

機械学習を援用したコンクリートの乾燥収縮量に対する骨材の影響分析

香川大学 正会員 ○岡崎慎一郎 岡崎百合子

埼玉大学大学院 正会員 浅本晋吾 東京理科大学 今本啓一

1. はじめに

コンクリートの乾燥収縮に対する影響要因は、養生条件や試験体のサイズ、さらには材料条件等が挙げられ、CEB-FIP¹⁾や阪田式²⁾らの乾燥収縮予測式において説明変数として組み込まれている。また、近年では、材料条件において、単位水量や水セメント比の影響に加え、骨材自体の収縮に起因する影響が周知の事実となっている。この影響は、土木学会の示方書式や日本建築学会式のひび割れ制御指針において定性的には組み込まれているものの、その複雑性ゆえに十分に解明されていない現状にある。本研究では、膨大な情報量の裏に潜むパターンを抽出できる機械学習を援用して、骨材に関する複数の変数が収縮に与える影響を分析する。

2. 学習に用いたデータ

本研究で対象としたデータは、全国生コンクリート工業組合連合会が平成20年から平成24年^{例え3)}に収集されたものであり、JISA1129に基づく100×10×400mmの角柱供試体を対象に、乾燥期間182日に測定される乾燥収縮量と、その使用材料および配合に関するデータが得られている。図-1に本データにおけるサンプルごとの粗骨材および細骨材の岩種別の重量割合を示す。本データの骨材は、砂岩、硬質砂岩、石灰岩等から構成されており、細骨材については砂岩が大半を占める一方、粗骨材では、砂岩のほか、石灰岩等のデータも多く含まれる。その他に含まれる岩種は各サンプル数が少ないため、本研究においては、粗骨材に、砂岩、硬質砂岩、石灰岩のいずれかを使用した1918個のサンプルを対象データとし、粗骨材が収縮に与える影響を分析するものとする。図-2に、対象データにおける、セメントに関する変数である単位水量(W)および水セメント比(W/C)の頻度分布を示す。WおよびW/Cのいずれも、粗骨材の岩種の違いによりほぼ同様な分布となっており、骨材に関する乾燥収縮への影響を分析するにあたり、これらによるバイアスが生じにくいデータ群であることが分かる。なお、本研究では、骨材関連変数の影響分析を目的とすることから、対象データにおけるセメント種類は普通ポルトランドセメントのみとした。

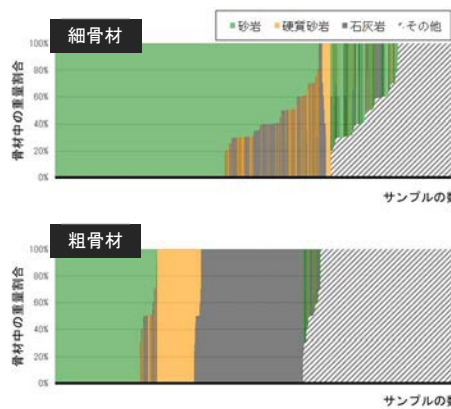


図-1 サンプルごとの骨材の岩種別体積割合

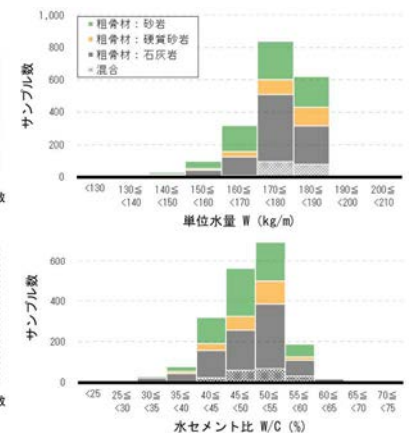


図-2 対象データ内のW・W/Cの頻度

3. 機械学習を用いた骨材関連変数の影響分析

機械学習を用いて、収縮量を応答変数とし、説明変数に骨材関連変数を段階的に追加して複数のモデルを構築し、それらのモデルの性能比較により、乾燥収縮に対する各骨材関連変数の影響を分析した。まず、W, W/C, 混和材料の有無といった、セメントに関する変数のみを説明変数としたModel_00を構築し、骨材関連変数の影響を含まないベースモデルとした。次に、Model_01として、Model_00で使用したセメント関連変数に加え、骨材関連変数として、A) 細骨材および粗骨材の絶対乾密度 D_s および D_g 、B) 骨材中の含水量 Δw 、C) 骨材平均比表面積 S をそれぞれ説明変数に追加したものを、Model_01_A, Model_01_B, Model_01_Cとして構築した。なお、対象データにおいて骨材の比表面積の情報は得られていないことから、既往の文献⁴⁾で計測された各岩種の平均値より、平均比表面積 S を算出した。さらに、Model_02では、骨材関連変数としてA, B, Cのうち

2つを、Model_03では3つ全てを説明変数として採用した。学習アルゴリズムは、外れ値の追跡に強く、複雑な挙動抽出を得意とするガウス過程回帰を採用し、モデルの性能評価には5分割交差検証におけるRMSEを用いた。図-3に、各モデルによる性能評価結果を示す。骨材関連変数を1つずつ説明変数に加えたModel_01の性能を見ると、いずれも、ベースモデルであるModel_00と比較してRMSEは低下して性能は改善しており、骨材平均比表面積 S を説明変数に加えたModel_01_Cにおいてはその改善が最も大きいことが分かる。Model_02においては、変数のペアにより多少のばらつきはあるものの、さらなるRMSEの低下が確認され、Model_03ではRMSEは 89μ と最も低い値を示す。図-4に、Model_00とModel_03について、実測値と5分割交差検証時のモデル値の比較を示す。骨材関連変数を用いていないModel_00に比して、Model_03の実測への追跡性は大きく改善している。これらの結果より、今回用いた3種類の骨材関連変数は、多少の冗長性を持つてはいるものの、いずれも収縮現象に対する回帰に必要なことが示唆された。

