

岩石材料の物理的性質とスレーキング性の関係および既存のスレーキング試験の有用性

Relationship between Physical Properties and Slaking Characteristics of Rock Materials and Availability of Conventional Slaking Tests

村 上 幸 利 (むらかみ ゆきとし)

山梨大学工学部土木環境工学科 教授

1. ま え が き

盛土構造物の設計・施工に当たっては、自然環境の保全や合理的な工事費削減を念頭に置いて、施工現場またはその付近に産出する土石材料をできるだけ有効に利用しよう努めねばならない。しかし、泥岩等の新第三系水成堆積岩や変朽安山岩のような熱水の影響を受けた火成岩を盛土材料として用いる場合には、盛立ての仕方によっては、その岩石材料が気象や地下水位の変動の影響を受けて、細粒・粘土化や脆弱化など材質の低下を起し、これが結果的に盛土構造物の顕著な変形・沈下の発生原因になることがある。このような降雨や地下水位の変動等の外的要因による岩石の細粒・粘土化は、スレーキング現象によるところが大きい。スレーキングとは、不飽和状態または乾燥状態にある岩塊を水浸させた場合に、水は毛管現象によって岩塊内に侵入し、造岩鉱物粒子の結合力を著しく低下させて、岩の細片化と強度低下を引き起こす現象であると説明されている¹⁾。したがって、盛土構造物の安定化を図るためには、盛土材料として用いられようとする岩石についてスレーキングを起こす可能性やその程度を事前に適切に評価し、その評価に応じて工学上、適宜に対処できる施工方法を検討し、採用していくことが極めて重要である。この見地から、岩石試料が水浸によって形状変化を起こす過程を観察したり²⁾、乾燥・湿潤状態の繰返しによって細粒化する様子を定量的にとらえたりする方法により、岩石のスレーキング性を評価しようとする試験法がこれまでに幾つか提案されている^{3),4)}。

本報告は、岩石塊を盛土材料として用いる場合に、施工管理上、事前評価が不可欠である岩石のスレーキング性に注目し、いわゆるフォッサ・マグナ地域に分布する岩石を限定的に扱いながらも、その物理的性質とスレーキング性の関連性および従前のスレーキング試験法の相互関係を吟味し、これによって総合的な視点から、既存のスレーキング試験の有効性と有用性について改めて検討・考察したものである。

2. 岩石のスレーキング性を評価する試験方法

前述したように、岩石のスレーキング性を評価するた

めの試験方法はこれまでに幾つか提案されている。代表的な試験法として、次の四つがある。

2.1 室内スレーキング試験

岩石試料に対して乾燥・湿潤状態を人為的に繰返し与え、試料の粒度あるいは吸水量がどのように変化するかを調べて、スレーキング性の程度を知る試験である。まず、粒度調整した自然含水状態の岩石試料を所定量用意し、110℃で24時間、炉乾燥した後、室温に下がるのを待って常温水に24時間浸す。この作業を所定回数繰返す。その後、ふるい分け試験を実施して細粒化した試料の重量割合でもって定義される「スレーキング率」を求めたり、含水量試験によって試料の吸水量を求め、乾燥・湿潤の繰返し回数に対する変化率を調べる^{2),3)}。この方法に基づいた日本道路公団の基準が有名である⁴⁾。

2.2 耐スレーキング性試験

岩石試料に乾燥・湿潤状態を繰返して与えると、試料は脆弱化・劣質化するが、それに対する抵抗性を調べる試験である。具体的には、重量を正確に計った3 cm角程度の岩塊試料10個を網目の大きさが2 mmの金網でできたドラムに入れて炉乾燥した後、ドラムの回転軸下まで水を入れた状態で試料ごとドラムを所定の要領で回転させ、それを終えてから試料を炉乾燥させる。この操作を2回行って、最終乾燥重量を初期重量で除した「耐スレーキング性指数」を求めて、スレーキングに対する抵抗性の指標とする⁵⁾。また、乾燥・湿潤の繰返し回数と耐スレーキング指数の関係曲線からその絶対平均勾配を求め、それを耐スレーキング変化率(%/回)とする。

2.3 浸水崩壊度試験

岩石には水浸によってその形状を大きく変化させ、崩壊に至るものもある。この変化の大きさから、岩石試料が有する結合性の程度、すなわち崩壊のしやすさを知り、スレーキング性の度合いを定性的に把握しようとする試験である。具体的には、3 cm角程度の岩石試料を3個用意し、60℃で24時間炉乾燥する。その後、デシケーター内で室温まで冷ましてから試料をビーカーなどの容器に入れて注水し、試料を完全に水浸させて静置する。試料の形態の変化を1, 2, 4 および24時間経過後に観察し、前もって定められている5段階の「スレーキング区分」に従って区分する。今回は、各経過時間で観察・

