岩石材料の風化指標

中村 康夫*

1. 風化作用の種類と風化指標

風化作用は、一般に化学的風化作用、物理的風化作用、生物的風化作用の3つに分類されるが、生物的風化作用の個々の作用は、植物の根による圧力のような物理的作用や、バクテリアによる鉄の酸化のような化学的作用であるので、前二者のいずれかに分類できる。また前二者も、便宜的な分類であり、相乗作用によって効果が倍加すると考えられる。例えば、化学的風化作用に分類される水和作用は、鉱物による水の吸着という化学的過程と、それに続く膨張による圧力の発生という物理的過程から成り立っている。同様に、物理的風化作用に分類される塩類風化は、蒸発という化学的過程とそれに続く結晶作用による圧力の発生という物理的過程から成り立っている。さらに、代表的な物理的風化作用である熱風化は、高温と低温の繰り返しによる疲労破壊と定義されているが、水の存在なしにこの作用が単独で岩石を風化させることは確認されていない。例えば、GRIGGS¹⁾は花崗岩供試体を乾燥空気中において、温度差110℃で急熱急冷を89,400回繰り返したが表面に全く変化が認められなかったのに対し、水道水で冷却した場合は960回で表面に変化を生じたことを報告している。またAIRES-BARROS *et al.*²⁾の耐久性試験でも、水分の存在が岩石の風化過程に重要な影響を及ぼすことが報告されている。このように、熱風化は、熱疲労のみでは生じず、水分による化学的作用があって初めて進行する。したがってこれらの作用において、化学的風化作用と物理的風化作用のいずれが主要な過程であるかを定めることは困難である。

以上のような風化作用分類上の問題はあがあるが、本文では風化の程度を定量的に表現するための風化指標について生物的風化作用を除き、化学的観点からなされた研究と、物理的観点からなされた研究に分けてレビューした。なお、化学的観点からなされた研究は、主に化学分析によって元素の移動について検討したものと、偏光顕微鏡によって鉱

物や組織の変化について検討したものに分けられる。ここでは前者によって求められた指標を化学的風化指標、後者によって求められた指標を鉱物学的風化指標として分類した。同様に、物理的観点からなされた研究は、純粋に物理量の変化を追求したものと、応用的に力学量の低下を追求したものに分けられるが、前者による指標を物理的風化指標、後者による指標を力学的風化指標として整理した。さらに、特別の目的のためこれらの指標を組合わせたものを複合指標とした³⁾。

風化指標は理学的な立場から風化のプロセスを解明するため、あるいは土木地質の立場から岩盤や材料を評価するために求められることが多い。前者には主に化学・鉱物学的手法が、後者には物理・力学的手法が用いられてきたが、最近はこちらを総合した研究が進められている。それぞれの指標の適用範囲は、研究目的によって新鮮岩から風化残積土まで様々であるが、ここでは、フィルダム用岩石材料として用いられるような新鮮な硬岩に対して適用可能な指標について検討し、風化残積土を対象とした指標は除外した。最後に、岩石材料の耐久性評価手法との関連から各種指標の適用性についてコメントした。

2. 化学的風化指標

さまざまな風化段階にある各種岩石の分析によって、化学的風化作用を受ける際、母岩より溶脱される元素としてNa, Ca, 増加する元素としてFe, Al, Ni, Ca, 中間的性質を示す元素としてMn, Mg, K, Zn等があることが明らかにされている。化学的風化指標は、風化過程における元素のこのような移動特性を考慮し、溶脱されやすい成分とその他の成分の比較で風化の程度を示すものが多い。表-1に、主な化学的風化指標を示す。これらの指標を成分に着目して分類すると以下ようになる。

2.1 溶脱されやすい成分

PARKER⁴⁾は加水分解によって溶脱されやすいNa, K, Ca, Mgの4つの元素と酸素イオンとの相対的結合力を考慮して、Weathering Indexを提案した。本指標は、珪酸

* 日本道路公団静岡建設局 Japan Highway Public Corporation, Shizuoka Construction Bureau

表-1 主な化学的風化指標

名 称	定 義	引用文献
1. 溶脱されやすい成分 Weathering Index	$\left(\frac{2\text{Na}_2\text{O}}{0.35} + \frac{\text{MgO}}{0.9} + \frac{2\text{K}_2\text{O}}{0.25} + \frac{\text{CaO}}{0.7} \right) \times 100$	4
2. 溶脱されやすい成分と主要成分の比 WPI(Weathering Potential Index)	$\frac{\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O} - \text{H}_2\text{O}^+}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O}} \times 100$	5
MWPI(Modified Weathering Potential Index)	$\frac{\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O}} \times 100$	6
3. 溶脱されやすい成分と Al_2O_3 等の比 DF(化学的新鮮度)	$\frac{\text{FeO} + \text{MnO} + \text{MgO} + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}^+}$	7
CIA(Chemical Index of Alteration)	$\frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}} \times 100$	8
CIW(Chemical Index of Weathering)	$\frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O}} \times 100$	9
SIW(Simple Index of Weathering)	$\frac{\text{Na}_2\text{O}}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}^+} \times 100$	10
4. 三산화物等に対する SiO_2 の比 PI(Product Index または Weathering Direction)	$\frac{\text{SiO}_2}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3} \times 100$	5
Silica-to-Almina Ratio	$\frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3}$	11
SAIR	$\frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}^+}$	12
Silica-Titania Index	$\frac{\text{SiO}_2/\text{TiO}_2}{(\text{SiO}_2/\text{TiO}_2) + (\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3) + (\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2)} \times 100$	13
5. 新鮮岩と風化岩の風化指標の比 WI(Weathering Index)	$\frac{\text{風化岩の WPI}}{\text{新鮮岩の WPI}}$	14
ADF(絶対的化学的新鮮度)	$\frac{\text{風化岩の DF}}{\text{新鮮岩の DF}} \times 100$	7
Imob(Mobiles Index)	$\frac{\text{Mob}_f - \text{Mob}_w}{\text{Mob}_f}$ Mob _f : 新鮮岩の($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{CaO}$)含有量 Mob _w : 風化岩の($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{CaO}$)含有量	15

