

氏名	たなかだて ゆうと 田中館 悠登
本籍（国籍）	岩手県
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	工博 第315号
学位授与年月日	令和2年3月23日
学位授与の要件	学位規則第5条第1項該当 課程博士
研究科及び専攻	工学研究科 機械・社会環境工学システム工学専攻
学位論文 題目	コンクリートのソルトスケーリング劣化機構及び その対策に関する研究
学位審査委員	主査 教授 羽原 俊祐 副査 教授 越谷 信 副査 教授 南 正昭 副査 准教授 山本 英和 副査 准教授 小山田 哲也

論文内容の要旨

東北地方や北海道などの積雪寒冷地域におけるコンクリート構造物の主な劣化現象は凍害であり、凍害の対策はコンクリート構造物の耐久性確保における重要な課題となっている。凍害とは、コンクリート中の水分の凍結膨張によって発生するものであり、長年にわたる凍結と融解の繰り返しによってコンクリートが徐々に劣化する現象である。1992年に「スパイクタイヤ粉じんの発生の防止に関する法律」施行されて以降、冬期間の交通安全のため塩化ナトリウム（NaCl）などの塩化物系の凍結防止剤の散布量が行われ、コンクリートの凍害の劣化形態の1つである表面損傷のスケーリング劣化が、内陸部の道路構造物でも報告されるようになった。このことから、スケーリング劣化は、ソルトスケーリング劣化とも呼ばれている。ソルトスケーリングについては、多くの劣化メカニズムが提案されているものの、詳細な劣化メカニズムは未だ明らかとはなっていない。

ソルトスケーリングの対策は、凍害の劣化形態の1つである内部ひび割れと同様に、連行空気（エントレインドエア）の導入により行われている。しかし、凍結防止剤の散布により、連行空気による対策を行った場合でも、ソルトスケーリング劣化が生じ対策が急務である。また、コンクリートの空気量は施工により変動することが報告されており、施工による連行空気の損失による構造物のソルトスケーリング抵抗性の低下が危惧されている。

本論文では、積雪寒冷地域における構造物のソルトスケーリング抵抗性向上を図るべく、ソルトスケーリングの劣化メカニズム、ソルトスケーリング劣化の対策の課題および構造物のソルトスケーリング劣化の発生の危険度について検討を行った。

本論文の構成は以下のとおりである。

第1章「序論」では、本研究の目的および概要について述べた。

第2章「ソルトスケーリング劣化に関する既往の研究」では、供用環境の危険度予測、環境や使用材料と配合がソルトスケーリング抵抗性に及ぼす影響、既往の劣化メカニズム、ソルトスケーリング試験方法および施工によるソルトスケーリング抵抗性の低下について整理し、当該研究における現状の課題を明らかにし、本研究の位置づけを明確にした。

第3章「新規のソルトスケーリング抵抗性試験の有用性に関する検討」では、ソルトスケーリングの劣化メカニズムを明らかにするため、まず初めに試験方法について検討した。既存のソルトスケーリング試験は、試験体が大きく、長期の試験期間を要する。そこで本論文では、既存の試験に比べて、簡便かつ省力的に多くの水準の試験が可能である小片凍結融解試験の有用性について確認した。その結果、小片凍結融解試験は、ソルトスケーリング劣化の特徴を再現し、既存のソルトスケーリング試験とある程度の整合性を示すことを明らかにした。このことから、小片凍結融解試験は、ソルトスケーリング劣化の試験として有用であることを明らかにした。

第4章「ソルトスケーリングの劣化メカニズムに関する検討」では、ソルトスケーリング劣化に影響すると考えられる水セメント比や空気量などの配合の影響および、冷却時の最低温度や凍結防止剤の濃度などの環境の影響について、第3章で試験方法として有用であることを確認した小片凍結融解試験により評価し、ソルトスケーリングの劣化メカニズムおよび発生条件をについて検討した。その結果、凍結防止剤溶液の濃度によってソルトスケーリング劣化が発生する温度の閾値が異なり、濃度に依存してソルトスケーリング劣化が発生する温度の上限の閾値が存在することを明らかにした。また、コンクリート周辺の凍結防止剤溶液が、氷と高濃度の凍結防止剤溶液とが混在する状態において、ソルトスケーリング劣化が発生することを見出した。このことから、氷と氷の間、氷とコンクリートの間およびコンクリートの空隙に、高濃度の凍結防止剤溶液が閉じ込められた状態において、温度低下に伴い凍結防止剤溶液が凍結膨張することでソルトスケーリング劣化が発生すると考察した。

第5章「ポンプ圧送によるソルトスケーリング抵抗性の低下に関する検討」では、施工工程の一つであるポンプ圧送時の加圧が、コンクリート中の気泡組織の変化とソルトスケーリング抵抗性の変化に及ぼす影響について検討した。その結果、一時的な加圧により、ソルトスケーリング劣化に有効な連行空気が減少し、それに伴いソルトスケーリング抵抗性が低下することを明らかとした。、加圧によりコンクリート中の連行空気が小さくなり、連行空気

