

大谷石類似石の工学的性質の比較と大谷石の自硬性に関する研究

林 聖也¹・高梨 倫明²・佐藤 陽³・清木 隆文^{4*}

¹株式会社 浅沼組（〒543-8688 大阪市天王寺区東高津町12番6号）

²焼津市役所（〒425-8502 静岡県焼津市本町2丁目16番32号）

³国土交通省関東地方整備局 鹿島港湾・空港整備事務所
（〒314-0021 茨城県鹿嶋市栗生2254）

⁴宇都宮大学大学院 工学研究科（〒321-8585 宇都宮市陽東7-1-2）

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

本研究では、はじめに、大谷石と大谷石類似石である深岩石、大谷戸室石、田下石、芦野石、板橋石、岩舟石の構成成分の違いを把握し、構成鉱物を特定することを目的として、X線粉末回折試験を行った。加えて、含有元素を特定するため、走査型電子顕微鏡を利用した。また、これらの岩石試料に対してポイントロード試験などで一軸圧縮強さを測定し、これらの観察、実験を行うことで、構成成分、含有鉱物、強度の特性の比較を試みた。また、特に、これらの岩石試料の中で自硬性を示すと言われる大谷石に注目し、含水量が異なる大谷石の強度変化についての定量的な把握および原因の究明を試みた。

Key Words : Oya tuff, similar type rock, XRD, self hardening, water content

1. はじめに

栃木県宇都宮市は代表的な堆積軟岩である大谷石の産地であり、耐震性、耐火性に優れ、硬岩と比較して軟らかく加工しやすいことから様々な用途に使用されてきた。しかし、風化の進行が早いため、石材表面の強度の低下が起こる。また、他の類似石においても、それぞれ異なった化学組成、色調、工学的性質を示している。

これまでに、大谷石の化学組成や強度特性についての研究は多くあるものの、含有鉱物と強度を結びつける研究や、大谷石類似石との比較による工学的性質の違いについての研究実績はない。そこで、大谷石と、大谷石類似石(表-1)である、大谷戸室石、深岩石(白目、青目)、田下石、板橋石、芦野石、岩舟石との工学的性質を比較することで、それぞれの岩石にはどのような特徴があり、岩石の強度とどのように結びつくのかということに注目し、大谷石の工学的特徴の成り立ちを探ることを目的とする。また、特に大谷石に注目して、大谷石には時間経過に伴い強度が上昇するという現象(自硬性)が報告されている。しかし、その現象の定量的な把握および原因の究明は行われていない。そこで、本研究では、「含水量

の変化に伴い強度がどのように変化しているのか」、
「間隙水が大谷石のどのような部分の強度低下に影響をあたえているのか」ということに着目し、自硬性や含水量の違いによる大谷石の強度変化についての定量的な把握および原因の究明を目的とした。

2. 試験方法について

本研究では、以下に示す試験を行い、大谷石と大谷石類似石の工学的性質の違い及びその原因を明らかにする。

- 基本物理特性の測定：各種岩石における、乾燥密度、有効間隙率の測定。
- ポイントロード試験：不定形供試体の一軸圧縮強さの測定。
- X線粉末回折試験：化学組成や鉱物組成の比較。
- 走査型電子顕微鏡(FE-SEM/EDX)：観察領域に含まれている元素をエネルギー分散 X 線分光法(Energy Dispersive X-ray spectrometry, 以下 EDX)で定性的、定量的に確認。
- 画像解析：画像解析ソフト(MEDIA CYBERNETIC 社製 Image-Pro ver.4.0)による、岩石表面のグループ別面積比

