

## AI を導入した打音による岩石強度予測手法の研究

榎ニュージェック ○上田 広和  
山口大学工学部 中島 伸一郎  
丸山 裕太郎  
栗林 謙

### 論文要旨

本研究では、岩盤分類の要素の一つである「ハンマー打診による岩石硬さ判定」の自動化を、AI を導入することにより実現することを目的とする。CNN による打音の自動判定モデルの適用性を検証すべく、A ダム建設現場の岩盤においてハンマー打音の収集を行った。硬さや岩級の異なる岩盤で打音を収集した結果、岩盤の硬さと音圧ピークには相関が見られた。感度の良い收音機器では、小さい音圧レベルでも精度よく收音できる一方で、ノイズの影響を受け易く、環境音が大きい場合はレンジオーバーし易い。ビットレートやサンプルレートは打音波形にあまり影響がない事が判明した。ノイズリダクション機能を有する收音機器では、打音判定に有利になると期待していたが、深層学習させた CNN モデルでは正答率が下がる結果となった。これは地点のノイズ特性が判定結果に及ぼす影響因子として大きいためであると判断され、今後は打音波形の特徴のみを抽出する方法やノイズの影響を排除した標準化方法を検討する必要がある。

キーワード：岩盤硬さ、ハンマー打音、AI、ノイズ

### まえがき

大規模土木構造物の基礎や、トンネルの支保形式を最終的に決める上で、掘削面や切羽上で岩盤分類を行う事が必須となる。岩盤分類法は、電中研式岩盤等級分類、Rock Mass Rating (RMR)、Q system などが国内外で利用されるが、割れ目と共に岩石の硬さが指標の一つとなる手法が多い。

2010年代以降、ICT 技術の建設現場への導入が進んだ結果、SfM や LiDAR など詳細な掘削面の形状データが迅速に取得できるようになり、これらを AI 技術と組み合わせる事で、岩盤中の割れ目や湧水量の自動評価技術は実用面まで到達しつつある<sup>1)</sup>。一方、岩石の硬さ評価は、従来の「ハンマー打診による判定法」から技術進展があまりない。この方法での硬さ評価は定性的であり、個人の能力と経験で判定が異なる場合が多々見られ、これが岩盤分類評価にバラつきを生む余地を残している。

「ハンマー打診による判定法」は、岩盤評価のみならず、コンクリートの非破壊検査法としても古くから用いられてきた。コンクリート工学の分野では、早くから打撃音(以下、「打音」)に着目した理論的な基礎研究や応用研究まで幅広く研究されている<sup>2)</sup>。一方で、コンクリートを対象とした打音の研究は、コンクリートそのものの物性を調べるというよりは、コンクリート内部の亀裂といった欠陥を抽出することを目的にしており、岩盤の硬さを評価するという趣旨とそぐわない面もある。

岩盤の打音を定量的に評価しようとした試みとして、稲森らの研究がある<sup>3),4),5),6),7)</sup>。これらの研究では、様々な形状・寸法の模擬岩盤に対して鉄球を自由落下させて、その時に発生する打音をマイクロフォンで収集し、音圧波形の中で最初の立ち上がりの勾配(応答音圧パルス勾配)が、被打診物の材料特性と相関することを見出した。ただし、打診の条件は厳密に決められており、打診面の形状は平滑でなければならないといった制約がある。このため応答音圧パルス勾配法はボーリングコアでは有効性が確認されているものの<sup>7)</sup>、凹凸のある掘削面や不定形な岩石試料での適用は難しいと考えられる。

本研究ではトンネルでの切羽判定の全自動化を主目的に、国内の掘削現場でハンマー打音の音波波形、岩種、硬さ情報を収集して AI に学習させ、岩盤硬さの自動化判定の適用性を検証したので、ここに報告する。

### 1. 打音データの収集

#### (1) 現場条件

打音データの収集は、国内で建設中である A ダムサイトの基礎掘削面、リムトンネル、原石山の三地点で行った。地質は主として花崗岩で構成されるが、古い地質時代に受けた造構応力によるカタクレイサイト(断層破碎岩)が小規模に発達する他、新第三紀に花崗岩を貫入した安山岩脈が頻繁に見られる。

