

博士論文審査報告書

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

コンクリート構造物は建設後は半永久的でメンテナンスフリーと考えられてきたが、建設後の各種作用によって徐々に劣化することが認識されるようになった。また、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る現状となってきた。また、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る現状となってきた。また、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る現状となってきた。また、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る現状となってきた。

経年によるコンクリート構造物の劣化に関しては、構造物の長期間にわたる性能変化、構造物が受ける劣化作用に対する抵抗性について、使用材料、施工方法などの影響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、実構造物に関する膨大な調査・研究成果が集約されつつあり、予測方法を取り入れた実用的な設計方法が示されている。従来の仕様規定による設計では、構造物が設置される環境に対して各種条件（コンクリートの使用材料、配合など）などの構造細目の仕様を定めことによって耐久性が確保されるものとしてきた。一方、性能規定では供用年数の概念を導入し、構造物の設計時において供用期間を設定し、構造物の性能が供用期間内において要求性能を満足することを確認するものとしている。すなわち、使用材料、施工方法などは供用期間内で所要性能を満足するように任意に選択することが可能であり、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。このためには、コンクリート構造物の耐久性をより確実かつ合理的に推定・評価することが可能なシステムが整備されることが求められている。

我が国の寒冷地に位置する橋梁、水路施設、港湾施設などではコンクリート構造物の劣化が数多く報告されており、最も大きな劣化要因である凍害によるひび割れやスケーリングなどの損傷が見られる。凍害に関しては、1940年代から研究が行われ多くの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。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対的に比較・評価するものであり、構造物の設計供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性能照査の体系に基づいた整理がなされつつあり、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が、所定の相対動弾性係数を満足するように材料や配合を選択するものであり、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。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確立し、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、経年による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。

前記の背景を踏まえ、本研究では、次の事項を研究目的としている。

第一の目的は、凍害に対して大きな影響を及ぼす要因を明らかとすることである。これまでに、既設構造物で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のようであり、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っている。

第二の目的は、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である。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と考えられるが、できるだけ影響の大きな要因を選定し凍害における劣化予測手法を導くこととしている。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を活用することとしている。

第三の目的は、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としている。

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、以下に示すとおりである。

第1章は序論であり、研究の背景および目的を述べ、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。既往の劣化モデル構築の試みを概説し、多くの要因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述べている。

第3章は凍害の調査結果を考察した章である。対象施設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年の農業用水路である。本水路は、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ている。水路のコンクリート表面には凍害による部分的なひび割れ、剥離、剥落などの損傷が認められている。健全箇所および劣化箇所からコア試料を採取して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を見出している。また、コンクリートの動弾性係数の測定により、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を示している。

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述べている。3章の調査結果を基に、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ている。モデルの構築では、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。これらの係数は、凍結融解試験結果や実構造物のデータを基に回帰することによって求めている。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ている。

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ている。検証にあたっては、まず、最低温度を -18°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ている。次に、得られた予測式により、実環境を想定した最低温度を -10°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ことを示している。本検討から、本研究で提案した凍害モデルにより、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を明らかにしている。

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、および、耐凍害性向上のための防止材の効果に関して検討している。前者では、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を述べている。また、後者については、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ている。

第7章は結論であり、本研究を総括している。

以上が本論文の要旨であるが、これを要するに著者は既設構造物の調査や既往の研究成果を基礎として多くの要因を含む新たな凍害モデル提案し、本モデルにより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を明らかにしている。さらに、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ている。

よって、本論文はコンクリート工学に対して重要な貢献をなすものであり、博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。

2009年2月

審査員

主査	早稲田大学	教授	工学博士（東京大学）	関 博
	早稲田大学	教授	工学博士（早稲田大学）	依田照彦
	早稲田大学	教授	工学博士（東京工業大学）	清宮 理
	早稲田大学	教授	工学博士（早稲田大学）	小泉 淳