

技術者を悩ませる特殊土のコレクション

第7回 脆弱岩および破碎土の工学的性質と現場対応事例

Weak rocks and crushed weak rocks: engineering properties, practical issues, and countermeasures

菊本 統 (きくもと まもる)

横浜国立大学 教授

e-mail: kikumoto-mamoru-fc@ynu.ac.jp

田久 勉 (たきゅう つとむ)

(株) 高速道路技術研究所 土工研究室長

永田 政司 (ながた まさし)

中日本高速道路(株) 東京支社保全課長代理

安部 哲生 (あべ てつお)

西日本高速道路(株) 東京事務所調査役

横田 聖哉 (よこた せいや)

東日本高速道路(株) シニアエキスパート

キーワード：脆弱岩，脆弱岩破碎土，堆積軟岩，凝灰岩，スレーキング

1. はじめに

脆弱岩は軟岩に分類され、かつ乾燥と湿潤の繰り返しなどによって容易に風化が進行する地盤材料である。軟岩は一軸圧縮強さが 1~20 MPa、弾性波速度が 700~2800 m/sec 程度で、土砂と硬岩の中間的な振る舞いをする¹⁾。大まかにはブルドーザの土工板で直接掘削できる土砂、発破により掘削する硬岩に対して、リッパで掘削できるものを軟岩と位置付けている¹⁾²⁾。軟岩は形成過程に応じて、土砂が固結して硬岩になる途中段階の堆積軟岩、低固結の火山砕屑岩などの火山軟岩、硬岩が風化して土砂になる途中段階の風化軟岩がある。このうち、脆弱岩は新生代・新第三紀の中新世・鮮新世(2303 万年前~258 万年前)に堆積した固結度の低い泥岩や変質を受けた凝灰岩など堆積軟岩に多い。なお、風化軟岩に分類される風化花崗岩や、さらに風化が進んだまさ土については、本講座の第3回で解説している³⁾。脆弱岩にまつわる工学的課題の多くは経時的な剛性や強度の低下によるもので、脆弱岩からなる地盤を切土掘削して形成した法面は、掘削直後は硬く安定していても、比較的短い期間で風化が顕著に進行し(写真-1)、表層崩落を起こすこともある⁴⁾。

脆弱岩を切土やトンネル掘削して得た発生土は、砕いて盛土材や裏込め材に用いることがある。このような材料を脆弱岩破碎土と呼ぶ。脆弱岩破碎土も母岩と



写真-1 リッパで掘削した泥岩の切土法面(神戸市北区)：掘削後、1週間で風化が進み、リッパの爪痕が消えて土砂化している。

同様に風化が進みやすい性質をもつため、乾湿の繰り返しを受けると盛土の沈下を引き起こしたり、強度低下して盛土の安定が損なわれたりすることがある。

この章では、特殊土の一つとして脆弱岩および脆弱岩破碎土の特徴を概説するとともに、切土と盛土それぞれについて実際の現場での課題や対処方法を紹介する。なお、脆弱岩破碎土の特徴や物理的・力学的性質を知るうえで必要な取り扱いの注意点については「地盤材料試験の方法と解説⁵⁾」もご参照いただきたい。

2. 脆弱岩および脆弱破碎土の性質

2.1 脆弱岩の種類と分布

脆弱岩は比較的、年代が新しい新第三紀(中新世、鮮新世)の泥岩や頁岩、凝灰岩に多い。泥岩は海や湖、

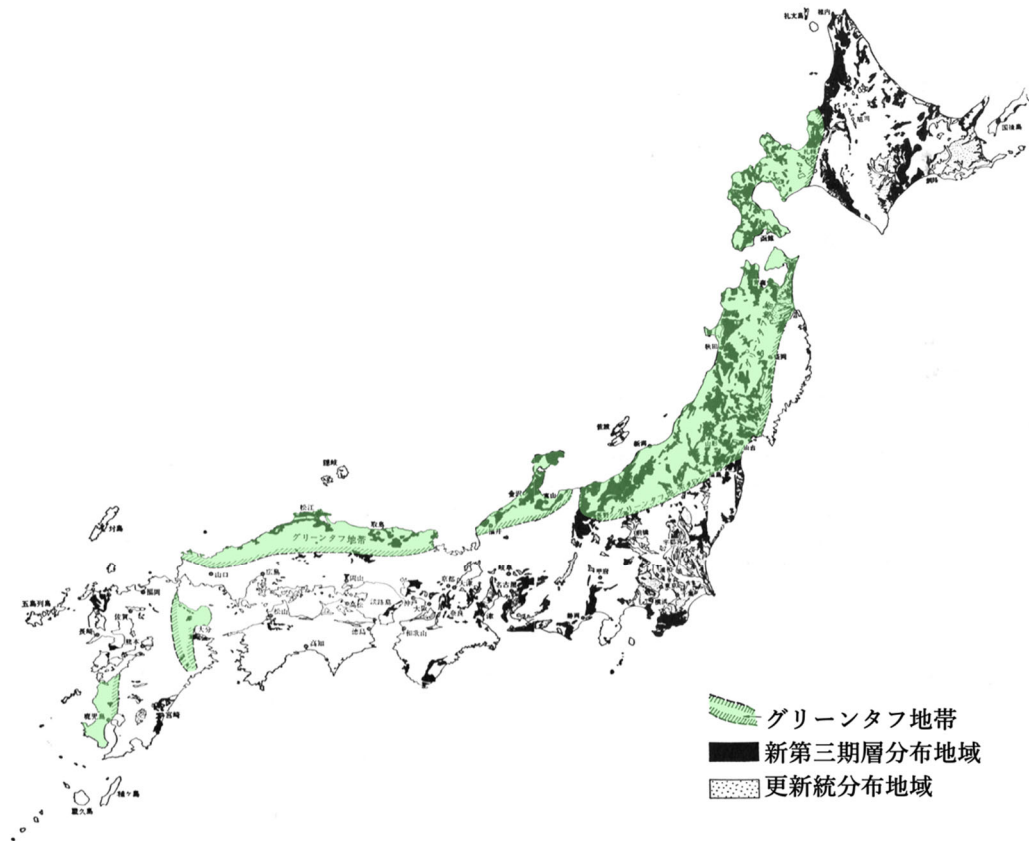


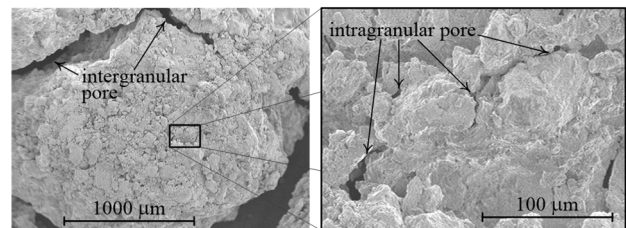
図-1 脆弱岩がよくみられる地層（新第三紀層，グリーンタフ地域および沖積層）の分布⁶⁾

河川でシルトや粘土が堆積・固結したもので、泥岩がさらに固結して層理面に平行な細かい縞目（葉理）を形成すると頁岩になる。凝灰岩は2 mm以下の粒径の火山灰が固結した岩石である。

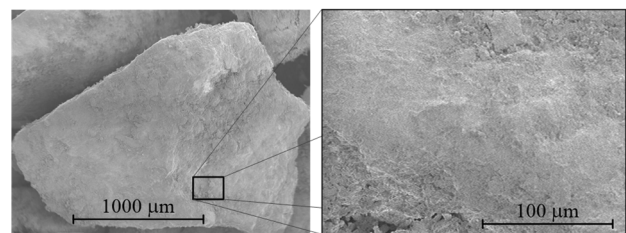
脆弱岩をよく含む新第三紀（中新世，鮮新世）層および第四紀（更新世）の洪積層は、図-1のように全国的に広く分布している。新第三紀層や洪積層は沖積層の直下や平野周辺の丘陵地にも存在するため、大きな河川流域の都市部でもしばしば確認されている。