の内部の圧力と外部の圧力との均衡が崩れ、連行空気が周囲の水に溶解し、気泡数の減少が生じることにより、加圧による空気連行空気の減少が起こることを明らかにした。また、ポンプ圧送時の加圧の対策として、中空微小球型の混和材による空気の導入が有効であることを見出した。

第6章「道路構造物のソルトスケーリング発生危険度マップの提案」では、第4章において明らかとなったスケーリング発生条件に基づき、岩手県をはじめとする積雪寒冷地域の東北地方におけるスケーリング劣化の危険度の照査を試みた。2013年から2018年までの5年間に於いて1冬期で-7℃以下となった日数の平均と凍結防止剤の散布量に基づきソルトスケーリング危険度マップを試作した。その結果、既存の凍害危険度マップとある程度一致する結果となった。また、国道4号線の県北地域においてソルトスケーリングの危険度が高いことを示した。

第7章「結論」では、これまでの6章の検討による結論を導いた。

論文審査結果の要旨

コンクリートは多孔質であり、細孔内の水の凍結による体積膨張によりもたらされる応力が原因となり、さらに凍結融解繰返しでコンクリートを崩壊させる現象が凍害である。AE剤による空気の連行対策は有効であり、現在では積雪寒冷地域の新設のコンクリート構造物はAEコンクリートとなっている。1992年に「スパイクタイヤ粉じんの発生の防止に関する法律」が施行されて以降、冬季の交通安全運航のため凍結防止剤の使用が行われ、多いところでは、高速道路で100t/km、一級国道では50t/kmが年間で使用されている。凍結防止剤の使用に伴い、コンクリート表面からセメントペースト及びモルタルが剥離するスケーリング劣化が著しくなっている。スケーリング劣化はいわば新しいコンクリートの凍害の劣化形態である。真水ではこのような劣化は起こらず、海水や凍結防止剤散布環境下で起こることが知られているものの、そのメカニズムは仮説の域にとどまっている。そのため、これまで凍害が生じていない地域においてもスケーリングが生じることが懸念される。加えて、AE剤による空気の連行を行った場合でも、スケーリング劣化が生じることが報告されており、喫緊の課題となっている。また、施工により連行した空気量が低下することが報告されており、施工によるスケーリング抵抗性の低下が危惧される。以上の背景から、この研究では、コンクリートのスケーリング劣化のメカニズムの解明及びその対策の提案を目的に検討が行われた。この研究で行った主な検討項目を以下に示すとおりである。

- (1) 新規のスケーリング抵抗性評価試験の確立
- (2) 新規のスケーリング抵抗性評価試験による劣化メカニズムの検討
- (3) 施工による構造物のスケーリング抵抗性の低下についての検討とその対策の提案
- (4) 岩手県および東北地方におけるスケーリング発生危険度マップの提案

(1)では、新規に提案するスケーリング抵抗性評価試験である小片凍結融解試験を確立させるため、試験体寸法や評価指標の改良を行った。既存の試験に比べて、簡便かつ省力的に多くの水準の試験が可能である小片凍結融解試験の有用性について確認した。また、ASTM C672などの既存のスケーリング抵抗性評価試験方法とある程度の整合性があることを示した。(2)では、水セメント比等の構造物の耐久性に関連する配合的要因及び、最低気温及び凍結防止剤の濃度等の環境的要因について、小片凍結融解試験により評価し、スケーリング劣化のメカニズムの解明を試み、スケーリングが -5°C から塩水の共晶点である -20°C の温度域で発生することを明らかにした。スケーリングのメカニズムに関する新しい知見を多くえた。これらの結果をもとに、耐久性を向上させる手法として中空微小球混和材の有効性を明らかにした。(3)では、構造物の実際の施工を再現した試験により施工による構造物のスケーリング抵抗性の変動について把握し、そのスケーリング抵抗性の変動を引き起こす現象について検証を行い、施工によるスケーリング抵抗性の変動の対策を、実際に実施した検証実験に基づき、その対策案を提案した。(4)では、これまで得た知見をもとに、スケーリングの発生条件に基づき、岩手県をはじめとする積雪寒冷地域の東北地方におけるスケーリング劣化の危険度を、年間の最低気温及び凍結防止剤の散布量データを参照し評価した。東北における道路構造物のスケーリング劣化危険地域を新たに指摘することができた。

以上、スケーリング現象の解明、それに対する対応策の提案など工学的に有用な多くの知見を得ることができた。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。

原著論文名（1編を記載）

題目,著者名(全員),学術雑誌名,(巻,号,頁),発行年月

氷点下における降温と昇温の繰り返しがモルタルのソルトスケーリング抵抗性に及ぼす影響,

田中 館悠登, 羽原 俊祐,

セメント・コンクリート論文集, No.72, p.240-246, 2019年3月29日