表－1 大谷石と大谷石類似石一覧

岩 種	産 地	概 要	石 種	産 地	概 要
大谷石	栃木県 宇都宮市 大谷町	灰緑～青緑白色の緑色凝灰岩（軽石質凝灰岩）で、石塀などに最もよく使われており、耐火性・耐震性・耐熱性・加工性に優れ、日本の建築用軟岩の代表として有名である。ミソと呼ばれる、暗緑～暗褐のモンモリロナイト等の粘土鉱物を生じ、さらに風化すると凹穴になる。	板橋石	栃木県 日光市	凝灰岩で、不純物を含まず緻密で、色調は真っ白である。
大谷戸室石	栃木県 宇都宮市 大谷町	大谷石と似ているが、大谷石に比べて吸水率が高く少し軟らかい。また、ミソが大谷石に比べると余り目立たない。	芦野石	栃木県 那須郡 那須町芦野	福島県境に至るまでの国道に沿った約10キロ間で採石される石英安山岩質溶結凝灰岩。色調は灰色で、耐久性・耐熱性に優れている上に細工・加工がしやすいという特徴がある。
深岩石	栃木県 鹿沼市 笹原田	凝灰岩で、形成された時代も大谷石と同時期である。大谷石に比べて、ミソが少なく、緻密で吸水率が低く、圧縮強度が高く、風化抵抗性も比較的高い。これに加えて、深岩石には白目と青目があり、採掘される深さによって色が異なる。	岩舟石	栃木県下都 賀郡岩舟 町、足尾山 系の最南東 端に位置す る岩舟山	新生代に珪石の上に噴出した安山岩が風化により崩れて礫となり、造岩に当たり、付近にあった小石を巻き込んで火山灰とともに膠結したもので、安山岩質角礫凝灰岩といわれる。
田下石	栃木県 宇都宮市 田下町	大谷石と同様に坑道掘りで採掘され、大谷石の細目に分類される。大谷石のようにかさぶた状に剥がれ落ちたり、肌落ちしたりすることが無く ¹⁾ 、ミソと呼ばれる褐色の変質部分を含まない特徴がある。			

の測定。本研究では、岩石試料表面に現れている基質部分、岩片・鉱物部分、ミソ部分とその石材内部の含有率を代表しているとしてグループ分けした。

- (f) 針貫入試験：針貫入勾配 NP を測定し、岩石表面の基質部分における換算一軸圧縮強さの測定。

3. 各種試験結果

(1) 基本物理特性の測定結果

各種岩石における基本物理特性(乾燥密度と有効間隙率)の測定結果を図－1に整理して示す。

(2) ポイントロード試験結果

各種岩石におけるポイントロード試験結果を一軸圧縮強度に換算し、整理した結果を図－2に示す。

(3) X線粉末回折試験結果

各種岩石に実施したX線粉末回折試験結果を示す。

a) 大谷石、大谷戸室石のX線回折強度

定性的には、大谷石(図－3)と大谷戸室石(図－4)はどちらもClinoptilolite(単斜プチロル沸石)とQuartz (石英)が検出され、ピークは類似している。

b) 深岩石の白目、青目のX線回折強度

大谷石、大谷戸室石との相違点として、白目(図－5)、青目(図－6)ともに、Quartz, Clinoptiloliteに加えて、長石であるAlbite(曹長石)を含有していることが確認された。Albiteは、珪酸塩鉱物の一種であり、Naに富む斜長石である。

c) 田下石のX線回折強度

田下石(図－7)からは、沸石鉱物である，Mordenite(モルデン沸石) が検出された。Mordeniteは針状結晶で緻密な塊であり、珪酸塩分に比較的富む火山岩の空隙を満たしてQuartz、沸石類などを伴って産する²⁾。

d) 板橋石のX線回折強度

板橋石(図－8)は、外来岩片やミソなどの不純物を含まない岩石であることから、比較的分かりやすく、回折強度の高いピークのグラフが得られた。含有鉱物として、Quartz, Albiteが検出された。板橋石は、Quartz, Albiteを主成分としていることが確認できた。

e) 芦野石のX線回折強度

芦野石(図－9)からは沸石鉱物は検出されず、Quartz, Albiteに加えて、Cristobalite(クリストバル石)が検出された。Cristobalite は、SiO₂の結晶多形の一つで、Quartzの高温結晶形である³⁾。

f) 岩舟石のX線回折強度

岩舟石(図－10)は他の大谷石類似石とは異なり、多種多様な外来岩片で構成されており、様々なピークが現れた。検出された主な鉱物としては、Quartz, Albite, Cristobaliteが挙げられる。特定できなかったピークを示す成分は、定性分析を行った際、主にNaを含む様々な鉱物のピークと類似していた点から、Naを多く含む珪酸塩鉱物のものであると推定される。

