岩石の耐久性試験の比較

中村康夫*・石塚克己**

Comparison of Rock Durability Tests

Yasuo NAKAMURA and Katsumi ISHIZUKA

Abstract

The outdoor exposure test and accelerated deterioration tests, such as the freezing and thawing test and sodium sulfate soundness test on dolerite have been conducted to study the deterioration characteristics and durability of material rocks for use as riprap of rock fill dams in each test condition. From a series of tests, the following results have been obtained.

1) The deterioration types of rocks in the freezing and thawing test are basically identical with those in the outdoor exposure test. In these tests, the deterioration types of rocks can roughly be categorized into five groups, N (horizontal), N' (almost horizontal), A (stepped), B (smoothly curved) and C (intermediate between A and B) based on weight loss curve characteristics.

2) The change types in physical parameters, such as absorption, dry density and dynamic modulus of elasticity with time in the outdoor exposure test are identical with those in the freezing and thawing test. Relationship between change types in physical parameters and rock properties are also identical in these two tests.

3) Even though in the case that any relationship between initial physical parameters and deterioration types can't be recognized at all in the outdoor exposure test, close relationship can be recognized in the freezing and thawing test and the sodium sulfate soundness test.

4) In the case where close relationship between initial physical parameters and deterioration types can be recognized in the outdoor exposure test, criteria values for durability evaluation are all nearly equal in the outdoor exposure test, freezing and thawing test and sodium sulfate soundness test. Therefore, in this case, durability of rocks under natural environments can accurately be evaluated by accelerated deterioration tests.

5) In the case where any relationship between initial physical parameters and deterioration types can't be recognized at all in the outdoor exposure test, criteria values for durability evaluation in the freezing and thawing test are different from those in the sodium sulfate soundness test. Namely, deterioration characteristics of such material rocks can't be considered to have close relationships among these accelerated deterioration tests.

1. はじめに

岩石材料の耐久性評価のために実施される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と、曝露試験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、岩石材料の耐久性は個々の試験結果あるいは、現場毎に個別に判断されているのが現状である。しかしながら、劣化促進試験と曝露試験の

対応関係を求めることは、劣化促進試験の耐久性評価手法としての有効性、および岩石材料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。このため、筆者等は、同一岩種、同一形状・寸法の供試体を用いて凍結融解試験、薬液による安定性試験、曝露試験を実施し、各試験の対応関係について検討してきている^{1)~6)}。今回は、粗粒玄武岩の各試験における劣化特性を考察し、各試験の関連について検討した結果について報告する。

* 建設省九州地方建設局

** 建設省土木研究所

2. 供試体および試験方法

2.1 供 試 体

凍結融解試験、薬液による安定性試験および曝露試験に用いた供試体は、いずれも新第三紀中新世の堆積岩中に貫入した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 5 cm、長さ 10 cm の円柱状に整形したものである。供試体は、粒度および色調から D1（粒径が小さく、比較的白い）と D2（粒径が大きく、比較的黒い）の 2 種類に区分されるが、主要造岩鉱物はいずれも斜長石、透輝石、角閃石であり、その他緑泥石、方解石、沸石等を少量含む。表-1 に供試体の性質を示す。D1、D2 とも種々の風化程度のものを含むため、供試体の性質はかなりばらついている。同表に示されるように、D1、D2 とも 3 種の試験に用いられた供試体の性質はそれぞれほとんど等しい。

表-1 供試体の性質

区分	項目	乾燥密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	有効間隙率 (%)	動弾性係数 ($\times 10^4$ kgf/cm ²)	超音波伝播速度 (m/sec)	供試体個数 (個)
D1	凍結	2.653	1.892	5.089	2.908	3400	47
	融解	0.061	1.134	2.661	2.079	620	
	曝露	2.656	1.547	4.413	3.602	3450	
		0.046	0.810	1.902	1.985	560	
	安定性	2.654	1.772	4.611	3.533	3500	
		0.081	1.198	2.811	1.971	560	
D2	凍結	2.612	2.967	7.686	2.650	3540	47
	融解	0.059	0.904	2.056	1.156	660	
	曝露	2.621	2.807	7.569	2.703	3530	
		0.051	0.895	1.926	1.179	750	
	安定性	2.617	2.929	7.622	2.607	3540	
		0.054	0.809	1.947	1.168	670	

