

塩類風化による地圏材料の劣化に関する研究 Salt Weathering on Geosphere Materials—Oya Tuff and Concrete in Architectures

プロジェクト代表者:小口千明(地圏科学研究センター・助教授)
Chiaki T. OGUCHI (Geosphere Research Institute, Associate Professor)

ABSTRACT

An abandoned underground quarry of Oya-tuff has much salt efflorescence in winter. Besides salt weathering, freeze-thaw weathering and slaking must be considered because of winter temperature below 0°C in this area and swelling clays as a component of the rock. Field survey was performed to collect salts and to measure moisture contents. Thenardite and gypsum are detected using XRD as main salts as well as zeolites. Moisture contents are relatively steady due to underground environment. Concerning concrete building, salt weathering is also observed on the pedestrian deck of Department of Engineering at Saitama University made in 1969. The observed salt minerals were trona ($\text{Na}_3\text{H}(\text{CO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) and calcite (CaCO_3). Trona was much seen in winter but less in summer.

To know the influence of rock properties on weathering, three kinds of Oya-tuff and two kinds of concretes were used for salt experiments. In the case of Oya-tuff, the freeze-thaw and slaking experiments were performed for comparing salt experiment with Na_2SO_4 solution. The specimens were made square pillar specimens whose bottoms are sunk into distilled water for freeze-thaw and slaking experiments, or Na_2SO_4 saturated solution for salt weathering experiment. Dry conditions were performed for 24 hours in an oven set 40°C for slaking and salt weathering experiments, and in a freezer of -15°C for freeze-thaw experiment. Wet conditions were then carried out for 24 hours left in a room of *ca.* 20°C. This wet-dry cycle was repeated by 10 cycles. Through these experiments, it is cleared that the specimens for salt weathering experiment were the most severely destroyed. In the case of concretes, dense concrete specimens and porous ones (Spasars) were sunk in five solutions of H_2O , trona ($\text{Na}_3\text{H}(\text{CO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), NaHCO_3 , Na_2CO_3 and CaSO_4 in 24 hours at room temperature and then dried in an oven at 40°C. This wet-dry cycle is repeated and the specimens sunk in Na_2CO_3 and trona solutions are weathered.

Weathering Susceptibility Index (WSI) of each case is calculated using crystallization pressure and data of pore size distribution. The WSI values are harmonized with the results of this salt weathering experiment.

Keywords: Salt weathering, Weathering susceptibility index, Oya-tuff, Concrete

1. はじめに

岩石材料の利用方法として、例えば、一般住宅の壁や外構石塀などがある。建設当初は美しい外観であったものが建設後数十年も経つと、風化・劣化により岩石表面が汚れ、剥離等が生じることが多い。このような例は、世界遺産および国指定重要文化財級の石窟や石造建築物をはじめ、有名石材による一般住宅の壁や外構、地下室壁面、あるいは煉瓦やコンクリート構造物など、地圏環境に所在のあらゆる建設物で見られる。このような自然岩石および人工岩石の劣化は、主として塩類風化によることが報告されており(eg, Winkler & Wilhelm, 1970; Arnord & Zhender, 1990; Goudie & Viles, 1997; Kuchitsu, 2000; Oguchi et al., 2002, 2006; Matsukura et al, 2004)、その現象は天然岩石における塩類風化とはほぼ同じプロセスで起こっていると考えてよい。塩類風化は、岩石中の空隙間を移動している溶液が蒸発して溶存物質が析

出し、その際に生じる結晶圧とともに周囲の岩石を破壊していく現象である。本研究においては、大谷石採石場跡地である大谷資料館(栃木県宇都宮市大谷町に所在)内部の壁面と、埼玉大学工学部のコンクリート製ペDESTリアンデッキを対象に現地調査と室内実験を併行して行い、それぞれの岩石における塩類風化における岩石物性の影響について調べた。

2. 調査対象物の外観

(1) 大谷資料館

大谷石は海水中に堆積したデイサイトまたは流紋岩質の軽石塊と同質の火山灰からなり、荒い堆積層理を示す。軽石塊はしばしば変質して暗緑色・暗褐色の鉄分に富む。この部分は「みそ」と呼ばれ、膨潤性粘土鉱物であるモンモリロナイトを含む。大谷資料館は、石材採掘の際に地下を三段

