

## 建設工事における風化・変質作用の取扱い方

### 4. 軟岩の風化作用

千木良 雅 弘 (ちぎら まさひろ)

勸電力中央研究所 我孫子研究所原燃サイクル部処分研究室

#### 4.1 はじめに

軟岩の風化作用を正しく理解することは、軟岩を土木施工の対象とする際に次のような重要性を持っている。一つは、この理解が現在の岩盤の力学的性質の分布を的確に調査して解明するのに役立つことである。特に、地表近くでの岩盤の力学的性質が割れ目よりも岩石の風化に大きく支配される堆積性軟岩の場合、このことが重要である。もう一つの重要性は、軟岩の中には比較的速く風化するものがあるために、人工法面、構造物基礎、トンネルなどの長期的安定性を評価する際に、場合によっては現状での力学的性質だけでなく風化によるその変化を評価する必要もあることである。

上記のような重要性にもかかわらず、軟岩の風化についての研究は、硬岩の風化についての研究に比べかなり遅れている。軟岩は、堆積性軟岩、風化軟岩、火山軟岩に大別されているが<sup>1)</sup>、本章では日本に最も広く分布する堆積性軟岩の風化について述べる。

一般的な堆積岩の主要構成鉱物は、多くの場合石英、長石、粘土鉱物（イライト、スメクタイト、緑泥石、カオリナイト等）であり、付随鉱物として方解石、黄鉄鉱、（またまれに沸石）が含まれることが普通である。黄鉄鉱は、化学的風化作用に重要な役割を果たしていることが最近明らかになって来たものであり、堆積性軟岩には通常直径数  $\mu\text{m}$  程度の蓇状粒子（フランボイダル黄鉄鉱）として0.1%から数%含まれる（口絵写真-24）。

日本の堆積岩のほとんどは元々水中に堆積した泥や砂が次第に脱水固化したものであり、軟岩では脱水固化が不完全で、間隙が多く、間隙を通じての水の移動が風化を促進する。水の移動は、含水率変化に伴う粘土鉱物の膨潤や収縮、サクシオン圧の発生、

水-岩石間の化学反応などを通じて岩石を風化させる。

#### 4.2 含水率変化による風化(スレーキング)

堆積性軟岩を新しく地表に露出させると乾燥・湿潤繰返しによって急速に風化して岩片状や土砂状になる場合があることは、古くから知られており、しばしば建設工事において問題となって来た。この現象はスレーキングと呼ばれ、この現象が著しく認められる泥質岩を中心に古くから研究されて来た。しかしながら、これらの研究の多くは、スレーキングに対する岩石の抵抗力を判断するための試験方法についてのものであり、そのメカニズムや自然条件下でのスレーキング挙動については良くわからない点が多い。かつては、Terzaghi and Peck (テルツァーギとベック)<sup>2)</sup> によって、乾燥岩石が吸水する際に岩石の間隙空気圧が高まり、そのために岩石が破壊すると考えられたが、仲野<sup>3)</sup> は、泥岩を大気圧下および真空下で吸水させた結果を比較し、この説を否定した。

岩石の含水率変化に応じた挙動に対して、岩石の構成鉱物（特にスメクタイト等）の乾燥収縮や湿潤膨張挙動が大きく影響することはよく指摘される所であるが、それだけでなく、岩石の組織、粒度組成、固結の程度の影響も当然大きい。吉中・安発<sup>4)</sup> は、泥岩に含まれる水の化学ポテンシャル、モンモリロナイトおよび非晶質物質の量、乾燥収縮量、湿潤膨張量などの関係を研究し、泥岩の収縮・膨張および浸水による強度低下を、岩石骨格の剛性と強さに対する収縮力・膨張力との相互作用に求めた。そして、膨張力を生ずる原因は泥岩を構成する材料の水の吸着能とその強さにあることを示した。そして、水の吸着能とその強さはモンモリロナイトおよび非晶質物質の種類や量によって決定されると考えた。

## 講 座

田中<sup>5)</sup>も、泥岩の乾燥収縮および湿潤膨張と間隙水の化学ポテンシャルとの関係を論じ、110°C乾燥による収縮率と pF 値(土中水の負の圧力水頭を cm で表し、その常用対数をとった値)を用いて湿潤膨張挙動を予測できると述べている。小島・斉藤<sup>6)</sup>は、より実用的な観点から、泥岩とそれを粉体にしたもの(つまり骨格を失わせたもの)との吸水含水比の差が、岩石の組織、粒度組成、固結の程度などの影響を表すと考えて、泥岩の吸水に伴う膨潤量や膨潤圧を簡易的に求める手法を提案している。

岩石のスレーキングに関する性質を求める試験法には次のようなものがある。乾湿を多数繰り返す方法として、奥園<sup>7)</sup>、Franklin and Chandra<sup>8)</sup>、Morgenstern and Eigenbrod<sup>9)</sup>、大住・今川<sup>10)</sup>の方法などがある。また、試験の迅速性のために1回の乾湿サイクルでスレーキングを判定するものに、国鉄の地質調査標準示方書<sup>11)</sup>、土木学会<sup>12)</sup>、Morgenstern and Eigenbrod<sup>9)</sup>、吉中・小島・田中<sup>13)</sup>、小島・斉藤<sup>6)</sup>の方法がある。これらの方法は、基本的には目視によって岩石形状の変化を観察するか、乾湿繰返しに伴う含水率の変化あるいは細粒化質量を測定し、必要に応じて力学試験を行うものであり、随所で紹介されているので、ここでは繰り返して述べない。

