

平成 25 年台風第 26 号による伊豆大島火山山麓における 表層崩壊の発生機構

曾根 好徳*・飛田 健二**・寺田 悠祐**・上野 将司***・
浅見 和弘****・野並 賢*****・沖津 二郎****・矢部 満*****

The Mechanism of Slope Collapse in the Foothills of the Izu Oshima Island Volcano by Typhoon No. 26 of 2013

Yoshinori SONE*, Kenji TOBITA**, Yusuke TERADA**, Shoji UENO***,
Kazuhiro AZAMI****, Satoshi NONAMI*****, Jiro OKITSU**** and Mitsuru YABE*****

Abstract

Typhoon No. 26 caused slope collapse and debris flow in Izu Oshima Island before dawn on October 16, 2013, resulting in extensive damage to Motomachi region in the downstream area. The authors conducted an on-site survey in November 2013, and then installed rain gauges, tensiometers and pore water pressure gauges in May of the following year for monitoring. The authors also conducted indoor tests using samples gathered at the original locations. The primary causes of the slope collapse were the geological structure deposited parallel to the ground slope (dip slope) and the difference in mechanical characteristics and the water permeability between the volcanic sand layer and the loess layer. The collapse was triggered by the unprecedented rainfall with the upper surface of the loess layer as sliding surface. It was found that the roots of trees around the collapsed area did not reach into the loess layer and thus provided almost no binding strength. In addition, monitoring results showed no generation of pore water pressure in the subject area under an hourly rainfall of around 25 mm and under continuous rainfall of around 380 mm. It was clarified that warnings of collapse could be provided in the future by measuring the soil pore water pressure. In addition, measures during planting to promote the growth of taproots to form forests that can help prevent disaster are important.

Keywords: Slope collapse, Volcanic sand, Loess, Vegetation, Pore water pressure, Taproot

(要 旨)

2013年10月16日未明、平成25年台風第26号により、伊豆大島において表層崩壊とそれに伴う土砂流が発生し、下流域の元町地区で大きな被害が発生した。筆者らは、2013年11月に現地踏査を行うとともに、翌年5月に雨量計・テンシオメータ・間隙水圧計を設置し、モニタリングを行ってきた。また原位置で採取した試料を用いた室内試験を実施した。今回の表層崩壊は、斜面に平行に堆積し流れ盤をなす地質構造、火山砂層とレス層の透水性および力学特性の違いを素因とし、記録的な雨量を誘因として、レス層上面をすべり面として発生している。また、崩壊地付近における樹木の根系はレス層中に達しておらず、根系による緊縛効果はほとんど作用していないことがわかった。また、モニタリングの結果、当該地域では、時間雨量25 mm程度や連続雨量380 mm程度では間隙水圧の発生は認められないこと、土中の間隙水圧等を測定することで、将来的に崩壊予測のハザード情報が提供できる可能性があることを明らかにした。さらに、防災機能の高い森づくりを行うためには、植栽の段階で直根の伸長を促す方法をとること等が重要であることを示した。

キーワード: 表層崩壊, 火山砂, レス, 植生, 間隙水圧, 直根

* 名古屋大学減災連携研究センター ** 応用地質(株)事業開発室 *** 応用地質(株)エンジニアリング本部

**** 応用地質(株)地球環境事業部 ***** 応用地質(株)関西支社 ***** 応用地質(株)海外事業本部

* Nagoya University Disaster Mitigation Research Center, ** OYO Corporation Business Development Office,

*** OYO Corporation Engineering Headquarters, **** OYO Corporation Global Environment Business Division,

***** OYO Corporation Kansai Regional Office, ***** OYO Corporation International Group Management Headquarters

1. はじめに

2013年10月16日未明、平成25年台風第26号(以下、「台風26号」)の集中豪雨によって、伊豆大島三原山の外輪山西側の長沢、大金沢および八重沢等の上流域において表層崩壊が発生した。また、この表層崩壊に伴う土砂流の発生により、下流域の元町地区が大きな被害を受けた。大島町の被害は、死者36名、行方不明者3名、負傷者22名、全壊家屋71戸、半壊家屋25戸に達している¹⁾。

今回の集中豪雨は、最大正時時間雨量118.5mm(2013/10/16 3:00~4:00)、連続雨量824mm(2013/10/15 8:00~2013/10/16 7:00)を記録し、ともに1938年の観測開始以来、最高の記録となっている。

2014年8月の広島市での土砂災害など、近年の気候変動に伴って集中豪雨の多発化と類似の災害への懸念が高まっている。2013年の伊豆大島での土石流災害は集中豪雨に伴う斜面の表層崩壊の発生が引き金となっている。表層崩壊に伴う土砂災害の防止対策として、実際に生じた崩壊地付近に着目し、各種調査結果を通じた発生機構の把握を行うことが挙げられる。また、表層崩壊の発生に影響を与える植生状況の把握も有効である。筆者らは上記の観点に立ち、2013年11月26日~28日に現地調査を行った。現地では、地表踏査に加え、簡易装置を用いた土層の強度および透水性測定を行うとともに、植生に関する調査を行った。また、2014年5月下旬には、崩壊地付近において、土層のサクションおよび間隙水圧の計測装置を設置し、計測を継続してきた。また、原位置にて乱れの少ない試料を採取し、各種物理試験および力学試験を実施して、崩壊機構の検討を行った。

本報告は、これらの調査、計測結果について、現在までに得られた知見をまとめたものである。

2. 伊豆大島の自然環境の概要

2.1 地形の概要

伊豆大島は北北西-南南東方向に伸びた紡錘形の火山島で、長径15km、短径8km、最高点は三原新山の標高764mである。山頂部には直径3kmのカルデラがあり、その中央南西寄りに中央火口丘の三原山が位置する。カルデラ壁は、北東から東側にかけて、流出した溶岩などで埋められて不明瞭になっている。鳥瞰図を図-1に、水系図を図-2に示す。

島の北西部と南東部には緩斜面が比較的広く発達する。東海岸は海岸侵食が著しく、海蝕崖が発達しており地層境界からはフノウの滝を含めて複数の湧水箇所が認められる。外輪山を放射状に刻む多数の浅く短い谷地形は、降雨時以外に流水の無い水無川である。これらの箇所的水系図から、島の南半部は斜面傾斜が急で谷密度が高く、北半部では斜面傾斜が比較的緩く谷密度が低いことがわかる。また、今回の災害発生箇所

の元町地区に面した外輪山斜面は、スプーンでえぐられた様な凹状地形をなし(図-1矢印)、水系が未発達で周辺と異なった地形を呈する。この凹状地形は過去の大規模な崩壊跡が原型と思われるが、火口跡(マール)とする見解もある²⁾。

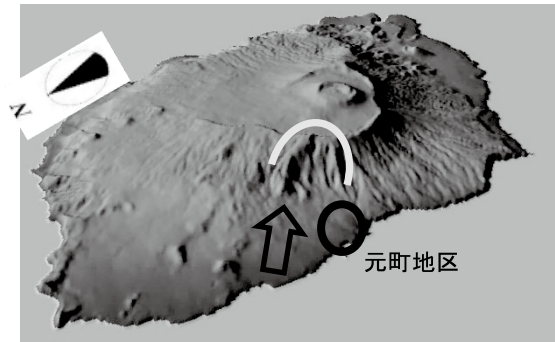


図-1 伊豆大島の鳥瞰図

Fig. 1 Plan view of Izu Oshima Island
(この図は、国土地理院発行の数値地図50mメッシュ(標高)[日本Ⅱ]をカシミール3Dで加工した)

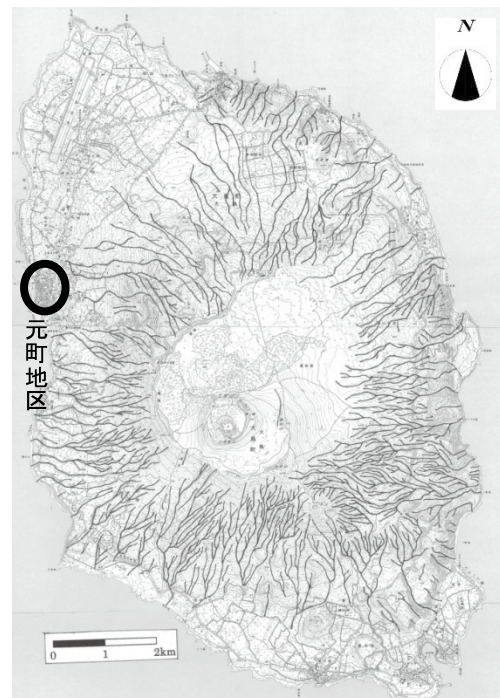


図-2 伊豆大島の水系図

Fig. 2 River system map of Izu-Oshima Channel stream system map of Izu Oshima Island
(国土地理院発行1/2.5万地形図「大島北部」「大島南部」に水系を加筆)

2.2 地質の概要

伊豆大島の火山地質図を図-3に示す。

伊豆大島の土台をなす古い火山の地層が東海岸の海食崖に露出しており、その活動時期は明瞭ではないが第四紀更新世初頭以降と考えられている³⁾。カルデラ形成前の火山活動は約4万年前の海底噴火活動からはじまり、2万年前頃からは陸上火山活動に推移したとされる。現在みられるカルデラは、1,500年前に爆発的

な噴火で形成され、島内全域に火砕流を流下させた。この後も何回もの噴火活動が知られており、降下火砕物と噴火休止期の堆積物（レス）の互層が全体を覆っている。この新規降下火砕物については小山・早川⁴⁾により詳細な層序が示され、噴火史が検討されている。

元町地区に面した凹状地形の外輪山斜面の上部には割れ目火口が線状に分布し、ここから流出した元町溶岩流が凹状地形を薄く覆っている。その後の火山活動で元町溶岩流は何枚もの降下火砕物（火山砂）とレスに覆われている。今回の災害の発端になった表層崩壊は、透水性の大きい火山砂が比較的透水性の小さいレスの上面を滑落したものであり、斜面に平行に堆積した流れ盤の地質構造と透水性の差が素因となっている。



図-3 伊豆大島火山地質図
Fig. 3 Volcanic geological map of Izu Oshima Island (伊豆大島火山地質図⁵⁾を基に作成)

2.3 植生の概要

2.3.1 調査地周辺の現存植生

表-1に伊豆大島の火山噴火後の植生遷移の概要を示す。Tezuka⁶⁾によると、伊豆大島は温暖帯に属し、自然林の主体は常緑広葉樹林である。海洋の孤島であり種子の供給が少ないため、極相林に達するまで1,000年以上の年月を要するとされる。

日本植生誌関東⁷⁾によると、常緑広葉樹林の極相林は、スダジイとタブノキなどから構成されるが、島内には極相林は少なく、大部分は二次林である。東京都大島町史自然編⁸⁾によると、室町時代には薪炭利用が始まり、特に太平洋戦争中には、薪炭需要に応えるため、相当な規模で森林伐採が行われた。また、戦後も1960年代後半まで、薪炭のための森林伐採が行われ

た。

図-4に崩壊地周辺の現存植生図を示す。崩壊地周辺で広い面積で分布する群落は、ハチジョウイヌツゲ群落、オオシマザクラ-オオバエゴノキ群集、オオバヤシャブシ-ニオイウツギ群集（二次林）（以下、オオバヤシャブシ群落）である。ハチジョウイヌツゲ群落は崩壊地の上部付近に主に分布している特徴がある。

表-1 伊豆大島の火山噴火後の植生遷移

Table 1 Vegetation succession after volcano eruption of Izu Oshima Island

遷移初期			遷移後期
荒原	先駆性樹林	落葉広葉樹林 常緑広葉樹林(低木)	常緑広葉樹林
シタタスキラン、 ハチジョウススキ	オオバヤシャブシ、 ニオイウツギ	オオシマザクラ、 オオバエゴノキ、 ハチジョウイヌツゲ、 ヒサカキ、シロダモ	スダジイ、 タブノキ

(Tezuka⁶⁾を基に作成.)

