

堆積軟岩の風化による表面色調および強度の変化に関する研究

A STUDY ON COLOR CHANGE AND STRENGTH DEGRADATION OF SEDIMENTARY SOFT ROCK BY WEATHERING

瀬川隆大*・永岡智子**・清木隆文***

Takahiro SEGAWA, Tomoko NAGAOKA, Takahumi SEIKI

It is reported several problems by weathering of sedimentary soft rock. For example, slope failure and heaving by freeze-thaw of rock. Utsunomiya is famous for Oya stone or Oya tuff. It has characters which earthquake-proof and fire-proof, easy processing, so that it has been used as building materials from Kofun Period. But, Oya tuff suffers easily the effect of weathering (strength degradation, collapse of surface). It is important to understand degradation character of rock. Then, this research study the relation among weathering and color change, strength degradation, component quantities change and degradation process by weathering. As a result, the surface color of Oya tuff changes yellow and green with strength degradation continuously.

Key Words: weathering, Oya tuff, Cappadocia tuff, strength degradation, color change

1. はじめに

国内各地で、岩石の凍結融解に起因する岩盤等の斜面崩壊、建造物基礎の盤膨れなどの堆積軟岩の風化現象に伴う様々な問題が多数報告されている。栃木県宇都宮市は代表的な堆積軟岩である大谷石(流紋岩質熔結凝灰岩)の産地であり、耐震性、耐圧性、耐火性に優れていることなどにより、古墳時代から様々な用途に利用されてきた。現在では、一般的な岩石に比べて加工しやすい点から塀や蔵などの建築材料によく利用されている。しかし、大谷石は、硬岩と比較して風化速度が大きく、風化に伴う強度の低下や岩石表面の欠落がよく見られる。こうした風化現象による大谷石の耐久性、安全性を考える上で、岩石の劣化特性を把握することが必要である。そこで本研究では、大谷石を用いた乾湿繰り返し試験、凍結融解試験、蒸散試験を行い、岩石に人為的風化を与え、一軸圧縮強度の低下、供試体表面における色調変化を観察し、岩石の風化による劣化過程を検証した。また、トルコ共和国カッパドキア地下都市群における現地調査の結果についても触れる。

2. 実験概要

(1) 供試体の作成

乾湿繰り返し試験、凍結融解試験では、栃木県大谷町で採石された大谷石のうち細目石のみを用い、5cm×5cm×5cm

* 学生会員 宇都宮大学大学院 工学研究科

**ダイドードリンコ(元宇都宮大学学生)

***正会員 博士(工学) 宇都宮大学 工学部建設学科建設工学コース

の立方体に整形した。蒸散試験においては、荒目石と細目石を用い、5cm×5cm×2.5cmの立方体に整形した。

(2) 乾湿繰り返し試験¹⁾

本来、岩石に乾湿履歴を与える試験では、乾燥炉機での強制乾燥を行う手法が多いが、本試験では、より自然に近い状態での乾燥履歴を与え、岩石の劣化特性を把握することを目的とした。試験手順は、まず供試体を蒸留水で浸水させ、真空ポンプを用いて2時間脱気状態で浸水した。その後、強制湿潤空中重量および強制湿潤水中重量を測定し、乾燥炉機下で22時間自然乾燥させ、風化を促進させた。これを1サイクルとし、最大で15サイクルまで行った。乾燥炉機下の温度を1週間測定した結果は図-1に示すように平均22.3℃であった。

