

# スリランカのケガール地方で発生した 風化変成岩の斜面崩壊に関する土質力学的考察

GEOTECHNICAL INVESTIGATION ON SHALLOW LANDSLIDE OF WEATHERED  
METAMORPHIC ROCK AT KEGALLE IN SRI LANKA

小幡 隼士<sup>1</sup>・後藤 聡<sup>2</sup>・Sajith BANDARANAYAKE<sup>1</sup>・N.P.G. AMALI<sup>3</sup>  
Sandaruwan KARUNARATHNA<sup>1</sup>・Priyantha BANDARA<sup>3</sup>・大川原 優希<sup>4</sup>  
Shunji OBATA, Satoshi GOTO, Sajith BANDARANAYAKE, N.P.G. AMALI,  
Sandaruwan KARUNARATHNA, Priyantha BANDARA and Yuki OKAWARA

<sup>1</sup>山梨大学大学院医工農学総合教育部土木環境工学コース (〒400-8511 山梨県甲府市武田 4-3-11)

E-mail: g23tc007@yamanashi.ac.jp

<sup>2</sup>山梨大学大学院総合研究部工学域土木環境工学系 (〒400-8511 山梨県甲府市武田 4-3-11)

E-mail: goto@yamanashi.ac.jp

<sup>3</sup>National Building Research Organisation (Colombo 05, Sri Lanka)

<sup>4</sup>日本工営株式会社 新潟支店北陸事務所 (前 山梨大学大学院) (〒920-0025 金沢市駅西本町 5-4-43)

E-mail: b0891@n-koei.co.jp

**Key Words:** weathered metamorphic rock, shallow landslide, geotechnical investigation

## 1. はじめに

スリランカは急峻な地形条件や脆弱な地質特性、モンスーン期の豪雨などの気候条件から土砂災害が多発している。特に土砂の移動速度が速く、長距離移動する高速長距離土砂流動と呼ばれる現象が顕著にみられ、人命や資産に大きな被害をもたらしている<sup>1)2)</sup>。2016年5月15日から3日間にわたる豪雨によって、5月16日夜から17日の朝にかけてケガール地方とキャンディ地方で多くの地すべりが発生し、5月17日16時頃にアラナヤケ地すべり、17時頃にガントゥナ・ウダガマ地すべりが発生した。地すべり発生前には時間雨量25mmを超える豪雨が降ったとされている(図-1)。1960~1990年の30年間の5月の平均月総降水量は144mmであったとされており、今回の地すべり発生までの累積雨量が約400mmであったことから、非常に大きな豪雨であったことがわかる。アラナヤケ地すべりでは75棟の家屋が倒壊し、死者31名、行方不明者96名<sup>3)</sup>にのぼる甚大な被害が及んだ。被害範囲は滑落崖から末端部まで全長約2000m、最大幅約500mと長距離にわたって被害が及んだと報告されてい

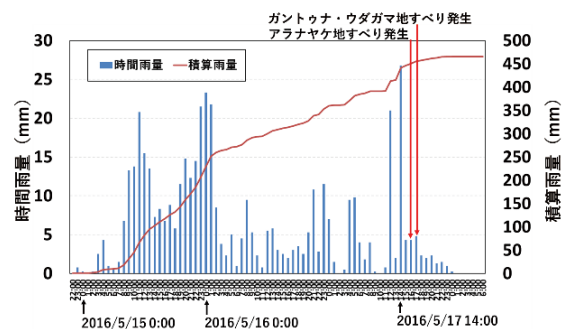


図-1 災害発生時のアラナヤケ地方の時間雨量



図-2 地すべり発生地点図<sup>3)</sup>

る。一方ガントゥナ・ウダガマ地すべりは滑落崖から末端部まで全長約 250m とアラナヤケ地すべりと比較して小規模な地滑りであり、人的被害はなかった<sup>4)</sup>。

