

水分変化に伴う大谷石の風化メカニズムの検討

宇都宮大学大学院 学生会員 ○菊池健太
宇都宮大学大学院 正会員 清木隆文

1. はじめに

大谷石(流紋岩質熔結凝灰岩)は、栃木県宇都宮市大谷町で産出される石材として、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、大谷石は硬岩と比較しても岩質が軟らかく加工しやすい反面、地上環境では風化の進行が早く、それに伴う強度低下や変色、岩石表面の欠落が問題となっている。また、大谷石の構造については、既往の研究¹⁾より、主要鉱物は単斜プテロル沸石、曹長石、灰長石等であることが分かっているが、大谷石が置かれる自然環境によってどのような影響で風化し、劣化に至るメカニズムは明確になってはいない。また、既往の研究では、乾湿繰返しによる色調変化や含水状態における大谷石基質部の強度変化について分析がなされてきた。そこで、本研究は、水分変化による風化メカニズムについて検討を行うことを目的とする。具体的には、屋外暴露試験や一定環境下での風化試験を行い、それぞれの色調、強度の変化の過程と水分変化の関係について分析を行った。

2. 試験方法と試験で用いた試料について

(1) 試験方法について

a) 針貫入試験

この試験は針貫入試験器を用いて、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。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。

b) 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。本研究で用いた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。

c) 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。

(2) 試験で用いた試料について

大谷石地下採石場より採取してきた、切り出して間もない新鮮な試料、表面が乾燥した試料を用いて試験を行った。

3. 屋外暴露試験について

(1) 試料、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、13×6×7 cmの直方体に成形したものを一つの条件につき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ヵ月間である。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)、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5.5×5.5×7.5cmの直方体に成形したものを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ヵ月間である。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ップで雨水を遮った状態(以下、条件②')(図-8)、日陰に置き日射を遮った状態(以下、条件③')(図-9)、水分を過剰に与えた状態(以下、条件④')(図-10)の4条件である。



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

キーワード 大谷石, 風化, 換算一軸圧縮強さ, 色調, 屋外暴露試験

連絡先 〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東 7-1-2 宇都宮大学大学院工学研究科 E-mail : mt096425@cc.utsunomiya-u.ac.jp



図-7 条件①'



図-8 条件②'

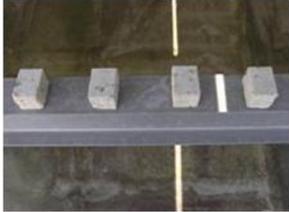


図-9 条件③'



図-10 条件④'

(2) 測定項目、測定方法について

測定項目は、色調値、換算一軸圧縮強さ、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。

4. 屋外暴露試験の結果と考察

(1) CASE1

a) 暴露時間に伴う色調の変化について

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。(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 $3\sim 10\text{g/m}^3$ の間で推移していたのが、2週目以降は $1\sim 8\text{g/m}^3$ の間で推移している(図-13)。そのため、乾燥の影響を受け、変化が大きくなったと考えられる。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 2g/m^3 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) 暴露時間に伴う強度の変化について

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たことが確認できた(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。

(2) CASE2

a) 暴露時間に伴う色調の変化について

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(図-14)。また、試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週目付近程変化は大きくない(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だと考えられる。

b) 暴露時間に伴う強度の変化について

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。

5. 一定環境下での風化試験について

(1) 用いた試料と試料の設置場所について

大谷石地下採石場より採取した大谷石を、 $10\times 10\times 10\text{cm}$ の立方体に成形し、試験試料とした。設置環境は宇都宮大学地域共生センター地下室(以下、地下室)(温度 20°C 、湿度 80%)、宇都宮大学建設棟資料保管室以下、資料保管室(温度 20°C 、湿度 45%)、宇都宮大学建設棟第二実験室測定室(以下、測定室)(温度 20°C 、 60%)、の3箇所に試料を5個ずつ設置した。

(2) 測定、観察項目と測定方法について

測定項目は色調値、換算一軸圧縮強さで、それぞれ分光測定試験、針貫入試験により測定を行った。また、測定の際に岩石測定面の写真を撮影し、表面の観察を行った。なお、今回示す色調値、換算一軸圧縮強さの測定データは試験開始から2週目までのものである。