2.2 脆弱岩の特徴

新第三紀層は脆弱岩をしばしば含むものの、一般的には土砂に比べて剛性や強度が高いので構造物の支持層として用いられ、切土やトンネル掘削により得た土塊や岩塊は発生土として盛土材や路床材，路盤材に利用されている。脆弱岩は掘削時の応力解放により吸水膨張して著しく強度が低下したり，乾湿繰返しによる風化現象（スレーキング）や締固めによって泥濘化したりして，土砂に近い性質を呈することがある。そのため，岩塊の風化による剛性や強度の低下を考慮して，軟岩と土砂の性質をともに考慮した設計，施工を行う



(a) 神戸泥岩



(b) 清水泥岩

写真-2 走査電子顕微鏡で観察した脆弱岩の表面構造⁷⁾

か，脆弱岩の剛性や強度が低下しないように風化を抑制する工法を用いる必要がある。

脆弱岩の性質は，構成する粒子の起源や粒径，固結度，風化の程度によって異なる。写真-2のように，固結度が低く個々の構成粒子を明瞭に区別できる脆弱岩もあれば，よく固結して緻密化した脆弱岩もある。脆弱岩が含有する粘土鉱物も様々であるが，単位結晶の

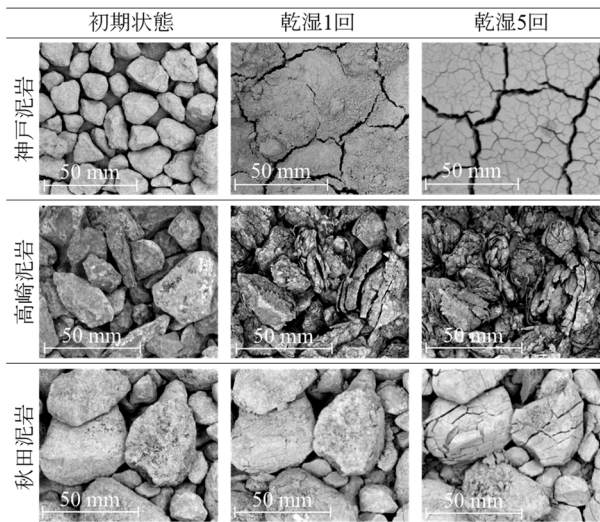


写真-3 乾湿繰り返しによる泥岩の風化（上から順に、一回の湿潤で完全に泥凪化する神戸泥岩、頁岩に似た層状の剥離をする高崎泥岩、玉ねぎ状に表面から剥離する秋田泥岩）⁷⁾

間に水分子が侵入すると結晶の間隔が広がって膨張する性質をもつスメクタイトは吸水膨張や膨潤圧を引き起こす。写真-3 は泥岩を破碎して得た岩碎に湿乾履歴を与えてスレーキングによる細粒化の様子を観察した結果であるが、容易に崩れて泥土化する岩碎や、乾湿繰り返しとともに層状に割れる岩碎、玉ねぎ状に表面から剥離する岩碎など様々である。

2.3 脆弱岩の物理的・力学的性質

脆弱岩および破碎土は外力や乾湿繰り返しを受けて細粒化するため、現地では品質を確保できる方法で試料を採取し、採取後は無用な外力を加えず、自然含水比を一定に保つように保管する必要がある。縮固め試験や各種の力学的な荷重試験では、試験中に材料特性が変化するため、複数回の試験に同じ試料を繰り返して使用しないように留意する。

試験は目的に応じて「乱さない状態」の新鮮な試料を用いるのか、「乱した状態」での応答を観察するのか、明確にすることが重要である。図-2 はスレーキング前後の風化砂岩に対して非圧密・非排水三軸試験で得た強度特性である。スレーキング後は前と比較してピーク強度が小さく、内部摩擦角は大きく減少している⁸⁾。なお、スレーキング前後の供試体はともに自然含水比で締固めており、乾燥密度はほぼ同じである。また、スレーキング後の供試体はスレーキング試験で細粒化した岩碎を用いて作製されている。

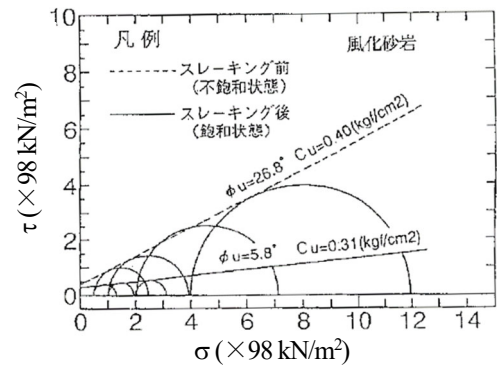
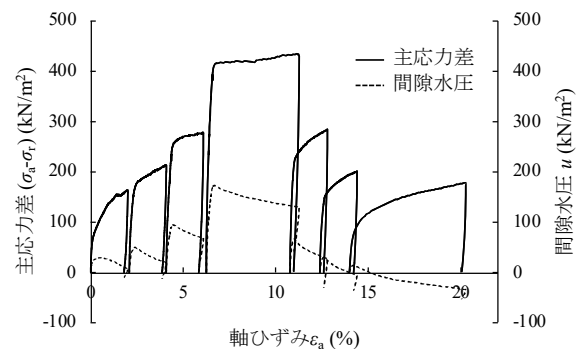
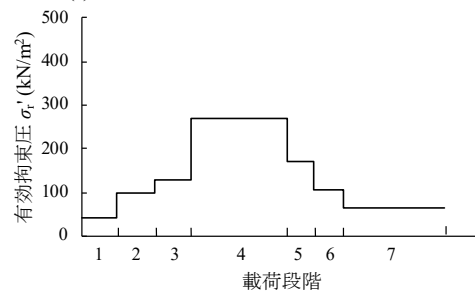


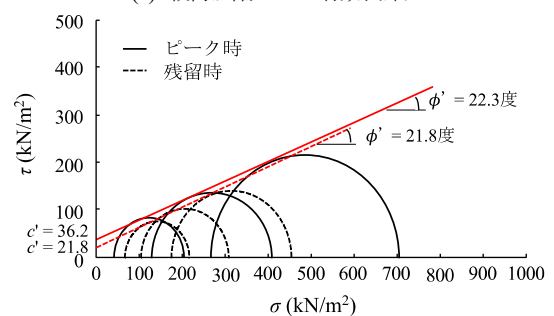
図-2 スレーキング前後の風化砂岩の強度特性⁸⁾



(a) 多段階せん断時の応力ひずみ関係



(b) 荷重段階ごとの有効拘束圧



(c) ピーク時および残留時のせん断強度

図-3 泥岩の多段階三軸圧縮試験（圧密非排水）の結果例⁹⁾

脆弱岩は試料採取や保管、試験時に無用な乱れを生じさせないための取り扱いに手間がかかり、試験の再現性にも影響を及ぼす。これに対して、1本の供試体に対して拘束圧を変化させて多段階のせん断を行い、一連の強度定数を得ようとする多段階三軸試験も用いられている⁹⁾。図-3 は各荷重段階において有効拘束圧を



(a) 切土法面の表層崩壊の様子



(b) 亀裂が発達した泥岩斜面からの落石状況



(c) 切土掘削後、数年が経過した泥岩の亀裂発達状況
写真-4 泥岩からなる切土法面の表層崩壊事例

段階的に引き上げてピーク強度を計測した後、再度、拘束応力を段階的に引き下げて残留強度を計測した多段階三軸試験の結果で、一つの供試体から強度特性のパラメータを特定している。

