

# 崩壊地内に残存した土砂量を考慮した 崩壊生産土砂量の推定方法に関する研究結果

## RESEARCH REPORT OF METHOD FOR ESTIMATING THE AMOUNT OF SEDIMENT PRODUCED BY THE COLLAPSE INCLUDES COLLUVIAL DEPOSITS IN THE COLLAPSED AREA

山田 友<sup>1</sup>・坂井 佑介<sup>1</sup>・山越 隆雄<sup>1</sup>

Yu Yamada, Yusuke SAKAI and Takao YAMAKOSHI

<sup>1</sup>国土交通省国土技術政策総合研究所土砂災害研究部（〒305-0804 つくば市旭 1 番地）

E-mail: yamada-y924a@mlit.go.jp

**Key Words:** amount of sediment, LiDAR survey, colluvial deposits, disasters in weathered granite area

### 1. はじめに

土砂災害に関する分析を実施するにあたり、山地流域内における生産土砂量を精度良く把握することは、災害規模の評価や土砂収支の把握、河床変動計算等における境界条件設定を適切に実施する上で極めて重要である。さらには、中期土砂流出対策計画<sup>1</sup>においては、山地流域内に残存した土砂量を精度良く把握することも重要な課題である。

近年では、土砂災害発生時の山地流域内における生産土砂量や山地流域内に残存した土砂量を把握する手法として、2 時期の航空レーザ計測データ（LP データ）を用いた、標高値差分解析（以下、差分解析とする）が採用されることが多い。差分解析は、例えば、松岡ほか<sup>2</sup>により一定の精度が確認されており、広範囲にわたって迅速に生産土砂量や土砂収支に基づいて山地流域内に残存した土砂量を把握することが可能である。

一方で、差分解析では、一度侵食された崩壊面に崩土が被覆するように堆積した土砂量、すなわち崩壊域内に残存した土砂量（以下、「崩壊域内残土量」という）を把握することは非常に困難である。また崩壊域内残土量が計上されないと斜面崩壊に伴う生産土砂量（以下、「崩壊生産土砂量」という）を過小評価するおそれがある。しかし、これまで、崩壊域

内残土量の把握に関する研究は少ない<sup>3</sup>。

本論では、崩土に被覆された崩壊面を現地調査によって推定し、その結果から崩壊域内残土量の算出を試みる。崩壊面の推定にあたり、簡易貫入試験を用いた方法とその推定結果の妥当性を検証した。さらに、算出した崩壊域内残土量と崩壊生産土砂量の傾向について分析した結果について報告する。

### 2. 研究方法

#### (1) 研究対象地

研究対象地は、(ア) 発災前後の LP データを有すること、(イ) 崩壊地の現地調査が可能であること、(ウ) 比較的最近（現地調査は令和元年 12 月および令和 3 年 7 月に実施）の崩壊であること、(エ) 一定の地域に崩壊地が集中し、地形や地質などに大きな違いがないと考えられることを考慮して、令和元年台風 19 号で被災した、宮城県伊具郡丸森町の阿武隈川水系に属する五福谷川上流および新川上流で発生した崩壊地とした。丸森町は宮城県南部に位置しており、主に花崗岩が分布し、一部に白亜紀の変成岩が分布する。また、これらを部分的に段丘堆積物が覆って段丘面を形成している。令和元年台風 19 号で発生した表層崩壊は、風化によりまさ化した花崗岩斜面で多く見られた。なお調査対象は、まさ化した

花崗岩斜面で発生した斜面崩壊箇所であり、令和元年12月に土研式簡易貫入試験を実施した17箇所のうち、令和3年7月に斜面表層部をより詳細に把握するための追加調査（SH型簡易貫入試験を使用）を実施し、崩壊域内残土が見られた9箇所（図-1、表-1）とした。

(2) 崩壊域内残土量および崩壊生産土砂量について  
崩壊生産土砂量は、図-2に示す崩壊域内で元地形が侵食された体積（差分侵食量（A））と崩壊域内に崩土が堆積して差分解析で算出ができない土砂量（崩壊域内残土量（B））を積算したものとした。差分侵食量（A）は、発災前後のLPデータ（表-2）の標高差分による崩壊域内の侵食量を積算した体積とした。なお、発災前のLPデータについては、崩壊地No.1~7については平成24年計測データ、崩壊地No.8,9については、平成21年計測データを用いて解析した。また、崩壊域内残土量（B）は、簡易貫入試験結果から崩土に被覆された崩壊面を推定した上で、LPデータで測定した断面図を併用して算出する。崩壊面の推定方法と断面図を用いた崩壊域内残土量の算出方法については後述する。

