

報告 AI を用いたコンクリートのひび割れ自動検出技術の実用化に関する検討

堀口 賢一*1・本澤 昌美*2・野村 価生*2・北原 剛*3

要旨：新たに開発した AI を用いたコンクリートのひび割れ自動検出技術について、その実用性を検証した。本開発 AI 技術と類似のふたつの AI 技術とのひび割れ検出の精度を比べたところ、本開発 AI 技術ではより微細なひび割れを的確に検出できることが確かめられた。また、高架橋橋脚で試行したところ、従来の近接目視に対して、本開発 AI 技術によるひび割れ調査は、作業時間、作業費用ともに大きく縮減できることが確かめられた。ただし、型枠跡の誤検出も多いことから、今後の AI による学習での改善点も明らかとなった。

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

1. はじめに

近年、我が国の社会インフラ施設や建築物の老朽化対策は喫緊の課題であり、その対策を検討するために必要な現況調査の迅速化や効率化、調査結果の定量化などの要求が高まっている。特にコンクリート構造物のひび割れの調査は、構造物の劣化の有無やその程度を把握し、劣化原因の推定や耐久性を評価する上で欠かすことができない。このような社会的な要請に呼応して、内閣府を中心として 2014 年度から 2018 年度の 5 か年にかけて、第 1 期 SIP（戦略的イノベーション創造プログラム）が実施された。この第 1 期 SIP の研究開発課題のひとつには、インフラ維持管理・更新・マネジメント技術が挙げられ、その一環として、著者らは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²⁾（以下、ひび割れ画像解析技術）を中核とした、コンクリート構造物のひび割れ点検技術の開発を進めてきた^{3)~6)}。

筆者らは、SIP での取組みを通じて、ひび割れ画像解析技術によるひび割れの幅や長さの推定精度を向上させた。また、SIP での地域実装支援の取組みを通じて実用性を高め、コンクリート構造物のひび割れ調査への適用実績を積み重ねてきた。さらにその成果により、国土交通省の「点検支援技術性能カタログ（案）」に掲載して⁷⁾、本技術が広く社会で利用されることを図ってきた。

今回、これまでのひび割れ画像解析技術に、さらに AI（人工知能）を活用したひび割れの自動検出の機能を組み込んだ。また、これによるひび割れ自動検出の精度を検証するため、市販の 2 種類の AI によるひび割れ自動検出技術と比較した。さらに、開発した AI ひび割れ自動検出技術を高架橋橋脚のひび割れ調査で試行し、ひび割れの自動検出の精度とひび割れ調査の効率化の程度について検証した。本報文では、この AI を用いたコンクリ

ートのひび割れ自動検出技術の実用化に向けた検証結果について報告する。

2. ひび割れ画像解析技術の概要と特徴

2.1 ひび割れ画像解析の実施手順

図-1 にひび割れ画像解析の実施手順を示す。これまででは、まず、工程①で図-1a) の撮影画像に対して、ひび割れ位置の大まかなトレースを人が行い、図-1b) に示すひび割れ候補領域画像を作成する。次に、工程②でトレース範囲の画素単位でウェーブレット変換を実行し、得られるウェーブレット係数からひび割れ幅を推定して、画素ごとのひび割れ幅に応じて色分け表示した図-1c) のようなひび割れ画像を出力する。最後に、工程③でひび割れ幅ごとの長さを集計処理することで、図-1d) に示すひび割れ幅ごとの長さ分布図が得られる。

工程①において、これまで人はひび割れをトレースしているが、次の工程②において、その領域に限定してウェーブレット変換を行うことで、解析時間を短縮でき、また、ひび割れでない箇所の除去が不要となり、画像全体をウェーブレット変換するよりも効率的なためである。