脆弱岩および破碎土では通常の試験に加えて、耐久性を評価する試験も実施される。乾湿履歴に対する細粒化のしやすさ、すなわちスレーキング特性を評価す

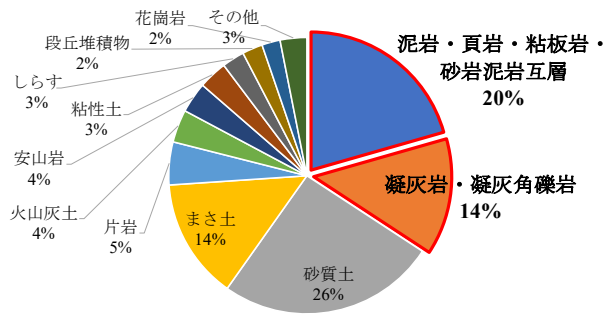


図-4 1995年～2003年の切土法面崩壊箇所の地質¹⁰⁾に加筆

る方法としては、乾燥と水浸を一回与えて変化を観察する「スレーキング試験 (JGS 2124)」と乾湿を繰り返して積極的に風化を進展させる「促進スレーキング試験 (JGS 2125)」の2種類がともによく実施されている。また、脆弱岩破碎土に対しては、荷重を受けたときの破碎のしやすさ、すなわち破碎率を評価する方法として破碎率試験も実施される。試験の概要は「地盤材料試験の方法と解説⁵⁾」を参照いただきたい。結果や利用方法については4.で詳しく解説する。

3. 脆弱岩により構成された切土法面の問題と対応

3.1 脆弱岩により構成された切土法面の実態

国土の約 2/3 が山岳地である我が国では、道路や鉄道といったインフラを建設するにあたり山地を切土掘削する機会が多く、脆弱岩が分布する地域 (図-1 参照) にも切土法面は多数存在する。そして脆弱岩の経年劣化は切土斜面の法面崩壊等の問題を引き起こしてきた (写真-4)。1995～2003 年にかけて高速道路の切土法面で発生した 418 件の崩壊事例の地質¹⁰⁾をまとめた図-4 からわかるように、脆弱岩をよく含む泥質岩類 (泥岩・頁岩・粘板岩・砂岩泥岩互層) や凝灰岩類での崩壊事例は全体の約 1/3 にのぼる。なお、風化が急速に進展する泥岩や凝灰岩の地質的要因に加えて、地すべり地形や受け盤・流れ盤、集水型斜面といった地質構造的素因も複合的に影響している。

3.2 切土法面の風化と崩壊

(1) 切土法面の風化とは

一般に岩石の風化は「岩石が地表面において水、空気、太陽熱の作用を受け分解変質する過程」であり、その主な要因は①乾湿繰り返しや凍結融解などの物理

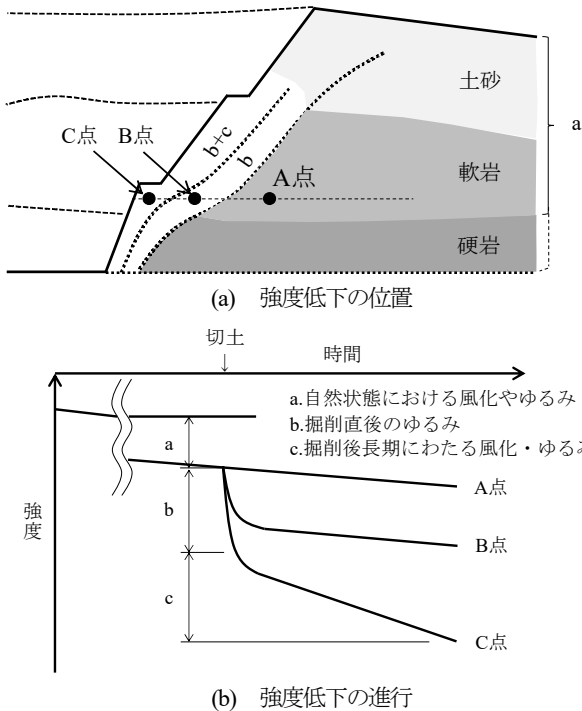


図-5 切土法面の風化やゆるみの概念図¹³⁾



写真-5 掘削から約50年経過した切土法面表面の風化状況
(新生代新第三紀 泥岩優勢砂岩泥岩互層)

的風化作用, ②酸化・還元・溶脱等の化学的風化作用, ③根茎による割れ目の発達や細菌による酸化などの生物的風化作用の三つに分類される¹¹⁾。

切土法面では, 岩石の風化に加えて切土掘削時の応力解放(ゆるみ)による亀裂の発達やそれに伴う吸水膨張の影響も考慮する必要がある。多賀らは, この切土法面の風化やゆるみの進行を「a. 自然状態における風化・ゆるみ」, 「b. 掘削直後のゆるみ」, 「c. 掘削後, 長期にわたる風化・ゆるみ」の三つに区分して説明している(図-5)^{12)~14)}。aは切土前からの地質学的年代を経て受けた風化作用と重力性のゆるみである。bは掘削後の比較的早期に終了する応力解放に伴うリバウンドやクリープ, スレーキングによる強度低下で, 法面施工時の重機や発破の影響も含まれる。cは, 法面施

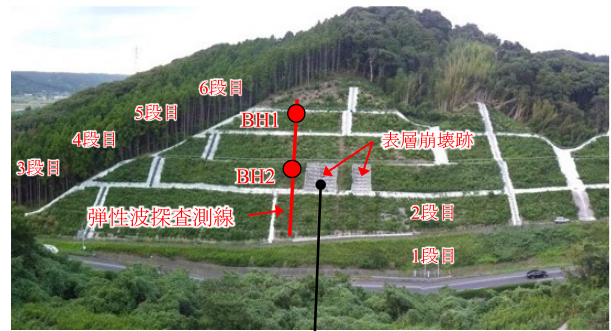


写真-6 表層崩壊箇所の復旧状況(コンクリート杭工)



工後, 乾燥・湿潤や凍結・融解の繰返しによる強度劣化および進行性破壊である。切土法面の建設や管理で対象となるのはbとcの影響による強度低下である。

(2) 風化が影響した切土法面の崩壊事例

切土法面を構成する岩盤は, 風化作用を受けると強度が低下し, 降雨等の作用がトリガーとなって崩壊することがある。古第三紀以降の堆積性軟岩は一般的に固結度が低く, 切土後の風化作用に対しても耐久性が低い。写真-5は, 掘削から約50年が経過した泥岩切土法面の表層部の状況で, 掘削時の応力解放に伴う亀裂の発達や吸水膨張を受けたあと, 長期にわたって乾湿繰返し等の作用を受けることで岩盤の表層部の亀裂が進展し, 細粒化が進んでいる。掘削から約45年後には豪雨時に表層崩壊を生じたため, 対策として法枠による法面保護が施された(写真-6)。このように風化しやすい岩盤が露出した法面では, 表層の風化が進み, 表土の侵食や肌落ち, 崩落等を生じることがある。

(3) 切土法面の風化機構に関する検討事例

脆弱岩からなる切土法面の風化機構については, 物理的風化と化学的風化の両面からの検討⁹⁾が進められている。この検討では, 切土掘削後から約50年にわたって継続的に弾性波速度 V_p や物理特性, 強度特性の調査が行われ, 切土法面を構成する泥岩の風化と物理的および力学的性質の時間的, 空間的な変化が分析され

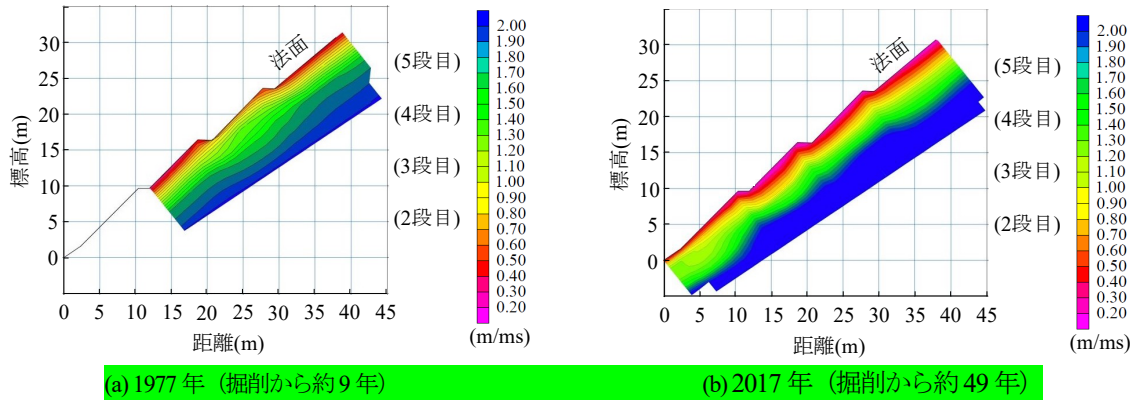


図-6 弾性波速度 (P波) の分布⁹⁾ (測線は写真-6 参照)