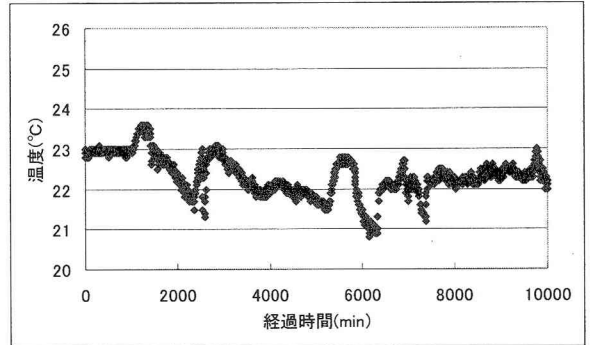


図-1 乾燥炉機下における一週間の温度変化

(3) 凍結融解試験²⁾

この試験の目的は、最も大きい物理的風化作用である凍結融解作用による岩石の劣化特性を定量的に把握することである。試験手順は、乾湿繰り返し試験と同様に、まず供試体を2時間真空状態で浸水し、強制湿潤空中重量および強制湿潤水中重量を測定した。その後、冷蔵庫で凍結に11時間、融解に11時間を与え、湿潤および凍結融解に要する時間を24時間とした。これを1サイクルとし、最大で15サイクルまで行った。

(4) 蒸散試験

この試験は、現場の環境をモデルとし、常に水が供給される環境における岩石の劣化特性を把握することを目的としている。試験手順は、供試体を1時間真空状態で浸水し、それを蒸留水で満たした容器にはめ込み、供試体の中央部で固定し、供試体内の水の出入りを上下面のみに限定した(図-2)。乾燥炉機下において24時間自然乾燥させ、その後、蒸散量を計測し、蒸散量と同じ程度の蒸留水を加えた。これを1サイクルとし、最大で31サイクル行った。

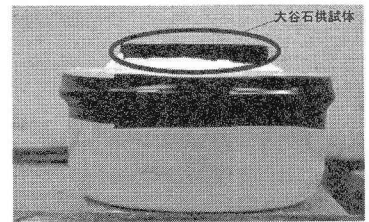


図-2 蒸散試験装置

(5) 針貫入試験

針貫入試験機(図-3)は、軟岩の一軸圧縮強さ q_u をサンプリングなしで測定することができる。測定方法は、測定面に垂直に針を圧入し、貫入量が10mmに達した時の貫入力量、または貫入力量が100Nに達した時の貫入量を計測し、針貫入勾配NP値(=貫入力量/貫入量)を算出し、得られた針貫入勾配より一軸圧縮強さ q_u を(1)式により換算した。

$$\log q_u = 0.978 * \log NP + 2.599 \dots \dots \dots (1)$$

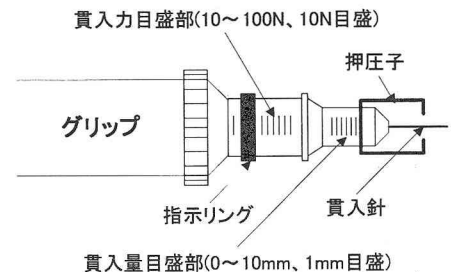


図-3 針貫入試験機(軟岩ペネトロ計)

試験には、乾湿繰り返し試験および凍結融解試験、蒸散試験に用いた供試体に対して行った。乾湿繰り返し試験および凍結融解試験に用いた供試体には、風化面から3mmずつの層に分けて、各層20回程度、3層まで行う。蒸散試験に用いた供試体については、風化面から5mm、10mm、12.5mmの層に分けて、各層20回程度測定した。また、トルコ共和国カッパドキア地下都市郡の現地調査結果は針貫入試験機を用いたものである。

(6) ポイントロード試験

ポイントロード試験は、岩石試料として非整形の岩塊でも行うことができ、短時間で供試体全体の一軸圧縮強度を求めることができる。しかし、岩石の形状や割れ目などによる影響から、測定結果のばらつきが多い。そのため本試験では、自動式ポイントロード試験機を使用することにより人為的誤差を軽減した。この試験では、乾湿繰り返し試験および凍結融解試験を行った供試体について行った。ここでは、より正確な一軸圧縮強度を得るために、1サイクルに対して3個の供試体を用いた。試験装置の概要は図-4に示す。

