

氏 名	SWE YU
博士の専攻分野の名称	博士（工学）
学 位 記 号 番 号	博理工甲第 760 号
学位授与年月日	平成 21 年 9 月 18 日
学位授与の条件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学 位 論 文 題 目	Role of rock properties and salt efficacy in laboratory salt weathering (室内塩類風化実験における岩石物性と塩類効果の役割)
論 文 審 査 委 員	委員長 教 授 渡邊 邦夫 委 員 准教授 小口 千明 委 員 准教授 長田 昌彦 委 員 准教授 山辺 正 委 員 准教授 Celine Schneider (Reims University)

## 論文の内容の要旨

Salt weathering is known to be one of the most destructive mechanisms in the deterioration of natural rocks and porous building materials such as stone, concrete, mortar, and brick. It is thus important to fully understand the various aspects of salt weathering so as to find efficient ways to preserve monuments, modern buildings, and engineering structures. However, because of the simplicity-oriented experimental designs of most of the traditional salt efficacy and/or rock durability tests, some arguments, e.g. those about the efficacy of sodium sulfate and those about the relative influence of rock properties and salt efficacy on salt weathering, have not yet been settled over the course of nearly two centuries of investigations. In this study, an attempt was made to answer some of these research questions including (i) is sodium sulfate, the most widely used salt, invariably effective in destroying any type of rock, (ii) is salt weathering salt type-dependent or rock-type dependent, and (iii) can salt efficacy of rocks be predicted solely from their pore characteristics. Besides, the relative influence of individual rock properties and that of five different microporosities on salt crystallization damage were also evaluated.

To fulfill these objectives, a laboratory impregnation-drying experiment was performed using five types of salts to attack eight types of rocks. Prior to weathering test, the petrophysical and hydromechanical properties of the rocks were examined. Particularly, five different microporosities were calculated from mercury intrusion porosimetry data by setting five upper limits of micropores, such as 0.05, 0.1, 1, 2.5, and 5  $\mu\text{m}$ . Also, initial solution absorption capacity and salt uptake of the rocks were measured. The salt weathering experiment was done by impregnating unpolished 5-cm cube specimens of each rock with their appropriate solutions for 2 h at 20°C. The cubes were then dried in an oven for 20 h at 50°C. They were then allowed to cool down for 2 h at 20°C. This 24-h immersion-drying-cooling cycle was performed 70 times. During experiment, weathering progress and visual classification of damage pattern were recorded daily. To study the relationship between

pore characteristics, salt uptake, and damage, the pre- and post-experiment pore size distributions of the rocks were also examined by Mercury Intrusion Porosimetry. Some anomalous results were scrutinized by Scanning Electron Microscope coupled with Energy Dispersive Spectroscopy.

It is observed that, of the five salts used, sodium chloride and aluminium sulfate were invariably ineffective with all rock types while sodium carbonate, magnesium sulfate, and especially sodium sulfate were markedly more effective in damaging most types of the rocks used. Sodium sulfate emerged as the most destructive salt in six out of the eight rocks tested, and even granite was substantially disintegrated. However, sodium sulfate was found not to be invariably effective with any type of rock. It indeed manifested its impotency against a relatively weak rock, Tago Sandstone, which was severely damaged by magnesium sulfate through synergistic action of subflorescent crystal growth and repeatedly coating-detaching crusts. Present results also showed that both salt type and rock properties influenced the damage pattern. The durability ranking of the rocks became significantly altered with the salt type while the variation in salt efficacy ranking with rock type was less pronounced.

Moreover, Pearson correlation coefficients and Principal Component Analysis (PCA) indicated that most of the hydromechanical properties were the poor predictors of salt susceptibility of the rocks, whereas pore characteristics were found to have a significant effect on salt uptake and damage. Of the rock properties investigated, the microporosity of pores smaller than 0.05 or 0.1  $\mu\text{m}$  ( $P_{m0.05}$  and  $P_{m0.1}$ ) showed a critical influence on salt crystallization damage quantified by dry weight loss, whereas the microporosity of pores smaller than 5  $\mu\text{m}$  ( $P_{m5}$ ) played a more important role in salt uptake, as confirmed by the pore size distributions of pre- and post-experiment specimens. Statistical data revealed that with decreasing size of micropores, the correlation between salt damage and microporosity became more significant, whereas the correlation between salt uptake and microporosity became less pronounced. On the other hand, the connected porosity controlled salt uptake and mechanical strengths. Overall, pore characteristics were found to be the key factor controlling salt uptake and damage. Rocks with high amount of micropores ( $< 5 \mu\text{m}$ ) and higher proportion of micropores ( $< 0.05$  or  $0.1\mu\text{m}$ ) were particularly susceptible to salt crystallization damage. Thus, based on these pore characteristics, which can readily be obtained from a single mercury porosimetry measurement, a durability estimator called salt susceptibility index (*SSI*) was also proposed. The estimated outcomes correlated significantly with the actual dry weight loss of the rocks tested. However, the relative influences of salt type/efficacy and rock type/properties on salt weathering propensity were not clear enough to draw a reasonable conclusion. Furthermore, anomalies arose that could not be explained in terms of rock properties or salt efficacy alone. Salt damage appears to be influenced by the individual interactions between salts and rocks rather than rock properties and salt efficacy alone, which could explain the anomalous results.

