

大谷石の風化に影響を与える 環境因子抽出に関する試み

菊池健太^{1*}・清木隆文¹

¹宇都宮大学大学院 工学研究科地球環境デザイン学専攻 (〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東 7-1-2)

*E-mail: mt096425@cc.utsunomiya-u.ac.jp

本研究では、屋外暴露試験により大谷石の風化に伴う表面の色調、強度の変化を確認した。また、大谷石が置かれる自然環境が風化に与える影響を分析した。その結果、屋外暴露試験の結果より、外気に曝されている環境条件下では、雨風などの外的要因による乾燥湿潤の繰り返しによって試料の表面は凹凸が増えて多孔質になる一方で、乾燥によって表面の固結度が増加することで、換算一軸圧縮強さは著しく低下しないと考えられる。また、このような環境条件下では色調が緑色系から赤色系へ大きく変化することが分かった。以上の知見をもとに、風化に伴う表面の色調、強度の変化と環境条件との関係を分析し、風化を促進させる環境要素の抽出を試みた。

Key Words : Oya tuff, weathering process, uniaxial compression strength, colour tone, exposure test

1. はじめに

日本各地で岩石の凍結融解に起因する岩盤等の斜面崩壊、建造物基礎が膨れるなどの盤膨れ、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¹⁾。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、耐火性に優れていることから、様々な用途に利用されてきた。しかし、大谷石は比較的軟らかく、加工しやすい一方で、風化の進行が早く、それに伴い強度低下や変色、岩石表面の欠落がよくみられる。建設石材として使用されてから、数年経過した大谷石の表面には、凹凸や穴ができ、強度低下につながっている。本研究では、屋外暴露試験により大谷石の風化に伴う表面の色調、強度の変化をみた。また、大谷石が置かれる自然環境が風化に与える影響を分析した。その結果、屋外暴露試験の結果より、外気に曝されている環境条件下では、風雨などの外的要因による乾燥湿潤の繰り返しで試料の表面は凹凸が増えて多孔質になる一方で、乾燥によって表面の固結度が増加することで、換算一軸圧縮強さは著しく低下しないと考えられる。また、このような環境条件下では色調が緑色系から赤色系へ大きく変化することが分かった。以上の知見をもとに、風化に伴う表面の色調、強度の変化と環境条件との関係を分析し、風化を促進させる環境要素の抽出を試みた。

2. 大谷石の概要

(1) 大谷石について

栃木県宇都宮市の中心部から北西に7kmに位置する大谷町は、標高200mの丘陵地帯にある。この地域の地質は足尾帯に属し、中・古生代のチャート・砂岩・頁岩などから成る古代三期の基盤岩、大谷層から成る新三基層、宝木礫層と北関東ローム層(宝木粘土層)から成る第四期の洪積層で構成されている。大谷石は、今から2000万年前の新生第三紀中新世の前半に、流紋岩質の海底火山の爆発により噴出し、火山灰や軽石を含んだ火山灰質のものが、海水中に堆積し凝結してできた凝灰岩の一種である。また、みそと呼ばれる、含水量の多い沸石及びモンモリロナイトの粘土鉱物から成っている軟らかい褐色の部分が斑点状に含まれている。大谷石は、軟らかく加工が容易で、耐震性、耐火性、防湿性に優れているが、非常に風化しやすく、とくにみそ部分は劣化して欠落しやすい²⁾。

(2) 大谷石の風化の種類について

既往の研究³⁾より、大谷石の風化は、

- i) 赤褐色に変色
- ii) 白色粉状あるいはかさぶた状に肌落ち
- iii) ある一定の深さで板状に肌落ち

に大別される。

(3) 観察及び試験で用いた試料について

大谷石採石地下空間内の壁面及び切り出して間もない淡緑色の新鮮な試料、表面が乾燥した試料、切り出して1年経過し変色した試料を用いた。

3. 試験方法について

(1) 針貫入試験

この試験は軟岩に針を貫入することで針貫入勾配 NP 値を測定し、表面の換算一軸圧縮強さを求めるものである。使用機器は、軟岩ペネトロ計 SH-70(丸東製作所)である。25 回測定を行い、大小 3 個の測定値は平均せず 19 個の測定値の平均値を一般的な値で理解しやすくするために、一軸圧縮強さに換算する(以下、換算一軸圧縮強さ)。