4. 大谷石類似石に関する考察

(1) 岩石試料における基本物理特性と一軸圧縮強さの関連性について

各種岩石試料の乾燥密度と有効間隙率の測定結果について整理したものを図－11に示す。すべての岩石において、乾燥密度の増加に伴い、一軸圧縮強さも増加する傾向が確認された。また、有効間隙率の増加に伴い、一軸圧縮強さが減少する傾向が確認された(図－12)。これは、岩石の構造が密なほど、一軸圧縮強さが高いことを示している。逆に、岩石の構造が密ではなく、間隙が多いほど、一軸圧縮強さは低くなることも示している。大谷石、大谷戸室石、深岩石は、基質部分、岩片部分、ミソ部分

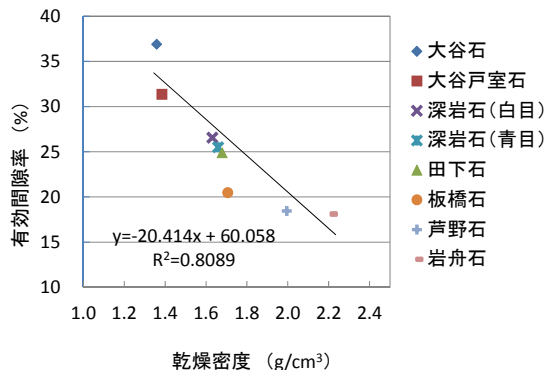


図-1 各種岩石における基本物理特性

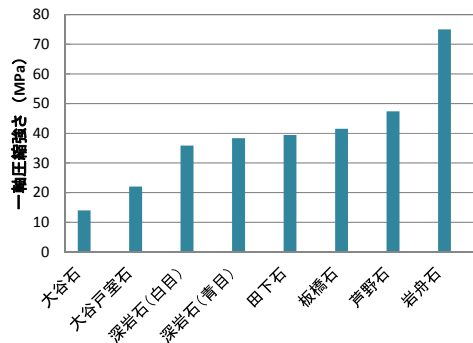


図-2 各種岩石の換算一軸圧縮強さ

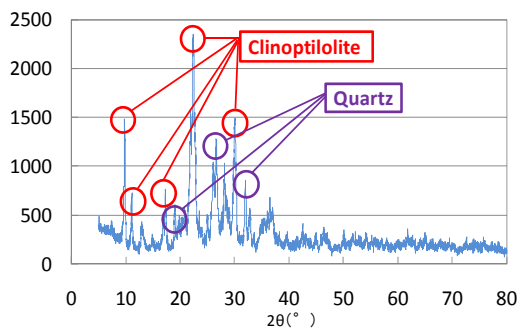


図-3 大谷石のX線回折強度

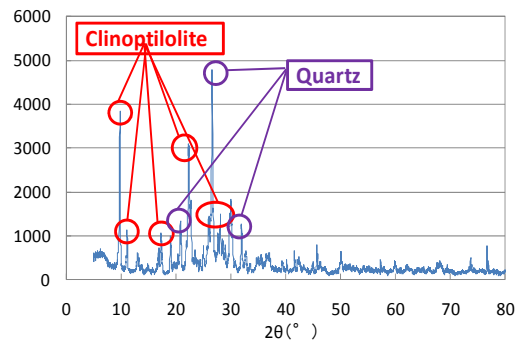


図-4 大谷戸室石のX線回折強度

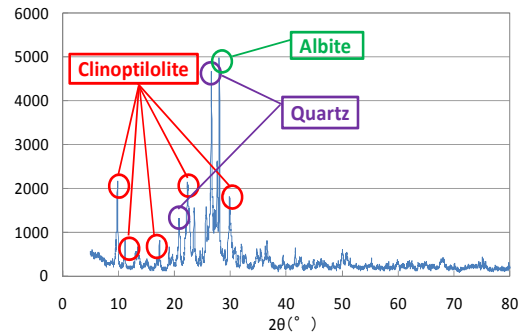


図-5 深岩石(白目)のX線回折強度

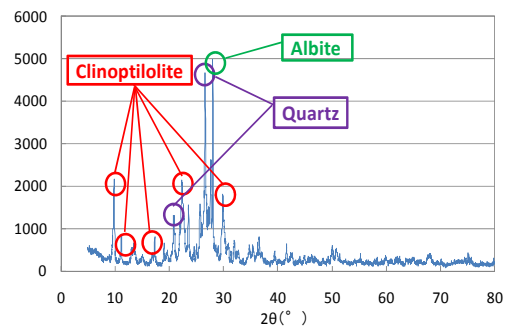


図-6 深岩石(青目)のX線回折強度

