

関門層群における強風化安山岩のスレーキング特性および 切土斜面表層の脆弱化に関する検討

Investigation of Soil Property of Strongly Weathered Andesite and Stability of its Cut Slope based on Boring Core Samples

神谷知佳 Chika KAMIYA (山口大学大学院創成科学研究科)
鈴木素之 Motoyuki SUZUKI (山口大学大学院創成科学研究科)
太田岳洋 Takehiro OHTA (山口大学大学院創成科学研究科)
河内義文 Yoshifumi KOCHI ((株)ケイズラブ)

山口県西部に分布する関門層群を横断する道路建設現場では、切土中・切土後に、崩壊や変状が発生したことが複数報告されている。本研究では崩壊のリスクを事前に評価する手法を確立することを目的として、関門層群における強風化安山岩土層の構成と N 値の関係および深度ごとのスレーキング特性について検討した。その結果、強風化安山岩部は 3 種類に大別でき、特性として乾燥後、水浸すると深い深度まで急速にスレーキングが起きやすいということが分かった。

キーワード：切土、法面、安山岩、風化、ボーリング (IGC : C-09, D-00, E-06)

1. はじめに

山口県西部に分布する関門層群分布域(図-1)で道路建設に伴い斜面切取りがなされてきたが、その内の複数箇所切土中や切土後に変状や崩壊が発生しており、施工時の安全性や経済性に影響を与えてきた。これまでに、このような関門層群では施工に伴う崩壊、再崩壊の事例が多数報告されているが、いまだに崩壊のリスクを事前に評価する手法は確立されていない。このことから、切土前に崩壊や変状のリスクを抽出し、必要な対策を行い、未然に防ぐことは重要な課題である。

本研究では、山陰道の建設前の地盤調査で採取されたボーリング試料に対する試験・分析結果をもとに、強風化安山岩の土質特性と今後想定される切土法面の安定性について検討した。さらに本研究では、崩壊リスクを事前に評価する手法を確立することを目的として、主に次の 2 点の検討を行った。

- (1) 大局的に地山の状況を把握するために土層の構成と N 値の関係について調べた。
- (2) 土質特性とあわせて、乾燥・水浸を経て崩壊するまでの過程に違いや特徴があるのか、深度ごとにスレーキング特性を調べた。

以下に、この 2 点の検討結果と考察について述べる。

2. 既往研究

本研究で対象とする関門層群の地盤工学上の問題点としては、その風化・変質部において切土に伴い、崩壊を

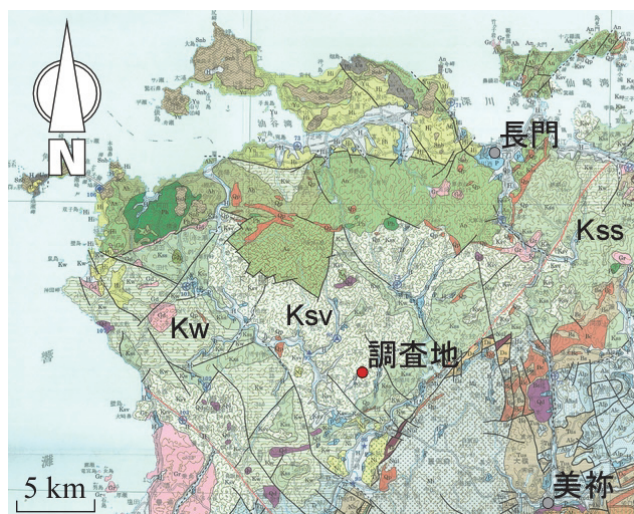


図-1 山口県の地質図(西村ほか²⁾に一部加筆)

Ksv: 下関亜層群上部層(安山岩・デイサイト質～流紋岩質凝灰岩～流紋岩質), Kss: 下関亜層群下部層(頁岩・砂岩・礫岩・凝灰質砂岩・赤色頁岩), Kw: 脇野亜層群(頁岩・砂岩・礫岩・赤色頁岩)

起こしていることが挙げられる。その問題点を解決すれば、建設事業の経済性や安全性が向上すると考えられる。しかし、既往研究ではそれぞれのケースごとに崩壊事例が報告されているに過ぎず、関門層群の切土安定性に関して共通する問題点はまとめられていない。

関門層群の変質に着目した研究として、歌田ら³⁾は、関門層群中に見られた変質作用は広域、ホルンフェルシック、熱水、風化の 4 つに大別されるとした。なお、風化変質は関門層群中ではむしろ稀であるが、他の変質帯とくに熱水変質帯に重複して出現することが報告されて

