

講

座

石造文化財の保存

3. 岩石の劣化・風化に関する実験的研究

中村 康夫 (なかむら やすお)

日本道路公団静岡建設局工務部調査役

(前・建設省土木研究所環境部地質研究室 室長)

3.1 はじめに

風化作用に対する石造文化財の抵抗性(耐久性)を検討する場合、文化財自体の岩質のみならず、それが置かれた環境条件が耐久性に大きな影響を与えることに注目する必要がある。文明の発生以来、人類の環境への適応によって石造文化財は地球上のさまざまな地域で製作されてきた。文化財が製作された当時は人類の居住に適した温暖な環境であったものがその後の地球環境の変化により、現在では全く人類が居住できない程厳しい環境になっている場所も多い。したがって、現在では石造文化財が置かれている環境は極めて多岐にわたっており、過酷な風化作用を受けているものも多数ある。これに加え、近年の人類の活動による酸性雨の影響等によって深刻な問題を生じている例もある。

石造文化財が受ける最も厳しい風化作用は、寒冷地における凍結融解作用と乾燥地における塩類の晶出作用であるが、我が国においては前者が主と考えられる。そこで本文では、主に前者を再現する室内試験として凍結融解試験を紹介し、後者を再現する室内試験として薬液による安定性試験について簡単に触れる。さらに、実際の風化環境を再現する試験として曝露試験をとりあげ、これら3種の試験における岩石の風化特性を比較した結果について報告する。その前に、さまざまな観点からなされた風化に関する研究成果を、風化の程度を定量的に示す風化指標という形で簡単に紹介する。紙数の関係で指標を紹介するにとどめるが、研究の背景や詳しい内容については、それぞれの文献を参照されたい。

3.2 風化の程度を示す指標

3.2.1 各種風化指標

岩石(ここでは特に石造文化財)の風化に対する抵抗性を検討するためには、風化の程度を的確に表現できる指標(風化指標)が必要である。以下にさまざまな観点から提案された各種

風化指標について、化学的、鉱物学的、物理的、力学的指標の四つに分類して示すが、紙数の関係もあり、個々の解説は省略する。なお、これらの指標を組合せた複合指標も提案されているが、特別な用途に限定されるため割愛する。

表-3.1に主な化学的風化指標を示す。岩石の化学的風化においては一般に、Na, Ca等が母岩から最も溶脱されやすく、Fe, Al, Ni, Cu等が最も溶脱されにくい。また、Mn, Mg, K, Zn等は中間的性質を示す。化学的風化指標は、風化過程におけるこのような元素の移動特性を考慮し、溶脱されやすい成分と溶脱されにくい成分の比で風化の程度を表すものが多い。

表-3.2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・空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。

表-3.3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風化指標として用いる例もあるが、新鮮岩と風化岩の物理量の比を用いる例もある。また、質量減少率や相対動弾性係数は各種風化促進試験における

表-3.1 主な化学的風化指標

名 称	定 義	文献
WPI=Weathering Potential Index	$\frac{\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O} - \text{H}_2\text{O}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O}} \times 100$	1)
PI=Product Index Weathering Direction	$\frac{\text{SiO}_2}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3} \times 100$	1)
WI=Weathering Index	$\frac{\text{風化岩の WPI}}{\text{新鮮岩の WPI}}$	2)
Silica-to-Almina Mole Ratio	$\frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3}$	3)
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)
D.F.=化学的新鮮度	$\frac{\text{FeO} + \text{MnO} + \text{MgO} + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}}$	5)
A.D.F.=絶対的化学的新鮮度	$\frac{\text{風化岩の D.F.}}{\text{新鮮岩の D.F.}} \times 100$	5)
SAIR	$\frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}}$	6)
MWPI=Modified Weathering Potential Index	$\frac{\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO}}{\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3} \times 100$	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	$\frac{\text{Na}_2\text{O}}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{強熱減量}} \times 100$	10)
Silica-Titania Index	$\frac{\text{SiO}_2/\text{TiO}_2}{(\text{SiO}_2/\text{TiO}_2) + (\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3) + (\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2)} \times 100$	11)

