伊豆大島における崩壊斜面の特徴と安定計算

中央大学　学生会員　○吉田　翔
中央大学　学生会員　　安佐伊　弘貴
中央大学研究開発機構　　正会員　　石井　武司
中央大学　　正会員　　齋藤　邦夫

1.　はじめに

平成 25 年 10 月 16 日未明，台風 26 号に伴う豪雨により東京都大島町で大規模な斜面の崩壊および土石流が発生した．その被害は死者 35 名，行方不明者 4 名，全壊家屋 203 戸などであった．

崩壊斜面の安定計算のモデル化は様々な研究がなされており，地下水の上昇による不安定化が考えられている[1)]．しかしながら，本報告では特に地表面からの降雨の浸透に注目して，崩壊の推定をした．

降雨の浸透量を簡便に評価するため，ここではタンクモデルを用いた土壌雨量指数により当時の浸透量を推定した．また，大金沢源頭部の崩壊箇所から採取した火山砂の物理試験および力学試験により物性値を得た．そして現地調査を踏まえて安定計算の検討対象斜面を選定した．

2.　伊豆大島土砂災害の概要

2.1 人的被害の発生要因

今回の土砂災害は，記録的な豪雨により急斜面の堆積土層が崩壊し，これに伴い土石流が多量の流木を巻き込みながら流下し，居住区域である元町地区を襲ったことによる（図1[2)]）．これに加えて，土砂災害警戒情報が発表されていたものの，積極的な避難行動がとられていなかったなど，様々な要因が重なったために大きな被害が発生したと考えられる．

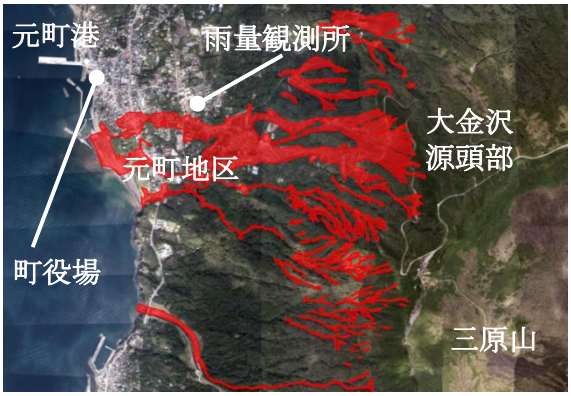

図 1　土砂流出範囲

2.2 豪雨の特徴

伊豆大島では，図 1 のように気象庁の雨量観測所として大島観測所が設置されている．大島観測所では，10 月 15 日の 8 時過ぎから降雨が記録され，1 時間雨量 20mm の強雨が 23 時まで継続した．その後は 1 時間雨量 40mm に激しさが増し，16 日 4 時には最大 1 時間雨量 118.5mm，積算雨量 824mm に達した．結果として日最大降水量および日最大 1 時間降水量は大島町で観測史上第 1 位となる降雨となった．図 2 に 15 日 9 時から 16 日 9 時にかけての降雨量推移を示す．16 日 4 時に 1 時間雨量がピークとなった．また，0 時からの 6 時間で最大 6 時間雨量 549.5mm を記録した．

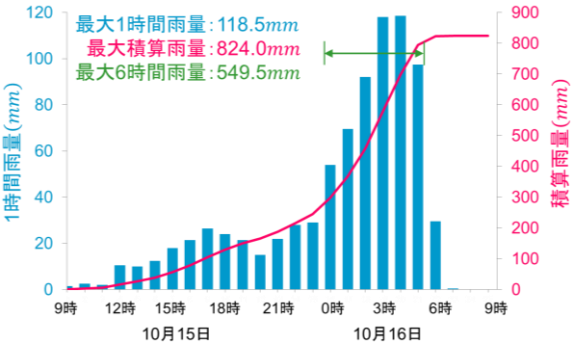

図 2　災害発生時の降雨量概況

2.3 崩壊斜面の地形・地質

崩壊した斜面の地質は，14 世紀の噴火で流れ出た玄武岩溶岩流の上に，火山灰層と風成層（レス層）の互層で構成されている．火山灰層の透水性は高く，レス層は相対的に透水性が低いことが特徴である．先述した局所的な豪雨により斜面が不安定化し，透水性の低いレス層をすべり面として，厚さ 1.0mほどの火山灰層が表層崩壊を起こしたと推定することができる．