深さ(m)	試料の色調	風化の程度	フロント	鉱物の含有量 (相対強度)						pH												
				Il	K	Sm	Cl	C	Pt	3	4	5	6	7	8	9	10	11				
0.0-0.5	褐灰色 (明)	W1	酸化帯 酸化フロント	■	■	■	■	■	■	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●			
0.5-1.0				■	■	■	■	■	●		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
1.0-1.5				■	■	■	■	■	■		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
1.5-2.0	■	■		■	■	■	■	●	●		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●		
2.0-2.5	褐灰色	強風化	W2	■	■	■	■	■	■	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●			
2.5-3.0	暗灰色	風化		■	■	■	■	■	■	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●		
3.0-3.5			■	■	■	■	■	■	■	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●		
3.5-4.0		■	■	■	■	■	■	■	■	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●		
4.0-4.5		■	■	■	■	■	■	■	■	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●		
4.5-5.0		■	W3 弱風化/ 新鮮岩	溶解帯/ 新鮮岩帯 (溶解フロントは不明)	■	■	■	■	■	■	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●		
5.0-5.5		■			■	■	■	■	■	■	■	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
5.5-6.0		■			■	■	■	■	■	■	■	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
6.0-6.5		■			■	■	■	■	■	■	■	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
6.5-7.0		■			■	■	■	■	■	■	■	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
7.0-7.5		■			■	■	■	■	■	■	■	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
7.5-8.0	■	■			■	■	■	■	■	■	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
8.0-8.5	■	■			■	■	■	■	■	■	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
8.5-9.0	■	■			■	■	■	■	■	■	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
9.0-9.5	■	■			■	■	■	■	■	■	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
9.5-10.0	■	■	■	■	■	■	■	■	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●			
10.0-10.5	■	■	■	■	■	■	■	■	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●			

※地下水位はボーリング掘削時の孔内水位である

図-7 鉱物分析およびpH試験の結果⁹⁾

た。図-6は写真-6の測線で1970年と2017年に取得した弾性波速度 V_p の分布であり、法面表層の V_p が低下し、風化が進行した様子をもてとれる。

現地採取されたボーリングコアは、地下水位以浅の表層付近で褐色化が顕著で、強風化している様子が確認された。これに対して、粉末X線回折法による鉱物分析やpH試験では、図-7に示すように地下水位以浅で黄鉄鉱や緑泥石の消失とスメクタイトの生成など含有鉱物の変化と岩石の酸性化が認められ、化学的風化の進展が明らかにされた。同様の傾向は応用地質学の観点からも指摘されている¹⁵⁾。

3.3 切土法面の風化への対応

(1) 風化の程度を知るための調査例

高速道路では、切土法面をなす岩盤の風化進行調査

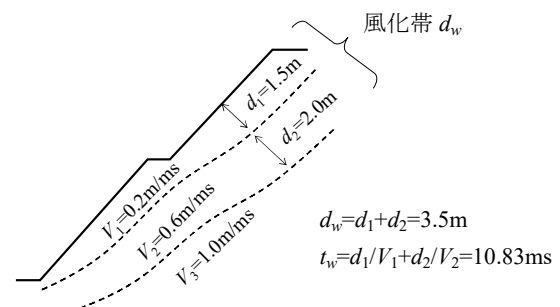


図-8 風化帯層厚および風化帯通過時間の計算例

として弾性波探査 (屈折法)¹⁶⁾ および速度検層¹⁶⁾ を全国で96箇所を選定して継続的な調査が実施されている。この調査は弾性波速度が地盤の N 値や一軸圧縮強さと強い相関がある特徴に着目したもので、弾性波速度の変化を追跡することで、切土法面の風化進行や強度低下に伴う法面の不安定化の評価を狙っている^{17)~19)}。この方法では、弾性波速度 V_p が1 m/ms以下とな

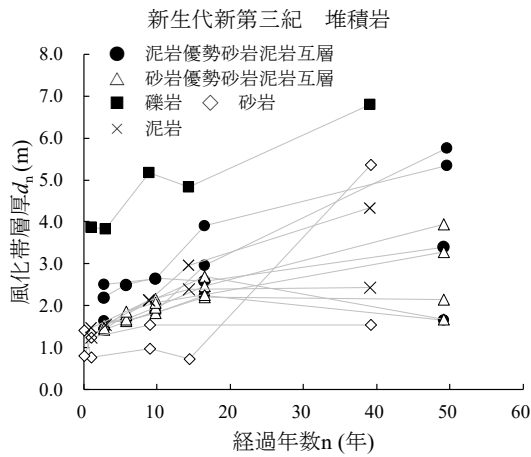


図-9 風化帯層厚の経年変化

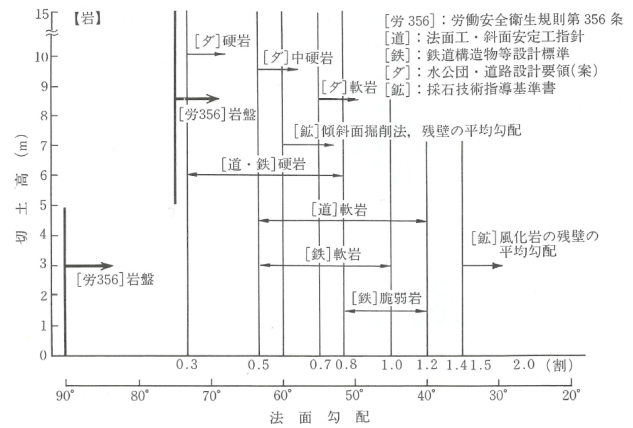
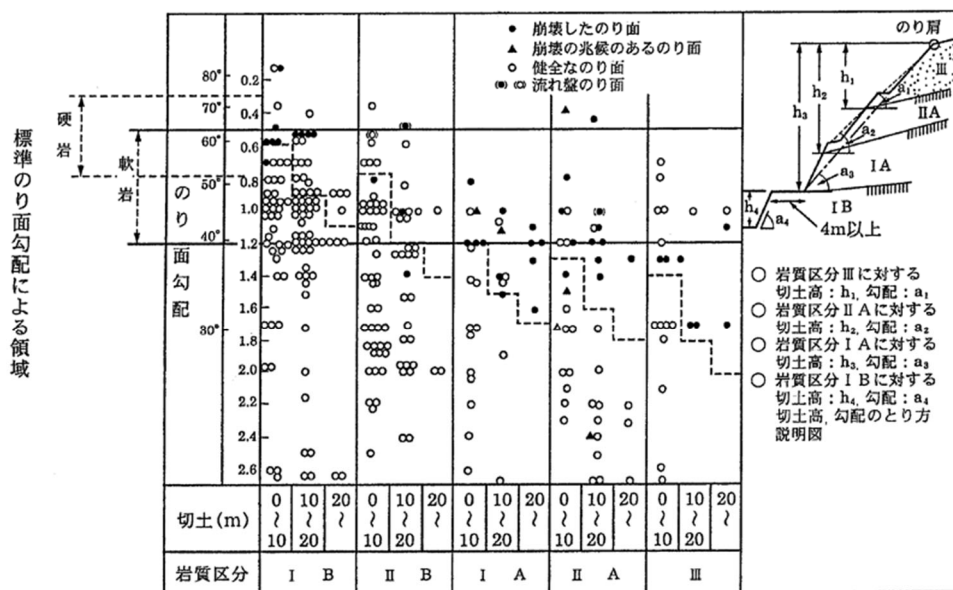


