

論文 レーザ光照射システムによる遠方からのひび割れモニタリング

石関 嘉一^{*1}・山口 友之^{*2}

要旨：橋梁などの社会インフラの供用年数の増加に伴い、老朽化したコンクリート構造物の維持管理技術が課題となっている。橋梁のような対象の場合、人が直接ひび割れ点検を行うには、非効率かつ危険度が高いため、遠方から非接触で高精度にひび割れ計測する手法が必要となる。本稿では、デジタルカメラとレーザポインタを搭載した計測システムを開発し、ひび割れが発生している橋梁床版を約 6m 離れた下方の位置から撮影し、画像処理によりひび割れ幅計測を行う手法について述べる。実構造物の橋梁の床版に対して、提案システムを適用し、0.2mm 未満の幅（最少 0.1mm の幅）のひび割れを計測できることを確認した。

キーワード：ひび割れ、画像処理、レーザ光計測、クラックゲージ、橋梁検査

1. はじめに

橋梁、トンネルやダムなどの社会インフラの供用年数が増加している現在、老朽化したコンクリート構造物を簡便かつ高精度に点検可能な維持管理技術の開発が急務である。とりわけ、コンクリート構造物に発生するひび割れは、その発生位置や幅によって、構造物の健全性を評価する指標になる¹⁾²⁾。橋梁などの長大な構造物を対象とする場合、床版の裏側や橋脚などのひび割れ点検を実施するには、足場の設置や重機などの利用、橋梁の通行制限等によるコストの増大、人的作業になるため高所からの落下等の危険性が伴う。そのため、コンクリート構造物に近接することなく、遠方からひび割れを検出・計測できる技術開発が必要となる。

遠方から望遠レンズ等を用いてカメラ撮影する画像処理技術³⁾は、戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」の一つとして重要視されている⁴⁾。画像中のひび割れ幅は 1pixel～数 pixel 程度であり、求められる計測精度は 0.2mm のひび割れ幅を計測することである。直接アクセスすることが可能な場合は、クラックスケールやマーカーを貼り、画像上でひび割れとクラックスケール等を比較する手法など⁵⁾⁶⁾があるが、アクセスが不可能な場合には適用することができない。

遠方から撮影し、正確なひび割れ幅を算出するためには、対象物の大きさ、もしくは対象とカメラの距離が既知である必要がある。一般には、レーザ計測で壁面とカメラまでの距離を 1 点だけ求めて画像解像度を算出する方法が採られるが、コンクリート壁と正対しているときのみ理論が成り立つ。しかし、現場では平行で撮影することが困難な場合が多く、カメラの移動が難しい場合は、カメラの首フリによって撮影されるため、カメラと壁面

との幾何関係を固定することは困難である。一方、近年は距離計測と画像撮影が一体となった形式が主流となってきたが、ひび割れ点検に必要である 0.2 mm/pixel のひび割れ幅を、遠方から計測することは困難である⁷⁾。

そこで、提案手法ではレーザ光を複数用いて対象となる壁を投影し、投影されたレーザ光も含めて画像撮影を行う。カメラ装置とレーザ光の照射する位置を既知とすることで、画像一枚で画像解像度を算出することができ、かつ画像中に含まれるひび割れ幅を計測することが可能となる。実験では、コンクリート壁へレーザ光を実際に照射し、カメラの首ふりを行う場合でも高精度に解像度を算出でき、かつひび割れ幅を計測することが可能であることを示した。

2. 提案手法のフロー

橋梁の床版の裏側を計測対象とし、提案手法のひび割れ幅の計測手順について述べる。

2.1 レーザ光照射

測定対象のコンクリート平面に、レーザ光を照射する。レーザ光は線形発光可能なものを利用し、3 つの光の線から成る幾何図形（三角形）をコンクリート平面に照射する。

2.2 画像獲得

コンクリート表面の高精細な画像を獲得するために、高解像度デジタルカメラを用いる。撮像平面内に、レーザ光による三角形が写りこむように撮影を行う。ただし、レンズの焦点距離は既知であるとする。