スリランカの地形地質学的特徴として、アラナヤケ地すべりが発生した地域周辺はクォーツアイトや花崗片麻岩が広く分布しており、風化した花崗片麻岩帯で地すべりが起きたと報告されている<sup>2)4)5)</sup>。スリランカでは、花崗岩類が長い時間熱による接触変形作用や大陸プレート同士の圧縮による変形作用を受けて層状に変成している<sup>6)</sup>。その風化の度合いや化学組成は地点によって異なるため、すべり面の同定が非常に困難である。スリランカの地すべりは、花崗片麻岩が広がる山岳地帯かつ年間降水量の多い島南西部に集中しており、地すべり発生のための地形条件と気象条件が重なる地域で多発している。一方日本では、主に中国地方に花崗岩類が広がっており、花崗岩類が著しく風化してマサ土化している地域での土砂災害や、堆積岩が花崗岩の貫入による接触変形作用によってホルンフェルス化している地域での土砂災害が報告されている。両者の土質力学的性質を比較することで、風化した変成岩および花崗岩を起因とする地すべりの発生メカニズムについて考察が可能となる。

また、アラナヤケ地すべりとガントゥナ・ウダガマ地すべりは尾根を挟んで反対側に位置しており(図-2)、類似した地質構造をしている。大規模な地すべり発生地で現地調査を行うことは困難であるため、小規模な地すべり発生地から崩壊発生メカニズムの糸口を掴むことができれば被害発生予測に大きく貢献できる。本論文ではガントゥナ・ウダガマ地すべりを対象に現地調査を実施し、小規模な地すべり発生地の土質力学特性を明らかにすることを目的としている。

## 2. 調査地域

2024年3月16日～18日にガントゥナ・ウダガマ地すべりを対象に現地調査を実施した。図-3に調査地点図を示す。さらに、図-4に滑落崖付近を拡大した図を示す。地点 P1, P2 は 2023 年 4 月に実施した現地調査の調査地点である<sup>7)</sup>。地点 P1 では試料採取および露頭観察、地点 P2 では簡易動的コーン貫入試験を実施した。地点 P3 は 2024 年 3 月の現地調査にて試料を採取した地点(07°, 08', 4.17" N 80°, 26', 3.04" E)である。また、滑落崖に対して平行な側線 (LineA) 上の 5 地点 (地点①～⑤) と、すべり方向におおよそ平行な側線 (LineB) 上の 2 地点 (地点⑥, ⑦)、地点 P3 付近の 3 地点で簡易動的コーン貫入試験を実施した。

図-5に地点 P1 にて観察された露頭を示す。上位より赤色に風化した層(Red 層)、茶色に風化した層(Brown 層)、白色に風化した層(White 層)の 3 段階の風化が確認された。層厚はそれぞれ約 20 cm, 6 cm, 80 cm であった。図-6に地点 P3 の様子を示す。表層を 10 cm 程度取り除き、物理試験用に内体積 100 cm<sup>3</sup> の採土円筒でサンプリング

をした。また、15 cm×8 cm×5 cm のサンプリング容器を用いて一面せん断試験用試料を、チャック付きポリ袋に各種試験用の乱した試料を採取した。地点 P3 は滑落崖の側壁上部のすべり面が残っている地点であり、white 層と Brown 層が入り混じっているような様子が確認された。これらの様子からすべり面を含んだ土塊であると推察される。