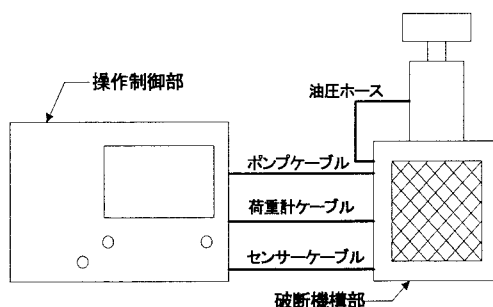


図-4 ポイントロード試験装置の概要

(7) 分光測定試験

この試験は、岩石の風化程度を画像解析によって区分するために、供試体表面の色調変化の測定を行った。本試験では、ミノルタ社の分光測色計(CM-501)を用い、供試体の色調変化を測定した。分光測色計の色度表色系は $L^*a^*b^*$ 表色系である。 $L^*a^*b^*$ 表色系では、明度を L^* 、色相と彩度を示す色度を a^* 、 b^* で表す。 $L^*a^*b^*$ 各パラメーターの詳細を以下に示す。

L^* ：黒(0)、白(100)に対応する。

a^* ：赤(+), 緑(-)に対応する。

b^* ：黄(+), 青(-)に対応する。

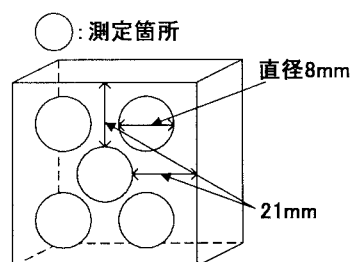


図-5 分光測定試験の測定箇所

試験方法は、乾湿繰り返し試験および凍結融解試験に用いる供試体について、試験前後の表面色調変化を測定した。図-5のように1面に付き5箇所、1個の供試体につき合計30箇所測定した。

(8) 色調変化測定試験

この試験の目的は、分光測定器のような高価な機材を使用せずに、デジタルカメラとAdobe Photoshop7.0を用いて風化による色調変化を測定することである。試験手順は、デジタルカメラによって蒸散試験1サイクルごとに供試体表面を撮影した。撮影時には、各写真の色の基準として赤、緑、白のプラスチック板を供試体とともに撮影し、色の基準をもとに各写真の撮影環境の違いを補正した。色調の補正には、Adobe Photoshop7.0を用い、色調変化を計測した。その際の色度表色系は $L^*a^*b^*$ 表色系を用いた。

3. 試験結果および考察

(1) 乾湿繰り返し試験

試験から得られた有効間隙率・含水比・体積減少率を図-6に示す。サイクルが進むごとに有効間隙率が大きくなった。これは乾湿履歴を与える回数が増えていくごとに表面がもろくなり欠落したこと、浸水の際に表面に存在していた粘土鉱物が多少こぼれ落ちたためであると考えられる。また、粘土鉱物および表面の欠落は、体積減少の原因とも考えられる。体積の減少は、10サイクルを越えると約1～6%もの減少がみられた。このような現象が起きると、含水比が小さな値を取るはずであるが、図-6を見ても分かるように、含水比も有効間隙率と同様に大きくなっている。これは、乾湿サイクルの繰り返しに供試体内部の水分は蒸発せずにそのまま残り、わずかな表面欠落では、含水比に大きく影響を与えないことに起因する。

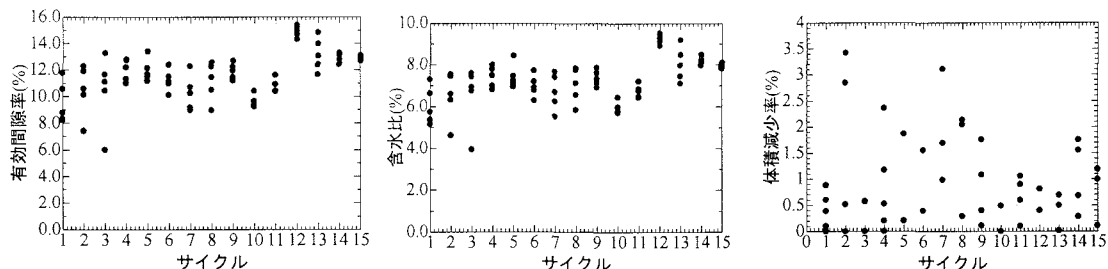


図-6 乾湿繰り返しによる有効間隙率，含水比，体積減少率の変化

(2) 凍結融解試験

試験から得られた有効間隙率・含水比・体積減少率を図-7に示す。乾湿繰り返し試験に比べて風化の進行速度が速く，サイクルが進むにつれて，有効間隙率の値が大きくなり，その値は3サイクル目で乾湿履歴を与えたものの約5.8倍にも及んだ。しかし，4サイクルを越えた時点で，有効間隙率の変化は見られず，ほぼ一定の値が得られた。

