

令和 6 年 5 月 30 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14301

研究課題名（和文）乾湿繰り返し時における多孔質材料内圧力の定量的予測に関する研究

研究課題名（英文）Study on Quantitative Prediction of Pressure in Porous Materials under Dry-Wet Cycles

研究代表者

高取 伸光（Takatori, Nobumitsu）

京都大学・工学研究科・助教

研究者番号：70880459

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では吸湿過程における凝灰岩のひずみと水分状態の関係を明らかにするための実験、吸水過程および吸湿過程による硫酸ナトリウムの水和プロセスの違いと材料破壊への影響の違いを明らかにするための実験、塩類風化のメカニズムの現状の課題についての文献調査を行った。得られた主な結論を以下に示す。本実験で用いた凝灰岩のひずみは相対湿度30%以上の領域ではひずみと相対湿度に対しほぼ線形的な関係にあり、ひずみは含水率よりも相対湿度に依存した。また、硫酸ナトリウムによる結晶化圧力は湿潤方法が異なることによる差は小さく、吸湿過程と吸水過程で同程度の変形が生じることを実験により明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

建造物や屋外文化財を構成する多孔質材料は、乾湿の繰り返しに伴い材料内の圧力が変化し、材料が変形したり破壊されることがある。これらの現象は乾湿風化あるいは塩類風化と呼ばれ、その抑制方法の確立は文化財保存の分野を含め幅広い分野で求められている。一方で、屋外文化財の乾湿風化および塩類風化のメカニズムについては十分な知見が得られているとは言い難い。本研究成果は屋外文化財の乾湿風化および塩類風化のメカニズムを理解する上で、またこれらの風化現象を抑制する方法を模索する上で重要な成果であると考えられる。

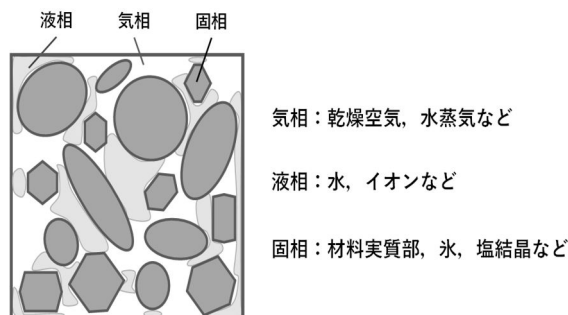
研究成果の概要（英文）：In this study, we conducted experiments to clarify the relationship between the strain and moisture content of tuff during the moisture absorption process, experiments to clarify the differences in the hydration process of sodium sulfate and its effect on material damage due to water absorption and moisture absorption processes, and a literature review on the current issues on the mechanism of salt weathering. The main results obtained are as follows. The strain generated in the tuff used in this experiment showed a nearly linear relationship between strain and relative humidity in the range of relative humidity above 30%, and strain was more dependent on relative humidity than on water content. The experiments also showed that the difference in crystallization pressure due to sodium sulfate was small due to different wetting processes, and that the same degree of deformation occurred during the moisture absorption and water absorption processes.

研究分野：建築環境工学

キーワード：多孔質材料 乾湿風化 塩類風化 硫酸ナトリウム 凝灰岩 ひずみ 湿気 応力

1. 研究開始当初の背景

建造物や屋外文化財の多くはその材料内部に微細な空隙構造を有する多孔質材料であり、その空隙内には水や塩などの物質が入り出す(Fig.1)。材料中の物質やエネルギー量は熱や物質の移動に伴い変化し、それに応じた応力が材料実質部に加わる。このとき材料中の水あるいは空気は材料実質部を膨張あるいは収縮させるような力(以降内圧と総称する)を生じる。これにより材料中の水分が乾燥と湿潤を繰り返すことで材料は変形や破壊が生じる。



このように水分の乾湿の繰り返しにより材料が破壊される現象は**乾湿風化**と呼ばれ、水分が塩を含む場合には**塩類風化**と呼ばれる。これらの現象はともに材料中に存在する水分の応力によって生じる現象であり、建造物や屋外文化財の保存の観点から極めて重要な課題である。

