

切羽鏡面の吹付けコンクリートのひび割れ検出により 肌落ちの予兆を知らせるシステムの開発

切羽画像から肌落ちの予兆を AI で検知

浜田 元・清水 隆司・久保 陽平

厚生労働省では、2024年3月に「山岳トンネル工事の切羽における肌落ち災害防止対策に係るガイドライン」を改正しており、山岳トンネル工事の切羽における労働災害のより一層の防止を図ることが求められている。同ガイドラインにおいて、切羽鏡面のコンクリート吹付けは、切羽での肌落ちリスクを低減させるための有効な対策の一つであり、切羽地山のゆるみを抑制するとともに、切羽の変状を視認しやすくするとされている。本稿では、作業員が切羽に近づく場面の切羽画像から、AIにより切羽鏡面の吹付けコンクリートのひび割れを検出し、肌落ちの予兆を知らせるシステムを開発したので報告する。

キーワード：山岳トンネル、切羽、肌落ち、鏡吹付けコンクリート、画像、AI

1. はじめに

厚生労働省では、2024年3月に「山岳トンネル工事の切羽における肌落ち災害防止対策に係るガイドライン（以下、ガイドライン）」¹⁾を改正しており、山岳トンネル工事の切羽における労働災害のより一層の防止を図ることが求められている。

ガイドラインには、肌落ち災害防止に有効と考えられる具体的な対策が複数示されており、その一つとして、切羽鏡面のコンクリート吹付け（以下、鏡吹付け）が挙げられている。ガイドラインにおいて、鏡吹付けは、掘削により露出した地山を早期にコンクリートで覆うことで切羽地山のゆるみを抑制することができるとしている。また、切羽鏡面がコンクリートで覆われるため、切羽の変形により生じるひび割れや変状が視認しやすくなるとされている。一方、ガイドラインでは、肌落ち災害防止対策の実効性をより一層高めるため、切羽監視責任者の切羽監視を補助することを目的として、最新のデジタル技術などを積極的に活用することが求められており、その一例として、各種センサーを活用した切羽監視・肌落ち検知の取り組みが挙げられている。

本稿では、装薬作業や鋼製支保工建込み作業など、作業員が切羽に近づく場面の切羽画像から、AIにより鏡吹付けコンクリートに生じるひび割れを検出し、肌落ちの予兆を知らせるシステム（以下、肌落ち監視システム）を開発したので報告する。

2. 肌落ち監視システムの概要

肌落ち監視システムの概要を図-1に示す。本システムは撮影機器と解析PCで構成されている。

撮影機器の主な仕様を表-1に示す。撮影機器は、撮影対象の切羽寸法を高さ8m×幅10m、撮影機器

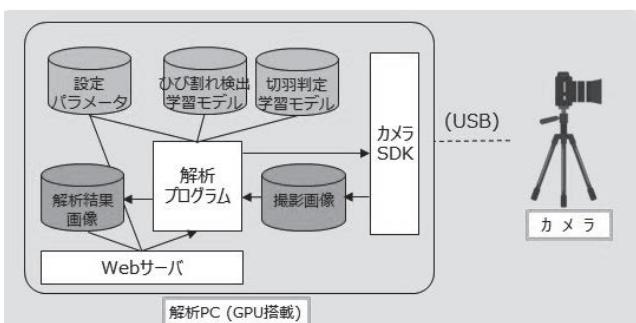


図-1 肌落ち監視システムの概要

表-1 撮影機器の主な仕様

カメラ		レンズ	
撮像素子	35 mm フルサイズ (35.7 × 23.8 mm)	対応撮像 画面サイズ	35 mm フルサイズ
カメラ有効 画素数	約 6,100 万画素	焦点距離	24 ~ 105 mm
ISO 感度	50 ~ 102,400	画角 (35 mm 判)	84° ~ 23°
シャッター 速度	1/8,000 ~ 30 秒 バルブ	開放絞り (F 値)	4
連続撮影速度	最高 約 10 コマ / 秒	最小絞り (F 値)	22