注) D.F. および A.D.F. は質量比で計算されるが、ほかはモル比で計算される。

表—3.2 主な鉱物学的風化指標

名 称	定 義	文献
$K = \text{Quality Index}$	$\frac{\sum_{i=1}^n P_i X_i}{\sum_{j=1}^n P_j Y_j}$ 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 (%)	12)
Percentage of Secondary Minerals	(1) $\frac{\text{2次鉱物の個数}}{\text{石英以外の初生鉱物の個数} + \text{石英の個数}} \times 100$ (2) $\frac{\text{2次鉱物の個数}}{\text{石英以外の初生鉱物の個数}} \times 100$	13)
変質部量	$\frac{\text{長石の変質部}}{\text{長石の変質部} + \text{未変質長石}} \times 100$	14)
R_{SM} : Secondary Mineral Rating	$\Sigma(P, M) T_R$ P : 2次鉱物含有率 M : 鉱物の安定性に関する評価点 T_R : 岩石の組織に関する評価点	15)

注) 上記の指標はすべて偏光顕微鏡を用いたモード分析によって求める。

表—3.3 主な物理的風化指標

名 称	定 義	文献
密度・有効間隙率・吸水率 Quick Absorption	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	16)
弾性波伝播速度, 動弾性係数 f : 相対動弾性係数	$\frac{f_n^2}{f_0^2} \times 100$ f_0 : 試験開始前の供試体の一次共鳴振動数 f_n : n サイクル試験後の "	17)
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 "	18)
硬度 ショア硬度	反発硬度の1種	19)
シュミットハンマー反発値	"	20)
ビッカース硬度	押し込み硬度の1種	21)
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 : n サイクル試験後の供試体質量	17)
風化度	それまでにはく離れた細粒のうち4.76 mm ふるいを通過する部分の乾燥質量 初期の乾燥質量	22)

表—3.4 主な力学的指標

名 称	定 義	文献
一軸圧縮強度 風化度	$\frac{\text{風化した岩石の一軸圧縮強度}}{\text{新鮮な岩石の一軸圧縮強度}}$	23) 24)
引張り強度 T : 風化引張り強度指数	$\log S_r$ S_r : 引張り強度を kgf/cm^2 で表した値	25) 26)

る風化指標として用いられる。なお、質量減少率については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 に従った¹⁷⁾。

表—3.4に主な力学的風化指標を示す。力学的風化指標としては、圧縮強度、引張り強度のいずれも用いられ、風化度は力学量そのものあるいは新鮮岩と風化岩の比の形で表現される。なお、引張り強度は非整形試料を用いた点載荷試験によって求められることが多い。

3.2.2 石造文化財の耐久性評価のための風化指標

化学的風化指標や鉱物学的風化指標は、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り、分析が複雑で時間もかかり熟練を要する。また、石造文

化財の保存に関して問題となる強度や物理的特性とある程度関連を有するものの、それらを直接的に表現するものではない。これに対し、力学的風化指標や物理的風化指標はそれぞれの特性そのものであるうえ、それらを求めるための試験は比較的単純で時間もかからず、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。以上から、地盤工学の分野で、実際に石造文化財の耐久性評価に用いる指標としては力学的風化指標や物理的風化指標が優れていると言えよう。

さらに、後述するように、岩石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風化促進試験を実施して、経時的に測定を繰返すのが最も精度の高い方法である。したがって、耐久性の指標も非破壊で繰返し測定が可能であることが望まれる。この点一軸圧縮強度や点載荷試験による引張り強度等の力学的風化指標は破壊試験によって求めざるを得ないので同一供試体の経時測定はできない。このため、力学的風化指標を求めようとするときあらかじめ多数の供試体を用意しておき、各測定サイクルごとに数個ずつ破壊試験をする必要があり、実際にはかなりの労力を伴う。これに対し、比重、吸水率、超音波伝播速度、質量減少率等の物理量は経時測定が可能であるうえ、力学特性とも密接な関連を有している。したがって、地盤工学の分野で石造文化財を念頭においた場合、岩石の耐久性評価指標として最も利用しやすいのは物理的風化指標である。

