

# 護岸のひび割れ検出 AI の作成と オルソ画像を活用したひび割れ幅の評価

吉田 龍人<sup>1</sup>・藤井 純一郎<sup>1</sup>・大久保 順一<sup>2</sup>・天方 匡純<sup>1</sup>

<sup>1</sup>正会員 八千代エンジニアリング株式会社 (〒111-8648 東京都台東区浅草橋 5-20-8)

E-mail: ry-yoshida@yachiyo-eng.co.jp

<sup>2</sup>非会員 八千代エンジニアリング株式会社 (〒111-8648 東京都台東区浅草橋 5-20-8)

現在の河川の点検は、目視を基本とした定性的な管理が行われているため、定量的かつ合理的な点検手法への転換が求められている。この問題を受け、筆者らは AI を用いた護岸のひび割れ検出に取り組み、これまでに自動検出の可能性を示した。

そこで本論文では、AI 検出結果の幅をピクセル単位で計測する手法と、SfM 解析によって空間解像度を統一した画像生成技術を併用することで、ひび割れ幅を実寸で自動計測する手法について検討した。その結果、本手法によって従来の人手の作業では困難であった網羅的なひび割れの計測が可能となった。

**Key Words:** Deep Learning, SfM, Maintenance, Fusion Net, Monitoring, Orthophoto

## 1. 始めに

都市部を流れる掘り込み河道と呼ばれる河川形態の河道法面には、一般的にコンクリート護岸が施工されており、変状や損傷の状況に応じて、維持管理が行われる。

一方で、現在のコンクリート護岸の点検は、河川技術者の目視点検を基本とする定性的な管理が実施されているため、技術者が減少する昨今においては、これまでの経験工学に基づいた手法から、定量的かつ合理的な点検手法への転換が求められている。

この課題を受け、筆者ら<sup>1,2)</sup>は点検および評価の自動化に向けた技術開発に取り組んできた。既往の研究では、護岸のひび割れ検出 AI を作成し、護岸のひび割れ自動検出の技術的な可能性を示した。

ただ、護岸のひび割れに基づく健全度評価は、ひび割れの幅を評価指標の1つとしているため、単にひび割れを検出し、ピクセルをカウントするだけでは、ひび割れ検出 AI を従来の点検に代替することはできない。

そこで本論文では、新たな区間でのひび割れ自動検出 AI の作成結果を示すとともに、画像上の空間解像度を統一したオルソ画像を作成し、オルソ画像のひび割れ検出結果を実寸評価する手法について示す。

## 2. 従来の護岸点検手法

国土交通省の堤防等河川管理施設及び河道の点検・評価要領<sup>3)</sup>によると、現在の河川の点検は目視点検を基本とし、必要に応じてスケール等による計測を行うことが定められている。

さらに、この計測結果に基づき、健全度評価を実施する必要がある。同点検・評価要領では、健全度には異常無し、要監視、予防保全、措置の4つの区分が設けられており、本研究で対象とする護岸では、幅 2mm を越えるひび割れが存在する場合、予防保全と評価される。

以上より、従来の点検では、あるひび割れに対して、点検者が最大幅であると判断した1箇所のひび割れ幅によって健全度を定めていると言える。

そのため、従来の点検では、点検基準が点検者の主観に影響し、評価の客観性が担保できないだけでなく、健全度評価結果が局所的なひび割れの大きさに依存しているという問題がある。つまり、現状の手法では、過小評価する傾向にある点検者が計測した最大 1.9mm 幅のひび割れが存在する平均ひび割れ幅の大きな区間よりも、過大評価する傾向にある点検者が計測した最大 2.0mm 幅のひび割れが存在する平均ひび割れ幅の小さな区間が優先して補修されてしまう恐れがある。