岩石を室内で見た場合のスレーキングの研究の現状は以上のとおりであるが、ここで野外に目を移して考えてみよう。野外での観察・測定によるスレーキング研究は意外に少ない。

鈴木ほか<sup>14)</sup>と高橋<sup>15)</sup>は、それぞれ三浦半島と日南海岸において、第三紀の泥岩、砂岩、凝灰岩の互層が洗濯板状の凹凸をなす原因について検討した。そして、泥岩部分が凹む原因は乾湿繰返しによって破壊する(スレーキング)ことであることを室内での力学試験などにより明らかにした。前門<sup>16)</sup>は、島尻泥岩の切土の3年後の法面で表面から15 cm までの含水率、密度、硬さの測定を行い、表面付近の泥岩が細片化していることを乾湿繰返しによると考えた。藁谷<sup>17)</sup>と藁谷・松倉<sup>18)</sup>は房総の更新統のシルト岩を対象にして谷壁表面から12 cm までの含水比分布と表面岩石の剝離量を経時的に測定し、剝離量と降雨および季節変化に応じて変化する含水比との関係を論じた。しかしながら、後2者では研究対象とした斜面の形成過程や風化の「初期状態」についてはほ

とんど述べられていない。これらの研究は、それらの記述から判断して、黄褐色というよりも暗灰色から青灰色の泥岩が切土、あるいは谷壁浸食によって露出した後、どのようにスレーキングを起こして行くかについて研究したものであると言える。一方、小宮・新城<sup>19)</sup>は、島尻泥岩の自然地山においてボーリングコアを用い、含水比の分布を複数時期に調べている。その結果によると、含水比の経時変化は地表付近で最も大きいのが、数mの深さまで泥岩の色は黄褐色から黄色であり、その変色部分で含水比の変化が顕著なようである。つまり、スレーキングを著しく起こすような大きな含水比変化は自然地山ではすでにならかなり酸化された岩石の部分で起こるようである。

野外で生じている岩石の乾燥・湿潤過程は、室内での単純な乾燥・水没過程ではないし、次節で述べる化学的過程と共に岩石に作用しており、今後は野外での岩石の乾湿繰返しによる風化作用について研究を進める必要があると考える。実際、従来の室内実験から、泥岩のスレーキング挙動や強度に対する乾湿繰返しの影響は岩石の湿潤の仕方に依存することが明らかとなっている<sup>20)</sup>。また、自然の岩石の割れ目を見ると、たいていそれら沿いに岩石が酸化し、黄褐色を帯びている。そして、これらの割れ目には石膏などの硫酸塩が析出していることもまれではない。つまり、自然の岩盤表面では乾燥・湿潤と次節で述べる化学的風化とが必ずしも分離されて起こるわけではない。

### 4.3 酸化・溶解による化学的風化

#### 4.3.1 概 説

化学的風化は岩石と間隙水との化学反応であり、その種類には鉱物の水和、炭酸ガス付加作用、溶解(加水分解、イオン解離等を含む)、酸化がある<sup>21)</sup>。これらのうち、堆積性軟岩の化学的風化においては、次の理由から溶解や酸化が最も重要である。堆積性軟岩の場合、構成鉱物は長い間間隙水と接していたため、鉱物表面はたいてい水和していると考えられる。山下ほか<sup>22)</sup>は5万年程度よりも古い火山灰中の火山ガラスはほとんどすべて水和していることを示した。そして、実際に堆積性軟岩として扱われる岩石はこれよりも古い岩石である。炭酸ガス付加作用

表-4.1 堆積性軟岩の風化およびその工学的影響の研究の例

場 所	地 層 名	時 代	岩 石	黄鉄鉱含有率(%)*	方解石含有率(%)**	備 考	文 献
英 国	Westbury beds	三疊紀	頁 岩	4~9	?	膨れ	Hawkins & Pinches, 1987 <sup>30)</sup>
カナダ	Lorraine Formation	オルドビス紀	頁 岩	4	<4	"	Quigley & Vogan, 1970 <sup>35)</sup>
カナダ	Sainte-Foy Formation	カンブリア紀	頁 岩	2	3	"	Bérubé et al., 1986 <sup>37)</sup>
米 国	Conemaugh and Monongahela Formations	石炭紀	石炭と頁岩	0.1~5	?	"	Dougherty & Borsotti, 1972 <sup>26)</sup>
米 国 (テキサス)	Wilcox formation	始新世	褐炭と頁岩	0.4~6	?	酸性土壌	Dixon et al., 1982 <sup>37)</sup>
米 国 (メリーランド)	Coastal Plain Sediment	白亜紀	グロウコナイト堆積物	4	?	"	Wagner et al., 1982 <sup>64)</sup>
英 国	Westphalian Coal Measure	始新世	泥 岩?	2.5	4.5	岩石の風化に黄鉄鉱が重要	Toyior, 1988 <sup>38)</sup>
英 国	Upper Lias Clay	ジュラ紀	粘 土	5~10	4~6	"	Chandler, 1972 <sup>55)</sup>
英 国	Oxford Clay	ジュラ紀	粘 土	5~15	10~40	"	Russel & Parker, 1979 <sup>39)</sup>
千葉県	?	新第三紀	凝灰質砂岩・凝灰角礫岩	?	?	硫酸塩析出による石仏破損	関・酒井, 1987 <sup>82)</sup>
福島県	竜の口層	鮮新世	凝灰質凝灰岩・珪藻土質凝灰岩・凝灰岩・泥岩・凝灰質シルト岩	?	?	"	関 ほか, 1987 <sup>63)</sup>
宮崎県	宮崎層群	鮮新世	泥 岩	0.4~2.2	?	硫酸塩によるコンクリート基礎破損	小林, 1982 <sup>36)</sup> 高谷, 1983 <sup>37)</sup>
福岡県	?	?	石炭ボタ	?	?	"	落合 ほか, 1986 <sup>38)</sup>
北海道	豊似川層	中新世	砂岩, 礫岩	2.2	0.3	岩石の風化に黄鉄鉱が重要	千木良, 曾根, 1988 <sup>40)</sup>
新潟県	魚沼層群, 山屋層	鮮新世	砂 岩	1.5	0.2	"	千木良, 1988 <sup>43)</sup>
新潟県	灰爪層	更新世	泥 岩	2.2	2.6	"	千木良, 1987, 1988 <sup>42), 45)</sup>
千葉県	柿の木台層	更新世	泥 岩	1.1	2.8	"	志田原 ほか, 1992 <sup>58)</sup>
新潟県	寺泊層	中新世	泥 岩	4.1	?	堆積環境解析のための研究	猪, 1972 <sup>56)</sup>
新潟県	椎谷層	中新世	泥 岩	1.9	?	"	猪, 1972 <sup>56)</sup>
千葉県	上総層群	鮮新世~更新世	泥 岩	1.5~3.0	?	"	猪 ほか, 1983 <sup>67)</sup>