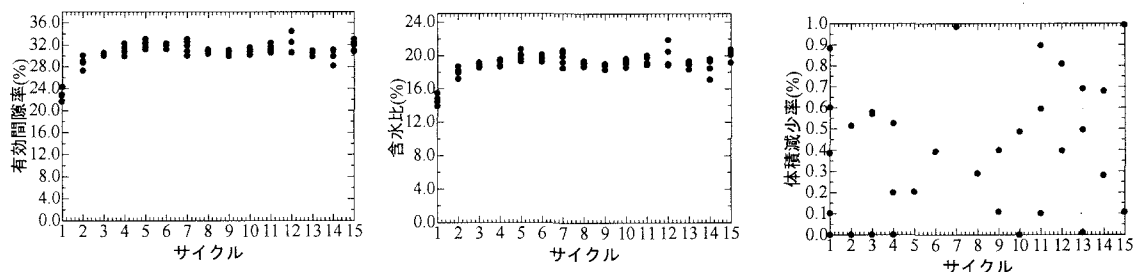


図-7 凍結融解による有効間隙率，含水比，体積減少率の変化

(3) 蒸散試験

荒目石は，サイクルが進むにつれて，蒸散量が減少する傾向が見られた。また，細目石は，サイクルの経過とは関係なく，1サイクルあたり約9gの水が蒸散をした。荒目石は，粘土鉱物である”みそ”が部分的にまとまって存在しているのに対し，細目石では，みそが細かく岩石内に存在している。この構造の違いが，蒸散量の異なる原因の1つとして考えられる。

(4) 針貫入試験

乾湿履歴または凍結融解履歴が与えられた供試体は，測定深度(3mm, 6mm, 9mm)が浅いほど深く貫入し，強度が低くなる傾向が見られた。表-1には，乾湿繰り返し試験および凍結融解試験の初期状態，1～15サイクルまでの最大貫入量とその一軸圧縮強度について示す。一軸圧縮強度は，初期状態と比較すると乾湿繰り返し後で約14分の1，凍結融解繰り返し後で約19分の1となり，風化により強度が非常に低下していることが分かる。

蒸散試験に用いた供試体は，風化サイクルが経過するにしたがって荒目石，細目石ともに強度低下がみられた。荒目石は細目石に比べて強度低下速度が約10倍となった。トルコ共和国カッパドキアの凝灰岩を対象とした現地調査の結果は，年数の経過により一軸圧縮強度がわずかに低下する傾向が見られた。強度低下がわずかにしか見られない原因の1つとして，表面欠落を繰り返しフレッシュな面が表面に露頭しているためであると考えられる。

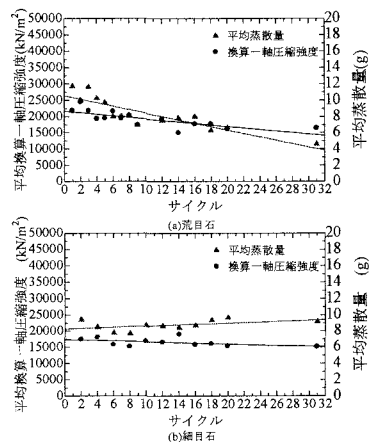


図-8 蒸散量と一軸圧縮強度

表-1 最大貫入量と一軸圧縮強度

	最大貫入量 (mm)	一軸圧縮強度 (kPa)
初期状態	0.6	463.5
乾湿繰り返し後	23.1	32.81
凍結融解後	22.1	24.66

(5) ポイントロード試験

図-9では0(初期状態)～15サイクルまでのポイントロード試験による一軸圧縮強度を示す。これより、乾湿繰り返し後は4サイクル目までに、凍結融解後は3サイクル目までに急激な強度の低下が見られる。それ以降のサイクルでは、急激な強度の低下がほとんど見られず、徐々に低下している。この原因としては、新鮮な岩石試料内で、初期サイクルでは破壊に至らない微細な亀裂が生じ、やがてそれらが伸張し相互に連結し合っ、乾湿繰り返しおよび凍結融解繰り返しを幾度か行った後、大きな亀裂になって強度低下・破壊に至ると考えられる。