したがって、より適切な維持管理のためには、客観性と合理性を兼ね揃えた点検手法の開発が求められる。

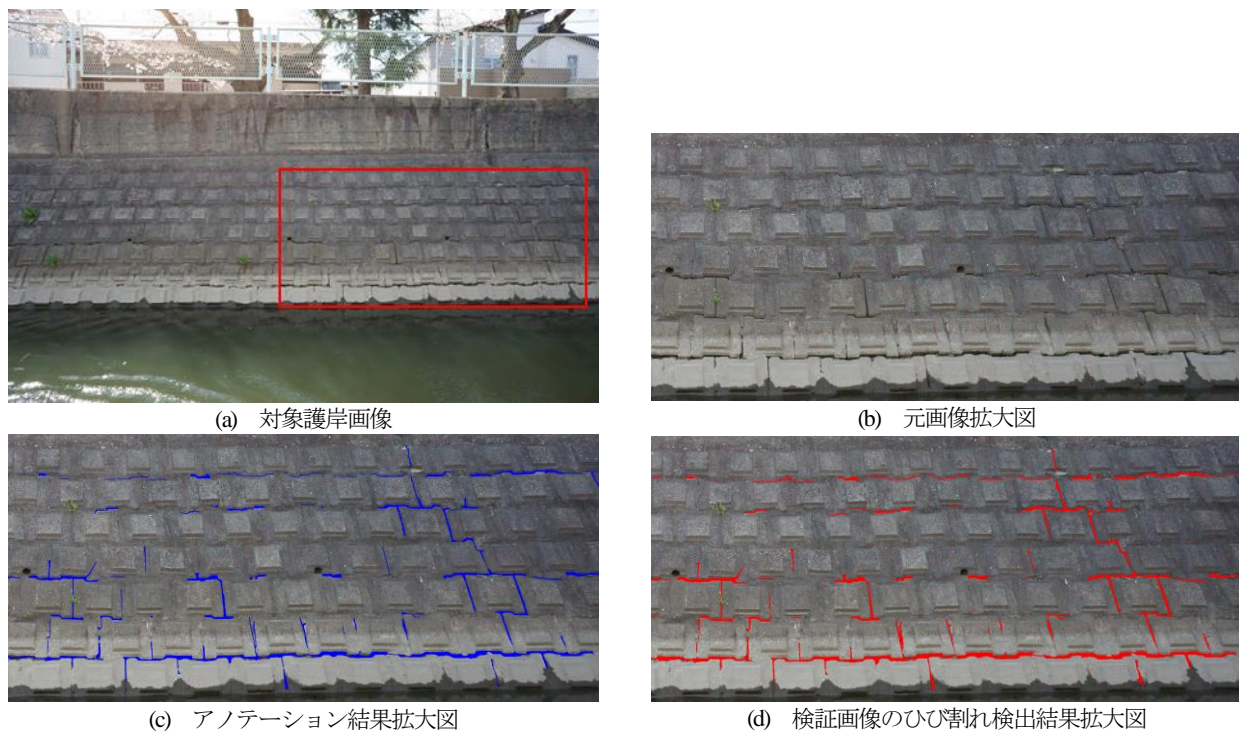


図-1 対象護岸画像

### 3. 護岸ひび割れ検出 AI の作成

#### (1) 教師画像の収集

斎藤<sup>2)</sup>らは、ひび割れを自動検出するモデルの学習方法および結果を示したが、これまでのデータセットで作成したモデルでは、未学習の意匠の護岸ブロックにおけるひび割れ検出精度が低いという問題があった。そこで、本論文では研究の対象となる護岸の画像データを改めて収集し、新たに学習を実施した。

実際に収集した画像は、図-1(a)に示す意匠の護岸画像である。枚数は50枚で、同じ意匠の護岸が続く約1.7km（左右岸で3.4km）の河川区間からひび割れの多数存在するものを選定した。画像サイズは6000px×4000pxである。この50枚の画像を元に、画像中のひび割れに該当するピクセルを抽出したアノテーション画像を作成した。図-1(b)のアノテーション結果が図-1(c)であり、この図の青いピクセルがひび割れである。

なお、アノテーションはピクセルレベルで拡大した場合でも判別可能なひび割れを対象としており、品質確保のため、河川技術者による精査を行った。

#### (2) ひび割れ検出 AI の学習

##### a) ひび割れ検出モデル

本研究では、既往の研究<sup>2)</sup>で提案した FusionNet<sup>4)</sup>をベースにカスタマイズしたモデルを使用した。学習にあたって、学習率等の基本的なパラメータは、既往研究で用いた値を踏襲した。

