

キャピラリーバリアを用いた古墳の雨水の浸透抑制に関する研究ーキャピラリーバリアのメカニズムに関する実験および解析的検討ー

澤田 茉伊¹・三村 衛²・吉村 貢³

¹学生会員 京都大学大学院博士後期課程 工学研究科都市社会工学専攻
(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂C1-2)
E-mail: sawada.mai.43u@st.kyoto-u.ac.jp

²フェロー会員 京都大学大学院教授 工学研究科都市社会工学専攻
(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂C1-2)
E-mail: mimura.mamoru.3r@kyoto-u.ac.jp

³正会員 ソイルアンドロックエンジニアリング株式会社 技術本部
(〒561-0834 大阪府豊中市庄内栄町2-21-1)
E-mail: yoshimura@soilandrock.co.jp

墳丘の崩壊や石室の漏水等の古墳に生じる損傷の多くは雨水の浸透に起因しており、古墳の修復・保存に適用可能な雨水の浸透抑制方法が必要とされている。本稿では、キャピラリーバリアを発現しうる覆土を有効な方法のひとつと考え、遮水のメカニズムと遮水性に影響を与える要因について、模型実験と数値解析による評価をもとに研究した。実験は数値解析により、定量的に再現できたため、これをもとにバリアが発現している地盤内の雨水の浸透を分析した結果、遮水は細粗粒二層地盤の層境界における透水係数の差異に起因することがわかった。また、バリアの遮水性は、地盤の傾斜角、層厚、降雨強度に依存することが確認された。これは、地盤や降雨の条件に応じて、地盤に浸透する雨水の総流量が保存されるよう、各層の透水係数が変化するためと考えられる。

Key Words : capillary barrier, unsaturated seepage flow, water retention, permeability, historical cultural heritage

1. はじめに

歴史的な地盤構造物である史跡としての古墳には、自然作用や、人為的な破壊により、著しく損傷しているものが多い¹⁾。損傷の種類は、要因ごとに大きく三つに分類できる。1) 墳丘の力学的安定性（墳丘の崩壊）、2) 墳丘内の水分移動（石室への雨水や地下水の流入）、3) 石室内の温湿度環境（石材の結露、塩の析出、かびの繁殖）である。古墳の修復・保存においては、これら三つの要因を評価、制御することが求められるが、中でも2)に属する、墳丘への雨水の浸透抑制は重要な課題のひとつである。墳丘への過度な雨水の浸透は、墳丘の崩壊²⁾や、石室内の漏水など深刻な被害を引き起こす。本稿では、古墳の雨水の浸透抑制方法に関して、キャピラリーバリアを利用した方法に着目する。キャピラリーバリアは、粗粒土層の上に細粒土層を重ねた二層地盤に

浸透した雨水が、下部の粗粒土層に浸透せず、層境界に集積する現象である^{例えば3)}。地盤に勾配がある場合は、図-1に示すように、集積流をなして層境界に沿って流下する。キャピラリーバリアは、主に廃棄物処分場のキャッピング³⁾、⁴⁾や斜面崩壊の抑制工⁵⁾に利用することを目的に研究が進められてきている。古墳の修復・保存目的では、大分県のガランドヤ1号墳で実績がある⁶⁾。当古墳では、墳丘が失われ、石室が完全に露出した状態であったが、石室の奥壁にある装飾を屋外環境の暴露から保護し、また見学可能な施設として活用するため、石室を覆うドーム状の保護施設が建設された。保護施設は、コンクリート製の躯体に覆土を施したもので、覆土部分は厚さ20cmの粗粒土層の上に厚さ100cmの細粒土層を重ねてキャピラリーバリアを発現しうる構造になっている（図-2）。また、十分な厚さを持った覆土は断熱性が高いため、保護施設内の室温変化によって生じる結露を抑制す

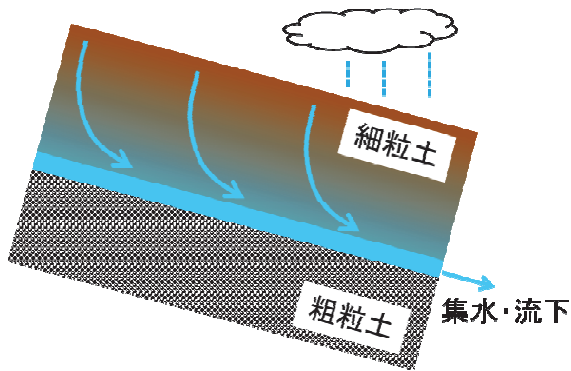


図-1 キャピラリーバリアを発現している地盤内の雨水の流れ

表-1 模型地盤と降雨強度の条件

ケース	傾斜角 (度)	層厚 (cm)	降雨強度 (mm/h)
1 基準	10	30	4.09
2 傾斜1/2	5	30	4.07
3 層厚1/2	10	15	4.26
4 降雨2倍	10	30	8.55

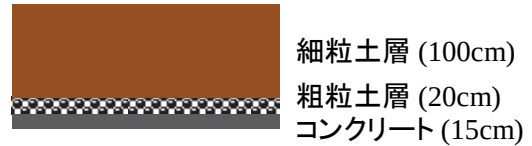
る効果もある。

古墳の排水対策としては、墳丘に礫を一部敷きつめる形の暗渠排水の存在や、一部に粗粒の層が設置されているのではないかと推測される例^{例えば3)}はあるが、本稿で述べるような細粗粒二層構造によってキャピラリーバリア効果を積極的に活用したと断定できるものはない。ガランドヤ1号墳の整備にあたっては、コンクリート躯体直上の礫層は最終的な排水層として位置づけられており、短時間のゲリラ豪雨や、表層の細粒土層に亀裂や水みちから雨水が浸入してきた場合でも、飽和時の排水性が高い砂礫層を介して排水することにより、躯体への長時間の水分の暴露を防止できる構造を意図している。つまり、細粗境界面におけるキャピラリーバリアのみで古墳の防水を担うのではなく、土質材料の保水特性を活用して雨水浸透に対する第一段階の遮水を、特別なメンテナンスを必要とせずに行えるという、技術的、経済的に優れた手法としてキャピラリーバリアを評価していることを述べておく。

キャピラリーバリアを利用する上での課題は、遮水性の定量的な評価や制御である。バリアの遮水性は、土質や地盤の形状、透水性、降雨条件に依存して変化し、これらとの依存性を考慮した限界長（上流端からバリアの破過点までの水平距離）の評価式が実験や理論に基づいて提案されている^{例えば3), 9)}。しかし、これらの評価式の多くは、一定勾配の地盤が定常降雨下にあることを条件としているため、図-2に示すような勾配の変化がある覆土の屋外環境下での遮水性評価には適用できない。

本研究では、この課題に根本的に対処するため、模型実

覆土の断面構造



ガランドヤ1号墳の保護施設



図-2 キャピラリーバリアを用いた古墳の保護施設

験と数値解析による評価に基づいて、キャピラリーバリアのメカニズムを明らかにする。実験は、キャピラリーバリアを発現する模型地盤に模擬降雨を与えるもので、これを浸透流解析で定量的に再現し、バリアを発現している地盤内の浸透流を詳細に分析する。また、バリアの遮水性に影響を与えるもののうち、地盤の傾斜角、層厚、降雨強度と遮水性との関係を研究する。

2. 模型実験によるキャピラリーバリアの遮水性評価

(1) 試料

粗粒土と細粒土からなる二層の模型地盤に、一定の模擬降雨を与えたときの上下層の流量と地盤中の飽和度を測定し、キャピラリーバリアの遮水性を評価する。実験は、模型地盤の傾斜角、上層の層厚、降雨強度がバリアの遮水性に与える影響を調べるため、ケース1を基準にこれらを変化させた計4ケース（表-1）を行った。

模型地盤に用いる試料は、ガランドヤ1号墳の保護施設の覆土に適用されたものと同一のものをを用いた。図-3に、下層に用いる粗粒土と上層に用いる細粒土の粒径加積曲線を示す。それぞれの工学的分類は、礫（G）と細粒分まじり礫質砂（SG-F）で、ともに現場近くの土取場で採取された土をふるい分けて生産されたものである。また、試料と模型地盤の諸量を表-2に示す。模型地盤の乾燥密度は、実際の覆土と統一した。なお、飽和透水係数は、定水位透水試験で評価したが、締固めの状態により試験結果にばらつきが生じやすい細粒土については複数回実施したところ、 $3.94 \times 10^{-5} \sim 1.18 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ の範囲であった。

細粗粒土の水分特性曲線を図-4に示す。図中のプロットは、保水性試験の結果である。保水性試験は、細粒土

表-2 試料と模型地盤の諸量

	上層(細粒土)	下層(粗粒土)
土粒子密度 (g/cm^3)	2.67	2.67
乾燥密度 (g/cm^3)	1.74	1.52
含水比 (%)	11.4	2.0
飽和度 (%)	57.11	7.07
間隙比	0.53	0.75
飽和透水係数 (m/s)	3.94×10^{-5} $\sim 1.18 \times 10^{-4}$	4.21×10^{-3}
水分特性曲線 モデル	$\alpha=0.038$ (排水) $\alpha=0.075$ (吸水)	$\alpha=0.386$ (排水) $\alpha=0.771$ (吸水)
パラメータ	$n=2.816, m=0.645$ $\theta_t=0.195, \theta_s=0.315$	$n=2.654, m=0.623$ $\theta_t=0.011, \theta_s=0.430$

