

浸透流解析に基づく平成30年北海道胆振東部地震による斜面崩壊の発生危険条件の検討

北海道大学大学院農学院 ○青木稔弥  
 北海道大学大学院農学研究院 桂真也・山田孝  
 北海道大学広域複合災害研究センター 厚井高志

1. はじめに

2018年9月6日午前3時7分59秒に発生した平成30年北海道胆振東部地震は、厚真町や安平町を中心に、テフラが厚く堆積する斜面の崩壊を多数引き起こした。その崩壊の特徴として、地震動が増幅する斜面尾根部よりも谷部・平滑部での崩壊が多いこと<sup>1)</sup>や保水性の高いテフラ層(恵庭a 降下軽石(En-a: 20 ka) ロームなど)を崩壊すべり面としている事例が多いこと<sup>2)3)</sup>などが挙げられる。従って、今回の地震による崩壊発生には水が大きく関与した可能性が推察される。水が関与して地震動で崩壊するメカニズムとして、すべり面液状化の発生が示唆されている<sup>4)5)</sup>など。すべり面液状化はすべり面付近において、飽和条件下で、地震動などの外力により土粒子が破碎され体積が縮小し、過剰間隙水圧が発生することで、すべり面付近のせん断抵抗力が急激に低下し崩壊に至る現象<sup>6)</sup>である。以上を踏まえ、地震発生直前の崩壊すべり面となった層(En-a ロームなど)の水分状態が崩壊発生をコントロールする重要なキーの一つであると考えられる。既往研究でも地震発生直前の崩壊斜面の水分状態を再現し、それをもとに崩壊発生の議論をした事例は見当たらない。そこで本研究では、Richards 式に基づいてある時の土壌の水分状態を再現できる浸透流解析(断面2次元)により地震発生直前の崩壊・非崩壊斜面内部の水分状態を再現し、その結果を比較することで、斜面崩壊の発生危険条件の検討を行う。

2. 研究方法

浸透流解析を行う斜面は、北海道厚真町高丘地区北部の胆振管理区道有林111林班に位置する平均勾配29°の崩壊斜面と平均勾配28°の非崩壊斜面である。基岩は新第三紀中新世振老層の礫岩砂岩互層である。崩壊・非崩壊斜面のテフラ層厚・層構造については図1のA~E点においてオーガー掘削やトレンチ調査を行うことにより把握した。崩壊斜面の層構造は、上位から樽前a 降下火砕堆積物(Ta-a:1739 A. D)、樽前c 降下火砕堆積物(Ta-c:2.5 ka)、樽前d 降下火砕堆積物(Ta-d:8.7-9.2 ka)、En-a ローム(斜面上部では一部細粒軽石化する)、風化基岩である。崩壊すべり面はEn-a ローム基底付近である。非崩壊斜面の層構造は、上位からTa-a、Ta-c、Ta-d、En-a ローム、En-a 軽石、クッタラ火山起源の降下火砕堆積物(Kt-1:43.5 ka)、風化基岩である。テフラ層厚は崩壊・非崩壊斜面それぞれ、1.2~1.9 m、1.1~3.2 m程度である。斜面長は両斜面とも約70 mである。さらに、現地にて(図1のF点)各層の不攪乱サンプルを採取し、それらに対してpF 試験と飽和透水試験を行うことにより、各層の飽和透水係数:Ks と水分特性曲線を求めた。水分特性曲線については以下に示す Kosugi (1996) モデル<sup>7)</sup>を適用した。

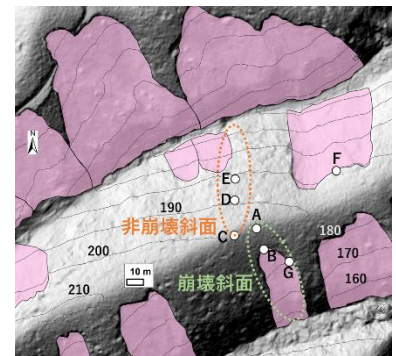


図1 調査対象斜面とその周辺

表1 各層の水分特性パラメータ

層	$\theta_s$	$\theta_r$	$\psi_m$ [cm]	$\sigma$	$K_s$ [cm/s]
Ta-a	0.586	0.155	-17.5	0.74	$5.4 \times 10^{-2}$
Ta-c	0.595	0.241	-20.6	0.90	$5.0 \times 10^{-2}$
Ta-d	0.713	0.419	-55.7	1.76	$1.4 \times 10^{-2}$
En-aローム	0.679	0.417	-121.7	1.78	$1.4 \times 10^{-2}$
En-a細粒軽石	0.683	0.103	-131.6	2.77	$6.8 \times 10^{-2}$
En-a軽石	0.583	0.340	-2.6	2.77	$4.2 \times 10^{-1}$
Kt-1	0.591	0.196	-10.8	0.63	$8.0 \times 10^{-2}$
風化基岩	0.445	0.152	-1055.5	2.35	$3.5 \times 10^{-5}$

$$Se = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = Q \left[ \frac{\ln(\psi/\psi_m)}{\sigma} \right]$$

