

表層崩壊跡地での現地調査並びに原位置試験による

斜面崩壊予測に関する研究

田上裕¹、永川勝久²、山本健太郎³、寺本行芳⁴

^{1, 2}基礎地盤コンサルタンツ(株)、^{3, 4}鹿児島大学

我が国において、真っ先に亜熱帯化が懸念される九州地方の最南端に位置する鹿児島県において、森林生態学的と地盤工学的観点から、表層崩壊跡地での現地調査並びに原位置試験によるしらす自然斜面（火山灰・降下軽石被覆斜面）の安定性評価や表層崩壊予測に関する研究を実施した。

1. はじめに

日本は森林が国土の約 70%を占め、斜面崩壊の大半は表層崩壊で、誘因である降雨の影響がかなり大きい。しかし、崩壊現場においては表層崩壊が生じた斜面と生じなかった斜面もあり、斜面そのものの素因（植生（森林）生育状況や地盤特性）を調べるのが重要であると考えている。また、一般的な斜面安定解析においては植生の遷移に伴う根系効果、表層土層や浸透能特性が反映されていない。

そこで、我が国において、真っ先に亜熱帯化が懸念される九州地方の最南端に位置する鹿児島県において、森林生態学的と地盤工学的観点から、火山灰・降下軽石被覆斜面の表層崩壊跡地において現地調査並びに原位置試験を行い、自然斜面の安定性を調査してきている^{1), 2), 3)}。

2. 現地調査

テストフィールドを鹿児島県垂水市に位置する鹿児島大学農学部附属高隅演習林に設定している（図-1 参照）。テストフィールドは業務資料、空中写真や現地調査を基に表層崩壊の発生年が同定されたものを選定し、2013 年度時点で表層崩壊発生後の経過年数は 8～58 年の範囲となった。現在、同じ領域内でかつ、北向き、ほぼ同じ標高（約 520 m）の 6 地点のしらす自然斜面を表-1 に示すように設定した。表層崩壊跡地は 35～40 度程度の急傾斜を成し、表層崩壊面積は 29～114m²の範囲である。

写真-1 にはテストフィールドでの現地写真の一例を示す。No.6 では経過年数が最も小さく、No.4 では表層崩壊後の経過年数が最も大きい。これを見ると、No.6 では小さな雑木や雑草が多いことがわかる。樹高 1m 以上ではアカメガシワが優占し、これ以外にもヌルデ、センダン、ヒサカキ、クロマツなども多く見られた。樹高 4m 以上を構成する樹種は常緑針葉樹のクロマツであった。樹



図-1 テストフィールド地点
（国土地理院地形図より作成）

表-1 テストフィールドでの表層崩壊特性

テストフィールド	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6
表層崩壊発生後の経過年数（年）	12	22	40	58	28	8
斜面平均傾斜（°）	38	41	40	39	37	42
崩壊地の面積（m ² ）	36	29	61	114	34	42



(a) No.6



(b) No.4

写真-1 テストフィールドの現地写真

高 1m 未満ではイヌビワ、イズセンリョウなどが優占し、これ以外にもマルバウツギ、ヤブムラサキも多く出現していた。最大樹高を示した樹種はクロマツで、その樹高は 4.5m であった。一方、No.4 では大きな樹木である常緑広葉樹が多く見られた。樹高 1m 以上では、アラカシ、スダジイ、タブノキなどの常緑性高木や、常緑性小高木のヒサカキ、ネズミモチが優占していた。樹高 5m 以上を構成する樹種は常緑性高木のアラカシ、スダジイ、ヤブニッケイ、タブノキ、ヤブツバキ、クロキであり、樹高 10m 以上を構成する樹種はアラカシ、スダジイ、タブノキ、クロキであった。樹高 1m 未満では、イズセンリョウ、イヌビワなどが多く出現していた。なお、最大樹高を示した樹種はアラカシで、その樹高は 13.6m であった。

図-2(a), (b)には有効表層土層深と表層土の深さ方向による乾燥密度を、表層崩壊発生後の経過年数に対してプロットしたものである。有効表層土層深は検土杖を用い、各地点全域での縦横断方向に 1m 間隔で行った測定結果の平均値である。また、乾燥密度を測定するために 1つの表層崩壊跡地につき、斜面の上部と下部の 2

箇所に土壌断面を設けた。そして、乾燥密度は、各土壌断面において地表から 10cm, 30cm および 50cm の深さの地点で、それぞれ 100ml のステンレス試料円筒を用いて不攪乱試料を採取することにより求めた。図-2(a)を見ると、有効表層土層深の発達は崩壊発生後 30 年頃までは穏やかであるが、その後次第に速度を増し、40 年