(2) 分光測定試験

この試験は大谷石表面の風化程度を色調で判別するために、色調を測定するものである。使用機器は、分光測定器 CM-508i(ミノルタ社)である。分光測定器の色度表色系は $L^*a^*b^*$ である。ここに、 L^* 値は黒(0)白(100)に対応し、 a^* 値は赤(+)緑(-)に、 b^* 値は黄(+)青(-)の色調値に対応する。

(3) X 線粉末回折試験

大谷石が風化することにより、成分が変化していると考え、大谷石を粉碎して粉末試料を作成し、X 線粉末回折試験を行い、鉱物組成を分析した。使用機器は、粉末 X 線回折装置 RINT2100(リガク)である。

4. 屋外暴露試験について

(1) 用いた試料と試験期間、与える環境条件について

a) CASE1

大谷石地下採石場より採取してきた大谷石を、 $13 \times 6 \times 7$ cm の直方体に成形したものを 1 つの条件につき 5 個用意し、計 30 個の試料を用いて試験を行った。試験期間は冬季 12 月～1 月の 2 ヶ月間である。試料に与える環境条件は、そのままの状態(以下、条件①)(図-1)、水分を過剰に与えた状態(以下、条件②)(図-2)、日陰に置き、暗幕をかけ、日射を遮った状態(以下、条件③)(図-3)、日陰に置き、暗幕をかけ、日射を遮り、水分を過剰に与えた状態(以下、条件④)(図-4)、圧縮性のビニールカバーで雨水及び外気の接触を遮った状態(以下、条件⑤)(図-5)、日陰に置き、暗幕をかけ、圧縮性のビニールカバーで雨水及び外気の接触を遮った状態(以下、条件⑥)(図-6)の 6 条件である。

b) CASE2

乾燥した大谷石試料を $5.5 \times 5.5 \times 7.5$ cm の直方体に成形したもの 1 つの条件につき 4 個用意し、計 16 個の試料を用いた。試験期間は冬季 11 月～1 月初旬までの約 2 ヶ月間である。試料に与える環境条件は、そのままの状態(以下、条件①)(図-7)、ビニールカバーとサランラップで雨水を遮った状態(以下、条件②)(図-8)、日陰に置き日光を遮った状態(以下、条件③)(図-9)、蒸留水で過剰に水分を与えた状態(以下条件④)(図-10)の 4 条件である。

(2) 測定項目、測定方法について

測定項目は、換算一軸圧縮強さ、色調値、成分であり、それぞれ針貫入試験、分光測定試験、X 線粉末回折試験によって、測定を行った。



図-1 条件①



図-2 条件②



図-3 条件③



図-4 条件④



図-5 条件⑤



図-6 条件⑥



図-7 条件①



図-8 条件②'



図-9 条件③'



図-10 条件④'

5. 屋外暴露試験の結果と考察

空気水分量は、ある温度で気体の単位体積(1m³)に含まれる水蒸気の質量(g)を表す。空気水分量 D (g/m³)の算出には、式(1)⁵⁾を用いた。

$$D = \frac{m_v}{V} = \frac{U \cdot e_w}{100} \cdot \frac{M_v}{RT} \quad (1)$$

ここに、

e_w : 飽和水蒸気圧(Pa)

$$e_w = 6.11 \times 10^{7.14t/237.3} + t \times 100$$

m_v : 湿潤空気中の水蒸気の質量 (g)

V : 湿潤空気の体積 (m³)

U : 相対湿度 (%)

M_v : 水のモル質量 (18.0153g/mol)

R : 気体定数 (8.31451J/K・mol)

T : 絶対温度 (K)

t : 温度 (°C)

(1) CASE1

a) 暴露時間に伴う色調値の変化について

条件①、②の試料は、試験開始から2週目から8週目にかけて色調値 a^* が緑色系から赤色系への変化が大きい。条件③の試料は4週目から8週目までの変化が大きい。一方、条件④、⑤、⑥の試料は、変化が小さい(図-11)。条件①、②の試料は常に、雨水による水分の出入りが制限されない環境条件に設定され、最も天候環境の影響を受けやすい。特に色調値 a^* が緑色系から赤色系への変化が大きかった。また、試験開始から2週目までは空気水分量の変化が3~10 g/m³の間で推移していたのが、2週目以降は1~8 g/m³の間で推移している。そのため、乾燥の影響

