

暴露試験による大谷石の 風化発生環境に関する検討

菊池健太^{1*}・佐藤陽²・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)

²宇都宮大学大学院 工学研究科学際先端システム学専攻 (〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東7-1-2)

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

採石後経過年数の異なる試料に対して、針貫入試験及びX線粉末回折試験を行い、換算一軸圧縮強さ及び鉱物組成の違いをみた。加えて、乾燥した大谷石を対象に、屋外暴露試験を行い、換算一軸圧縮強さ、色調及び鉱物組成の変化をみた。これらの試験結果から、大谷石はある時期までは時間経過に伴う強度低下がみられるが、それ以降は大谷石の自硬性などにより、新鮮なものよりも強度が高くなると考えられる。また、暴露試験より夏季・冬季のいずれの環境下でも、空気中の湿度の変化や降雨による水分の出入りが強度低下や変色に影響を及ぼしていることが明らかとなった。

Key Words : oya tuff, weathering process, uniaxial compression strength, color tone, mineral components, 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、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、採石後経過年数の異なる試料に対して針貫入試験、X線粉末回折試験を行い、風化に伴う換算一軸圧縮強さ、鉱物組成の変化を分析した。さらに、乾燥した大谷石試料を対象に、異なる環境下での換算一軸圧縮強さ、色調及び成分の変化の違いを見るための屋外暴露試験を行った。本研究では、大谷石石材の風化現象について調査を行うとともに、屋外暴露試験を行い、風化の発生過程を検証することとで、風化の発生環境を抽出することを目的とした。ここで、風化とは、岩石が空気中にさらされて軟らかな含水物質に変化する過程と定義する。

2. 大谷石の概要

(1) 大谷石について

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 2,000 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、軟らかいので加工がしやすく、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、特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

既往の研究より、大谷石の風化は、

- a) 赤褐色に変色
- b) 白色粉状あるいはかさぶた状に肌落ち

c)ある一定の深さで板状に肌落ち
に大別される³⁾。
本研究では、特に変色する風化に着目した。

(3) 観察及び試験で用いた試料について

まず、風化による大谷石の変色と採石後の経過年数の関係について検証するため、大谷石地下採石場の立坑付近の、採石後30年経過した壁面、中間地点の採石後10年経過した壁面、切り出して間もない新鮮な壁面を対象とし、針貫入試験を行った。また、これらの3箇所の壁面からX線粉末回折試験用試料を削り取った。また、大谷石地下採石場から切り出して間もない新鮮な大谷石試料を用いて、屋外暴露試験を行い、試験開始前の試料、試験開始後2週間、4週間、6週間、9週間に回収した試料についてそれぞれ換算一軸圧縮強さ、色調値の測定及び鉱物組成の分析を行った。試験開始前の換算一軸圧縮強さは、暴露する試料と同じサイズの試料を別に作成し、その試料に対して行った針貫入試験の結果を用いた。

3. 試験方法について

(1) 薄片観察

新鮮な大谷石試料と切り出して10年経過した大谷石試料を用いて、薄片試料を作成し、偏光顕微鏡による微細構造観察を行った。オープンニコルで有色鉱物か無色鉱物かを判断し、クロスニコルによる干渉色や形状などから鉱物を特定した。

(2) 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軸圧縮強さに換算する(以下、換算一軸圧縮強さ)。

(3) 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。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。

(4) 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、大谷石を粉砕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。

4. 冬季屋外暴露試験について

(1) 用いた試料と与える環境条件、実施期間について

試験には、乾燥した大谷石試料を $5.5 \times 5.5 \times 7.5\text{cm}$ の立方体に成形したものをを用いた。試料に与える環境条件は、そのままの状態(以下、そのままの状態)(図-1)、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、カバーをした状態)(図-2)、日陰に置き日光を遮った状態(以下、日陰に置いた状態)(図-3)、蒸留水で過剰に水分を与えた状態(以下、過剰に水分を与えた状態)(図-4)の4条件である。実施期間は約2ヵ月と1週間の2パターン行い、約2ヵ月実施した試験では環境条件は上記の4条件、1週間実施した試験ではそのままの状態と日陰に置いた状態の2条件のみで実施した。

