

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 5 月 27 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K06491

研究課題名(和文) 豪雨時における斜面内浸透流の再検討 - 不均一性と間隙空気の役割について

研究課題名(英文) Re-examination of seepage flow on slopes during heavy rain - On the role of non-uniformity and pore air-

研究代表者

齋藤 雅彦 (SAITO, Masahiko)

神戸大学・工学研究科・助教

研究者番号：40283915

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、豪雨時の斜面崩壊に密接に関係する斜面内浸透流について、通常の浸透流解析では無視されている物性値の空間的不均一性および間隙空気の挙動に着目し、豪雨時における斜面内の飽和度や間隙水圧・間隙空気圧の空間分布、およびそれらの時間変化について、実験的および解析的検討によってその特徴を定性的/定量的に把握することを試みた。その結果、不均一な斜面では、低透水域の上流側において顕著な地下水位の上昇が生じ得ることを確認した。また、300ケース以上の解析結果より、豪雨時における斜面内湧水と表面流の発生メカニズム、および不均一性や間隙空気が安全率に与える影響について定量的な知見を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

浸透流解析は、斜面安定問題に対してすでに幅広く適用されている一般的な手法であるが、測定が困難な地盤の不均一性、および通常の降雨では無視し得る間隙空気の挙動については、考慮されることはなく、単純化されたモデルに基づいた解析結果により斜面の安定性が議論されてきた。これに対して本研究では、局所的な間隙水圧の上昇、あるいは異常な地下水位の上昇や湧水の発生といった崩壊に直結する現象を定量的に把握するとともに、それらが安定計算に与える影響を明らかにすることによって、斜面防災に関する従来にない有用な知見が得られた。

研究成果の概要(英文)：In this study, we focused on spatial inhomogeneity of physical properties and pore air behavior that were ignored in conventional seepage flow analysis. In addition, we attempted to qualitatively and quantitatively grasp the characteristics of spatial distributions of slope saturation, pore water pressure, pore air pressure, and temporal fluctuations during heavy rain. As a result, it was confirmed that a remarkable rise of groundwater level could occur in the upstream of the low permeable region in the heterogeneous slope. Furthermore, from the analysis results of more than 300 cases, quantitative information was obtained on the generation mechanism of spring water and surface flow in the slope during heavy rain, and the effect of heterogeneity and pore air on the safety factor.

研究分野：地盤水理学, 地盤環境工学

キーワード：斜面内浸透流 気液2相流解析 不均一性 間隙空気 空間分布モデル

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 社会的背景

近年においても、豪雨による土砂災害が毎年のように頻発している。各都道府県が公開している急傾斜地崩壊危険箇所は28万箇所以上に上るが、そのうちの人家5戸以上等の113,557箇所に対して、崩壊防止施設等による整備がなされているものは約20,600箇所にすぎず、当然のことながら、このようなハードウェア的な災害防止対策には自ずと限界がある。また土砂災害警戒区域の基礎調査が完了しているのは、47都道府県中16県(H27.4月時点)であり、土砂災害に対する備えは決して十分とは言えない。一方、急傾斜地崩壊危険箇所は、傾斜度30度以上、高さ5メートル以上とされているが、現地の地盤条件(地盤強度や透水性・地下水位等)は千差万別であり、崩壊の危険性についても、当然大きなばらつきが含まれているはずである。限られた予算のもと、効率的な災害対策を講じるためには、潜在的な危険度を可能な限りの確に評価する必要があるが、その前提として崩壊のメカニズムを明らかにすることはきわめて重要である。

(2) 国内外の研究動向および位置づけ

豪雨による斜面崩壊に関する研究は、国内外を問わず古くから活発に行われている。なかでも、崩壊メカニズムに関しては、理論的/実験的を問わず、またフィールド調査も含めて、すでに多くの知見が蓄積されている。崩壊予測モデルに関しても、簡易なものから詳細なものまで、様々な手法が提案されている。これら従来の崩壊理論においては、崩壊危険度は素因(土の力学的性質や地形・地層構成)と、誘因(降雨強度や総降雨量、あるいは地下水位)が条件として与えられ、安定解析等により安全率として評価されるのが一般的である。このとき、実際の斜面では、工学的に同一と見なし得る地層内においても、物性値(透水係数等)は空間的に大きなばらつきを有することが知られている。しかし、通常はこのような不均一性が考慮されることはなく、素因をモデル化する際には、各層の地盤物性値等は空間的に均一と仮定される。これは、これら物性値の空間分布に関する詳細な情報を得ることは事実上不可能なためである。また、崩壊の誘因となる地盤内の水分量や水位・水圧分布については、浸透流解析による予測/推定がある程度可能である。一方、異常な豪雨時には地盤内の間隙空気の影響が阻害されることにより、間隙水圧の上昇を促進することが知られており、間隙空気の挙動を無視した従来の浸透流解析ではこのような挙動を適切に評価することができない。

