

小径コンクリートコアの内部構造が超音波速度に及ぼす影響 Effect of Internal Structure for Small-diameter Concrete Cores on Ultrasonic Pulse Velocity

○向井萌華*・柴野一真*・鈴木哲也**

○Moeka MUKAI*, Kazuma SHIBANO* and Tetsuya SUZUKI**

1. はじめに

コンクリート材料における非破壊検査手法の一つである超音波試験は、材料の力学特性と密接に関連していることから農業水利施設の維持管理や品質評価の分野で広く利用されている。超音波試験では、コンクリート内部の骨材、空隙およびひび割れの分布によって波の反射、散乱および透過が生じるため、測定結果の解釈にはこれらの影響を考慮する必要がある。コンクリートの配合設計や施工方法、構造物の立地条件によって、内部の幾何学的特徴が異なるため、超音波の伝搬特性との関係を明らかにすることが重要である。本研究では、ダム堤体から採取したコンクリートコアを対象とした超音波試験を実施することで内部構造と超音波速度の関係を詳細に検討することを目的とした。

2. 実験・解析方法

2.1. 超音波速度試験

中空重力式コンクリートダムである内の倉ダムの堤体より採取した直径 70 mm のコンクリートコアを供試した。コア断面に対し平行に等間隔で P 波を入力し、超音波速度試験を行った。入力周波数は 150 kHz である。

2.2. CT 画像解析による内部構造定量化

超音波速度に影響を及ぼす内部構造を定量化することを目的として X 線 CT 計測を行った。目視により内部構造を粗骨材、空隙およびひび割れに分類し、それぞれの幅、

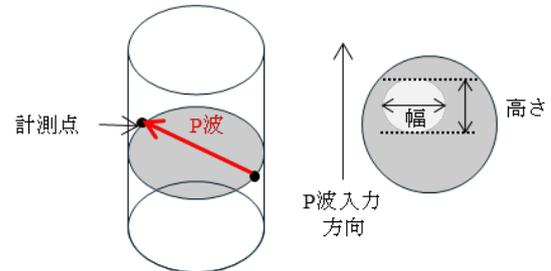


Fig. 1 超音波入力方向と X 線 CT 指標の関係

Relationship between ultrasonic input direction and internal structure

Table 1 グラフ構造に基づき算出した内部構造の指標

Internal structure calculated based on graph structure	
指標	説明
平均次数	ノードごとの平均接続数
ネットワーク密度	実際のエッジ数/最大エッジ数
連結成分	独立した部分ネットワークの数

高さ、面積、周囲長の総和を算出した。幅および高さ、面積、周囲長の総和と超音波入力方向との関係は Fig. 1 に示すとおりである。加えて、粗骨材および空隙については、位置関係を定量化することを目的としてグラフによる指標を取り入れた。グラフはノードとノード間を接続するリンクで構成される。ノードはそれぞれの重心座標、リンクは 16 mm 以内に位置するノード同士をつなぐよう設定し、粗骨材および空隙それぞれについて幾何学的・構造的な特性を表す指標を算出した。グラフに基づき算出した内部構造の指標を Table 1 に示す。これら計 18 項目の内部構造に関する指標を説明変数としてランダムフォレストによる超音波速度の予測を試みた。

* 新潟大学大学院自然科学研究科 Graduate School of Science and Technology, Niigata University

** 新潟大学自然科学系(農学部) Institute of Agriculture, Niigata University

キーワード: コンクリート, 超音波速度, 損傷度評価, 幾何学特徴量

2.3. SHAP 値を用いた特徴量の重要度算出

ランダムフォレストにおいて、説明変数が予測に寄与しているかを明らかにするため、説明変数の重要度を算出した。重要度の算出方法には、SHAP (Shapley additive explanations) 値を用いた¹⁾。入力ベクトル x を簡略化した入力 $x' \in \{0,1\}^M$ に対してモデル f を局所的に線形近似処理した f_x を用いた特徴量 i のモデル f への貢献度 φ_i が以下の式で表される。

$$\varphi_i(f, x) = \sum_{z' \in x'} \frac{|z'|!(M - |z'| - 1)!}{M!} [f_x(z') - f_x(\frac{z'}{i})]$$