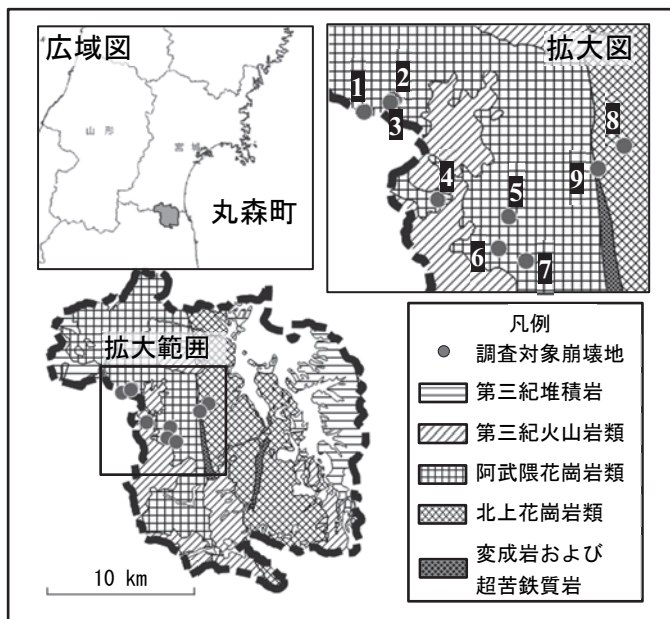


図-1 調査位置図

表-1 崩壊地の諸元

崩壊地番号	基盤地質	表層の土質	崩壊形態	崩壊域面積	崩壊斜面の平均勾配	崩壊地中央点の斜面位置
				(m <sup>2</sup> )	(°)	斜面尻0~尾根1
No. 1	阿武隈花崗岩類	砂質土	風化花崗岩岩部の表層崩壊	439.71	42	0.63
No. 2				360.07	28	0.44
No. 3				201.52	34	0.47
No. 4				568.27	39	0.63
No. 5				436.60	30	0.60
No. 6				174.31	37	0.48
No. 7				299.71	33	0.64
No. 8	北上花崗岩類	礫質土	北上花崗岩類	1276.45	33	0.60
No. 9				517.84	43	0.37

(3) 簡易貫入試験による崩壊面の推定方法

崩壊面は、簡易貫入試験により深度ごとに10cm貫入に要する打撃回数の換算値であるNd'値（重錘3kg）またはNd値（重錘5kg）を分析して推定した。なお、Nd'値とNd値には、相関性があることが既往研究により把握されている。川満ほか<sup>4)</sup>では、Nd値=0.51Nd'値、平松ほか<sup>5)</sup>では、Nd値=0.58Nd'値であるため、本研究では、Nd値=0.51~0.58Nd'値として取り扱った。推定方法の詳細を以下に示す。

【使用機材】

SH型貫入試験機（Nd'値、Nd値を取得）および土研式簡易貫入試験機（Nd値を取得）を用いた。

【調査地点の設定】

- ・地点数：各崩壊地2~3地点
- ・現地踏査により設定した測線上
- ・崩土が堆積する範囲
- ・崩壊地内と末端部付近

【崩壊面の推定手順（図-3）】

- (イ) 崩壊地内の崩土が被覆していない地点（調査地点X）を岩盤と想定して簡易貫入試験を実施し、得られた結果を岩盤境界の閾値とする。
- (ロ) 崩壊地の背後の非崩壊地点（調査地点Y）を表土と想定して簡易貫入試験を実施し、得られた結果から表土境界の閾値を設定する。

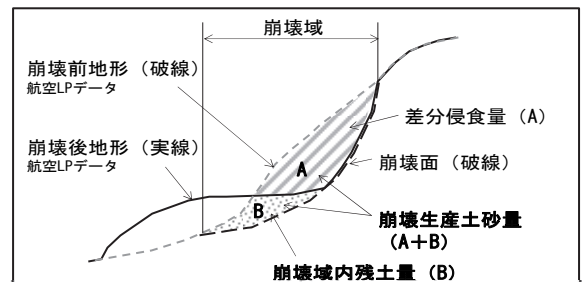


図-2 崩壊域内残土量と崩壊生産土砂量のイメージ

表-2 航空LPデータの諸元

測量年度	計測グリッド	座標系	データ処理
令和元年10月（発災後）	1.0 m	XY10	基準データ
平成24年（発災前）	1.0 m	XY9	OGISにて、測地系の変換補正
平成21年（発災前）	2.0 m	XY10	国土地理院の「測量計算サイト」にて東日本大震災前後の座標・標高補正TIN内挿補間により、計測グリッドを1mで再作成