2.2 ひび割れ画像解析技術の特徴

本手法では、撮影画像の 1 画素の大きさである空間分解能の 1/4 から 2 倍程度のひび割れ幅を推定できる。例えば、撮影した画像の空間分解能が 0.8mm /画素の場合に、幅 0.2mm 以上のひび割れ幅を推定できる。これは、画素ごとに得られるウェーブレット係数とひび割れ幅に高い相関があるためであり、ひび割れと判別された画素ごとにひび割れの幅を高精度に推定できる²⁾。そのため、図-1d) のようなひび割れ幅ごとにひび割れ長さを集計したヒストグラムや、ひび割れ総延長、平均ひび割れ幅、さらに単位面積当たりのひび割れ長さであるひび割れ密

*1 大成建設（株） 技術センター社会基盤技術研究部材工研究室主席研究員 博士（工学）（正会員）

*2 大成建設（株） 技術センター社会基盤技術研究部材工研究室研究員

*3 大成建設（株） 土木本部土木技術部 ICT 推進室 次長

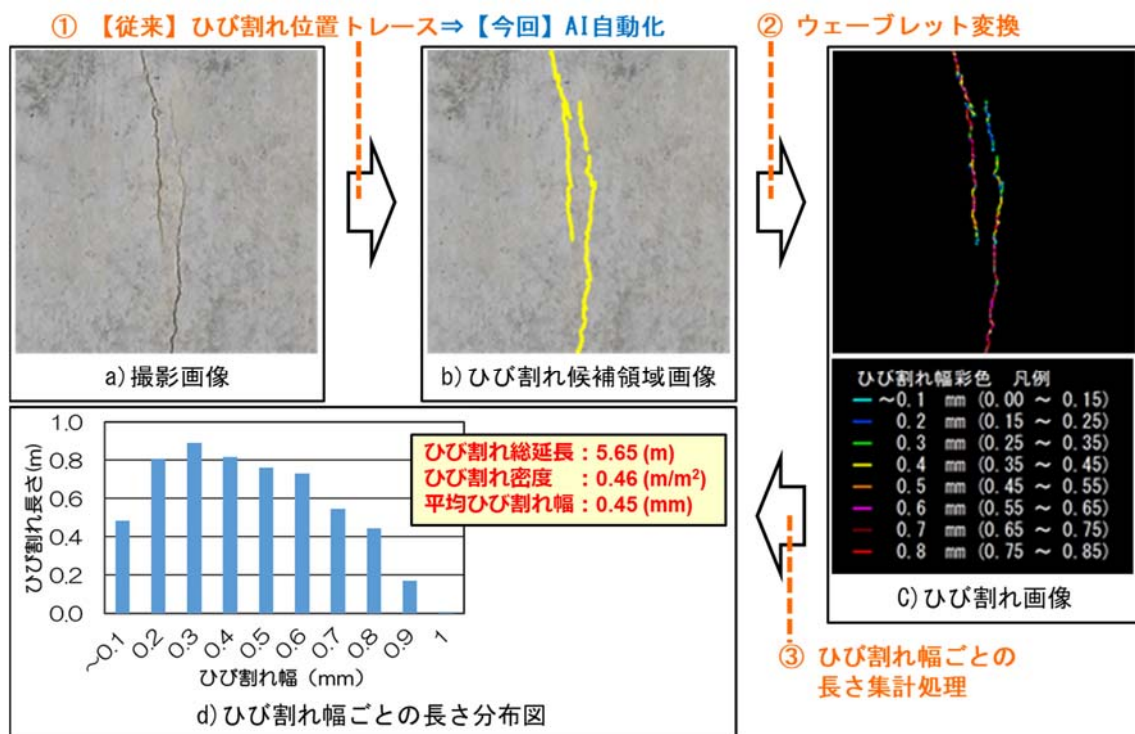


図-1 ひび割れ画像解析の実施手順

度を出力することも可能である。

今回、これまで工程①において、ひび割れの位置を人によるトレースで指定していたところを、AIによる自動検出に置き換えることで、ひび割れ検出の効率化と客観化を図った。このAIは、画像から直接深層学習によりひび割れを抽出し、幾何的特徴で一部フィルタリングするシステムで構成されている。