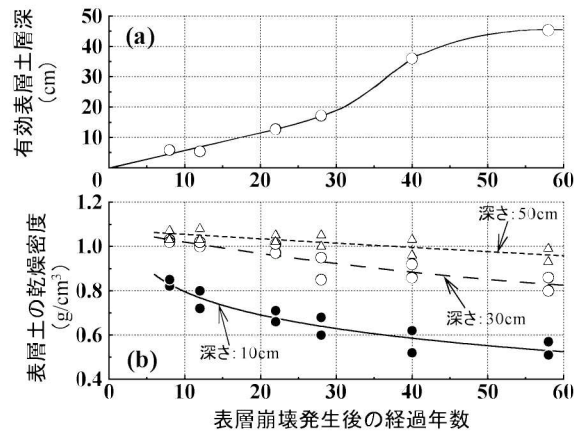
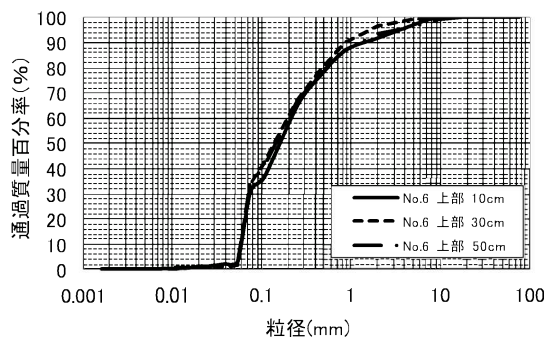
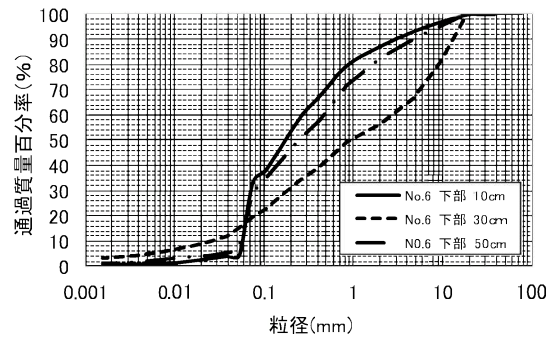


図-2 表層崩壊発生後の経過年数に対する有効表層土層深及び表層土の乾燥密度

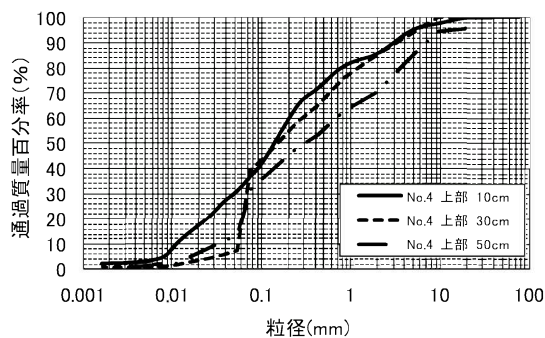


(a) 斜面上部

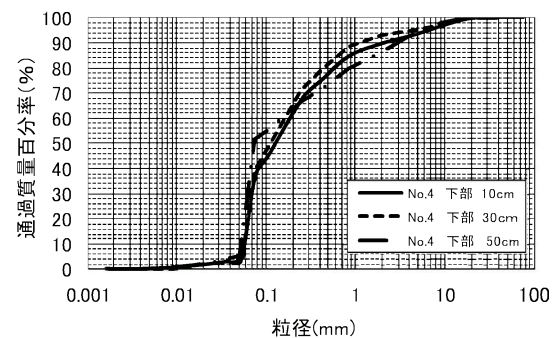


(b) 斜面下部

図-3 粒径加積曲線 (No.6)



(a) 斜面上部



(b) 斜面下部

図-4 粒径加積曲線 (No.4)

程度を過ぎると少し鈍化している。さらに、図-2(b)は No.1～No.6 の各地点における深さごとの乾燥密度を、表層崩壊発生後の経過年数に対してプロットしたものである。図中の実線および破線は、それぞれの深さでの経年変化曲線を示す。なお、斜面上部と下部で乾燥密度を測定したため、それぞれプロットがペアの2つとなっている。これを見ると、表層土（森林土壌）の発達は深さ 10cm の乾燥密度の値が示すように、比較的地表に近い部分からはじまり次第に深さ方向に進行している。崩壊跡地への森林の侵入は、森林の回復に伴う根系の発達や森林による有機物の供給を通じて土壌化を促し、これらの作用は比較的土壌の表層から進行していくことがわかる。