(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、測定及び分析した。

5. 夏季屋外暴露試験について

(1) 用いた試料と与える環境条件について

試験には、1週間自然乾燥させた大谷石試料を $10 \times 10 \times 10\text{cm}$ の立方体に成形したものをを用いた。供試体の寸



図-1 そのままの状態



図-2 カバーをした状態



図-3 日陰に置いた状態



図-4 過剰に水分を与えた状態

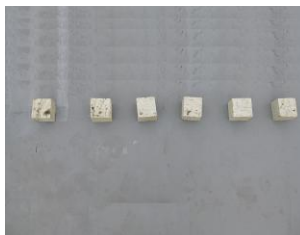


図-5 そのままの状態



図-6 カバーをした状態

法を冬季屋外暴露試験のものから変更した理由は、針貫入試験及分光測定試験において測定し易くするためである。試料に与える環境条件は、冬季屋外暴露試験において換算一軸圧縮強さ及び色調値 a^* の変化が4条件の中で最も大きい条件と最も小さい条件で、夏季と冬季の変化の違いを検証しなかったため、そのままの状態(図-5)、ビニールカバーとサランラップで雨水を遮った状態(図-6)の2条件とした。

(2) 測定項目と測定方法について

測定項目及び測定方法は前述の冬季屋外暴露試験と同様である。

5. 試験結果と考察

(1) 試験結果について

a) 針貫入試験

新鮮な試料と切り出してから10年経過した試料と切り出してから30年経過した試料では、10年経過、新鮮、3年経過の順に表面の強度が高い(表-1)。よって、ある時期までは時間経過に伴う強度低下はみられるが、それ以降は大谷石の自硬性などにより、新鮮なものよりも強度が高くなると考えられる。

b) X線粉末回折試験

採石後30年経過した壁面、採石後10年経過した壁面、切り出して間もない新鮮な壁面からそれぞれ採取した試料についてX線粉末回折試験を行った結果(図-7)、30年経過した試料では、大谷石の主成分として考えられているClinoptilolite(単斜プテロル沸石)の含有率は48%、Quartz(石英)は3.4%、Gypsum(石膏)は44%であった。10年経過した試料では、Clinoptiloliteの含有率は55%、Quartzは13.5%、Gypsumは10.3%であった。新鮮な試料では、Clinoptiloliteの含有率は61%、Quartzは19%、Gypsumは0%であった。以上のことから、採石後の経過年数に伴い、石膏の含有率が高くなるとともに、大谷石の主成分として考えられているClinoptiloliteやQuartzの含有率が低くなる。また、新鮮な試料では、QuartzやCristobalite(クリストバル石)、Tridymite(鱗珪石)、Albite(曹長石)などの鉱物が含有していることが確認されたが、30年経過した試料ではそれらの鉱物の含有率が低下していた。

