

風化した大谷石表面の色調と工学的性質及び構成成分との関連について

佐藤 陽^{1*}・清木 隆文²

1. 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)
2. 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: mt086631@cc.utsunomiya-u.ac.jp

栃木県は代表的な堆積軟岩である大谷石の産地である。大谷石は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岩石表面の欠落がよくみられる。本研究では、走査型電子顕微鏡を利用し、試料の構成元素を特定した。加えて、風化に伴う成分変化を把握する目的で、X線粉末回折試験を行い、成分変化の状態を検討した。また、大谷石の壁面と採石した大谷石において、一軸圧縮強さ、色調を測定し、風化における色調と成分、及び強度の変化を関係づけることで、風化状態の指標を作成することを目的とした。これらの試験結果より、風化により大谷石壁面の色調値が変化することにより、換算一軸圧縮強さが低下し、クリノプチロライトなど大谷石の構成比率が経年によって変化する傾向が得られた。

Key Words: *Oya tuff, weathering process, uniaxial compression strength, colour tone, mineral components*

1. はじめに

(1) 研究の背景と目的

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。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とされ、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、風化の進行が早いため、強度低下や変色、岩石表面の欠落が多くみられる。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、凹凸や大きな窪みが生じるものもあり、石材としての品質の低下につながっている。

本研究では、走査型電子顕微鏡を利用し、試料の構成元素を特定した。また、風化に伴う成分変化を把握する目的で、X線粉末回折試験を行い、風化に伴う成分変化の状態を検討した。また、定量的な劣化状態の指標作成のために、大谷石の壁面と採石した大谷石において、換算一軸圧縮強さと一軸圧縮強さ、色調を測定し、風化における色調と成分、及び強度の変化を関係づけることで、風化状態の指標を作成することを目的とした。ここで、風化とは、岩石が地表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. 対象とした現場の風化と試料の採取について

(1) 大谷石の概要

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 の丘陵地帯である。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第三紀の基盤岩、大谷層から成る新三期層、宝木礫層と北関東ローム層(宝木粘土層)から成る第四紀の洪積層で構成されている¹⁾。大谷石は、今から2,000万年前、新生代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、凝結して出来た淡緑色を呈する凝灰岩の一種である。また沸石およびモンモリロナイトを多く含む粘土鉱物からなる“みそ”と呼ばれる比較的軟らかい濃緑色の部分を斑点状に含む。この“みそ”の含有量で、荒目石、細目石と区別される。また、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”の部分は乾燥して褐色となり軟化し、欠落しやすくなる。

(2) 大谷石の風化の種類について

現場の調査に基づいて、大谷石の風化は、

- 1) 変色(赤褐色あるいは黒色)
- 2) 粉状あるいはかさぶた状に肌落ち
- 3) ある一定の厚さの板状の肌落ち

に大別した。本論文では特に、1)変色を伴う風化の影響に着目し、次節に示す現場 A, B の調査によりその影響を明らかにすることを試みた。2), 3)は肌落ちを起こす視点から、同様の風化機構を経ていると見なせるので、同次節の現場 C の調査をもとに整理した。

(3) 観察・試験で用いた試料

本研究で採取、測定した試料の採取現場 3 箇所を、現場 A、現場 B、現場 C として、実施した、観察、試験について説明する。観察、試験に用いた現場 A と現場 B の試料は、すべて大谷石採石地下空間から採取した試料を使用し、現場 A においては、採石地下空間内の、入り口付近(以下、入り口)と、中間付近(以下、中間)と奥付近(以下、奥)の 3 つの大谷石の残柱と、切り出して間もない大谷石(以下、新鮮)の試料を採取した。現場 B においては、切り出して間もない新鮮な大谷石と、切り出して 2 年経過した大谷石の変色した箇所と変色していない箇所から試料を採取した。また、採石地下空間内において、立抗付近にあり、石材を切り出してから 30 年経過した大谷石の壁面と、切り出してから 10 年以上経過した壁面の変色した表面から試料を削り採取した。また切り出して間もない壁面を風化を受けていない新鮮な大谷石壁面と位置づけて、同様に表面を削り試料を採取した。現場 C の試料は、外気にさらされている壁面と、採石跡空間の壁面と、空間内に置いてある石材を用いた。外気にさらされている壁面の中で、地表面から高さ 1m 以上の面には、白色の粉状物質が付着している箇所と(以下、壁の白色部分)、浮いていて、触ると崩れてしまう「かさぶた」のような層(以下、かさぶた)と、そのすぐ裏の緑色で強度が比較的低い層(以下、軟らかい緑色の層)と、緑色の強度の比較的高い層(以下、硬い緑色の層)の 3 重の構造をなしていた。また、現場 C の大谷石の壁面から白色の針状結晶物が析出していた。これは、比較的秋から冬に多く見られ、空気中の乾燥の度合と気温が関係していると考えられる。

