

画像解析によるひび割れ自動検出手法について

(株)大林組 正会員 ○大島 優
正会員 富井 孝喜
正会員 青木 峻二

1. はじめに

近年、高架橋やトンネルなどの土木構造物を効率的に維持管理するため、画像からコンクリートのひび割れを自動検出する技術が開発されている¹⁾。しかし、従来のひび割れ自動検出技術は、目視による点検と比較してひび割れの検出率とひび割れ幅の計測精度が低い傾向にあった。加えて、一般的なカメラでは対象物に接近して撮影を行う必要があるため、撮影枚数が膨大となり、高所にある土木構造物を対象とする場合は高所作業車やドローンが必要となるなど課題を抱えていた。

そこで大林組は、富士フイルムが開発した画像解析技術と特殊な高性能カメラを組み合わせることで、コンクリートのひび割れをこれまで以上に高精度に、かつ短時間で自動検出する手法を確立した。本手法を用いることで、遠距離からでも微細なひび割れの撮影が可能となり、また1枚あたりの撮影面積が拡大したことで作業時間とコストが大幅に削減可能となった。本手法の確立に向けて行った富士フイルムとの共同実証では、従来は難しかった暗い場所でもひび割れ検出が可能であることを確認し、さらに、これまで実績のなかった曲面のひび割れ検出についてもその有効性を確認するなど、適用範囲の拡大を実現した。

本報文では、富士フイルムが開発中の画像解析技術を利用し、2017年6月～2018年3月に掛けて、現場での適用を目的として撮影方法や機材がひび割れの検出と幅の推定に与える影響について検証した。

2. ひび割れ自動検出手法の特長

以下に本手法の特長を示す。

(1) 高い精度でひび割れ幅と長さを自動検出

富士フイルムが開発した画像解析技術は、医療分野において毛細血管を検出する用途で開発した技術をもとに新規開発した、AIを利用したひび割れ自動検出技術である。また、大林組が本手法で使用する高性能カメラは、一般的なカメラと比較して撮像素子サイズが大きく、色の階調も多い特殊なカメラである。この特殊高性能カメラは、ひび割れ検出においてAIによる画像解析技術と相性が良いことを実証試験により確認している（3. 本手法の優位性についてにて後述）。

本手法を実際の土木構造物に試験適用した結果、ひび割れ幅0.05mm以上のひび割れを100%検出し、近接目視によるひび割れ幅の計測結果との適合率が90%以上となることを確認した。本手法を適用することで、専門の技術者の計測技量によらず一定の精度で点検ができ、経年比較によるひび割れの進展状況も正確に判断することが可能となる。

(2) 遠距離からの撮影を可能にし、作業時間とコストを大幅に削減

同程度の焦点距離のレンズを使用した場合、特殊な高性能カメラを使用することで、一般的な一眼レフカメラと比較して2倍ほど離れた位置からでもひび割れの撮影が可能となる。実証試験では、最大50m程度離れた位置から撮影した画像を使用し、0.2mmのひび割れを精度良く検出できることを確認した。これにより、これまで画像によるひび割れ検出が難しかった高架橋の床版や河川の橋脚などでも、地上から撮影した画像を用いてひび割れの検出が可能となった。また、足場や高所作業車が不要となることから、近接目視による点検作業と比べて安全なうえ作業時間とコストを大幅に削減できる特徴がある。一例として、幅4.5m×高さ2m×長さ25mのボックスカルバート内部を対象とした試験適用では、近接目視による点検作業に対して4分の1の

キーワード コンクリート、ひび割れ、画像解析、デジタルカメラ

連絡先 〒108-8502 東京都港区港南2-15-2 (株)大林組 生産技術本部 リニューアル技術部 TEL03-5769-1332

作業時間ではほぼ同精度の結果を得ることができた。

さらに、特殊高性能カメラは画素数が多いため、通常のデジタル一眼レフカメラと比較して1枚の撮影範囲が拡大した。2000万画素程度のカメラと比較した場合、撮影枚数を5分の1程度まで低減できるため、従来の自動検出手法と比較しても作業時間の削減が可能となった。