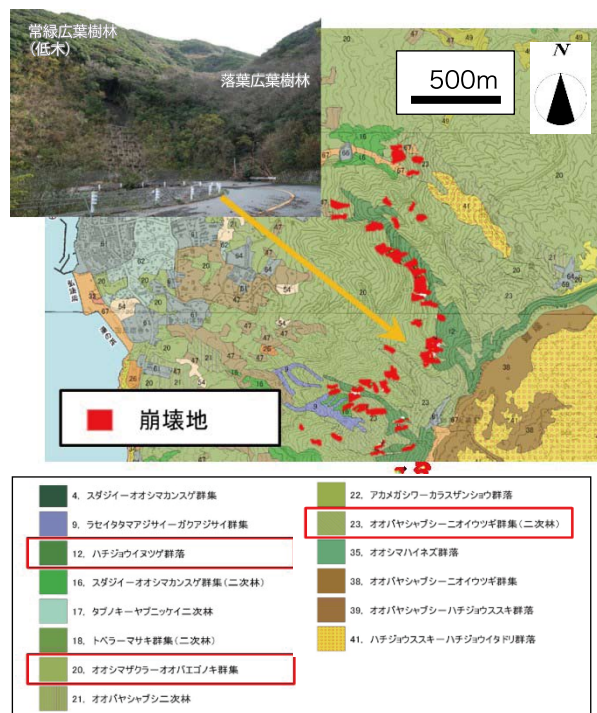


図-4 崩壊地周辺の現存植生図

Fig. 4 Current vegetation map of collapsed area (平成 24 年度東京都(伊豆諸島)現存植生調査委託報告書⁹⁾を基に作成)

2.3.2 崩壊地の傾斜と植物群落

国土地理院発行の10 m メッシュの数値標高モデル¹⁰⁾を用いてGISソフトArcGIS(ESRI社製)で傾斜を求めた。崩壊地の傾斜を図-5に示す。

傾斜25°未満の範囲からの崩壊は少なく、崩壊は25°以上の急斜面に移行した範囲から発生している傾向がある。崩壊の発生箇所の主な植生は、オオシマザクラ-オオバエゴノキ群集である。ハチジョウイヌツゲ群落の一部は崩壊していたが、主に傾斜25°未満の

斜面や尾根部に分布する傾向があった。また、オオバヤシャブシ群落は崩壊しなかった範囲に多くみられた。

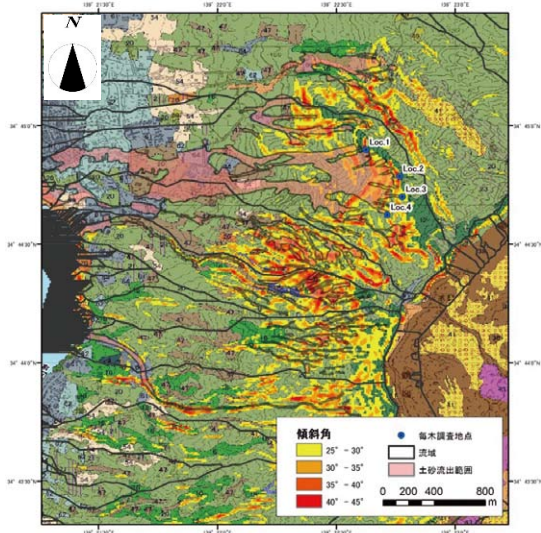


図-5 崩壊地周辺の傾斜と植生

Fig. 5 Inclination and vegetation around the collapsed area (植生の凡例は、図-4の平成24年度東京都(伊豆諸島)現存植生調査委託報告書の凡例と同じ。傾斜25～45°の範囲を黄～赤で図示した)

3. 気象条件

3.1 災害発生時の雨量

2013年10月15日～16日にかけてのハイエトグラフを図-6に示す。気象庁大島特別地域気象観測所(以下、「大島観測所」)では、最大24時間雨量824mm、最大時間雨量122.5mmという猛烈な雨を記録している。

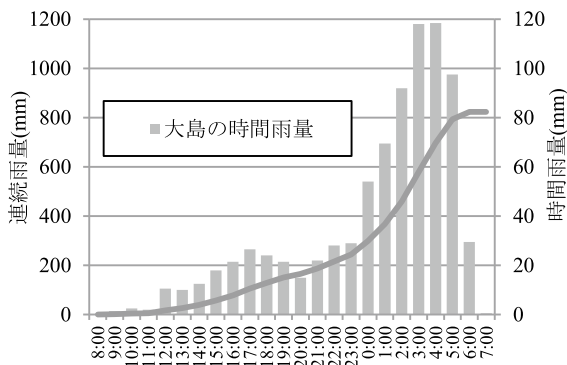


図-6 大島観測所におけるハイエトグラフ(2013年10月15日～16日)

Fig. 6 Hyetograph at Izu Oshima Island meteorological station (October 15 to 16, 2013)

3.2 過去の雨量との比較

3.2.1 過去に記録した雨量

伊豆大島は、関東地方の南部に位置し、比較的温暖な気候で雨量が多い。年降水量の平年値(1981～2010)は2,827.1mmと、東京の1,528.8mmの1.8倍程度である。

今回の雨量と過去の雨量を比較するため、時間雨量と、連続雨量に着目し、大島観測所の過去60年間(1954/1/1～2014/9/30)の記録を整理した。

過去60年間における正時時間雨量の順位(1～10位)を表-2に、連続雨量の順位(1～10位)を表-3に示す。これによれば、今回の降雨では、正時時間雨量の1位、2位、4位、5位を記録し、連続雨量では観測史上1位の値であった。

過去60年間に、連続雨量(3時間6mm以上の雨が降り続いた場合の積算雨量)が100mmを超えた降雨は、244回、500mmを超えた降雨は2回あった。

表-2 大島観測所における正時時間雨量の順位

Table 2 Hourly rainfall ranking at Izu Oshima Island meteorological station

順位	年月日	時刻	正時時間雨量(mm)	備考(台風名)
1	2013/10/16	～4:00	118.5	H25年26号
2	2013/10/16	～3:00	118.0	H25年26号
3	1980/10/14	～19:00	105.5	S55年19号
4	2013/10/16	～5:00	97.5	H25年26号
5	2013/10/16	～2:00	92.0	H25年26号
6	1958/9/26	～17:00	87.5	狩野川台風
7	1981/10/22	～20:00	82.5	S56年24号
8	1955/8/6	～4:00	78.4	
9	1961/10/10	～5:00	73.4	
10	2006/4/12	～4:00	73.0	

表-3 大島観測所における連続雨量の順位

Table 3 Continuous rainfall ranking at Izu Oshima Island meteorological station

順位	年月日	時刻	連続雨量(mm)	備考(台風名)
1	2013/10/16	～7:00	824.0	H25年26号
2	1982/9/12	～17:00	719.5	S57年18号
3	1958/9/26	～22:00	435.0	狩野川台風
4	2000/7/8	～8:00	411.0	H12年3号
5	1981/10/23	～1:00	403.0	S56年24号
6	2012/5/3	～13:00	384.5	
7	2003/8/16	～12:00	360.5	
8	1990/11/30	～18:00	349.0	H2年28号
9	1972/7/15	～20:00	342.5	S47年7月豪雨
10	1996/9/22	～17:00	342.0	H8年17号

3.2.2 実効雨量による比較

図-7 に、時間雨量と実効雨量から算出したスネークラインを示す。

式 (1) に、実効雨量の算出式を示す。半減期は、透水性が大きい地盤を考慮して、1.5 時間として計算している。

$$R_T = r_T + \sum (r_{T-n} \times 0.5^{n/t}) \quad (1)$$

- ここに、 R_T : 時刻 T の実効雨量 (mm)
- r_T : 時刻 T における時間雨量 (mm)
- r_{T-n} : n 時間前の時間雨量 (mm)
- t : 半減期 (hr)

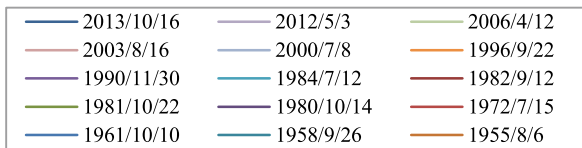
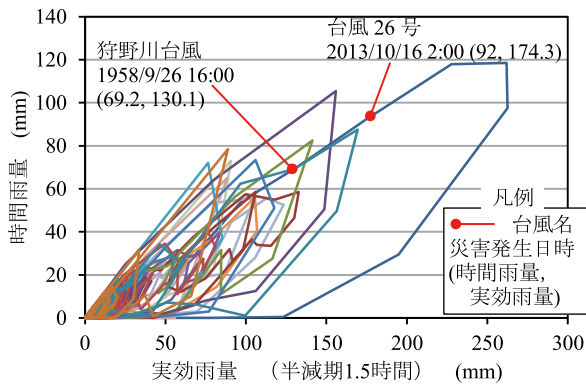


図-7 スネークライン (時間雨量-実効雨量)
Fig. 7 Snake line (hourly rainfall-effective rainfall)

3.2.3 土壌雨量指数による比較

気象庁で採用している 3 段直列タンクモデルの概要を図-8 に示し、その係数を表-4 に示す。図-9 には横軸を土壌雨量指数としたスネークラインを示す。

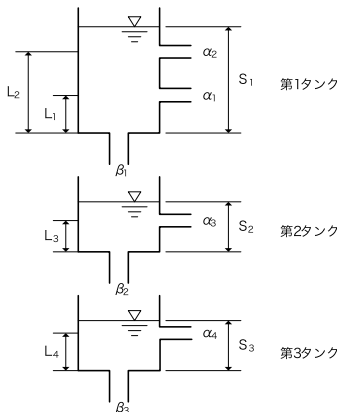


図-8 3 段直列タンクモデル
Fig. 8 Three-stage series tank model

$$S_1(t+\Delta t) = (1-\beta_1\Delta t) \cdot S_1(t) - [a_1\{S_1(t)-L_1\} + a_2\{S_1(t)-L_2\}] \cdot \Delta t + R \quad (2)$$

$$S_2(t+\Delta t) = (1-\beta_2\Delta t) \cdot S_2(t) - a_3\{S_2(t)-L_3\} \cdot \Delta t + \beta_1 \cdot S_1(t) \cdot \Delta t \quad (3)$$

$$S_3(t+\Delta t) = (1-\beta_3\Delta t) \cdot S_3(t) - a_4\{S_3(t)-L_4\} \cdot \Delta t + \beta_2 \cdot S_2(t) \cdot \Delta t \quad (4)$$

ここに、
 S_1, S_2, S_3 : 各タンクの貯留高 (mm)
 a_1, a_2, a_3, a_4 : 各流出孔の流出係数 (1/hr)
 $\beta_1, \beta_2, \beta_3$: 各タンクの浸透流出孔の浸透係数 (1/hr)
 L_1, L_2, L_3, L_4 : 各流出孔の高さ (mm)
 時間刻み Δt は 10 分とし、 R は解析あるいは予想される 10 分間雨量とする。

表-4 タンクモデルにおける係数
Table 4 Parameters for the tank model

	1 段目	2 段目	3 段目
流出孔の高さ (mm)	$L_1=15$ $L_2=60$	$L_3=15$	$L_4=15$
流出係数 (1/hr)	$\alpha_1=0.1$ $\alpha_2=0.15$	$\alpha_3=0.05$	$\alpha_4=0.01$
浸透係数 (1/hr)	$\beta_1=0.12$	$\beta_2=0.05$	$\beta_3=0.01$

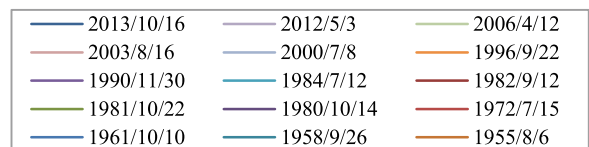
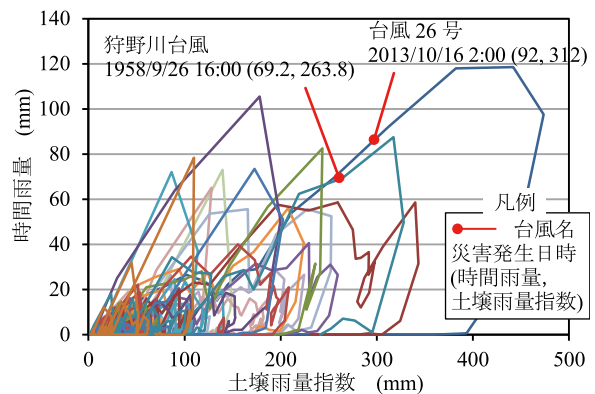


図-9 スネークライン (時間雨量-土壌雨量指数)
Fig. 9 Snake line (hourly rainfall-soil water index)

図-7 および図-9 では、台風 26 号と狩野川台風時の雨量が図右上方にプロットされ、非常に多量の雨量であったことがわかる。一方で、台風 26 号、狩野川台風を除けば、時間雨量 105.5 mm (1980 年台風 19 号: 連続雨量 270 mm), 連続雨量 719.5 mm (1982 年台風 18 号: 最大時間雨量 58.5mm) の降雨にもかかわらず、斜面崩壊・土石流に関連する人的被害は発生していない。このため、時間雨量、実効雨量、土壌雨量指数以外のパラメータについても今後検討する必要がある。

4. 崩壊の概要

土砂流出範囲は図-10に示すとおりで、中央の広い面積の部分とその両側（南北）の筋状の部分がある。広い面積の部分は大金沢流域で、大規模な崩壊が発生したような印象をうけるが、後述するように谷地形の未発達な平滑な斜面において多数の表層崩壊が並列に発生したために、土砂流の流下域が交錯して裸地化した箇所がつながったものである。筋状の被災箇所は長沢、八重沢、大宮沢などの溪流で、谷地形の発達する谷頭斜面で崩壊が発生し、土砂流となって谷沿いに流下したものである。広い面積になった崩壊地頭は、外輪山の頂部緩斜面の直下に位置する一連の急斜面に

あたり、地形的には遷急線の下方斜面である。遷急線は崩壊前線と呼ばれることもあり、山腹斜面では表層崩壊や落石が起こりやすい。御神火スカイライン付近の崩壊について、踏査結果をもとに発生箇所と規模を整理して遷急線とともに図-11に示す。御神火スカイラインは遷急線に並行して少しずつ高度を上げて御神火茶屋の手前で遷急線の上の緩斜面へと登るため、遷急線沿いの崩壊地頭が御神火スカイラインに沿うように見える。

一方、崩壊位置は遷急線の直下の傾斜30～40°の急斜面にあたり、0次谷やわずかに凹状の集水地形になっている。遷急線の上方斜面の傾斜は20°程度の緩斜面であるため、地形的に明瞭な遷急線になっている（写真-1）。