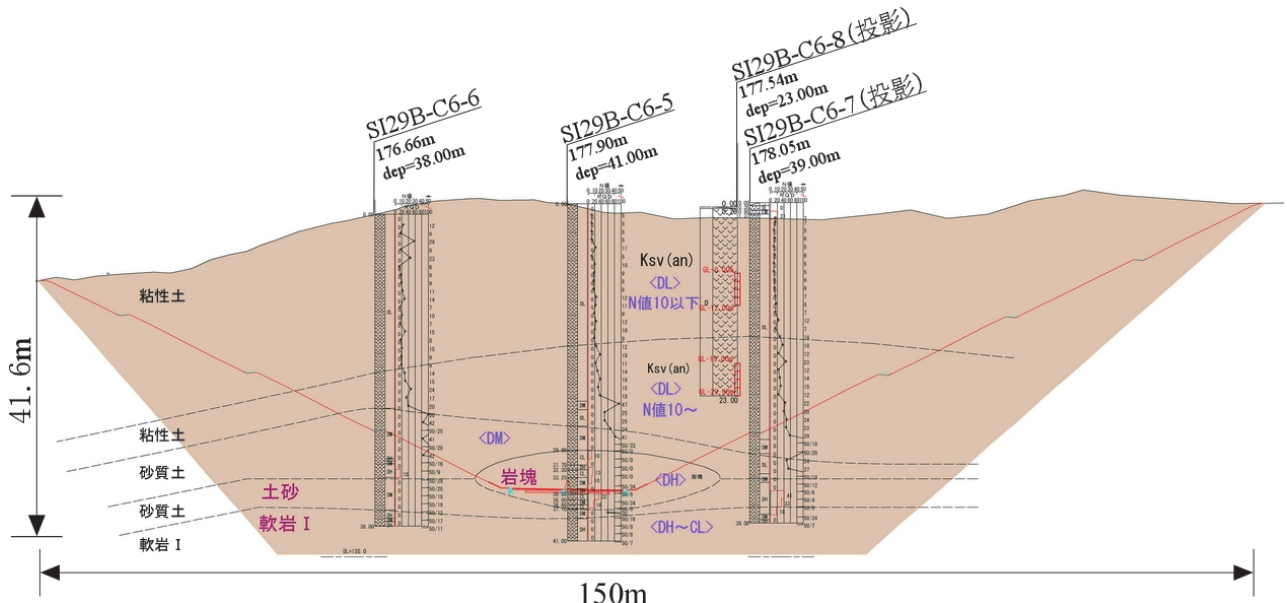


図-2 地質断面図

いる。

地層境界によるすべりに着目した研究として、黒色薄層土に起因するものと白色粘土層に起因するものが報告されている。黒色薄層土に関する研究では、山本ら⁴⁾は、すべり面に認められた黒色土について鉱物学・化学・物理的性質を調べ、黒色土中の黒色は微細で非晶質なマンガあるいは鉄の酸化物ないし水酸化物によってもたらされたことを報告した。また、山本ら⁵⁾は、その黒色薄層土の化学的および物理的性質を明らかにし、事前に不連続面に黒色土が沈殿していることが分かった場合、それに起因する斜面崩壊に対する安定性の検討においては黒色土間の設計強度定数として、粘着力 $c_a=7.7\text{kPa}$ 、内部摩擦角 $\phi_a=23.1^\circ$ という値を用いることを提案している。他方、白色粘土に関する研究は、山本ら⁶⁾は、関門層群からなる斜面崩壊が現場で認められた白色粘土に起因するという発生機構を明らかにした。頁岩と白色粘土の貼り合わせた供試体を用いた一面せん断試験から得られた強度定数が最も小さかったことから、崩壊は白色粘土と頁岩の境界面にて発生したものとした。また、施工時は白色粘土層のような挟在層の境界面を考慮した法面施工の必要性をあげている。

次に、崩壊事例を集約して素因・誘因を検討した研究として、Kochi et al.¹⁾はいくつかの崩壊事例をもとに、素因を分析した結果、関門層群に発生する地すべりを強風化・黒色薄層土・15m以上の切土・褶曲・頭部に断層・豪雨の6つの因子に支配されているとした。ただし、この中で崩壊に共通する確実な因子は、強風化した地層からなる斜面が崩壊したという点のみである。

このようにこれまでに関門層群からなる斜面崩壊にはいくつかの形態があることが報告されているが、これらの斜面崩壊に唯一共通している強風化したことによって生成された土砂の土質特性や風化に対する抵抗性に着目した研究はまだされていない。

3. 調査試験箇所・調査試験方法

3.1 調査箇所の概況

調査エリアは高さ約35mの長大切土が計画されている地点である。その計画・設計に伴い、調査ボーリングが実施された。図-2に示すように、切土法面、計画道路面を超える深度での調査ボーリングで計画されている。掘進長約40mのボーリングが道路の中心で1本と左右の法面の中心付近で1本ずつ、サンプリングのために掘られた掘進長23mのボーリングが1本の計4本が実施されている。なお、法面表層部には、強風化部の出現が予測されたため、法面勾配は両側とも1:2.0(合成勾配約 25°)で設計された。

