

令和 5 年 5 月 1 日現在

機関番号：14501

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2021～2022

課題番号：21K20462

研究課題名（和文）熱水分移動と応力・ひずみ変化の連成解析による組積造建築の凍害メカニズムの検討

研究課題名（英文）Investigation into frost damage mechanisms of masonry buildings using coupled hygrothermal and mechanical simulations

研究代表者

福井 一真（Fukui, Kazuma）

神戸大学・工学研究科・助教

研究者番号：00908767

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では熱水分移動と応力・ひずみ変化の連成解析モデルを用い、材料内の水分の凍結融解による組積造壁体の劣化メカニズムの検討を行った。まず、壁体を構成する焼成材料の持つ物性値の異方性に着目し、変形の異方性を考慮できる適切なモデル化についての検討を行った。また、寒冷地において日射や外気の温度変化に晒される壁体を再現するモデルを作成し、シミュレーションにより材料内の含水率や細孔内の液水・氷の圧力が上昇し凍害リスクが高まる時期や位置を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

欧州では断熱改修に伴う組積造壁体の劣化リスクの変化への関心が高く、文化財建築の保存は国内外問わず急務の課題である。このような課題の解決策となりうる数値解析に用いる適切なモデルの検討を行ったことや、実験室実験では再現が難しい実際の壁体構成や環境条件を想定した劣化メカニズムを示したことは意義が大きいと考えている。今後本研究で行ったモデル化や検討手法をもとに、より広い環境条件や様々な壁体構成を考慮した凍害リスクの評価が期待できる。

研究成果の概要（英文）：This study investigated the deterioration mechanisms of masonry walls due to freezing and thawing using coupled hygrothermal and mechanical simulations. First, we investigated modeling methods for the freeze-thaw processes of fired clay materials which compose masonry walls, considering the anisotropies of the material properties. Next, calculation models of a masonry wall were developed, and numerical simulations considering solar radiation and temperature changes in a cold region were conducted to clarify the season and position in a material in which the ice content and liquid water and ice pressure became high and the frost damage risks increased.

研究分野：建築環境工学

キーワード：凍害 組積造建築 数値解析 熱水分移動 ひずみ Poromechanics 異方性 実環境

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

建築材料の凍害は、材料内の水分が凍結と融解を繰り返すことで表面の剥離や亀裂、壁体の剥落などを引き起こす現象である。凍害は寒冷地だけでなく比較的温暖な地域でも観察され¹⁾、水分に起因する建築材料の主要な劣化要因の一つであり、建築物の長寿命化や文化財建築の保存などの観点から抑制されるべき問題である。

凍害を受ける建築材料はセメント系やセラミック系の外装材、コンクリート、石材など幅広いが、特に近年では欧州において、建築物の美観を損なわずに省エネルギー化や居住者の快適性の向上を達成するために行われる内断熱改修に伴い、レンガと目地モルタルからなる組積造建築の壁体の凍害リスクが増加することが懸念されている^{2),3)}。また、文化財建築の保存も急務の課題であり、国内においても近代に建設された歴史的価値をもつ組積造建築の劣化が多く確認されている⁴⁾。そのため、このような組積造の壁体の凍害リスクを評価し、適切な改修方法や保存方法を提案することが求められている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、材料内の熱水分移動と応力・ひずみ変化の連成解析モデルを用い、材料内の水分の凍結融解による組積造建築の壁体の劣化メカニズムを明らかにすることである。

3. 研究の方法

(1) 熱水分移動や変形に関わるレンガの物性値の把握

組積造の壁体を構成するレンガの物性値はその製造過程で強い異方性や不均一性をもち、それらは凍害の原因となる材料内の熱水分移動や応力・ひずみ変化に大きな影響を与えられられる。本研究では材料の凍結融解過程と破壊に特に大きな影響を及ぼすと考えられる水分物性（平衡含水率、水分拡散係数）と力学物性（Young 係数、せん断弾性係数、Poisson 比）の詳細な測定を行い、その異方性と不均一性を把握する。