2. 研究の目的

豪雨時における斜面内の浸透挙動について、物性値の不均一性が及ぼす影響、および間隙空気の作用について、おもに室内実験と数値シミュレーションにより定性的/定量的に把握する。これらを考慮した場合、従来の不均一性および間隙空気の運動を無視した浸透流解析と比較すると、斜面崩壊に対して安全側/危険側の両面が浮かび上がることが考えられる。本研究では、まずはこの点について、より現実に近いと考えられるモデリングにより、斜面内の飽和度や間隙水圧・間隙空気圧の空間分布、およびそれらの時間変化から明らかにしたい。また、実際に豪雨によって崩壊が発生したいくつかの斜面に関する詳細な調査結果が得られており、これに基づいて、崩壊時の浸透挙動の再現を試み、崩壊を誘発したメカニズムについて新たな視点から考察を加える。

3. 研究の方法

(1) シミュレーションコードの開発とモデル斜面による検討

これまでに申請者らは、3次元気液2相流および飽和・不飽和浸透解析、自己相似型透水係数分布モデルを用いたジェネレータ、3次元地形ジェネレータ等をすでに開発している¹⁾⁻³⁾。これらを統合・発展させることによって、現時点で最高水準の斜面浸透流シミュレータ作成を目指す。またこれを用いて様々な斜面における浸透挙動の特徴を明らかにする。

(2) 模型実験による数理モデルの検証

模型実験は、現有の実験用水槽内に作成する。不均一性は、斜面形成の際に透水性・保水性の異なる材料を部分的に使用することによって表現し、不均一性の影響を的確に捉えることができるよう工夫する。また、こうして得られた実験結果について、シミュレータによる再現を試み、定量的に再現可能であることを確認する。

(3) 網羅的な数値実験による定量的評価

間隙空気を考慮した気液2相流3次元数値モデルにより、斜面の透水性、不均一性、勾配、斜面幅および層厚と、総降雨量および降雨強度などをパラメータとして変化させ、可能な限り網羅的に多数の数値シミュレーションを行う。これらに基づいて、豪雨時における表面流の発生、および崩壊に密接に関係すると考えられる斜面内湧水の発生メカニズムの検討、またそれらの定量的評価を試み、加えて均一性や間隙空気が斜面崩壊の安全率に与える影響について安定解析により検討する。

4. 研究成果

(1) 模型実験

試料としてガラスビーズを使用して勾配 25° の斜面模型を製作し、均一な斜面と局所的に透水性の小さい領域を含む不均質な斜面について、上流からの浸透時における水面形を比較した。写真1および写真2は実験結果の一例を示したものである。



写真1 均一斜面の水面形



写真2 不均質斜面の水面形

(2) 断面2次元モデルによる斜面内浸透流に関する研究成果

豪雨時の斜面崩壊に密接に関係する斜面内浸透流について、通常の浸透流解析では無視されている物性値の空間的不均一性について、透水係数の空間分布モデルを用いて疑似的にばらつきと偏りのある不均一な2次元斜面を生成し、また、気液2相流解析によって間隙空気を考慮した豪雨時における斜面内の間隙水圧・間隙空気圧の空間分布、およびそれらの時間変化について、その特徴を定性的/定量的に把握することを試みた。

図1に $K_{ws}=2 \times 10^{-3} \text{cm/s}$, $t=5$ 日における間隙水圧分布の一例を示す。いずれのケースにおいてもこの時点で下流端から中流部上端付近まで地下水位が発生しているが、均一場では滑らかな水面形が得られているのに対し、不均一場では斜面内の透水性のばらつきに応じて空間的に大きな水位変化が生じている。この解析結果は模型実験の結果とも整合する。

