

# 博士學位論文

(論文内容の要旨及び論文審査の要旨)

第15号

令和3年5月

八戸工業大学

は し が き

博士の学位を授与したので、学位規則（昭和28年文部省令第9号）  
第8条の規程に基づき、その論文の内容の要旨及び論文審査の結果の  
要旨をここに公表する。

# 目 次

課程博士

学位記番号	博士の 専攻分野の 名称	氏 名	論 文 題 名	頁
博 第 5 7 号	博士 (工学)	张 萌	Improvement of Durability for Concrete Bridges in Cold Climate (寒冷気候におけるコンクリート橋梁の耐久性の改善)	1



氏名	張 萌
博士の専攻分野の名称	博士（工学）
学位記番号	博 第57号
学位授与年月日	令和3年3月19日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
学位論文題目	Improvement of Durability for Concrete Bridges in Cold Climate (寒冷気候におけるコンクリート橋梁の耐久性の改善)
論文審査委員	(主査) 八戸工業大学教授 阿波 稔 (副査) 八戸工業大学教授 月永 洋一 (副査) 八戸工業大学准教授 迫井 裕樹

## 論文の内容の要旨

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 $-3^{\circ}\text{C}$ 未満で、凍結防止剤が年間約20t/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イ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 $\mu\text{m}$ の気泡分布が増加することを明らかにした。0~200 $\mu\text{m}$ 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ことが、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。

## ABSTRACT

Concrete, because of its good plasticity, versatility, and low cost is widely used in the construction of all kinds of infrastructures such as roads, bridges, dams, and tunnels. However, the durability of concrete structures in cold climates has always been the focus of attention. In the cold region of Japan, many existing reinforced concrete (RC) structures currently are suffering from multiple deteriorations such as frost damage, the chloride ion attack, alkali-silica reaction (ASR), and granulated concrete due to severe environment and climates, which seriously restricted its service life and function.

As we all know, in cold regions, road and bridge deterioration is a common phenomenon main related to frost attack. Deicing salt is widely used to ensure the driving safety of vehicles in winter. When the average temperature less than  $-3^{\circ}\text{C}$  in winter and the deicing salt was sprayed approximately 20 t/km per year according to the report in the Tohoku region of Japan. For this reason, the Tohoku Regional development bureau has published the manual for the countermeasure to frost damage of concrete structures under spreading deicing salt. This manual was proposed to increase the target air content of fresh concrete on site. That is to cover the decreasing of air content while the execution process of construction and to attain air content in hardened concrete. In the case of concrete structures under the most severe environment on frost damage risk, the W/B less than 45% and the target air content of 6% were requested. However, study on the deicing salt scaling resistance and the distribution characteristics of air voids during the entire construction execution phase are not clear yet.

Furthermore, maintenance management for extending the service life of the existing RC structures becomes particularly critical in recent years. Nevertheless, the increase in maintenance management will inevitably lead to an increase in maintenance costs, which seriously restricts the development of the modern social economy. In the Tohoku region of Japan, over 40% of bridges will reach a service life of more than 50 years by 2025, which means a large number of bridges would have potential risks on its performance, according to the Ministry of Land. In other words, the great majority of existing RC bridge structures are about to or have entered a large-scale rehabilitation and reconstruction period. Therefore, the fabrication of durable concrete is of great significance to green and sustainable development. This thesis focuses on improving the concrete durability for bridge structures in cold climate via the survey of surface air permeability of existing RC bridge substructures (Non-destructive testing, NDT), laboratory tests, tests of concrete frost resistance at various stages of the actual construction process, and a novel exploration of curing method. Around this subject, the main research contents and conclusions are as follows:

(1) The influence of the initial curing on air permeability and the deicing salt scaling resistance of surface concrete were investigated. These results showed that concrete curing with sheet or permeability formwork was better than curing in air with in-creased of duration. Especially, utilizing the form of permeable sheet is greatly effective for the attainment of high surface quality and durable concrete. Simultaneously, focus on cold weather concreting, could evaluate the appropriate curing period including additional curing from combining with the surface air permeability and the deicing salt scaling resistance of concrete. It is also decided that the concrete has better deicing salt frost resistance, when the surface air permeability coefficient is less than  $1 \times 10^{-16} \text{m}^2$ .