3.3 岩石の風化に関する実験的研究の現状と問題点

岩石の風化に関する実験的手法としては、自然環境下における風化特性を調査する手法と、各種風化促進試験を実施して風化特性を把握する手法の二つがある。

3.3.1 自然環境下における風化特性の調査

自然環境下における岩石の風化状況の調査手法には既存の石造文化財や土木構造物の風化状況調査や供試体の曝露試験がある。岩石の風化過程は原岩の性質のみならず、風化環境に著しく左右されるので、対象とする岩石を実際の風化環境下に設置し、長期間にわたって測定するのが理想的である。その点本手法は最も優れているが、データを得るのに時間がかかるのが最大の欠点である。ただし、墓石や記念碑等は建立年が明らかであるため、これらの風化状況の調査は岩石の実際の風化速度を知るための有効な手法として古来実施されている²⁷⁾。また、

ダムのような大規模事業の場合には、調査から建設に入るまでかなり長年月を要する例が一般的であるので、調査の初期段階で曝露試験を実施する例が増えている。これは耐久性が極端に劣る岩石は、曝露開始直後に急速に風化する例が多いので、1～2年間の比較的短期間の曝露試験によってかなり正確に耐久性を把握できるからである²⁸⁾。

3.3.2 風化促進試験

岩石を対象とした風化促進試験には、薬液による安定性試験、湿潤乾燥試験、凍結融解試験等がある。

薬液による安定性試験は硫酸ナトリウムあるいは硫酸マグネシウムの結晶圧による破壊作用に対する岩石の抵抗性を調査する手法であり、所定の繰返し回数後の損失質量百分率から抵抗性を判断している。硫酸ナトリウムを用いた手法についてはコンクリート骨材に関してJIS化されており²⁹⁾、土木学会ではダムコンクリート用骨材に関して損失質量百分率の限度を12%と規定している³⁰⁾。しかし Na_2SO_4 が晶出して $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ になる際の容積変化は82%にも達し、水が氷に相変化する際の容積変化9%よりはるかに大きく、非常に過酷な試験といえる。このため、本試験における岩石の耐久性は、凍結融解試験や曝露試験による結果とかなり異なる例も報告されている³¹⁾。

湿潤乾燥試験は、非凍結領域において強制的に湿潤(水浸)・乾燥を繰返す方法であり、時間的要素を別にすれば、温帯における風化環境を最も忠実に反映していると考えられる。しかし、軟岩等スレーキングしやすい岩石を除けば、風化促進試験としては相当長時間を要するので硬岩の実施例は少ない。

凍結融解試験は、水浸あるいは気乾状態で強制的に凍結融解を繰返す方法であり、前二者の中間的性格をもち、物理的風化作用の強調された試験として、新鮮な硬岩を含む広い範囲の岩石に対して有効と考えられている。このためフィルダムロック材や石造文化財の耐久性を検討するため本試験が実施されることが多い。しかしながら、試験方法や解析方法は確立しておらず、各機関によってまちまちである³²⁾。コンクリートの凍結融解試験¹⁷⁾に準じて実施される場合もあるが、試験条件や供試体の形状・寸法等、岩石にそのまま適用するには無理な面も多い。また耐久性は所定の凍結融解サイクル繰返し後の質量減少率で判断している例が多いが、その基準値は各現場で個別に判断されている。

3.4 風化指標の経時変化

3.3で述べたように、凍結融解試験や薬液による安定性試験等の風化促進試験と曝露試験等自然環境下における風化特性の対応関係について検討された例は少なく、ほとんど未解明である。したがって、岩石の耐久性は各試験結果ごとに個別に判断されている。しかしながら、風化促進試験と曝露試験の対応関係を求めることは、風化促進試験の耐久性評価手法としての有効性、および岩石の自然環境下における耐久性を評価するうえで極めて

重要である。このことを目的として同一岩種、同一形状、寸法の供試体を用いて実施された凍結融解試験および曝露試験における風化指標の経時変化について以下に紹介する³³⁾。

粗粒玄武岩のボーリングコアあるいはブロックサンプルを直径5cm、長さ10cmの円柱状に整形して供試体とした。曝露試験は実験棟屋上に試験台を設置し、良好な排水条件で供試体を曝露して行った。凍結融解試験は、試験槽内の温度をプログラムコントロールできる空気循環式の凍結融解試験装置を使用し、ゴム容器中に供試体を水浸状態で入れ、槽内最高(最低)温度+20℃(-20℃)、日当たり4サイクルで行った。

