

学位論文の要旨（和文）

論文題目 寒冷気候におけるコンクリート橋梁の耐久性の改善

専攻名 社会基盤工学専攻 専攻 学位の種類 博士（工学）

学籍番号 D18301 氏名 張 萌

[要旨] (3,000 字程度、1 行 40 文字で 75 行)

コンクリートは、その優れた可塑性、汎用性、および低コストのために、道路、橋、ダム、トンネルなどのあらゆる種類のインフラストラクチャーの建設に広く使用されている。しかし、寒冷地でのコンクリート構造物の耐久性は常に注目されてきた。日本の寒冷地では、現在、多くの既存の鉄筋コンクリート（RC）構造物が、厳しい供用環境や気候のために、凍害、塩害、アルカリシリカ反応（ASR）、砂利化などの複合劣化が顕在化している。そのため、その性能・機能や耐用年数の低下が課題となっている。

ご存知のように、寒冷地では主に凍害に起因する橋梁やトンネルの劣化が一般的な現象である。1990 年代初頭から、冬の車両の安全運転を確保するために凍結防止剤（塩化物）が広く使用されている。日本の東北地方の報告によると、冬の平均気温が -3°C 未満で、凍結防止剤が年間約 $20\text{t}/\text{km}$ 散布されている。このため、国土交通省東北地方整備局では、凍結防止剤が散布されるコンクリート橋梁の凍害対策マニュアルを発行している。このマニュアルは、現場でのフレッシュコンクリートの目標空気量を増やすために提案されている。それは、建設の施工段階での空気量の減少をカバーし、硬化コンクリートの空気量を確保することを目的としている。凍害リスクが最も厳しい環境下のコンクリート構造物の場合、W/B が 45% 未満で、目標空気量が 6% であることが要求されている。しかし、実際の施工段階におけるソルトスケーリング抵抗と気泡の分布特性に関する研究はまだ明確ではない。

さらに、近年では既存の RC 構造物の長寿命化を目的とした維持管理が特に重要になっている。それにも関わらず、管理構造物の増大は必然的に維持費の増加につながり、それは現代の社会経済の発展に深刻な影響を及ぼすことが懸念される。国土省によると、日本の東北地方では、40% 以上橋梁が 2025 年までに供用開始から 50 年以上に達するため、多くの橋梁がその性能に潜在的なリスクを抱えている。言い換えれば、既存の RC 橋梁の大部分は、大規模なリハビリと更新の時期に差し掛かっている。したがって、耐久性のあるコンクリート構造物の整備は、グリーンで持続可能な地域社会にとって非常に重要といえる。この論文は、既存の RC 橋梁の表層透気係数の調査（非破壊検査、NDT）、実験室試験、実際の現場フィールドのさまざまな段階でのコンクリートの耐凍害性の試験を通じて、寒冷気候におけるコンクリート橋梁の耐久性の改善を目指したものである。主な研究内容と得られた成果を以下に示す。

(1) 表層部コンクリートの透気性とソルトスケーリング抵抗性に及ぼす初期養生の影響を調査した。これらの結果は、シートまたは透水型枠を使用したコンクリート養生は、養生時間が長くなる気中での養生よりも優れていることを示した。特に透水型枠を利用することは、高い表層品質と耐久性のあるコンクリートの確保に非常に効果的である。同時に、寒冷地コンクリートに焦点を当て、表層部コンクリートの透気性とソルトスケーリング抵抗性との組合せによって、追加養生を含む適切な養生期間を評価することができることを明らかにした。また、表層透気係数が $1 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ 未満の場合、コンクリートのスケーリング抵抗性が優れていると判断される。

