

# 動画を用いた引張疲労試験体ならびに列車走行時のRC桁のひび割れ幅、たわみの計測に関する基礎的検討

野間康隆<sup>\*1</sup>・佐藤祐子<sup>\*2</sup>・渡辺 健<sup>\*2</sup>

高架橋等のコンクリート構造物の検査では、検査項目の一部としてひび割れの幅や桁の変位の計測が求められる。本研究では、動画を用いてこれらの項目を計測するための室内ならびに現地での実験を行った。具体的には、まず輝度と幾何学的特性により画像からひび割れの位置と幅を計測する手法を用いて、引張疲労試験時のひび割れ幅の計測を試みた。また、上記手法ならびにデジタル画像相関法を用いた画像解析手法により列車通過時のひび割れ幅ならびに桁のたわみの計測について基礎的な検討を実施した。

キーワード：動画、画像解析、ひび割れ幅、たわみ、計測、維持管理

## 1. はじめに

限られた財政や技術者が不足するなかで、老朽化が進む社会インフラの維持管理のありかたが問題となっている。維持更新のための大規模なインフラ点検業務にはコスト、人手、手間がかかり、低コスト、高効率を目指した点検技術の開発が行われている<sup>1)</sup>。

このような背景の下、ひび割れ等の変状を画像で捉え、画像を解析することで、インフラの健全度評価に結びつけようとする研究が行われてきた。確立されたこれらの研究成果のなかには、汎用性や機能性を高め、商用の技術として扱われているものもある<sup>2)</sup>。筆者らも同様に、社会インフラの効率的点検に寄与する技術として市販の一眼レフデジタルカメラを用いて遠隔で点検対象構造物のひび割れを撮影し、計測する技術を開発してきた。この技術は、撮影画像から輝度と幾何学的特性を用いてひび割れの位置と幅を計測するひび割れ画像計測手法である<sup>3)</sup>。既報<sup>3)</sup>では、コンクリート構造物の効率的な検査を実施することを目的に、画像における位置の検出率と、ひび割れ幅の計測誤差を検証した。さらには、このような開発と同時に様々なひび割れが問題となるコンクリート構造物を対象とした現場への適用を図ってきており、ダム等の構造物の撮影の駆動性を上げるため、UAV撮影画像を用いたひび割れ調査にも本技術の適用を行ってきた<sup>4)</sup>。

また、社会インフラの維持管理においては、荷重作用時の構造物のたわみなどの変形計測も重要になる。一般には、構造物の変位やひずみは、接触式変位計やひずみゲージにより行われてきた。これらの計測機器の欠点としては、高さのあるコンクリート構造物に接触させて計

測を行うことが困難なことや、ひび割れ等不連続面を有する場合に計測ができなくなることが挙げられる。このような課題を解決するため、コンクリート構造物の変位、ひずみ等の変形を非接触で捉える画像解析を用いた技術の開発が行われており<sup>5)</sup>、筆者らも同様な技術を保有している<sup>6)</sup>。

これらの画像を用いたひび割れ、変形の計測に関する技術開発に関しては、基本的に静止画の解析を実施することで行われてきた。最近では、これらの計測を動画により行う研究も実施されてきており<sup>1)</sup>、本研究でも同様に、動画を用いてひび割れ、変形の動的計測が可能な画像解析技術に関して検討することにした。本研究では、動画を用いたコンクリート構造物の載荷試験時や実構造物の列車走行時のひび割れやたわみ等の画像計測を実施し、計測結果の検証を行うことで、保有技術の動画計測への適用性を評価することとした。具体的には、まず、引張疲労試験時の鉄筋コンクリート製の試験体の開閉するひび割れを撮影し、この際のひび割れ幅の測定に関する基礎的検討を実施した<sup>7)</sup>。また、列車通過時にのみ開口するひび割れや、列車通過による桁のたわみの計測が実構造物の検査で求められると考えられる。そのため、列車が通過する際の鉄筋コンクリート製の鉄道高架橋のひび割れ幅やたわみを市販の一眼レフカメラの動画撮影機能で動的に計測するための現地実験を実施した<sup>8)</sup>。ひび割れ幅やたわみに関して、既往の計測技術による計測結果と動画を用いた画像解析結果を比較し、後者技術の計測の可能性を検討した。

