北海道積丹半島における火砕岩の特性と岩盤崩壊の要因について

Properties of pyroclastic rock and controlling factor of the rock mass failure around the Shakotan Peninsula, Hokkaido, Japan

米田哲朗^{*)}・林 謙二^{*)}・ダカル ゴネス^{*)}・柏谷公希^{*)}・金子勝比古^{*)}

Tetsuro YONEDA, Kenji HAYASHI, Ganesh P. DHAKAL, Kouki KASHIWAYA and Katsuhiko KANEKO

Abstract

Steep rock slopes composed of pyroclastic rocks of middle Miocene to Pliocene age are formed around the coastal part of Shakotan peninsula, Hokkaido, Japan. Rock mass failure frequently occurs at these area which can be exemplified by the rock failure accident at Toyohama tunnel, Feb. 10, 1996. The pyroclastic rocks comprising the slopes is classified into the soft, inhomogeneous type. They are characterized by presence of smectite filling the interspaces between the particles as well as the pores in the rock. It may be possible that the microscopic occurrence of the smectite can be an important factor which controls the change in physical properties of the rock such as durability and hardness under an aqueous weathering condition. In addition, mineralogical feature of the rock may be a promoting factor of crack propagation causing the rock mass failure at such steep slope area.

Key words : pyroclastic rock, smectite, slake durability, physical weathering

和文要旨

北海道積丹半島の海岸部では、新第三紀中新世中期～鮮新世の火砕岩からなる急崖斜面が広く発達している。ここでは、1996年の豊浜トンネル付近の岩盤崩落事故をはじめとして、少なからぬ数の岩盤斜面崩壊が発生している。それらの急崖を構成する火砕岩類は、工学的な分類上不均質軟岩に相当する岩盤であり、構成岩片・粒子の間隙や割れ目を充填する産状のス멕タイトを広く含有することで特徴づけられる。すなわち、このス멕タイトのミクロな分布特性は、水に富む風化環境のもとで、火砕岩の構成岩片・粒子の接合性や固結度が関係する物理的性状変化を促進させる重要な要因であることが示される。そして、この火砕岩の特性は、急崖斜面における岩盤亀裂の伸長など岩盤崩壊の直接的原因に結びつくものと理解することができる。

キーワード：火砕岩、ス멕タイト、スレーキング特性、物理的風化

1. 緒言

1996年2月に発生し20名もの犠牲者を出した豊浜トンネル岩盤崩落事故以来、急崖斜面における岩盤の安定性評価や保全をめぐる問題に大きな関心が寄せられ、岩盤崩落のメカニズムや原因解明のための調査・研究また予知・予測技術の開発研究が広く進められてきている^{1)~5)}。それらの調査・研究の中で、岩盤崩落の基本的要因である地形・地質構造、気候、地下水また地震などの自然的因子に加えて、岩盤の地質・岩石性状に対して十分な理解を持つことの重要性が指摘されている。すなわち、急崖斜面などにおける水の凍結融解や水-岩石反応などによる岩石風化は、岩盤中の亀裂の発生・進展など物理的性状変化ならびに化学的変質をもたらすものであり、岩盤強度や耐久性の劣化の要因となり得るものと考えられる。そのような岩盤の安定性の評価や予測の方法を考えていく上で、岩石の現在の風化状態さらには地質学的な履歴を把握し、岩盤の風化と性状変化についての基本的関係を理解することが重要である¹⁾。そのためには、岩石の地質工学的的方法による強度・耐久性や透水性、さらに岩石鉱物学的な手法による岩石の組成・組織に関する性質など、岩盤・岩石特性の多面的な検討に基づいたケーススタディが必要であると考えられる。

筆者らはここ数年来、岩盤風化と性状変化のケース

スタディの一つとして豊浜地域を含めた積丹半島付近に分布する火砕岩をとりあげ、地表およびボーリングコア試料の観察・実験から得られた火砕岩の産状、組成・組織また物理的性状について広域的な比較検討を行っている。今回、積丹半島沿岸部の豊浜地域、キナウシ地域また積丹半島東方の忍路地域に分布する火砕岩の鉱物学的特徴とスレーキングについて述べ、火砕岩の鉱物学的特性およびそれと関連して進行する性状変化が岩盤崩壊の素因の一つとして重要であることを指摘したい。