ここで Se:有効飽和度、 $\theta$ :体積含水率、 $\theta_s$ :飽和体積含水率、 $\theta_r$ :残留体積含水率、 $\psi$ :圧力水頭、 $\psi_m$ : $Se=0.5$ の $\psi$ 、 $\sigma$ :孔隙分布幅である。また、Qは

$$Q(x) = \int_x^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du$$

で表される余正規分布関数である。同モデルを適用し、層ごとに水分特性パラメータを求めた(表1)。以上を踏まえ、Hydrus ver. 3.03(PC-Progress社)上で崩壊・非崩壊斜面の斜面断面を作成した(図2,3)。斜面長については崩壊斜面の遷急線以下のテフラ層厚・層構造が不明であったため、両斜面とも崩壊斜面の尾根頂部から遷急線までの距離である約51 mと設定し

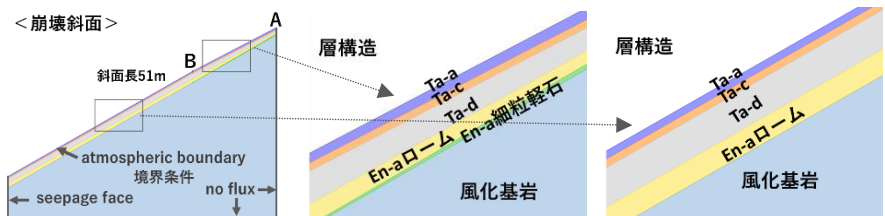


図2 崩壊斜面の作成断面

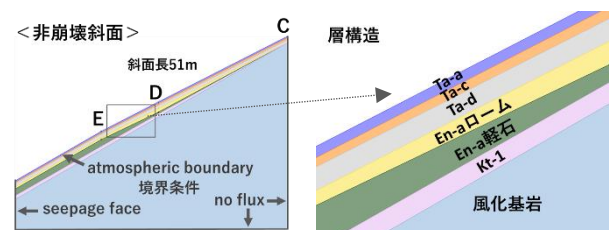


図3 非崩壊斜面の作成断面

た。境界条件は図2,3のように設定した。初期条件は過去の非崩壊斜面におけるテンシオメータでの土壌水分連続観測より推測された、各層の平均的な $\psi$ として、 $-20\sim-60$  cmを各層に与えた。次に、Hydrus上で斜面を多数の三角形メッシュに切り、各メッシュに、そのメッシュがある層の水分特性パラメータ(表1)を与えた。最後に2018年4月1日以降の実測降雨(アメダス安平における観測値)を斜面表層に与えて、浸透流解析を行い、地震発生直前(2018年9月6日午前3時)の斜面内部水分状態を再現した。その後、崩壊斜面のすべり面であったEn-aローム基底付近の水分状態の違いに着目し、**斜面崩壊の発生危険条件を検討した。**

### 3. 結果

図4は浸透流解析によって推測された地震発生直前の崩壊・非崩壊斜面内部の $\psi$ を示す。En-aローム基底付近の $\psi$ に着目する(図の黒点線上)と、図5より崩壊斜面のEn-aローム基底の $\psi$ は約 $0\sim-1.5$  cmである一方で、同範囲において、非崩壊斜面のEn-aローム基底の $\psi$ は約 $-40\sim-80$  cmであることが分かる。これより、崩壊斜面のEn-aローム基底付近の方が高含水で、飽和に近いことが分かった。

