

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 12 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25870351

研究課題名(和文) 環境条件を考慮した屋根材の凍結融解による劣化モデルの構築

研究課題名(英文) Modeling of frost damage to roof materials under variable environmental conditions

研究代表者

伊庭 千恵美 (IBA, CHIEMI)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：10462342

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：日射や夜間放射、降雨等の環境条件が屋根材の凍結融解による劣化(凍害)に与える影響を明らかにすることを目的とし、まず実際の使用条件下における屋根材の継続的な劣化調査を行い、凍害のメカニズムを推定した。

実環境下での凍害の進行を予測するモデルを検証するため、屋根模型を用いて屋根周りの温湿度、濡れ状況のデータを蓄積した。実験室での瓦の凍結融解実験により、実環境下で観察された劣化を再現した。また、本研究で提案した熱水分移動の解析モデルにより、瓦の部位によって水分が蓄積する様子や温度、氷が発生する位置(劣化位置)が異なるということが確かめられた。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study was to investigate the influence of variable environmental conditions such as solar radiation and rainfall on the frost damage to roof materials. Field surveying of frost damage on roof tiles was continually conducted. Based on the observed results, the moisture transport inside the tiles during the freezing process was estimated and a feasible deterioration mechanism was proposed. Frost damage was experimentally reproduced to be similar to that observed in a field survey, and the experimental results were examined by numerical analysis. The temperature, humidity, and wetting conditions around the roof were measured using the roof model structures. The obtained data were used to validate the numerical modeling of frost damage under real climatic conditions. The numerical analysis revealed that temperature, moisture flow, and water content were dependent on the position of the tiles; therefore, the resulting ice contents were significantly different.

研究分野：建築環境工学

キーワード：凍結融解 屋根材 環境条件 劣化性状 解析モデル

1. 研究開始当初の背景

建築物の外装は風雨や飛来物から建築物を守り、また美観を保つ役割をもつ。中でも屋根は日射や夜間放射の影響を受けやすく、外壁よりも過酷な環境条件に曝される。冬季の平均外気温が 0 を下回らない温暖地においても瓦等の屋根材に凍害が生じることは、屋根施工者の間ではよく知られているが、建築物の使用の間ではあまり知られていない。凍結融解が原因と推察される屋根材の劣化性状は、ひび割れや剥離、欠けなど様々なものがあり、裏面の剥離など外見上は気づかれず、雨漏りが生じてから発覚するような事例もある。

瓦等の焼成材料の凍害については、材料強度、破壊性状等に着目した検討が行われてきたが、製造技術が進歩し、劣化メカニズムの研究が進んだ現在においても凍害はしばしば生じており、施工から数年足らずで劣化することがある。材料内への水分の浸入経路や周囲の温湿度変動等の環境要因の影響については、材料メーカーや施工者においても情報が不足しており、適用可能か否かは経験による判断がなされることが多い。

屋根材が実際に使用される環境条件や材料物性値をふまえて、凍結融解に伴い材料内で発生する応力を定量的に解析できれば、ひび割れや剥離等の劣化が生じるか否かを予測できるようになると考えられる。

2. 研究の目的

本研究は、実地調査や実験を通して、実際の使用環境下における屋根材の凍結融解による劣化を予測する解析モデルを構築し、劣化メカニズムを検討することを目的とする。これにより、環境条件の違いによって材料内のどこで破壊が生じやすくなるか、破壊形態が異なるか否かを明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 塀瓦の劣化調査 (定点観測)

2013 年 10 月から、京都市内の寺院の塀瓦を対象に、1 ヶ月に 1 回程度、目視観察と写真記録を行い、劣化の進行状況を把握した (図 1)。調査対象の瓦は、炭素膜を表層仕上げとしたいぶし瓦である。

塀は社殿の四周を囲むように配置されており、各方位に面した瓦の裏面温度 (葺き土との境界面) を継続的に測定した。調査対象



図 1 調査対象の塀瓦と気象観測装置

地に気象観測装置を設置し、瓦の温度と外気温や日射等の環境条件との対応を検討した。また、冬季には塀の一部について、定点カメラで 5 分間隔のインターバル撮影を行い、雨水の流れ方や積雪の状況を確認した。

(2) 屋根材の広域劣化調査・ヒアリング調査

気温や降水量、降雪量など気象条件が異なる地域において、屋根瓦の劣化性状や屋根面での雨や雪の状態を調査した。できるだけ広範な地域や建物での調査を行いサンプル数を増やすことで、様々な時系列の現象を把握する手法をとった。