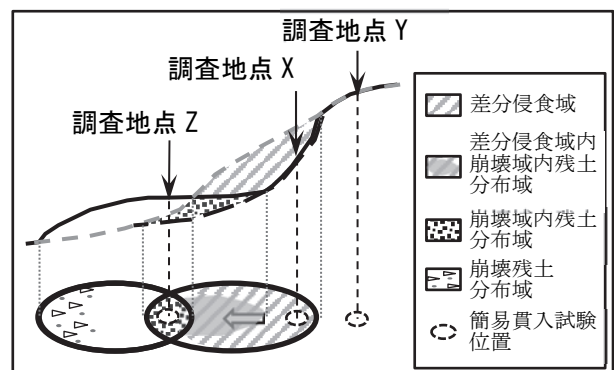


図-3 簡易貫入試験位置の概念図

(ハ) 崩土が被覆した範囲（調査地点 Z）で簡易貫入試験を実施する。

(ニ) 調査地点 Z の簡易貫入試験結果について、調査地点 X で得られた岩盤の閾値、もしくは調査地点 Y で得られた表土の閾値に該当する土層の上面を崩壊面に設定する。なお、ここで崩壊面は崩壊部と非崩壊部の境界面を想定している。すなわち、斜面頭部および末端部では崩壊面は表土中を通過して地表面に連続しその上面を崩土が被覆すること、また、崩土が流出する際に表土の一部が削剥されその上面に崩土が被覆することが想定された場合は、表土の閾値に該当する土層の上面を崩壊面とする。

研究対象地は、花崗岩を基岩とする風化部で発生した表層崩壊であり、崩壊面の岩相に明瞭な違いが見られないため、非崩壊岩盤の  $Nd'$  値および  $Nd$  値に崩壊地による差はないと考えた。このため、非崩壊岩盤が露岩し、斜面へのとりつきが比較的容易な崩壊地 No.2 を代表地として崩土、表土、岩盤の閾値を設定し、その他の崩壊地については、代表値で設定した閾値を元に崩壊面を設定した。

#### (4) 崩壊域内残土量と崩壊生産土砂量の算出方法

崩壊域内残土量（図-2 の B）の算出式の手順は、以下の i ~ iii の通りである（図-4）。

i. 断面図から測線ごとの崩壊域内残土が分布する範囲の断面積を求め、分布範囲の水平長さで割ることで、測線上の平均崩壊域内残土厚（ $D(l_n)$ ）を算出する。

$$D(l_n) = S(d_n) / L_n \quad (1)$$

＝【測線の崩壊域内残土断面積  
／崩壊域内残土水平長】

ii. 隣接する 2 測線で算出した  $D(l_n)$  の平均値を、測線間の崩壊域内残土分布範囲の平面積に乗じて、測線間に残存した崩壊域内残土量（ $V_n$ ）とした。なお、本研究では、測線間隔を 5 m に設定した。