3. 観察、試験の機器について

(1) 観察機器について

a) 走査型電子顕微鏡

大谷石試料から岩片を切り出し、走査型電子顕微鏡(FE-SEM.EDX)による観察分析を行い、観察領域に含まれている元素を定性的、および定量的に調べた。

b) X 線粉末回折試験

大谷石が風化することにより、構成成分が変化すると考え、大谷石を粉碎して X 線粉末回折試験を実施した。この結果から、化学組成、鉱物組成の変化を調べた。

(2) 試験機器について

c) 針貫入試験

この試験は軟岩に針を一定速度で貫入させて針貫入勾配を測定し、換算一軸圧縮強さを求めるものである。本研究では、各現場において、換算一軸圧縮強さを求め、実際の一軸圧縮強さと比較して、針貫入試験による一軸圧縮強さを算出した。

d) 分光測定試験

この試験は、画像解析によって風化程度を区別することを目的として、色調を分光測定器で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。ここで、 L^* 値は黒(0)白(100)に対応し、 a^* 値は赤(+)緑(-)に、 b^* 値は黄(+)青(-)に対応する。本研究では特に、大谷石表面が新鮮な緑色系から赤色系へと変色するので、 a^* 値について整理する。

4. 試験結果と考察

本研究で、現場 A と現場 B では色調と強度の関係に着目し、現場 C は成分と強度の関係に着目して調査および分析をすすめた。本論文では現場 A, C の試験結果とその考察をはじめに示す。これに加えて、経年とともに壁面が赤褐色になる傾向が顕著である現場 B から採取した試料を対象として、分析を行った結果を示し、考察する。

(1) 現場 A と現場 C について

現場 A は、採石年数(採石後の経過年数)によって、大谷石の壁面の色調値 a^* が緑色系から赤色系に変化する様子が見られ、風化によって、変色が起こった。一軸圧縮強さと色調値 a^* に着目すると、色調値 a^* が低くなるにつれて、強度は上昇するという傾向が得られた(図-1)。現場 C は他の現場 A, B とは異なり、大谷石の壁の表面に針状の白色結晶物が析出していた。この結晶物は主に地面付近によく見られ、地表面からの高さ 1m 以上になると、針状の付着物に代わって、粉状の白色物が付着する様子が観察された。また、緑色の強度の高い層に比べて、壁面が白色を呈し、針状の結晶物が析出している箇所と、壁の白色部分の奥の層の一軸圧縮強さがおよそ 1.00MPa~2.00MPa ほど大きい(表-1)ので、この壁面に付着した白色物が影響を及ぼしていると考えられる。高さ 1m 以上で表面が白色化していない箇所は、表面が浮いていて、触ると崩れてしまうかさぶたの様な層と、そのすぐ裏の緑色で強度が低い層と、緑色で強度の高い層の 3 重の構造を成していた。壁面の析出物は、 Na_2SO_4 の含有率が 95%と高い(表-2)。この試料の原子数濃度の割合(表-3)から Na_2SO_4 が主成分であることが確定できた。既往の文献²⁾より、今回の白色の針状結晶物は、ミラビラ