\* 分析値として硫酸が示されている場合, すべて黄鉄鉱として含まれると算出.

\*\* CO<sub>2</sub>はすべて方解石として含まれると仮定.

## 講 座

は、風化作用時に鉱物に炭酸ガスが付加され炭酸塩が形成されることであるが、実際には、炭酸ガスは水に溶けて炭酸として鉱物を溶解するのに消費されることの方が多い。さらに、堆積性軟岩はたいていの場合有機物を含み、長い間還元的な環境に置かれていたものであるため、地表付近の酸化環境に置かれると酸化されやすい。

堆積性軟岩の化学的風化の研究は主に三つの分野で行われてきた。つまり、土壌学、地質工学、そして地質学の分野である。これらの研究は、お互いに密接に情報交換されながら行われて来たものではないと思われるが、いずれにおいても、堆積性軟岩に普通に含まれる黄鉄鉱の酸化が風化作用に大きな役割を果たしていることが明らかになって来ている(表-4.1参照)。

土壌学の分野では、堆積物に含まれる黄鉄鉱が酸化されて硫酸が生成し、これが酸性土壌の主原因の一つであることが比較的早くから認識されており、すでにそれに関する国際シンポジウムが何回か開かれて来た<sup>23),24)</sup>。しかしながら、土壌学で研究されて来たのは、主に平坦地でしかもごく地表付近(1 m 前後)であった。そのため、山地での研究は少なく、またボーリングなどを用いての深部までの研究はほとんどなされて来なかった。

地質工学の分野では、堆積岩の上に建設された中小の建物が地盤の盤ぶくれにより破損するという現象が各地で生じていることが1970年頃から明確に認識され始めた。この大きな原因が地盤中に硫酸塩が晶出することであること、また、これらの硫酸イオンは主に黄鉄鉱の酸化によって生成されたものであることが次々に明らかになってきた<sup>25)~27)</sup>。また、これらの盤ぶくれの研究と平行して、黄鉄鉱の酸化により生成される硫酸が岩石中の炭酸塩を溶解して岩石を劣化させることも明確になって来た<sup>28)~33)</sup>。田中<sup>34)</sup>は黄鉄鉱の役割については述べていないが、風化に伴って岩石中の方解石が溶解して岩石強度が低下することを示した。黄鉄鉱に由来する硫酸または硫酸イオンは、岩石のみでなくコンクリートとも反応して、それを劣化させることも知られている<sup>35)~41)</sup>。

地質学の分野では硫化物鉱床鉱山からの排水が硫酸酸性になることは古くから知られていたものの、

堆積岩にわずか数%含まれる硫化物が堆積岩の風化帯構造の形成に大きく寄与することは最近になって明確にされてきた<sup>42)~49)</sup>。ただし、岩石中の黄鉄鉱が酸化して生成される硫酸酸性条件下で緑泥石がスメクタイトに変化することは知られていた<sup>50),51)</sup>。

本節では、最近明らかになって来た化学的風化メカニズムについて紹介するとともに、風化による力学的性質の変化についても触れる。

## 4.3.2 堆積性軟岩の化学的風化メカニズム

図-4.1は日本の山地での堆積性軟岩風化帯の特徴的な構造と化学的風化のメカニズムを示す。岩石の鉱物・化学分析、物理試験などから、このような風化帯の構造は、以下の様に水と岩石との連鎖的な化学反応によって説明されることが明らかとなった。

## (1) 酸化帯と酸化フロント

地中水は涵養時には大気中の二酸化炭素と酸素と平衡にあるが、表層土壌通過時に二酸化炭素を得、酸素を減ずる。そして、さらに下方の岩体内部に浸透して行く。二酸化炭素は水にとけて炭酸となり、鉱物を溶解する。一方、酸素は酸化しやすい鉱物を酸化する。筆者が今まで各地で分析を行って来た結果によれば、自然地山では二酸化炭素の影響を受けた領域は酸素によって酸化した領域よりも狭く、その上部に位置していた。このため、酸素によって酸化された領域を酸化帯、その上部の二酸化炭素の影響を受けた領域をそれと分けて表層酸化帯と呼んだ。