図-3.1(a), (b)にそれぞれ曝露試験、凍結融解試験における質量減少率の経時変化の例を示す。同図に示されるように、質量減少率の経時変化特性は両試験において同様な傾向を示し、以下の5タイプに分類される。

- A: 階段状
- B: なめらかな曲線
- C: 両者の中間的性状
- N: 水平
- N': ほとんど水平

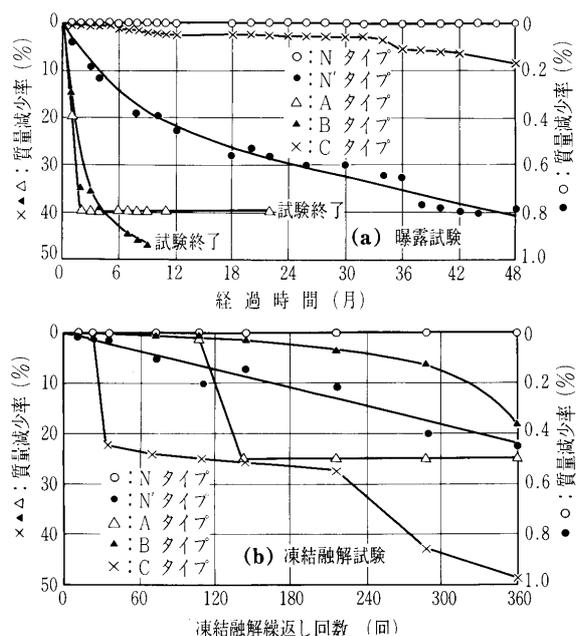


図-3.1 質量減少率の経時変化の例³³⁾

Aタイプは新鮮で固結度が高く、比較的大きな亀裂を含む硬岩にみられる風化形式であり、基質自体は風化せず、ある時点で突然亀裂に沿って破断するため、質量減少率の経時変化は不連続な階段状を示す。Bタイプは大きな亀裂を含まず、比較的低固結度の低い均一な組織を持つ岩石や、ある程度風化した岩石にみられる風化形式である。このような岩石の耐久性は、基質を構成する鉱物自体あるいは鉱物粒子間の結合力に支配される。したがって、鉱物自体の耐久性が劣る場合や、鉱物粒子間の結合力が弱い場合には、試験開始直後より徐々に風化が進行するため、質量減少率の経時変化はなめらかな曲線を示す。Cタイプは亀裂を含み、ある程度風化を受けた

講 座

岩石にみられ、質量減少率の経時変化はA, B両タイプの中間的様相を呈する。以上のほか、質量減少を全く生じず、経時変化が水平なものをN, 極めてわずかながら質量減少率が徐々に増加するものをN'タイプとした。前者は新鮮で固結度が高く、亀裂を含まない硬岩にみられ風化は全く生じない。後者は小さな亀裂を含む硬岩にみられ、試験の経過とともに徐々に亀裂が開く場合もある。

曝露試験における吸水率および乾燥密度の経時変化の例を図-3.2(a), 図-3.3(a)に、凍結融解試験におけるそれぞれの経時変化を図-3.2(b), 図-3.3(b)に示す。これらに示されるように、両試験における吸水率および乾燥密度の経時変化特性は同一であり、全く変化しない例(aタイプ)と変化する例(bタイプ, 吸水率は増加し、乾燥密度は減少する)の二つに分類できる。a

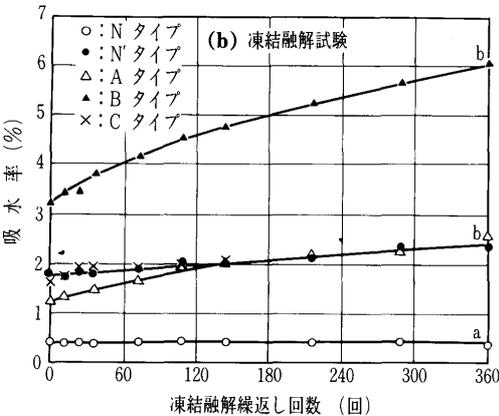
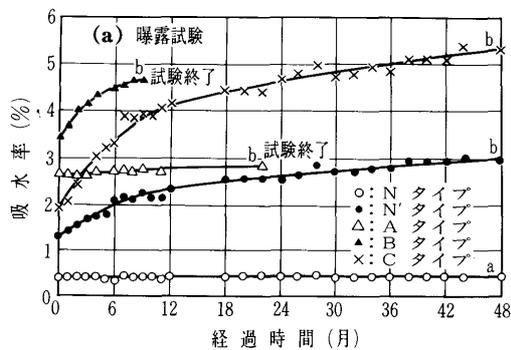