2.3 画像解像度算出

画像上から三角形を抽出し、三角形の頂点座標を計算し、三角形の幾何補正を行う。幾何補正のパラメータより、画像解像度を算出する。

*1 株式会社大林組 技術研究所 生産技術研究部 主任研究員 博士（工学）（正会員）

*2 筑波大学 システム情報系助教 博士（工学）

2.4 ひび割れ幅計測

ひび割れ幅を計測するには、画像中からひび割れのみを検出する画像処理を行う⁸⁾⁹⁾。検出したひび割れのみ
の画像に対して、2.3 で算出した解像度情報から、各ひび
割れ幅を算出し、解析結果とする。

3. 実地実験

3.1 開発したシステムの概要

開発したシステムに使用する機器を表－1 に示す。計
測器は画素数 5000 万程度のデジタル一眼レフカメラ、
70-200mm 望遠レンズおよび直線が投影できるレーザポ
インタを 3 本用いた。また、これらの計測機は機材を固
定できる専用の架台を用いて、一体形状とした。画像確
認用 PC からカメラをリモートコントロールする仕様と
し、三脚を回転するとカメラとレーザポインタは同時に
作動するシステムである。撮影画像には、ひび割れと決
まった位置にレーザポインタが同時に記録される。また、
高解像度大画面 (14.0 型 1600×9000) の画像確認用 PC か
らカメラをリモートコントロールすることで、カメラの
設定・撮影・撮影画像の確認などを効率的に行える。レ
ーザ距離計は、システム評価およびキャリブレーション
時に使用する。開発システムの外観を写真－1 に示す。

3.2 実験場所

計測場所は、上下 2 車線の 1 日 4 万台程度の交通量が
ある国道橋梁の床版下面を対象とした。対象橋梁は写真
－2 に示す国道 246 号中津川橋下り線(神奈川県厚木市)
の左岸の床版下面である。交通量が著しく多いため、橋
梁上から機材を設置して計測することは困難である。そ
のため、地上より橋梁を計測する必要があった。また、
河川に架橋しているため、足場等の仮設施設の設置は困
難であった。カメラから対象の橋梁床版までの距離は約
6m である。計測した床版下面を写真－3 に示す。

3.3 撮影のシステム設定

開発システムの撮影方法は、地上から床版を撮影する
方法である。計測状況を写真－4 に示す。撮影の際には、
橋梁点検の効率化を図るため、図－1 に示す要領で移動
する回数を減らす代わりに三脚上部を傾けて撮影した。
計測可能な対象との角度は、原理的には三角形が撮像で
きればよいと 90 度未満まで可能であるが、今後詳細
な検討が必要であるが、今回は±20 度程度とした。

一般的に、理想的な写真を得るためには、ISO 感度は
可能な限り低くおさえた方が良いが、今回は、三脚上部
を傾けて撮影したため、一枚の写真内に距離差が生じる
ことから、被写体深度を考慮し F 値は 7.1 以上とした。
なお、室内実験により、カメラの設定は F8.0 および
ISO1250 程度が適切であることがすでに確認できている。

撮影時は、強風と交通振動による床版振動の影響によ

り、F8.0 および ISO1250 の条件下で得られる 1/20 のシ
ャッター速度ではブレが生じたため、F7.1 および
ISO3200 として撮影を実施した。

撮影区間は、主桁と対傾構で囲まれる 1 区間、約 3
m×5m (約 15m²) とし、12 区画 (概ね 1.4m×0.9m/1
画像) に分けた。最終的には、それぞれの撮影画像を画
像処理した後、ひび割れ抽出画像を合成し、ひび割れ
MAP を作成する。計測分割の要領を図－2 に示す。

表－1 システムの仕様

デジタルカメラ	一眼レフカメラ 5060 万画素(8688×5792)
レンズ	望遠レンズ EF70-200mm
三脚	カーボン製 耐荷重 10 kg
画像確認用 PC	ノート型パソコン 14 インチ (1600×900)
レーザポインタ	緑色、線形発光
レーザ距離計	ISO16331-1 適合品 測定範囲 0.05～80m



