

レーザー振動計測の深層学習による浮石検知について

浮石 スカログラム VAE (株)大林組 正会員 ○奥澤 康一 正会員 鈴木 健一郎 新村 亮 谷口 信博
(株)ブレイン 水野 寿教 橋間 智博
(公財)レーザー技術総合研究所 倉橋 慎理 オレグ コチャエフ

1. はじめに

山岳トンネル工事における切羽での肌落ち災害を軽減・防止するため、発破後のズリ出し後にアタリ取りやコソクの際に確実に浮石の除去を行うことが必要である。著者らは、ズリ搬出後に切羽でコソクを実施しているジャイアントブレーカーが発する振動情報を用いて、遠隔からの振動計測により浮石を検知する技術の開発を行っている。

これまで、模型実験¹⁾および原位置斜面の実験²⁾から、浮石と健全な岩盤での振動をレーザードップラー振動計で計測し、得られた波形からウェーブレット解析を行って作成したスカログラムをもとに浮石と健全岩盤を判定する手法について検討してきた。しかし、岩盤の亀裂の状況や風化や硬軟の不均質等により振動の伝播の違いがあり、明確な区別が難しいことが課題として残っている。この研究では、得られたスカログラム画像を用いて、VAE 分析によって浮石の判定が可能かの検討を行った。

2. レーザー振動計測およびスカログラム

実験は図-1 に示すように、岩盤を 2,750 kg級の大型ブレーカーで打撃し、遠隔からレーザー振動計により、打撃点周辺の振動を計測するもので、詳細は文献2を参照されたい。図-2 と図-3 にそれぞれ実験で得られた浮石と判定された点と健全と判定された点のレーザー振動計で計測された波形とスカログラムを示す。スカログラムとは、振動データをウェーブレット変換した2乗絶対値のことであり、周波数毎の振動の強さを示す³⁾。ウェーブレット解析とは、周波数及び時間の両者の分解能を兼ねた解析法であり、振動のように時間と共に変化するデータを解析するのに有効な解析法である。図-2, 3 の下段のスカログラムでは、縦軸が周波数、横軸が時間、色の寒暖が振動の強さを示し、暖色になるほど振動が強いことを示す。浮石における振動応答は、振幅が大きく、低周波主体で連続時間が長い特徴を持ち、健全全部での振動応答は、より高い周波数で振動し、比較的短時間で収束するといった特徴を持つ。

3. VAE 分析

上述のような特性をより確実に判定するため、深層学習による検討を行った。表-1 に示すように、入力するスカログラム画像のサイズ、潜在空間の次元数、空間分布を2次元に圧縮する手法、クラスタリング手法をパラメータとして分析を行った。ネットワークには全結合層のみで構成されるVAE(変分オートエンコーダー)と畳み込み層と全結合層で構成されるCVAE(畳み込みオートエンコーダー)の2種類を用いた。学習のエポック数は10,000回とした。スカログラム画像には「健全」と「浮石」の他、浮いてはいないが振動計測後にブレーカー打撃により砕けた点を「砕け」と称した3クラスがある。使用したスカログラム画像は321枚で、内訳は「健全」154枚、「砕け」69枚、「浮石」98枚である。学習は「砕け」を含む3クラスと「砕け」を含まない2クラスの2通りを実施し、2クラスの学習でも、正解率の判定では「砕け」を含むすべての画像を対象とした。データ数としては非常に少ない中での分析であることに留意されたい。

VAEによる特徴量抽出とクラスタリングによってクラスを判定したところ、潜在空間のバラツキが完全ではないが、クラスを構成しているように見えるものがあった。また、一部の結果では図-4に示すように大まかに2つのクラスに分かれているように見えることから、「健全」と「浮石」を判定できる可能性が示唆された。この見解を定量的に示すために表-1に示す性能評価指標により定量的な評価を試みた。分析の性能評価指標については、「浮石」を真値(Positive)とした混同行列と併記した。