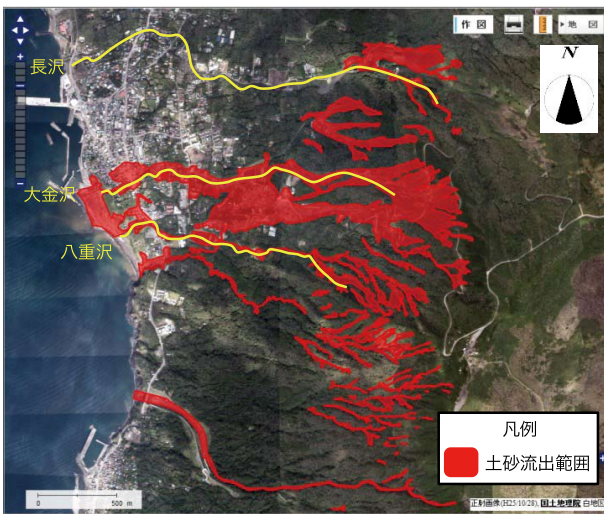


図-10 土砂流出範囲
 Fig. 10 Range of debris flow
 (国土地理院 災害情報共有マップ¹¹⁾を基に作成)



写真-1 遷急線付近の表層崩壊と植生 (①地点)
 Photo 1 Slope collapse and vegetation around the knick line (convex Site 1)
 遷急線（赤破線）付近で左右に表層崩壊がみられ、中央は崩壊跡地でヤシャブシなどの植生が繁茂している。

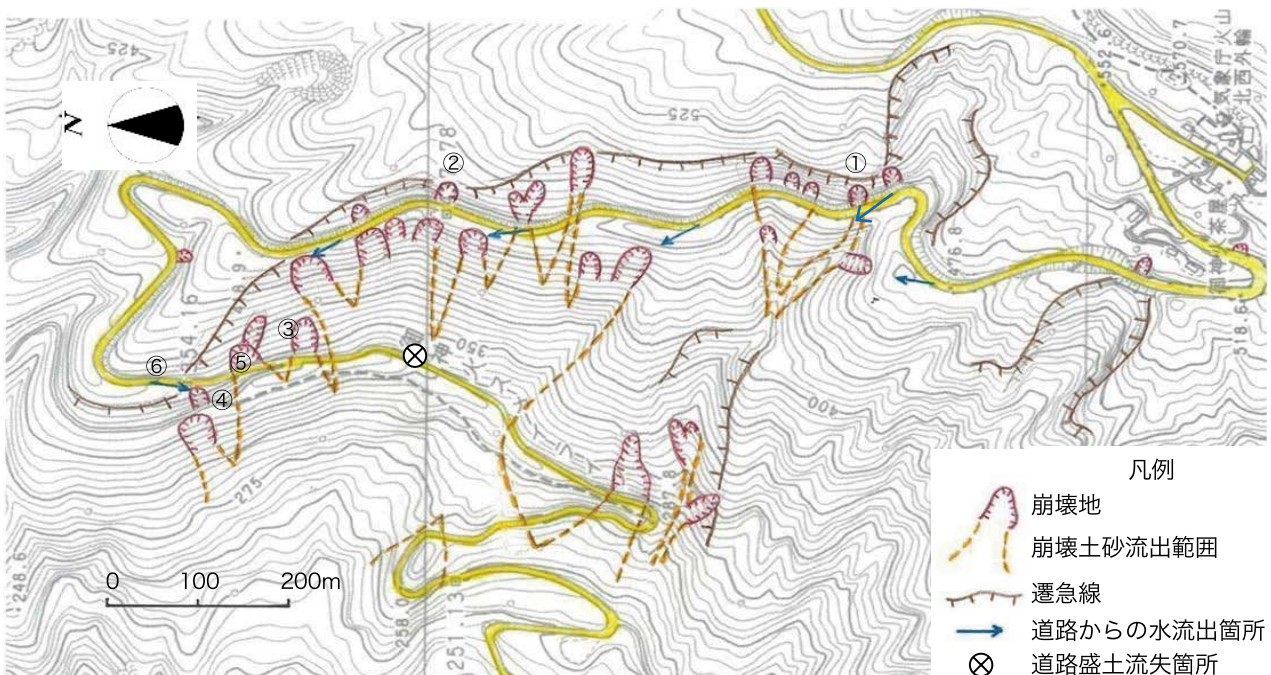


図-11 表層崩壊位置図 (①～⑥は写真撮影地点) (国土地理院の火山基本図白地図を基に作成)
 Fig. 11 Slope collapse location map (① to ⑥ indicate photo points)



写真-2 のり枠上方の表層崩壊 (②地点)
Photo 2 Slope collapse above slope crib (Site ②)



写真-3 道路沿いの斜面の表層崩壊 (③地点)
Photo 3 Slope collapse along the road (Site ③)
赤褐色のスコリア層には植生が残っており、表層崩壊範囲はこの上の斜面にあたる

個々の崩壊規模は、幅 10～50 m、斜面長 20～50 m、崩壊深度 1 m 程度であり、火山地域でよくみられる表層崩壊タイプで根系層崩壊¹²⁾と呼ばれる。このような表層崩壊が図-11 に示すように複数箇所でも並列に発生したため、崩壊土砂が交錯して流下して広い裸地が形成された。具体的な崩壊例は写真-2, 3 に示すとおりで、崩壊土砂はのり枠や道路を横断して流下している。

崩壊面には比較的透水性の小さいレス層が広く露出し、崩壊地の頭部や側方の崖にはレス層に比べ透水性の大きい火山砂層が 1 m 程度の層厚で斜面と同じ傾斜で分布する (写真-4, 5)。火山砂層はスコップで容易に掘れる程度の緩い状態である。レス層と火山砂層は元町溶岩の上位に互層となって堆積し、少なくとも各 4 層が確認できる。斜面の地質は流れ盤構造であり、樹木の根系の大半は表層の火山砂層内にとどまり、下位のレス層まで侵入していないので根系による緊縛効果 (杭効果も含む) が見込めず、火山砂層は極めて不安定な状況にある。

また、御神火スカイラインの数箇所でも路面排水が斜面へ流れ出ていた。その位置は図-11 の道路上の矢印に示す位置で、道路の曲線部や縦断勾配の変化点にあ



写真-4 崩壊地側部の状況 (④地点)
Photo 4 Side of collapsed area (Site ④)
植生の根系は大半が表層の火山砂層に留まり、下位のレス層に貫入していない



写真-5 崩壊地頭部の滑落崖の状況 (⑤地点)
Photo 5 Head of collapsed area of scarp (Site ⑤)
崩壊層は層厚 80 cm の透水性の大きい火山砂層で、下位には透水性の小さなレス層が分布する



写真-6 道路下方の表層崩壊 (⑥地点)
Photo 6 Slope collapse beneath the road (Site ⑥)
道路の流水が曲線部から斜面へ流れ出て、表層崩壊が発生している

たる (写真-6)。道路山側斜面の崩壊土砂が路面に堆積した箇所では、路面排水がせき止められて斜面へ流出した。このような場所では局所的な表層崩壊が発生しているので、道路の復旧に際しては路面排水の処理能力の向上が課題としてあげられる。全体的に見て、

道路が他流域の表流水を導水したり、大量の排水が1か所に集中したりしたわけではない。

表-5に、新聞記事に基づく住民の証言を示した。これらの証言によれば、2013年10月16日の午前2～3時頃に、表層崩壊とそれに続く土砂流の発生がおきている。

表-5 住民の証言の記録
Table 5 Testimonies of residents

場所	時刻	証言内容	証言者
元町地区	1:30	ゴオーという地鳴りのような音	男性(54)
	2:00頃	2階に避難後に1階1部屋が流される	
神達地区	2:00頃	ドーンという音で目が覚めると上流の家が流されてきて衝突、キッチンや風呂が埋まる	男性(29)
椿園ホテル	2:00頃	何かが裂けるような音と振動、その後玄関ドアが破れ土砂が流入し1階廊下は腰の高さまで埋まる	ホテル社長
元町地区	2:00頃	泥・水・草・がれきが流入	男性(36)
元町地区	2:00過ぎ	豆球が停電と同時にガラスが割れて水が流入、夫婦で別棟へ濁流の中を素足で避難、自宅は全壊	女性(86)
元町地区	2:45	テレビで台風情報確認中に「ガーッ」の異音で沢と反対の部屋へ夫婦で移動した直後に窓から泥流が入る	男性(83)
元町地区 大金沢	3:00頃	夫婦で床から天井まで押し上げられ屋根裏へ逃げた	女性(75)
元町2丁目	3:00過ぎ	家族に起されたら室内は水浸し	女性(84)
元町2丁目 海沿い	3:00頃	水や土砂が流入、テレビが消えて停電	男性(60)
大金沢	3:30頃	大金沢の氾濫を確認	警察署員

(朝日新聞記事 (2013/10/16～11/1) を整理)

5. 調査方法

5.1 現地調査

崩壊地内および崩壊地周辺の斜面において、地形・地質・植生状況等を把握するために、図-12に示すLoc.1～4で現地調査を実施した。

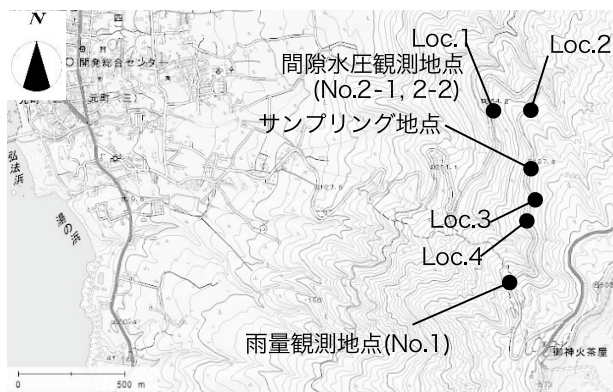


図-12 調査地点位置図

Fig. 12 Map of survey locations
(国土地理院「地理院地図 (http://maps.gsi.go.jp/)」を基に作成)

現地調査では、地表踏査に加えて、土層強度検査棒¹³⁾を用いた表層の土層厚さの測定、簡易動的コーン貫入試験機¹⁴⁾を用いた N_d 値の測定を行った。土層厚さの測定では、土層強度検査棒を人力によって地盤に押し込む方法により、大まかに土層厚さを測定した。また、100 cc サンプラーを用いた変水頭法による透水試験¹⁵⁾(以下、「簡易透水試験」)により、透水係数の測定を行った。

5.2 サンプルングおよび室内試験

大金沢上流の崩壊地において、表層付近の地盤材料のサンプルングを行い(許可番号:環関地国許第1405099号)、土質試験および化学試験に供した。

サンプルング地点を図-12に、採取した試料の一覧を表-6に、サンプルング地点の土層断面を写真-7に示す。

火山砂およびレスの試料は、乱れの少ない方法で採取し、物理試験・力学試験・化学試験に供した。表土およびスコリアの室内試験には乱した試料を用いた。土質試験の項目を表-7に、化学試験の項目を表-8に示す。

表-6 サンプルング試料一覧

Table 6 List of samples

試料名	表層からの深度
表土1	0.00～0.10 m
表土2	0.10～0.22 m
火山砂	0.50～0.80 m
レス	0.90～1.40 m
スコリア	1.50～1.80 m



写真-7 サンプルング地点の土層断面

Photo 7 Soil profile of sampling sites

表-7 土質試験項目一覧
Table 7 List of soil test items

規格番号	試験名	表土	火山砂	レス	スコリア
JIS A 1202	土粒子の密度試験	○	○	○	○
JIS A 1203	土の含水比試験	○	○	○	○
JIS A 1204	土の粒度試験	○	○	○	○
JIS A 1205	土の液性限界・塑性限界試験		○	○	
JGS 0151	土の保水性試験		○	○	
JIS A 1218	土の透水試験 (飽和)		○	○	
-	土の不飽和透水試験		○	○	
JGS 0561	土の圧密定圧(排水)一面せん断試験		○	○	

表-8 化学試験項目一覧
Table 8 List of chemical test items

規格番号 試験名	表土	火山砂	レス	スコリア
pH (1:2.5 水抽出法)		○	○	○
pH (KCl 抽出法)		○	○	○
EC (1:5 水抽出法)		○	○	○
陽イオン交換容量		○	○	○
全窒素 (ケルダール法)		○	○	○
全炭素		○	○	○
リン酸吸収係数		○	○	○
有効態リン酸 (トルオーグ法)		○	○	○

(試験方法は、土壤環境分析法¹⁶⁾による)



図-13 崩壊地とモニタリング計器設置場所
Fig. 13 Collapsed area and locations of monitoring instruments

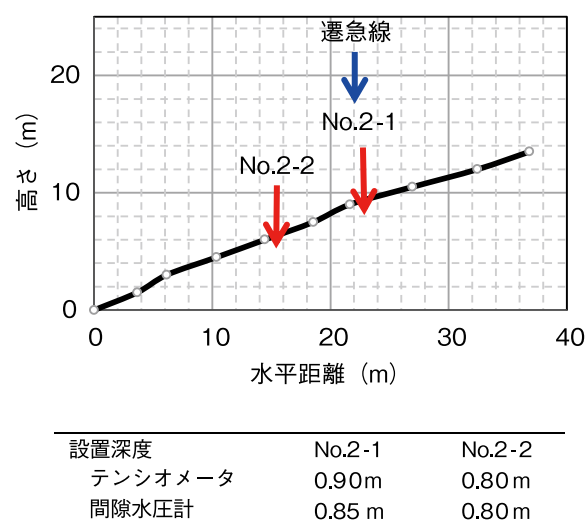


図-14 簡易断面と計器設置箇所および設置深度
Fig. 14 Simplified cross section, instrument installation locations and installed depths

