風化による組成と組織の変化が岩石の破壊特性に及ぼす影響*

柏谷 公希¹ 米田 哲朗²
林 謙二³ Ganesh P. DHAKAL⁴

Influence of Compositional and Textural Changes by Weathering on Breakdown Property of Rocks

by Kouki KASHIWAYA^a, Tetsuro YONEDA^b, Kenji HAYASHI^c, Ganesh P. DHAKAL^d

- a. Division of Solid Waste, Resources and Geoenvironmental Engineering, Graduate School of Engineering, Hokkaido University, Postdoctoral research fellow, Kita13 Nishi8, Sapporo, Hokkaido, 060-8628, Japan (Corresponding author: FAX 011-706-6315, E-mail lin@eng.hokudai.ac.jp)
b. Division of Solid Waste, Resources and Geoenvironmental Engineering, Graduate School of Engineering, Hokkaido University, Professor
c. Geotechnos Co., Ltd.
d. AB Consultants, Inc., USA

Influence of compositional and textural changes by weathering on breakdown property of rocks was considered through two cases.

First case is the slaking property change of Poronai siltstone by preceding deteriorations such as weathering alteration and shear by landslide. The altered sample, where increase in smectite was observed, showed accelerating slaking behavior. In contrast, the sample, that was fractured by landslide but not altered, showed drastic slaking in the early stage of the slaking test and then approached to the behavior of intact sample.

Second case is the influence of weathering on breakdown behavior in uniaxial compressive test. Samples are Inada granite and Kuroishiyama gabbro. In their weathered samples, fractures occurred by weathering were observed and their distributions had close relationships with the composition and texture of the plutonic rocks. Breakdown behaviors in the uniaxial compression were affected by the fractures developed through weathering.

In these two cases, the breakdown behaviors are considered to relate with compositional and textural changes occurred by weathering, and it indicates that grasping about compositional and textural change is essential for understanding and prediction of physical property variation in weathering environment.

KEY WORDS: Weathering, Composition, Texture, Slaking, Uniaxial Compressive Test, Fracture

1. はじめに

風化作用を被ることで、岩石中では亀裂の発達や風化変質鉱物の生成が進行する¹⁾。それに伴って岩石の様々な物性が変化し、岩盤が徐々に不安定化するため、風化は斜面などでマススラブメントが発生する素因となる。そのため、長期に渡って岩盤の安定性の保持が必要となる場合や、岩石の風化特性あるいは風化環境によって速やかに風化が進行する場合などには、ある時点における物性だけでなく、風化による時系列的な物性変化をも考慮に入れることが必要になる。

現時点では、風化による時系列的な物性変化を定量的に検討し

た例は限られており²⁻⁴⁾、それらの研究の中で扱われた岩石の種類も限定されている。より広い岩種を対象とした、風化による物性変化の定量的予測モデルを構築するために、様々な岩石の風化特性や、風化環境下での物性変化に影響を与える支配的因子、物性変化のメカニズムなどに関する定性的な情報の蓄積がまずは必要である。

そのような観点から、本論文ではシルト岩のスレーキング（乾燥と湿潤の繰り返しによって岩石が結合力を失い、碎片に分解する現象⁵⁾）と、深成岩の一軸圧縮による破壊という岩石の2種類の分解・細片化過程に、風化による亀裂の発達や鉱物変質が及ぼす影響について検討を行った。シルト岩の例では、それ自体物理的な風化過程であるスレーキングの特性が、化学的な風化変質や地すべりによる物理的な破碎といった履歴によって変化することを明らかにする。その上で、履歴の違いがスレーキング特性に差異を生じさせるメカニズムを考察する。深成岩の例では、風化によって組成・組織と密接な関連性を持った亀裂が発達することで、一軸圧縮試験での破壊挙動が変化することを示し、風化による物性変化のメカニズムについて考察する。これらの、風化による組

* 2006年8月21日受付 11月14日受理

1. 普通会員 北海道大学大学院工学研究科環境循環システム専攻 博士研究員

2. 普通会員 北海道大学大学院工学研究科環境循環システム専攻 教授

3. 普通会員 ジオテクノス(株)

4. AB Consultants Inc., Maryland, USA

[著者連絡先] FAX: 011-706-6315

E-mail: lin@eng.hokudai.ac.jp

キーワード: 風化, 組成, 組織, スレーキング, 一軸圧縮試験, 亀裂

Table 1 Samples and conducted experiments.

