

機関番号：34315

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2010

課題番号：21760377

研究課題名（和文） 斜面内の間隙水および間隙空気の挙動に関する実験的研究

研究課題名（英文） Experimental research on behaviors of pore-water and air in a slope

研究代表者

酒匂一成（SAKO KAZUNARI）

立命館大学・立命館グローバル・イノベーション研究機構・准教授

研究者番号：20388143

研究成果の概要（和文）：

古くから、河川堤防の崩壊時に内部から気泡が発生したとの目撃情報があり、近年、間隙空気の挙動を解明することの重要性に関する議論が増えている。本申請課題では、一次元円筒土槽試験、室内土槽試験および実斜面において間隙空気圧の計測を実施した。結果として、不飽和土中の間隙空気圧の変化傾向および土中の間隙水圧との関係について計測することができた。室内土槽試験では、斜面崩壊との関係についても考察を行ったが、今回の実験では、明確な関係は見られなかった。しかし、間隙空気圧を計測することで土中の浸透挙動をより明確に把握することが可能となった。

研究成果の概要（英文）：

It has been observed that pore-air pressure affects unsaturated seepage behavior in unsaturated soils. It has also been reported that a large number of air bubbles can develop in soils after a river dike failure resulting from a flood. In this project, laboratory tests using a cylindrical soil box and a soil tank to investigate the behaviors of the pore-water pressure and the pore-air pressure under the different rainfall intensity and boundary conditions are reported. The behaviors of the pore-water pressure and pore-air pressure measured by a field monitoring are also described. As the results, these results suggest that measuring of the pore-air pressure clarifies the behaviors of pore-water pressure in unsaturated soil.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2010 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：地盤防災

1. 研究開始当初の背景

研究代表者らは、2004年7月から清水寺敷地内の重要文化財後背斜面において現地モニタリング（テンシオメータ、温度計、雨量計、光ファイバセンサ）を実施しており、その中で降雨強度と間隙水圧の関係、間隙水圧と地表面変位の関係などについて考察

を行ってきた。

近年、岡山大学西垣ら、京都大学岡ら、岐阜大学神谷らの研究において、堤防の決壊や産業廃棄物処理場内斜面の安定性や変形問題などにおいて、降雨や越流水による斜面に閉じ込められた間隙空気の圧力変動を考慮したモニタリング、数値シミュレー

ション、透気係数の室内実験などが行われてきている。しかしながら、斜面内の間隙空気の挙動を解明するために必要な計測データが十分に得られておらず、未解明な部分が多く残っている。学会等の質疑において、申請者らの現地モニタリング地点での間隙空気圧の計測や降雨強度-間隙水圧-間隙空気圧-斜面の安定性の関係についての考察が期待されている。

2. 研究の目的

本申請課題では、一次元円筒土槽、室内土槽および自然斜面において、間隙空気圧の計測を実施し、斜面内の間隙空気の挙動、各種条件（降雨強度、境界条件、土質材料など）の違いによる間隙空気圧の変化傾向、間隙水圧と間隙空気圧の相関関係、室内土槽試験における斜面崩壊時の間隙空気圧の変化傾向などについて考察を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

本課題の企画にあたり、簡易一次元円筒土槽試験および間隙空気圧の変化に伴うテンシオメータ計測値の変動確認試験を実施した。円筒土槽試験では、底面を排気条件として実験を行い、降雨時間の経過につれ、約1kPaの間隙空気圧の上昇が見られた。また、人工的に間隙水圧：-1kPaと間隙空気圧：1kPaを発生させ、テンシオメータで計測したところ、0kPaと計測された。このことから、テンシオメータの補正式は、“真の間隙水圧 u_w = テンシオメータ値 u_w' - 間隙空気圧 u_a ”となることが分かった。

これらの結果をもとに、間隙空気の挙動に関する詳細な検討を平成 21、22 年度で実施した。

(1) 平成 21 年度

平成21年度は、円筒土槽による一次元浸透試験を実施し、降雨条件（時間雨量10、50、80、100、200mm）・境界条件（排気・非排気条件、地下水あり・なし）の違いによる間隙水圧および間隙空気圧の挙動を計測した。