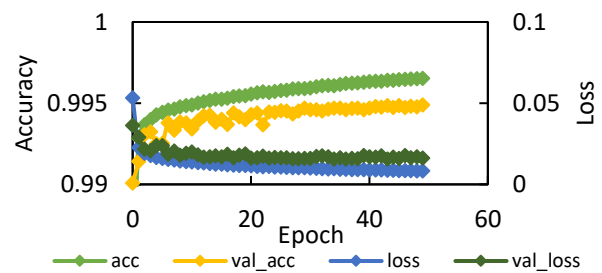


図-2 学習曲線

##### b) 学習結果

上述のモデルで、50枚の教師画像のうち、8割を学習用、2割を検証用として無作為に分割し、学習を行った。教師画像の母数が小さいため、本来は学習画像と検証画像の内容を変えた複数のケースで学習精度を検証すべきだが、教師画像が連続した区間の撮影結果であり、画像の類似性が高いこと、教師画像を分割したのちに224pxに細分化されることを理由に、データの分布に偏りは少ないと判断し、学習は1度のみの試行とした。なお、エポック数は50エポックである。

学習によって得られた学習曲線を図-2に示す。図-2より検証画像の accuracy および loss である val\_acc, val\_loss が概ね収束したことが確認できる。50エポック目のモデルで、検証画像10枚から求めた mIoU は0.65であり、汎化性は十分得られたと判断した。また同モデルによって検証画像のひび割れ検出結果を図-1(d)に示す。これにより、図-1(c)で与えたアノテーションと概ね同じ位置を検出していることが確認できた。

## 4. ひび割れの検出と評価

### (1) 検出用画像の作成

#### a) オルソ画像の作成

デジタルカメラで護岸を撮影したオリジナルの画像では、画像全体で空間解像度を一定に保つことはできないため、AIで抽出したひび割れの幅を実寸で計測できない。

そこで、SfM解析<sup>5)</sup>による護岸の3次元形状の再現と正射変換により、空間解像度を統一したオルソ画像の作成を行った。

図-3は、研究対象区間のうち、ある橋梁間の約125mのオルソ画像を示している。この画像は、護岸から約5mの位置で撮影した6000px×4000pxの214枚の画像によって2mm/pxの空間解像度で作成した。元となる214枚の画像は、水平方向のオーバーラップ率が90%以上、鉛直方向のオーバーラップがほぼ0%である。

なお従来点検の評価基準である幅2mmの計測を行う場合、より細かな解像度が必要となるが、計測可能なひび割れ幅の下限値は、単に画像の解像度に依存することから、本研究では簡単のため2mm/pxとした。

#### b) オルソ画像の空間再現精度の検証

SfM解析では、解析時に画像に3次元座標を付与することで、空間の再現精度が向上する。そこで本研究では、撮影カメラに搭載したGPSの座標だけを付与したオルソ画像と、GPS座標に加えて、現地測量によって得た地上調整点(GCP)を付与したオルソ画像を作成し、図-3に示す上流および下流の2点間ABの水平距離によって3次元空間の再現精度を比較した。なおGCPには、護岸の上流側1点、中央2点、下流側2点の計5点の座標を用いた。

表-1はそれぞれの手法で、水平距離を計測した結果を示している。表よりGCPを解析に組み込むことで誤差が1.381mから0.085mまで低減できたことが分かる。

以上より、GPS座標のみでも、区間全体に対する誤差が1.11%と概ね良好な結果が得られるため、簡易的な計測を行う場合はGCPは不要であると考えた。一方、GCPを付与することで0.07%まで誤差を低減できるため、精緻な計測が必要な際は、GCPを設定すべきであると考えた。

#### c) ひび割れ計測精度の検証

現地でのひび割れ計測結果と、同位置のオルソ画像上のひび割れ幅を比較することで、局所的なひび割れ計測精度の検証を行った。なお、用いたオルソ画像はGCPを付与したもので、比較の際は2mm/pxとして、画像側の計測結果をmm単位に換算した。