Sample	岩種	肉眼的特徴	XRD	スレーキング試験	組織観察	一軸圧縮試験
5.75	シルト岩	内部まで完全に褐色化が進み、破砕・軟質化した強風化岩。指圧で分解する。	○	-	-	-
7.25		部分的に褐色化し破砕が進んだ中風化岩。指圧では割れない。	○	-	-	-
11.25		褐色化は見られないが、破砕が進行。指圧では割れない。	○	-	-	-
13.25		暗灰色の未風化岩。亀裂は認められず硬質。	○	-	-	-
SI-i	花崗岩	暗灰色でインタクトな未風化岩。	○	○	-	-
SI-f		すべり面付近より採取。褐色化はしておらず暗灰色だが、破砕・軟質化が進行。	○	○	-	-
CS		全体的に亀裂が発達し、亀裂面が褐色化した風化岩	○	○ ⁸⁾	-	-
Gr-f		まさ中から採取したコアストーン。表面はわずかに褐色化しているが、内部は新鮮で緻密。	○	-	○	○
Gr-w	斑禰岩	風化が進行しているが、固結した礫。黒雲母の周辺部は褐色の汚濁が認められる。	○	-	○	○
Gb-f		非常に新鮮で緻密な黒緑色の斑禰岩	○	-	○	○
Gb-w		風化の進行した岩塊から採取。長石は白濁し、全体的にやや褐色化している。	○	-	○	○

Table 2 Experimental conditions of XRD.

	全岩粉末試料	定方位試料
使用 X 線	CuK alpha	CuK alpha
スタート角度 (degree)	2	2
ストップ角度 (degree)	40	35
ステップ角度 (degree)	0.02	0.02
スキヤンスピード (degree/min.)	1	1
管電圧 (kV)	30	30
管電流 (mA)	20	20
発散スリット (degree)	1	1/2
散乱スリット (degree)	1	1/2
受光スリット (mm)	0.3	0.3

成・組織の変化が、その後の破壊特性に影響を及ぼしたと考えられる事例を通して、時系列的な岩石の物性変化を理解、さらには予測する上で、風化による岩石の組成・組織の変化を把握することが重要であることを示す。

2. 研究試料および実験方法

本論文では、軟岩の代表としてシルト岩を、硬岩の代表として花崗岩と斑禰岩を研究対象に選択した。試料の肉眼観察による特徴と、行った実験の一覧を Table 1 に示す。

シルト岩は、古第三系幌内層のシルト岩である。地すべりの対策工として造設された集水井の壁面から、様々な深度で風化程度の異なる試料を採取した。まず、これらの試料のうち、肉眼的に風化程度が異なる 5.75, 7.25, 11.25, 13.25 の 4 試料（以下深度別試料とする）を対象に X 線回折分析 (XRD) を行い、幌内層シルト岩の風化変質の特徴を把握した。また、SI-i と SI-f（以下スレーキング試料とする）の XRD から、これらの試料における風化変質の進行程度を明らかにした。XRD では、74 μm 以下に粒度調整した全岩粉末試料の分析から全岩鉱物組成を求めるとともに、遠心分離で回収した粒径 2 μm 以下の粘土分の定方位試料を作製し、未処理で、さらにエチレングリコール処理を施して分析を行うことで粘土鉱物組成を明らかにした。なお、分析には理学電機製の X 線回折分析装置である RINT 2000 を使用し、Table 2 に示した分析条件で回折パターンを求めた。

スレーキングは、スメクタイトなど膨潤性粘土鉱物を含み強度

が低い泥岩や凝灰岩に起こりやすいことが知られている⁶⁾。ここでは、ASTM (1990)⁷⁾の方法に従ってスレーキング試料のスレーキング試験を行い、風化変質と破砕のどちらも生じていない SI-i、風化変質は生じていないが地すべりによる破砕・軟弱化が進んだ SI-f、さらに風化変質が生じているが地すべりによる破砕の影響を受けていない CS⁸⁾のスレーキング特性を比較した。