打音収集現場の状況は、基礎掘削面では近傍にてコンソリデーショングラウチングのためにボーリングマシンが複数台稼働していたほか、ポンプによる打設面上の排水、コンクリート型枠の設置作業が進行中であった。リムトンネルは掘削が概ね完了し、ライニングコンクリートの打設中であった。岩盤は露出していなかったため、坑内と坑口付近明り部の底盤コンクリートの打音を収集した。リムトンネル内の打音収集作業は昼休憩中に行ったため、環境音は無音に近かった。原石山ではデータ収集を行った法面から約 100m の距離においてブレイカーによる岩塊小割作業がほぼ連続的に行われていたほか、大型ダンプトラックが頻繁に通行しており、三地点の中では最も騒音が著しかった。

## (2) 打音収集機器・データ収集方法

ハンマー打音の収集に当たって、性能の異なる收音機器を表-1 に示す 8 種類を選定した。ただし現場作業の制約により、実際に使用したのは 6 種類に留まる。このうち DJI mic と DJI mic2 はノイズリダクション機能がある事から、2 台準備してノイズリダクション機能 ON/OFF の 2 パターンで收音した。打撃音の収集のほか、打撃地点周辺の環境音を 1 分間収集した。收音機器を搭載した打音収集装置の概観を図-1 に示す。全マイクの方向がハンマー打撃箇所に向くように配置したが、打撃箇所と装置の距離は概ね 1~2m 程度としたものの、厳密ではない。打音収集箇所の認識と、時刻の同期、岩盤状態や叩き方を記録するためにデータ収集時はハンディカムで動画撮影した。岩盤の打撃には、Estwing 社製ハンマーE3-14 を用いた。打撃は岩盤が過度に破壊しない強度で 200~300 回行った。

岩盤の硬さを極力定量的に評価するために、ハンマー打撃箇所付近においてシュミットロックハンマーの反発度を 10 点前後で計測した。打音収集箇所の岩盤分類は、現場の地質に精通する地質技術者により、電中研式岩盤等級分類にて行った。

## 2. AIによる自動判定化方法

AI を活用した打音による岩石硬さの自動判定の流れを図-2 に示す。

### (1) データ処理

打音基データの Wav ファイルをテキストファイルに変換した後、ファイルの時刻合わせをした。打音ファイルを更に 0.25 秒間隔に分割した。環境音の測定結果から、ノイズレベルが 0.5dB 以下は岩盤打撃音なしと判定し、最大音圧が 0.5dB 以下の打音ファイルは除去した。

打音の振幅波形データは、フーリエ変換により時間と周波数のスペクトログラムに変換した。

### (2) 深層学習

MATLAB®を使用して畳み込みニューラルネットワーク

表-1 收音機器一覧

マイク種別	製品	ビット	サンプルレート	ロガー	
①	ガンマイク	MKE600 (SENNHEISER)	32bit	48kHz	Zoom F6
②	ラベリアマイク	MX184 (SHURE)	32bit	48kHz	Zoom F6
③	ワイヤレスマイク1	DJI mic (2台)	24bit	48kHz	単独/USB
④	ワイヤレスマイク2	DJI mic2 (2台)	32bit	48kHz	単独/USB
⑤	×ウェブカメラ	Logicool C922	16bit	44.1kHz	USB接続
⑥	アクションカメラ	GoPro10 Hero Black	16bit	32kHz	単独/USB
⑦	×スマホC	Apple iPhone SE	16bit	44.1kHz	単独
⑧	ICレコーダ	SONY ICD UX533F	16bit	44.1kHz	単独