の深さで掘り進められており、最深部の空間には地下水が溜まっている。館内の年間平均気温はほぼ 15℃である。秋から春先にかけて岩盤表面に白色物質が多く析出し、夏場にはその析出量が少なくなることが観察されている。このような白色物質は岩盤を構成する粒子を押しつけて析出しており、壁面下部には白色析出物と粉末状の岩盤崩落物とが堆積している(図1)。

大谷凝灰岩の地下採掘場跡地においては、1991年に岩盤崩落事故が起きている。この事故では過度に石材を採掘したことが指摘されているが、一方で、この岩石そのものが風化・劣化しやすいことも原因の一つとされている。



図1 大谷資料館の壁面における塩類析出

(2)コンクリート製ペDESTリアンデッキ

埼玉大学工学部のペDESTリアンデッキは、1969年に竣工された。建設後37年を経過しており、天井や橋脚に劣化が認められる。天井部分では、秋から春先にかけて、ひび割れや錆びた鉄筋の周辺に白色析出物が見られ、コンクリート片が浮き上がり、手を触れただけで容易に剥落する状況である(図2)。橋脚部分では、下部にひび割れが多い傾向があるが、橋脚そのものの構造にはほとんど影響はないと思われる。また、床面との境界付近で、ごくわずかの白色の物質が秋から春先に



図2 ペDESTリアンデッキにおける塩類析出

かけて見られることもある。天井および床面付近における白色物質の析出現象は、岩石などで見られる塩類風化ときわめて類似しており、コンクリートにおいても塩類風化が起こっていると考えられる。

3. 現地調査と塩類の特定

(1) 大谷資料館

大谷資料館には、2ヶ月に1回の頻度で赴き、館内5ヵ所にて岩盤表面からの粉末状崩落物と白色析出物を採取し、壁面含水比を測定した。含水比測定には赤外線水分計(JE-100CC)を用い、各測定箇所の床面から20 cm、60 cm、100 cm、140 cm、170 cmの箇所を測定した。また、採取物については、実験室に持ち帰り、X線粉末回折分析(XRD)により特定した。

壁面含水比については、大谷資料館の入り口に近い箇所では含水比の季節変化が大きく、深部ほど季節変化が小さいという結果が得られた。XRD結果によれば、白色析出物はテナルダイト(Na_2SO_4)、石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)、沸石(一般式: $(\text{Na}_2, \text{K}_2, \text{Ca}, \text{Ba})[(\text{Al}, \text{Si})\text{O}_2]_n \cdot x\text{H}_2\text{O}$)などであり、含水比の高い部分では沸石が卓越する傾向があった。

(2)コンクリート製ペDESTリアンデッキ

数ヶ月に1度の頻度で劣化が進んでいる天井部分における塩類析出状況を観察し、写真を撮影した。また、析出塩や剥落したコンクリートを採取して実験室に持ち帰り、含有鉱物および塩類鉱物をXRD(X線粉末回折法)で、微小範囲における元素濃度分布をSEM-EDS(エネルギー分散型元素分析装置付き走査型電子顕微鏡)により求めた。

夏場にはほとんど析出していなかった塩が、冬には広範囲にわたり析出し、特にコンクリートのひび割れ部分や剥き出しになっている鉄筋周辺に多く析出している傾向があった。また、5月に採取した塩類鉱物はトロナ($\text{Na}_3\text{H}(\text{CO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)であったが、10月の試料にはトロナはほとんど検出できず、12月の採取物で再び確認できた。なお、硬い白色析出物はカルサイト(CaCO_3)であり、一年を通じて検出できた。

4. 塩類風化実験

(1) 大谷凝灰岩

現地調査より、白色析出物の主要成分は硫酸塩であり、塩類風化は大谷資料館の壁面劣化の

一要因と言える。この他、宇都宮市付近では、冬季には最低気温が 0℃を下回ることもあるので、凍結融解による劣化の可能性も否定できない。また、大谷石そのものには膨潤性粘土鉱物が含まれているため、乾湿風化による劣化も考えられる。以上を考慮し、これら3種の風化プロセスを同時に比較できる実験を行った。なお、大谷凝灰岩には、石材価値の観点から、荒目、中目、細目の三種が生産されているため、実験にはこれらを用いて比較した。表 1 にこれらの岩石物性を示す。