2. 積丹半島沿岸部における岩盤崩落と火砕岩の地質的特徴

北海道積丹半島の海岸線では、おおよそ海食によると考えられている比高50m~100mを越す急崖地形が連続的に発達し、発生時期が不明なものも含め大規模~小規模の多くの岩盤崩落の発生が知られている(図-1)。たとえば、1974年以降、当地域では比較的大規模な岩盤崩落が神恵内キナウシ地域(規模2,000m³)、豊浜地域セタカムイ(同420m³)、豊浜地域ワッカ岬(同27,000m³)、忍路(同270m³)そして豊浜トンネル(同11,000m³)で発生している⁵⁾。

それら急崖地域の地質は、主に新第三紀中新世中期~鮮新世の海底火山活動によりもたらされた中性および酸性火砕岩類(水砕破砕岩、水中軽石流堆積物およびそれらの二次堆積物など)からなる^{6),7)}。そのような火砕岩類から構成される岩層は半島沿岸部に広く分布しており

^{*)} 北海道大学大学院工学研究科環境資源工学専攻
Division of Environment and Resources Engineering, Graduate School of Engineering,
Hokkaido University
〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目
Kita 13, Nishi 8, Kita-ku, Sapporo, 060-8628 Japan

図-1 積丹半島付近における岩盤崩落分布図
(岩盤崩落の機構説明と計測技術に関する研究委員会 (2000)⁵⁾の図に一部手を加えて引用。)

Fig. 1 Distribution of rock mass failures around Shakotan peninsula. Map after the research committee of mechanism clarification and monitoring technique of rock mass failure (2000)⁵⁾ is revised in this study.

図-2 積丹半島付近における火砕岩層の分布図
(塗色部は新第三紀中新世中期～鮮新世の火砕岩層の分布を表す。)

Fig. 2 Distribution of pyroclastic rock formation (colored part) of middle Miocene to Pliocene age around Shakotan peninsula

(図-2), 図-1 で示された規模の大きい岩盤崩落はおおよそこれらの火砕岩層の分布地域内で発生していることがわかる。

豊浜地域に分布する火砕岩は、中新世中期～後期の尾根内層に区分される安山岩質水冷破砕岩である。上述の豊浜地域のセタカムイ、ワッカケ岬および豊浜トンネルにおける火砕岩は、地質学的にほぼ同時期に形成された一つの火山体を構成する岩層であり、それらの地点における岩盤崩壊を旧海底火山の側面における山体崩壊であ

ると理解することもできる。図-3 Aにその概略を示すように豊浜トンネル岩盤崩落現場付近の水冷破砕岩は、下部よりユニットⅠ～Ⅳの四層に区分される¹⁾。崩落岩体はユニットⅠ～Ⅲにまたがる部分であり、その主要部はユニットⅡからなる。ユニットⅠおよびⅢは成層火砕岩であり、斜面上に再堆積した水冷火砕岩であると考えられている。ユニットⅡは、下部の角礫質な部分、中部の無層理塊状部分、そして上部の成層した比較的細粒部分の三つのサブユニットに区分される。また、ユニットⅡについては、豊浜近傍から採取された安山岩の放射年代値から11.2Maの噴火年代が考えられている⁸⁾。岩盤崩落現場付近の斜面では、長期間露出した岩盤表面や開口亀裂部分では風化による褐色化が進んでいるほか、とくに火砕岩の基質部で、局所的な変質に起因すると考えられる淡黄色部が随所に認められる。

キナウシ地域の火砕岩は、新第三紀中新世後期の尾根内層に区分されるデイサイト質水冷破砕岩である^{6), 9)}。それら火砕岩の礫と細粒物質からなる基質部の量比は変化に富み、自破砕溶岩、火山角礫岩、凝灰岩など、岩相変化が著しい。また、それら火砕岩は表層に分布する風化部分のをぞきおおむね新鮮な外観を呈する(図-3 B)。

積丹半島東方の忍路地域では、新第三紀後期中新世の俱知安累層に区分されている安山岩質火砕岩が忍路湾およびその周辺の海岸部に分布している¹⁰⁾。忍路湾付近では水冷破砕岩や枕状溶岩など水中火砕流に伴う種々のタイプの火砕岩から構成され¹¹⁾、その周辺の海岸部では砂質凝灰岩が広く分布している。それら火砕岩の角礫部分は黒色～暗灰色で比較的新鮮硬質であるが、基質部分は淡黄褐色を呈し変質が進んでいる。また、とくに枕状溶岩の団塊周辺部ないし境界部には黄褐色変質部が網脈状などをなし特徴的に認められる。