表-1 採石後の経過年数と換算一軸圧縮強さの関係

経過年数	換算一軸圧縮強さ(MPa)
新鮮	1.23
10年経過	0.92
30年経過	1.43

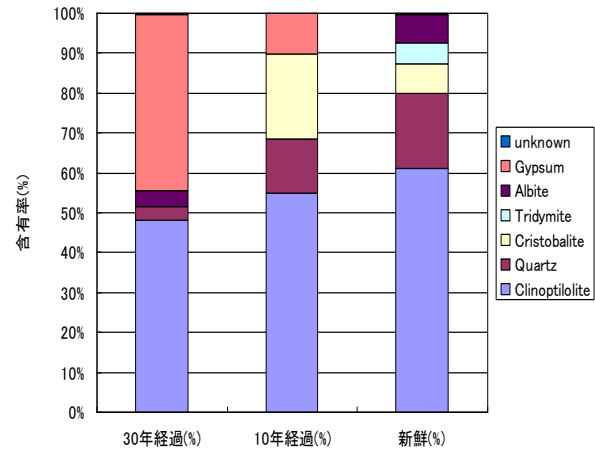


図-7 大谷石地下採石場の壁面試料の定量分析結果

6. 屋外暴露試験の結果と考察

(1) 冬季長期屋外暴露試験について

針貫入試験の結果、初期状態からの大谷石表面の換算一軸圧縮強さの低下が著しかったのは、そのままの状態の試料と過剰に水分を与えた状態試料であった。一方、カバーをした状態の試料と日陰に置いた状態試料は、他の2つの条件と比べて換算一軸圧縮強さの低下量は小さく、変化もなだらかであった(図-8)。また、分光測定試験の結果、そのままの状態の試料、日陰に置いた状態の試料、過剰に水分を与えた状態の試料は、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、その変化が著しかったのはそのままの状態の試料であった。一方、最も変化が小さかったのはカバーをした状態の試料であった(図-9)。カバーをした状態の試料は、換算一軸圧縮強さの変化も他の条件下の試料に比べて小さかったことから、換算一軸圧縮強さの低下や変色は水分の出入りが大きく影響しているものと思われる。さらに、X線粉末回折試験の結果、日陰に置いた状態の試料、過剰に水分を与えた状態の試料で、少量の石膏が検出された。また、そのままの状態の試料、日陰に置いた状態の試料、過剰に水分を与えた状態の試料からは、少量Thenarditeが検出された。また、過剰に水分を与えた状態の試料を設置したバット内の残留物について、X線粉末回折試験を行った結果、少量のGypsum、Thenarditeが検出された。そのままの状態の試料のClinoptiloliteについて、経過時間と含有率との間に負の相関があることから(図-10)、暴露時間の経過に伴って含有量が減少していると考えられる。また、過剰に水分を与えた状態の試料のClinoptiloliteについてもそのままの状態の試料と同様、経過時間と含有率との間に負の相関があることから(図-11)、暴露時間の経過に伴って含有量が減少していると考えられる。

(2) 冬季短期屋外暴露試験について

換算一軸圧縮強さは、そのままの状態の試料では僅かに上昇し、日陰に置いた試料では、徐々に低下する傾向が見られた(図-12)。日陰に置いた試料は、先に実施した長期屋外暴露試験の傾向と同様であり、湿度変化に伴う表面の風化による換算一軸圧縮強さが原因と考えられる。一方、そのままの状態の試料の換算一軸圧縮強さの上昇については、大谷石試料表面の乾燥に伴う硬化などが原因と考えられるが、さらに実験を重ねて原因を究明する必要がある。大谷石表面の色調は、2条件の試料ともに、変化は小さいものの、色調値 a^* の緑色系から赤色系への変化が見られた(図-13)。

(3) 夏季屋外暴露試験について

針貫入試験の結果、そのままの状態の試料は、暴露時間の経過に伴って換算一軸圧縮強さの低下する傾向が確認された。また、試験開始から1週目までの換算一軸圧縮強さの低下量は0.25MPa、1週目から2週目までの低下量は0.55MPa、2週目から3週目までの低下量は0.49MPaであり、1週目以降に低下量が増大していた。一方、カバーをした状態の試料は、そのままの状態の試料に比べて換算一軸圧縮強さの低下量は少ない。2週目より3週目の換算一軸圧縮強さが大きくなっているが、これは測定値のばらつきによるものであり、強度の上昇ではないと考える。(図-14)。

分光測定試験の結果、そのままの状態の試料は試験開始から4日目までは a^* 値の緑色系から赤色系への変化が小さいが、4日目から2週目にかけて変化が大きい。これは、試験開始3日目、6日目、13日目に雨が降っていることから、雨水が試験4日目から2週目までの変化を進ませたと考えられる。カバーをした状態の試料は、試験開始から4日目までは緑色系から赤色系への変化はほとんど見られず、4日目から1週目にかけて緑色系から赤色系への僅かな変化であった。しかしながら1週目以降はそれまでのような変化は見られなかった(図-15)。