3.2 土質試験

各種土質試験は、図-2の断面図に示すボーリング孔(SI29B-C6-8)のコア試料を用いて実施した。なお、試験対象深度ではトリプルチューブサンプラーを用い、乱れの少ない試料を採取した。強風化した土の状態を知るために、同孔の試料(試料番号 S-1, 2(GL-8.00-10.00m)と S-7, 8(GL-21.00-23.00m))を用いて、土粒子の密度試験、土の含水比試験、湿潤密度試験、粒度試験、液性限界・塑性限界試験などの物理試験を行い、地盤材料の工学的分類を行った。スレーキング試験は図-2に示す SI29B-C6-5 および SI29B-C6-8 の乱れの少ないコア試料を用いて実施した。試験は地盤工学会の岩石のスレーキング試験(案)⁷⁾に従って実施した。40±5℃で48時間炉感させた試料を24時間吸水させ、水浸直後、30分、1、2、4、6および24時間経過時点でそれぞれスレーキング区分を判定し、24時間経過時点の区分をスレーキング指数とした。なおスレーキング区分における指標を表-1に示す。それぞれの区分における詳細は以下の通りである。スレーキング区分0は変化なし。スレーキング区分1は割れ目が

少し出来るが供試体の原形を保っている。スレーキング区分2は全体に割れ目が多数でき、いくつかの岩片に別れる。供試体の原形は概ね判別できる。スレーキング区分3は全体が細粒化し、供試体の原形は判別できない。泥状の進行は顕著でない。スレーキング区分4は全体が泥状化。

採取できた箇所である。なお、試料は全岩試料、水簾試料、水簾試料にエチレングリコールを吹きかけたエチレングリコール処理試料を用いた。測定には山口大学総合科学実験センター機器分析実験施設の Rigaku 社製 X 線回折装置 MiniFlex600 を使用した。X 線回折の測定条件は X 線:CuK-ALPHA1/40kV/15mA, 測定範囲:2.0~40.0°, スキャンステップ:0.01°, スキャンスピード:10.0°/min である。

表-1 スレーキング区分

区分	0	1	2	3	4
試料状態					

3.3 X 線回折試験

深度毎に含有される粘土鉱物を同定するためにコア試料を用いて X 線回折試験を実施した。試験深度は GL-0.0~30.0m までは 1m ごと、それ以降は分析可能な試料が

4. 調査試験結果とその考察

4.1 周辺の地形地質

調査地周辺は標高差 100m 程度の低丘陵が広がり、広域で見ると北東-南西方向に尾根が発達する。また、調査地の東側には稲見川が南北方向に走っている。調査地の広域的な地質は山口県下関市~萩市にかけて広く分布する白亜系の関門層群である(図-1)。その内、調査地周辺

