

半世紀にわたる泥岩切土法面の風化過程と法面安定への影響

永田政司¹, Sharmily BHOWMIK², 菊本 統³, 藤原 優⁴, 佐藤尚弘⁵

- 1 中日本高速道路・東京支社 保全・サービス事業部（横浜国立大学・都市イノベーション学府）
- 2 横浜国立大学・都市イノベーション学府
- 3 横浜国立大学・都市イノベーション研究院
- 4 西日本高速道路・技術本部 技術環境部
- 5 明治コンサルタント

概 要

泥岩をはじめとする堆積軟岩は、切土掘削により地表に露出すると時間経過とともに風化が進行し、長期間が経過した切土法面はしばしば表層崩壊を引き起こしている。そのため、堆積軟岩で構成された切土法面の風化の進展と安定性の変化を把握し、適切に対策することは重要な課題になっている。しかし掘削後、数十年にわたって堆積軟岩の風化過程を観察した事例は過去にない。本研究では、著しい風化が確認された泥岩切土法面を対象として、掘削から約50年にわたって弾性波探査等の現地調査や土質試験、X線回折分析を行い、法面の風化機構と安定性への影響を検討した。その結果、法面表層では掘削直後の除荷に伴う応力解放や乾湿繰返しの影響による強度低下を生じる一方で、泥岩を構成する粘土鉱物の酸化や溶解等の化学変化は途中段階にあるため、化学的風化は50年経過後も経時的に進行することが示唆された。

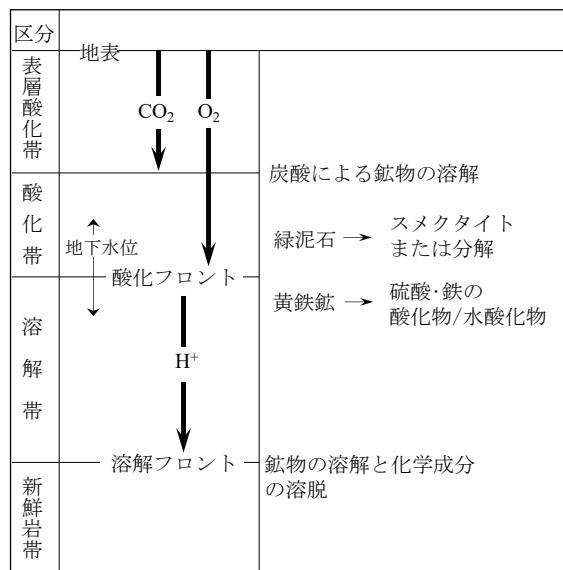
キーワード：切土法面、泥岩、風化、弾性波探査、法面安定

1. はじめに

1965年に名神高速道路が開通して以来、9500 kmを超える延長の高速道路網が全国に整備されてきたが、総延長の約7割は切土や盛土といった土工構造物で構成されている。日本の国土は約2/3が山地で、泥岩や凝灰岩等の風化しやすい堆積岩が広く分布するため、多くの切土法面は脆弱な岩で構成されている。高速道路に関して言えば、切土法面の約半数は供用後30年以上が経過しており¹⁾、建設後、数十年間にわたって安定を保ってきた切土法面でも、徐々に風化が進行して表層崩壊等の変状を生じるケースが顕在化している。このような切土法面では、掘削時の応力解放により物理的風化が進み²⁾、さらに露出した法面から時間をかけて化学的風化も進展したことが原因と推察される。そのため、長期供用を経た切土法面を効果的に維持管理していくためには、風化しやすい堆積岩の長期的な風化挙動を把握し、変形・強度特性の変化を予測した上で、切土法面を長期かつ戦略的に保全していくことが重要である。しかし、切土法面はサイトごとに地質や地質構造が異なるため、風化進行度や風化が安定性に及ぼす影響には未解明な点が多い。

既往研究では、泥岩など堆積岩の化学的風化や物理的風化について幾つかの調査・分析が行われてきた。これらの研究では、X線回折分析(XRD)や蛍光X線分析(XRF)

等により泥岩の化学的風化過程に関する分析が行われ、岩石を構成する粘土鉱物のうち、黄鉄鉱の酸化による硫酸の生成が化学的風化に大きく関与することが示されている³⁾⁻⁷⁾。また、黄鉄鉱の酸化が方解石の溶解を促進させる可能性や⁵⁾⁶⁾⁷⁾、緑泥石の性質変化（一部の研究ではスメクタイトに変化すると説明）³⁾⁴⁾⁶⁾に関与することを示している。そして、これら化学的風化により地盤の強度が低下する可能性が指摘されている。千木良³⁾⁸⁾は、このような泥岩の化学的風化のメカニズムを図解し（図1）、泥岩の風化帯は基本的に表層から深部に向かって、表層酸化帯、酸化帯、溶解帯、新鮮岩帯に分けられ、重要な化学的風化作用はこれらの層の境界となる酸化フロントと溶解フロントで起こると説明した。一方、物理的風化に関しては、スレーキング試験等により乾湿繰返しの作用で地盤強度が低下することを確認するとともに、化学的風化と関連させた分析が行われている⁶⁾⁷⁾⁹⁾。津田ら⁷⁾は、島尻層泥岩切土法面の建設時および約30年後の標準貫入試験結果(N値)から換算した一軸圧縮強度を比較することにより、地下水位以浅における風化による強度低下を確認した。また、スレーキング試験やXRD、走査電子顕微鏡(SEM)による分析により風化プロセスを考察し、地下水位の変動域において乾湿繰返しに伴うスレーキング(物理的風化)や方解石等の鉱物類の溶出(化学的風化)が同時に進行し、地盤の強度を低下させた可能性を指摘している。このように泥岩材料

図 1 化学的風化のメカニズム⁸⁾

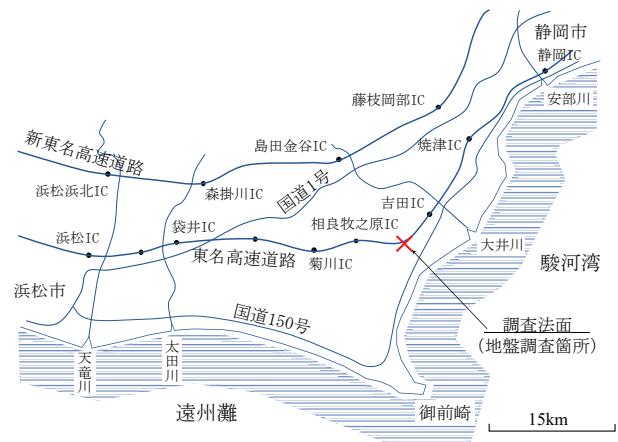
の風化について、粘土鉱物の組成の変化や、採取した岩石試料の色調、強度の違いを調べることにより泥岩の風化機構が明らかにされてきた。一方、高速道路では、新鮮な岩盤が地表に露出して風化が始まった時期を明確に規定できる切土法面に対して、全国 96 箇所を選定して法面の観察や物理探査（速度検層、弾性波探査）が継続的に実施されてきた^{10)~13)}。一連の研究では、法面表層付近の弾性波速度が経時に低下することを明らかにしているが、風化による鉱物組成やせん断強度の変化と関連付けた検討はこれまでになかった。

これに対して、本研究では風化が著しい泥岩で構成される切土法面（以下、泥岩切土法面と呼ぶ）を対象として現地調査と室内試験を実施し、掘削から約 50 年にわたる長期的な風化現象について、鉱物の性質や物性、せん断強度等の分布の調査結果に基づいて時間的、空間的な風化の進展を考察した。そして、泥岩の風化が切土法面の長期的な安定に与える影響を検討した。

2. 対象法面の概要

2.1 法面の位置および地形・地質

著者らは、東北地方から中部、関西、中国、九州・沖縄まで全国の高速道路沿線の 96 箇所の切土法面に対する弾性波探査等の調査結果をもとに、切土法面の風化過程について検討を行なってきた^{10)~13)}。これらの切土法面は新生代第四紀から新第三紀、古第三紀、中古生代の堆積岩や変成岩、火成岩で構成される。このうち、本論文では著しい風化の進行が確認された東名高速道路の泥岩切土法面を対象とする。対象は図 2 に示す吉田 IC～相良牧之原 IC 間にある切土法面（以下、調査法面と呼ぶ）で、比高 50~100 m の山塊が連続し起伏に富んだ牧之原台地に代表される丘陵部に位置しており、調査法面の施工完了年は 1968 年である。なお、本論文では施工完了年からの経過年数を t で示す。図 3 に調査法面の平面図、横断図、地質横断図を



(a) 位置図



(b) 建設当時の空中写真（文献14）に加筆

図 2 調査法面の位置と空中写真

示す。当該地は、両切りで道路が建設された区間であり、調査法面は上り線側に位置する。法面段数は 6 段で、法面勾配は概ね 1:1.0 であり、植生により法面保護されている。地質は、新第三紀中新世相良層群の泥岩が優勢な砂岩泥岩互層であり、地層は(c)図に示すように受け盤構造である。調査法面は、降雨により 2013 年に表層の一部が崩壊した履歴がある。なお、下り線側の法面は流れ盤であり、法面内の断層の存在も影響して建設中に大規模な崩壊が三度発生したため、排土工や法面保護工が施されている¹⁵⁾。

2.2 切土掘削前の地盤の状態

調査法面で建設前に行われた調査ボーリング BH 0 について図 3 (b)に位置、表 1 に柱状図に基づく土質区分や N 値の深度分布を示す。BH 0 は、測線 A と B の間のり尻付近において地表から鉛直方向に実施された。土質分類は、地表から 3 m まで茶～黄褐色化した粘土が主体で、自然含水比 W_n は 6~24 %、N 値は 15~48 である。一方、3 m 以深は、暗灰色の軟岩（泥岩）が確認されており、深さ約 10 m の自然含水比 W_n は 9 %程度、N 値は 62~124（70 以上は換算値）である。切土掘削前の地盤の状態は、地表から 3 m 程度は風化した泥岩であり、それ以深は新鮮な泥岩が存在していたと考えられる。

2.3 調査法面における追跡調査

表 2 に調査法面で実施している追跡調査の内容を示す。

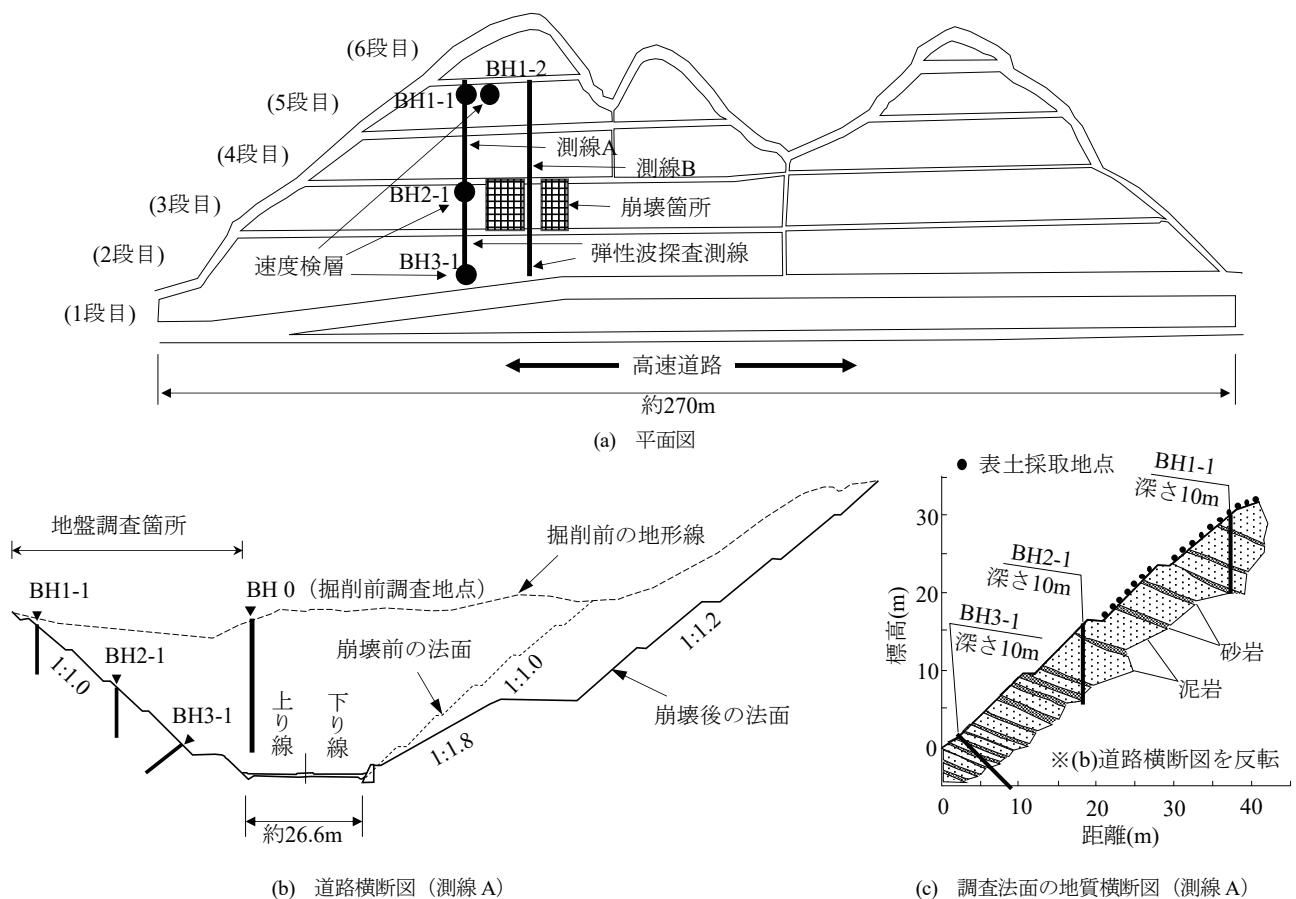


図 3 調査法面の平面図、横断図、地質横断図

表 1 調査法面における建設前の地盤調査結果 (BH 0)

