

凍結融解と塩化物の複合作用による

スケーリングに対する耐久性設計法に関する研究

学位論文内容の要旨

寒冷地における代表的な劣化因子に凍結融解が挙げられる。さらに、沿岸部や凍結防止剤の散布地区では塩化物の作用も合わせて受ける。コンクリートが凍結融解と塩化物の作用を複合的に受けると、コンクリートの表面がうろこ状に剥がれ落ちるスケーリングが促進されることが知られている。スケーリングは、ひび割れの進展が主な一般の凍害とは劣化の形態が異なるため、既往の凍害の予測・評価に関する研究成果はそのまま適用することができない。そのため、寒冷地におけるコンクリートの耐久性の照査技術の高度化を図るには、一般の凍害に加えて、凍結融解と塩化物の複合作用によるスケーリングの評価方法の確立が求められている。本論文では、凍結融解と塩化物の複合作用によるスケーリングに対する耐久性設計法の確立を目的に、種々の実験、調査を行い、その結果を包括的にとりまとめ、設計法の提案を行った。

第1章では、研究背景、スケーリングの被害の現状、関連する既往の研究について整理するとともに、研究の位置付けと目的および論文構成を述べた。

第2章では、スケーリングに及ぼすコンクリートの品質の影響ならびにスケーリングの抑制に効果的な配合条件について整理した。水セメント比および凍結融解作用前の75nm以上の細孔量の影響が大きいことを明らかにし、これらのパラメータと凍結融解履歴を組み合わせたスケーリングの進行予測式を提案した。また、スケーリングの発生形態は水セメント比が同じでも使用するセメントの種類や供試体の部位によって異なることを実験的に確認した。さらに、第2章で得たデータの範囲内で、最大スケーリング深さが2.5mm以下に留まることが期待される水セメント比について考察した。

第3章では、第2章で得た成果の妥当性の検証を目的に、建設後10数年～約40年に亘って凍結融解と塩化物の複合作用を継続的に受けている北海道沿岸部の防波堤上部天端面(高炉B種使用)において調査を行った。調査データを解析してスケーリングに及ぼす影響因子の重み付けを行ったところ、深さ350～400mmの水セメント比(配合推定値)、圧縮強度、深さ0～50mmの水セメント(配合推定値)、経過年数、気泡間隔係数、地域係数(ただし、本研究での対象は2.3～6.6)、空気量の順に影響が大きいことを確認した。一般に圧縮強度は水セメント比と密接な関係にあることに鑑みると、水セメント比と経過年数の2つが極めて重要なパラメータであると言え、第2章の成果の妥当性が実証された。また、第2章で示したスケーリングの進行予測式は防波堤上部天端面においても適用が可能であることを確認し、ASTM C 672の実験結果を構造物の耐久性設計へ応用するための基本的な考え方について示すことができた。さらに、一部の防波堤において内部の塩化物イオン量を調べたところ、コンクリート標準示方書に準じて算出した計算値を上回る量が蓄積していたことを

明らかにし、塩化物イオンの浸透性に及ぼすスケーリングの影響が大きいことを実構造物レベルで確認した。

第4章では、スケーリングに及ぼす凍結融解作用前の環境の影響について整理した。打設後、気中に静置せず、湿潤環境下に継続的に静置した場合、淡水が作用する時は小さいスケーリング量で推移するのに対し、塩水（濃度3パーセント）ではセメントの種類によらず大きなスケーリングが急速に発生し、淡水とは異なる劣化形態を示すことを実験的に確認した。また、気中静置後に再吸水を行った場合も高炉B種においてスケーリングが多く発生する実験結果が得られたが、スケーリングの程度は前者の方が大きい傾向が示された。データ解析を行い、スケーリングはValenzaらの理論に基づいて補正した弾性係数と凍結圧勾配がともに小さいほど進行しやすいこと、補正弾性係数は表層の含水率、凍結圧勾配はコンクリートの透水係数と密接な関係にあることを明らかにした。これをもとに、含水率と透水係数を組み合わせたスケーリング促進の危険性を照査する式の構築、スケーリングの進行性に及ぼす凍結融解前の環境の影響の照査フローの提案を行った。