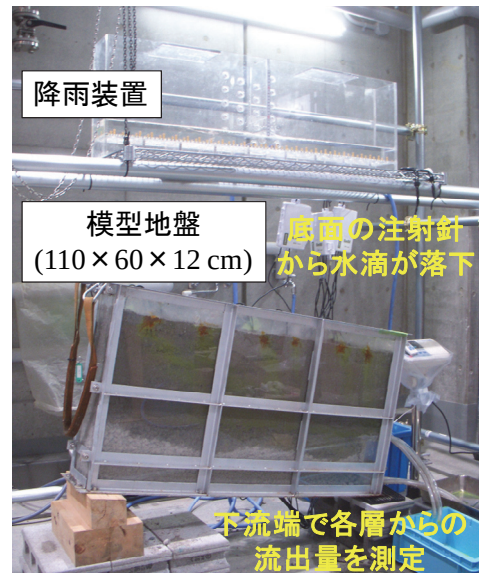


図-5 実験装置の概要

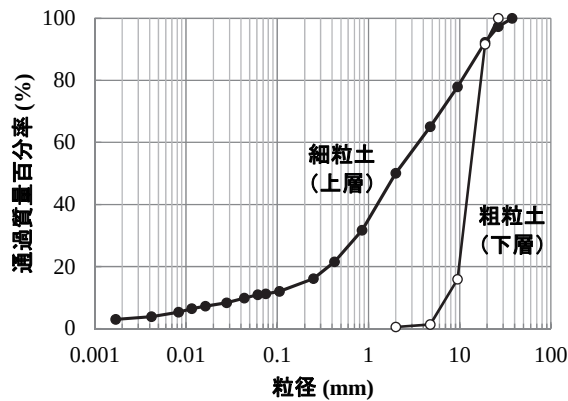


図-3 模型地盤に用いた試料の粒径加積曲線

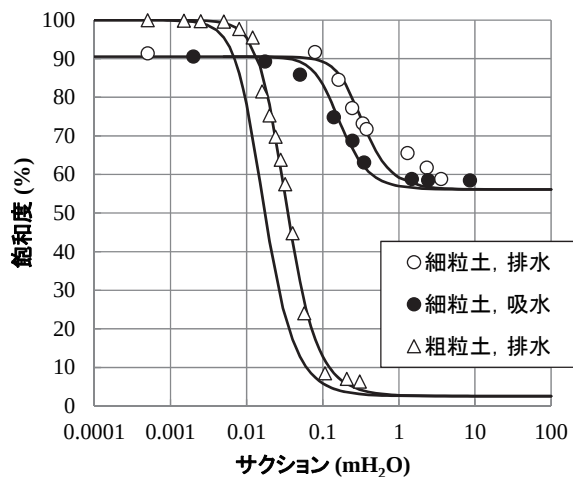


図-4 試料の水分特性曲線

については、9.5mmふるい通過分を表-2に示す乾燥密度になるよう直径5cm、高さ5cmに締め固めた供試体を用いて、水頭法と加圧法でサクシオンを制御して評価した。一方、粗粒土については、供試体寸法が直径15cm、高さ10cmの大型の保水性試験装置を用いた。サクシオン

の制御は細粒土に用いた装置と同じく、水頭法と加圧法を併用するが、排水過程のみ測定する仕様になっている。また、図中の曲線は、van Genuchtenの水分特性曲線モデル⁹⁾を用いて試験結果を補完したものである。各曲線のモデルパラメータを表-2に示す。パラメータのうち、 α については、主吸水曲線の α は主排水曲線の α の2倍の関係にあるとしたLucknerら¹⁰⁾の報告を参考に設定している。 θ_t と θ_s については、残留および飽和時の含水状態にはヒステリシスがないものとし、主吸排水曲線で共通とする。また、 n と m ($=1-1/n$) についても、Mualemの不飽和透水係数モデル¹¹⁾を適用する場合を想定して、透水係数と体積含水率の関係にはヒステリシスがないものとし、主吸排水曲線で共通とする。

(2) 実験方法

実験装置は、二層の模型地盤を作製する土槽と、これに一定降雨を供給する降雨装置からなる(図-5)。また、図-6に模型地盤の詳細を示す。土槽の内寸は、長さ110cm、高さ60cm、奥行12cmで、底面から20cm厚の粗粒土層、以上に最大30cm厚の細粒土層を設ける仕様になっている。土槽の下流端には、各層の底面位置に直径1cmの排水口が奥行き方向に3つずつ取り付けられており、各層の浸透水を集水できる。ただし、下流端側壁を伝わる雨水の流れが生じないように、下流端付近には降雨を与えず、また下流端の層境界には仕切り板を設けて、側壁を伝って下層に流入する流れを防ぎ、各層の浸透量を確実に分離・集水できるようにしている。各排水口からの流量は、はかりを用いて測定する。

模型地盤は、自然含水比に調整した試料を表-2に示す乾燥密度になるよう重量と土層厚さを管理して作製した。各層の締め固め層厚は5cmとした。層境界には、細粒土の

落下を防ぐため、メッシュ材（目開き512 μ m）を設けた。メッシュ材の透水性は十分高いため、雨水の浸透の妨げにはならない。地盤内には、図-6に示す位置に計12個の土壌水分計（Decagon Device 社製、EC-5）を設置した。

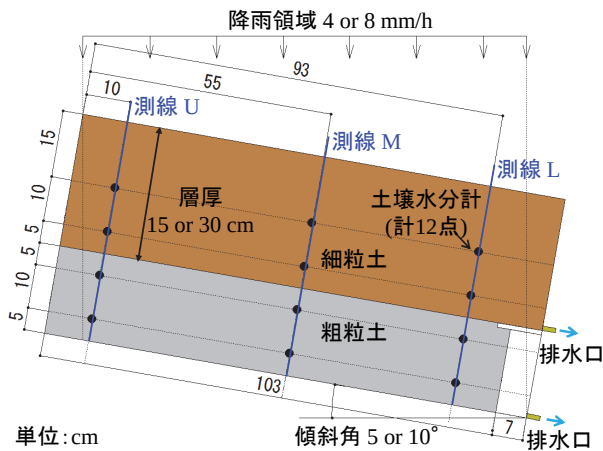


図-6 模型地盤の詳細

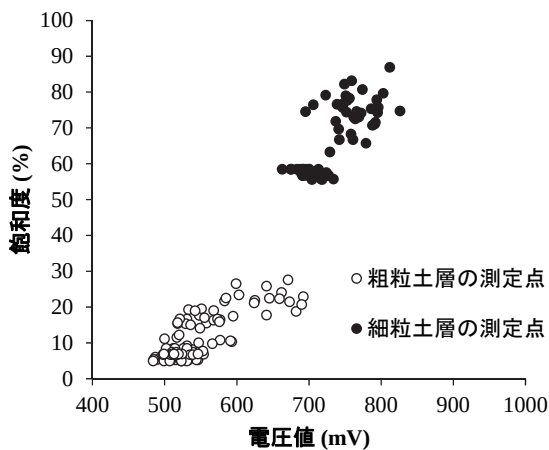


図-7 土壌水分計の電圧値と飽和度の関係

ただし、層厚を1/2にしたケース3については、最も表層に近い3つの土壌水分計の設置位置は、図-6中の位置よりも5cm深くした。土壌水分計の設置個所では、実験前後に含水比を実測して飽和度を算定し、その時に土壌水分計が示す電圧値との関係を調べ、較正を試みた。図-7に結果を示すが、細粗粒土ともに、任意の電圧値に対する飽和度は10~20%程度の幅を持って分布している。すなわち、これらの結果から近似的に導いた較正関係を用いて、飽和度を評価すると、実測値と最大10%程度の差が生じる場合が想定される。そこで、本実験では、測定点ごとに実験前後の飽和度の実測値と電圧値から線形関係を評価して、実験中の飽和度を推定することにした。

模型地盤を作製した後、所定の傾斜角になるよう作られた楔形の土台の上に土槽の上流端を設置し、45時間連続で一定降雨を与えた。降雨装置は、土槽の上面から50cmの高さに設置されており、水槽の底面に取り付けた注射針を通して水が落下する仕組みになっている。水槽の背面には、給水口と、水位を一定に保つための越流口が複数設けられており、水槽内の水面高さを調節することで、降雨強度の調整を行う。降雨強度は、事前に測定しておき、所定の降雨強度になっていることを確認して実験を開始した。

(3) 実験結果

図-8は、各ケースの排水口からの流出量の時刻歴である。いずれのケースも定常状態では、地盤に浸透した雨水の全量が排水口から流出した。上下層の排水口からの流出量の配分は、キャピラリーバリアの遮水性を表すが、ケース間で大幅な違いが見られる。図中には、全流出量に占める各層からの流出量の割合を記している。4ケースの中で、ケース1は下層からの流出がなかったが、ケース1を基準に模型地盤の傾斜角や上層厚を1/2にしたり、降雨強度を2倍にしたりした3ケースでは、下層からの排水があり、ケース1に比べてバリアの遮水性が低下して