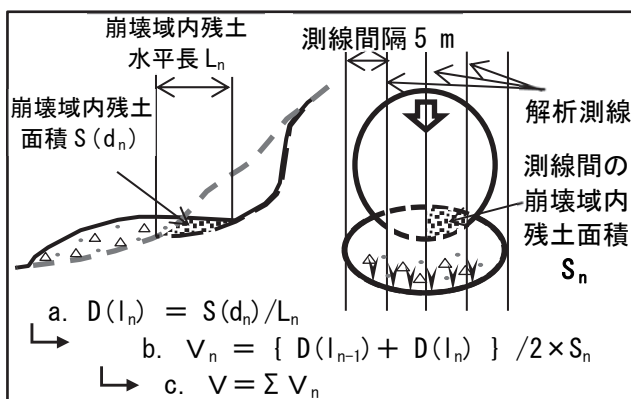


図-4 崩壊域内残土量の算出方法概念図

$$V_n = \{D(l_{n-1}) + D(l_n)\} / 2 \times S_n \quad (2)$$

＝【2 測線の平均崩壊域内残土厚  
×崩壊域内残土分布面積】

iii. 各測線間の崩壊域内残土量の総和を崩壊地の崩壊域内残土量（ $V$ ）とした。

$$V = \sum V_n \quad (3)$$

＝【測線間崩壊体積の総和】

また、差分侵食量（図-2 の A）は、発災前後の LP データの差分解析により算出し、崩壊域内残土量を足し合わせることで、崩壊生産土砂量を算出した。

#### (5) 崩壊域内残土量および崩壊生産土砂量の分析方法

崩壊生産土砂量および崩壊域内残土量について、以下の項目について分析した。

- (a) 崩壊域内残土量と崩壊生産土砂量
- (b) 崩壊域内残土量の割合と崩壊生産土砂量
- (c) 崩壊域内残土量と崩壊域面積
- (d) 崩壊域内残土量の割合と崩壊域面積
- (e) 崩壊域内残土量の割合と平均勾配
- (f) 崩壊域内残土量の割合と崩壊地中央点の斜面位置

ここで、(b)・(d)・(e)・(f)に用いる崩壊域内残土量の割合は、崩壊生産土砂量のうち崩壊域内残土として残存した割合とし、崩壊域内残土量を崩壊生産土砂量で除して算出した。また、崩壊地中央点の斜面位置は、崩壊地の主測線を延長させた直線状で、斜面末端（平坦部もしくは谷部）から尾根までの距離を正規化した値である。つまり、斜面尻を 0 とし尾根を 1 とした時の崩壊地中央点の相対位置であり表-1 に示している。

### 3. 崩壊面の推定

#### (1) 崩土・表土・岩盤の閾値の設定

図-5 に代表地である崩壊地 No.2 の簡易貫入試験結果を示す。調査地点名は図-3 の概念図と対応しており、崩土が被覆した範囲（調査地点 Z）は複数箇所で行っているため、地点 Z-1 のように枝番をつけて示している。図-5 より、崩壊地内の非崩壊岩盤箇所である地点 X で、 $Nd'$  値が 10 以上であることを把握した。次に、崩壊地背後の非崩壊地表土の分布する地点 Y では、 $Nd'$  値が 5 以上であることを把握した。また、地点 Y では、 $Nd'$  値が 10 を超えると急激に  $Nd'$  値が上昇する傾向が見られた。これは、非崩壊岩盤の層に達したためと考えられる。これらの結果を踏まえて、崩壊地内の地点 Z-1、Z-2 の簡易貫入

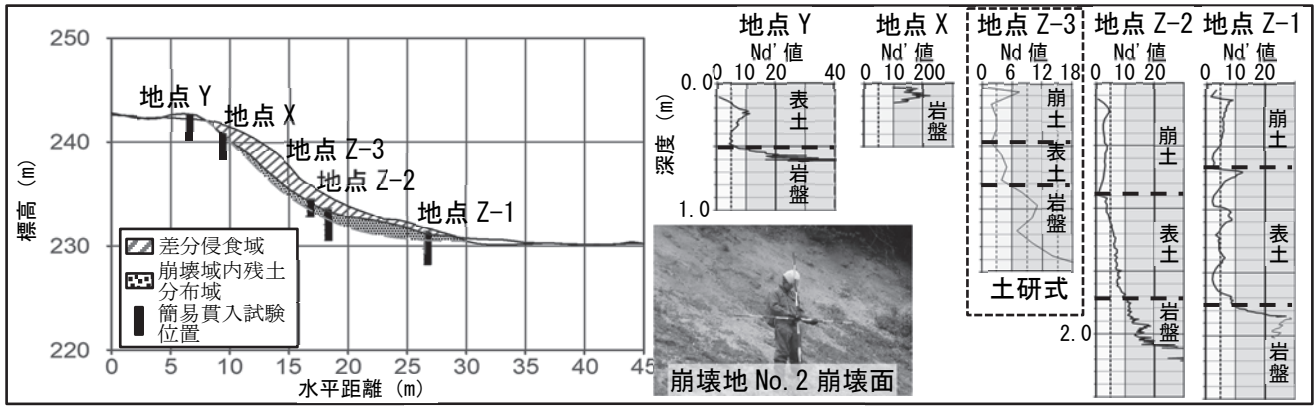


図-5 崩壊地 No. 2 簡易貫入試験結果図

試験結果を見ると、Nd'値が 5 未満の区間、Nd'値 5 以上 10 未満の区間、Nd'値 10 以上の区間に区別できる。

Nd'値 5 未満の区間では、局所的に Nd'値 5 以上の値が見られるが、概ね安定した値が見られる。

Nd'値 5 以上 10 未満の区間では、やや変動が大きい場合、Nd'値が深度方向へ漸移的に上昇する場合など、Nd'値 5 未満の区間と比較してやや不安定な挙動が見られる。