深度 (m)	現場観察による分類	色調	標準貫入試験	
			試験深度(m)	N値*
0.0-0.6	粘土	茶褐色	—	—
0.6-1.5	粘土混じり砂礫	茶褐色	1.3	15
1.5-3.0	固結粘土	黄褐色	2.3	48
3.0-	軟岩	暗灰色	3.3	57
			4.3	62
			11.1	124
			18.1	111
			22.1	124

※70より大きいものは換算値

2.4 調査法面における追跡調査

表 2 に調査法面で実施している追跡調査の内容を示す。追跡調査は 1970 年 ($t=2$)、1977 年 ($t=9$)、1984 年 ($t=16$)、2017 年 ($t=49$) の 4 回実施しており、法面観察、弾性波探査および速度検層により法面の経年的な変化を確認した。なお、 t は施工完了からの経過年数である。法面観察では、高速道路建設後、間もなく実施した初回の調査から継続して、植生の状態や法面の変状を写真やスケッチ等で記録している。弾性波探査および速度検層については法面に 2~3 測線を設定して、同一箇所を継続的に調査してきた。

図 4 は 1970 年 ($t=2$)、1977 年 ($t=9$)、1984 年 ($t=16$)、2000 年 ($t=32$)、2016 年 ($t=48$)、2017 年 ($t=49$)

表 2 追跡調査の内容

調査内容	調査時期			
	1970年 (33箇月)	1977年 (117箇月)	1984年 (198箇月)	2017年 (595箇月)
法面観察	○	○	○	○
弾性波探査	○	○	○	○
速度検層	—	○	○	○

に撮影した調査法面の全景写真である。写真のように切土後、年月の経過とともに自然遷移による樹林化が進行している。樹木が根を張ることで表層地盤が補強される一方で、風化がさらに進行して軟質化していることも予想される。なお、2017 年には法面排水施設の更新工事のために樹木が伐採されたが、その後、植生は回復している。図 5 は、1984 年および 2017 年の調査時に撮影した法面表土とボーリングコアである。切土掘削直後の表層部の岩質区分は軟岩であったが 1984 年には角礫状または粘土状に変化しており、2017 年の調査時も同様の傾向であった。深度 2.10~3.05 m のボーリングコアは、わずかに亀裂を含むが、概ね棒状を呈する部分が多い。コアの亀裂面は褐色化しており風化の兆候が確認される。このように、調査法面で採取した試料からは切土掘削から約 50 年を経て地表から風化が深さ方向に明瞭に進行していることが確認された。

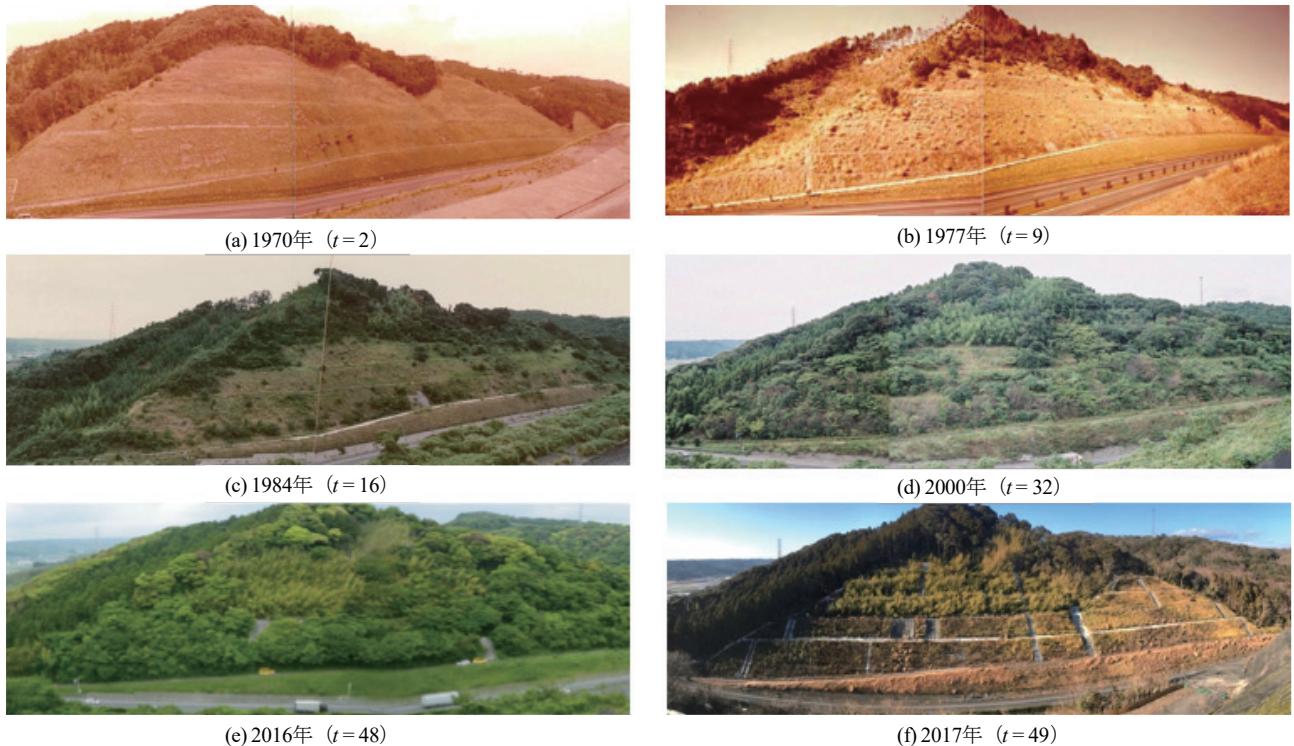


図 4 調査法面の全景写真



図 5 調査法面の表層部およびボーリングコア（地表から2.10～3.05 m）の状態

3. 岩盤の風化機構の検討方法

岩盤の風化は、岩石が地表面付近で水や空気、太陽熱の作用を受けて分解変質する過程である。風化作用は発生原因によって、(a) 切土等による除荷や乾湿繰り返し、加熱冷却などによる物理的風化、(b) 酸化・還元・溶脱等の化学的風化に大別される¹⁶⁾。実地盤では、これらの風化作用が必ずしも別々に作用するのではなく相互に影響を及ぼし合っている。例えば、岩盤斜面では物理的風化によってゆるみと細片化が生じると水が浸透しやすくなつて化学的風化も促進されるし、化学的風化が進むと岩石の空隙率が増大して脆くなり、より深部まで物理的風化作用を受けやすくなつて風化が進むと考えられている¹⁷⁾。ここでは、まず弾性波探査および速度検層により地盤剛性の経年変化を求め、切土掘削時の応力解放や乾湿繰り返しによる亀裂の発達や密度低下の影響について検討した。さらに、現場から採取した泥岩試料を用いた各種の室内試験をもとに、化学的および物理的風化機構について議論した。調査

内容の一覧を表 3 に示す。

3.1 現位置試験

(1) 試料採取と標準貫入試験

4つのボーリング孔の位置を図 2 に示す。BH 1-1 と BH 1-2 は切土法面の 5 段目であり、互いの距離は 1.0 m 以内である。BH 2-1 は 3 段目、BH 3-1 は 2 段目に位置する。試験用試料は、BH 1-1, BH 1-2 および BH 2-1 の 3 つのボーリング孔と測線 A 上の 4～6 段目の法面表面から採取し、各種の室内試験により力学的性質や鉱物特性を確認した。BH 1-1 では、JIS A 1219 に従って標準貫入試験を実施し、搅乱試料を取得した。ただし、詳細なデータを得るために N 値の計測間隔は 0.5 m とした。BH 1-2 と BH 2-1 では、オールコアボーリングにより地表から約 10.0 m の深さまで不搅乱試料を採取した。測線 A 上の表層部の試料は、地表から 20 cm 程度の深さからスコップで採取した。なお、BH 3-1 は初回の追跡調査時に掘削した速度検層用の調査

表 3 地盤調査内容の一覧

区分	内容	測線A					測線B
		BH1-1	BH1-2	BH2-1	BH3-1	法面表層部	
現位置試験	試料採取	搅乱試料	不搅乱試料	不搅乱試料	-	搅乱試料	-
	標準貫入試験	○	-	-	-	△	-
	速度検層	-	○	○	○	-	-
	密度検層	-	○	○	-	-	-
	弾性波探査（屈折法）	測線A及び測線Bで実施					
室内試験	粉末X線回折	○	-	○	-	○	-
	pH試験	○	-	○	-	○	-
	密度及び含水比試験	○	○	○	-	-	-
	一軸圧縮試験及び針貫入試験	-	○	○	-	-	-
	多段階三軸圧縮試験	-	○	○	-	-	-

孔である。

(2) 速度検層および密度検層

速度検層¹⁸⁾は、測線 A 上の BH 1-2, BH 2-1, BH 3-1 において実施した。ダウンホール法 (JGS 1122-2012) により地中の弾性波 (P 波, S 波) 速度を計測し、法面内部の泥岩の剛性率やポアソン比、ヤング率を得た。1 箇所当たりの最大測定延長 10 m, 測定間隔は 0.5 m である。なお、速度検層は BH 1-2 と BH 2-1 では 2017 年 ($t=49$) に実施しており、BH 3-1 では 1970 年 ($t=2$), 1977 年 ($t=9$), 1984 年 ($t=16$) および 2017 年の 4 回にわたって実施している。密度検層¹⁹⁾は BH 1-2 と BH 2-1 で実施し、調査孔周辺の原位置密度を計測した。孔壁崩壊による密度計測結果への影響を考慮するために孔壁検層により孔径を深度方向に連続的に測定し、密度の補正に用いた。

(3) 弾性波探査（屈折法）

弾性波探査²⁰⁾は、1970 年 ($t=2$), 1977 年 ($t=9$), 1984 年 ($t=16$), 2017 年 ($t=49$) に実施した。ハンマーで地震波を発生させ、図 2 に示す測線 A と B に沿う屈折波を観測することで、P 波と S 波の速度を求め、切土法面の剛性の分布を得た。各々の測線延長は 34.5 m であり、受振器を 1.5 m 間隔で配置して 24 成分の観測器を用いて屈折波を計測した。いずれの計測結果もはぎとり法解析 (萩原の方法)²⁰⁾と呼ばれる岩盤内の弾性波速度を求めるための層構造解析手法により弾性波速度の分布を図化したが、2017 年の結果についてはトモグラフィ解析²⁰⁾により弾性波速度の詳細な 2 次元等高線図も得た。なお、弾性波探査は降雨の少ない時期の晴天日に実施し、車輌通行による影響を除外するため、車輌通行のないタイミングで実施した。また、追跡調査は極力、過去の調査実施者が行い、人為的な差異を生じないよう留意した。

