重力変形斜面の岩盤に発達する亀裂が溶出特性に与える影響

Effects of cracks on the ion leaching of gravitationally deformed slope

田中健貴^{a)*}, 木下篤彦^{a)b)}, 吉村元吾^{a)}, 菅原寛明^{a)}, 小川内良人^{c)}, 横山 修^{c)}

Yasutaka TANAKA, Atsuhiko KINOSHITA, Gengo YOSHIMURA, Hiroaki SUGAWARA, Yoshito OGAWAUCHI and Osamu YOKOYAMA

Abstract

In recent years, water analysis has been proposed as a method to extract the potential slopes of deep-seated landslides. Although this technique can be used to predict the site of groundwater spring by water analysis, it does not take into consideration changes in the characteristics of leaching ions due to bedrock condition. Therefore, in the current study, we conducted a leaching test on boring cores weathered under different conditions for differences in ion concentration. We found that ion concentration changed with sample core depth and fracture opening length. Ion concentrations increased at a fracture opening length of approximately 3 mm. From these results, we conclude that cracks and bedrock weathering can influence the dissolution of ions.

Key words : boring survey, deep-seated landslide, fracture opening, leaching, potential slope

和文要旨

近年、深層崩壊が発生するおそれのある斜面の抽出方法の1つとして水質分析を用いる方法が提案されている。この方法では、地下水の集中を深層崩壊の1つの要因と捉え、地下水が集中する箇所で見られる湧水に着目し、渓流水の水質分析を行う。しかし、渓流水の水質形成に影響を与えると考えられる斜面からの湧水の水質が、深層崩壊が発生するおそれのある斜面周辺で変化するメカニズムについては不明な点が多い。そこで本報告では、深層崩壊が発生するおそれのある斜面で複数のボーリングコアを用いて溶出試験を行い、溶出特性の違いを分析した。その結果、コアの破砕度や開口量によって溶出イオンの濃度に変化すること、おおむね開口量が3 mm程度で溶出イオン濃度が大きくなる傾向を示した。これらのことから、岩盤の溶出過程は様ではなく、岩盤に発達する亀裂や破砕状況に影響されている可能性が示された。

キーワード：ボーリング調査、深層崩壊、開口亀裂、溶出試験、危険斜面抽出

1. はじめに

深層崩壊は発生頻度は低いが、被害は大きくなる場合がある。深層崩壊による被害を防ぐ、あるいは軽減するためには、深層崩壊が発生するおそれのある斜面（以後、危険斜面）をあらかじめ抽出し、対策を行う必要がある（蒲原・内田, 2014）。

これまで危険斜面を抽出する手法の1つとして、水質分析を利用する手法が提案されてきた。地頭蘭ら（2006）は山地溪流において縦断的に渓流水の水質分析を行い、電気伝導度（以後、EC）やSiO₂が危険斜面抽出の指標となることを示した。危険斜面周辺でECやイオン溶出量が大きくなるメカニズムについては明らかになっていない部分が多いが、森ら（2017）は紀伊山地の危険斜面においてボーリング調査を実施し、得られたボーリングコアを用いた溶出試験から、危険斜面においてECが高くなるメカニズムに、炭酸塩鉱物に由来するCa²⁺およびHCO₃⁻が影響している可能性を指摘している。

一方で、前田ら（2006）は地すべり地で採取されたボーリングコアを用いて溶出試験を行い、風化程度によって溶出イオン特性が変化することを指摘した。この指摘を踏まえると、危険斜面においても、イオン溶出量やEC

は岩盤状況によって変化することが考えられる。

そこで本報告では、危険斜面でボーリング調査を実施し、岩盤の亀裂や破砕度を調査するとともに、ボーリングコアを用いた溶出試験を行った。その上で、岩盤の亀裂や破砕度を踏まえた溶出特性の違いを検討した。

2. 調査地概要

ボーリング調査は平成23年台風12号によって深層崩壊が発生した赤谷崩壊地の西に位置する重力変形斜面（以後、赤谷西1、赤谷西2と呼ぶ）において平成28年、29年に実施した（図-1）。斜面の選定は、微地形判読およびひずみ率による方法に基づき行った。