(3) トンネル曲面や暗い現場でも適用が可能

本手法では、従来ひび割れの自動検出が難しかったトンネル内部のような暗い場所や、トンネル曲面においても適用が可能となった。富士フイルムが開発した画像解析技術は、もともと高架橋の床版など平面を対象としていたが、富士フイルムと共同で実証を行った結果、曲面を撮影した場合でも精度良くひび割れが検出できることを確認した。撮影時の照明の有無や明るさの変化に検出精度が左右されず、さらに土木構造物の形状を問わないため、従来技術と比較し簡易で安定した点検が可能となる。

3. 本手法の優位性について

複数種類のカメラで撮影したひび割れ画像を富士フイルムが開発した画像解析技術で解析し、結果を比較することで、特殊高性能カメラを用いた本手法の優位性について検証を行った。

(1) 試験概要

屋外のコンクリート構造物壁面を対象とし、3種類のカメラを用いてひび割れの撮影及び解析を実施した。使用したカメラの性能を表-1に示す。カメラは、画素数、ピクセルサイズ（センサーサイズ/画素数）、色諧調を比較対象とした。ピクセルサイズは大きいほど画質が向上し、色諧調は14bitから16bitになることで色数が60倍以上となる。また、同条件下で写真を撮影する場合、特殊高性能カメラを使用することで画像1枚あたりの撮影範囲はデジタル一眼レフカメラ（1790万画素）の6倍程度まで大きくなる。

本試験では、幅0.1mmのひび割れ検出に必要とされる0.3mm/画素での撮影に加えて、撮影枚数の低減を目指すため、0.6、0.9mm/画素の条件でも撮影を行い、カメラによるひび割れ検出精度の比較を行った。試験時の設定は、ISO感度を200以下、F値を8とし、撮影距離は各カメラの仕様から0.3～0.9mm/画素の画像を得られる3～45mとした。なお、撮影距離は式(1)より算出した。

$$L = (R \times P \times F) / S$$

式(1)

ここに、

- L : 撮影距離(mm)
- R : 必要解像度(mm/画素)
- P : 横方向の画素数
- F : 焦点距離(mm)
- S : 横方向の撮像画面サイズ(mm)

表-1 使用したカメラの性能

	デジタル 一眼レフカメラ	ハイエンドデジタル 一眼レフカメラ	特殊高性能カメラ
画素数	1,790万画素 (5,184×3,456)	5,000万画素 (8,688×5,792)	10,000万画素 (11,608×8,708)
センサーサイズ	22.3×14.9mm	36.0×24.0mm	53.7×40.4mm
ピクセルサイズ(μm)	4.30	4.14	4.63
色諧調(bit)	14	14	16
焦点距離(mm)	15～55	70～200	55～240
撮影距離(m)	1.2～3.8	5.0～14.5	3.5～15.5
撮影範囲(m ²)	1.5×1.0m	2.6×1.7m	3.5×2.6m

注) 0.3mm/画素とした場合

(2) 試験結果および考察

試験結果を表-2 に示す。また、試験結果の判定基準を表-3 に示す。

まず、0.3mm/画素で撮影を行った画像で比較を行った。その結果、使用したすべてのカメラで 0.1mm 以上のひび割れが精度良く検出できており、誤検出も見られなかった（写真-1）。このことから、0.3mm/画素の条件で撮影ができれば、カメラの性能に関わらず高精度な解析結果が得られることを確認した。

次に、0.6、0.9mm/画素の撮影画像について検証した。特殊高性能カメラ以外のカメラでは、0.6mm/画素の段階でひび割れ幅の推定精度が著しく低下し、画像が不鮮明となる。0.9mm/画素では検出できないひび割れが目立った。一方で、特殊高性能カメラでは 0.9mm/画素でも幅 0.2mm 程度のひび割れを精度良く検出できることを確認した。写真-2 には、0.9mm/画素の条件で同じひび割れを撮影し、それぞれの画像からひび割れ検出を行った結果を示している。写真から、特殊高性能カメラでは検出できているひび割れが、その他のカメラでは検出できていないことが分かる。これは、一般的なデジタル一眼レフカメラと比較して、特殊高性能カメラがピクセルサイズの大きく色階調の多い高性能なセンサーを使用していることに起因すると考えられる。なお、ひび割れ幅が「-1.00」と表示される場合は、ひび割れ幅の推定ができないことを示している。