写真－1 開発システムの外観



写真－2 計測対象の橋梁

3.4 レーザ光照射システムによる計測

レーザ光照射システムの外観を写真-5 に示す。デジタル一眼カメラとレーザポインタは一体化されており、レーザポインタの間隔は 240mm とした。本手法の特徴として、写真-6 に示すように、レーザ光で作成した正三角形を撮影対象物に投影し、ひび割れとレーザポイントによる三角形を一枚の画像に撮像する。別の計測手法に複数点を距離計測し、幾何関係を算出する手法¹⁰⁾もあるが、提案手法は 1 枚の画像ですべての情報(ひび割れ、幾何関係(解像度))が得られる利点がある。

床版とカメラとの距離と、撮影角度の情報を三角形の画像上の頂点座標から計算し、幾何補正等を行う。その際に、事前準備として、レーザポインタで描画する三角形が以下に示す条件であることが必要である。

レーザ光照射システムの初期条件

- ①正三角形であること
- ②三角形が撮影システムからの距離の違いによらず一定(平行投影)であること

従って、この 2 点の条件を現場で確認するためのキャリブレーション作業を行う。

キャリブレーションを行う際には、撮影システムと平行に 2 枚の校正用アクリル板を設置した。平行を実現するために、撮影システムにキャリブレーション用の距離計を設置し、計測を行う。校正用アクリル板には、正三角形の基準マークが描かれている。撮影システムのレーザポインタを調節し、レーザ光が 2 つの基準マークを透過するように調節し、2 つの異なる距離においても平行に正三角形が投影するようにする。

ここで、幾何補正や解像度算出は、画像上で既知の 3 点が分かれば可能であるが、現地での平行投影の補正を容易にするために、正三角形を投影し、その 3 頂点を用いている。