注) 上段: 平均値, 下段: 標準偏差

2.2 試験方法

2.2.1 曝露試験

土木研究所（茨城県筑波郡）土質共同実験棟屋上に設置した曝露試験台の上に供試体を置き、良好な排水条件下で曝露した。測定は、試験開始後 1 年間は 1 カ月に 1 回、その後は原則として 2 カ月に 1 回実施し、重量損失、乾燥密度、有効間隙率、吸水率、動弾性係数等を求めた。なお、 n カ月曝露後の重量損失 Wl_{sn} は (1) 式で定義した。

$$Wl_{sn} = \frac{W_0 - W_n}{W_0} \times 100 \quad (1)$$

ただし、 W_0 : 試験開始前の乾燥重量

W_n : 測定時の乾燥重量

2.2.2 凍結融解試験

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風化試験装置を使用し、ゴム容器中に供試体を水浸状態で入れ、下記の条件下で試験を実施した。

槽内最高（最低）温度	+15°C (−15°C)
温度上昇（下降）速度	30°C/時間
最高（最低）温度持続時間	2 時間
周期	6 時間
日当りサイクル数	4 サイクル

上述の条件下で凍結融解を繰返し、0, 12, 24, 36, 72, 108, 144, 216, 288 および 360 サイクルにおいて、供試体の観察、記載、写真撮影を行うとともに、各種測定を行い、重量損失、乾燥密度、有効間隙率、吸水率、動弾性係数等を求めた。試験は、360 サイクルに達するか、動弾性係数が測定不能な程度に供試体が破壊するまで実施した。なお、 n サイクルにおける重量損失 Wl_{sn} は (1) 式で定義した。

2.2.3 薬液による安定性試験

試験は、JIS A1122-1976 硫酸ナトリウムによる骨材の安定性試験方法の規定に準拠した。ただし、供試体は凍結融解試験および曝露試験に用いたものと同一形状・寸法とし、ゴム容器も凍結融解試験と同一なものを使用した。試験前および試験後に各種測定を行い、重量損失、乾燥密度、有効間隙率、吸水率、動弾性係数等を求めた。なお、試験終了時（5 サイクル終了時）における重量損失 Wl_{ss} は (1) 式で定義した。

3. 物理量の経時変化特性

薬液による安定性試験においては、物理量の経時測定を行っていないので、ここでは曝露試験結果と凍結融解試験結果について述べる。

3.1 重量損失

図-1 (a), (b) にそれぞれ曝露試験、凍結融解試験

図-1 (a) 重量損失の経時変化の例 (曝露試験)

図-1 (b) 重量損失の経時変化の例 (凍結融解試験)

における重量損失の経時変化 (以下、重量損失曲線と呼ぶ) の例を示す。同図に示されるように、重量損失曲線は両試験とも同様な傾向を示しほぼ等しく、以下の 5 タイプに分類される。

- A : 階段状を示すもの
- B : なめらかな曲線を示すもの
- C : 両者の中間的性状を示すもの
- N : 水平線で示されるもの
- N' : ほとんど水平なもの

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劣化形式であり、基質自体は劣化せず、亀裂に沿って分割する。このような岩石の耐久性は、亀裂の付着力に支配され、基質の劣化は生じないので、ある曝露日数の時点で突然数片に分割する。したがって、重量損失の経時変化は不連続な階段状で示される。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もつ岩石や、ある程度風化が進行した岩石にみられる劣化形式である。このような岩石の耐久性は、基質を構成する鉱物自体、あるいは各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、曝露開始直後より徐々に劣化が進行するので、重量損失の経時変化はなめらかな曲線で示される。Cタイプは、クラックを含み、ある程度風化をうけた岩石にみられる劣化形式であり、重量損失の経時変化はA、B両タイプの中間的様相を呈する。

以上の他、重量損失を全く生じず、経時変化が水平な直線で示されるものをNタイプ、極めてわずかながら重

量損失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

図-2 (a) 吸水率の経時変化の例 (曝露試験)