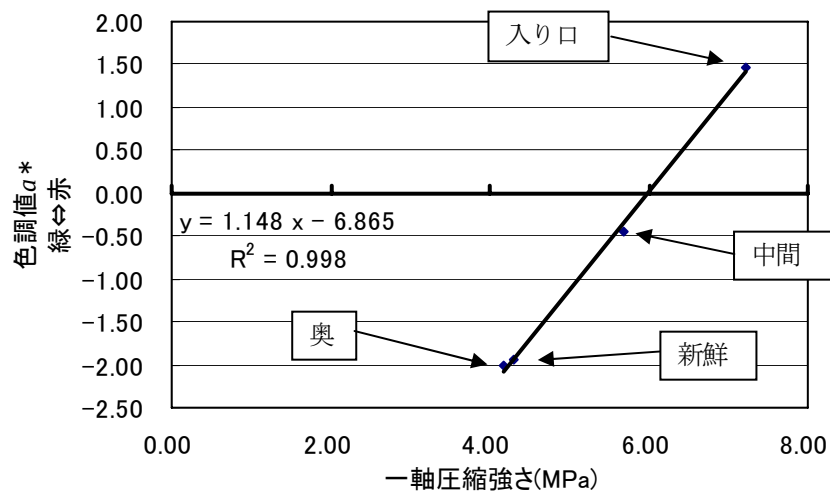


図-1 現場 A による一軸圧縮強さと色調値 a^* の関係

表-1 現場 C における換算一軸圧縮強さ

測定箇所	換算一軸圧縮強さ (MPa)	一軸圧縮強さ (MPa)
壁の白色部分の奥の層	2.38	7.95
軟らかい緑色の層	0.94	3.14
地上付近の針状結晶物発生箇所	2.46	8.20
石材(昭和40～50年代に切り出し)	2.57	8.57
採石跡空間の壁面	1.44	4.79
硬い緑色の層	2.07	6.91

表-2 現場 C から採取した各試料の定量分析結果

構成成分	壁の白色部分 の奥の層(%)	軟らかい緑色 の層(%)	かさぶた (%)	地上付近の白色の 針状結晶物(%)	硬い緑色 の層(%)	壁の白色 部分(%)
SiO ₂	66.0	36.0	86.0	0.0	0.0	0.0
Na ₂ O	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
MnO ₂	0.0	22.0	5.0	0.0	77.0	10.0
MgO	34.0	0.0	0.0	0.0	23.0	0.0
K ₂ O	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0
Fe ₂ O ₃	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Al ₂ O ₃	0.0	15.0	3.0	5.0	0.0	3.0
FeS	0.0	9.0	0.0	0.0	0.0	4.0
Na ₂ SO ₄	0.0	0.0	0.0	95.0	0.0	77.0
CaSO ₄ ·2H ₂ O	0.0	18.0	4.0	0.0	0.0	6.0
合計	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

表-3 現場 C から採取した各資料の原子量濃度

構成元素	白色部分 の奥(%)	硬い緑色 の層(%)	軟らかい緑色 の層(%)	かさぶた (%)	壁の白色部分 (%)	結晶物の発 生箇所(%)
O	73.67	72.91	79.21	71.43	68.93	60.99
Na	3.01	3.85	3.01	3.47	6.10	3.39
Al	3.58	3.93	3.14	4.33	6.98	4.52
Si	18.17	18.02	13.66	19.60	16.42	28.55
S	0.29	0.32	0.27	0.18	0.52	0.88
K	1.00	0.91	0.66	0.93	0.00	1.52
Ca	0.02	0.03	0.03	0.03	1.05	0.02
Fe	0.26	0.03	0.02	0.03	0.00	0.13
合計	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

イト(mirabilite, Na₂SO₄ · 10H₂O)あるいはテナルダイト(thenardite, Na₂SO₄)であると結論づけられた。また、白色化した壁面の表面を削り、X線粉体回折試験を行った

ところ、対象とした試料は、6 %のCaSO₄を含有していた(表-3)。既往の文献³⁾で見られるように、現場Cの大谷石にもCaSO₄が表面に析出したものと考えられる。岩