赤谷西1, 2は、ひずみ率がそれぞれ4.7%, 3.5%であった。ここでひずみ率は図-2に示す通り小崖の斜面方向の長さを斜面長で除した値で、斜面の重力変形の程度を示す指標である（木下ら, 2016）。木下ら（2016）では危険斜面抽出の1つの手法としてひずみ率の算出を挙げている。なお、平成23年台風12号で発生した深層崩壊のうち、赤谷、長殿、坪内、栗平などの14斜面を対象に分析した結果では、斜面の崩壊前のひずみ率は5~21%であった（千木良ら, 2012）。

微地形判読に基づく危険度評価では赤谷西1は危険度Ⅳ、赤谷西2は危険度Ⅱと評価された。この方法では、対象斜面における小崖の分布などに注目し、図-3に示す危険度評価がされる（千木良ら, 2014）。この方法は平成23年台風12号で発生した深層崩壊を検討段階で対象に含んでおり、少なくとも紀伊山地においては有効な評価

* 連絡著者／corresponding author

a) 国土交通省近畿地方整備局大規模土砂災害対策技術センター
Sediment Disaster Prevention Technology Center, Kinki Developing Regional Bureau, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism
〒649-5302 和歌山県東牟婁郡智勝浦町市野々3027-6
3027-6, Ichinono, Nachikatsuura-cho, Higashimuro-gun, Wakayama, 649-5302, Japan

b) 国土交通省国土技術政策総合研究所
National Institute for Land and Infrastructure Management, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism

c) 国土防災技術株式会社
Japan Conservation Engineers & CO, LTD.

図-1 調査地
Fig.1 Study site

方法と考えられる。

当該地域に分布する白亜系四万十帯日高層群美山層は主に頁岩優勢砂岩頁岩互層, 頁岩, 砂岩からなり, チャート, 緑色岩, 酸性凝灰岩を伴っている。また赤谷西斜面は, 最下部にせん断面が発達する頁岩優勢層が分布し, その上位に砂岩頁岩互層, 尾根部に砂岩層が分布する。地層の走向は, 東西方向および西北西-東南東方向の走向で $40\sim 60^\circ$ 北傾斜が卓越している。なお全体として, 流れ盤を呈している。

以上を踏まえ, 図-1に示す範囲でボーリング調査を計3箇所で行った。それぞれAk-1(掘削長80m), Ak-3(掘削長90m), Ak-5(掘削長85m)である。

3. ボーリングコアを用いた溶出試験の実施

3.1 試料採取およびコア状況の把握

岩石試料は, ボーリングによって得られたボーリングコアから採取した。これまでも岩盤に生じた開口亀裂の透水性について議論が進められてきた(例えば田中ら, 1996; 寺川ら, 1996; 関ら, 2006)が, 一般に開口亀裂は岩盤の透水性を増大させる場合があると考えられている。ここで開口亀裂が多い場合, 相対的に地下水との接触面積が大きくなり, イオン溶出が促進されると考えられる。そこでここでは, 地下水との接触のしやすさの指標として, ボアホールカメラで観測した孔壁に発達する亀裂の幅を開口量として計測した。計測はボアホールカメラにより行い, 孔壁面の面要素との切り合い線の最大傾斜部分の幅を計測した。また不連続面についても明瞭な開口が見られた場合には計測を行い, 亀裂ではあるが, 画像上開口が認められないものは開口量0mmとした。

試料採取にあたり, コアの破碎状況を把握するため, 脇坂ら(2012)に従って破碎度を区分した(図-4)。

図-2 ひずみ率の算出
(木下ら, 2016より引用)

Fig.2 Calculation for strain
cited from Kinoshita et al. (2016)

図-3 微地形判読に基づく危険度評価
(千木良ら, 2014から一部引用)

Fig.3 Evaluation for potential slope by micro topographic feature cited from Chigira et al. (2014)

ここで開口する引っ張り割れ目を有さない状態のコアを便宜的にCr0, また崩積土をDtと区分した。なお, 試料はできる限り複数の区分から採取するようにした。

3.2 溶出試験

使用した試料の諸元を表-1に, また試料を採取したコアの一部を写真-1に示す。ここで試験に使用した試料には脈状の炭酸塩鉱物の白色脈が見られる試料があった。またコアには開口亀裂部に充填物が見られるコア(写真-1(a))と開口亀裂部に充填物がないコア(写真-1(b))があった。

