

1. スレーキングの諸問題

Problems of slaking

○田村栄治・露口耕治(株式会社四電技術コンサルタント)

1. はじめに

スレーキングは岩石が乾燥、湿潤を繰り返すことにより、細粒化しバラバラになる現象で(図1、写真1)、地盤工学会(1996)¹⁾などにより長期的な盛土材の圧縮沈下や強度低下を引き起こす可能性が指摘されている。また、掘削による応力解放と泥岩の長期にわたるスレーキングに起因するとしたのり面崩壊の報告例²⁾もあり、応用地質分野で重要なキーワードの一つである。

本論では、スレーキングの定義について触れ、スレーキングとされる地盤トラブル事例の整理を行い、狭義のスレーキングである泥岩などの新鮮岩のスレーキングの要因を検討し、スレーキングの諸問題について報告する。

2. スレーキングの定義

主要な辞書や資料をもとに、スレーキングの定義と解説を表1にまとめて示す。表1のうち、地盤工学会用語辞典では、主として軟岩に対して浸水すると組織の結合力が破壊されて泥状化あるいは細片状化する現象を言うとし、狭義のスレーキングの定義と捉えることができる。一方で、応用地質用語集CD版には乾燥した半固結堆積物、地盤工学会用語辞典では上記に加えて乾燥した粘性土、新版地学辞典では乾燥した粘土もスレーキングの対象としており、広義のスレーキングの定義と捉えることができる。本論では狭義の泥岩など岩のスレーキング(写真1)について検討する。なお、小島ほか(1984)³⁾はスレーキングを膨潤とスレーキングとは表裏一体の関係にあり、岩石の急速な風化の総称としている。

表1 スレーキングの定義と解説

辞書等	定義と解説
応用地質用語集CD版, 2004, 日本応用地質学会編	乾燥した半固結堆積物あるいは碎屑性軟岩が水分を吸収して岩石組織の結合力を失い, 細片化する現象.
地盤工学用語辞典, 平成18年, 地盤工学会編	<ul style="list-style-type: none"> ・主として軟岩に対して浸水すると組織の結合力が破壊されて泥状化あるいは細粒化する現象をいう。自然斜面や軟岩の盛土の劣化、軟質化の原因になることがある。 ・また、乾燥した粘性土の土塊を急速に水中に浸すと、内部に閉じ込められた空気が吹き出して土塊が崩れる現象についてもスレーキングということがある。
新版地学辞典, 2012, 地学団体研究会編, 榊平凡社発行	<ul style="list-style-type: none"> ・乾燥した粘土や泥岩の塊が降雨などの水分を吸収し、崩れて細粒化する現象。水の侵入によって内部の間隙中の空気が圧縮され土粒子間に引張力が働くこと、土粒子が水を吸収し粒子間隔を広げ粒子間結合力が低下することが原因。 ・新第三紀泥岩地帯の地すべりの原因となったり、あるいは泥岩を用いた盛土の圧縮沈下などをもたらす。
土木用語大辞典, 1992, 土木学会編	<ul style="list-style-type: none"> ・岩石が乾燥と湿潤による水分変化を受けると、鉱物粒子間の結合力が失われて次第に崩壊する現象。その理由として、(1)水分の侵入が間隙中の空気を圧縮し、岩塊や土塊中に引張力を生じること、(2)土粒子の水分吸収により粒子間が広がり、粒子間結合が低下すること、が考えられている。 ・泥質岩や変質岩等の粘土鉱物が多く含まれる岩石に特徴的にみられる。これらの岩石の風化に対する安定性を評価するうえで重要な指標である。

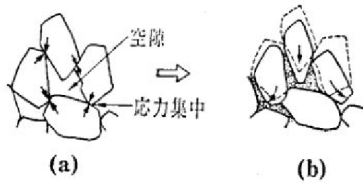


図-1 ぜい弱岩（岩塊）盛土の圧縮沈下

図1 ぜい弱岩盛土の圧縮沈下のイメージ（島ほか，1980）⁴⁾



写真1 四万十北帯の泥岩、掘削岩の細片化の事例（硬貨は1円玉）

3. スレーキングによる地盤トラブルの事例

スレーキングによる地盤トラブルの事例としては、盛土の不同沈下、地すべり・崩壊、トンネルの盤膨れなどが挙げられ、スレーキングによる地盤トラブルの事例を表2にまとめて示す。