調査は、2013 年 11 月 21 日に岐阜県垂井町・関ヶ原町、滋賀県米原市で屋根瓦の劣化性状の観察、2013 年 11 月 29 日に石川県金沢市・白山市で屋根面での雨や雪の状態の確認、2013 年 12 月 17 日に愛知県名古屋市で屋根瓦の劣化性状の観察を行った。比較のため、粘土瓦の他に一般的に使用されている化粧スレートとセメント瓦も観察対象とした。

調査では目視観察と写真記録を行うとともに、屋根材が置かれている環境条件を記録し、温度や含水状況に影響を与えそうな要因、劣化性状と環境条件の関係を整理した。

また、日本国内で瓦の生産が多い愛知県と島根県において、製造工程の見学と粘土瓦の製造者・技術者に対するヒアリング調査も行った。

(3) 凍結融解実験

材料の耐凍害性を確認する従来の凍結融解試験は、凍結時は低温空気に暴露し、融解時は全体を水中に浸漬するというもので、実環境下で観察されるものとは異なる劣化が生じることが、以前より指摘されてきた。

本研究では、定点観測を行った塀の軒瓦を用いて、実験室で凍結融解実験を行った。その際、軒瓦の施工状況を再現するため、一部は葺き土に接し、一部は外気に露出するように試験体を恒温槽内設置した (図 2)。

初期的に葺き土と瓦に十分に含水させ、1 サイクルを 12 時間とし、-10 から +10 まで恒温槽内の空気温度を変化させた (実験後半は装置へ着霜が生じ、最低温度は -4 程度となった)。瓦の表裏面と葺き土内部の温度、葺き土内部の水分化学ポテンシャルを測定した。

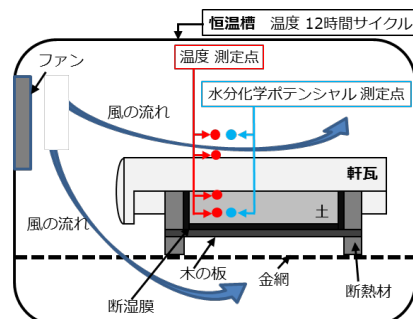


図 2 軒瓦を想定した凍結融解実験の概要

(4) 屋根模型を用いた環境測定

現在、住宅などでは瓦の施工法としては葺き土を用いない引掛け棧瓦葺きが主流となっているため、屋根瓦の裏面には形状に由来する空気層が形成される。瓦の種類によって仕上げの放射率や日射吸収率が異なるため、瓦自体の温度や裏面空気層温度が異なる。また、形状によって屋根材の重ね部分の間隙も異なるため、空気層と外気との換気量も異なると思われる。

屋根周りの熱移動と湿気移動を解析するモデルを作成する際の基礎データを蓄積することを目的に、和形いぶし瓦、釉薬平板瓦（銀黒）、化粧スレート（黒）をそれぞれ用いた屋根模型を作成し、大学校舎の屋上に設置した（図3）。和形いぶし瓦と化粧スレートの試験体では、屋根下地に通常のアスファルトルーフィングを用い、釉薬平板瓦では放射率の低いアルミ被覆遮熱ルーフィングを用いた。スレートは平らな形状をしているため、裏面空気層は形成されない。

図4に温湿度の測定点を示す。和形いぶし瓦とスレートについては、屋根材の重ね部分に濡れセンサーを挟み込み、降雨等による濡れの影響がどの程度持続するかを確認した。

(5) 解析モデルの検討

屋根模型実験に対応した屋根周りの温湿度解析

図5のように、模型実験における屋根周りの放射環境をモデル化し、屋根材の吸放湿を考慮して、空気層と外気との空気移動量の推定を行った。このモデルを用いて、葺き土を用いない場合の屋根材裏面空気層と外気との換気回数を推定した。

凍結融解実験に対応した瓦内部の含水率分布に関する解析

凍結融解実験に対応した境界条件を入力し、凍結融解を考慮した材料内熱水分移動解析を行い、実験で観察された劣化部位と解析による含水率分布の対応関係を検証した。

4. 研究成果

(1) 塀瓦の劣化調査（定点観測）

調査を行った塀瓦の断面を図6に示す。塀瓦の調査では、棧瓦の大きな亀裂や層間剥離、丸瓦の何層にも重なるような層状剥離が多く見られた（図7）。さらに、瓦裏面へ雨水が回り込まないように、防水の役目を果たす棟部分の漆喰の浮きあがりや剥離も見られ、葺き土への水分浸入が認められた。

2013年10月から2014年3月までの半年間において、塀瓦の劣化の進行を確認した。特に、2014年1月20日の調査において、凍結と凍結により劣化がおこる様子を観察できた。なお、観察時の外気温は約1℃であった。