判定されるスレーキング区分の合計値によって試料のスレーキング性の程度を評価することとする。

2.4 暴露試験

室内での半強制的な条件設定のもとで行う試験とは異なった立場から、試料を自然の気象のもとに置き、乾燥・湿潤の繰返しのなかで試料が起こす形状変化を調べ、定量的にスレーキング性の程度を知ろうとする試験である⁶⁾。具体的には、モールド内で岩石試料を締固めて得られる円筒状供試体を日光や降雨などが直接当たる野外に放置し、毎日定刻にその重量と高さを測定する。これによって、供試体のひずみ量や含水比の経時的な変化が求まる。また、所定の暴露日数が経過した後、供試体を形成する岩石試料について粒度試験を行うことにより、暴露後での試料の粒度変化が分かる。

本研究においても、これらの4種類の試験法を対象にして、取り扱うスレーキングの指標としては、上述の「スレーキング率」、「耐スレーキング指数」、「耐スレーキング変化率」、「スレーキング区分の合計値」および「暴露試験後の9.5 mm ふり通過率」とする。このうちスレーキング率は、粒径37.5～19 mm に調整済の岩石試料を対象とした室内スレーキング試験において、乾燥・湿潤の繰返しを受けた試料のうち9.5 mm ふりを通過した試料の重量割合で定義した。また、暴露試験については、気象変化が激しい10月を選び、平成9年10月1日から30日までの30日間で行った。

なお、岩石がもつ物理的性質とスレーキング性の間にはどのような関係が存在するかを追究することを一つの目的としているので、スレーキングに関与する岩の物理的性質をとらえる試験として、密度試験、吸水率試験、有効間隙率試験および含水量試験を取り扱う。試験法の詳細については他の文献を参照願いたい⁷⁾。

3. 試料および試験結果

用いた岩石試料は15箇所から採取したものであって、1箇所当たり1サンプルを用いることにした。これらの採取場所の地質はフォッサマグナのグリーンタフ地域でもある山梨県と静岡県東部の新生界・新第三系（今から約2 600万年前から以降）に相当する。フォッサマグナはその地質学的背景からして、水盆に厚く堆積した泥岩、砂岩あるいは頁岩といった水成岩、活発な火山活動によって生成された凝灰岩や凝灰角礫岩、集塊岩などの火成堆積岩、あるいはマグマの発達・活動によって生み出さ

れた安山岩、ひん岩、花崗岩質岩石などの火成岩といった、多岐にわたる岩種が比較的狭い地域に分布するという特徴をもつ。

試料の採取は、気象の影響等を受けていない岩石を地表から50 cm 以深より掘り起こすようにして行った。15箇所から採取した試料のうち12箇所のものが軟岩に相当し、他は対比のために採取した中硬岩または硬岩である。採取試料の岩の種類およびそのサンプル数は表—1に表示するとおりである。表—2には、スレーキング試験の代表格としての室内スレーキング試験の結果ならびに物理試験から得られた主な結果について、岩石試料の種類ごとにその測定値の範囲を1サンプル当たり5個のデータの平均値によって示す。なお、当初心配された試験結果のばらつきは、同じ場所で採取された試料の間ではほとんど見られず、室内スレーキング試験で±10%、物理試験で±5%程度の範囲内に収まった。

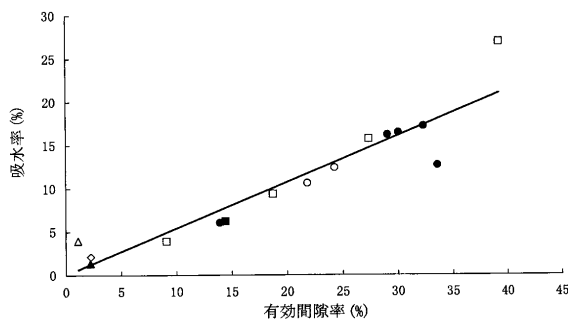
まず、室内スレーキング試験結果では、スレーキング率にして約0～100%まで幅広く分布し、岩種による違いが鮮明であることが分かる。すなわち、スレーキング性は、特に泥岩と泥岩質凝灰岩において顕著であり、硬岩や凝灰岩ではわずかしき見られない。物理試験結果のうち、特徴的な傾向を列挙すると、以下のとおりである。含水比は採取した時点の直近の気象に多少影響されようが、全体的にみると、中硬岩か硬岩に相当する花崗閃緑岩、輝石安山岩で3.3%以下と低く、典型的な軟岩である泥岩では約6～16%と高い。密度に関しては一部の軟岩において、造岩鉱物の平均密度と岩石の密度の間で大きい差異が見られ、岩石内部に間隙部が多く存在している様子がうかがわれる。実際に、有効間隙率を算定してみると、中硬岩と硬岩で1～2%と小さい値である半面、軟岩では20%を超えるような大きい値をもつものがある。また図—1に示すように、吸水率は試料によって1.3%から27%近くまでの広い範囲に及ぶが、有効間隙率との関係は、一部の試料を除いて相当に強いことが分かる（図中の記号は表—1に記すとおりであり、以下の