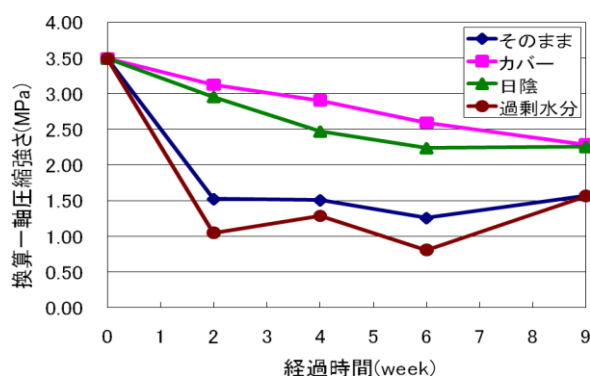


図-8 冬季屋外暴露試験における経過時間と換算一軸圧縮強さの関係

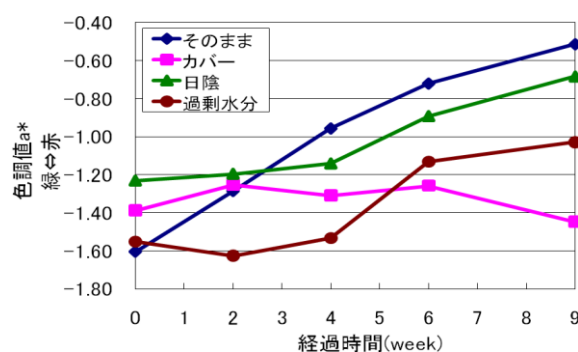


図-9 冬季屋外暴露試験における経過時間と色調値 a^* の関係

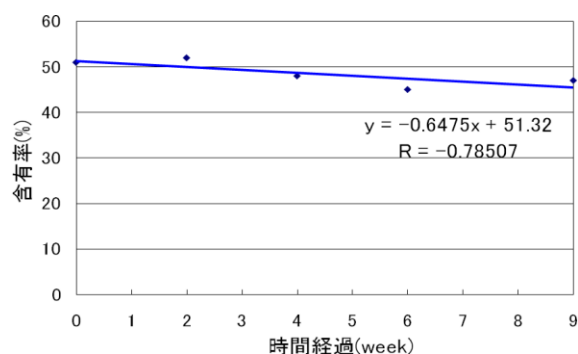


図-10 そのままの状態の試料の Clinoptilolite の含有率の変化

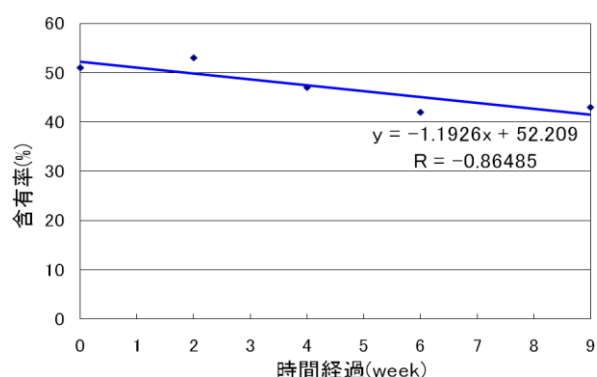


図-11 過剰に水分を与えた状態の試料のClinoptiloliteの含有率の変化

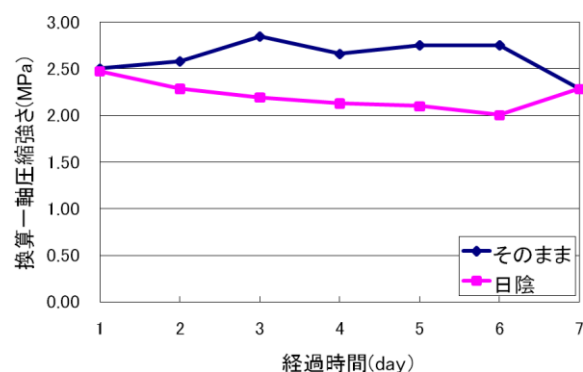


図-12 冬季短期屋外暴露試験における経過時間と換算一軸圧縮強さの関係

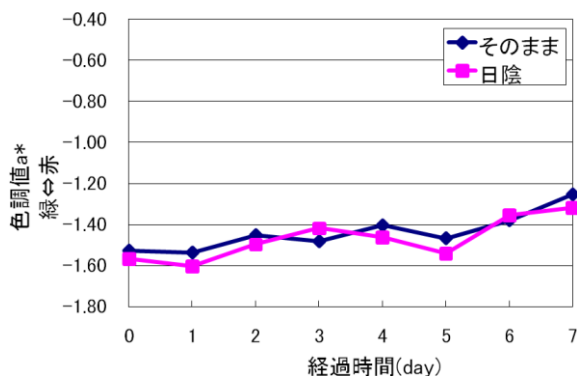


図-13 冬季短期屋外暴露試験における経過時間と色調値 a^* の関係

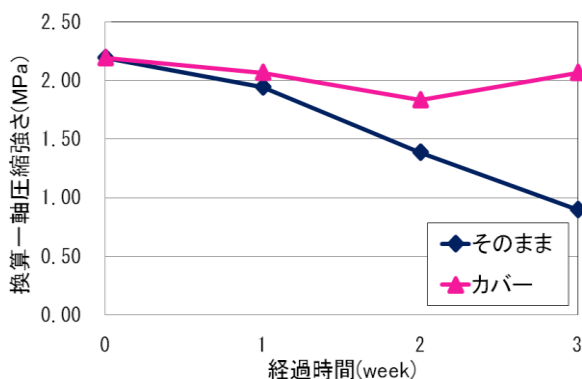


図-14 夏季屋外暴露試験における経過時間と换算一軸圧縮強さの関係

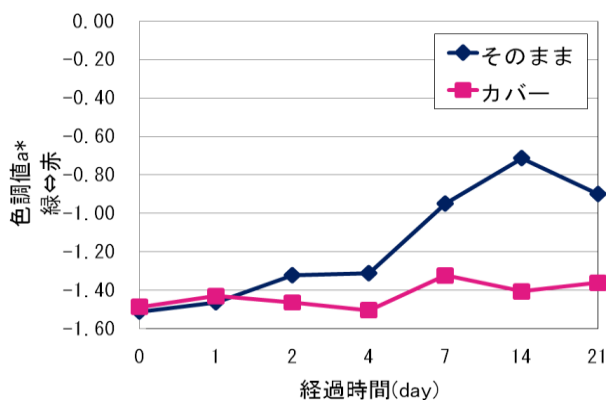


図-15 夏季屋外暴露試験における経過時間と色調値 a^* の関係

7. まとめ及び今後の課題

(1) まとめ

a) 大谷石地下採石場について

大谷石地下採石場において、3箇所(新鮮、10年経過、30年経過)表面について針貫入試験を行った結果、10年経過、新鮮、30年経過の順に強度が高い傾向を示した。また、それぞれの壁面から採取した試料についてX線粉末回折試験を行った結果、採石後の経過年数に伴って、試料中の石膏の含有率の上昇と、大谷石の主成分である Clinoptilolite や石英の含有率の低下が見ら

れた。これは、酸性成分を含んだ地下水が、大谷石内部に浸透移動し、表面の乾燥によって再び表面付近に移動し、大谷石の主成分である Clinoptilolite 内の Ca 成分⁴⁾と結合することにより、石膏が析出することが原因と考えられる。さらに、採石後経過年数に伴う変化の大きい成分(Gypsum, Quartz, Cristobalite)が、時間経過に伴う強度の低下や自硬性による強度上昇に大きく関係があると推定される。