菊本ほか（2016）⁵⁾では、泥岩、頁岩や凝灰岩などの脆弱岩の岩砕を土構造物の築造に用いる場合には、スレーキングが長期的な圧縮沈下や強度低下を引き起こす可能性を指摘している。島ほか（1980）⁴⁾は、神戸層群の泥岩の盛土の事例として道路盛土完成後8年間で約70cmの不同沈下を生じた例を報告している。また、同じ神戸層群の盛土で、不同沈下により盛土のすべりに至る事例も報告されている（林ほか，2012）⁶⁾。

スレーキングが地すべり、崩壊の主要原因と評価している事例として、田窪ほか（2012）²⁾と汪（2015）⁷⁾の事例を表-2に示した。田窪ほか（2012）²⁾の事例では、N値50以下の強風化層が緩みゾーンと評価され、不動層はN50以上となっており、スメクタイトは含まれていないようである。汪（2015）⁷⁾の事例では、不動層は原岩色であるが、すべり土塊の褐色化が非常に顕著となっている。これらの緩みゾーンの形成や地すべりは、別の要因による古い緩みゾーンや古い地すべりの兆候があり、そのため、移動土岩塊が強風化して崩壊やすべりを助長した可能性が高いと考えられる。移動土塊や移動岩塊は割れ目が多いことから、スレーキングが比較的短い時間で風化を助長させ、強度低下をもたらしたと考えられ、新鮮岩のスレーキングとはやや異なる現象と思

表2 スレーキングとされる地盤トラブルの事例

地盤トラブル	説明	スレーキング試験ほか	主な文献
盛土の不等沈下	新第三紀の神戸層群の泥岩を用いて高さ約20mの道路盛土を施工、完成8年間で約70cmの不等沈下を生じ、4回の路面かさ上げを実施した（島ほか，1980）。	神戸層群泥岩はスレーキング試験では初期段階でほとんどの岩片が細粒化し、乾湿履歴後、団粒化した粒子も生じるが結合は極めて緩い（菊本ほか，2016）	島ほか（1980） ⁴⁾ ， 菊本ほか（2016） ⁵⁾
地すべり・崩壊	愛媛県南西部、秩父帯の受盤構造の切土のり面で長さ22m、幅25m、緩みゾーンの深さを8.7m程度と評価。泥岩の長期的なスレーキングにより崩壊に至ったと評価。	スレーキング試験でスレーキングが明瞭	田窪ほか（2012） ²⁾
	島根第三紀層の地すべり（2015年山陰道多伎区間地すべり）、地質は新第三系中新統 大森層の礫岩、岩、泥岩。地すべりの規模は長さ160m、幅100m、深さ14.4m。不動層は原岩色であるが、すべり土塊の褐色化が非常に顕著。	試験はなし。地すべりの原因として、切土後のスレーキングにより地盤の強度が低下したと推定	汪（2015） ⁷⁾
トンネルの盤膨れ	紀州・四万十帯・第三紀層、音無川層の砂岩・泥岩の混在岩において、道路トンネル掘削で約20cmの盤膨れ。	スレーキング試験でスレーキングが強い	谷本ほか（2004） ⁸⁾
	紀州・四万十帯・第三紀層、牟岐層群の砂岩・泥岩互層において、道路トンネル掘削で約30cmの盤膨れ。	連続破壊三軸試験で、浸水後の強度低下が大きい。薄片レベルの微細クラックが多い	松前ほか（1993） ⁹⁾

われる。

トンネル掘削による盤膨れでも、スレーキングに関連した2事例が報告されている。谷本ほか(2004)⁸⁾は、和歌山県の第三紀四万十層の音無川層群の砂岩、泥岩の混在岩からなる道路トンネル掘削で約20cmの内空変位が観測された事例を報告している。軟質な頁岩はスレーキング試験では極めてスレーキングが強く、泥状化したと報告している。また、本地点の変状発生箇所周辺の泥岩、頁岩にはスメクタイトは含有されないものの、岩石薄片の観察から、潜在的な微細クラックが多いとしている。トンネル掘削による応力解放で微細なクラックが分離し、そこに水が入ることでスレーキングが発生し、強度低下をもたらしたと考察している。