キーワード　伊豆大島土砂災害，斜面崩壊，斜面安定計算
連絡先　〒112-8551　東京都文京区春日 1-13-27　中央大学理工学部 地盤環境研究室　TEL．03-3817-1812

2.4 地震計データによる崩壊発生時刻の推定

東京大学地震研究所は伊豆大島に火山観測のために地震計をいくつか設置している．図3[3]は，10 月 16 日の 2 時から 4 時まで観測されたデータである．およそ 2 時 3 分にやや大規模で 2 分間続く振動が観測され，これが最初に発生した斜面崩壊であると考えられる．この振動はおよそ 0.2kine と，震度で例えると 1 程度のものであった．その後は 3 時ごろまでに大きな振動が 4 回ほど認められ，これらも斜面崩壊によるものと考えられる．3 時以降は比較的振幅の小さい波形が継続し，これは崩壊土砂が土石流となって流下したことによって発生したとされる．4 時以降は目立った波群はなかった．以上のことから，斜面崩壊は 2 時から 4 時までの間に起こったと推測される．

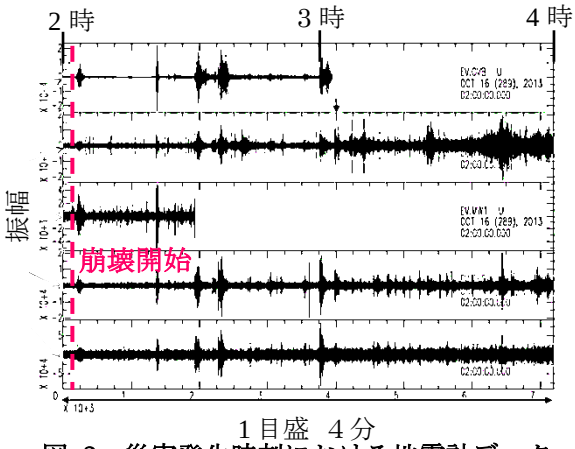

図 3　災害発生時刻における地震計データ

2.5 斜面崩壊発生時刻における土壌雨量指数

降雨は地中へ浸透したり，地表面を流出したりする．この雨水が地中にどの程度貯留しているのかを図 4 のような三段のタンクモデルを用いて指数化したものが土壌雨量指数である．モデル化した各タンクの貯留量$S_i(t)$の合計$\Sigma S_i(t)$が時刻tにおける土壌雨量指数であり，その評価は次式による．

$$S_1(t+\Delta t) = (1-\beta_1\Delta t)S_1(t) + R(t+\Delta t) - q_1(t)\Delta t \quad (1)$$

$$S_2(t+\Delta t) = (1-\beta_2\Delta t)S_2(t) + \beta_1 S_1(t)\Delta t - q_2(t)\Delta t \quad (2)$$

$$S_3(t+\Delta t) = (1-\beta_3\Delta t)S_3(t) + \beta_2 S_2(t)\Delta t - q_3(t)\Delta t \quad (3)$$

また，各タンクからの流出量q_iは次のように与えられる．

$$q_1 = \alpha_0\{S_1(t) - L_0\} + \alpha_1\{S_1(t) - L_1\} \quad (4)$$

$$q_2 = \alpha_2\{S_2(t) - L_2\} \quad (5)$$

$$q_3 = \alpha_3\{S_3(t) - L_3\} \quad (6)$$

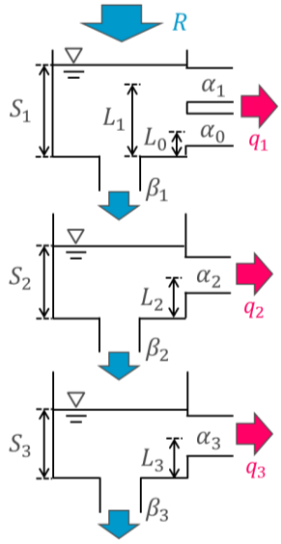

図 4　三段タンクモデル概要

表 1　三段タンクモデルのパラメータ

	第1タンク	第2タンク	第3タンク
流出係数α_i $(1/hr)$	$\alpha_0 = 0.10$ $\alpha_1 = 0.15$	$\alpha_2 = 0.05$	$\alpha_3 = 0.01$
浸透係数β_i $(1/hr)$	$\beta_1 = 0.12$	$\beta_2 = 0.08$	$\beta_3 = 0$
流出孔高さL_i (mm)	$L_0 = 30$ $L_1 = 60$	$L_2 = 15$	$L_3 = 15$