\*1 土木研究部 \*2 公益財団法人鉄道総合技術研究所

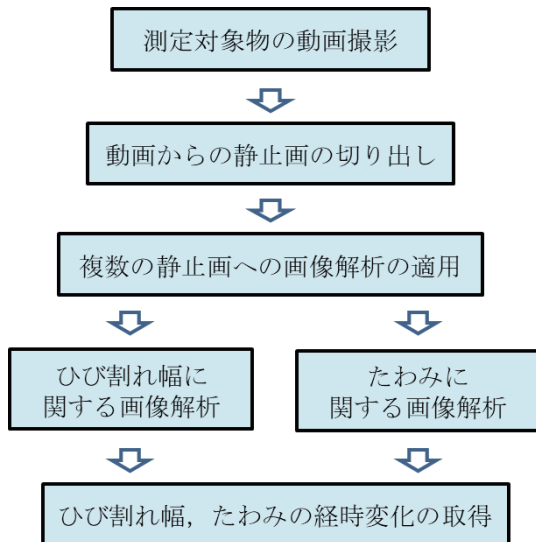


図-1 動画を用いた画像解析フロー

## 2. 動画を用いた画像解析概要

### (1) 動画を用いた画像解析のフロー

本研究で実施する動画を用いた画像解析のフローを図-1に示す。画像解析手法は静止画で実施するものとなっている。このため、まず撮影動画から静止画に切り出す作業を行う。本研究では、動画の規格としてハイビジョン (1280 × 720 pixels, 119.9 fps) や 4K (4096 × 2160 pixels, 29.97 fps) 撮影ができる市販の一眼レフデジタルカメラを使用して動画撮影を行った。このように撮影した動画は一般に公開されているフリーソフトで動画から静止画を切り出すことができる。本研究におけるひび割れやたわみに関する画像解析は、このように切り出した画像を用いて行い、画像を解析することでひび割れ幅やたわみの経時変化の推定を行った。

### (2) ひび割れ幅計測のための画像解析概要

保有するひび割れ画像解析技術<sup>3),4)</sup>を適用し、ひび割れ抽出や幅推定を行った。この技術で使用する幾何学的パラメータとひび割れ幅推定方法をひび割れ画像解析概要として、図-2に示す。

ひび割れ抽出は、以下のような工程で行う。

- a) 平滑化処理による背景輝度の算出
- b) 閾値処理による背景より暗部になっている領域の特定
- c) 暗部領域に対する線状構造を判別する独自の幾何学的パラメータを用いたひび割れの抽出

次に、抽出したひび割れから幅推定を行う。幅推定は、抽出ひび割れの輝度と背景輝度の差分量等に注目して、ひび割れ幅を推定するものである。また、連続するひび割れの輝度分布から平均ひび割れ幅を推定する方法を開発し用いた。

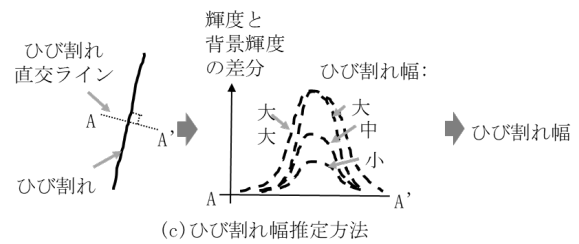
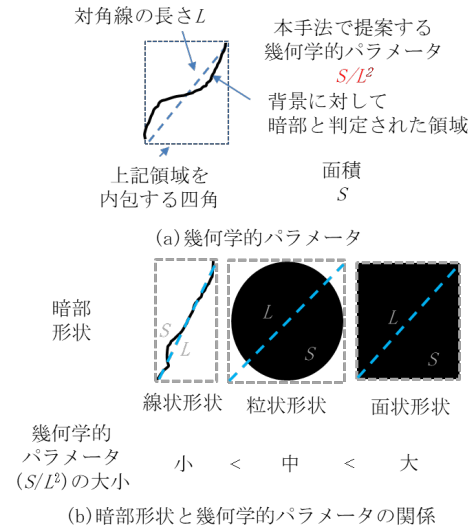