塩岩の理論的な風化ポテンシャルを正確に評価でき、加水分解が主因であるような風化環境下における酸性～塩基性の岩石に適用できるとしている。

2.2 溶脱されやすい成分と主要成分の比

REICHE⁵⁾ が提唱した WPI(Weathering Potential Index)は、分子が風化によって溶脱されやすい元素と著しい増加を示す H_2O を、分母がほぼ全岩の組成を表している。風化が進行するに従って分子成分が溶脱し、 H_2O が増大するため WPI は減少し、負の値を示すこともある。なお、VOGEL⁶⁾ は WPI から H_2O 除き MWPI(Modified Weathering Potential Index)とした。

2.3 溶脱されやすい成分と Al_2O_3 等との比

三浦⁷⁾ は、風化によって減少する成分を分子に、増加する成分を分母にとって化学的新鮮度 DF(Degree of the

Chemical Freshness)を提案した。この値は岩石の種類によって異なり、一般に新鮮な岩石は塩基性である程大きな値を示す。したがって、特定の岩石に対しては、風化作用を受けているほど化学的新鮮度は小さいが、異種岩石との比較はできない。そこで異種岩石間の風化度の比較を可能とするために、新鮮岩の化学的新鮮度に対する風化岩の化学的新鮮度の比を絶対的化学的新鮮度 ADF(Degree of the Absolute Chemical Freshness)と定義した。

NESBITT and YOUNG⁸⁾ は風化過程で最も安定な Al_2O_3 を分子に置き、三種の可動陽イオン Ca, Na, K の減少で風化度を表す CIA(Chemical Index of Alteration)を提唱した。本指標は、長石類と各種粘土鉱物の割合の変化を反映しており、酸性～塩基性の珪酸塩岩石、堆積岩、変成岩に適用可能であるが、CaO は炭酸塩やリン酸塩の場

合は補正が必要である。これに対し、HARNOIS⁹⁾は、Kは風化過程において溶脱される場合と残留する場合の両様の挙動を示すことから、CIAからK₂Oを除いたCIW (Chemical Index of Weathering)を提唱した。本指標は、風化過程において挙動の明らかな元素のみに基づいた単純な指標で、酸性～塩基性の岩石に適用できるとしている。

天田・岡谷¹⁰⁾は、指標の単純化のため、風化過程において最も溶脱されやすいNa₂Oと、最も安定なAl₂O₃と変化量の大きいH₂O(強熱減量)の比で風化度を表すことを提案し、SIW (Simple Index of Weathering)と命名した。SIWは次項に述べるSAIRに類似しているが、一般に風化過程におけるNaの溶脱の程度がSiに勝るため、SAIRと比較して風化の程度をより明瞭に示すことができるとしている。各種化学的風化指標の比較試験から、いずれも火成岩や堆積岩に適用可能であり、脱塩基あるいは鉄の酸化に着目したSIWやADF等が最も風化の程度を明確に示すが、次項に述べる脱珪酸に着目したPIやSilica-to-Alumina Ratio(以下シリカ-アルミナ比と呼ぶ)等で風化度を表しても、安山岩の例を除けば非常にわずかな差しかみられないことを報告している。

2.4 三二酸化物等に対するSiO₂の比

PI(Product Index)は、SiO₂と三二酸化物の和に対するSiO₂の比でSiの減少を表すもので、風化が進行するに従って値は減少する。REICHE⁵⁾は、WPIを縦軸にPIを横軸にとった図に値をプロットし、風化の進行状況を示した。

RUXTON¹¹⁾は、風化過程においてシリカ分が失われ、アルミナ分が残留することに着目してSiO₂とAl₂O₃の比で風化度を表すことを提案し、シリカ-アルミナ比と命名した。各種岩石の化学分析結果から、シリカ-アルミナ比が次項に述べるWI¹⁴⁾および全溶出元素量と極めて密接な関係を有し、風化度をよく表す最も簡便な指標であるとした。しかしながら、同指標は、酸性～中性岩に対しては有効であるが、塩基性岩にはあまり有効でない等、適用にあたっては慎重な検討が必要である。