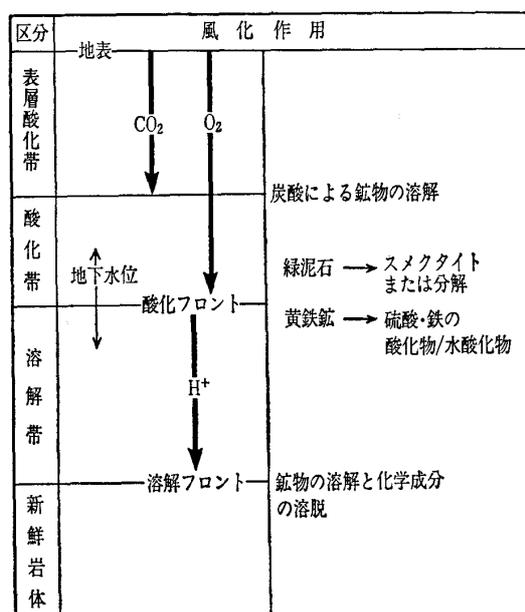


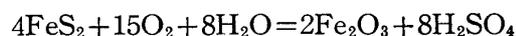
図-4.1 堆積性軟岩の風化メカニズム

酸素は酸化帯を通過する際にはあまり消費されずに、酸化帯の下底まで達して、そこで岩石を最も著しく酸化する。このため、酸化帯の下底を酸化フロントと呼んだ。肉眼的にはここで岩石の色は深部の暗灰色ないし青灰色から、浅部の黄褐色ないし黄灰色に変化する。

酸化フロントの位置は多くの場合ほぼ地下水面にある。これは、前述したように、酸化帯で含水率経時変化が著しいことから示されるように、地下水面付近までは大気が侵入するためであろう。酸化フロントは割れ目沿いの地中水流れが卓越する場合には、割れ目に沿って深部に突出した形態をとるが、筆者らの調査した地点ではいずれも滑らかな面であった。二酸化炭素の影響を受けた領域には明りょうなフロントが存在するか否かは不明確である。

酸化フロントでは、黄鉄鉱が酸化して消失し、その結果、硫酸が生成される。また、緑泥石はおそらくスメクタイトに変化する。細粒分の緑泥石は消失し、粗粒分の緑泥石はスメクタイトに変化するようである。酸化フロントでは二価の鉄は激減し、三価の鉄が増加する。三価の鉄のかなりの量は粘土鉱物が多い場合にはそれらの中に入り、少ない場合には遊離した酸化物あるいは水酸化物として粒子を膠結する。

黄鉄鉱の酸化反応は、簡単には次式のように表せるが、実際にはバクテリア (*Thiobacillus ferrooxidans*) も関与する複雑な反応で<sup>52)</sup>、現在のところ岩石中の黄鉄鉱の酸化がどの程度の速さで進むのかは明らかでない。



## (2) 溶解帯と溶解フロント

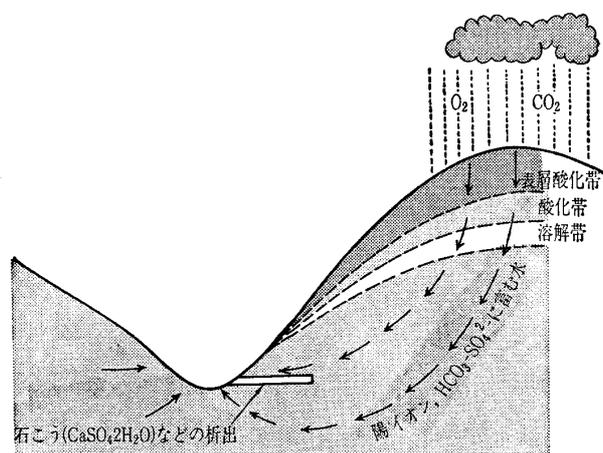
地中水の流れが下向きで比較的速い山地では、酸化フロントで生成された硫酸は下方に移動し、岩石を溶解する。そして、硫酸が解離して生ずる水素イオンは岩石との反応で消費され、硫酸イオンは地下水とともに移動すると考えられる<sup>53)~56)</sup>。筆者と共同研究者の研究では、酸化フロント下方に岩石の溶解と化学成分の溶脱作用の著しい部分があり、これを溶解フロント、溶解フロントと酸化フロントの間を溶解帯と呼んだ<sup>42)~47)</sup>。米国や英国の平坦地で今まで研究された泥岩の風化帯ではこのような溶解帯は認められていない<sup>29), 57)</sup>。実際に平坦地の風化帯

には溶解帯がないのかどうかについては疑問も残るが、もしそうであるならばこの違いは後に述べるように、地中水の移動の違いを反映しているものと考えられる。

溶解帯は酸化フロントで生成された硫酸によって鉱物が溶解されたゾーンであるが、その間隙水の pH は岩石中に含まれる緩衝剤 (例えば方解石や沸石) の量に依存する。つまり、緩衝剤が十分多ければ、硫酸が生成されても、水素イオンは緩衝剤との反応に消費されるので pH はあまり低くならない。実際、硫酸酸性土壌の地帯では石灰による土壌改良が行われて来ている。一方、これらの緩衝剤に乏しい岩石の場合、溶解帯の pH は下がる。溶解帯の岩石の懸濁水の pH は 3 から 4 程度のこともある。例として、密度  $1.4\text{g/cm}^3$ 、間隙率 51%、硫黄含有率 0.3% (黄鉄鉱の形) の岩石を想定し、黄鉄鉱がすべて酸化した場合の水の pH を計算すると、0.5 と著しく低い値になる。また、酸化帯には酸化フロントで形成したジャロサイトが残存することもあり<sup>43)</sup>、ジャロサイトは pH 4 以下で生成することがわかっている<sup>59)</sup>。