図8に凍結により劣化が進行する様子を示す。表面が剥離している箇所で見柱状の氷柱、瓦の表面付近が氷に持ち上げられるように



図3 屋根模型外観

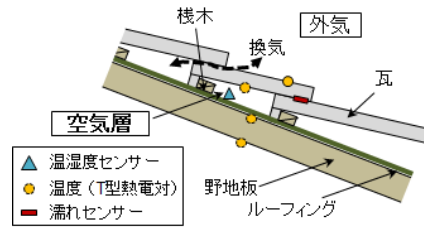


図4 屋根模型温湿度測定位置

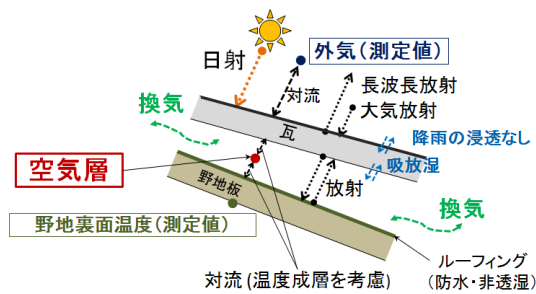


図5 空気層周りの温湿度解析モデル

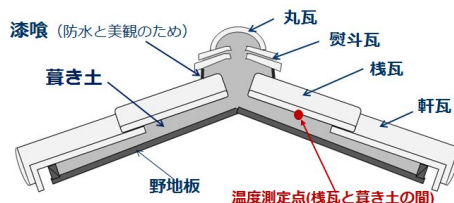


図6 調査対象の塀瓦の構成



図7 特徴的な瓦の劣化

して生じた剥離、軒瓦の垂れの模様部分の剥離、瓦の厚さ方向中心における大きな割れが確認できた。

これらの観察結果から、瓦内部での含水率の分布に着目し観察結果から劣化のメカニズムの考察を行った（図9）。

のように微細な亀裂に水分が浸透して凍結が生じると、水分の膨張により亀裂を広げる方向に力が働く。のように結露や降雨により水分が瓦内部に浸透する場合、表面付近の含水率が局所的に高くなる。葺き土に含まれていた水分が浸透する場合は、瓦内部の含水率は裏面付近が高くなる。夜間放射により表面から温度が低下すると、温度と含水率が結氷条件を満たす位置で氷が形成される。その部分では水分化学ポテンシャルが低下するため、水分が集まり、結氷量が増加し、剥離や亀裂が生じると考えられる。

図10は、実地調査における冬季の瓦裏面温度の方位による違いを示したものである。勾配はすべて同じであり、天空率は方位によりあまり変わらないことから、いずれの方位においても、夜間は外気温よりも2程度低い温度となる。また、日中は、周辺の樹木と太陽高度の関係で、東向き・西向きでは外気温と同程度までしか温度が上がらない。凍結は外気温が最も低下する深夜から早朝にかけて生じることが多いが、東向きは朝早くから日射が当たるため凍結が生じたとしても融解しやすく、北向き・西向きは凍結が持続しやすい。実際に東向きよりも北向き・西向きで劣化が多く観察されたが、凍結の持続時間が長く結氷量が増えやすい条件であったことも一因といえる。

なお、本調査については2015年3月に1st International Symposium on Building Pathologyにて口頭発表を行ったところ、雑誌 Structural Survey journal のSpecial Issue に選出されたため、今後内容を加筆・修正の上、投稿する予定である。

(2) 屋根材の広域劣化調査・ヒアリング調査
各地域での屋根の観察により得られた知見は、以下の通りである(図11)。

- ・屋根付属物などによって屋根面での水分状態には差異が生まれ、スレート屋根のドーマーの下や雨樋付近といった水分と接する時間が長い箇所に劣化が集中していた。
- ・瓦同士が接する部分に欠けが多く、瓦裏面の大きな剥離や瓦の凸部分の大きな亀裂といった葺き替えが必要な劣化もあった。いずれの地域においても、剥離・割れといった瓦の著しい劣化は施工年代による影響が大きいと考えられる。
- ・積雪の多い岐阜県・滋賀県では南向きの化粧スレートに劣化が多く、積雪が少なく比較的温暖である愛知県ではこの傾向が見られなかった。南向き屋根には直達日射が当たりやすいため、温暖な地域では低温状態が維持されにくいことに加えて、水分が蒸発しやすく、凍結のリスクが低下する。積雪寒冷地では日射の当たる面では融雪による水分供給と凍結融解が繰り返され、劣化が促進されると考えられる。このように、地域によって、同じ環境要因であっても及ぼす影響には違いがあるといえる。