写真-3 床版下面



写真-4 計測状況

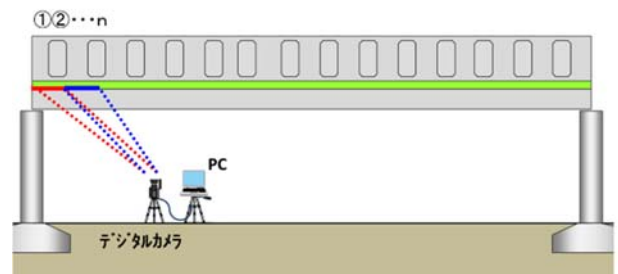


図-1 計測方法

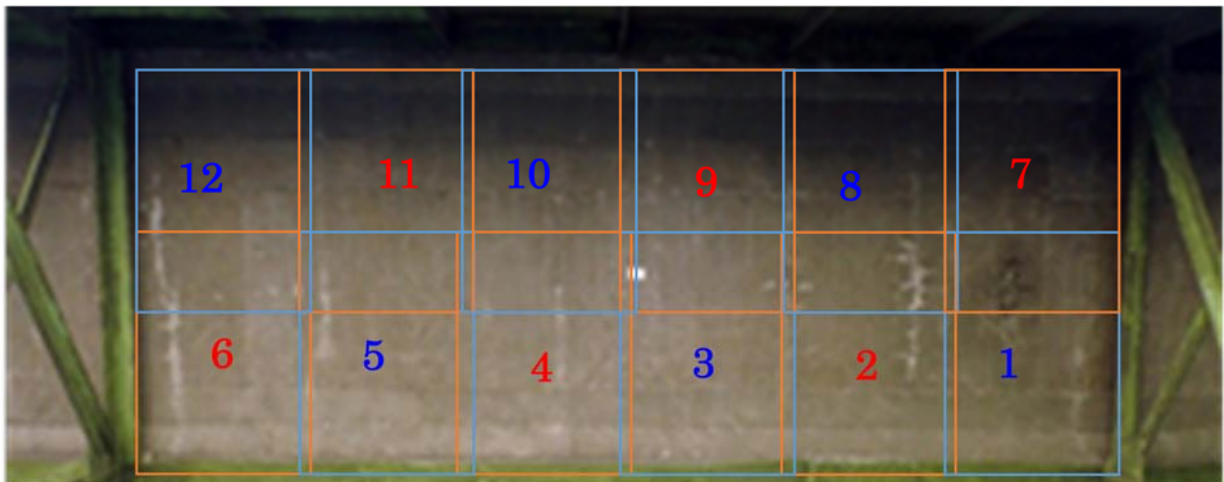


図-2 計測面の分割

3.5 レーザ光照射システムによる解像度算出

画像中のレーザ光は緑色であるため、撮像画像に2値処理を行い、図-3に示すように、デジタル画像から容易にレーザ光の直線を検出することが可能である。ここで、次節で述べるひび割れ検出には、グレースケール画像で十分であるが、緑色で投影されたレーザ光線分を画像処理する必要があるため、提案システムでは、カラー画像を利用している。画像処理により検出された直線の交点を算出し、三角形の頂点を求める。

次に、求められた頂点座標から、幾何変換処理および画像の解像度算出処理を行う。床版とカメラが正確に正対している場合には、正三角形が投影されており、1辺の長さ 240mm と既知であるため、解像度は容易に算出でき、写真-6 の場合は、0.15mm/pix となった。

平行投影でない場合の具体的な手順は、図-4に示すように、まずカメラ座標系 x - y - z と画像座標系 u - v を考える。カメラ座標系の z 方向と水平にレーザ光線は出力されているため、三角形の各頂点 A, B, C の x 成分 A_x , B_x , C_x と y 成分 A_y , B_y , C_y は既知の値である。未知のパラメータ A_z , B_z , C_z を画像上での各 A, B, C の座標値 u_a , u_b , u_c を用いて算出する。

$$A_z = \frac{f \cdot A_x}{u_a}, B_z = \frac{f \cdot B_x}{u_b}, C_z = \frac{f \cdot C_x}{u_c} \quad (1)$$

ここで、 f は焦点距離である。式(1)より、三角形の頂点座標の3成分を算出することができる。これにより、カメラと対象までの距離も決定でき、1枚の画像の解像度を算出することが可能である。

さらに、この3頂点座標を用いて、対象平面の平面方程式を導出する。点Aを通る平面式は、法線ベクトルを $\mathbf{n}(l, m, n)$ とすると以下になる。