図-3, 4 には No.6, 4 での斜面上部と下部における粒径加積曲線を示す。斜面上部と下部の各土壌断面を設定し、地表から 10cm, 30cm および 50cm の深さの地点でサンプリングを実施した。図-3(a)からはどの深さでもシルトと砂の割合がおおまかに 30%と 60%以上あることがわかる。図-3(b)からは 10cm, 50cm の深さでは砂の割合が 50%以上、30cm の深さではれきの割合が 40%以上となった。また、No.6 では表層崩壊発生後の経過年数も小さく、しらす崩壊面上にも出てきていることも観察された。次に、図-4(a)からは 10cm, 30cm の深さでは砂とシルトの割合がそれぞれ 45%と 30%以上で、50cm の深さでは砂が約 40%以上で、シルトとれきがそれぞれ約 30%であった。一方、図-4(b)を見ると、10cm, 30cm の深さでは砂とシルトの割合がそれぞれ約 50%と約 40%であった。50cm の深さになると、砂の割合が減少し、シルトとれきの割合が増加していることが観察された。全般的には、表層崩壊発生後の経過年数が異なる No.6 と No.4 を比較すると、経過年数が大きくなるほど、さらに地表面に近いほど細粒化が進行している傾向があることがわかった。

3. 原位置試験

簡易的な原位置試験として、簡易動的コーン貫入試験（通称：簡易貫入）⁴⁾と土層強度検査棒（通称：土検棒）⁵⁾を実施した。図-5, 6 には一例として、表層崩壊後の経過年数が最小と最大である No.6 と No.4 の斜面上部と下部でのコーン貫入試験結果を示す。

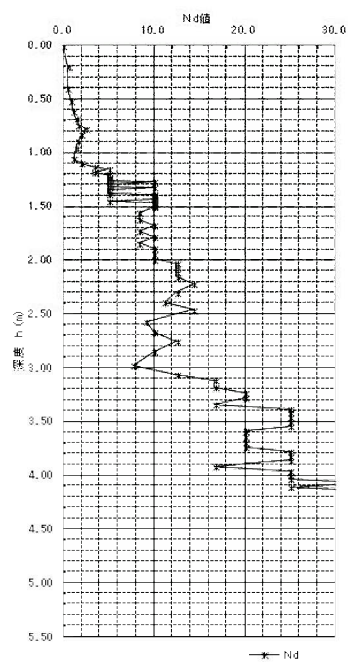
No.6 の結果である図-5(a)を見ると、打撃回数が 0 回で貫入量は 1 cm であるが、打撃回数が 1, 2 回の時にそれぞれ貫入量は 19, 20 cm となり、その後、貫入量が減少し、貫入深さが約 80 cm

までは N_d 値が増加していった。貫入深さが約 1.2m 程度辺りからは固い層も見られ、貫入深さが 4.2 m 程度において 10 回の打撃による貫入量が 20 mm 未満となったため、貫入を中止した。一方、図-5(b)では貫入深さが 15 cm までは N_d 値が増加し、その後、減少していった。貫入深さが 50 cm を超えると、貫入量が減少し始め、 N_d 値が増加していった。そして、貫入深さが約 90cm において、10 回の打撃による貫入量が 20 mm 未満となったため、貫入を中止した。

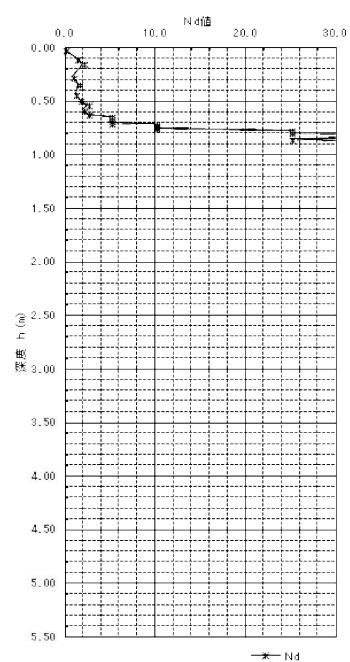
次に、No.4 の結果である図-6(a)を見ると、打撃回数が 0 回でも貫入量が 37cm もあり、打撃回数が 1 回で 16 cm 貫入した。貫入深さが 1.5m 程度までは N_d 値が増加していることがわかる。また、貫入深さが 4.0m 程度辺りから N_d 値が急に増加していることも観察される。一方、図-6(b)では打撃回数が 1 回で貫入量が 10cm となり、貫入深さが 65cm 程度までは N_d 値が増加し、その後、減少傾向にあった。また、貫入深さが 1.6m 程度辺りでは N_d 値が急に大きな値となり、この辺りには強固な層があることがわかる。よって、No.6 の地点においてのみ、貫入を途中で中止することとなったが、他の地点においては貫入深さが 5.0m まで貫入試験を続けることができた。