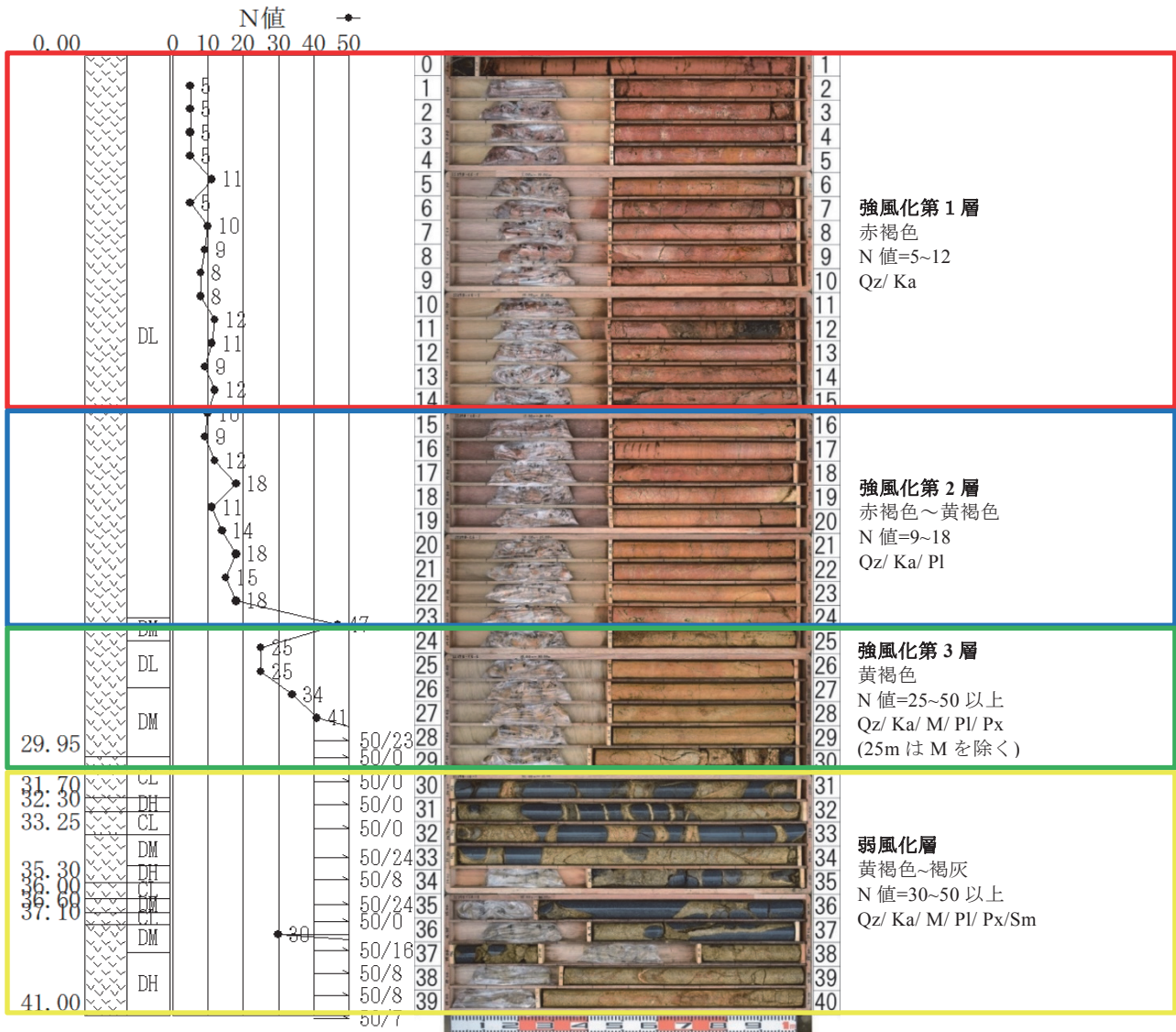


図-3 柱状図およびコア写真

(Qz : 石英, Ka : カオリナイト, Pl : 長石類, M : 雲母類, Px : 輝石類, Sm : スメクタイト)

は安山岩およびデイサイト質～流紋岩質凝灰岩の火山岩優勢層からなる下関亜層群上部層(Ksv)が分布するとされる。現地観察結果では風化はしているものの凝灰岩、安山岩が広く分布していることが認められ、凝灰角礫岩、砂岩等も一部認められる。自然斜面での表層部にはこれら地質が赤褐色に風化した粘性土が分布する。

4.2 ボーリング結果

ボーリングの結果から、調査地全体が深部まで強風化しているということが分かった(図-2)。山体の中央で実施した SI29B-C6-5 の柱状図とコア写真を図-3 に示す。

GL-20m 付近までの N 値は 5～20 程度と低く、深部まで強風化している。この深層風化部の岩級区分は DL 級とし、さらに N 値 10 を境に強風化第 1 層と強風化第 2 層に区分した。コアの色彩は表層に近いほうが赤褐色で、深くなるにつれて黄褐色になっていく。強風化第 1 層は赤褐色、強風化第 2 層は黄褐色を呈する傾向がある。また、SI29B-C6-5 孔では、GL-30.0～37.0m は新鮮な岩塊に挟まれたマトリックス部分は黄褐色に風化変質している。

なお、このボーリング孔では掘削中～掘削後に有意な孔内水位は認められていない。

4.3 土質試験結果

土質試験結果の一覧を表-2 に示す。土の湿潤密度試験より得られた自然含水比は S-1, 2 で 55.5%、S-7, 8 で 36.2%であった。

粒度分布 S-1, 2 は粘土、シルト分が 98%、S-7, 8 は粘土、シルト分が 85.9%を占めている。図-4 に示すように、全体的に細粒分が多く、粒径 0.01～1.0mm に集中している。

S-1, 2 の液性限界は 63.7%、塑性限界は 30.0%で塑性指数は 33.7 であることから、分類としては粘土(高液性限界)の(CH)に分類された。S-7, 8 の液性限界は 39.2%、塑性限界は 22.7%で塑性指数は 16.5%であることから、分類としては砂まじり粘土(低液性限界)の(CL)に分類された。図-5 の塑性図ではいずれも A 線上にプロットされた。

4.4 スレーキング試験結果

経過時間とスレーキング区分の関係を示した結果を図-6 に示す。また、試験の経過を水浸前と水浸後 24 時間を対比させた代表的な写真を図-7～図-9 に示す。

SI29B-C6-5 では、GL-24.5m を除く 7 試料がスレーキング指数 4 を示す結果となった。スレーキングの過程をみると、GL-12.5～22.5m の試料は水浸させてから 20 分以内に区分 4 に達している。26.5m が区分 4 に達したのは水浸後 1 時間であった。GL-24.5m の