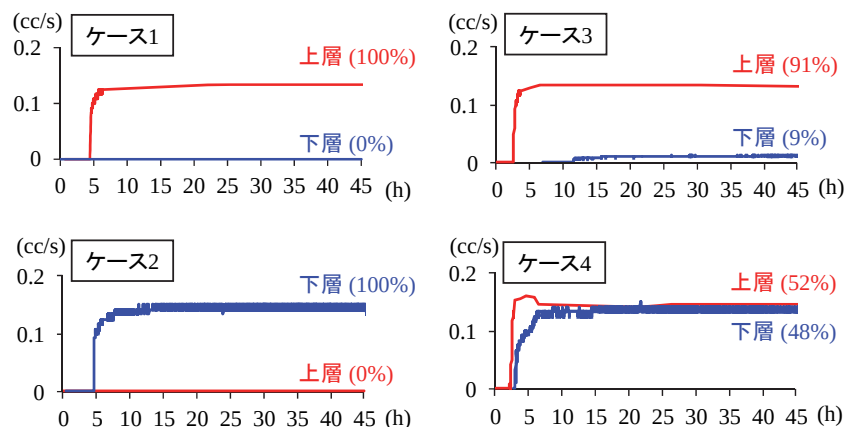


図-8 各層の排水口からの流出量の測定値

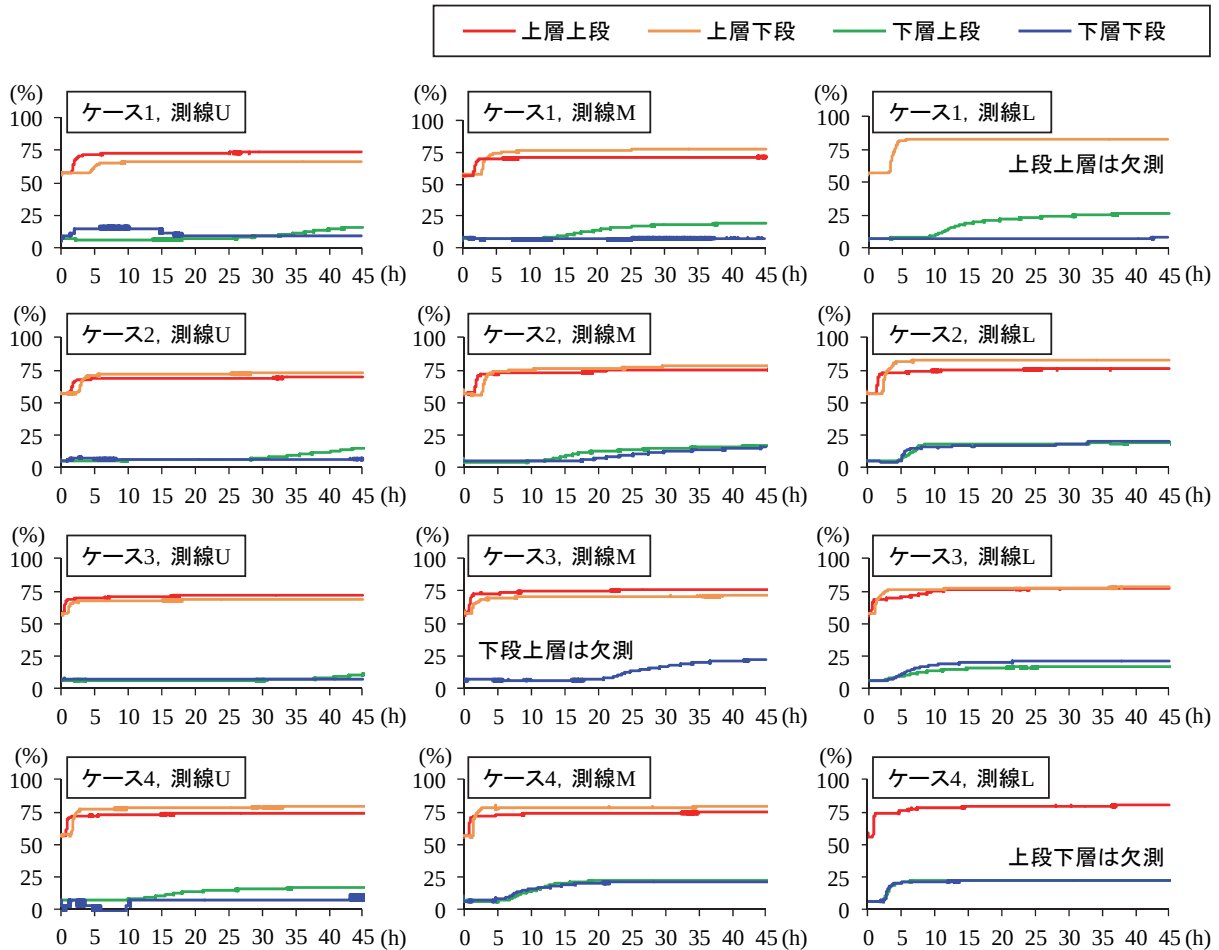


図-9 土壌水分計で測定した地盤内の飽和度の時刻歴

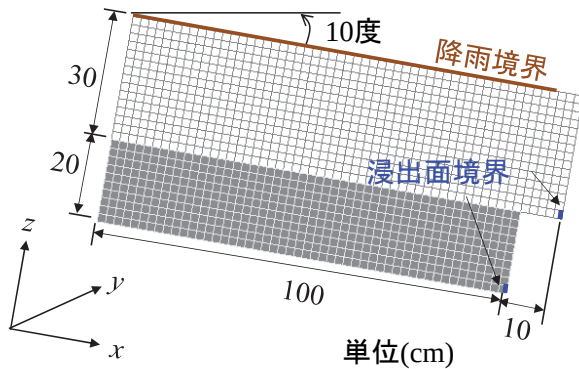


図-10 模型地盤の解析モデル (ケース1)

いることがわかる。中でも、傾斜角と降雨強度を変化させた場合は、上下層からの流出量の配分が大きく変化している。これに対し、層厚の変化には、あまり影響を受けていない傾向が見られる。これらの結果から、傾斜角、層厚、降雨強度のいずれもバリアの遮水性に寄与するが、寄与の程度が異なると考えられる。

図-9は土壌水分計を用いて測定した地盤内の三測線上の飽和度の時刻歴である。下層の上下段の土壌水分計は、それぞれ底面から5cm、15cmに位置し、上層の上下段の

土壌水分計は、底面から25cm、35cmに位置する(図-6参照)。いずれのケースも定常状態では、上層中の6点は70~80%、下層中の6点は浸潤している箇所については15~25%の範囲に分布した。下流ほど高い値を示す傾向が見られたが、これは下流ほど上流側からの流量が多いためと考えられる。

3. 数値解析による模型実験の再現

(1) 解析条件

上記の4ケースの模型実験を詳細に分析するため、二次元のFEMによる飽和-不飽和浸透流解析¹¹⁾(解析コード: AC-UNSAF2D)で再現する。代表として、ケース1の模型地盤の解析モデルを図-10に示す。境界条件は、降雨領域に含まれる地表面を降雨境界とし、下流端の排水口部分は浸出面境界とした。

浸出面境界は、一般に不飽和状態で不透水境界(流量がゼロの流量境界)、飽和に達すると固定水頭境界に切り替わる境界である。すなわち、圧力水頭ゼロを閾値として、流量境界と固定水頭境界を切り替える境界であるが、これを適用すると、ケース2以外の3ケースで観察

された上層排水口からの流出を再現できなかった。つまり、上層排水口では圧力水頭が閾値に至らず、浸透水はすべて下層排水口から流出した。このことから、排水口周辺の土が不飽和状態のまま流出が生じていると考えられるため、ここでは圧力水頭の閾値をゼロよりも低い値に設定する。また、傾斜角を変えたケース1とケース2で上層からの流出量が大きく変化したことから、閾値は傾斜角に依存した関数で表現するのが適当と考えられる。

排水口の圧力水頭の閾値は、排水口の土と大気境界面に作用する斜面水平方向(x軸方向)の力のつり合いをもとに設定する。境界面では、土側からは間隙水圧、間隙空気圧、間隙水の自重が作用し、また大気側からは大気圧が作用する。間隙水の自重は、式(1)で表される体積V中のものを考える。ここに、 d (=1cm)は排水口の開口高さで、x軸およびy軸方向は単位長さとする。このとき、排水口の境界面の面積 S は、式(2)で表され、土粒子、水、空気が占める面積をそれぞれ S_s 、 S_w 、 S_a とする。このような条件のもとでは、排水口境界面上に作用する斜面水平方向の力のつり合いは式(3)で表される。ここに、 ρ_w は水の単位体積重量、 g は重力加速度、 θ は体積含水率、 u_a は間隙空気圧、 u_w は間隙水圧、 u_0 (=0)は大気圧、 i は斜面の傾斜角を表す。ただし、 θ 、 u_a 、 u_w は体積Vの領域内では均一とする。また、 F は土粒子や排水口周面との摩擦等に起因する抵抗力とする。なお、間隙空気圧 u_a が大気圧 u_0 に等しいと仮定すれば式(3)は式(4)のように簡略化される。ここに、 S_w は S と θ の積で表されるものとする。排水口からの間隙水の流出は、浸潤により式(4)の力のつり合いが維持できなくなったときに生じると考える。模型地盤は初期に不飽和状態で、浸潤過程では間隙水の自重(第1項)の増加と、間隙水圧(第2項)の上昇に応じて、摩擦力(第3項)が増加することで、力のつり合いが保たれ、排水口から間隙水は流出しない。しかし、やがて F が限界値 F' に達すると流出が始まる。このときの圧力水頭 $H_{seepage}$ は、式(4)を変形し、式(1)と式(2)を代入すると式(5)で表される。

$$V = 1 \cdot 1 \cdot d \quad (1)$$

$$S = 1 \cdot d \quad (2)$$

$$S = S_s + S_w + S_a \quad (3)$$

$$\rho_w g V \theta \sin i + u_w S_w + u_a S_a - u_0 S - F = 0 \quad (4)$$

$$\rho_w g V \theta \sin i + u_w S \theta - F = 0 \quad (u_a = u_0 = 0)$$

$$H_{seepage} = \frac{u_w}{\rho_w g} = -\frac{V \sin i}{S} + \frac{F'}{\rho_w g S \theta} \quad (5)$$

式(5)の第2項は、流出が始まるときの排水口境界面の単位面積の間隙水に働く抵抗力を水頭表示したものに相当し、地盤や降雨条件には依存しない値である。つまり、式(5)は地盤の傾斜角が大きいほど間隙水の自重の斜面

水平成分が大きい分、より低い圧力水頭で流出することを意味している。ただし、式(5)の第2項は、直接評価する手段がないため、ここでは傾斜角が10度 ($\sin 10=0.174$) と5度 ($\sin 5=0.087$) のどちらの場合も $H_{seepage}$ が負値となる範囲で、式(5)の第2項を変化させて、実験で得られた排水口からの流出(図-8)の再現を試みた。その結果、これを0.074mH₂Oと設定した場合に、4ケースのいずれも解析で得られた排水口からの流出量や流出開始時間は測定値のそれに近かった(図-11参照)。このとき、 $H_{seepage}$ は、傾斜角が10度では-0.100mH₂O、5度では-0.013mH₂Oとなる。なお、 $H_{seepage}$ は、上下層の排水口で共通とした。厳密には、抵抗力に相当する式(5)の第2項は細粗粒土と異なると予想されるが、共通とした場合も上下層ともに流出を適切に再現できていることから、粒度は抵抗力にさほど影響しないと考えられる。

解析に用いた地盤の浸透特性を表すパラメータの一覧を表-3に示す。上下層とも室内試験で得られた表-2と図-4を参考に、排水口からの流出量と流出開始時間を再現するよう設定した。水分特性曲線は、図-4の主走査曲線に囲まれた領域内で、モデルパラメータのうち α を調整することにした。また、不飽和透水係数は、表-2の飽和透水係数と選定した水分特性曲線をもとに、Mualemの不飽和透水係数モデル¹⁾を用いて推定した。下層については、4ケースとも共通としたが、上層については、模型地盤の締固めのむら等による浸透特性の違いがあると思われるため、ケースごとに適切な値を評価した。なお、解析の初期条件については、各ケースで実測した初期飽和度に対応する圧力水頭を与え、同一層内では均一とした。

表-3 解析に用いたパラメータ

ケース	1 基準	2 傾斜1/2	3 層厚1/2	4 降雨2倍
水分特性曲線モデル	上層 $\alpha=0.037$ $n=2.816, m=0.645, \theta_r=0.195, \theta_s=0.315$	下層 $\alpha=0.579, n=2.654, m=0.623, \theta_r=0.011, \theta_s=0.430$		
飽和透水係数(m/s)	上層 1.18×10^{-4}	下層 1.18×10^{-4}	上層 7.89×10^{-5}	下層 9.86×10^{-5}
初期圧力水頭(mH ₂ O)	上層 -1.848	下層 -1.538	上層 -1.558	下層 -1.743
圧力水頭閾値 $H_{seepage}$ (mH ₂ O)	上層 -0.100	下層 -0.164	上層 -0.117	下層 -0.114

(2) 解析結果

4ケースの排水口からの流出量と、模型地盤内の12測点(図-6参照)の飽和度の時刻歴を実験と解析で比較する(図-11, 図-12)。解析のパラメータは、排水口からの流出量と流出開始時間の再現を指標に評価したが、飽和度の変化も多く測定点で定量的に再現できており、

本解析のモデル化と再現は適切と考えられる。いくつかの測定点では、飽和度の測定値と解析値で最大15%程度の差が見られるが、これは模型地盤の締固めのむらや土粒子の配置等の不均質性による局所的な浸透や、飽和度の測定精度が一因と考えられる。