×：計画したものの、現場では使用せず。



図-1 ハンマー打音収集装置の概観

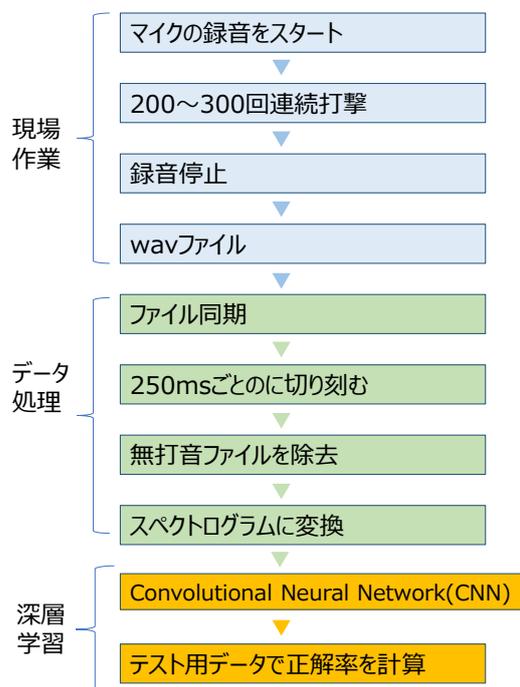
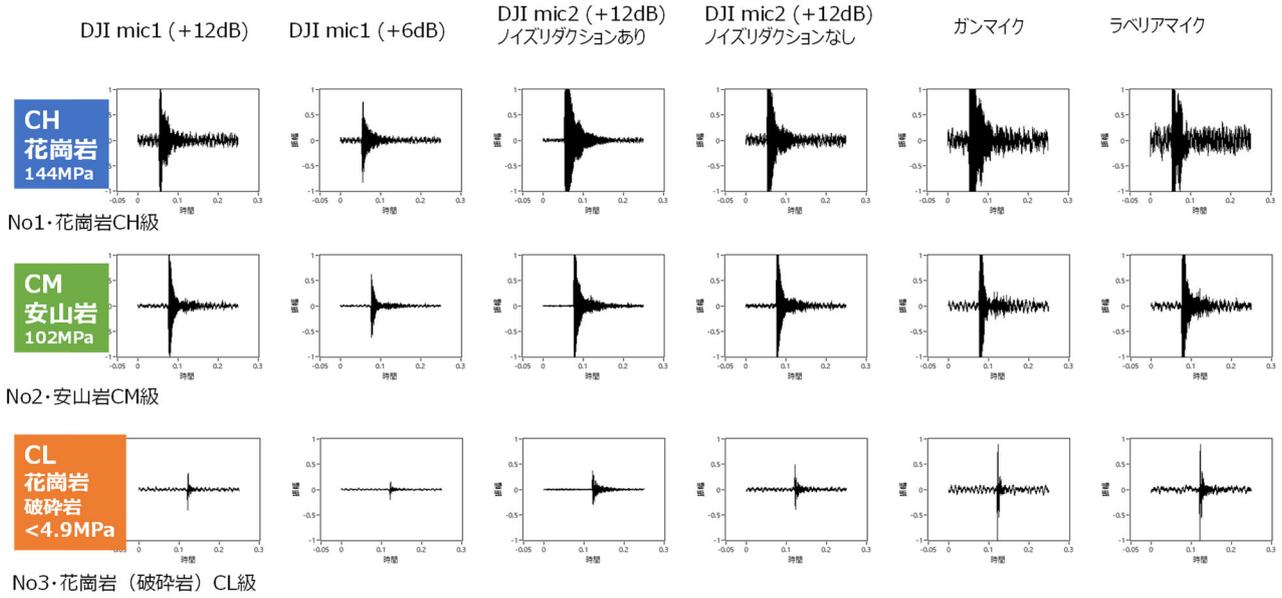


図-2 ハンマー打音による岩石硬さ自動判定の流れ

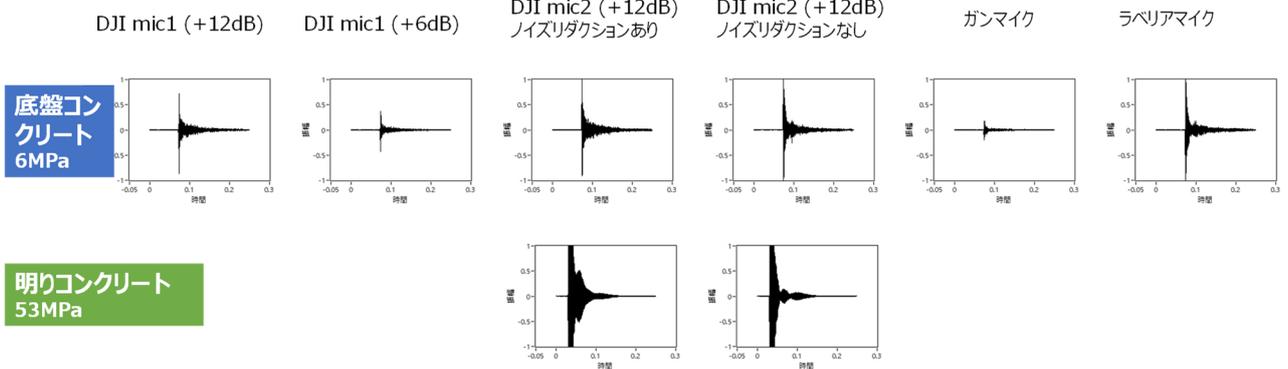
(Convolutional Neural Network: CNN)を構築し、打音のスペクトログラムを画像データとして類似性を反復学習した。反復回数は 380 回である。