方解石が硫酸に溶解されると、 $\text{Ca}^{2+}$  が水中に放出され、石膏ができやすくなるが、実際にこれが析出するためには、水分が蒸発する必要があると思われる。志田原ほか<sup>58)</sup> は切土法面近くの泥岩の溶解帯に石膏を検出したが、これは切土後溶解帯が水に不飽和になってから生じた可能性もある。米国等の平坦地で酸化帯から見出された石膏も<sup>57)</sup>、水分の上方移動と蒸発によって形成された可能性がある。

溶解フロントを通過した地中水は、そこまで移動



図—4.2 山地における水の移動と風化

講 座

する過程で、炭酸イオン、硫酸イオン、溶脱した陽イオンに富むようになっており、岩石とは反応しにくくなっている(図-4.2)。このため、溶解フロントよりも深部での化学的風化作用は著しく遅いことは間違いない。

(3) 地中水の移動と化学的風化

上述したように、少なくとも地中水の涵養域である山地では、堆積性軟岩の重要な化学的風化作用は酸化フロントと溶解フロントとで起こっており、これらは風化の進行とともに深部に移行すると考えられる。つまり、ある位置の化学的風化作用は単に時間に従って進行するのではなく、時間とともにその環境を変えて進行する。ただし、そのほかに気候変化や地殻変動、浸食などは別途考慮する必要がある。そして、このような化学的風化作用は、基本的には化学成分の移流(流れによる運搬)・拡散と反応速度とによって決定されているため、今後その観点からの研究が必要であろう。このような研究を通じて、酸化フロントや溶解フロントの深部への移行速度も明らかとなって来るし、また、地質学的時間をかけて形成された風化帯だけでなく、人工的に作った切取り斜面などの長期的風化挙動についても理解が進むものと考えられる。

(4) 堆積性軟岩の化学的風化に伴う物性変化

堆積性軟岩の化学的風化に伴う物性変化としては、黄鉄鉱の酸化によって生じた硫酸が岩石中の炭酸塩を溶解して岩石が劣化することが、Russel & Parker(ラッセルとパーカー)<sup>29)</sup>やHawkins et al.(ホーキンスほか)ら<sup>31)</sup>によって指摘されている。しかしながら、かれらの研究の対象とした岩石は炭酸塩鉱物を数%以上含むような石灰質のものであり、日本に一般的に見られる岩石とはやや異なる。

図-4.3に千木良らによる風化帯構造と岩盤物性との関係の一例を泥岩<sup>42)</sup>、砂質泥岩<sup>58)</sup>、砂岩・礫岩<sup>44)</sup>について示す。残念ながら、各地点において調査された物性の項目が異なり、相互のデータをそのままの形で比較はできないが、 $N$ 値、変形係数(孔内載荷試験による)、および弾性波速度( $V_s$ )がお互いに正の相関関係にあると考えることができよう(図-4.3)。また、定

性的にはこれらの値が岩石の強度・剛性の大小を示していると考えられる。図-4.3に示されている一つの大きな特徴は、泥岩では深部から浅部に向けて溶解帯、酸化帯の順に一方向的に岩石が劣化しているのに対して、砂岩・礫岩では酸化帯で一時的に強度・剛性が向上していると見られることである。溶解帯ではこれらの岩石いずれでも新鮮岩石に比べて、岩石の強度・剛性が低下していると見ることができる。この原因は、先に述べたように溶解帯では岩石の構成鉱物が溶解され、化学成分が溶脱されていることに求められる。一方、酸化帯ではその下の溶解帯に比べて、泥岩ではこれらが低下しているのに、砂岩・礫岩では強度・剛性が増加している。この違いの原因は、次のように酸化フロントでの鉄の挙動の差にある。すなわち、細粒の粘土分が多い場合には、三価の鉄は遊離した形で析出しにくく、また析出したとしても膠結すべき粒子の表面積が大きいため岩石の強度・剛性を増加させることができない。それに対して、砂岩・礫岩などの粗粒岩石では三価の鉄が遊離した酸化物、あるいは水酸化物として析出して粒子相互を膠結するために、岩石の強度・剛性が増加する。

岩石の強度・剛性と直接結びつかないが、泥岩の酸化帯で緑泥石が消失し、スメクタイトが増加することは地すべりを考えた場合重要であるように思われる。堆積性軟岩に発生する地すべりには酸化フロント近傍にすべり面を持つものが多く<sup>60)</sup>、スメクタ

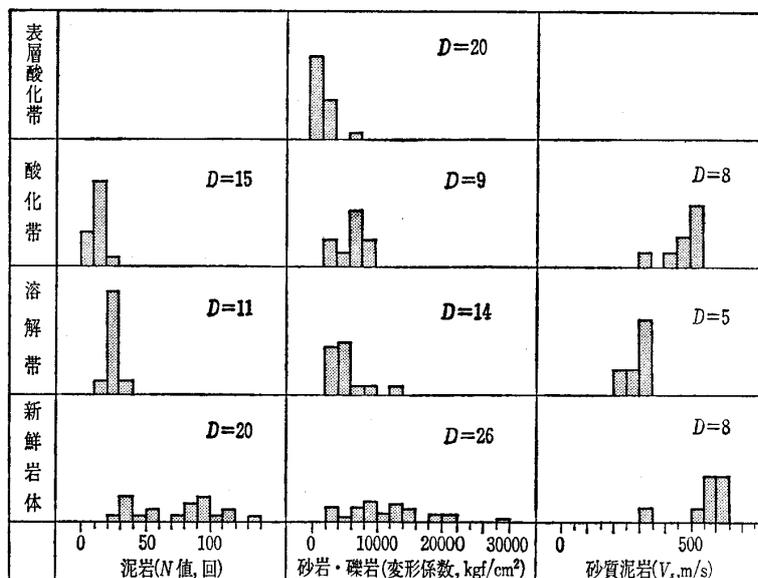


図-4.3 堆積性軟岩の風化帯と物性値の変化。Dはデータ数。縦軸は頻度(フルスケール100%)