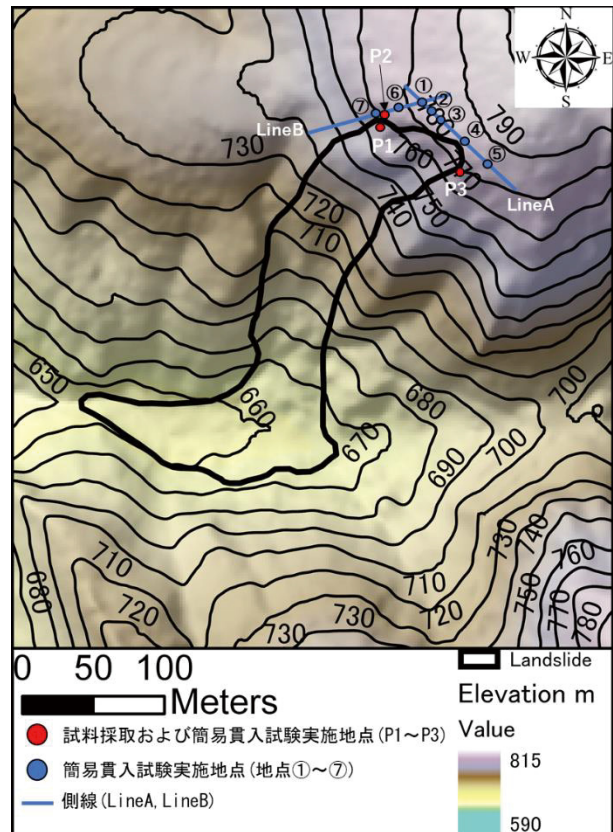


図-3 調査地点図

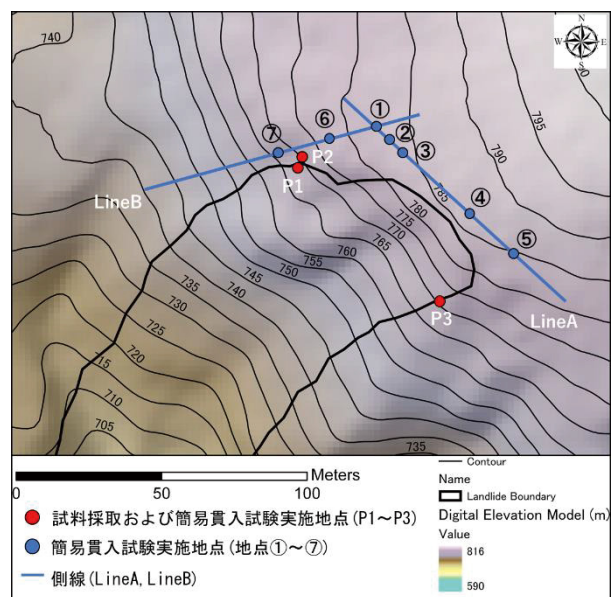


図-4 滑落崖付近の地形図

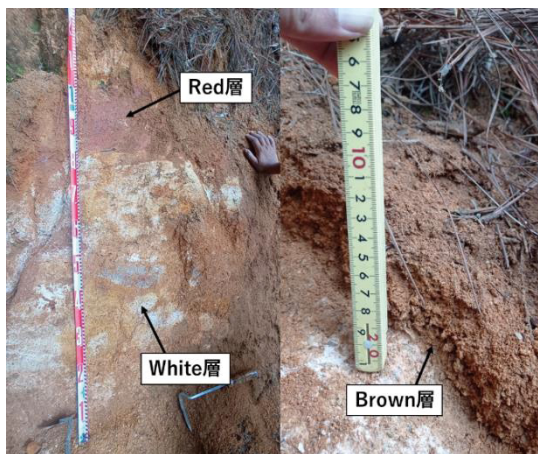


図-5 地点 P1 の露頭 (2023 年 4 月撮影)



図-6 地点 P3 の露頭 (2024 年 3 月撮影)

### 3. 物理試験

#### (1) 試験方法

物理試験は、地点 P3 にて内体積 100 cm<sup>3</sup>、内径約 5 cm、高さ約 5 cm の採土円筒で採取した乱れの少ない試料 A～F (表-1) を用いて実施した。

#### (2) 試験結果・考察

表-1 に物理試験結果を示す。含水比は 11%～14% であり、湿潤密度、乾燥密度は試料 A, B, C と D, E, F で違いがみられる結果となった。図-7 に示すように試料の様相をみると、試料 D, E, F は White 層が多く含まれている。そのため、採取した地点の違いによって試料に含まれる層の割合が変わったため、湿潤密度、乾燥密度に違いがみられたと考えられる。White 層が多く含まれている試料ほど乾燥密度が高いため、Red 層、Brown 層は風化が進んだものとみられる。

### 4. 液性限界・塑性限界試験

#### (1) 試験方法

液性限界・塑性限界試験は英国規格準拠試験の BS1377 に則って行われた。試験方法は JIS 規格とおおむね同じであるが、3 回の液性限界試験結果の近似曲線から 25 回の落下回数で含水比を液性限界として決定し、塑性限界試験は 1 つのサンプルを採取し、そのサンプルの含水比を塑性限界として決定した。

表-1 物理試験結果

試料番号	A	B	C	D	E	F
土粒子の密度 (g/cm <sup>3</sup> )	2.604					
含水比 (%)	13.36	12.72	14.46	14.16	11.22	13.59
湿潤密度 (g/cm <sup>3</sup> )	1.234	1.222	1.209	1.449	1.379	1.368
乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> )	1.089	1.084	1.056	1.269	1.240	1.204
間隙比	1.391	1.402	1.465	1.052	1.100	1.163
飽和度 (%)	30.87	28.88	31.06	50.76	36.59	41.62