3. AIを用いたひび割れ検出精度の比較

3.1 再現率と適合率の定義

AIによるコンクリートのひび割れ自動検出の精度について、再現率と適合率を算定した。ここでの再現率と適合率は、人がひび割れと判別した画素とAIがひび割れと判別した画素に対する評価である。

図-2にAIによるひび割れ自動検出におけるTP/FP/TN/FNの概念図を示す。また、表-1にその定義を示す。図-2中の黒線は人がひび割れと判別した画素を表し、緑線はAIがひび割れと判別した画素を表している。また、青丸、赤丸、黒丸、黄丸は、黒線、緑線の重なりの有無を概念的に示しており、この色分けされた丸印は、それぞれTP、FP、TN、FNを示すものである。

再現率 (Recall)、適合率 (Precision) と TP/FP/TN/FN の関係は、それぞれ式(1)、式(2)の通りとなる。

$$\text{再現率 (Recall)} = \text{TP} / (\text{TP} + \text{FN}) \quad (1)$$

再現率は、人がひび割れと判別した画素に対して、AIもひび割れと判別した画素の割合



図-2 AIによるひび割れ自動検出におけるTP/FP/TN/FNの概念図

表-1 TP/FP/TN/FNの定義

AI \ 人	人がひび割れであると判断	人がひび割れでないと判断
AIがひび割れであると判断	● TP True Positive (真陽性)	● FP False Positive (偽陽性)
AIがひび割れでないと判断	● FN False Negative (偽陰性)	● TN True Negative (真陰性)

