

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 14 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06211

研究課題名(和文) 空気相の封入・漏出が地盤構造物の品質に及ぼす影響

研究課題名(英文) Influences of air phase entrapment and leakage on quality of an earth structure

研究代表者

河井 克之 (KAWAI, Katsuyuki)

近畿大学・理工学部・准教授

研究者番号：30304132

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：降雨の浸透が地盤を不安定化させることは知られているおり、降雨浸透シミュレーションや現地計測で降雨浸透挙動の把握を目的とした研究が多くなされている。しかし、その時の地盤内空気相の挙動に注目したものは少なく、その影響もよく分かっていない。ここでは、地盤内空気相の構造物の品質に与える影響について検討した。まず、土/水/空気連成解析によって、傾斜地盤への降雨浸透挙動を明らかにするとともに、その時に空気圧の局所化が生じることを確認した。また、実物大盛土で詳細な浸透挙動計測とともに空気圧も計測し、解析結果の妥当性を検証した。その結果、降雨強度や総雨量によって、浸透・空気圧発生挙動が異なることが分かった。

研究成果の概要(英文)：It is known that rainfall infiltration can cause unstabilization of an earth structure and rainfall simulation and site monitoring have been conducted. However, the behavior of air phase induced by rainfall infiltration has not been sufficiently investigated. In this study, air pressure behavior within an earth structure was investigated through soil/water/air coupled simulation and a full-scale embankment test. First, rainfall infiltration into a slope was simulated under various conditions and it was found that air pressure localization occurs due to rainfall infiltration. Next, the infiltration behavior was monitored on full scale embankment. Consequently, different tendency of air pressure distribution according to rainfall intensity was obtained and it showed good agreement with simulation results.

研究分野：地盤工学

キーワード：不飽和土 空気相

1. 研究開始当初の背景

2014年の広島集中豪雨は多くの死傷者を出す惨事となった。土石流到着前に異音や異臭を感じたという被害者証言は、これまで経験的に知られていた土砂災害の前兆現象が降雨量などの数値計測データに加えて避難の判断材料として有効であることを示している。2006年に国土交通省で提案された「土砂災害警戒避難に関わる土砂災害前兆情報の活用とあり方」を、土田ら(土田孝, 由利厚樹, 加納誠二, 中藪恭介, 矢葺健太郎, 花岡尚, 川端昇一: 地盤内のおい強度と斜面崩壊時のにおい発生に関する一考察, 地盤工学ジャーナル, Vol.8, No.2, pp.339-348, 2013.)は表-1のようにまとめている。また, 土石流のみならず斜面崩壊発生箇所から非難した住民証言にも, 異臭による報告がなされている他, 発災の数時間前のおいの到達など, 上流の土砂崩壊によるものだけではなく, 地盤内に封入されている空気の漏出によるものも多く含まれているものと考えられる。また, 豪雨時の河川堤防が破裂音とともにエアブローを生じ決壊した事例は, 多くの文献で報告されており(例えば, 小高猛司, 岡二三生, 横田善弘, 竜田尚希, 角南進: 平成16年7月福井豪雨による地盤災害の緊急調査団報告-福井豪雨による河川上流部の被害について-, 2005.), これも地盤内の空気相が圧縮され瞬間的に漏出した結果と考えることができる。現在の地盤工学は, 飽和状態にある土の力学体系の整備によって発展を遂げ, 近年になりようやく不飽和状態にある土の力学モデルがいくつか提案されるようになったが, 地盤内の空気相の挙動を土骨格, 間隙水挙動と連成させ, 初期値境界値問題にまで発展させ実現象に適用しようとするアプローチは少ない。

2. 研究の目的

本研究では, 降雨や地下水位上昇といった

表-1 土砂災害と前兆現象の種類

五感	移動主体	土石流	崖崩れ	地滑り
視覚	山斜面がけ	溪流付近の斜面が崩れ出す 落石が生じる	崖に割れ目 崖から小石が落ちる 斜面が孕み出す	地面にひび割れができる 地面の一部が落ち込む, または盛り上がる
	水	川の水が異常に濁る 雨が降り続けているのに水位が下がる 土砂の流出	表面流が生じる 崖から水が噴き出す 湧水が濁り出す	沢や井戸の水が濁る 斜面から水が噴き出す 池や沼の水かさが増える
	樹木 その他	濁水に流木が混じり出す 溪流内の火花	樹木が傾く	樹木が傾く 家や擁壁に亀裂が入る 擁壁や電柱が傾く
聴覚		地鳴り 山鳴り 転石のぶつかり合う音	樹木の根が切れる音がする 樹木が揺れる音がする 地鳴りがする	樹木の根が切れる音がする
嗅覚		腐った土のにおいがする		