表-2 土質試験結果一覧

試料番号 (深さ)		S-1,2 (8.00~10.00m)	S-7,8 (21.00~23.00m)
一般	湿潤密度 ρ_t g/cm ³	1.690	1.861
	乾燥密度 ρ_d g/cm ³	1.087	1.366
	土粒子の密度 ρ_s g/cm ³	2.741	2.734
	自然含水比 w_n %	55.5	36.2
	間隙比 e	1.522	1.001
	飽和度 S_r %	100.0	98.9
粒度	石分 (75mm以上) %		
	礫分 (2~75mm) %	0.0	0.0
	砂分 (0.075~2mm) %	2.0	14.1
	シルト分 (0.005~0.075mm) %	42.6	51.8
	粘土分 (0.005mm未満) %	55.4	34.1
	最大粒径 mm	0.250	0.425
コンシシ 特性	液塑性限界 w_L %	63.7	39.2
	塑性限界 w_p %	30.0	22.7
	塑性指数 I_p	33.7	16.5
分類	地盤材料の 分類名	粘土 (高液性限界)	砂まじり粘土 (低液性限界)
	分類記号	(CH)	(CL-S)

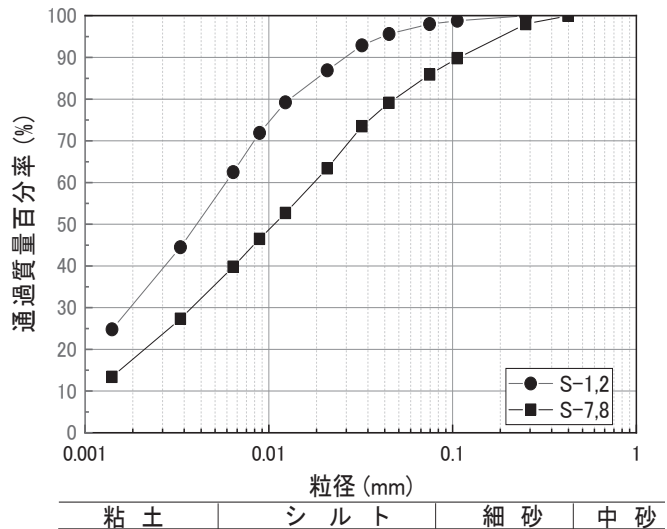


図-4 粒径加積曲線図

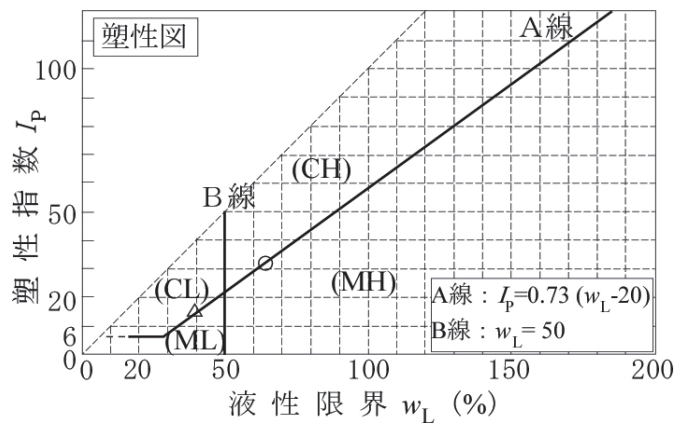


図-5 塑性成図 (○ : S-1, 2 △ : S-7, 8)