3. 結果および考察

Fig. 2 にランダムフォレストによる超音波速度の予測結果を示す。訓練データに対しては高い一致性が確認でき、モデルが学習データに良好にフィットしていることが分かる。一方、テストデータでは一部のサンプルにおいて予測値が過小または過大となり、過学習の傾向が確認された。

Fig. 3 は予測超音波速度に対して、SHAP 値を用いた説明変数の重要度を示す。説明変数それぞれの SHAP 値の平均値が大きいものから上に記載している。粗骨材同士のネットワーク密度が予測を最も強く上昇させた一方、ひび割れ周囲長や高さは既往研究と同様に超音波速度を低下させる方向に大きく寄与していた²⁾。ひび割れの存在が伝搬速度の低下に顕著な影響を及ぼしていることが示唆された。

4. おわりに

本研究では、X 線 CT 画像から抽出された内部構造の定量化指標を用いてランダムフォレストにより超音波速度の予測を試みた。その結果、テストデータでは一部の予測値に過大・過小の偏りが見られ、モデルの過学習傾向が確認された。SHAP 値に基づく特徴量寄与の可視化からは、粗骨材の

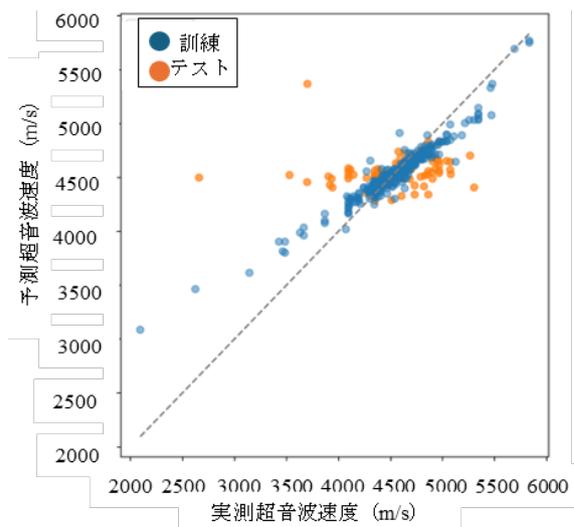


Fig. 2 ランダムフォレストによる超音波速度の予測結果

Prediction result of ultrasonic pulse velocity by random forest model.

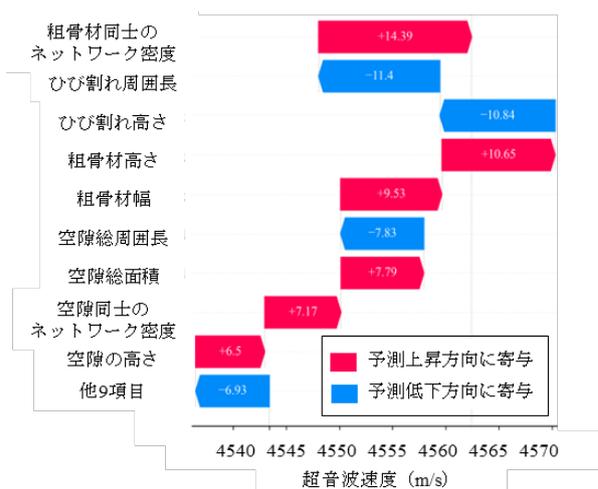


Fig. 3 説明変数の重要度 SHAP value of explanatory variables.

ネットワーク密度が速度上昇に寄与し、ひび割れの幾何学的特徴が速度低下に寄与する傾向が示された。

引用文献

- 1) Lundberg, S.M. and Lee, S.I. (2017) : A unified approach to interpreting model predictions, *Advances in Neural Information Processing Systems*, 30.
- 2) Morozova, N., Shibano, K., Shimamoto, Y. and Suzuki, T. (2022) : Visualization and evaluation of concrete damage in-service headworks by X-ray CT and non-destructive inspection methods. *Front. Built Environ*, 8.