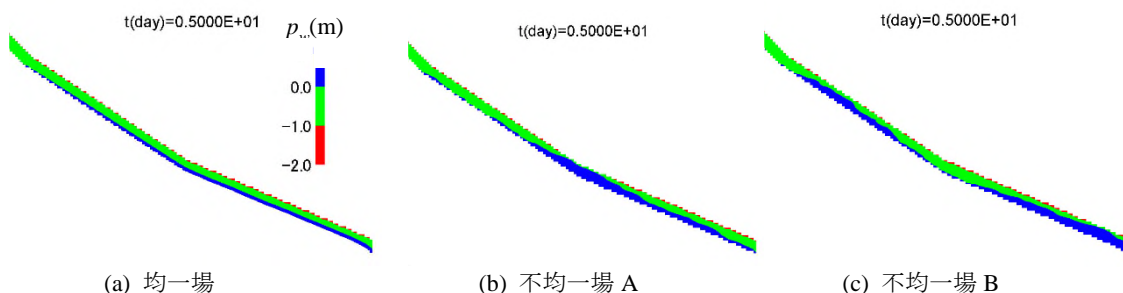


図1 間隙水圧分布の一例 (1phase, $K_{ws}=2 \times 10^{-3} \text{cm/s}$, $D=5\text{m}$, $t=5$ 日)

図2は、空気圧分布と空気の流速ベクトル分布の一例である。均一場においては、斜面内の間隙空気圧が概ね均等に上昇し、間隙空気も地表面全体から地表に排出される。一方、不均一場においては、透水性の低い部分で局所的に間隙空気圧が上昇し、透水性の高い部分から排出されていることがわかる。

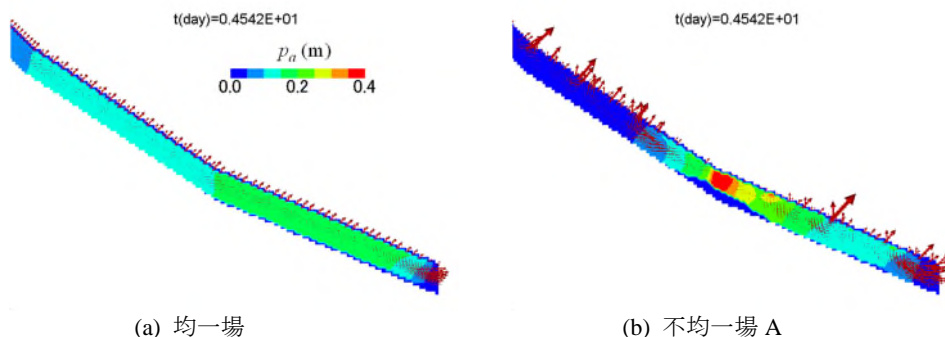


図2 空気圧分布と空気の流速ベクトル分布 ($K_{ws}=2 \times 10^{-3} \text{cm/s}$, $D=10\text{m}$)

これらの実験・解析により、得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 地盤の不均一性の影響については、斜面勾配や平均的な透水性によって生じ方が異なることが示唆された。また層厚との関係で地下水位の上昇余地が大きいほどより顕著に不均一性の影響が表れ、とくに透水性が低い領域において地下水位が大きく上昇することを示した。

2) 間隙空気の影響については、層厚が10mのケースにおいて最大約0.4mの間隙水圧の上昇をもたらし、とくに不均一場においては透水性の低い領域において局所的に上昇する可能性があることを示した。

(3) 3次元モデルによる斜面内浸透流および局所的湧水に関する研究成果

不均一な斜面における豪雨時の湧水の発生について、透水係数の空間分布モデルおよび3次元数値シミュレーションにより、まず均一場・不均一場のそれぞれについて、降雨強度および斜面の透水性と間隙空気の影響に関する定量的な考察を行った。また降水量、斜面の透水性、表土層厚等と、湧水の発生状況および発生量について整理することを試みた。

図3は、降雨のピーク時刻である $t=20\text{hr}$ における2相流解析による飽和度分布と、地表面の間隙空気の流速ベクトル分布を示している。均一場の地表面は一様に飽和度が上昇するため、地表面からの空気の排出が非常に小さいのに対し、不均一場では高透水性部分の飽和度が上昇しにくいため、間隙空気の排出が比較的容易であることがわかる。