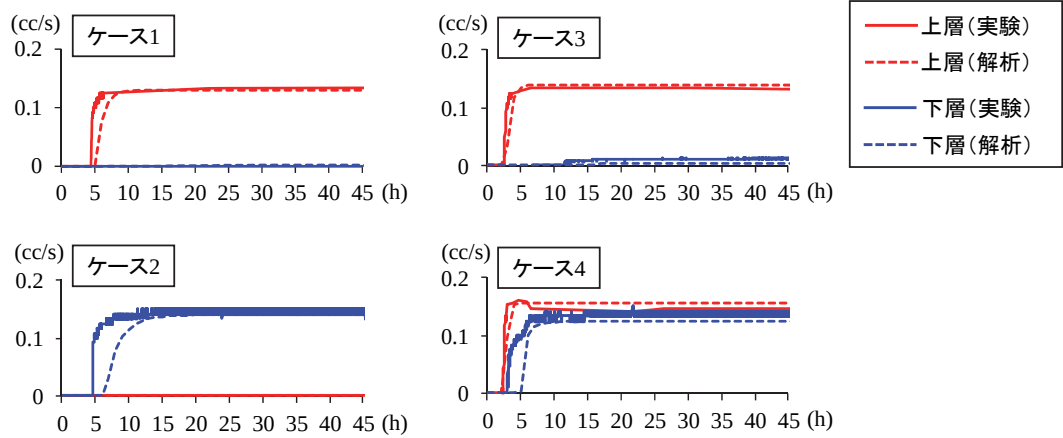


図-11 排水口からの流出量の測定値と解析値の比較

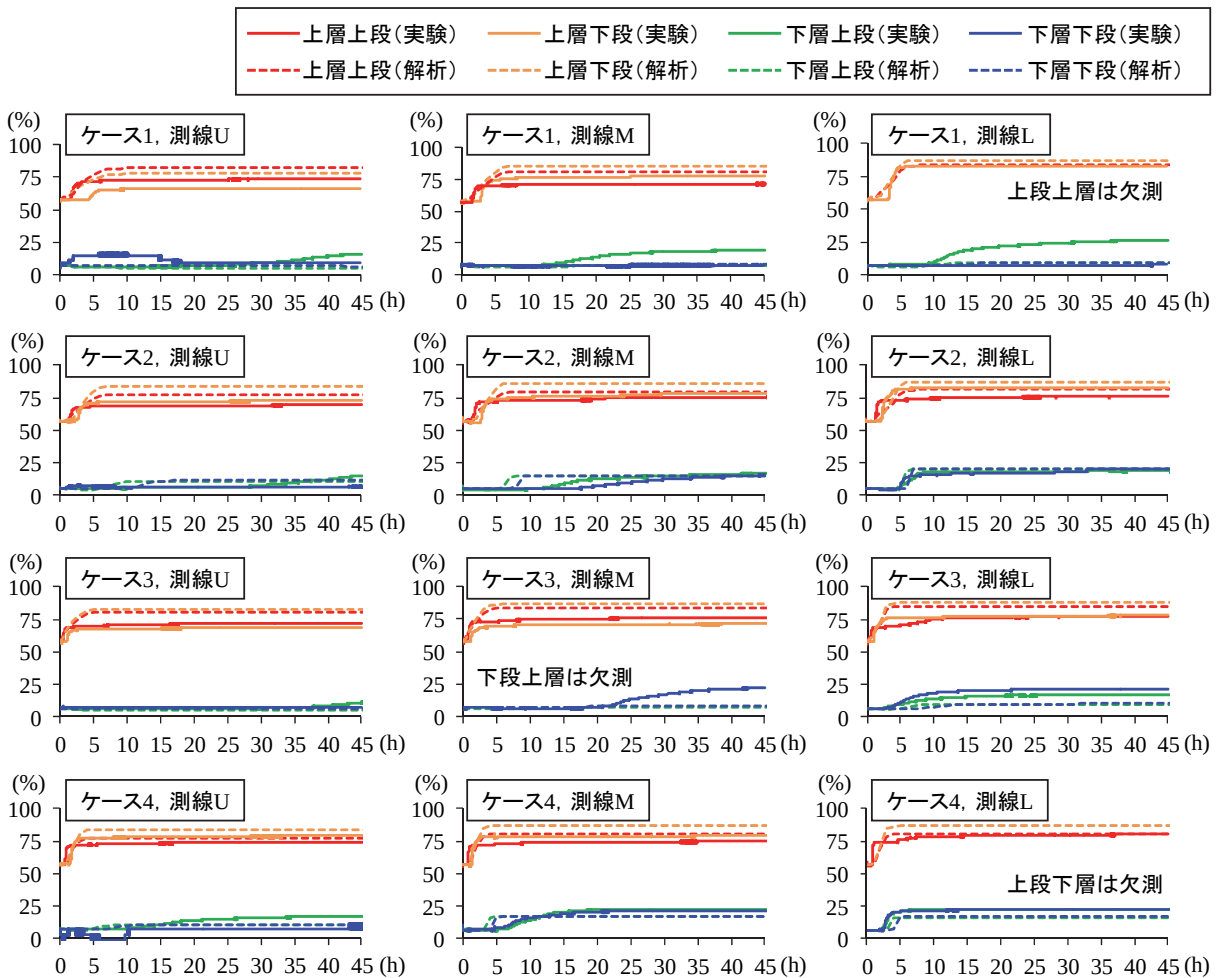


図-12 地盤内の飽和度の測定値と解析値の比較

4. キャピラリーバリアの遮水のメカニズム

(1) 遮水の要因

既往の研究では、キャピラリーバリアの遮水のメカニズムは、上下層の1) 透水係数の差異、2) サクシジョンの差異、3) 全水頭の差異、の三通りで説明されている。すなわち、1) では不飽和状態で下層の透水係数が上層に比べて無視しう程低い場合に、下層への浸透が抑制されると説明する^{3, 13, 14, 15}。Miyazaki¹³は、本稿と同様の傾斜のある模型地盤を用いた実験を行い、層境界で観察された浸透流の屈折・流下が二層の不飽和透水係数の差に起因することを示した。これに対して、2) では不飽和状態で下層のサクシジョンが相対的に低い場合に、浸透水が上層に保持され、下層に浸透しないと説明する^{8, 16, 17}。Kung⁸は、粒度の異なる二層の境界に保持された間隙水を、表面張力によって管径の異なる管内に保持された水分でモデル化し、これをもとに限界長の評価式を提案した。また、3) では下層の全水頭が相対的に高い場合に、下層で上昇流が生じるため、下層に浸透しないと説明する¹⁸。Kitamura and Sako¹⁸は、様々な全水頭の分布パターンを想定し、遮水が生じる場合を検討している。

これらの既往の研究を踏まえて、解析で得られた模型地盤の流速（図-13）、透水係数（図-14）、サクシジョン（図-15）および全水頭（図-16）の分布をもとに、遮水のメカニズムを検討する。これらの分布図の時間断面は、

降雨開始から45時間経過し、地盤中の浸透流が十分定常状態になった時点である。なお、全水頭は、圧力水頭に下流端底部（図-10の上流端底部を原点としたときの $x=110, y=0$ ）をゼロとする位置水頭を加えたものである。4ケースのうち、まず下層の排水口からの流出がなかったケース1に着目する。浸透水は層境界で屈折・流下しているが、上流端から下流端までの全領域で下層の全水頭は相対的に低く、浸透水の一部は下層に浸透していることがわかる。ただし、その流速は上層中の流れに比べて極めて小さい。これは、下層の透水係数が上層よりも低いことが原因と考えられる。層境界では、下層の透水係数は最も大きい箇所でも、上層の1/1000以下である。なお、サクシジョンは下層で相対的に低く、上層で保水される条件にある。

次に、下層からの流出が見られた他の3ケースの諸量の分布をケース1と比較する。いずれも層境界では、ケース1と同様に浸透水の屈折・流下が見られるが、下層の浸透はケース1よりも流速が大きく、また下流で増大する傾向にある。特に、ケース2（傾斜角1/2）では、上層排水口から流出しない分、下流端では下層の浸透が、局所的に増大している。これらの流速分布に対応して、下層では透水係数の上昇、サクシジョンの低下、全水頭の上昇が生じ、下流でより顕著である。