実験方法は以下の通りである。底面を 5 cm×5 cm、高さを 15 cm に整形した3種の大谷凝灰岩試料を容器に立てて入れて、下部から 3 cm の高さまで溶液に浸した。ここで、溶液とは、塩類風化実験の場合は、硫酸ナトリウムの 20℃における飽和溶解濃度、凍結融解実験と乾湿風化実験の場合は蒸留水である。供試体を約 20℃で各溶液に 24 時間液浸後、塩類風化および乾湿風化実験では 40℃で 24 時間乾燥させ、凍結融解実験では約 -15℃の冷凍庫内に 24 時間置いた。この液浸-乾燥(凍結)過程を 1 サイクルとして、10 サイクルまで繰り返した。1 サイクル終了ごとに写真撮影と重量測定を行い、蒸発した液量を補充した。

実験の様子を図 3 に示す。塩類風化実験では、1 サイクル終了時に試料の崩落と塩類析出が確認でき、10 サイクル終了時には荒目の大谷凝灰岩では供試体全体を塩類が厚く覆い、岩石を大きく剥落させていた。乾湿風化実験では、実験開始から終了まで、みその部分の崩落は確認できたものの、岩石全体の目立った変化はなかった。凍結融解実験では、溶液補充量では 3 種の実験の中で最少であったが、実験が進むごとに溶液の色が濁っていく様子が観察された。

(2) コンクリート類

1 辺が 5 cm の立方体に整形したコンクリートおよびスペーサーの 2 種の供試体を 5 mm メッシュの

金網に乗せ、蒸留水、トロナ溶液、炭酸水素ナトリウム溶液、炭酸ナトリウム溶液、硫酸カルシウム溶液の 5 種類の溶液に 24 時間浸し、その後炉乾燥機で 24 時間乾燥させた。塩溶液はいずれも、20℃における飽和溶解度に相当する量を蒸留水に溶かして調整した。浸してから乾燥させるまでを 1 サイクルとし、1 サイクルごとに重量測定と写真撮影を行い、21 サイクル行った。測定した 2 種のコンクリート類の岩石物性については、表 1 に示した。

蒸留水に浸したものと硫酸ナトリウムに浸した試料からは、塩の析出は見られなかった。この 2 種類以外のトロナ溶液、炭酸水素ナトリウム溶液、炭酸ナトリウム溶液に浸した試料は 2 種類とも、1 サイクルから塩の析出が見られた。トロナ溶液に浸したコンクリート試料は 9 サイクルで剥落し、炭酸ナトリウム溶液に浸したコンクリート試料は 8 サイクルで剥落が確認できた。スペーサー試料では剥落は確認できなかった。実験終了時の写真を図 4 に示す。また、トロナ溶液に浸したサンプルの重量変化を実験前の試料の乾燥重量との比で表し、サイクルごとの結果を図 5 に示す。トロナ溶液に浸したスペーサー試料では、他の塩類溶液に浸したときよりも重量比が 1 番高くなった。また、コンクリートは 9 サイクル以降で重量比が減少し、実験前の重量比(重量比 1)を下回った。



図 3 塩類風化実験 8 サイクル後の供試体の様子 (左:荒目、中:中目、右:細目)

表 1 実験に用いた大谷凝灰岩およびコンクリート類の岩石物性

	大谷凝灰岩			コンクリート類	
	(荒目)	(中目)	(細目)	コンクリート	スペーサー
かさ密度 (g/cm ³)	1.43	1.43	1.47	2.07	1.98
真密度 (g/cm ³)	2.50	2.46	2.50	2.70	2.69
間隙率 (%)	33.68	33.03	34.14	23.33	26.394
圧裂引張強度 (MPa)	23.97	23.98	27.72	62.23	82.15
区間直径ごとの間隙総体積(mm ³ /cm ³)					
V ₁ (直径 10 ^{1.5} ~10 ^{0.5} μm)	0.0292	0.0381	0.0066	0.001	0.0009
V ₂ (直径 10 ^{0.5} ~10 ^{-0.5} μm)	0.1275	0.0278	0.0438	0.0076	0.0244
V ₃ (直径 10 ^{-0.5} ~10 ^{-1.5} μm)	0.0638	0.1286	0.1657	0.0406	0.0412

