

氏名	はん しょうぎ <b>樊 小義</b>
本籍（国籍）	中華人民共和国
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	工博 第291号
学位授与年月日	平成30年9月25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・社会環境システム専攻
学位論文 題目	<b>コンクリートのスケーリング劣化に及ぼす凍結過程の作用応力と連行空気の影響に関する研究</b>
学位審査委員	主査 准教授 小山田 哲也 副査 教授 羽原 俊祐 副査 教授 越谷 信 副査 教授 大西 弘志

## 論文内容の要旨

コンクリートのスケーリングは、凍結融解サイクルに伴いコンクリートの表面が薄片状に剥がれる現象で、凍害劣化の主要な一つの形態である。近年ではこのスケーリング劣化の進行によりコンクリート表面の骨材の剥離や土砂化により重篤化する事例も確認され、コンクリートの耐久性や耐荷性などに影響を与える問題が報告されるようになった。

岩手県などの積雪寒冷地域では冬期間に道路に散布されている凍結防止剤溶液がコンクリート構造物のスケーリング劣化を助長していることが知られているが、交通安全の確保のために凍結防止剤は散布せざるを得ず、コンクリート構造物のスケーリング抵抗性はコンクリートそのものの劣化抵抗性を確保することで果たされなければならないのが現状である。

本研究では、コンクリートのスケーリング抵抗性の確保を最終的な目的とし、その手段として、以下の3つを設定した。

- ①スケーリング劣化のメカニズムの検討
- ②スケーリング抵抗性とコンクリート中の気泡組織との関係
- ③現場施工におけるコンクリートのスケーリング抵抗性の確保の留意点

①では、スケーリング現象のメカニズムについて実験結果に基づき、既往の研究を踏まえてメカニズムを構築して提案した。提案したメカニズムは、物理的な作用に基づき、コンクリート表面に発生する氷からの応力とコンクリート内部の応

力の総和とした。

氷の応力については、Glue-Spall 理論を用いて、理論的あるいは解析的に解釈されてきた氷とコンクリートのひずみ差に基づく応力を実験的に解析した。凍結防止剤水溶液が凍結した場合、真水が凍って、内部に溶液が濃縮したポケットができ、さらに凍結が進むと、氷は自らの収縮に耐え切れずに圧壊する。この氷はコンクリートの表面をかきむしるような方向にせん断力を与え、コンクリート表面を破壊させると考えた。

コンクリートの応力については、micro-ice-lens 理論を援用した。コンクリート表面は、凍結の際、コンクリート表層部から凍結し、エンタルピーの高い凍結防止剤が吸い寄せられて凍結膨張する。モルタルに連行空気が十分に存在する場合には、膨張圧が生じた水は、連行空気内に排出される。毛細管空隙やゲル空隙の水には負圧が生じ、コンクリートは全体的に収縮する。また温度低下による収縮も起こる。

コンクリートの収縮力が十分に大きく氷の収縮力との差が小さい場合には、スケーリングは起こらないか軽微な表面剥離となる。一方、モルタルの収縮が小さいあるいは凍結膨張する場合には、氷とのひずみ差が大きくなり表面剥離が生ずるとした。

本研究ではこのメカニズムを仮定して、現象が証明できるように実験を行った。6種類の凍結防止剤を使用して氷とモルタルのそれぞれの応力を実験的に求めた結果、スケーリング量との相関があることを説明した。したがって提案したメカニズムの妥当性が検証できた。

②では、①において検討したメカニズムを、気泡径分布の異なるモルタルにおいて実証した。実験により求められた氷とモルタルに働く応力の総和は、スケーリング量と高い相関があることがわかった。また AE 剤による連行空気が微細であり、適切な量が混入されることによって、モルタルのスケーリング抵抗性が向上することも確認された。その結果から微細な連行空気の効果の原因について検討し、連行空気の表面積に着目した。硬化コンクリートの気泡径分布の測定結果から連行空気の周長を算出して表面積を代表する値とした。実験の結果、モルタル中の連行空気の周長が大きくなる程、凍結融解試験で観測されたスケーリング量が小さくなることが分かった。以上より、凍結過程で氷の凍結によりモルタル内の毛細管空隙の圧力が高まった場合に、その水の排出面積が大きいコンクリートのスケーリング量が小さくなるものと考えた。

③では、以上より得られた結果と実構造物での劣化の状況とを比較するため、実際に東北地方で道路橋橋脚あるいは橋台に打ち込まれた 10 現場のコンクリートを採取して凍結融解試験を行うとともに、硬化後に残存している連行空気の気泡径分布について考察した。コンクリート構造物への施工に伴う圧送や締固めによって、荷卸し時の空気量は大きく損失することが確認された。