想定される三つの遮水の要因のうち、以上の解析結果の説明に適切なものを検討する。まず、透水係数の差

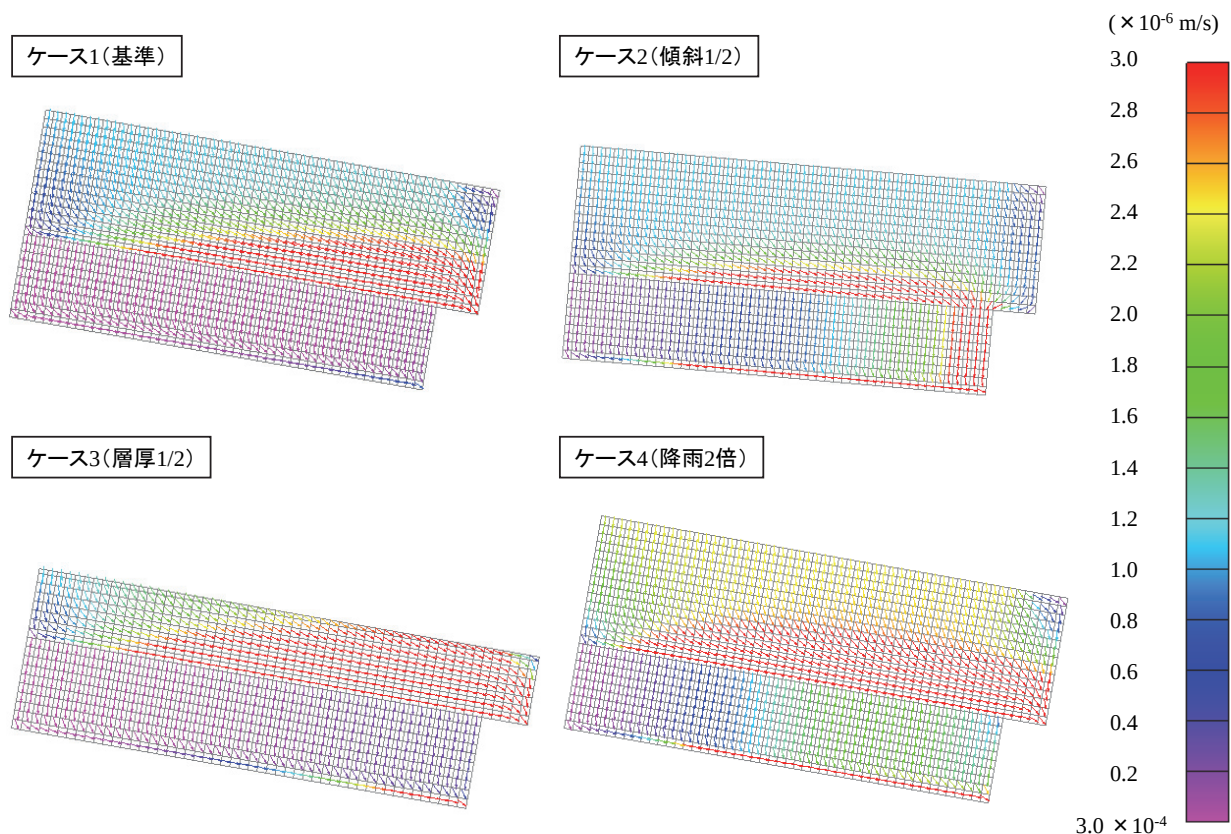


図-13 定常時の流速の分布

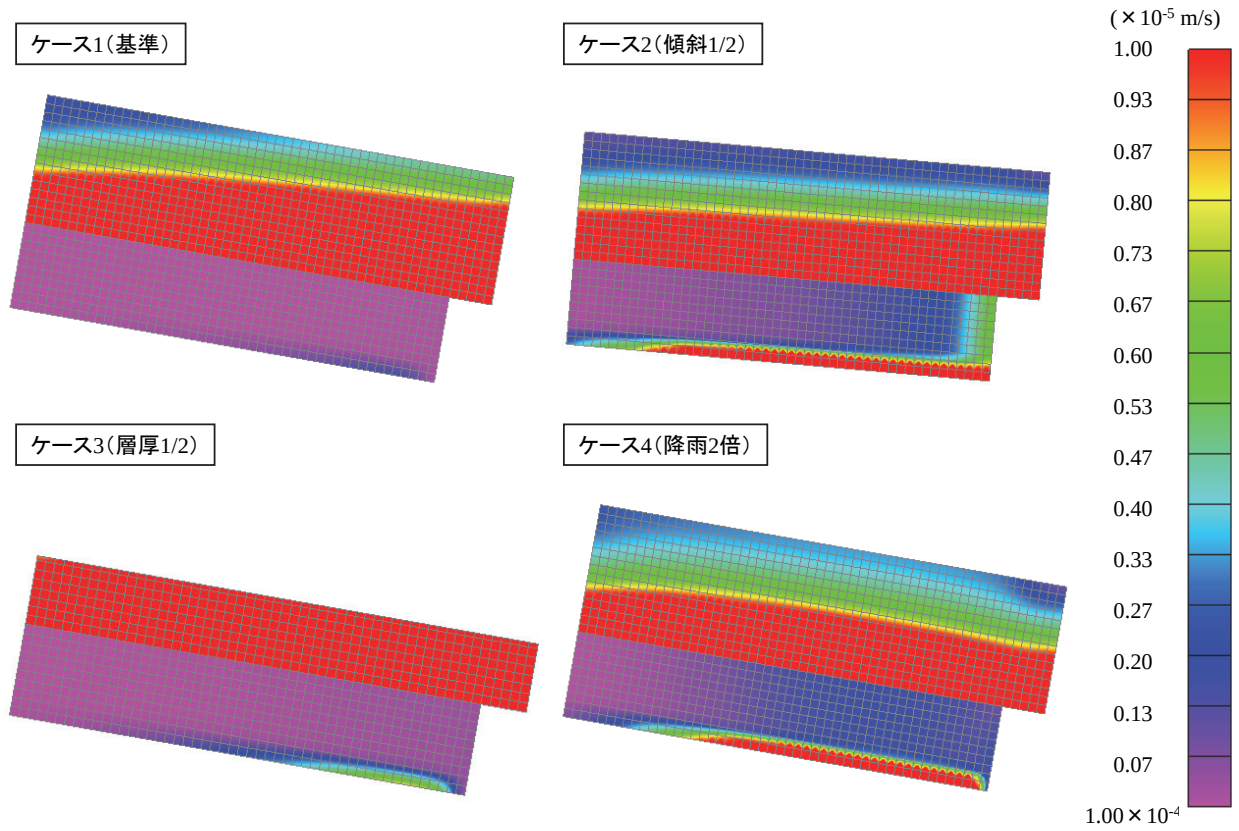


図-14 定常時の透水係数の分布

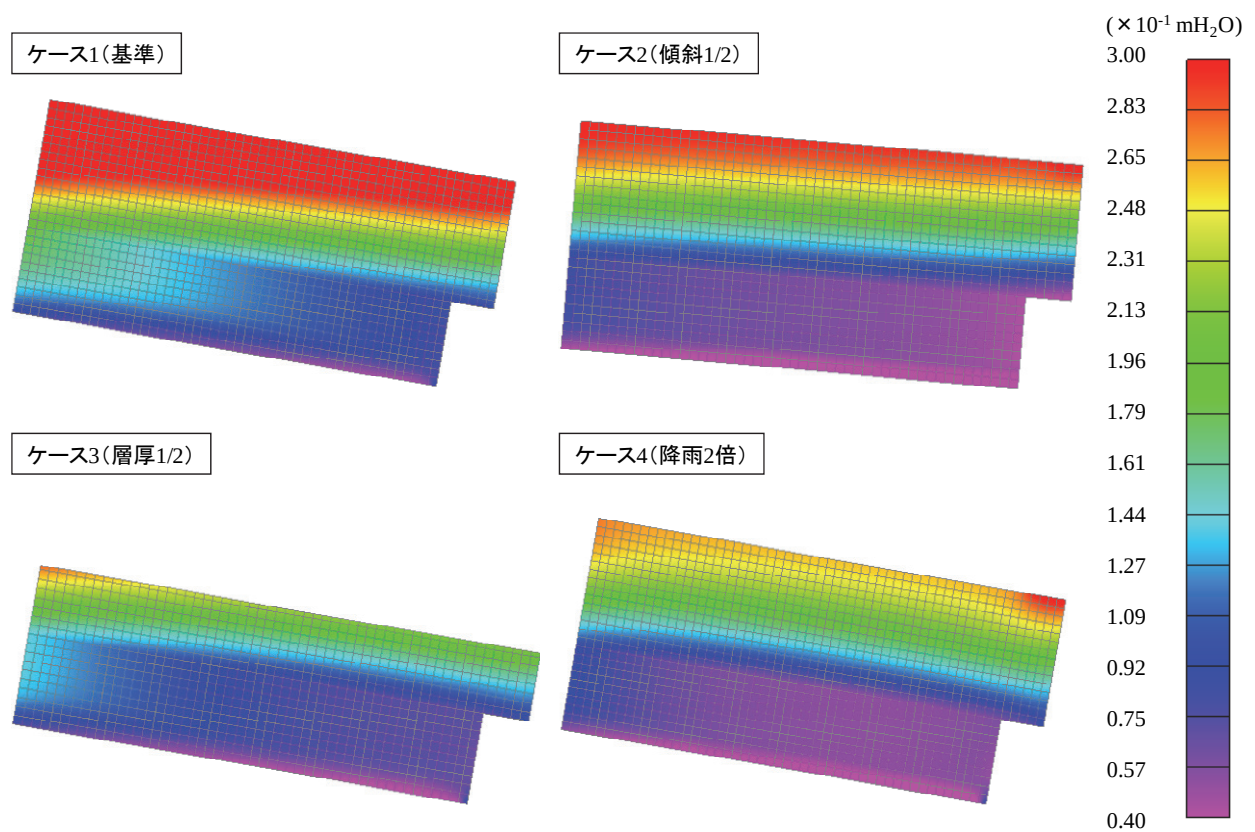


図-15 定常時のサクションの分布

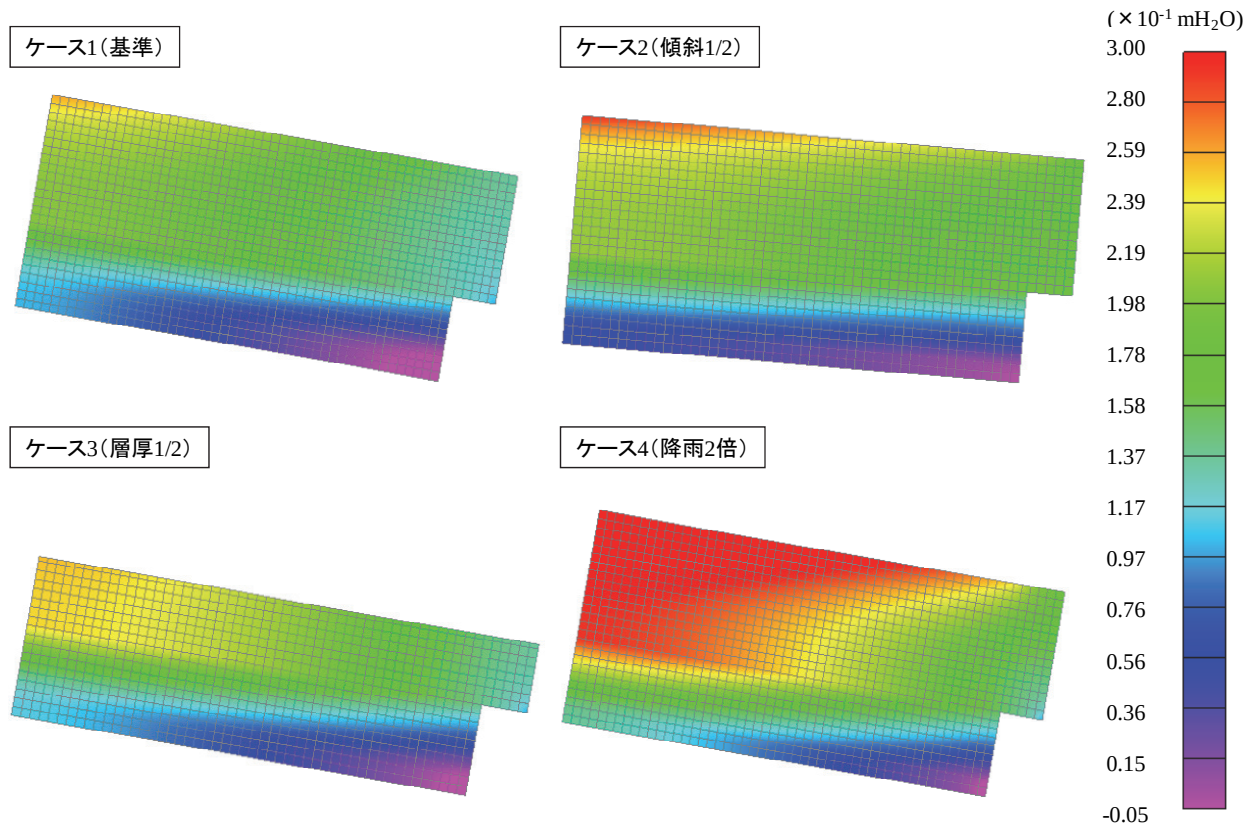


図-16 定常時の全水頭の分布

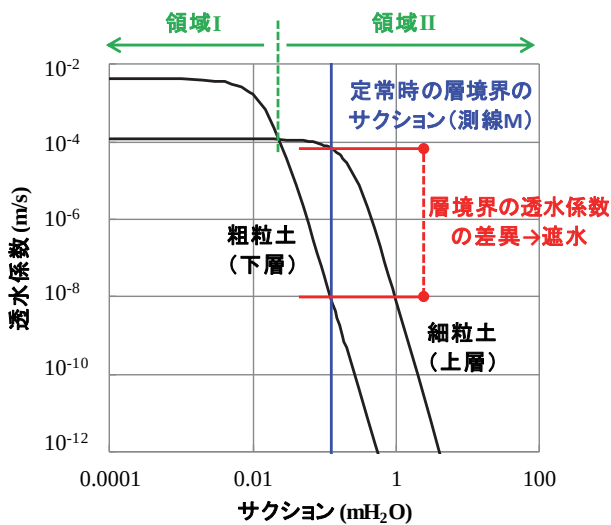


図-17 層境界における透水係数の差異 (ケース1)