上述の火砕岩とくに水冷破砕岩について、構成岩片(礫)の粒径や礫と基質部分との構成割合が大変不規則に変化に富むことが共通した特徴である。さらに、火砕岩の角礫部分はおおむね黒色～暗灰色の新鮮硬質で緻密な火山岩片であるが、基質部分は褐色～灰黄色～灰色を呈し比較的脆弱、時として多孔質であることが特徴的である(図-3 C)。とくに風化の進んだ表層の火砕岩試料では基質部の褐色化と脆弱化が著しい。しかし、肉眼的に表層風化の影響を受けていないと判断される比較的深部の火砕岩コア試料中にも粘土細脈が観察されることもある(図-3 D)。

3. 試料および実験方法

積丹半島海岸部に分布する火砕岩層から広く試料採取を行った。とくに上述の3地域の地表試料およびボーリングコア試料に対し鉱物学的分析とスレーキング試験を行った。豊浜地域では、地表露頭6カ所(白岩、ワッカケ岬、滝ノ瀧、豊浜港、豊浜トンネル崩落現場、セタカムイ岩)ならびに新滝ノ瀧トンネルと豊浜トンネル崩落

図-3 火砕岩の性状

(A: 豊浜トンネル崩落現場付近の火砕岩の産状 (左図は豊浜トンネル崩落事故調査委員会 (1996)¹⁾の図を簡略化), B: キナウシ地域のコア試料, C: 安山岩片と細粒多孔質な基質部からなる火砕岩 (豊浜トンネル崩落現場付近), D: 火砕岩中のスメクタイト粘土脈 (豊浜地域新滝ノ間コア試料))。

Fig. 3 Occurrence and macroscopic feature of the pyroclastic rock

(A: steep slope of pyroclastic rock near rock fall site at Toyohama tunnel, B: core sample of pyroclastic rock from Kinaushi area, C: a pyroclastic rock sample of andesite rock fragment with fine-grained porous matrix (near rock fall site at Toyohama tunnel), D: clay vein nearly composed of smectite in core sample of pyroclastic rock from Shin-Takinoma in Toyohama area.)

現場付近で行われたボーリングから採取された火砕岩試料を使用した。キナウシ地域の火砕岩試料は、すべて急崖斜面で行われたボーリングコアから採取されたものである。また、忍路地域では、いずれも地表露頭から試料採取を行い、忍路湾岸斜面の水冷破碎岩と枕状溶岩を、またフゴッペおよび桃岩付近の砂質凝灰岩を実験試料に用いた。

採取したすべての火砕岩試料に対し、試料の粉末を蒸留水中で超音波分散した後、遠心分離により粒径2μm以下の粘土分を回収し、粘土試料を得た。粘土鉱物の同定のため、これら粘土の未処理とエチレンジアミン飽和 (EG) 処理の定方位試料に対しX線粉末回折 (XRD) 分析 (日本電子JDX-3500, 管電圧/電流 40KV/200 mA, スリット系: 0.5°-0.2mm-0.5°, ステップ角度 0.02°, 計数時間 1 sec) を行った。さらに、代表的な粘土試料を選び、不定方位試料についてXRDによる粘土鉱物のd (060) 反射ピークの測定を行った。また、いくつかの試料に対し全岩試料のXRD分析を行い、鉱物組成を調べた。

上記のXRD分析から得られたXRDデータを用い、結晶子 (スメクタイト) の粒径 (干渉散乱領域の大きさ)

評価を試みた。EG処理のスメクタイトの001回折ピークに対して、粉末X線回折における試料の粒径と関係づけられる半価幅 (FWHM) を計測するとともに、計算プログラムMudmaster¹²⁾を用いて、BWA (Bertaut-Warren-Averbach) 法による粒径解析¹³⁾を行った。

また、試料の研磨薄片を作成し、偏光顕微鏡 (オリンパスBX60およびニコンHQ130-PA160システム) により、火砕岩の鉱物組成および組織を調べた。そして、それら薄片を用いて電子線プローブ微小部分分析装置 (EPMA: 日本電子製JXA-8900M) による構成鉱物の定量化学分析と主要元素の特性X線による化学組成マッピングを行った。さらに、代表的ないくつかの粘土試料に対し、分析透過型電子顕微鏡 (ATEM: 日立製作所H-700およびHoriba EMAX-2200) による透過像観察および化学分析も行った。