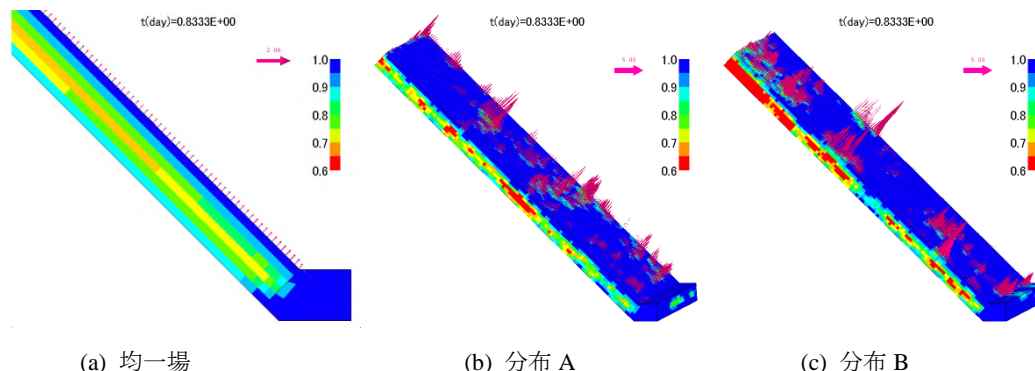


図3 飽和度分布と地表面における空気の流速ベクトル分布

図4は $t=24\text{hr}$ における $y=0.0\text{m}$ 断面の水圧分布と流速ベクトル分布の一例であるが、均一場では斜面全体が飽和して概ね斜面に平行に流下し、湧水は勾配変化による水面上昇部分のみに生じるのに対し、不均一場では部分的に不飽和部が見られるとともに、地表面に向かう非常に速い流れも生じている。このような豪雨時の斜面内に局所的に生じる速い流れは、細粒分の流出を伴うと考えられ、斜面の弱体化につながる要因の一つと考えられる。図5は、不均一場（分布B）における透水性分布と地表面の流速ベクトル分布であるが、とくに低透水性部分の上流側に局所的な湧水が発生していることがわかる。これは、低透水性部分における地下水位の上昇に伴うものである。

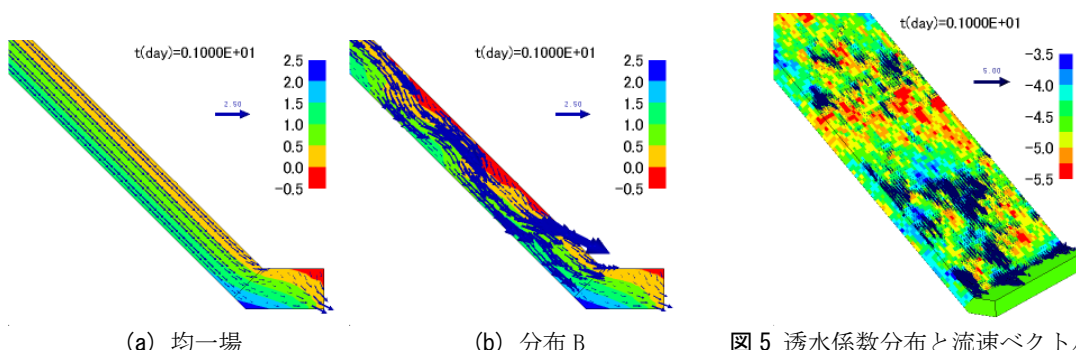


図4 水圧分布と流速ベクトル分布の一例

図5 透水性分布と流速ベクトル分布

これらの検討により得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 不均一場では均一場より1相流解析と2相流解析の圧力分布に違いが生じにくいと考えられる。ただし、明らかな相違が生じている部分が局所的に存在する可能性がある。
- 2) 湧水量の解析において、斜面における浸透強度 q_i に対する飽和透水係数の平均値 K_{wa} の比 K_{wa}/q_i が3.5以上であれば、間隙空気の影響は解析上無視し得ると考えられる。
- 3) 不均一場では豪雨時にも部分的に不飽和部が見られるとともに、局所的に地表面に向かう早い流れが生じる。とくに低透水性部分の上流側に局所的な湧水が発生しやすい。