松前ほか(1993)⁹⁾は、和歌山県の第三紀四万十帯の牟婁層群の砂岩、頁岩からなる地山の道路トンネル掘削で約30cmの内空変位が観測された事例を報告している。本地点の頁岩は浸水崩壊試験で細片化するが泥状化まではしない、スメクタイトの含有量もわずかで膨張圧を発生するほどではないことが試験から分かっているとしている。

しかし、本地点の岩石試料を一旦乾燥させた後浸水させて、連続破壊三軸試験を行うと強度(C、 ϕ)の低下が極めて大きいこと、また、岩石の偏光顕微鏡観察では微細なクラックが多いことも報告されている(図2)。この浸水による強度低下は、後述表3のスレーキング要因の2)の黄鉄鉱の含有ないし3)の化石海水の存在を原因とするものである可能性もあるが、微細な割れ目が多いことが主な要因のようである。

以上のように、四万十帯の堆積岩でもトンネル掘削時において、スレーキングに起因すると思われる大きな内空変位が発生している。2事例とも、潜在クラックが多いことが変形の要因として挙げられているが、どの程度の潜在クラックがあるとスレーキングによる強度低下が大きくなるのかなど、予測するにはまだ課題が多い。

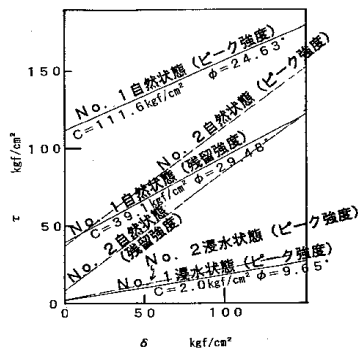


図-6 連続破壊三軸圧縮試験結果

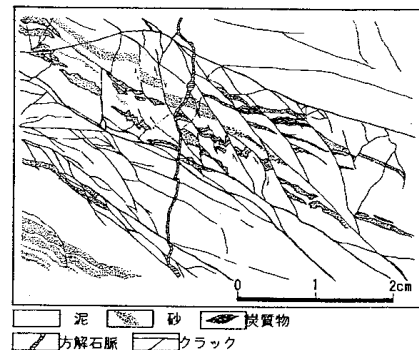


図-7 岩石薄片スケッチ図

図2 連続破壊三軸圧縮試験の結果(左)と
岩石薄片のスケッチ図(右)(谷本ほか(2004)⁸⁾)

4. スレーキングの要因別区分

スレーキング発生の要因として、地質的には表3の膨潤性粘土鉱物であるスメクタイトを含有する場合、黄鉄鉱による酸性地下水による劣化の場合、化石海水による浸透膨潤圧が発生する場合、密にへき開などの微細割れ目が発達する場合の4要因が考えられる。なお、吉田ほか(2003)¹⁰⁾は和泉層群の泥岩のスレーキングについて研究し、長石、雲母の溶出と膠結物(非結晶物質)の溶出がスレーキングのメカニズムとする見解を示している。

1) 膨潤性粘土鉱物であるスメクタイトを含む場合

一般に、スレーキングは膨潤性粘土鉱物であるスメクタイトを多く含む泥岩に多いことが知られている³⁾。この場合、スレーキングの原因は膨潤性の粘土鉱物の膨潤圧によるものと考えられ