図-7, 8 には一例として、表層崩壊後の経過年数が最小と最大である No.6 と No.4 の斜面上部と下部でのベーンコーンによるせん断試験結果を示す。図-7, 8 にはベーンコーンにかかる鉛直荷重 W_{vc} を 4-5 回変え、せん断試験を実施した時のベーンコーンにかかるトルク T_{vc} との相関関係を示す。両図ともに良い相関が得られ、既存の換算式⁵⁾により粘着力 c と内部摩擦角 ϕ を算出した。No.6 の図-7(a)に対しては、 $c_{dk}=8.49$ (kN/m²), $\phi_{dk}=8.09$ (deg.)、図-7(b)に対しては、 $c_{dk}=9.89$ (kN/m²), $\phi_{dk}=13.08$ (deg.)となった。一方、No.4 の図-8(a)に対しては、 $c_{dk}=5.02$ (kN/m²), $\phi_{dk}=8.83$ (deg.)、図-8(b)に対しては、 $c_{dk}=5.91$ (kN/m²), $\phi_{dk}=9.63$ (deg.)となった。下添字 dk は土検棒を表す。なお、この換算式は参考文献での参考式であるため、今後、現場一面せん断試験の実施を予定しており、そこから得られた地盤強度パラメータとの比較検討を行いたい。

図-9 にはすべてのテストフィールドでの結果をまとめた、表層崩壊後の経過年数に対する地盤強度パラメータ（粘着力 c と内部摩擦角 ϕ ）の変化を示す。全般的には、No.1（表層崩壊発生後の経過年数が 12 年）を除いて、斜面上部（実線）の c, ϕ が斜面上部（破線）のものよりも大きくなる傾向を得た。また、粘着力 c は、斜面上部と下部ともに大まかに表層崩壊後の経過年

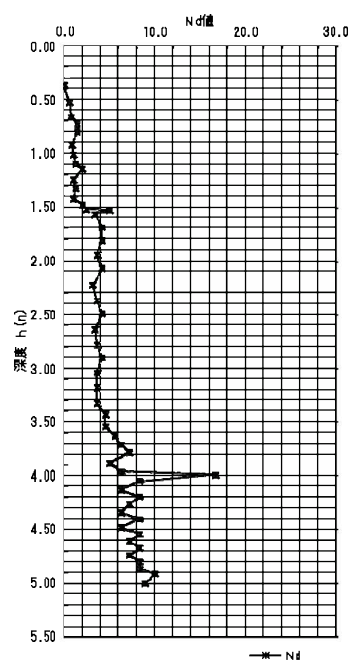


(a) 斜面上部

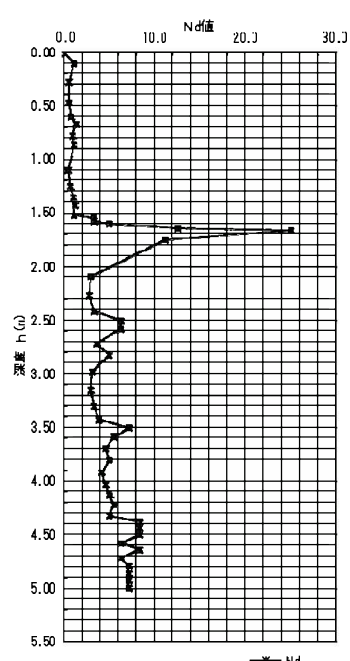


(b) 斜面下部

図-5 簡易動的コーン貫入試験結果 (No.6)

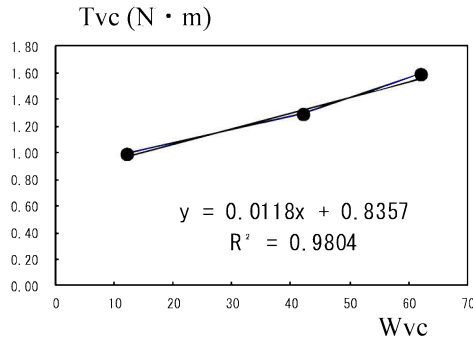


(a) 斜面上部

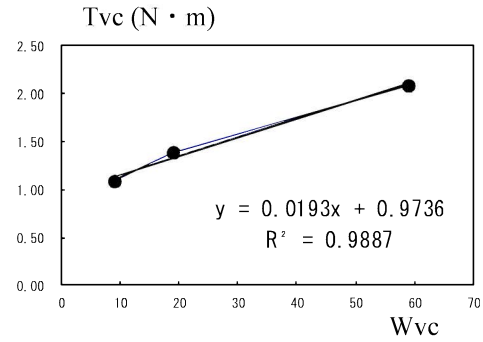


(b) 斜面下部

図-6 簡易動的コーン貫入試験結果 (No.4)