なお, 溶出試験はNEXCO試験方法の「地盤材料のタンクリーチング試験方法132-2015」を参考にして, 試

図-4 脇坂ら (2012) に基づく破碎度区分

Fig. 4 Classifying of crashed rock based on Wakisaka et al. (2012)

表－1 溶出試験に用いた試料諸元
Table 1 Specification of materials used for the dissolution test

No.	深 度 (GL-m)	開口量 (mm)	EC (mS/m)	イオン当量濃度 (meq/L)							コア状態
				Mg ²⁺	Ca ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	
AK-1	17.7	3.4	0.7	0.01	0.03	0.01	0.01	0.00	0.06	0.01	Cr1a
	24.1	3.0	1.6	0.01	0.09	0.02	0.01	0.00	0.14	0.01	Cr1a
AK-3	14.2	0.0	0.7	0.00	0.02	0.02	0.01	0.01	0.04	0.01	Cr0
	41.1	9.3	0.7	0.00	0.01	0.03	0.00	0.00	0.06	0.01	Cr2
	76.3	0.0	2.7	0.01	0.22	0.01	0.00	0.00	0.25	0.01	Cr0
	77.5	0.0	1.0	0.00	0.05	0.01	0.00	0.00	0.08	0.01	Cr0
	84.2	4.2	1.2	0.01	0.05	0.03	0.01	0.00	0.09	0.02	Cr3
	86.7	4.8	0.9	0.00	0.04	0.01	0.01	0.00	0.07	0.01	Cr1a
AK-5	10.1	9.6	1.5	0.00	0.00	0.04	0.01	0.00	0.07	0.01	Cr1b
	21.1	3.9	1.8	0.00	0.00	0.03	0.01	0.00	0.05	0.01	Cr3
	32.3	4.6	1.6	0.01	0.02	0.02	0.01	0.00	0.07	0.01	Cr1a
	48.25	0.0	1.6	0.00	0.02	0.04	0.01	0.00	0.06	0.02	Cr4
	52.25	5.5	1.3	0.00	0.01	0.03	0.00	0.00	0.05	0.01	Cr1a
	64.1	0.0	1.5	0.00	0.01	0.04	0.01	0.01	0.06	0.03	Cr2
	68.4	3.4	3.8	0.02	0.15	0.02	0.03	0.01	0.21	0.03	Cr1a
	72.4	0.0	3.3	0.00	0.22	0.00	0.00	0.00	0.26	0.01	Cr0

写真－1 Ak－5 のボーリングコア状況の例

Photo 1 Boring core of Ak-5

(a) 9m～11mでは開口亀裂部に充填物が見られた。(b)31m～33mでは溶出痕が開口亀裂として観察された。(c)67m～69mではCa²⁺の由来と考えられる白色脈が見られた。

(a) In the core of 9m～11m, fracture openings have filler. (b) In the core of 31m～33m, we can observe mark of leaching. (c) The core of 67m～69m has white veins which Ca²⁺ originates from.

料と溶媒水の液固比を1：10（試料400g～1kg程度），pH6.0の溶媒水を使用し，28日間のタンクリーチング試験を実施した。1～5日間は溶媒水を1分間に1回攪拌し，6日目以降は攪拌を行わず，試料を静置し，試験を継続した。また分析項目および分析機器は，Na⁺，K⁺，Mg²⁺，Ca²⁺をイオンクロマトグラフ（ICS-2000），Cl⁻，SO₄²⁻をイオンクロマトグラフ（ICS-1600），HCO₃⁻を滴定法，pHおよびECをpH・EC計（WM-50EG）とした。

4. 結果

4.1 開口量と深度の関係

図－5に深度と開口量の関係を示す。赤谷西1の斜面上部に位置するAk-1では深度が深くなるに伴い，開口量が小さくなるのに対して，斜面下部に位置するAk-

3では深度が大きくなるに伴い，開口量が大きくなる傾向を示した。Ak-5は深度50～60mにかけて開口量のピークを示しており，各ボーリングで傾向が異なる。

4.2 溶出試験結果

表－1に溶出試験結果のECとイオン当量濃度を示す。Ak-3（76.3m），Ak-5（68.4m），Ak-5（72.4m）で相対的にECが大きく，Ca²⁺，HCO₃⁻の濃度が大きい傾向があることが分かる。

図－6に溶出試験の結果をヘキサダイアグラムとして示す。いずれの試料においてもMg²⁺，NO₃⁻＋SO₄²⁻は深度間で変化が小さく，どの試料でも溶出量は少ない。一方でCa²⁺，HCO₃⁻は各試料の深度間での変化が他の溶出イオンと比較して相対的に大きい。

次に図－7に深度と各試料のCa²⁺，HCO₃⁻の関係を示

図-5 (a) Ak-1, (b) Ak-3, (c) Ak-5 における深度と開口量の関係

Fig. 5 Relation between depth and fracture opening
(a), (b), (c) indicate Ak-1, Ak-3, Ak-5 respectively.