火砕岩の風化環境下における耐久性を調べるため、ISRMの指針¹⁴⁾に基づくスレーキング試験を行った。試験方法はASTMに従い、採取した試料を砕き、質量測定した40~60gの岩片を10個用意した。これを105℃の恒温槽にて約4時間乾燥させた後、スレーキング試験装置 (JACOM製JTR-140A) のドラムに入れ、ドラム回転軸下2 cmまで蒸留水が入った水槽内でドラムを10分間回転 (20rpm) させた。その後ドラム内から岩片を取り出し、105℃の恒温槽で約4時間乾燥させ、乾燥後約1時間冷却するのを待ち、質量を測定した。ドラム中での回転-乾燥-質量測定までを1サイクルとし、これを10サイクル繰り返した。

4. 火砕岩の鉱物学的特徴

4.1 変質鉱物の産状

火砕岩試料に対する光学顕微鏡観察、XRD分析およびEPMA分析の結果、安山岩質火砕岩試料 (豊浜および忍路) では、斜長石、輝石および火山ガラスが碎屑粒子や基質部に広く観察され、またデイサイト質火砕岩 (キナウシ) ではそれらに加えて石英、角閃石および黒雲母が認められた。それら主要構成鉱物は、鏡下で、おおそ新鮮である場合が多いが、キナウシ地域のデイサイト質火砕岩では有色鉱物のオパサイト化など変質が進み汚濁しているものが多い。上記のほか、豊浜では磁鉄鉱、マグヘマイトおよびチタン鉄鉱が鏡下で普通に認められる。

変質鉱物については、ほぼすべての火砕岩試料からスメクタイトが認められ、積丹半島沿岸地域の火砕岩にはスメクタイトが広範囲に含まれることが判明した。その一例として、図-4に豊浜地域新滝ノ間トンネルおよびキナウシ地域のボーリング柱状図 (それぞれS1-3およびAB3) と採取コア試料から認められたスメクタイトのX線回折パターンを示す。いずれのボーリングコアにおいても、下部から上部まで広くスメクタイトが産出することが分かる。なお、図-4には後で述べるスメクタイトの粒径解析結果も併せて示している。

図-4 スメクタイトの産出状態の一例
(ボーリングコアに見られるXRDパターンと平均粒径の変化。S1-3: 豊浜地域新滝ノ間, AB3: キナウシ地域。)

Fig. 4 XRD patterns and variations in mean crystallite size of smectite of pyroclastic rock samples from two drilling holes (S1-3 and AB-3). S1-3: Shin-Takinoma in Toyohama area, AB3: Kinaushi area

これら火砕岩中のスメクタイトは、光学顕微鏡下で淡黄色～褐色を呈する微細粒子集合体として、とくにその基質部中に広く分布する。それらスメクタイトは、火砕岩の基質部分で粒子の間隙を充填する状態や粒子表面を被覆し網脈状をなし含有される産状で認められることが特徴である (図-5 A)。このほか、火山岩粒子の石基中で、真珠状あるいは不規則な微細割れ目を充填したり、

RF: 岩片 Pl: 斜長石 Sm: スメクタイト
図-5 火砕岩の偏光顕微鏡写真
Fig. 5 Microphotographs of pyroclastic rock samples

丸い空隙を充填あるいは内部壁面をコロフォーム状に被覆するなどの例も観察される (図-5 B)。さらに、表層の風化試料中では、スメクタイトが基質部中の斜長石やガラス質物質を交代する産状を示すものも観察される (図-5 C)。

その他の変質鉱物として、一部の試料からクリストバライトが認められるほか、表層の風化試料からはハロイサイトが検出された。さらに、キナウシの火砕岩試料から熱水変質による生成物と考えられる自形～半自形の黄鉄鉱が特徴的に認められる。これらのほか、黄褐色化し風化の影響を受けたと考えられる試料中に、鏡下で不定形の集合体をなす水酸化鉄鉱物が広く観察される (図-5 D)。

上述のように、火砕岩試料中のスメクタイトは、多くの場合亀裂や空隙を充填したり、碎屑粒子を被覆する状態で認められる。その一例として、スメクタイトのミクロな産状を示す二次電子線像および特性X線のカラーマップを示した (図-6)。スメクタイトは、鉄・マグネシウムに富むことが特徴であり、長柱状～針状の斜長石 (Ca, Alに富む) を含む碎屑粒子の表面を被覆あるいは間隙を充填し、全体としてネットワーク状に分布していることがよくわかる。この試料は、地表風化の影響を受け生成したと考えられるハロイサイトが共存しており、スメクタイトの外側 (空隙側) に帯状に重なるハロイサイト (Alに富みFe・Mgに乏しい) の存在が明瞭に示されている。

4.2 スメクタイトの鉱物学的特性

XRD分析から得られたスメクタイトの001ピーク (図-4に示されている) に対して行った粒径解析と半価幅

図-6 火砕岩のEPMAによる化学組成マッピング (スメクタイトとハロイサイトが共存する表層風化試料(豊浜地域)。明るさの程度が強いほど、おおよそ含有量が高いことを示す。)