これらを用いて降雨が始まった 15 日 9 時から 16 日 9 時までの土壌雨量指数を計算した．降雨量$R(t)$は気象庁のデータを適用し，各パラメータについては Ishihara and Kobatake(1979)[5]の火山岩におけるものを用いた．表 1 にそのパラメータを示す．また，災害前の 15 日以前は目立った先行降雨がないことから，初期条件として$S_i(0) = 0$とした．

図 5 は斜面崩壊が起きたとされる 16 日 2 時から 4 時までの計算結果である．最初の崩壊が発生した 2 時ごろの土壌雨量指数はおよそ 350mm となった．この時間における積算雨量は 450mm 程度であったが，およそ 8 割程度の雨水が土中に貯留しているといえる．その後 4 時の時点では 550mm 程度の貯留量に達した．

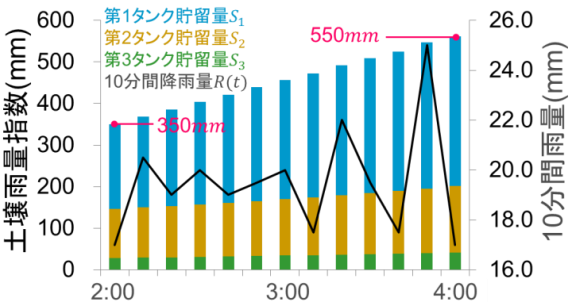

図 5　災害発生時刻における土壌雨量指数

3.　火山砂の物理試験および力学試験

大金沢源頭部の崩壊箇所から採取した攪乱試料について，土粒子密度試験，最小・最大密度試験，透水試験および粒度試験をそれぞれ実施した．各種試験結果を表 2，粒度分布を図 6 に示す．

火山砂のせん断強度特性は，水中落下法で相対密度がおよそ

表 2　火山砂の物理試験結果

土粒子密度　ρ_s (g/cm^3)	2.81	平均粒径 D_{50} (mm)	0.29
最小密度 $\rho_{dmin}(g/cm^3)$	1.17	均等係数 U_c	4.13
最大密度 $\rho_{dmax}(g/cm^3)$	1.52	曲率係数 U_c`	0.74
透水係数　k_{15} (cm/s)	1.5×10^{-2}		

80%となるように供試体を作成し，圧密排水条件の側圧$50kPa$と$100kPa$の 2 種類で三軸圧縮試験を行った．それによって得た結果は，粘着力が$c' = 2.0kN/m^2$，内部摩擦角が$\phi' = 33.1°$であった．

4. 斜面の安定計算

4.1 崩壊斜面の規模における分類

斜面の安定計算を行うにあたり，崩壊した斜面を，その規模により 2 つのタイプに分類する．

タイプ①は，道路（御神火スカイライン）より下部分が幅広く崩壊しているものである．これは崩壊幅が 50～100m 程度と非常に大きく，また 100m 以上の長い斜面となっているのが特徴であり，今回の災害で一番多く見られたタイプである．

タイプ②は, 道路より上部分が崩壊を起こしているものである．これは崩壊幅が 20～30m 程度，長さは 50m 以下と，タイプ①と比べると小さい．

4.2 検討対象斜面

計算対象としたのは，被害が特に大きかった大金沢上流部周辺の斜面である．現地調査で対象とした図7[2)]の A，B，C の斜面である．これらの崩壊斜面を分類分けすると，A はタイプ①，B および C はタイプ②であるといえる．傾斜角θはそれぞれおよそ$\theta_A = 40°$，$\theta_B = 31°$，$\theta_C = 35°$であった．また，崩壊深さはいずれもおよそ 1m の表層崩壊であり，崩壊長さに比べて非常に小さかった．