(2) To obtain high-durability concrete suitable for cold climates, the deicing salt scaling resistance,



alkali-silica reaction (ASR), restrained and free shrinkage, and the visual evaluation of RC bridge slab surface cracks were conducted in the laboratory and field. These results indicated that concrete with FB cement has a better deicing salt scaling resistance, however, it has little difference in terms of deicing salt scaling resistance regardless of cement types and W/B ratios, when the air content of fresh concrete reaches 6%. Concrete (especially for low W/B ratios) with BB cement has better resistance for ASR expansion, autogenous/drying shrinkage under re-restrained/free conditions, and cracking.

(3) The air void system of RC bridge slabs of Mount Aobuna No. 1 Bridge and Shinyanagibuchi Bridge were studied. The results revealed that the air void frequency increase with W/B ratio decrease, especially the diameter 0-200 $\mu\text{m}$ . Confirming the air void in the range of 0-200 $\mu\text{m}$  was one of the significant factors for featuring the distribution of air void and the spacing factor. Moreover, the dosage of the expansive agent has little influence on deicing salt scaling resistance of concrete. PP fiber can improve the anti-scaling performance of concrete surfaces, however, the curing methods of fiber concrete would be one of the significant factors to determine the surface scaling resistance. It is proved that wet curing is helpful to the frost resistance of PP fiber concrete.

(4) The effects of the individual or hybrid addition of superabsorbent polymers (SAP) with varying dosages (0.1%, 0.2%, 0.3%, and 0.6%) and the lime-type expansive agent (KEA) on the length and mass change, compressive strength, and pore structures (MIP) of mortars were investigated. The results showed that the incorporation of SAP can effectively mitigate its autogenous shrinkage and the length change value of the mortar with SAP smaller than Ref until 49 d, regardless of the presence of KEA. The hybrid addition of SAP and KEA increase the initial expansion of the specimens as compared with individual addition of SAP, which is a beneficial effect on compensating for the shrinkage of the mortar under drying conditions. Moreover, the addition of SAP seems to delay cement hydration and increase the volume of macropores (greater than 100 nm), thereby reducing the compressive strength of the mortars. The introduction of KEA slightly promoted the formation of micropores, resulting in a slight increase in compressive strength compared with the samples without KEA. Furthermore, in our view, it promotes pore refinement, so as to re-duce moisture evaporation.

(5) The influence of different SAP incorporation methods and different SAP and KEA contents on internal curing effect the shrinkage behavior and compressive strength of concrete were studied. The results showed that the concrete with pre-soaked SAP, due to the clustering of pre-soaked SAP in the fresh concrete, it is difficult to uniformly distribute in the concrete matrix, resulting in the formation of larger pores in the hardened concrete. However, the existence of these larger pores did not adversely affect the compressive strength of concrete. In addition, when the surface of concrete was exposed for 63 days under drying conditions, the wet residue range of the concrete samples with pre-soaked SAP was larger than that of the concrete samples with dry SAP powder. The combined effect of SAP and KEA is beneficial to mitigate the autogenous shrinkage of concrete and delay the drying shrinkage, regardless of the incorporation methods of SAP. The voids created by SAP and air-entraining agent have a negative impact on the compressive strength of concrete. The compressive strength decreases with the increase of SAP contents, regardless of the incorporation methods of SAP. In addition, when the SAP content is 0.3%, its compressive strength is greater than or close to the concrete samples with 5% air content.

To sum up, this work has tried to improve the durability of concrete in cold areas through laboratory and field

research, thereby extending the service life of the RC structures and reducing subsequent maintenance costs. The research results and recommendations provide a little technical contribution for casting durable concrete in cold climate.