と切羽鏡面の離隔を 10 ~ 15 m, 検出するひび割れの最小幅を 1 mm と想定し仕様を定めている。カメラはレンズ交換式デジタルカメラで、撮像素子が 35 mm フルサイズ、有効画素数が約 6,100 万画素である²⁾。レンズは 35 mm フルサイズ対応で、焦点距離が 24 ~ 105 mm、画角が 84° ~ 23° である³⁾。

解析 PC は、撮影画像のサイズ (40 MB)、ひび割れを検出する際の撮影画像の分割数 (20 × 20 分割)、ひび割れの検出時間 (1 ~ 2 分) などから必要な処理能力を想定し仕様を定めている。解析 PC の主な仕様は、CPU が Core i7-12700H、メモリが 16 GB、GPU が NVIDIA GeForce RTX 3070Ti (メモリサイズ 8 GB) である⁴⁾。なお、解析 PC には、図-1 に示すとおり、設定パラメータ、ひび割れ検出学習モデル、切羽判定学習モデルで構成する解析プログラムがインストールされている。

ひび割れ検出の処理フローを図-2 に示す。切羽画像は、解析 PC よりカメラへ撮影開始を指示し、事前設定した時間間隔で取得する。取得した切羽画像は、事前設定した分割数にしたがって画像分割し、複数枚の分割画像（以下、パッチ画像）を作成する。その後、学習モデルにより、パッチ画像ごとに鏡吹付けコンクリート面（以下、切羽鏡面）であるか否かを判定し、切羽鏡面と判定したパッチ画像に対してひび割れ検出を行い、ひび割れ検出結果を出力する。

3. ひび割れ検出 AI エンジンの適用性の検討

(1) 検討の概要

コンクリート構造物のひび割れ検出で実績を有する AI エンジン⁵⁾について、吹付けコンクリートのひび割れ検出への適用性を確認するため、選定した撮影機器により吹付けコンクリート供試体のひび割れ画像を取得し、AI エンジンの基本学習モデルを用いてひび割れ検出を試みた。なお、AI エンジンは、セマンティックセグメンテーション⁶⁾を用いて作成している。

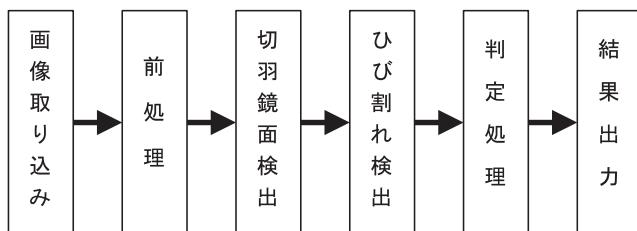


図-2 ひび割れ検出の処理フロー

(2) ひび割れ画像の取得方法

吹付けコンクリート供試体のひび割れ画像の撮影状況を図-3 に示す。供試体は縦 400 mm × 横 850 mm × 厚さ 50 mm であり、撮影機器と供試体との離隔を 15 m、撮影範囲はレンズの調整により供試体中央を基準として左右に各 5 m、供試体撮影面の照度は約 200 lx とした。供試体のひび割れは、供試体背面から油圧ジャッキで段階的に載荷し発生させた。

(3) ひび割れの検出結果

ひび割れ検出結果の一例を写真-1 に示す。写真-1 に示すとおり、AI エンジンの基本学習モデルにより、幅 1 mm のひび割れを検出している。この AI エンジンが、吹付けコンクリートのひび割れ検出に適用できることを確認した。