花崗岩は、茨城県笠間市の石切場から採取したもので、白亜紀～古第三紀の稲田花崗岩である。一方、斑禰岩は、福島県小野町の石切場から採取した黒石山斑禰岩である。

花崗岩と斑禰岩についても、まず XRD で鉱物組成を求めた。分析条件はシルト岩と同様である。その上で、直径 30mm、長さ 54～60mm のコア状供試体を作製し、軸ひずみと周ひずみを記録しながら 0.2mm/min. の定ひずみ速度で一軸圧縮試験を行った。試験には、インストロン製材料試験装置 5500 を用いた。さらに、蛍光試薬を混合したメチルメタアクリレート樹脂（岩石検知薬 B）を含浸させた薄片を作製し、インタクトな試料と風化試料の一軸圧縮試験前および試験後の亀裂を蛍光法⁹⁾で観察した。その際、風化によって組成・組織とどのような関係性を持った亀裂が生じ、さらに、それらの亀裂が一軸圧縮で発達する亀裂とどのような関係があるのかに着目して観察を行った。花崗岩と斑禰岩、インタクトな試料と風化試料を比較することで、風化花崗岩と風化斑禰岩の破壊挙動の特徴を明らかにし、風化による強度低下のメカニズムを考察した。

3. 風化履歴とシルト岩のスレーキング特性の関係

3・1 実験結果

深度別試料とスレーキング試料の XRD から、シルト岩試料の主成分鉱物は石英と斜長石であることが明らかとなった。その他に微量の黄鉄鉱と方解石が含まれ、これらの鉱物の回折ピークは最も風化の進行した 5.75 で消失した (Fig. 1)。また、黄鉄鉱のピークは 13.25 から 5.75 へ風化程度の増大に伴って一様に小さくなるのに対して、方解石では 7.25 と 11.25 で未風化岩の 13.25 よりも強いピークが認められた。スレーキング試料の SI-i と SI-f では、黄鉄鉱の明瞭なピークが認められたが、方解石のピークは観察されなかった。

次に、定方位試料の XRD の結果を Fig. 2 に示す。7.25, 11.25 および 13.25 では緑泥石と雲母粘土鉱物（イライト）のピークが認められるが、最も風化の進行した 5.75 では緑泥石がほとんど

Fig.1 Calcite and pyrite peaks observed in the XRD patterns of the siltstone samples (Cal: calcite; Py: pyrite).

Fig.3 Slaking test results of the samples which have different degradation history (SI-i: not deteriorated; SI-f: fractured by shear; CS: altered by weathering).

消失しスメクタイトが増加していることがわかる。また、全ての試料で、イライト/スメクタイト混合層の存在を示唆しているものと考えられる連続的なピークが $6.5-8.5^\circ$ 付近に観察された。スレーキング試料は、緑泥石、イライト、スメクタイトを含み、SI-i と SI-f の粘土鉱物組成が非常に似通っていることが示された。

スレーキング試験の結果を Fig. 3 と Fig. 4 に示す。Fig.3 はサイクル数と耐スレーキング指数（試験前の質量に対する各サイクル後の質量の割合）の関係であり、Fig.4 は各サイクルにおける耐スレーキング指数の減少量を表している。なお、Hayashi et al.⁸⁾ による CS のスレーキング試験の結果もあわせて示す。

intactな SI-i では、サイクル数の増加とともにほぼ一定の割合で耐スレーキング指数が減少した。また、破碎が進んだ SI-f では、1 サイクルで急激に耐スレーキング指数が減少したが (Fig.3)、その後数サイクルで、各サイクルでの耐スレーキング指数の減少量は SI-i の値に漸近した (Fig.4)。これに対して、褐色化

Fig.2 XRD results of the oriented samples of clay fractions collected from the siltstones (Sm: smectite; Ill: illite; Chl: chlorite).

Fig.4 Loss of slaking durability index at each cycle.