図-2 (b) 吸水率の経時変化の例 (凍結融解試験)

図-3 (a) 乾燥密度の経時変化の例 (曝露試験)

図-3 (b) 乾燥密度の経時変化の例 (凍結融解試験)

る劣化形式であり、劣化は生じず、耐久性は最も良好である。後者は、小さなクラックを含む硬岩にみられる劣化形式であるが、曝露試験におけるD2供試体の中には、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も含まれている。凍結融解試験では開口クラックの発生した供試体は存在しない。

3.2 吸水率、乾燥密度、有効間隙率

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それぞれ 図-2 (a)、図-3 (a) に、凍結融解試験におけるそれぞれの経時変化を 図-2 (b)、図-3 (b) に示す。有効間隙率の経時変化の例は、吸水率と同様な傾向を示すので図示していない。図-2, 3 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等しく、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2つに分類できる。a タイプの供試体の重量損失は、すべてNタイプに属する。逆に、重量損失曲線が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、重量損失曲線がNタイプ以外 (N', A, B, C タイプ) 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。

3.3 動弾性係数

図-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。同図に示さ

図-4 (a) 動弾性係数の経時変化の例 (曝露試験)

図-4 (b) 動弾性係数の経時変化の例 (凍結融解試験)

れるように、両試験における動弾性係数の経時変化特性は等しく、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耐久性は良好であり、重量損失曲線はすべて N タイプに属する。逆に、重量損失曲線が 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、重量損失曲線が N タイプ以外 (N', A, B, C タイプ) 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。

4. 破壊時間、破壊サイクルおよび重量損失の頻度分布

図-5 (a) は、曝露試験における供試体の破壊時間および重量損失の頻度分布を、図-5 (b) は凍結融解試験における供試体の破壊サイクル (凍結融解寿命⁵⁾) および重量損失の頻度分布をまとめたものである。ここでは、重量損失の大小にかかわらず、A タイプの劣化を示す供試体の本体から小片が分離した時点を破壊と定義した。同図左欄は、A タイプの供試体の破壊時間 (図-5 (a)) あるいは、破壊サイクル (図-5 (b)) の頻度分布を示している。したがって、左欄に関しては、出現頻度が多い程、しかも左側に出現する程耐久性は劣る。右欄は、48 か月 (図-5 (a)) あるいは 360 サイクル (図-5 (b)) 以内に破壊を生じなかった供試体の、48 か月、360 サイクルにおける重量損失 W_{L48} , W_{L360} の頻度分布を示している。したがって、右欄に関しては、出現頻度が多い程、しかも左側に出現する程耐久性は良好である。

4.1 曝露試験結果

図-5 (a) に示されるように、D1 で 48 か月以内に破壊を生じた供試体 5 例は、すべて曝露開始後 6 か月以内 (実際は 2 か月以内) に破壊しており、耐久性は極めて劣る。これに対し、48 か月以内に破壊を生じなかった供試体の W_{L48} はすべて 1% 以下であり、耐久性は極めて良好である。すなわち、耐久性が良好な供試体と劣る供試体の差が歴然としている。D2 で 48 か月以内に破壊した供試体の破壊時間は、D1 と異なり、広い範囲にばらついている。また、48 か月以内に破壊しなかった供試体の W_{L48} は、1% 以下がほぼ半数を占めるが、4% まで分布しており、D1 に比較して分布範囲が広い。すなわち、D2 は D1 に比較して耐久性の良否の差が明確でない。

4.2 凍結融解試験結果

図-5 (b) に示されるように、D1 で破壊を生じた 17 例のうち、14 例までが 72 サイクル以内 (実際は 36 サ

図-5 (a) 曝露試験における破壊時間および重量損失 W_{L48} の頻度分布

図-5 (b) 凍結融解試験における破壊サイクル数および重量損失 W_{L360} の頻度分布

図-5 (c) 薬液による安定性試験における重量損失 W_{L5} の頻度分布

イクル以内) に破壊しており、耐久性が極めて劣る。また、360 サイクル以内に破壊しなかった供試体の W_{L360} は、30 例中 25 例までが 1% 以下であり、耐久性は極めて良好である。すなわち、耐久性の良好な供試体と劣る供試体の差が顕著である。これに対し、D2 で 360 サイクル以内に破壊した供試体の破壊サイクル数は広い範囲にばらついており、D1 とは分布状況が異なる。また、360 サイクル以内に破壊しなかった供試体の W_{L360} は、広い範囲に分布している。すなわち、D1 に比較し