## 論文の審査結果の要旨

寒冷地域における道路橋コンクリートは、凍結防止剤の影響と凍結融解作用により表層劣化（スケーリング）を受けやすい環境下にある。さらに、構造物表面におけるスケーリングの発生は、かぶりコンクリートの機能低下を招き、物質の侵入を速め塩害やアルカリシリカ反応（ASR）などの複合劣化のリスクを増大させる。近年、橋梁をはじめとしたインフラの老朽化に社会的な大きな関心が寄せられており、構造物の維持管理・更新や将来のメンテナンスコストの低減が喫緊の課題となっている。一方で東北地方においては東日本大震災以降のインフラ建設の急増に伴い、コンクリートの凍害、塩害およびASRの対策、さらにひび割れ抑制等の多重防護に基づくコンクリート構造物の高品質化・高耐久化の取り組みが鋭意進められている。

そのような背景のもと、本論文は寒冷地域におけるコンクリート橋梁の耐久性の改善を目的とし、実構造物の調査および室内実験を通じて主に材料・配合・施工の観点から包括的な研究を行ったものであり、7章から構成されている。

第1章は、緒論として研究の背景、コンクリート構造物の老朽化と長寿命化に関する既往の研究、研究の特色と学術的・社会的な重要性、本研究の目的、展望・手法および論文構成について述べている。

第2章は、既設コンクリート橋梁下部工の表層品質調査、ならびに室内におけるスケーリング試験の結果から、スケーリング抵抗性の向上には施工段階での十分な養生による表層品質の改善が極めて重要であること示した。そして、表層透気係数を指標として所要のスケーリング抵抗性を確保するための養生期間を提案した。

第3章は苛酷な寒冷環境下において供用されるコンクリート橋梁を対象とし、室内試験とフィールド調査（青ぶな山1号橋（青森県）、新柳渕橋（岩手県））をもとに高耐久RC床版を現場実装するための材料・配合、施工等について検討した。そして、凍害、ASRなどの複合劣化やひび割れの抑制のための材料・配合の要件を示した。

第4章は、第3章で示された高耐久RC床版の材料・配合をもとにコンクリート中の気泡組織について検討した。その結果、材料・配合および施工条件の異なるコンクリートの気泡特性を明らかにするとともに、Void frequencyはコンクリート中の気泡特性を評価する簡易的かつ重要なパラメータであることを示した。

第5章は、高耐久RC床版の自己・乾燥収縮の低減によるひび割れ抑制を目的とし、膨張剤と新材料である超吸水性ポリマー（SAP）の相乗効果について実験的な研究を行った。その結果、SAPを適切に混和することにより膨張剤の効果を向上させることが可能となり、それにより自己収縮が緩和し乾燥収縮を遅らせることに寄与することが分かった。

第6章は、コンクリートの材料・配合設計や施工計画の観点から寒冷地域において高耐久RC橋梁を建設するための総合的な提案を行っている。さらに、SAPを現場実装するための方向性を述べている。

第7章では、本研究で得られた成果を総括し、今後の展望について論じている。

以上、本研究により得られた成果は、寒冷地域におけるコンクリートの複合劣化対策やひび割れ抑制を通じて高耐久な RC 橋梁の実現に貢献するものであり、実用的価値は極めて高く、コンクリート工学上極めて重要な意義を持つ。

よって、本論文は、博士（工学）の学位論文として十分な価値を有するものと認められる。

## 最終試験の結果の要旨

令和2年2月8日、論文審査委員および関係教員の出席のもと最終試験を実施した。学位論文の内容、コンクリート工学、建設工学、外国語および研究実績に関して口頭試問を行った結果、十分な学力ならびに研究能力があると認められた。対外発表としては、査読論文5編（内、第一著者4編、いずれも英文）がある。また、学位論文の一部を構成する査読論文は、令和2年5月に（公社）日本コンクリート工学会東北支部より奨励賞を受賞している。これらの研究実績等からも関連専門分野における高い能力および英語の読解力・会話力があると認められた。

以上より、最終試験に合格と判定した。