異(要因1)については、遮水が生じる場合の下層の透水係数の範囲は定量的に明らかにされていないが、ケース1が範囲内にあり、他の3ケースでこれを超えているとすると、下層の浸透量の増加が説明できる。次に、サクシジョンの差異(要因2)で評価すると、いずれのケースも下層で相対的に低いため、下層への浸透は起こらないと判断されるが、ケース1以外では有意な量の浸透が見られる。最後に、全水頭の差異(要因3)で評価すると、

いずれのケースも下層で相対的に低いため、バリアは発現していないと判断されるが、ケース1は実質的には遮水されている。以上より、本研究で観察された遮水は、三つの要因のうち、透水係数の差異(要因1)で説明するのが適当と考えられる。

(2) 層境界の透水係数の差異とバリアの遮水性

遮水の要因となる層境界の透水係数の差異は、細粗粒土の保水性と透水性の違いに起因している。ケース1の解析で用いたサクシジョンと透水係数の関係を図-17に示す。飽和に近い領域では、粗粒土の透水係数は細粒土よりも高いが(領域Iとする)、不飽和化するとこの大小関係は逆転して、粗粒土のほうが低くなる(領域IIとする)。このような二つの領域は、細粗粒土の飽和透水係数と保水性の違いにより生じる。土の透水係数は飽和時に最も高く、不飽和状態では飽和度に応じて低減する。本研究で用いた粗粒土は、粒径2mm以上の土粒子のみから構成され、2mm以下を50%含む細粒土に比べて、間隙径が大きいため、飽和透水係数が高く、保水性が低い。そのため、飽和に近い領域Iでは、飽和透水係数の高い粗粒土の方が透水係数が高いが、保水性が低いため、サクシジョンの増加に対する飽和度と透水係数の低減が著しく、0.01mH₂Oを超えた付近で細粒土の透水係数を下回る(領域II)。

遮水の要因を層境界の透水係数の差異で説明した Ross³⁾は、バリアは層境界のサクシオンが領域Ⅱにあるときに発現し、領域Ⅰとの交点で破過するとしている。また、Stormont¹⁴⁾は粗粒土のサクシオンが水侵入値に達すると破過すると説明しているが、細粒土層の粒度を変化させた模型実験のうち、高い遮水性が発揮されたケースでは、破過の閾値とする水侵入値は交点よりもやや不飽和側の領域Ⅱにある。これらの既往の研究から、バリアの発現条件として、層境界のサクシオンが領域Ⅱにあることが必要と考えられる。本研究で実施した4ケースの解析結果によると、下層への浸透が顕著な場合も含めて、いずれも定常時の層境界のサクシオンは上流端から下流端に至るまで領域Ⅱにある。バリアの破過は、限界長を評価する場合など、必要に応じて閾値を設定して定義できるが、これは本論文の議論の対象ではないため、ここではいずれのケースもバリアを発現しているが、その遮

水性の違いにより、下層の浸透量に差が生じていると捉えることにする。

バリアの遮水性は、遮水の要因である層境界の透水係数の差異と密接に関係すると考えられる。図-18は、定常時において上流端から任意の位置までの間に下層に浸透した量をケース間で比較したものである。また、図-19はこのときの測線M上の透水係数分布の比較である。浸透量の少ないケースほど、層境界の透水係数の差異は大きく、ケース間でオーダー単位の明確な差が見られる。これは、図-17では、層境界のサクシオンが二つの領域の交点から不飽和側に移動するほど、遮水性が高いことを意味する。このことから、層境界の透水係数の差異は、遮水性に主体的に寄与するパラメータであり、遮水性の評価・制御において、重要な指標になると考えられる。

5. キャピラリーバリアの遮水性に影響を与える要因

(1) 地盤の傾斜角、層厚、降雨強度とバリアの遮水性の関係

キャピラリーバリアの遮水は、二層地盤を構成する土の浸透特性の違いによる層境界での透水係数の差異に起因することがわかった。そして、バリアの遮水性は、透水係数の差異の程度に密接に関係し、地盤の傾斜角や層厚を減少した場合や降雨強度を増加した場合は、遮水性が低下する傾向が確認された。ここでは、地盤の傾斜角と層厚、降雨強度が遮水性に与える影響と仕組みについて考察する。

地盤の傾斜角と層厚、降雨強度の3つのパラメータが下層の浸透量に与える影響は、4ケースの模型実験から傾向がうかがえるが、ケース間で地盤の浸透特性に若干の差があり、ケース数も十分ではない。そこで、3つのパラメータの影響をより正確に把握するため、浸透特性を統一して、傾斜角3種類、層厚3種類、降雨強度3種類の条件を組み合わせた計7ケースを対象に、数値解析による評価を行った。浸透特性は、先の4ケースの平均に設定した。解析ケースとパラメータの一覧をそれぞれ表-4と表-5に示す。

定常時（降雨開始から45時間後）の上流端から地盤

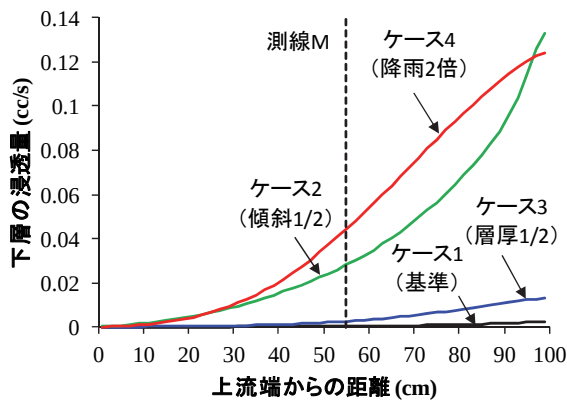


図-18 定常時の下層の浸透量の比較

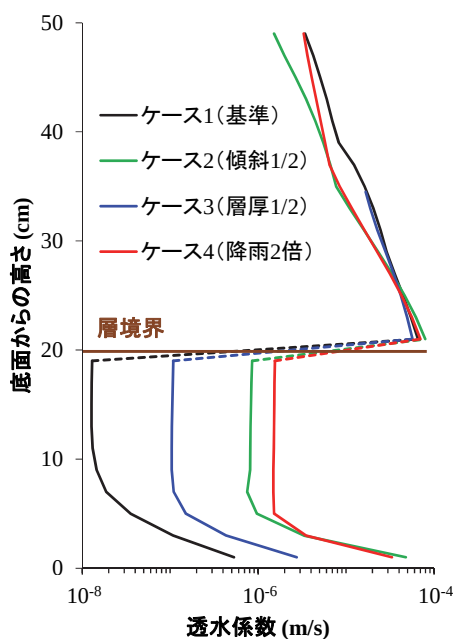


図-19 定常時の透水係数の分布の比較（測線M上）

表-4 解析ケース

傾斜角(度)	層厚(cm)	降雨強度(mm/h)
5	30	8
10		
20		
10	15	4
	60	
	30	16

中央の測線Mまでの領域における下層の浸透量の評価値を示す。降雨強度が8mm/hの場合について、傾斜角との関係を図-20の上段左図に、層厚との関係を上段中図に示す。また、傾斜角10度、層厚30cmの場合について、降雨強度との関係を上段右図に示す。いずれも縦軸は、

表-5 解析に用いたパラメータ

水分特性曲線 モデル パラメータ	上層	$\alpha=0.047, n=2.816, m=0.645,$ $\theta_r=0.195, \theta_s=0.315$
	下層	$\alpha=0.579, n=2.654, m=0.623,$ $\theta_r=0.011, \theta_s=0.430$
飽和透水係数 (m/s)	上層	9.86×10^{-5}
	下層	4.21×10^{-3}
初期圧力水頭 (mH ₂ O)	上層	-1.576
	下層	-0.124
圧力水頭閾値 $H_{seepage}$ (mH ₂ O)	上層	-0.013 (傾斜5度)
	下層	-0.010 (傾斜10度) -0.027 (傾斜20度)

上流端から測線Mまでの領域の全浸透量に占める下層の浸透量の割合を表したものである。また、図-20の下段には、このときの測線M上の透水係数の分布を合わせて示す。実験で見られた傾向の通り、傾斜角や層厚が小さいほど、また降雨強度が高いほど下層の浸透量は多くなっている。また、下層の浸透量が多いものほど、下層の透水係数は高く、層境界の透水係数の差異は小さい。そして、3つのパラメータの中では、傾斜角と降雨強度に大きく依存し、層厚にはさほど依存しない傾向が見られる。

(2) 地盤の傾斜角、層厚、降雨強度がバリアの遮水性に影響を与える仕組み

地盤の傾斜角と層厚、降雨強度の3つのパラメータが下層の浸透量に影響を与える仕組みについて考察する。上流端から任意の長さ*l*までの領域に着目すると、上流側で浸透した雨水は、図-21に示すように、上層中を下流に向かって流れる途中で一部は下層に浸透する。地盤内の浸透流が定常状態になっている場合は、式(6)に示す総流量の保存が成り立っている。単位奥行あたりでは、上層の断面流量 Q_u と上流側での下層の浸透量 Q は、それ