図-5に「浮石」の再現率が優秀であったものについて、入力画像サイズをパラメータに示す。今回の検討の範囲では「浮石」の

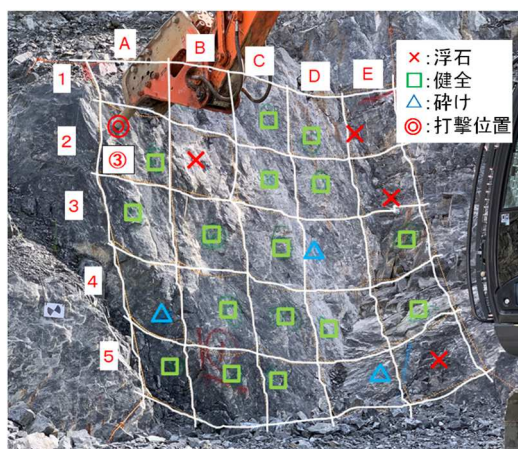


図-1 レーザー計測と打撃位置

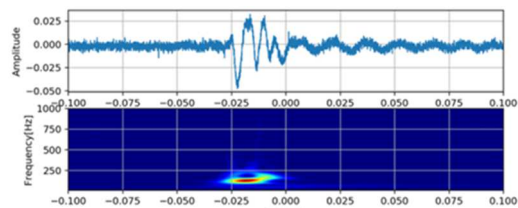


図-2 浮石の振動波形(上)スカログラム(下)例

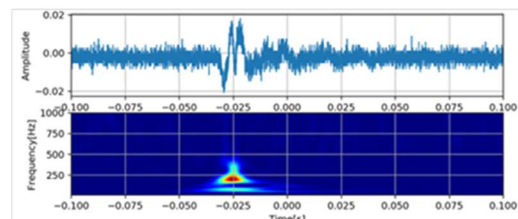


図-3 健全全部の振動波形(上)スカログラム(下)例

表-1 VAE 解析のパラメータと数量

| パラメータ | |
|------------|-----------------------------|
| 入力画像サイズ | 64px、128px、196px |
| 潜在空間の次元数 | 4、8、16、32、64、256 |
| 2次元に圧縮する手法 | PCA、ICA、t-SNE、UMAP、PCA+UMAP |
| クラスタリング手法 | K-Means、GMM |

スカログラム画像から「浮石」を判定する学習の再現率は、最大で94%であった。この時、「健全」の判定においては30%が健全、70%が浮石との判定となっており、学習の正解率は63%、浮石の判定の適合率は84%である。

打撃振動から100%の精度で浮石を判定することは難しい。そこで、「健全」や「砕け」かどうかは確実に判定できないが、「浮石」部分を見落とさないことを念頭に、「安全上の判定」法を表-2に示した。「浮石」を「健全」と判定することは安全上あってはならないため×であるが、「健全」や「砕け」を誤って「浮石」と判定した場合は安全上問題がないため○となる。ただし、「健全」や「砕け」を落とす行為を実施する必要があるため余分な時間を費やすことになる。当然「浮石」を「浮石」と判定する場合は○の判定であるが、浮石を見落とさないためには、この判定を100%にする必要がある。浮石判定率を「浮石」を「浮石」と判定する真陽性 TP と「健全」を「健全」と正しく判定する真陰性 TN に「浮石以外」を誤って「浮石」と判定する偽陽性 FP も加えたもの全データに対する割合、すなわち「浮石判定率」= $(TP+TN+FP)/(TP+TN+FN+FP)$ 、を浮石判定の性能評価指標とする。浮石判定率と正解率の関係を図-6に示す。正解率より緩い条件となるため浮石判定率は高くなり、最大98.4%となる。この時、「浮石」の適合率は94.9%と最大であったが、「健全」の中で誤って「浮石」と判定した割合は69.5%と高い値であった。

4. まとめと展望

浮石の振動特性は、打撃点から計測点に伝わるエネルギーが岩盤の凹凸や不連続面の状況などにより変動するため特徴が捉え難い。振動測定結果のスカログラム画像を深層学習により分析した結果、以下の知見を得た。

- ・安全の観点から「健全」を誤って判定することを許容する性能評価指標を提案した。
- ・浮石判定率の高い分析条件では「健全」を誤って「浮石」と判定をしたケースが多い。浮石判定率を維持しつつ「健全」の誤判定を減らしていく必要がある。