外水位変動, 外力変化がもたらす変形によって, 地盤内の空気相が封入もしくは漏出する挙動を明らかにすることにある。これまでも地盤材料の透気性に関する研究はいくつかあるものの, 様々な外的要因にさらされた地盤構造物において, 内部の空気相が浸透特性のみならず変形特性に及ぼす影響を明らかにしたものは少ない。本研究では, 模型実験と数値解析によって, 地盤構造物中の空気の流れや封入圧の評価手法を確立し, 災害時の警戒指針や地盤構造物の設計管理へ適用することを目指す。

3. 研究の方法

地盤構造物内の空気相の挙動を明らかにするために以下の研究計画を立てた。

(1) 空気相挙動に注目した傾斜地盤への降雨浸透シミュレーション

既存の土/水/空気連成解析では, 相毎の質量保存則から連続式の定式化を行っているが, 実際の地盤材料内では, 高い圧力下で気相が封入されると, 気相は液相に溶解し, 飽和度や圧力の変化を生じることが考えられる。また, 逆に封入された気相の減圧によって液相の気化が生じる可能性も考慮する必要がある。これらはいずれも高飽和状態に起こる現象である。この様に, 高飽和領域では従来の土/水/空気連成問題のフレームワークが適用できない。ここでは, 液相内の溶解空気や気相内の水蒸気を精緻に表現するために, Henry 則や蒸気圧の概念を適用し, 連続式の拡張を行う。また得られたモデルを組み込んだ土/水/空気連成有限要素解析シミュレータの開発を行う。得られたシミュレータを用い, 傾斜地盤への降雨浸透挙動をシミュレートし, 地盤構造物内の空気相の局所化挙動を明らかにする。

(2) 実物大盛土における浸透挙動計測

降雨浸透などの水分量変化による地盤構造物の品質を評価するためにサクシオン計測を用いることが多い。サクシオンは間隙空気圧と水圧の差として定義されているが, 実際にサクシオン計測として用いられているテンシオメーターは水圧を計測するものであり, 空気相変化によって生じる水圧変化もサクシオン変化とみなされてしまう可能性がある。また, 水分特性曲線が有するヒステリシスを考慮して, サクシオンと含水率を独立して計測し, 地盤構造物内の浸透挙動を詳細に検討した例も少ない。ここでは, 実物大実験盛土を構築し, 材料定数や境界条件が明らかな状態で, 詳細な現地計測を行う。

(3) 高容量テンシオメーター開発のためのセラミック飽和手法の検討

テンシオメーターでは, 水で飽和した多孔質セラミックを介して土中水と圧力変換器受圧部を水理学的に連続させることで, 地盤内の負の水圧測定を可能にしている。つまり,

セラミックの飽和状態が精緻な計測のカギとなる。しかし、長期間計測や、高サクシオン値の測定は、テンシオメーター内でキャビテーションによる気泡発生の原因となり、計測を困難にしている。そこで、ここでは、セラミックの有効な飽和手法を模索するため、種々の条件で飽和させたセラミックをX線CT撮影によって飽和状態を把握し、その影響について検討した。

4. 研究成果

本研究で得られた成果を以下の様にまとめる。

(1) 空気相挙動に注目した傾斜地盤への降雨浸透シミュレーション

降雨模型実験を模擬するために、図-1の様な解析領域を設定した。模型斜面の天端と法面に、降雨強度相当の流速を与えた。その結果、図-2に示す様に、模型実験から得られた浸潤線を良く表現できた。この時のサクシオンの経時変化についても計測値と良い一致を見せ(図-3)、解析条件の妥当性を確認した。

次に、降雨強度の異なる降雨浸透シミュレーションを行い、浸透挙動の違いを確認した。図-4,5に降雨継続1.5時間後と、その後降雨を停止し1時間放置した時に飽和度分布を示す。一般的に、降雨強度に応じて、地表面からの降下浸潤線の飽和度が決まることが知られている。降雨強度 60mm/h の場合、地表面近傍がほぼ飽和状態にあることが分かる。いずれも、ここで設定した降雨継続時間では模型盛土深部は不飽和状態を維持している。図-6,7にこのときの間隙空気圧分布を示す。模型地盤内で圧縮された空気は地表面から

排出されるが、地盤の透気係数は飽和度の増加とともに低減していき、飽和状態ではゼロになる。降雨強度 60mm/h では、地表面近傍で空気の排出がほとんどできないため、浸潤線の降下に伴って、内部の空気圧が全体的に上昇しているのが明らかである。また、降雨停止後、高まった空気圧は法尻方向に消散していくのも確認できる。