表—1 用いた岩石試料

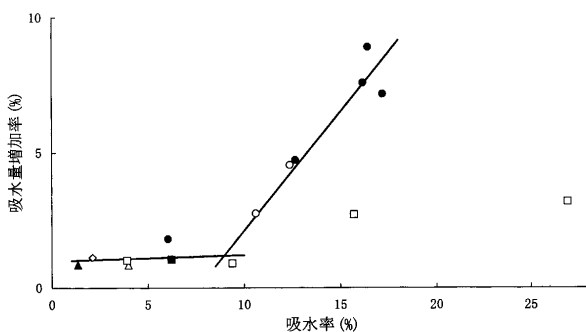
岩質	岩の種類	サンプル数	図中記号	備考(地質年代)
軟岩	泥岩	5	●	中新世～鮮新世
	泥岩質凝灰岩	2	○	中新世～鮮新世
	凝灰質岩	4	□	第四紀
	砂岩	1	■	中新世
硬岩	安山岩	1	△	第四紀
	花崗岩	1	▲	第三紀
中硬岩	変朽安山岩	1	◇	中新世

表—2 室内スレーキング試験結果と主な物理試験結果

	スレーキング率 (%)	自然含水比 (%)	鉱物密度 (g/cm ³)	岩の密度 (g/cm ³)	有効間隙率 (%)
泥岩	52.3 ～ 100.0	5.6 ～ 16.7	2.66 ～ 2.76	1.99 ～ 2.30	13.9 ～ 33.6
泥岩質凝灰岩	48.4 ～ 95.3	3.3 ～ 9.9	2.68 ～ 2.76	1.96 ～ 2.06	21.8 ～ 24.3
凝灰質岩	0.3 ～ 3.4	2.1 ～ 8.7	2.48 ～ 2.73	1.46 ～ 2.30	9.1 ～ 39.2
砂岩	1.9	1.2	2.73	2.32	14.4
安山岩	1.3	3.3	2.75	2.56	1.1
花崗岩	0.5	0.1	2.72	2.69	2.2
変朽安山岩	8.7	2.6	2.72	2.50	2.2



図—1 有効間隙率と吸水率の関係



図—2 吸水率と吸水量増加率の関係

図についても同様である)。吸水率と吸水量増加率の関連性は、物理的にみて強いように考えられるが、両者の関係を表した図—2をみると、吸水率が9%前後を境にして双直線関係が認められる。すなわち、低い吸水率を示す岩石試料においては吸水量増加率に大きな差異が見られない半面、高い吸水率を示す岩石試料においては、吸水率の違いが吸水量増加率に大きく影響するようである。

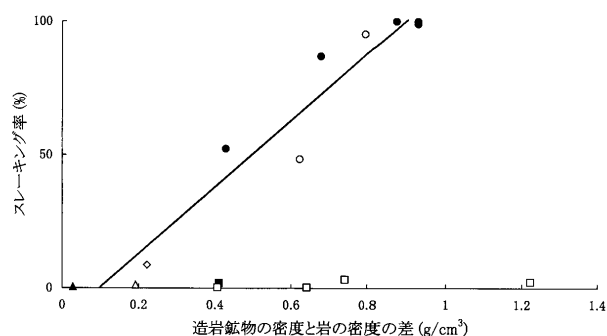
4. 岩石の物理的性質とスレーキング性の関係

岩石の物理的性質とスレーキング性の関係を定量的に明らかにするために、それぞれの物理量とスレーキング性を表す指標の間での相関係数を求め、それを表—3に示す。この表をみると、岩石の物理的性質のうちスレーキング性と相関性の高いものは、吸水量増加率と自然含水比であることが分かる。自然含水比は岩内部の保水能をもった間隙部分の状況を間接的に表す物理量であり、また吸水量増加率はスレーキングに伴う岩内部の間隙量の増大、すなわち岩石の固結度の低下を表すものであることから、これは当然の結果かも知れない。他方、吸水率とス