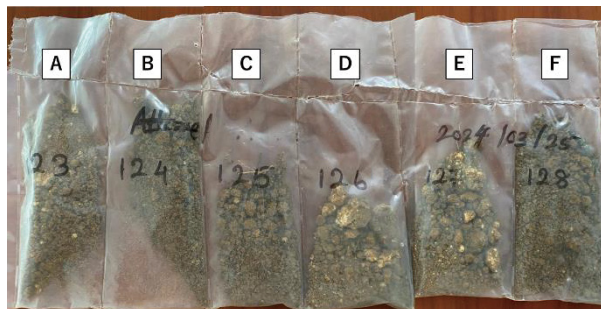


図-7 物理試験に用いた試料

表-2 液性限界・塑性限界試験結果

液性限界 (%)	塑性限界 (%)	塑性指数
50.9	37.4	13.5

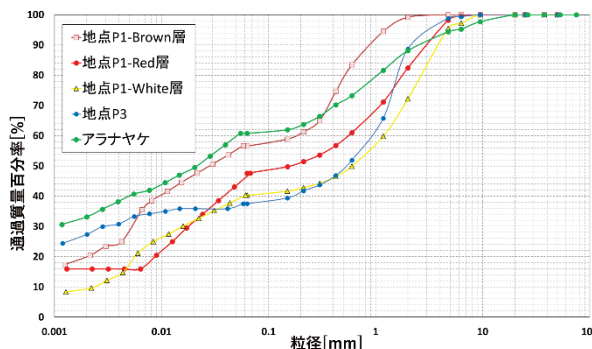


図-8 粒度試験結果

#### (2) 試験結果・考察

表-2 に液性限界・塑性限界試験の結果を示す。工学的分類は MH に属することが確認された。透水性は大きく、乾燥強さ、タフネスが大きいことがわかる。塑性指数が小さいため、少しの含水量の変化で液体状態への移行変わることが確認された。そのため、豪雨を誘因とした地すべりが起きやすい土質であったことがわかる。

### 5. 粒度試験

#### (1) 試験方法

粒度試験は現場にてチャック付きポリ袋に採取した乱した試料を用いて実施した。試験方法は英国規格準拠試験の BS1377 に則って実施した。

#### (2) 粒度試験結果・考察

図-8 に粒度試験結果を示す。比較として、2023 年 4 月の現地調査で地点 P1 にて採取した試料 (Brown, Red,

White)による粒度試験結果<sup>5)</sup>とアラナヤケ地すべりにおける現地調査で採取した試料の粒度試験結果を示す。風化が進んでいると推定されるBrown層, Red層には細粒分が多く含まれており, White層では他の層よりも礫分が多く含まれていることが分かる。今回の現地調査で得られた試料による試験結果をみると, 0.075mm以上の粒径加積曲線はWhite層と非常に類似した値を示しており, それ以下はどの層にもみられない値を示している。また, 最終到達点が約24%と, どの層よりも高い割合を示している。地点P3では滑落崖付近のすべり面の土が落ち残っている場所で採取している。反対に地点P1は滑落崖の内側で試料を採取しており, なおかつ地すべり発生から時間が経過しているため, 降雨などによって細粒分が抜け落ちたと推察される。

## 6. 定圧一面せん断試験

### (1) 試験方法

試料は地点P3にて15cm×8cm×5cmのサンプリング容器を用いて採取した乱れの少ない試料から, 6cm×6cm×2.5cmの一面せん断試験用容器に成型した試料を用いて試験を実施した。試験は英国規格準拠試験のBS1377に則って実施した。試験は定圧条件で実施し, 垂直応力は25kPa, 50kPa, 75kPa, 100kPaの4パターンを各2回,

せん断速度は0.25mm/min.である。また比較のため, 2023年4月の現地調査の地点P1にて採取したWhite層を用いた再構成試料による試験も実施した。再構成試料では垂直応力25kPa, 50kPa, 100kPaの3パターンで実施した。

表-3に一面せん断試験に用いた試料の物理特性を示す。また, 図-8の粒度分布をみると, P3とwhite層は0.075mm以上の粒径加積曲線は類似した値を示しているが, 細粒分の値は大きく異なる。