て耐久性の良否の差が明確でない。以上の傾向は、曝露試験結果とほぼ同様であるが、凍結融解試験結果の方がばらつきが大きい。

4.3 薬液による安定性試験結果

図-5(c)は薬液による安定性試験終了時の供試体の重量損失の頻度分布を示したものである。D1は、21供試体中5個(24%)、D2は22供試体中7個(32%)破壊しており、薬液に対する安定性はほぼ等しい。しかしながら、試験終了時の重量損失は、D1がすべて1%以下であるのに対し、D2は4%まで分布している。

5. 初期物理量と耐久性の関係

5.1 初期物理量と重量損失の関係

5.1.1 曝露試験結果

図-6(a),(b)は、それぞれD1, D2の初期吸水率および初期動弾性係数と重量損失曲線のタイプの関係を示したものである。同図において、縦線(|)は、特にD2にみられるような、指で力を加えれば簡単に破壊する程付着力が低下した開口クラック(以下、開口クラックと呼ぶ)、左下がりの斜線(/)は、やや開口しているが付着力を有しているクラック(半開口クラック)、右下がりの斜線(\)は、密着しているクラック(密着クラック)を表わしている。これらのクラックは曝露試験の結果生じたものである。したがって、耐久性の評価にあたっては、開口クラックを含む供試体は、ほとんどAタイプに匹敵する程耐久性が劣り、密着クラックを含む供試体はNタイプに次いで耐久性が良好であり、半開口クラックを含む供試体は両者の中間的な耐久性を示す点に留意する必要がある。

図-6(a)に示されるように、D1は重量損失曲線のタイプと初期吸水率および初期動弾性係数の間に密接な関連が認められる。最も耐久性が良好なNタイプは最も物性値が優れており(吸水率 $<0.85\%$ 、動弾性係数 $>5.5 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$)、次いで耐久性が良好なN'タイプの物性値がこれに次ぎ($0.85 < \text{吸水率} < 2\%$ 、 $2.0 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2 < \text{動弾性係数} < 5.5 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$)、A, Bタイプ(吸水率 $>2\%$ 、動弾性係数 $< 2 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$)の順になっている。

図-6(b)に示されるように、D2の初期物性の良好な供試体はAタイプの劣化を示し、またN'タイプの劣化を示す供試体の物性値は広い範囲に分布しているため、初期値と重量損失曲線のタイプの間に明確な関連が認められない。ただし、N'タイプの中では、吸水率が大きくなる程、開口クラックを含む供試体が多くなる傾向が認められる。

図-6(a) 曝露試験における初期吸水率および初期動弾性係数と重量損失曲線のタイプの関係 (D1)

図-6(b) 曝露試験における初期吸水率および初期動弾性係数と重量損失曲線のタイプの関係 (D2)

5.1.2 凍結融解試験結果

図-7(a),(b)は、それぞれD1, D2の初期吸水率および初期動弾性係数と重量損失曲線のタイプの関係を示したものである。図-7(a)に示されるように、D1は重量損失曲線のタイプと初期吸水率および初期動弾性係数の間にかなり密接な関連が認められる。耐久性の最も優れているNタイプは物性値も最も良好であり(吸水率 $<1.1\%$ 、動弾性係数 $>5.0 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$)、N'タイプがこれに次いでいるが広い範囲($0.9\% < \text{吸水率} < 2.25\%$ 、 $0.8 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2 < \text{動弾性係数} < 6.0 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$)に分布している。Aタイプは動弾性係数 $< 1.5 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 、吸水率 $>1.0\%$ 、Cタイプは動弾性係数 $< 3.0 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 、吸水率 $>1.75\%$ の範囲に分布している。このように、重量損失曲線のタイプによって分布範