上記の試験結果から、幅 0.2mm 程度のひび割れであれば 0.9mm/画素の画像からも検出が可能であり、なおかつ画角が広く遠距離からの撮影も可能となる特殊高性能カメラはひび割れ自動検出技術と相性が良く、本手法の優位性が高いことを確認した。

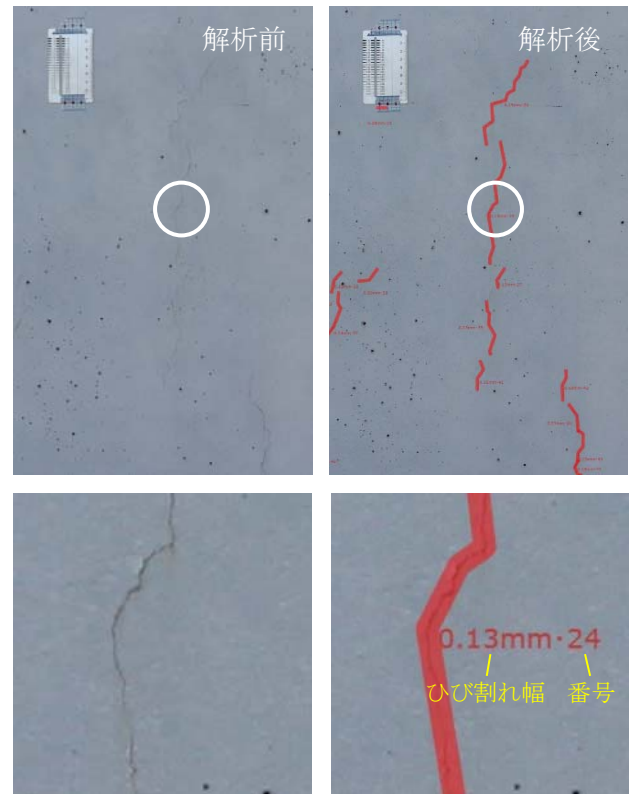


写真-1 0.3mm/画素での検出結果
(デジタル一眼レフカメラ 1,790 万画素で撮影)

表-2 試験結果

	ひび割れ	デジタル 一眼レフカメラ	ハイエンドデジタル 一眼レフカメラ	特殊高性能カメラ
0.3mm/画素	検出	◎	◎	◎
	幅推定	◎	◎	◎
0.6mm/画素	検出	○	○	◎
	幅推定	△	△	○
0.9mm/画素	検出	△	△	○
	幅推定	×	×	△

表-3 判定基準

	◎	○	△	×
検出	幅 0.1mm 検出	幅 0.2mm 以下 検出精度低下	幅 0.2mm 以下 検出不能	検出不能
幅推定	0.1mm まで推定	誤差 0.1mm 未満	誤差 0.1mm 以上	推定不能