b) 冬季・夏季屋外暴露試験について

冬季屋外暴露試験において、約2ヶ月の大谷石試料の色調、強度、成分の変化を見た結果、そのままの状態を設置した試料と蒸留水で過剰に水分を与えた試料は、試験開始から2週目にかけて試料表面の换算一軸圧縮強さが低下した。また、カバーをして雨水を遮った試料と日陰に置いた試料は、他の2つの条件に比べて换算一軸圧縮強さの低下量が小さく、変化はなだらかであった。このことから、短期間での大谷石試料の強度低下には、降雨による水分の出入りや湿度変化が大きく影響しているものと思われる。また、カバーをして雨水を遮った試料以外は、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。このことから、屋外における大谷石試料の変色にも、换算一軸圧縮強さと同様に降雨による水分の出入りや湿度変化が関係していると考えられる。鉱物組成の変化について見てみると、そのままの状態に置いた試料、過剰に水分を与えた試料に関して、経過時間に伴う Clinoptilolite の含有率の減少の傾向が見られた。一方、カバーをした試料に関しては、鉱物の含有率の変化は見られなかった。屋外暴露試験における試料の鉱物組成の変化から言えることは、降雨による水分の出入りがある試料は Clinoptilolite の含有率に減少の傾向があり、また、Gypsum や Thenardite が少量ながら析出しやすい。よって、これらの析出物は降雨による水分の変化が大きく関係していると考えられる。冬季短期暴露試験においては、試験実施期間中降雨がなかったため、長期実施の結果に比べて换算一軸圧縮強さ、色調値 a^* の変化は僅かであった。夏季屋外暴露試験において、3週間大谷石試料の色調、強度の変化を見た結果、そのままの状態を設置した試料の换算一軸圧縮強さは、試験開始1週目までの低下は小さいが、それ以降は大きく低下している。また、色調値 a^* は試験開始4日目から2週目にかけて緑色系から赤色系へ大きく変化している。一方、カバーをして雨水を遮った試料は、そのままの状態を設置した試料に比べて、换算一軸圧縮強さの低下量や色調値 a^* の緑色系から赤色系への変化量はそのままの状態に比べて小さい。一方で試験期間の暴露試験を行った場所の湿度の変化をみると、試験開始1週目までは湿度の日変化が小さいが、それ以降は変化が大きい。試料供試体の表面が空气中に晒され、空气中の湿度の変化や