3.2 室内試験

(1) 鉱物分析

泥岩の鉱物組成は粉末 X 線回折により分析した。BH 1-1, BH 2-1 の試料と法面 4, 5, 6 段目の表層部（深さ 0.2 m 程度）から採取した試料を分析した。供試体は、採取した試料が熱で変質しないように 40°C で 24 時間以上、低温炉乾燥した後に、粉末にして 53 mm のふるいにかけた。試

料に含まれる粘土鉱物は、Ulrey and Drees²¹⁾および Moore and Reynolds Jr.²²⁾の手法を参考にして、以下の手順で同定した。

まず、回折角 2θ と回折強度 I の関係を表す回折パターンをもとに各粘土鉱物の回折角 2θ に対応する格子面間隔 d (d00l(Å)) を算出し、データベースと照合することで粘土鉱物の有無を特定した。存在が確認された粘土鉱物 i に対しては、回折ピーク I^i から相対的な含有量 I_r^i を次式により求めた。

$$I_r^i = \frac{I^i}{I_{max}^i} \times 100 (\%) \quad (1)$$

ここに、 I_{max}^i は全試料の I^i の最大値である。粘土鉱物の含有程度は、回折ピークを明瞭に判別できる $I_r^i \geq 10$ の範囲が三等分されるように閾値を設定し、粘土鉱物を含有しない、少量含有する ($0 \% < I_r \leq 40 \%$)、中程度含有する ($40 \% < I_r \leq 70 \%$)、多量に含有する ($70 \% < I_r \leq 100 \%$) の 4 段階に分類し、風化作用による粘土鉱物の含有量の変化を新鮮岩部と比較しながら議論した。なお、XRD による分析の再現性については、同じ粉末試料に対して複数回の分析を行い、ほぼ同じ回折パターンが得られることを確認している。

(2) 物理試験

物理試験では、JGS 0211:2009 に記載された方法に従い、BH 1-1, 2-1 および法面の表層部から採取した試料の pH 試験を実施した。BH 1-2 および BH 2-1 から採取した試料の含水比は JIS A 1203:2009、湿潤密度は JIS A 1225 に従って求めた。

(3) 力学試験

法面を構成する泥岩のせん断強さの深度分布を知るために、BH 1-2 および BH 2-1 で採取した不搅乱試料を用いて一軸圧縮試験および多段階三軸圧縮試験 CU を行った。一軸圧縮試験は JGS 2521:2009 に従うこととしたが、円柱供試体を取得できない部分は JGS 3431:2012 に従つて机上型の針貫入試験を行い、針貫入勾配 N_p から一軸圧縮強度 q_u を換算した。換算には次の相関関数を用いた²³⁾。

$$\log q_u = 0.978 \log N_p + 2.621 \quad (2)$$

ここに、 q_u は一軸圧縮強度 (kN/m²)、 N_p は針貫入勾配 (N

表 4 試験条件

項目	内 容
試験方法	多段階三軸圧縮試験 CU
試料採取部位	BH1-2, 深さ0.60m, 1.75m, 4.47m BH2-1, 深さ0.61m, 1.72m, 3.39m
試験条件	セル圧 σ_c (kN/m ²): 150, 200, 300, 500 残留時 300, 200, 150 背圧 u_b (kN/m ²): 100.0 圧密応力 σ' (kN/m ²): 50, 100, 200, 400, 残留時 200, 100, 50

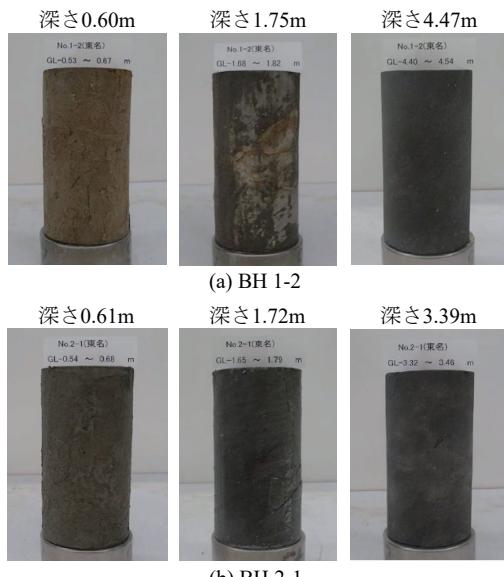


図 6 試験前の供試体

/mm)である。なお、針貫入試験は1深度毎に5つの岩片に対して行い、これらの平均値を用いて結果を分析した。

多段階三軸圧縮試験は、Kovari and Tisa²⁴⁾の方法に従って実施した。この試験は、一つの供試体に対して拘束応力を変化させて複数回のせん断を行うことにより強度定数 c , ϕ を得るものであり、亀裂の多い岩石試料など供試体を複数個、作製して試験を実施することが困難な場合に有効である。表4に試験条件を示す。供試体は、BH 1-2およびBH 2-1のボーリング試料から、強風化部、風化部、新鮮岩部の3箇所を選定した。強度定数はピーク時と残留時について求め、両者を比較した。図6にBH1-2およびBH2-1の供試体の写真を示す。供試体の状態は、BH1-2の深さ1.75m(風化部)の表面に若干色調の異なる部位が確認されるが、一様の泥岩で構成されており、亀裂の少ない状態である。また、風化の程度が強い浅部ほど供試体の色調は褐色を帯びている。なお、試験時の間隙圧係数B値は初期載荷時において0.95~1.0であり、飽和条件下でせん断試験を行った。

4. 結果と考察

ボーリング孔から採取した試料の目視観察、鉱物分析および物理試験の結果に基づき、切土掘削から約50年にわ

表 5 BH1-1のボーリングコア等観察の結果

深度(m)	土質区分	色調	標準貫入試験 試料写真	標準貫入試験		
				試験 深度 (m) ^{*1}	N値 ^{*2}	
0.00-	強風化 泥岩	褐灰色		0.80	21	
				1.29	38	
1.35- 1.75	風化泥岩	帶褐灰色		1.74	83	
				2.15	150	
1.75- 2.00	風化細粒砂岩	褐灰色		2.64	188	
				3.21	68	
2.00-	弱風化 泥岩	暗灰色		3.69	88	
				4.13	300	
4.05-	泥岩	暗灰色		4.54	188	
				5.11	125	
10.07				5.60	167	
				6.09	188	
				6.60	150	
				7.09	188	
				7.58	250	
				8.07	375	
				8.58	250	
				9.09	214	
				9.54	214	
				10.04	214	

*1 試験区間の中心深度

*2 50より大きい値は換算値

表 6 BH2-1 のボーリングコア等観察の結果

深度(m)	土質区分	色調
0.00- 2.00	風化泥岩	帶褐暗灰色
2.00- 4.00	弱風化泥岩	暗灰色
4.00-		
	泥岩	暗灰色
10.00		

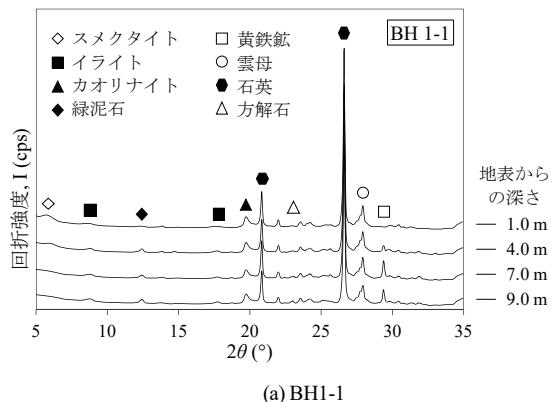
たる化学的および物理的風化の進行について検討した。化学的風化と物理的風化は、現象が複合的に進むことから、調査結果から各々を個別に評価することは困難であるため、これらの分析では以下の条件で各々の風化現象を特定した。

- (1) 化学的風化は、酸化や溶解等による化学的な鉱物特性の変化であり、XRDの鉱物分析とpH、目視でのボーリングコアの観察の3つの結果で特定した。
- (2) 物理的風化は、除荷や乾湿・温度変化による膨張収縮による亀裂進展や細粒化による剛性や強度の低下であり、弾性波探査や強度試験の結果で特定した。

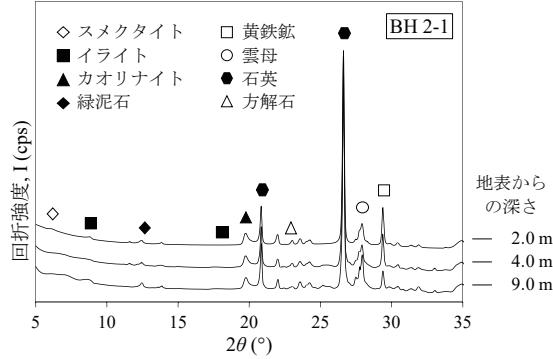
4.1 切土法面の化学的風化

(1) ボーリングコアの観察

表5および表6にBH 1-1とBH 2-1の土質区分、風化の



(a) BH1-1



(b) BH2-1

図 7 ポーリング孔深さ方向の XRD の結果

程度、色調およびN値の深度分布を示す。土質区分について、BH 1-1 の一部に砂岩が確認されるものの、総じて泥岩が主体である。どちらも深さ 4.0 m あたりまで風化しており、地表から 2m 程度までは泥岩の岩芯まで褐色を帯びており、2m から 4m 程度までは亀裂沿いに僅かな変色が確認される。それ以深は亀裂沿いの変色も少なく新鮮な泥岩が確認されている。色調は、風化部は鉄分の酸化によって褐色化した灰色であり、新鮮な部分は暗灰色である。BH 1-1 については、色調の変化が明瞭であり、切土法面の表層部が 2m 程度の深さまで強く風化していることが明らかである。表層部は 4.0 m 以深の新鮮部に比べて風化の程度が激しく、N 値も小さい。なお、切土掘削前の調査結果（表 2）では、当時の地表から 3 m 程度の深さまで泥岩が褐色化して明瞭に風化していたことがわかつている。このため、切土掘削前の地表面に比較的近い位置にある BH 1-1 は、掘削前から既にいくらか風化が進んでいたと予想される。一方、BH 2-1 は、切土掘削前の N 値が 100 を超え、色調が暗灰色の新鮮な軟岩であったのに対して、切土掘削後は法面表面から 2.0 m 程度の深さまで褐色を帯びていたことから、切土後に進行した風化現象を確認できる。

(2) 鉱物分析

図 7 および図 8 にポーリング孔 BH 1-1, BH 2-1 および法面表層部で採取した土試料の XRD 回折パターンを示す。また、表 7～表 9 にポーリング孔 BH 1-1, BH 2-1 および法面表層部の鉱物分析の結果を示す。図 7 および図 8 より、調査法面を構成する泥岩が含有する鉱物は石英、雲母、イライト、カオリナイト、スメクタイト、緑泥石、方解石およ

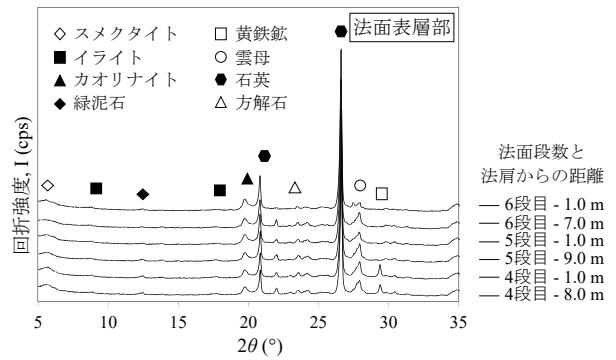


図 8 法面表土の XRD の結果

より黄鉄鉱であった。石英と雲母の含有量は採取位置・深さによらず総じて高く、泥岩を構成する主要な鉱物と言える。表 7～表 9 に粘土鉱物の含有量をまとめた。

イライトとカオリナイトは、BH 1-1 では深さにより幾らか含有量が変化するものの、BH 2-1 や表土では概ね一様に存在しており、風化の影響を受けずに安定的に存在する鉱物といえる。