また、幅1m×奥行1.5m×高さ1mの土槽内に盛土を作製し、盛土内の間隙空気圧、間隙水圧、斜面崩壊の関係について計測を行った。さらに、実大規模の盛土試験を実施し、間隙水圧、土壌水分量、地下水位、地表面変位、間隙空気圧の計測を行った。

さらに、実斜面での実験に向けたセンサのキャリブレーションおよび計測システムの確認を行った。

(2) 平成 22 年度

平成 22 年度では、昨年度に実施した試験結果についてデータ分析を主に実施した。また、清水寺敷地内の斜面における間隙空気圧

の長期計測を本格的に開始した。以下に、各試験における検討内容について示す。

一次元円筒土槽試験

各種条件（底面の境界条件、降雨強度）の違いによる土中の間隙水圧および間隙空気圧の変化傾向に関する考察。

室内土槽試験

盛土斜面に降雨や地下水位を与えた際の“テンシオメータで直接計測された間隙水圧”と“間隙空気圧の補正を行った後の間隙水圧”を比較し、間隙空気圧の影響について検討。また、斜面崩壊発生時の間隙水圧と間隙空気圧の挙動に着目して考察。

清水寺敷地内斜面

現設置位置に間隙空気圧を併設し、長期計測を行い、間隙空気圧の変化傾向を把握し、テンシオメータで得られた値を補正し、雨量と間隙水圧の関係について再考。また、現地斜面における浸透挙動でみられた特徴的な現象において間隙空気圧の影響があるのか長期計測を通じて解明。

4. 研究成果

(1) 不飽和土中の間隙空気圧がテンシオメータ計測値に与える影響について

図-1 にテンシオメータの校正方法の概要を示す。テンシオメータの負圧センサの受圧部の高さを基準とし、そこから水面の高さを下げることで負圧を与えている。

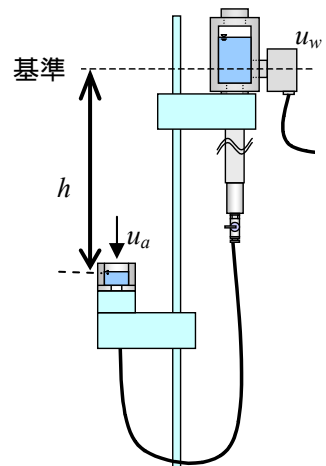


図-1 テンシオメータの校正方法

通常は、図-1 中の u_a は大気圧としているが、今回は $u_a=0, 1, -1$ [kPa]を与えて試験を行った。図-2 に校正結果を示す。図より、水面を同じ高さにしても与えられた空気圧の分だけ出力値が変動していることが分かる。テンシオメータで直接計測される値を間隙水圧 u_w' とし、間隙水圧 $u_w = \rho gh$ 、間隙空気圧 u_a とすると、これらは次式のような関係を持つ。

$$u_w' = u_w + u_a \quad (1)$$

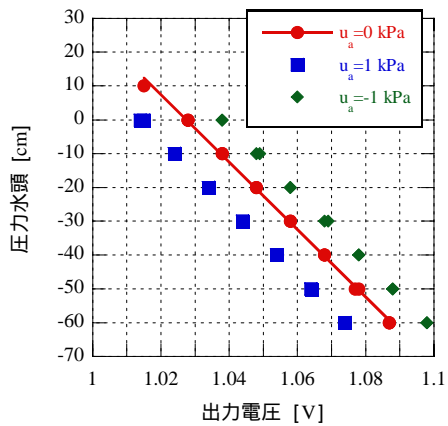


図-2 校正結果

以上のことから、もし土中の間隙空気圧が上昇した場合、テンシオメータの値に影響が及ぼされることがわかった。

(2) 一次元円筒土槽試験

各種条件(底面の境界条件、降雨強度)の違いによる土中の間隙水圧および間隙空気圧の変化傾向に関して考察を行った。

試験装置の概要および試験条件

図-3 に一次元円筒土槽試験の概要およびセンサの設置位置を示す。また、表-1 に試験条件を示す。今回の試験では、降雨条件を10、50、100mm/hourとし、底面の排気条件および地下水の条件を変化させて実験を行った。地下水位は、底面から100mmの位置に設定した。また、排気条件は円筒下部のバルブで調整した。試料として信楽産まさ土を使用した。