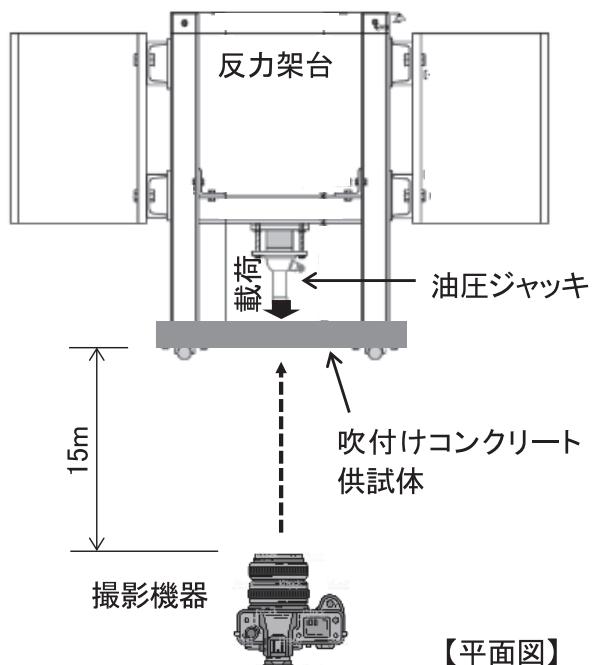


図-3 ひび割れ画像の撮影状況

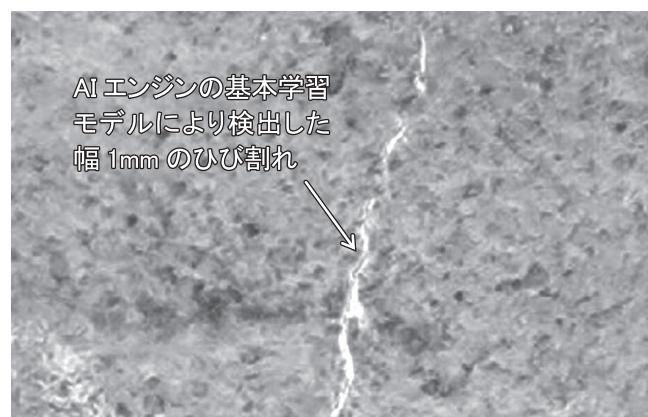


写真-1 ひび割れ検出結果

4. 肌落ち監視システムの学習モデルの作成

(1) 学習モデル作成の概要

作業員が切羽に近づく場面の切羽画像には、当然ながら作業員、ブームやマンケージなどの施工装置が写り込む。そのため、本システムでは、複数のCNN(Convolutional Neural Network)⁷⁾を適宜用いて切羽鏡面とそれ以外を区別し、検出した切羽鏡面に対しひび割れ検出を行う。なお、ひび割れ検出では、装薬時の電気雷管の脚線もあわせて検出し、ひび割れとの誤認を防止する。

(2) 切羽鏡面検出の学習モデル

(a) 学習モデルの作成方法

切羽鏡面を検出するため、切羽画像2枚から画像分割などにより教師データ(1,600枚)を作成し、CNNを用いて学習モデルを作成した。

学習モデルの作成では、切羽鏡面の検出精度を高めるため、図-4に示すとおり、2種類のCNNを段階的に用いた。1段階目の学習モデル作成では、切羽画像を 20×20 のパッチ画像に分割し、パッチごとに「切羽鏡面」、あるいは「切羽鏡面以外」としてラベルを割り当て、CNNの一つであるResnet18⁸⁾に予測させて正解（技術者が切羽鏡面としてアノテーションした

もの）とのずれが少なくなるように学習させた。2段階目の学習モデル作成では、1段階目に学習したモデル（図-4中の学習済みCNN）を用いて、 8×8 のパッチ画像（図-4中の破線部分）に対して特徴ベクトルを抽出し、特徴ベクトルをまとめて別の3層モデルのCNNに予測させて1段階目と同様に学習させた。

(b) 学習モデルの推論精度の確認

前述の2段階で作成した学習モデルを用いて、テストデータの切羽画像から切羽鏡面を検出した結果の一例を写真-2に示す。エレクターブームや鏡boltなどを誤認することなく切羽鏡面を検出しており、正