Nd'値 10 以上の区間では、急激な Nd'値の上昇や深度ごとの Nd'値の変動が大きい等、明らかに他の 2 区間と異なる結果となった。

以上の SH 型簡易貫入試験の結果から、Nd'値 5 未満の区間を崩土、Nd'値 5 以上 10 未満の区間を非崩壊表土、Nd'値 10 以上の区間を非崩壊岩盤と推定できる。

次に、設定した土層と Nd'値の関係を、土研式簡易貫入試験を実施した地点 Z-3 へ適用する。Nd 値 = 0.51~0.58Nd'値であることから、換算すると Nd 値 2.55~2.9 未満が崩土、Nd 値 2.55~2.9 以上 5.1~5.8 未満が非崩壊表土、Nd 値 5.1~5.8 以上が非崩壊岩盤となる。ただし土研式簡易貫入試験では、10 cm 貫入するのに 3 回打撃した場合は Nd 値 = 3、6 回打撃した場合は Nd 値 = 6 となるため、崩土 < 3 ≤ 表土 < 6 ≤ 岩盤と設定する。SH 型簡易貫入試験と比較して、傾向は緩慢的ではあるが、各区間に同様の傾向が見られた。

(2) 閾値から推定した崩壊面の妥当性の検討

簡易貫入試験を用いた表層土層の既往研究結果と今回設定した閾値を比較し、妥当性を確認する。沖村・田中<sup>6)</sup>は、表層を対象として、層相の違いにより A~C 層に区分し、各層における Nd 値の閾値を設定している。閾値は、A 層 (非常にルーズな土層) : Nd 値 0~3, B 層 (ルーズな土層) : Nd 値 3~7, BC 層 (漸移層) : 7~13, C 層 (強風化基岩) : 13~25 であることが示されている。また、日浦ほか<sup>7)</sup>では、

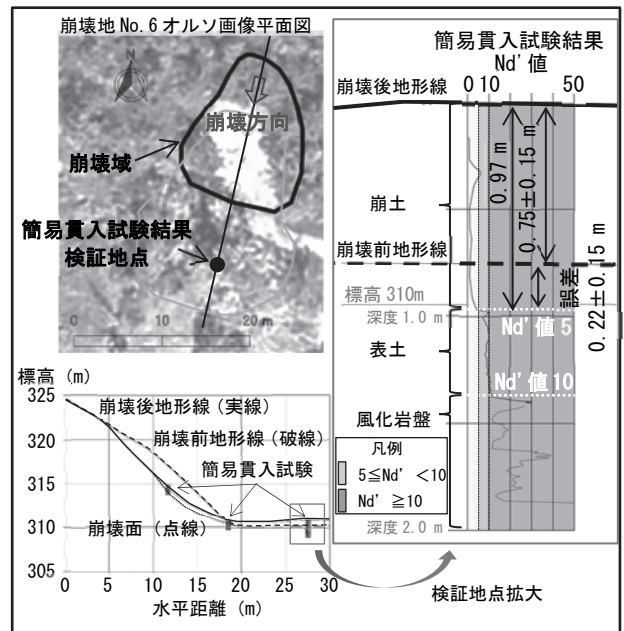


図-6 崩壊地 No. 6 における簡易貫入試験結果と LP データの整合性検証結果図

Nd 値 = 0~10 を表層崩壊発生土層としている。本研究で設定した崩土は非常にルーズであり、閾値を Nd' 値 5 ≒ Nd 値 3 とした結果は、これら既往研究結果と整合していると考えられる。

次に、閾値の検証を目的として、崩壊地 No.6 で発災前の LP データと簡易貫入試験結果から推定した崩壊面を比較した (図-6)。崩壊地 No.6 は、現地調査で崩土が崩壊地から離れた平坦面まで流出した様子が確認でき、崩壊前の地表面が降雨による侵食や崩壊後の崩土の移動による削剥等の影響が小さい、すなわち災害前の LP データによる地形が崩土と表土の境界と一致すると推定される箇所であり、閾値による土層の区分の妥当性確認に適していると判断した。ここでは、発災前の LP データの標高は、災害後の LP データの標高から深さ約 0.75 m の位置である。そして、簡易貫入試験による Nd'値 5 の境界深度は約 0.97 m であった。LP データの垂直方向の誤差 0.15 m<sup>8)</sup>を考慮すると、LP データの標高差は、0.60~0.90 m である。この結果、LP データの標高差分と

