

大谷石の風化による表面変化と 強度の関連に関する検討

徳留雄太¹・清木隆文^{2*}・飯村 淳³

¹元 宇都宮大学 地域デザイン科学部 (〒321-0912 栃木県宇都宮市陽東7-1-2)

²宇都宮大学 地域デザイン科学部 (〒321-0912 栃木県宇都宮市陽東7-1-2)

³大谷石産業(株) (〒321-0344 栃木県宇都宮市田野町318-3)

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

大谷石は、宇都宮市北西部にある大谷町を中心とする産地として、東西約4 km、南北約6 kmにわたって分布している火山砕屑軽石凝灰岩である。大谷石は耐火性、耐震性、吸湿性に富み、軽量で加工がしやすく、見た目も鮮やかな緑色で趣があることが挙げられる一方で、風化の進行が早く、それに伴う大谷石表面の剥離や色調変化が目視で顕著である。本研究では防水剤塗布や強度測定、色調値測定や表面の構成成分観察などの表面分析を行った。その結果、大谷石の色調変化はごく表層に限ったものであると確認された。さらに、採掘からの経過時間が長いほど、強度が弱くなる傾向を確認した。また、大谷石が水や空気と触れる時間が長いほど内部構造が疎になり内部強度低下が進行することが明らかになった。

Key Words : Oya tuff, colour tone change, weathering preservation, waterproof paint

1. はじめに

大谷石は、宇都宮市大谷地区で採掘される淡緑色の軽石凝灰岩である。大谷石は耐火性、耐震性に富み、軽量で加工がしやすいため、建築材料として広く利用されている。その一方で、大谷石は風化の進行が早く、それに伴う表面の剥離や色調変化が時間経過と共に生じる。また、その風化の進行度合いは、大谷石表面の水分の状態や空気の流れに応じて影響を受ける。これまで著者らは、大谷石の風化の定量化とそのメカニズムの検討のために様々なアプローチを行って来た¹⁾。近年では、風化を防止するために大谷石に潤滑剤を塗布し、水分に触れる機会を減らすことで風化の進行を遅らせることを試み、その背景から水分の風化への寄与を確認している¹⁾。本研究では、防水剤塗布や強度測定、色調値測定や表面の構成成分観察などの表面分析を通して、風化の原因を究明することを目的とする。

2. 実験試料及び研究手順について

(1) 実験に用いた大谷石試料について

本研究を行うにあたり、採掘された直後の新鮮な大谷石（以下、新鮮な大谷石）、採掘後3か月、半年、1年半

の間、大谷石石材の加工工場の倉庫で保管されていた大谷石（以下、3か月、半年、1年半経過の大谷石）、堆積面を基準に切り出す方向を堆積面に平行な方向に広い面を持つ試料と堆積面に垂直な方向に広い面をとった試料をそれぞれ3 cm×5 cm×10 cmの立方体に成形した試料を準備した。また、自然に剥がれた面と機械で切断した面の違いを確認するための試料も準備した。

(2) 各種実験手順について

大谷石表面に防水スプレーを噴霧するあるいは、防水塗料を塗布することで撥水機能を与え、水分や空気との接触量をできるだけ減らし、色調変化を防止することを試みる。また、その大谷石を建物の屋上に置き、屋外での色調変化も測定する。その際、分光測定器(Konica Minolta CM-600d)によってL*a*b*表色系の緑色(負値)―赤色(正值)系の色調値(a*値)を測定し、色調変化防止効果を測る。また、色調変化が進んだ、採掘からの経過時間が異なる大谷石の表面を削ることで、色調変化の深さを測る。さらに、採石場からの採掘後の経過時間が異なる大谷石と採掘直後の新鮮な大谷石の新鮮な内部までヤスリで削り、その削り深さを測る。また、新鮮な大谷石に対して、2か月間毎日蒸留水を塗布し、色調と強度を継続的に測定し、色調変化と強度の関係を考察する。さらに、採掘からの経過時間が異なる大谷石に対しても色調