イトは非常に小さな残留強度を有することが知られているからである<sup>61)</sup>。

#### 4.4 塩類の析出による風化

堆積性軟岩の露頭表面にはごく普通に白色や黄色の粉末状の析出物が見られる。また、堆積性軟岩のボーリングコアを放置しておくと、1か月もたたないうちに岩石表面に同様な析出物が生じることも良く見られる。これらの大部分は硫酸塩であり、白色の析出物の主体は石膏、黄色の析出物の主体はジャロサイトである。

硫酸塩の岩盤表面への析出は、岩盤の剝離や劣化を引き起こし、これは、特に文化財やトンネル等の長期的安定性維持を考える上で重要である。関ほか<sup>62), 63)</sup>は凝灰質砂岩などの岩石に彫刻された石仏表面に種々の硫酸塩が析出、剝離を繰り返すことによって石仏表面の岩石も次第に剝離して行くことを明らかにした。さらに、堆積性軟岩に掘削されたトンネルの壁には掘削後わずか数か月の内に硫酸塩の析出物が形成されることが普通であり、場合によっては1 cmにも達する厚みの層ができることもある(口絵写真-25)。このようなトンネル壁の析出物も析出、剝離を繰り返す。

これらの硫酸イオンは、主に黄鉄鉱の酸化によって供給されるものと考えられる。それが岩盤表面近傍に由来するのか、あるいは前節で述べた酸化フロントに由来するのかは明らかではないが、硫酸塩の析出様式や速度は、地中水の組成と岩盤表面での水の蒸発速度に依存している。

堆積性軟岩中に硫酸塩が析出して地盤を膨張させ、建築物に被害を与える場合があることは先に述べた。この硫酸塩の析出に起因する盤ぶくれは数10 cmに及ぶこともあり、またその際に発生する応力についてはいくつかの報告があり、Taylor (テイラー)<sup>33)</sup>によってまとめられている。例えば、実験的に求められた値として、14~500 kN/m<sup>2</sup>の応力が報告されているが、実験方法や試料によってかなり異なった値となっている。日本では建築物基礎の岩盤中に硫酸塩が析出して盤ぶくれが生じたという事例は報告されていないが、日本の堆積性軟岩の性質がこれらの発生したものとそれほど大きく異なるとも思えないので、こうした事例も皆無ではないものと思われる。

実際、日本の野外の切土露頭では、泥岩の割れ目間に石膏が析出している例を良く見かける。

このような盤ぶくれが生ずるためには間隙水が硫酸塩に過飽和になることが必要であり、これが容易に達成されるのは、地下水面よりも上で間隙水が蒸発しやすい箇所であろう。Quigley & Vogan (クィグリーとホーガン)<sup>25)</sup>は一つの建築物でも、盤ぶくれが生じたのは地下水面よりも上の岩盤に基礎を置いた箇所で、地下水面よりも下の岩盤に基礎を置いた箇所では盤ぶくれが生じなかったことを報告している。

硫酸イオンは岩盤表面に浸出して塩を析出させるだけでなく、コンクリートの成分と反応してエトリンガイトのように高い膨張圧を発生させるような鉱物を生成し、コンクリートを破損することがある。日本でも、宮崎層群分布地等で住宅基礎のコンクリートがこのようにして破損した事例が報告されている<sup>36)</sup>。これは、住宅基礎のコンクリートの下にビニールシートを敷き、コンクリートと岩盤とを遮断することによって防止されたと言う。

#### 4.5 おわりに

主に堆積性軟岩について、主として化学的風化のメカニズムとその工学的な重要性について述べてきた。最近の研究によって堆積性軟岩の化学的風化において占める黄鉄鉱の役割が大きくクローズアップされて来たが、それが過大に評価されている可能性もある。今後黄鉄鉱の含有率の少ない淡水成の堆積岩の風化についても研究を進め、ここに述べたような研究結果と比較する必要があるだろう。しかしながら、堆積性軟岩の中にわずか数%しか含まれない黄鉄鉱の役割には驚くべきものがあると言えよう。

#### 引用文献

- 1) Okamoto, R., Kojima, K. and Yoshinaka, R.: Distribution and engineering properties of weak rocks in Japan, Proceedings of International Symposium on Weak Rock, Tokyo, pp. 1269~1283, 1981.
- 2) Terzaghi, K. and Peck, R. B.: Soil mechanics in engineering practice, Second ed., John Wiley and Sons, New York, NY, 729p.
- 3) Nakano, R.: On weathering and change of properties of tertiary mudstone related to landslide, Soil and Foundation, Vol. 7, No. 1, pp. 1~14, 1967.