### (2) 試験結果・考察

図-9に乱れの少ない試料の試験結果, 図-10に再構成試料の試験結果を示す。まず, 強度定数について比較する。比較として, 再構成試料の垂直応力-せん断応力関係の図に, 乱れの少ない試料の垂直応力とせん断応力の関係をとともに示す。図-9, 10中の破線は垂直応力50kPa時のせん断応力を除いた場合の破壊線である。また, 図-10中の赤色の破線は再構成試料の破壊線である。また, 表-4に試験結果から得られた強度定数を示す。乱れの少な

表-4 強度定数

	乱れの少ない試料 (50kPa①を除く)	再構成試料 (White層)
粘着力 c(kPa)	11.7	7.65
内部摩擦角 φ(°)	35.2	36.5

表-3 一面せん断試験に用いた試料の物理特性(試験前)

	乱れの少ない試料(1回目)				乱れの少ない試料(2回目)				再構成試料(White層)		
	25kPa	50kPa	75kPa	100kPa	25kPa	50kPa	75kPa	100kPa	25kPa	50kPa	100kPa
湿潤密度 (g/cm <sup>3</sup> )	1.601	1.553	1.492	1.368	1.608	1.559	1.488	1.413	1.830	1.830	1.830
乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> )	1.395	1.374	1.335	1.191	1.401	1.380	1.332	1.230	1.550	1.540	1.520
含水比 (%)	14.72	13.02	11.74	14.87	14.72	13.00	11.71	14.89	17.99	18.77	20.31
間隙比	0.899	0.928	0.985	1.225	0.891	0.921	0.990	1.154	0.710	0.721	0.743
飽和度 (%)	43.37	37.18	31.58	32.18	43.78	37.40	31.36	34.18	67.18	69.01	72.40

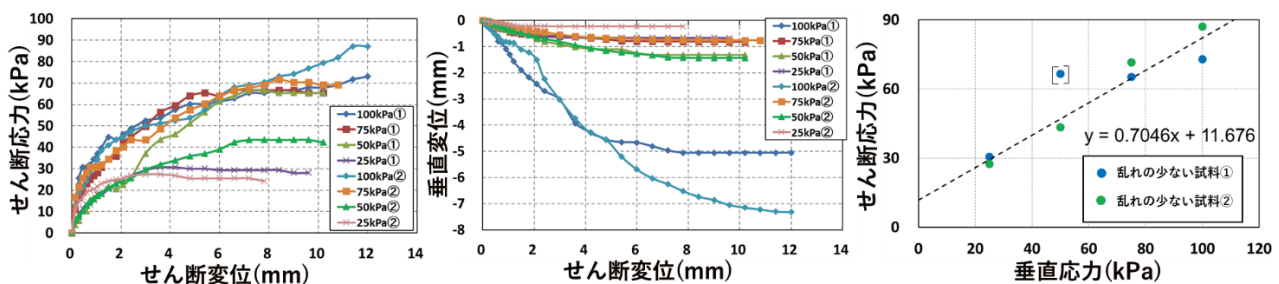


図-9 一面せん断試験結果(乱れの少ない試料(地点P3))

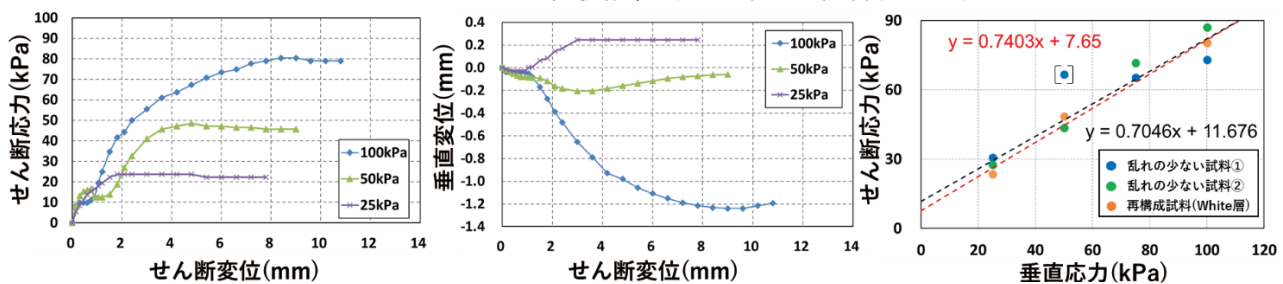


図-10 一面せん断試験結果(再構成試料(地点P1 White層))

い試料の粘着力は 11.7 kPa, 内部摩擦角は 35.2 ° となった. 再構成試料では粘着力 7.65 kPa, 内部摩擦角は 36.5 ° であった. 内部摩擦角は非常に類似した値を示したが, 粘着力は乱れの少ない試料よりも低い値を示した.