で構成されている。図-11における乾燥密度と有効間隙率の関係から、岩石の構造において、ミソ部分の含有率が高ければ、有効間隙率が増加し、乾燥密度は減少すると考える。乾燥密度と一軸圧縮強さの関係、有効間隙率と一軸圧縮強さの関係を絡めて考えると、ミソ部分の含有率が高ければ、一軸圧縮強さは低下し、逆に、ミソ部分の含有率が低ければ、一軸圧縮強さは大きくなると考えられる。また、田下石、板橋石、芦野石、岩舟石の構造は、ミソ部分を含まず、基質部分と岩片部分で成り立っている。前述のとの関連性より、ミソ部分を含まなければ、乾燥密度は増加し、有効間隙率は減少すると考えられ、田下石、板橋石、芦野石、岩舟石に関しては、岩石の基質部分、岩片部分の面積比が岩石の基本物理特性、一軸圧縮強さに影響していると考えられる。

(2) 大谷石、大谷戸室石、深岩石におけるミソ部分の面積比、一軸圧縮強さの関連性について

図-13からミソ部分の面積比が増加するにつれて、一軸圧縮強さが減少する傾向が確認された。大谷石のような新第三紀後半以降に堆積した泥岩や凝灰岩は堆積性軟岩と呼ばれ、強度が低いことに加え、スメクタイト系の膨張性粘土鉱物を含むことが確認されており、変質鉱物として膨張性粘土鉱物を含む軟岩は吸水膨張による劣化が起りやすい。さらに、膨張性粘土鉱物を含む軟岩の劣化は、その種類、含有量、交換性陽イオン組成、軟岩自体の強度などにより特徴づけられるとされている⁴⁾。以上の関連性から、岩石中のミソ部分の含有率は、一軸圧縮強さに影響を与える主要因の一つである。ミソの含有率の増加に伴い、乾燥密度、一軸圧縮強さは減少し、有効間隙率は増加する傾向が裏付けられた。

