

Q スレーキングという言葉をよく聞きますが、地盤に関してどのような問題があるのですか？

スレーキングとは一般に泥岩などの軟岩が乾燥、吸水を繰り返すことにより、細かくばらばらに崩壊する現象を言います。岩石に膨潤性粘土鉱物であるスメクタイトが含まれている場合、水を吸収しスメクタイトが膨張して岩自体を破壊させ、スレーキングが発生すると考えられています。しかし、スメタイトが含まれていなくても、細かい亀裂を多く介在するなど、別の要因でもスレーキングが起きます。

A 一般的には、スレーキングを起こす岩石は、古～新第三紀の堆積岩である泥岩、凝灰岩に多く見られます。スレーキングを起こしやすい岩は盛土材料としては強度低下を起こしたり、細粒化により圧縮沈下を生じる原因となります。切土の場合には、スレーキングにより風化速度が速くなり、深部にまで風化が進みやすく、また、強度低下により斜面崩壊や地すべりの要因となると考えられています。特に、掘削による応力開放の影響が大きい岩石でスレーキングは顕著となる傾向があります。

上記が懸念される場合にはスレーキング試験を行い、その可能性を事前に検討を行う必要があります。

(1) スレーキングとは

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す。乾燥した粘性土の土塊が、吸水して崩れる現象もスレーキングと呼ぶことがあります。スレーキングは泥岩や頁岩、凝灰岩などの堆積岩で多く発生するとされ、スレーキング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ます¹⁾。また、愛媛県南西部、秩父帯の泥岩の受け盤構造の切土において、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のり面崩壊の報告例²⁾があり、この泥岩でも、スレーキング試験において明確な兆候が表れたと報告しています。

表-1 に主な専門辞書に示されるスレーキングの定義と解説を示します。スレーキングの地質的原因については、後述の膨潤性粘土鉱物であるスメクタイトの膨潤圧による劣化、黄鉄鉱に起因する酸性水の発生による劣化、化石海水による浸透膨潤による劣化、応力開放で強度低下しやすい割れ目を多く含む岩などが考えられます。ここでは、狭義の岩石のスレーキングについて解説し、スレーキングの原因を踏まえた評価を示します。

表-1 専門辞書によるスレーキングの定義と解説

辞書	定義と解説
応用地質用語集CD版、2004、 日本応用地質学会編 ³⁾	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 ⁴⁾	<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、1996、地学団 体研究会編、(株)平凡社発行 ⁵⁾	<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、1999、土木 学会編 ⁶⁾	<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。

(2) 要因別に見たスレーキング

スレーキング発生の要因として、地質的には以下の5要素があります。

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ます⁷⁾。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と考えられています。

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します⁸⁾。このような軟岩は東北地方のグリーンタフ地域の泥岩、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ます。

中田ほか(2006)⁹⁾は、釧路炭鉱や池島炭鉱の地下水が塩水域にある堆積岩では、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ます。

2) 泥岩に含まれる方解石の溶解等が原因の場合

西山ほか(2006)¹⁰⁾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たとしています。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ます。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ます。

また、吉田ほか（2003）¹¹⁾ は、和泉層群の頁岩のスレーキング特性について研究し、スレーキングのメカニズムとして、長石、雲母の溶出および膠着物（非結晶物質）の溶出であるとの見解を示しました。

このように、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、注意が必要です。

3) 化石海水を含む古～新第三紀の泥岩に浸透膨潤圧が発生する場合

Higuchi et. al. (2015)¹²⁾ 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新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大いに参考になります。研究の成果を以下のように報告しています。

報告によれば、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、執筆者が追記）、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しています。

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ます。

4) 切土による応力開放によりスレーキングが促進される場合

奥園（1975）¹³⁾ は、古～新第三紀泥岩、非溶結凝灰岩、ジャ紋岩、熱水変質した岩などの中には、切土後極度に固結度が低下するものがあるとし、この低下の原因として、切土によって応力が開放され吸水膨張すること、および切土後の乾燥湿潤の繰り返しや凍結融解の繰り返し作用を受けて風化が進行することにあるとの考えを示しました。さらに、切土により高速道路の現場における施工実績と同ノリ面試料の乾漆繰返し試験による吸水量増加率の関係を求め、下表の吸水量増加率と適正なノリ勾配の関係を示しています。