試験結果

図-4 は、Case1 の試験結果を示しており、テンシオメータから得られた値(間隙圧、 u_w')、間隙空気圧 u_a 、間隙圧 u_w を間隙空気圧 u_a で補正(式(1))して得られた間隙水圧 u_w の時系列変化を示している。図より、非排気条件においては、降雨により、土中の間隙空気圧の上昇がみられる。また、テンシオメータの値を間隙空気圧で補正することで、より明確に土中の間隙水圧の変化を把握することができる。

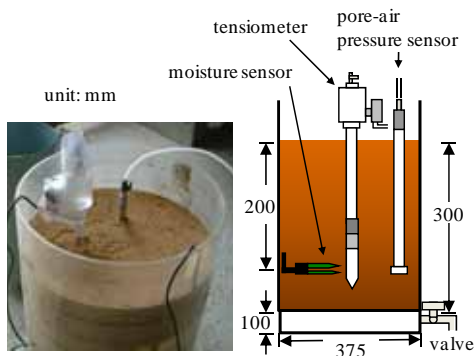


図-3 円筒土槽試験の概要およびセンサの設置位置



写真-2 降雨装置

表-1 試験条件

Case	Rainfall intensity	Exhaust conditions	Does groundwater exist?
Case1	10mm/hour	Unexhausted	Yes
Case2		Exhausted	No
Case3			
Case4	50mm/hour	Unexhausted	Yes
Case5		Exhausted	No
Case6			
Case7	100mm/hour	Unexhausted	Yes
Case8		Exhausted	No
Case9			

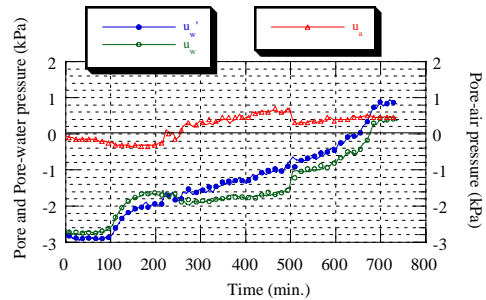
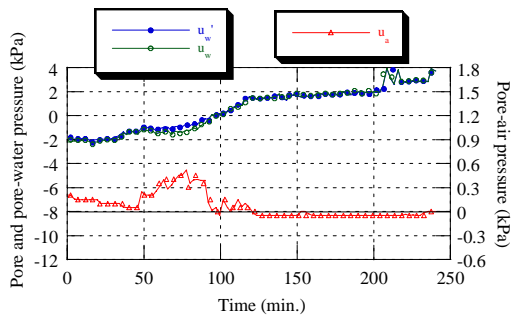


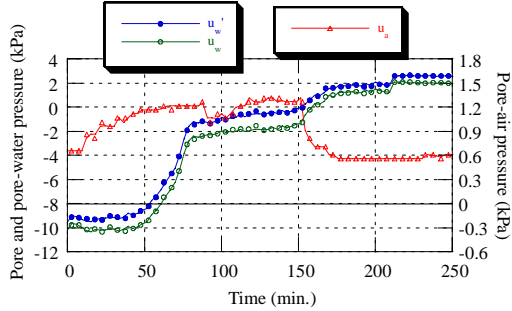
図-4 間隙圧、間隙水圧、間隙空気圧の時系列変化 (Case1)