## 講座

- 4) 吉中龍之進・安発智在：泥岩の保水性と力学的性質の関連，第5回岩の力学国内シンポジウム講演集，pp. 19~39, 1977.
- 5) 田中芳則：水分ポテンシャルからみた泥岩の乾燥収縮と湿潤膨張，応用地質，Vol. 23, pp. 13~21, 1980.
- 6) 小島圭二・斉藤保祐：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, pp. 10~22, 1984.
- 7) 奥園誠之：切土ノリ面の崩壊とノリ面こう配，土と基礎，Vol. 20, No. 2, pp. 33~39, 1972.
- 8) Franklin, J. A. and Chandra, R.: The slake-durability test, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, Vol. 9, pp. 325~341, 1972.
- 9) Morgenstern, N. R. and Eigenbrod, K. D.: Classification of argillaceous soils and rocks, *ASCE, GT*, Vol. 10, pp. 1137~1156, 1974.
- 10) 大住明夫・今川史郎：スレーキング試験の一提案，第13回土質工学研究発表会講演集，pp. 1121~1124, 1978.
- 11) 日本国有鉄道：地質調査標準示方書（施管第166号），1969.
- 12) 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，1980.
- 13) 吉中龍之進・小島圭二・田中荘一：簡易スレーキング試験方法の提案，第12回岩盤力学に関するシンポジウム講演概要，pp. 36~40, 1979.
- 14) 鈴木隆介・高橋健一・砂村継夫・寺田 稔：三浦半島荒崎海岸の波蝕棚にみられる洗濯板状起伏の形成について，*地理学評論*，Vol. 43, pp. 211~222, 1970.
- 15) 高橋健一：日南海岸青島の「波状岩」の形成機構，*地理学評論*，Vol. 48, pp. 43~62, 1975.
- 16) Maekado, A.: Field measurement on slaking in Shimajiri mudstone in Okinawa, southwestern Japan. *Annual Report, Institute of Geoscience, University of Tsukuba*, Vol. 8, pp. 48~50, 1982.
- 17) 藁谷哲也：上総丘陵を開析する谷でみられる谷壁の剝離と乾湿風化，*地理学評論*，Vol. 59, pp. 505~522, 1986.
- 18) 藁谷哲也・松倉公憲：上総丘陵の谷壁斜面表面における含水比変化に伴うスレーキング剝離，*地形*，Vol. 9, pp. 135~144, 1988.
- 19) 小宮康明・新城俊也：島尻層泥岩における風化の進行とその工学的性質に及ぼす影響，*土と基礎*，Vol. 39, No. 6, pp. 21~27, 1991.
- 20) 小宮康明・新城俊也：乾湿風化に伴う泥岩の力学特性の変化，切土のり面および斜面の風化と安定に関するシンポジウム発表論文集，*土質工学会*，pp. 31~36, 1985.
- 21) Ollier, C.: *Weathering*, Second edition, Longman, London and New York, 270 p. 1984.
- 22) 山下 透・岩野英樹・壇原 徹：火山ガラスのHydrationとSuper-hydrationについて，*日本地質学会第98年学術大会*，松山，p. 214, 1991.
- 23) Dost, H. (Editor): *Acid sulfate soils*, ILRI Publ. 18, Vols. I and II, International Institute for Land Reclamation and Improvement, The Netherlands, 1973.
- 24) Kittrick, J. A., Fanning, D. S. and Hossner, L. R. (Editors): *Acid sulfate weathering*, Soil Science Society of America, Special Publication, Vol. 10, 234p., 1982.
- 25) Quigley, R. M. and Vogan, R. W.: Black shale heaving at Ottawa, Canada, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 7, pp. 106~115, 1970.
- 26) Dougherty, M. T. and Barsotti, N. J.: Structural damage and potentially expansive sulfide minerals, *Bulletin of Association of Engineering Geologists*, Vol. 9, pp. 105~125, 1972.
- 27) Bérubé, M.-A., L., Jacques, P., Gelinat, J.-Y., Chagnon and Lefrançois, P.: Black shale heaving at Saint-foy, Quebec, Canada, *Canadian Journal of Earth Science*, Vol. 23, pp. 1774~1781, 1986.
- 28) Spears, D. A. and Taylor, R. K.: The influence of weathering on the composition and engineering properties of in situ coal measures rocks, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, Vol. 9, pp. 729~756, 1972.
- 29) Russel, D. J. and Parker, A.: Geotechnical, mineralogical and chemical interrelationships in weathering profiles of an overconsolidated clay, *Quarterly Journal of Engineering Geology, London*, Vol. 12, pp. 107~116, 1979.
- 30) Hawkins, A. B. and Pinches, G. M.: Sulphate analysis on black mudstones, *Geotechnique*, Vol. 37, pp. 191~196, 1987.
- 31) Hawkins, A. B., Lawrence, M. S. and Privett, K. D.: Implications of weathering on the engineering properties of the Fuller's formation, *Geotechnique*, Vol. 38, pp. 517~532, 1988.
- 32) Pye, K. and Miller, J. A.: Chemical and biochemical weathering of pyritic mudrocks in a shale embankment, *Quarterly Journal of Engineering Geology, London*, Vol. 23, pp. 365~381, 1990.
- 33) Taylor, R. K.: Coal measures mudrocks: composition, classification and weathering processes, *Quarterly Journal of Engineering Geology, London*, Vol. 21, pp. 85~99, 1988.
- 34) 田中芳則：方解石の溶出に伴う泥岩の組織と物性の変化，*応用地質*，Vol. 26, pp. 129~135, 1985.
- 35) 本田朔郎：鉄パイプの腐食の原因と黒色泥岩中のフランボイダル黄鉄鉱，*秋田大学鉱山学部地下資源研究施設報告*，Vol. 46, pp. 1~5, 1981.
- 36) 小林 嵩：日向平野に分布する新第三紀地層（宮崎層群）の土壌の特性と東石の崩壊について，*南九州大学園芸学部研究報告*，Vol. 12, pp. 41~50, 1982.
- 37) 高谷精二：東石崩壊の発生した地域にみられる塩類集積現象について，*土と基礎*，Vol. 31, No. 1, pp. 101~104, 1983.
- 38) 落合英俊・松下博通・林 重徳：硫酸イオンを含む地盤における住宅基礎，*土と基礎*，Vol. 34, No. 6, pp. 45~50, 1986.
- 39) 荒井康夫：セメントの材料科学，*大日本図書*，258 p., 1984.