図-3.2 吸水率の経時変化の例³³⁾

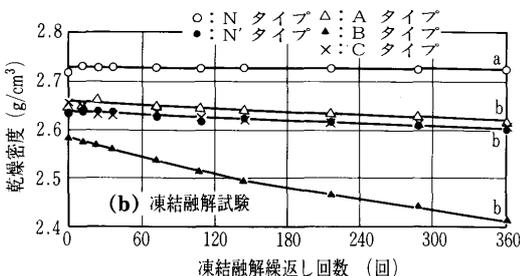
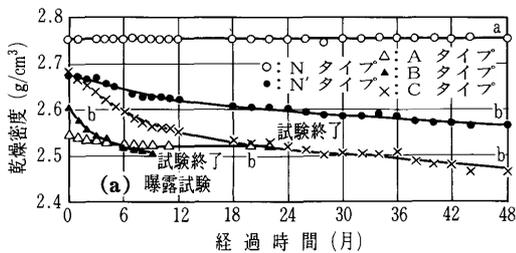


図-3.3 乾燥密度の経時変化の例³³⁾

タイプの質量減少率の経時変化はすべてNタイプに属する。逆にNタイプに属する供試体の吸水率および乾燥密度の経時変化はすべてaタイプに属する。また質量減少率の経時変化がNタイプ以外の供試体の吸水率および乾燥密度の経時変化はすべてbタイプに属する。

図-3.4(a), (b)にそれぞれ曝露試験, 凍結融解試験における動弾性係数の経時変化の例を示す。同図に示すように、両試験における動弾性係数の経時変化特性は同一であり、極めて緩やかな低下を示す例(α タイプ)と初期に急激な低下を示す例(β タイプ)に分類される。 α タイプに属する供試体の質量減少率の経時変化はすべてNタイプに属する。逆にNタイプに属する供試体の動弾性係数の経時変化はすべて α タイプに属する。また質量減少率の経時変化がNタイプ以外の供試体の動弾性係数の経時変化はすべて β タイプに属する。

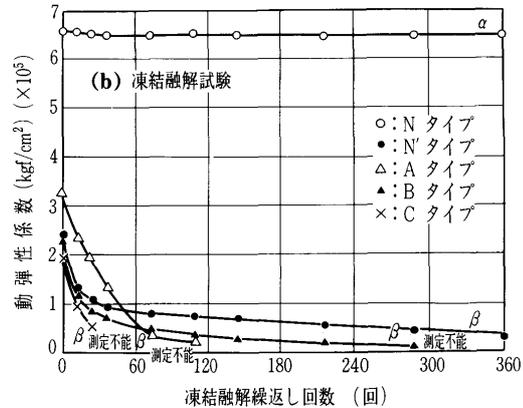
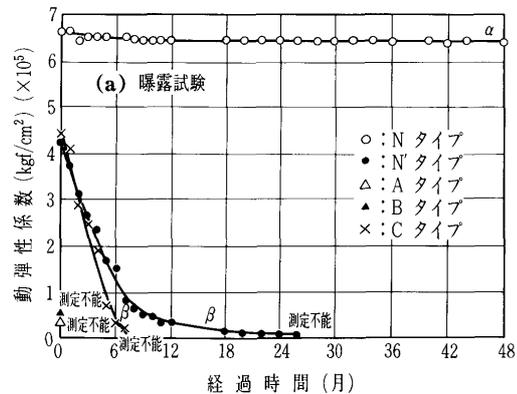
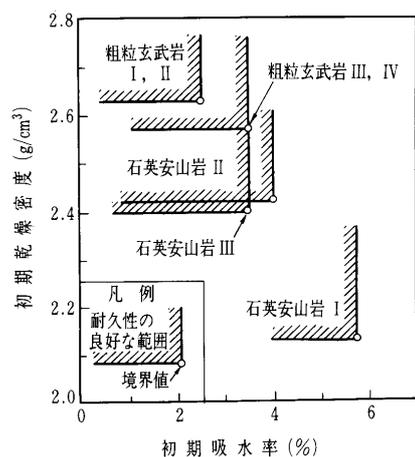