大見・ほか¹²⁾は、シリカ-アルミナ比に風化過程で変化量の大きいH₂Oを考慮に入れたSAIRを考案し、一軸圧縮強度、弾性波伝播速度、単位体積質量等の物理・力学的風化指標との比較を行った結果、これらと最も関連が高いのはSAIRで、次いで強熱減量、シリカ-アルミナ比の順であることを報告している。また、化学的風化指標を求めるには化学分析を行う必要があるが、化学分析は物理・力学試験に比較して微妙で、熟練が必要であるにもかかわらず、得られる結果は、物理・力学的風化指標ほどの精度が期待できないことを指摘している。

JAYAWARDENA and IZAWA¹³⁾は、スリランカの結晶片岩類の化学分析結果から、SiO₂/TiO₂、Al₂O₃/TiO₂が強熱減量(風化度)と密接な関連をもつことを見出し、熱帯

地域における珪酸塩岩に広く適用できる化学的風化指標として、Silica-Titania Indexを提唱した。本指標はWPI、シリカ-アルミナ比、強熱減量、点载荷試験値と密接な関連を有することを報告している。

2.5 新鮮岩と風化岩の指標の比

新鮮岩と風化岩でそれぞれ風化指標を求め、その比で風化度を表すものでADFの他、SHORTのWI¹⁴⁾(Weathering Index)やIRFANのMobiles Index¹⁵⁾がある。WIは新鮮岩と風化岩のWPIの比で、1～0の値をとり、0に近づくほど風化が進行していることを示す。

IRFAN¹⁵⁾は長石を含む火成岩に対して、風化過程で失われやすいK₂O、Na₂O、CaOを風化岩と新鮮岩で比較することにより風化度を表し、Mobiles Indexと命名した。本指標は風化過程で溶脱される可動陽イオンの相対量を与えるもので、とくに良好な排水条件下にある長石の風化度を定量化でき、未風化長石含有量、シリカ-アルミナ比、乾燥密度等と密接な関連を有することが報告されている。

2.6 その他

化学的風化指標と、鉱物学的風化指標との中間的な指標として、磨耗pH(Abrasion pH)がある。GRANT¹⁶⁾は、めのう乳鉢に供試体と蒸留水を入れて磨砕し、上ずみ液のpH(Abrasion pH)を測定したところ、その値が岩石の風化度と密接な関連を有することを見出した。また、MALOMO¹⁷⁾は風化花崗岩中の長石粒子のみの磨耗pHを求め、風化が進行するほどその値は低下し、間隙率、吸水率、比重等の物理的風化指標と密接な関連があることを報告している。

3. 鉱物学的風化指標

表-2に主な鉱物学的風化指標を示す。鉱物学的風化指標は、風化によって生じた二次鉱物や、亀裂、間隙等耐久性に悪影響を与える組織上の欠陥と健全部を対比することにより、風化の程度を示すものが多い。例えばSCOTT¹⁸⁾やWEINERT¹⁹⁾は、二次鉱物含有量によって道路路盤材としての適否を検討しているが、前者がアメリカオレゴン州、後者が南アフリカを対象としていることもあって、判定の基準値は異なる。また、MENDES *et al.*²⁰⁾は花崗岩および片麻岩質花崗岩の偏光顕微鏡観察から、分子に新鮮な鉱物の割合、分母に二次鉱物や亀裂等の割合を置き、K(Quality Index)と命名し、弾性係数と密接な関連を持つことを報告している。

九里・ほか²¹⁾、斎藤・ほか²²⁾は石英閃緑岩の偏光顕微鏡観察から、長石、黒雲母、石英等の変質段階を数値化して、その和を岩石全体の変質度と定義した。また、長石の変質部と未変質部を比較することで変質部量を定義し、変質度あるいは変質部量は、弾性波伝播速度、有効間隙率、一軸圧縮強度等の物理・力学量と密接な関連があることを明ら

表-2 主な鉱物学的風化指標

名 称	定 義	引用文献
K (Quality Index)	$\frac{\sum_{i=1}^n P_i X_i}{\sum_{j=1}^m P_j Y_j}$ P_i : 新鮮な鉱物 X_i の割合 (%) P_j : 風化鉱物・亀裂等 Y_j の割合 (%)	20
Percentage of Secondary Minerals	(1) $\frac{\text{二次鉱物の個数}}{\text{石英以外の初生鉱物の個数} + \text{石英の個数}} \times 100$ (2) $\frac{\text{二次鉱物の個数}}{\text{石英以外の初生鉱物の個数}} \times 100$	19
変質部量	$\frac{\text{長石の変質部}}{\text{長石の変質部} + \text{未変質の長石}} \times 100$	21
R_{SM} (Secondary Mineral Rating)	$\Sigma (P, M) T_R$ P : 二次鉱物含有率 (%) M : 鉱物の安定性に関する評価点 (2.0~10.0) T_R : 岩石の組織に関する評価点 (0.3~2.0)	23

かにした。しかしながらこの方法は、鉱物の変質度を定量する際に主観が入り、かつ熟練を要し、時間もかかるうえ、大きな結晶を含む岩石に適用が限定される等一般的な方法ではない。