が観察された CS では、サイクル数が増加するに従って耐スレーキング指数の減少量が大きくなることが明らかとなった (Fig.4)。

3・2 考察

XRD から、幌内層シルト岩では、黄鉄鉱、方解石、緑泥石、スメクタイトに顕著な風化の影響が認められることが示された。深度別試料における、これらの鉱物のピークに着目すると、幌内層シルト岩の化学的風化で生じる鉱物変質は、黄鉄鉱および方解石の溶解、緑泥石の減少とスメクタイトの増加によって特徴づけられる。風化程度の増大に伴って一様に減少する黄鉄鉱に対して、方解石では肉眼観察によるシルト岩の風化程度との関係に一定の傾向が認められない。これは、幌内層で部分的に観察される方解石脈の影響によるものと推測される。

また、スレーキング試料の黄鉄鉱と方解石 (Fig.1)、粘土鉱物 (Fig.2) の回折ピークは非常に類似している。スレーキング試料の SI-i と SI-f は近接した箇所（両試料の採取箇所の距離は数 10cm 程度）から採取したものであることも合わせて、両試料における

鉱物組成は等しく、風化変質の度合いは同程度であると考えることができる。

スレーキング試料を対象に行ったスレーキング試験では、履歴の異なる幌内層シルト岩は、スレーキング特性が異なることが明らかとなった。このような破壊特性の変化は、地すべりで生じた破碎や風化による鉱物変質に起因していると考えられる。

SI-fには地すべりによる剪断の影響で多くの亀裂が生じており、スレーキング試験の早い段階で破碎および軟質化した部分の脱落が起こる。しかし、スメクタイトの増加など風化変質は認められず、亀裂が生じていない部分の強度が保たれていることで、サイクルが進むにつれてインタクトな SI-i と同様のスレーキング特性を示すようになったものと考えられる。それに対して、CSでは風化変質によってスメクタイトが増加していることで、岩石全体の強度が低下しているのに加え、湿潤状態の変化による影響が大きくなっていると推測される。そのため、スレーキング試験で破碎が進行し、水-岩石界面が増加するにつれて、スメクタイトの膨潤がより広く生じるようになり、スレーキングが加速度的に進んだものと考えられる。

風化によって変質鉱物が生じたシルト岩のスレーキングは、長い時間をかけて変質した風化岩の急速な再風化と考えることができる。今回、先駆的な劣化が、シルト岩のスレーキング特性を変化させることを示し、そのメカニズムを考察した。岩石を劣化させる要因とその結果生じるスレーキング特性変化との関係について知見を蓄積することで、岩盤のスレーキング挙動の予測を高精度化できる可能性がある。

4. 風化による深成岩の破壊挙動の変化

4・1 実験結果

薄片の偏光顕微鏡観察およびXRDから、稲田花崗岩は主に石英、斜長石、カリ長石、黒雲母からなることが明らかとなった。また、風化した試料では、パーミキュライトとスメクタイトの生成が認められた。一方、黒石山斑礫岩の主成分鉱物は角閃石と斜長石で、風化変質としてはスメクタイトの増加が観察された。

一軸圧縮試験前の稲田花崗岩の蛍光観察から、稲田花崗岩では風化によって、粒間亀裂の増加、粒間亀裂および粒界亀裂、石英の粒内亀裂などの開口幅の増大が生じ、斜長石の粒内には多くの微細な亀裂が生成していることが明らかとなった。この場合、粒界・粒間亀裂と石英の粒内亀裂の開口幅は斜長石の粒内亀裂の開口幅よりも大きい。これに対して、風化黒石山斑礫岩では、斜長石における微細な粒内亀裂の発達が著しく、角閃石の亀裂ははるかに少ないことから不均質な外観を呈する。角閃石では劈開に沿った粒内亀裂が認められるが、斜長石と比較して開口幅は小さく、数も少ない。粒界亀裂や粒間亀裂も観察されるが、開口幅が小さいものが多い。連続性が高く、開口幅の大きい粒間亀裂も多くはないが存在する。