図-2 ひび割れ画像解析概要<sup>3),4)</sup>

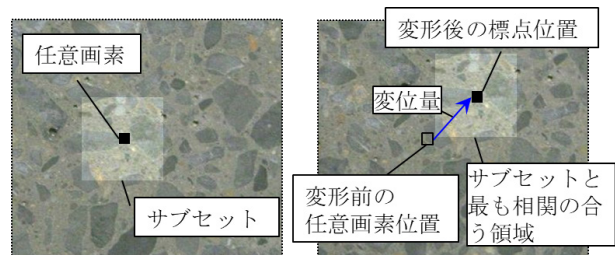


図-3 デジタル画像相関法概要<sup>6)</sup>

### (3) たわみ計測のための画像解析概要

たわみの計測は、変形前後の画像を使用して構造物の変形を計測する画像解析手法の一つであるデジタル画像相関法を使用して行った。この手法では、図-3に示すように計測する対象の輝度値の分布と、変形後の分布の相関度が高い領域を探索することで、着目した画素の変形前後の移動量を推定する計測法である。このように測定対象物が相関をとれる特徴のある模様を有していれば、デジタルカメラで撮影した画像を解析するだけで面内変形を計測することができ、容易に低コストで計測が行えるというメリットがある。本研究では、このデジタル画像相関法を改良し高速化を図った手法を使用して、たわみの計測を行うこととした<sup>6)</sup>。

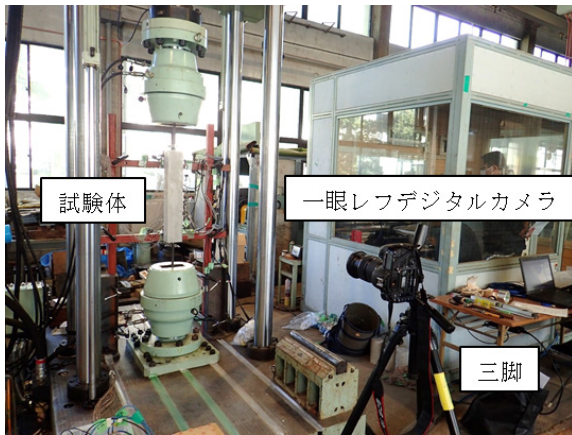


図-4 試験ならびに撮影状況<sup>7)</sup>

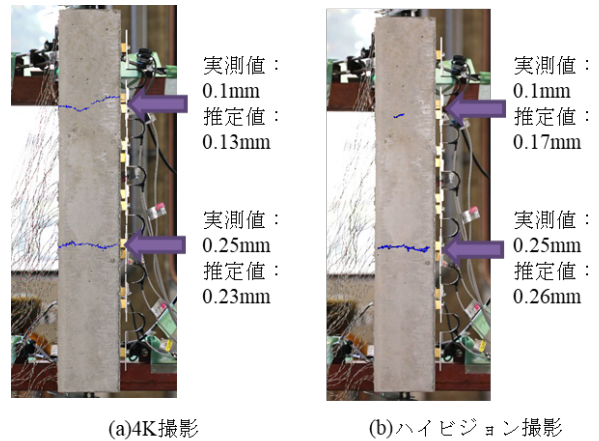


図-5 静的荷重時の抽出と幅推定結果<sup>7)</sup>

### 3. 引張疲労試験体を用いた計測

#### (1) 実験概要

引張疲労試験時の試験ならびに撮影状況を図-4に示す。試験には100×100×600mmのコンクリート部分に鉄筋が埋め込まれた鉄筋コンクリート製の試験体を使用した。この試験体に静的荷重や疲労荷重を与え、ひび割れを発生させるとともに4K(分解能0.17mm/画素)、ハイビジョン(分解能0.56mm/画素)動画によるひび割れの開閉確認やひび割れ幅の変化の計測を行った。同時に、クラックスケールならびにパイ型変位計でひび割れ幅を計測した。カメラは三脚に固定した。撮影距離は2mと設定した。撮影時に特殊な照明は使用せず、屋外からの日光照射ならびに実験室内照明使用下で撮影を行った。撮影は試験開始時の30.5kN静的荷重作用時(荷重し、荷重を作用させた状態)と疲労試験中12Hzの動的荷重作用時に行った。