表-2 吸水膨張や風化に対する耐久性と適正ノリ勾配¹³⁾

視察による分類	例	乾湿繰返しによる吸水量増加率（%/回）	ノリ勾配	
			地下水なし	地下水あり
① 固結度が高いもの	古第三紀以前のケツ岩、固結凝灰岩	1.0以下	1 : 0.8	1 : 1.0
② 比較的固結度が低いもの	新第三紀層、ジャ紋岩	1.0～2.0	1 : 1.0	1 : 1.2
③ 極めて固結度が低いもの	凝灰質泥岩、鮮新世またはコウ積世の粘土	2.0以上	1 : 1.2	1 : 1.5

ここでいう乾湿繰返しによる吸水量増加率とは、乾湿繰返し試験（1回当たり24時間水浸、48時間強制乾燥の繰返し）の繰返し回数と1回当たりの吸水量の増加分を吸水量増加率（%/回）と定義したものです（図-1）。この吸水量の増加は、主にスレーキングを主とする風化に対する耐久性を示すインデックスとなることを示しているとしています。すなわち、奥園（1975）¹³⁾は、応力開放がスレーキングに大きく係わることを述べています。

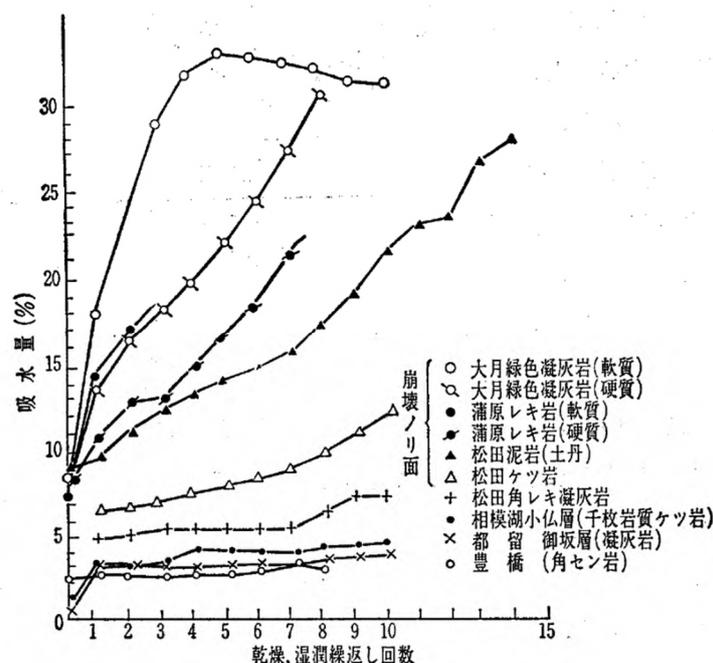


図-1 乾湿繰返し回数と吸水量の関係（注、原文では風化試験結果と記載）¹³⁾

5) 切土のり面などの掘削による地下水低下の影響

切土のり面では、掘削による応力解放とともに、地下水低下をもたらします。地下水低下は不飽和領域の拡大をもたらします。不飽和領域では乾湿の繰返しの影響が大きくなり、スレーキングを促進させる要因の1つと考えられます。

(3) トンネルの盤膨れから見たスレーキングの課題

トンネル地山でスレーキングに関連した盤膨れ事例を2つ以下に示します。

谷本ほか（2004）¹⁴⁾は、和歌山県の古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地山の道路トンネルで約20cmの内空変位が観測された事例を報告しています。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、泥状化したとしています。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ます。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ます。

松前ほか（1993）¹⁵⁾は、和歌山県の古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で約30cmの内空変位が観測された事例を報告しています。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ます。

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ます。この浸水による強度低下は、前述のスレーキング要因の 2) 3) 及び 4) を原因とするものである可能性があります。

以上のように、四万十帯の堆積岩においてもトンネル掘削時において、スレーキングと見られる大きな内空変位が発生しています。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ますが、トンネル掘削による応力開放が大きな要因と思われます。どの程度の潜在クラックや応力開放があるとスレーキング傾向が強くなるのかなど、予測するにはまだ課題が多いと思われます。