方解石と黄鉄鉱は、BH 1-1 (表 7) ではそれぞれ 1.5 m, 2.5 m 以深で連続的に存在するものの、それ以浅には存在しないことがわかつた。一方、BH 2-1 (表 8) では表層から深部まで含有した。表土 (表 9) では、法面の上段ほど含有量が少なく、ボーリング孔から採取した試料と調和的な傾向を示した。緑泥石は位置や深度によらず検出されたが、BH 1-1 の 2.0 m 以浅や地表の法面上段において含有量が少ないと傾向にあった。このように方解石や黄鉄鉱、緑泥石は化学的風化作用によって減少、あるいは消失することが確認された。

スメクタイトは、BH 1-1 (表 7) の 4.5 m 以浅、BH 2-1 (表 8) の 2.0 m 以浅および表土 (表 9) の含有量が顕著であった。すなわち、スメクタイトは風化作用によって別の鉱物から生成されていることが推察される。

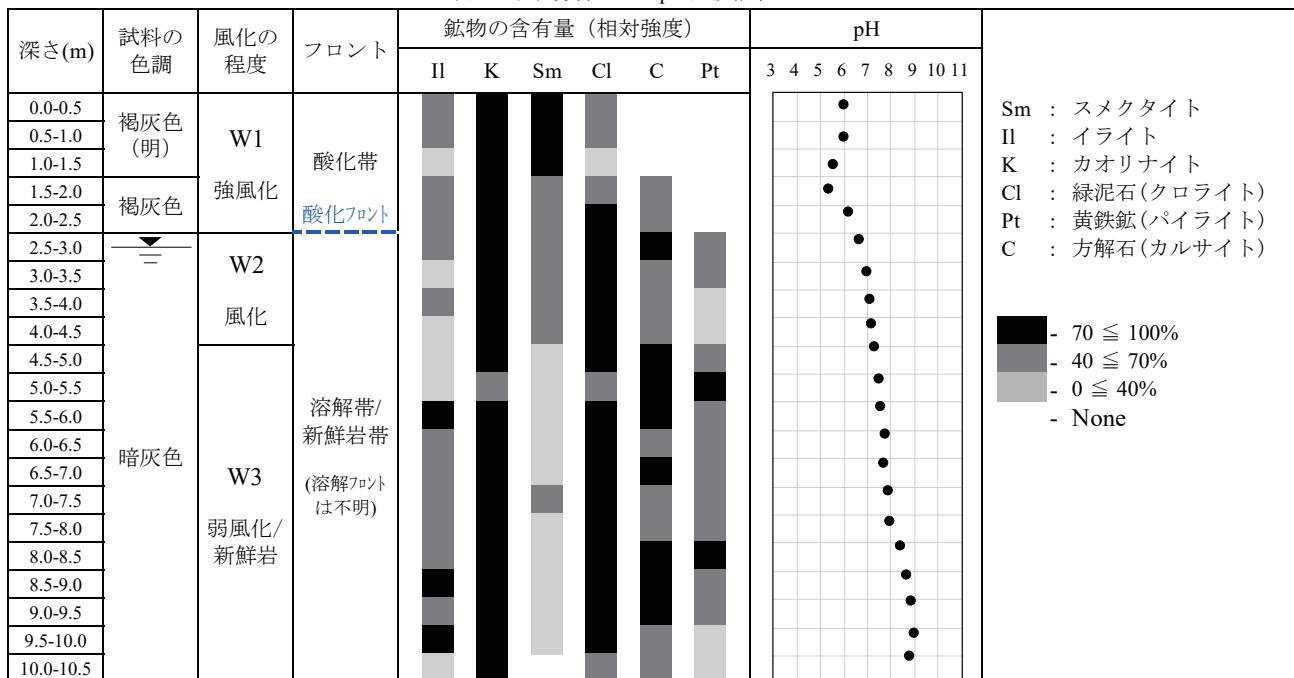
以上の結果は、法面表層で明瞭な酸化作用が確認されたボーリングコアの観察結果と調和的である。

(3) pH 試験

表 7～表 9 に BH 1-1, BH 2-1 および法面表層部の pH を示す。BH 1-1 (表 7) は 3.0 m 以浅で酸性、3.0 m 以深はアルカリ性であった。BH 2-1 (表 8) は、ボーリング孔の全体がアルカリ性を示した。法面表層部 (表 9) は、最上段 (6 段目) から 5 段目 3m までが酸性であり、それ以下は全てアルカリ性である。以上のことから pH は法面の上段ほど、また土被りが小さいほど小さい傾向があった。法面内部の液性が連続的に分布すると仮定すると、BH 1-1 の深さ 3.0 m あたりから法面表土 5 段目の上から 3.0 m あたりにかけて酸性とアルカリ性の境界が存在していると考えられる。

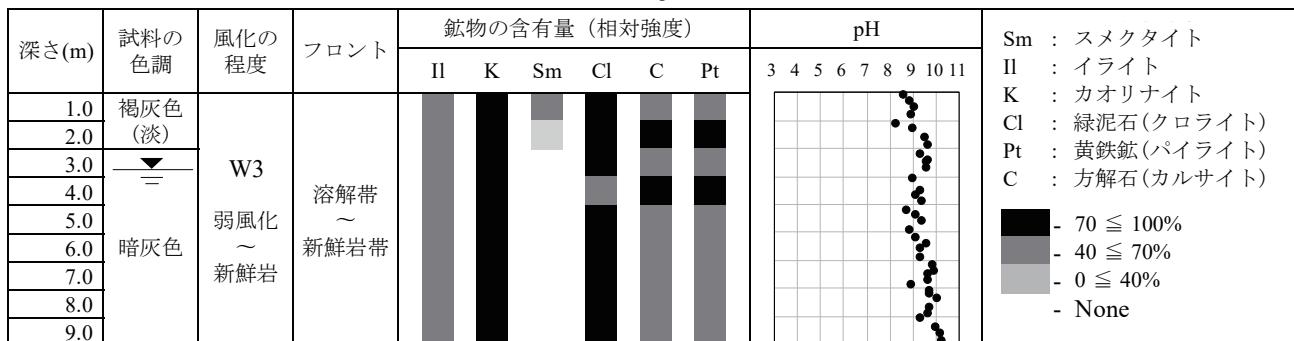
前節の鉱物分析では、法面表層付近で黄鉄鉱が消失していることを指摘した。黄鉄鉱は溶解すると硫酸を生成するため、本節で示した表層付近の pH が低下して酸性に移行しているという結果とよく対応している。

表 7 鉱物分析およびpH試験結果 BH 1-1



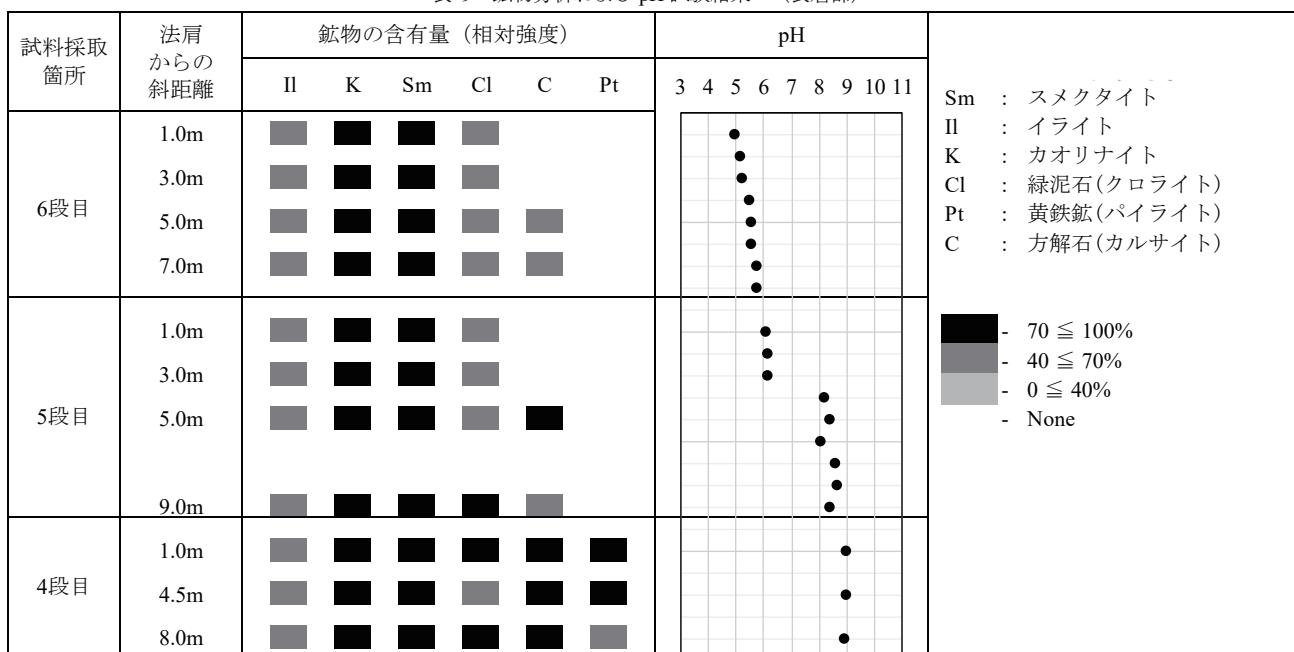
※地下水位はボーリング掘削時の孔内水位である

表 8 鉱物分析およびpH試験結果 BH 2-1



※地下水位はボーリング掘削時の孔内水位である

表 9 鉱物分析およびpH試験結果 (表層部)



(4) 化学的風化のプロセスとゾーニング

法面から採取した試料の目視観察、XRDによる鉱物分析およびpH試験の結果より、調査法面内における化学的風化の進展状況を確認した。泥岩の自然斜面の調査³⁾も参考にしながら、ボーリング試料の色調や各種の分析結果に基づいて、切土法面における化学的風化の進展状況を表7および表8に示す3つのゾーンW1, W2, W3に分類して解釈する。

W1は褐色化が進み、風化の程度が強いゾーンで、ボーリング孔BH1-1の地表面から深さ2.5mまでの領域のようにスメクタイトの含有量は非常に高く、緑泥石の含有量は減少しており、既に方解石と黄鉄鉱の含有量は消失している。このゾーンは黄鉄鉱の溶解で硫酸が生成してpHが低く酸性になっており、泥岩の化学的風化が著しい「酸化帯」である。W2は風化の程度が中程度のゾーンで、例えばボーリング孔BH1-1の深さ2.5~4.0mの領域のように、褐色化が僅かに進むものの、緑泥石、方解石および黄鉄鉱が残存し、pHは中性からアルカリ性であった。W1とW2の境界は、酸性から中性に液性が変化することから酸化フロントと呼ばれる。W2は、それ以深の比較的、新鮮な泥岩層が広がるゾーンW3と比較して、方解石や黄鉄鉱が幾らか溶解していることが見て取れたが、「溶解帯」および溶解帯と新鮮岩の境界である「溶解フロント」を明確に指摘した自然斜面の調査事例³⁾に比べて溶解フロントは不明瞭であった。

法面下方のBH2-1は、スメクタイトの含有量が表層付近において中程度以下であるものの、深さ方向に緑泥石、方解石、黄鉄鉱の含有量の有意な減少が見られず、pHは一様にアルカリ性であることからW3と区分される。

法面表層部は、最上段(6段目)から5段目3mまでの範囲においてスメクタイトの含有量が多く、緑泥石の含有量は減少しており、既に方解石と黄鉄鉱は消失している。また、pHが5~6と小さく、明瞭に酸化している。このことから、法面上部の表層部は、BH1-1の地表面付近と同様に化学的風化が著しく、風化の程度がW1と区分される。法面5段目5m~9mの範囲は、スメクタイトの含有量が高く、黄鉄鉱の含有が確認されない一方で、pHは8~9程度の一様にアルカリ性であり、緑泥石や方解石の含有量の有意な減少が確認されないことから、風化の程度が中程度のW2と区分される。法面4段目は、BH2-1の地表面付近と同様に、pHは一様に9程度のアルカリ性であり、緑泥石、方解石および黄鉄鉱の含有量の有意な減少がみられないことからW3と区分される。

以上より、法面でも切土掘削前の地表面に近い上部では化学的風化が進行しており、下段のほうでは化学的風化はまだ途上であると考えられる。

(5) 化学的風化機構

調査法面を構成する泥岩の色調は、法面の上部と下部の両方で、深い部分は暗灰色であり、表層部分では褐灰色を呈している。この色の明確な変化は、切土法面の表層部における風化の進行を示している²⁾²⁵⁾²⁶⁾。化学的風化の発生