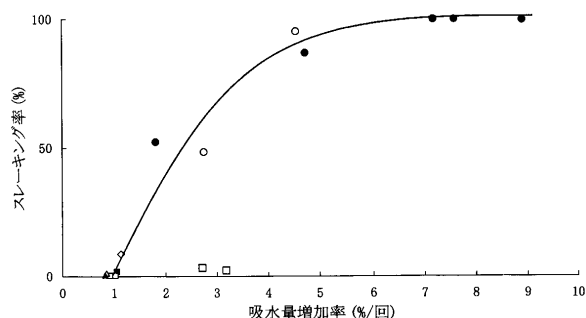
レーキング性の相関性は意外に低い。このことは、凝灰質岩石のように元来吸水性は高いがスレーキングをほとんど起こさない岩石試料が存在することを示唆するものであろう。また、岩石の密度や造岩鉱物の平均密度とスレーキング性の間には、相関性がほとんどない。

次に、造岩鉱物の平均密度と強制乾燥時での岩石の密度との差、すなわち岩石の間隙度合いを間接的に表す物理量が岩石のスレーキング性とどの程度関係するかを調べる試みを行った。その結果は、図—3に示すとおりであるが、相関性が相当に高いことが分かる。このことより、前述と同様に、岩内部に存在する間隙の程度がスレーキング現象にかなり関係するようである。ただし、その相関関係は泥岩や砂岩のように続成作用によって固結した水成堆積岩で認められるが、凝灰質岩石の場合は必ずしもそのようではない。その理由は、凝灰質岩石は火山活動に伴う火山灰の堆積や火砕流の固結化したものであり、その生成過程における揮発性物質の発泡によって岩内部は多孔状態にあるが、鉱物粒子の結合性は溶結によって極めて安定しており、乾燥・湿潤の繰返しによってもスレーキングはほとんど起こらないためと考えられる。しかし、ここで取り扱う泥岩質凝灰岩試料のように、凝灰岩であってもモンモリロナイト系粘土鉱物を含む場合(X線回折によって確認している)については、極めてスレーキングを起こしやすくなることを付記しておく。

なお、岩石のスレーキング性と最も相関性が高い吸水量増加率について、多少考察を行っておくことは有意義であろう。図—4は、両者の関係を表した図である。これをみると、凝灰質岩石の一部を除いて、ある一定の関係が認められる。すなわち、吸水量増加率が大きい岩石ほどスレーキング性の程度が著しく、吸水量増加率が5%を超えると、スレーキング率はほぼ100%に達すること



図—3 岩石の間隙の度合いとスレーキング性の関係



図—4 吸水量増加率とスレーキング率の関係

表—3 岩石の物理量とスレーキング性を表す指標の相関関係

	スレーキング率	耐スレーキング指数	耐スレーキング変化率	スレーキング区分合計	暴露試験・9.5mmふるい通過率
自然含水比	0.690	-0.718	0.717	0.651	0.783
鉱物密度	0.348	-0.264	0.265	0.408	0.232
岩石の密度	-0.405	0.509	-0.507	-0.398	-0.340
飽和度	0.556	-0.507	0.510	0.570	0.524
有効間隙率	0.562	-0.643	0.640	0.533	0.481
吸水率	0.429	-0.527	0.525	0.407	0.339
吸水量増加率	0.881	-0.865	0.865	0.901	0.843

が分かる。ただし、両者には単純な直線的関係があるのではない。吸水量増加率が低い岩石については直線的関係があるものの、吸水量増加率が4%/回を超える岩石に対しては、吸水量増加率とともにスレーキング率100%に漸近するような関係がある。吸水量増加率は乾燥・湿潤の繰返しを受けるなかで生じる岩石の吸水性の変化率を表すものであって、その値が高いほど乾燥・湿潤の繰返しによって岩石の構造が急激に弛緩する状況を示すものである。したがって、岩石構造の崩壊の程度を表すスレーキング性と密接な関係が存在するのは、当然の帰結かも知れない。ただし、一部の凝灰質岩石については、吸水量増加率が比較的高くてもスレーキング性はほとんどない。このような岩種の場合、前述したように、乾燥・湿潤の繰返しによっても、鉱物粒子の強力な結合性は揺るがず、間隙部の局所的な変化によって吸水性の増加は起こるものの、岩石全体の構造の弛緩・崩壊にはつながらないためと考えられる。