と強度を測定する。大谷石の強度測定に関して、既往の研究²⁾では表面強度測定のため、軟岩ペネトロ計(丸東製作所)による針貫入試験における貫入量を0.5mmと2.0mmに設定して測定していた。本研究では、極浅い表面部分のみ着目するため、貫入量0.5mmでの貫入荷重を読み取り、貫入力/貫入量をNP値(N/mm)とした。測定の際、針の貫入を始めてすぐに大谷石の奥まで針が入ることがあったため、その回数も記録した。これに加えて、色調変化が進んだ表面部分とその奥部分に分けてX線粉末回折試験を行い、表面と内部の鉱物の特定を行った。また、大谷石のひび割れ方や異なる切り出し面の分析を行い、表面の状態と風化との関連性について検討した。このように本研究では、様々な風化現象を総合的に分析する試験方法を考え、風化原因を考察した。

3. 大谷石試料の観察・試験結果について

(1) 色調変化防止のための防水剤塗布試験の結果

表面に何も塗布しない無加工の大谷石の a^* 値と、それぞれの防水剤塗布面の a^* 値をまとめたものを図-1に示す。また、噴霧した防水スプレーは、市販のもので、配合されている樹脂の名前を用いて、フッ素、シリコン、フッ素シリコンと表記する。防水塗料は商品名を用いて、密着シーラー、防水塗料、防水一番とする。

本試験は8週間継続して行い、防水剤のうち防水塗料

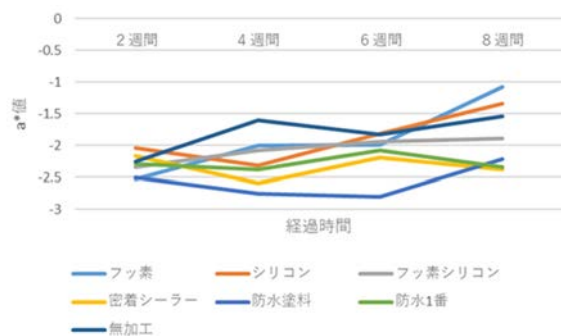


図-1 防水剤塗布面と無加工面の a^* 値の変化

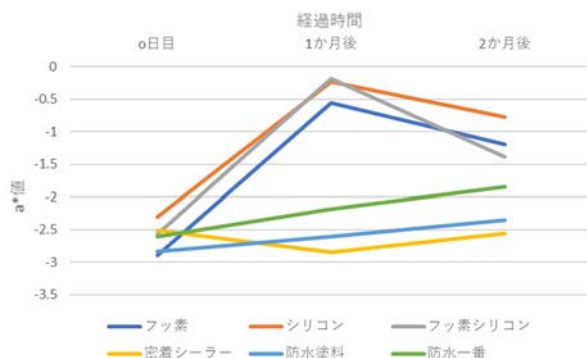


図-2 防水剤を塗布した新鮮な大谷石の a^* 値の変化

(密着シーラー、防水塗料、防水一番)は8週間色調変化を防止し、防水スプレー(フッ素、シリコン、フッ素シリコン)は4週間頃から a^* 値の値が大きくなり、赤色化している傾向を示していることから、色調変化防止効果が弱まったことを確認した。目視では、防水スプレー

表-1 経過時間ごとの色調変化の深さと削り回数

経過時間	削る前(mm)	削った後(mm)	削り深さ(mm)	削った回数(回)
1年半前A	31.33	31.12	0.21	290
1年半前B	31.42	31.23	0.19	280
半年前A	25.83	25.66	0.17	120
半年前B	25.86	25.72	0.14	100
3か月前A	30.45	30.37	0.08	50
3か月前B	30.2	30.11	0.09	60

表-2 3種類の大谷石と新鮮な大谷石内部の削り回数と削り深さ

経過時間	削る前(mm)	削った後(mm)	削り深さ(mm)	削った回数(回)
1年半前	31.36	29.79	1.57	800
半年前	25.71	24.96	0.75	800
3か月前	30.32	30.12	0.2	800
新鮮	30.28	30.05	0.23	800