#### (2) ひび割れ幅計測結果

##### a) 静的荷重載荷時

30.5kN静的荷重後の画像を用いたひび割れの抽出ならびに幅推定結果を図-5に示す。4K動画では、幅0.1mmのひび割れを完全に抽出できたが、ハイビジョンでは抽出が不完全となった。また、クラックスケールで実測した結果と比較すると、推定誤差0.1mm以下でひび割れ幅推定ができていることが確認できた。

##### b) 動的荷重載荷時

ひび割れが最も開いているときと閉じているときの撮影画像とひび割れ抽出結果を図-6, 7に示す。4Kの場合、ひび割れが閉じたことにより、画像解析によるひび割れの一部が抽出できなくなっている。ただし、抽出できなかった箇所についても、撮影画像から目視で確認できる場合があった。一方で、ハイビジョンの場合はひび

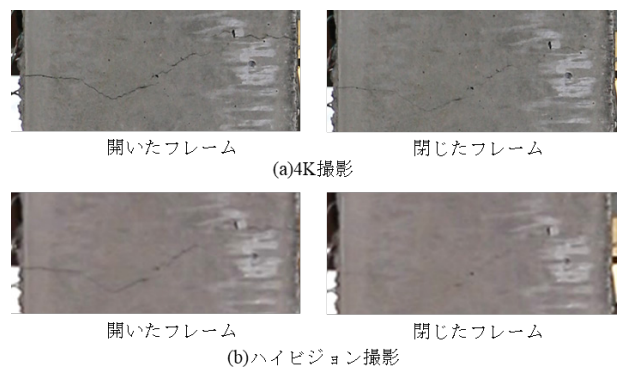


図-6 ひび割れの開閉状況<sup>7)</sup>

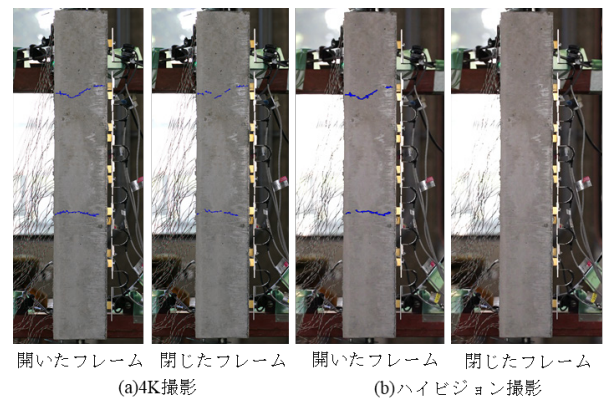


図-7 動的荷重時の抽出状況<sup>7)</sup>

割れが閉じたことにより、撮影画像から目視でのひび割れの確認が困難になっており、画像解析によるひび割れの抽出もできなかった。

図-6のひび割れのサンプリング周波数100Hzのパイ型変位計の計測結果と30フレーム分の画像解析(4K:1sec, ハイビジョン:0.25sec)による幅推定結果を図-8に示す。パイ型変位計の計測値は、ひび割れ幅の最大値が0.25mm, 最小値が0.10mmであった。図-8より、12Hzの加振に対し、4Kならびにハイビジョンいずれの