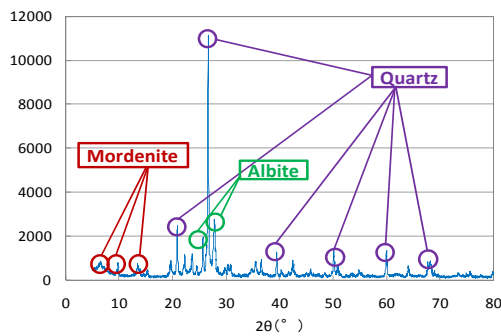


図-7 田下石のX線回折強度

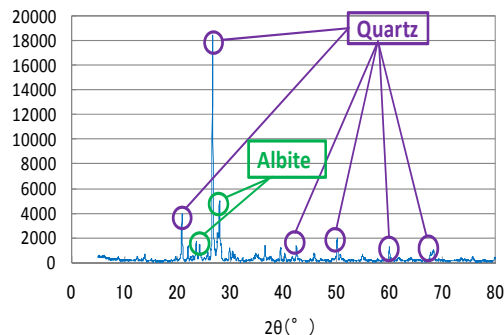


図-8 板橋石のX線回折強度

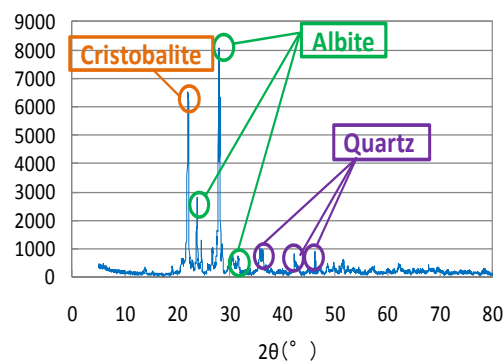


図-9 芦野石のX線回折強度

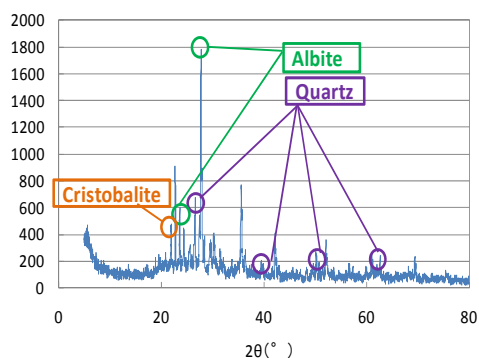


図-10 岩舟石のX線回折強度

5. 大谷石の自硬性の確認

(1) 大谷石の自硬性の確認手順

本研究では、採石地下空間内の壁面で水分を含んだ試料の強度(以下、含水強度)、含水強度と自硬性との関連を捉えるために、採石年代の異なる壁面(新鮮、採石してから10年経過、採石してから30年経過)に対して含水比試験、針貫入試験を行った。また、採石場と製品石材

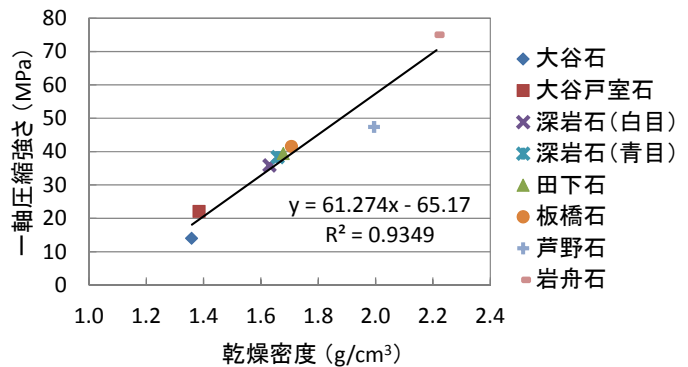


図-11 乾燥密度と一軸圧縮強さの関係

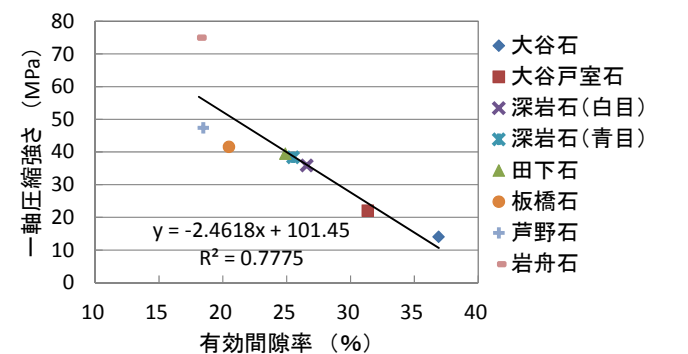


図-12 有効間隙率と一軸圧縮強さの関係

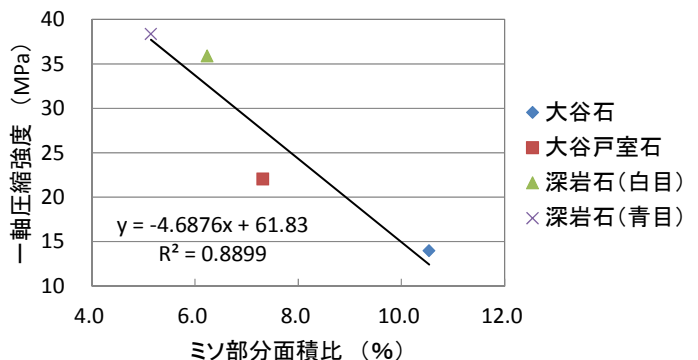


図-13 ミソ部分面積比と一軸圧縮強さの関係

の含水強度の違いを把握するために、サンプル(製品石材)に対しても同様の試験を行った。また、各構成部分を走査型電子顕微鏡により詳細な構造を細かく観察した。それに加え、X線粉末回折試験を行うことにより、各部分に含まれる主要な鉱物を特定し、水分、強度との関連性を明確にした。