- 40) Gutt, W. H. and Harrison, W. H.: Chemical resistance of concrete, *Concrete*, Vol. 11, pp. 35~37, 1977.
- 41) Plum, D. R. and Hammersley, G. P.: Concrete attack in an industrial environment, *Concrete*, Vol. 18, pp. 8~11, 1984.
- 42) 千木良雅弘：泥岩の化学的風化のメカニズム—自然環境下での風化と斜面安定, 電中研報告, U87041, 1987.
- 43) 千木良雅弘：砂岩の風化のメカニズム (その2) 細粒砂岩の風化, 電中研報告, U88040, 1988.
- 44) 千木良雅弘・曾根賢治：砂岩の風化のメカニズム (その1) ゼオライトにより膠結された粗粒砂岩の風化, 電中研報告, U88039, 1988.
- 45) 千木良雅弘：泥岩の化学的風化—新潟県更新統灰爪層の例一, 地質学雑誌, Vol. 94, pp. 419~431, 1988.
- 46) Chigira, M.: A mechanism of chemical weathering of mudstone in a mountainous area, *Engineering Geology*, Vol. 29, pp. 119~138, 1990.
- 47) Chigira, M. and Sone, K.: Chemical weathering mechanisms and their effects on engineering properties in soft sandstone and conglomerate cemented by zeolite in a mountainous area, *Engineering Geology*, Vol. 30, pp. 195~219, 1991.
- 48) 千木良雅弘：泥岩の化学的風化のメカニズム—溶解および酸化実験—電中研報告, U88041, 1988.
- 49) 千木良雅弘・曾根賢治：泥岩の化学的風化のメカニズム—岩石劣化試験装置を用いた酸化実験—, 電中研報告, U87040, 1987.
- 50) Lynn, W. C. and Whittig, L. D.: Alteration and formation of clay minerals during cat clay development, *Clays and Clay Minerals*, Vol. 14, pp. 241~248, 1966.
- 51) Senkayi, A. L., Dixon, J. B. and Hossner, L. R.: Transformation of chlorite to smectite through regularly interstratified intermediates, *Journal of Soil Science Society of America*, Vol. 45, pp. 650~656, 1981.
- 52) Silverman, M. P.: Mechanism of bacterial pyrite oxidation, *Journal of Bacteriology*, Vol. 94, pp. 1046~1051, 1967.
- 53) 有泉 晶：地すべり地帯陸水の水質について, 土木研究所報告, No. 123, pp. 117~130, 1964.
- 54) 狛 武・横田節哉：第三系地すべり地帯における水質の特徴—北海道常磐大地区の例一, 地質調査所月報, Vol. 22, pp. 305~317, 1971.
- 55) 新藤静夫・田中芳則：地すべり土層の水文地質学的検討と融雪水の動態 (II)—新潟県北魚沼郡入広瀬村横根地すべりを例として—, 地すべり, Vol. 18, pp. 12~16, 1982.
- 56) Vear, A. and Curtis, C.: A quantitative evaluation of pyrite weathering. *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 6, pp. 191~198, 1981.
- 57) Dixon, J. B., Hossner, L. R., Senkayi, A. L. and Egashira, K.: Mineralogical properties of lignite overburden as they relate to mine spoil reclamation. In: Kittrick, J. A., Fanning, D. S. and Hossner, I. R. (Editors), *Acid Sulfate Weathering*, Soil Science Society of America, Special Publication, Vol. 10, pp. 169~191, 1982.
- 58) 志田原巧・大山隆弘・千木良雅弘：泥岩の風化のメカニズム—砂質泥岩の法面での風化—, 電力中央研究所報告, 準備中.
- 59) Breeman, N. van: Redox processes of iron and sulfur involved in the formation of acid sulfate soils. In J. W. Stucki et al. eds. *Iron in Soils and Clay Minerals*, Reidel Publishing Company, pp. 825~841, 1988.
- 60) Veder, C.: *Landslides and their stabilization* (with contribution by Fritz Hilbert and translated by Erika Jahn). Springer-Verlag, New York, 247p. 1981.
- 61) Skempton, A. W.: Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory, *Geotechnique*, Vol. 35, pp. 1~18, 1985.
- 62) 関陽太郎・酒井 均：千葉県館山市船形磨崖仏十一面観音像の劣化と水・岩石相互作用, 岩鉱, Vol. 82, pp. 230~238, 1987.
- 63) 関陽太郎・平野富雄・渡辺邦夫：福島県小高町薬師堂石仏群の劣化と水・岩石相互作用, 岩鉱, Vol. 82, pp. 269~279, 1987.
- 64) Wagner, D. P., Fanning, D. S., Foss, J. E., Patterson, M. S. and Snow, P. A.: Morphological and mineralogical features related to sulfide oxidation under natural and disturbed land surfaces in Maryland, *Soil Science Society of America, Special publication, No. 10, Acid Sulfate Weathering*, pp. 109~125, 1982.
- 65) Chandler, R. J.: Lias clay: weathering processes and their effect on shear strength, *Geotechnique*, Vol. 22, pp. 403~431, 1972.
- 66) 狛 武：油田第三系における泥質岩の化学組成, 地質調査所報告, Vol. 250-2, pp. 211~227, 1972.
- 67) 狛 武・鈴木尉元・小玉喜三郎：房総半島における上総層群泥質岩中の硫黄, 炭素, 塩素, 鉄の形態・組成と堆積環境, 地質調査所月報, Vol. 34, pp. 191~206, 1983.