を示すものである。そのため、AIの検出漏れが多いと再現率は低く算出される。

$$\text{適合率 (Precision)} = \text{TP} / (\text{TP} + \text{FP}) \quad (2)$$

適合率は、AIがひび割れと判別した画素に対して、人もひび割れと判別した画素の割合を示すものである。そのため、AIの誤検出が多いと適合率は低く算出される。

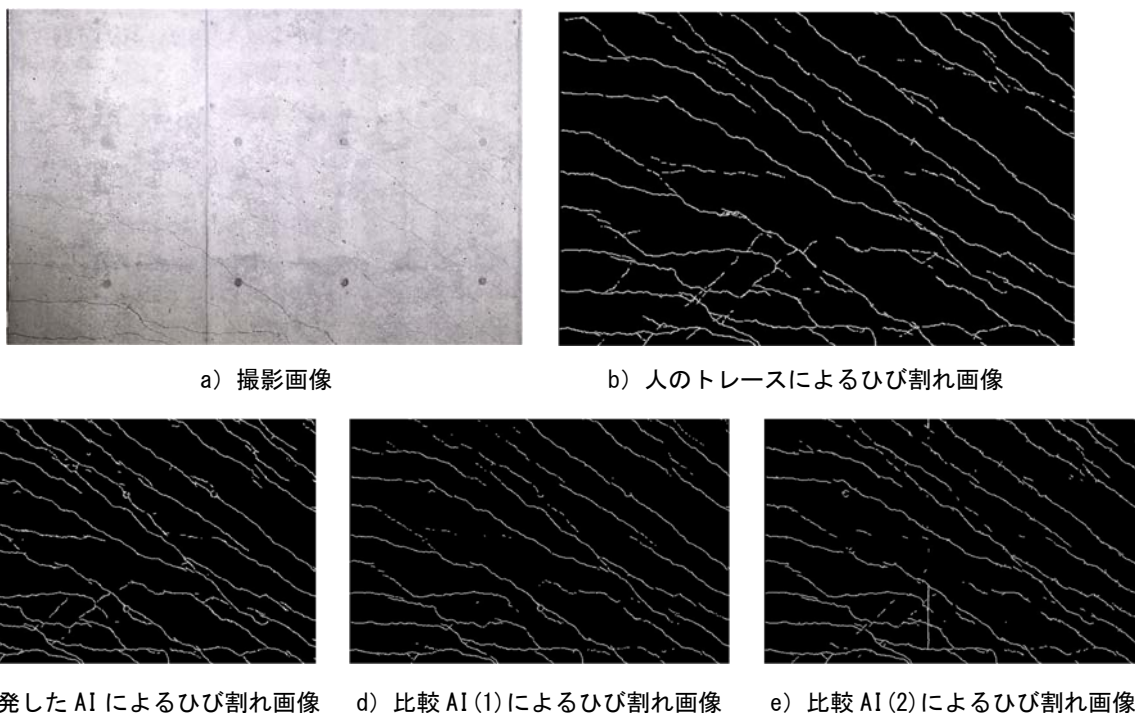


図-3 AIにより自動検出したひび割れ画像（空間分解能 0.4mm/画素の場合）

3.2 ひび割れ検出精度の比較

ひび割れ検出精度の比較は、今回開発した AI を用いたコンクリートのひび割れ自動検出技術（以下、本開発 AI 技術）と、他の類似の 2 つの AI ひび割れ検出技術（以下、比較 AI 技術(1), (2)）について、同じ撮影画像に対する再現率と適合率を算定して比較した。比較 AI 技術(1), (2)は、市販の AI によるひび割れ自動検出技術で、(1)については、その学習方法などの詳細は不明である。一方、(2)については、画像から輝度勾配のベクトルのパターンを算出し、これで深層学習することでひび割れを識別するシステムとされている。また、本開発 AI 技術により検出可能なひび割れの幅は、撮影画像の空間分解能の 1/4 程度であり、比較 AI 技術(1), (2)も同程度と考えられる。

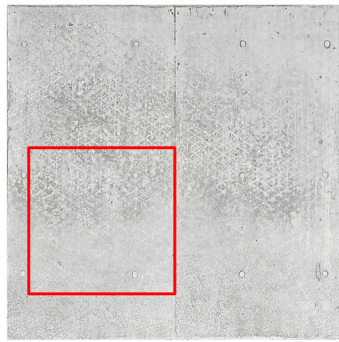
撮影画像は、空間分解能やコンクリート面の色合いなどが異なる 50 枚を選定した。図-3、図-4 に AI により自動検出したひび割れ画像 50 枚のうち 2 枚の結果を示す。それぞれの図には、a) 撮影画像、b) 人のトレースによるひび割れ画像、c) 開発した AI によるひび割れ画像、および d), e) に 2 つの比較 AI によるひび割れ画像を示している。また、表-2 に AI によるひび割れ画像の再現率と適合率を示す。表-2 には、図-3、図-4 の 2 枚のそれぞれの再現率と適合率と、全 50 枚の平均の再現率と適合率を示している。

図-3 の撮影画像の空間分解能は 0.4mm/画素で、コンクリート表面の汚れなどが少ない、比較的綺麗な面のひび割れである。また、クラックスケールによるひび割れ

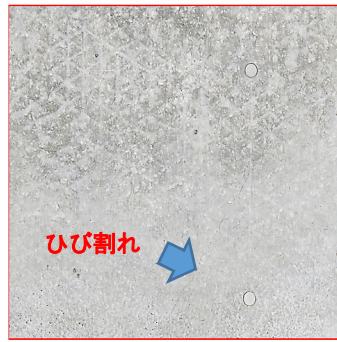
幅の最大値は 0.9mm であった。このようなひび割れの撮影画像に対して、本開発 AI 技術は比較 AI 技術(1), (2)に比べて再現率が高く、ひび割れの検出漏れが少ないことがわかる。ただし、適合率はやや低い。これは、本開発 AI 技術で型枠跡などの誤検出が多いことが主たる要因と考えられるが、一方で微細なひび割れのうち、人がトレースしていない画素を、本開発 AI 技術ではひび割れとして検出していることもひとつの要因と考えられる。

