

コンクリートのひび割れ画像解析の開発と実用化展開

堀 口 賢一

近年、コンクリート構造物の近接目視点検の効率化や高精度化が求められている。そこで、デジタル画像からコンクリートのひび割れをAIで自動検出し、ひび割れ幅を自動算定できるひび割れ画像解析技術を開発した。特に、ひび割れ幅の算定において、ウェーブレット変換による画像解析技術を用いていることが特徴で、比較的粗い画像からでも微細なひび割れ幅を算定することができる。このような機能を活かして2020年7月から実用化し、橋梁、トンネル、ボックスカルバート、ダム堤体、LNGタンク外壁、建築建屋、擁壁、および煙突など100箇所以上の構造物で、合計24万m²を超える適用実績が得られ、コンクリート構造物のひび割れ点検業務に広く活用されるようになっている。

キーワード：コンクリート、維持管理、ひび割れ、AI、画像解析、自動検出、ウェーブレット変換、ひび割れ幅

1. はじめに

コンクリート構造物の点検では、コンクリートのひび割れの有無の確認や、発生しているひび割れの位置や長さ、幅を記録することが基本とされている。これは、コンクリート構造物の劣化にはさまざまな原因があるが、劣化の兆候やその程度が、構造物表面にひび割れやその変化として表れることが多いためである。写真-1に近接目視によるコンクリート構造物のひび割れ点検状況を示す。ひび割れの点検は、従来から

点検員が調査箇所に近接して目視によりその有無を確認し、幅や長さを測定して、手書きで図面に記録する手法が取られてきている。しかしながら、このような方法には以下のようないくつかの課題がある。

- ・点検業務に従事する人員の確保が難しくなっている。
- ・点検結果が点検員の技量や特徴に依存し、点検記録にバラツキが生じる。
- ・高所に登ったり、狭隘な箇所に潜り込んだりする危険性や苦痛を伴うことがある。

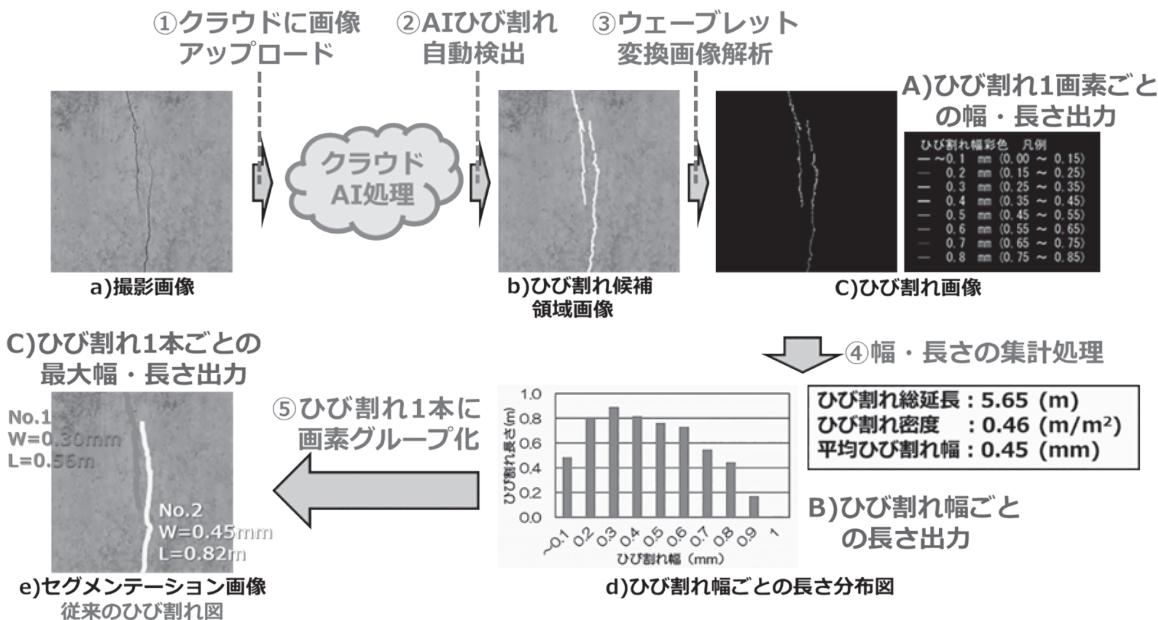
これらの課題を解決することを目的として、デジタル画像からひび割れを自動で検出し、幅や長さも自動で定量的に評価できる本技術を開発し、実際の構造物の点検に適用して実績を積み重ねた。本稿では、本技術の概要ならびに適用事例について紹介する。