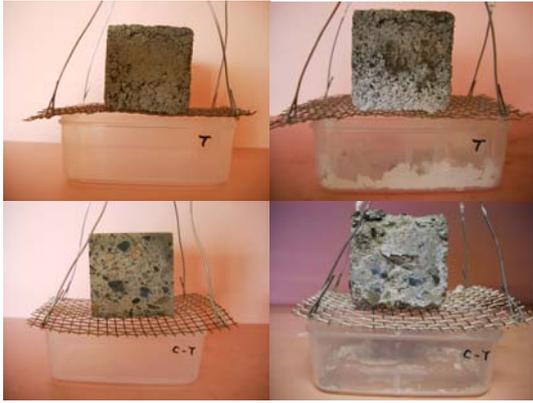


図4 トロナ溶液に浸した2種のコンクリート類の実験前と実験終了後の写真(上:スペーサー、下:コンクリート。左:実験前、右:実験後)

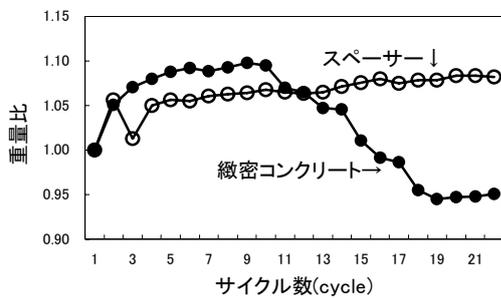


図5 サイクル数と重量比の変化(トロナ溶液の場合、実験前の重量を1とする)

5. まとめ

現地調査より、大谷凝灰岩およびコンクリート双方とも塩類風化が起きていることが確認できた。大谷凝灰岩ではテナルダイト (Na_2SO_4) が、コンクリートではトロナ ($\text{Na}_3\text{H}(\text{CO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) が主要な析出塩である。塩類風化実験からは、これらの溶液が岩石を劣化させることが確認された。その際、塩類が結晶化するときの結晶圧と岩石物性、とくに間隙径の大きさととの兼ね合いが支配要因となることが考えられる。Matsukura & Matsuoka (1996) によれば、易風化指標 (WSI : Weathering Susceptibility Index) は、間隙内の結晶圧と引張強度との比で表される。各実験におけるWSI値を算出すると、表2のようになった。これらの値は、実験結果および現地での現象と調和的である。

表2 実験から求められた結晶圧 (P_c)と易風化指標 (WSI)

	P_c (MPa)	WSI
大谷凝灰岩		
Na_2SO_4		
荒目	660.2	2.09
中目	382.4	0.064
細目	386.6	1.43
コンクリート		
$\text{Na}_3\text{H}(\text{CO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	47.83	0.77
NaHCO_3	4.01	1.43
Na_2CO_3	129.84	2.09
CaSO_4	89.25	0.064
スペーサー		
$\text{Na}_3\text{H}(\text{CO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	52.04	0.63
NaHCO_3	97.1	1.18
Na_2CO_3	141.27	1.72
CaSO_4	4.37	0.053

引用文献

- Arnold A, Zehnder K (1990) Salt weathering on monuments. In: Zezza F (ed) The conservation of monuments in the Mediterranean Basin 31-58, Grafo Brescia.
- Goudie AS, and Viles H (1997) Salt weathering hazards. John Wiley & Sons, Chichester.
- Kuchitsu N (2000) Process of salt weathering observed at a brick building, Shimoren Kiln, central Japan. Transactions of the Japanese Geomorphological Union 21: 261-276.
- Matsukura, Y. & Matsuoka, N. (1996) The effect of rock properties on rates of tafoni growth in coastal environments. *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplement Bd.*, 106, 57-72.
- Matsukura, Y., Oguchi, C.T. & Kuchitsu N. (2004) Salt damage to brick kiln walls in Japan: spatial and seasonal variation of efflorescence and moisture content. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 63, 167-176.
- Oguchi CT, Matsukura Y, Kuchitsu N (2002) Environmental and seasonal influences on the spatial distribution of salt efflorescence and weathering on brick kiln walls. Transactions of the Japanese Geomorphological Union 23: 335-348.
- Winkler EM and Wilhelm EJ (1970) Saltburst by hydration pressures in architectural stone in urban atmosphere, *Geol Soc Am Bull* 81: 567-572.