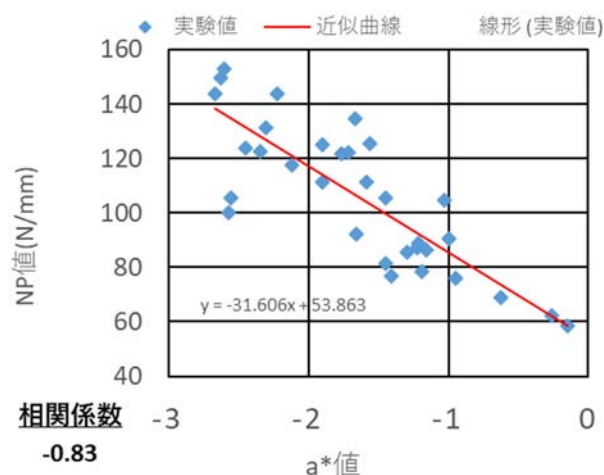


図-3 蒸留水を塗布した大谷石の a^* 値とNP値(強度)との関係

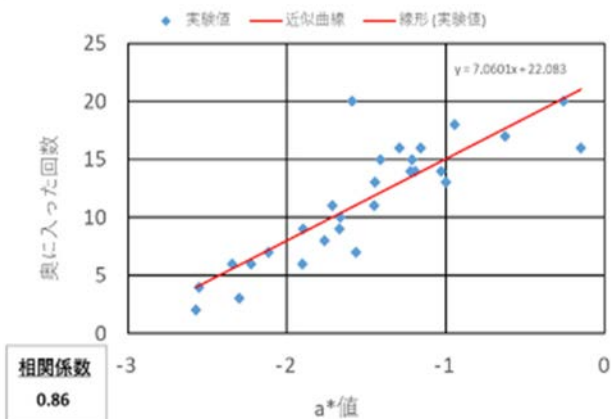


図-4 蒸留水を塗布した大谷石の a^* 値と針貫入試験の針が奥に入った回数

を噴霧した大谷石は8週間後も蒸留水を撥水しているように見えたが、色調変化が進行していたことから、大谷石の内部に入る水分量がそれほど多くなくても、色調変化は進行することが確認された。

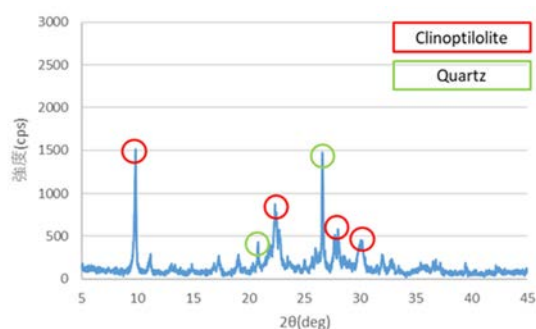


図-5 新鮮な大谷石の表面部分

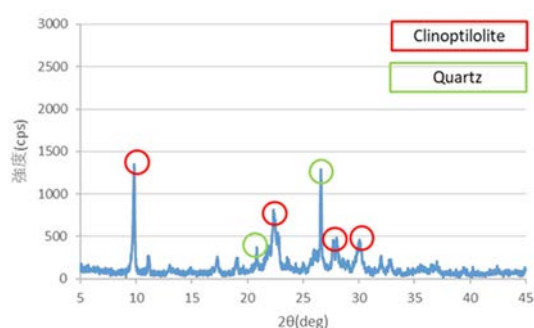


図-6 新鮮な大谷石の奥部分

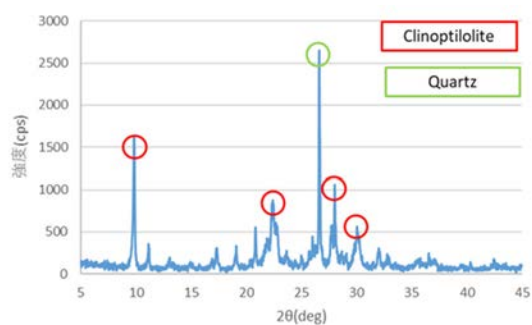


図-7 採掘から3か月経過した大谷石の表面部分

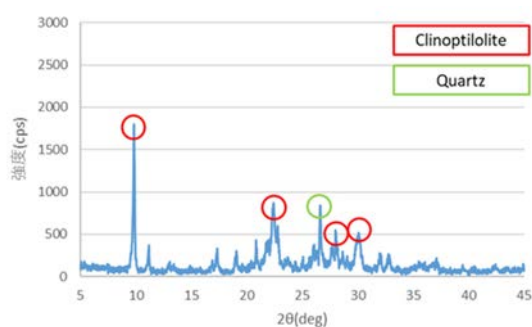


図-8 採掘から3か月経過した大谷石の奥部分

(2) 屋外における色調変化防止試験結果

防水剤を塗布して、2か月間屋上に置いた新鮮な大谷石の a^* 値の変化を図-2に示す。

屋外試験において、防水塗料を塗布した大谷石の a^* 値変化は2か月間で概ね0.5以内に収まり、大谷石表面の色調変化を防止する事ができた。防水スプレーを噴霧した大谷石は試験開始から1か月後までの間に、 a^* 値が約-2.5から-0.5に増加し、2か月目は約-1.0まで減少した。これは、雨水により色調変化した表面が剥離して落ち、新鮮な表面が改めて現れたか、もしくは、防水スプレーで霧状に噴霧された防水薬剤が小さな粒となってまばらに大谷石試料の表面に付着するため、色調の変化もまばらであり、実験開始後に a^* 値が増える場所が限定的であるために見かけ上 a^* 値が減る可能性が挙げられる。