2. ひび割れ画像解析技術の概要

図-1に本技術によるコンクリートのひび割れ画像解析の処理手順を示す¹⁾。本技術は、クラウド上で稼働する画像分析および画像解析のプログラムで構成されている。その処理手順は、①クラウドにデジタル画像をアップロード、②AI画像分析によるひび割れの自動検出、③ウェーブレット変換を用いた画像解析によるひび割れ1画素ごとの幅・長さの定量処理、④ひび割れ幅ごとの長さの集計処理、および⑤ひび割れ1本ごとに複数の画素をグループ化する処理となって

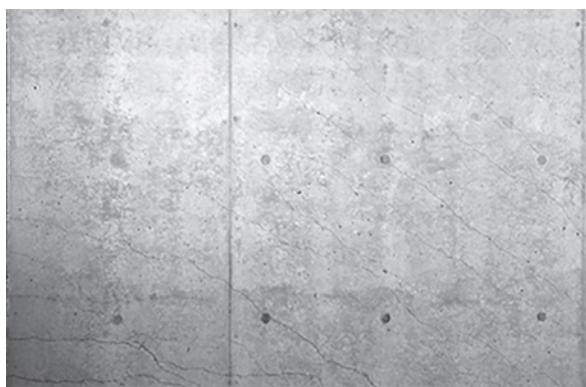


写真-1 近接目視によるコンクリート構造物のひび割れ点検状況

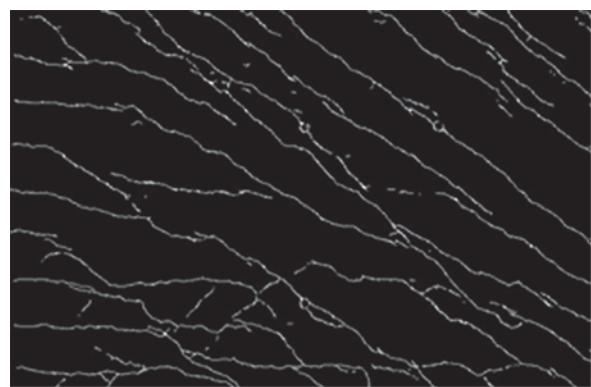
図-1 本技術によるコンクリートのひび割れ画像解析の処理手順¹⁾

いる。また、この実施により得られるアウトプットは、b) AI がひび割れと認識した画素を抽出したひび割れ候補領域画像、c) ひび割れ 1 画素ごとの幅に対して色分けしたひび割れ画像、d) ひび割れ幅ごとの長さ分布図、および e) ひび割れ 1 本ごとに区分したセグメンテーション画像である。セグメンテーション画像は、通常の近接目視点検で、点検員が 1 本のひび割れと評価する範囲ごとに複数の画素をグループ化して、ひび割れの最大幅ごとに色分けしたひび割れ画像のことであり、従来の近接目視点検で得られるひび割れ図に相当する。

一般的には、b) のひび割れ候補領域画像や、e) のセグメンテーション画像がコンクリートのひび割れ図とされるものであるが、本技術ではさらにひび割れの幅や長さをより正確に評価できる、c) ひび割れ 1 画素ごとの幅に対して色分けしたひび割れ画像や、d) ひび割れ幅ごとの長さ分布図を出力することができる。



撮影画像



AI により検出したひび割れ候補領域画像

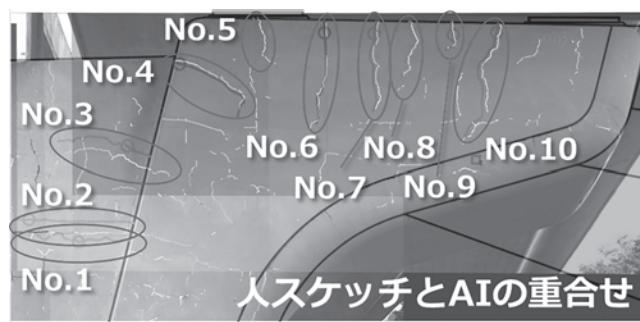
図-2 本技術による AI ひび割れ検出結果¹⁾

3. ひび割れ画像解析技術の特徴

(1) AI によるひび割れの自動検出の精度

図-2 に本技術による AI ひび割れ検出結果を示す。図-2 のような一般的なコンクリート面に対する画像では、ひび割れの検出率が 96.9% と高く、ひび割れの検出漏れが少ない特徴を有している¹⁾。また、図-3 に人と AI によるひび割れ抽出を重ね合せた結果を示す。ここでは、ひび割れ幅 0.2 mm 以上を検出対象としたが、人が検出したひび割れは AI でも全て検出されている²⁾。