Fig. 6 Secondary electron image (SEI) and chemical images (Si, Ca, Fe, Al and Mg) of surficial weathered rock sample showing coexistence of smectite and halloysite. Brighter part in chemical image shows higher chemical concentration in comparison with darker one

の計測結果を比較した(図-7)。豊浜およびキナウシ地域のスメクタイトの平均粒径は3~8 nmの範囲にあり、半価幅は0.5~1.4の範囲の値を示している。スメクタイトの平均粒径と半価幅は負の相関性を有しており、粒径の減少と回折ピークのブロードニングの関係として知られていることと調和的である。これら粒径パラメータはそれぞれの地域で変動幅があるものの、豊浜地域ではキナウシ地域のものに比べ小さい粒径(大きい半価幅)を示すものが多く、スメクタイト粒径に地域差があることが示される。さらに、キナウシの例に見られるように、地表部の褐色化した火砕岩中のスメクタイトの粒径が明らかな減少傾向を示しており(図-4参照)、表層風化の影響によりスメクタイトの粒径変化が生じる場合があることを示唆している。

各地域の代表的火砕岩試料について、EPMAによるスメクタイトの定量化学分析を行った。その結果から2八面体型スメクタイトの主成分である SiO_2 - Al_2O_3 - Fe_2O_3 のモル比を図-8の三角図にプロットし、2八面体型スメクタイト(モンモリロナイト、バイデライト、ノントロナイト)の理想式と比較した。図-8に示されるように、

図-7 XRDによるスメクタイトの平均粒径とピーク半価幅
Fig. 7 Mean crystallite size (mean size of coherent scattered domain) vs. full width at half maximum of XRD peak of smectite

図-8 スメクタイトの化学組成変化
Fig. 8 Ternary plots of SiO_2 - Al_2O_3 - Fe_2O_3 mole ratios of smectite

積丹半島に分布する火砕岩中のスメクタイトは、 Al_2O_3 と Fe_2O_3 の間に広い組成変化を示している。それらの多くはモンモリロナイトとノントロナイトの中間的なAl-Fe組成を持つスメクタイトであると理解される。また、豊浜および忍路地域のスメクタイトはややFeに富むものが多く、一方キナウシ地域のそれはFeに乏しくAlに富むものが多いという傾向があり、地域差が認められる。

以上述べた積丹半島沿岸部に分布する火砕岩中でのスメクタイトの二次的生成の要因すなわち火砕岩変質の原因については、現在の陸上の表層風化や火砕岩生成以降の海底風化さらに熱水作用など複合的な地質学的プロセスが関与したものと考えられている¹⁶⁾。

5. 火砕岩のスレーキング特性

述べたように、火砕岩中のスメクタイトのミクロな産出状態として、基質部分で粒子の間隙を充填する状態や

表-1 スレーキング試験試料一覧

Table 1 Brief description of rock samples used for slake durability test.

岩質	試料名	特徴	産地
細粒火砕岩	STF1	黄褐色の細粒砂質凝灰岩	桃岩(忍路地域)
	STF2	灰褐色の細粒砂質凝灰岩	セタカム岩(豊浜地域)
	STF3	黄褐色の細粒砂質凝灰岩	アゴッペ(忍路地域)
	STF4	灰褐色の細粒砂質凝灰岩	アゴッペ(忍路地域)
	STF5	黄褐色の細粒～粗粒砂質凝灰岩	アゴッペ(忍路地域)
粗粒火砕岩	HC1	全体的に緑～灰色の水砕破砕岩	豊浜(豊浜地域)
凝灰質砂岩	(比較試料)	黄褐色の風化凝灰質砂岩	島根県来待

RF: 岩片 Sm: スメクタイト Ze: 沸石

図-9 比較試料(来待産凝灰岩質砂岩)の偏光顕微鏡写真
Fig. 9 Microphotograph of tuffaceous sandstone (comparative rock sample) from Kimachi area, Shimane Prefecture, Japan

粒子表面を被覆し網脈状をなし含有される状態が特徴的である。膨張性粘土鉱物であるスメクタイトのこのような分布特性は、岩石の構成岩片・粒子の接合性や固結度に関係し、水に富む風化環境下での岩盤耐久性の支配要因となることが考えられる。このため、主に、豊浜および忍路地域から採取したスメクタイトを含む細粒火砕岩(砂質凝灰岩)のスレーキング試験を行い、乾燥・湿潤状態の繰り返しと回転による磨耗に対する岩石の抵抗性を調べた。用いた火砕岩試料の一覧を表-1に示す。

