

乾燥を考慮したコンクリートの凍害劣化予測手法と 利用に関する研究

著者	野口 巧巳
学位名	博士（工学）
学位の種類	課程博士
報告番号	甲第495号
研究科・専攻	工学専攻
学位授与年月日	2022-03-23
URL	http://doi.org/10.15118/00010864

氏 名 野口 巧巳

学位論文題目 乾燥を考慮したコンクリートの凍害劣化予測手法と利用に関する研究

論文審査委員 主査 教授 濱 幸雄
教授 溝口 光男
准教授 高瀬 裕也

論文内容の要旨

コンクリートの凍害は、寒冷地において生じる劣化現象であり、強度の低下や美観の悪化を伴う重大な劣化の一つであるため、凍害危険度などの凍害環境の地域性の評価手法が提案・活用されている。また、コンクリートの長寿命化の観点から、ASTM 相当サイクル数などの様々な凍害劣化予測手法が提案されている。一方で、乾燥を受けることにより直径 40～2000nm 細孔量が増加、耐凍害性が低下することが明らかとなっており、乾燥条件から直径 40～2000nm 細孔量の予測手法として温湿度時間積が確立されている。しかし、既往の凍害地域性評価や劣化予測手法では乾燥による影響を考慮することができない。そのため、本研究では、ASTM 相当サイクル数と温湿度時間積を組み合わせることにより、乾燥による耐凍害性低下を考慮した凍害環境評価および凍害劣化予測手法の確立とその活用方法の提案を目的とした。

年間の凍結融解回数である ASTM 相当サイクル数と組み合わせて相対動弾性係数を予測するために、温湿度条件から劣化の兆候が現れる過程と明確な劣化が現れる過程における凍結融解 1 サイクルあたりの相対動弾性係数低下量を導出する式を誘導した。それにより、気象条件と環境条件、材料条件から任意の経過年数における相対動弾性係数や、相対動弾性係数が 90%、85%、60%になるまでの年数である安全管理年数、維持管理限界年数、設計限界年数の予測が可能である。

本予測手法を用いて凍害環境の地域性を評価するために、気象データの時間間隔や統計処理手法ごとに適した計算手法を検討し、その検討結果を踏まえ、気候変動による凍害環境の地域性の変化として比較的温暖な地域でのみ凍害リスクが減少したことを明らかにした。また、日本国内における凍害環境の地域性分布図の作成し、北海道と本州・九州の山岳部においてはほぼ同等の凍害環境であることを示した。さらに、世界の凍害環境に対する気候帯ごとの整理を行い、亜寒帯が厳しい凍害環境であることを示し、他の気候帯では条件によって凍害環境になる場合があることを明らかにした。

本予測手法を用いる際に JIS A 1148 A 法の試験結果が必須であるという問題を解決するために、LightGBM を用いた機械学習によって調合条件などから JIS A 1148 A 法試験結果予測モデルの作成を試みた。その結果、学習データの偏りによって汎用性は乏しいものの特

定条件下であれば十分な精度での試験結果の予測が可能なモデルの作成が行えた。これらの結果を踏まえ、凍害劣化予測システムの提案とそれを利用した維持管理、調合選定への本予測手法の活用方法について提案した。

ABSTRACT

Frost damage of concrete occurs in cold regions, and is one of the serious deteriorations. Therefore, a method for evaluating the regional characteristics of the frost damage environment, such as the Frost Damage Degree, has been proposed and utilized. In addition, various frost damage prediction methods such as Equivalent Cycles to ASTM Test (C_{yASTM}) have been proposed. On the other hand, it has been clarified that the pore volume of 40 to 2000 nm in diameter increases and the frost resistance decreases due to drying. Based on this, the Maturity of Temperature and Humidity has been established as a method for predicting the pore volume of 40 to 2000 nm in diameter from the drying conditions. However, the effects of drying cannot be taken into consideration by the existing methods for evaluating or predicting frost damage. Therefore, in this study, I aimed to establish a frost damage environment evaluation and frost damage prediction method considering the decrease in frost resistance due to drying by combining C_{yASTM} and Maturity of Temperature and Humidity, and to propose a method of utilizing.

In order to predict the relative dynamic modulus of elasticity (RDM) in combination with the C_{yASTM} , an equation to derive the amount of decrease in the RDM per freeze-thaw cycle from the temperature and humidity conditions has created. As a result, it is possible to predict the RDM over arbitrary number of years from climate data, environmental conditions, and material conditions.

In order to evaluate the regional characteristics of frost damage environment using this prediction method, a calculation method suitable for each time interval of climate data and statistical processing method has examined. Based on the results of the study, regional distribution map of the frost damage environment in Japan has created, and the frost damage environment is almost the same in Hokkaido and mountainous areas of Honshu / Kyushu has shown. Furthermore, I organized the world's frost damage environment by climatic zone, showed that the subarctic zone is severe frost damage environment.

In order to solve the problem that the test results of the JIS A 1148 A method are indispensable when using this prediction method, a test results prediction model was created from the mix proportions by machine learning using LightGBM. As a result, a model that can predict test results with sufficient accuracy under specific conditions has

created, although it is not versatile due to the bias of training data. Based on these results, a frost damage prediction system has proposed.

論文審査結果の要旨

寒冷地のコンクリートでは凍結融解作用の繰り返しにより強度低下や美観の悪化をともなう凍害が耐久性上の重要な課題であり、これまでに劣化メカニズム、劣化対策、劣化予測に関する研究が国内外で数多く行われている。凍害劣化予測については、地域の気象条件を適切に評価し、促進試験結果との対応を明らかにすることが肝要である。冬期の凍結融解作用については凍害危険度、ASTM 相当サイクル数などの様々な指標が提案されている。一方で、夏期の乾湿繰り返しの影響について、コンクリートの耐凍害性に影響する直径 40～2000nm の細孔量の変化を表す温湿度時間積の考え方が確立されている。本研究では、これまで考慮されていなかった夏期の乾燥の影響を考慮した新しい凍害環境評価指標と凍害劣化予測手法を確立し、その活用方法を提案することを目的としている。

まず凍害環境評価指標として、年間の凍結融解回数である ASTM 相当サイクル数と夏期の温湿度時間積を組み合わせて、凍結融解 1 サイクルあたりの相対動弾性係数の低下率を算出する式を誘導し、任意の地点における気象条件と環境条件、材料条件から凍害劣化の進行を予測し、安全管理年数（相対動弾性係数 90%となる年数）、維持管理限界年数（相対動弾性係数 85%となる年数）、設計限界年数（相対動弾性係数 60%となる年数）の予測を可能としている。また、本手法に用いる適切な気象データの時間間隔、統計処理手法を検討し、最近 50 年間の気候変動による凍害環境の地域性的変化についても検討し、最新の気象資料を用いて算出した結果を 1km メッシュのコンター図で表し国内の凍害環境を可視化した。さらに、日本国内だけでなく世界の凍害環境についても気候帯ごとの特徴を整理している。

提案した手法では JIS A 1148 A 法の促進試験結果が必須であるという課題の解決のために、LightGBM を用いた機械学習によって材料・調合条件などから JIS A 1148 A 法の試験結果を予測するモデルを作成し、機械学習の精度、汎用性を検証し、課題を整理している。最終的には、任意の地点、任意の材料・調合を用いたコンクリート構造物の維持管理および調合選定に利用できる凍害劣化予測システムを提案している。

以上の成果は、寒冷地のコンクリート構造物の耐久性向上、維持管理手法の高度化に大いに貢献するものである。よって、著者は博士（工学）の学位を授与される資格があるものと認められる。