(2) 大谷石の自硬性確認試験・観察結果の考察

大谷石壁面の換算一軸圧縮強さと含水比との間には良好な正の相関があり、含水比が低いほど換算一軸圧縮強さは高い傾向を示している(図-14)。なお、含水比は、現場から試料を採取し、室内で含水比試験を実施して求めた。採石年代の観点から見ると、採石年代が古い壁面ほど、含水比は低い傾向を示した(図-15)。これは、壁面表面から水分が長い年月をかけて水蒸気として抜けていったことが原因と考えられる。さらに、採石年代が古い壁面ほど壁面表面の強度は上昇している(図-16)。これ

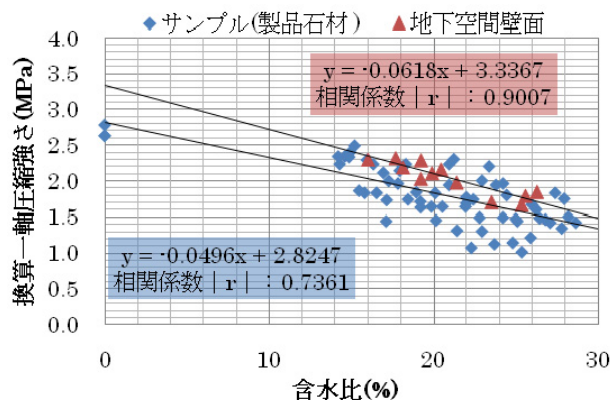


図-14 大谷石の含水強度について

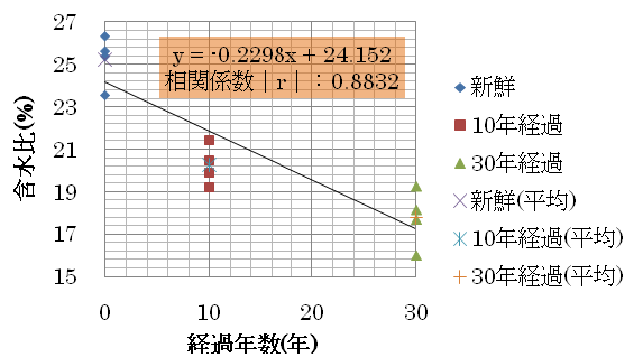


図-15 含水比試験結果

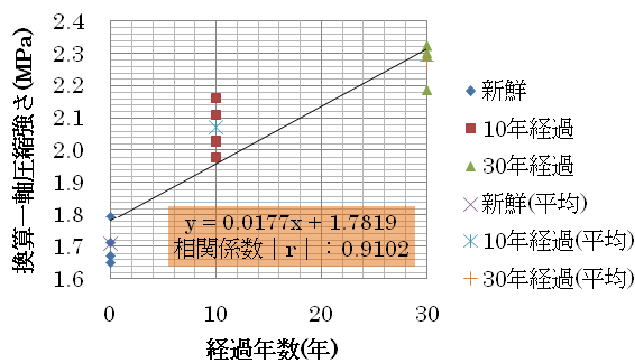


図-16 針貫入試験結果

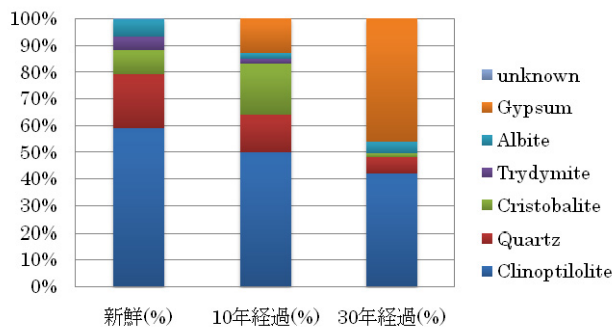


図-17 含水比試験結果(現地調査)

