

京都大学	博士 (工学)	氏名	福井 一 真
論文題目	過冷却を考慮した多孔質建築材料の凍結融解過程における熱水分挙動と変形および破壊のメカニズムの検討		
<p>本論文は、過冷却に着目して多孔質建築材料内の凍結融解過程における熱水分移動や水分の圧力変化、変形のプロセスや、破壊のメカニズムを明らかにすることを目的として研究を行ったものである。</p> <p>第1章では、背景および多孔質建築材料内の水分の過冷却現象と、それがおよぼす材料の熱水分挙動と変形および破壊性状への影響に関する既往研究を整理し、研究目的として、1) 実験的手法を用い、様々な実験条件における多孔質建築材料内の水分の過冷却解消時の熱水分・力学挙動を明らかにすること、2) 熱水分移動と力学との連成解析モデルを用い、過冷却に着目して材料内の熱水分移動や水分の圧力変化、変形のプロセスや、破壊のメカニズムを明らかにすることを述べた。</p> <p>第2章では、材料の熱水分挙動と変形に過冷却がおよぼす影響を把握するために、示差走査熱量計(DSC)と熱機械分析装置(TMA)を用い、過冷却解消温度と凍結中の含水率増加速度、ひずみ変化の検討を行った。焼成材料内の過冷却水の凍結の速度は、既往研究で示されたセメント系材料でのものよりかなり大きくなること、過冷却解消温度と降温速度や試験体の含水率との相関はみられず、-7 から -13 $^{\circ}\text{C}$ の範囲で過冷却の解消が起こること、また過冷却解消時に実験に用いた材料が大きく膨張することなどを明らかにした。</p> <p>第3章では、より一般的な建築材料に近い寸法の焼成材料の試料を用いた凍結融解実験を行い、第2章の小さい材料より過冷却の解消温度が高く、そのばらつきが小さいこと、過冷却解消時の膨張はかなり小さくなることなどを明らかにした。この理由について、過冷却解消時に放出される潜熱により温度が 0 $^{\circ}\text{C}$ 近くまで急速に上昇し、凍結開始から短時間で材料内の水分は平衡状態か、それに近い状態に達し、急速な含水率の増加が妨げられたことによると考察した。また、膨張ひずみは実験に用いた焼成材料の厚さ方向でのみ観察され、変形の異方性がかなり大きいことを確認した。</p> <p>第4章では、既往研究を参考に第7章以降で用いる凍結融解過程を含む多孔質建築材料内の熱水分同時移動理論と、poroelasticity 理論や poromechanics に基づく材料内の水分の圧力変化や変形の予測に必要な基礎理論についてまとめた。また材料が飽和状態に近い場合と不飽和の場合では、圧力と温度の平衡関係式と平衡含水率関係は異なることを示した。</p> <p>第5章では、熱水分移動や変形に関する数値解析に用いる焼成材料の物性値をまとめ、透水係数とヤング係数の異方性の考慮の必要性を示した。特に透水係数を求めるための吸水実験では、材料内部で圧縮される空気の圧力変化が水分移動に影響を極力小さくするため、試験体の側面のみを断湿した方法を用いた。</p> <p>第6章では、建築材料の水分の移動係数の測定における適切な断湿条件を検討するため、材料内の空気圧の変化が水分移動に与える影響について検討を行った。吸水実験と数値解析の結果を用いて吸水過程の材料内の空気圧と含水率の変化の過程を明らかにし、前章で用いた測定法の妥当性を示した。</p> <p>第7章では、第2章で DSC の 結果から定数を推定した反応速度式を用いて不飽和材料内の水分の過冷却を考慮した熱水分同時移動モデルを構築し、第3章で行った凍結融解実験の解析を行い、温度分布の測定結果との比較から妥当性を確認した。温度の上昇速度については実験結果との違いがあったものの、構築したモデルは過冷却解消時の急激な温度上昇を含めて実験結果と一致することを確認した。</p> <p>第8章では、前章で行った過冷却を考慮した熱水分同時移動モデルを用いて熱水分・力学の連成解析モデルを構築し、第3章で行った凍結融解実験に対して数値解析を行い、本章で構築したモデルを用いることで過冷却解消時の急激な温度上昇に加え、実験に用いた焼成材料の厚さ方向での膨張を再現できることを確認した。ただし、数値解析では実験に用いた焼成材料の厚さに垂直な方向のひずみ変化は十分に再現できず、その理由としてここで用いたモデルが材料のヤング係数とポアソン比、透水係数の異方性は考慮しているが、Biot 係数をはじめとするその他の物性値の異方性を考慮していなかったためと考えられることを考察した。</p> <p>第9章では、前章で構築した熱水分・力学の連成解析モデルを用い、過冷却を含めた凍結融解過程の材料内の水分移動や相変化、圧力の変化の過程を明らかにし、建築材料の変形や破壊性状への過冷</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	福井 一真
<p>却の影響とそれらのメカニズムについての考察を行った。第3章で述べた材料の氷の飽和度の経時変化の解析結果から、凍結が始まってから短い時間で材料内の水分が平衡状態か、それに近い状態に達し、急速な凍結が抑制されることで材料の変形が小さくなるという仮説を確かめた。材料内の水分の圧力と水分の移動の関係を検討し、本論文で用いた材料は透水係数が大きく、過冷却解消過程では材料の氷の飽和度が小さく、含水率が高かったため、材料内から表面への水分移動によって水分の圧力の上昇が抑制されることを明らかにした。また過冷却解消後に温度低下に伴い材料の氷の飽和度が増加することで透水係数が小さくなり、材料内の水分が閉塞されることが大きな変形と破壊に繋がることを示した。</p> <p>第10章では、得られた結論を総括し、本論文で用いた焼成材料よりも透水係数が小さく、大きな変形を生じやすい材料として特にセメント系材料を用いた場合の過冷却解消時の熱水分・力学挙動を明らかにすることや、実環境下における過冷却解消温度や過冷却解消時の含氷率の増加速度などを予測するための理論的検討を行うことなど、今後の研究課題をまとめた。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、過冷却に着目して多孔質建築材料内の凍結融解過程における熱水分移動や水分の圧力変化、変形のプロセスや、破壊のメカニズムを明らかにすることを目的として研究を行ったものである。得られた主な成果を以下に示す。