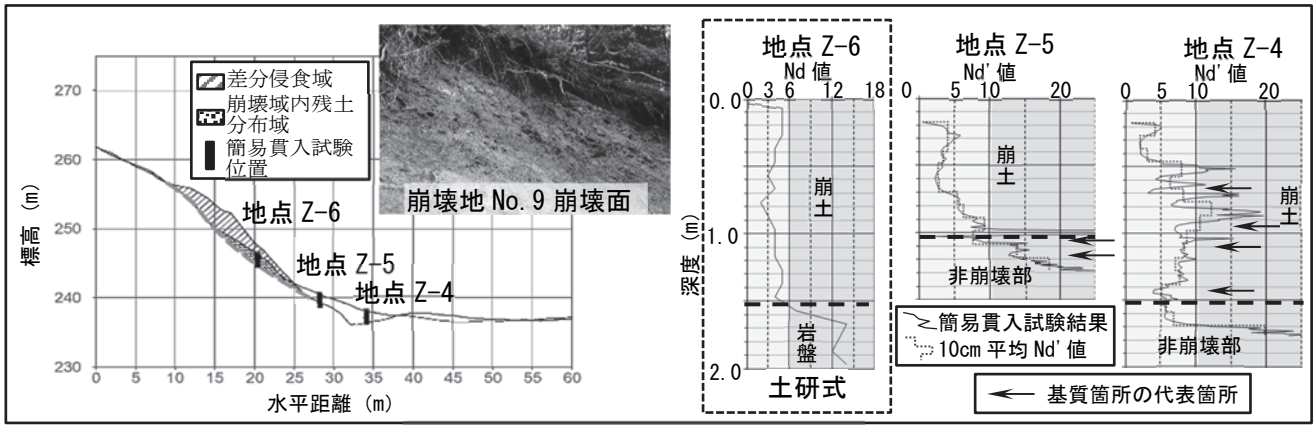


図-7 崩壊地 No. 9 簡易貫入試験結果図

簡易貫入試験結果の差は 0.37～0.07 m となり、整合的であると考えられ、閾値の設定とこれにより推定した崩壊面は一定程度の妥当性が得られたものと考えられる。そして、この閾値と崩壊面の推定方法で、No.2 以外の崩壊地の崩壊面を推定した。

一方で、崩壊地 No.9 では、他の崩壊地とは異なり、表土が礫を多く含む土質であったため、この閾値での崩壊面の推定が難しかった。図-7 に示した崩壊地 No.9 の簡易貫入試験結果では、Nd'値の変化が大きく見られる。これは、崩土に多く含まれる礫に当たることによって生じていると考えられる。詳細を見ると地点 Z-4 および Z-5 では、基質と思われる箇所 Nd'値が 5 未満になる区間と 5 以上になる区間に分けられる。Nd'値 5 未満の区間では、礫と基質の Nd'値の差が大きく、かなり緩んだ土層であることが伺える。Nd'値 5 以上の区間では、礫と基質の Nd'値の差が比較的小さく、深度方向に漸移的に Nd'値が高くなる傾向が見られる。このことから、基質部で Nd'値 5 未満となる区間が崩土であり、Nd'値 5 以上となる区間が非崩壊部と推定できる。なお、非崩壊部における表土と岩盤の境界は明瞭でなかった。本研究は崩土と非崩壊部の境界を把握することが目的であり、基質部での Nd'値が崩土  $< 5 \leq$  表土および岩盤であると設定する。

ただし、この設定は土研式簡易貫入試験への適用が困難である。土研式簡易貫入試験は、10 cm ごとに Nd 値を取得するため、基質部と礫部を分けて Nd 値を把握することはできない。このため、基質部と礫部を合わせた平均的な Nd 値の傾向を分析することにした。地点 Z-4 および Z-5 の崩土と非崩壊部における 10 cm 平均 Nd'値は、局所的に礫の影響を受けて外れ値が見られるが、概ね 10 未満の区間と急激に Nd'値 20 付近まで大きくなる Nd'値 10 以上の区間に分けられる。Nd'値 5 を境界とした場合と 10 cm 平均 Nd'値 10 を境界とした場合では、最大でも 0.2 m 以内の誤差に収まり、概ね一致していると考えた。