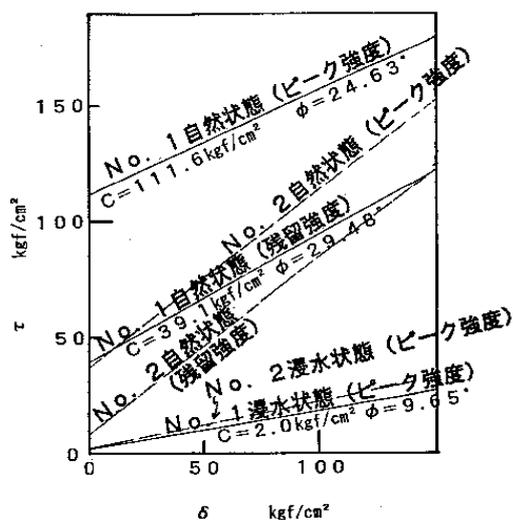


図-6 連続破壊三軸圧縮試験結果

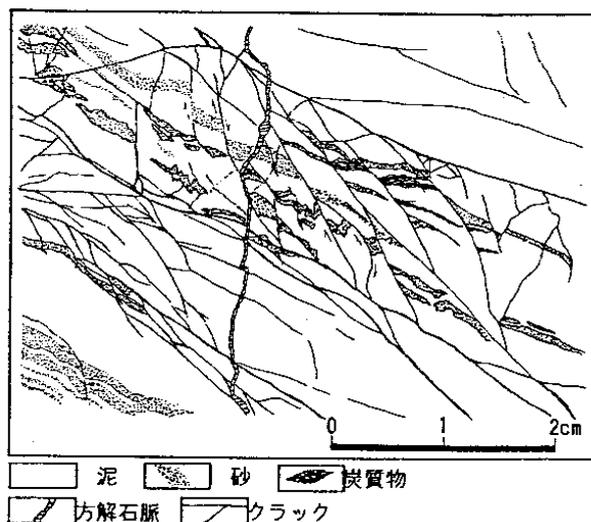


図-7 岩石薄片スケッチ図

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) ¹⁴⁾)

(4) スレーキング試験の薦め

スレーキングの発生には前述のように様々な要因があり、また、複数の要因が重なってスレーキングが促進されることも多いと考えられます。

一般に泥岩や凝灰岩を盛土材料として使用する場合に、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) ^{15~18)} が行われることが多いと思います。スレーキングの発生要因はまだ不明なことが多いですが、大きな切土やトンネル掘削などの大きな工事においては、スレーキング試験を事前に実施し、地盤の安定性についてリスク評価しておくことが望ましいと考えられます。

なお、本論は田村・露口 (2020) ¹⁹⁾ を参考に解説しました。

【参考文献】

- 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 2012
- 3) 応用地質用語集 CD 版 (2004) : スレーキング、日本応用地質学会編
- 4) 地盤工学用語辞典 (2006) : スレーキング、地盤工学会編、p. 74
- 5) 新版地学辞典 (1996) : スレーキング、地学団体研究会編、(株)平凡社発行、p. 659-660
- 6) 土木用語大辞典 (1999) : スレーキング、土木学会編、p. 665
- 7) 小島圭二ほか (1984) : 軟岩の膨潤・スレーキング特性 (その 1) - 簡易試験による評価 -、応用地質、vol. 25、no. 1、pp. 10-22
- 8) 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
- 9) 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、vol. 56、no. 2、pp. 133-144
- 10) 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、徳島大学総合科学部・自然科学研究、第 20 巻、pp. 43-54
- 11) 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、pp. 15-25
- 12) 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
- 13) 奥園誠之 (1975) : 4.2 章、ノリコウ配の設計、地盤工学会ライブラリー 12. 切土ノリ面、pp. 110~113
- 14) 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
- 15) 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
- 16) 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
- 17) 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
- 18) ASTM (1992) : Standard Test Method for Slake Durability of Shales and Similer Weak Rocks. D4644-87, pp. 958-960 (Reapproved 1992)
- 19) 田村栄治・露口耕治 (2019) : スレーキングの諸問題、日本応用地質学会中国四国支部令和元年研究発表会発表論文集、pp. 1-6

(回答者 田村 栄治)