図-5 は、時間雨量 50mm の際の排気条件の違いによる間隙水圧と間隙空気圧の変化挙動を示している。図より、非排気条件においては、間隙空気圧の上昇がみられる。また、非排気条件で間隙空気圧が上昇した後、ある程度時間が経過した際に、間隙空気圧の急激な減少が見られる。これは、センサや円筒土槽と土の境界から空気が外に排出したためと考えられる。また、その際に間隙水圧が上昇している。これは、土中に存在していた間隙空気圧が水の浸透を妨げていたが、外部に空気が排出されたため、空気に代わり水が浸透したためと考えられる。

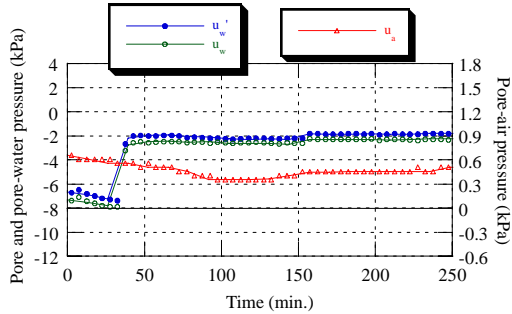
図-6 は、非排気・地下水無の条件下において、降雨量が異なる場合の間隙水圧および間隙空気圧の変化挙動の計測結果を示している。図より、降雨量が大きくなるとともに土中の間隙空気圧の増加量が大きくなっていることがわかる。また、間隙水圧が反応する時間が、降雨量が増えるとともに通常は、早



(a) Case4 (非排気・地下水有)



(b) Case5 (非排気・地下水無)



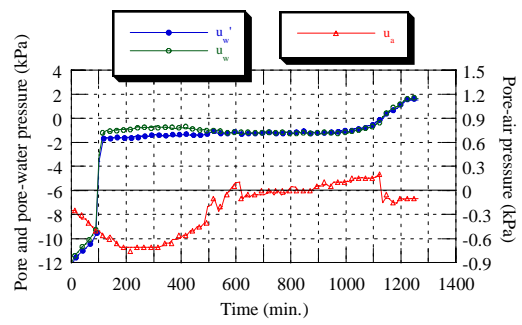
(c) Case6 (排気・地下水無)

図-5 時間雨量 50mm のときの間隙水圧および間隙空気圧の変化挙動

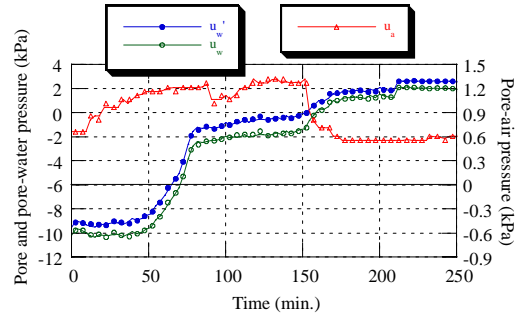
くなると考えられるが、試験では遅くなっていることがわかる。これは、土槽表面の間隙が雨水によって覆われ、土中に間隙空気圧が封入され、浸透が妨げられているものと考えられる。試験の観察によると、降雨量が多い場合には、土槽表面には水たまりが発生していた。また、センサや土槽側面から土中の間隙空気が排出された際に間隙空気圧の低下、間隙水圧の上昇、土槽表面の水の浸透が計測および観測された。

以上の結果から、一次元円筒土槽試験では以下の結果が得られた。

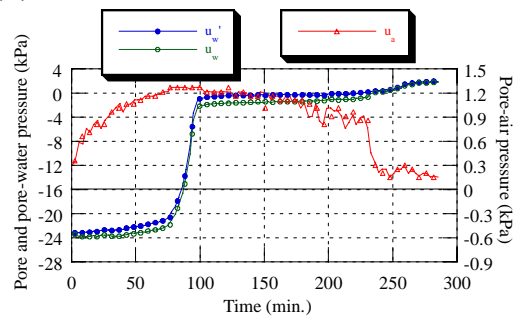
- ・土中の間隙空気圧を計測することにより、間隙水圧の変化挙動をより明確に把握することができる。
- ・非排気条件や地下水有条件では、土中の間隙空気圧の上昇がみられた。