比較試料として島根県来待産の風化凝灰質砂岩について同様のスレーキング試験を行った。比較試料は、顕微鏡観察およびXRD分析結果より、積丹半島の火砕岩試料とほぼ同様の大きさの碎屑粒子からなり(図-9)、少量(同程度)のスメクタイトを含有すると見なされる岩石である¹⁷⁾。しかし、スメクタイトは碎屑岩片中に含まれることが多く、碎屑粒子間には主に沸石の充填により特徴づけられること、さらに、スメクタイトは三八面体型の鉄サポナイトであることが積丹産火砕岩と比べて大きく異なっている。また、比較試料の細孔分布について、スレーキング実験に用いた積丹産火砕岩の一つ(STF1)と比較すると、平均細孔半径(それぞれ515.3nmおよび12.20nm)と相対細孔体積がやや異なるものの累計細孔体積(127.2mm³/gおよび159.6mm³/g)はほぼ同様の値を示している¹⁷⁾。

スレーキング試験における試料の形状変化と質量変化

スレーキング試験前 2 サイクル 10 サイクル

A: 細粒火砕岩 (STF1)
B: 粗粒火砕岩 (HC1)
C: 凝灰質砂岩 (比較試料)

図-10 スレーキング試験における試料片の形状変化
Fig. 10 Change in shape of the rock samples during slake durability test

(A: fine-grained pyroclastic rock, B: coarse-grained pyroclastic rock, C: tuffaceous sandstone (comparative rock sample).)

図-11 火砕岩試料のスレーキング特性

Fig. 11 Slake durability (slaking index % vs. number of cycle) of pyroclastic rock samples. Vertical and horizontal axes can be taken as rock aspect change and process intensity of physical weathering (mainly wetting and drying), respectively

(○: tuffaceous sandstone (comparative rock sample), ■: coarse-grained pyroclastic rock, ●: fine-grained pyroclastic rock (sample STF1).)

の特性曲線をそれぞれ図-10と図-11に示した。試料のスレーキングし難さを、試験前の乾燥重量に対する2サイクル後の乾燥重量の割合(I_{d2})であらわすと、積丹産細粒火砕岩試料は40%~80%の範囲にあり、比較試料のそれ(89%)に比べ低い耐スレーキング指数を示す。また、10サイクルまでのスレーキング指数をプロットした特性曲線についてみると、積丹産火砕岩試料は明瞭により高い減量割合で推移しており、比較試料に比べ明らかにスレーキングしやすいと評価される。なお、図-10の試料の変状写真で見られるように、やや粗粒火砕岩試料

(HC1)は、細粒分から2mmを超える粗粒分まで幅広い粒径の火山砕屑物粒子からなる不均質岩である。このため、径2mmを超える砕屑物粒子の構成割合の影響を考慮する必要があるものの、耐スレーキング指数 I_{d2} は比較試料と比べて低い値(64%)を示しており、積丹産細粒火砕岩試料と同様にスレーキングしやすいと評価できる。

このような積丹産火砕岩試料と比較試料のスレーキング特性の違いを、変質鉱物として含まれるスメクタイトのミクロな分布特性の相違に結びつけることができる。すなわち、火砕岩では、粒子間隙などの細孔を通路として浸透する水によるスメクタイトの膨潤などが主要因であると考えられる。一方、比較試料の来待砂岩では火山岩片中に含まれるスメクタイトが岩片粒子の結合性の低下に大きく影響しなかったと推察できる。さらに、火砕岩と比較試料のスメクタイトが異なった鉱物種であること(火砕岩中のスメクタイトはFeに富むモンモリロナイト-ノントロナイトであり、来待砂岩のそれはFeサポナイトである¹²⁾)も影響している可能性が考えられる。いずれにせよ、積丹半島沿岸部に分布する火砕岩中のスメクタイトの存在は、風化の進行に伴う火砕岩の性状変化を支配する要因となり、急崖斜面岩盤の耐久性や安定性に影響するものと考えられる。