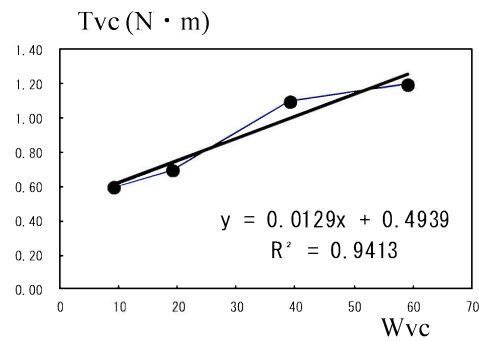


(a) 斜面上部

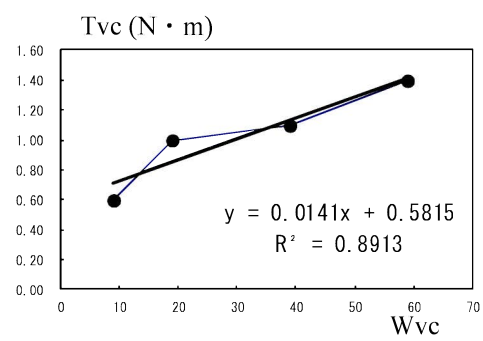


(b) 斜面下部

図-7 ベーンコーンせん断試験結果 (No.6)

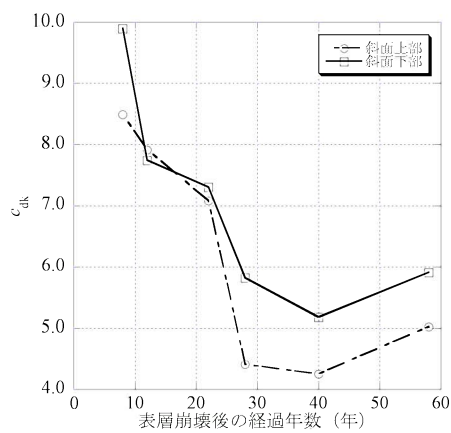


(a) 斜面上部

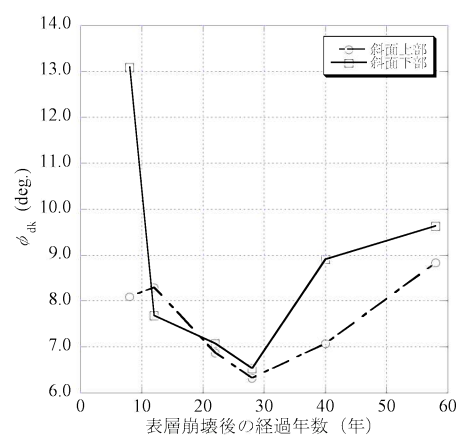


(b) 斜面下部

図-8 ベーンコーンせん断試験結果 (No.4)



(a) c_{dk}



(b) ϕ_{dk}

図-9 表層崩壊発生後の経過年数に対す地盤強度パラメータの変化

数の増加とともに減少する傾向を得た。しかし、内部摩擦角 ϕ の値は粘着力 c と異なり、表層崩壊後の経過年数の増加にあまり依存しない結果となった。ただ、原位置にて実際に試験を実施すると、軽石や様々な根系の影響が特に、せん断試験結果に与える影響はかなり大きいと感じているところである。

4. 土壌浸透能試験

図-10 は、No.6～No.4（表層崩壊発生後からの

経過年数が小さい方から並べた、表-1 参照）における有効表層土層深の頻度分布を示す。なお、 N は総数を表す。崩壊発生後の経過年数の増加に伴って、相対的に大きな有効表層土層深の頻度が増加している。各表層崩壊跡地における有効表層土層深の最大値は、それぞれ 9cm (No.6)、8cm (No.1)、21cm (No.2)、22cm (No.5)、45cm (No.3)、57cm (No.4) であった。