COLE and SANDY²³⁾ は、オーストラリアの道路路盤材に用いる玄武岩の耐久性を評価するため、評価点方式によるRSM(Secondary Mineral Rating)を提案し、これが比表面積やメチレンブルー吸着量等、ほかの風化指標と密接な関連をもつことを示した。RSMを求めるには熟練を要し、時間もかかるので、RSMと比表面積やメチレンブルー吸着量との相関を求めておき、採石場選定時等厳密な耐久性評価が必要な場合にはRSMを、操業中の採石場における日常の品質管理にはメチレンブルー吸着量や比表面積を用いることを提案している。同様な研究はドイツの玄武岩質凝灰岩について実施され、耐久性の評価にはRSMとメチレンブルー吸着量が有効と報告されている²⁴⁾。しかしながら、南アフリカ産の玄武岩を対象とした研究では、RSMよりエチレングリコールによる浸潤試験の方がより適切に耐久性を把握できることが報告されている²⁵⁾。これは、耐久性がモンモリロナイト等膨潤性粘土鉱物に支配されており、その把握はエチレングリコールによる浸潤試験で直接できるためと考えられる。

なお、鉱物学的指標としては偏光顕微鏡によるものの他に、X線回折強度によるものがある。例えば、西田・青山²⁶⁾ は花崗岩を対象として、斜長石の(040)面の回折強度を風化指標とした。斜長石の(040)面に着目したのは、未風化の試料から極端に風化した試料まで比較的シャープなピークとして検出でき、かつ風化に伴って連続的に変化

するためとしている。ボーリングコアのX線回折結果から、斜長石の(040)面の回折強度は風化が及んでいない地下深所では一定であるが、地表に近づくに従って小さくなることを報告している。

4. 物理的風化指標

表-3に主な物理的風化指標を示す。物理的風化指標は物理量そのものを指標とする場合と、新鮮岩と風化岩の比を用いる場合がある。

4.1 密度、有効間隙率、吸水率等

密度、有効間隙率、吸水率はいずれも簡単な機器と操作によって非破壊で測定でき、かつ個人差が入る余地が少ないので風化指標として優れている。とくに吸水率は、岩石の間隙内に浸透できる最大の水の量を示すもので、耐久性と密接な関連を持つ。

一般に密度、有効間隙率、吸水率を求めるには、105~110℃で24時間以上乾燥させ、水中に72時間以上放置して水浸させるので試験終了までに最低4日かかる。このため、HAMROL²⁷⁾ は試験の迅速化を目的として、乾燥時間および水浸時間をそれぞれ105±2℃で120分間、30~90分間に短縮し、吸水率(Quick Absorptionと命名)を求め、これがボーリング掘進速度、せん断強度、変形係数等と密接な関連を有することを報告している。この方法は、風化がまず供試体表面から起こることに注目し、風化によって影響を受ける部分のみの変化量を測定していると考えられ、迅速な測定法として注目される。しかしながら、乾燥時間、および水浸時間の差が吸水率に与える影響は、岩種と供試体の大きさによって左右されるため²⁸⁾、HAMROL²⁷⁾ の時

表-3 主な物理的風化指標

名 称	定 義	引用文献
密度・有効間隙率・吸水率 Quick Absorption	省略 吸水率を求めるための乾燥時間，吸水時間をそれぞれ120分，30～90分に短縮したもの	27
弾性波伝播速度 f (相対動弾性係数)	省略 $\frac{fn^2}{f_0^2} \times 100$ f_0 : 試験開始前の供試体の1次共鳴振動数 fn : n サイクル試験後の供試体の1次共鳴振動数	30
動弾性係数比	$\frac{E_{an}}{E_{a0}} \times 100$ E_{a0} : 試験開始前の動弾性係数 E_{an} : 各測定時における動弾性係数	31
K (Coefficient of Weathering)	$\frac{V_0 - V_w}{V_0}$ V_0 : 新鮮岩の弾性波伝播速度 V_w : 風化岩の弾性波伝播速度	34
硬度 ショア硬度 シュミットハンマー反発値 ビッカース硬度	反発硬度の一種 " 押し込み硬度の一種	35 36 37
m_r (質量減少率)	$\frac{m_0 - m_n}{m_0} \times 100$ m_0 : 試験開始前の供試体質量 m_n : サイクル試験後の供試体質量	30
風化度	それまでに剥離した細粒のうち4.76mm フルイを通過する部分の乾燥重量 初期の乾燥重量	42
剥離度	$\frac{\text{あるサイクル数の風化作用によって(b)フルイを通過する部分の表乾重量}}{\text{(a)フルイを通過し, (b)フルイに残留する初期表乾重量}}$	43

間設定がほかのケースに対して妥当であるか充分検討する必要がある。ただ，ロックフィルダムで使用される岩種は一種類のことが多いので，それぞれの施工現場における品質管理手法としては有効と考えられる。

間隙に関連した量で岩石の耐久性に影響を与えと考えられるものに，間隙の直径と比表面積がある。松岡²⁹⁾は，凍結融解試験を行い，比表面積が大きいほど破碎速度が大きく耐久性も劣るが，ばらつきも大きいこと，間隙の直径と耐久性の間にはほとんど関連がないことを報告している。