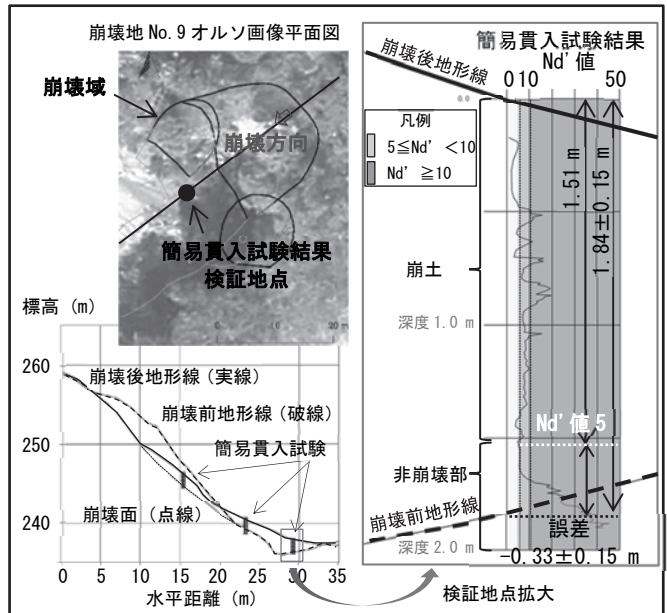


図-8 崩壊地 No. 9 における簡易貫入試験結果と LP データの整合性検証結果図

これを地点 Z-6 へ適用した結果、Nd 値 6 ( $\equiv$ Nd'値 10) を境として、試験結果の傾向に明瞭な差が見られ、地点 Z-4 の 10 cm 平均 Nd'値とよく似た傾向であることから、崩土と非崩壊部の境界付近を捉えていると考えた。つまり、土研式簡易貫入試験での Nd 値は、崩土  $< 6 \leq$  非崩壊部と設定できるものとした。

野村<sup>9)</sup>は、礫を含む表土が被覆する地域の崩壊面の Nd 値が 5～10 程度であるとしており、本研究で閾値を Nd'値 10  $\equiv$  Nd 値 6 とした結果と整合している。また、崩壊地 No.9 について、LP データの標高差分は 1.84 m で、鉛直方向の誤差を考慮すると 1.69～1.99 m であり、Nd'値 5 の深度が約 1.51 m であるため、誤差は 0.18～0.48 m 程度で、一定程度妥当性が得られたと考える (図-8)。

以上の、本研究における、簡易貫入試験による崩土と非崩壊部の閾値は、Nd'値 5  $\equiv$  Nd 値 3 (礫を多く含む崩壊地 No.9 では Nd 値 6) と設定できると判断した (表-3)。

#### 4. 崩壊域内残土量と崩壊生産土砂量の算出結果と傾向

崩壊域内残土量と差分侵食量および崩壊生産土砂量を比較した結果を表-4に示す。崩壊域内残土量と崩壊生産土砂量は、相関係数0.89と強い正の相関が見られ、崩壊生産土砂量に因らず、崩壊域内残土量の割合は31%以内に収まる結果となった(図-9(a), (b))。この傾向は、崩壊域内残土量と崩壊域面積にも見られ、相関係数0.81の強い正の相関が見られ、崩壊域内残土量の割合は崩壊域面積の大きさに因らなかつた(図-9(c), (d))。すなわち崩壊規模に比例して崩壊域内残土量が多くなる一方で、崩壊域内残土量の割合は、一定の範囲に収まる結果となった。また、崩壊域内残土量と崩壊斜面の平均勾配は、相関係数0.27であり、やや負の相関関係が見られ、斜面位置とは明瞭な相関関係にない結果が得られた(図-9(e), (f))。

これらの結果から、本研究で対象とした地域における崩壊生産土砂量が2,000 m<sup>3</sup>以下の崩壊では、崩壊域内残土量は崩壊規模や地形によらず、崩壊規模の一定の割合に集約される可能性があり、斜面勾配が緩やかであるほど残存しやすい傾向があることも考えられる。一方で、本研究は9事例と少なく、比較的小規模なサンプルである。また、その他の地形要素(平均曲率等)や降雨分布との関係については分析できていない。より詳細に崩壊域内残土量や崩壊生産土砂量の傾向を把握するためには上記の課題に取り組む必要があると考えられる。

**謝辞：**本研究を進めるにあたり、東北地方整備局宮城南部復興事務所、宮城県より貴重なデータを提供頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 国土交通省：河川砂防技術基準 計画編 技術資料, 第3章 第2節 2.3, pp.12-13, 2019.