第5章では、耐久性設計法の確立に向けての補足的な検討として、スケーリングの進行速度の大小を簡易的に予測できるモデルの構築を目的とした実験を行った。スケーリングの進行速度は水セメント比（もしくは75nm以上の細孔量）が高く、透水係数が小さいほど大きいことを確認した。この成果をもとに、スケーリングは表層の組織が脆弱でかつ凍結圧の負荷が表層に蓄積されやすい品質のコンクリートほど進行しやすいことを説明できるモデルを構築した。そして、第2章～第4章、および本章で行った補足的な検討の成果を包括的に整理し、スケーリングを抑制するための耐久性設計法をとりまとめた。

第6章では、スケーリング抑制対策について検討を行った。対策の基本は表層の組織の緻密化と水・塩分の浸透抑制の2つに大別されるが、前者は第2章と第3章で既に検討済のため、ここでは後者に着目し、提案されている多くの工法を代表してシラン系表面含浸材を取り上げ、スケーリングおよび塩化物イオン浸透の抑制効果の検証を目的に室内実験、実橋での試験施工、沿岸部での暴露実験を行った。追跡調査4～5年の範囲ではあるが、新設および打換え部材ではスケーリングの進行抑制効果および遮塩効果が期待されることが明らかとなった。効果は製品によって異なるが、室内実験（塩水浸漬実験）における塩化物イオン浸透深さの測定結果は現場に適用する製品を選定する上で有効なバロメータになることを示した。さらに得られたデータを解析し、シラン系表面含浸材によってもたらされるライフサイクルコスト縮減効果および費用対効果について総合的にとりまとめた。

第7章では、本研究で得られた研究成果の総括を行うとともに、今後の研究の方向性・課題について述べた。

以上に示すように、スケーリング挙動の解析・定式化、設計、劣化抑制対策について研究を行った結果、凍結融解と塩化物の複合作用によるスケーリングに対する耐久性設計法を確立・提案することができた。なお、これら成果の一部は、現在、行政の実務にも反映されており、寒冷地における社会資本の適切な設計・維持管理への貢献が期待される。

学位論文審査の要旨

主 査	教 授	名 和 豊 春
副 査	教 授	三 上 隆
副 査	教 授	杉 山 隆 文
副 査	准教授	胡桃澤 清 文

学 位 論 文 題 名

凍結融解と塩化物の複合作用による

スケーリングに対する耐久性設計法に関する研究

コンクリートは、土木構造物を形成する主要な建設材料の一つであり、メンテナンスフリーであるとして古くから大量に使用されてきた。しかし近年、コンクリートの早期劣化が認められ、コンクリート構造物の耐久性設計や維持管理が求められるようになった。コンクリートの維持管理では、供用期間における耐久性と経済性の両者を考慮したストックマネジメント計画が重要であり、コンクリートの劣化予測を適切に行うことが大切となる。寒冷地における代表的な早期劣化としては凍結融解による劣化、特に沿岸部や凍結防止剤の散布地区における凍結融解と塩化物の作用の複合的劣化によりコンクリートの表面がうろこ状に剥がれ落ちるスケーリングが促進されることが知られている。スケーリングは、ひび割れの進展が主な一般の凍害とは劣化の形態が異なるため、既往の凍害の予測・評価に関する研究成果はそのまま適用することができない。そのため、寒冷地におけるコンクリートの耐久性の照査技術の高度化を図るには、一般の凍害に加えて、凍結融解と塩化物の複合作用によるスケーリングの評価方法の確立が求められている。本博士論文は、凍結融解と塩化物の複合作用によるスケーリングに対する耐久性設計法の確立を目的に、種々の室内実験や現場調査を行い、その結果を包括的にとりまとめ、スケーリングに対する耐久設計法の構築および対策の提案に成功したものである。主たる成果は以下に列挙される。