Fig. 1 多孔質材料の空隙構造の模式図

乾湿風化および塩類風化は Fig.2 に図示するようなプロセスに分類できる。

- 環境の変化に対し熱や水分の移動が生じ、材料内の温度・水分状態が変化するプロセス
- 材料内の内圧(空気や水などが材料を押し出す力)が変化するプロセス
- 内圧の変化に伴い材料骨格部が弾性変形や塑性変形、破断するプロセス

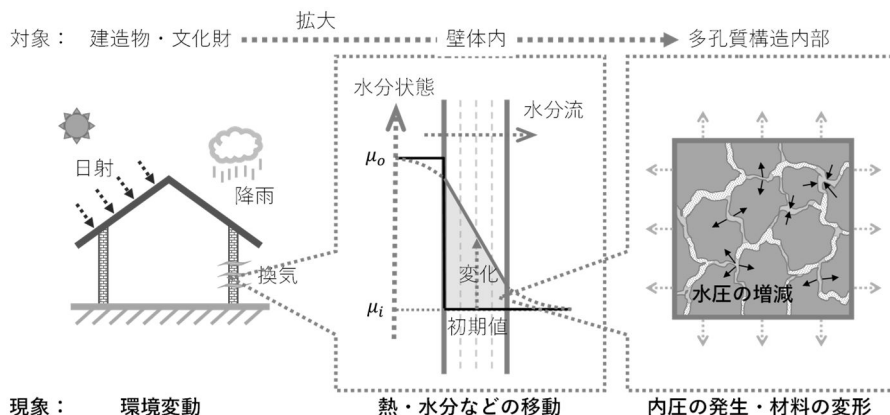


Fig.2 環境変動に伴う材料構造の変形プロセスの概念図

建築物や屋外文化財は絶えず外界気象の変動にさらされるため、定常状態というのは稀であり、上述のような変化が常に生じる。そのため乾湿風化や塩類風化を定量的に評価するためには、材料中の熱や水分、塩の移動や内圧の変化、材料の変形・破壊挙動を連立して解く必要がある。非平衡過程に拡張した熱力学はこれらの問題を統一的に解くのに強力な学問であり、これまでも熱や水分、塩の移動、材料の変形・破壊挙動については非平衡熱力学を基礎とした理論が構築されている。しかし、多孔質材料内という拘束力が働く条件下における内圧の変化に関しては、測定方法やメカニズムを含めその定量的な評価方法は十分に議論されていない。ここで、多孔質材料内における水分状態と内圧の関係を解明するためには、巨視的な視点における多孔質材料内の内圧の測定と、微視的な視点における内圧の発生メカニズム両方の観点から検討を行うことが必要不可欠であると考えられる。

2. 研究の目的

本研究の最終的な目標は、Fig.2 に示すように多孔質材料中における熱や水分、溶質の移動やそれに伴う内圧の変化、材料の変形・破壊挙動を定量的に予測できる技術を開発し、この技術を建築や文化財保存の現場に活用することである。

本研究ではこの目標を達成する第一歩として、多孔質材料中の水分状態と内圧の関係を明らかにすることを目的とし、中でも乾湿風化および塩類風化の主要な要因である乾湿繰り返し時における内圧の発生メカニズムについて、既往研究の整理ならびに実験による検証を行った。具体的な研究の目的は以下に示す3点である。1点目は、吸湿過程における多孔質材料のひずみと水分状態の関係を明らかにすることである。2点目は、塩類風化の中でも最も破壊的な塩といわれている硫酸ナトリウムによる内圧の発生メカニズムについて、既往研究のレビューからそのメカニズムを整理し現状の課題を整理することである。3点目は、実環境下において硫酸ナトリウムが無水和物から水和物へと相が変化する際の内圧の発生メカニズムに着目し、その湿潤過程に水分の供給状態の違い、すなわち塩の溶解と潮解の違いが作用しうるかについて検討した。