1. 材料の熱水分挙動と変形に過冷却がおよぼす影響を把握するために、分析手法である示差走査熱量計(DSC)と熱機械分析装置(TMA)を用い、過冷却解消温度と凍結中の含水率増加速度、ひずみ変化の検討を行った。焼成材料内の過冷却水の凍結の速度は、既往研究で示されたセメント系材料でのものよりかなり大きくなること、過冷却解消温度と降温速度や試験体の含水率との相関はみられず、 -7 から -13°C の範囲で過冷却の解消が起こること、過冷却解消時に実験に用いた材料が大きく膨張することを明らかにした。
2. 一般的な建築材料に近い寸法の焼成材料の試料を用いた凍結融解実験を行い、DSCに用いた小さい材料より過冷却の解消温度が高く、そのばらつきが小さいことと、過冷却解消時の膨張はかなり小さくなること、また、膨張ひずみは実験に用いた焼成材料の厚さ方向でのみ観察され、変形の異方性がかなり大きいことなどを明らかにした。
3. 既存の凍結融解過程を含む多孔質建築材料内の熱水分同時移動理論と、poroelasticity 理論や poromechanics に基づく材料内の水分の圧力変化や変形の予測に必要な基礎理論を用いて、過冷却を考慮した熱水分同時移動解析モデルを用いて熱水分・力学の連成解析モデルを構築した。
4. 一般的な建築材料に近い寸法の焼成材料の試料を用いた凍結融解実験に対して、過冷却を考慮した熱水分同時移動解析モデルを用いた熱水分・力学の連成解析モデルにより、過冷却解消時の急激な温度上昇に加え、実験に用いた焼成材料の厚さ方向での膨張を再現できることを確認した。
5. 同実験において材料の変形が小さくなる理由として、凍結が始まってから短い時間で材料内の水分が平衡状態か、それに近い状態に達し、急速な凍結が抑制されたためであることを確かめ、本論文で用いた材料は透水係数が大きく、過冷却解消過程では材料の氷の飽和度が小さく、含水率が高かったため、材料内から表面への水分移動によって水分の圧力の上昇が抑制されていたことを明らかにした。また、過冷却解消後に温度低下に伴い材料の氷の飽和度が増加することで透水係数が小さくなり、材料内の水分が閉塞されることが大きな変形と破壊に繋がることを示した。

以上のように、本論文は学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和3年2月19日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。