

1. 研究背景と目的

斜面崩壊過程の解明のために、これまで植生のない自然斜面 (Ochiai et al., 2004, Landslide) や人工斜面 (Iverson et al., 2000, Science) で降雨実験による検討が行われてきたが、人工的な雨水供給の継続時間が短かったり、また自然斜面が持つ複雑な環境を実験斜面で再現することは極めて困難であった。一方、崩壊の可能性が高い斜面を予測し観測を行うという手段もあるが、必ずしも斜面が崩れるとは限らない。そのため、斜面崩壊発生時の土層内における飽和・不飽和帯分布などの野外観測データが未だ不足している。2015 年の砂防学会では山地源頭部流域の地形特性と基岩面飽和帯の形成過程を報告したが、その観測地が 2016 年の台風によって崩壊した。本研究では崩壊時に記録された水文データを解析し、斜面崩壊プロセスを考察した。

2. 観測地と項目

台湾宜蘭県における粗坑溪の支溪にある天然林小流域源頭部で現地観測を行った ($24^{\circ}45'42''\text{N}$, $121^{\circ}35'45''\text{E}$)。年雨量は 4125 mm であり、台湾の代表的な多雨地域である。源頭部面積は 0.15 ha であり、基岩は頁岩と粘板岩である。観測地は急斜面であり、勾配は $4\sim 75^{\circ}$ 、平均 41° であった。観測地の下部には二つのガリーが存在し、一年を通して流出が見られる (図 1)。流出箇所にはガリー侵食が進んでおり、植生が存在せず、それ以外の場所には広葉樹や下層植生による被覆が多く見られる。レーザー距離計を用いて 2 m 間隔で地表面地形を計測し、また貫入試験より土層厚を計測することで、基岩面地形を推定した (図 1)。観測地における 60 箇所にテンシオメータを埋設し、基岩面直上の間隙水圧を記録した。ガリーに簡易的な量水堰を設置し、水位計により流出を計測した。これらの水文データを、データロガーを用いて 10 間隔で記録した。

2016 年 9 月、台風 MEGI (平成 28 年台風 17 号) が台湾全土に大きな被害をもたらした。南部では土石流が発生し、浸水被害も報道された。台風後の調査で、観測地の登山道以下の区域がほぼ崩れ落ち、大量の土砂と倒木が下流に堆積していることを発見した。すべり面は基岩内に達していなかったことから、源頭部の表層崩壊と判断された。崩壊により多くの観測機器が破損した中、データロガーが残存し、崩壊時に記録されたデータを復元することができた。

3. 結果と考察

今回の台風がもたらした豪雨イベントの総雨量は 378.5 mm であった。降雨開始 (2016/9/27 0:10) 後、降雨強度は徐々に上昇し、最大の $19.5 \text{ mm}/10 \text{ min}$ に達した後、徐々に弱まった (図 2a)。降雨開始後、テンシオメータ 60 本中、計 53 本が正常に作動し、記録できていた (図 2b)。53 地点中、正圧を記録した地点の割合と総量を飽和率と飽和帯量とそれぞれ定義した (図 2a)。積算雨量の上昇と共に飽和率と飽和帯量が上昇し、13.17 時間経過時点で飽和率が最大の 0.89 に至った。その後、幾つかのテンシオメータが計測できなくなり、斜面崩壊が始めたと考えられる。16.83 時間経過した時、テンシオメータの計測可能率が急に下がり、斜面崩壊が拡大したと考えられる。流出は、降雨開始後から上昇傾向にあったが、13.17 時間後に急速に減少に転じ、16.83 時間

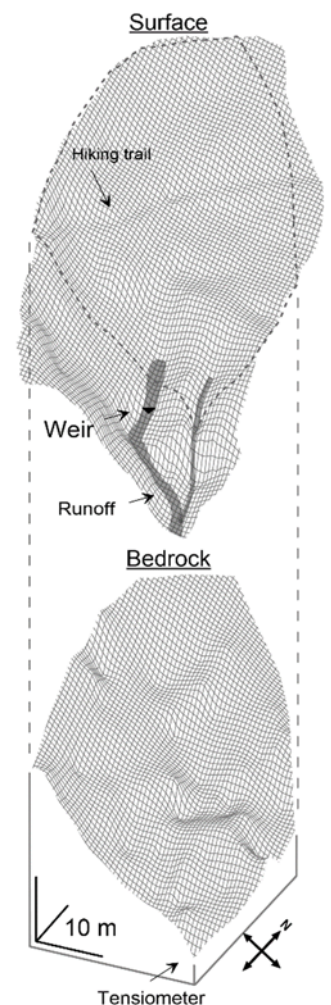


図 1. 地表面と基岩面地形。

後にはほぼゼロになった。これは 13.17 時間後に堰が土砂に埋もれ越流が発生し、16.83 時間後に堰と水位計が崩壊土砂により破壊されたためと考えられる。間隙水圧と流出のデータ欠損のタイミングからほぼ同様の崩壊プロセスを推察することができた。