は、現場から採取した泥岩試料のXRDおよびpH試験により明らかとなった。切土法面表層部およびBH1-1とBH2-1の地下水位よりも上部で確認されたスメクタイトの増加と緑泥石の減少は、黄鉄鉱が酸化して硫酸を生成し、酸性環境下で緑泥石がスメクタイトに変化したことを意味している²⁷⁾。湿気の多い気候では、風化は主に水と酸化によって引き起こされ²⁷⁾、地下水面上で湿潤と乾燥の作用が繰り返されることにより、泥岩の風化を誘発する酸化過程が生じる。緑泥石のスメクタイトへの変化、すなわち、法面表層部におけるスメクタイトの増加、黄鉄鉱および緑泥石の消失または含有量の減少は、既往研究^{3)~6),28)~31)}によって行われた研究により明らかにされている。一方、方解石は、法面表層部やBH1-1の表層付近の酸化過程における溶解³²⁾により消失した。Hachinoheら³³⁾もまた、風化した泥岩には方解石が消失していることを示し、溶解がその理由の一つであると述べている。BH1-1では、pH値が地下水より上部では酸性を示したが、緩衝剤として作用する方解石の存在により、強い酸性環境であるにも関わらず比較的高い値を示した⁴⁾。BH2-1では、地下水面上で幾らか化学的風化が進行し、スメクタイトはBH1-1よりも低い濃度で存在しており、黄鉄鉱と方解石の含有も確認された。BH2-1のpH値が全てアルカリ性であることは、酸化および溶解過程がその領域でまだ進行中であることを示唆している。

4.2 切土法面の物理的風化

切土法面で採取した試料の密度、含水比、弾性波速度、一軸圧縮強度およびせん断強度を示し、物理的風化は主に剛性と強度に変化をもたらすという観点で議論する。

(1) 密度および含水比

図9および図10に密度および含水比の試験結果を示す。湿潤密度および乾燥密度は、BH1-2とBH2-1で同様の傾向を示しており、深さ2.0~3.0m以深のW2およびW3では、値が一様に高く、W1では、地表に近いほど値が小さい。含水比も、BH1-2とBH2-1で同様の結果であり、深さ2.0~3.0m以深のW2およびW3では、値がほぼ一定であり、W1では、地表に近いほど高い。これは、泥岩の細粒化で、地盤の保水性が高まった影響と考える。

(2) 速度検層

図9および図10に速度検層の結果を示す。BH1-2およびBH2-1における弾性波速度 V_p および V_s は、法面表面付近の値が小さく、深くなるに連れて値が大きくなる。 V_s と密度 ρ の関係式(3)から得られる剛性率 G は、切土法面の表面と深部の剛性の変化を表す。

$$G = \rho \cdot V_s^2 \quad (3)$$

両ボーリング孔では、切土掘削による応力解放や乾湿繰り返し等の作用により徐々に風化が進行し、泥岩の剛性が表面部分(特に3.5m以浅)で大幅に低下した。図11に1977年(t=9)、1984年(t=16)、2017年(t=49)にBH3-1で実施した速度検層によって得られた弾性波速度比 V_p/V_0 の分布を示す。ここに、 V_0 は新鮮岩部の弾性波速度 V_p で

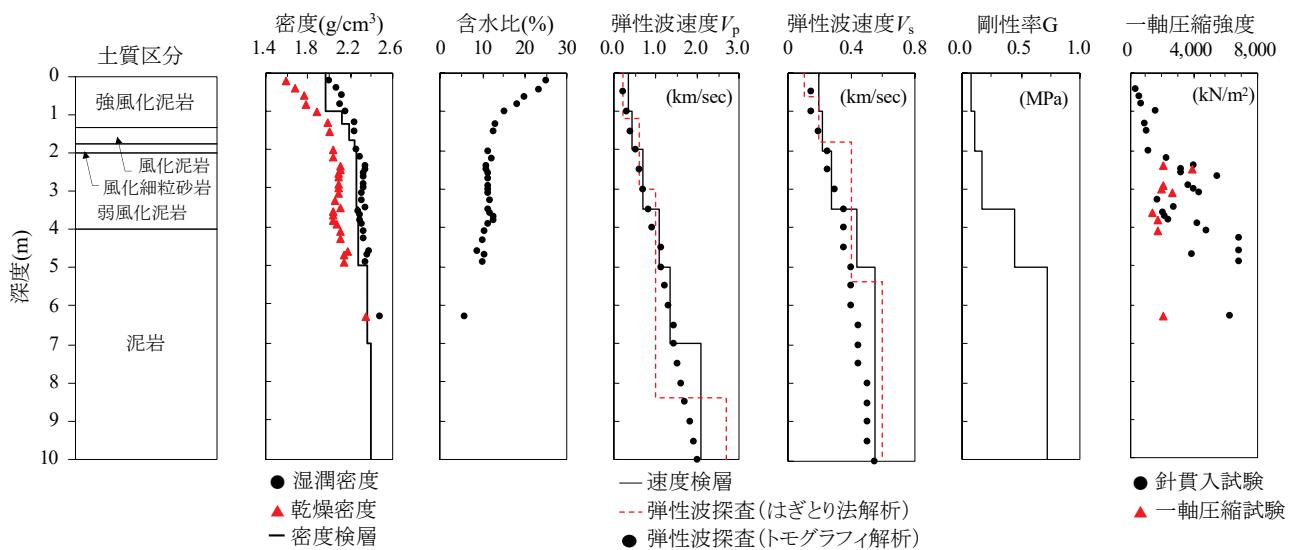


図 9 物理特性に関する調査および試験の結果 (BH 1-2)

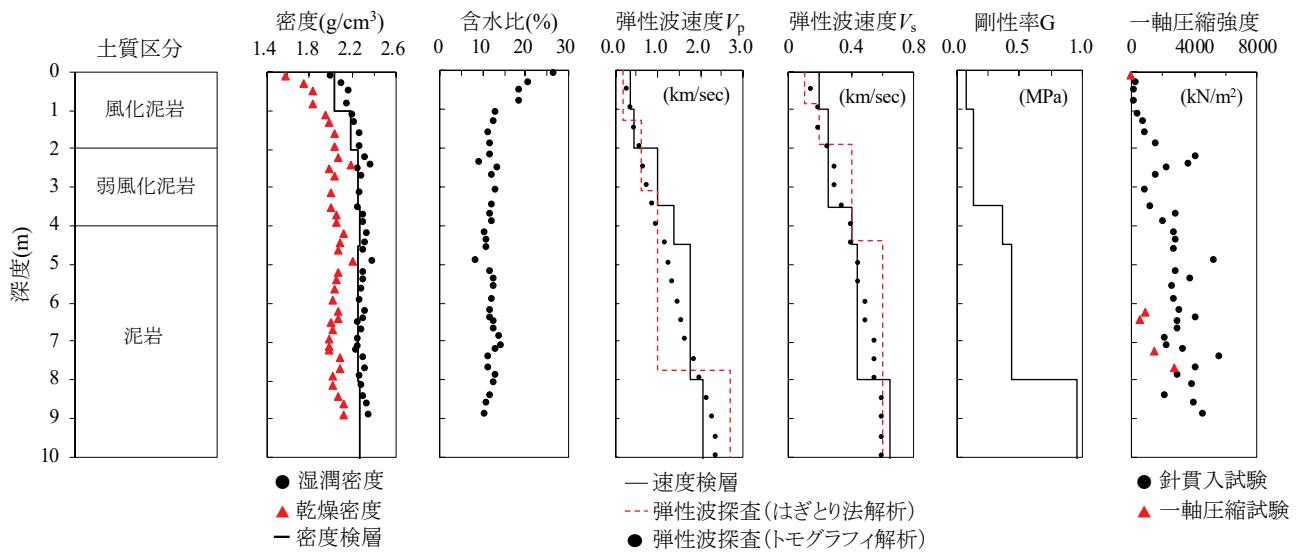
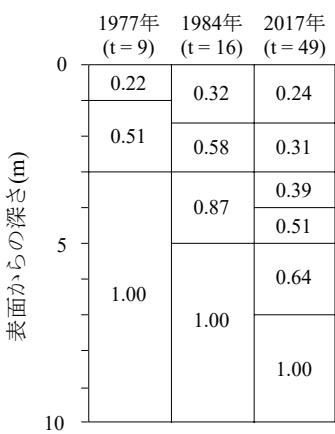


図 10 物理特性に関する調査および試験の結果 (BH 2-1)

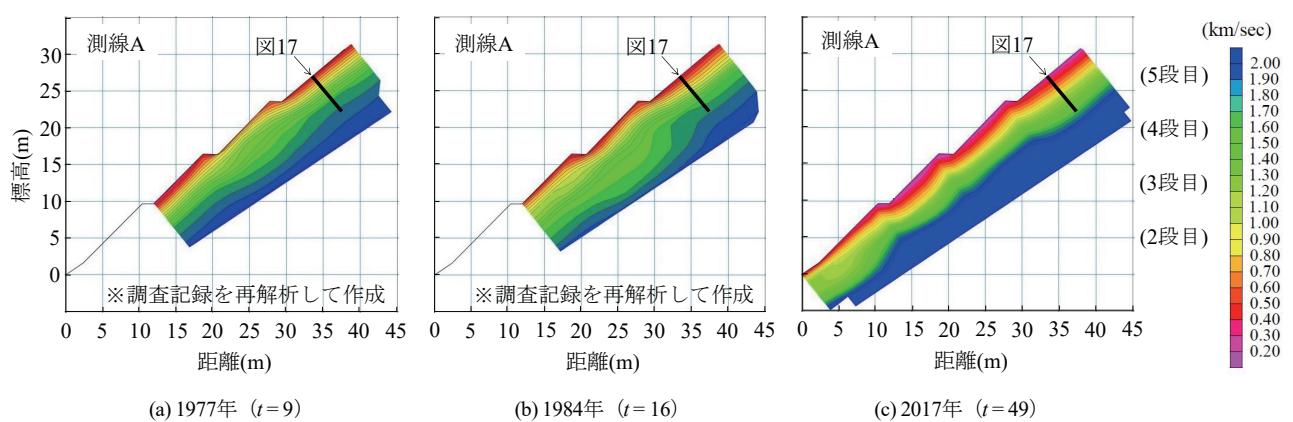
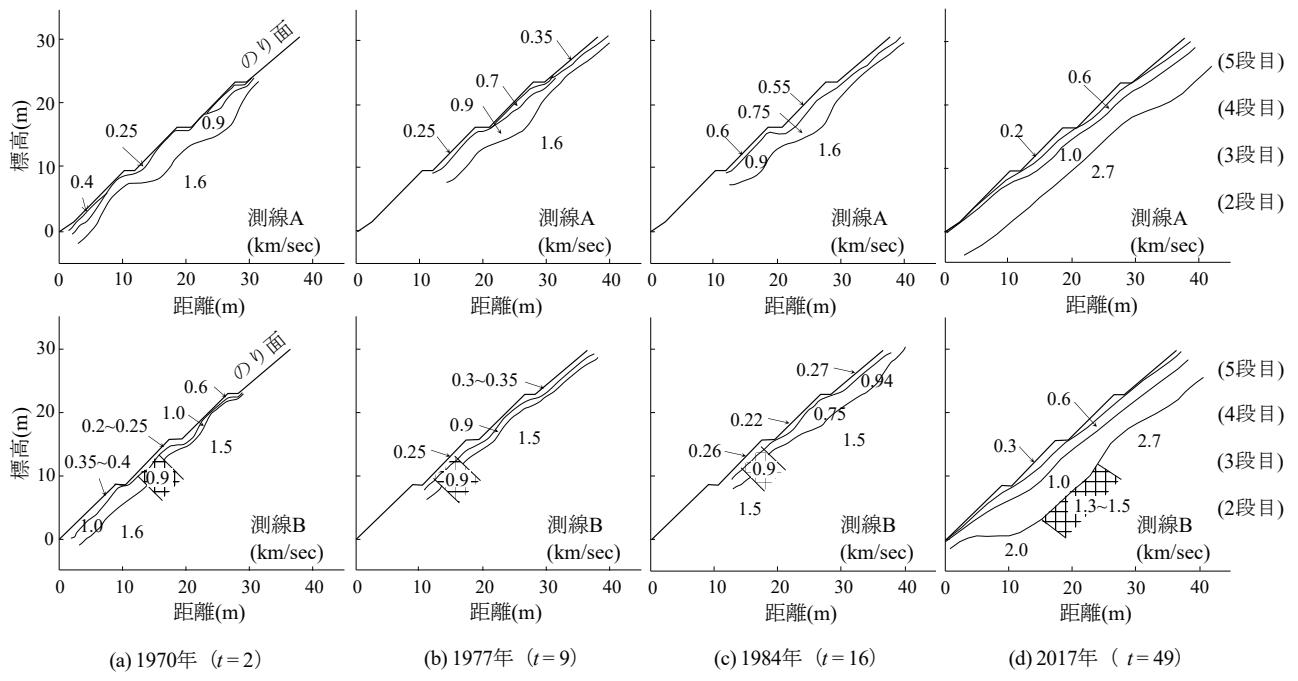
図 11 弹性波速度比 V_p/V_0 の経年変化 (速度検層 BH 3-1)