一方、図-4 の撮影画像の空間分解能は 0.6mm/画素で、コンクリート表面に剥落防止メッシュの筋模様が見られ、ひび割れと誤認識されやすいと思われる特徴のある面のひび割れである。また、画像解析によるひび割れ幅の最大値は 0.2mm であった。このようなひび割れの撮影画像に対して、本開発 AI 技術による再現率は 80.1%であるが、比較 AI 技術(1), (2)ではそれぞれ 6.7%, 3.8%と殆ど検出できていないことがわかる。

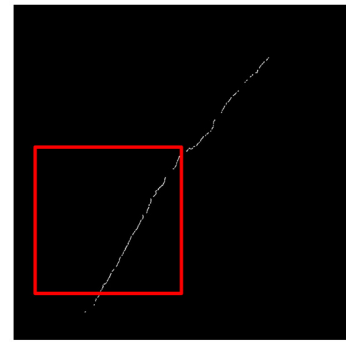
以上のことから、本開発 AI 技術は、比較 AI 技術(1), (2)に比べて、ひび割れをより的確に検出することができると評価した。このように本開発 AI 技術が他の比較 AI 技術に比べて、図-4 のような筋模様があるコンクリート面でも再現率が高いのは、AI における深層学習において、ひび割れ部分を正確に抽出し、切り分けて学習する教師データの質がよいこと、ならびに、ひび割れだけでなく、画像全体からひび割れの有無を判断する機能を導入していることが理由として考えられる。



a-1) 撮影画像



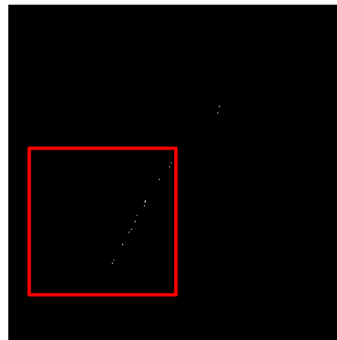
a-2) 撮影画像（赤枠拡大）



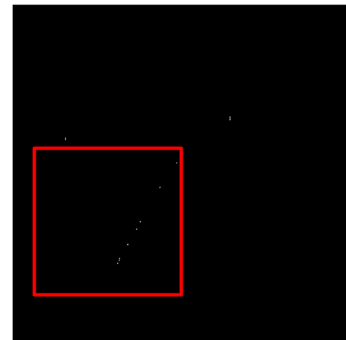
b) 人のトレースによるひび割れ画像



c) 開発した AI によるひび割れ画像



d) 比較 AI (1) によるひび割れ画像



e) 比較 AI (2) によるひび割れ画像

図-4 AI により自動検出したひび割れ画像（空間分解能 0.6mm/画素の場合）

表-2 AI によるひび割れ画像の再現率と適合率

画 像	本開発AI技術		比較AI技術(1)		比較AI技術(2)		空間分解能 (mm/画素)
	再現率	適合率	再現率	適合率	再現率	適合率	
図-3	96.9	81.2	66.8	95.3	77.8	87.5	0.4
図-4	80.1	52.7	6.7	85.0	3.8	51.2	0.6
50枚平均	71.4	36.8	35.0	56.5	21.8	47.1	0.1~0.6

4. 高架橋橋脚での試行

次に、本開発 AI 技術を実際の高架橋の橋脚のひび割れ調査で試行し、ひび割れ検出の精度や作業性向上の効果について検証した。

4.1 試行内容

(1) 試行現場と撮影条件の概要

写真-1 にひび割れ検出の精度や作業性向上の効果について検証した高架橋橋脚の外観を示す。試行対象の橋脚は、地中埋設部分を除き地上から高さが 6.5~7.5m、正面の幅が 5.0~16.5m、側面の幅が 3.0m である。また、正面の面積は 70m² 程度、側面の面積は 30m² 程度で、橋脚 1 本あたりの面積は合計 200m² 程度である。以上のほぼ同一の形状寸法の 4 つの橋脚で試行した。