(4) 斜面安定解析における透水性分布の不均一性に関する研究成果

豪雨時の斜面崩壊に密接に関係する斜面内浸透流について、通常の浸透流解析では無視されている透水性等の空間的不均一性および間隙空気の挙動に着目し、豪雨時における斜面内の飽

和度や間隙水圧・間隙空気圧の空間分布、およびそれらの時間変化について、透水係数の空間分布モデルと、飽和・不飽和浸透流解析および気液2相流解析を用いた3次元数値実験により、その特徴を定性的／定量的に把握することを試みた。また、不均一性や間隙空気が斜面安定解析結果に与える影響について検討した。

図6は、均一場と不均一場で安全率 F_s の時間変化を比較したものである。ここで $K_{wa}=1.0 \times 10^{-4}$ m/s のケースは 1ph, それ以外は 2ph の結果である。 F_s の最小値に着目すると、間隙空気の影響が顕著に現れるケースでは、わずかに均一場の方が小さいが、 $K_{wa}/q_r \geq 3.81$ のケースではすべて不均一場の方が小さい。

図7は、 $t=24$ hrにおけるy方向の安全率分布を示している。これより、均一場の安全率は、不均一場のどの断面の安全率よりも大きく、0.03~0.04程度であるが、危険側に評価されていることがわかる。また、図8は均一場と不均一場で、地下水面およびすべり面を比較したものである。間隙空気圧の影響を受けにくいケースでは、安全率は地下水位に強く依存すると考えられるが、不均一場では局所的に地下水位が高くなる部分が存在するため、最小安全率は均一場より低くなると考えられる。

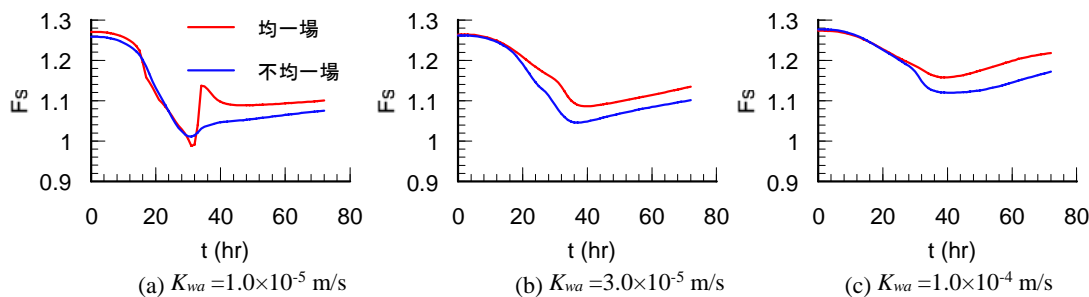


図6 安全率 F_s の時間変化 ($r_m=40$ mm/hr)

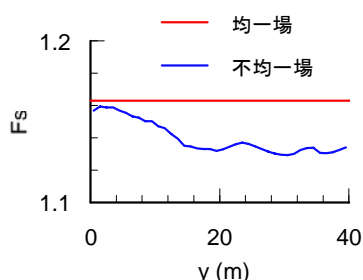


図7 安全率 F_s のy方向分布

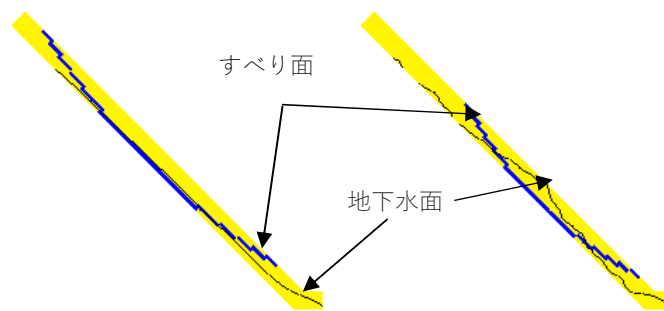


図8 地下水面とすべり面

これらにより得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 斜面内浸透流における間隙空気の影響は、浸透強度と飽和透水係数の関係より、 $K_{wa}/q_r < 2.5 \sim 3.5$ の場合に強く現れるものと推測される。
- 2) 2相流解析では比較的早い段階から安全率の低下が見られ、1相流解析より最大で0.1程度低下する可能性があり、 K_{wa}/q_r が小さいケースでは、安定解析上も間隙空気の影響は決して小さくはないと考えられる。
- 3) 間隙空気圧の影響を受けにくいケースでは、安全率は地下水位に強く依存し、不均一場では局所的に地下水位が高くなる部分が存在するため、最小安全率は均一場より低くなると考えられる。