乱れの少ない試料のせん断変位-せん断応力関係をみると, 1 回目の垂直応力 50 kPa のケースでせん断応力が不連続に上昇する挙動を示した. 現段階で原因は不明であるが大きな粒子の混在など, 何らかの原因があったことが推察される. そのため, 50 kPa 1 回目の試験結果は外れ値として強度定数の算出からは除いている. 再構成試料の結果と比較すると, 垂直応力 25 kPa, 100 kPa の試験結果はともに類似したピークせん断応力を示していることがわかる. 破壊線を比較しても乱れの少ない試料と再構成試料に大きな違いは見られず, 高い再現性を示している.

乱れの少ない試料の垂直変位に着目すると, 100 kPa の 1 回目, 2 回目の垂直変位がそれぞれ約 5 mm, 7 mm と他の条件と比較して非常に大きく, 高い収縮性を示していることがわかる. 乾燥密度が 100 kPa だけ小さいことが原因であると考えられる. 反対に, 再構成試料の垂直変位をみると, 垂直応力 25 kPa のケースで体積が膨張する正のダイレイタンスが確認された. 乱れの少ない試料よりも乾燥密度が大きいことから, 密に詰まっていたことが原因であると考えられる.

以上の試験結果から, 細粒分含有率が強度に与える影響は少なく, 体積変化に与える影響が大きいと考えられる. 今後は地点 P3 の試料を用いた再構成試料でも一面せん断試験を実施し, 比較する必要がある.

## 7. 簡易動的コーン貫入試験

### (1) 試験方法

本試験はイギリスの Transport Research Laboratory によって規格化された試験装置を用いて試験を実施した<sup>8)</sup>. 落下高さ 575 mm, ハンマー重さ 8 kg である. 試験は英

国規格準拠試験の BS1377 に基づき, ハンマーを一回落下させる毎の貫入深さを記録した. 試験箇所は図-3, 4 に示す通りである. ただし, 地点 P3 では異なる場所で 3 回の試験を実施した. 結果は記録から 10 cm 貫入するときの落下回数を読み取り Nd 値に換算して比較を行う. ただし, 本試験では JIS 規格の簡易動的コーン貫入試験と同様の計算方法<sup>9)</sup>で Nd 値に換算しているため, 8 kg のハンマーでは Nd 値を過小評価していることに注意する必要がある.

### (2) 試験結果・考察

図-11 に試験結果を示す. 試料採取地点 P3 は, 2 章に記述の通りすべり面の側壁上部の落ち残りの地点のため, すべり面までの深さは他の地点よりも浅いことが予想されていた. 地点 P3 の試験結果をみると 1 回目, 2 回目では貫入深さ 40-50 cm で Nd 値が上昇し, すぐに貫入が困難になった. 3 回目は深さ 70 cm で Nd 値の上昇がみられたが, これは採取地点よりも離れた場所で行ったため, 岩盤層までの層厚が 1, 2 回目よりも厚かったことが原因と考えられる. 滑落崖よりも上で試験を実施した地点 P2, LineA の結果をみると貫入深さ 200 cm 付近で Nd 値は 40 以上を示していることがわかる. これらの結果から, 適度に風化した岩盤層は地表面から深さ 2 m 付近に存在し, その上部にすべり面が存在していることが示唆された. すべり面付近の Nd 値は 10-20 程度であったと考えられる. LineA の地点⑤に関しては用意した試験機の関係上 3 m 以上の深さで試験が実施できなかったため試験を打ち止めたが, 3 m 付近でも Nd 値の急激な上昇は見られなかった.