5.3 モニタリング

雨量とサクションおよび間隙水圧の関係を明らかにする目的で、崩壊地頭部に応用地質製のポケット通信機能付雨量計 (No.1) と、レス層上位の火山砂層を対象としたテンシオメータおよび間隙水圧計 (No.2) のモニタリング計器を設置した。

モニタリング計器設置場所は、大金沢の崩壊地頭部で、遷急線付近とした (図-13)。

計器の設置位置は、図-14の簡易断面に示すように、遷急線付近に位置する (No.2-1) およびその下方に位置する (No.2-2) の2地点とし、それぞれの地点にテンシオメータと間隙水圧計を1基ずつ設置した。

また、それらセンサデータ収録とデータ通信用にポケット通信機能付データロガー (応用地質製) を併せて設置した。なお、測定間隔は雨量計、テンシオメータ、間隙水圧計のいずれも5分とした。図-15にテンシオメータの仕様および設置方法を、図-16に間隙水圧計の仕様および設置方法を示す。

テンシオメータ (株式会社モル製)

- ・センサ方式: 半導体圧力センサ,
2重ダイヤフラム,
シリコン封入型
- ・測定範囲: -100~100 kPa
- ・精 度: ±0.5% FS 以下
- ・温度範囲: 0~60 °C
- ・電源電圧: 9~14.5 VDC
- ・出 力: 1~3VDC
(1-6VDC;400 kPa 時)
- ・セラミックス受感部寸法:
φ39×h 40 mm
- ・脱気水注入: シリンジによる注入方
式, 受感部に給水・排水の2系統チ
ューブ接続

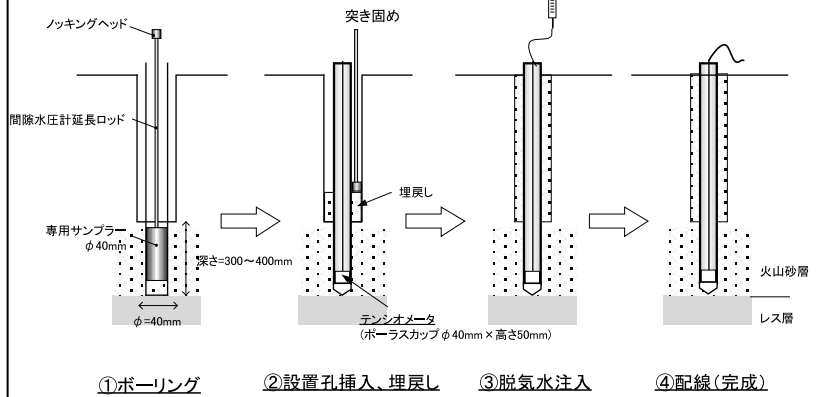
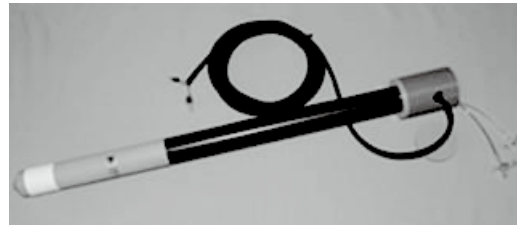


図-15 テンシオメータの仕様と設置方法
Fig. 15 Specifications and installation method of tensiometer

間隙水圧計 (応用地質株式会社製)

- ・センサ方式: 半導体圧力センサ
- ・測定範囲: 0~100 kPa
- ・精 度: ±0.5% FS 以下
- ・温度範囲: 0~40°C
- ・電源電圧: 8~15 VDC
- ・出 力: 4 (0 kPa) ~
20 mA (100 kPa)
- ・フィルタ材質, ろ過径:
ブロンズ球焼結, 100 μm
- ・プローブ材質, 径:
ステンレス, φ16 mm

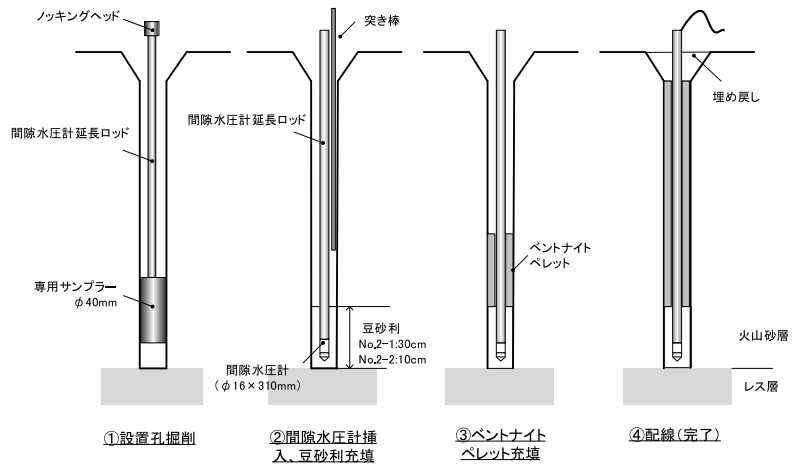


図-16 間隙水圧計の仕様と設置方法
Fig. 16 Specifications and installation method of pore water pressure gauge

6. 調査・観測結果

6.1 地盤の特性

6.1.1 地質構成

調査地には、スコリア層が分布し、それを覆って火山砂層、レス層が互層状に分布している。図-12の Loc.1 における崩壊地頭部の状況を写真-8 に示し、側部における表層部の断面を写真-9 に示す。



写真-8 崩壊地頭部の状況
Photo 8 Head of collapsed area



写真-9 崩壊地側部の状況
Photo 9 Side of collapsed area

6.1.2 土層強度検査棒調査結果

土層強度検査棒による調査を、Loc.1 の崩壊地内および崩壊地周囲で実施した。崩壊地内部の3箇所、崩壊地周囲の6箇所で、人力による押し込みにより、表層厚を測定した。

この結果、土層強度検査棒の貫入深度は、崩壊地内部で1.0～1.4 m、崩壊地周囲で1.5～1.9 mであった。緩い火山砂層と軟質なレス層を貫入し、スコリア層により貫入が妨げられたものと考えられる。

6.1.3 簡易動的コーン貫入試験結果

簡易動的コーン貫入試験は、Loc.1 の崩壊地周囲（頭部、側部）で実施した。実施状況を写真-10 に、試験結果を図-17 に示す。

試験の結果、頭部では深度1.1 m付近で、側部では深度1.4 m付近でそれぞれ N_d 値がやや大きくなる傾向が認められた。これらの付近では、すべり面は深度0.8～1.0 m付近にあり、崩壊深度を規定した要因が、地盤の締め具合以外のものであることを示唆している。

N_d 値が20近くになる深度には、スコリア層が分布することを確認している。



写真-10 簡易動的コーン貫入試験実施状況
Photo 10 Portable dynamic cone penetration test in progress

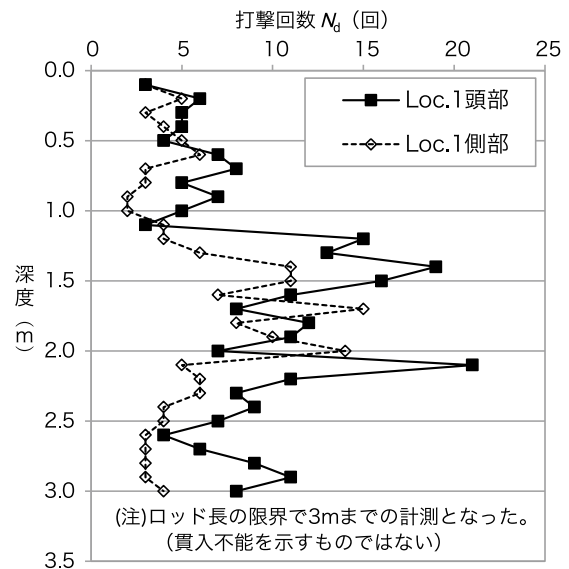


図-17 簡易動的コーン貫入試験結果
Fig. 17 Portable dynamic cone penetration test results

6.1.4 簡易透水試験結果

火山砂層とレス層の透水性を概略把握する目的で、簡易透水試験を実施した。試料は、崩壊地内の代表的な箇所でサンプラーを押し込み、乱れが生じないように採取して実施した。

簡易透水試験の実施状況を写真-11 に、測定結果を表-9 に示す。火山砂の透水係数は 10^{-6} m/s オーダーで、レスは 10^{-8} m/s オーダーであり、火山砂のほう

がレスより2オーダー透水性が大きいことがわかった。なお、後述するように室内試験による飽和透水係数はここで得られた結果よりも差が小さいが、本試験による通水方法では完全飽和に至っていなかった可能性があったと考えている。



写真-11 簡易透水試験実施状況
Photo 11 Simplified permeability test in progress

表-9 簡易透水試験結果
Table 9 Simplified permeability test results

地点名	火山砂	レス
Loc.1	1.7×10^{-6} m/s	1.3×10^{-8} m/s
Loc.3	4.2×10^{-6} m/s	2.9×10^{-8} m/s

6.1.5 土質試験結果

表層崩壊の発生機構把握のためには、降雨に伴う崩壊土の力学特性の変化の把握が重要である。これまで表層崩壊のシミュレーションに不飽和浸透特性に着目した検討がなされている¹⁷⁾ことや、飽和化に伴うサクシヨンの消失が表層崩壊の発生に影響を与えているとする報告¹⁸⁾を踏まえ、不飽和状態の浸透特性および力学特性に着目した試験を実施した。

(1) 物理試験結果

物理試験結果の一覧を表-10に示す。また、粒径加積曲線を図-18に示す。

表-10より土粒子密度に着目すると、火山灰およびレス、スコリアは一般的な土質材料と比べて大きく、鉱物を多く含んでいることが示唆される。また、火山砂と比べてレスの自然含水比は高く、保水性の違いを表している。図-18の粒径加積曲線に着目すると、レスは、表土と粒度が類似しており、火山砂は、レス・表土よりも砂分を10%ほど多く含んでいる。また、0.005 mm以下の粘土分の含有量はレスと比べて半分程度の8%であり、細粒分の含有量に比べて塑性の小さいことが特徴的である。スコリアは、火山砂と比べて礫を多く含んでいる。一方乾燥密度は、より細粒なレスのほうが火山砂よりもやや大きい。同程度の締り

度合であれば、粒径の大きな試料ほど乾燥密度は大きくなることを考慮すると、レスのほうが火山砂よりも締り度合の良いことが推察される。火山砂は非常に緩い状態にあり、サクシヨンの影響によって間隙比の大きい構造が保たれているものと考えられる。このことは、降雨浸透に伴うサクシヨンの消失によって、強度が低下する可能性を示唆している。

表-10 物理試験結果一覧
Table 10 List of physical test results

試験番号	表土1		表土2		火山砂		レス		スコリア	
	深 度	G.L.-(m)	0.00	0.10	0.50	0.90	1.50	0.00	0.10	0.50
一 般	湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	-	-	-	1.437	1.503	-	-	-	-
	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	-	-	-	1.120	1.171	-	-	-	-
	土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.701	2.768	2.872	2.839	2.841	-	-	-	-
	自然含水比 w_n (%)	87.4	50.6	20.8	36.3	42.4	-	-	-	-
	間 隙 比 e	-	-	1.552	1.437	-	-	-	-	-
	飽 和 度 S_r (%)	-	-	51.2	56.2	-	-	-	-	-
	石 分 (75mm以上) (%)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-
	礫 分 (75mm~2mm) (%)	0.0	0.0	0.0	0.0	21.7	-	-	-	-
	砂 分 (2mm~75μm) (%)	53.9	56.9	66.1	55.4	49.1	-	-	-	-
	シルト分 (75μm~5μm) (%)	32.2	29.6	26.4	30.3	17.1	-	-	-	-
粒 度	粘土分 (5μm未満) (%)	13.9	13.5	7.5	14.3	12.1	-	-	-	-
	最大粒径 (mm)	0.850	0.850	2	2	26.5	-	-	-	-
	均等係数 U_c	59.6	70.3	19.0	116	104	-	-	-	-
	20% 粒 径 D_{20} (mm)	0.0118	0.0151	0.0306	0.0128	0.0229	-	-	-	-
	テ コ ン シ ョ ン	液性限界 w_L (%)	108.4	60.3	NP	34.8	39.3	-	-	-
	レ ス	塑性限界 w_p (%)	54.3	33.5	NP	24.7	28.7	-	-	-
	塑性指数 I_p (%)	54.1	26.8	-	10.1	10.6	-	-	-	-
分 類	地盤材料の分類名	細粒分質 砂	細粒分質 砂	細粒分質 砂	細粒分質 砂	細粒分質 礫質砂	-	-	-	-
	分類記号	(SF)	(SF)	(SF)	(SF)	(SFG)	-	-	-	-