4.2 弾性波伝播速度，動弾性係数

弾性波伝播速度や動弾性係数は，非破壊で迅速に測定できるので風化指標として有効である。コンクリートの凍結融解試験では，必ず測定され，JISでは相対動弾性係数が60%に低下した時点で試験終了と規定している³⁰⁾。動弾性係数は岩石の耐久性試験においても風化指標として測定される例が多いが³¹⁾，岩石の場合，耐久性に優れる供試体でも

凍結融解の初期に急激な減少(60%以下)を示すものがあり，コンクリートと同様に扱うと耐久性を過少評価することになる³²⁾。弾性波伝播速度は，このような室内劣化促進試験のみならず，種々の風化段階にある花崗岩^{21), 22)}や火山岩³³⁾等についても測定され，風化度や有効間隙率，密度，軸圧縮強度等ほかの物理・力学量と密接な関連を有することが報告されている。さらに，ILIEV³⁴⁾は弾性波伝播速度が密度，有効間隙率，変形係数等と直線関係にあることを報告し，新鮮岩に対する新鮮岩と風化岩の弾性波伝播速度の差の比を風化係数 K と定義して，これによる風化区分を提唱した。

4.3 硬 度

岩石の硬度には，ひっかいて傷をつけて傷の大きさを比較するひっかき硬度，硬質の圧子を押つけてくぼみを作り，くぼみの大きさを比較する押し込み硬度，一定の力で押さえてすり減らし，すり減りの程度を比較する磨耗硬度，

一定の高さからハンマーを落として跳ね上がる高さを比較する反発硬度等がある。これらのうち、風化指標として使用されたことがあるのは、反発硬度の一種であるショア硬度、およびシュミットハンマー反発値、押し込み硬度の一種であるビッカース硬度等である。

岡本・ほか³⁵⁾は、流紋岩供試体の凍結融解試験を行い、ショア硬度が高い値から漸減する岩石の耐久性は高く、低い値に一定に保たれる岩石の耐久性は低いが、他の物理的風化指標に比較してばらつきが大きいことを報告している。斎藤・阿部³⁶⁾は石英閃緑岩、安山岩、石英安山岩、玄武岩のシュミットハンマー試験を行い、反発値は弾性波伝播速度、有効間隙率、密度、一軸圧縮強度等の物理・力学量と密接な関連をもち、とくに野外調査において岩石・岩盤の物理・力学量の推定や風化指標として有効であることを示している。AIRES-BARROS *et al.*³⁷⁾は、砂岩、頁岩、石灰岩の急熱急冷試験を行い、急熱急冷のサイクル数の増加とともにビッカース硬度が低下することを報告している。

4.4 質量減少率

質量減少率は、試験開始前の質量と試験によって失われた質量の比をパーセント表示したものであり、凍結融解試験、湿潤乾燥試験、薬液による安定性試験等の室内劣化促進試験や曝露試験において、岩石の劣化を直接的に示す指標として用いられている。中村は質量減少率の経時変化特性に基づいて岩石の劣化形式を分類し、耐久性の評価手法を提案した³²⁾。さらに凍結融解試験と曝露試験を比較し、両試験における質量減少率の経時変化が同様な傾向をもつことを報告している³⁸⁾。質量減少率は、重量減少率³¹⁾、重量変化率³⁹⁾、重量損失³²⁾、残存損失率⁴⁰⁾、残留重量率²⁹⁾、累積重量損失率⁴¹⁾等研究者によって種々の名称が与えられているが、ここではJIS A6204-1995³⁰⁾に従った。

山野⁴²⁾はフィルダムに用いる軟岩を対象として湿潤乾燥試験を実施し、表-3に示すように風化度を定義し、各サイクルにおける風化度を求める実験式を導いている。また、風呂内・安福⁴³⁾は、同表に示す剝離度で湿潤乾燥試験および凍結融解試験における頁岩の耐久性を検討し、フィルダムロック材としての適用性を判断している。しかしながら、これらの指標は、軟岩のように連続的に風化しやすい岩石についてはよい結果を与えるが、硬岩で風化しにく

い岩石に対しては適用困難と考えられる。

5. 力学的風化指標

表-4に主な力学的風化指標を示す。斉藤・ほか²²⁾は花崗岩の一軸圧縮強度と変質部量、有効間隙率、弾性波伝播速度が密接な関連を有することを報告している。さらに、一軸圧縮強度によって風化度を表現する試みは山口⁴⁴⁾によってなされ、風化岩と新鮮岩の一軸圧縮強度の比を風化度と定義している。しかしながら、風化岩と同一岩体で新鮮な岩石を採取することが困難であるうえ、供試体の作製に時間がかかるのが欠点である。松尾・澤⁴⁵⁾は花崗岩の整形供試体を用いた単純引張試験および圧裂試験を行い、引張強度が総合的な風化指標として有効であり、風化の進行に伴う引張強度の低下は、粒子境界部の破壊が増大することによって説明されるとしている。木宮⁴⁶⁾は花崗岩の非整形供試体による点荷試験から、風化の進行に伴って引張強度が等比級数的に低下することを見出し、常用対数で表した引張強度値を引張強度指数 τ と名付けて風化指標とした。 τ はすべての風化段階に適用できるのみならず、シリカ-アルミナ比、 $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、WPI等の化学的風化指標と極めて密接な関連があり、風化機構そのものに関係していることを報告している。本試験は非整形供試体を用いて迅速に実施でき、かつ一軸圧縮強度への換算も可能であるので、工学的試験法として優れている。