$$l(x - A_x) + m(y - A_y) + n(z - A_z) = 0 \quad (2)$$

平面方程式が導けたので、画像座標系の u - v の各点と式(2)の交点を算出することで、画像上の各画素の3次元座標を算出することができる。



写真-5 レーザ光照射システム



写真-6 レーザ光で照射した正三角形

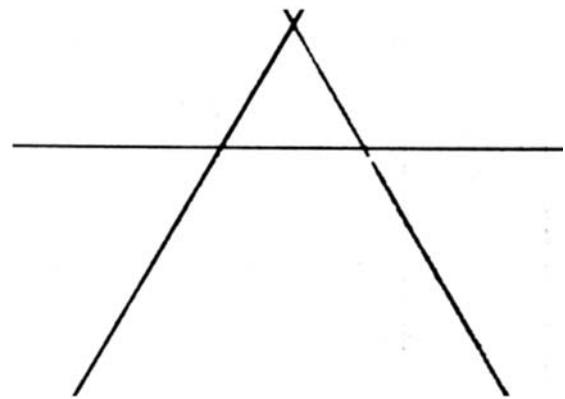


図-3 レーザ光の抽出

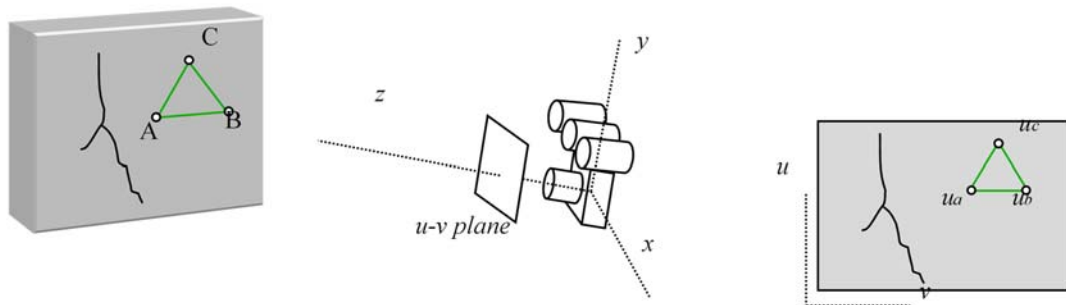


図-4 カメラ座標系と画像座標系

3.6 ひび割れ計測

まず、ひび割れを計測するためには、獲得した濃淡画像の中からひび割れのみを検出する必要がある。そこで、ひび割れ検出に有効である、パーコレーションモデルに基づくひび割れ検出手法を適用する⁸⁾⁹⁾。パーコレーション処理とは、固体に液体が染み込む現象であるパーコレーション過程を画像処理としてモデル化し、ひび割れのような非直線的な細線検出を行う処理である。

図-5 に、図-2 を基準に複数箇所を撮影し、統合した撮影画像とひび割れ MAP の結果を示す。ひび割れが途切れ途切れになっているが、ほとんどのひび割れ幅が 0.2mm 未満のひび割れである。図-5 より、本手法によって、0.2mm 未満の幅（最少 0.1mm の幅）のひび割れを検出することができ、高精度な計測結果が確認できた。さらに、一部の区画におけるひび割れについて、ひび割れ幅を画像解析により自動的に 0.1mm 幅でグレーディングした処理画像の「(1)ひび割れ幅計測の区分表示」と「(2)目視結果との比較」を図-6 に示す。目視観察によるひび割れ調査では、ある区間のひび割れの平均的なひび割れ幅を代表値として示すことが多く行われているが、

図-6 (1)より本方法では、任意の位置におけるひび割れ幅を示すことが可能である。また、図-6 (2)に示すように、目視結果と同程度の精度であることも確認できる。

4.まとめ

本研究では、デジタルカメラとレーザポインタを搭載した計測システムにより、ひび割れが発生している橋梁床版を約 6m 離れた下方の位置から撮影し、画像処理によって、ひび割れ幅の計測を行った。

実地実験の結果より、床版に発生しているひび割れに対して、0.2mm 未満の幅（最少 0.1mm の幅）のひび割れを検出することができ、ひび割れ MAP を作成できた。また、画像解析により、ひび割れ幅を 0.1mm の幅でグレーディングした図を得ることができ、コンクリート表面における任意の位置のひび割れ幅を示すことができた。

提案手法は、レーザ光照射によって、対象構造物に近接することなく、また、クラックゲージをコンクリート表面に貼り付ける作業をすることなく、1 枚の画像から、画像解像度とひび割れ幅を計測することが可能であることを確認した。