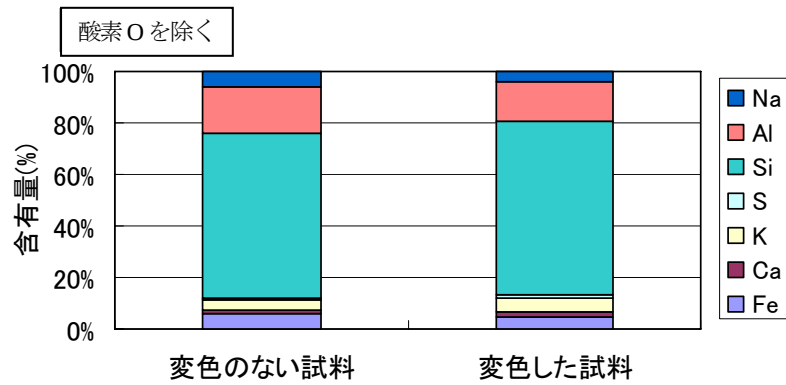


図-2 構成元素の定量分析結果

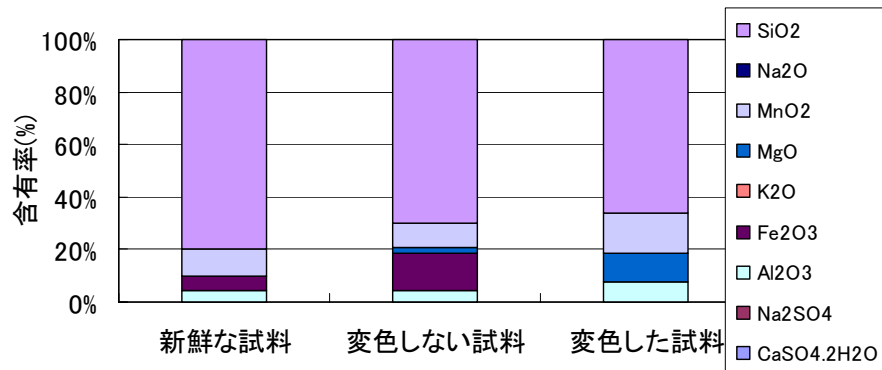


図-3 構成成分の定量分析結果

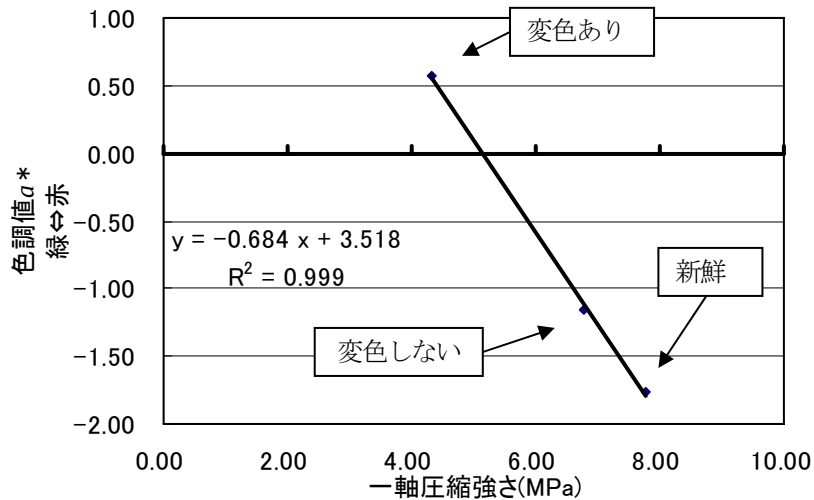


図-4 現場Bによる一軸圧縮強さと色調値 a^* の関係

石の中で、溶液から結晶が生成される際の圧力(結晶力)が岩石を物理的に破壊する⁴⁾ことがわかっている。岩石中の CaSO_4 が $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ となって晶出する場合、約 110MPa ⁴⁾の圧力が生ずることから、この結晶物の生成が風化作用に影響を及ぼすと考えられる。

(2) 現場Bについて

a) 切り出した大谷石の試料について

この現場は、採石年数が経過することによって、大谷石の壁面の色調が変化の様子が見られ、風化による変色が原因と考えられる。

走査型電子顕微鏡による構成元素の定量分析結果に着目すると、切り出してから2年経過した大谷石の変色した面と、変色していない面では、構成元素に大きな違いが見られなかった(図-2)。

X線粉末回折試験による構成成分の簡易定量分析結果に着目すると、大谷石表面が変色することにより、酸化マンガン(MnO_2)、酸化マグネシウム(MgO)、酸化アルミニウム(Al_2O_3)などの構成成分が変化し、含有率が増加傾向あることを示した(図-3)。

