

学位論文題名

過冷却現象を考慮したコンクリートの 凍害機構に関する研究

学位論文内容の要旨

コンクリートの凍害は、寒冷地のコンクリート構造物にとって大きな問題である。実際の環境下での耐凍害性を適切に評価し対応するためには、様々な要因が影響するコンクリートの凍害メカニズムを解明することが必要である。

凍害の根本的な原因は細孔中に存在する水の凍結であることから、本研究では、セメント硬化体の細孔構造とそこに存在する水の在り方を検討し、水銀圧入法による細孔径分布から相対湿度に対応した毛管水の存在を記述する手法を示した。また、セメント硬化体中の電気抵抗が温度と水分の化学ポテンシャルに依存する性質に着目した理論的な検討から、細孔中に存在する水の凍結率を算定する手法を開発した。

次に、これらの手法を用いてモルタルによる実験を行い、凍結融解作用下のモルタルの長さ変化挙動が、過冷却水の凍結による体積増とほぼ対応することを明らかとし、不凍水圧の発生と組織の変形を、急速な氷晶の成長を伴う過冷却状態にある水の凍結により説明する新たな凍害機構を提案した。

本研究は7章で構成され、各章の概要は以下の通りである。

第1章は序論であり、本研究の背景と目的について述べ、本研究の位置づけを行うとともに、各章の構成を記した。

第2章では、凍害を考える上で基本となるセメント硬化体中の水分の在り方と細孔構造の関係について述べた。水銀圧入法による細孔構造の測定手法に検討を加え、測定結果に含まれる試料表面、および、気泡の影響を除く手法を示した。さらに、円筒細孔を仮定した場合について、相対湿度と平衡する毛管凝縮半径と吸着水層厚さについて理論的な検討を行い、工学的に多用される水銀圧入法による細孔構造測定結果から脱着平衡時の細孔内水分量を算定する手法を導き、その適合を実験により検証した。

第3章では、凍害の根本的な原因となる凍結水量の温度による変化を非破壊で連続して測定する手法について述べた。セメント硬化体中の電気抵抗が温度と調湿時の平衡相対湿度に依存する性質に着目した理論的な検討を行い、セメント硬化体の比抵抗と温度、化学ポテンシャルの関係を明らかにした。さらに、その適用を低温域にまで広げた場合の比抵抗の増加を、不導体としての氷の増加と電解質伝導体としての不凍水量の減少としてとらえることで、セメント硬化体中の凍結水率を非破壊で連続して

測定する手法を開発した。

第4章では、毛管水の凍結とモルタルの凍結融解挙動について述べた。第2章、第3章に示した手法を用いて行ったモルタルによる実験結果を解析し、最低温度を変化させた凍結後の融解過程における凍結水量と温度の関係から、過冷却水の凍結率と温度の関係を統計的に記述し、また、融解時の化学ポテンシャルの変化から毛管水の融点降下と細孔径の関係を実験式として示した。さらに、これらの実験式をもとに過冷却水の凍結によるモルタルの長さ変化を算定し、これが、熱機械分析装置（TMA）を用いて測定した凍結融解作用下の長さ変化の実測値と対応することを明らかにした。

第5章では、凍害によるコンクリートの劣化程度におよぼす凍結最低温度の影響について述べた。水セメント比、空気量の水準を変化させたコンクリートを用いて、凍結最低温度を5水準に変化させた凍結融解試験を行い、コンクリートの凍害におよぼす凍結最低温度の影響を詳細に把握した。

第6章では、過冷却水の凍結を考慮した凍害機構を提案し、そのモデル化を行った。ここで提案した凍害機構は、Powersの水圧説、及び、融点降下を考慮した鎌田の凍害理論に基礎を置いたものであるが、これらの理論では考慮されていない過冷却状態の水の急速な凍結と水分移動により凍害の原因を説明したものである。これは、細孔径に依存した融点よりも低い温度で液体として存在する過冷却水が凍結する際の急速な氷晶成長と急激な体積増により、不凍水が毛細管中を大きな流速で気泡へと移動し、この移動に伴い発生する不凍水圧によって組織の破壊と変形が生じるとした機構である。

提案した凍害機構に基づき、温度、乾燥程度、引張強度、細孔構造、及び、気泡組織から凍結融解挙動を算定するモデルを構築し、モルタルによる実験結果から適用を検証した。さらに、このモデルをコンクリートに適用し、凍結時の最大歪み度の計算値と凍結融解試験結果との対応から、コンクリートへの適用を検証している。その結果、本研究で提案した凍害機構、および、そのモデルにより、温度、細孔構造、強度、気泡組織、含水程度が複合してコンクリートの耐凍害性に及ぼす影響を定量的に評価する事が可能となった。