写真-2 にひび割れ画像の撮影状況を示す。画像の撮影は、デジタル一眼レフカメラ（有効画素数 6,100 万画素）を三脚に固定して地上から行った。また、画像の空間分解能は、0.50~0.55mm/画素の範囲になるように撮影した。これは、撮影画像の 1 枚あたりの画角が縦 3m×横 5m 程度で、本ひび割れ画像解析技術において、幅 0.2mm



写真-1 高架橋橋脚の外観

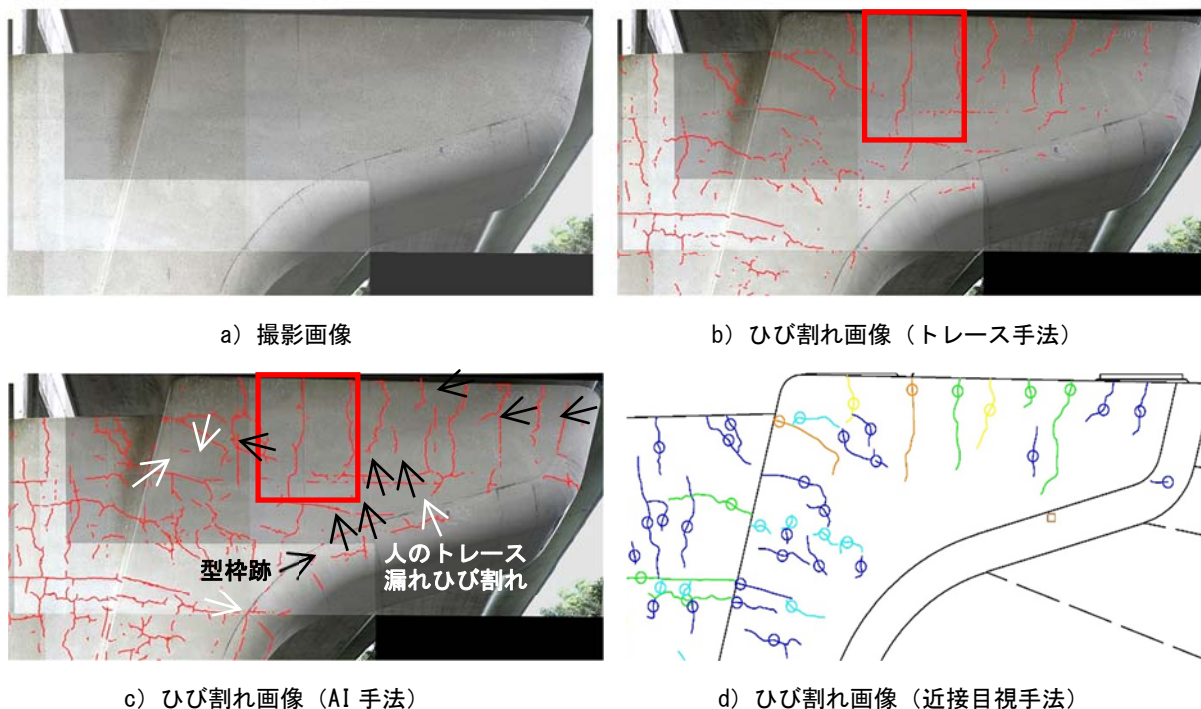


写真-2 ひび割れ画像の撮影状況

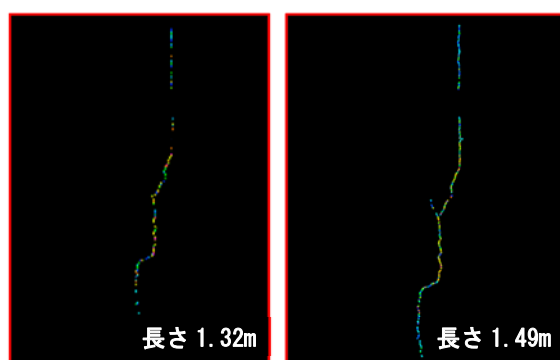
以上のひび割れをほぼすべて検出できる撮影条件である。

(2) ひび割れの検出手法

ひび割れの検出は、(1) 撮影画像上で人がひび割れをトレースする手法（以下、トレース手法）、(2) 撮影画像から本開発 AI 技術でひび割れを自動検出する手法（以