図-10 各機関の岩盤に対する法面勾配の基準の比較¹⁷⁾



注) 図中ののり面勾配は、適用に示す平均のり勾配であるので、標準のり面勾配領域と若干異なる。

図-11 泥岩・凝灰岩の岩石区分と適正法面勾配¹⁸⁾

る速度層を風化帯と定義し、風化帯の層厚 d_w (m) や平均速度 V_w (m/ms), 風化帯通過時間 t_w (ms) によって風化進行を評価する (図-8)。図-9 は、新生代新第三紀堆積岩からなる切土法面の風化帯層厚 d_w の経年変化を調査した事例である。この調査は切土掘削直後から行われ、切土掘削からの約 50 年間で風化帯層厚 d_w が徐々に増加しており、風化の進行が確認された。

(2) 風化を考慮した設計 (適正な法面勾配の設定)

新第三紀の泥岩や頁岩、固結度の低い凝灰岩等の軟岩などの脆弱岩に加えて、蛇紋岩、温泉余土等の変質岩も「風化の速い岩」と考えられている。このような岩盤の強度特性は風化により刻々と変化するため、標準的な設計基準を適用できず、従来の安定解析で切土法面の安定を正確に評価するのも難しい。そのため、

余裕をもたせた安全側の勾配で設計することで法面の安定を担保している。具体的に、各機関は過去の法面勾配の採用実績を踏まえて、地山条件に応じた法面勾配の設計基準が設けており、例えば泥岩・凝灰岩に対しては図-10 の法面勾配が適用されている。

脆弱岩の切土法面に対しては、風化による不安定化の可能性も考慮して法面勾配を設定する必要がある。切土による応力解放や、その後の乾湿や凍結融解の繰返し作用の影響を受けて急速に風化し、法面の安定性が損なわれることへの懸念から、図-11 に示す参考基準¹⁹⁾に基づいて法面勾配が個別に設定されている。この基準は、岩の硬さや二次的強度変化を考慮した法面勾配の判別基準¹⁸⁾で、岩の外見やハンマーによる打診、土壌硬度、弾性波速度、ボーリング孔内試験の結果に



(a) モルタル吹付けの様子



(b) モルタル吹付け工を施した切土斜面
写真-7 モルタル吹付け工

より岩の硬さⅠ～Ⅲを判別し、勾配を決定している。一方、二次的強度変化の程度はAとBで表し、風化の程度を特徴付ける自然吸水膨張率や液性限界、乾湿繰返し時の吸水量増加率により判別する。基準の詳細は参考文献¹⁹⁾を確認されたい。

(3) 切土法面設計における風化の考慮（法面保護工）

切土法面の風化は降雨等の作用により斜面崩壊を引き起こす要因となることから、一般的に法面の風化が予見または確認される場合には法面保護工を計画する。法面保護工は植生によるものと吹付コンクリート等の構造物によるものに大別されるが、法面の侵食防止や風化抑制、土砂流出防止等の目的に応じて現場の地盤の状態にあった適切な工法を選択する。風化の速い脆弱岩に対しては、地山を密閉することにより風化や侵食を抑制し、土砂の流出や落石を防止することを期待して、モルタルおよびコンクリート吹付け工（写真-7）やコンクリート枠工（写真-6）等の密閉型法面保護工が採用される事例が多い。

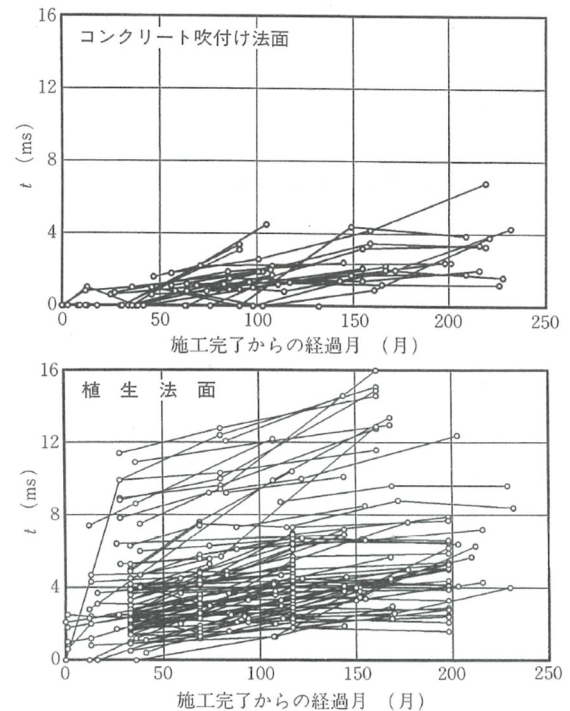


図-12 コンクリート吹付け法面、植生法面の風化帯通過時間 t_w の経年変化比較¹⁹⁾

(4) 密閉型法面保護工の効果と課題

密閉型法面保護工の風化抑制効果については、切土掘削直後と数年後の風化帯通過時間 t_w の変化に基づいて評価が行われている。図-12は堆積岩からなる切土法面において、コンクリート吹付け法面と植生法面の風化帯通過時間 t_w の経年変化を示している。風化帯通過時間 t_w は風化の進行とともに値が増大する指標であるが、コンクリート吹付け法面は植生法面に対して t_w の増加が抑えられており、風化進行に対する抑制効果が高い。しかし、約100ヶ月を過ぎたあたりから風化の進行が大きくなる法面が認められ、コンクリート吹付け自体の劣化も原因の一つと考えられている¹⁴⁾。これより法面保護工は永久構造物とは言えないため、将来にわたって永続的に効果を維持するためには劣化具合に応じた維持管理が重要である。

以上のように、切土法面の風化に対しては法面勾配を緩くすることや密閉型法面保護工を施すことにより対応しているが、年月とともに地山自体の風化が進行して様々な問題を引き起こしている。切土法面を永続的に維持管理するためには、風化の進行による法面の不安定化を予測して対策する技術や、劣化する法面保護工の維持管理技術が必要不可欠であるため、現在も研究を進められている。

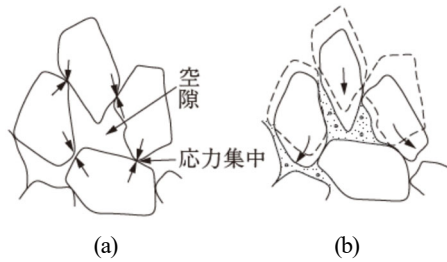


図-13 脆弱岩破碎土のスレーキングと圧縮のメカニズム²⁰⁾

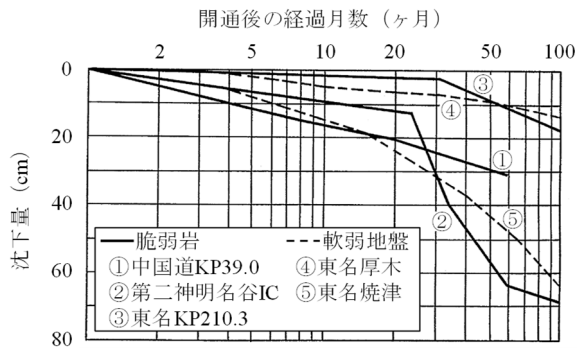


図-14 脆弱岩盛土および軟弱地盤上の盛土の沈下事例^{18)に加筆}

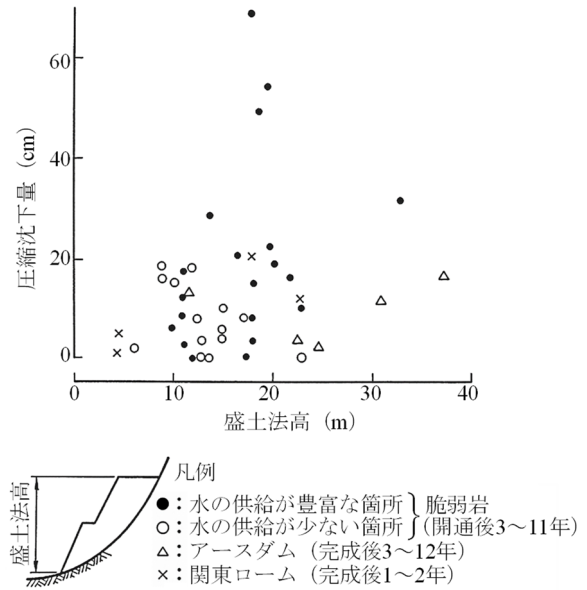


図-15 脆弱岩盛土の盛土条件と圧縮沈下量²⁰⁾

4. 脆弱岩破碎土による盛土の問題と対応

ここからは、高速道路における脆弱岩破碎土による盛土（以下、脆弱岩盛土）の問題と対応について、沈下と安定の問題に大別して説明する。

4.1 脆弱岩盛土における沈下の問題と対応

(1) 脆弱岩盛土の沈下の実態

全国各地で建設される高速道路では、その土地で掘削して発生した土を利用することで、経済的に盛土が構築される。切土掘削により発生した土は、脆弱岩破碎土であっても盛土に利用することを基本としてきた。