## 論文の審査結果の要旨

塩類風化は天然の岩石や、コンクリート、レンガなどの建設・建築材料（以下、“石材”と称す）を風化・劣化させる要因の一つとして知られているが、そのメカニズムについては様々な観点からの調査が必要であり、明確でない。塩類風化については、これまでも多くの研究が為されてきたが、塩類の種類に視点をおいた実験と、岩石物性の種類に視点をおいた実験のどちらかに着目したものは多いものの、岩石物性と塩の種類を双方を同時に考慮したものはほとんど無いため、石材を塩類風化から守るための総合的な視点からの提唱はされてこなかった。本研究論文では、塩類が岩石に与える影響度を総合的に判断し得る一指標を提唱した。以下に、論文内容を記すとともに、学位論文審査の結果を要約する。

第1章では、序論として、塩類風化の現象の紹介と従来の研究を踏まえて、本研究の意図について述べた。すなわち、塩類風化に関するほとんどの文献をレビューしたうえで、岩石物性と塩の種類を双方を考慮することの意義を述べた。

第2章では、第1章のレビューを踏まえ、石材の塩類風化に影響を及ぼす程度が最も高いと一般認識されている硫酸ナトリウムが、必ずしもそうではないことについて述べた。硫酸ナトリウムは石材の耐久性評価に用いられる試薬でもあり、その評価方法には限界があることを意味する。塩類風化の要因として、近年の既存研究で最も着目されているのが岩石の間隙構造である。これらのことを踏まえ、岩石-塩溶液相互反応に対する間隙径分布の重要性を評価することを研究目的として、種々の岩石を用いて岩石物性、とくに間隙径分布に関して把握したうえで、種々の塩溶液を用いた塩類風化実験を行うことを述べた。

第3章では、塩類風化の一般理論について説明した。塩類風化のメカニズムとしては、塩そのものの熱による体積膨張、塩の析出（結晶）時の体積膨張、塩の水和時の体積膨張などがある。塩類風化においては、結晶成長時の体積膨張が第一義的に考慮されなければならないメカニズムである。また、塩の結晶化においては、多孔物体中（石材）の毛管現象が重要な働きをすることについても説明された。

第4章では、塩類風化実験の方法について説明された。まず、岩石および塩の種類に関する説明が記載された。使用した石材は、大谷石（凝灰岩）、白河石（熔結凝灰岩）、白浜石（細粒砂岩）、多胡石（粗粒砂岩）、イタリア産トラバーチン（石灰岩）、葛生石（ドロマイト）、抗火石（多孔質流紋岩）、真壁石（かこう岩）であり、いずれも実際の建設・建築物に用いられているものである。これらの石材に関する各種物性（かさ密度、間隙率、飽和度、間隙径分布、一軸圧縮強度）に関する調査結果についても提示された。用いた塩溶液の種類は、硫酸ナトリウム、硫酸マグネシウム、硫酸アルミニウム、炭酸ナトリウム、および、塩化ナトリウムである。実験にはこれらの塩の20℃における飽和溶液を用いた。実験方法としては、5 cmの立方体試料全体を20℃の各塩溶液中に2時間浸した後、40℃で20時間炉乾燥し、その後2時間室温まで冷却する、というサイクルを繰り返す単純なものである。各サイクルにおける重量変化を追跡するとともに、実験後の試料については間隙径分布の測定とSEM-EDSによる観察を行った。

第5章では、塩類風化実験の結果が述べられている。研究目的に対応させ、塩溶液ごと、岩石ごとに、それぞれ整理している。ほとんどの岩石の場合、硫酸ナトリウムによる風化程度が高かったが、多胡石はそれに反する結果となった。また、イタリア産トラバーチンと葛生石については炭酸塩岩特有の性質を示した。

また、種々の岩石物性間で相関係数を取り、相互に関係の高い岩石物性をグループ分けした。

第6章では、繰り返しの浸漬 - 乾燥試験に伴う、硫酸マグネシウムの塩類風化機構について、多胡石を中心に検討した。この岩石は、他の岩型では最も劣化の酷かった硫酸ナトリウム溶液を用いた実験ではほとんど劣化せず、硫酸マグネシウム溶液を用いた場合で重量損失量が最大であった。間隙径分布および SEM-EDS による観察結果を総合すると、多胡石の場合、硫酸マグネシウムの結晶化が、岩石の若干内側で起こり (sub-florescence)、このため、一皮ずつ剥けるように風化が進行していくことが分かった。

第7章では、以上の調査・分析結果をもとに、塩類風化における岩石物性および塩の種類による影響に関して考察を行った。まず、これらの影響の程度に関してランク付けを行った。次に、岩石物性別に風化に対する影響の程度を、とくに、塩溶液の吸収能と間隙径分布との関連に着目して考察した。間隙を、その直径のサイズ別に分類し、風化に対してどの間隙サイズが最も影響するかを、統計学的手法のひとつである principal component analysis により検討した。その結果、直径が  $5\mu\text{m}$  以下の間隙総体積が多く  $0.1\mu\text{m}$  以下の間隙の割合が高い岩石は、塩類析出の際に影響を受けやすいことが分かった。これらの検討結果を基に、Salt Susceptibility Index (SSI) なる指標を考案した。この指標は、間隙径分布の結果のみから構築されたものであるが、指標化の前段階において既に種々の岩石物性との相互関係を検討済みであるため、岩石物性の影響も加味したものである。この指標により、塩類風化の受けやすさを評価することができる。

第8章では、上記の研究内容を、結論および今後の展望としてまとめている。提案された SSI は、高額な装置に依存しなければならない制約はあるものの少量の試料片で検討できるため、石材評価には適切な指標であると考えられる。

以上に要約したように、本論文では学術的価値の高い成果が示されており、博士（工学）の学位を授与するに相応しい内容を備えていると判断し、当学位論文審査委員会は合格と判定した。