分光測定試験による色調値の測定結果では、採石年数によって、大谷石の壁面の色調値 a^* が緑色系から赤色

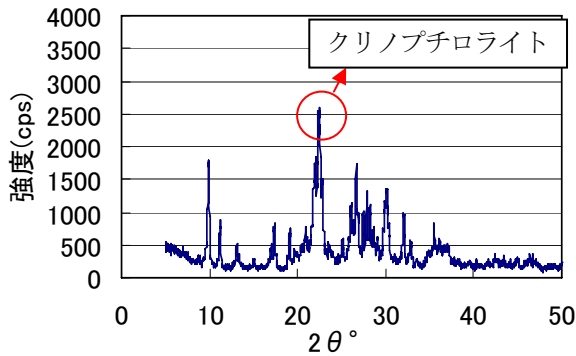


図-5 新鮮な大谷石の強度ピークデータ

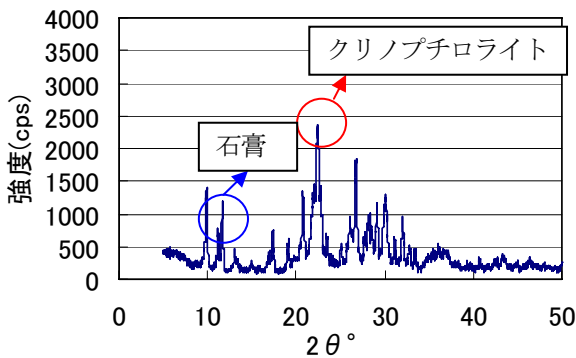


図-6 切り出してから10年経過した大谷石の強度ピークデータ

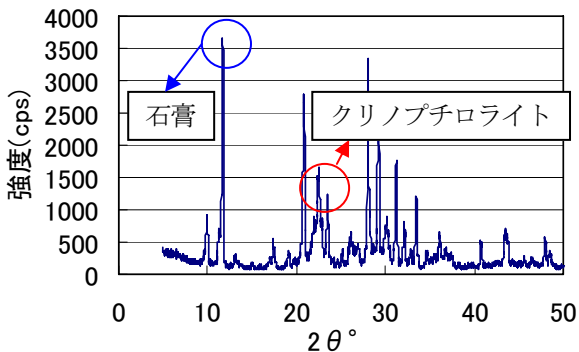


図-7 切り出してから30年経過した大谷石の強度ピークデータ

表-4 各試料の色調値 a^* と一軸圧縮強さ

項目 試料	色調値 a^*	一軸圧縮強さ (MPa)
新 鮮	-1.65	4.12
10年経過	-0.22	3.08
30年経過	-0.16	4.79

系に変化する様子が見られ、風化によって、大谷石表面に変色が起きていることが定量的に確かめられた。また一軸圧縮強さは、色調値 a^* が低くなるにつれて、高くなる傾向がある(図-4)。この結果は、大谷石表面が赤

色系を呈してくると、表面の強さが低下する傾向があることを示す。構成成分の変化もあることから、新鮮な大谷石から酸化物が生成される過程で変色を起し、大谷石の表面の強さが低下すると考えられる。

b) 大谷石採石地下空間内の壁面から採取した試料について

X線粉末回折試験による各試料の定性分析を行った。その結果、いずれの試料からでも、クリノプチロライト (clinoptilolite, $(Ca, Na, K, Sr, Ba, Mg)6Al_6Si_{30}O_{72} \cdot 20H_2O$)、モルデナイト (mordenite, $Ca_2Na_2K_2Al_2Si_{10}O_{24} \cdot 7H_2O$)、石英 (quartz, SiO_2) が検出された。特にここでは、クリノプチロライトの検出ピークの位置について図示する(図-5 ~ 図-7)。石材を切り出してから30年経過した大谷石の壁面と10年経過した大谷石の壁面から採取した試料からは、石膏 (gypsum, $CaSO_4 \cdot 2H_2O$) が検出された(図-6, 7)。既往の文献より、一部大谷地域の大谷石内部から、石膏が析出すると報告されている^{5), 6)}。この現場でも同様に石膏が同様に析出したと考えられる。また、採石年数が経過するほど、個々の計測値の様々なピーク値の組み合わせの中で、石膏のピーク値が増加していることより、石膏が大谷石が採石後の経年に従って増加傾向にある(図-5 ~ 図-7)。この現場では、採石年数が経過すると、大谷石の表面が赤褐色に変色することから、変色に影響を及ぼす鉱物の特定を試みたが、良い結果を得ることはできなかった。比較的ピーク強度の低いデータを詳しく分析することなどを行う必要がある。

分光測定試験の測定結果より、色調値 a^* は新鮮な大谷石の試料に比べ、10年経過、30年経過と、採石年数からの経過年数が長い程、表面が赤色系を示す(表-4)。また、針貫入試験から求めた換算一軸圧縮強さに着目すると、新鮮な大谷石の試料に比べ、10年経過した試料の一軸圧縮強さは低く、30年経過した試料は新鮮な大谷石の試料に比べ、一軸圧縮強さが高い結果となった(表-4)。この傾向は、一概に大谷石の表面が、緑色系から赤系になるだけでは説明できない。経年による石膏の析出が強度の変改に影響^{5), 6)}すると考える。