全打音データの 70%を学習用に、10%をパラメータ調整用に、残り 20%を CNN モデルの判定テスト用にした。

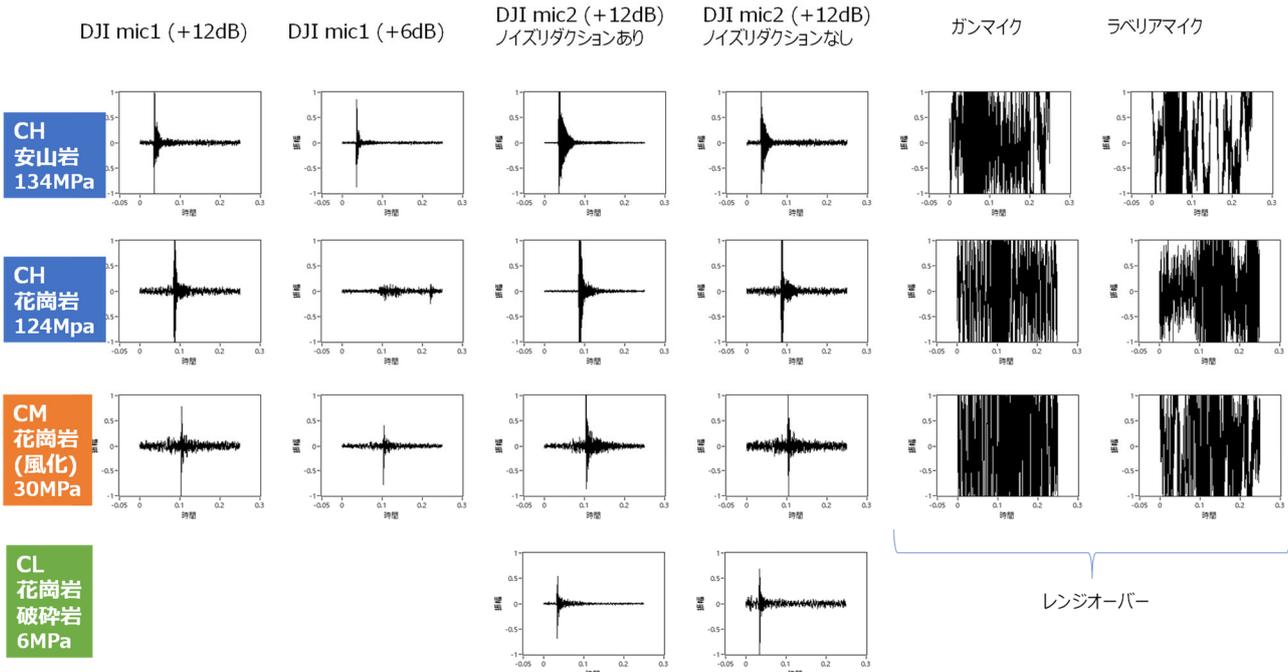
【ダム基礎掘削面】



【リムトンネル】



【原石山】



※岩石名下の数字は、シュミットロックハンマー反発度から換算した一軸圧縮強度

図-3 收音機器の違いによる打音波形の特徴



Engineers, Reston, Virginia, Peter C. Chang, Editor,  
18p.

- 3) 瀬崎満弘ほか(1999):岩盤分類の指標である「ハンマー打診音」に関する基礎的実験と考察(その1)―鋼球による打診音の特徴と被打診物の物性について―, 土木学会 54 回年次学術講演会(平成 11 年 9 月)講演集, pp. 764-765.
- 4) 船曳伸二ほか(1999):岩盤分類の指標である「ハンマー打診音」に関する基礎的実験と考察(その2)―鋼球による打診音の音圧波形の立ち上がりと被打診物の物性について―, 土木学会 54 回年次学術講演会(平成 11 年 9 月)講演集, pp. 766-767.
- 5) 稲盛光洋ほか(1999):岩盤分類の指標である「ハンマー打診音」に関する基礎的実験と考察(その3)―実務用ロックハンマーによる打診音の特徴と被打診物の物性について―, 土木学会 54 回年次学術講演会(平成 11 年 9 月)講演集, pp. 768-769.
- 6) 稲盛光洋ほか(1999):岩盤分類の定量的指標としての「応答音圧パルス勾配法」, 土木学会論文集 No. 638/III-49, pp. 335-351.
- 7) 稲盛光洋ほか(2001): 応答音圧パルス勾配法の頁岩コアに対する適用例, 土木学会論文集 No. 638/III-57, pp. 165-178.