第一の成果として、スケーリングに及ぼすコンクリートの品質の影響について系統立った一連の研究・調査を行いスケーリングの進行を抑制するための耐久性設計方法を構築したことが挙げられる。本研究では、まず ASTM C 672 の一面凍結融解試験を用いた室内実験で、従来の凍害でも指摘されていた硬化セメントペースト中の 75nm 以上の粗大な細孔量の影響が大きいことを明らかにし、これの支配要因である水セメント比と凍結融解サイクル数をパラメータとしてスケーリングの進行を予測することに成功した。さらに、建設後 10 数年～約 40 年に亘って凍結融解と塩化物の複合作用を継続的に受けた北海道沿岸部の防波堤のスケーリングを調査し、室内の促進実験で得た成果の妥当性を確認している。その際に、水セメント比の設計値が 53～60% の場合、ASTM C 672 における 300 サイクルの結果が、実環境の最大 20～33 年分のダメージに相当するなど、促進試験結果と実構造物の耐久性を関連付けることに成功し、実構造物のスケーリングを予測する一般的な

手法を確立したことに本研究の価値が認められる。

第二の成果は、スケーリングに及ぼす凍結融解作用前の養生および凍結融解作用時の環境、特に水分、塩分の供給の影響について検討し、スケーリングの作用機構を明らかにした点である。打設後に湿潤環境下に養生したコンクリートのスケーリングは、淡水が作用する時は小さいのに対し、塩水(濃度 3%) ではセメントの種類によらず大きくなり、凍結融解と塩化物の作用の複合的劣化を確認するとともに、再吸水を行った場合に高炉 B 種セメントを用いたコンクリートにおいてスケーリングが多く発生する実験結果を得た。凍結融解試験中に各コンクリート供試体中に生じる応力を測定し、スケーリングは弾性係数と凍結圧勾配がともに小さいほど進行しやすく、弾性係数は表層の含水率、凍結圧勾配はコンクリートの透水係数と密接な関係にあることを明らかにした。次に、表層の含水率と透水係数を組み合わせたスケーリングの劣化モデルを構築するとともに、そのモデルに基づきスケーリングの進行性に及ぼす養生および周辺環境の影響の評価方法の提案を行っている。本評価方法により、任意の養生および環境でのスケーリング劣化の進行を追従することが可能となり、維持管理に対する多大な貢献が認められる。

第三の成果は、配合と養生の 2 つの観点からスケーリング抑制対策について提案し、その効果をライフサイクルコストの観点からも実証した点である。スケーリングの抑制対策の基本は、配合から決定される表層の組織の緻密化と、供用期間中の水・塩分の浸透の抑制の 2 つに大別される。前者は水セメント比の低減で達成され、既に建設後 10 数年～約 40 年の実構造物で実証されている。本研究では、後者の水・塩分の浸透の抑制を達成する方法として、シラン系表面含浸材の高い撥水・遮塩性能に着目し、その効果を室内実験、実橋での試験施工、沿岸部での暴露実験によって確認した。その結果、調査期間 4～5 年であるが、シラン系表面含浸材のスケーリングおよび塩化物イオン浸透の抑制効果が新設および打換え部材では期待できることを明らかにした。さらに、実橋で取得したデータを用いてシラン系表面含浸材によってもたらされるライフサイクルコストの解析を行い、抑制対策の費用対効果を定量化することに成功している。本研究で得られたこれらの成果は、既に北海道開発局の制定する海洋コンクリート構造物の配合条件の見直し(案)や道路橋での表面含浸材の適用にあたっての留意事項などに反映され、社会的な還元がなされており高く評価される。

これを要するに、著者はコンクリート構造物の凍結融解と塩化物の複合作用によるスケーリング劣化に関する耐久性設計および抑制対策を構築したものであり、建設資源工学およびコンクリート工学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。