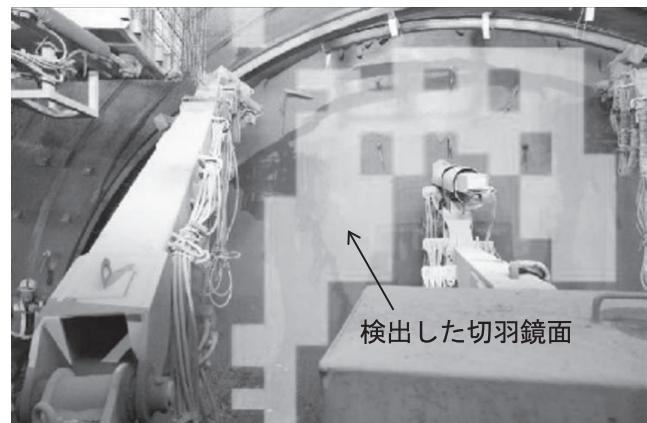
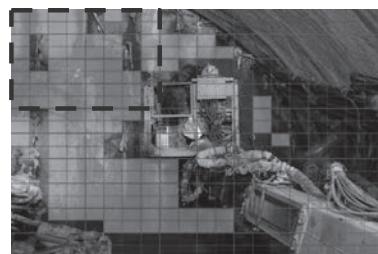


写真-2 切羽鏡面の検出結果



1段階目学習モデルの作成概要



2段階目学習モデルの概要

[コメント]
2段階目モデルの作成では、 8×8 のパッチ画像をパッチ単位で学習している
($13 \times 13 = 169$ 枚)

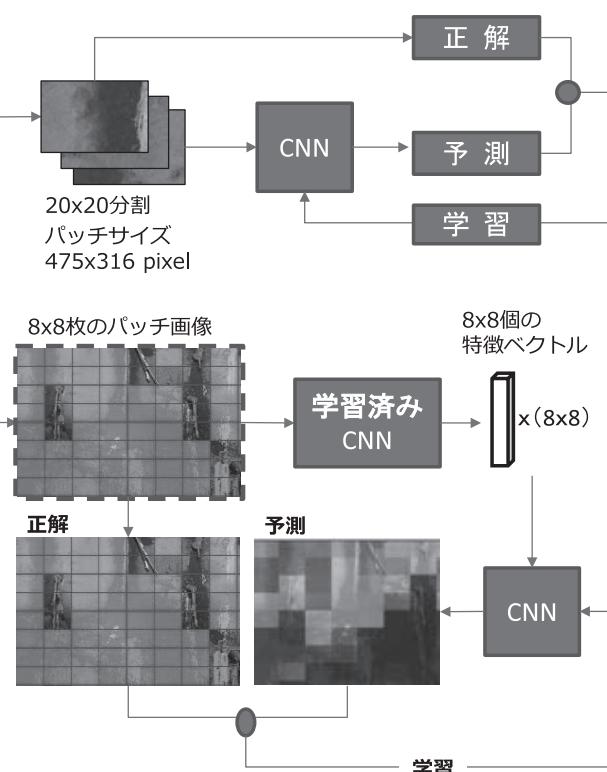


図-4 切羽鏡面を検出する学習モデルの作成方法

解率は 79 ~ 95% であった。作成した学習モデルにより、切羽鏡面を比較的高い精度で検出できることを確認した。

(3) ひび割れ・脚線検出の学習モデル

(a) 学習モデルの作成方法

ひび割れ・脚線を検出するため、供試体画像 21 枚、切羽画像 17 枚から画像分割などにより教師データ（供試体画像より 517 枚、切羽画像より 337 枚）を作成し、前述の AI エンジンを用いて学習モデルを作成した。学習モデルの作成では、切羽画像を 20×20 のパッチ画像に分割し、各パッチ画像の画素単位で「ひび割れ」、「脚線」、「ひび割れ、脚線を含まない切羽鏡面」としてラベルを割り当て、AI エンジンに予測させて正解（技術者がひび割れあるいは脚線としてアノテーションしたもの）とのずれが少なくなるように学習させた。

(b) 学習モデルの推論精度の確認

学習モデルを用いて、テストデータの切羽画像からひび割れを検出した結果の一例を写真-3 に示す。ひび割れは一部あるいは部分的に検出されており、正解率は 81 ~ 97% であった。作成した学習モデルによ