検証の際は、上流・下流、護岸の上部・下部、縦方向・横方向のひび割れを満遍なく選定し、幅2mm以上のひび割れを合計29点を計測した。図-4は実際にオルソ画像上でひび割れを計測した例である。

図-5は現地でノギスを用いてひび割れを計測した結果を横軸に、オルソ画像上でひび割れを計測した結果を縦軸にプロットした散布図である。

図より、近似線の傾きが1.04であることから、現地計測値と画像計測値がほとんど同じ値であることが分かる。特に、実寸10mm以上の計測結果は安定し、概ね2mm程度の誤差で計測ができた。一方で、実寸10mm以下の計測結果は値のばらつきが大きくなり、実寸より過大に評価される傾向にあった。

ここで、10mm以上のひび割れ計測において、2mm程度の誤差が生じた理由は、空間をメッシュで区切って表現されるデジタル画像の特性により、解像度レベルの誤差が生じたためだと判断した。この誤差はメッシュの区切りの位置と、ひび割れと護岸ブロックの境界線の位置の関係によって、最大で±2pxは生じるものとする。

また10mm以下のひび割れ計測においてばらつきが増加した原因としては、上述の理由に加え、カメラの性能や撮影時のブレなどがあり、ピクセルレベルでの撮影誤差が生まれてしまうためだと推察した。

上述の誤差を考慮すると、2mm±0.2mm/pxの精度で計測するためには、0.1mm/px程度の解像度で画像を撮影する必要があると考える。なお、0.1mm/pxの解像度はあくまで計測のために必要な解像度であり、2mm/pxの解像度でも1mm程度までのひび割れは視認および検出可能であった。

表-1 地点ABの水平距離の計測結果

計測対象	長さ (m)
現地測量	124.609
オルソ画像 (GPS)	125.990
オルソ画像 (GPS+GCP)	124.524



図-3 オルソ画像

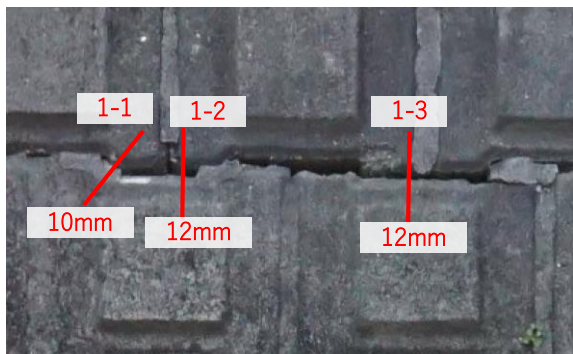


図-4 ひび割れ計測例

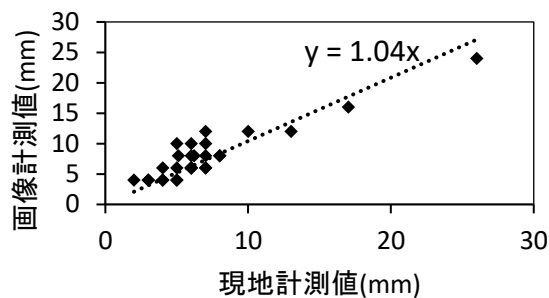
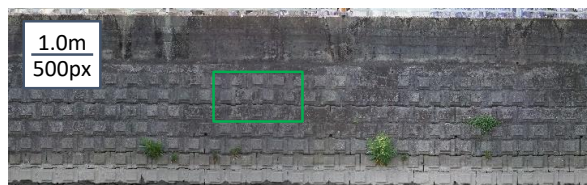
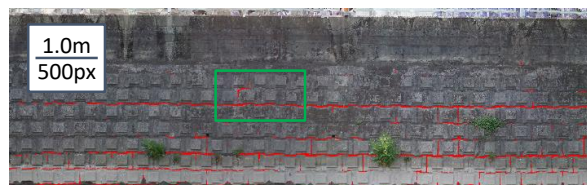