図-3.4 動弾性係数の経時変化の例³³⁾

3.5 初期物理量と耐久性

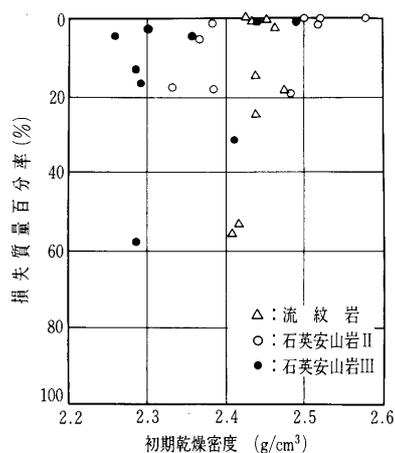
岩石の耐久性は風化形式(質量減少率の経時変化)と密接な関連があり、BタイプおよびCタイプの風化形式を示す岩石は初期物理量から耐久性が推定できることが報告されている³¹⁾。図-3.5は初期物理量と耐久性の関係を図示したものであり、プロットされた各点を中心に吸水率はそれ以下、乾燥密度はそれ以上の値を有する供試体(図中斜線で示される)の耐久性は良好である。同図に示されるように、耐久性良否の境界値は供試体ごとに異なっており、全岩種に共通する基準値を設定することは不可能である。また、Aタイプの風化形式を示す岩種は初期物理量と耐久性の間に関連が認められない。

図-3.6は、硫酸ナトリウムによる安定性試験におけ



図—3.5 初期物理量（吸水率と乾燥密度）と耐久性の関連³¹⁾

る初期乾燥密度と損失質量百分率の関係を示したものである。同図に示されるように、乾燥密度が大きいと損失質量百分率が減少する概略的傾向が認められるが、ばらつきが大きく、また耐久性良否の判定基準も岩種ごとに異なっており、全岩種に共通する基準値を設定することは不可能である。また同一形状・寸法の供試体を用いた凍結融解試験によると流紋岩はAタイプの劣化形式を示し、極端に耐久性が劣る（108サイクル以内ですべて崩壊）が図—3.6ではかなり良好である。



図—3.6 薬液による安定性試験における損失質量百分率と初期乾燥密度の関係³¹⁾

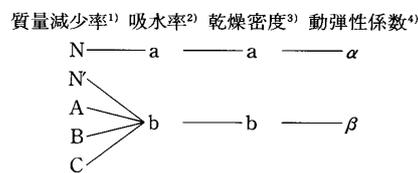
以上のように、供試体の初期物理量から耐久性を判定するためには凍結融解試験あるいは曝露試験を実施し、風化形式を判定した後、初期物理量と耐久性の関連について岩種ごとに検討し、耐久性判定の基準値を求める必要がある。いったん基準値を設定すると、その岩種については以降凍結融解試験や曝露試験を行う必要はなく、通常の物理試験から耐久性を判定できる。

3.6 耐久性試験の比較

3.4で述べたように、質量減少率、吸水率、乾燥密度、動弾性係数等の各種風化指標の経時変化特性は凍結融解試験および曝露試験においてほぼ等しい。これは凍結融解試験が自然環境下における岩石の風化現象をかなり正確に反映しているためと考えられる。ただし、N'タイプの風化を示す供試体は、曝露試験では開口クラックが

発生して指で力を加えれば破壊しそうな供試体が含まれているため、質量減少率のみでは耐久性が評価できないケースがあるのに対し、凍結融解試験ではクラックも発生しておらず質量減少率のみで耐久性が評価できる点が異なっている。これは曝露試験に比較して凍結融解試験における風化作用が強いためと考えられる。