岩塊は転圧しても空隙ができやすく、脆弱岩破碎土の場合は施工後に降雨や地下水の影響を受けると、スレーキングが生じる。図-13(a)のように応力集中部から土粒子が破碎し、同図(b)のように空隙に落ち込むことで、盛土は圧縮沈下を引き起こす。

図-14は、脆弱岩盛土と軟弱地盤上の盛土の沈下傾向を比較したものである。軟弱地盤の長期沈下はよく知られているが、脆弱岩盛土で急激に生じる沈下は大きく長期にわたる場合がある。

高速道路における脆弱岩盛土の沈下への対応については、島ら²⁰⁾が詳述している。図-15は、盛土条件と開通後の圧縮沈下量の相関を示したもののだが、スレー

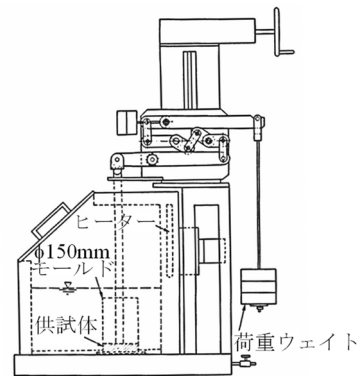


図-16 乾湿繰返し圧縮試験機²⁰⁾

キング性の高い脆弱岩盛土はアースダムや関東ローム盛土より大きな圧縮沈下量を示すものが数多い。また、圧縮沈下量が大きい脆弱岩盛土は、盛土高10~15m以上で、盛土内への水の供給が豊富な箇所である²⁰⁾。

島らの研究当時は、路面クラックを生じて大がかりな原因調査を行ったケースや、路面補修のほか、排水溝やガードレールの補修、大規模な水抜き対策を講じたケースもあったが、盛土崩壊に至るような大きな変状は見られなかった。ただし、交通量や道路構造によっては、沈下による路面の段差が大きな影響を与えかねないことから、将来の圧縮沈下量を建設時に軽減する方策について研究が進められた。

(2) 脆弱岩破碎土の圧縮性分類

脆弱岩盛土のスレーキングによる圧縮性を室内で検討するために、供試体に一定荷重を載荷した状態で乾燥水浸を繰返し、圧縮沈下量を測定できる試験機が開発された(図-16)。併せて、圧縮沈下の主たる材料的

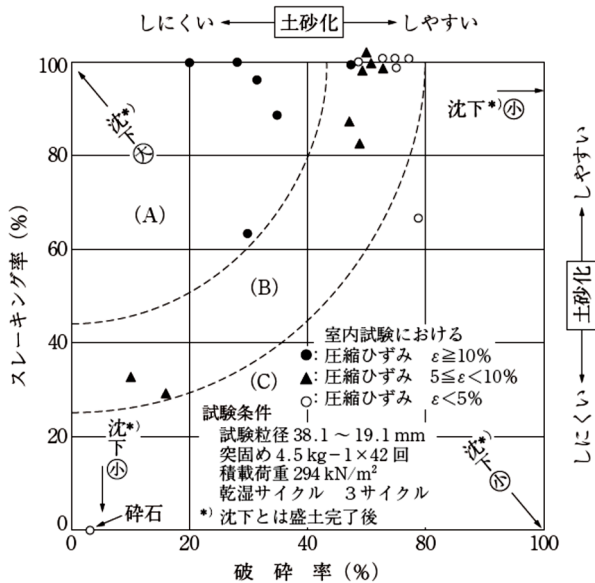


図-17 脆弱岩材料の圧縮性分類図²⁰⁾に一部加筆

要因と考えられる①岩材料の耐久(スレーキング)性, ②空隙の大小に影響する岩材料の粒度, 外力による粒度の変化, すなわち施工機械による破碎のしやすさに着目し, それらの指標(スレーキング率, 破碎率)を得る試験方法が考案された。これらの試験方法はその後, NEXCO 各社で地盤材料の適否の判断に用いられている^{21), 22)}。19~37.5 mm の粒径に調整した試料に対して, 乾湿繰返し 5 サイクル後の 9.5 mm ふり通過率をスレーキング率, 2 MN/m² での静的載荷後の 9.5 mm ふり通過率を破碎率としている。

図-17 は, 全国から採取した脆弱岩 22 試料について, スレーキング率と破碎率の関係から圧縮性を評価できるように整理したものである。(A) 領域に入る材料は乾湿繰返しによる圧縮ひずみが 10 %以上となり, このような材料で盛土を構築した場合は, 供用後の沈下に対する懸念が大きいと考えられる。

(3) 脆弱岩盛土の施工管理

圧縮性が大きいと判定された材料をやむを得ず盛土する場合, その沈下量を軽減するためには施工方法の工夫が必要となる。そこで, 乾湿繰返し条件下における岩塊の圧縮沈下量に対する破碎効果の影響を調査した結果, 岩塊混入率が高い現場では岩塊を破碎転圧することが圧縮沈下量を軽減する有効な方法であることがわかった²⁰⁾。言い換えると, 脆弱岩盛土では空気間隙率を小さくすれば圧縮沈下量を軽減できるということになる。図-18 は, 載荷荷重別に空気間隙率と圧縮

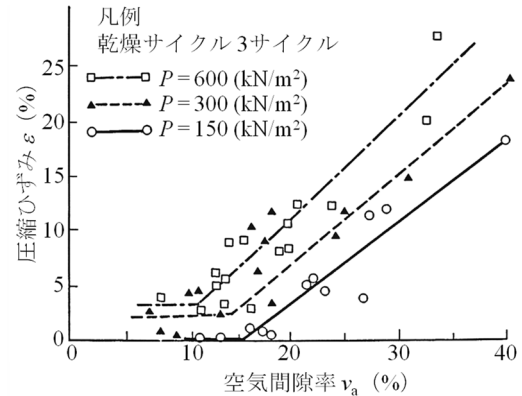


図-18 空気間隙率と圧縮ひずみ¹⁸⁾

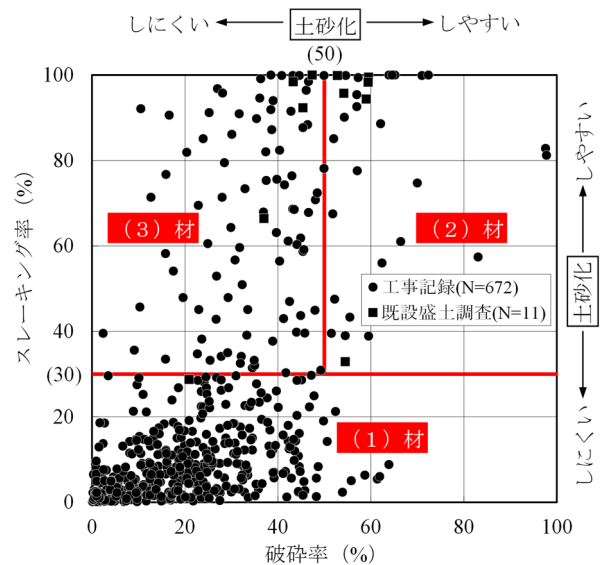


図-19 圧縮沈下を考慮するスレーキング性材料の区分¹⁸⁾に一部加筆

ひずみの関係を示したものである。空気間隙率がある値以下になると, 圧縮ひずみはほぼ一定値となる。このことから, 現場においては, 密度比の基準のみならず空気間隙率の基準を併せて設け, 大型施工機械等で破碎転圧するのが有効と言える。

