

# 博士論文概要

## 論文題目

寒冷地の水路施設におけるコンクリートの  
凍害劣化予測に関する研究  
Prediction of Degradation Due to Frost Damage  
for Concrete Waterway in Cold Region

申請者

林	大介
Daisuke	Hayashi

近年、コンクリート構造物が環境作用の影響によって少なからず劣化するものであることが認識され、従来の仕様規定に代わる性能規定の設計手法が適用されている。従来の仕様規定による設計では、コンクリートの使用材料や配合、配筋条件などの構造細目の仕様を定め、安全係数を考慮することによって耐久性が確保されるものとしていた。それに対し、性能規定では、設計時において、設計耐用期間にわたる構造物の性能を評価し、それが要求性能を満足することを確認するものとしている。換言すれば、使用材料や施工方法を限定せずに設計を行なうことが可能であり、従来の仕様規定に比べて自由度の高い合理的な体系となっている。その一方で、構造物の長期間にわたる性能、すなわち、構造物が受ける劣化作用に対する抵抗性や、その抵抗性に対して使用材料および施工方法がどのように影響するのかなどを定量的に評価することが求められることとなる。塩害および中性化に関しては、膨大な実構造物の情報や研究成果が集約されつつあり、予測精度の課題は残るものの、実用的な予測方法を取り入れた設計体系が示されている。このように、コンクリート構造物の耐久性をより確実かつ合理的に確保することが可能なシステムが整備されつつあるのが現状と言える。

コンクリート構造物における代表的な劣化要因の一つである凍害については、1940年代から研究が行われ、これまでに様々な知見が得られているが、劣化の実態が十分に把握されているとは言い難く、寒冷地では、ひび割れやスケーリングなどの損傷が後を絶たない。従来、寒冷地に供用される構造物の耐久性は、促進凍結融解試験によって凍結融解抵抗性が確認されたコンクリートを用いることで確保できるものとされてきた。実際、この方法により、合理性や経済性に欠ける面があるにせよ、多くの構造物の耐久性が確保されてきたことは事実であり、土木技術者の経験に基づいた工学的な判断が一定の成果を挙げてきたことは評価すべきことと考えられる。しかし、促進凍結融解試験は、使用材料や配合などの異なるコンクリートの凍結融解抵抗性を相互に比較するためのものであり、構造物の設計耐用期間にわたる凍結融解作用に対する耐久性を定量的に評価できるものではない。凍害の設計手法については、性能照査の体系に基づいた整理がされているが、促進凍結融解試験の相対動弾性係数を指標として照査する方法が提案されているに過ぎず、実質的には仕様規定による方法が適用されているものと言える。よって、今後は、性能規定による設計、施工および維持管理の方法を成熟させ、より確実かつ合理的に構造物の耐久性を確保するシステムを構築していくことが求められるものと考えられる。そのために、まず、凍害による劣化の実態を把握し、さらには、凍害の過程を定量的に予測することが可能な手法を構築していくことが必要とされている。

こうした背景を踏まえ、本研究では、下記を目的とした。

これまでに、凍害環境に供用される実構造物を広い範囲で調査した事例は少なく、凍害に影響を及ぼす環境条件や部材形状などの傾向が明らかとなりつつある

ものの、凍害の実態が十分に把握され、定量化が図られているとは言えないのが現状である。こうした状況を鑑み、本研究では、北海道において約40年間供用された水路施設を対象とした詳細調査を行い、劣化に対して特に影響を及ぼす要因を明らかとすることを第一の目的とした。

また、コンクリートの凍害の進行には多岐にわたる要因が影響を及ぼすため、全てを考慮した劣化予測手法を導くのは難しいのが現状であるが、凍害の劣化予測に対するニーズを踏まえると、実構造物の調査によって劣化の実態を把握し、調査データに基づいた合理的な予測手法の構築を検討する必要があるものと考えられる。そこで、本研究では、第一の目的として掲げた水路施設の調査結果の考察に基づき、水路施設の凍害を再現することが可能な予測手法を提案することを第二の目的とした。