り、切羽鏡面のひび割れが比較的高い精度で検出できることを確認した。

テストデータの切羽画像から電気雷管の脚線を検出した結果の一例を写真-4 に示す。脚線は概ね検出されており、正解率は 86 ~ 100% であった。作成した学習モデルにより、切羽鏡面の脚線が比較的高い精度で検出できることを確認した。

5. 肌落ち監視システムの現場での試行

本システムの有効性を確認するため、トンネル現場に導入し試行した。試行現場は延長 740 m の 2 車線道路トンネルであり、掘削は発破方式により行われた。

本システムの現場試行は装薬作業を対象とした。撮影機器による切羽鏡面の画像取得状況を写真-5 に示す。撮影機器は、切羽鏡面全体が視認しやすく、機器の取付けが容易な油圧削岩機の操作室の天板上に、マグネット付き架台と雲台（遠隔操作機能付き）を介して設置した。解析 PC による切羽鏡面の検出状況、ならびにひび割れの検出状況の一例を写真-6 に示す。切羽鏡面の検出は、装薬作業中の作業員、ブームや肌落ち防護ネットなど、切羽鏡面以外の部分が除去

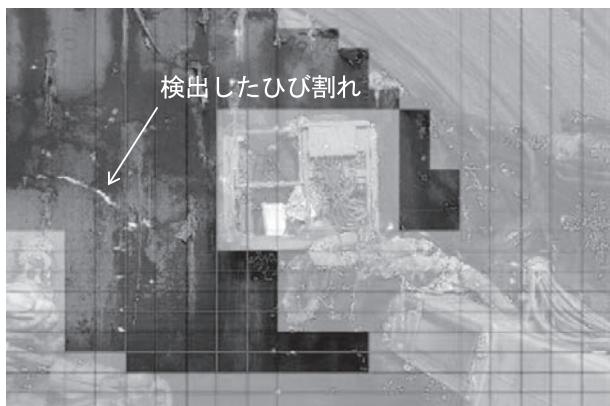


写真-3 ひび割れの検出結果

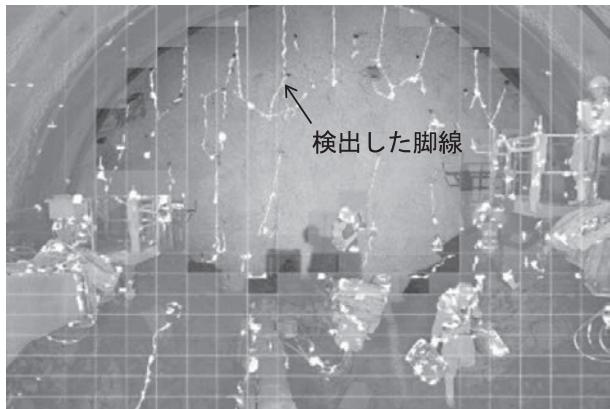


写真-4 脚線の検出結果

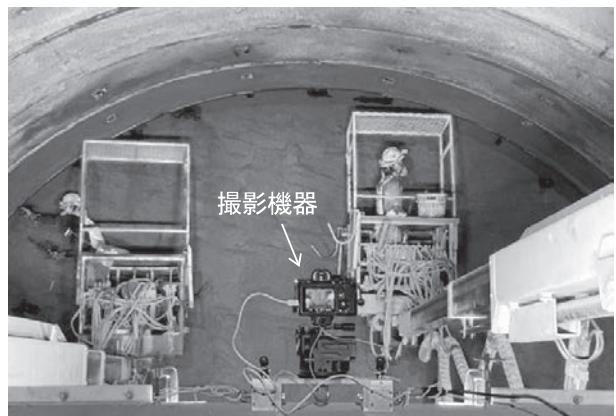


写真-5 撮影機器による切羽鏡面の画像取得状況

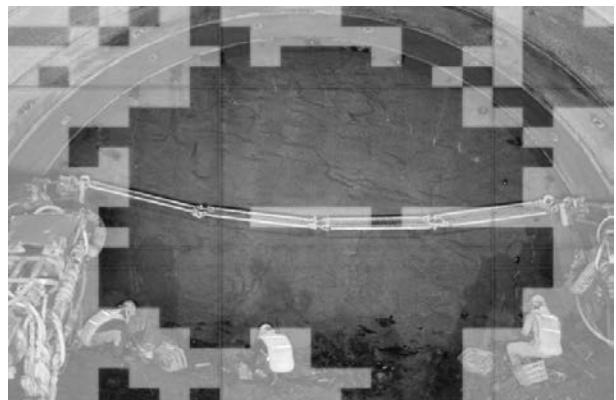


写真-6 切羽鏡面およびひび割れの検出状況

され、切羽鏡面が概ね検出されている。しかしながら、切羽鏡面より後方の支保が完了したトンネル外周面の一部を切羽鏡面と誤認しており、切羽鏡面の検出について改善の余地が残る結果となった。

今回の現場試行では、目視観察から、切羽鏡面にひび割れは確認されていない。また、本システムでもひび割れは検出されていない。これらのことから、切羽鏡面にはひび割れが生じなかったと推察され、ひび割れ検出の現場検証には至らなかったと判断される。一方で、切羽鏡面に現れた電気雷管の脚線をひび割れと誤認していないことは確認できている。なお、ひび割れ検出結果の表示に要する時間は40～60秒であり、想定した時間で検出結果の表示が行えることを確認した。

6. おわりに