4.3 計算方法

斜面の安定計算はFellenius法やBishop法などのスライス法が主であるが，斜面 A，B，C で発生したような表層崩壊はすべり土塊の長さに比べて深さが小さく，スライスで左右のスライス間力が等しくなる．したがって，左右の側面力を等しいと仮定する無限斜面の安定計算法を適用した．

計算モデルを図 8 に示す．これは，降雨によって地表面から雨水が浸透していき，すべり土塊が上部から飽和状態になっていくことで斜面が不安定化していくというものである．計算式を以下に示す．

$$F_s = \frac{c' + \{(\gamma_{sat} - \gamma_w)h_w + \gamma_t(H - h_w)\}\cos^2\theta \tan\phi'}{\{\gamma_{sat}h_w + \gamma_t(H - h_w)\}\cos\theta \sin\theta} \quad (7)$$

ここに，F_s: 安全率，γ_t: 湿潤単位体積重量$[kN/m^3]$，γ_{sat}: 飽和単位体積重量$[kN/m^3]$，γ_w: 水の単位体積重量$[kN/m^3]$，c': 粘着力$[kN/m^2]$，ϕ': 内部摩擦角[°]，H: 崩壊深さ$[m]$，h_w: 飽和土塊高さ$[m]$，θ: 傾斜角[°]である．

4.4 試計算の結果と考察

安定計算で得られた飽和土塊高さh_wと安全率F_sの関係を図 9 に示す．計算に使用した物性値は表 3 のとおりである．γ_tおよびγ_{sat}については土木技術研究所のデータ[6)]を参考にした．斜面崩壊時の安全率を 1.0 とすると，h_wは斜面 A，B，C でおよそ 0.3m，0.8m，0.6m となった．斜面 A は斜面の崩壊が始まった 2 時ごろにおける土壌雨量指数の計算結果と浸透量が概ね一致しており，傾斜角 40°程度の斜面から崩壊がおきたのではないかと考えられる．また，斜面 C のような傾斜角 35°程度の斜面は 4 時ごろに崩壊したと推測できる．斜面 B については 2 時～4 時にお