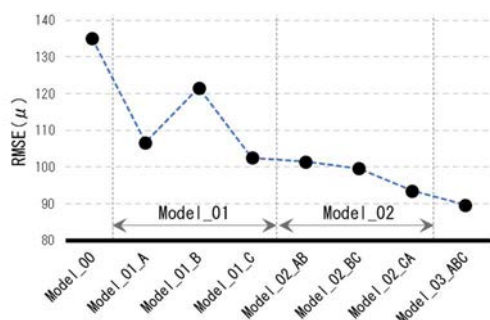


図-3 各モデルのRMSE

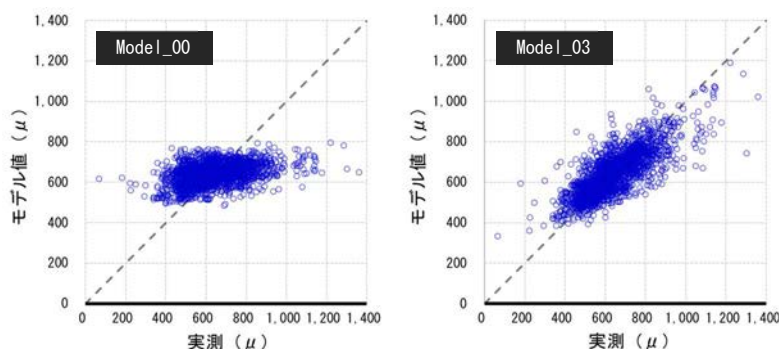


図-4 対象データにおける実測とモデル値の比較

4. 既存の評価式との比較

最後に、今回構築したモデルModel_03の性能を、既存の評価式と比較する。図-5に、Model_03と、土木学会の示方書式と、建築学会のひび割れ制御指針の式について、実測値と予測値の比較を示す。同図は、粗骨材の岩種によって色分けし、また、実測値と予測値の誤差 $\pm 200\mu$ の範囲を破線で示す。Model_03では、いずれの骨材岩種においても、概ね $\pm 200\mu$ の誤差となっており、既存の式に比して実測値の挙動をより正確に追跡できていることから、骨材関連変数の影響を精密にモデルに組み込んでいると示唆される。

一方、Model_03は、実測値に対して柔軟な機械学習モデルがゆえに、構造が極めて複雑な形式で表現されるものであるのに対し、既往の評価式は非常に簡易な定式で表現されており、説明性と利便性が高い利点を有する。今後の課題として、本モデルが学習した構造のうち、支配的な構造を分析・抽出し、既往評価式のような簡易な定式としての表現を試み、回帰性能を維持した上で、説明性および利便性の向上を目指したい。

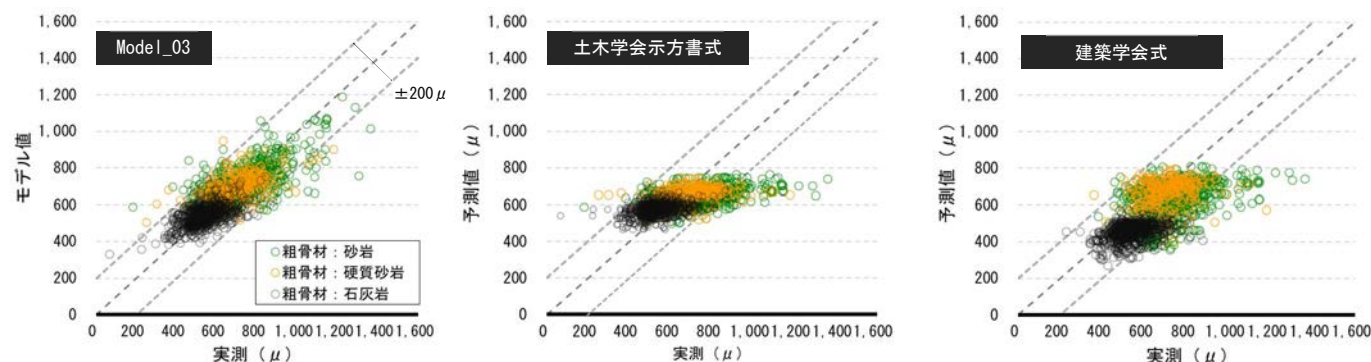


図-5 対象データにおける本モデルと既存評価式との性能比較

謝辞 本研究は、日本コンクリート工学会2020年度研究助成により行われた。ここに謝意を記す。

- 参考文献：1) COMIT EURO-INTERNATIONAL DU BETON : CEB-FIP Model Code 90, Thomas Telford, 1990
 2) Sakata, K. : Prediction of concrete creep and shrinkage, Proc., RILEM PROCEEDINGS, CHAPMAN & HALL, 649-649, 1993
 3) 全国生コンクリート工業組合連合会技術委員会：乾燥収縮に関する実態調査結果報告書（平成20年度），2009
 4) 今本ら：各種骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮特性と骨材比表面積の影響，日本建築学会論文集，Vol.71, pp.9-14, 2006