(3) 大谷石表面の色調変化深度の確認試験の結果

本実験では、色調変化が進行している大谷石表面を削り、色調変化の深度を調べたところ、色調変化深度は0.09 mm～0.21 mmと極めて浅く、色調変化がごく表層に限られたものだということが確認された(表-1)。また、市販の金ヤスリで表面を深さ方向に削る実験を行った。その結果、採掘からの時間が経過しているほど、削る深さが深く、これに比例して削る回数も増える事から、大谷石内部の強度が低いことが確認された(表-2)。これは、採掘からの時間が経過するにしたがって、大谷石と空気や水分が触れる時間が多くなることで、構造内部の造岩鉱物成分が溶け出し、大谷石の内部が疎な状態に変化していくからであると考えられる。

(4) 大谷石の色調変化と表面強度の相関を確認する試験

本試験では8週間継続して行い、 a^* 値と針貫入勾配NP値(N/mm)に強い相関関係があることを確認した(図-3)。また、 a^* 値と、NP値(N/mm)を測る際に針が奥に刺さる回数にも強い相関関係が確認された(図-4)。さらに、粉末X線回折装置(以下、粉末XRD装置)により、主要鉱物として、Clinoptililite(単斜プチロル沸石)とQuartz(石英:SiO₂)が検出された(図-5、図-6)。また色調変化が進んだ大谷石表面のQuartzの特性を表すX線回折強度のピーク値の方が、その内部のQuartzのピーク値より高いことが確認された(図-7、図-8)。この傾向は新鮮な大谷石では見られない結果であるので、色調変化を伴う風化によって大谷石の奥のQuartzの結晶構造が失われている傾向を示した。この結果より、色調変化が進むと内部強度が低下するのは、大谷石内部に水分や空気が入り、出ていくタイミングで大谷石の構成する主要成分の一部が失われて、結晶構造の規則性が崩されることが原因であると考えられる。



図-9 大谷石Aのひび割れの様子(写真の奥行方向が堆積面に垂直な方向を示す)



図-10 大谷石Bのひび割れの様子(写真の奥行方向が堆積面に垂直な方向を示す)



図-11 大谷石Cのひび割れの様子(写真の奥行方向が堆積面に平行な方向を示す)



図-12 大谷石Dのひび割れの様子(写真の奥行方向が堆積面に平行な方向を示す)

(5) 大谷石ひび割れ面の分析結果

本研究では、新鮮な大谷石を「大谷石A」、風化した大谷石を「大谷石B」とする。また大谷石Aと堆積層の向きが直交方向に切り出した新鮮な大谷石を「大谷石C」、堆積面の方向が大谷石Cと同様に風化した大谷石を「大谷石D」として、堆積層の向きが異なる大谷石に対してタガネをハンマーで叩いて力を表面に加え、割れ目を人為的に発生させた。その結果、堆積層の向きによってひび割れ方が違うことと、ひび割れが発生するまでにタガネで衝撃力を作用させた回数が違うことが確認できた。堆積面に対してほぼ垂直に力を加えた場合には、面が折れ曲がるような形で半分や十字型に割れ(図-9、図-10)、力を加えた回数が平均して約30回程度だったが、堆積面に対してほぼ平行に力を加えた場合には、面を剥ぐ、もしくはその剥いだ面が折れ曲がるように割れ(図-11、図-12のうち、特に図-11)、力を加えた回数が平均して約20回程度だった。これらの結果より、堆積層の向きと強度の関連性を確認した。

表-3 自然な面と不自然な面の針貫入勾配NP値(N/mm)

	自然な面	不自然な面
石 1	126.4	169.2
石 2	115.2	150.4
石 3	115.2	128.8



図-13 繊維状の構造を表面に有する機械切断した大谷石の面(赤丸で囲った部分が繊維の束のような構造の箇所)