(1) 氷柱



(2) 表面の剥離



(3) 模様の剥離



(4) 亀裂



劣化前 2013/12/10 氷の形成 2014/1/20 劣化後 2014/2/10

図8 塀瓦における氷の生成と劣化の進行

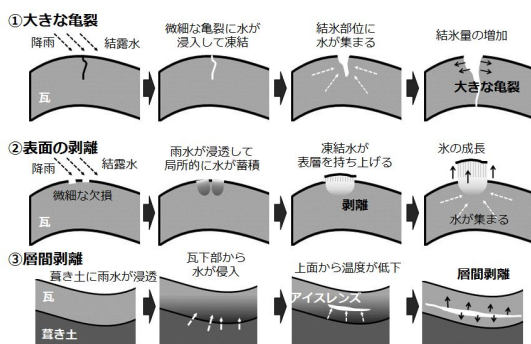


図9 凍結による劣化メカニズムの推定

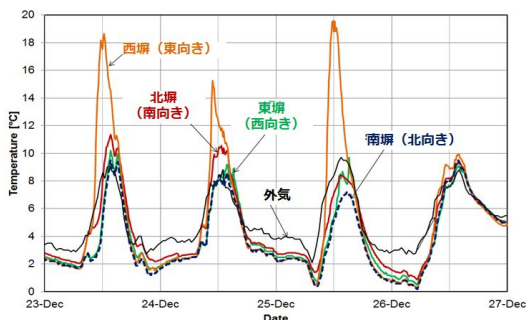


図10 方位による瓦裏面温度の違い



図11 広域調査で観察された劣化

ヒアリング調査では、製造時のプレス圧の強さや瓦の形状によって瓦内部で強度に分布が生じていること、特に手作業で作られる部分は強度が低い可能性があること、製造された年代によって内部の粗密に差が生じ、強度や水の浸透しやすさに違いがあることがわかった。

(3) 凍結融解実験

調査地での施工状態を再現し、初期的に十分な水分を与えて凍結融解実験を行った結果、実地調査で観察されたものに近い性状の劣化が確認された(図12)。

特に葺き土に接している部位では、葺き土の熱容量と葺き土に含まれる水分の凍結による凝固熱の発生により瓦自体の温度が低下しにくく、ごく薄い表層剥離が生じたのみであったが、葺き土に接しない部分では大きな剥離やえぐったような欠けが生じた。葺き土は水分の供給源である一方、その熱容量により瓦の温度低下を緩和させる効果がある。

(4) 屋根模型を用いた環境測定

各試験体における冬季の晴天日の温度変化を図13に示す。また、冬季2か月間(2013年12月~2014年1月)の裏面空気層絶対湿度と外気絶対湿度の関係を図14に示す。

測定結果から、屋根周りの温度には、屋根表面及び下地材の熱放射が大きく影響していること、瓦裏面の空気層温湿度は、外気との換気と瓦裏面の吸放湿の影響により外気よりも低湿化する時期があることが明らかになった。また、瓦とスレートの重ね部分の濡れの測定により、降雨後半日程度は重ね部分に水が滞留すること、降雨がなくても結露により長時間濡れが継続することがわかった。一般部分よりも重ね部分の方が凍結に対するリスクは高いといえる。

(5) 解析モデルの検討

屋根模型実験に対応した屋根周りの温湿度解析

瓦裏面空気層と外気との間の換気回数をパラメータとして計算を行ったところ、深夜では1.0[回/h]程度、日中の日射が当たる時間帯は10.0[回/h]以上で、空気層絶対湿度の計算値と実測値が比較よく一致した。日中は日射による屋根材の温度上昇が換気を促進していると考えられる。

凍結融解実験に対応した瓦内部の含水率分布に関する解析

凍結融解実験の条件を模擬した瓦内部の熱水分移動解析を行い、瓦内部での含水率分布(結氷が生じている位置と量)の計算結果と、凍結実験における劣化状況の観察結果を比較した。解析では、土に接していない部分の表層付近で周期的な氷の形成が生じ、空気に接する表層が剥離するという実験結果との対応が見られた(図15)。