6. 複 合 指 標

岩石材料の耐久性は、厳密には岩石材料の性質、水分条件、気候、気象条件、地形、構造物の種類、構造物に作用する力(動的あるいは静的)等のすべての条件を考慮しなければ評価できない。このことは、今までみてきたような単一の指標で岩石材料の耐久性を判定することが困難であることを示している。このため数種類の指標を組み合わせ、新しい風化指標(複合指標)を考案し、耐久性を評価する試みがなされている。表-5に主な複合指標を示す。

供用中の構造物の目視による耐久性の評価は、同様の材料を用いて新しい構造物をつくる際の最も信頼できる情報となる。例えば、SMITH *et al.*⁴⁷⁾はカリフォルニアの道路斜面保護材(リップラップ材)の風化状況を目視観察して、各種風化指標との関連を検討した結果、目視観察による風

表-4 主な力学的風化指標

名 称	定 義	引用文献
一軸圧縮強度 風化度	省略	22
	風化した岩石の一軸圧縮強度	44
	新鮮な岩石の一軸圧縮強度	
引張強度 τ (風化引張強度指数)	省略	45
	$\log St$	46
	St : 引張強度を kgf/cm^2 で表した値	

表-5 主な複合指標

名 称	定 義	引用文献
DAR(Durability Absorption Index)	$\frac{\text{Durability Index}}{\text{吸水率}+1}$ Durability Index : 摩耗損失量の 1 種	47
RDI(Rock Durability Index) RDI _s (Static Rock Durability Index) RDI _D (Dynamic Rock Durability Index)	$\frac{Is(50)^* - 0.1(SST + 5 WA)}{SGssd}$ $\frac{0.1(M. AIV + 5 WA)}{SGssd}$ Is (50)* : 飽和供試体および絶乾供試体の点載荷試験値の平均値 SST : 硫酸マグネシウムによる安定性試験における質量損失 WA : 吸水率 SGssd : 飽和表乾比重 M.AIV : Modified Aggregate Impact Value	48
IRD(Index of Rock Durability)	$\frac{R}{n+2a}$ R : 一軸圧縮強度(MPa単位) n : 有効間隙率(%) a : 吸水膨張ひずみ(10 ⁻⁴ 単位)	49

化状況と最もよく一致したのは、吸水率とDurability Index(一種の磨耗損失量)であることを見出し、表-5で定義されるDAR(Durability Absorption Ratio)を提案した。DARは目視による観察結果と97%の確率で対応しており、カリフォルニア州高速道路局はDARを道路斜面保護材の品質管理指標として採用した。

FOOKES *et al.*⁴⁸⁾は構造物基礎、切り取り法面、ダムおよび道路斜面保護材等動的応力を受けない構造物の耐久性を評価するため、表-5のようにRDI_s(Static Rock Durability Indicator)を定義し、RDI_s<-3の岩石は耐久性が不良としている。本指標においては、吸水率は耐久性と非常に密接な関連を有するため5倍し、点載荷試験値は静的強度を評価するため、また硫酸マグネシウムによる安定性試験における質量損失(SST)は、凍結融解や急熱急冷の繰り返しに対する耐久性を評価するため採用されている。また、本指標は、SSTを含んでいるため、結果を得るのに時間がかかるので岩種ごとのSSTとWA(吸水率)の関係式を用いて、比重、吸水率、点載荷試験値のみで値を迅速に求めることのできるRDI_{sq}(qはquickを表す)を導き、RDI_sと極めてよい一致を示すと報告している。

RODRIGUES and JEREMIAS⁴⁹⁾は、表-5に示すとおりIRD(Index of Rock Durability)を定義し、ポルトガルのフィルダムのリップラップ材として用いられた硬砂岩の湿潤乾燥試験、および薬液による安定性試験とIRDを比較した結果、IRDが大きい程耐久性が良好であることを示している。

7. 岩石材料の耐久性評価のための風化指標

前述したように、岩石材料の風化指標は、化学的・鉱物

学的・物理的・力学的な各観点に立った指標や、それらを組み合わせた複合指標等、目的に応じて各種のものが提案されている。これらのうち、化学的指標や鉱物学的指標は、化学的風化段階における元素の移動や、鉱物の変化に基づくものであるが、分析に熟練を要し、時間もかかる。また土木地質の分野で問題となる強度・変形特性や物理的特性とある程度関連を有するものの、それらを直接表現するものではない。これに対し、物理的指標や力学的指標を求めるための試験は、比較的単純であるうえ、学会や関連機関において基準化されている項目が多く、個人差が入る余地が少ない。また試験に要する時間も短いものが多く、コンクリートの耐久性を評価する指標として、JISやASTMで採用されているのも物理的指標である。複合指標は、構造物の置かれた環境を考慮したより正確な耐久性を評価できると考えられるが、前四者の指標に比べて測定に時間がかかる。この欠点を補うため、簡単に求められる吸水率等との関係式を導いて複合指標を求める例もあるが、それでは複合指標を考案した意味が失われ、単一の指標と同様の内容となる。以上のことから、土木地質の分野で、工事の施工管理に用いる岩石材料の風化指標としては、物理的指標や力学的指標が優れている。