は、採石年代が古い壁面ほど壁面表面は乾燥し硬化するためであると考えられる。このことから、自硬性は含水量に大きな影響を受けると考えられる。また、X線粉末回折試験結果より、採石してからの経過年数に伴い、石膏の含有率が高くなるとともに、大谷石の主成分⁹⁾として考えられているClinoptiloliteやQuartzの含有率が低くなる。また一方で、新鮮な試料では、QuartzやCristobalite, Tridymite(鱗珪石), Albite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(図-17)。酸性成分を含んだ降水が大谷石内部に浸透し、表面の乾燥によって再び表面付近に移動することで、主としてCa成分と結合してCaSO₄(硫酸カルシウム)が晶出膨張することにより、表面が剥離するものと考えられている⁹⁾ことや、大谷石の主成分であるClinoptiloliteの化学組成にCaO(酸化カルシウム)が含まれていること⁹⁾、風化の著しい大谷石試料ではClinoptiloliteは消滅し、風化の軽微な大谷石試料ではCaOやNa₂O(酸化ナトリウム)が選択的に溶脱されること⁷⁾が報告されている。これらの考えをもとにすると、採石後の経過年数に伴う石膏の含有率の上昇は、地下水の蒸散、浸透によってClinoptiloliteのCaOが溶脱され、その溶脱されたCaOのCa成分と地下水の酸性成分が結合することが原因と考えられる。また、10年経過した試料と30年経過した試料との成分を比較すると、両者の間で含有率の変化が大きいのは、Clinoptilolite, Gypsum, Cristobalite, Quartzであるが、Cristobaliteに関しては、時間経過との相

関がみられないため、個体差によるものであると考えられる。従って、壁面表面からの深さ1cmの範囲のClinoptilolite, Gypsum, Quartzの含有率の変化も、自硬性の原因と考えられる。

(3) 製品石材の含水強度、及び構成鉱物の変化

乾燥状態の大谷石サンプルを120時間蒸留水に浸けておき飽和状態にさせ、風乾状態で脱水試験を行った。適当な時間間隔で高周波水分計による水分量の計測と針貫入試験を行い、脱水過程における含水比と換算一軸圧縮強さの関係を求めた(図-14)。その結果、大谷石サンプルの換算一軸圧縮強さと含水比との間には良好な負の相関があり、含水比が低いほど換算一軸圧縮強さは高い傾向を示した(図-14)。これは、地下空間内の壁面の含水強度の結果と一致している。しかし、構成鉱物の観点からみると採石場壁面のX線粉末回折試験結果のように、時間経過に伴うQuartz, Cristobalite, Tridymite, Albiteの含有率の減少やGypsum含有率の上昇は見られず、試験前後では、構成鉱物の違いはほとんど見られなかった。このためGypsumの析出には、降水や地下水に含まれる成分が大きな影響を与えていると考えられる。一方で今回、大谷石サンプルの含水強度試験では、蒸留水を使用したため、塩析出の供給源がないので、石膏が析出しなかったと考えられる。

6. まとめ

(1) 大谷石及び大谷石類似石の構成について

X線粉末回折試験において、すべての岩石からQuartzの存在が確認された。その他の主要鉱物としては、Clinoptilolite, Albite, Clistobaliteが確認された。また、画像解析ソフトを用いて岩石の表面の観察を行った結果、視覚的には、大谷石、大谷戸室石は比較的似ており、基質部分、岩片及び鉱物部分、ミソ部分から成っている。深岩石は大谷石と同様にミソ部分が存在するが、基質部分が大谷石に比べて緻密で、岩外来片及び鉱物部分を多く含んでいる。また、深岩石は、採掘される深さによって白目、青目といった岩石の色調が異なる特徴が確認されている。しかし、本研究での走査型電子顕微鏡による定量分析の結果において、深岩石の青目からはFeの存在が確認されたが、白目からはFeの存在が確認されず、仮に存在しているとしても青目に比べて微量であると考えられる。このことから、深岩石における白目と青目の色調の違いは、採掘される深さにも影響するが、Feから成る鉱物による色調の違いであると推測した。田下石、板橋石、芦野石は前述の岩石と異なり、ミソ部分は存在せず、非常に緻密な基質部分と、外来岩片及び鉱物部分から成っている。岩舟石は、安山岩礫質凝灰岩と呼ばれ大谷石と同様の凝灰岩ではあるが、構造はほぼ外来岩片から成っており、外来岩片が基質部分を担っている。EDXによる定量分析の結果からも、Mg, Fe成分が高く、Siの存在が少ない。このことから苦鉄質鉱物の可能性が高く、大谷石類似石として考えるか難しいところである。