(2) 凍結融解過程のレンガ内の熱水分移動と応力・ひずみ変化の連成解析モデルの構築

(1)で得られた物性値を用い、材料内の熱水分移動理論⁵⁾と多孔質弾性論⁶⁾にもとづいた凍結融解過程のレンガ内の熱水分移動と応力・ひずみ変化の連成解析モデルを構築する。また、解析結果を凍結融解実験により得られる材料の温度とひずみの変化や破壊性状と比較することでモデルの妥当性の検証を行う。既往研究^{e.g., 6)}で行われた凍結融解過程の材料内の熱水分移動と応力・ひずみ変化の連成解析はセメント系材料を対象としたものに限られるため、レンガのもつ物性値の異方性と不均一性や高い透水性、内部の水分の凝固点降下により形成される材料内の熱水分や応力・ひずみの分布の特徴を検討する。

(3) 破壊に至るまでの組積造壁体内の熱水分移動と応力・ひずみ変化のプロセスの解明

(2)で構築したモデルを拡張してレンガと目地モルタルからなる組積造壁体をモデル化し、外気の温湿度や放射冷却、降雨、地下水の吸い上げといった実際の環境条件を考慮した計算を行う。レンガの物性値の異方性と不均一性に加え、目地モルタルとの物性の違いを考慮し、様々な環境条件において壁体内で凍結水量や応力が集中する箇所を特定し、劣化に至るまでの熱水分移動と水分の相変化や圧力変化、応力・ひずみ変化のプロセスを検討する。

4. 研究成果

(1) 熱水分移動や変形に関わるレンガの物性値の把握

2021年度に異方性と不均一性を考慮したレンガの力学物性の測定を行った。また、(2)で行った凍結融解過程のひずみ測定ではレンガの変形の異方性がかなり大きかったが、力学物性の異方性を考慮したモデルではその挙動を再現できなかった。そこで、2022年度には細孔内の液水や氷の圧力の、材料の有効応力への寄与をあらわす poroelastic parameter の異方性についての理論的な検討を行った。

(2) 凍結融解過程のレンガ内の熱水分移動と応力・ひずみ変化の連成解析モデルの構築

Fig. 1 (a)にモデルの妥当性検証のために行った凍結融解実験に用いた試験体の模式図を示す。レンガの異方性を考慮して厚さ方向とそれに垂直な方向の2方向にひずみゲージを貼り付け、恒温槽内で凍結融解させた。結果は Fig. 1 (b)に示す通りであり、2つの方向 (side と top) で変形の大きさがかなり異なった。そこで、数種の焼成材料を用い、このような凍結融解過程における材料の変形の異方性を再現できるモデルについての検討を行った。

まず、力学物性の異方性を考慮して凍結融解過程のひずみ変化を再現する数値解析を行ったところ、Fig. 2(a)に示すとおり材料の厚さ方向 (side) では冷却過程における材料の膨張の傾向をよく再現できたが、材料の厚さに垂直な方向 (top) では測定結果よりひずみがかなり大きくなり傾向を再現できなかった。なお、ここでは異方性以外の条件を単純にするために瓦を模した焼成材料を用いた結果を示す。

次に、anisotropic poroelasticity 理論^{7),8),9)}にもとづき poroelastic parameter の異方性を考慮したモデルを構築し、実験を再現する数値解析を行ったところ、Fig. 2 (b)に示すように材料の厚さに垂直な方向のひずみが小さくなり、測定結果と傾向がよく一致した。また、これらの解析結果から Fig. 3 のように凍結融解過程の材料の各方向の変形に対し、氷の及ぼす圧力による膨張、熱収縮、他の軸方向の変形によるポアソン効果といった各要素が及ぼす影響を示し、変形の異方性が生じるメカニズムを明らかにした。

以上の結果より、焼成材料のような異方性の強い材料の変形を予測するためには力学物性だけでなく poroelastic parameter の異方性の考慮が重要であると結論づけた。