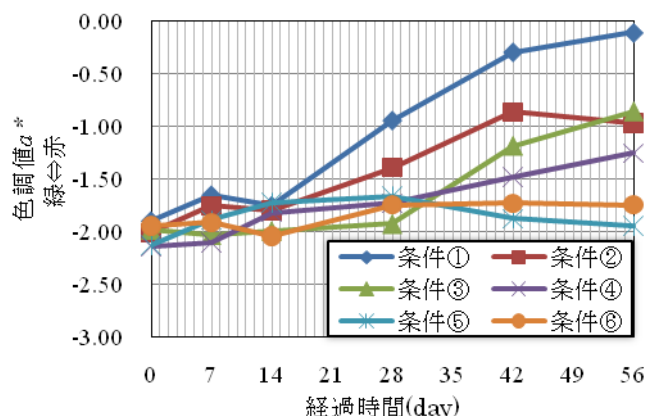


図-11 色調値 a^* と時間経過の関係(CASE1)
(条件別に試料5個の平均値をプロット)

を受け、変化が大きくなったと考えられる。条件③の試料においても、4週目にかけての変化が顕著である理由として、晴天が続いていたことが影響していると考えられる。条件①、②の試料ほど、直接乾燥・日射の影響は受けないものの、空気水分量の変化が小さくなった(図-13)ことにより、長時間をかけて変化したと考えられる。条件④の試料は、条件③に比べて過剰に水分を与えているため、色調値 a^* の変化が小さい。そのため、水分が色調値 a^* に大きく影響していると考えられる。条件⑤、⑥の試料は、カバーをし、雨水を遮った状態であり、天候環境の変化による影響を受けにくかったと考えられる。以上より、色調値 a^* の変化に大きく影響しているのは、天候環境による湿度変化によるものであると考えられる。特に色調値 a^* が緑色系から赤色系に変化する要因の一つとして、空気水分量の変化幅が2週目以降約2 g/m³下降していることから、この空気水分量の変化に伴う岩石表面の乾燥が考えられる。

b) 暴露時間に伴う換算一軸圧縮強さの変化について

条件①、②に対して、条件③、④、⑤の試料は換算一軸圧縮強さ(以下、強度)の低下が大きい(図-12)。これらの強度の変化の違いは、雨水や外気との接触の有無や日射の有無などの環境条件の違いによる乾湿繰り返し差が原因であると考えられる。条件①、②の試料は常に、雨水による水分の出入りが制限されないのに対し、条件③、④、⑤、⑥は水分の出入りが制限されている。天候環境は試験開始から2週目にかけて雨天の日が4日間あり、空気水分量の変化が大きいことが確認できた(図-13)。雨水の影響を直接受ける条件①、②の試料の表面は乾湿繰り返しによって凸凹になり、ミソの欠落などが観察された。その一方で、試料の表面が乾燥により再び硬化したことで、強度が大きく低下しなかったと推定される。

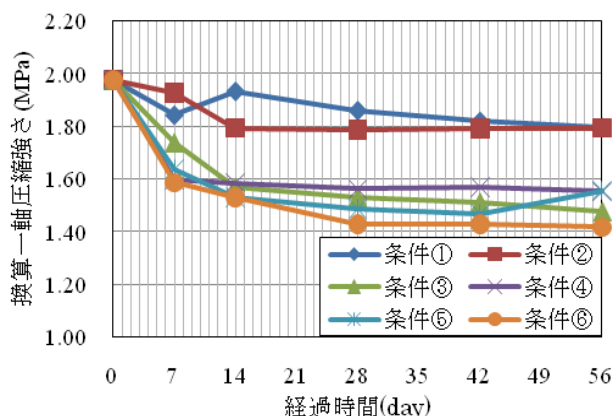


図-12 換算一軸圧縮強さと時間経過の関係(CASE1)
(条件別に試料5個のデータをプロット)

表-1 条件ごとの気候環境の影響と色調値 a^* の変化について (CASE1)