雨水による水分の出入りに制限がないそのままの状態のほうが換算一軸圧縮強さ、色調値 a^* の変化が大きいことから、夏季においても冬季と同様に湿度の変化や雨水による水分の出入りが強度低下や変色に影響していることが明らかになった。また、そのままの状態で設置した試料の換算一軸圧縮強さの初期値で正規化した換算一軸圧縮強さを冬季と夏季で比較すると、冬季では試験開始から 2 週目までで 0.56、夏季では、0.37 であり、2 週目までは冬季のほうが強度低下が進行している。しかしながら、冬季は 4 週目で 0.57、夏季は 3 週目で 0.59 の比となるので、試験開始 2 週目以降は夏季のほうが強度低下が大きい傾向を示す。さらに、冬季短期屋外暴露試験と夏季屋外暴露試験で色調値 a^* の試験開始 1 週間の変化を比較すると、そのままの状態の試料では、冬季よりも夏季のほうが大きく変化した。これらの結果より、冬季よりも夏季のほうが、湿度の日変化や雨水による水分の出入りが強度低下や変色に大きく影響すると考えられる。

c) 地下環境と地上環境における鉱物組成の変化について

大谷石地下採石場において検証した大谷石の長期的な変化による風化では、Gypsum の析出と Clinoptilolite や Quartz の減少などの成分の変化や、それらを原因とする強度の変化が起こると考えられる。また、冬季屋外暴露試験の結果から、短期間の地上における風化では、地下ほどの著しい鉱物組成の変化は見られないが、降雨による水分の出入りや湿度変化による変色や強度低下が顕著である。

以上より、大谷石の風化発生環境の明確化の視点から考えられることは、地上環境において、岩石表面が空气中に晒され、湿度の日変化や降雨による水分の出入りによる影響を受けやすい状態にあること、昼夜で湿度の日変化が大きいこと、降雨による水分の出入りがあることが風化発生環境の条件として考えられる。

(2) 今後の課題

今後の課題は、風化による変色や強度低下、鉱物組成の変化にどのような関係があるのかを追求すること、石膏の析出過程の検証、屋外暴露試験において設定した条件の環境についての分析、環境条件の定量化、大谷石の自硬性などの検証が挙げられる。

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) 富永博夫：ゼオライトの科学と応用、講談社、1987。

CONSIDERATION TO EFFECTIVE ENVIRONMENT OF WEATHERING OCCURRENCE OF OYA TUFF BY EXPOSURE TEST

Kenta KIKUCHI, Akira SATOU and Takafumi SEIKI

In this study the authors considered the relation between uniaxial compression strength and the mineral component on weathering process of Oya tuff on the ground and underground quarry. Additionally, they carried out exposure test in winter and summer term on the ground and observed the change of uniaxial compression strength, color tone and the mineral components. It shows that strength of Oya tuff decreases in the period, but the strength happens to rise in certain term because of the self-hardening property. The color tone change and strength deterioration in summer term are faster than those in winter term. They concluded that the humidity oscillation and the rain fall events strongly influenced weathering progress and the chemical change of minerals such as quartz, clinoptilolite and gypsum might cause those long-term change at the underground quarry.