5. 火砕岩特性と岩盤斜面崩壊の要因

積丹半島地域の急崖岩盤斜面に対する防災対策のための実態調査さらに岩盤崩落メカニズムや原因解明のための調査研究が数多く行われている。そして、積丹半島沿岸部を含む広域的な岩盤斜面崩壊の実態調査の結果、岩盤斜面の崩落様式は4つのタイプに分類されること(図-12)、また、いずれのタイプにおいても崩落岩体を分離する亀裂進行と分離面付近における風化状態がそれら岩盤斜面の安定性評価にとって重要であること⁵⁾、などが明らかにされている。とくに豊浜トンネルの岩盤崩落に関して、岩体の力学的釣り合いを変化させ崩落に導いた直接的原因として、崩壊面(背面)における亀裂の発生と低速伸長が重要であることが指摘され^{1), 2), 4), 18), 19), 20)}など、岩盤中の亀裂進展が火砕岩からなる急崖斜面崩壊に対する支配要因となっていることが示されている。

そのような岩盤の亀裂を伸長させる要因として、風化作用とくに低温下の物理的風化および乾湿風化を挙げることができる²¹⁾。低温下の物理的風化は、①凍結融解プロセスにおける水分移動とアイスレンズ成長、②低温の水による岩石の水和破碎(吸着水分子の斥力に起因する破碎)、また③凍結時の間隙水圧および亀裂内水圧の発生などによる岩石破碎の進行である。それらはいずれも引張応力の作用下での急崖岩盤の亀裂伸長要因であり、寒冷地の風化環境下の岩盤に特徴的な要因であると考えられる。さらに、岩石の乾湿繰り返しによる風化は、上記②の破碎進展メカニズムが関係する岩石の膨張・収縮による破碎である。本研究で得られた火砕岩試

図-12 積丹半島付近における岩盤の崩落様式のタイプ
(北海道古平町国道229号線岩盤崩落調査委員会(1997)²⁾の図を加筆して使用。)

Fig. 12 Types of rock mass failure in Shakotan peninsula. Diagram is quoted from the investigative committee of rock mass falls along Route229in Furubira, Hokkaido(1997)²⁾, and revised in this study

料のスレーキング特性は、乾湿風化プロセスにおける火砕岩中の亀裂進展のし易さを示すものと考えることができ、同様の環境下にある急崖斜面の岩盤亀裂伸長の要因となるものであろう。それらのほか、岩石の応力腐食や地震による動的応力の影響を考慮することができよう。応力腐食割れは、引張応力の作用下で水分が存在する場合には応力の値が強度以下であっても亀裂が低速に伸長する現象であり、水に富む表層風化環境における岩盤中の亀裂伸長を促進させるものとして急崖斜面における岩盤亀裂伸長の要因に数えることができる。また、地震(振動)による動的応力は亀裂伸長の加速要因として働くことが考えられ、地震(振動)の影響を要因の一つに挙げることができよう。

述べたように、急崖岩盤の亀裂伸長に起因する不安定化と崩落にとって、岩石の物理的風化は重要な影響を及ぼすことが理解される。とくに、積丹半島地域の急崖斜面を構成する火砕岩の特性、すなわち膨張性粘土鉱物であるスメクタイトのミクロな分布特性などは、風化プロセスにおける亀裂進展を含む物理的性状変化を助長する役割を果たすものと見ることができる。前章のスレーキング特性の比較結果は、このことを示唆するとともに、火砕岩の物理的性状変化の解析にとって鉱物学的特性の理解が不可欠であることを示している。

6. 結語

北海道積丹半島の海岸部では、新第三紀中新世中期～鮮新世の火砕岩からなる急崖斜面が広く発達している。

そこでは、1996年の豊浜トンネル付近の岩盤崩落事故をはじめとして、少なからぬ数の岩盤斜面崩壊が発生している。それらの急崖を構成する火砕岩類は、工学的な分類上不均質軟岩に相当する岩盤であり、構成岩片・粒子の間隙や割れ目を充填する産状のス멕タイトを広く含有することで特徴づけられる。すなわち、膨張性粘土鉱物であるこのス멕タイトのミクロな分布特性は、水に富む風化環境のもとで、火砕岩の構成岩片・粒子の接合性や固結度が関係する物理的性状変化を促進させる重要な自然的要因であることが示される。そして、この火砕岩の特性は、急崖斜面における岩盤亀裂の発生・伸長や岩盤支持力の低下など岩盤崩壊の直接的原因に結びつくものと理解することができる。さらに、それら火砕岩の特性は、地震などによる振動や海食による機械的破壊に対する岩盤の耐久性や抵抗性の劣化・減少の促進要因となることも考えられる。このように、本地域における火砕岩の特性は岩盤斜面崩壊の重要な自然的要因の一つであるといえる。本地域における火砕岩岩盤斜面の安定性・耐久性を評価し、防災・保全のための具体的な指針を得るためには、風化の進行に伴う岩石性状変化について、理論、室内実験さらにフィールド調査・計測による基礎的・総合的な検討の必要性が指摘される。