5. 既存のスレーキング試験の相互関係

次に、それぞれのスレーキング試験から評価された結果の相互関係を明らかにするために、それぞれの指標間の相関係数を求めたところ、表—4 のようになった。また、このうちの代表例として室内スレーキング試験結果（スレーキング率）と耐スレーキング試験（耐スレーキング指数）の関係図を参考までに図—5 に示しておく。これを見ると、室内スレーキング試験、耐スレーキング試験および浸水崩壊度試験の間では、約0.9以上の相関係数が得られ、極めて高い相関性があることが分かった。なお、暴露試験と他のスレーキング試験との間では、相関性の程度が若干低下していることが言える。これは、暴露試験が自然条件をまともに受ける野外試験であることに関係しているものと思われる。

以上の結果を総合的にみると、岩石材料のスレーキング性を調べる目的において、それぞれ既存のスレーキング試験結果には大きな差異がなく、いずれも有効な試験法であると言えよう。したがって、岩石のスレーキング性を把握するうえにおいて、どの試験法を採用するかという問題に対しては、試験の特徴、すなわち乾燥・湿潤の繰返しを受けるなかで起こる岩塊粒子の細粒化の程度に注目するのか、岩塊の形状変化をみるのかなどによって、材料評価として最も明確にしたい視点から試験法の選択を行うべきものと考えられる。

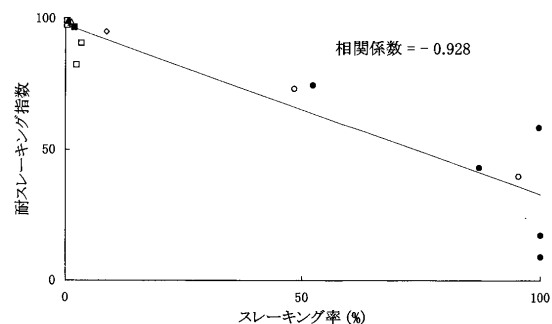
6. ま と め

本研究において得られた結果を以下にまとめると、

- (1) 岩石の物理的性質のうち、スレーキング性と相関性が高いものは、自然含水比と吸水量増加率である。特に、凝灰質岩石の一部を除くと、吸水量増加率が最もスレーキング性の程度と密接な関係がある。す

表—4 各種スレーキング試験結果の相互関係

	室内スレーキング試験 スレーキング率	耐スレーキング試験 耐スレーキング指数	浸水崩壊度試験 スレーキング区分合計	暴露試験 9.5mmふるい通過率
スレーキング率				
耐スレーキング指数	-0.928			
スレーキング区分合計	0.981	-0.915		
9.5mmふるい通過率	0.854	-0.845	0.827	



図—5 スレーキング率と耐スレーキング指数の関係

なわち、大きい吸水量増加率を示す岩石ほど、強いスレーキング性を示し、その値が4%/回を超すような岩石では、顕著なスレーキング性を発揮すると考えられる。

- (2) 造岩鉱物の密度と岩の密度との差、すなわち岩内部の間隙の度合いを間接的に表す変量は、一部の凝灰質岩石を除いて、スレーキング性の程度とはほぼ直線的関係にあり、相関性が見られる。他方、吸水率や有効間隙率は意外にスレーキング性との相関性は低い。
- (3) 既存のスレーキング試験は相互に極めて高い相互関係が認められ、いずれも有効な試験法である。ただし、暴露試験は自然条件のもとでの野外試験という特殊性を有し、他の室内でのスレーキング試験とは意味合いが異なることを認識すべきであろう。

参 考 文 献

- 1) 地盤工学会編：土質工学用語辞典，p. 166, 1985.
- 2) 土木学会岩盤力学委員会第4分科会：軟岩の調査・試験の指針，岩の力学，pp. 223～226, 1980.
- 3) 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, pp. 45～52, 1980.
- 4) 日本道路公団：KODAN 111-1975 岩の乾湿繰返し試験方法，日本道路公団土木工事試験方法，1975.
- 5) 岩の力学連合会：ISRM 指針，第1巻，pp. 21～24, 1982.
- 6) 例えば，板橋一雄・佐高 健・森 富雄・岩田 賢：軟岩の暴露試験と細粒化の表現法，土木学会論文集，No. 523/Ⅲ-31, pp. 19～29, 1995.
- 7) 地盤工学会編：岩の調査と試験，pp. 371～387, 1989.

(原稿受理 1999.1.13)