(2) 実物大盛土における浸透挙動計測

降雨浸透シミュレーションで見られたような浸透挙動を確認するために、実物大盛土に置いて各種計測を行った。盛土(天端幅 4.0m, 盛土高さ 2.0m, 法勾配 1:1.8)は、宅地造成地の建設残土を用いて難透水性地盤上に造られた。図-8に各種計測装置の設置位置を示す。土壌水分計については2基のデータロガーを用いて10ヶ所設置した。その内、下部データロガーの1chに関しては、盛り立て過程における盛土深部の含水率変化を計測するために、盛土の1層目締めめ終了後に設置した。その他のセンサーは盛土完成後に地表面から設置した。図-9,10,11に下部データロガーに接続した含水率計の2015年11月、2016年6,9月の計測データを示す。図-9で、盛土完成は11月15日であり、それまでの1chの値は盛立て中の深部含水率変化である。わずかではあるが盛り立てとともに含水率が増加しているのは、盛土材料に含まれる水分が位置水頭差によって下部に移動していること示している。図-10は梅雨時を表しており、頻繁な降雨があることが分かる。3chに注目すると、降雨とともに含水率が増加しているが、その消散には数日を要しているのが

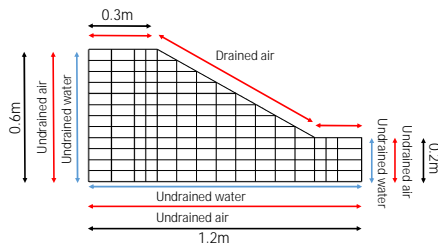


図-1 解析領域

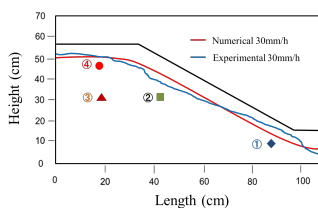


図-2 浸潤線

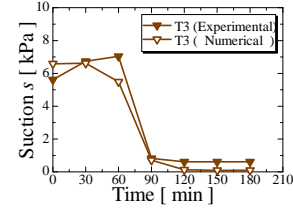


図-3 位置のサクシオン

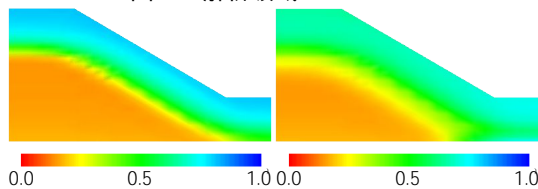


図-4 飽和度(30mm/h)

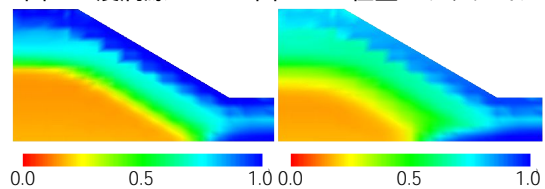


図-5 飽和度(60mm/h)

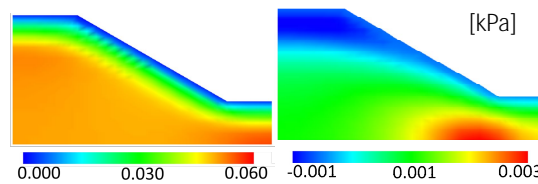


図-6 間隙空気圧(30mm/h)

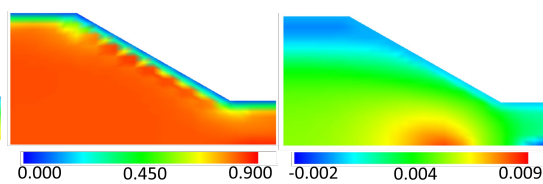


図-7 間隙空気圧(60mm/h)

確認できる。つまり、地盤構造物では雨水の浸透は容易いが、排水は困難であることが分かる。しかしながら、相当な降雨があるにも関わらず、盛土深部の含水率(1ch)が上昇するのは25日になってからである。これは、浸透した雨水が法面近傍を流れ行くこと示している。不飽和透水係数は飽和度が高いほど大きくなる。解析で示したように、法面近傍の飽和度が高いため、浸透した雨水は飽和度が高く透水係数の大きい法面方向に誘導され、結果的に浸透雨水は法面近傍を法面と平行に流れていくと推察される。しかしながら、頻繁な雨によって総雨量が大きくなると浸潤線降下とともにやがて、深部に雨水が到達すると言える。図-11は台風時期の高い降雨強度の雨であるが、総雨量が比較的小さいために、深部への雨水到達は生じていない。図-12に2016年9月の空気圧の経時変化を示す。周期的な値の増減があるが、これは外気温変化の影響を受けていることが分かる。しかし、降雨時には周期的な増減から逸脱する様に、空気圧が上昇しているのが確認できる。また、降雨強度による空気圧上昇傾向の違いも確認できる。5日付近の雨は通常の雨であり、20日及び26日付近の雨は台風による高強度の雨である。通常の雨では法