囲がほぼ限定されているが、曝露試験結果程明瞭な関連は認められない。

図-7 (b) に示されるように、D2 に関しては D1 ほど明確ではないが、重量損失曲線のタイプと初期吸水率および初期動弾性係数の間には関連が認められる。すなわち、N タイプおよび N' タイプが吸水率 $< 2.25\%$ 、動弾性係数 $> 3.75 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ の範囲に、A, B, C タイプは吸水率 $> 2.25\%$ 、動弾性係数 $< 3.75 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ の広い範囲に分布している。このように、物理量の初期値と重量損失曲線のタイプにほとんど関連の認められなかった曝露試験結果と異なり、凍結融解試験結果においては、ほとんど劣化を生じない N, N' タイプと顕著な劣化を生じる A, B, C タイプの分布領域がほぼ区分できる。

図-7 (a) 凍結融解試験における初期吸水率および初期動弾性係数と重量損失曲線のタイプの関係 (D1)

図-7 (b) 凍結融解試験における初期吸水率および初期動弾性係数と重量損失曲線のタイプの関係 (D2)

5.1.3 薬液による安定性試験結果

図-8 (a), (b) は、それぞれ D1, D2 の初期吸水率および初期動弾性係数と耐久性の関係を示したものである。耐久性の指標としては、土木学会の基準に準拠して重量損失 12% ($W_{12\%}$) を用いた。同図 (a) に示されるように、D1 に関しては初期物理量と耐久性の間には密接な関連が認められ、吸水率 $< 2.20\%$ 、動弾性係数 $> 2.0 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ の供試体の重量損失はすべて 12% 以下であり、耐久性は良好である。これに対し、D2 はばらつきが大きく、D1 ほど物理量と耐久性の間に明瞭な関係は認められないが、吸水率 $< 3.4\%$ 、動弾性係数 $> 1.5 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ の供試体の耐久性は良好である。このように、D2 に関しては、曝露試験や凍結融解試験より薬液による安定性試験の方が、初期物理量と耐久性の関連が明瞭である。

図-8 (a) 薬液による安定性試験における初期吸水率および初期動弾性係数と重量損失曲線のタイプの関係 (D1)

図-8 (b) 薬液による安定性試験における初期吸水率および初期動弾性係数と重量損失曲線のタイプの関係 (D2)

5.2 動弾性係数の低下

図-9, 10 はそれぞれ曝露試験, 凍結融解試験について, 縦軸に初期動弾性係数を, 横軸に動弾性係数が初期値の 60%⁴⁾ に低下した経過時間 (単位: 月) あるいは凍結融解サイクル数を取り, D1, D2 に関してプロットしたものである。なお 48ヶ月経過時点あるいは 360 サイクル終了時においても初期値の 60% 以上の値を保っている場合もそれぞれ 48カ月, 360 サイクルにプロットした。また, 最初の経時測定 (曝露試験では 1 カ月, 凍結融解試験では 12 サイクル) に至るまでに破壊した供試体は, それぞれ 0 カ月, 0 サイクルにプロットした。

5.2.1 曝露試験結果

図-9 (a) に示されるように, D1 は重量損失曲線のタイプ, あるいは動弾性係数の初期値によって分布範囲が明瞭に区分できる。すなわち, Nタイプの供試体 (初期値 $>5.5 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$) は, 48 カ月曝露後も初期値の 90% 以上を保っているが, N'タイプの ($2.0 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ < 動弾性係数 $< 5 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$) は曝露後 1 ~ 8 カ月で

図-9 (a) 曝露試験における初期動弾性係数と動弾性係数 60% 低下時間の関係 (D1)

図-9 (b) 曝露試験における初期動弾性係数と動弾性係数 60% 低下時間の関係 (D2)

初期値の 60% 以下に低下している。N'タイプの中では, クラックの密着した供試体の方が初期値の 60% 以下に低下するのに要する時間が長い。AタイプおよびBタイプの供試体は, 曝露後 1 カ月以内にすべて 60% 以下に低下している。