フレッシュコンクリートの空気量の低下に応じて硬化後の空気量は低下した。こ

これらのスケーリング量は、空気量の低下に伴い大きくなる。本研究の結果から得られた連行空気の周長とも相関があることが分かり、硬化コンクリートに必要な空気量は、橋脚や橋台に使用されるレベルのコンクリートの場合では 3.5%と推察された。また本研究の結果からフレッシュコンクリートに必要な空気量は日本工業規格で示されている  $4.5 \pm 1.5\%$  の上限値である 6.0%よりも大きくすべきであることが分かった。

このようにスケーリング劣化のメカニズムから劣化対策まで考慮した本論文は、学術的かつ工学的な観点から重要な意義を成すものと考えられる。

## 論文審査結果の要旨

コンクリートのスケーリング劣化は、岩手県をはじめとする積雪寒冷地域のコンクリートの耐久性に関わる大きな問題として、認識されている。ただし、劣化メカニズムが的確に捉えられておらず、道路構造物の耐用年数 100 年を目標と掲げている現在でも適格な対策が講じられていないのが現状である。

本論文では、コンクリートのスケーリング抵抗性の確保を最終的な目的とし、その手段として、以下の三つを設定している。

- ①スケーリング劣化のメカニズムの検討
- ②スケーリング抵抗性とコンクリート中の気泡組織との関係
- ③現場施工におけるコンクリートのスケーリング抵抗性の確保の留意点

現在道路構造物に顕在化しているスケーリングのメカニズムを捉え、その解決策を提案している本論文は、学術的かつ実務的価値が高く、すでに国土交通省東北地方整備局から通知された「東北地方における凍害対策に関する参考資料（案）」の一部にも採用されており、その実績は評価できる。

それぞれの技術的な新規性は以下の 3 点で評価できる。

### ○スケーリング現象のメカニズムの構築

提案したメカニズムは、既知の内容を整理した上で、これらを援用する方法で劣化現象が証明できるように実験的かつ定量的な評価を行って検証されている。具体的には、6 種類の凍結防止剤を使用して氷とモルタルのそれぞれの応力を実験的に求め、スケーリング量との相関があることを説明したものである。本実験により凍結時にコンクリート内外に発生する物理的な作用力が劣化を引き起こすことが明らかとなり、提案したメカニズムの妥当性が検証できた。

### ○スケーリング劣化対策における連行空気の効果

上記検討したメカニズムを、気泡径分布の異なるモルタルにおいて実証した。AE 剤による連行空気は微細であり、適切な量が混入されることによって、モルタルのスケーリング抵抗性が向上することも確認された。硬化コンクリートの気泡径分布の測定結果から連行空気の周長を算出して表面積を代表する値とし、モルタル中の

連行空気の周長が大きくなる程、凍結融解試験で観測されたスケーリング量が小さくなることが分かった。これらは新たな知見であり、新規性を有すると判断でき、今後の積雪寒冷地域のコンクリート構造物の新設あるいは維持管理に有益な情報となったと考えられる。

○実構造物のスケーリング抵抗性の現状とその向上

上記より得られた結果と実構造物での劣化の状況を比較するため、実際に東北地方で道路橋脚あるいは橋台に打込まれた 10 現場のコンクリートを採取して凍結融解試験を行うとともに、硬化後に残存している連行空気の気泡径分布について考察した。コンクリート構造物への施工に伴う圧送や締固めによって、荷卸し時の空気量が大きく損失することが確認された。

フレッシュコンクリートの空気量の低下に応じて硬化後の空気量は低下した。これらのスケーリング量は、空気量の低下に伴い大きくなる。本研究の結果から得られた連行空気の周長とも相関があることが分かり、硬化コンクリートに必要な空気量は、橋脚や橋台に使用されるレベルのコンクリートの場合では 3.5%と推察された。また本研究の結果からフレッシュコンクリートに必要な空気量は日本工業規格で示されている上限値である 6.0%よりも大きくすべきであることが分かった。

このように既成の概念に捉われず、物理化学的な側面からスケーリング劣化のメカニズムから劣化対策まで考慮した本論文は学術的かつ工学的な観点から重要な意義を成すものと考えられる。

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 スケーリング劣化に及ぼすコンクリート表面に発生する応力の影響，  
樊小義，小山田哲也，羽原俊祐，コンクリート工学年次論文集，Vol. 39，No. 1，  
pp. 817-822，2017**