表-3 Nd値と土質の関係

Nd'値	Nd値	土質
5未満	3未満	崩土(砂質土を主体とするもの)
5未満(基質部)	6未満	崩土(礫を多く含むもの:崩壊地No.9)
5~10未満	3~6未満	表土(砂質土を主体とするもの)
10以上	6以上	風化岩盤および礫を多く含む表土(崩壊地No.9)

表-4 差分侵食量比較結果一覧表

崩壊地番号	①崩壊域内残土量(m <sup>3</sup> )	②差分侵食量(m <sup>3</sup> )	④崩壊域内残土量の割合	
			③崩壊生産土砂量 ①+②(m <sup>3</sup> )	①/③
No. 1	86.95	700.85	787.80	11%
No. 2	119.69	378.12	497.81	24%
No. 3	37.70	148.65	186.35	20%
No. 4	75.20	170.34	245.54	31%
No. 5	86.88	194.67	281.55	31%
No. 6	37.87	266.05	303.92	12%
No. 7	63.88	234.53	298.41	21%
No. 8	543.65	1346.99	1890.64	29%
No. 9	151.54	653.57	805.11	19%

- 2) 松岡暁, 山越隆雄, 田村圭司, 長井義樹, 丸山準, 小竹利明, 小川紀一朗, 田方智: LiDARデータの差分処理による流域土砂動態把握の試み, 砂防学会誌, Vol.62, No.1, pp.60-65, 2009.
- 3) 平川泰之, 柏原佳明, 千葉達朗, 山口和也: 土砂災害後の迅速なる崩壊残土量算出の試み-2018年4月11日耶馬溪の斜面崩壊の事例-, 砂防学会誌, Vol.71, No.4, pp.20-25, 2018.
- 4) 川満一史, 吉松弘行, 瀬尾克美, 長谷川秀三, 村中重仁: 斜面の表層構造調査用の簡易貫入試験機について, 平成14年度砂防学会研究発表会概要集, P72, 2002.
- 5) 平松晋也, 宮前崇, 長谷川秀三, 漆崎隆之: 改良自記型簡易貫入試験機の砂防調査への適用性, 平成16年度砂防学会研究発表会概要集, 097, 2004.
- 6) 沖村孝, 田中茂: 一試験地における風化花こう岩斜面の土層構造と崩壊発生深さに関する研究, 新砂防, 第116号, pp.7-16, 1980.
- 7) 日浦啓全, 大手桂二, 日置象一郎, 村上公久: 山地における土砂生産に関する研究(1), 京都府立大学農学部演習林報告, No.22, pp.36-53, 1978.
- 8) 室井翔太, 佐藤匠: 空中写真測量・航空レーザ測量, 砂防学会誌, Vol.72, No.2, pp.40-42, 2019.
- 9) 野村康裕: 簡易貫入試験による土層厚の計測, 砂防学会誌, Vol.71, No.6, pp.54-56, 2019.

(2022.5.30 受付)

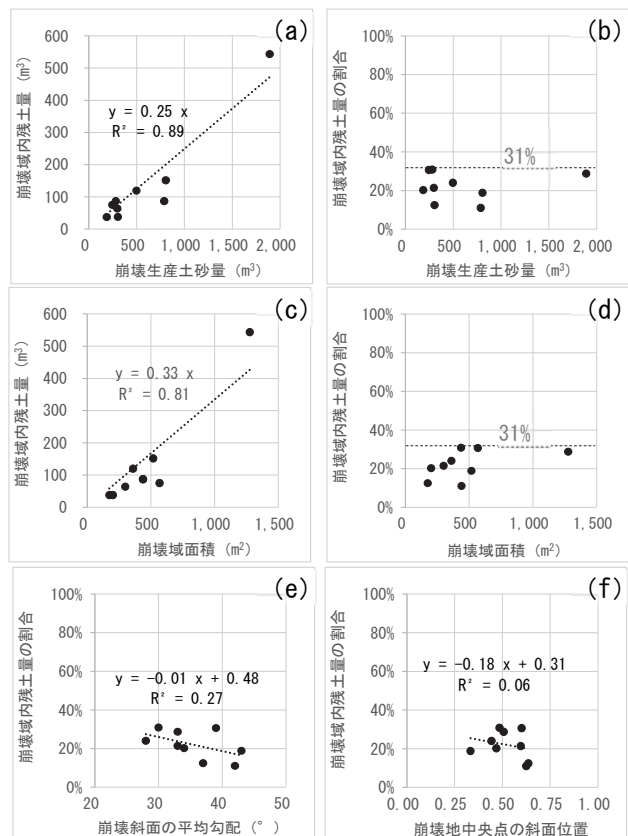


図-9 崩壊域内残土量の分析結果