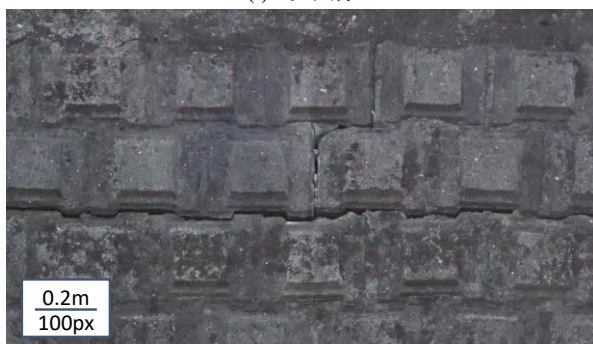
図-5 現地とオルソ画像上のひび割れ計測結果



(a) 元画像



(b) 検出結果



(c) 元画像拡大図



(d) 検出結果拡大図

図-6 オルソ画像のひび割れ計測結果

## (2) 未学習画像のひび割れ検出

前章の手順で作成したひび割れ検出モデルを用いて、GCPを付与して作成したオルソ画像のひび割れ検出を行った。入力画像は図-6(a)および(c)で、検出結果は図-6(b)および(d)である。定性的な評価ではあるが、未学習である入力画像に対して、ひび割れが正しく検出されていることが分かる。

## (3) ひび割れ幅の計測と評価

### a) ひび割れ計測方法

本章ではこれまでに、空間解像度を統一したオルソ画像の生成手順と、オルソ画像のひび割れ自動検出結果について示した。そこで本節ではオルソ画像からAIで検出されたひび割れの幅と延長を計測する手法について示す。

本研究でのひび割れ計測手法を模式的に表したものを図-7に示す。本手法では3つのステップにより、ひび割れの幅および延長を計測する。

まず最初のステップとして、ひび割れとして検出された領域に対して、細線化処理<sup>9)</sup>を実施する。図-7の白い

領域がひび割れ検出結果で、グレーの領域が細線化処理結果を示している。

細線化処理結果のピクセルは、ひび割れの中心に沿うため、細線化処理後のピクセルの数をひび割れの延長として計測することができる。

次に、細線化処理後のピクセルの8近傍に着目し、局所的なひび割れの方向を計測する。この時、ひび割れが計測可能なのは、8近傍に存在するピクセルが2つ以下の図-7(A)のような場合であり、計測結果は22.5度刻みとなる。

なお、ひび割れの方向が計測不可となる図-7(B)のようなケースは、ひび割れが枝分かれする箇所の交点の1pxのみで発生することから、ひび割れ計測に与える影響は極めて小さいと判断した。

最後に、ひび割れが計測可能なピクセルについて、ひび割れの方向と直角な方向に、ひび割れ領域の長さを計測する。このとき、計測されるひび割れの延長および幅の単位はpxであることから、計測値に空間解像度の2mm/pxをかけることで実測値への換算を行った。