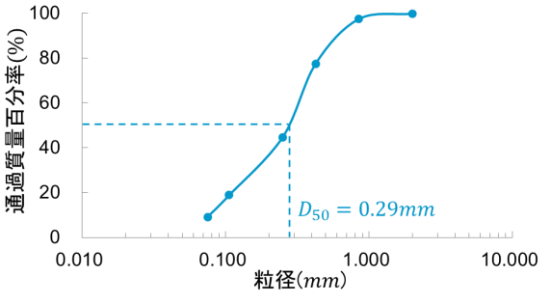

図 6 粒度分布

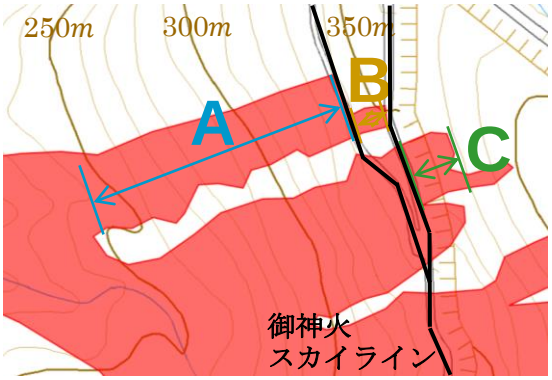

図 7 安定計算の検討対象斜面

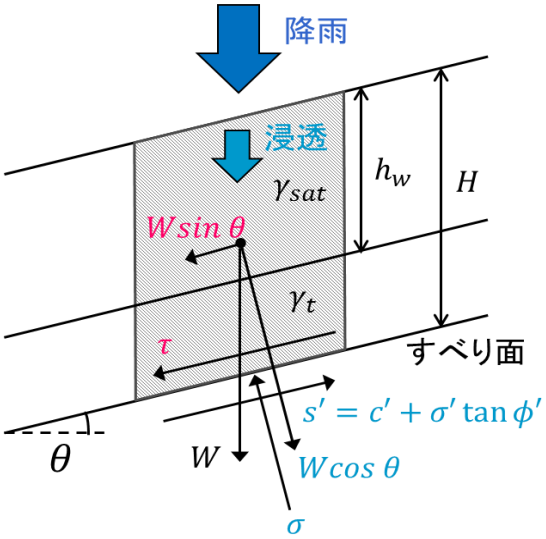

図 8 安定計算のモデル

ける土壌雨量指数との整合性はなかった．他の斜面に比べて傾斜角が小さいことから，内部摩擦角との大小関係が対応しているのではないかと考えられる．

5. まとめと今後の課題

本報告では，降雨が地表面から浸透するものとし，無限斜面のモデルを適用して安定計算を行った．その成果を以下にまとめる．

(1)斜面 A および C は, 安全率が 1.0 となるときの降雨浸透量と，崩壊した時間とされる 2 時～4 時における土壌雨量指数が概ね一致した．

(2)斜面 B は，土壌雨量指数と結果が対応しなかった．

今回の計算モデルの適用により，土壌雨量指数との比較によって降雨の浸透による斜面の崩壊をある程度評価できると考えられる．しかし現地調査では地表流出や，道路の側溝からの雨水侵入による地下水の上昇などの痕跡が認められた．よって，これらの斜面の不安定化に及ぼす影響についても考慮したい．また土壌雨量指数計算の妥当性の検討や，計算モデルの再設定などを行うため，より精度の高い実験や現地調査などを踏まえて，斜面崩壊をより適切に説明するための検討を進めていくことを計画している．

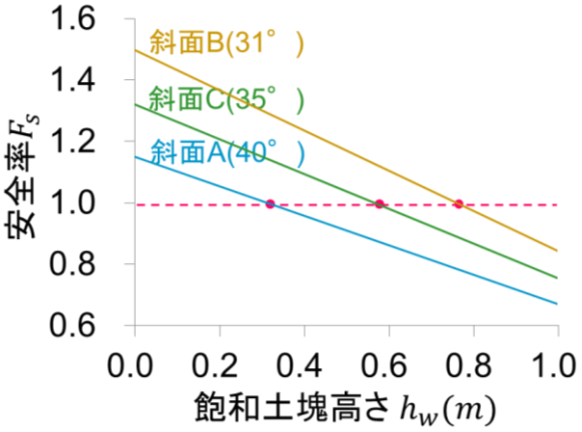

図 9 対象斜面の安定計算結果

表 3 安定計算に用いたパラメータ

$\gamma_t(kN/m^3)$	$\gamma_{sat}(kN/m^3)$	$\gamma_w(kN/m^3)$
15.2	18.1	9.8
$c'(kN/m^2)$	$\phi'(°)$	$H(m)$
2.0	33.1	1.0

謝辞

本研究を行うに際し，東京都大島支庁および大島町役場の協力を賜りました．ここに謝意を表します．

参考文献

1) 横内啓隆・本明将来・若井明彦・後藤 聡: 台風２６号による伊豆大島土砂災害の表層崩壊機構の検討 (その 2: 解析的検討), 第 49 回地盤工学研究発表会講演集, 1825-1826, 2014.
2) 地理院地図（電子国土 Web）, http://maps.gsi.go.jp/.
3) 京都大学防災研究所斜面災害研究センター: 2013 年 10 月 16 日未明の伊豆大島における斜面崩壊に関する報告（その３）, http://www.dpri.kyoto-u.ac.jp/web_j/contents/event_text/20131016-3.pdf, 2013.
4) 国土交通省 気象庁: 土壌雨量指数, http://www.jma.go.jp/jma/kishou/know/bosai/dojoshisu.html.
5) Ishihara, Yasuo and Shigeki, Kobatake: Runoff model for flood forecasting, Bull. Disas. Prev. Res. Inst. , Kyoto Univ. , 29, 27-43, 1979.
6) 土木研究所 土砂管理研究グループ: 伊豆大島土砂災害の概要と斜面崩壊等の危険度把握技術, https://www.pwri.go.jp/jpn/results/01_tokyo/pdf/01.pdf.
7) 寺嶋智巳・松四雄騎・八反地剛: 斜面水文学の視点から見た 2013 年 10 月の台風 26 号による伊豆大島の斜面崩壊，京都大学防災研究所年報，第 57 号 A, 17-24, 2014.
8) 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緊急調査団: 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.