(a) Case2 (10mm/hr・非排気・地下水無)



(b) Case5 (50mm/hr・非排気・地下水無)



(c) Case8 (100mm/hr・非排気・地下水無)

図-6 非排気条件下における降雨量の違いによる間隙水圧および間隙空気圧の変化挙動

- ・降雨条件が異なる場合、降雨量が多くなるとともに間隙空気圧の増加量が大きくなる。
- ・降雨量が多くなると、土中の間隙空気が閉じ込められ、水の浸透を妨げる。
- ・排気条件の場合は、土中の間隙空気圧はほとんど変化しない。

(3) 室内土槽試験

本研究では、立命館大学内の降雨装置室および独立行政法人防災科学研究所内の大型降雨装置室において室内土槽試験を実施した。ここでは、(独)防災科学研究所で実施した大型室内土槽試験結果を示す。

試験概要

室内大型土槽試験では、W4.0m×L7.8m×H5.0m の大型モデル斜面の崩壊試験を行った。作製した斜面に計測機器を設置して、50mm/h の降雨で試験を行った。本試験で設

置した計測機器は、空気圧計、テンシオメータ、土壌水分計、伸縮計、水位計である。図-7 にモデル斜面の概要およびセンサの設置位置を示す。テンシオメータは、下段、中段にそれぞれ3基ずつ（深さ0.15、0.45、0.85m）設置した。間隙空気圧計は、下段、中段にテンシオメータの隣に1基ずつ0.45m 深さに設置した。土壌水分計は、下段、中段、上段に3基ずつ（深さ0.15、0.45、0.85m）伸縮計は、下段、中段、上段に1基ずつ設置した。水位計は、斜面底面に等間隔に5基設置し、のり先から0.8m に1基設置した。

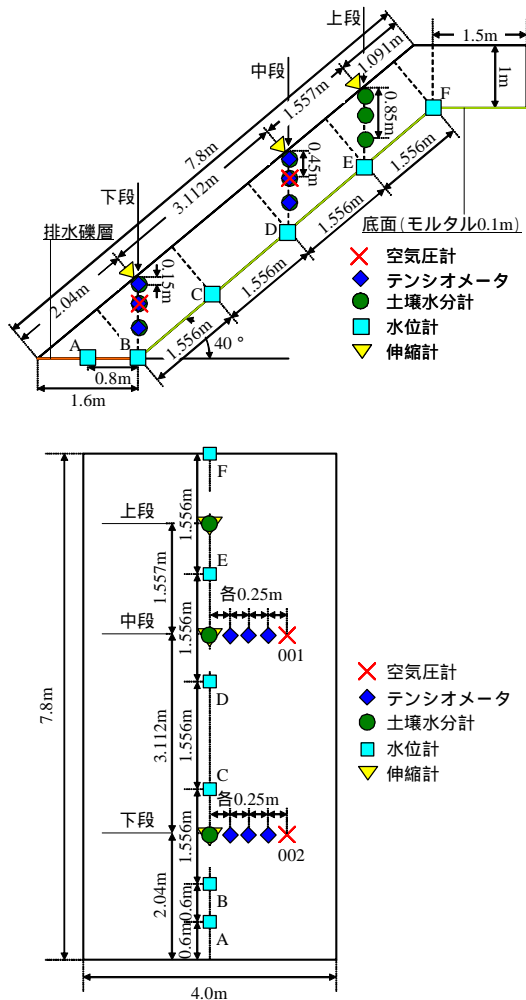


図-7 大型土槽試験の概要図

試験結果

試験結果を図-8 に示す。試験開始時は降雨強度を 100mm/h で行ったが、地表面部分に降雨による表面流が発生し、斜面と接しているケーブルが原因で、ガリ侵食が発生した。そのため、試験開始約 16 分後に降雨を強制的に一時停止し、約 3 分後（試験開始約 19 分後）に降雨強度を 50mm/h に変更して試験を再開した。降雨開始 167 分後に表層崩壊が発生し、降雨終了と同時に試験