関門層群における強風化安山岩のスレーキング特性および切土斜面表層の脆弱化に関する検討

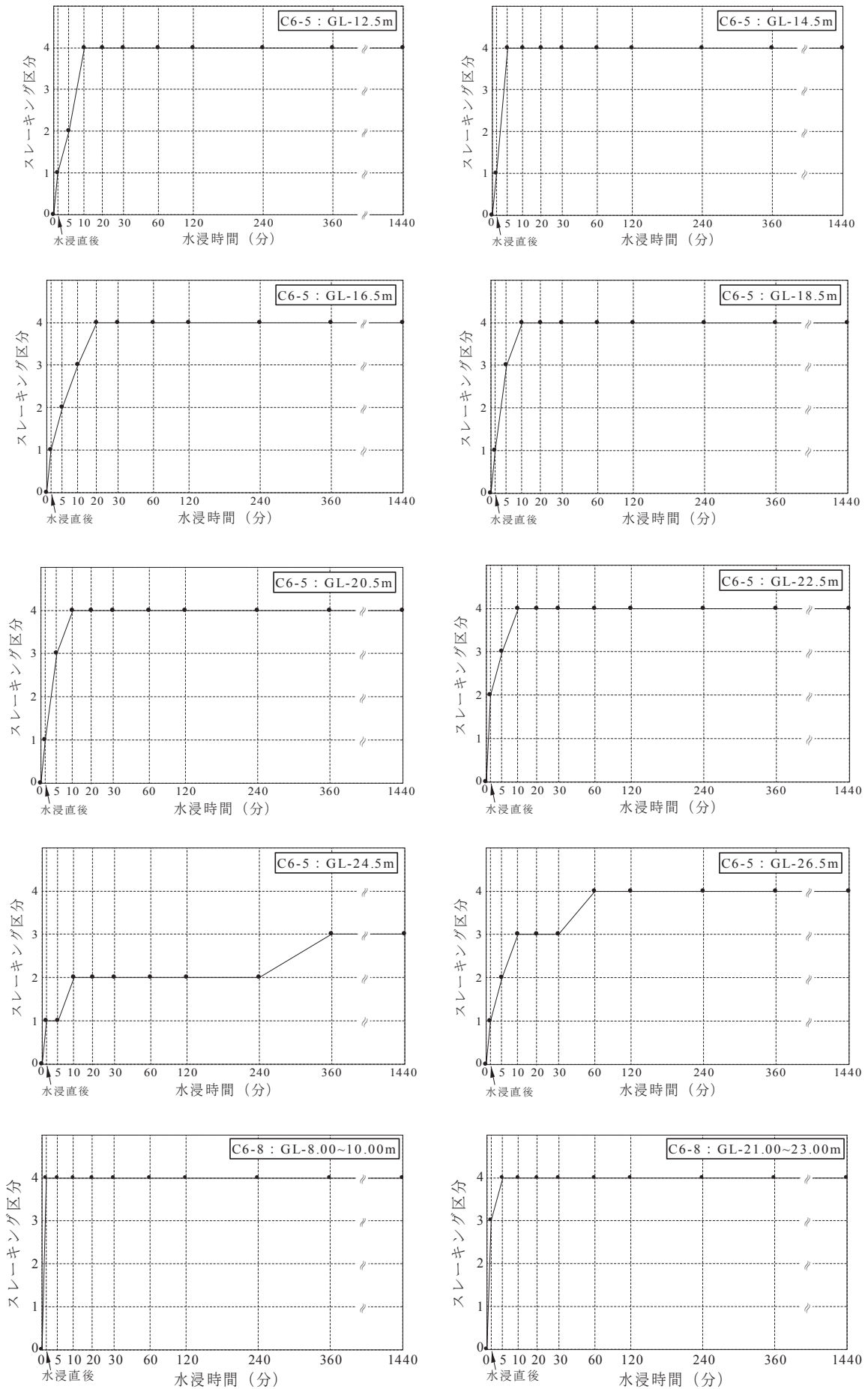


図-6 時間経過とスレーキング区分関係図

試料は水浸させてから4時間後まで区分2を保ち、6時間後に区分3を保ったまま24時間経過した(図-9)。

SI29B-C6-8では、GL-8.00~10.00m(S-1,2)は水浸直後から急速にスレーキングが進み区分4に達した。GL-21.00~23.00m(S-7,8)も水浸直後から一部を残してスレーキングが進み、5分後には区分4に達した。

スレーキング試験におけるSI29B-C6-5の各段階の含水比の一覧を表-3に示す。スレーキング指数4のサンプルのセルを着色してある。含水比に着目してみると、初期含水比 w_1 においてスレーキング指数4の試料は約13~32%、スレーキング指数4以下の試料は10%であった。浸水前含水比 w_2 において、スレーキング指数4の試料は0.5~1.3%、スレーキング指数4以下の試料は1.6%であった。水浸24時間経過後の含水比 w_3 において、スレーキング指数4の試料は73.6~100.6%、スレーキング指数4以下の試料は40.4%であった。

4.5 X線回折試験結果

X線回折試験により得られた粘土鉱物を図-3中に示している。

含まれる鉱物は石英・カオリナイト・長石類・雲母類・輝石類・スメクタイトであった。含有鉱物の組合せは深度毎に以下の傾向が認められた。GL-0.0~15.0mは石英・カオリナイト、GL-15.0~24.0mは石英・カオリナイト・長石類、GL-24.0~25.0mは石英・カオリナイト・長石類・雲母類・輝石類、GL-25.0~30.0mは石英・カオリナイト・長石類・雲母類・輝石類・雲母類、GL-30.0~40.0mは石英・カオリナイト・長石類・雲母類・輝石類・スメクタイトであった。GL-24.0~25.0mの1点をGL25.0~30.0mの派生とすると、図-3に示す4つにグルーピングすることができた。

5. 考察

5.1 土質試験の特性

地下水位はボーリング孔内測定では認められなかったが、採取されたコア試料の自然含水比は36.2~55.5%と高く、山体は非常に湿潤した状態であると推定される。また、粒径加積曲線、塑性図からも透水性の小さい粘性土であることがわかる。一方、ボーリング中には削孔水を用いていることを考慮すれば、孔内からは周辺に逸水浸透しており、孔周辺からは供給される圧力水頭を持った地下水はないものと推定される。また、深部は完全に風化していないため、砂混じり粘土程度だが、表層近くになるとほぼ砂分はなくなり、完全に粘土となることがわかった。したがって、降雨が鉛直方向に浸透し難い状況であるものと推定される。