(6) 分光測定試験

乾湿繰り返し後の色調変化は、初期サイクルで既に茶色を帯び、6サイクル目ではほとんど変化が見られなかった。7サイクル目では茶色・緑色が強く現れてきた。また、みそのまわりも黄色に近い茶に変化し、10サイクル目にはみそが完全に黄系の茶褐色になった。しかし、11サイクル以降は、灰色に近い部分の白色が強くなった。

凍結融解後の色調変化は、初期サイクルから3サイクルまで特に変化はなく、唯一みその部分およびその周辺部が薄い茶色を帯びてきた。4サイクル目では、乾湿繰り返し試験7サイクル後と非常に似た色調になった。その後は、ほとんど変化がなかった。

(7) 色調変化測定試験

荒目石、細目石ともにL*値とa*値はあまり変化が見られなかった。b*値とサイクルとの関係は図-10に示す。荒目石は18サイクルまでb*値が増加していき、その後はほぼ一定の値を取る。これに対し、細目石は21サイクルまでb*値が増加していき、その後一定の値を取る。色調が変化するにつれて強度の低下が見られたことより色調変化と強度には関係がある。

4. まとめ

本研究では、大谷石を対象に、乾湿繰り返し試験、凍結融解試験、蒸散試験を行うことで人工的に風化を与えた。また、人工的風化を与えた大谷石に針貫入試験、ポイントロード試験、分光測定試験、色調変化測定試験を行い、一軸圧縮強度と表面色調の

変化を関連付けることを目的に室内試験を実施した。トルコ共和国カッパドキア地方の現位置において凝灰岩に針貫入試験を実施した。以下にその結果から得られた知見を示す。

- (1) 乾湿繰り返し試験では、繰り返しサイクルを重ねるにつれて、有効間隙率、体積減少率が増加した。これは乾湿履歴を与える過程において、表面がもろくなり欠落したこと、浸水の際に表面に存在していたみそがこぼれ落ちたためであると考えられる。体積の減少に伴って、含水比が小さな値を取るはずであるが、含水比は有効間隙率と同様に増加した。この原因として、サイクルの繰り返しに供試体内部の水分は蒸発せずに残ること、わずかな表面欠落は含水比にさほど影響を与えないことが考えられる。
- (2) 凍結融解試験は、乾湿繰り返し試験よりも風化の進行が速く、有効間隙率は3サイクル目で乾湿履歴を与えたものの最大有効間隙率の約5.8倍にも及んだ。しかし、4サイクル以降は有効間隙率の変化は見られず、ほぼ一定の値が得られた。
- (3) 蒸散試験では、荒目石はサイクルの経過に伴って蒸散量が減少する傾向が見られた。細目石はサイクルの傾向

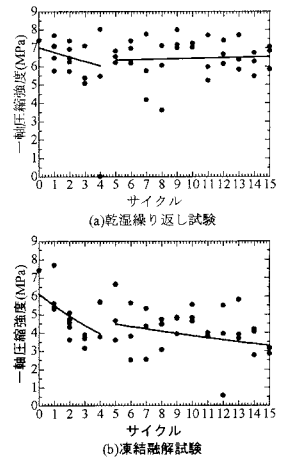


図-9 一軸圧縮強度の変化

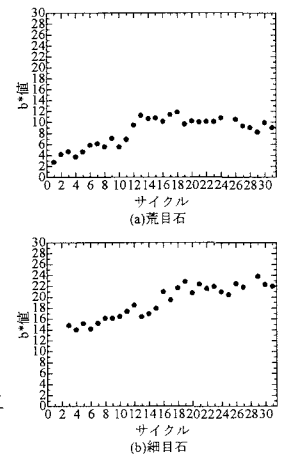


図-10 b*値の変化

とは関係なく1サイクルあたり9gの水分が蒸散をした。これは、荒目石ではみそが固まって存在しているのに対し、細目石では分散して存在していることが原因の1つであると考えられる。