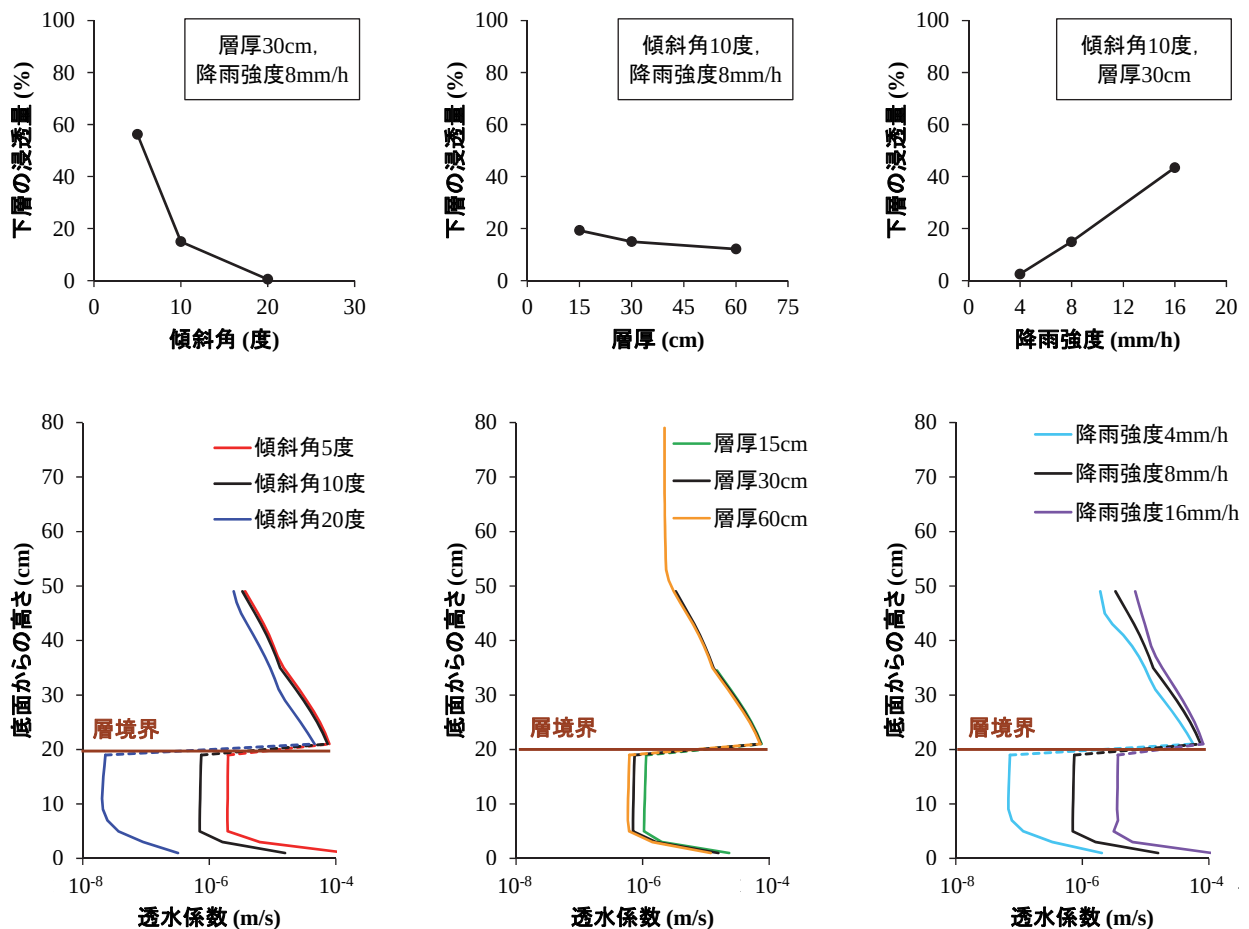


図-20 傾斜角、層厚、降雨強度が下層の浸透量に与える影響（上段）と透水係数の分布（下段）

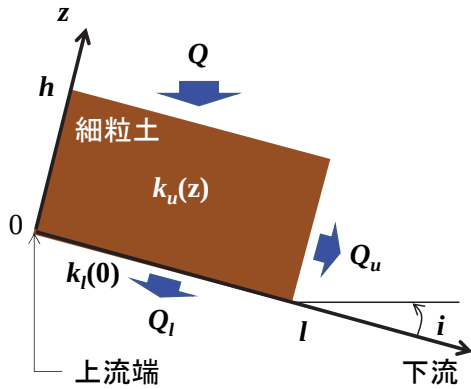


図-21 地盤内の総流量の保存

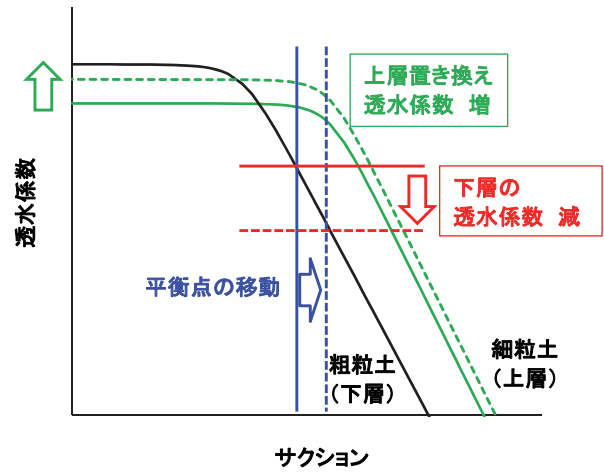


図-23 上層材料変更に伴う下層の浸透量の変化

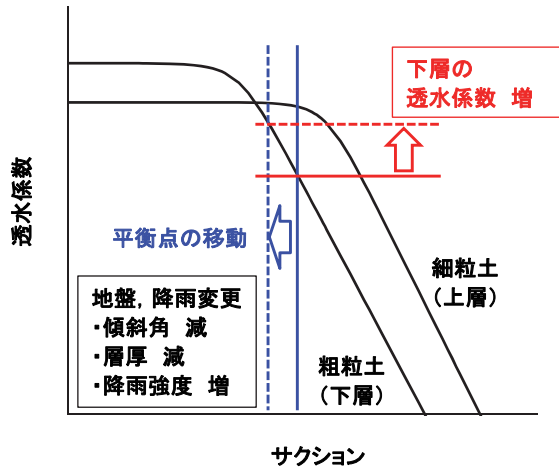


図-22 傾斜角, 層厚, 降雨強度の変化に伴う下層の浸透量の変化

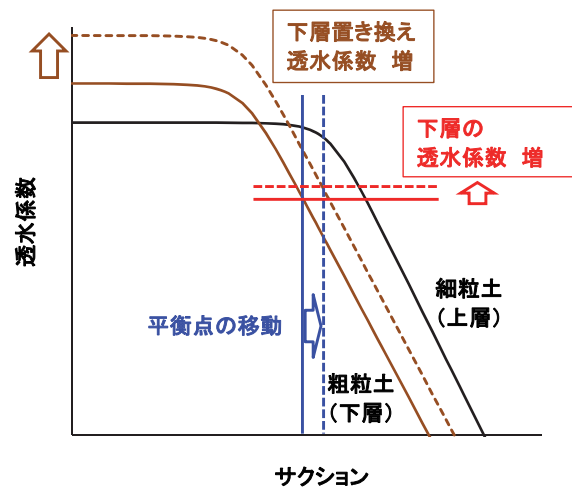


図-24 下層の材料変更に伴う下層への浸透量の変化

ぞれダルシー則を用いて, 式(7)と式(8)で表す. ここに, $k_u(z)$, $k_l(z)$ は上下層の透水係数で, 深さ z の関数とする. これらは, 地盤の飽和度やサクションに依存して変化する. また, 動水勾配はそれぞれ地盤の傾斜角 i の正弦と余弦に相当するが, $i = 5 \sim 20$ 度の範囲で変化させる場合, $\sin i$ の変化に比べると $\cos i$ の変化は十分小さく, ほぼ一定とみなすことができ, Q_l はほぼ層境界の下層側の透水係数 $k_l(0)$ によって決まる.

$$Q = Q_u + Q_l \quad (6)$$

$$Q_u = \int_0^h k_u(z) dz \cdot \sin i \quad (7)$$

$$Q_l = k_l(0) \cdot l \cdot \cos i \quad (8)$$

いま, 地盤の傾斜角と層厚, 降雨強度の3つのパラメータが変化したときの総流量の保存 (式(6)) を考える. 上流側の浸透量 Q が一定で, 地盤の傾斜角 i や層厚 h が減少した場合, 上層の断面流量 Q_u は減少する. このとき, 式(6)を満たすよう, 図-22に示すように, 平衡点は透水係数 $k_u(z)$, $k_l(0)$ がより高い飽和側に移動する. このようにして下層の透水係数 $k_l(0)$ の増加, 層境界での透水係数 $k_u(0)$, $k_l(0)$ の差異の縮小, 下層の浸透量 Q_l の増加が生じ

る仕組みになっていると考えられる. また, 傾斜角や層厚が一定で, 上流側の浸透量 Q が増加する場合も, 式(6)が成り立つよう, 透水係数 $k_u(0)$ と $k_l(0)$ は連動して増加する結果, 下層の浸透量 Q_l が増加すると考えられる.

同様の考え方で, 地盤の浸透特性が変化した場合に生じる下層の浸透量の変化も説明できる. まず, 傾斜角, 層厚, 降雨強度が一定の条件で, 上層を透水性の高いものに置き換えた場合について考える. 平衡点は, 図-23に示すように, 式(6)が成り立つよう Q_u が増加する分, 不飽和側に移動し, $k_l(0)$ および Q_l は減少する. 次に, 下層を透水性の高いものに置き換えた場合も, 平衡点は, 式(6)が成り立つよう Q_l が増加する分, 不飽和側に移動するが, $k_l(0)$ は置き換え前よりも高い状態で平衡に至るため, Q_l は増加する (図-24). すなわち, 上層の透水係数が高いほど, また下層の透水係数が低いほどバリアの遮水性は高いと考えられる.

(3) 地盤の傾斜角, 層厚, 降雨強度がバリアの遮水性に与える影響力

次に, 地盤の傾斜角と層厚, 降雨強度の3つのパラメータがバリアの遮水性に与える影響の大きさについて考える. 下層の浸透量は, 傾斜角と降雨強度には大きく依存するが, 層厚にはあまり依存しない傾向が見られた. この理由について, 地盤内の流速分布をもとに考察する.

図-25は, 降雨強度8mm/h, 層厚30cmで, 傾斜角が異なる3ケースの定常時(降雨開始から45時間後)の地盤中央の測線M上の斜面水平方向の流速分布を比較である. 傾斜角が増加すると, 透水係数は減少するが(図-20下段左図参照), 動水勾配の増加の影響が強く, 上層断面の流速と流量は増加している.

また, 図-26は, 同様の流速分布の比較を, 地盤の傾斜角と10度, 層厚30cmで, 降雨強度が異なる3ケースについて示したものである. この場合は, 降雨強度が増加すると, 透水係数は増加し(図-20下段右図参照), 上層断面の流速と流量は増加している.

このように, 傾斜角や降雨強度が流速分布に顕著な影響を及ぼすのに対し, 層厚は流速分布にはほとんど影響しない. 図-27は, 同様の流速分布の比較を降雨強度8mm/h, 傾斜角10度で, 層厚が異なる3ケースについて示したものである. 層厚が増加すると, 透水係数が低下する分(図-20下段中図参照), 上層の流速は低下するが, 変化量は比較的小さい. そのため, 例えば, 最も薄い15cm厚の場合と最も厚い60cm厚の場合の上層の断面流量の違いは, ほぼ増し厚した45cmの領域の流量の違いに相当する. しかし, 上層中の流速は, 層境界で卓越

し, 地表面に向かって減衰する分布形状をとるため, 層厚を4倍にしたにも関わらず, 上層の断面流量の変化は2割程度である.