一軸圧縮試験で得られた強度の平均値は、Gr-fが187.7MPa、Gr-wが70.0MPa、Gb-fが228.2MPa、Gb-wが78.5MPaである。一軸圧縮によって破壊した供試体から作製した蛍光試薬入り薄片の顕微鏡写真をFig. 5に示す。なお、写真の長辺に平行な方向が載荷方向である。一軸圧縮で破壊したGr-fのコアでは、巨視的な破断面が形成され、破断面の近くでは載荷軸に平行な多くの亀裂が発達しているのが観察された。単位面積あたりの亀裂の本数は、破断面までの距離に依存し、破断面に近いほど多くの亀裂が発生している。粒内に亀裂の生成がほとんど見られない黒雲母を除いて、このような亀裂は鉱物の種類と関係なく生じており、石英中でも斜長石中でも同様に観察された(Fig.5a, c)。一方、Gr-w

Fig.5 Microphotographs showing differences in fracture patterns in the plutonic rocks broken by the uniaxial compressive test. a, c: Gr-f; b, d: Gr-w; e, g: Gb-f; f, h: Gb-w (Qtz: quartz; Bt: biotite; Pl: plagioclase; Amp: amphibole).

では載荷軸に平行な亀裂を主とした網目状の亀裂が生じており、Gr-fと比較すると鉱物粒子の粒界を通る亀裂が多いと思われる(Fig.5b)。その他、変質が進んだ斜長石の破碎(Fig.5d)など、鉱物粒子の破碎・分解が観察された。

Gb-fでは、ポイキリティック組織の主晶である角閃石の内部に巨視的な破断面が生じ、その近くでは載荷軸あるいは破断面に平行な亀裂が観察された(Fig.5e, g)。しかし、これらの巨視的な破断面付近に存在する亀裂の開口幅は花崗岩で観察されるものと比べて狭く、巨視的な破断面以外の岩石組織への影響も花崗岩と比較して小さい。わずかではあるが、斜長石の破碎も観察された。Gb-wでは、一軸圧縮によると思われる亀裂が全体的に網目状に発達しているが(Fig.5f, h)、連続性が高く、開口幅の大きな亀裂は載荷軸に平行なものが多い。斜長石には風化によって多くの粒内亀裂が生じており、上述の連続性の高い亀裂は斜長石を通ることが多いと思われる。鉱物粒子の破碎も観察された。

以上の観察から、インタクトな試料と比べて、風化試料では一軸圧縮によって連続性の高い亀裂が形成される部分が変化することが明らかとなった。すなわち、花崗岩では鉱物粒子の粒界での分離が生じ、斑礫岩では斜長石を連結するような亀裂が発達する傾向が認められた。

4・2 考察

観察結果から、稲田花崗岩と黒石山斑礫岩では、風化によって生じる亀裂の特徴が異なるのに加えて、一軸圧縮で形成される亀裂の特徴が異なることが示された。これらは両岩石の破壊機構の違いを反映しているものと考えられる。風化稲田花崗岩では、インタクトな稲田花崗岩と比較して、一軸圧縮によると思われる連続性の高い亀裂が鉱物粒子の粒界を通ることが多く、粒間亀裂や石英の粒内亀裂に加えて、風化で発達した粒界亀裂による粒子の固結力の喪失は強度低下の一因であると考えられる。一方で、風化黒石山斑礫岩では、粒界亀裂の発達はあまり顕著ではなく、斜

長石に多くの粒内亀裂が生成している。一軸圧縮では斜長石を連結するような亀裂の生成が観察されたことから、粒内亀裂の増加による斜長石粒子の強度低下が、岩石全体の強度低下をもたらしていると考えられる。Tateyama et al.¹⁰⁾ は、花崗岩に含まれる鉱物粒子の風化による強度低下を調べ、花崗岩が風化初期の硬岩から粘土質まき土まで風化しても石英では強度変化が認められなかったにもかかわらず、斜長石では強度が 1/60 になったことを明らかにした。このように、風化の影響は鉱物によって異なることを考慮すると、深成岩のように構成鉱物粒子が大きい岩石では、風化の進行に伴って、斜長石などの風化しやすい鉱物によって生じる低強度ドメインが岩石中に点在するようになるものと予想される。今回の観察結果を考慮すると、稲田花崗岩では風化によって発達した粒界亀裂が、一軸圧縮における鉱物粒子の粒界での分離を容易にしたと考えられる。一方で、黒石山斑礫岩では風化によって粒界亀裂があまり発生しないことで鉱物粒子が分離しにくい、風化した斜長石が低強度ドメインとなり、一軸圧縮によって斜長石をつなぐように破断が起こったものと考えられる。以上の結果は、組成と組織に従い風化で発達した亀裂が、一軸圧縮による破壊挙動に大きな影響を及ぼしている可能性を示している。