凍結融解試験および曝露試験における各種風化指標の関係は図—3.7のようにまとめられる。吸水率、乾燥密度とも変化せず、動弾性係数が極めてわずかに減少する供試体はNタイプに属し、質量は減少しない。吸水率、乾燥密度、動弾性係数とも顕著な変化を示す供試体にはN' A, B, Cの4タイプが属する。特に、質量には顕著な減少が認められないN'タイプの供試体でも、ほかの物理量は顕著な変化を示しているため、N'タイプの供試体の耐久性判定にあたっては種々の風化指標を総合して判断する必要がある。



- 注)
- 1) N: 水平
 - 2) a: 変化しない
 - N': ほぼ水平
 - 3) a: 変化しない
 - A: 階段状
 - 4) alpha: 極めてわずかな減少
 - B: なめらかな曲線状
 - 5) b: 変化する (増加する)
 - 6) b: 変化する (減少する)
 - C: AとBの中間タイプ
 - 7) beta: 急激な減少

図—3.7 各種風化指標の経時変化特性の関係³³⁾

また、風化形式（質量減少率の経時変化）と初期物理量間に明確な関連が認められる場合には、耐久性評価の基準値は曝露試験、凍結融解試験、薬液による安定性試験の3種の試験においてほぼ等しい³³⁾。したがって、この場合には自然環境下における耐久性は、風化促進試験によってかなりの確に評価できる。しかしながら、少数ではあるが、曝露試験において風化形式と初期物理量間に明確な関連が認められない場合も存在する。この場合には自然環境下における耐久性を初期物理量あるいは風化促進試験で評価することは困難であるが、風化促進試験における耐久性は、それぞれの試験ごとに基準値を変えて評価することができる。したがって、岩種によっては、風化促進試験で自然環境下における耐久性が評価できない場合もあり得る。これは、自然環境下における風化現象は複雑な要因が絡み合っているが、風化促進試験においては一つの物理的作用が強調されるためと考えられる。

3.7 おわりに

岩石の風化作用に関しては、地質学のみならず、地形学、鉱物学、土壌学、土木地質学、岩盤力学、地盤工学等の境界領域に属するため、古くから多岐にわたる研究がなされている。しかしながら、風化過程は原岩の性質のみならず気象等環境条件との関連が極めて大きく複雑

講座

な現象であるので、その本質を究明するのは容易ではない。そこで本章では、風化過程の本質の究明を目的とする地質学的・化学的研究内容については深く立ち入らずその成果として風化指標を紹介するにとどめ、岩石を材料として使用することを念頭において実施されている土木工学的な研究の概要を紹介した。

土木工学分野ではコンクリート骨材やロックフィルダムの透水性材料として岩石が大量に使用されている。これらに用いる岩石は、強度が大きく耐久性に優れていることが要求される。強度に関しては試験方法が確立しており、調査、設計段階での確に把握され、施工時の試験によって確認されているが、耐久性に関しては試験方法が確立しておらず、本文で紹介したような手法によって各現場ごとに独自に検討されている。この分野で実施されている手法は石造文化財の保存に関しても基礎的なデータを得る手法として有効と考えられる。しかしながら、これらの試験と実際の風化過程の関連は必ずしも明らかにされていない。したがって石造文化財の耐久性を検討するにあたっては、実際に使用された岩石を用いて種々の風化促進試験を実施して風化特性を把握するとともに、石造文化財の置かれた環境条件や風化実態の調査を行い両者を比較することが必要である。