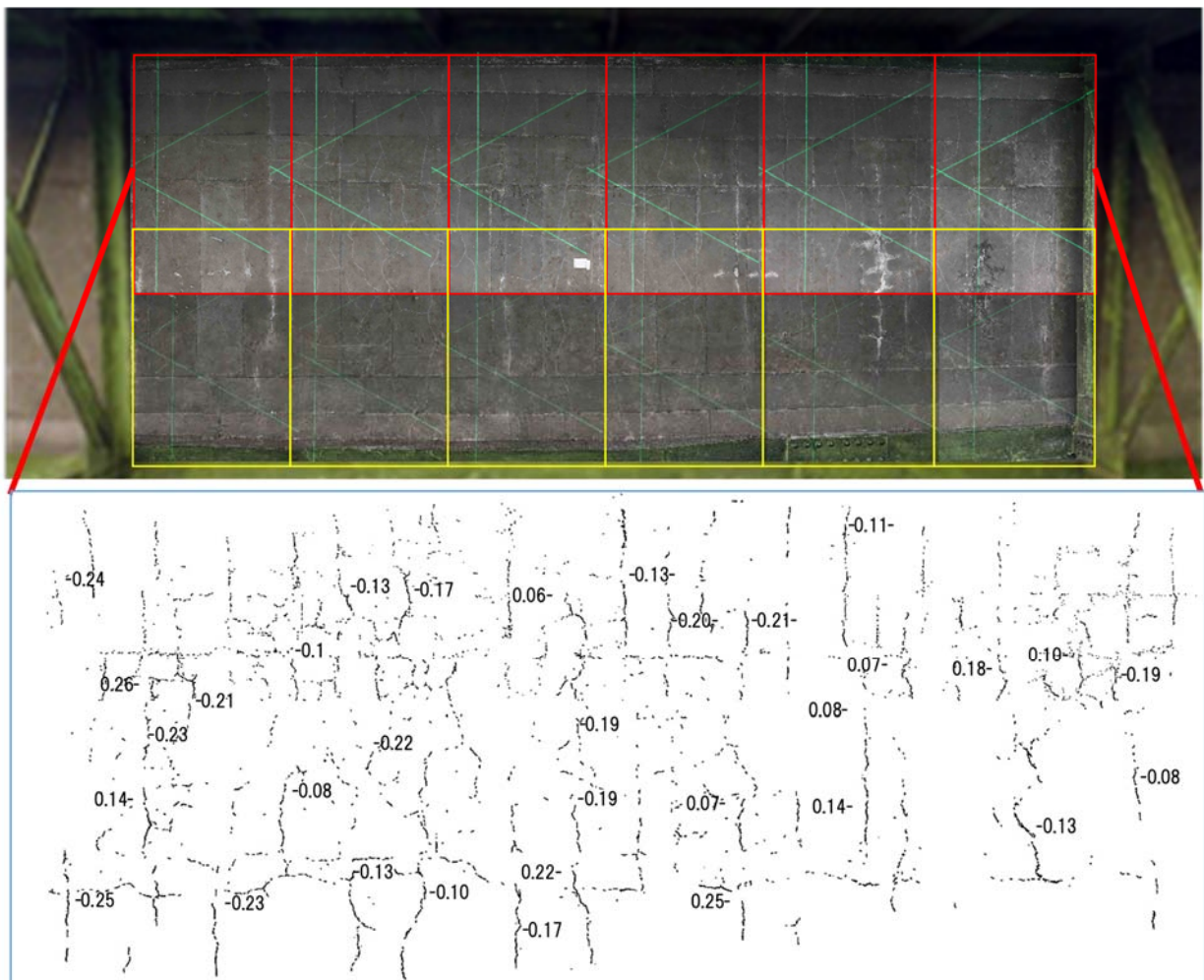
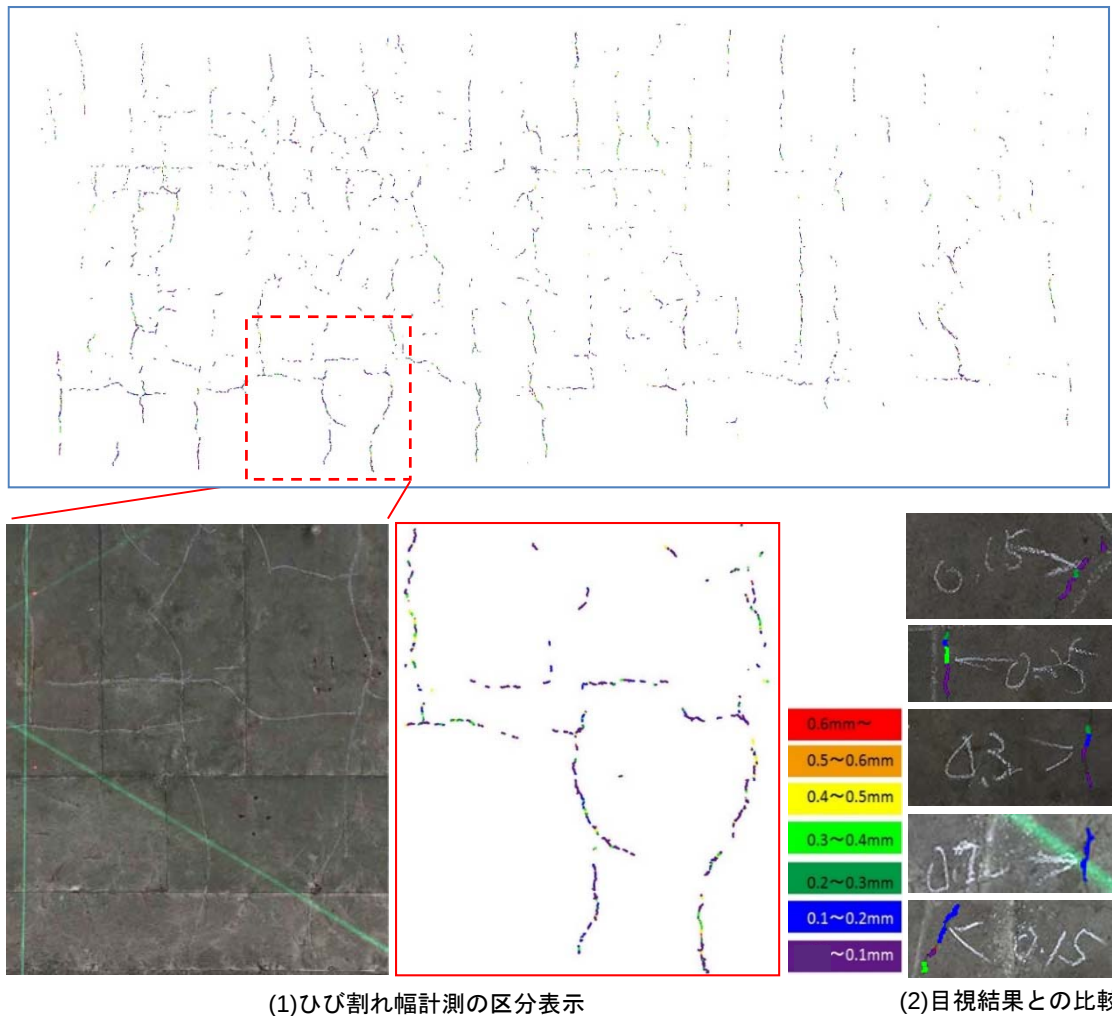