このように、本技術での AI によるひび割れの検出精度が高いのは、画像全体から局所的なひび割れの有無を判断する画像処理機能と、さまざまひび割れパターンの学習データを用いた AI によるひび割れ抽出機能を組み合わせていることが要因として挙げられる。

図-3 人とAIによるひび割れ抽出を重ねさせた結果²⁾

(2) ひび割れ幅の自動算定の精度

ひび割れ幅の自動算定のために、ウェーブレット変換を用いた画像解析技術を開発した。これにより、本技術は類似技術に比べて、コンクリートの色合いや明るさの影響を受けにくく、さまざまな撮影環境で、正確にひび割れ幅を定量評価できる特徴を有している³⁾。具体的には、ウェーブレット変換により、画像上のひび割れと判断された画素ごとにウェーブレット係数が得られ、この係数とひび割れ幅には高い相関があることが確かめられている。そのため、本技術では画素寸法の1/4から2倍程度のひび割れ幅を精度よく推定できる³⁾。

表-1に人とウェーブレット変換によるひび割れ幅の比較結果を示す。これは、図-3に示した人とAIによるひび割れ抽出結果について、人が抽出した10本のひび割れそれぞれの最大幅について比較したものである。人による評価は近接目視でクラックスケールにより測定したもの、画像解析による評価は本技術のウェーブレット変換によるもので、それぞれ同じ位置のひび割れ幅について比較している。これによれば、両者のひび割れ幅の評価結果の差は、概ね0.1 mm程度の範囲にあり、実用上問題ないことがわかる²⁾。

表-1 人とウェーブレット変換によるひび割れ幅の比較結果²⁾

ひび割れ No.	最大ひび割れ幅 (mm)	
	近接目視	本技術
1	0.2～0.3	0.2～0.3
2	0.2～0.3	0.4～0.5
3	0.2～0.3	0.3～0.4
4	0.4～0.5	0.3～0.4
5	0.3～0.4	0.3～0.4
6	0.4～0.5	0.4～0.5
7	0.2～0.3	0.2～0.3
8	0.3～0.4	0.3～0.4
9	0.2～0.3	0.3～0.4
10	0.2～0.3	0.3～0.4

このように本技術では、図-1で示したとおりひび割れ幅について、①ひび割れ1本ごとの最大ひび割れ幅、②ひび割れ全体の平均ひび割れ幅、および、③幅ごとのひび割れ長さ分布が得られる。これは、ウェーブレット変換により、画素ごとのひび割れ幅情報を詳細に得ているためである。これに対して、類似技術では、ひび割れ1本ごとの最大幅のみ出力されるものがほとんどである。本技術により得られるひび割れ幅に関する詳細な情報は、ひび割れの経年変化を把握したい場合や、ひび割れ補修における注入材の設計数量を算定したい場合などに活用されている。

4. ひび割れ点検の効率化と技術の汎用性

コンクリート構造物のひび割れ点検について、本技術を使った場合と従来の近接目視による場合の点検費用を比較した場合、対象構造物の種類や配置、アクセス環境、撮影環境、および検出したい最小ひび割れ幅などによって、どちらが経済的になるかは異なる。総じてドローンを使った撮影が可能な環境では、本技術を活用することによるコスト縮減効果が得られる傾向にある。

写真-2に点検に要する人員と費用を比較したラーメン高架橋の外観を示す。比較条件は下記のとおりである。

- ・調査対象：ラーメン高架橋の柱、梁、床版下面、および高欄外側面の幅0.2 mm以上のひび割れ
- ・調査面積：5,101 m²
- ・調査方法：高所作業車を使った近接目視、および一眼レフカメラによる三脚撮影の2通り