さらに、岩石材料の耐久性評価にあたっては、凍結融解試験や薬液による安定性試験等の劣化促進試験を実施して、経時的に測定を繰り返すのが最も精度が高い。したがって、耐久性評価のための風化指標も非破壊で繰り返し測定が可能な量が望ましい。この点、一軸圧縮強度や点載荷試験値は、破壊試験であり経時測定はできない。このため、力学的指標を求めようとする多数の供試体を用意して、各測定サイクルごとに数個ずつ破壊試験を行う必要があり、実

施するには供試体の作製等にかかなりの労力を伴う。これに対し、比重、吸水率、弾性波伝播速度、質量減少率等の物理量は経時測定が可能であり、また力学的特性とも密接な関連を有する。したがって、土木地質の分野で、建設工事を念頭においた場合、岩石材料の耐久性評価のための風化指標として最も利用価値の高いのは、物理的風化指標である。

なお、矢萩・ほか⁵⁰⁾はロック材として用いる緑色片岩の各種曝露試験を実施し、粒度、質量減少率、点載荷試験値、動弾性係数等の物理的風化指標では風化の進行形態を的確に評価できるが、X線回折や陽イオン交換量等鉱物学的風化指標や、化学的風化指標は顕著な変化を示さなかったことを報告している。

引 用 文 献

- 1) GRIGGS, D. T.(1936):The factor of fatigue in rock exfoliation, *J. Geol.*, Vol.44, pp.783-796.
- 2) AIRES-BARROS, L., GRAÇA, R. C. and VELEZ, A.(1975): Dry and wet laboratory tests and thermal fatigue of rocks, *Eng. Geol.*, Vol.9, pp.249-265.
- 3) 中村康夫(1996): 岩石の劣化・風化に関する実験的研究, 土と基礎, Vol.44, No.10, pp.55-60.
- 4) PARKER, A.(1970): An index of weathering for silicate rocks, *Geol. Mag.*, Vol.107, pp.501-504.
- 5) REICHE, P.(1943): Graphic representation of chemical weathering, *J. Sed. Petrol.*, Vol.13, No.2, pp.58-68.
- 6) VOGEL, D. E.(1975): Precambrian weathering in acid metavolcanic rocks from the Superior Province, Villebon Township, south-central Quebec, *Can. J. Earth Sci.*, Vol.12, pp.2080-2085.
- 7) 三浦清(1973): 深成岩類の風化に関する研究(第1報), 応用地質, Vol.14, No.3, pp.1-16.
- 8) NESBITT, H. W. and YOUNG, G. M.(1982): Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutite, *Nature*, Vol.299, pp.715-717.
- 9) HARNOIS, L.(1988): The CIW index:A new chemical index of weathering, *Sed. Geol.*, Vol.55, pp.319-322.
- 10) 天田高白・岡谷直(1989): 化学的風化指数に関する一考察, 新砂防, Vol.42, No.4, pp.3-11.
- 11) RUXTON, B. P.(1968): Measures of the degree of chemical weathering of rocks, *Jour. Geol.*, Vol.76, pp.518-527.
- 12) 大見美智人・本田彰義・井上正康・吉田幸信(1975): 風化安山岩の化学的・物理的性質の関係について, 応用地質, Vol.16, No.4, pp.1-9.
- 13) JAYAWARDENA, U. de S. and IZAWA, E.(1994): A new chemical index of weathering for metamorphic silicate rocks in tropical regions: A study from Sri Lanka, *Eng. Geol.*, Vol.36, pp.303-310.
- 14) SHORT, N. M.(1961): Geotechnical variations in four residual soils, *J. Geol.*, Vol.69, pp.534-571.
- 15) IRFAN, T. Y.(1996): Mineralogy, fabric properties and classification of weathered granites in Hong kong, *Quart. Jour. Eng. Geol.*, Vol.29, pp.5-35.
- 16) GRANT, W. H.(1969): Abrasion pH, an index of chemical weathering, *Clays and Clay Minerals*, Vol.17, pp.151-155.
- 17) MALOMO, S.(1980): Abrasive pH of feldspars as an engineering index for weathered granite, *Bull. I.A.E.G.*, Vol.22, pp.207-211.
- 18) SCOTT, L. E.(1955): Secondary minerals in rock as a cause of pavement and base failure, *Proc. Highway Research Board*, 34th Annu. Meeting, pp.412-417.
- 19) WEINERT, H. H.(1968): Engineering petrology for roads in South Africa, *Eng. Geol.*, Vol.2, No.6, pp.363-395.
- 20) MENDES, F. M., AIRES-BARROS, L. and RODRIGUEZ, F. P.(1966): The use of modal analysis in the characterization of rock masses, *Proc. 1st Cong. I. S. R. M.*, Vol.1, pp.217-223.
- 21) 九里尚一・阿部司・斎藤徳美(1971): 花崗岩類の風化に関する研究(I), 物理探鉱, Vol.24, No.1, pp.6-17.
- 22) 斎藤徳美・阿部司・九里尚一(1971): 花崗岩類の風化に関する研究(II), 物理探鉱, Vol.24, No.5, pp.10-15.
- 23) COLE, W. F. and SANDY, M. J.(1980): A proposed secondary mineral rating for basalt road aggregate durability, *Aust. Road Res.*, Vol.10, No.3, pp.27-37.
- 24) STAPEL, E. E. and VERHOEF, P. N. W.(1989): The use of the methylene blue adsorption test in assessing the quality of basaltic tuff rock aggregate, *Eng. Geol.*, Vol.26, pp.233-246.
- 25) HASKINS, D. R. and BELL, F. G.(1995): Drakensberg basalts: their alteration, breakdown and durability, *Quart. Jour. Eng. Geol.*, Vol.28, pp.287-302.
- 26) 西田一彦・青山千彰(1979): 花コウ岩風化層の間ゲキ径分布と水分吸着特性について, 応用地質, Vol.20, No.1, pp.3-12.
- 27) HAMROL, A.(1961): A quantitative classification of the weathering and weatherability of rocks, *Proc. 5th Int. Conf. S. M. F. E.*, Vol.2, pp.771-774.
- 28) 斎藤徳美(1973): 乾燥および水浸による火成岩の含水率の変化について, 物理探鉱, Vol.26, No.5, pp.37-44.
- 29) 松岡憲知(1986): 凍結破砕速度に影響を与える岩石物性, 地形, Vol.7, No.1, pp.23-40.
- 30) JIS A 6204-1995 コンクリート用化学混和剤 付属書2 コンクリートの凍結融解試験方法, pp.12-14.
- 31) 建設省(1970): 土木試験基準(案)上, pp.95-108.
- 32) 中村康夫(1979): 凍結融解試験による岩石の劣化特性と耐久性の評価, 応用地質, Vol.20, No.4, pp.2-11.
- 33) 斎藤徳美・阿部司・九里尚一(1974): 火山岩の風化に関する研究(I), (II), 物理探鉱, Vol.27, No.1, pp.3-15, pp.16-26.
- 34) ILIEV, I. G.(1966): An attempt to estimate the degree of weathering of intrusive rocks from their physico-mechanical properties, *Proc. 1st Cong. I.S.R.M.* Lisbon, pp.109-114.
- 35) 岡本隆一・中村康夫・加藤則男(1977): ロック材耐久性判定基準作成のための岩石試験, 土木技術資料, Vol.19, No.12, pp.3-8.
- 36) 斎藤徳美・阿部司(1973): シュミット・ハンマーによる風化火成岩の反撥度について, 物理探鉱, Vol.26, No.1, pp.19-31.
- 37) AIRES-BARROS, L.(1977): Experiments on thermal fatigue of non-igneous rocks, *Eng. Geol.*, Vol.11, pp.227-238.
- 38) 中村康夫・石塚克己(1984): 岩石の耐久性試験の比較, 応用地質, Vol.25, No.4, pp.21-31.
- 39) 入江恒爾・荒井克彦・町原秀夫・村上浩(1979): 凍結融解作