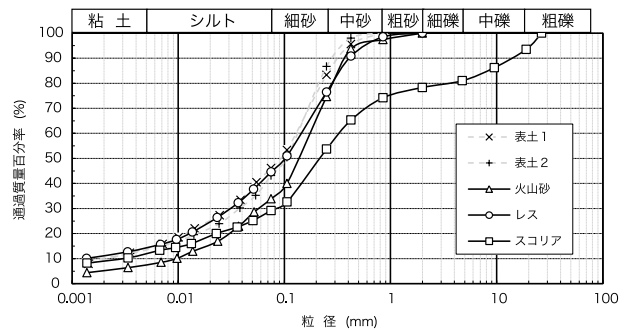


図-18 粒径加積曲線
Fig. 18 Grain size accumulation curves

(2) 透水試験結果

水分特性曲線を図-19に、透水係数と体積含水率の関係を図-20に、透水係数と飽和度の関係を図-21に示す。土の保水性試験は、試験期間の大幅な短縮が可能な連続加圧法により実施している^{19), 20)}。図-19より、脱水過程から得られる空気侵入値は火山砂、レスとも2 kPa程度であるのに対し、吸水過程から得られる水侵入値は明確な折れ曲がり点が見られなかった。火山砂のほうが体積含水率の変化幅が大きいのは、非常に緩い状態にあり有効間隙比が大きいためである。

次に、図-20の体積含水率と透水係数の関係に着目すると、体積含水率の変化によって両試料とも透水係数が4オーダー程度変動しており、雨水浸透現象を検討するにあたっては、飽和度の変動に伴う透水係数の

変化を考慮することの重要性を示すものと考えられる。また、飽和透水係数は、火山砂が 6.9×10^{-5} m/s、レスが 2.2×10^{-5} m/s であり、火山砂のほうがレスより 3 倍程度大きい結果となっている。次に、図-21 の飽和度と透水係数の関係に着目すると、同一の飽和度であればレス層のほうが透水係数は小さいことがわかる。表-10 に示した自然状態の飽和度はともに 50% 程度であることを考慮すると、原位置の自然状態における透水性は火山砂のほうが大きく、雨水が浸透して飽和度が高くなるにつれ、その差は小さくなっていくものと考えられる。

(3) 力学試験結果

火山砂とレスの力学特性の評価は、乱れの少ない砂質土系の試料にも容易に適用でき、火山砂のような低拘束圧下においても試験が可能な一面せん断試験によって行った。含水条件は、飽和度の上昇によるサクシジョンの低下が力学特性に与える影響を把握するため、飽和状態と自然含水比の 2 種類で実施した。試験は定圧条件とし、せん断試験過程における垂直変位も計測した。図-22(a), (b) に自然含水比における火山砂、レスのせん断変位～せん断応力・垂直変位の関係を、図-23 にピーク強度時の垂直応力～せん断応力の結果を示し、表-11 に試験から求めた粘着力 c_{cd} および内部摩擦角 ϕ_{cd} を示す。

図-22(a), (b) より、両試料ともせん断初期に圧縮側の垂直変位を示すが、その後体積変化をあまりしない供試体と、膨張側への変位を生じる供試体が混在していることがわかる。また、膨張側への変位を生じる供試体は、垂直応力が大きくなる傾向が見られる。これは、体積変化挙動、すなわちダイレイタンス特性にわずかな供試体のばらつきが大きな影響を与えることを示すものである。今回のような緩い砂質土は、一般にせん断時は負のダイレイタンス（体積圧縮）を生じるが、低拘束圧下においては負のダイレイタンスは抑えられる。またせん断に伴うひずみの局所化で、正のダイレイタンス（体積膨張）を生じる場合がある。その発生頻度は供試体のばらつきの程度に左右されるが、乱れの少ない試料を用いた場合は、ばらつきの影響を加味することが望ましいと考えられる。

図-23 のピーク強度時の垂直応力～せん断応力には、最小二乗法で引いた破壊限界線を示している。ただし、火山砂については、続成作用があまり発達しておらず、低塑性であるため飽和状態では粘着力を有さない材料とみなし、 $c=0$ として破壊限界線を引いた。これより、火山砂、レス共にピーク強度時のせん断応力はサクシジョンの影響により、自然含水比のほうが概ね大きくなっている。また、レスは飽和状態においても粘着力を有しており、火山砂とは力学特性が異なっていることがわかる。

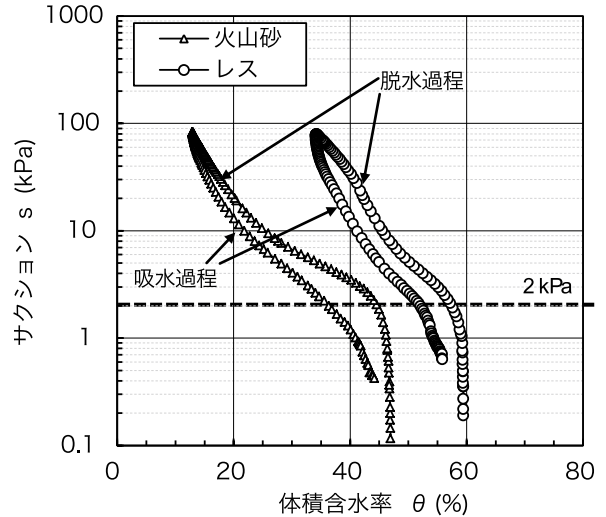


図-19 水分特性曲線
Fig. 19 Soil Moisture Characteristic Curves

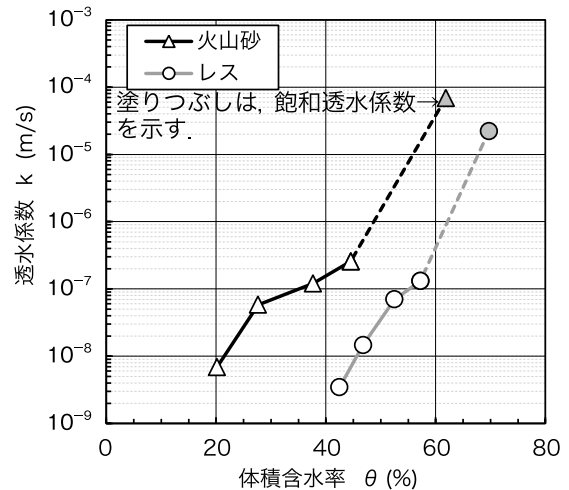


図-20 透水係数と体積含水率の関係図
Fig. 20 Permeability-volumetric water content relationship

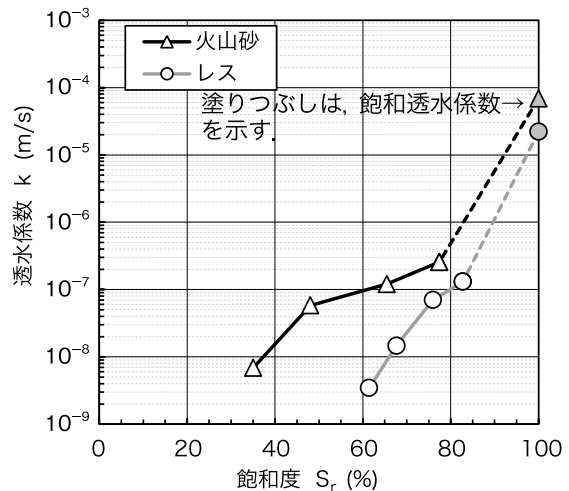
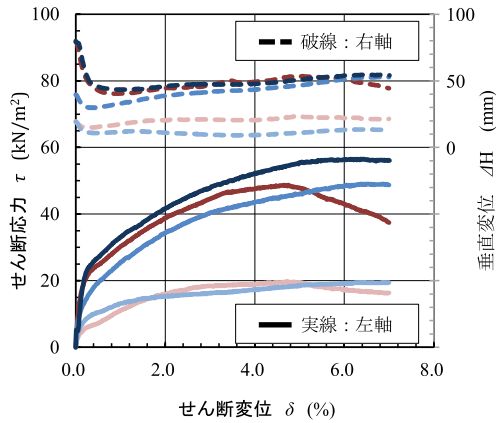
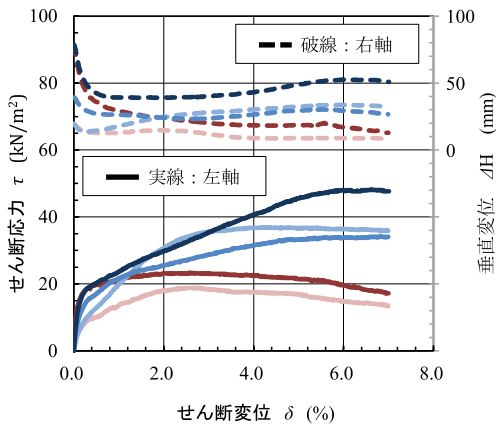


図-21 透水係数と飽和度の関係図
Fig. 21 Permeability-saturation relationship



(a) 火山砂



(b) レス

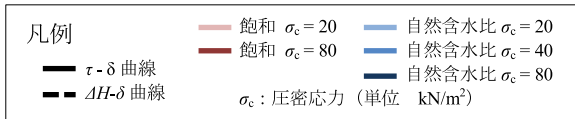


図-22 一面せん断試験におけるせん断変位～せん断応力・垂直変位
Fig. 22 Shear displacement, shear stress, and vertical displacement in a box shear test

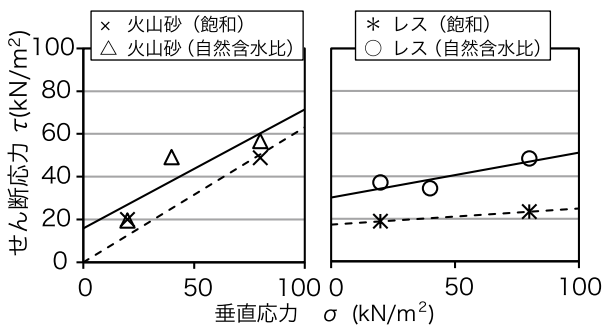


図-23 一面せん断試験結果

Fig. 23 Box shear test results

表-11 力学試験結果

Table 11 Mechanical property test results

試料	含水条件	c_{cd} (kN/m ²)	ϕ_{cd} (°)
火山砂	飽和	0	32.3
	自然含水比 $\theta = 31.7\%$ $3.5 \leq s \leq 6.0$	15.8	29.9
レス	飽和	17.3	4.3
	自然含水比 $\theta = 40.4\%$ $11.6 \leq s \leq 33.6$	29.9	11.9

6.1.6 土壌の物理性・化学性試験結果

根系の発達状況と土壌の物理性・化学性との関係性を把握する目的で、土壌の物理性・化学性試験を実施した。試験結果を表-12に示す。この表では、物理性、化学性において、植物の発育に関連する項目と各々の適正範囲、ならびに採取した土壌の分析結果を示している。

火山砂、レスともに、物理性は概ね適正範囲内、化学性はEC、陽イオン交換容量、有効態リン酸については適正範囲外で、その他の化学性に関する項目は適正範囲内である。両試料を比較すると、物理性・化学性に関しては、大きな差異はみられなかった。

表-12 土壌の物理性・化学性試験結果

Table 12 Soil physical and chemical test results

項目	単位	適正範囲		火山砂	レス	スコリア	出典
		下限	上限				
易有効水分保持能	L/m ³	80	-	187*	144*	-	緑化
粗孔隙	%	10	-	30	21	-	農林
固相率	%	-	30	38	30	-	農水
気相率	%	10	-	36	38	-	農水
ち密度	mm	8	23	18	21	20	急傾
ち密度(最大値)	mm	-	22	18	24	20	農林
pH		5.5	7.5	7.0	6.4	7.6	急傾
pH(KCl)		4.5	7.1	5.9	5.6	6.3	緑化
EC	dS/m	0.2	1	0.02	0.021	0.021	緑化
陽イオン交換容量	cmol/mg	6	-	1.4	2.3	4.7	緑化
腐植	%	1	-	0.6	1.2	1.2	緑化
全窒素	mg/kg	0.6	-	0.45	0.65	0.82	緑化
C/N比		-	30	7.6	10.8	8.5	緑化
リン酸吸収係数	mg/100g	-	2000	357	589	557	緑化
有効態リン酸	mg/kg	100	-	4.0	7.2	4.3	緑化

*水分保持能: pF1.8~1.9で算出した

適性範囲の出典: 緑化: 日本緑化センター²¹⁾, 農林: 農林水産省²²⁾, 農水: 農水および吉田²³⁾, 急傾: 急傾斜地崩壊防止工事技術指針委員会²⁴⁾.