5.2 スレーキング特性

各段階の含水比の結果から、スレーキング指数4にな

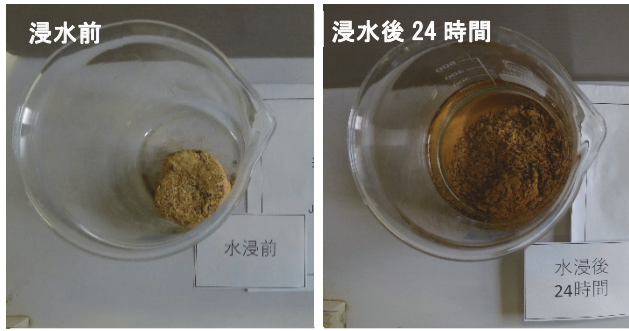


図-7 SI29B-C6-5 水浸前と水浸後 (GL-26.5m)

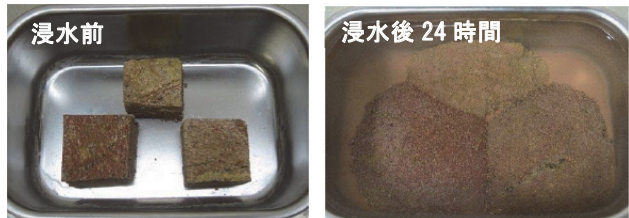


図-8 SI29B-C6-8 水浸前と水浸後 (GL-8.0~10.0m)

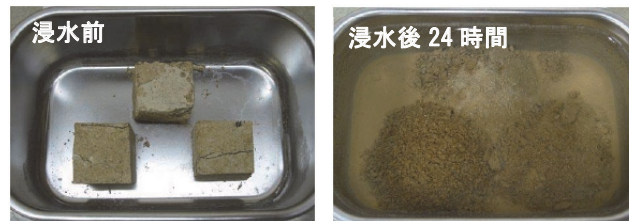


図-9 SI29B-C6-8 水浸前と水浸後 (GL-21.0~23.0m)

表-3 SI29B-C6-5 ボーリングコア土試料の段階別含水比

深さ(m)	w_1 (%)	w_2 (%)	w_3 (%)
12.5 m	30.57	1.26	84.73
14.5 m	21.96	1.30	100.60
16.5 m	28.31	1.21	93.89
18.5 m	31.80	1.33	97.63
20.5 m	12.92	0.45	100.54
22.5 m	27.08	0.71	98.30
24.5 m	10.93	1.58	40.37
26.5 m	19.77	1.14	73.58

※ w_1 :初期含水比, w_2 :水浸前含水比, w_3 :水浸24時間経過後含水比

る試料は、水浸前後の含水比の値から初期含水比に関わらず、乾燥しやすいという特徴が認められた。スレーキング指数4の試料でもスレーキング指数3の試料の初期含水比の値に近いものがあるが、水浸前の乾燥させた後の含水比に違いがでる。スレーキング指数4の試料はいずれも1.3%以下になったが、スレーキング指数3の試料は1.6%までしか下がらない結果となった。これらの値は、スレーキングを起こす試料が保水能力はそれほど高くなく、蒸発・吸水をしやすい特性を示す。現場に置き換えて考えてみると、切土斜面が空気に触れるようになって、表層の水分が蒸発し含水比が低下する。そこに降雨による給水がされた場合、表層からスレーキングが進行し、表層部が崩壊する可能性がある。以上の特徴から、施工上のポイントとして以下の2点が挙げられる。

- (1) 法面保護：降雨時に表土流出および小崩壊の発生が懸念されるため、切土後早急に法面を保護することが

望ましい。また、保護工に引張り強度を有するものを適用することで、スレーキングを防ぐことが可能である。

- (2) 排水処理：降雨時の排水処理に留意する必要がある。法面保護後も地山から法面表層へ向かって給水がされない限り、乾燥によって含水比が小さくなるのが想定される。もし、乾燥後に降雨や地下水位の上昇等によって法面表層への給水があると、構造物と接する法面表面の表土が流出し、構造物と地山に隙間ができる可能性があるため、その抑制の観点から、水路や水抜パイプの設置が必要である。

5.3 X線回折試験の結果

5.3.1 風化について

図-3の4つにグルーピングした結果では、風化の程度が小さい深部の方が含有鉱物の種類が多く、風化の程度が大きい地表近くは含有鉱物の種類が少ないという結果が得られている。

風化の程度が表層近くでは大きくなり深部では小さくなるように漸移している要因は、グルーピングした鉱物の組合せに深度による逆転がみられないこと、N値は表層近くでは小さく深部では大きくなっていることから、クラックに沿って化学的風化および物理的風化が表層から進行した影響が大きいと考える。鉱物の風化プロセスとしては新鮮なコアストーンに含まれる長石類や輝石類が化学的風化作用を受けることにより、雲母類（イライト）、スメクタイト、カオリナイトが生成される。さらに風化が進行すると、スメクタイトはカオリナイトやイライトに変化し、長石類も風化作用で分解され、カオリナイトなどに変化した可能性も考えられる。