ある。 V_0 の経年変化はほとんどなく 1.8km/sec 程度であり、法面表層の V_p は V_0 の 2~3 割まで低下している。法面表面の低速度層には観測年によって値のばらつきがみられる

ものの、法面垂直方向の低速度域が経年に増加することがみてとれ、掘削から約 50 年の間に風化帯が発達していることがわかる。なお、多賀ら¹¹⁾が指摘するように図 11 に示した P 波速度は間隙水にも影響を受けるため、含水状態が経時に変化しやすい表層付近では計測時期によるばらつきを生じている。一方、法面から離れた深部は含水比の変動が小さいため、弾性波速度比の経年変化から風化帯の進展を見てとることができる。

(3) 弹性波探査

図 9 および図 10 に BH 1-2 および BH 2-1 に沿う弾性波速度 V_p および V_s を示す。これらは、2017 年のはぎとり法解析 (図 12(d)) およびトモグラフィ解析 (図 13(c)) の速度分布から調査孔に沿う速度を読み取ったものである。結果より、2 つの解析方法で得た結果にはやや差異があるものの、速度検層と同様な傾向を示した。図 12 に測線 A および B のはぎとり法解析による弾性波速度 V_p の分布を示す。これらは、1970 年 (t = 2), 1977 年 (t = 9), 1984 年



($t=16$), 2017年 ($t=49$) の調査結果である。結果より、速度層は法面に対してほぼ平行に分布しており、時間が経過とともに、法面表面から徐々に速度が低下することが見てとれる。また、測線Bの3段目には周囲よりも低速度な箇所(緩み域)を捉えている。2013年 ($t=45$) に発生した表層崩壊は、この局所的な低速度部の近傍で発生したものである。このように弾性波探査により法面を広範囲に調査することにより、局所的な弱部を把握することができる。図13はトモグラフィ解析により求めた測線Aにおける弾性波速度 V_p の2次元等高線図である。この図は、過去の弾性波探査データをトモグラフィ解析により再解析して求めたものである³⁴⁾。結果は、図12と同様に法面に平行して速度層が分布し、時間が経過するにつれて法面表面の弾性波速度が低下している。はぎとり法解析は3~4程度の速度層による評価であり、各層の速度値は観測年によって異なるのに対し(図12)、トモグラフィ解析は地下の断面をセルに分割して速度値を逆解析により求めるため、速度層を任意に細かく表示して観測結果を比較することができます。

きる。今回は、0.1km/sec毎に速度層を表示し、風化帯層厚の変化等、風化進行の程度をより定量的に分析した。

(4) 一軸圧縮強度

泥岩の強度は、一軸圧縮試験と針貫入試験により q_u を求めた。図9および図10により、風化の影響により地表から2.0m程度までの一軸圧縮強度が深部に対して大きく低下している。BH 1-2については、新鮮部の強度は4,000kN/m²程度以上であるのに対し、表層付近は約900kN/m²であり、強度が4分の1程度に低下している。BH 2-1についても同様に、新鮮部の強度は3,000kN/m²程度以上であるのに対し、表層付近は約600kN/m²であり、5分の1程度の強度低下している。なお、一軸圧縮試験の結果は、針貫入試験に対して全体的に小さい値を示した。これは、供試体整形時にひび割れが生じるなどして強度低下した可能性がある。

(5) 三軸試験で得た強度特性

図14にBH1-2(0.6m部)の多段階三軸圧縮試験CUの結果を示す。多段階載荷によって得られた(a)主応力差

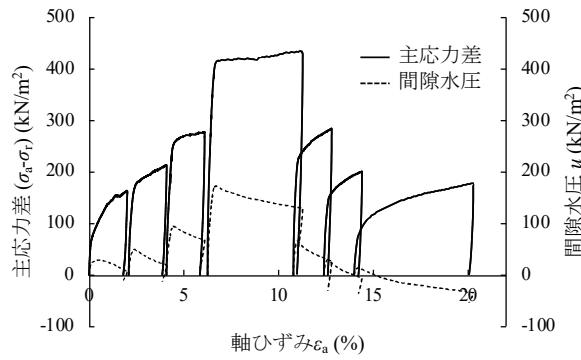
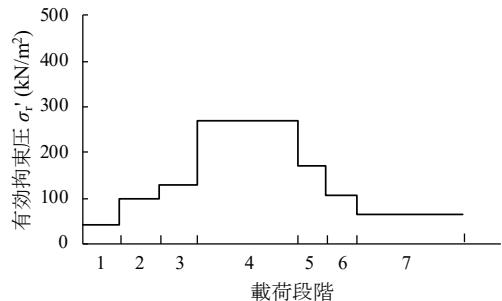
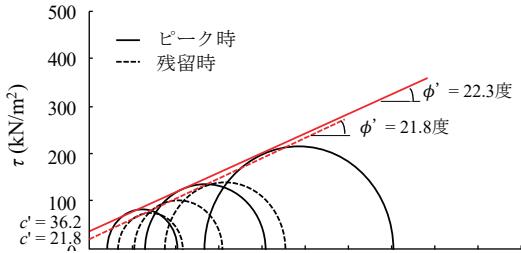
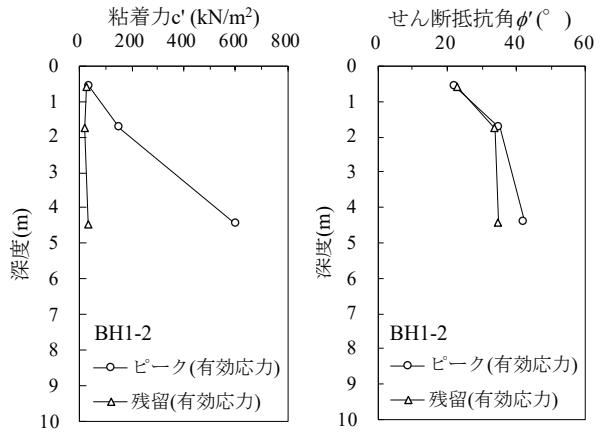
(a) 主応力差 ($\sigma_a - \sigma_r$) , 軸ひずみ ε_a , 間隙水圧 u の関係(b) 各載荷段階における主応力差最大時の有効拘束圧 σ'_r (c) ピーク時および残留時のせん断強度定数 (c' , ϕ')

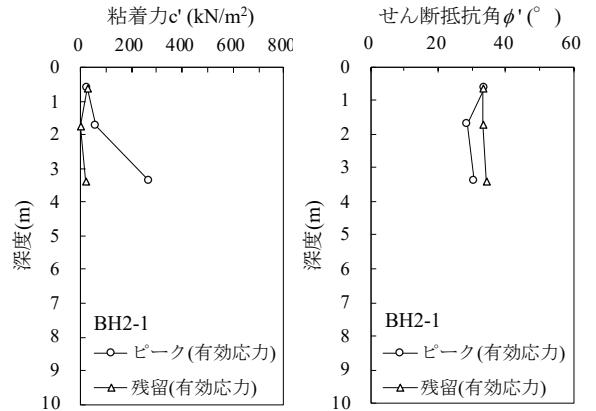
図 14 多段階三軸圧縮試験の結果 (BH1-2 深さ 0.60m)

($\sigma_a - \sigma_r$), 軸ひずみ ε_a , 間隙水圧 u の関係は、(b) に示す有効拘束圧 σ'_r の条件で試験したものであり、4段階目の載荷時に主応力差がピークとなり、その後に軟化し、残留状態を迎えた。このとき、4段階目の載荷時に間隙水圧が最も卓越し、軟化とともに水圧が減少し、7段階目には負の間隙水圧が確認された。これらの傾向は、土被り（風化の程度）の違いによりピーク強度の大きさ等に定量的な違いがあるものの、風化部、弱風化部、新鮮岩部において概ね同じ傾向が確認された。(c) のピーク時および残留時のせん断強度定数 (c' , ϕ') は、多段階載荷によって得られた応力とひずみ、間隙水圧の関係から得た有効応力場の応力円により求めた。

図 15 に多段階三軸圧縮試験 \overline{CU} のピーク時および残留時のせん断強度定数 (c' , ϕ') の深度分布を示す。ピーク時の粘着力 c' は、BH 1-2 および BH 2-1 はともに土被りに依存して値が大きく変化し、地表に近いほど値が小さい。例えば、BH 1-2 の弱風化部～新鮮部 (4.5 m) は $c' = 600$ kN/m² 程度であるのに対し、強風化部 (0.6m) では、残留



(a) BH 1-2



(b) BH 2-1

図 15 せん断強度定数 c' , ϕ' の深度分布

粘着力 c' と同程度の $c' = 36$ kN/m² 程度である。残留粘着力 c' については、土被りに依存した変化は見られず、 $c' = 20$ kN/m² 前後と小さい。一部、BH 2-1 の風化部 (1.7m) において、 $c' = 2.3$ kN/m² の弱部が確認された。

せん断抵抗角 ϕ' については、BH 1-2 の弱風化部～新鮮部 (4.5 m) が 40° 程度、風化部の (1.75m) が 35° 程度、強風化部 (0.6m) が 23° 程度であり、風化の程度が大きい表面付近はせん断抵抗角 ϕ' の低下が著しい。一方、BH 2-1 は、弱風化部 (3.4m) から風化部 (0.6m) のどの深さも 30°～35° 程度であり、あまり値が変化しない。BH 1-2 強風化部のせん断抵抗角 ϕ' の低下は、化学的風化の進行による黄鉄鉱と方解石の消失やスメクタイトの含有量の増加が関係していると考えられる。

なお、図 9 に示すように一軸圧縮試験および針貫入試験で求めた一軸圧縮強度は、幾らかばらつきはあるものの深度 2.0m 以下の強風化部の一軸圧縮強度は 1,000 kN/m² 程度以下であり、深度とともに増加する傾向があった。これに対して、強風化帶から採取した土試料の三軸圧縮試験の破壊時応力から求めた一軸圧縮強度は 100 kN/m² 程度であり、一軸圧縮強度に比べてやや低い結果になった。これは一軸圧縮試験が自然含水比の試料に対して実施されたのに対して、三軸圧縮試験では供試体を飽和させて有効拘束応力を付与して実施したためと考える。



図 16 表層崩壊箇所（2013年）の現状

(6) 物理的風化機構

調査法面の物理的風化に見られる全体的な傾向は、法面深部の新鮮な岩の状態と比較して、法面表層部分の密度、剛性および強度により確認した。切土掘削後からの約 50 年の間に、地盤剛性の漸進的な低下が確認された。この全体的な傾向は、新鮮な状態の泥岩が掘削により地表に露出されてから始まる物理的な風化の進行を示している。物理的風化の要因には、掘削による応力解放や乾湿繰り返し等の作用がある。応力解放については、掘削して間もなく法面全体の弾性波速度が低下したことから、切土掘削により除荷され、地盤が給水、膨張することにより亀裂が発達し、密度の低下や地盤強度の低下に影響したと考えられる。

(7) 化学的風化と物理的風化の相互作用

法面の風化による亀裂の発達は、表層部分への水の侵入を容易にし、化学的風化を促進する可能性がある。BH1-2 表層部のように方解石が消失すると（表 7）、泥岩を多孔質にし³²⁾、上部の化学的風化をさらに促進する作用物質としても働く。また、地下水位よりも上部では、湿潤と乾燥の繰り返しが生じやすい環境にもなるため、乾湿繰り返し作用による泥岩の細粒化も進むと考えられる。約 50 年にわたる弾性波速度の漸進的な低下（図 11、図 12、図 13）は、これらのような風化が徐々に進行したことを示していると考えられる。以上のように、物理的風化と化学的風化は相互に関係し合いながら泥岩の状態を変化させている。