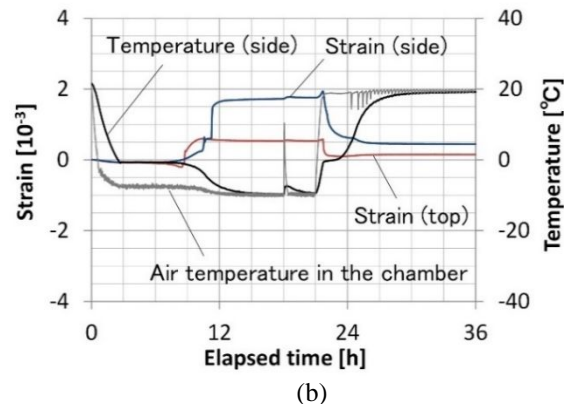
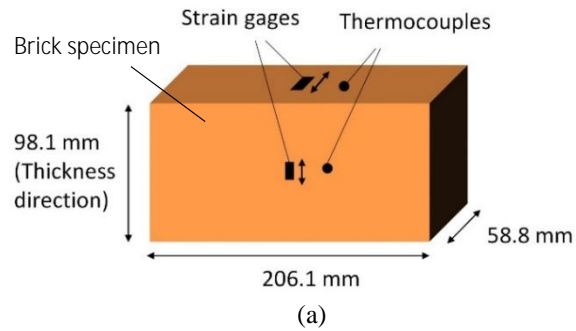


Fig. 1 凍結融解実験の(a)試験体の模式図と(b)結果

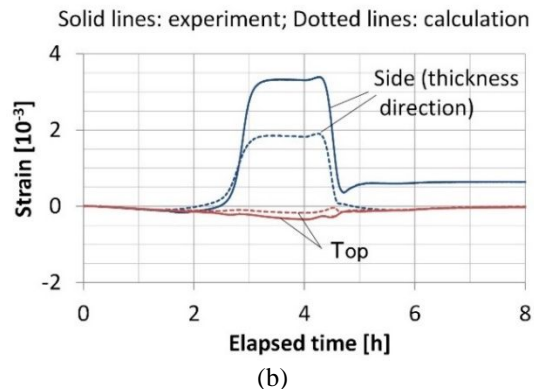
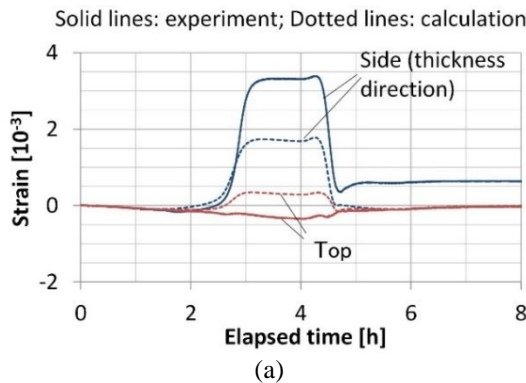


Fig. 2 凍結融解過程の焼成材料のひずみの測定結果と解析結果の比較; (a)力学物性の異方性のみを考慮した場合; (b)力学物性に加え poroelastic parameter の異方性を考慮した場合