図-12 に, 試験結果から推察される簡易的な地質断面図と簡易動的コーン貫入試験結果を重ね合わせた図を示す. LineA, LineB の標高は, 現地側線に沿って 4 m 置きに GPS で記録したものを使用した. 上位から Nd 値が 10 以下の完全に風化した層 (Completely Weathered - Soil), 10-30 程度の高度に風化した層 (Highly Weathered - Soil),

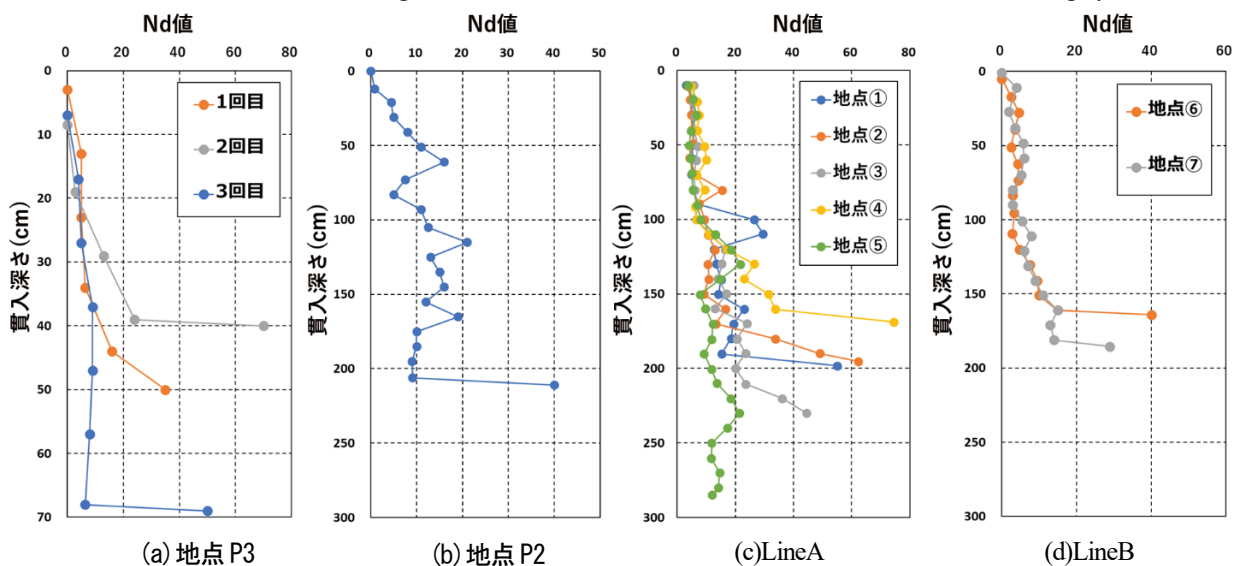


図-11 簡易動的コーン貫入試験結果

Nd 値が 30-40 を超える適度に風化した岩盤層 (Moderately Weathered - Rock) が存在すると推察される。CW-S と HW-S の間で Nd 値の上昇がみられた地点は大きな礫が存在していたと考えられる。LineA の地点⑤では 3m 付近でも Nd 値の上昇がみられなかった。図-4 を確認すると谷地形の始まりのような地点であり、図-12(a) に示すように地下深くまで風化が進んでいると推察される。

## 8. まとめ

本論文ではガントウナ・ウダガマ地すべりを対象に現地調査を実施し、様々な試験結果から土質力学的性質について検討した。今回の調査によって得られた知見を以下に示す。

- ① ガントウナ・ウダガマ地すべり発生地では赤色、茶色、白色の3段階に風化した層が確認された。
- ② 塑性指数は低い値を示し、少量の含水量の変化で液体状態に移り変わる性質を持っていた。
- ③ 風化の度合いによって粒度分布は大きく異なり、赤色、茶色層は高い細粒分含有率を示した。
- ④ 乱れの少ない試料と再構成試料で一面せん断試験結果から得られる強度定数に大きな違いはなく、細粒分含有率が強度に与える影響は少ないと考えられる。
- ⑤ 表層から岩盤までの深さは約 2m 程度であり、岩盤上部の風化層にすべり面が存在していた。

変成岩の風化は地形の成り立ちや変成までの期間によってその様相は大きく異なる。今後は風化の度合いによる化学組成の違いなどから物理特性、力学特性を考察することで、この地域一帯の地すべり発生メカニズムについて検討する必要があると考えられる。