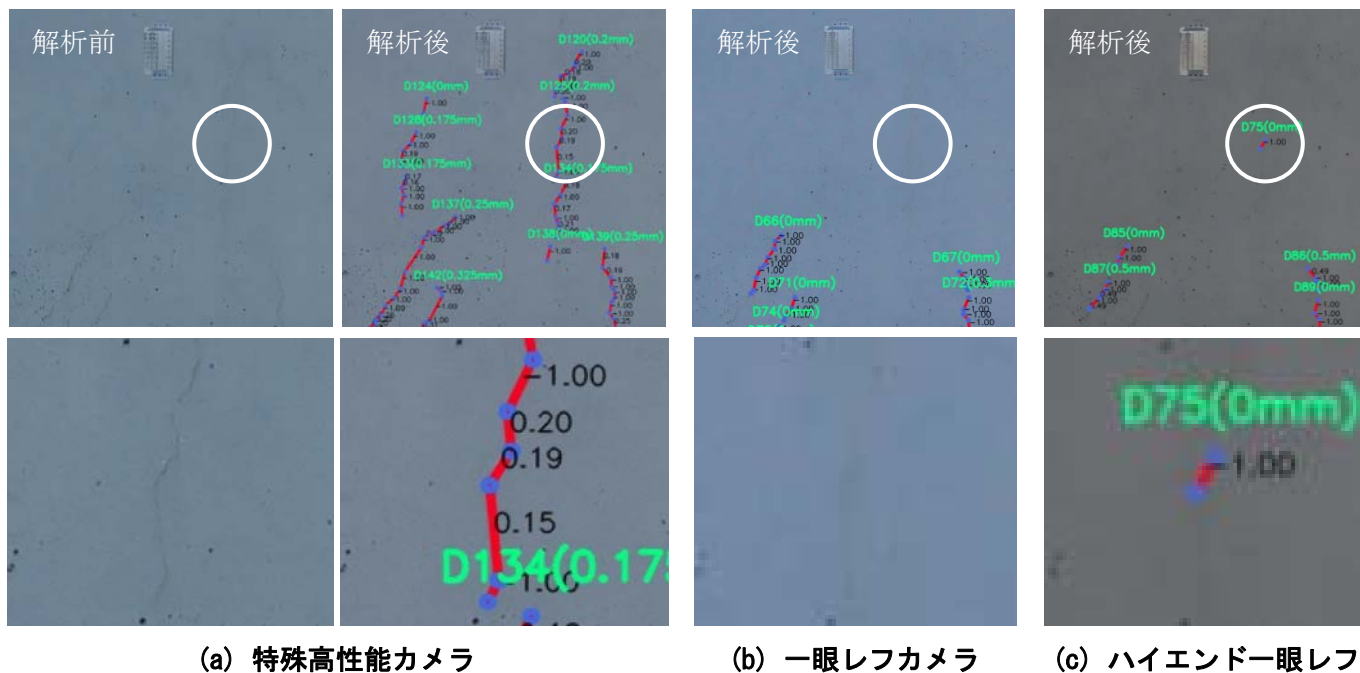


写真-2 0.9mm/画素での検出結果

4. 現場での適用事例

本手法の現場での適用事例を以下に示す。なお、以下の適用例ではすべて 0.3mm/画素の条件でひび割れ撮影を実施している。

(1) 道路橋橋脚

道路橋橋脚のコンクリート壁面(約 5×5m)を対象に本手法を適用した。適用結果を**写真-3**に示す。また、目視によるひび割れ幅との比較を**写真-4**に示す。

試験結果から、本手法の適用により幅 0.05mm 程度のひび割れまで精度良く検出できていることが確認できた。また、ひび割れ幅に関しても、目視で確認した結果と同等の精度が得られていることを確認した。



写真-3 道路橋橋脚への適用結果

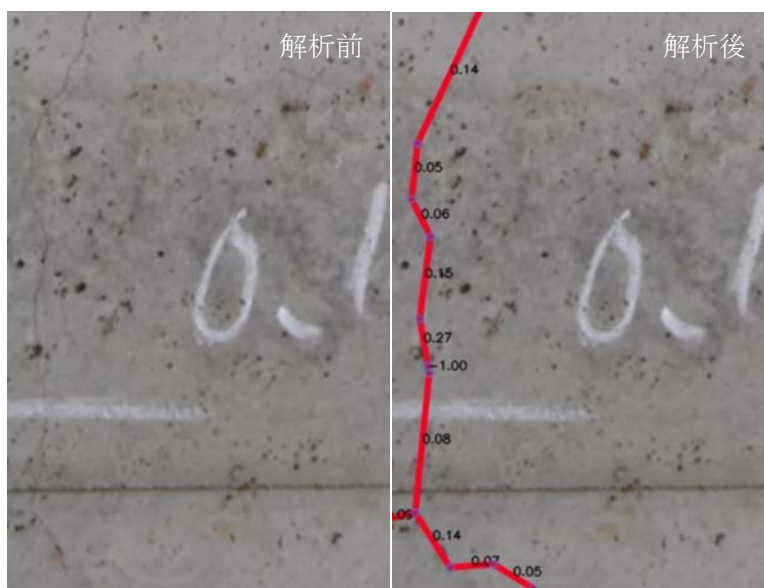


写真-4 目視によるひび割れ幅との比較

(2) トンネル覆工コンクリート

a) 排水トンネル

排水トンネルの覆工コンクリート（撮影距離約 3.5m）を対象に本手法を適用した。適用結果を**写真-5**に示す。また、目視によるひび割れ幅との比較を**写真-6**に示す。なお、トンネル内には照明がなかったため、充電式 LED 投光器で覆工面を照らしながら撮影を実施した。

