# 山地斜面末端の不均質な浸透流出現象の解析

京都大学大学院農学研究科　○正岡直也・山川陽祐・小杉賢一朗・水山高久
京都大学防災研究所　堤大三

## 1. 研究背景と目的

山地斜面末端の土層内部において、複雑な土層構造に起因する不均質な水文現象（e.g. パイプ流、基岩を介した浸透流出）が局所的な水分集中を生み、予測困難な表層崩壊を発生させることが近年特に注目されている。そのメカニズム解明のためには実際の斜面内部の不均質な土層構造と水分挙動を高い空間的密度で実測し、知見を得ることが必要である。本研究では崩壊危険斜面に高密度かつ広域にテンシオメータを設置し、土壌間隙水圧の変動を集中的に観測した。さらに得られたデータを用いた安定解析を行うことで、不均質な水文現象が崩壊発生へ与える影響を明らかにすることを目的とした。

## 2. 調査地と調査方法

観測は、京都大学防災研究所穂高砂防観測所ヒル谷試験流域内の南南東向き谷壁斜面末端（傾斜約 40 度）で行った（図１）。基岩地質は風化花崗斑岩である。調査斜面上において等高線に沿う方向の６本の測線（A～F）上で、貫入試験を斜距離約１m間隔で計 57 点行い、土層厚を測定した。その後テンシオメータを基岩面上及び土層中に合計 118 本埋設し、土壌間隙水圧(ψ)を継続的に計測した。

さらに得られたψデータを無限長斜面の安全率計算式に代入し、各地点の表層崩壊に対する安全率 Fs を算定した（小杉ら，2010）。すべて基岩面($N_h$=100)をすべり面と仮定し、計算条件として既往研究を参考に粘着力 c=1.0tf/m², 内部摩擦角φ=45° とした。

土壌のパラメータは、観測斜面近傍で土壌サンプルを採取し計測した。貫入抵抗値($N_h$)に基づき、表層土($N_h$ <30)と下層土(30< $N_h$ <100)に区分した。

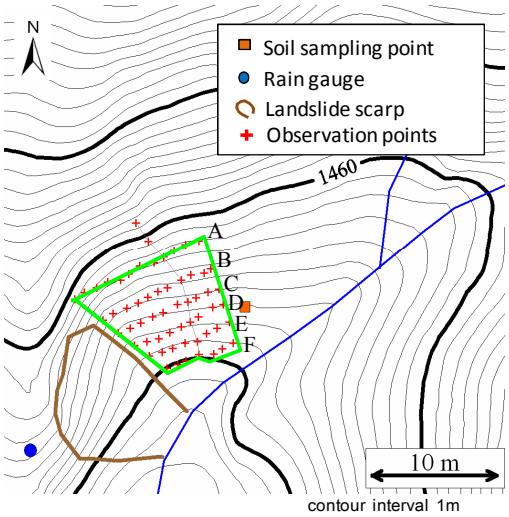


図１　観測斜面付近の地形図

表１　土壌のパラメータ

| | θs | θr | ψm[cm] | σ | Ks[cm/s] |
|---|---|---|---|---|---|
| 表層 | 0.47 | 0.25 | −10.63 | 1.46 | 0.3461 |
| 下層 | 0.35 | 0.05 | −714.00 | 2.78 | 0.0004 |

## 3. 結果と考察

貫入試験の結果から得られた基岩面地形と傾斜を図２に、土層深分布を図３に示す。図４に、2009/7/16-18 の総降雨量 102mm の降雨イベントのハイエトグラフと、代表的な２点（B-5, D-3）のψ時間変動を示す。さらに時間ステップ[1], [2]における基岩面ψ分布を図５(a)に示す。また、過剰間隙水圧分布を図５(b)に、安全率 Fs の分布を図５(c)に示す。先行研究において、観測斜面上に基岩湧水（図中の○印）、選択的浸透によるψの急上昇現象（図中の×，△印）の存在が確認されている(*Masaoka et al., 2010*)。

降雨前[1]から、斜面右上部で非常に高いψを示す飽和帯が分布していた（図５中の○印）。これらの点では過剰間隙水圧が発生しており、上方向への基岩内地下水湧出の影響と考えられる。安全率 Fs は斜面右側で低い値を示していた。Fs<2 の領域と土層厚（図３）1m 以上の領域が概ね対応しており、土層厚分布の影響を強く受けていると考えられる。その中でも斜面右上部では Fs は特に低く、高い地下水位の影響と考えられる。また、斜面中～下部（Line-D 上）では Fs はやや高く、これは斜面勾配（図２）が緩いためと考えられる。

降雨ピーク[2]において、一時的な飽和帯が斜面上部まで広がっていた。斜面右上部では Fs はさらに低下し、Fs<1 となる部分も存在した。斜面下部の一部の点で局所的に急激な水圧上昇が起こり（図中の×印）、右上部