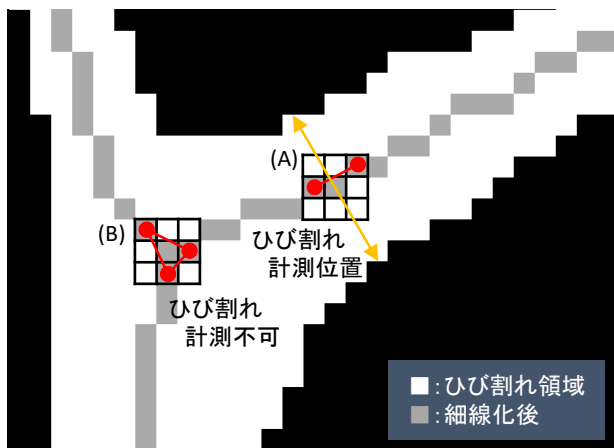


図-7 ひび割れ計測方法

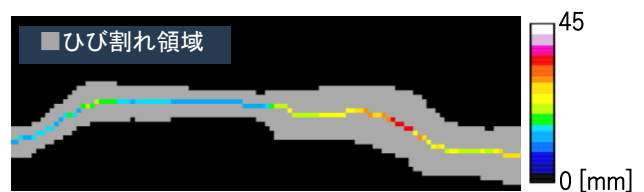


図-8 ひび割れ幅計測結果

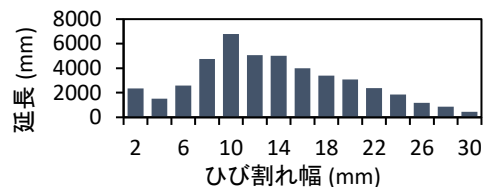


図-9 ひび割れ計測結果のヒストグラム

## b) ひび割れ計測結果

図-8はひび割れ検出結果に対してひび割れ幅を計測した結果を一部拡大して示している。グレーの領域が検出結果であり、細線化処理結果のピクセル上にひび割れ計測結果を示している。

図-8より、ひび割れの広がりに応じて、細線化処理後の中心線の画素値も増加しており、ひび割れの形状に沿って幅が計測されていることが分かる。

さらにこの計測結果をヒストグラムで表したものが図-9である。このヒストグラムより、ある区間に存在するひび割れの網羅的な計測結果を一目で確認可能となった。

ただし、本手法によるひび割れ幅の計測精度は、SiM画像の解像度がボトルネックとなり、国土交通省の点検・評価要領に準じた2mm幅のひび割れを精度よく計測することは難しい。当然、より高画質なカメラで近接撮影をすると、解像度を上げることは可能であるが、撮影時間が増え、データ量が膨大になるため、あまり現実的ではない。

一方で、計測のサンプリング数は従来の点検に比べても遥かに多く、区間全体の劣化の傾向を把握することは可能であると考えられる。

以上より、デジタル画像の処理によってひび割れの計測を行う本手法では、局所的な計測結果の信頼性は、従来の現場での計測手法に比べて低いが、大域的に多点のサンプリングをすることから、ひび割れの定量評価を安定して実施できると考える。本手法は、局所的な計測結果に基づいて健全度を評価していた、従来点検の課題解消の糸口になると期待される。

## c) 区間単位のひび割れ評価手法の提案

検出されたピクセル数のカウント結果から、ひび割れ面積を区間毎に算出し、オルソ画像と並べて表示したものが図-10である。この図より、ひび割れの総量を河川

の区間単位で比較することが可能となった。

従来の点検・評価要領では、人の手で計測することが前提にあるため、ある区間でのひび割れの最大幅という管理基準を定めざるを得なかったが、AIではひび割れを網羅的に計測可能であるため、ひび割れの面積や面積の増加率などといった新たな管理基準を設けることができる。

以上より、各技術者がその時々状況を見て、定性的に計測していた従来手法と比較して、本手法は経年的に比較可能で、定量的に計測できる優れた手法であると考えられる。

ただ、護岸の空洞化など、視覚的に判別不可能な変状も多数存在していることから、画像からの点検および評価ですべてを代替することはできない。

よって、点検業務でAIを活用する際は、河川全体の簡易的なモニタリングをAIで行い、劣化の進行が激しいとAIが判断した箇所は、人の手によって正確に計測を行うという点検プロセスを組む必要があると考える。

## 5. 最後に

### (1) まとめ

本論文では、未学習である意匠の護岸に存在するひび割れを自動で検出するAIを作成するとともに、空間解像度を統一したオルソ画像の作成および精度の検証、ひび割れ検出結果からひび割れ幅を評価する手法について示した。

従来の人による計測では、ひび割れの網羅的な計測が不可能であったため、ひび割れ幅の大きさが管理基準として用いられていたが、本研究の結果により、網羅的な計測が可能となり、ひび割れ面積に応じた新たな管理基準を提示することができた。

本論文の成果を受けて、今後の点検は AI を活用した簡易的なモニタリングと、人による精密なモニタリングを併用することが重要であると考えた。

## (2) 今後の取り組み

ひび割れ検出モデルの汎化性向上と、本手法による経年的な評価の実施の2点が、今後の取り組みとして挙げられる。

まず、1 つ目のひび割れ検出モデルの汎化性向上に関して示す。護岸には数多くの意匠があり、同一河川の限られた区間であっても、複数の意匠の護岸が用いられていることも少なくない。本研究では、1 種の意匠のみを対象に、ひび割れの検出に取り組んできたため、検出対象護岸の意匠が変わった場合、ひび割れ検出精度が大幅に低下することが想定される。