6.2 植生と根系

6.2.1 林分の構造と推定樹齢

崩壊地頭部周辺の林分の構造的な特徴を、毎木調査や年輪判読で調査した。

毎木調査の結果を図-24に示す。崩壊地との境界部付近の林分は、ハチジョウウイヌツゲ、ヒサカキなどの常緑樹やオオバヤシャブシ、オオバエゴノキなどの落葉樹が優占する林分であった。いずれの地点でも萌芽している個体が多く、胸高直径10 cm以下と細い樹木が多かった。

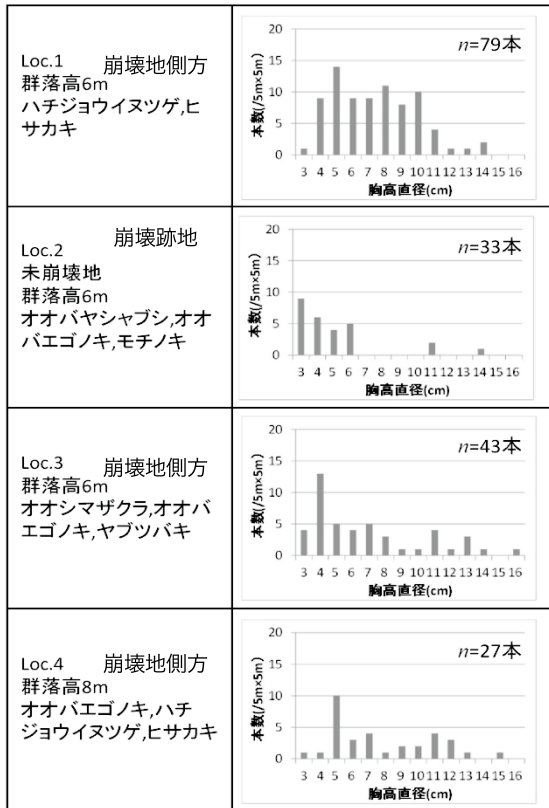


図-24 調査林分の胸高直径階分布
Fig. 24 Distribution of diameter at breast height in researched forests

倒木の年輪数と胸高直径との関係を図-25に示す。樹齢約50年(年輪数50)でみると、常緑樹(ハチジョウイヌツゲ, ヒサカキ)の胸高直径は約10cm, 落葉樹(オオシマザクラ, オオバヤシャブシ)は約20cmであった。胸高直径からは、Loc.2の林齢は約40年, その他3箇所は約50~70年と推定される。

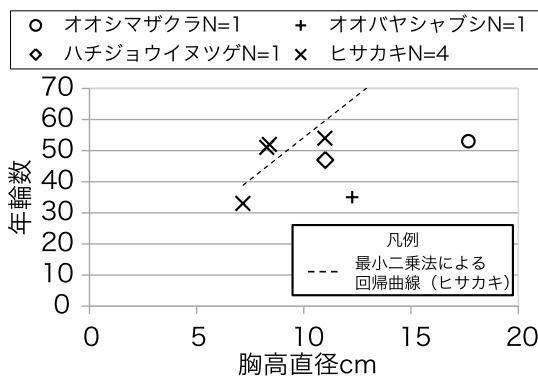


図-25 倒木の胸高直径と年輪数
Fig. 25 Diameter at breast height and number of annual rings of fallen trees

6.2.2 根系の発達状況

一般に、植生の遷移は、草本群落から木本群落へと発達し、木本群落も、最初は先駆性樹種から構成される群落から、やがては、寿命が長い種から構成される極相林へと遷移する。伊豆大島の場合、先駆植物の群

落の構成種は、主にオオバヤシャブシである。それより遷移が進んだ群落の主構成種は、ヒサカキ、ハチジョウイヌツゲ、シロダモなどであり、極相林の主構成樹種のスタジイ、タブノキは、崩壊地周辺では見られない。

今回、表層崩壊が発生した斜面の主な植生は、オオシマザクラ-オオバエゴノキ群集や、ハチジョウイヌツゲ群落(辺縁)であり、極相林ではない。この周辺では、薪炭用に伐採した履歴があり、現地調査の結果でも樹木は1株当たり5~8本の株立ちが見られることから、萌芽更新が行われており、一帯は萌芽更新林である。このため、天然更新の樹木に比べると、根系の発達が乏しくなっている。太田²⁵⁾は、森林伐採を行うと、伐採後10年前後は過去の根系が腐朽し、新たに成長しはじめた樹木の根系が発達し回復するには20年程度かかるとしている。

崩壊地付近で確認した根系の状況を写真-12に示す。根系は火山砂層の中に伸長していたものの、レス層までは伸長しておらず、レス層付近に到達した根系はレス層の上面に沿って横方向に伸長していた。

崩壊地付近で成立している林分の根系分布の模式図を図-26に示した。崩壊地側部では、高さ約1mの断面を観察することができるが、ここでも根系はレス層までは伸長していない。

上述した観察結果から、レス層には、根系を発達させるににくい要因があると推定される。

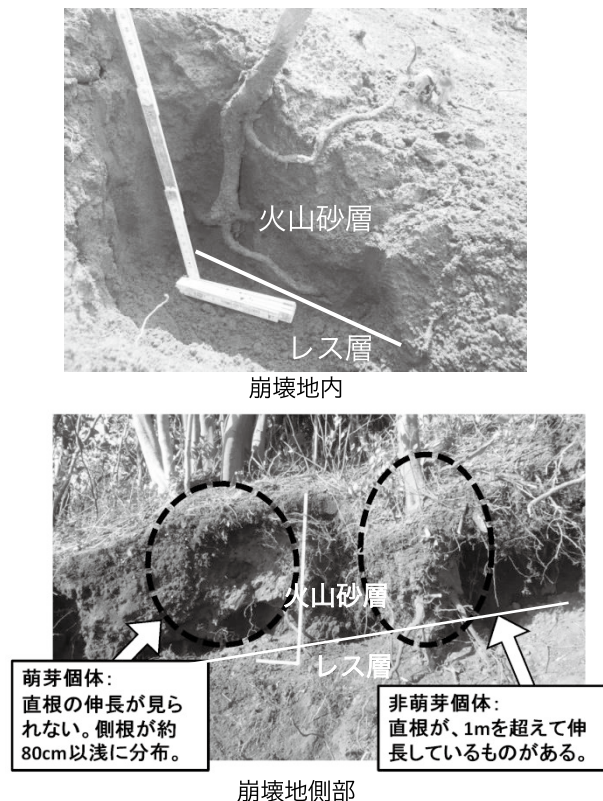


写真-12 崩壊地付近における根系の発達状況
Photo 12 Growth of root system near collapsed area

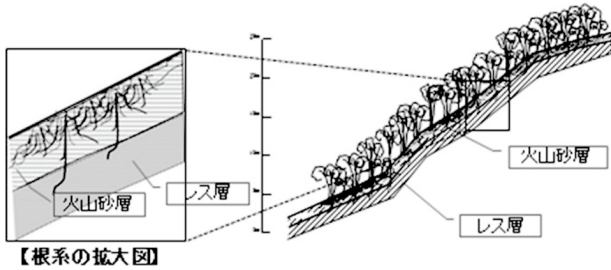


図-26 崩壊地付近の樹林と根系分布の模式図

Fig. 26 Model of trees and root distribution around collapsed area

6.2.3 崩壊地と崩壊跡地における植生・根系の違い

崩壊跡地の斜面 (Loc.2) には、オオバヤシャブシ群落が生育している。この付近の表土・火山砂層は30～40 cm 以下と薄い。オオバヤシャブシの根系構造は、直根の伸長は明白でなく、主に、細く短い側根が深さ30～40 cm 程度まで侵入し根系を伸長させていた。オオバヤシャブシ群落が生育している箇所は崩壊しなかったが、これは火山砂層の層厚が40 cm 以下と薄かったためであり、オオバヤシャブシ群落の根系で、土層が維持できた可能性がある。

今回崩壊した斜面 (Loc.1,3,4) 付近には、落葉広葉樹林、常緑広葉樹 (低木) が分布している。一般に、遷移が進んだ植物群落は、根系の侵入深が深いため、その土壤保全力は先駆樹種の群落より高いことが多い。しかし、今回の伊豆大島では、落葉広葉樹林であるオオシマザクラ-オオバエゴノキ群集と常緑広葉樹 (低木) 林のハチジョウイヌツゲ群落の辺縁部 (以下、落葉広葉樹林ほか) の斜面が崩れ、先駆樹種のオオバヤシャブシ群落の斜面が崩れていない現象が生じている。これは落葉広葉樹林ほかの表土・火山砂層の厚さが70～80 cm あり、オオバヤシャブシ群落の表土・火山砂層の厚さに比べて厚かったこと、およびレス層に根系が侵入していないため土層の緊縛効果が小さく、滑動への抵抗力が弱かったことが要因として推察される。

根系がレス層に侵入していない原因は二つ考えられる。一つは、レス層の透水性がやや小さいことである。透水性がやや小さいため、一時的に水の停滞層が形成され、水の停滞層が存在することにより、十分な酸素が停滞層中に供給されず、根が伸長しなかった可能性がある。

もう一つは、直根が消失したために、レス層まで根系が成長しなかった可能性である。側根が密生した原因は、薪炭のために萌芽更新を繰り返したことにありと考えられる。萌芽更新を繰り返すと、伐採ごとに根の先端が枯死し、新しい側根が密生するため、根系は短く細くなる。つまり、萌芽更新を繰り返すほど、根系層は浅くなる。これらのことが、落葉広葉樹林ほかの根系層を薄くした主因と考えられる。

6.3 モニタリング結果

6.3.1 雨量

雨量計の設置位置を図-27に示す。No.1雨量計は、2014年5月20日に設置し、モニタリングを開始した。

比較対象は大島観測所と大島北ノ山観測所 (アメダス観測所) である。

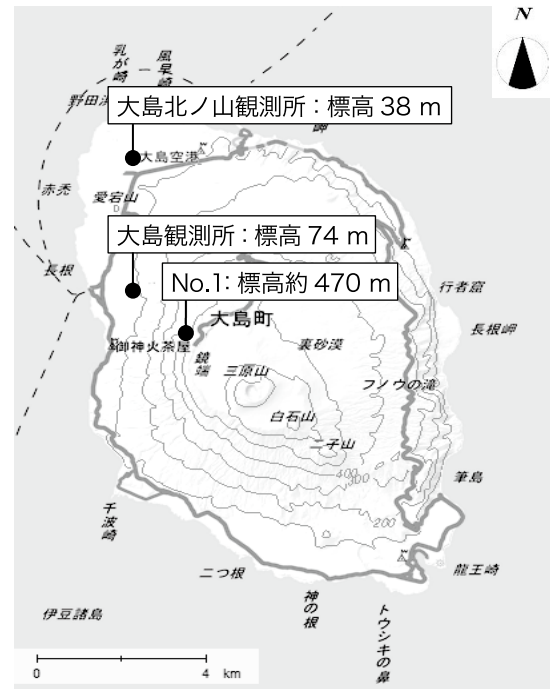


図-27 雨量計設置位置図

Fig. 27 Map of rain gauge locations (国土地理院 地理院地図 を基に作成)

観測開始から10月末までの総雨量を比較すると、本研究で設置したNo.1地点では1,637.5 mmであり、これに対して大島観測所では1,353.0 mm、大島北ノ山観測所では984.5 mmとなった。

No.1地点と大島観測所、大島北ノ山観測所との時間雨量の比較を図-28に示す。5か月程度の観測結果ではあるが、No.1地点の時間雨量が、大島北ノ山観測所や大島観測所よりもほとんどの観測で大きくなる傾向を示すことがわかった。

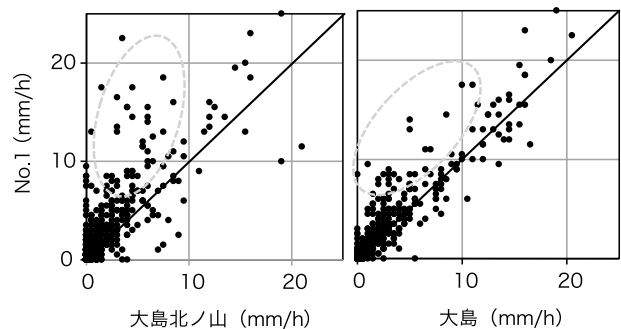


図-28 No.1地点と他の観測地点の時間雨量比較

Fig. 28 Hourly rainfall comparison between Site No.1 and other observation points

以上の観測結果から、山裾や平地の雨量より外輪山の遷急線付近の雨量のほうが大きくなる例が多いことがわかった。すなわち、2013 年 10 月 16 日未明における災害の発生時には大島観測所で時間雨量 122.5 mm を記録しているが、No.1 地点に相当する大金沢上流では、それを上回る時間雨量があった可能性がある。

ただし、火山山麓や山地部においては、地形効果等により、比較的近い距離でも雨量が異なることが予想される。このため、今後は、稠密観測によって、より正確な雨量の観測が必要と考える。

6.3.2 間隙水圧およびサクシオン

図-29 に間隙水圧およびサクシオンの経時変化図を示す。間隙水圧の計測値は、No.2-1、No.2-2 とも

に、 0 ± 0.5 kPa と計測器の精度未満であることから誤差の範囲であり、正の間隙水圧は発生しなかったと判断した。

一方、サクシオンの経時変化では、無降雨期間に増加し、降雨により減少する傾向が認められる。表-13 にモニタリング期間中のサクシオンの最大値・最小値を示す。最小値は、No.2-1 で 1.3 kPa、No.2-2 で 1.4 kPa であった。サクシオンは、連続雨量 100 mm 以上の降雨があると、約 1.5 kPa まで低下するが、1 kPa 以下までは低下せず 1.5 kPa 程度の値を継続している。

2 地点におけるサクシオンの挙動を比較すると、まず No.2-1 (遷急線付近) が降雨に反応し、続いて No.2-2 (遷急線下方) が緩やかに減少し、緩やかな