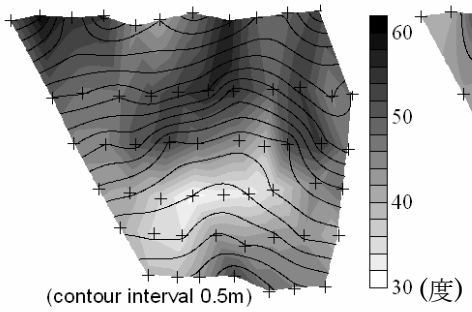


図２　基岩面地形図（等高線）と傾斜

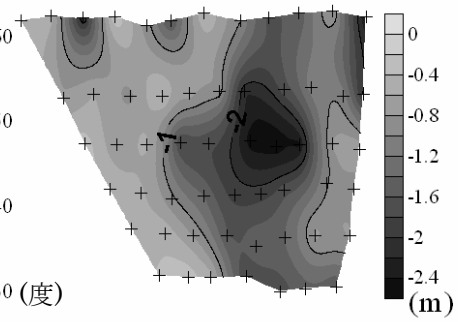


図３　土層厚分布

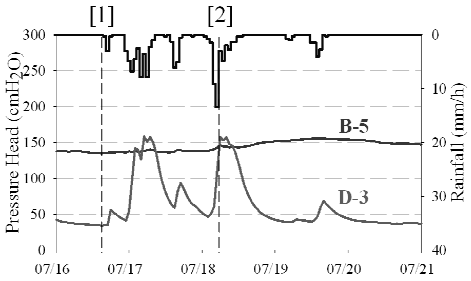


図４　ハイエトグラフ及び代表点のψ変動

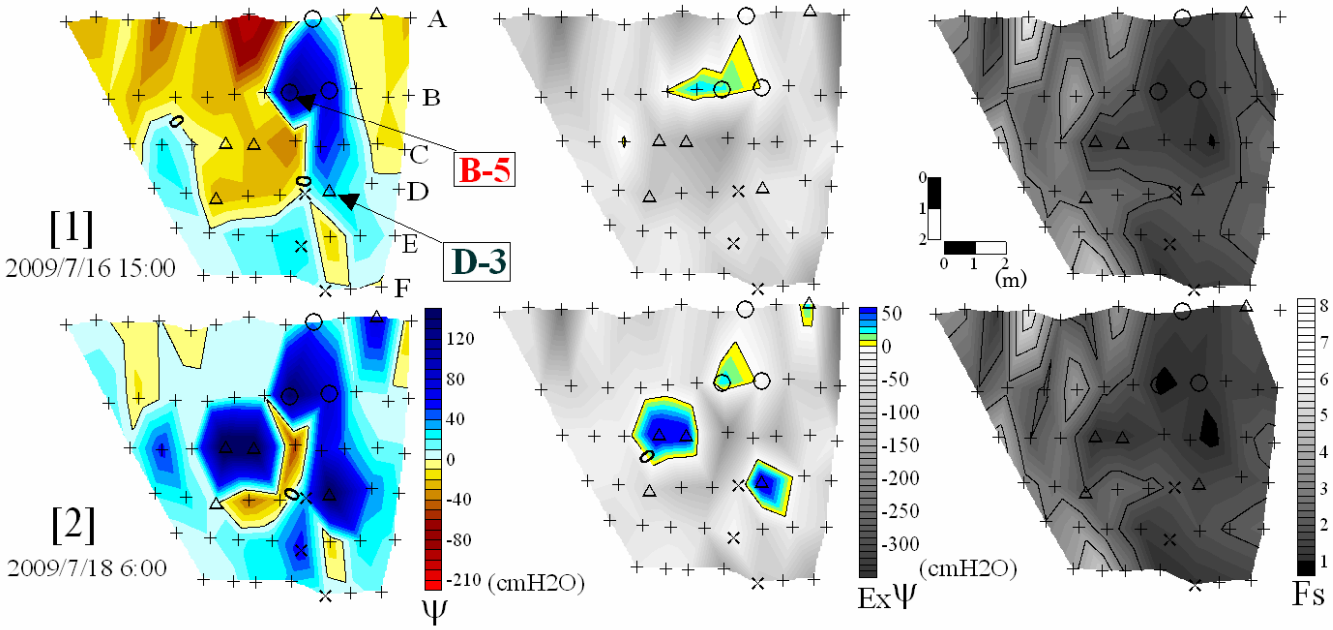


図５　左から(a)基岩面ψ分布　(b)過剰間隙水圧分布　(c)安全率 Fs 分布

の飽和帯から斜面末端まで高水圧帯が繋がっていた。このことから、この部分に選択的な流路が形成されていると考えられる。しかし流路上では過剰間隙水圧は発生しておらず、これは大孔隙（パイプ）が発達し水が素早く排出され、ψが一定以上に上昇しづらいためと考えられる。Fs の顕著な減少が見られないのも同様の理由によると考えられる。一方、流路から離れた点でも急激な水圧上昇が起こる点が存在し（図中の△印）、基岩面では過剰間隙水圧が発生していた。これらの点では、基岩面への選択的な雨水浸透によりψは大きく上昇するが、素早い排出経路を持たないと考えられる。今回の安全率計算では過剰間隙水圧を考慮していないため Fs の顕著な減少は見られなかったが、実際には土粒子を押し上げる力による斜面の局所的な不安定化が起こっている可能性がある。

このように、安全率 Fs には土層構造（土層厚分布，斜面勾配）が与える影響が大きく、詳細な土層構造を把握することが第一に重要であるが、さらに基岩湧水や選択的浸透などの不均質な水文現象を把握することでより実態に即した崩壊予測が可能になることが示された。今後は過剰間隙水圧の影響を考慮し、さらに基岩以外がすべり面となる場合を検討するなど、より詳細な条件での安定解析を行う必要があると考えられる。

**参考文献：小杉ら（2010）六甲山系における斜面崩壊に基岩内地下水が与える影響，平成 22 年度砂防学会研究発表会概要集，** 120-121；Masaoka et al. (2010) Intensive Measurements of Soil Pore Water Pressure for Analyzing Heterogeneous Hydrological Processes on a Hillslope, International Journal of Erosion Control Engineering 3(1), 53-58

(E-mail: hatiemon@kais.kyoto-u.ac.jp)