図－5 橋脚の撮影画像とひび割れ画像（橋脚 1 の上半右半分）



a) トレース手法 b) AI 手法

図－6 ひび割れ幅と長さの比較（橋脚 1）

下、AI 手法)、および(3) 橋脚表面に人が近接して目視によりひび割れをチョーキングして図面を作成する手法（以下、近接目視手法）の 3 通りで行った。また、ひび割れ幅と長さの定量評価は、トレース手法と AI 検出手法では、本ひび割れ画像解析技術を用いて行った。一方、近接目視手法では、ひび割れ幅はクラックスケールで測定し、ひび割れ長さはコンベックスで計測した。

4.2 試行結果

(1) ひび割れ検出の精度

図－5 に橋脚の a) 撮影画像と b) ひび割れ画像（トレース手法）、c) ひび割れ画像（AI 手法）、d) ひび割れ画像（近接目視手法）を示す。a) 撮影画像は、分割撮影した画像をあおり補正して合成したものである。4 本の橋脚（橋脚 1～橋脚 4）についてひび割れ図を作成したが、ここでは橋脚 1 の上半右半分の撮影画像と 3 つの手法に

表－3 ひび割れ幅と長さの比較

橋 脚	トレース手法		AI 手法		近接目視手法	
	長さ (mm)	幅 (mm)	長さ (mm)	幅 (mm)	長さ (mm)	幅 (mm)
橋脚1	1.32	0.50	1.49	0.40	1.35	0.50
橋脚2	3.06	0.80	2.55	0.90	2.20	0.80
橋脚3	2.23	0.90	2.08	0.80	1.70	0.50
橋脚4	0.38	0.60	0.45	0.50	0.50	0.40

よるそれぞれのひび割れ画像を示す。

図－6 に橋脚 1 のひび割れのうち、図－5 に赤枠で囲った 1 本について、トレース手法と AI 手法のひび割れ幅と長さを比較して示す。また、表－3 に橋脚 1～橋脚 4 について、3 通りの手法でひび割れ 1 本を抽出して長さと幅を比較した結果を示す。なお、ここでのトレース手法と AI 手法によるひび割れ幅は、図－1 に示したようなひび割れ幅ごとのひび割れ長さのヒストグラムにおいて、ひび割れ幅の小さい方から長さを累積して、ひび割れ全長の 90%の長さに該当する幅とした。これは、ひび割れではないコンクリート表面上の気泡などの空隙の幅も評価しており、これを排除するためである。なお、近接目視手法では、人が最大幅と判断した位置のひび割れ幅をクラックスケールで測定した。

3 つの手法を比べると、トレース手法と AI 手法は幅、長さともにほぼ同じに評価されている。一方、近接目視手法では、幅は点検員が最大と主観的に判断しているため、橋脚 3 では大きく違っている。また、近接目視手法では、長さを直線的に計測しているため、折れ点の多い

表-4 橋脚のひび割れ画像の再現率と適合率

橋 脚	正 面		側 面		全 面	
	再現率	適合率	再現率	適合率	再現率	適合率
橋脚1	78.9	52.6	69.0	31.2	74.0	41.9
橋脚2	74.3	57.2	68.7	37.9	71.5	47.6
橋脚3	74.6	45.8	79.0	40.8	76.8	43.3
橋脚4	79.3	31.6	80.4	34.7	79.9	33.2
平 均	76.8	46.8	74.3	36.1	75.5	41.5