次に、表層崩壊跡地における森林の回復に伴う表層土壌の発達が浸透能に及ぼす影響を明ら

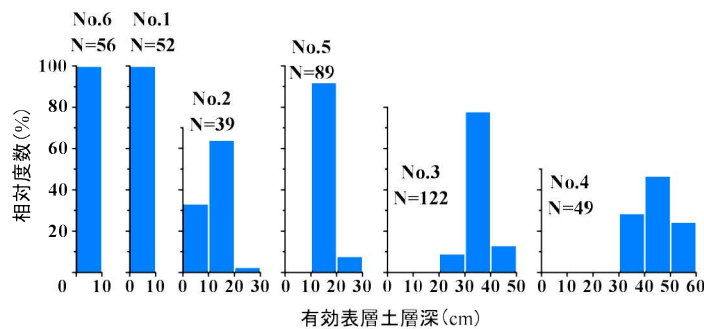


図-10 有効表層土層深の頻度分布

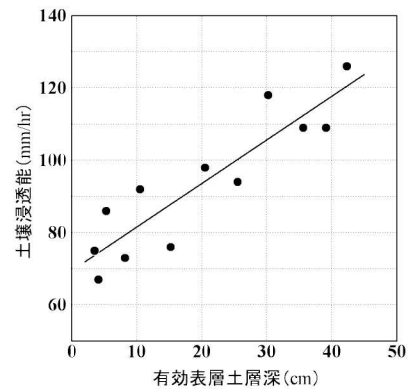


図-11 有効表層土層深と土壌浸透能の関係

かにするため、表層崩壊跡地において有効表層土層深の異なる 12 箇所の区画を設定し、散水式の浸透能試験を行った。今回、土壌浸透能は次のような方法⁶⁾で測定した。

- ① 仕切られた区画（斜面方向の水平長 1m×幅 0.5m）の全面に如雨露で真上から散水し、その水が地中に浸透しないで地上を流出した量をその下端で計測する。
- ② 散水量（2,000cc、雨量に換算して 4mm）から流出量を差し引いて浸透水量を求める。
- ③ 浸透水量を浸透に要した（散水開始から流出終了までの）時間で割って土壌浸透能を求める。なお、散水は流出量がほぼ一定値になるまで繰り返して行い、最後の測定値を土壌浸透能とした。

図-11 は、有効表層土層深と土壌浸透能の関係である。図中の実線は土壌浸透能（ I_r ）と有効表層土層深（ ED ）の回帰直線であり、次式で表わされた。

$$I_r = 1.21ED + 69.5 \quad (r = 0.90)$$

ここで、 r は重相関係数を示す。両者には正の強い相関があり、有効表層土層深の発達とともに土壌浸透能は大きくなっている。これには図-2(b)で示したように、有効表層土層深の発達に伴う乾燥密度の低下による土壌空隙の増加が関係している。

No.6～No.4 における有効表層土層深の平均値（図-2(a)）から、図-11 における土壌浸透能と有効表層土層深の回帰直線を用いて土壌浸透能を推定すると、それぞれ 76mm/hr (No.6)、76mm/hr (No.1)、85mm/hr (No.2)、90mm/hr (No.5)、113mm/hr (No.3)、124mm/hr (No.4) となる。森林の初期の回復段階である No.6 および No.1（崩壊発生後 8 年および 12 年経過）の土壌浸透能は、土壌の発達が見られない桜島の裸地にお

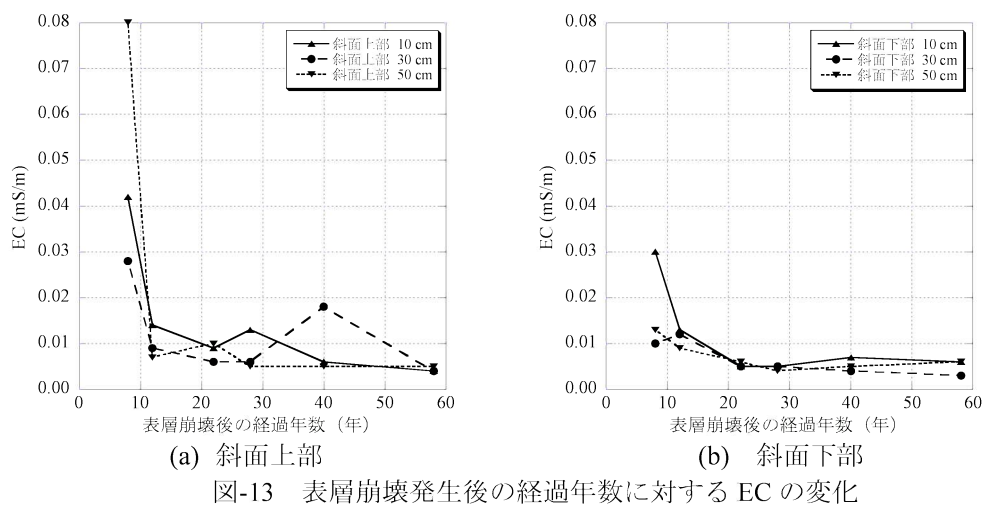
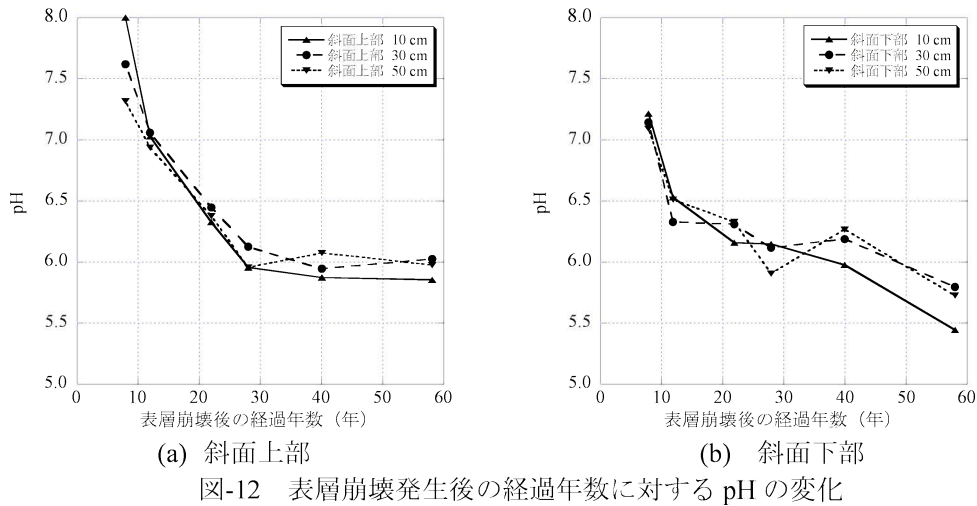
ける浸透能の 70mm/hr⁷⁾と同程度の小さな値を示すが、森林の遷移の進行に伴う土壌の発達（図-10、図-2(a)および図-2(b)）によって大きくなり、極相に達した森林である No.4（表層崩壊発生後 58 年経過）では No.6 および No.1 の約 1.6 倍の土壌浸透能までに回復している。