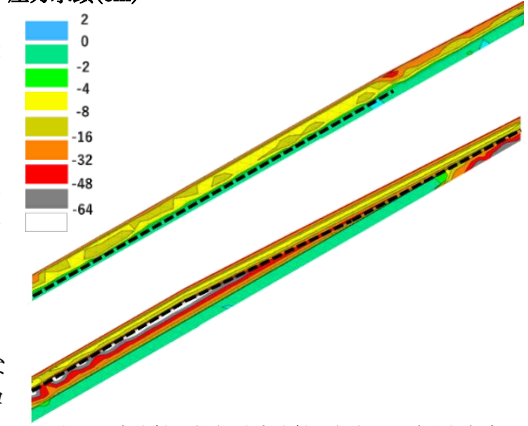


図4 崩壊斜面(上)・非崩壊斜面(下)の地震発生直前

### 4. 考察

#### 4.1 崩壊斜面のEn-aローム基底の方が高含水となった要因

浸透流解析の結果、崩壊斜面En-aローム基底の方が高含水となったのは層序の違いによると推察される。非崩壊斜面ではEn-aロームの直下に常時透水性の低くないEn-a軽石(表1)が存在する一方で、崩壊斜面ではEn-aロームの直下に常時透水性が低い風化基岩(表1)が存在することで、En-aローム基底に水が溜まりやすいためであると考えられる。

#### 4.2 すべり面液状化発生の検討

浸透流解析の結果、崩壊斜面のEn-aローム基底付近はかなり飽和に近い状態であったと推測された。さらにEn-aロームは飽和体積含水率が0.68と高いこと(表1)、崩壊斜面側壁(図1のG点)にて簡易貫入試験を行った結果、En-aロームのNd値が1~2程度と低いことより、地震動によって土粒子構造の破壊や体積縮小が発生しやすく、また細粒分が多い<sup>8)</sup>ことから、発生した過剰間隙水圧が消失しにくいとも推察される。従って、地震発生直前のEn-aローム基底付近はすべり面液状化が発生しうる条件が満たされ、崩壊斜面ではEn-aローム基底付近ですべり面液状化が発生し、崩壊に至った可能性があるといえる。

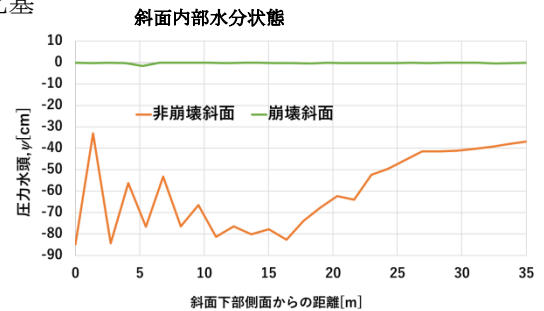


図5 En-aローム基底付近の圧力水頭

#### 4.3 崩壊発生危険条件の検討

崩壊すべり面液状化の発生が示唆されたことから、今回の地震による崩壊のすべり面となったEn-aロームがより高含水になればなるほど崩壊の危険性が増すといえる。4.1の議論から、より高含水となる条件は、En-aロームの直下の層に常時透水性が低い層があることと推察された。以上より、今回の地震による崩壊発生危険条件の一つは、En-aロームのようにすべり面液状化を起こしうる土質である層の直下に風化基岩のような常時透水性が低い層が存在したことで、飽和あるいは飽和に近い状態が作り出された場合だと考えられる。従って、単にすべり面液状化を起こしうる土質の層が存在するだけでなく、その直下の層の水分特性が崩壊発生の危険性を検討するうえで重要であると示唆される。

### 5. おわりに

本研究では地震発生直前の崩壊・非崩壊斜面内部水分状態に着目して、崩壊発生危険条件を検討した。その結果、今回の地震における崩壊発生危険条件の一つはEn-aロームのようにすべり面の液状化を起こしうる土質の層が、その層の直下に常時透水性の低い層が存在することで、より高含水となることと推察された。

謝辞  
本研究はJSPS科研費JP19H02393および河川基金の助成を受け、北海道胆振総合振興局森林室、北海道大学土壌保全学研究室にご協力を頂いた。また北海道開発局建設部からLPデータを提供頂いた。

#### <参考文献>

- 1) Kasai, Yamada(2019), Earth, Planets and space 71(81)
- 2) 田近ら(2019), 日本地球惑星科学連合2019年大会, HSD14-02
- 3) 千木良ら(2019), 京都大学防災研究所年報, Vol. 62(B):348-356
- 4) 雨宮ら(2018), 日本地質学会学術大会講演要旨/第125回学術大会(2018札幌-つくば)
- 5) Li et al., 2020, Landslides17(1):1233-1250
- 6) Sassa(1996), 1996 Balkema, Rotterdam. ISBN 90 5410 8185
- 7) Kosugi(1996), Water Resour Res 32(9):2697-2703
- 8) 小山内ら(2019), 砂防学会誌 71(5):54-65