装薬作業や鋼製支保工建込み作業など、作業員が切羽に近づく場面の切羽画像から、AIにより鏡吹付けコンクリートに生じるひび割れを検出し、肌落ちの予兆を知らせるシステム（肌落ち監視システム）を開発した。また、本システムをトンネル現場に導入して試行し、実用性を確認した。その結果、切羽監視責任者の切羽監視を補助するシステムとして有効であることを確認した。

今後は、本システムの現場への普及展開を図りながら、切羽鏡面やひび割れの検出精度の向上、ひび割れ検出までの処理時間の短縮、切羽監視責任者が容易に携帯可能な機器（タブレットPCや携帯電話）との連携、防塵・防滴対策など、残された課題の解決に取り組みたいと考えている。

J C M A

〔参考文献〕

- 1) 厚生労働省：山岳トンネル工事の切羽における肌落ち災害防止対策に関するガイドライン
<https://www.mhlw.go.jp/stf/seisaku-00000000/001233649.pdf>
- 2) SONY : a 7R IV (ILCE-7RM4A)
<https://www.sony.jp/ichigan/products/ILCE-7RM4A/spec.html>
- 3) SONY : FE 24-105mm F4 G OSS
<https://www.sony.jp/ichigan/products/SEL24105G/spec.html>
- 4) DELL Technologies : Dell G15 5520 セットアップと仕様
<https://dl.dell.com/content/manual44317959-dell-g15-5520-セットアップと仕様.pdf?language=ja-jp>
- 5) システム計画研究所：AIひび割れ検出エンジン「ひびここ」
<https://www.hibikoko.com>
- 6) 和田尚之：「機械学習・AI」のためのデータ処理入門、工学社
- 7) 斎藤康毅：ゼロから作る Deep Learning —Pythonで学ぶディープラーニングの理論と実装、オライリー・ジャパン
- 8) 田村雅人、中村克行：Pythonで学ぶ画像認識 機械学習実践シリーズ、インプレス

〔筆者紹介〕

浜田 元（はまだ はじめ）

（株）奥村組

技術本部 技術研究所 土木研究グループ
地盤調査・計測チームリーダー



清水 隆司（しみず たかし）

（株）システム計画研究所

事業本部 宇宙ロボティクス事業ユニット
マネージャー



久保 陽平（くぼ ようへい）

（株）システム計画研究所

事業本部 宇宙ロボティクス事業ユニット