(6) 異なる切り出し面の表面分析試験結果

大谷石の機械で切断された面と引っ張られる力で剥がされた自然な面の強度測定をしたところ、自然な面の方が強度が小さいことが確認できた(表-3)。また、目視でそれぞれの試料の表面を観察すると、自然な面には、小さな穴が多く見られた。これは、大谷石に多く含まれる空隙の一部であると考えられる。一方で機械で切断された面には小さな穴が見られず繊維の束のような構造が多く見られた(図-13)。この違いは、大谷石が引っ張って剥がされる際、鉱物同士の結びつきが弱い鉱物境界部分に分離面が生じるため、自然に表層に現れた面は機械で切断した面に比べて鉱物同士の結びつきが弱い箇所が現れたことが原因であると考えられる。

4. まとめ

(1) 大谷石の色調や強度から考察する風化の原因

大谷石の色調変化深度の確認試験では、大谷石の色調変化はごく表層に限ったものであり、内部は新鮮な色調を保っていることが確認された。また、継続的に蒸留水を塗布し続けた大谷石に対して、経過時間ごとに色調変化と強度との関連性を調べたところ、 a^* 値とNP値(N/mm)との間に強い相関関係が確認された。さらに、強度を測定する際の針貫入試験において、あらかじめ風化を受けて色調が赤褐色になった層の厚さ(表-1)を超えて、基準とした0.5mmよりも深い位置まで簡単に針が

奥に刺さることが確認されたことから、風化を受けた層よりも深い位置まで針が刺さる回数と a^* 値の関連性を調べると、こちらも強い相関関係が確認された。風化を受けて色調が変化した層よりも奥に針が刺さるということと、採掘からの経過時間が異なる大谷石をヤスリで削った時に、経過時間が最も長かった大谷石が削り回数に対する削り深さが最も大きかったことから、内部構造が疎になっているということがわかる。これらの結果より、大谷石が水や空気と触れる時間の長さによって、表面の色調変化や内部の強度低下といった風化の進行度合いが変化することがわかる。

大谷石内部の強度低下は、Quartz の結晶構造の規則性が崩れていることが原因として考えられる。粉末 XRD 試験の結果、色調変化が進んだ大谷石表面の Quartz の特性を表す X 線回折強度のピーク値の方が、その内部の Quartz のピーク値より高いことが確認された。ピーク値が低いということは、結晶構造の規則性が崩れているということである。既往の研究²⁾では、大谷石粉末を通過させた水溶液を分析すると、多くの種類の元素が流れ出ていることが確認されている。それと同じように、大谷石内部に水や空気が入り、出ていくタイミングでも構成元素が外に流れ出て、結晶構造の規則性が崩れることで内部強度が低下している可能性が考えられる。

色調変化防止のための防水剤塗布試験では、防水塗料を塗布した大谷石は 8 週間色調変化を防止することができたが、防水スプレーは 4 週間経過したあたりから色調変化が進行し始め、8 週間経過した時点では無加工の大谷石と近い a^* 値になっていた。しかしながら、試験開始から 8 週間経過後に、防水スプレーを塗布した大谷石に蒸留水を塗布したところ、撥水効果を発揮していることが確認できた。この結果より、大谷石の内部に入る水の分量が多くなると、色調変化は進行することが確認できる。防水スプレーを塗布した大谷石は 8 週間後も撥水機能があるように見えたが、小さな隙間から水が入り込み、それが色調変化を進行させていると考えられる。それに対して、防水塗料は水が入る小さな隙間がないほど表面を覆うことができていたので、色調変化が進行が遅いと考えられる。

(2) 大谷石の表面状態や構造から考察する風化の原因

大谷石の異なる切り出し面の表面分析試験では、引張力で剥がされた自然な面の方が機械で切断された面より強度が低いことが確認された。また、自然な面からは多くの小さな穴が見られた。一方、機械で切断された面では自然な面には、見られない繊維の束のような構造が多く見られた。これらの構造は非常にもろく、触れると剥離しやすい風化現象に似た現象が生じた。このように、自然な面の強度が低い原因は大谷石の鉱物同士の結びつ

きにあると考えられ、小さな穴は空隙の一部であると考えられる。大谷石が引っ張って剥がされる際、鉱物同士の結びつきが弱い鉱物境界部分に分離面が生じるため、剥離後に表層に現れた面は鉱物同士の結びつきが相対的に弱い面で、強度の低下が起りやすい。この表面に小さな空隙が観察されたのも、構造的に疎な部分から剥離するため、その表層に現れた弱面の特徴を表していると考えられる。

