水が形成される可能性がある．宙水を形成し得る難透水層の透水係数と層厚の関係について，パラメトリックスタディを実施して詳細に調べる必要がある．また本研究では，盛土中央部で天端から侵入した水が鉛直下方に浸透する挙動を再現することを目的に，一次元の浸透流解析を実施した．今回用いたモデルは 3 層構造で各層内は均質一様を前提とした極めて簡易的なモデルである．盛土内宙水の形成条件を明らかにするためには，盛土内における透水係数の空間分布の不均質性を考慮した地盤モデルを生成し，3 次元での浸透流解析を実施するなど，より現実の状況に近い条件での検討を行う必要がある．

謝　辞

本研究を遂行するにあたり，各種室内試験においては，神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻卒業生の瀬古一樹氏，友近温人氏，元神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻の片岡沙都紀助教に協力を得た．また一名の匿名査読者の方からいただいたご意見により，本研究の浸透流解析における「宙水」の解釈が明確となり，本論文の考察がより有意義なものとなった．関係者各位に謝意を表す．

参　考　文　献

1) 塚本将康，赤平博文，一井利光，阿部利枝，太田史朗：大規模河川堤防における湿潤化調査の一例，全国地質調査業協会連合会「技術フォーラム 2013」長野，No.28，2013.
2) 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* 論文集，pp.183-188，2016.
3) 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報告集，第 63 号，pp.1-10，2021.

4) 地盤工学会地盤工学用語辞典改訂編集委員会：地盤工学用語辞典，地盤工学会，2006.
5) 公益社団法人日本地下水学会：地下水用語集，理工図書，p.69，2011.
6) 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.
7) 深田竜司・肥後陽介・大竹雄・南野佑貴・加藤亮輔：盛土内の不均質透水性空間分布の生成と不飽和降雨浸透解析への適用，土木学会論文集 A2，Vol.73，No.2，I-791-799，2017.
8) 片岡沙都紀，瀬古一樹，友近温人，澁谷啓：盛土内宙水の形成メカニズム解明に向けた実験的検討，建設工学研究所論文報告集，第 64 号，pp.43-52，2022.
9) 土質工学会：土質試験法（第 2 回改訂版），pp.143-144，1979.
10) 石田朋靖，相馬尅之，足立忠司，河野英一，飯竹重夫：pF の測定とその原理，土と基礎，Vol.35，No.1，pp.61-66，1987.
11) 西垣誠，竹下祐二，河野伊一郎：室内試験による不飽和浸透特性の非定常算定方法，土木学会論文集，No.454，Ⅲ-20，pp.103-112，1992.
12) 柏原佳明，土屋智，逢坂興宏：土壌カラムを用いた水分移動に関する実験とその解析，日本林学会誌，Vol.81，No.4，pp.269-274，1999.
13) van Genuchten，M. T.：A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils，Soil Science Society of America Journal，Vol.44，pp.892-898，1980.
14) Seki，K.，Toride，N.，& Th. van Genuchten，M.：Evaluation of a general model for multimodal unsaturated soil hydraulic properties. J. Hydrol. Hydromech. Vol.71，No.1，pp.22-34，2023.
15) 関勝寿：SWRC Fit，<https://seki.webmasters.gr.jp/swrc/index-ja.html>，2023. （2024.10.3 閲覧）
16) 赤井浩一，大西有三，西垣誠：有限要素法による飽和-不飽和浸透流の解析，土木学会論文集，第 264 号，pp.87-96，1977.
17) Richards，L. A.：Capillary conduction of liquids through porous mediums，Physics，Vol.1，Issue 5，pp.318-333，1931.
18) Mualem，Y.：A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resources Research，Vol.12，No.3，pp.513-522，1976.
19) 国土交通省：<https://www.mlit.go.jp/river/pamphlet_jirei/bousai/saigai/kiroku/suigai/suigai_3-1-1.html#:~:text=%E4%B8%96%E7%95%8C%E3%81%A7%E3%82%82%E5%A4%9A%E9%9B%A8%E5%9C%B0%E5%B8%AF%E3%81%A7,%E3%81%AB%E9%9B%86%E4%B8%AD%E3%81%97%E3%81%A6%E3%81%84%E3%82%8B%E3%80%82>，2020.（2024.10.3 閲覧）
20) 山本眞暉，片岡沙都紀，澁谷啓：細粒分含有率と締固め度に着目した盛土材料の透水性評価手法の提案，建設工学研究所論文報告集，第 66 号，pp.27-35，2024.

著　者

山本　眞暉　　京都大学大学院工学研究科博士後期課程，修士（工学），地盤工学
齋藤　雅彦　　研究員，博士（工学），地下水工学
澁谷　啓　　所員，博士（工学），Ph.D.，地盤工学