5. お わ り に

岩石の風化変質や地すべりによる性状変化の影響で、その後の破壊特性が変化したと考えられる事例を通して、風化による組成・組織変化を把握することの重要性を示した。

幌内層シルト岩の例では、地すべりの影響で破碎しているが風化変質が生じていない試料と、風化変質が生じているが地すべりの影響を受けていない試料、それらのどちらの影響も受けていないインタクトな試料のスレーキング特性を比較した。その結果、スレーキング特性はそれぞれ異なり、地すべりによって破碎した試料では、スレーキング試験の始めに急激なスレーキングが生じるが、その後はインタクトな試料のスレーキング特性に近づく。その一方で、変質した試料では加速度的にスレーキングが進行することが明らかとなった。その理由として、破碎試料では地すべりによる破碎の影響を受けていない部分の強度が保たれているの

に対して、変質した試料ではスメクタイトの増加によって、岩石全体の強度低下と水の影響の増大が生じていたためであると考えられる。

稲田花崗岩と黒石山斑礫岩の例では、インタクトな試料と風化試料を対象に一軸圧縮試験前後の亀裂観察を行い、破壊挙動の特徴を明らかにするとともに、風化による強度低下機構を考察した。花崗岩では、風化によって粒間亀裂や石英の粒内亀裂、粒界亀裂などの発達が認められた。一軸圧縮試験後の風化試料では、鉱物粒子の粒界での分離が観察され、風化による粒界亀裂の発達で生じる固結力の低下は稲田花崗岩の強度低下の一因であると考えられた。斑礫岩では風化による粒界亀裂の発達は少なく、斜長石の粒内亀裂の生成が顕著であった。一軸圧縮で生じた亀裂の特徴も考慮して、風化による斜長石の強度低下が、斑礫岩全体の強度低下をもたらしていると推察された。

地表付近に分布する岩石は多かれ少なかれ風化作用の影響を受けており、岩石の風化特性、すなわち時系列的な工学的特性の変化に関する情報は非常に重要であると考えられる。岩石の物性変化を理解、さらには予測する技術確立の上で、風化による岩石の組成・組織の変化に関する知見を蓄積することが不可欠である。

謝辞 本研究を行うにあたり、上野振一郎氏には調査・実験を通して御協力頂いた。ここに記して感謝の意を表する。

References

- 1) W. K. Hamblin and E. H. Christiansen: *Earth's dynamic systems*, (Prentice-Hall, New Jersey, 2001), pp.236-261.
- 2) K. Kimiya: *Chishitsugakuzasshi*, **81**(1975), 683-696.
- 3) K. Nishiyama and Y. Matsukura: *J. Japan Soc. Eng. Geol.*, **43**(2002), 216-225.
- 4) Y. Matsukura, K. Hashizume, and C.T. Oguchi: *Eng. Geol.*, **63**(2002), 39-47.
- 5) Jibankogakukai: *Taiseki Nangan no Kogakuteki Seishitsu to Sono Oyo*, (Jibankogakukai, Tokyo, 1987), p.60.
- 6) M. Chigira: *Saigai Chishitsugaku Nyumon*, (Kinmiraiisha, Nagoya, 1998), pp.75-76.
- 7) ASTM: *Annual book of ASTM Standards*, **4.08**(1990), 863-865.
- 8) K. Hayashi, M. Yama and T. Yoneda: *J. Japan Soc. Eng. Geol.*, **46**(2005), 198-206.
- 9) T. Nishiyama and H. Kusuda: *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **31**(1994), 369-375.
- 10) H. Tateyama, K. Jinnai, K. Kimura and K. Tsunematsu: *Nendokagaku*, **20**(1980), 129-133.