表3 スレーキングの要因別区分

要因	説明	主な文献
スメクタイト	吸水による粘土鉱物の膨潤、Na型スメクタイトでは急速スレーキングが起きる	中田ほか (2006) ¹²⁾
黄鉄鉱に起因する酸性地下水	黄鉄鉱の溶解による酸性水の生成、酸性水による石膏生成の結晶圧および割れ目を充填する方解石の溶解によるクラックの開口 (岩石の劣化)	西山ほか (2006) ¹³⁾
化石海水の浸透膨潤圧	引っ張り強度の小さい泥岩が乾燥期にひび割れし、雨水の浸透で含有する化石海水との間で浸透膨潤圧が発生し、岩石が劣化する	Higuchi et. Al. (2015) ¹⁴⁾
長石・雲母の溶出と膠結物 (非結晶物質) の溶出	四国の和泉層群の泥岩を詳細に分析、長石・雲母の溶出と膠結物 (非結晶物質) の溶出	吉田ほか (2003) ¹⁰⁾
密に発達するへき開	四万十帯の泥岩ではしばしば微細な割れ目を有し粘土化までではないが、乾湿により細片化がのり面表面などでしばしば見られる	四万十帯のトンネルの盤膨れ事例など

る。さらに、スメクタイトを多く含む軟岩試料を乾燥させた後、水に浸すと多くの場合水中で激しく崩壊することが知られている¹¹⁾。このような軟岩は東北地方のグリーントフ地域の泥岩、凝灰岩に多いとされ、この種の岩石を切土した場合、その掘削表面でスレーキング現象が見られる。また、中田ほか (2006)¹²⁾ は、釧路炭鉱や池島炭鉱の地下水が塩水域にある堆積岩は、膨潤性の強いNa型スメクタイトが含まれることが多く、急速スレーキングを起こしやすいことを報告している。

2) 泥岩などに含まれる黄鉄鉱による酸性地下水による劣化の場合

西山ほか (2006)¹³⁾ は四国、秩父帯下部白亜系の泥岩のスレーキングを研究し、弱風化帯および新鮮岩でも顕著なスレーキングが見られるとしている。さらに、スレーキングの原因として、切土により酸化環境下での泥岩に含まれる黄鉄鉱の溶解、それに起因する硫酸酸性水の発生、酸性水によるクラックを充填する方解石の溶解、クラックの開口の促進による透水性の増大がスレーキングを促進させるとし、方解石の溶解による強度低下の効果が大きいとしている。また、酸性水の発生による石膏の晶出に伴う結晶圧による岩石劣化の可能性も指摘している。四国地方の古い地質体の泥岩においてもスレーキング現象が見られることから、注意が必要である。

3) 化石海水を含む第三紀の泥岩で浸透膨潤圧が発生する場合

Higuchi et. Al. (2015)¹⁴⁾ は、台湾の月世界と呼ばれる侵食が激しく不毛の地を形成する第三紀の海成泥岩の急速風化を詳細に研究し、スレーキングのプロセスを考えるうえで重要な指摘を行っている。Higuchi et. Al. (2015)¹⁴⁾ による研究成果を以下のとおりである。

- ① 泥岩は塩気のある間隙水を持ち、その透水性は低く、乾期には乾燥クラックを発達させながら乾燥する (泥岩の引っ張り強度が小さいため表層に割れが発生、執筆者が加筆)、
- ② 塩気のある間隙水は深部から表層に移動し、斜面の表層近くで塩として沈殿し、塩を凝縮させる。
- ③ 降雨による真水は、斜面表層に沈殿した塩を溶かしながら開口亀裂に沿って深部まで急速に浸透する。
- ④ 雨季には岩の間隙水は増加し、浸透圧を増加させながら希釈される。
- ⑤ その時、浸透圧の増加は体積膨張をもたらし、乾燥亀裂を閉じさせる。すなわち、岩に含まれる化石海水により発生する浸透圧 (浸透膨潤) が岩石劣化の原因と報告している

(図-3)。

雨水による間隙水の希釈は、最終的には化学的浸透による岩の細粒化、スレーキングをもたらし、細粒化した表層物質は、雨季には引き続く雨の間、斜面の洗掘により急速に削剥され、風化の次のサイクルが始まるとしている。このような現象が中国四国地方の第三紀泥岩で生じる素因があるかは今後の研究課題である。