3. 研究の方法

本研究では上述の目的を達成するため、A) 吸湿過程における凝灰岩のひずみと水分状態の関係を明らかにするための実験、およびB) 吸水過程および吸湿過程による硫酸ナトリウムの水和プロセスの違いと材料破壊への影響の違いを明らかにするための実験の2つを行った。また、塩類風化のメカニズムの現状の課題については文献調査より行った。以下にA) およびB) の実験方法の詳細について示す。

A) 吸湿過程における凝灰岩のひずみと水分状態の測定

実験装置の概要を Fig.3, Fig.4 に示す。温度・相対湿度の制御可能なデシケータ内に試験体を設置した。デシケータ内の温度は一定とし、相対湿度のみを変化させることで、吸湿・放湿過程における試験体の含水率およびひずみの経時変化を測定した。

測定に用いた装置はそれぞれ以下のとおりである。温度制御は電熱線を用いたヒーターのPID制御 (AS ONE 社 TJA-550P) により行った。ファンの最大風量は公称値で 0.36[m³/min] である。湿度制御は湿度制御装置 (キッツマイクロフィルター社 AHCU-2) を用い、PID 制御により行った。温湿度は、温湿度計 (Onset 社 UX100-011A: 以降、温湿度計と呼称) により計測した。ひずみの測定は汎用箔ひずみゲージ (共和電業社 KFGS-5-120-C1-11) を、常温硬化型瞬間接着剤 (CC-36) を用いて材料と接着させた。なお計測システムには EDX-10B および EDX-14A (共和電業社) を用いた。含水率の測定には誘電式含水率計 (METER 社 TEROS-12: 以降含水率計と呼称) を用いて測定した。含水率計の測定有効範囲は 1010ml である。重量測定には電子天秤 (A&D 社 GX-6100R) を用い、吊り下げ方式で連続測定した。

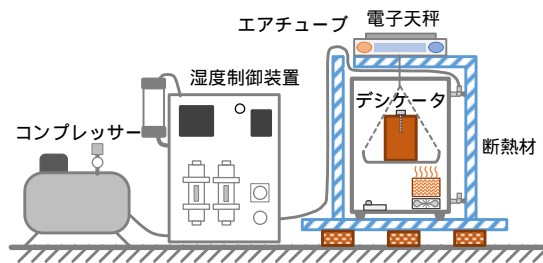


Fig.3 実験装置概要 (全体像)

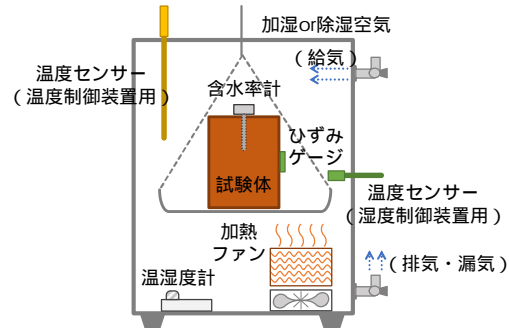


Fig.4 実験装置概要 (デシケータ内)

試験体には寸法は約 100mm × 150mm × 80mm の阿蘇火砕流堆積物の凝灰岩を用いた [8]。なお、含水率センサーのプローブ (直径約 3mm) 挿入のため、試験体の側面には 4mm 計のビットで穴を 3 点開けた。

試験体に用いた凝灰岩は、予備検討として事前に脱イオン水で毛管飽和させ、相対湿度 10% 環境下で一週間乾燥させた。

実験では温度制御目標値を 23 とした。相対湿度は湿度制御装置の制御目標値 10% を初期条件とし、30%、50%、60%、70% へと逐次変更した。ただし、装置の性能限界のため相対湿度 70% に至らず、65% 程度までしかデシケータ内の湿度が上昇しなかった。そのためこの段階で重量計測を中止し凝灰岩をトレーに乗せ、水を試験体底部から 20g 吸水させ、デシケータ内の相対湿度を約 81% まで増加させた。このうち、トレー内にさらに約 400g の水を加え、底部からの吸水により材料を毛管飽和させた。