試験結果から、一切の明かりがないトンネル曲面においても、LED 投光器を使用することで本手法が適用可能であることを確認した。また、既に補修をしたひび割れに関しては画像から検出されることはないが、同時にエフロレッセンス等の析出物によりひび割れが判別できない場合においても、画像から検出されないことを確認した（**写真-7**）。



写真-5 排水トンネルへの適用結果



写真-6 目視によるひび割れ幅との比較



写真-7 補修済み及び析出物のあるひび割れ

b) 道路トンネル

道路トンネルの覆工コンクリートを対象に本手法を適用した。トンネル内での撮影イメージを図-1に示す。また、適用結果を写真-8に示す。

トンネル内の照明は工事用の蛍光灯のみであり、撮影対象とした覆工面は 10 ルクス未満の照度であったが、本手法では 0.1mm 程度のひび割れまで精度良く検出できていた。また、覆工面には全面に結露が付着していたが、結露による検出精度の低下、誤検出は確認されなかった。

本現場では、比較としてハイエンドデジタル一眼レフカメラ（5000 万画素）を用いた撮影、及び画像解析も実施した。写真-8 と同じ位置を撮影し、画像解析を行った結果を写真-9に示す。

一眼レフカメラでは工事用照明のみでの撮影が難しかったため、別途充電式 LED 投光器を 2 つ用意し、撮影対象面の照度を 44 ルクス程度まで上げて撮影を行った。しかし、評価に用いた一眼レフカメラのオートフォーカスでは覆工面にピントを合わせて鮮明な写真を撮ることが難しかったため、特殊高性能カメラと比較して、ひび割れ幅の推定精度が低下する結果となった。