尻吹き空気圧のみ上昇しているが、台風時には全体的な空気圧上昇がみられる。この空気圧挙動の違いも解析で表現されている者である。

(3) 高容量テンシオメーター開発のためのセラミック飽和手法の検討

テンシオメーターに用いられているセラミック(直径41mm,厚さ7mm)を3種類の方法で飽和させ、その飽和状態を、X線CTスキャナーを用いて内部の密度分布を計測することで確認した。飽和手法については、デシケーターを用いて通水脱気する一般的な方法(真空法)と、密閉容器内にセラミックを脱気水に浸し、加圧する方法(加圧法)、また加圧法と同様に密閉容器を用いるが容器に高温～低温の熱サイクルを与えその時生じる圧力差によって飽和させる方法(ベルセロ法)を用いた。飽和させたセラミックは、その後気乾状態で乾燥させ、飽和直後からの乾燥過程のCT画像も得た。図-13に、CT画像の一例を示す。セラミックは境界を明らかにするために絶乾状態のセラミックではさむ形で撮影する。X-Z面の画像では間ではさまれたセラミックでより白っぽい画像となっているのが分かるが、これは飽和によって密度が

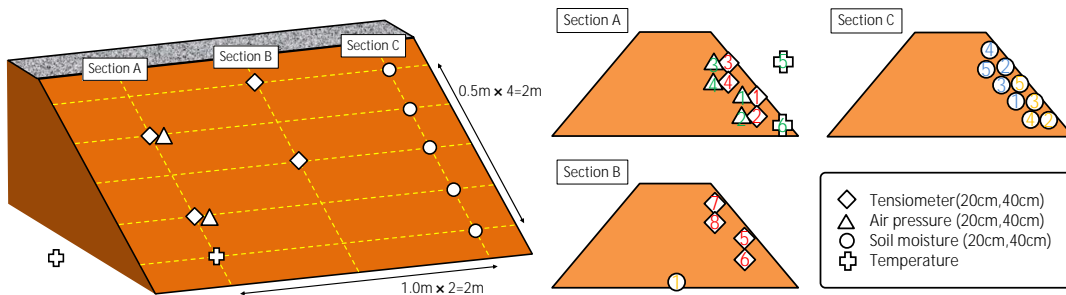


図-8 計測器設置概要

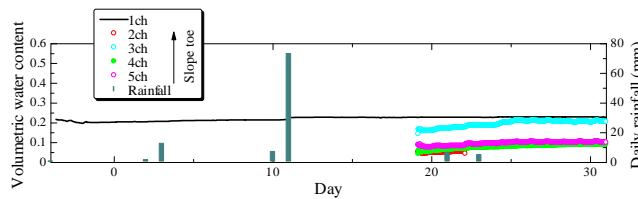


図-9 含水率経時変化(2015年11月)

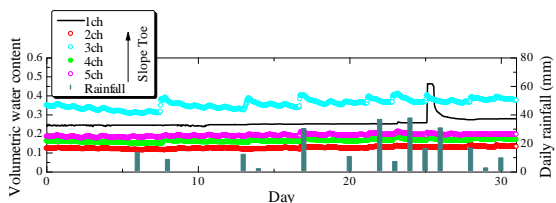


図-10 含水率経時変化(2016年6月)

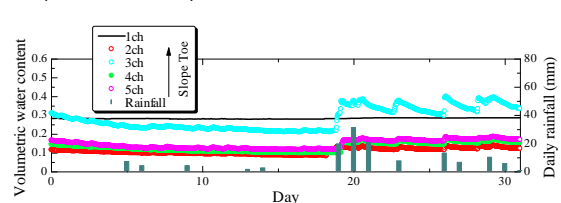


図-11 含水率経時変化(2016年9月)