図-5 ひび割れ MAP (ひび割れ検出とひび割れ計測の結果)



(1) ひび割れ幅計測の区分表示

(2) 目視結果との比較

図-6 ひび割れ幅計測結果

謝辞

本技術の研究に当たり、早稲田大学 橋本周司教授、広島工業大学 竹田宣典教授より、多大なご指導を賜りましたことを深く感謝致します。

参考文献

- 1) 日本建築学会, 鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ-メカニズムと対策技術の現状-, 日本建築学会, 2003.
- 2) 日本コンクリート工学協会, コンクリートのひび割れ調査, 補修・補強指針-2013-, 日本コンクリート工学協会, 2013.
- 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), 68(3), 178-194, 2012.
- 4) 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) HP ; <http://www.jst.go.jp/sip/k07.html>
- 5) T. Yamaguchi, S. Hashimoto, Practical Image Measurement of Crack Width for Real Concrete Structure, Electronics and Communications in Japan, Vol.92, No. 10, pp.1-12, 2009, Sep. 2009.
- 6) 佐野浩, 大澤廣, 後藤和夫, 堀内宏信, マーカーとデジタルカメラを利用したひび割れ計測システムの開発, 土と基礎, Vol.52, No.6, pp.22-24, 2004.
- 7) <http://velodynelidar.com/>
- 8) T. Yamaguchi, S. Hashimoto, Fast Crack Detection Method for Large-size Concrete Surface Images using Percolation-based Image Processing, Machine Vision and Applications, Vol.21, No.5, pp.797-809, Aug. 2010.
- 9) 竹田宣典, 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, 大林組技術研究所報, No.79, 2015.
- 10) 吉田次男, 河野幸彦, 石井政博, 小出博, デジタルカメラによるダム表面状態調査, ダム工学, No.18, Vol.2, pp.118-125, 2008.