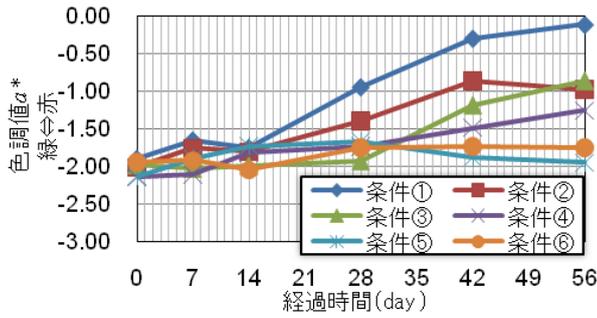


図-11 色調値 a^* と時間経過の関係(CASE1)

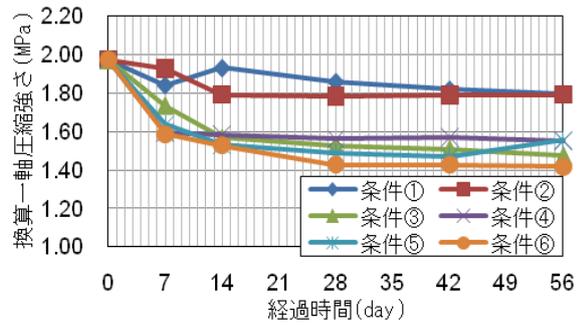


図-12 換算一軸圧縮強さと時間経過の関係(CASE1)

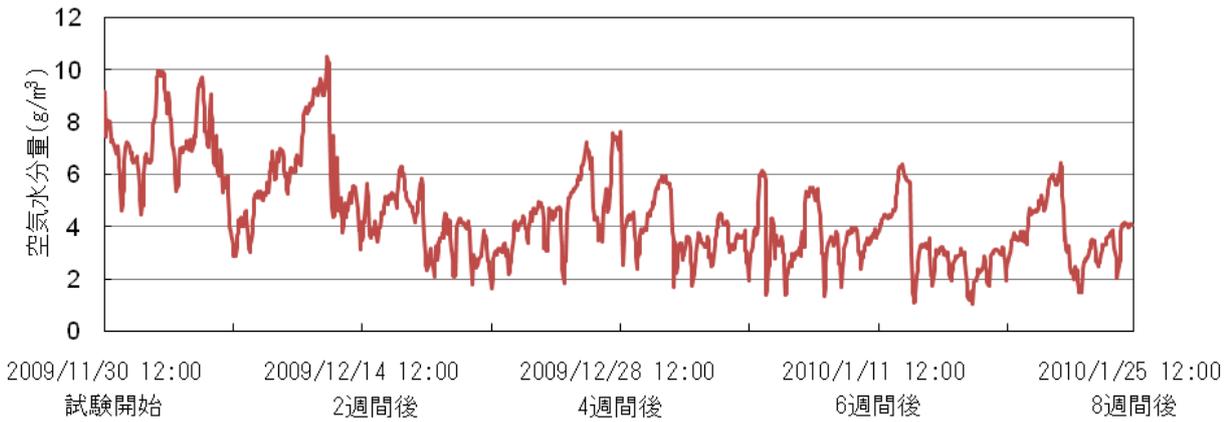


図-13 暴露時間に伴う空気水分量の変化の推移(CASE1)

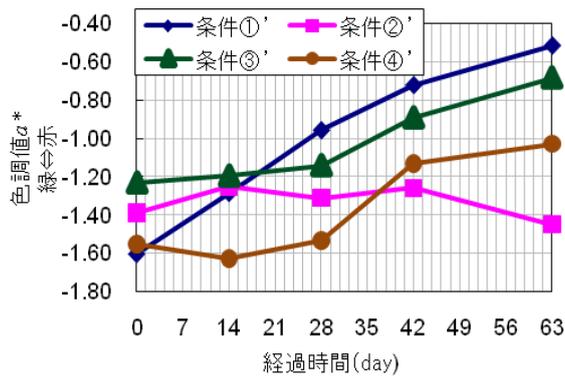


図-14 色調値 a^* と時間経過の関係(CASE2)