5.3.2 風化程度とN値・色調の関係について

図-3の4つのグループとそれに対応するN値とコアの関係では、4.2ボーリング結果と同様な結果が認められた。ボーリングコアの岩級区分評価と異なる点はGL-0.0~24.0mに分布するDL級強風化部を、鉱物組合せとN値により、第1層と第2層に分割した点である。第1層（赤褐色系）はN値が小さく含有粘土鉱物が2種、第2層（黄褐色～褐灰色）はN値が比較的大きくなり、含有鉱物も3種であることが分かった。以下にグループごとにN値・コアの色調・含有鉱物の組合せについてまとめる。

GL-0.0~15.0の色調は赤褐色、N値は5~12、含有鉱物組合せは石英とカオリナイト、GL-15.0~24.0mの色調は赤褐色～黄褐、N値は9~18、含有鉱物組合せは石英・カオリナイト・長石類、GL-25.0~30.0mの色調は黄褐色、N値は25~50以上、含有鉱物組合せは石英・カオリナイト・長石類・雲母類・輝石類であった。そのうちGL-24.0~25.0mの1点のみ雲母類が含まれないが、コアも前後が砂質シルト状コアなのに対して、シルト質砂状コアであり、N値も47に上がっているため、若干性質が異なる。GL-30.0~40.0mの色調は黄褐色～褐灰でN値は30~50

以上、含有鉱物組合せは石英・カオリナイト・長石類・雲母類・輝石類・スメクタイトであった。

以上の結果より、N値と色調は風化の程度に相関があることが示唆された。なお、満下⁸⁾が数値化された色彩測定結果は風化区分および物性値評価に有効であることを報告していることから、今後は関門層群のケースでも適応可能か検討したい。もし適応できれば、より簡易的な物性値判断が可能になり、有効な手段になると考える。

6. まとめ

本研究で検討した2点の結果を以下に要約する。

- (1) 関門層群における強風化安山岩を3つに大別した。表層に最も近い強風化第1層は近く完全に風化した赤褐色の粘性土(CH)で、N値は5~12のDL級である。強風化第2層は赤褐色～黄褐色で、N値は9~18のDL級である。強風化第3層は黄褐色の砂まじり粘性土(CL-S)で、N値は25~47である。
- (2) 関門層群における強風化安山岩は自然含水比が高く、乾燥させれば容易に蒸発する。また、深度を問わず水浸させると数分~1時間程度で完全にスレーキングするケースが多く、急速にスレーキングを起しやすいう性質を有している。

謝辞

国土交通省山口河川国道事務所からボーリングコアを提供いただいた。また、応用地質株式会社・上野将司氏から有益なご教示とご助言をいただいた。ここに、深く感謝の意を表す次第である。

参考文献

- 1) Kochi, Y., Yamamoto, T., Suzuki, M., Nishikawa, T. : Characteristics of Landslide and failure with their Countermeasure in Kanmon-group Slopes, Yamaguchi prefecture, Western Japan, Journal of the Japan Landslide Society, Vol.41, No.2, 172~181, 2004.
- 2) 西村裕二郎, 今岡照喜, 金折裕司, 亀谷敦 : 山口県地質図 第3版(15万分の1)説明書, 山口地学会, 2012.
- 3) 歌田実, 澤田臣啓 : 西日本, 関門層群(白亜紀前期)の変質作用, 地質学雑誌, Vol.111, pp.206-216, 2005.
- 4) 山本哲朗, 鈴木素之, 福岡正人, 宮内俊彦, 岡林茂生, 瀬原洋一 : すべり面上の光沢質黒色薄層土に起因した斜面崩壊, 土と基礎, Vol.48, No.7, pp.24-27, 2000.
- 5) 山本哲朗, 鈴木素之, 吉原和彦, 宮内俊彦 : 不連続面上の光沢質黒色薄層土に起因した斜面崩壊と設計強度定数, 地すべり, 第37巻, 第4号, pp.49-57, 2001.
- 6) 山本哲朗, 鈴木素之, 武田直樹, 江野本昭夫, 池田

智子, 河内義文: 関門層群からなる切土斜面の崩壊について, 土と基礎, Vol.52, No.11, pp.41-43, 2004.

- 7) 地盤工学会基準案: 岩石のスレーキング試験方法および岩石の促進スレーキング試験方法, 土と基礎, Vol.53, No.11, 2005.11.
- 8) 満下淳二, 石沢一吉, 遠藤司, 武内俊昭: 岩石の色

彩特定と風化区分および物性値評価への応用に関する検討, 応用地質, 第 38 巻, 第 6 号, pp.370-385, 1998.

(2019年6月21日 受付)