図-9 (b) に示されるように, D2 は初期動弾性係数の大きな供試体がAタイプの劣化を示すため, D1 程明瞭に分布範囲が限定されていない。全供試体が曝露後 11 カ月以内に 60% 以下に低下しているが, D1 と同様に, N'タイプの供試体の中では, クラックの密着して

図-10 (a) 凍結融解試験における初期動弾性係数と動弾性係数 60% 低下サイクル数の関係 (D1)

図-10 (b) 凍結融解試験における初期動弾性係数と動弾性係数 60% 低下サイクル数の関係 (D2)

いる供試体の方が 60% に低下するのに要する時間は長い。このように、動弾性係数の低下傾向は供試体の劣化特性と密接な関連を有しており、特に N' タイプの供試体の耐久性を評価する指標として有効である。しかしながら、密着クラックを含む N' タイプの供試体以外は、すべて 3 カ月以内に 60% 以下に低下しており、中にはかなり耐久性の良好な半開口クラックを含む供試体も含まれているので、動弾性係数のみで耐久性を評価すると、岩石の場合過小評価する可能性があることは凍結融解試験の場合と同様である^{3), 4)}。

5.2.2 凍結融解試験結果

図-10 (a) に示されるように、D1 は動弾性係数の低下と重量損失曲線のタイプの間に密接な関連が認められる。すなわち、顕著な劣化を生じる供試体 (A, B, C タイプ) の動弾性係数は、すべて 24 サイクル以内に初期値の 60% 以下に低下しており、耐久性が最も良好な N タイプの供試体は、360 サイクル終了時においてもすべて初期値の 60% 以上 (90% 以上の値を保っている供試体が多い) を保っている。N タイプに次いで耐久性が良好な N' タイプは、初期値が N タイプと同等な供試体が 4 例含まれているが、288 サイクルまでにすべて 60% 以下に低下していることで区別される。また、12 サイクルで既に 60% 以下に低下している供試体もあるが、耐久性は良好である。このように、特に N' タイプの供試体に関しては、動弾性係数 60% 低下サイクルで耐久性を評価すると、コンクリート供試体と異なり、過小評価することになる。このことは、曝露試験でも同様であり、他の岩種についても認められる⁴⁾。

図-10 (b) に示されるように、D2 は D1 とほぼ同様な傾向を示すが、D1 では初期値が $3 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 以上を示す供試体は N タイプあるいは N' タイプに属し、耐久性が良好であるのに対し、D2 では A, B, C タイプ等顕著な劣化を示す供試体が多い点が異なっている。このような傾向は、曝露試験結果とほぼ同様である。しかし、凍結融解試験結果の方が曝露試験結果に比較して、ばらつきがやや大きい。

6. 各種試験における劣化特性の比較

6.1 物理量の経時変化特性

薬液による安定性試験においては、物理量の経時測定は行なっていないので、ここでは曝露試験結果と凍結融解試験結果について検討する。

3 章で述べたように、重量損失、吸水率、乾燥密度および動弾性係数の経時変化特性は両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

石の劣化現象をかなり正確に反映しているためであると考えられる。ただし、N' タイプの劣化を示す供試体は、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 (特に D2)、重量損失のみでは耐久性が評価できないケースがあるのに対し、凍結融解試験ではほとんどクラックも発生しておらず、重量損失のみで耐久性が的確に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劣化作用が強いためであると考えられる。すなわち、凍結融解試験では供試体は常に完全飽和状態にあり、クラック内に浸入した水の凍結融解に伴う 9% の体積変化によってクラックに沿って破壊するため、A タイプの劣化を示すのに対し、曝露試験では完全飽和状態で凍結融解作用をうけることは稀であり、湿潤乾燥や温度変化が劣化作用の主体となるため、クラックが徐々に開口するにとどまり、破壊には至らず重量損失曲線は N' タイプに属する。したがって、曝露試験における岩石の耐久性評価にあたっては、重量損失のみならず、他のデータの検討や肉眼による観察を十分行うことが重要である。

吸水率、乾燥密度、動弾性係数等の各種劣化指標と重量損失曲線のタイプの関係は曝露試験および凍結融解試験で等しく、表-2 のようにまとめられる。同表に示されるように、吸水率、乾燥密度、動弾性係数等の物理量の経時変化は互いに密接な関連を有している。吸水率、乾燥密度とも変化せず、動弾性係数がほとんど変化しない供試体は、N タイプに属し、重量損失は全く生じない。逆に、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 タイプが属して