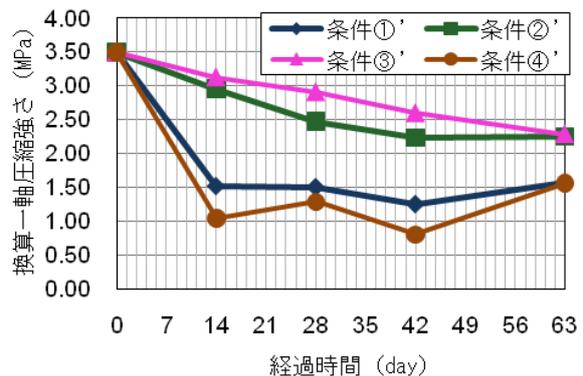


図-15 換算一軸圧縮強さと時間経過の関係(CASE2)

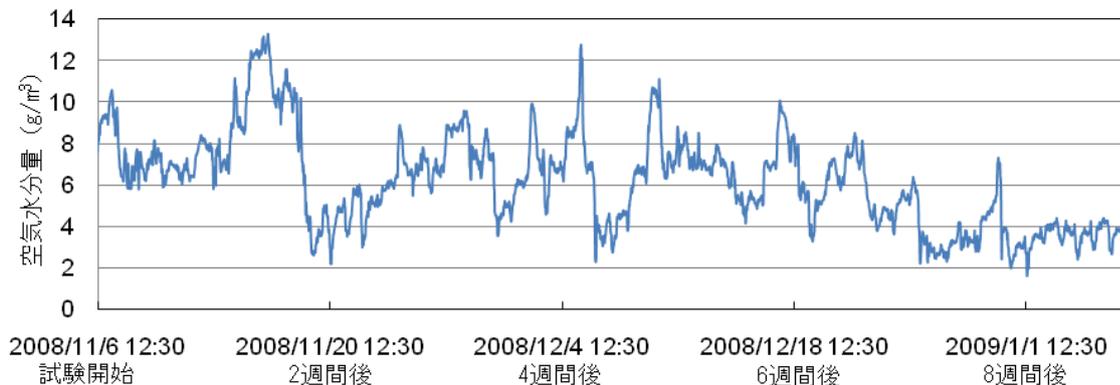


図-16 暴露時間に伴う空気水分量の変化の推移(CASE2)

6. 一定環境下での風化試験結果と考察

(1) 色調値の変化について

地下室，資料保管室，測定室の3箇所を設置したいずれの試料も色調値 a^* は緑色系から赤色系への変化は見

られなかった(図-17). このことから，一定環境下では，短期間での色調値の変化は見られず，また，温度や湿度の条件が異なる場合でも，色調値の変化に短期間では差は生じないということが分かった.

(2)強度の変化について

地下室に設置した試料に関しては、経過時間に伴う換算一軸圧縮強さの低下の傾向が見られた(図-18)。しかしながら、屋外暴露試験で用いた試料のように、著しい強度低下は見られなかった。一方、資料保管室や測定室に設置した試料では、地下室に設置した試料のように強度低下の傾向は見られなかった。測定面の観察と貫入量の変化の関係に注目すると、地下室や測定室に設置した試料は、外来岩片や鉱物等の密集部において経過時間に伴う貫入量の増加は見られなかったが、基質部では貫入量が増加した(表-1)。このことから、基質部では、空気中に含まれる水分の供給により、強度が低下し、貫入量が増加したと推測される。

7.まとめと今後の課題

(1)異なる環境での色調、強度の変化について

屋外暴露試験は、空気水分量の変化幅の低下や急激な低下等特徴的な変化が色調変化の影響し、また、その空気水分量の変化に伴う乾燥や降雨による水分供給によって、試料の強度が変化すると考えられる。一定環境下での風化試験は、温度や湿度がほぼ一定の環境であるので、短期間では色調値は変化しないが、強度は異なる温度・湿度条件の環境下の変化が見られた。特に、基質部では経過時間に伴う貫入量が増加した。以上のことから水分供給や乾燥の変化により、大谷石の色調変化が起こると考えられる。また、水分供給による基質部の強度変化が大谷石試料の強度変化を引き起こすと考えられる。