5. 土壌分析

テストフィールドの各地点での表層土壌を採取し、土壌の溶出液に対して pH、電気伝導率（EC）の測定を実施した。土壌の溶出液は自然乾燥させた土壌 20g に蒸留水 50 g を加え、マグネチックスターラーで約 3 分間かくはんした後、上澄み液が透明になった約 10 分間程度放置したものを使用した。図-12 には、斜面上部と下部における表層崩壊後の経過年数に伴う pH の変化を示す。これを見ると、表層崩壊後の経過年数の増加とともに pH が減少する傾向を有することがわかる。また、斜面下部の pH が斜面上部のものよりも小さくなった。これは、斜面下部が上部よりも土壌の酸性化が進み、腐植酸の効果によるものと考えられる。また、侵食の影響などにより、斜面上部で流れ出したものが斜面下部に蓄積することも一因であろう。次に、図-13 には、斜面上部と下部における表層崩壊後の経過年数に伴う EC の変化を示す。これを見ると、表層崩壊後の経過年数が 10 年未満の跡地を除いて、概ね似たような傾向を示すものと考えられる。また、表層ほど腐植が進み、酸性化が最も進むであろう地表から 10cm の深さの地点でのサンプリングにおいて一番酸性化が進んでいない場合も見受けられるが、これは火山灰や軽石などの火山噴出物の影響や侵食の影響によるものと推測される。

6. 表層崩壊リスクの低減

有効表層土層深は、表層崩壊後の経過年数が



おおよそ 15-20 年経過すると、表層土層深の層厚の増加傾向が強い。また、それに反して地盤強度パラメーター (c, ϕ) は 10 年を過ぎると大きく減少する。一般的に表層崩壊後の経過年数が大きいほど風化が進行し、地盤強度パラメータや乾燥密度が小さくなる傾向を有すると考えられる。ただ、原位置にて実際に試験を実施すると、軽石や根の影響が特に、せん断試験結果に与える影響は大きい。

本研究では、火山灰・降下軽石被覆自然斜面を例に、崩壊経過年数が既知のものを利用して、崩壊後の経過変化を植生、地盤の双方から確認した。崩壊後の経過年数が不明斜面の場合、植生の生育や多様性 (植種)、各種経年変化カーブ等により崩壊後の経過年数の推定も可能と考えられる。崩壊後の経年数がわかれば、同様の地形地質や環境条件と制約はつくが、今後の表層崩壊リスクの考察が可能になると考える。また、豪雨時に多発する表層崩壊は、斜面に分布する土質や植生、地形等の影響により崩壊しやすさが異なる。本研究による崩壊後の経年的変

化を見ることにより、いつ・どこで・どの程度の規模で斜面崩壊が発生するか、現状の危険箇所指定地マップから崩壊危険度リスクを加味した精度良いゾーニングマップが可能となり、実効性あるソフト・ハード的対策ができるものと考えられる。図-14 には、斜面崩壊リスクの低減を図にまとめたものを示す。

7. おわりに

火山灰・降下軽石被覆斜面の表層崩壊跡地の斜面上部と下部において、表層土の乾燥密度や粒度特性などの地盤調査、原位置試験並びに土壌分析を実施してきた。これらにより、表層崩壊発生からの経過年数が大きなほど、さらに地表面に近いほど細粒化が進行している傾向があることがわかった。また、表層崩壊後の経過年数が大きいほど風化が進行し、地盤強度パラメータ c, ϕ や乾燥密度が小さくなる傾向を得た。そして、斜面上部では斜面傾斜によるゆるみの影響を受け、斜面下部が強くなる傾向も得た。次に、 ϕ は c と異なり、経過年数の増加にあま