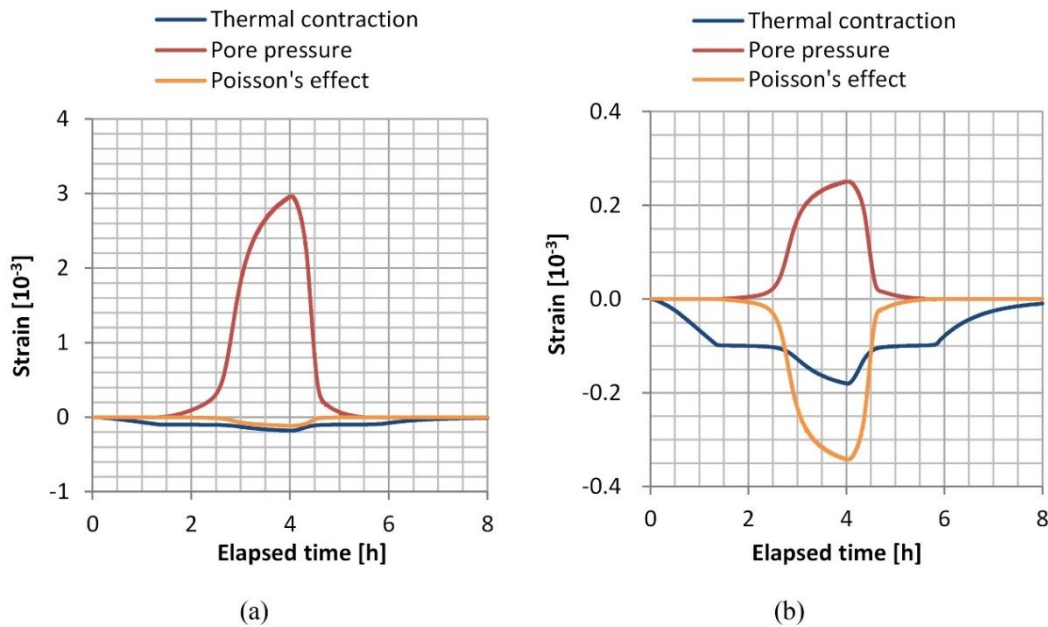


Fig. 3 焼成材料の(a)厚さ方向と(b)厚さに垂直な方向における各要因のひずみへの寄与

(3) 破壊に至るまでの組積造壁体内の熱水分移動と応力・ひずみ変化のプロセスの解明

2021 年度には熱水分移動と応力・ひずみ変化の連成解析モデルを用いた検討に先立ち、レンガとは著しく物性値が異なるモルタル層が組積造壁体の吸水・凍結過程に及ぼす影響を検討するため、組積造壁体を対象とした一次元の熱水分同時移動モデル (Fig. 4) を作成し、気象条件の日変動を考慮した壁体内の温度・液相含水率・含水率の数値解析を行った。

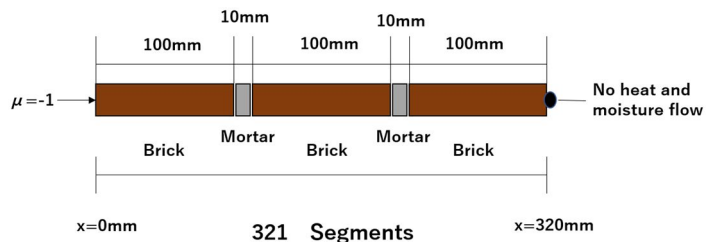


Fig. 4 一次元の組積造壁体モデル

解析開始から 12 h (720 min.) は降雨を想定した境界条件として外気側表面の自由水基準の水分化学ポテンシャルを -1.0 J/kg とし、12 から 24 h 後にかけては夜間の外気温の低下を想定して外界の温度を -10 度とする第 3 種境界条件を用いた。また、モルタル層の影響を確認するため、モルタル層をレンガに置き換えレンガ単層壁とした計算も行った。

結果を Fig. 5 に示す。モルタルの熱物性はレンガと比較的近いものの、高含水率領域における水分伝導率が著しく小さいという特徴がある。壁体の凍結過程ではより低温になる外気側表面の水分の化学ポテンシャルが低下し、壁体内部から水分が流入する。解析結果より、モルタル層が存在することでこのような凍結過程の壁体内の水分移動が妨げられ、壁体の外気側表面での凍結が抑制される一方、より深い位置まで凍結が進行する可能性があることを示した。組積造壁体を対象とした検討ではモデルが複雑になることを避けるために均一な物性値を用いて解析を行うことがあり、本研究において構成材料の物性値の違いの影響を定量的に示したことは意義が大きいと考えている。

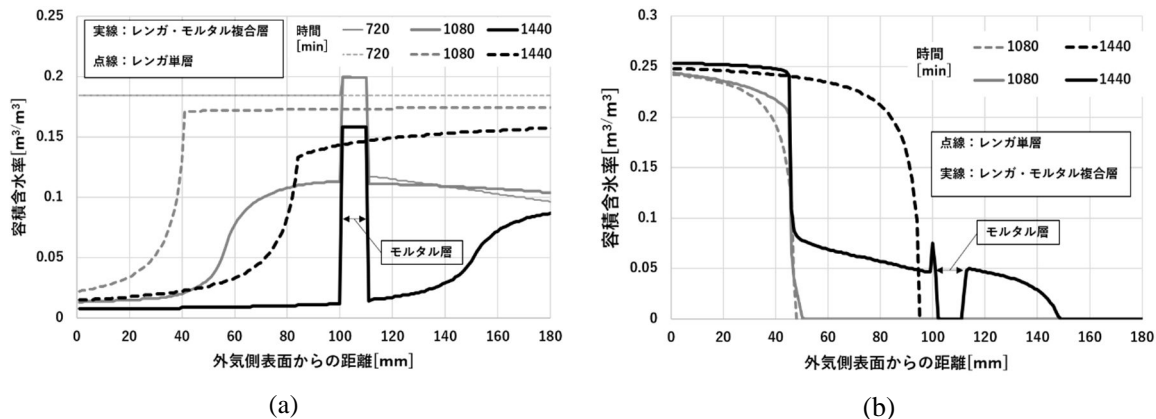


Fig. 5 凍結過程における組積造壁体（レンガ・モルタル複合層）とレンガ単層壁内の(a)液相含水率と(b)含水率分布の変化の比較

さらに、2022年度には応力・ひずみ変化との連成解析モデルを用い、劣化が報告されている寒冷地の組積造壁体を対象とした検討を行った。温度変化と日射を境界条件として与える実環境を想定した数値解析により、凍結融解に伴い材料内の液水や氷の圧力が上昇し凍害リスクが高まる時期や位置を明らかにした。