B) 吸水過程および吸湿過程による硫酸ナトリウムの水和プロセスの違いと材料の変形挙動

本実験では、 Na_2SO_4 を含ませた試験体の吸湿時および吸水時のひずみを観察した。実験装置の概要を Fig.5 および Fig.6 に示す。試験体をポリスチレン製シャーレに乗せ、23 程度に保たれた恒温槽内のデシケーター内に設置した。また、吸水過程では、シャーレの上に紙ウエスを敷き、紙ウエスに吸わせた水分を試験体下部から吸水させた。測定内容はひずみ、温度、湿度とした。ひずみゲージは試験体上部中央に、試験体である凝灰岩の火砕流が堆積した面と平行な面に貼り付けた。温湿度は温湿度計と熱電対を用いて計測した。

デシケーター内の調湿には、飽和塩溶液を用いた。吸湿過程の放湿時と吸水過程では、硝酸マグネシウム ($\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$)、吸湿過程の吸湿時には、硫酸ナトリウム (Na_2SO_4) を用い、それぞれ 53.5% と 93.0% に調湿した。

試験体には凝灰岩 (阿蘇火砕流堆積物) を用い、寸法は各辺 3cm の立方体とした。各実験条件における試験体のサンプル数は 4 とし、うち 3 つには塩を含ませ、残り 1 つは塩を含ませないものとした。前者の調製手順を以下に示す。まず試験体を純水に 3 日以上含浸させた後、105 の乾燥炉で質量が一定となるまで乾燥させた。23 で 12g/100g (H_2O) の Na_2SO_4 溶液に含浸し、毛管飽和させ、再び 105 の乾燥炉で乾燥させた。その後、 $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ で調湿したデシケーター内に 3 日以上放置したものを試験体とした。なお、乾燥時と飽和時には重量測定を行った。

吸湿過程では、 $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ で調湿したデシケーター内で 4 日以上放置し、調湿材を Na_2SO_4 飽和塩溶液に変更し、3 日以上デシケーター内で放置したのち、再度 の手順に戻る動作を合計 4

回繰り返した。なお、各手順の終了時に試験体の重量測定と写真撮影を行った。吸水過程では、 $Mg(NO_3)_2$ 飽和塩溶液で調湿したデシケーター内に設置した試験体の底面から脱イオン水を吸水させ、3日以上放置した。この手順を、吸水させる水の量を 1.0g, 3.5g, 7.0g の3つの条件でそれぞれ別の試験体で行った。なお、吸水の前後で重量測定および写真撮影を実施した。

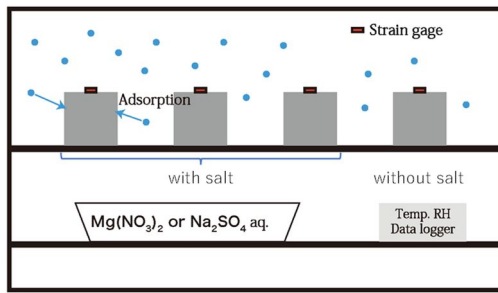


Fig.5 吸湿過程の模式図

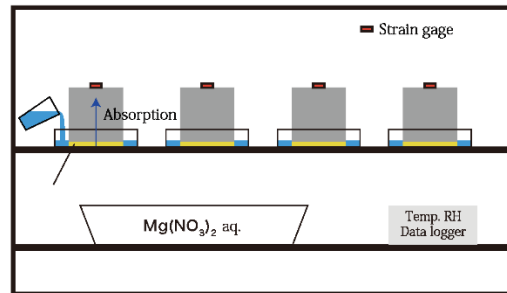


Fig.6 吸水過程の模式図

4. 研究成果

本研究で得られた主な成果を以下に示す。

A) 吸湿過程における凝灰岩のひずみと水分状態の測定

Fig.7 に吸湿時における材料のひずみと、含水率計により測定した材料内温度および含水率の結果を示す。なお相対湿度は湿度制御装置の指示値を示した。測定結果より、相対湿度 81%付近までは、含水率の変化が極めて小さく、これは平衡含水率測定の結果と一致する。一方、毛管吸水により含水率は 4.5%から 28%まで急激に上昇したが、これによるひずみの変化量は実験全体におけるひずみの変化の約 4 割程度に過ぎなかった。