また、大谷石のひび割れ面の分析では、堆積層の向きが異なる大谷石に対して同じようにタガネで力を加えたところ、割れ方に大きな違いがあった。具体的には、堆積面に対してほぼ垂直に力を加えた場合には、面が折れ曲がるような形で半分や十字型に割れ、堆積面に対してほぼ並行に力を加えた場合には、面を剥ぐ、もしくはその剥いだ面が折れ曲がるように割れた。また、割れるまでにタガネで力を加えた回数も異なり、堆積面に垂直に力を加えた方が堆積面に平行に力を加えたときより多くの回数、言い換えると大きな力を要した。これは、堆積層の向きによって外からの衝撃に対する強度が異なるということである。鉱物同士の結びつきの強さには、堆積層の向きも関連があることが確認された。これは大谷石材で作られる擁壁の剥離しやすい面の方向と一致しており、風化により剥離を起こす素因となっている可能性がある。

5. 今後の課題

本研究では、防水剤塗布試験について、防水塗料の付着状態や色調変化防止の効果は確認できたが、防水スプレーがどのように付着し、どれほど撥水効果を発揮し、色調変化防止に寄与したかなどは確認できなかったため、防水スプレーの噴霧前と噴霧後の大谷石それぞれに EDX で元素分析を行った上で色調変化を測るなどの方法で、防水スプレーの正確な色調変化防止効果について検討する必要がある。

大谷石表面の色調変化深度の確認試験について、色調変化深度を確認し、採掘からの経過時間の長さによって大谷石の奥部分の強度が異なることが確認されたので、大谷石の奥部分の強度と、色調変化の過程に関係があるのかを検討する必要がある。

色調変化と強度との関連性を調べる試験について、 a^* 値と NP 値(N/mm)を測る際に針が奥に刺さる回数のどちらともに強い相関関係が確認された。しかしながら、粉末 XRD 試験では、色調変化面とその内部の面で Quartz の特性を表す X 線回折強度のピーク値に差があることが確認されたことより、簡易的に Quartz の含有量が異なる

ことが確認されたが、定量分析を行い、より深く風化の原因を究明していくことが望まれる。

大谷石ひび割れ面の分析では、堆積層の向きとひび割れ方の関連性を確認できたので、実験を重ね、ひび割れ面と剥離の関連性を検討していきたい。

異なる切り出し面の表面分析試験について、面の違いによる強度や構造の違いは確認できたが、繊維状の構造が現れる理由を確認できなかった。このために、繊維状の構造部分の元素分析や繊維状の構造部分と他の部分にわけて針貫入試験を行うなどの詳細な分析を行うこと等により、繊維状の構造について詳しく検討する必要がある。

屋外における色調変化防止試験について、防水塗料を塗布した場合の色調変化防止効果は確認できたが、防水

スプレーを噴霧した場合の大谷石表面の a^* 値が一旦増加し赤褐色へと推移する傾向を示し、その後減少していたので、より長期的な試験を行い、経過を観察する必要がある。

参考文献

- 1) 例えば、依田さやか、清木 隆文、飯村 淳、大谷石の風化に伴う色調及び強度変化の関連性の検討、第 15 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、大阪、岩の力学連合会、6p、岩の力学連合会、2021.1.
- 2) 清木 隆文、榎木 康佑、鶴田 亮介、飯村 淳、大谷石の色調変化定量化及び剥離防止 法に関する検討、第 47 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集、pp.68-73、土木学会、2020.1.

CONSIDERATION OF SURFACE CHANGE OF OYA TUFF BY WEATHERING AND RELATION AMONG ITS COLOUR CHANGE AND THE STRENGTH

Yuta TOKUTOME, Tkafumi SEIKI and Jun IIMURA

Oya tuff is classified to pyroclastic pumice tuff and excavated in Oya town, Tochigi Prefecture, Japan. It is a soft rock material and easily weathered. In this study, we carried out preserving those original condition of Oya tuff by splaying / soaking up some waterprrof agents. And we also empirically check the relation among surface colour tone change and strength degradation during accelated weathering process. We also checked internal strength beneath the weatherd surface layer. It cleared that a layer part just below the surface tended weaker than the fresh ones. The weatheng couse to decompose structural mineral beneath the surface by miglating moisture may affect the strength degradation and causes exfoliation of the surface.