(2) 大谷石及び大谷石類似石の工学的性質について

ポイントロード試験の結果から、岩舟石、芦野石、板橋石、田下石、深岩石(青目)、深岩石(白目)、大谷戸室石、大谷石の順で一軸圧縮強さが高いことが確認された。また、各種岩石試料において、乾燥密度、一軸圧縮強さの増加に伴い、有効間隙率が減少する傾向がみられ、高い相関も得られた。そこで、有効間隙率の増加に影響を与える要因のひとつとして、ミソ部分の存在に着目し、ミソ部分を含有する大谷石、大谷戸室石、深岩石(白目、青目)において、ミソ部分の含有率と一軸圧縮強さには高い相関があり(図-13)、ミソ部分を含有する岩石の強度は、ミソ部分の含有率に影響を受けるという結論に至った。一方、ミソ部分を含有しない、田下石、板橋石、芦野石については、一軸圧縮強さは基質部分の面積比に

支配されると考えたものの、図-13より逆転する傾向が生じた。そこで、岩石試料の大部分を占める基質部分の面積比ではなく、基質部分そのものの強度に影響されると考え、岩石基質部分を対象に針貫入試験を実施すると、基質部分の換算一軸圧縮強さが大きくなるにつれ、結果として岩石の一軸圧縮強さも増加する。よって、ミソ部分を含まない岩石においては、基質部分の強度が、岩石の強度を決定する一因となる。

(3) 大谷石の自硬性について

各試験の結果を総合すると、含水量の違いによる大谷石の強度変化は、基質部分に原因があると考えられる。この基質部分は、様々な鉱物が混在する多孔質構造であり、乾燥することで収縮し、強度が上昇すると考えられる。この乾燥収縮は、サクシジョンの影響を受けていると考えられる^{8) 9)}。また、基質中に含まれる Thenardite のように水に可溶な膠結物質が、大谷石に吸収された水分により溶解することも強度変化の原因であると考えられる。この自硬性は、化学的に塩類が関与しているとも考えられるので、さらなる確認が必要である。

参考文献

- 1) 佐藤 陽, 清水隆文: 風化による大谷石の構成成分と表面色調への影響および強度変化に関する検討, 第12回岩の力学に関する国内シンポジウム(第29回西日本岩盤工学シンポジウム)講演論文集, 岩の力学連合会, pp.737-744, CD-ROM, 2008.
- 2) 森本信男: 造岩鉱物学, 東京大学出版会, 1989.
- 3) 井上厚行: 膨潤性粘土鉱物の特徴, 鉱物としての見方(地盤工学会・技術者交流特別セッション, 粘土科学47(3), 日本粘土学会, pp.161-167, 2008.
- 4) 地学団体研究会: 地学事典, 平凡社, 1996.
- 5) ロナルド・ルイス: ボウイネッツ 岩石と宝石の大図鑑, 誠文堂新光社, 2007.
- 6) 富永博夫: ゼオライトの科学と応用, 講談社, 1987.
- 7) 千葉とき子, 松原聰: 栃木県宇都宮市大谷産軽石凝灰岩中の単斜ブチロル沸石, 国立科学博物館専報, Vol.38, pp.21-25, 2002.
- 8) 木下直人, 安部 透, 若林成樹, 石田 毅: 高温下岩石の力学特性に関する研究, 土木学会論文集, 第561号/III-38, pp.151-162, 1997.
- 9) West, G.: Effect of suction on the strength of rock, Quarterly Journal of Engineering Geology, Vol.27, pp.51-56, 1994.

STUDY ON COMPARISON OF ENGINEERING PROPERTIES AMONG OYA TUFF AND ITS SIMILAR TYPE ROCKS AND SELF-HARDENING OF OYA TUFF

Seiya HAYASHI, Noriaki TAKANASHI, Akira SATOU and Takafumi SEIKI

This study tried to clear difference of engineering properties among Oya tuff and the similar type rocks of Oya tuff, Oya-Tomuro tuff, Fukaiwa stone, Toge stone, Ashino stone, Itabashi stone, Iwafune stone. The authors carried out water content test, needle penetration test, poing loading test, XRD, EDX. These experiment and observation have cleared that the higher water content and content rate of clay mineral are the weaker uniaxial compression strength is. Especially The authors focused on the process of self hardening of Oya tuff with same approaches. It concludes that water content and crystalised of gypsum may cause hardening on the surface of Oya tuff.