謝辞

本論文にて検討結果を述べた火砕岩ボーリングコア試料は、筆者の一人（米田）が参加した地盤工学会北海道支部「岩盤崩落の機構解明と計測技術」に関する研究委員会に対して北海道開発局が提供したものである。ここに記して、同委員会および北海道開発局の関係各位に深謝の意を表する。

参考文献

- 1) 豊浜トンネル崩落事故調査委員会 (1996): 豊浜トンネル崩落事故調査報告書, 218p.
- 2) 北海道古平町国道229号線岩盤崩落調査委員会 (1997): 北海道古平町国道229号線岩盤崩落調査委員会報告書地盤工学会, 183p.
- 3) Ishijima, Y. and Fuji, Y. (1997): A study on the mechanism of slope failure at Toyohama tunnel, Feb. 10, 1996, Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. Vol. 34, Nos. 3-4, Paper No. 087.
- 4) 中島巖・米田哲朗 (1998): 豊浜トンネル坑口岩盤の崩壊機構に関する一考察, 資源・素材 '98(A) 岩盤工学, pp. 21-24.
- 5) 岩盤崩落の機構解明と計測技術に関する研究委員会 (2000): 岩盤崩壊の発生機構と計測技術, 地盤工学会北海道支部, 226p.
- 6) Yamagishi, H. (1981): Geology of the Shakotan peninsula, Hokkaido, Japan, Rept. Geol. Survey Hokkaido, 52, pp. 1-29.
- 7) 渡辺寧 (2000): 札幌-岩内地域マグマ-鉱化熱水系分布図, 特殊地質図38, 地質調査所
- 8) 宇井忠英・広瀬亘 (1997): 豊浜トンネル岩盤崩落事故現場の水砕火砕岩の岩石記載学的特徴, 北海道地区自然災害科学資料センター報告, 12, pp. 21-30.
- 9) 通産省資源エネルギー庁 (1985) 昭和59年度広域調査報告書 積丹地域, 156p.
- 10) 長谷川潔・小山内照 (1977): 国富-定山溪地域の地質と鉱床, 北海道地下資源調査所調査研究報告, 5, 37p.
- 11) 山岸宏光 (1974): 北海道地下資源調査所報告, 12, pp. 63-68.
- 12) Eberl, D. D., Drits, V. A., Srodon, J., and Muesch, R. (1996): Mudmaster-A program for calculating crystallite size distributions and strain from the shapes of X-ray diffraction peaks, USGS, Open-file report, 96-171, 44p.
- 13) Drits, V. A., Eberl, D. D., and Srodon, J. (1998): X-ray measurement of mean thickness, thickness distribution and strain for illite and illite-smectite crystallites by the Bertaut-Warren-Averbch technique, Clays and Clay Minerals, Vol. 46, No. 1, pp. 38-50.
- 14) ISRM (1981): Rock Characterization testing and Monitoring -ISRM Suggested Methods, Pergamon Press, Oxford, 211p.
- 15) ASTM (1990): Standard test method for slake durability of shales and similar weak rocks (D4644), Annual book of ASTM Standards Vol. 4. 08, pp. 863-865.
- 16) 米田哲朗・大河原正文・渡辺隆 (1999): 北海道積丹半島豊浜トンネル付近の水砕火砕岩に産するス멕タイト, 粘土科学, Vol. 39, No. 2, pp. 53-64.
- 17) Dhakal, G., Yoneda, T., Kato, M., and Kaneko K. (2002): Slake durability and mineralogical property of some argillaceous pyroclastic and sedimentary rocks, Engineering Geology, Elsevier, Vol. 65, No. 1, pp. 31-45.
- 18) 菊池宏吉・水戸義忠 (1998): 国道229号線豊浜トンネル上部斜面の岩盤崩落メカニズムに関する地質工学的考察, 応用地質, Vol. 39, No. 5, pp. 456-470.
- 19) 石島洋二 (2001): 岩盤崩壊現象の概要と崩壊のメカニズム, 資源・素材2001(札幌), 発表講演資料 岩盤工学, pp. 25-28.
- 20) 三田地利之 (2001): 岩盤崩壊に関わる各種要因の役割, 資源・素材2001(札幌), 発表講演資料 岩盤工学, pp. 33-36.
- 21) Bland, W. and Rolls D. (1998): Weathering, Arnold and Oxford Univ. Press, 271p.

(原稿受付2001年11月26日, 原稿受理2002年4月27日)