さらには、構築された予測手法を用い、事例解析によって水路施設の耐凍害性向上に関する知見を示すことを第三の目的とした。

本論文は、7章より構成されている。各章の構成および概要は、以下に示すとおりである。

第1章では、序論として研究の背景および目的を示し、論文の構成を示している。

第2章では、既往の研究で提案されている凍害のメカニズムおよび劣化予測の現状を示している。これまでの劣化モデル構築の試みについて概説し、凍害の進行には多岐にわたる要因が影響を及ぼすため、全てを考慮した劣化予測手法は提案されていないのが現状であることを示した。

第3章では、北海道の空知地区を北南方向に流れる供用期間34年から41年の農業用水路の凍害調査結果の考察を示している。調査対象とした水路は、水セメント比が50%のコンクリート構造物であり、年間あたりの凍結融解回数が70回程度であることが想定される。水路には凍害による部分的なひび割れ、剥離および剥落が認められ、これらの損傷が認められた9箇所を選定してコア試料の各種試験を実施した結果、劣化箇所では、健全な箇所よりも空気量が少なく、気泡間隔係数が大きい傾向が確認された。また、コンクリートの動弾性係数により、凍害によるコンクリート表面および内部のひび割れの程度を評価できることが確認された。

第4章では、水路の凍害を再現することが可能な予測手法の構築の過程を示している。凍害調査によって得られた傾向を基に、寒冷地におけるコンクリート構造物の相対動弾性係数の経年変化に対し、硬化コンクリートの空気量および気泡間隔係数が及ぼす影響を評価することが可能な凍害モデルを提案した。解析には、上記の空気量および気泡間隔係数に加え、コンクリートの水セメント比、外気温の履歴、年平均の相対湿度および係数を与える必要がある。この係数は、凍結融解試験結果や実構造物のデータを基に回帰して得られるものである。調査対象の

水路を事例として、凍害モデルによる再現性を確認した結果、実構造物における相対動弾性係数をおおむね再現できることが確認された。

第5章では、構築された凍害モデルの妥当性について検証した結果を示している。検証にあたり、まず、最低温度を $-18^{\circ}\text{C}$ とする促進凍結融解試験を実施し、その結果から凍害モデルの係数を推定して予測式を得た。次に、得られた予測式によって、実環境を想定した最低温度を $-10^{\circ}\text{C}$ とする促進凍結融解試験における相対動弾性係数の経時変化を再現することが可能であるかを評価した。その結果、化学混和剤を用いないコンクリートおよびAE減水剤を用いたコンクリートのいずれにおいても、解析結果と試験結果はほぼ同様の傾向を示すことが確認された。このことから、凍害モデルにより、促進凍結融解試験結果などを基に係数を設定することによって、コンクリートの相対動弾性係数の経時変化を再現することが可能であることが検証された。

第6章では、構築された凍害モデルを用いた水路施設の凍害進行予測、コンクリートの気泡組織に関するパラメータスタディおよび暴露試験に基づいたシラン・シロキサン系浸透性吸水防止材の耐凍害性向上に関する試算の結果を示している。調査対象とした水セメント比が50%の水路施設を事例とした場合、硬化コンクリートの空気量を3.0%以上とし、気泡間隔係数を $250\mu\text{m}$ 以下とすれば、50年間にわたって相対動弾性係数を60%以上に保持できることや、硬化コンクリートの空気量および気泡間隔係数がそれぞれ1.5%および $300\mu\text{m}$ となった場合でも、耐凍害性向上対策としてシラン・シロキサン系浸透性吸水防止材を塗布することにより、50年間にわたって相対動弾性係数を60%以上に保持できることなどを示した。

第7章では、本研究の結論を示している。本研究で提案した凍害モデルによって、対象構造物の設計耐用期間および要求される相対動弾性係数に応じて、コンクリートに要求される空気量および気泡間隔係数を提示することが可能であることなどを総括した。