図-4に高架橋床版下面のひび割れ図を示す。図-4は、写真-2で示した高架橋に対して本技術を適用



写真-2 点検に要する人員と費用を比較したラーメン高架橋の外観



図一4 高架橋床版下面のひび割れ図

した結果である。このようにひび割れが多く発生している構造物の点検においては、本技術を活用することの便益が高くなり、近接目視に要する人員と費用をそれぞれ100%とした場合に対して、本技術を適用した場合は、人員数で27%、点検費用で12%の縮減効果が認められた。

5. 適用実績

図一5は、道路橋橋脚のRC巻立て耐震補強工事の際に、耐震補強後に見えなくなる橋脚表面のひび割れを記録したひび割れ画像である。この工事では、橋脚断面の3次元計測も同時に実行して形状・寸法を3次元モデルとして表示するとともに、本技術を活用して得られたひび割れ図を3次元モデルに貼付して、ひび割れの分布を3次元で俯瞰できるように活用した事例である⁴⁾。

本技術は、AIによるひび割れ自動検出機能を付与した2020年7月から、2024年9月末までの期間に、橋梁、トンネル、ボックスカルバート、ダム堤体、LNGタンク外壁、建築建屋、擁壁、煙突などの点検で活用され、100箇所以上の構造物で、合計24万m²を超える適用実績が得られている。

このように本技術は、コンクリート構造物の種類や部材によらず、コンクリートのひび割れ点検に適用できる幅広い汎用性を有している。また、撮影に用いるデジタルカメラのメーカー・機種が異なっても、検出したい最小ひび割れ幅に対応した画質で撮影すれば、ほぼ同等の検出結果が得られる再現性も有している。さらに、図一5に示したとおり、本技術により得られたひび割れ図を3次元計測結果と組み合わせることで、ひび割れ点検結果を3Dマッピング表示することも容易であり^{4)~6)}、国土交通省が進めるi-Constructionにおける、維持管理のDX(Digital Transformation)の推進にも寄与できる。

図一5 本技術により得られたひび割れ図を3次元表示した例⁴⁾

6. おわりに

AIを用いたひび割れの自動検出機能、およびウェーブレット変換を用いたひび割れ幅の自動算出機能を有する「コンクリートのひび割れ画像解析t.WAVE(ティ・ドット・ウェーブ)」を開発し、コンクリート構造物の点検に実用化した。また、2020年7月からは点検事業者などへの提供も開始し、コンクリート構造物のひび割れ点検業務に広く活用されるようになっている。このような、実用性の高さと点検業務への適用実績が評価されて、t.WAVEは令和5年度土木学会技術開発賞を受賞するなど、技術的にも高い評価を受けている。

J C M A

【参考文献】

- 1) 本澤昌美、堀口賢一、野村伸生：AIを用いたコンクリートのひび割れ自動検出精度の検証と実用化に関する検討、大成建設技術センター報、第54号、55-1-55-7、2021
- 2) 本澤昌美、堀口賢一、野村伸生、上村勇太、橋口稔秀、古村 崇、岡部成行：ひび割れ画像解析クラウドにおけるAI自動検出精度の検証および適用事例、土木学会全国大会第79回年次学術講演会、VI-569、2024
- 3) 小山哲、丸屋剛、堀口賢一、澤健男：ガボールウェーブレット変換を用いたコンクリートのひび割れ画像解析技術の開発、土木学会論文集E2(材料・コンクリート構造)、Vol.68、No.3、pp.178-194、2012
- 4) 堀口賢一、本澤昌美、岡部成行：コンクリートのひび割れ画像解析結果の三次元表示への取組み、土木学会全国大会第75回年次学術講演会、VI-275、2020
- 5) 堀口賢一、本島貴之、押野善之、菜花良平、本澤昌美、野村伸生、広島隆司：大深度立坑の外観調査へのひび割れ画像解析技術の適用、土木学会全国大会第77回年次学術講演会、VI-323、2022
- 6) 堀口賢一、本澤昌美、野村伸生、上村勇太、本島貴之、押野善之、広島隆司、岡部成行、宮良正彦、菜花良平：大深度立坑のひび割れ点検の効率化に向けた撮影手法の開発、土木学会全国大会第78回年次学術講演会、VI-1117、2023

【筆者紹介】

堀口 賢一 (ほりぐち けんいち)

大成建設㈱

技術センター 社会基盤技術研究部 先端基盤研究室
主席研究員