その後, 新東名高速道路の建設にあたり, 大規模な脆弱岩盛土が多く計画されたことを受け, より明確に材料を区分できるように考案されたものが, 図-19 である。同図には, 全国の工事記録から得たデータと別途既設盛土からサンプリングして得たデータを併記している。以降, 高速道路では, 高盛土や構造物周辺など, 供用後に沈下が大きな問題となる箇所での (3) 材の使用は可能な限り控えることとしている。

(4) 脆弱岩盛土の長期沈下計測例

写真-8 は脆弱岩破碎土を用いた新東名高速道路の盛土の例で, (a)は薄層に敷均した脆弱岩破碎土を大型振動ローラで転圧する試験施工, (b)は脆弱岩破碎土を



(a) 脆弱岩破砕土の転圧状況



(b) ゾーニング施工された高さ 90 m の高盛土
写真-8 脆弱岩破砕土を用いた盛土



写真-9 牧之原地区の盛土崩落状況²⁴⁾



写真-10 崩積土先端付近の粘性土²⁴⁾

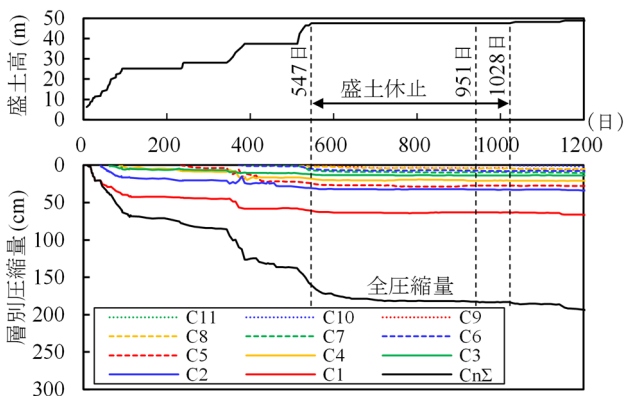


図-20 盛土層別沈下量の経時変化例²³⁾に一部加筆

含む多様な盛土材によりゾーニング施工された高さ 90 m の高盛土の様子である。図-20 は、盛土高約 50 m の倉真泥岩による盛土の、盛土高約 5 m 毎に測定した層別沈下計の圧縮量の経時変化である。盛土材はスレーキング率 40%以下、破碎率 20%以下であったが、岩塊は極力小割するなど注意深く、平均 9 cm/日で盛土施工された。盛土開始から最大 192.2 cm の圧縮沈下が生じているが、圧縮沈下率は 3.9%であった。盛土休止 547 日目付近の沈下速度は 0.5 cm/日であったが、951 日目から盛土再開までの沈下量はほとんどなく、ほぼ 1 年間で残留沈下が収束している²³⁾。

4.2 脆弱岩盛土における安定の問題と対応

(1) 東名牧之原盛土の崩落

脆弱岩盛土の沈下の問題に対して実務的対応が図られてきたが、東名高速道路の盛土が崩落した(写真-9)ことで、あらためて脆弱岩盛土の安定性に焦点が当てられるようになった。

当該盛土は、東名高速道路の牧之原 SA 付近の上り線に位置し、2009 年 8 月に駿河湾を震源とするマグニチュード 6.5 の地震の影響で、高さ約 28 m、長さ約 80 m、幅約 40 m にわたり崩落した^{24),25)}。重交通路線の混雑期の被災であったことから、この崩落に伴う通行止めの社会的影響が大きく、盛土の耐震性が注目されたほか、その要因の一つが盛土材である泥岩が長年のスレーキング作用による強度低下と推定されたことは地盤工学的に大きな影響を与えた。

崩落部の周囲および崩積土の表面には竹が生えており、崩落前から水が多かったことがうかがえた。崩積土の先端付近では、写真-10 のように足がぬかるむほどの粘性土が露頭していた²⁴⁾。図-21 の断面形状に示すとおり、盛土下の原地盤は相良泥岩層で道路横断方

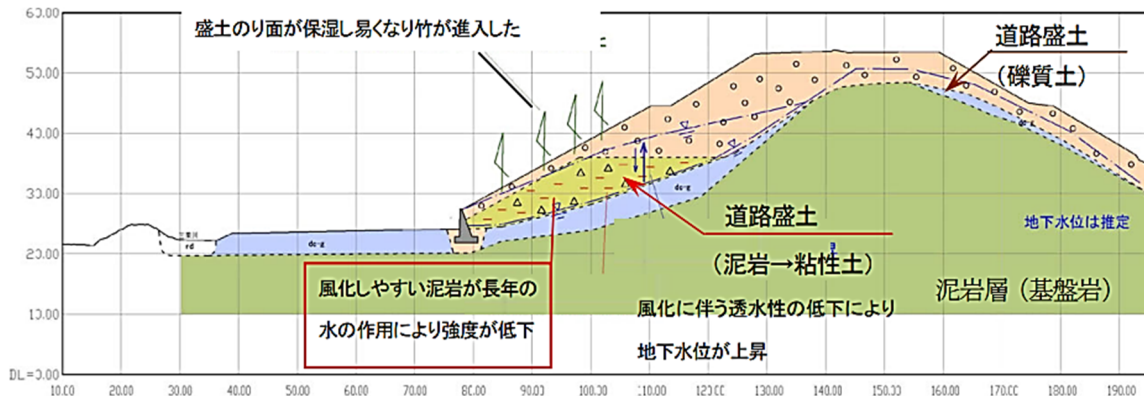


図-21 崩落箇所における断面形状 (崩落前)²⁵⁾

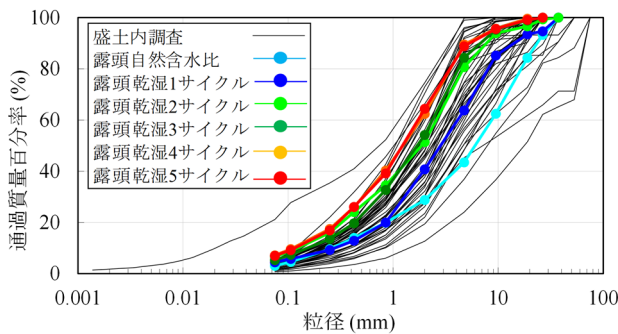


図-22 乾湿繰返し粒度と既設盛土粒度 (上信越道高崎地区)²⁶⁾

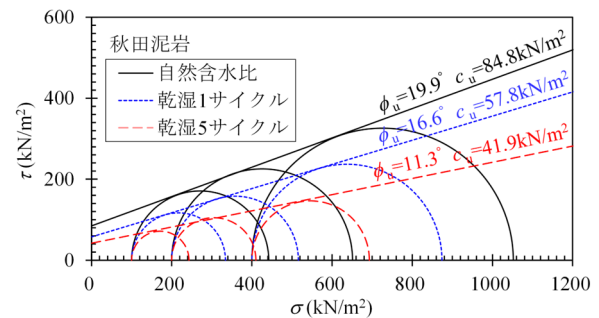


図-23 UU 三軸試験結果 (日本海東北道秋田地区)

向に凸型の特殊な形状であった。このような原地盤形状では、盛土に伝播する地震動が複雑となり、地震動の増幅により盛土の変形に与える影響が大きくなったとも考えられている²⁵⁾。また、上部路体は礫層等の良質材が使用されていたが、盛土下部に使用された泥岩(周辺地山から採取した新鮮岩でスレーキング率95.7%)が、長年の水の作用により強度低下するとともに、透水性が低下した結果、盛土内の地下水位が上昇し、地震が誘因となって崩落したものと推定された²⁴⁾。

(2) 脆弱岩盛土の強度定数の検討

この災害を受け、全国的高速道路供用路線の脆弱岩盛土9地点を調査した。図-22は、既設盛土のサンプリングの粒度と、その付近の露頭材料の乾湿繰返し試験による各サイクルの粒度を比較した例である。乾湿繰返しサイクルの増加に伴い細粒化するが、それらの粒度は盛土内の粒度分布の範囲内にあることがわかる。このことから、露頭材料を用いた乾湿繰返し試験で、将来の盛土の平均的な状態をある程度模擬できると考え²⁶⁾、力学試験の供試体作製に応用した。