第7章は総括であり、本研究の成果を要約した。

学位論文審査の要旨

主査	教授	鎌田	英治
副査	教授	井野	智
副査	教授	角田	典史雄
副査	教授	佐伯	昇
副査	教授	城	攻
副査	助教授	千歩	修

学位論文題名

過冷却現象を考慮したコンクリートの 凍害機構に関する研究

コンクリートの凍害は、寒冷地のコンクリート構造物にとって大きな問題であり、実際の環境下での耐凍害性を適切に評価し対応するためには、様々な要因の影響を考慮することができるコンクリートの凍害メカニズムが必要である。これまでの凍害理論の代表的なものとしては、気泡の効果を説明したPowersの水圧説、細孔径に依存する氷の融点降下を考慮した鎌田の凍害理論などがあり、個々の現象についてかなりよく評価できるが、広範囲の定量的な評価までには至っていない。

本研究は、実験で得られた様々な知見から過冷却現象を考慮した新しい凍害機構を提案したものである。実験にあたってはコンクリートの細孔構造、水の存在状態とその凍結を明らかにするために各種の新しい手法を開発しており、電極を用いた凍結水率の測定法、物理化学の理論を用いた検討など、従来の研究ではみられなかった新たな見地から研究を進め成果を得ている。

本論文の成果とその評価を要約すると以下ようになる。

1) コンクリートの細孔構造の測定方法としては、従来から水蒸気等温吸着および水銀圧入法が代表的なものとして用いられていたが、試験結果の細部には不明の点も多く、信頼性の面で問題があった。本研究では、水蒸気等温吸着における吸着層、水銀圧入法における試料表面の粗さおよび減圧過程で水銀が試料中に残留するヒステリシス効果の空気量依存性と細孔構造の測定結果に及ぼす影響について実験的に検討し、これらの影響を考慮した補正方法を提案し、測定結果の信頼性を向上させている。また、水蒸気吸着過程の吸着層の厚さとケルビン半径の関係を導き出し、実際の細孔の大きさを算定し、水銀圧入の過程の初期に測定される気泡などの影響を排除することで水銀圧入法による大径側からの累加細孔量と水蒸気

等温吸着の脱着曲線の比較を可能としている。さらに、水の表面エネルギー密度を用いた理論的考察を加えることにより、水蒸気の脱着過程のデータと水銀圧入法の加圧過程のデータがよく一致することを示し、セメント硬化体の水蒸気等温吸着測定を、測定の容易な水銀圧入法のデータで置き換えることを可能にしている。これらの手法は、コンクリートの細孔構造と相対湿度に対応した水の存在状態のより正確な測定を可能とし、本研究の成果を得るうえで重要な役割を果たしている。

2) これまでセメント硬化体の電気抵抗が温度と含水率などに依存することが知られていたが、理論的には明確にされていなかった。本研究では、化学ポテンシャルの概念を導入することでこれらの関係を理論的に説明し、水の化学ポテンシャルに対応する含水率を算定する手法を開発している。さらに、この手法の適用を低温域にまで拡張することで電気抵抗と温度から水の凍結率を非破壊で継続的に測定する手法を提案している。この手法は、細孔中の水とコンクリートの諸性質の関係を解明する上で有効な手法となる。

3) 新たに開発されたこれらの手法を用いることにより、毛細管空隙中に存在する水の過冷却現象と凍結性状、さらには融点降下の細孔径依存性を実験的に確認することに成功している。また、細孔構造から温度に応じた凍結水量を算定し、凍結融解作用下のモルタルの長さ変化挙動が過冷却水の凍結による体積増と対応することを明らかにしている。

水圧説および融点降下を考慮した凍害理論に基礎を置きながら、これらの理論では考慮されていない過冷却状態の水の急速な凍結に着目した新しい凍害機構を提案している。これは、細孔径に依存した融点よりも低い温度で液体として存在する過冷却水が凍結する際の急速な氷晶成長と急激な体積増により、不凍水が毛細管中を大きな流速で気泡へと移動し、この移動に伴い発生する不凍水圧によって組織の破壊と変形が生じるとした機構である。この新たに提案した凍害機構に基づき、モルタルの膨張挙動を記述するモデルを示し、熱機械分析装置による実測結果との対応からその適用性を検証している。さらに、コンクリートの凍結融解試験結果との対応を確認した結果、コンクリートの凍害に対する温度、含水程度、細孔構造、引張強度、気泡組織が複合した影響を定量的に評価することを可能にしている。使用する骨材による影響、凍結融解作用の繰り返しの効果等、今後、検討を続けるべき課題はあるが、これらの成果はコンクリートの耐凍害性の評価に関する研究の進展に大いに貢献するものと評価される。

これを要するに、著者は細孔中の水の過冷却現象に着目し、コンクリートの新しい凍害機構を提案し、凍害に対する多くの新知見を得たものであり、コンクリート工学および建設材料学の発展に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。