(4) 研究成果の意義と今後の展望

前述のとおり欧州では断熱改修に伴う組積造壁体の劣化リスクの変化への関心が高く、文化財建築の保存は国内外問わず急務の課題である。このような課題に対し用いることができる適切な数値解析モデルの検討を行ったことや、実験室実験では再現が難しい実際の建築物の壁体構成や晒される環境条件を考慮して劣化メカニズムを示したことがこれらの成果の意義である。今後本研究で行ったモデル化や検討手法をもとに、より広い環境条件や様々な壁体構成を考慮した凍害リスクの評価が期待できる。

参考文献

- 1) C. Iba, A. Ueda, and S. Hokoi, "Field survey on frost damage to roof tiles under climatic conditions," *Structural Survey*, vol. 34, pp. 135-49, 2016.
- 2) X. Zhou, D. Derome, and J. Carmeliet, "Hygrothermal modeling and evaluation of freeze-thaw damage risk of masonry walls retrofitted with internal insulation," *Building and Environment*, vol. 125, pp. 285-98, 2017.
- 3) C. Feng, S. Roles, and H. Janssen, "Towards a more representative assessment of frost damage to porous building materials," *Building and Environment*, vol. 164, p. 106343, 2019.
- 4) 早川典子, 森井順之, 朽津信明, "親水性樹脂を用いた凍結劣化抑制の試み," *保存科学*, No. 42, pp. 101-106, 2003.
- 5) 松本衛, 馬沙, "地盤の凍結と融解過程の解析に関する研究," *日本建築学会計画系論文集*, no. 482, pp. 25-34, 1996.
- 6) O. Coussy, "Promechanics of freezing materials," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 53, pp. 1689-1718, 2005.
- 7) M.A. Biot, "Theory of elasticity and consolidation for a porous anisotropic solid," *Journal of Applied Physics*, vol. 26, pp. 182-185, 1955.
- 8) A.H.-D. Cheng, "Material coefficients of anisotropic poroelasticity," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 34, pp. 199-205, 1997.
- 9) Y. Abousleiman and L. Cui, "The theory of anisotropic poroelasticity with applications," In: Zaman M, Gioda G, and Booker J (eds) *Modeling in Geomechanics*. New York, NY: Wiley. pp.559-593, 2000.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kazuma Fukui, Chiemi Iba, Daisuke Ogura	4. 巻 -
2. 論文標題 Coupled hygrothermal and mechanical simulations of highly anisotropic building material during freezing and thawing	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Building Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1177/17442591231165992	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 福井一真、高田暁
2. 発表標題 静電容量を利用した建築材料の含水率の経時変化の測定と凍結した材料への適用可能性
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

1. 発表者名 山中克、福井一真、高田暁
2. 発表標題 凍結融解過程における組積造壁体内の熱水分移動に及ぼすモルタル層の影響に関する基礎的検討
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

1. 発表者名 福井一真、高田暁
2. 発表標題 静電容量を利用した建築材料の含水率の経時変化の測定と凍結した材料への適用可能性
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山中克、福井一真、高田暁
2. 発表標題 凍結融解過程における組積造壁体内の熱水分移動に及ぼすモルタル層の影響に関する基礎的検討
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazuma Fukui, Satoru Takada
2. 発表標題 Water Uptake of Porous Building Materials with Extremely Small Air Entrapment Effects
3. 学会等名 13th Nordic Symposium on Building Physics (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 福井一真、高田暁
2. 発表標題 凍結融解が高含水率状態の多孔質建築材料内の水分の分布におよぼす影響
3. 学会等名 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 福井一真、高田暁
2. 発表標題 凍結融解が高含水率状態の多孔質建築材料内の水分の分布におよぼす影響
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2023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
---------	---------