環境条件	水分による影響		温湿度変化による影響		日射による影響	色調値 a^*
	水分の出入り	強制的な水分	温度変化	湿度変化	日射	
条件①	○	×	○	○	○	緑→赤
条件②	○	○	○	○	○	緑→赤
条件③	△	×	△	△	×	緑→赤
条件④	△	○	△	△	×	緑→赤
条件⑤	×	×	○	×	○	緑…赤
条件⑥	×	×	△	×	×	緑…赤

気候環境の影響：○(激しく影響あり) △(影響あり) ×(影響なし)

色調値：⇒(変化が大きい) →(変化) …(変化が小さい)

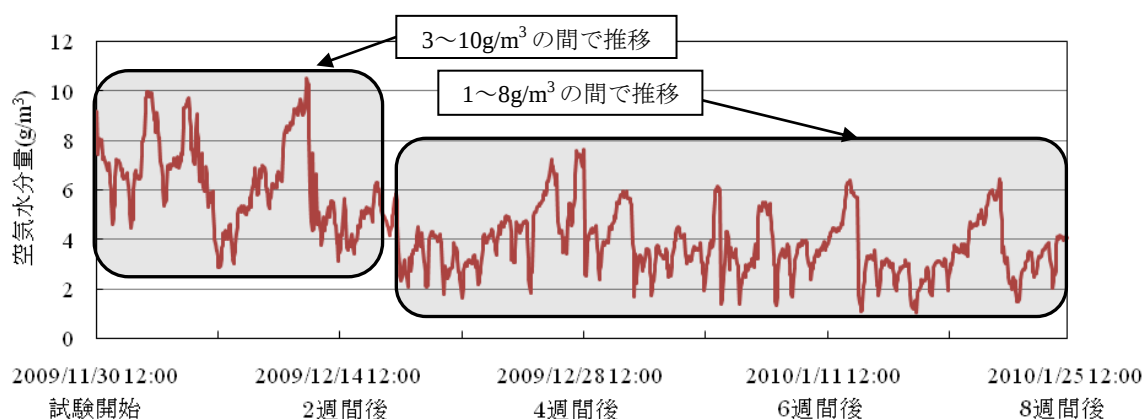


図-13 暴露時間に伴う空気水分量の変化の推移(CASE1)

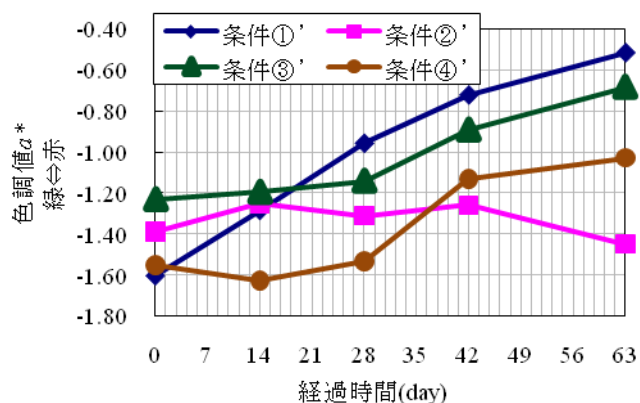


図-14 色調値 a^* と時間経過の関係(CASE2)
(条件別に試料 4 個の平均値をプロット)

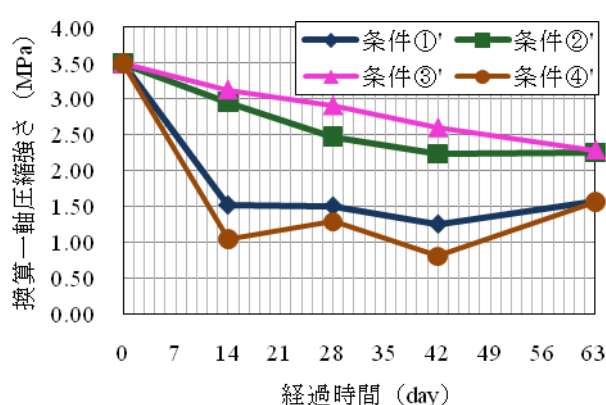


図-15 換算一軸圧縮強さと時間経過の関係(CASE2)
(条件別に試料4個のデータをプロット)

表-2 条件ごとの気候環境の影響と色調値 a^* の変化について(CASE2)