4.3 調査法面の風化と法面安定への影響

(1) 調査法面の風化機構

調査結果の分析により、切土掘削から約 50 年で調査法面に生じた物理的および化学的風化の実態が明らかになった。法面の上部と下部の両方で物理的風化による表層の弱化は同程度であったが、化学的風化については、法面上部と下部とではその状態に大きな差が確認された。これは、法面最上部は掘削前の原地盤表面に近いことから、切土掘削の前から風化が進行していたことが影響している。具体的には、法面の上部（BH1-2）と下部（BH2-1）の pH

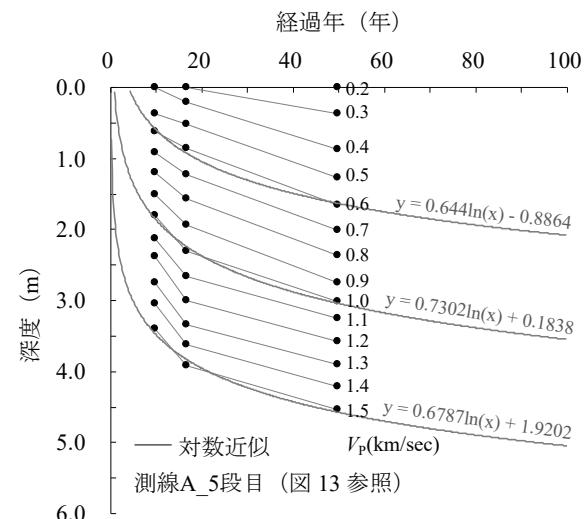


図 17 速度層の深さの経年変化

試験や XRD の結果から、法面上部は表面付近の地盤が酸性化しており、黄鉄鉱や方解石が消失し、スメクタイトが生成され、化学的風化が進行していた。一方で、法面下部は地盤が全体的にアルカリ性であり、表面付近の黄鉄鉱や方解石の含有量がわずかに低下する程度で、化学的風化の進行はまだ途上である。このような状態の違いが見られる一方で、法面の上部（BH1-2）と下部（BH2-1）の密度や強度は法面表層付近で大きく低下し、低下の度合いは同程度であった。また、弾性波探査や速度検層、密度検層の結果からも同様の傾向が確認された。

(2) 調査法面の風化による法面安定への影響

切土法面管理における重要事項は、法面崩壊による道路通行阻害等の第三者への影響を未然に防止することである。風化による地盤の強度低下は法面を不安定化させる可能性があることから、風化と法面安定性の関係を明らかにし、法面管理に活かす必要がある。2013 年 ($t = 45$) に発生した調査法面の表層崩壊では、降雨の影響によって風化した泥岩が長さ約 10m、深さ約 1m の規模で流出し、密閉型の法枠工が施された（図 16）。この箇所は、BH2-1 の側面であり（図 3(a)）、崩壊前は BH2-1 と同じように法面の表層が風化して強度が低下していたと想定される（図 10）。BH2-1 の風化は掘削直後の除荷や乾湿繰り返し等により物理的風化が進み、鉱物の変化を伴う化学的風化は途中段階であったことから、表層崩壊は物理的風化による強度低下が大きく影響していたと考えられる。このように、調査法面の掘削から約 50 年は物理的風化の影響を強く受けたと考えられるが、将来は BH1-2 のように化学的風化の影響も受けながら法面全体の風化が益々進行すると予想される。化学的風化に関する既往の研究では、方解石の溶解が密度の低下や間隙率の増大、一軸圧縮強度の低下に影響することや³⁵⁾、配向性粘土鉱物（スメクタイトや緑泥石、雲母、バーミキュライト）の総量が残留強度の低下に影響する³⁶⁾など、地盤強度への影響についても明らかにされている。実際に、掘削前の原地盤面に近い BH1-2 では、法面表面付近での方解石や緑泥石の消失、スメクタイトの生

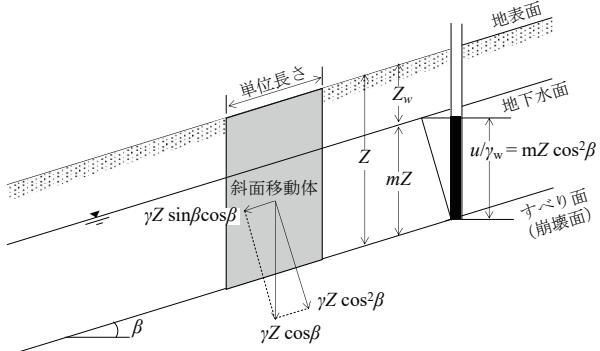


図 18 表層崩壊の安定モデル（文献39）に加筆

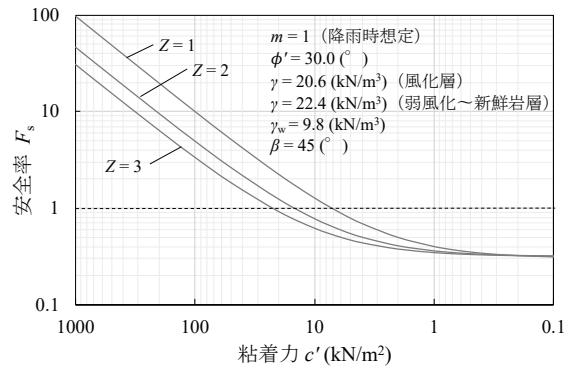
成が確認されており（表 7），地盤のせん断抵抗角 ϕ' が BH2-1 と比較して小さかった。この地盤強度の低下が化学的風化の影響によるものかどうかを特定するために，今後も継続的に調査を行い，法面の長期風化と地盤強度の関係を明らかにする必要がある。

(3) 風化進行速度

風化による法面安定を議論するには，切土法面の風化の影響を評価し，法面の不安定化を予測する必要がある。そこで，調査法面の建設直後から約 50 年にわたり継続して取得した弾性波速度データにより風化進行速度を分析した。図 17 に A 測線 5 段目における速度層の深さの経年変化を示す。速度層の深さは，各法面の中央位置における法面垂直方向の深さである。結果より，速度層の深さは，切土掘削から 20 年程度までの変化量が大きく，徐々に小さくなる傾向がみられる。藤原ら¹²⁾が風化帯として評価する $V_p=1.0 \text{ km/sec}$ の速度層の深さは，2017 年時点で約 3.0m の深さにあり，1977～1984 年の約 7 年間で 7.4cm/年，1984～2017 年の約 33 年間で 2.2cm/年の速度で深部へ移動した。また，対数近似で外挿した結果より，調査法面は今後も徐々に風化が進むことが予想された。2017 年の調査では弾性波速度 V_p と採取試料の一軸圧縮強度には強い相関があることを確認していることから³⁷⁾，風化による弾性波速度の変化を知ることにより，法面の不安定化を予測できる可能性がある。今後，弾性波速度から法面の安定を評価する方法を検討するとともに，他の追跡調査箇所についても同様の方法で風化の経年変化を分析することにより，様々な地質に対して風化の影響を把握することができると考えられる。

(4) 風化の法面安定に対する影響

泥岩の風化に関する既往の研究では，切土法面の酸化帶は地すべりを引き起こす可能性があることや^{3) 38)}，泥岩斜面のすべり面におけるスメクタイトの存在⁹⁾が指摘されており，本論文の化学的風化に関する検討結果と調和的な部分がある。2013 年には調査法面において表層崩壊が生じており（図 3(a)，図 16），風化による強度低下が影響していると考えられる。そこで，2017 年に実施した地盤調査で取得した崩壊地周辺の地盤のせん断強度定数をもとに風化が法面安定へ与える影響を検討した。安定評価には，地下水位の影響を考慮した簡便な表層崩壊モデル³⁹⁾を使

図 19 粘着力 c' と安全率 F_s の関係

用した。図 18 に表層崩壊モデルの概念を示す。また，式(4)に安定評価に用いた計算式を示す。

$$F_s = \frac{S}{T} = \frac{c' + (\gamma - m\gamma_w)Z \cos^2 \beta \tan \phi'}{\gamma Z \cos \beta \sin \beta} \quad (4)$$

$$m = 1 - \frac{Z_w}{Z}$$

ここに， T ：滑動力(kN/m^2)

S ：せん断強さ(kN/m^2)

γ ：土の単位体積重量(kN/m^3)

γ_w ：水の単位体積重量(kN/m^3)

m ：地下水位の高さを表すパラメータ

Z ：地表面からすべり面までの深さ(m)

Z_w ：地表面から地下水位までの深さ(m)

c' ：土の粘着力(kN/m^2)

ϕ' ：土のせん断抵抗角(°)

β ：傾斜角度(°)

安定計算は，BH 2-1 の採取試料に対して行った土質試験や力学試験の結果をもとに設定した。風化の影響は，粘着力 c' が低下するものとし，1,000 kN/m^2 から 0.1 kN/m^2 まで段階的に値を低下させた。せん断抵抗角 ϕ' は，泥岩の乾湿繰返し時の ϕ' はほとんど変化しないという知見から⁴⁰⁾，BH 1-2 の多段階三軸圧縮試験結果を参考に 30° とした。すべり土塊は，風化した泥岩の密度や含水比の影響を考慮して，風化層とそれ以深の弱風化から新鮮岩の層の 2 層構成とした。それぞれの土の単位体積重量 γ は，風化層が $20.6 \text{ kN}/\text{m}^3$ ，弱風化～新鮮岩層が $22.4 \text{ kN}/\text{m}^3$ とした。また，水の単位体積重量は $9.8 \text{ kN}/\text{m}^3$ とした。地下水位の高さを表すパラメータ m は，集中降雨時に崩壊が発生したことから $m = 1$ とした。図 19 に安定計算により算出した土の粘着力 c' と安全率 F_s の関係を示す。粘着力 c' を変化させた計算では，すべり面深さ Z が小さいほど，不安定化する（安全率 F_s が 1 未満となる）際の粘着力 c' が小さい。風化は法面表面から進行し，掘削直後から物理的風化の影響を受けて時間の経過とともに強度を低下させるとともに，その影響は法面深部へ伝播することから，風化しやすい岩で構成された切土法面では，深いすべりの崩壊だけでなく，掘削当初は表層地盤の風化による崩壊に注意する必要がある。今回の計算結果より，2013 年に生じた表層崩壊は，

すべり深さが約 1m 程度であったことから、粘着力は 7 kN/m² 程度未満であったと考えられる。実際に、BH 2-1 の試料で実施した多段階三軸圧縮試験や崩壊地周辺で行われたベーンコーンせん断試験⁴¹⁾において同程度の値が確認されている。以上より、対象とする地盤のせん断抵抗角や物性値によるが、切土法面の表層に形成される風化層の粘着力の低下具合を知ることで風化層の崩壊可能性を概略的に知ることができる。なお、法面安定には、法面勾配の要素も影響が大きい。一般に、切土法面の設計施工では現地の地質条件に応じた標準法面勾配を採用し⁴²⁾、風化の影響が想定される場合にはコンクリート等による法面保護を行うが⁴³⁾、場合によっては将来の風化の影響を考慮して法面勾配を緩くすることも考えられる。

以上より、切土掘削から約 50 年が経過した調査法面をモデルにした計算により、法面表層の風化による表層崩壊の可能性を指摘した。将来的にさらに風化が深部まで進行する場合には、より深い崩壊のリスクが高まることも考えられる。ただし、調査法面を掘削する前の自然地盤では、風化層の厚さが地表から 3m 程度であったことから(表2)、法面部の風化についても法面表面からある程度の深さで均衡すると考えられる。より深い崩壊のリスクについては、引き続き調査することにより明らかにする必要がある。

5. 結論

施工完了から約 50 年にわたり、泥岩切土において継続的に実施した弾性波探査や速度検層の結果と、約 50 年経過時の現地試料の分析や室内試験の結果から、泥岩の風化機構と風化の進行速度および泥岩切土法面の安定性について以下の結論を得た。