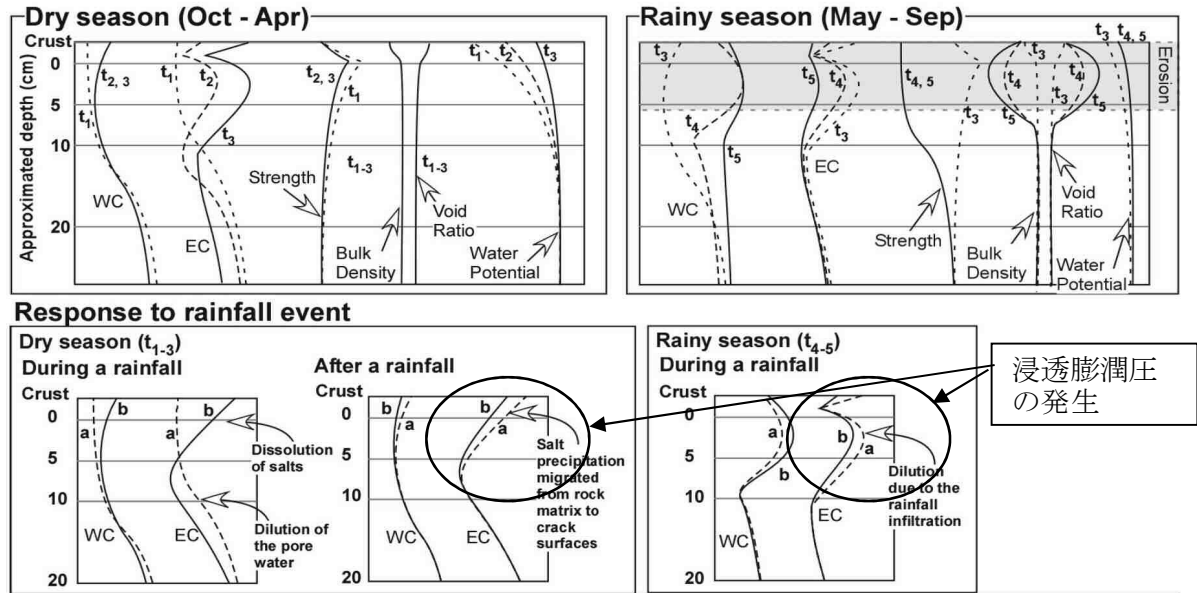


Fig. 8 Schematic sketch of the changing physical property profiles of the mudstone beneath the slope surface during the dry and rainy seasons.

t_1 : dry season without precipitation; t_2 : after sparse precipitation during the dry season; t_3 : late dry season after wetting and drying; t_4 : beginning of the rainy season; t_5 : after precipitation in the early rainy season (just before erosion). EC: Electrical Conductivity; WC: Water Content. The depths 5, 10, and 20 cm are indicative averages based on the monitoring data and on the results of Higuchi et al. (2013, 2014).

図3 Higuchi et. Al. (2015)による乾期から雨期の中の泥岩の物理特性の変化 (Higuchi et. Al., 2015¹⁴⁾に加筆)

注) 本図では、乾期の降雨後(左下のAfter a rain)や雨期に表層の5~10cm程度の深さで、表層に向かって間隙水の希釈、塩類の消滅(電気伝導度ECの変化で表示)を図示しており、ここで浸透圧膨潤が発生する。

4) へき開などの割れ目を多く内在する泥岩、凝灰岩の場合

谷本ほか(2004)⁸⁾や松前昌広ほか(1993)⁹⁾のトンネルの盤膨れの事例では、共通して微細な割れ目が多いことが挙げられる。これらの事例のように、スメクタイトや黄鉄鉱を含まなくとも、へき開などの内在する微細割れ目が多いとスレーキングのリスクがあると言える。また、切土、トンネル掘削などによる応力解放や地下水も内在する割れ目の固着力の低下を招くと考えられ、割れ目が多い岩石はスレーキングを起こしやすい大きな要因と考えられる。

5. まとめと今後の課題

本論ではスレーキングの定義、スレーキングとされる地盤トラブル事例の整理、スレーキングの地質的要因について検討した。膨潤性粘土鉱物であるスメクタイトを含有する場合、黄鉄鉱を含有し酸性水の発生により岩の劣化が進む場合、変成度が低く化石海水を多く含む場合などの地