環境条件	水分による影響		温湿度変化による影響		日射による影響	色調値 a^*
	水分の出入り	強制的な水分	温度変化	湿度変化	日射	
条件①'	○	×	○	○	○	緑⇒赤
条件②'	×	×	○	×	○	緑⇒赤
条件③'	△	×	△	△	×	緑→赤
条件④'	○	○	○	○	○	緑→赤

気候環境の影響：○(激しく影響あり) △(影響あり) ×(影響なし)

色調値：⇒(変化が大きい) →(変化) …(変化が小さい)

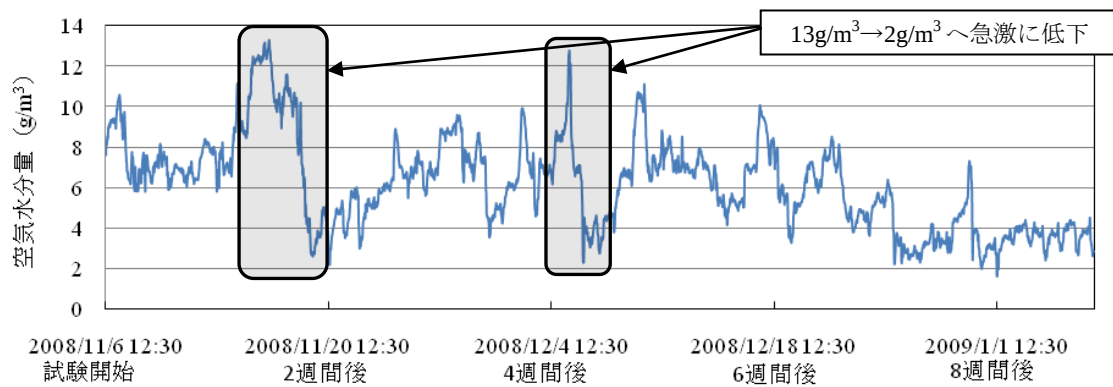


図-16 暴露時間に伴う空気水分量の変化の推移 (CASE2)

(2) CASE2

a) 暴露時間に伴う色調値の変化について

分光測定試験の結果、条件①'、条件③'、条件④'の試料は、時間経過に伴う a^* 値の緑色系から赤色系への変化が見られた。この変化が著しかったのは条件①'の試料であった。一方最も a^* 値の変化が小さかったのは、条件②'の試料であった(図-14)。また、条件②'の試料以外は、屋外での暴露時間の経過に伴って、色調値 a^* の緑色系から赤色系への変化が見られた。さらに、実験期間中の空気水分量の変化を見てみると試験開始2週目付近と4週目付近で空気水分量の変化が著しく、その後も変化はあるが2週目付近、4週目付近で変化は大きくない(図-16)。このことから、条件①'の試料は2週目付近、4週目付近の空気水分量の変化の影響による乾燥の影響を受けて変色したと考えられる。条件③'、条件④'の試料も条件①'のように大きく変化してはいないが2週目以降緑色系から赤色系へ変化していることから同じく乾燥の影響によるものと考えられる。

b) 暴露時間に伴う換算一軸圧縮強さの変化について

条件①'と条件④'の試料は、試験開始から2週目にかけて試料表面の換算一軸圧縮強さが低下した。また、条件②'の試料と条件③'試料は、他の二つの条件に比べて換算一軸圧縮強さの低下量が小さく、時間経過に伴う変化はなだらかであった(図-15)。CASE1と異なり、試料表面が天候環境の影響を受けやすい条件である条件①'、条件④'が試験開始から2週目にかけて著しく強度が低下する傾向を示したのは、CASE1と比べて試験開始から2週目にかけての空気水分量の最高値が高いことが理由と考えられる。これは、試料表面がCASE1の場合よりも湿っていたため表面が軟らかくなったことが原因と推定される。一方で条件②'や条件③'の試料は、CASE1の場合と同様にカバーがされている条件や日陰であることから、乾燥の影響による表面の硬化が起こりにくく、また条件①'や条件④'に比べると天候の影響を受けにくい条件であるため、強度の低下量が小さく、その変化もなだらかであったと