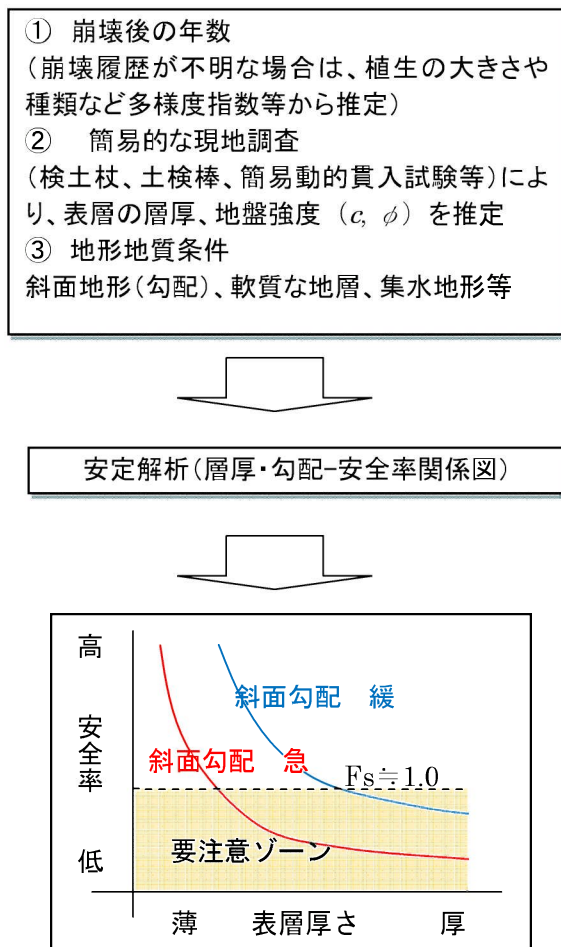


図-14 表層崩壊リスクの低減

り依存しない結果となった。なお、表層崩壊後の経過年数が大きいほど、斜面下部が上部よりも土壌の酸性化が進行し、pH が小さくなる傾向を示した。これまでのことは森林の遷移に支配されて、表層土の粒径などの物理的性質と pH などの化学的性質が変化していくことを証明していくものであるとも考えられる。さらに、テストフィールドでは火山灰や軽石などの火山噴出物の影響や侵食の影響もある程度、受けていることが確認できた。

今後は、テストフィールドにて現場一面せん断試験や樹木根系の引張り試験の実施や原位置で得られた情報を用いた斜面安定解析の実施を予定している。そして、樹木根系が斜面安定効果に与える影響や効果を定量的に評価していきたいと考えているところである。

なお、本報告書の内容は、第 11 回環境地盤工学シンポジウム論文集(地盤工学会、2015 年 7 月)と第 50 回地盤工学研究発表会(地盤工学会、

2015 年 9 月)において、発表予定であることを記す。

参考文献

- 1) K. Yamamoto, Y. Teramoto, M. Hira and K. Nagakawa: Site investigation and in situ test on shallow landslide scars of natural slopes covered by volcanic ash and pumice fall, Proc. of the Sixth Japan-Taiwan Workshop on Geotechnical Hazards from Large Earthquakes and Heavy Rainfall, Kitakyushu, pp.141-142, 2014.7.
- 2) 山本健太郎、寺本行芳、永川勝久、平瑞樹: 火山灰・降下軽石被覆斜面の表層崩壊跡地での森林生態学と地盤工学的観点からの調査, 第 7 回土砂災害に関するシンポジウム論文集, pp.31-36, 2014.9.
- 3) 山本健太郎、寺本行芳、永川勝久、平瑞樹、伊藤泰隆、田中龍児: 火山灰・降下軽石被覆斜面の表層崩壊跡地での地盤調査について, 自然災害研究協議会西部地区部会報・論文集-39 号, pp.49-52, 2015.2.
- 4) 地盤工学会: 地盤調査—基本と手引き—, pp.113-118, 2005.
- 5) 独立行政法人土木研究所: 土層強度検査棒による斜面の土層調査マニュアル(案), 2010.7.
- 6) 下川悦郎、地頭蘭隆: 桜島における表面侵食による土砂生産, 砂防学会誌, 39(6), pp.11-17, 1987.
- 7) 寺本行芳、下川悦郎、田中 信、地頭蘭隆、稲元崇裕: 桜島の荒廃斜面における表面侵食による土砂流出と植生の影響, 砂防学会誌, 57(1), pp.3-12, 2004.