**謝辞：** 佐々恭二京都大学名誉教授、小長井一男東京大学名誉教授には、多くのご支援とご助言をいただいた。本研究は、SATREPS プロジェクト (スリランカにおける降雨による高速長距離土砂流動災害の早期警戒技術の開発：研究代表 小長井 一男) により実施した。現地調査や室内土質試験にご協力いただいた NBRO および関係各位に感謝いたします。

### 参考文献

- 1) 判田乾一, 大河原彰, 佐々木央, 岡村充哉, 石原正仁, 中野亮 : アラナヤケ土砂災害現地調査報告, 砂防学会誌, Vol.69, No.6, pp67-70, 2017.
- 2) Dang, K., Sassa, K., Konagai, K., Karunawardena, A., Bandara, R. M. S., Hirota, K., Tan, Q., Ha, N. D. : Recent rainfall-induced rapid and long-traveling landslide on 17 May 2016 in Aranayaka, Kegalle District, Sri Lanka, Landslides16, pp155-164, 2019.

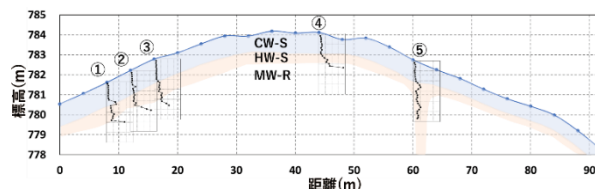


図-12(a) 簡易動的コーン貫入試験と地質断面図 (LineA)

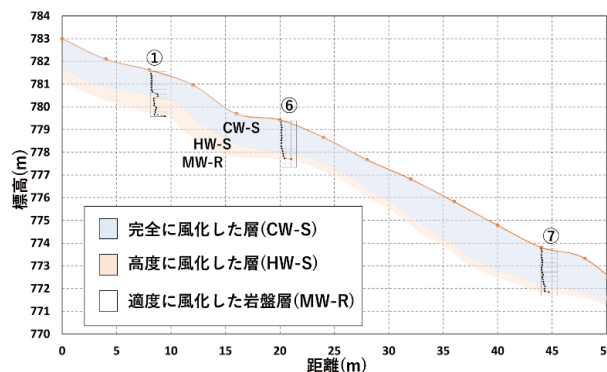


図-12(b) 簡易動的コーン貫入試験と地質断面図 (LineB)

- 3) Google earth  
<<https://www.google.co.jp/intl/ja/earth/about/>> (2024.05.30 アクセス)
- 4) Karunarathana, S., Bandara, P., Goto, S., Bandaranayake, S. : Identification of Potential Natural Slope Failure Zones by Geomorphological Analyses Using Raster Slope Shading of LiDAR; Case Study from Kegalle Sri Lanka, Progress in Landslide Research and Technology, vol3 Issue1, pp363-377, 2024.
- 5) Karunarathana, S., Goto, S., Bandaranayake, S., Bandara, P. : Identification of the complete particle size distribution of landslide debris by the combined method of scaled image analysis, line-grid analysis and laboratory sieve analysis , Geoenvironmental Disasters, vol11, pp1-20, 2024.
- 6) Osanai, Y., Sajeev, K., Owada, M., Kehelpannala, K.V.W., Prame, W.K.B., Nakano, N., Jayatileke, S. : Metamorphic evolution of high-pressure and ultrahigh-temperature granulites from the Highland Complex, Sri Lanka, Journal of Asian Earth Sciences, 28, pp20-37, 2006.
- 7) Bandaranayake, S., Goto, S., Karunarathana, S., Bandara, P. : A Case study on rain-induced landslide in Ganthuna Udagama Village in Kegalle District, Sri Lanka on 17th of May 2016, 第 59 回地盤工学研究発表会, 24-12-3-02, 2024.
- 8) Transport Research Laboratory : Overseas Road Note 18 A guide to the pavement evaluation and maintenance of bitumen-surfaced roads in tropical and sub-tropical countries, pp56-58, 1999.  
<<https://www.trl.co.uk/uploads/trl/documents/ORN018.pdf>> (2024.05.30 アクセス)
- 9) 公益社団法人地盤工学会 : 地盤調査の方法と解説-二分冊の一-, pp317-324, 2013.

(2024.05.31 受付)