考えられる。

6. まとめ及び今後の課題

(1) 屋外暴露試験の結果からみる風化環境因子の検討

岩石の風化作用には、物理的(機械的)風化作用、化学的風化作用、生物風化作用の三つに分類され、物理的風化作用には、除荷作用、日射風化(熱風化)、乾湿風化、塩類風化、凍結風化・凍結破砕などがあり温度変化や氷・塩類の結晶化などにより岩石に徐々に細かく破壊する現象が進行するプロセスであり、この作用で岩石は分解・破壊されてゆく化学的風化作用は、岩石中の成分と空気、雨水、加水分解、溶解、酸化などの諸作用によって岩石の化学的性質を変化させる。生物風化作用は有機体によって行われるものであり、その作用の仕方によって、何れかに分類される。一般には、これらの風化作用は単独で作用するより、複合して起こることが多い⁵⁾。大谷石の風化現象の場合は、物理学的風化作用と化学的風化作用が複合して起こっていると考えられる。また、屋外暴露試験の結果より、大谷石の風化に影響を与える環境因子として温度・湿度の変化、雨水による水分の出入り、日射などが考えられ、これらの因子が複合して物理学的風化作用や化学的風化作用を岩石にもたらし、風化現象を引き起こしていると推定される。さらに、屋外暴露試験の結果より、岩石表面の変色や強度の変化の要因として天候環境による湿度変化に伴う乾燥作用が考えられる。

よって、これらの環境因子のなかでも最も大谷石表面の変色や強度の変化に影響を与え、風化現象を引き起こす要因は湿度変化であると考えられる。また、空気水分量の変化の推移と色調変化の関係が整理すると、CASE1の場合、試験開始2週目までの空気水分量の変化の幅と2週目以降の変化の幅では 2g/m^2 の差がある。CASE2の場合では、2週目付近、4週目付近で空気水分量が 12g/m^3 から 2g/m^3 まで低下しており、この変化の幅の差や、急激な空気水分量の変化が、色調変化に関連があると考えられる。さ

らに、空気水分量と強度の関係についても整理すると、CASE1の場合、天候環境の影響を受けやすい条件下の試料で、2週目以降に強度の低下がみられることから、空気水分量が大きく変化した2週間の後にかけて、強度が時間差を持って低下したと考えられる。一方CASE2の場合、天候環境の影響を受けやすい条件下にある試料が、2週目付近の空気水分量の急激な低下によって、即座に強度を低下する傾向を示している。以上のことから、空気水分量の変化幅が暴露時間の経過と共に緩やかに変化していく場合、空気水分量の変化と時間差を持って強度が変化するが、急激に空気水分量に変化する場合、即座に強度低下を起こすと考えられる。

(2) 今後の課題

大谷石の風化に伴う変色や強度低下の原因究明には、物理的風化・化学的風化の視点からみた大谷石の風化メ

カニズムのさらなる詳細な検討が望まれ、環境条件の定量化、地上環境における風化条件の再現について検討が必要である。

参考文献

- 1) 小林靖：岩石の風化に伴う強度・組成の変化に関する研究 平成12年度宇都宮大学卒業論文。
- 2) 中村洋一，松居誠一郎，鈴木陽雄：宇都宮市大谷付近の地質，宇都宮大学教育学部紀要第2部，31，宇都宮大学教育学部，pp.105-116，1981。
- 3) 佐藤陽，清木隆文：風化による大谷石の構成成分と表面色調への影響及び強度変化に関する検討，第12回岩の力学国内シンポジウム，6ps，CD-ROM，岩の力学連合会，2008。
- 4) 稲松照子：湿度のおはなし，日本規格協会，1997。
- 5) 松倉公憲：地形変化の科学－風化と侵食，朝倉書店，2008。

CONSIDERATION TO ENVIRONMENTAL FACTORS AFFECTING WEATHERING OF OYA TUFF

Kenta KIKUCHI and Takafumi SEIKI

In this study the authors confirmed that the change of color tone and strength on the surface on weathering process of Oya tuff by exposure test. Additionally, they analyzed influence that environment in which weathering process gave to Oya tuff. It shows that inferred uniaxial compression strength doesn't decrease remarkably because while the surface of samples increases the roughness and the porosity, the stiffness on the surface increases by dryness under an environmental condition repeating between humid and dry state according to the influence of wind and rain. Color tone changed to reddish from greenish under the environmental condition.