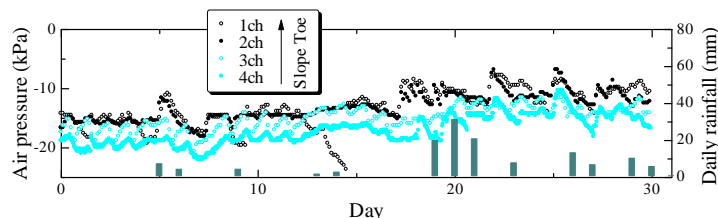
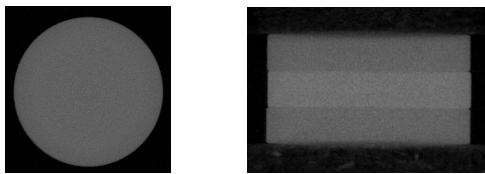


図-12 空気圧経時変化(2016年9月)



(a) X-Y面 (b) X-Z面
図-13 CT画像例

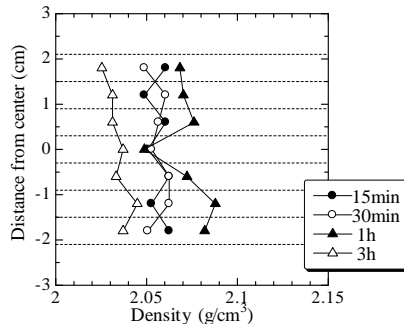


図-14 真空飽和(24h)後の密度分布

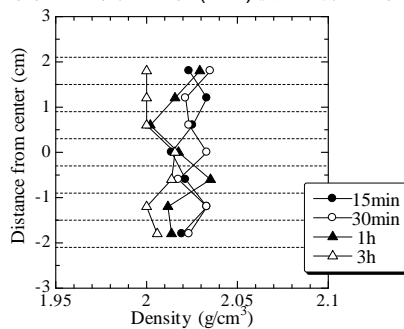


図-15 加圧飽和(24h)後の密度分布

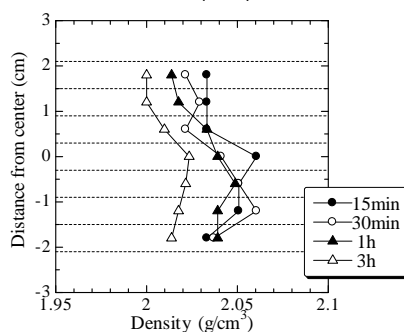


図-16 ベルセロ法(30回)後の密度分布

増していることを示している。図-2,3,4に、それぞれ真空法、加圧法、ベルセロ法によって飽和させたセラミックの飽和後の内部密度分布を示す。飽和直後(15min)の密度分布を比較すると、真空法では中央部で少し密度の低いところがあるものの全体的に加圧法、ベルセロ法よりも高い密度を示しており、飽和状態が高いことを示している。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計15件)

Kawai, K.: Influence of soil moisture and stratigraphic structure on actual evaporation, *Proc. 19th Int. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 査読有,

pp.1167-1170, 2017.

Kawai, K., T. Kawakatsu and A. Teraoka: Air pressure distribution induced by rainfall infiltration in soil/water/air coupled simulation, *Int. J. of GEOMATE*, 査読有, Vol.12, Issue 32, pp.63-69, 2017.

川勝拓哉, 河井克之, Binod TIWARI, 飯塚敦: 降雨時における傾斜地盤内空気の挙動について, *土木学会論文集 A2(応用力学)*, 査読有, Vol.71, No.2, I_171-I_180, 2015.

河井克之, 佐伯拓也, 野村瞬, 杉山友理, 飯塚敦: マルチング材料としての粉砕汚泥焼成煉瓦の有効活用について, *骨材資源*, 査読有, No.185, pp.13-23, 2015.

〔学会発表〕(計27件)

Kawai, K., D. Hazama and R. Nose: Behavior of the air phase within embankment due to rainfall, *Proc. of 2nd PanAm-UNSAT2017*, 査読有, 2017.

河井克之, 裕大智, 能瀬龍之介, 片岡沙都紀, 澁谷啓: 降雨時の盛土内浸透流と空気圧分布について, *Kansai-Geo-Symposium 2017 論文集*, 査読有, 2017.

Kawai, K., V. Phommachanh, T. Kawakatsu and A. Iizuka: Explanation of dry density distribution induced by compaction through soil/water/air coupled simulation, *Procedia Engineering*, 2016.

Kawai, K., V. Phommachanh, and A. Iizuka: Soil/water/air coupled F. E. simulation of phreatic surface generation process within a river levee, *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, 2015.

6. 研究組織

(1)研究代表者

河井 克之 (KAWAI, Katsuyuki)

近畿大学・理工学部・准教授

研究者番号: 30304312

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし

(4)研究協力者

なし