- (4) 針貫入試験の結果から、乾湿繰り返し試験または凍結融解試験を行った供試体は、測定深度が浅いほど深く貫入し、強度が低い傾向が見られた。一軸圧縮強度を初期状態と比較すると、乾湿繰り返し後で約14分の1、凍結融解繰り返し後で約19分の1まで低下していることが分かった。蒸散試験に用いた供試体は、サイクルの経過にしたがって荒目石、細目石ともに強度低下が見られた。また、一軸圧縮強度と蒸散量の相関を調べると、荒目石については相関が見られたが、細目石については相関が見られなかった。このことから、荒目石の風化には、水の蒸散が支配的である。
- (5) ポイントロード試験結果より、乾湿履歴を与えた供試体は4サイクル目までに、凍結融解を与えた供試体は3サイクル目までに急激な強度低下がみられた。しかし、それ以降のサイクルでは、急激な強度低下は見られず、徐々に強度が低下していった。この原因としては、初期サイクルでは破壊に至らない微細な亀裂が生じ、それらが伸張し連結することによって、あるサイクルに達した後、大きな亀裂となり強度低下・破壊に至り急激な強度低下が発生すると考えられる。
- (6) 分光測定試験は、乾湿繰り返し試験後の供試体において、初期サイクルで茶色を帯び、その後6サイクル目まではほとんど変化が見られず、7サイクル目で茶色・緑色が強く現れ、10サイクル目ではみそが完全に黄系の茶褐色になった。11サイクル以降では、灰色がかかった部分の白色が強くなった。初期サイクルから3サイクル目まで、特に変化せず、みそ部分およびみそ周辺部が薄い茶色を帯びてきた。4サイクル目では、乾湿繰り返し試験7サイクル後と非常に似た色調しており、その後7サイクル目まではほとんど変化が見られなかった。以上より、みそ周辺部は、みそから離れた部分よりも風化の進行が速いと考えられ、また、凍結融解は、乾湿の繰り返しよりも風化の進行速度が速いと考えられる。
- (7) 色調変化測定試験では、荒目石、細目石ともに b^* 値の増加が見られた。荒目石は18サイクルまで b^* 値が増加していき、その後はほぼ一定の値を取った。これに対し、細目石では、 b^* 値は21サイクルまで増加していき、その後はほぼ一定の値を取った。分光測定器を用いずに、風化による色調の変化を測定できたことから、デジタルカメラとAdobe Photoshop7.0を用いた色調測定は有効であると言える。
- (8) トルコ共和国カッパドキアの凝灰岩を対象とした現地調査の結果は、年数の経過により一軸圧縮強度がわずかに低下する傾向が見られた。何百年と年数が経過しているのに強度低下がわずかにしか見られない原因として、表面欠落を繰り返しフレッシュな面が表面に露頭しているためであること、また、風化がある程度進行すると強度低下速度が小さくなることが考えられる。

5. 今後の課題

今後の課題として、実験サイクルと実時間の関係をより明確にするために、対称とする岩石のおかれていた環境を定量的に評価し、考慮することが必要である。また、乾湿繰り返し試験および凍結融解試験、蒸散試験により人工的に風化を促進させることができたが、サイクルを重ねることにより供試体内部における変化を調査する必要がある。

参考文献

- 1)一ノ瀬正友、松井紀久男、後藤研：岩石の水分履歴による強度特性の変化、資源・素材学会誌、Vol.108、No.1、1992。
- 2)福田正己、播磨屋敏生、原田鉦一郎：岩石の凍結融解による風化が基礎崩落に与える影響について、月刊地球、Vol.18、No.9、pp.574-578、1985。