<参考文献>

- 1) 齋藤雅彦, 川谷健; 透水係数の空間分布モデルの適用性に関する一考察, 土木学会論文集, No.694/III-57, pp.245-258, 2001.
- 2) 齋藤雅彦, 正木寛昭, 市成準一; 2層地盤における鉛直浸潤時の間隙空気の挙動に関する研究, 応用力学論文集, Vol.11, pp.843-850, 2008.
- 3) Masahiko SAITO, Takumi ISHIHARA and Kei NAKAGAWA; Numerical Simulation on Advection Dispersion Processes in A Mountainside Slope, J. Hydrosoci. and Hydraulic Eng, Vol.29/No.1, pp.47-56, 2011.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

| | |
|--|------------------------|
| 1. 著者名 齋藤雅彦, 増田竜士 | 4. 巻 Vol.74, No.4 |
| 2. 論文標題 不均一性と間隙空気を考慮した数値解析による豪雨時の斜面内浸透流に関する研究 | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 土木学会論文集B1(水工学) | 6. 最初と最後の頁 I_7-I_12 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|--|-----------------------------|
| 1. 著者名 齋藤雅彦 | 4. 巻 Vol.75, No.2 |
| 2. 論文標題 数値シミュレーションによる不均一斜面内の局所的湧水に関する研究 | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 土木学会論文集B1(水工学) | 6. 最初と最後の頁 I_1237-I_1242 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名 齋藤雅彦 | 4. 巻 - |
| 2. 論文標題 斜面安定解析における透水性分布の不均一性の影響に関する研究 | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Kansai Geo-Symposium 2019 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 | 6. 最初と最後の頁 252-257 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 齋藤雅彦 |
| 2. 発表標題 不均一浸透場のモデリングと熱・物質輸送の数値シミュレーション |
| 3. 学会等名 第5回複相熱流体工学シンポジア |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 齋藤雅彦, 増田竜士 |
| 2. 発表標題 斜面内浸透流における不均一性の影響と間隙空気の挙動について |
| 3. 学会等名 第18回地下環境水文学に関する研究集会 |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名 齋藤雅彦, 萩迫隆弘 |
| 2. 発表標題 堤体内浸透流における不均一性の影響と間隙空気の挙動 |
| 3. 学会等名 第17回地下環境水文学に関する研究集会 |
| 4. 発表年 2016年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 鏡原聖史, 藤井正雄, 戎剛史, 片岡沙都紀, 齋藤雅彦, 澁谷 啓 |
| 2. 発表標題 現地調査・室内試験に基づくモニタリング観測場所を抽出する方法の提案 |
| 3. 学会等名 第51回地盤工学研究発表会 |
| 4. 発表年 2016年 |

| |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名 齋藤雅彦 |
| 2. 発表標題 豪雨時における斜面内湧水の発生に関する数値実験 |
| 3. 学会等名 第54回地盤工学研究発表会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 SAITO Masahiko |
| 2. 発表標題 NUMERICAL STUDY ON SPRING WATER IN NON-UNIFORM SLOPES AT HEAVY RAIN |
| 3. 学会等名 46th IAH Congress - Malaga, Spain 2019 (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 齋藤雅彦 |
| 2. 発表標題 数値シミュレーションによる不均一斜面内の局所的湧水に関する研究 |
| 3. 学会等名 第64回 水工学講演会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 齋藤雅彦 |
| 2. 発表標題 斜面安定解析における透水性分布の不均一性の影響に関する研究 |
| 3. 学会等名 Kansai Geo Symposium 2019 -地下水地盤環境・防災・計測技術に関するシンポジウム- |
| 4. 発表年 2019年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

| | | | |
|---------|---------------------------|-----------------------|----|
| 6. 研究組織 | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|---------|---------------------------|-----------------------|----|