次に、Fig.8 に吸湿時における相対湿度とひずみの関係を示す。相対湿度 30%以上の領域ではひずみと相対湿度に対しほぼ線形的な関係であることが分かる。このことから本実験で用いた凝灰岩のひずみは含水率よりも相対湿度に依存するものと考えられる。

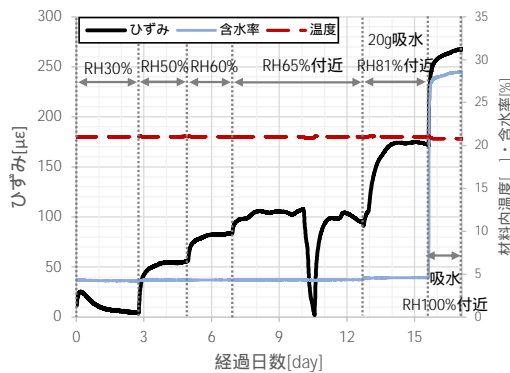


Fig.7 吸湿過程の模式図

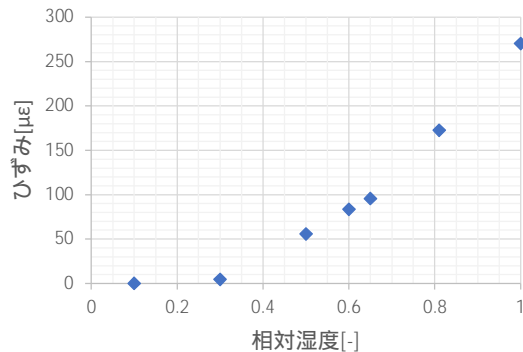


Fig.8 吸水過程の模式図

B) 吸水過程および吸湿過程による硫酸ナトリウムの水和プロセスの違いと材料の変形挙動

Fig.9 に乾湿繰り返し時における各試験片のひずみ変化を示す。なお、恒温槽では温度が若干変動するため温度を補正した。ひずみは吸着過程で増加し、脱着過程で減少し、塩を含む試験片の平均ひずみ変化は約 35μEであった。一方、塩を含まない試料のひずみの変化は 10μE以内と小さかった。また、吸湿による試験片の重量変化は、塩を含む試験体で約 0.018[kg/kg]、塩を含まない試験体で約 0.0030[kg/kg]であった。塩の有無によるひずみの差の原因は明らかではないが、吸湿量に差があることから、析出した塩による細孔構造の変化が要因の一つであると考えられる。次に、デシケーター中で長期間吸湿させた試験体のひずみと相対湿度を Fig.10 に示す。ひずみは 6 日目以降急激に増加し、最大ひずみ 250~600μEが測定された。