5. まとめ及び今後の課題

(1) まとめ

本研究では大谷石採石地下空間および地上の現場 A、B、C の3箇所で大谷石の風化についての調査、分析を進めた。本論文では、特に変色を伴う風化について注目し、現場 A、C の結果を示した。さらに現場 B の分析結果について今まで明らかになったことを整理し、考察した。

a) 現場 A について

現場 A では入り口、中間、奥の試料において採石年数

が経過している試料ほど、一軸圧縮強さが高い結果となった。また、大谷石の壁面の色調値 a^* が緑色系から赤色系に変化する傾向が得られた。

b) 現場 C について

現場 C において、壁面が白色化し、地表面から 1m 以上の白色部分と地上付近の白色の針状結晶物の発生箇所の一軸圧縮強さが、比較的高いことから、石膏の付着が強度増加の理由の 1 つであると考ええる。また、走査型顕微鏡による定量分析で、現場 C の大谷石の壁面の試料(表-3)から、Na が検出されたことから、テナルダイト(Na_2SO_4)の Na 成分が試料内に存在することが確認できたが、X 線粉末回折試験により鉱物の同定をさらに詳しく行う必要がある。また、石膏が析出することによって、大谷石内部の風化が促進され、大谷石内に一種の塩類風化が起きていると考えられる。

c) 現場 B について

現場から切り出して 2 年経過した大谷石の試料では、大谷石が変色することによって、強度が著しく低下することが確認できた。また、風化によって、大谷石の壁面の色調値 a^* が緑色系から赤色系に変化が見られた。

現場 B の大谷石採石地下空間の壁面は、採石年数が経過すると色調が緑色系から赤色系に変化し、10 年経過した大谷石壁面については、強度の低下も結果から得られたが、採石年数が 30 年経過した大谷石壁面の一軸圧縮強さは、新鮮な試料より高い結果となった。この理由としては、切り出された大谷石の壁面は変色を起こし、強度が低下する。また、10 年経過した試料と、30 年経過した試料では、色調値 a^* が近いことから、変色による風化はある一定の色調まで変化すると、それ以上は変化しにくいと考えられる(表-4)。また、石膏が付着することで強度が増す傾向があることから^{5), 6)}、ある一定の期間は風化により変色を引き起こし、強度が低下するが、石膏が析出し始めると、徐々に強度が高くなると考えられる。

(2) 今後の課題

変色を伴う大谷石の風化試料が赤褐色になることから、本研究では酸化鉄などの成分に着目して分析を行ったが、検出することができなかった。今後はさらに実験をすすめて、大谷石を変色させる鉱物の特定を行う。また、新鮮な大谷石からテナルダイトや石膏などの成分が析出する過程と強度、色調の変化についてさらに検討を行う。

謝辞: 本研究を実施するにあたり、観察、調査を実施する現場、大谷石試料を提供して下さいました、宇都宮市大谷地域の関係諸氏に、御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 五百川麻子, 中田正隆, 本間久英: 大谷石中の mirabilite 及び thenardite の産状と岩石の風化過程, 東京学芸大学紀要 4 部門, 52, pp.31-36, 2000.
- 3) 佐々木昭, 神山宣彦: イオウ同位体比よりみた大谷石中のミラビル石の成因, 地質調査所月報, 第 27 巻, 7 号, pp.445-449, 1976.
- 4) 小出博: 応用地質, 岩石の風化と森林の立地, 古今書院, 1952.
- 5) 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.
- 6) 佐藤陽, 清木隆文: 風化による大谷石の構成成分, 表面色調, 強度の変化についての検討, 第 63 回土木学会年次講演会, 2ps, III-245, CD-ROM, 土木学会, 2008.

RELATION AMONG COLOUR TONE, ENGINEERING PROPERTY AND STRUCTURAL COMPONENTS ON SURFACE OF WEATHERED OYA TUFF

Akira SATOU and Takafumi SEIKI

Oya tuff which becomes weaker, easily during the weathering, process is one of the most popular stone for building in Japan. In this study, the authors carried out some field observation and measurements at the outcrop and quarry of Oya tuff and laboratory experiments to understand the weathering process in individual environment. This study presents the difference and relation of uniaxial strength, colour tone change and mineralogical component of the fresh and weathered Oya tuff. Especially it emphasizes that the colour tone changes greenish to reddish on the surface with elapsing time after quarrying and amount of gypsum tends to increase instead of decreasing main components such as clinoptilolite. But those need precise analysis and data to understand process of its weathering degradation.