(2)水分変化に伴う風化メカニズムの検討

既往の研究より、大谷石基質部では絶乾状態よりも飽和状態の方が、強度が小さく、含水状態によって強度に違いがあること、飽和状態から絶乾状態へと変わった際に、基質部では乾燥収縮が起こっていることが報告されている。このことから、大谷石の風化による強度低下は、降雨や湿度変化による水分供給により基質部の結合力が弱まることで、起こると考えられる。また、大谷石は優れた加工性を有する反面、急速に風化して剛性が低下する特徴をもつが、これと同様の性質を呈する来待砂岩についても、風化過程で、岩石中に含まれる鉄分の酸化により、色調が褐色に変化している²⁾。これは、岩石中の鉄分が酸化し、ゲータイト(針鉄鉱)が生成されていることが報告されている。また既往の研究³⁾より、大谷石に含まれるミソ周辺は、暴露時間が経過することで、ミソ同士をつなぐように褐色に変色することが報告されている。これは、ミソに含まれる膨張性粘土鉱物であるモンロリロナイトが変色することが色調変化の要因の一つであることが報告されている。以上より、大谷石の風化に伴う色調の変化は、大谷石中に含まれる鉄分の酸化によって、岩石表面を褐色に変化させる鉱物を生成することが原因と考えられる。強度、色調の変化は、いずれの場合においても、大谷石試料の含水量の変化が原因であると考えられる。そこで、これらの関係を確認するために、水分変化に伴う大谷石基質部やミソの変状把握、大谷石中の鉄分を含む鉱物の特定、風化による大谷石の構造変化を分

析し、確かめる。

参考文献

- 1) 菊池健太, 佐藤陽, 清木隆文: 暴露試験による大谷石の風化発生環境に関する検討, 第39回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, 土木学会, pp202-207, 2010.
- 2) 横田修一郎他: 色彩値変化からみた来待石の風化速度, 応用地質, 第47巻, 第4号, pp.188-195, 2006.
- 3) 菊池健太, 関川浩平, 清木隆文: 風化に伴う大谷石の色調変化の原因究明の試み, 土木学会第65回年次学術講演概要集, pp407-408, 2010.

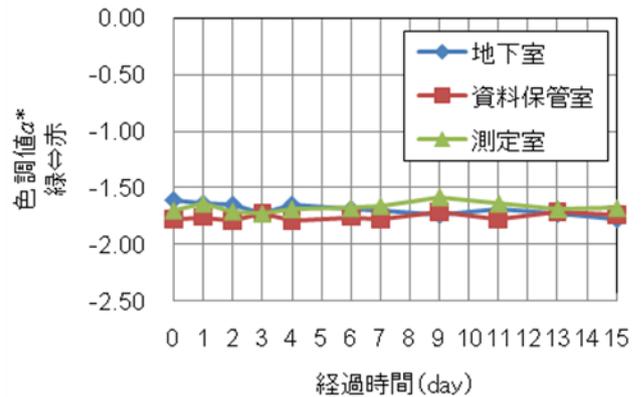


図-17 色調値 a^* と時間経過の関係

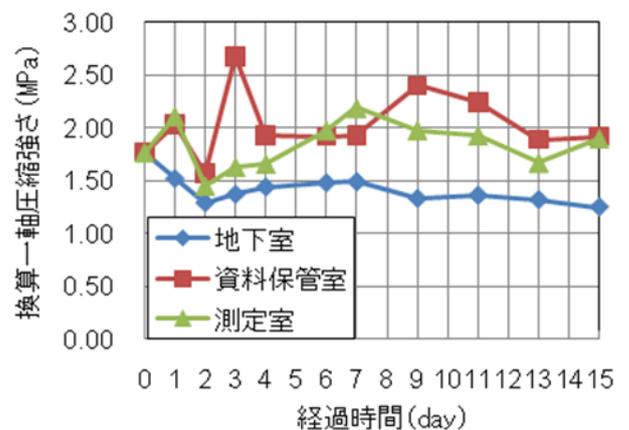


図-18 換算一軸圧縮強さと時間経過の関係

表-1 測定面の構成と針貫入量の変化の関係

| | 貫入量の平均値(mm) | |
|--------------|-------------|---------|
| | 試験開始前 | 試験開始2週目 |
| 外来岩片や鉱物等の密集部 | 1.5 | 1.6 |
| 基質部 | 1.6 | 2.9 |