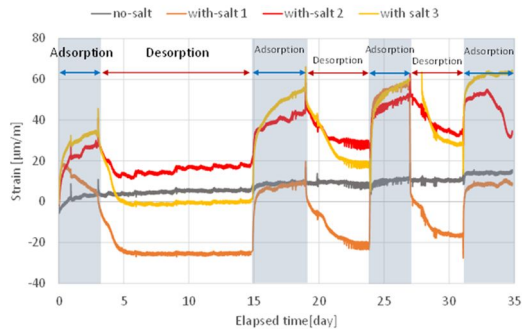


Fig.9 乾湿サイクルにおける試験体のひずみ変化

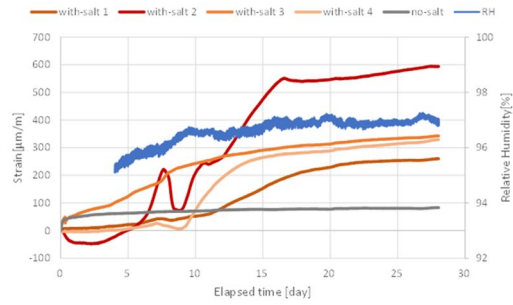


Fig.10 長期湿潤時の試験体のひずみ変化

次に、Fig.11 に各試験体の吸水時のひずみ変化を、Fig.12 に各吸水量に対する最大ひずみ変化を示す。塩を加えていない試験体では、吸水後にひずみが急速に増加しすやかに一定値に達した。一方、塩を加えた試験体でのひずみの変化は試験体ごとに異なり、吸水後速やかに増加し最大値に達した後、緩やかに変化するものと、1日～数日かけて徐々に増加するものが存在した。また、通常塩を含まない試験体の方が塩を含んだ試験体よりもひずみの増加は早かった。

次に、材料が塩を含むことの有無とひずみの関係について示す。3.5g または 7.0g の水を吸収させた場合、塩を含まない試験体のひずみは約 120 $\mu\epsilon$ であったのに対し、塩を含んだ試験体のひずみは最大約 200～700 $\mu\epsilon$ 程度であった。一方、1g の水を吸収させた試験片では、塩を含んだ試験体でもひずみは最大でも約 13 $\mu\epsilon$ 程度であった。この試験体では、底面から吸収した液水がひずみゲージの貼付された上面まで十分に届かず、十分なひずみが観察されなかったことが原因と考えられる。

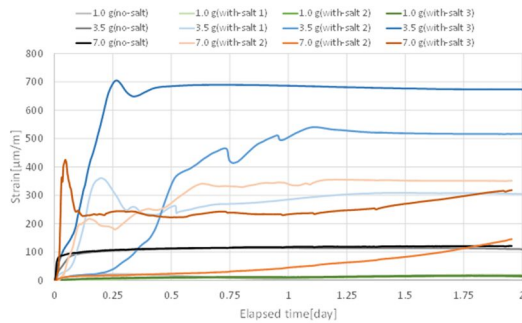


Fig.11 吸水時の試験体のひずみ変化

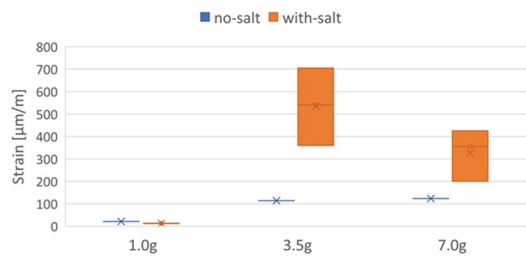


Fig.12 吸収によって得られるひずみの最大値

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 磯村隆正、高取伸光、小椋大輔、脇谷草一郎
2. 発表標題 屋外文化財の塩類風化と保存環境に関する研究 湿潤過程の違いが硫酸ナトリウムによる材料の変形挙動に与える影響の比較
3. 学会等名 令和5年度 日本建築学会近畿支部研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 磯村隆正、高取伸光、小椋大輔、脇谷草一郎
2. 発表標題 屋外文化財の塩類風化と保存環境に関する研究 湿潤過程の違いが硫酸ナトリウムによる材料の変形挙動に与える影響の比較
3. 学会等名 令和5年度 日本建築学会大会（近畿）学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Nobumitsu Takatori, Takamasa Isomura, Daisuke Ogura, and Soichiro Wakiya
2. 発表標題 Comparison of stress from sodium sulfate by water absorption and moisture absorption
3. 学会等名 SWBSS ASIA 2023（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高取伸光、小椋大輔
2. 発表標題 乾湿繰り返し時における多孔質材料内圧力の定量的予測に関する研究 吸湿過程における凝灰岩のひずみと水分状態の関係
3. 学会等名 日本建築学会近畿支部研究発表会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------