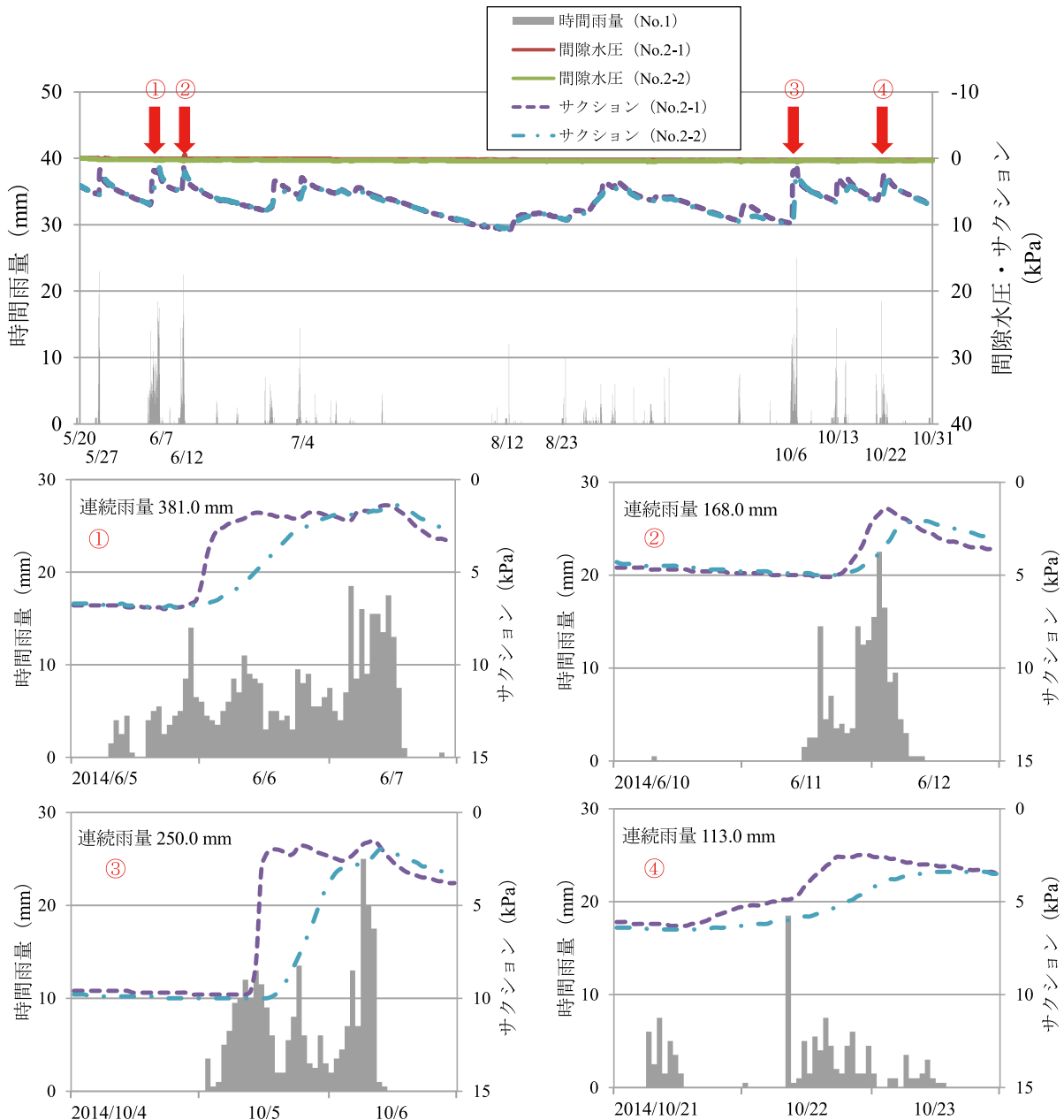


図-29 間隙水圧およびサクシオンの経時変化図

Fig. 29 Time series data of pore water pressure and suction

ピークを形成している。また、無降雨期間では、No.2-1のほうが早くサクシオンが増加し始める。これは、No.2-1は勾配が緩く、鉛直方向の浸透が斜面平行方向の浸透よりも卓越することが一因として考えられる。同様の傾向は数値解析結果でも確認されている²⁶⁾ことが興味深い。

表-13 サクシオンの最大・最小値
Table 13 Maximum and minimum values of suction

地点名		観測日	サクシオン (kPa)
No.2-1 (遷急線付近)	最大値	2014/8/12	10.8
	最小値	2014/6/7	1.3
No.2-2 (遷急線下方)	最大値	2014/8/13	10.6
	最小値	2014/6/7	1.4

7. 考察

7.1 崩壊機構

2013年10月16日に発生した斜面崩壊は、崩壊深度が1m程度未満の表層崩壊である。表層崩壊の誘因は、最大時間雨量122.5mm、最大24時間雨量824mm(いずれも大島観測所)を記録した降雨であるが、素因としては、斜面にほぼ平行に堆積した透水性および力学特性の異なる火山砂層とレス層が互層状を呈し、流れ盤構造をなして堆積する火山地域特有の地質構造があげられる。

この表層崩壊は、レス層上面をすべり面としており、豪雨によって浸透した雨水が火山砂層のサクシオンを減少させ、透水性の差により、レス層と火山砂層の境界部付近で間隙水圧が上昇したことで、表層部が不安定化し、崩壊に至ったものと推測される。すなわち、以下のとおりである。

- ① 降雨の浸透や背後斜面からの地下水の流動により、火山砂層の飽和度が上昇し、サクシオンが減少する。
- ② さらに降雨の浸透と地下水の流動により、サクシオンが消失し、レス層と火山砂層の境界部に間隙水圧が発生する。
- ③ 間隙水圧がさらに増大し、火山砂層が不安定化し、レス層上面をすべり面とする崩壊が発生する。

なお、崩壊地頭部におけるサクシオンと間隙水圧の観測結果では、観測期間中の最大時間雨量25mm、最大連続雨量381mmの時でも、サクシオンの減少は認められるが、間隙水圧の発生は確認されていない。このことから、当該地域で間隙水圧が発生するためには、相当な降雨強度が必要と推測される。

今回、崩壊機構の理解のために、室内試験で得られた火山砂の土質定数を用いて、無限長斜面を仮定した

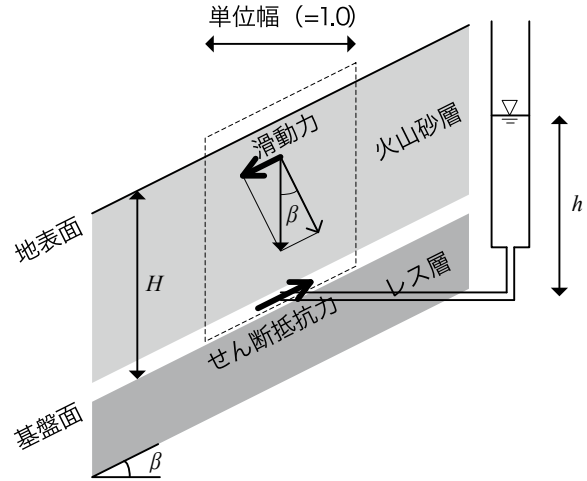


図-30 表層崩壊の簡単な安定計算モデル
Fig. 30 Simplified stability calculation model of slope collapse

簡単な機構解析を実施した。

この解析では、無限長斜面を仮定し、沖村²⁷⁾の無限長斜面モデルから植生の寄与する項を除いて、安定計算を行った。図-30に表層崩壊の簡単な安定計算モデルを示し、以下に安定計算式を示す。土質定数は、定圧一面せん断試験から算出した c, ϕ 値(表-14)を用いた。

$$F_s = \frac{c + A \cdot \cos^2 \beta \cdot \tan \phi}{B \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta} \tag{5}$$

$$A = (\gamma_{sat} - \gamma_w)h + \gamma_t(H - h) \tag{6}$$

$$B = \gamma_{sat}h + \gamma_t(H - h) \tag{7}$$

ここに、 F_s : 安全率

c : 土の粘着力 (kN/m²)

ϕ : 土の内部摩擦角 (°)

γ_{sat} : 土の飽和単位体積重量 (kN/m³)

γ_t : 土の湿潤単位体積重量 (kN/m³)

γ_w : 水の湿潤単位体積重量 10 (kN/m³)

H : 基盤面からの表土厚 (m)

h : 基盤面の水頭 (m)

β : 斜面(基盤)勾配 (°)

表-14 土質定数
Table 14 Mechanical properties of soil

項目(単位)	火山砂	レス
γ_{sat} (kN/m ³)	17.4	17.6
γ_t (kN/m ³)	14.3	15.0
c_{sat} (kN/m ²)	0	17.3
c_{uns} (kN/m ²)	15.8	29.9
ϕ_{sat} (°)	32.3	4.3
ϕ_{uns} (°)	29.9	11.9

添え字 $_{sat}$ は飽和時、 $_{uns}$ は不飽和時を示す

その他の計算条件として、火山砂の層厚と斜面勾配は調査地点の平均的な値を採用することとし、火山砂の層厚 $H=0.8$ m, 斜面勾配 $\beta=30^\circ$ とした。また、水位および土質定数の組み合わせは以下のとおりである。

- Case1: 自然含水比の c, ϕ で水位 $h=0$ m
- Case2: 飽和土の c, ϕ で水位 $h=0$ m
- Case3: 飽和土の c, ϕ で水位 $h=0.4$ m (水位半分)
- Case4: 飽和土の c, ϕ で水位 $h=0.8$ m (完全飽和)

結果を図-31に示す。これより、火山砂は飽和化に伴う粘着力の消失により、安全率を大きく減少させる結果となった。ただし、水位がない状態では1を上回っている。レス層との境界に水位が数10 cm 発生した時点で安全率が1を割り込み、崩壊に至る結果となった。一方、レスは飽和状態となっても粘着力を有するため、安全率は完全飽和状態においても1を大きく上回っている。この計算結果から、崩壊が発生したのが火山砂層とレス層の境界が水理境界面となったことが大きい、力学特性の違いも一因となった可能性

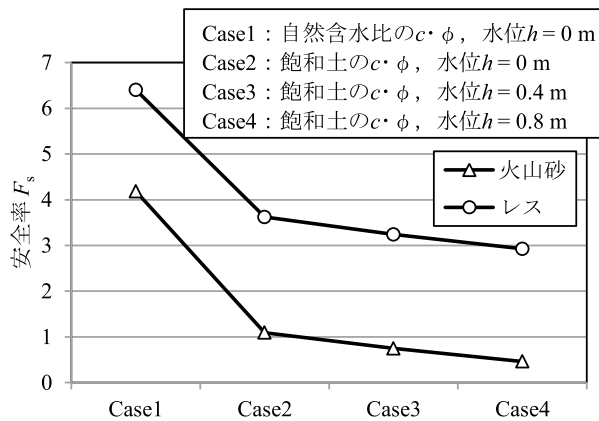


図-31 安定解析結果
Fig. 31 Stability analysis results

が示唆された。

7.2 降雨と土壌雨量指数の関係

気象庁タンクモデル（前掲の式(2)～(4)）により計算したNo.1の土壌雨量指数を図-32に示す。現地の観測結果によれば、間隙水圧は生じていないが、土壌雨量指数（水位）は、降雨に反応し、上昇を示している。

土壌雨量指数の係数（表-4）は、全国一律の値であるため、実現象を反映し、崩壊をよく予測できるように、地点により地形・地質を考慮して最適な係数を決定する方法が今後求められる。そのために、間隙水圧を計測し、実現象を捉えることが重要と考える。

また、これまでに人的被害が生じている2つの台風と、2014年に土壌雨量指数が上昇した期間（図-32の①、③）のスネークラインの比較を図-33に示す。

今回観測期間中に記録された降雨強度 25 mm/h や連続雨量 400 mm 程度では、災害があった降雨ほど、スネークラインは上昇していない。

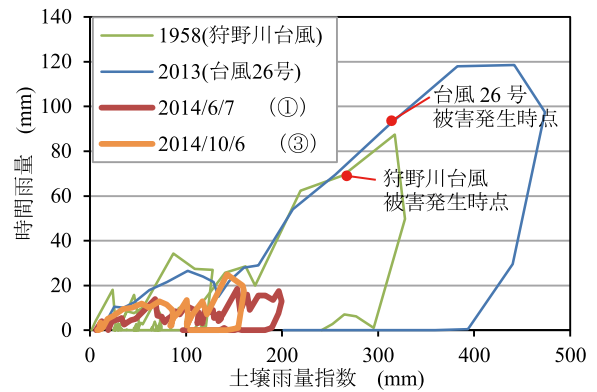


図-33 土壌雨量指数上昇時のスネークライン (2014)
Fig. 33 Snake line under increasing soil water index (2014)