表-2 各種劣化指標の関係

重量損失 ¹⁾	吸水率 ²⁾	乾燥密度 ³⁾	動弾性係数 ⁴⁾
N	a	a	α
N'			
A	b	b'	β
B			
C			

注)

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

いる。特に、重量損失には顕著な減少が認められない N'タイプの供試体でも、他の物理量は顕著な変化を示している。N'タイプの供試体の耐久性評価にあたっては、種々の物理量を総合して判断することが必要である。また、重量損失、吸水率、乾燥密度に全く変化の認められない Nタイプの供試体でも、動弾性係数は曝露時間あるいは凍結融解サイクル数の増加とともに徐々に減少している。これは、動弾性係数が重量損失、吸水率、乾燥密度等に表現されないような、ごくわずかな供試体の劣化をも敏感に反映しているためであると考えられる。

6.2 破壊時間、破壊サイクルおよび重量損失の頻度分布

4章で述べたように、曝露試験における破壊時間および重量損失の頻度分布と凍結融解試験における破壊サイクルおよび重量損失の頻度分布の傾向はほぼ等しい。すなわち、D1 は耐久性の良否の差が明確であり、破壊した供試体は初期段階でほとんど破壊しており、破壊しない供試体の試験終了時の重量損失は大部分 1% 以下であるのに対し、D2 は D1 に比較して耐久性の良否の差が明確でなく、破壊時間、破壊サイクル数、重量損失とも広い範囲に分布している。しかしながら、D1、D2 とも試験終了時までに破壊した供試体の割合が、曝露試験に比べて凍結融解試験の方が 10% 多く、破壊サイクル数もばらついている。また、D1、D2 とも試験終了時における重量損失も、凍結融解試験の方が曝露試験に比較して広い範囲にばらついている。これは、前にも述べたように、曝露試験における劣化作用が凍結融解試験より小さいためであり、曝露試験では組織が緩まないような比較的耐久性の良好な供試体でも、凍結融解試験ではクラック中に浸入した水の凍結融解により組織が緩むので破壊サイクルおよび重量損失も広い範囲に分布すると考えられる。

図-5 (a)、(b) の右欄および図-5 (c) に示されるように、3 者とも試験終了時における重量損失は D1 より D2 が広い範囲に分布している。しかし、破壊した供試体の全供試体に占める割合は、薬液による安定性試験の場合、D1 は 24%、D2 は 32% であまり差がないのに対し、曝露試験 (D1 が 26%、D2 が 43%) および凍結融解試験 (D1 が 36%、D2 が 53%) においては D2 の方が D1 に比較してかなり多く破壊している点が異なっている。

6.3 初期物理量と耐久性

表-3 は耐久性が良好と判断される供試体 (5.1 参照) の初期物理量の概略値を示したものである。既に述べた

表-3 耐久性が良好な供試体の性質

供試体	試験	物理量		
		乾燥密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	動弾性係数 ($\times 10^5$ kgf/cm ²)
D1	曝露	2.62以上	2.0以下	2.0以上
	凍結融解	2.64 "	2.1 "	2.0 "
	安定性	2.62 "	2.2 "	2.0 "
D2	曝露	—	—	—
	凍結融解	2.62 "	2.9 "	2.7 "
	安定性	2.58 "	3.4 "	1.5 "

ように、D2 の曝露試験結果によると、耐久性と初期物理量の間には関連が認められないので同表には記入していない。また、初期物理量と耐久性が最も密接な関連を有するのは、D1 の曝露試験結果であり、他のケースは程度の差はあるがいずれもばらつきがあるので、同表に示した値はあくまでも概略値である。