- 用による凝灰岩の風化過程について, 第14回土質工学研究発表会講演要旨集, pp.1397-1400.
- 40) 福田正己(1984): 小樽手宮洞窟壁面遺跡の凍結破損防止にかかわる基礎的研究, 低温科学 物理篇, Vol.43, pp.171-180.
- 41) 福田正己・張津生(1988): 敦煌莫高窟遺跡を構成する礫岩の凍結-融解実験, 低温科学 物理篇, Vol.47, pp.223-230.
- 42) 山野隆康(1973): フィルダムに用いるロック材料と軟岩の使用, 土と基礎, Vol.21, No.3, pp.25-31.
- 43) 風呂内和士・安福滋(1975): 瀬戸ダムの調査と設計について, 発電水力, No.136, pp.30-49.
- 44) 山口梅太郎(1970): 岩石の風化度に関する一試案, 第3回岩石の力学国内シンポジウム講演集, 土木学会他3学会, pp.7-11.
- 45) 松尾新一郎・澤孝平(1972): 風化花こう岩の破断面観察に基づく風化形式の判定およびその表示方法, 土質工学会論文報告集, Vol.12, No.4, pp.105-112.
- 46) 木宮一邦(1975): 花こう岩類の物理的風化指標としての引張強度, 地質学雑誌, Vol.81, No.6, pp.349-364.
- 47) SMITH, T., MCCAULEY, M. L. and MEARN, R. W.(1970): Evaluation of rock slope protection material, *Highway Research Board*, No.323, pp.6-13.
- 48) FOOKES, P. G., GOURLEY, C. S. and OHIKERE, C.(1988): Rock weathering in engineering time, *Quart. Jour. Eng. Geol.*, Vol.21, pp.33-57.
- 49) RODRIGUES, J. D. and JEREMIAS, F. T.(1990): Assessment of rock durability through index properties, *Proc. 6th Int. Cong. I. A. E. G.*, pp.3055-3060.
- 50) 矢萩賢仁・豊田光雄・中村昭(1993): 岩石質材料の原位置曝露試験, 第25回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.611-615.

(1997年5月21日受付, 1997年9月3日受理)

Jour. Japan Soc. Eng. Geol., Vol.39, No.2, pp.221-229, 1998

Weathering Indices of Rock Materials

Yasuo NAKAMURA