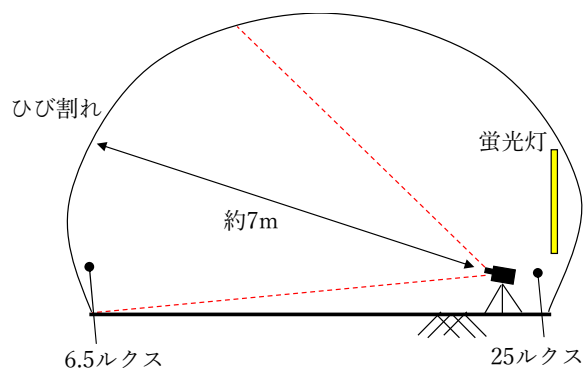


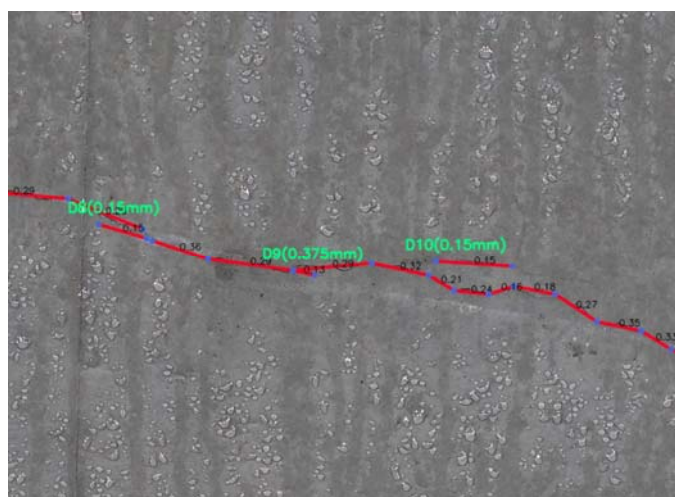
図-1 トンネル内での撮影イメージ



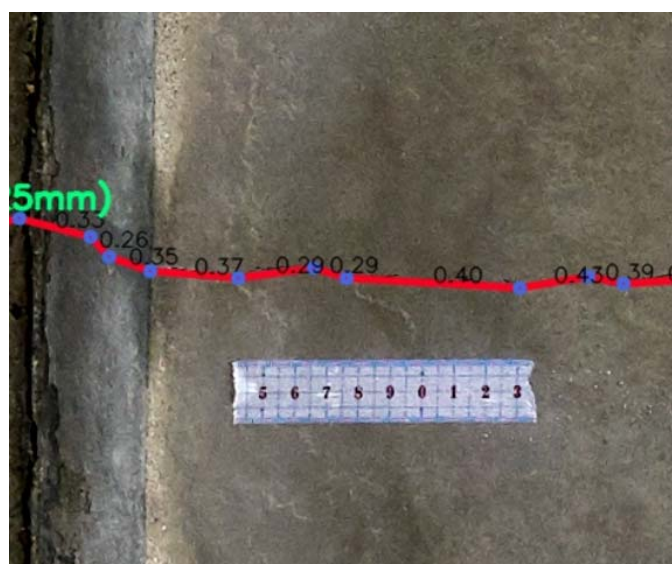
写真-8 道路トンネルへの適用結果



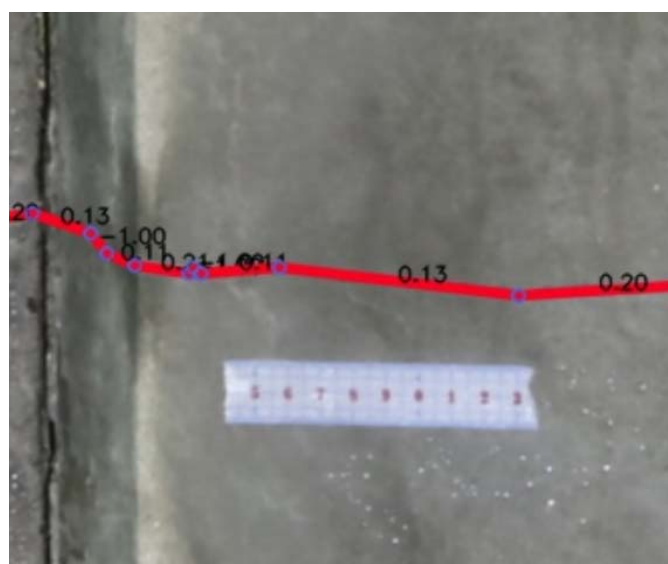
写真-9 ハイエンド一眼レフで撮影した結果



ここで、特殊高性能カメラとハイエンドデジタル一眼レフカメラで撮影した画像の比較を写真-10 に示す。特殊高性能カメラで撮影した画像は、工事用の蛍光灯のみ（約 6.5 ルクス）という条件下においても約 7m 先の覆工面に貼り付けたスケールの目盛りが確認できるほど鮮明であった。画像からひび割れ検出を行う場合、ひび割れの検出精度や幅の推定精度は写真の質に左右される。下の写真のように、同じ 0.3mm/画素の条件で撮影を行っても、カメラ次第で周囲の環境に写真の質が左右される可能性も考えられる。この適用事例では、特殊高性能カメラを使用することで撮影環境が写真の質に及ぼす影響を低減できることを確認した。この結果から、特殊高性能カメラを使用した本手法は優位性が高く、ひび割れの自動検出に適した手法であることが明らかとなった。



(a) 特殊高性能カメラ



(b) ハイエンドデジタル一眼レフカメラ

写真-10 カメラによる撮影画像の比較（ともに 0.3mm/画素）

5. まとめ

実証試験や現場での適用事例から、本手法を適用することで、10 ルクス未満となる暗部での撮影や曲面を撮影対象とした場合など、様々な条件下においても画像から高精度にひび割れの検出が可能であることを確認した。また、高性能カメラの使用により撮影枚数を削減し、さらに遠距離からの撮影を可能とした本手法は省力化の面でも優位性が高く、現場の生産性向上に寄与する手法であると考えられる。今後は本手法をひび割れ調査の標準技術として適用できるよう、様々な現場での適用事例を増やしていく予定である。

なお、本検討で用いたひび割れ検出技術は開発中のものであり、富士フイルムにおいて、ひび割れ検出や幅の推定の精度向上を継続している。最後に、本検討にあたり富士フイルム株式会社にご協力いただきました。ここに謝意を表します。

6. 参考文献

1) たとえば、竹田宜典，石関嘉一，山田守：画像処理によるコンクリート構造物のひび割れ計測，大林組技術研究所所報，No.79 2015