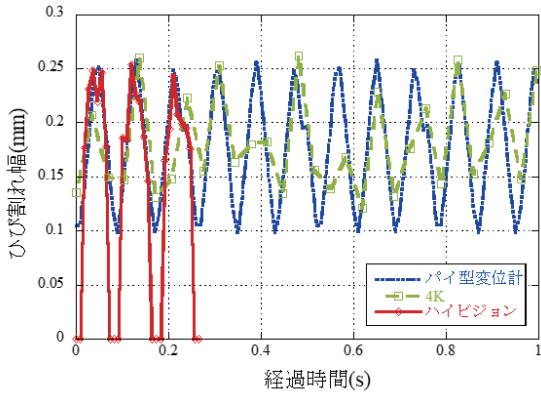


図-8 ひび割れ幅の経時変化<sup>7)</sup>

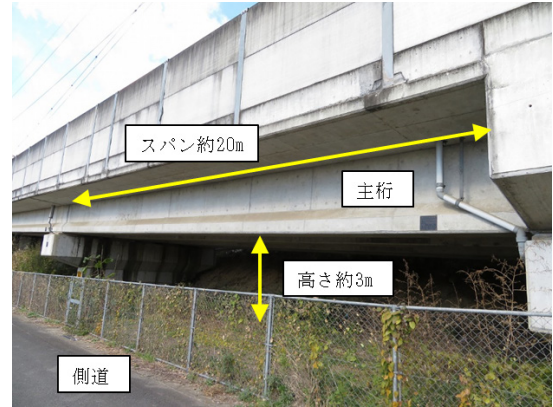


図-9 計測対象の鉄道高架橋<sup>8)</sup>

動画撮影でも最大ひび割れ幅および幅 0.15mm 以上のひび割れが計測できることがわかった。しかしながら、4K では、最小ひび割れを大きく計測していることがわかる。これは、抽出できていない箇所を考慮せず、抽出できた部分だけで平均ひび割れを算出しているためと考えられる。また、ハイビジョン撮影では、分解能 0.56mm/画素 に対し、最小ひび割れ幅 0.10mm のひび割れは画像上でぼやけてしまい、画像からひび割れが計測できない時点があり、この場合はひび割れ幅 0mm としている。したがって、ひび割れの開口を捉えるためにはハイビジョンでは不十分と判断した。

#### 4. 列車走行時の RC 桁を用いた計測

##### (1) 実験概要

図-9, 10 に示すように鉄道高架橋にて、市販の一眼レフデジタルカメラにより、4K で動画撮影し、当該主桁上を列車が通過した時のひび割れ幅やたわみの変化を計測した。動画は1秒当たり30枚撮影したが、開発技術による画像解析（以下、画像解析）は1枚おきで実施した。対象は、長さ20m、幅11m、高さ3mの複線鉄筋コンクリート（RC）T形4主桁の主桁下面の常時に開口しているひび割れ a～d ならびに桁のたわみとした。

##### (2) ひび割れ幅計測結果

ひび割れ a, b は側道から1番目の主桁にあり、同時に撮影した。ひび割れ c, d は側道から3番目の主桁にある同一のひび割れであるが、同一方向に通過する列車が異なる。カメラは、画像全体の輝度が均一になることを防止するために、撮影対象と同程度の明るさの場所に、撮影対象と平行に設置した。また、動画では静止画よりもカメラの保持および操作による機材の振動の影響が大きいため、三脚を使用し、撮影時間を列車通過前後に10