質で、スレーキングについて注意が必要であることを示した。あわせて、割れ目の多い泥岩でスレーキングに起因したと思われるトンネルの盤膨れの事例で示したように、へき開等の割れ目が多い場合にも、応力解放によりスレーキングが進行するリスクがある。小島ほか(1984)³⁾がスレーキングと膨潤は表裏一体の関係にあり、岩石の急速な風化の総称としているように、“スレーキングは風化や劣化の促進(強度低下)の要素”であると捉える必要がある。

一般に泥岩や凝灰岩を盛土材料として使用する場合には、スレーキング試験(浸水崩壊度試験と呼ばれることもある)^{15~17)}により事前評価されることが多い。

切土のり面やトンネル地山においても、事前評価が難しいものの、スレーキングによる地盤トラブルを事前に評価するため、スレーキング試験によるスレーキングの程度の把握やその要因、さらに、地下水環境、応力解放の度合いなどを総合評価してそのリスクを評価する必要がある。

スメクタイトや黄鉄鉱を含まない泥岩のスレーキングに起因するすべりやトンネルの盤膨れを評価する指標を見出すことが、今後の課題と考えられる。

引用文献

- 1) 地盤工学会(1996):盛土の挙動予測と実際(地盤工学・実務シリーズ2)
- 2) 田窪裕一ほか(2012):55.スレーキングによる泥岩法面の崩壊事例、全地連技術フォーラム
- 3) 小島圭二ほか(1984):軟岩の膨潤・スレーキング特性(その1)ー簡易試験による評価ー、応用地質、vol.25、no.1、pp.10-22
- 4) 島 博保・今川史郎(1980):スレーキング材料(ぜい弱岩)の圧縮沈下と対応策、土質工学会、土と基礎、No.1182、p.45-52
- 5) 菊本 統ほか(2016):破碎泥岩のスレーキング現象と変形挙動、土木学会論文集C(地圏工学)、vol.72、No.2、p.6-135.
- 6) 林 訓裕・山尾泰之・遠藤 司(2012):道路盛土のり面の変状観測と対策工の検討、土木学会第67回年次学術講演会(平成24年9月)、III-348、p695-696.
- 7) 汪 発武(2016):島根県における近年の斜面災害(2015年山陰道多伎区間地すべり)、日本応用地質学会・中国四国支部平成28年度研究発表会および現地検討会 講演資料、60p
- 8) 谷本親伯ほか(2004):南紀地区頁岩のスレーキング特性とトンネル施工、材料、vol.53、no.4、pp.447-453
- 9) 松前昌広ほか(1993):四万十帯のトンネルにおける大きな変形の原因に関わる一考察、トンネル工学研究発表会論文・報告集、第3巻、報告(8)、pp.161-166
- 10) 吉田幸信ほか(2003):和泉層群の頁岩のスレーキング特性とメカニズムに関する一考察、土木学会論文集、No.750、III-65、p.15-25
- 11) 地盤工学会・実務に役立つ土質工学(2000):34.岩のスレーキングとスウェリングの違いおよび試験法、pp.139-143
- 12) 中田英二ほか(2006):地下水水質と堆積岩のスレーキング特性の関係、資源地質、鉱物組成に基づく黄鉄鉱含有泥岩のスレーキング特性、vol.56、no.2、pp.133-144
- 13) 西山賢一ほか(2006):鉱物組成に基づく黄鉄鉱含有泥岩のスレーキング特性、特市重大学総合科学部・自然科学研究、第20巻、pp.43-54
- 14) Kohei HIGUCHI et. Al.(2015):Rapid Weathering and Salt Water Migration Processes near a Slope Surface in Plio-Pleistocene Mudstone Badlands in Southwest Taiwan、10th Asian Regional Conference of IAEG(2015)、pp.1-8
- 15) 地盤工学会(2009):地盤工学会基準(JGS 2124-2009)岩石のスレーキング試験方法、地盤材料試験の方法と解説、pp.285-308
- 16) 日本道路公団(2001):日本道路公団試験方法 第1編土質関係試験方法、JHS 110-2001、(財)道路厚生会、pp.281-283
- 17) ASTM(1992):Standard Test Method for Slake Durability of Shales and Simillar Weak Rocks. D4644-87、pp.958-960(Reapproved 1992)