同表に示されるように、D1 に関しては各試験における耐久性の良否判定の基準値はほぼ等しい。これに対し、曝露試験において初期物理量と耐久性の間に密接な関連が認められなかった D2 に関する基準値は、凍結融解試験と安定性試験で異なっている。すなわち、D1 の場合は自然環境下における供試体の耐久性は、凍結融解試験、薬液による安定性試験のいずれでもかなりの確に評価できる。しかし、D2 の場合は劣化促進試験における耐久性は、それぞれの試験の種類毎に、初期物理量で比較的的確に評価できるが、自然環境下における耐久性を初期物理量で評価することは困難である。したがって、岩種によっては、劣化促進試験で自然環境下における岩石の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劣化現象は複雑な要素が絡み合っているが、劣化促進試験においては 1 つの物理的作用 (凍結融解試験においては 9%、薬液による安定性試験においては 82% の体積変化⁷⁾) が強調されるためと考えられる。

初期物理量と耐久性に密接な関連がある場合 (実際はこの場合の方が多い^{3),4)}) には、凍結融解試験あるいは薬液による安定性試験によって自然環境下における岩石の耐久性はかなりの確に評価できる。粗粒玄武岩の例では両者の試験ともほぼ同一の結果を得たが、他の岩種の例では凍結融解試験結果と薬液による安定性試験結果が著しく異なる例が報告されている⁴⁾。また、6.2 に示したように、凍結融解試験の方が薬液による安定性試験に比べ自然環境下における岩石の劣化機構を正確に反映していると考えられるので、凍結融解試験の方がより妥当であると思われるが、詳細については今後岩種を増やして更に検討する必要がある。

7. ま と め

(1) 曝露試験および凍結融解試験における岩石の劣化形式(重量損失曲線のタイプ)はほぼ等しく、顕著な重量損失を生じるA, B, Cおよびほとんど重量損失を生じないN, N'タイプの5つに分類される。ただし, N'タイプの劣化を示す供試体は凍結融解試験においては重量損失で耐久性が的確に評価できるが、曝露試験においては開口クラックが発生し、指で力を加えれば破壊しそうな供試体も含まれているため、重量損失のみで耐久性を判断することはできない。

(2) 曝露試験および凍結融解試験における物理量の経時変化特性は等しい。また、経時変化特性と岩質との関連も両試験で等しい。

(3) 曝露試験において劣化形式と初期物理量の間に明確な関連が認められない場合にも、凍結融解試験および薬液による安定性試験においてはかなり明確な関連が認められる。

(4) 劣化形式と初期物理量の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。したがって、この場合には自然環境下における耐久性は劣化促進試験によってかなりの的確に評価できる。

(5) 曝露試験において劣化形式と初期物理量の間に明確な関連が認められない場合、耐久性評価の基準値は、凍結融解試験と薬液による安定性試験で異なる。

8. お わ り に

本文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における岩石の劣化特性と自然環境下の劣化特

性の関係について検討するため実施している各種試験のうち、粗粒玄武岩の試験結果についてまとめたものである。現在までの試験結果^{3), 4)}から劣化形式等基本的な劣化特性は各岩種に共通することが判明したが、細部については岩種によってかなり異なっているため、今後さらに多くの岩種について検討する必要がある。

本研究を進めるにあたり、土木研究所地質研究室桑原啓三室長には常に御指導・御助言をいただいた。また、新潟国道工事事務所(元土木研究所地質研究室)加藤則男技官、土木研究所地質研究室神保悟技官、阿部昌彦技官、長沢政和技官には測定および解析に協力していただいた。以上の方々に記して感謝する。

参 考 文 献

- 1) 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.
- 2) 岡本隆一・中村康夫・加藤則男(1979): 岩石の劣化速度に関する考察, 土木技術資料, Vol. 21, No. 2, pp. 29~34.
- 3) 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.
- 4) 中村康夫(1980): 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.
- 5) 中村康夫(1981): 凍結融解による岩石の破壊過程, 応用地質, Vol. 22, No. 4, pp. 9~19.
- 6) 中村康夫・石塚克己・長沢政和(1983): 曝露試験における岩石の劣化特性, 日本応用地質学会シンポジウムおよび研究発表会予稿集, pp. 63~66.
- 7) 素木洋一(1973): 建築用セラミック材料——焼結セラミック詳論——, 技報堂, pp. 187~211.

(昭和59年8月7日受付, 昭和59年12月11日受理)