以上のように, 地盤の傾斜角と層厚, 降雨強度がバリアの遮水性に与える影響の大きさの違いは, 3つのパラメータの流速分布への影響と, 分布形状から理解できる. ただし, 層厚については, ここまでの説明によると, 層

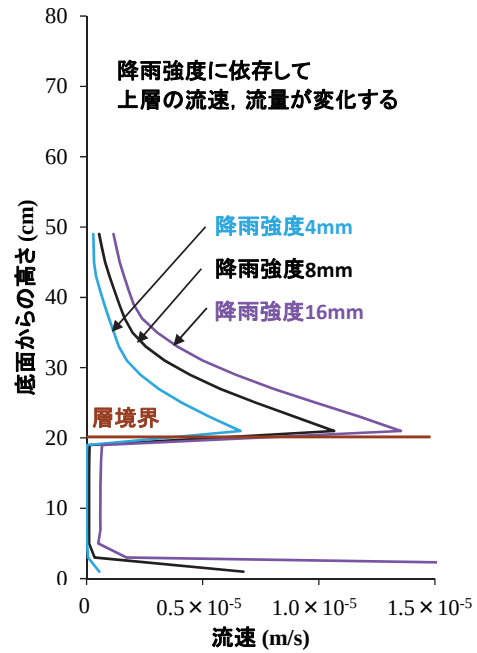


図-26 降雨強度が流速分布に与える影響
(傾斜角 10度, 層厚 30cm)

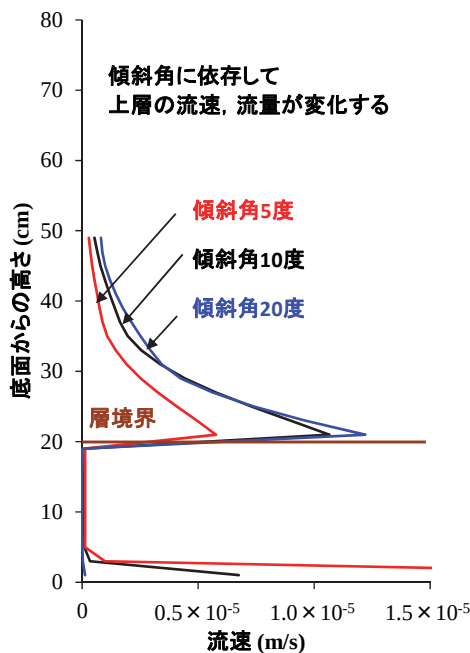


図-25 傾斜角が上層の流速, 流量に与える影響
(層厚 30cm, 降雨強度 8mm/h)

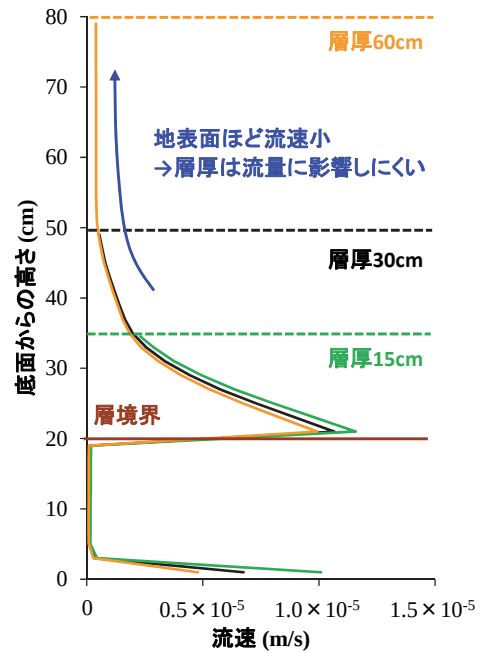


図-27 層厚が流速, 流量に与える影響
(傾斜角 10度, 降雨強度 8mm/h)

厚を厚くしてもバリアの遮水性にはあまり効果がないことになるが、ここで評価の対象としている遮水性は、あくまでも一定降雨条件で定常状態になったときの遮水性である。屋外で非定常の降雨がある条件では、層厚が厚いほど保水量が多く、また層境界に至るまでの時間が長くなるため、下層への浸透抑制に効果が高いと考えられる。

6. 結論

古墳の修復・保存に利用することを目的に、キャピラリーバリアのメカニズムと遮水性に影響を与える要因について、模型実験と数値解析による評価をもとに研究した。

模型実験は、地盤の傾斜角、上層の層厚、降雨強度の条件を変えた4ケースを実施したが、傾斜角や層厚が小さい場合や降雨強度が高い場合に下層の浸透量が多い結果となった。各ケースを浸透流解析で再現し、上下層からの流出量と地盤内の飽和度について実験と解析の結果を比較したところ、定量的に再現できており、適切なモデル化ができているものと考えられる。

数値解析による再現結果を用いて、キャピラリーバリアの遮水のメカニズムを考察した。既往の研究では、上下層の1) 透水係数の差異、2) サクシジョンの差異、3) 全水頭の差異、を遮水の要因とした三通りの説明がされている。4ケースの地盤内の透水係数、サクシジョン、全水頭の分布を解析で評価した結果、本研究で観察された遮水は、三つの要因のうち、1) 透水係数の差異で説明するのが適当と考えられる。また、層境界の透水係数の差は、遮水性に主体的に寄与することから、遮水性を評価・制御する上で重要な指標になると考えられる。

以上を踏まえて、地盤の傾斜角、層厚、降雨強度の3つのパラメータがバリアの遮水性に影響を与える仕組みを考察をした。上流端から任意の断面までの領域では、定常時には、上流側の浸透量は上層断面流量と下層の浸透量の和となる。この総流量の保存を満たすように、3つのパラメータの条件に応じて、定常時の上下層の透水係数と流量が変化することにより、バリアの遮水性が変化する仕組みになっていると考えられる。なお、3つのパラメータのなかで、バリアの遮水性は傾斜角と降雨強度に大きく依存し、層厚にはあまり依存しない傾向が見られた。これは、傾斜角と降雨強度は上層断面の流速と流量に影響するのに対し、層厚は流速分布にはほとんど影響せず、また流速は、層境界で卓越し、地表面に向かって減衰する分布形状をとるためである。

本研究では以上のように、キャピラリーバリアの基礎的、本質的な性質が明らかになった。この成果をもとに、屋外環境下での遮水性の評価や、キャピラリーバリアを

適用した古墳の保護施設や覆土の設計方法の検討など、実用面で必要とされる研究を展開する予定である。

謝辞：本研究はJSPS科研費 26・2562の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) 文化庁：古墳壁画の保存活用に関する検討会装飾古墳ワーキンググループ報告書，http://www.bunka.go.jp/takamatsu_kitora/kentokaito/kofun_wg/pdf/houkokusyo.pdf, 2014.
- 2) 澤田茉伊，三村衛，吉村貢：地盤工学に基づく降雨時の古墳墳丘斜面の安定性評価に関する検討，自然災害科学，Vol. 33, 特別号，pp. 87-99, 2014.
- 3) Ross, B.: The diversion capacity of capillary barriers, *Water Resources Research*, Vol. 26, No. 10, pp. 2625-2629, 1990.
- 4) 坂本篤，鈴木正人，西垣誠，小松満，今井淳，佐藤泰，横田季彦：キャピラリーバリアによる廃棄物処分場の浸透水量の制御に関する研究，廃棄物学会論文誌，Vol. 19, No. 5, pp. 318-327, 2008.
- 5) 上原るり香，神田美沙，森井俊広：土の毛管遮断機能と植生による地盤内の雨水浸透抑制効果，新潟大学農学部研究報告，Vol. 61, No. 2, pp. 175-180, 2009.
- 6) 福本惣太，三村衛，吉村貢，寺尾庸孝：墳丘復元材料によるキャピラリーバリア発現に関する実験研究，第 47 回地盤工学研究発表会発表講演集，pp. 73-74, 2012.
- 7) 大垣市教育委員会：大垣市埋蔵文化財調査報告書 史跡 昼飯大塚古墳 III, 2013.
- 8) Kung, K.-J. S.: Preferential flow in a sandy vadose zone: 2. Mechanism and implications, *Geoderma*, Vol. 46, No. 1, pp. 59-71, 1990.
- 9) van Genuchten, M. Th.: A Closed-form-equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 44, No. 5, pp. 892-898, 1980.
- 10) Lucner, L., van Genuchten, M. Th. and Nielsen, D. R.: A consistent set of parametric models for the two-phase flow of immiscible fluids in the subsurface, *Water Resources Research*, Vol. 25, pp. 2187-2193, 1989.
- 11) Mualem, Y.: A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, *Water Resources Research*, Vol. 22, No. 3, pp. 513-522, 1976.
- 12) 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，土木学会論文報告集，No. 264, pp. 87-96, 1977.
- 13) Miyazaki, T.: Water flow in unsaturated soil in layered slopes, *Journal of Hydrology*, Vol. 102, No. 1, pp. 201-214, 1988.
- 14) Stormont, J. C.: The effectiveness of two capillary barriers on a 10% slope, *Geotechnical & Geological Engineering*, Vol. 14, No. 4, pp. 243-267, 1996.
- 15) Yang, H., Rahardjo, H., Leong, E. C. and Fredlund, D. G.: A study of infiltration on three sand capillary barriers, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 41, No. 4, pp. 629-643, 2004.
- 16) 北村良介，酒匂一成，竹原晋平：毛管遮水層（Capillary Barrier）の歴史的建造物周辺の斜面管理へ

- の応用, 歴史都市防災論文集, Vol. 2, pp. 127-132, 2008.
- 17) 森井俊広, 鈴木一兄, 鈴木哲也, 河合隆行: 土のキャピラリーバリアの発現メカニズムと実務展開に向けた可能性調査試験, 新潟大学農学部研究報告, Vol. 67, No. 2, pp. 125-132, 2015.
- 18) Kitamura, R. and Sako, K.: Capillary barrier in unsaturated soils, *Proc. of 7th International Joint Symposium on Problematic Soils and Geoenvironment in Asia*, pp. 3-8, 2013.

(2015. 10. 1 受付)

INFILTRATION CONTROL IN HISTORICAL TUMULUS MOUNDS USING CAPILLARY BARRIERS—EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL STUDY ON THE MECHANISM OF CAPILLARY BARRIERS—

Mai SAWADA, Mamoru MIMURA and Mitsugu YOSHIMURA

Many damages of historical tumulus mounds are caused by precipitation associated with slope failure of tumulus mounds and deterioration of the stone chambers. Rainwater infiltration control is hence indispensable for conservation of tumuli. A capillary barrier is one of feasible options. A barrier is formed at the contact between a finer soil layer and an underlying coarser one. The infiltrating rainwater in the upper layer is diverted at the contact without flowing down to the underlying layer. In this paper, the mechanism of a capillary barrier and the factors that affect on the diversion capacity are studied by model chamber tests. Then, a series of numerical analysis is conducted to simulate the chamber tests. The calculated performance reveals that a barrier functions with the difference in hydraulic conductivity in the two layers. Degree of the diversion is controlled by the intensity of precipitation, the inclination of contact plane and the thickness of the upper layer because the hydraulic conductivity of the soil layers in the steady state changes to keep the total volume of seepage water when the three factors change.