ひび割れほど短くなる傾向が見られる。

表-4 に橋脚のひび割れ画像の再現率と適合率を示す。再現率は71.5～79.9%, 平均75.5%, 適合率は33.2～47.6%, 平均41.5%であった。適合率が低い要因として、図-5 中に黒矢印で示した型枠跡の誤検出が AI で多いことが考えられ、さらに、図-5 中に白矢印で示した人がトレースしていないひび割れを、AI が検出していることの影響が考えられる。このような点が、今後の本開発 AI による学習での改善点である。また、コンクリート構造物のひび割れを評価する上で、妥当な再現率や適合率については、今後検証を進めていきたい。

(2) 作業性向上の効果

橋脚 1～橋脚 4 について、3 つの検出手法によるひび割れ調査に要した作業時間と作業費用を比較した。トレース手法と AI 手法については、現地での画像撮影、室内でのあおり補正、画像合成、ひび割れ画像解析、ならびにひび割れ図作図までの作業を対象とした。一方、近接目視手法については、現地での高所作業車上でのひび割れのチョーキングと画像撮影、および室内でのあおり補正、画像合成、画像上のチョーキングのトレース、ならびにひび割れ図作図までの作業を対象とした。近接目視手法では、現地でチョーキングを図面に起こすのではなく、現地で撮影した画像上のチョーキングを室内で人がトレースする方法を採った。これは、ひび割れ画像の対比も目的としたことから、両手法によるひび割れの位置をできる限り正確に合わせることを意図したものである。

本試行の範囲において、トレース手法に対する AI 検出手法の作業時間比率と作業費用比率はともに、4 橋脚平均で47%、即ち、AI 検出により作業時間と費用を53%縮減できた。ただし、現状では型枠跡などの誤検出により適合率が低いと考えられることから、誤検出箇所を人が消すなどの作業を併用するのが現実的である。しかし、最初から人が全てトレースするのに比べると格段に効率化は図れているため、今後は人による部分的な追加トレースや削除の作業時間や作業費用も加味して検証したい。

5. まとめ

新たに開発した AI を用いたコンクリートのひび割れ自動検出技術について、その実用性を検証したところ、以下の結果が得られた。

- (1) 本開発 AI 技術と類似のふたつの AI 技術でのひび割れ検出の精度を比べたところ、本開発 AI 技術ではより微細なひび割れを的確に検出できることが確かめられた。
- (2) 橋脚での試行結果から、従来の近接目視に対して、本開発 AI 技術によるひび割れ調査は、作業時間、作業費用ともに大きく縮減できることが確かめられた。ただし、型枠跡の誤検出も多いことから、今後の AI による学習で改善すべき点も確かめられた。

謝辞

高架橋橋脚での画像撮影ならびにひび割れ画像解析の実施に際しては、中日本高速道路（株）東京支社横浜保全・サービスセンターに多大なご協力を頂いた。ここに厚く謝意を表します。

参考文献

- 1) 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP : エスアイピー) : <https://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/> (閲覧日 : 2021 年 1 月 12 日)
- 2) 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
- 3) 鈴木三馨, 本澤昌美, 堀口賢一, 坂本淳 : 遠方や狭隘部の撮影技術の開発とひび割れ画像解析技術の高度化, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.1855-1860, 2017.7
- 4) 堀口賢一, 鈴木三馨, 本澤昌美, 坂本淳 : 画像解析技術を用いた遠方からの床版ひび割れ定量評価システムの構築, コンクリート工学, Vol.56, No.1, pp.106-111, 2018.1
- 5) 堀口賢一, 本澤昌美, 岡部成行, 富山潤 : ドローンによる撮影画像を用いたコンクリートのひび割れ点検, コンクリート工学, Vol.57, No.9, pp.687-692, 2019.9
- 6) 富山潤, 須田裕哉, 崎原康平, 山田義智, 堀口賢一, 岡部成行 : UAV 撮影画像の解析技術を活用した離島架橋のひび割れ点検に関する考察, 土木学会論文集 F4 (建設マネジメント), Vol.75, No.1, pp.11-23, 2019
- 7) 点検支援技術性能カタログ(案), 国土交通省, 2020.