す。Ca²⁺は深度が大きくなるにつれて、溶出量が大きな値を示す傾向にあるが、値のばらつきは大きく、溶出量が小さい試料もある。この傾向はHCO₃⁻でも見られ、各試料ともに共通である。

図-8に深度とECの関係を示す。ECはCa²⁺、HCO₃⁻と同様に各試料とも共通して、深度が大きくなるにつれて、大きな値をとる傾向が見られる一方で、値のばらつきは大きい。

図-9に開口量とCa²⁺、HCO₃⁻の関係を示す。開口亀裂が無いCr0のコアで炭酸塩鉱物の白色脈が存在するAk-3（深さ76.3m）およびAk-5（深さ72.4m）を除外すると、開口量3mm程度で溶出量がピークを示している。図-10に開口量とECの関係を示す。開口量とECの関係は、開口量に対する溶出イオンの分布状況（図-9）と同様の傾向を示す。

図-6 岩石試料溶出後の水質分析結果

(a)~(b): Ak-1 (c)~(h): Ak-3 (i)~(m): Ak-5

Fig. 6 Result of water analysis for collected samples

5. 考察

5.1 深度と開口量の関係

図-5に示す通り、今回調査した斜面では、地下水との反応表面積を大きくすると考えられる開口亀裂が浅部よりも深部に多く見られるケースや、深度途中に開口量のピークがあるなど、複数のパターンが存在した。このことは、重力変形による岩盤変形の影響などにより、溶

図-7 深度と溶出イオンの関係
Fig. 7 Relation between depth and leaching ions

図-8 深度とECの関係
Fig. 8 Relation between depth and EC

図-9 開口量と溶出イオンの関係
Ca²⁺のAk-3, Ak-5 はイオン溶出量が同値
Fig. 9 Relation between fracture opening and leaching ions
The Ca²⁺ of Ak-3 and Ak-5 have same value

図-10 開口量とECの関係
Fig. 10 Relation between fracture opening and EC

出が複雑な過程を経て進行する可能性を示すものであると考えられる。

5.2 深度と溶出特性の関係

図-7, 図-8 に示す通り, イオン溶出量やECは深度が深くなると値のばらつきが大きくなる傾向がある。このことは深度がイオン溶出量やECに影響するのではなく, 深度が深くなることによる岩盤状況の変化, 例えば5.1で指摘した開口量の変化が複雑に影響することを示唆するものと考えられる。

5.3 開口量と溶出特性の関係

図-9, 図-10 に示す通り, 溶出イオンやECは開口量3 mm程度でピークが見られる。3 mm程度よりも小さい場合, あるいは大きい場合には溶出イオンやECは相対的に小さい。ここで開口亀裂は地下水との反応表面積を大きくすると考えられる。ここで紀伊山地においては炭酸塩鉱物がイオン溶出源であると考えられることから, 重力変形斜面において変形が進む際における1つのイオン溶出過程を想定した(図-11)。

- ①地下水により炭酸塩鉱物からCa²⁺, HCO₃⁻が溶出し, 数mmの開口亀裂が生じる
- ②①によって生じた開口亀裂を通じて地下水がさらに深

図-11 想定されるイオン溶出過程
Fig. 11 Presumed process of ion leaching

部へ浸透

③浸透地下水により, さらに溶出が進行し, 開口亀裂が発達

ここで想定した過程によれば, 炭酸塩鉱物を含む箇所新たに開口亀裂が生じた場合, イオン溶出が進行してCa²⁺, HCO₃⁻の溶出量が増加する可能性がある。この時, 炭酸塩鉱物などの溶出イオン供給源が無くなると溶出イオン量は低減し, ECも低下すると考えられる。開口亀裂が無いCr0のコアで炭酸塩鉱物の白色脈が存在するAk-3 (深さ76.3m) およびAk-5 (深さ72.4m) でイオン溶出量やECが示す値が大きかったことから, 炭