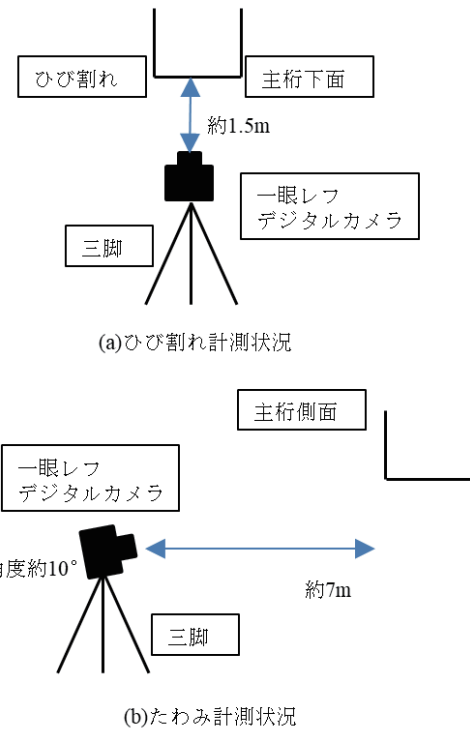


図-10 ひび割れ・たわみ計測状況

表-1 撮影条件ならびに列車通過前のひび割れ幅<sup>8)</sup>

ひび割れ名	a	b	c	d
分解能(mm/画素)	0.11	0.11	0.13	0.08
ひび割れ幅 (mm)	クラックスケール	0.2	0.3	0.2
	画像解析	0.25	0.21	0.18

秒ほど確保した。各ひび割れについて、分解能（画像中の1画素あたりの長さ）ならびに列車通過前のひび割れ幅を表-1に示す。開発技術とクラックスケールの差は0.1mm以下であり、対象が静止している場合、動画撮影した画像からクラックスケールの計測誤差と同程度の誤差でひび割れの幅が計測できた。計測値から列車通過前の計測値を引いた値である、列車通過時のひび割れ幅の変化量（以下、変化量）について、画像解析結果とパイ

型変位計によるサンプリング周波数 5000Hz での計測結果を図-11に示す。画像解析はパイ型変位計付近でのみ実施し、計測したひび割れの位置は図-11に青線で示している（ひび割れの記号は図中に記載）。いずれのひび割れも、画像解析により検出できた。また、パイ型変位計による計測結果より、ひび割れが約 3Hz で周期的に開閉していることが確認できる。ひび割れ c, d は、同一のひび割れであるが、ひび割れ c は d よりもひび割れ幅の変化量の振幅が大きく、周期がやや短い。これは、通過列車の速度が異なるためと考えられる。

開発技術では、ひび割れを構成する画素の輝度の累積値等を用いて、分解能以下の精度でひび割れ幅を計測するため<sup>3)</sup>、分解能の低下が計測精度の低下につながる。ひび割れ c は、最大変化量が常に負であり（図-11のひび割れ c の結果）、ひび割れ b, d よりパイ型変位計と画像解析による計測差が大きい。これは、ひび割れ b, d より分解能が低く、変化量の基準となる列車通過前も含めて、ひび割れ幅の計測誤差が大きいと考えられる。なお、分解能を保持した上で、桁の位置が高く撮影距離が長い桁下面等を撮影するには、望遠レンズを用いることが考えられる。図-11のように、ひび割れ a は画像の端で計測しており、4.5 秒以降ではひび割れ b よりもピントのブレが大きく、ひび割れが不鮮明に太く撮影されていた。このため、ひび割れ a の画像解析による最大変化量はパイ型変位計の結果よりも最大で 0.06mm 程度大きく計測され、4.5 秒以降のひび割れの開閉がわかりにくい。ひび割れ b～d で生じた 0.05mm 程度の計測誤差は、列車通過による地面や桁の振動等により当該画像でピントが合わず、ひび割れが不鮮明になり生じたと考えられる。ひび割れ b～d では、画像解析でも、パイ型変位計の結果と同様にひび割れ幅が周期的に変化していた。

(3) たわみ計測結果

たわみ計測では、主桁側面を動画撮影（0.12mm/画素、29.97fps）し、桁側面に貼付けた指標の位置変化から、列車通過時の変位を計測した。桁の変位について、画像解析結果とUドップラーを用いた非接触振動測定システム（サンプリング周波数、500Hz）<sup>9)</sup>による計測結果を図-12に示す。画像解析は、0.033秒毎に実施した。画像解析でも、非接触振動測定システムによる計測と同様に、桁の変位が約 3Hz で周期的に変化していた。変位が一致しない箇所の画像は、その他の時点の画像と色調が異なっており、地面や桁の振動に加えて、日射の変化が影響していると考えられる。