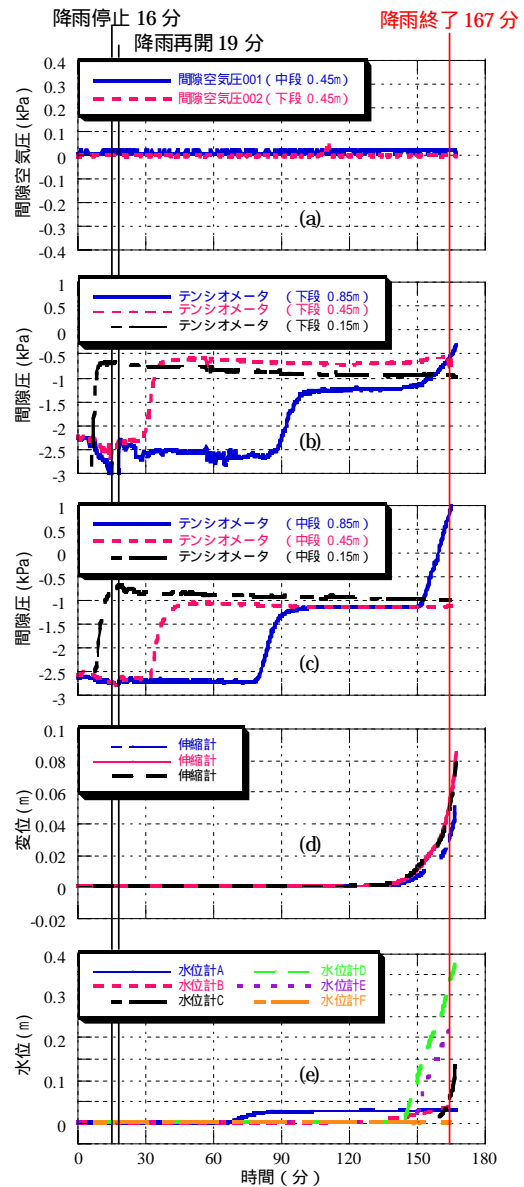


図-8 試験結果

を終了した。崩壊挙動としては、下段と中段の間から斜面が動き出し、上段を引っ張り、崩壊が生じた。また、のり肩に真横へ大きな亀裂が生じ、亀裂から雨水が浸透し、水みちが発生したことで、すべり面を形成された可能性が考えられる。

図-8 より、間隙空気圧のデータに全く変動がないことから、深さ 0.45m における今回の試験条件では、間隙空気圧の上昇は発生しないことが分かった。これは、浸透してきた雨水と入れ替わりに空気が斜面外に放出されたためと考えられる。テンシオメータの値は、浅い深度から順々に反応しており、表面から斜面内に向かって浸透が生じたことが把握できる。伸縮計と水位計の値は、試験開始 130 分頃までは一定の値を示していたが、それ以降においては徐々に増加しており、試験開始 167 分後の崩壊時に最大

値を示した。地下水位の上昇が斜面崩壊への影響が大いに関わっていることが分かる。

(4) 現地での間隙空気圧の計測

計測地点としては、著者らがこれまでに長期計測を行ってきた京都府京都市にある清水寺後背斜面で実施した。計測地点では、テンシオメータによる間隙圧の計測（深さ0.2、0.4、0.6、0.8、1.0m）を行っている。間隙空気圧の現地計測は、深さ1.0mと0.8mで行った。

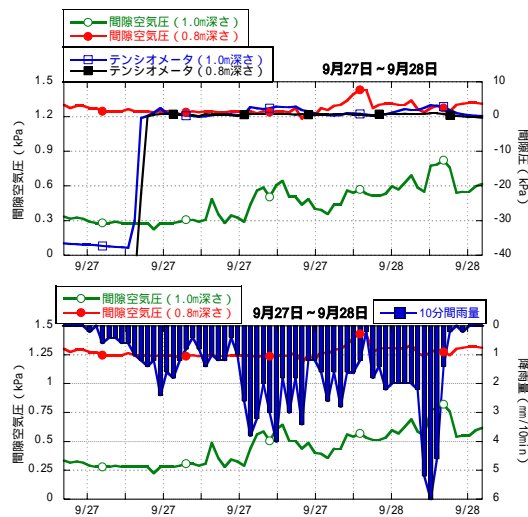


図-9 現地での間隙空気圧の計測結果
(2010年9月27-28日)