酸塩鉱物が溶出イオン量やECに与える影響が大きいことが示唆される。一方で重力変形による岩盤の変位によって開口亀裂が形成される可能性もある。この場合は、②から溶出過程が進行することが想定される。

6. まとめ

本報告では、岩盤に発達する亀裂や破碎状況による溶出イオン特性の違いを検討した。その結果、岩石試料の開口量、また試料内に存在する炭酸塩鉱物によって溶出特性が変化することが分かった。一方で、今回の調査は紀伊山地の危険斜面と考えられる斜面の結果を基にしたものであり、他斜面への適用性については、さらなる調査が必要である。また溶出試験は28日間実施したが、実際の斜面内部での溶出はさらに長期間に渡る。そのため、岩盤の変形に伴う溶出イオン特性の変化の実態把握ためには、より長期間の溶出試験が必要と考えられる。さらに、森林流域内の浸透流による水質形成は極めて複雑とされる(大手, 2001)。今回の調査により、危険斜面周辺において、溪流水の溶出イオンやECに変化が見られるとする地頭蘭ら(2006)の方法を支持する結果は得られたと考えられるが、より詳細な水質形成のメカニズム解明については、トレーサー試験を行うなど地下水の追跡調査が必要である。

引用文献

千木良雅弘・松四雄騎・ツォウ チンイン・平石成美・松澤真・松浦純生(2012): 2011年台風12号による深層崩壊, 京都大学防災研究所年報, 第55号A, pp. 193-211.

千木良雅弘・坂島俊彦・渋谷研一(2014): 深層崩壊発生危険斜面の地質・地形的抽出法について, 平成26年度砂防学会研究発表会概要集A, pp. 16-17.

地頭蘭隆・下川悦郎・寺本行芳(2006): 深層崩壊発生場予測法の提案-鹿児島県出水市矢筈岳山体を例にして-, 砂防学会誌, Vol. 59, No. 2, pp. 5-12.

蒲原潤一・内田太郎(2014): 深層崩壊対策技術に関する基本的事項, 国土技術政策総合研究所資料, 第807号.

木下篤彦・石塚忠範・高原晃宙・瀬戸秀治・野池耕平・森加代子・水野秀明(2016): 深層崩壊の発生する恐れのある斜面抽出技術手法及びリスク評価手法に関する研究, 土木研究所資料第4333号.

前田寛之・松木義則・長谷部賀宣・何洋(2006): “グリーンタフ”地域に分布する堆積軟岩の酸化的条件における化学的風化プロセス-新潟県虫生岩戸及び百川地すべり地域の例-, 日本地すべり学会誌, Vol. 42, No. 5, pp. 1-8.

森加代子・林幸一郎・木下篤彦・水野秀明・今森直紀・田中健貴・小川内良人(2017): 岩盤クリープ斜面を構成する岩石からのイオン溶出特性, 平成29年度砂防学会研究発表会概要集, pp. 418-419.

大手信人(2001): 植生のある流域の地下水・溪流水の水質形成機構, 地下水学会誌, Vol. 43, No. 3, pp. 201-213.

関陽児・上岡晃・金井豊・内藤一樹・奥澤康一・月村勝宏・中嶋輝允(2006): 孔内検層による透水性亀裂の探索と亀裂地下水の採試-茨城県稲田花崗岩の例-, 資源地質, Vol. 56, No. 2, pp. 169-184.

田中和広・田中靖治・宮川公雄・馬原保典・安地慎治・本荘静光(1996): 割れ目系岩盤における水理地質構造の調査手法の提案と適用, 応用地質, Vol. 36, No. 6, pp. 414-426.

寺川俊浩・窪田公一・中谷仁(1996): 岩盤地すべり地における地下水の挙動-とくに秋田県谷地地すべりを例として-, 地下水学会誌, Vol. 38, No. 4, pp. 295-313.

脇坂安彦・上妻睦男・綿谷博之・豊口佳之(2012): 地すべり移動体の特徴づける破碎岩-四万十帯の地すべりを例として-, 応用地質, Vol. 52, No. 6, pp. 231-247.

(原稿受付2018年1月15日, 原稿受理2018年7月9日)