ただ、意匠ごとにひび割れ検出モデルを使い分けるのは、処理の煩雑化にもつながる。よって、1 つのモデルで様々な意匠の護岸のひび割れを検知できる汎化性の高いモデルを作ることが理想となる。

汎化性の高いモデルを作成するには、様々な護岸を撮影したデータセットを作成し、データセットと検出精度に関する検証を行う必要があると考える。

次に、2 つ目の取り組みとなる経年的な評価について示す。本研究では、護岸撮影データに基づき、ひび割れ幅を評価する手法を示したが、経年的な評価は実施しておらず、現在の画像の解像度レベルで、進行が捉えられる変状の程度を明らかにする必要がある。

特に経年的な評価を行う上では、環境の変化による

AI 検出精度の悪化等も懸念される。

そのため、現場でのひび割れの増加量、オルソ画像での計測精度、AI のひび割れ検出精度に着目しながら、本論文の結果と比較する必要があると考える。

## 参考文献

- 1) 天方匡純：深層学習方式を活用した河川のコンクリート護岸の劣化領域抽出，建設機械施工，VOL.70, No.5, 2018.
- 2) 齋藤彰儀, 上総虎智, 平木悠太, 天方匡純, 吉田武司: 深層学習によるコンクリート護岸劣化領域検出システムの開発, デジタルプラクティス Vol.10 No.2, 情報処理学会, 2019.
- 3) 国土交通省水管理・国土保全局河川環境課：堤防等河川管理施設及び河道の点検・評価要領，p.5, p.9, p.19, 2019.
- 4) Quan, T. M., Hildebrand, D. G. C. and Jeong, W-K. : FusionNet : A Deep Fully Residual Convolutional Neural Network for Image Segmentation in Connectomics, arXiv : 1612. 05360, 2016.
- 5) Tomasi, C. and Kanade, T. : Shape and motion from image streams under orthography: a factorization method, Int'l.J.Computer Vision, 9(2), pp.137-154, 1992.
- 6) T. Y. Zhang and C. Y. Suen, A fast parallel algorithm for thinning digital patterns, Volume27, No.3, pp236-239, 1984.

(Received June 30, 2020)

(Accepted July 31, 2020)

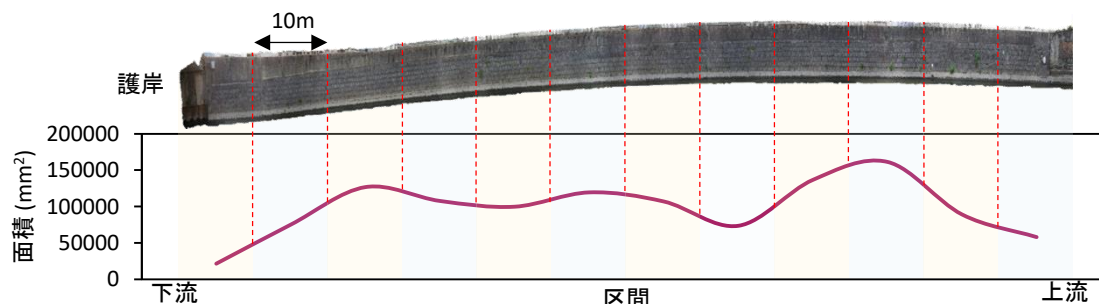


図-10 区間別のひび割れ面積表示

## CREATION OF CRACK DETECTOR ON REVETMENTS AND MEASURING CRACK USING ORTHOPHOTO

Ryuto YOSHIDA, Junichiro FUJII and Junichi OKUBO and Masazumi AMAKATA

Current maintenance methods of revetments are inefficient because it depends on the visual inspection of civil engineers. Thus, it is necessary to develop a quantitative and rational inspection method.

In previous studies, the authors developed a crack detector using CNN. However, in order to utilize detecting results in the current maintenance standards, crack width must be measured in actual size. Therefore, this study considered a method for measuring cracks from detecting results. As a result, the method is developed that can measure width of the entire crack.