(2) 寒冷地に適した耐久性の高いコンクリートを得るために、ソルトスケーリング抵抗性、アルカリシリカ反応 (ASR)、抑制および乾燥収縮、RC 橋床版の表面ひび割れの目視評価を実験室および現場で実施した。これらの結果より、FB セメントを使用したコンクリートのソルトスケーリング抵抗が優れていることを示した。一方、フレッシュコンクリートの空気量が 6% に達すると、セメントの種類や W/B 比に関係なく、ソルトスケーリング抵抗性に大きな差は認められなかった。BB セメントを使用したコンクリート (特に低 W/B 比の場合) は、ASR の膨張、拘束あるいは無拘束下での自己・乾燥収縮、およびひび割れに対する抵抗性が優れていることが分かった。

(3) 青ぶな山 1 号橋 (青森県) と新柳渕橋 (岩手県) の高耐久 RC 床版の気泡組織を評価した。その結果、W/B が減少すると、特に直径 0~200 μm の気泡分布が増加することを明らかにした。0~200 μm の範囲の気泡を確認することは、気泡分布と気泡間隔係数を特徴づけるための重要な要因の一つである。さらに、膨張材の使用は、コンクリートのソルトスケーリング抵抗にほとんど影響を与えないことが示された。ポリプロピレン繊維は、コンクリート表面のスケーリング抵抗性を向上させることができるが、その場合であってもコンクリートの養生方法は、表面のスケーリング抵抗性を決定する重要な要因となる。湿潤養生はポリプロピレン繊維コンクリートの耐凍害性に役立つことが検証された。

(4) さまざまな使用量 (0.1%, 0.2%, 0.3%, および 0.6%) の超吸収性ポリマー (SAP) と石灰型膨張材 (KEA) の個別またはハイブリッド添加が、モルタルの長さや質量の変化、圧縮強およびモ細孔構造 (MIP) 及ぼす影響を調査した。結果は、SAP を組み込むことで、KEA の存在に関係なく、材齢 49 日までの SAP を使用したモルタルの自己収縮とモルタルの長さ変化を効果的に軽減できることを示した。SAP と KEA のハイブリッド添加は、SAP の個別添加と比較して、試験片の初期膨張を増加させる。これは、乾燥条件下でのモルタルの収縮を補償する上で有益な効果となる。さらに、SAP を追加すると、セメントの水和が遅れ、マクロポアの体積が増加し (100 nm を超える)、それによってモルタルの圧縮強度が低下する傾向にある。KEA の導入により、微細孔の形成がわずかに促進され、KEA を含まないサンプルと比較して圧縮強度がわずかに増加した。さらに、水分の逸散を抑制するために細孔の微細化を促進する。

(5) コンクリートの収縮挙動と圧縮強度に及ぼす内部養生効果に関するさまざまな SAP 混入方法とさまざまな SAP および KEA 含有量の影響を研究した。その結果、SAP を事前に水に浸して使用したコンクリートは、SAP を事前に水に浸したため、フレッシュコンクリート中のマトリックスに均一に分布させることが難しく、硬化したコンクリートに大きな空隙が形成されることが分かった。ただし、これらの大きな空隙の存在は、コンクリートの圧縮強度への悪影響は確認されなかった。さらに、コンクリートの表面を乾燥条件下で 63 日間暴露した場合、SAP を事前に水に浸漬したコンクリートサンプルの湿った残留物の範囲は、乾燥した SAP 粉末を含むコンクリートサンプルのそれよりも大きかった。SAP と KEA の複合効果は、SAP の混入方法に関係なく、コンクリートの自己収縮を緩和し、乾燥収縮を遅らせるのに寄与した。SAP と空気連行剤によって作成された気泡は、コンクリートの圧縮強度に悪影響を及ぼす。SAP の混入方法に関係なく、SAP の含有量が増えると圧縮強度が低下する。さらに、SAP 含有量が 0.3% の場合、その圧縮強度は 5% の空気量のコンクリートサンプルよりも大きい、それに近いことを明らかにした。

要約すると、この論文は寒冷地でのコンクリート橋梁の長寿命化を目的としたものであり、実験室およびフィールド調査を通じてコンクリートの耐久性の改善を実現した。これらの研究成果は、寒冷地域でのコンクリート橋梁の耐用年数の延長に寄与し、将来のメンテナンスコストの削減が期待される。