今後は、打撃点から計測点までの岩盤状態の異なる場合のデータ数を増やし、浮石判定率を100%により近づけていく。また、遠隔振動計測からスカログラムをリアルタイムに作成して判定を行い、健全判定以外の点にコソクを指示するシステムを構築していきたい。

参考文献

- 1) K. Suzuki, K. Okuzawa, A. Shinmura, Y. Shimada, S. Kurahashi and K. Oleg: Experimental study on contactless method of measuring vibration of rock face using Laser, YSRM2019 Specialized Conference, Program & Abstracts, p.194, 2019.
- 2) 鈴木健一郎, 新村亮, 谷口信博, 奥澤康一, 倉橋慎理, オレグコチャエフ: レーザーを用いた浮石の遠隔検知手法に関する原位置実験, 第15回岩の力学国内シンポジウム講演集, 62, 6p, 2021.
- 3) 渡辺文雄, 岡嶋真一, 中川博, 風嵐健志, 児玉一夫, 松村文: ウェーブレット解析を応用した構造物周辺の地盤空洞調査, 応用地質, 38, pp. 349-358, 1998.

表-2 浮石推定の混同行列と性能評価指標

| | | 推定値 | | 性能評価指標 |
|--------|------|--|--|----------------------------------|
| | | 浮石以外 (健全+砕け) | 浮石 | |
| 真値 | 浮石以外 | ○浮石以外のスカログラム(Negative)を使って浮石以外を正しく判定(True)した数=真陰性 TN | ○浮石以外 (Negative)を正しく判定できず誤って(False)浮石と判断した数=偽陽性 FP | 特異度 = $TN/(FP+TN)$ |
| | 浮石 | ×浮石 (Positive) のスカログラムを誤って(False)浮石以外と判断した数=偽陰性 FN | ○浮石(Positive)のスカログラムを正しく浮石と判定(True)できた数=真陽性 TP | 再現率 = $TP/(FN+TP)$ |
| 性能評価指標 | | 陰性的中率 = $TN/(FN+TN)$ | 適合率 = $TP/(FP+TP)$ | 正解率 = $(TP+TN)/(TP+FP+FN+TN)$ |

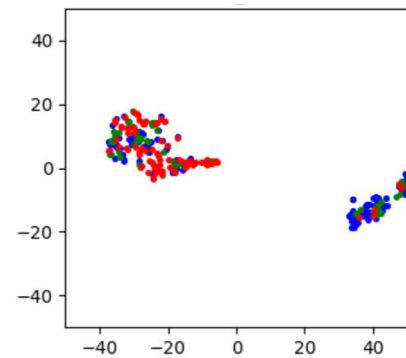


図-4 VAE 結果の例

(青: 健全, 緑: 砕け, 赤: 浮石, 解析条件: 128px, 潜在空間次元数 4, t-SNE, CVAE)

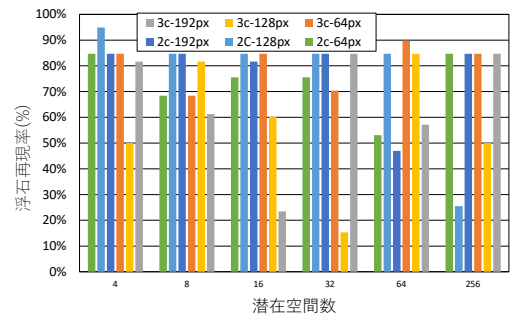


図-5 浮石再現率

(3c: 砕け有り, 2c: 砕けなし)

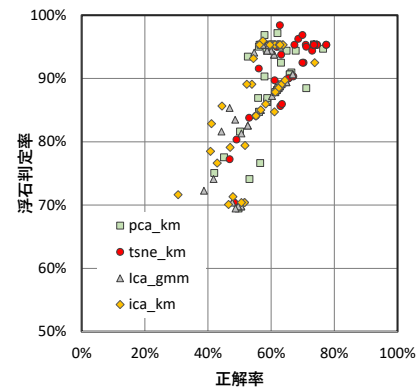


図-6 浮石判定率と正解率の関係