基岩面における間隙水圧の空間分布は、豪雨イベントの初期から非常に湿潤な状態にあったことを示している（図 2b）。2016 年 9 月、この豪雨イベントまでの積算雨量は 801.5 mm と大きかった。豪雨イベント開始時、すでに基岩面の上部に局所的な飽和帯が存在し、下部でも一部飽和帯が繋がっていた。その後、降雨の継続に伴って上部の飽和帯が下部に拡大し相互に繋がっていった（6 時間経過）。10 時間経過以降、飽和帯がさらに広がり、飽和率が 8 割を超えた。13.17 時間経過後、基岩面がほぼ飽和状態になっており、斜面下部から計測不能なテンシオメータが増加していったことから、この時点で崩壊が始まったと考えられる。

Liang and Chan (2017, Journal of Hydrology) は多数の降雨イベントを用いて、このサイトにおける基岩面飽和帯の形成特性を解明した。非常に湿潤な初期状態を除き、斜面の上部では基岩面飽和帯は発生しなかった。また、場所によって飽和頻度が異なり、ほとんど飽和しない箇所は全体の約 4 割を占めることが分かった。崩壊イベント時に観測された特徴としては、崩壊直前に全領域がほぼ飽和に達したことが挙げられる。そのような現象は過去に観測されていなかったことから、飽和帯の拡大と間隙水圧の激増が崩壊の主な原因と考えられる。また、降雨ピークの前にすでに局所的に崩壊が発生し、降雨ピーク後に崩壊が広がったことが分かった。今回の崩壊の発生は湿潤な初期状態も強く影響したと考えられる。

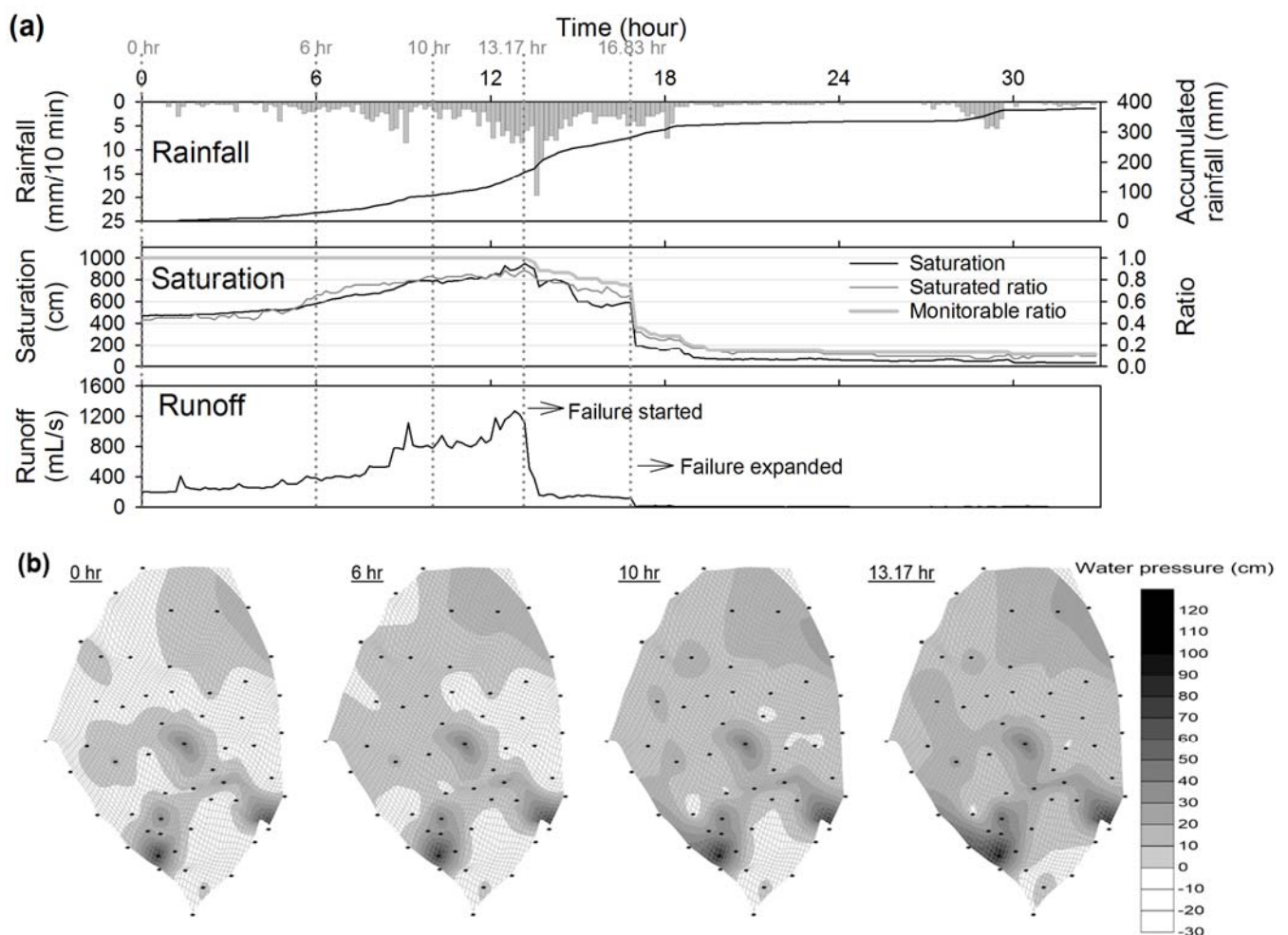


図 2. (a) 降雨、飽和帯量、飽和率、計測可能率、流出の時間変化、および (b) 基岩面における間隙水圧の空間分布を示している。図 2 b にある点は 53 本のテンシオメータの位置を示している。