図-9に、9月27日～28日の抜粋データを示す。間隙空気圧を設置した際の大気圧状態を0kPaとして、計測を実施した。9月27日時点で、間隙空気圧の値は、深さ1mで0.3kPa、0.8mで約1.3kPaを示している。ただし、気温変化の影響などが観測されており、得られたデータの妥当性については、今後、検討する必要がある。降雨後の状況を見ると、降雨開始1時間過ぎで、間隙圧の計測データが上昇している。しかしながら、間隙空気圧のデータは上昇しておらず、間隙圧が0kPaに到達した後に、間隙空気圧が上昇し始めている。この場合、間隙空気圧計の先端に水面が達し、センサ内に空気が封入されたことによる間隙空気圧の上昇であることが考えられる。この斜面では、降雨強度が大きい場合、100cm深さのテンシオメータの値が急激に上昇する傾向が見られる。今回の空気圧計設置により、地下水が発生している可能性を検知することができた。しかしながら、これ以外の期間のデータを見ても、多くの場合がテンシオメータの値が0kPaに達した際の上昇がほとんどであり、今回の計測期間では、降雨と間隙空気圧の関係については、明確な関係を見ることはできなかった。

以上、今後、長期的に間隙空気圧の計測を継続していきたい。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計4件)

K.Sako, R.Fukagawa and T. Satomi: Slope Monitoring system at a slope behind an important cultural asset, Journal of Disaster Research, 査読有, Vol.6, pp.70-79, 2010.

檀上徹、酒匂一成、梅田和明、深川良一：原位置への適用に向けたテンシオメータの改良、地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム2010、査読有、pp.113-140、2010.

酒匂一成、里見知昭、深川良一、安川郁夫、石田優子：現地計測結果に基づく降雨による危険度指標と土中の間隙水圧の関係について、委員会主催シンポジウム No.144、降雨と地震に対する斜面崩壊機構と安定性評価に関するシンポジウム、査読有、pp.291-294、2009.

K.Sako, R.Kitamura, T.Satomi and R.Fukagawa: A research on the quantitative evaluation of slope stability during rainfall, Proc. of Prediction and Simulation Methods for Geohazard Mitigation, 査読有, pp.533-538, 2009.

[学会発表](計5件)

檀上徹、酒匂一成、深川良一：室内土槽試験における地盤内の間隙空気圧の計測、第46回地盤工学研究発表会、2011年7月5日、神戸国際会議場(兵庫県)

檀上徹、里見知昭、酒匂一成、深川良一：強降雨時における地盤内の間隙空気圧ならびに間隙水圧の挙動に関する実験的研究、第65回土木学会年次学術講演会講演概要集、2010年9月3日、北海道大学(北海道)

酒匂一成、小島淳、檀上徹、深川良一：間隙空気圧測定を考慮したテンシオメータの改良について、第64回土木学会年次学術講演会、2009年9月2日、福岡大学(福岡県)

檀上徹、里見知昭、酒匂一成、深川良一：雨水浸透時の地盤内における間隙水圧および間隙空気圧の計測に関する一考察、第44回地盤工学研究発表会、2009年8月18日、関東学院大学(神奈川県)

酒匂一成、北村良介、里見知昭、深川良一：不飽和浸透挙動に対する数値力学モデルのフィッティングパラメータに関する一考察、第44回地盤工学研究発表会、2009年8月18日、関東学院大学(神奈川県)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

酒匂一成 (SAKO KAZUNARI)

立命館大学・立命館グローバル・イノベーション研究機構・准教授

研究者番号：20388143