参考文献

- 1) Reiche, P.: Graphic representation of chemical weathering, *J. Sed. Petrol.*, Vol. 13, No. 2, pp. 58~68, 1943.
- 2) Short, N. M.: Geotechnical variations in four residual soils, *J. Geol.*, Vol. 69, pp. 534~571, 1961.
- 3) Ruxton, B. P.: Measures of the degree of chemical weathering of rocks, *J. Geol.*, Vol. 76, pp. 518~527, 1968.
- 4) Parker, A.: An index of weathering for silicate rocks, *Geol. Mag.*, Vol. 107, pp. 501~504, 1970.
- 5) 三浦 清: 深成岩類の風化に関する研究, 第1報, 応用地質, 第14巻, 第3号, pp. 1~16, 1973.
- 6) 大見美智人・本田彰義・井上正康・吉田幸信: 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, 第16巻, 第4号, pp. 1~9, 1975.
- 7) Vogel, D.E.: Precambrian weathering in acid metavolcanic rocks from the Superior Province Villebon Township, South-Central Quebec, *Can. J. Earth. Sci.*, Vol. 12, pp. 2080~2085, 1975.
- 8) Nesbitt, H.W. and Young, G.M.: Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites, *Nature*, Vol. 299, pp. 715~717, 1982.
- 9) Harnois, L.: The CIW Index: A new chemical index of weathering, *Sed. Geol.*, Vol. 55, pp. 319~322, 1988.
- 10) 天田高白・岡谷 直: 化学的風化指標に関する一考察, 新砂防, 第42巻, 第4号, pp. 3~11, 1989.
- 11) Jayawardena, U. S. and Izawa, E.: A new chemical index of weathering for metamorphic silicate rocks in tropical regions: A study from Sri Lanka, *Eng. Geol.*, Vol. 36, pp. 303~304, 1994.
- 12) Mendes, F. M., Aires-Barros, L. and Rodrigues, F. P.: The use of modal analysis in the mechanical characterization of rock masses, *Proc. 1st Cong. ISRM*, Vol. 1, pp. 217~223, 1966.
- 13) Weinert, H.H.: Engineering petrology for roads in South Africa, *Eng. Geol.*, Vol. 2, No. 6, pp. 363~395, 1968.
- 14) 九里尚一・阿部 司・斉藤徳美: 花崗岩類の風化に関する研究(I), 物理探鉱, 第24巻, 第1号, pp. 6~17, 1971.
- 15) Cole, W. F. and Sandy, M. J.: A proposed secondary mineral rating for basalt road aggregate durability, *Australian Road Research*, Vol. 10, No. 3, pp. 27~37, 1980.
- 16) Hamrol, A.: A quantitative classification of the weathering and weatherability of rocks, *Proc. 5th Int. Conf. SMFE*, Vol. 2, pp. 771~774, 1961.
- 17) 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法, pp. 12~14.
- 18) Iliev, I.G.: An attempt to estimate the degree of weathering of intrusive rocks from their physico-mechanical properties, *Proc. 1st Cong. ISRM*, Vol. 1, pp. 109~114, 1966.
- 19) 中村康夫: 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, 第20巻, 第4号, pp. 2~11, 1979.
- 20) 斉藤徳美・阿部 司: 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, 第26巻, 第1号, pp. 19~31, 1973.
- 21) Aires-Barros, L.: Experiments on thermal fatigue of non-igneous rocks, *Eng. Geol.*, Vol. 11, pp. 227~238, 1977.
- 22) 小野隆康: フィルダムに用いるロック材料と軟岩の使用, 土と基礎, 第21巻, 第3号, pp. 25~31, 1973.
- 23) 斉藤徳美・阿部 司・九里尚一: 花崗岩類の風化に関する研究(II), 物理探鉱, 第24巻, 第5号, pp. 10~15, 1971.
- 24) 山口梅太郎: 岩石の風化度に関する1試案, 第3回岩の力学国内シンポジウム講演集, pp. 7~11, 1970.
- 25) 松尾新一郎・澤 孝平: 風化花コウ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, 第12巻, 第4号, pp. 105~112, 1972.
- 26) 木宮一邦: 花コウ岩の物理的風化指標としての引張強度, 地質学雑誌, 第81巻, 第6号, pp. 349~364, 1975.
- 27) 槽谷憲司: 石材建造物を対象とした岩石の風化実態調査とその考察, 応用地質, 第20巻, 第2号, pp. 47~57, 1979.
- 28) 中村康夫: フィルダム岩石材料の耐久性, 土と基礎, 第32巻, 第7号, pp. 21~27, 1984.
- 29) JIS A 1122-1989: 硫酸ナトリウムによる骨材の安定性試験方法, 5p.
- 30) 土木学会: コンクリート標準示方書「ダム編」, p. 20, 1986.
- 31) 中村康夫: 岩石材料の耐久性評価手法について, 第34回建設省技術研究会報告, pp. 895~901, 1981.
- 32) 脇坂安彦: 凍結融解試験, 岩の調査と試験, pp. 436~444, 土質工学会, 1988.
- 33) 中村康夫・石塚克己: 岩石の耐久性試験の比較, 応用地質, 第25巻, 第4号, pp. 21~31, 1984.