図12 凍結融解実験による瓦の劣化の進行

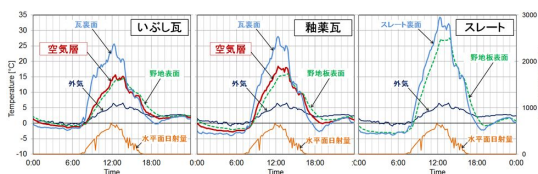


図13 冬季晴天日の屋根模型(南側)の温度

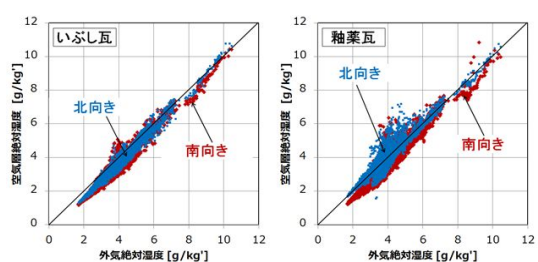


図14 冬季2か月間の瓦屋根模型裏面空気層の絶対湿度と外気絶対湿度の関係

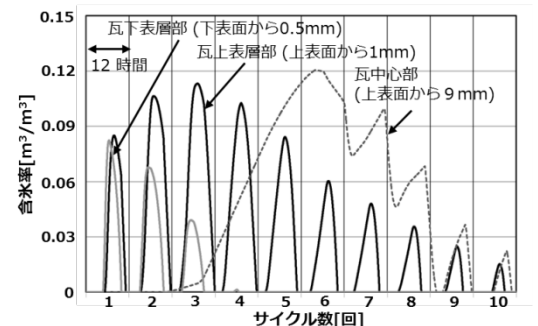


図15 両面空気に曝されている部位の含水率の経時変化の例

また、解析結果では、軒のように外気に接する面積が多く冷えやすい部位の中心部で多量の結氷が生じる場合があり、現地調査で観察された大きな亀裂との対応が見られた。瓦の部位により、周囲温度の影響度合いや水分の蓄積性状は異なり、結果的に含水率分布(劣化位置)も異なったものとなることが、本研究で提案した解析モデルにより確かめられた。

本研究では、実環境における屋根材(主に瓦)の凍結劣化性状を把握することはできたが、長期にわたる屋根材の凍結劣化を予測する解析は実施できていないため、今後検討していく予定である。

5. 主な発表論文等

(雑誌論文)(計0件)

〔学会発表〕(計9件)

伊庭千恵美、植田あゆ美、銚井修一、温暖地における屋根瓦の凍結劣化に関する研究(その4)瓦裏面空気層の温湿度測定、日本建築学会大会学術講演会、2015年9月6日、東海大学(神奈川県・平塚市)

植田あゆ美、伊庭千恵美、銚井修一、小椋大輔、温暖地における屋根瓦の凍結劣化に関する研究(その3)凍結劣化部位と含水率分布の関係に関する検討、日本建築学会大会学術講演会、2015年9月6日、東海大学(神奈川県・平塚市)

伊庭千恵美、植田あゆ美、銚井修一、温暖地における屋根瓦の凍結劣化に関する研究(その4)瓦裏面空気層の温湿度測定、日本建築学会近畿支部研究発表会、2015年6月27日、大阪保健医療大学(大阪府・大阪市)

植田あゆ美、伊庭千恵美、銚井修一、小椋大輔、温暖地における屋根瓦の凍結劣化に関する研究(その3)凍結劣化部位と含水率分布の関係に関する検討、日本建築学会近畿支部研究発表会、2015年6月27日、大阪保健医療大学(大阪府・大阪市)

Chiemi Iba, Ayumi Ueda, Shuichi Hokoi, Frost Damage of Roof Tiles: A Study on Moisture Boundary Conditions, 6th International Building Physics Conference, 2015-06-16, Torino (Italy)

Ayumi Ueda, Chiemi Iba, Shuichi Hokoi, Frost damage to roof tiles: Ice distribution in freeze-thaw experiment, 6th International Building Physics Conference, 2015-06-16, Torino (Italy)

Chiemi Iba, Ayumi Ueda, Shuichi Hokoi, Field Survey and Analysis on Frost Damage of Roof Tiles under Climatic Impact, 1st International Symposium on Building Pathology, 2015-03-26, Porto (Portugal)

植田あゆ美、伊庭千恵美、銚井修一、小椋大輔、温暖地における屋根瓦の凍結劣化に関する研究(その2)塀瓦の温度測定と劣化要因の検討、日本建築学会大会学術講演会、2014年9月14日、神戸大学(兵庫県・神戸市)

植田あゆ美、伊庭千恵美、銚井修一、小椋大輔、温暖地における屋根瓦の凍結劣化に関する研究(その2)塀瓦の温度測定と劣化要因の検討、日本建築学会近畿支部研究発表会、2014年6月22日、大阪工業技術専門学校(大阪府・大阪市)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕
出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕
該当事項無し

6. 研究組織

(1) 研究代表者

伊庭 千恵美 (IBA, Chiemi)

京都大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 10462342