図-23は、露頭泥岩試料を用いたUU三軸試験結果のモール円と破壊包絡線である。自然含水比状態、乾湿繰返し1サイクル後、乾湿繰返し5サイクル後の供

試体(直径200mm、高さ400mm)を作製して試験した。スレーキングに伴いせん断抵抗角 ϕ_u が減少する様子が見て取れる。なお、既設盛土内部はどの調査箇所も飽和度が90%以上であり、地山からの湧水の影響のみならず、降雨等による盛土法面部からの浸透水の影響を受けている可能性がある。また供用年数と飽和度に相関もないことから、盛土造成後の比較的早い段階で浸透水の影響を受けていると考えられる²⁷⁾。

一方、既設盛土から採取した試料は、UU三軸試験のモール円から、せん断抵抗角 ϕ_u は限りなく小さく、粘着力が卓越する材料である²⁶⁾ことが確認された。また、 \overline{CU} 三軸試験によるモール円から強度増加率 $m (= \sin\phi_{cu} / (1 - \sin\phi_{cu}))$ 、 ϕ_{cu} は \overline{CU} 三軸試験で求めたせん断抵抗角を求めると、 $m = 0.35 \sim 0.6$ 程度であった。

これらの検討の結果として、高速道路の脆弱岩盛土建設時において、将来的な強度低下を考慮する場合の強度定数として、表-1が設計要領¹⁸⁾に掲載されている。ここでは、スレーキング率が70%程度以上のものが強度低下を考慮すべき盛土材料として区分している。

このように、脆弱岩盛土の安定の問題に対しても、高速道路建設では実務的な対応がとられてきた。ただし、スレーキングによる細粒化と雨水や地下水による

表-1 強度低下を見込んだスレーキング性材料の土質定数
(概略検討の場合)¹⁸⁾

種類	状態	単位体積重量 (kN/m ³)	せん断抵抗角 (度)	粘着力 (kN/m ²)	地盤工学会基準 ^{注2)}
盛土	スレーキング性材料 締固めたもので、強度低下が懸念されるもの	19	0	0.4× <i>p_t</i> ^{注1)}	{G}, {GS}

注1) ここでいう *p_t* とは、有効土被り圧をいう。0.4 は盛土調査および露頭材料を用いた土質試験結果を基に設定した強度増加率。有効土被り圧が小さな範囲 (表層部) では粘着力は小さくなるが、最低値として 35 (kN/m²) は見込んでよい。
注2) 地盤工学会基準の記号は、掘削時の新鮮岩の状態における分類およびその目安である。

含水状態の変化が複合的に作用して強度低下を引き起こしていることが想定されるものの、その過程やメカニズムの完全な解明には至っていないため、現在も研究が進められている。

5. おわりに

本稿では、乾湿を繰り返すと急速に風化する脆弱岩と、それを砕いた地盤材料である脆弱岩破碎土について特徴を解説した。また、脆弱岩で構成される切土法面と脆弱岩破碎土を用いて築造した盛土について、実際の問題や対応の事例を紹介した。

脆弱岩で構成される切土法面に対しては、法面表層で展開される物理と化学が連成した複合的な風化のメカニズムについて最近の知見を紹介するとともに、表層地盤を風化させないための対策と、風化も想定して法面の安定性を確保する対応の両面から解説した。脆弱岩破碎土を用いた盛土に対しては、盛土の沈下を抑制するための対策と盛土の安定性を確保するための取組みについて紹介した。特に、脆弱岩盛土の著しい沈下を引き起こすスレーキングと細粒化への対策として、築造時に予め転圧破碎して細粒化させておくという考えは発想の転換による解決の好例と言えよう。本稿が読者にとって参考になれば幸甚の至りである。

参考文献

- 1) 安達徑治：施工面から見た軟岩 1. 講座を始めるに当たって，土と基礎 Vol. 33, No. 11, 69-74, 1985.
- 2) 安達徑治：施工面から見た軟岩 3.7 土砂・軟岩・硬岩の区分判定について，土と基礎 Vol. 34, No. 11, 81-86, 1986.
- 3) 中田幸男・村上豊和・川波敏博：技術者を悩ませる特殊土のコレクション 第3回 まさ土の工学的性質と崩壊事例，地盤工学会誌 Vol. 70, No. 11, 43-55, 2022.
- 4) 奥園誠之：施工面から見た軟岩 3.2 軟岩における切土斜面，土と基礎 Vol. 34, No. 4, 61-68, 1986.

- 5) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説 (第一回改訂版)，2020.
- 6) 土質工学会：土質基礎工学ライブラリー-10 日本の特殊土，1974.
- 7) Kikumoto, M., Putra, A. D. and Fukuda, T. : Slaking and deformation behavior, *Geotechnique* 66(9), 771-785, 2016.
- 8) 横田聖哉・三嶋信雄・星野克之・似内 徹・深澤明雄：スレーキング性材料の強度特性，堆積軟岩による盛土の工学的諸問題に関するシンポジウム発表論文集，229-236, 1995.
- 9) 永田政司・Bhowmik, S.・菊本 統・藤原 優・佐藤尚弘：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，地盤工学ジャーナル Vol. 17, No. 1, 73-89, 2022.
- 10) 平井健太・村上豊和・滝口 潤・佐藤尚弘：適正な法面保護工の選定に向けた実態把握と基礎分析，第57回地盤工学研究発表会講演集，2022.
- 11) 西田一彦：風化残積土の工学的性質，鹿島出版社，192, 1986.
- 12) 多賀直大・田山 聡・奥園誠之・八木沢孝哉：長期追跡調査による切土法面の風化の進行と安定性，土と基礎 Vol. 39, No. 6, 41-47, 1991.
- 13) 藤原 優・永田政司・佐藤尚弘・滝口 潤：切土法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 (地圏工学) Vol. 74, No. 4, 424-438, 2018.
- 14) 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, 73-83, 2020.
- 15) 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, 71-79, 1992.
- 16) 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，2013.
- 17) 土木学会編：岩盤斜面の安定解析と計測，土木学会，33-34, 1994.
- 18) 東日本高速道路㈱，中日本高速道路㈱，西日本高速道路㈱：設計要領第一集土工建設編，2020.
- 19) 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, 37-44, 1978.
- 20) 島 博保・今川史郎：スレーキング材料 (ぜい弱岩) の圧縮沈下と対応策，土と基礎 Vol. 28, No. 7, 45-52, 1980.
- 21) 東日本高速道路㈱，中日本高速道路㈱，西日本高速道路㈱：岩石の促進スレーキング試験方法，NEXCO 試験方法，42-45, 2017.
- 22) 東日本高速道路㈱，中日本高速道路㈱，西日本高速道路㈱：破碎性判定のための岩石の破碎試験方法，NEXCO 試験方法，38-41, 2017.
- 23) 川井田実・横田聖哉・中村洋丈：新東名高速道路における高森土および大規模盛土の設計・施工，基礎工 Vol. 40, No. 7, 9-14, 2012.
- 24) 高木宗男・横田聖哉・菅 浩一・安田 進・太田秀樹：東名牧之原地区における盛土のり面災害の実態，第55回地盤工学シンポジウム論文集，193-196, 2010.
- 25) 中村洋丈・横田聖哉・菅 浩一・安田 進・太田秀樹：東名牧之原地区における盛土のり面災害の動的変形特性，第55回地盤工学シンポジウム論文集，205-212, 2010.
- 26) 中村洋丈・小林 一・藤岡一頼：高速道路における脆弱岩を用いた盛土の安定性評価，第48回地盤工学研究発表会発表講演集，1117-1118, 2013.
- 27) 中村洋丈・小林 一：泥岩を用いた高速道路盛土の物理特性と強度特性，第13回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，103-108, 2013. (原稿受理 2023.12.25)