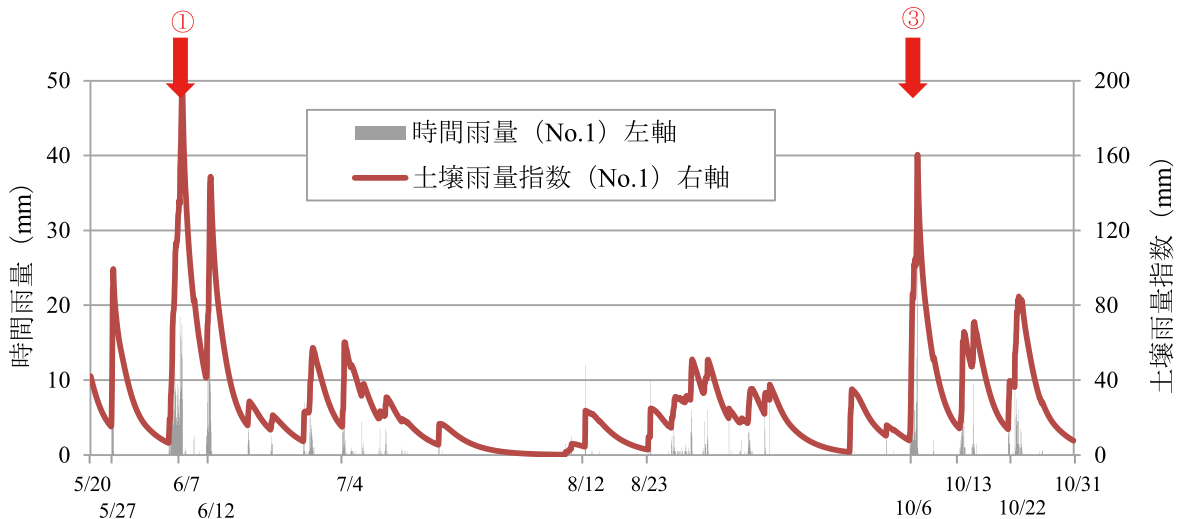


図-32 土壌雨量指数の経時変化図
Fig. 32 Time series data of soil water index

7.3 植生による斜面安定効果

表層崩壊の抑制として、樹木の根系による緊縛効果があげられる。一般に、太い直根が地中深く伸長する根系構造は、崩壊に対する抵抗性が高く、直根の伸長が見られない構造は、抵抗性が低い。また、太く長い側根が伸長した根系構造（根系のネット構造が発達したものは、崩壊に対する抵抗性が比較的高いが、側根のみが密生した根系構造は、崩壊に対する抵抗性は低いとされている（山寺）²⁸⁾。

崩壊地における根系構造をみると、根系は火山砂層に伸長しているものの、レス層まで達しているものはごくわずかである。今回の表層崩壊は、レス層上面をすべり面としていることから、根系による緊縛効果はほとんどなかったものと推測される。

レス層中に根系が伸長していない原因としては、①やや透水性が小さいことによる酸素供給の不足、②萌芽更新による直根の消失が考えられる。緊縛効果の発現のためには、これらの点に留意した植栽方法や生育基盤の造成が必要である。

8. 今後の減災対策にむけて

2013年10月16日の土砂流は、上流域の表層崩壊に起因して発生していることから、ここでは表層崩壊の発生源の調査・対策に関する提案について記述する。

8.1 表層崩壊危険箇所における調査・モニタリング

現在、表層崩壊がいつ頃発生するかという事前予測の試みはごく一部で行われている程度である。雨量の予測は、気象庁の高解像度降水ナウキャスト等により、従来と比べ格段に精度が上がってきているが、地中に関する情報を十分取得できていないことが予測する上での制約となっている。

本研究では、崩壊地頭部の斜面において、土層強度検査棒による調査、雨量観測および想定すべり面付近のサクション、間隙水圧の測定を行った。その結果、間隙水圧の検知には至らなかったものの、降雨に伴うサクションの変化を観測することができた。また、7.1節で示した計算結果からは、間隙水圧が検知された時点においては斜面崩壊の可能性が高まっていることが示された。これらの観測結果および検討結果から、将来的には、表層厚分布、雨量、想定すべり面付近の間隙水圧やサクション等のデータから、基準や閾値を設けるなどして、崩壊予測に関するハザード情報を提供できる可能性が高いと考えられる。

ただし、表層厚などの地質条件や地下水条件については、場所により異なることが予測されるので、今後、多くの箇所でも、予測のための調査・モニタリングを実施して、検証していくことが望まれる。また、事前の雨量予測と実際の雨量が大きく異なる事例もみられることから、雨量の稠密観測体制を構築しつつデータの蓄積も重要と考える。

8.2 防災機能の高い群落の造成

2013年10月16日の表層崩壊においては、根系による緊縛効果が発揮できなかったと考えられる。その一番の原因は、レス層まで根系が伸長しなかったことである。緊縛効果を発揮させるためには、直根を伸ばす植栽方法を取り入れる必要がある。

図-34に直根を誘発させる施工イメージを示す。根系の伸長を阻害する性質をもつレス層をスクリーオーガー等で穿孔し、直根の伸長を促すものである。

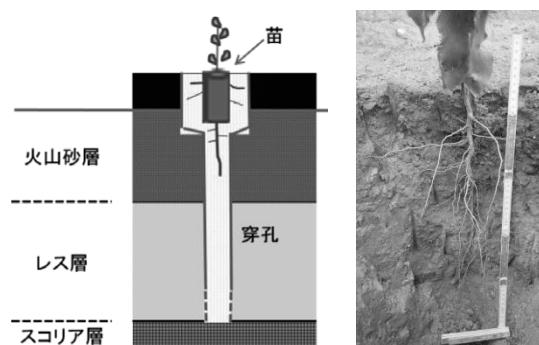


図-34 直根を誘発させる施工のイメージと直根

Fig. 34 Image of taproot induction method and taproot

防災機能の高い群落の造成には、上述した「直根を伸ばす方法」に加え、「適正な樹種の選定」、「生育基盤の確保」が必要である。

「適正な樹種の選定」では、郷土自生種などから寿命の長い樹種を用いることや生産性の高い樹種（蓄積量が多い樹種）を用いることがあげられる。本地域では、遷移段階後期で潜在自然植生の優占種と考えられるスダジイ、タブノキが候補になる。

「生育基盤の確保」では、特にレス層が崩壊面に全面的に露出している箇所でも生育基盤をきちんと確保する必要がある。具体的には、金網張工、厚層基材吹付工等により、流亡しない安定した生育基盤の造成があげられる。

8.3 構造物による安定対策

2013年10月16日の災害では、のり砕工を施したのり面は、その一部が破損した程度にとどまっている。今後ののり面対策としては、切土のり面全体を、面的な保護効果と排水効果のあるのり砕で覆う方法が有効策の1つと考える。

また、表層崩壊の懸念のある0次谷の合流部付近に崩落土砂対策工を設置することも、土砂流化や発生規模の抑制に効果があるものとする。

9. まとめ

今回の調査・観測、検討結果をまとめると、以下のとおりである。

①今回の斜面崩壊は、崩壊深度が1 m程度の表層崩壊

であり、レス層上面をすべり面として崩壊が発生している。表層崩壊は、火山砂層とレス層が斜面に平行に堆積し流れ盤をなす地質構造と両層の透水性の違いを主な素因とし、最大時間雨量 122.5 mm、最大 24 時間雨量 824 mm を記録した降雨を誘因としている。

- ②火山砂は、締め具合が非常に緩い砂であり、レス層に比べて 3 倍以上大きい透水性を有している。また、一面せん断試験の結果から求められる力学特性にはやや違いがみられるが、簡易動的コーン貫入試験結果ではほぼ同様な N_q 値を示している。
- ③崩壊地頭部における雨量観測の結果、既設の観測所（大島観測所、大島北ノ山観測所）と比較して雨量が多い傾向が観測された。今後、局所的な豪雨の発生増大が懸念される中では、雨量の稠密観測もハザード情報の一つとして有効と考える。
- ④表層部のモニタリングの結果、降雨と関連したサクシオンの低下を確認できたが、観測期間中の最大時間雨量（25 mm）や最大連続雨量（381 mm）の際でも間隙水圧の発生は確認できなかった。間隙水圧の発生には、相当の降雨強度が必要と思われる。崩壊危険箇所における間隙水圧等をモニタリングし、解析することができることが可能になれば、将来的に、表層崩壊の予測に関するハザード情報を提供できる可能性がある。
- ⑤崩壊地周辺の植生は、ハチジョウイヌツゲ、ヒサカキなどの常緑樹やオオバヤシャブシなどの落葉樹が優占している。それらの樹木の根系は、火山砂層中のみに伸長しているものがほとんどであり、レス層まで伸長していないため、今回の表層崩壊に対しては緊縛効果がほとんど発揮されなかった。今後、防災機能を少しでも高める群落を形成するためには、直根を伸ばす方法、適正な樹種の選定、生育基盤の確保が重要である。

10. おわりに

本論文は、名古屋大学減災連携研究センターと応用地質株式会社の共同研究「火山山麓における土砂災害発生メカニズムの研究」の成果の一部をまとめたものである。

大島町における土砂災害のあとも、2014年7月に長野県南木曾町、8月に広島市で、相次いで土砂災害が発生し、尊い人命が失われている。今後、気候変動等により、局所的、集中的な豪雨の発生の懸念が高まってきており、著者らも本研究をさらに進めることで、表層崩壊の予測と対策に寄与できるように努めたい。

最後に、大島町、南木曾町、広島市の土砂災害で亡くなられた方のご冥福を心からお祈りいたします。

謝辞

本調査研究を進めるにあたり、環境省関東地方環境事務所伊豆諸島自然保護官事務所、大島町役場、東京都大島支庁、東京都環境局自然環境部、計器設置・観測に関する土地利用の許可をいただきました各社、島民の方々には、情報提供、現地調査、試料採取、計器設置等においてご協力をいただきました。ここに感謝の意を表します。

また、現地調査に際しては、社外顧問の山寺喜成元信州大学教授のご指導の下、北原哲郎、谷瀬正寿、森川倫人、畠山正則、各氏の協力を得たことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 総務省消防庁. 平成 25 年台風第 26 号による被害状況等について (第 37 報). 2014.
- 2) 津久井雅志, 林幸一郎, 齋藤公一滝. 伊豆大島火山地形と層序の再検討. 日本火山学会講演予稿集. 2006, p. 125.
- 3) 国土交通省国土地理院. 火山土地条件報告書. 2006.
- 4) 小山真人, 早川由紀夫. 伊豆大島火山カルデラ形成以降の噴火史. 地学雑誌. 105 (2), 1996, p. 133-162.
- 5) 川辺禎久. 伊豆大島火山地質図. 地質調査所. 1998.
- 6) Tezuka, Y. Development of vegetation in relation to soil formation in the volcanic island of Oshima, Izu, Japan. 1961, Jap. J. Bot. 17 (3) :p. 371-402.
- 7) 宮脇昭. 日本植生誌関東. (株) 至文堂, 1986, p. 641.
- 8) 大島町史編さん委員会. 東京都大島町史自然編. 東京都大島町, 2000, p. 272.
- 9) 東京都. 平成 24 年度東京都 (伊豆諸島) 現存植生図調査委託報告書, 2012
- 10) 国土地理院. 10m 数値標高モデル. <http://fgd.gsi.go.jp/download/>
- 11) 国土地理院. 災害情報共有マップ. <http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/h25-taihu26-index.htm>
- 12) 稲垣秀輝. 根系崩壊. 地盤工学会誌, Vol.50, No.5, 1996, p. 5-7.
- 13) 独立行政法人 土木研究所 材料地盤研究グループ 地質チーム. 土層強度検査棒による斜面の土層調査マニュアル (案). 2010, 土木研究所資料第 4176 号.
- 14) 地盤工学会. 地盤調査の方法と解説. 地盤工学会, 2013, p. 317-324.
- 15) 宮崎毅, 西村拓. 土壌物理実験法. 東京大学出版会, 2011, p. 72-78.
- 16) 土壌環境分析法編集委員会編. 土壌環境分析

- 法．土壤肥料学会，1997
- 17) 例えば木下篤彦，神野忠広，岡本敦，一言正之，小野寺勝，桜庭雅明，杉山実．六甲山系におけるリアルタイムハザードマップシステムの構築．砂防学会誌，2013，Vol.66，No.1，p. 15-23.
 - 18) 若井明彦ら．平成25年10月台風26号による伊豆大島豪雨災害調査報告書 5.3崩壊土砂の地盤工学的特性，2014，p. 35-39.
 - 19) 川原孝洋ら．連続加圧方式による新しい保水性試験方法について(その1)．第47回地盤工学研究発表会講演集．2012，p. 691-692.
 - 20) 畠山正則ら．連続加圧方式による新しい保水性試験方法について(その2)．第47回地盤工学研究発表会講演集．2012，p. 693-694.
 - 21) 日本緑化センター．植栽基盤整備技術マニュアル．日本緑化センター，2013，p. 202.
 - 22) 農林水産省．地力増進基本指針．2008，http://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/hozen_type/h_dozyo/houritu.html
 - 23) 輿水肇，吉田博宣．緑を創る植栽基盤—その整備手法と適応事例—．ソフトサイエンス社，1998，p. 313.
 - 24) 急傾斜地崩壊防止工事技術指針作成委員会．新・斜面崩壊防止工事の設計と実例—急傾斜地崩壊防止工事技術指針—(本編，参考編)．全国治水砂防協会，2007，p. 320(本編)，p. 320(参考編)．
 - 25) 太田猛彦．森林飽和—国土の変貌を考える．NHK ブックス，2012，254p.
 - 26) 川勝拓哉，Pommachanh Viradeth，家永康平，飯塚敦，河井克之．降雨浸透シミュレーションにおける浸透能の影響について．第49回地盤工学研究発表会講演集．2014，p. 895-896.
 - 27) 沖村孝，市川龍平．数値地形モデルを用いた表層崩壊危険度の予測法．土木学会論文集．1985，Vol.358，p. 69-75.
 - 28) 山寺喜成．自然環境再生の緑化技術．社団法人日本砕石協会，2010，p. 213.
 - 29) 土木学会，地盤工学会，日本応用地質学会，日本地すべり学会．平成25年10月台風26号による伊豆大島豪雨災害調査報告書．2014