- (1) 泥岩切土法面では、掘削直後に応力解放の影響を受けて物理的風化が進んだ後、化学的風化が経時に進行する。ただし、施工完了から 50 年経過した現在でも、化学的風化は進行の途中段階にある。
- (2) 岩盤中に存在する黄鉄鉱が水に溶解して硫酸を生成すると酸化帯を形成する。生成した硫酸は緑泥石や方解石の溶解を溶解させるとともに、スメクタイトを生成し、溶解帯の形成を促す。
- (3) 化学的風化の観点で切土法面は表層から「酸化帯」と「溶解帯」および「新鮮岩(未風化帯)」に区分でき、最終的に酸化フロントは地表から 2.5 m 程度の深さに達するものと予想される。掘削前の地表面に近い法面上部では領域を明瞭に区分できる一方、法面下部では未だ「酸化帯」が形成されておらず、今後、黄鉄鉱の酸化と緑泥石や方解石の溶解が進み、化学的風化が進展していくものと予想される。
- (4) 除荷による物理的風化の影響で、法面表面の 1~2 m では切土掘削直後から岩盤の剛性は低下する。岩盤の剛性は経時的にも低下していることから、岩盤の亀裂の発達によって法面内部に水が侵入しやすくなり化学的風化の影響も確認された。なお、剛性低下の

観点から見た風化の進行速度は、切土掘削直後に速く、徐々に緩やかになる。

- (5) 切土法面の表面付近の強度は著しく低下しており、掘削から 50 年までに、泥岩の一軸圧縮強度は新鮮な状態の強度の 1/4~1/5 に低下する。
- (6) 2013 年に表層崩壊を生じた位置は法面の下部であるため、化学的風化よりも物理的風化が関わっていた可能性が高い。

最後に、本論文ではある切土法面について継続的な調査結果を示しながら、切土掘削から約 50 年にわたる風化の進展機構を考察した。しかし、切土法面はサイトごとに地形・地質や地下水の有無といった条件が異なり、切土法面の風化機構にも未だ未解明な点は多く、設計や施工、維持管理は過去の施工実績や崩壊履歴をもとに経験的に行われているのが現状である。今後は、本研究で得た知見もベースにしながら、異なる岩種の法面の風化特性についても検討する予定である。

謝辞

本研究は、高速道路の開通から 50 年という長期に渡り、歴代の研究者が意志を引き継ぎ調査してきた記録をもとに進めることができた。本研究の創始者である株式会社高速道路総合技術研究所 研究アドバイザーの奥園誠之氏には、本研究を進めるにあたり、切土法面の風化に関する多くの指導をいただいた。また、同研究所の道路研究部 土工研究室の皆様には弾性波探査等の現地調査や土質試験の実施、切土法面の風化に関する議論にご協力いただいた。なお、室内試験の一部は JSPS 科研費 16H06099, 19H00780 の助成を受けて実施した。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 松坂敏博、森山陽一、小笠浩司、太田秀樹、藤野陽三、宮川豊章、西村和夫：高速道路の構造物における大規模更新および大規模修繕の導入と課題、土木学会論文集 F4(建設マネジメント), Vol.73, No.1, pp.1-18, 2017.
- 2) HAWKINS, A. B., PINCHES, G. M.: Engineering description of mudrocks. Quarterly Journal of Engineering Geology, Vol.25, pp.17-30, 1992
- 3) CHIGIRA, M.: A mechanism of chemical weathering of mudstone in a mountainous area. Engineering Geology, Vol.29, pp.119-138, 1990.
- 4) CHIGIRA, M., OYAMA, T.: Mechanism and effect of chemical weathering of sedimentary rocks, Engineering Geology, Vol.55, pp.3-14, 2000.
- 5) PYE, K., MILLER, J. A.: Chemical and biochemical weathering of pyritic mudrocks in a shale embankment, Quarterly Journal of Engineering Geology, London, Vol.23, pp.365-381, 1990.
- 6) YONEDA, T., HAYASHI, K., KASHIWAYA, K.: Mineralogical characterization of mudstone weathering a case study in a landslide area, Central Hokkaido, Japan, ISRM International Symposium - 8th Asian Rock Mechanics Symposium, Sapporo, Japan, International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering, pp.328-335, 2014.
- 7) 津田涼太、廣瀬孝三郎、上原盛久、松原仁：島尻層群泥岩の物理・化学的な風化の実態と進行プロセスに関する調査・分

- 析的検討, 土木学会論文集 C(地盤工学), Vol.75, No.4, pp.386-397, 2019.
- 8) 千木良雅弘: 建設工事における風化・変質作用の取扱い方, 土と基礎, Vol.40, No.8, pp.71-79, 1992.
 - 9) BHATTARAI, P., TIWARI, B., MARUI, H.: Variation of soil properties in mudstone with depth and its effect on slope stability. Geo-Denver 2007, New Peaks in Geotechnics. Denver, Colorado, pp.1-10, 2007.
 - 10) 菊池英明, 古川浩平, 河村浩恵, 奥園誠之, 田山聰: 長期計測データを用いた切土法面崩壊に与える風化の影響に関する一考察, 土木学会論文集, No. 588, VI-38, pp.151-164, 1998.
 - 11) 多賀直大, 田山聰, 奥園誠之, 八木沢孝哉: 長期追跡調査による切土のり面の風化の進行と安定性, 土と基礎, Vol. 39, No.6, pp. 41-47, 1991.
 - 12) 藤原優, 永田政司, 佐藤尚弘, 滝口潤: 切土のり面の継続的な弾性波探査の計測データに基づく長期安定性の評価, 土木学会論文集 C(地盤工学), Vol.74, No.4, pp.424-438, 2018.
 - 13) 藤原優, 永田政司, 佐藤尚弘, 滝口潤: 長期追跡調査による切土法面の風化特性の評価, 日本地すべり学会誌, Vol. 57, No.3, pp.73-83, 2020.
 - 14) 日本道路公団: 東名高速道路建設誌, 1970, 1007p.
 - 15) 魚谷義彦, 平島碩人, 加藤興史: 泥岩地帯の切取ノリ面の崩壊, 道路, Vol.365, pp.61-73, 1971.
 - 16) 西田一彦: 風化残積土の工学的性質, 鹿島出版社, 1986, 192p.
 - 17) 土木学会: 岩盤斜面の調査と対策, pp.128-136, 1999.
 - 18) 地盤工学会 地盤調査規格・基準委員会編: 地盤調査の方法と解説, 地盤工学会, pp. 98-107, 2013.
 - 19) 地盤工学会 地盤調査規格・基準委員会編: 地盤調査の方法と解説, 地盤工学会, pp. 160-163, 2013.
 - 20) 地盤工学会 地盤調査規格・基準委員会編: 地盤調査の方法と解説, 地盤工学会, pp. 115-119, 2013.
 - 21) ULREY, A. I., DREES, L. R.: Methods of Soil Analysis, part 5-Mineralogical Methods. Madison, Wisconsin, USA, Soil Science Society of America, Inc., 2008.
 - 22) MOORE, D. M., REYNOLDS JR., R. C.: X-ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals. New York, USA, Oxford University Press, 1989.
 - 23) 丸東製作所: 軟岩ペネトロ計 SH-70 取扱説明書, 日本, 東京, 2006, 6p.
 - 24) KOVARI, K., TISA, A.: Multiple failure state and strain controlled triaxial tests, Rock Mechanics, Vol.7, pp.17-33, 1975.
 - 25) KOMA, T., YASUMOTO, S., KODAMA, K.: Forms of sulfur, carbon, chlorine and iron compounds and their depositional environment, in the Kazusa Group, the Boso Peninsula, central Japan. Bulletin of the Geological Survey of Japan, Vol.34, pp.191-206, 1983.
 - 26) OYAMA, T., CHIGIRA, M.: Weathering rate of mudstone and tuff on old unlined tunnel walls, Developments in Geotechnical Engineering, Vol.84, pp.279-291, 2000.
 - 27) CARROLL, D.: Rock Weathering, New York: Plenum Press, 1970.
 - 28) SENKAYI, A. L., DIXON, J. B., HOSSNER, L. R.: Transformation of chlorite to smectite through regularly interstratified intermediates, American Society of Agronomy, Vol.45, pp.650-656, 1981.
 - 29) RUSSELL, D. J., PARKER, A.: Geotechnical, mineralogical and chemical interrelationships in weathering profiles of an overconsolidated clay, Engineering Geology, Vol.12, pp.107-116, 1979.
 - 30) DIXON, J. B., HOSSNER, L., SENKAYI, A., EGASHIRA, K.: Mineralogical properties of lignite overburden as they relate to mine spoil reclamation. American Society of Agronomy, Vol.10, pp.169-191, 1982.
 - 31) WARREN, C. L., LYNN, D. W.: Alteration and formation of clay minerals during cat clay development. Clays and Clay Minerals. Berkeley, California, 1966.
 - 32) MERRILL, G. P.: A treatise on rocks, rock-weathering and soils, New York, The Macmillan company; London, Macmillan & co., ltd, 1897.
 - 33) HACHINOHE, S., HIRAKI, N., SUZUKI, T.: Rates of weathering and temporal changes in strength of bedrock of marine terraces in Boso Peninsula, Japan. Engineering Geology, Vol.55, pp.29-43, 1999.
 - 34) 物理探査評価研究小委員会岩盤すべり検討ワーキンググループ: 屈折法地震探査既往データへのトモグラフィ的解析法適用の有用性と課題-岩盤ゆるみ斜面の事例-, 応用地質, Vol.45, No.5, pp.249-258, 2004.
 - 35) 田中芳則: 方解石の溶出に伴う泥岩の組織と物性の変化, 応用地質, Vol.26, No.3, pp.19-25, 1985.
 - 36) 宜保清一, 中村真也, 江頭和彦: 地すべり土の残留強度と物理的・鉱物学的性質との関係, 農業土木学会論文集, No.210, pp.69-74, 2000.
 - 37) 永田政司, 菊本統, 藤原優, 佐藤尚弘: 弾性波探査に基づく風化した泥岩切土のり面の強度評価-東名高速道路 吉田地区-, 令和元年度土木学会全国大会第74回年次学術講演会概要集, III-93, 2019.
 - 38) VEDER, C.: Landslides and their stabilization. New York: Springer-Verlag, 1981, 274p.
 - 39) SKEMPTON, A.W., DELORY, F. A.: Stability of natural slopes in London Clay, Proceedings of the 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, London, Vol.2, pp.378-381, 1957.
 - 40) 奥園誠之: 切取りノリ面の風化とその対策, 土と基礎, Vol.26, No.6, pp.37-44, 1978.
 - 41) 永田政司, 菊本統, 村上豊和, 佐藤尚弘: 弾性波探査に基づく切土のり面の安定度評価手法の検証, 令和2年度土木学会全国大会第75回年次学術講演会概要集, III-07, 2020.
 - 42) 中日本高速道路株式会社: 設計要領第一集土工建設編「2. 切土」, pp.3-6, 2016.
 - 43) 中日本高速道路株式会社: 設計要領第一集土工建設編「6. のり面保護」, pp.1-5, 2016.

(2021.6.8 受付)

Half a century of weathering process of mudstone cut slope and impact on slope stability

Masashi NAGATA¹, Sharmily BHOWMIK², Mamoru KIKUMOTO³, Yu FUJIWARA⁴, Naohiro SATO⁵

- 1 Central Nippon Expressway company Limited, Tokyo Regional Branch, Maintenance Division
(Yokohama National University, Institute of Urban Innovation)
- 2 Yokohama National University, Institute of Urban Innovation
- 3 Yokohama National University, Department of Civil Engineering
- 4 West Nippon Expressway company Limited, Technology Headquarters, Technology Environment Department
- 5 Meiji Consultant Co., Ltd.

Abstract

Sedimentary soft rocks such as mudstone weather over time when exposed to the surface by cut excavation. And the cut slopes that have been excavated for a long time often caused surface collapse. However, there have been no cases of observing the weathering process of sedimentary soft rocks for decades, and prediction of weathering, stability of cut slopes, and rational measures are major issues. In this study, we conducted field surveys such as elastic wave exploration, soil tests, and X-ray diffraction analysis for about 50 years after excavation of significantly weathered mudstone cut slopes. Then, the weathering mechanism of the slope and its effect on stability were examined. As a result, it was confirmed that the strength of the slope surface layer decreased due to the effects of stress release and repeated dry and wet conditions due to unloading immediately after excavation. On the other hand, chemical weathering such as oxidation and dissolution of clay minerals that compose mudstone is still in progress, and it is expected that weathering will continue in the future.

Key words: cut slope, mudstone, weathering, elastic wave exploration, slope stability