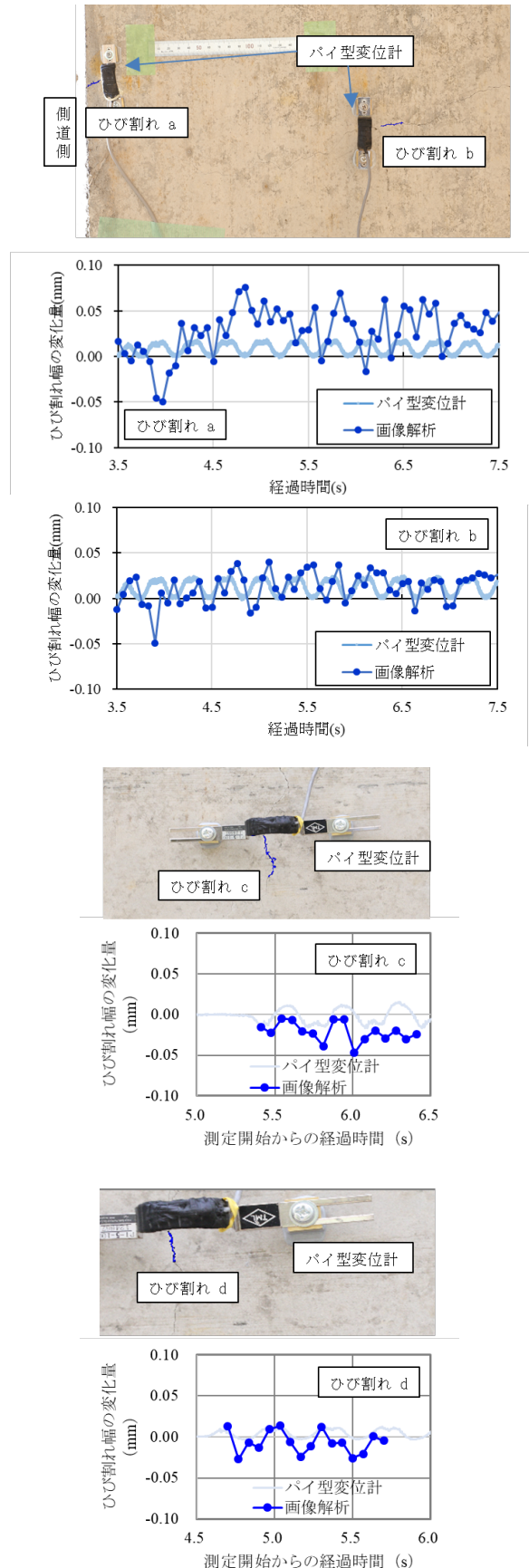


図-11 列車通過時のひび割れ幅の変化<sup>8)</sup>

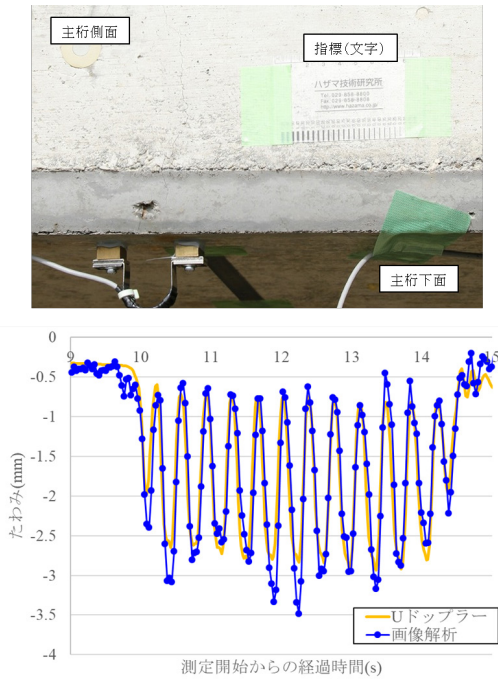


図-12 列車通過時の桁のたわみの変化<sup>8)</sup>

## 5. まとめ

本研究ではまず、4Kならびにハイビジョン動画を利用して、引張疲労試験時に発生あるいは開閉するひび割れ幅の挙動の計測を試みた。静的荷重作用時には、動画計測でクラックスケールと同様なひび割れ幅計測が実施できた。また、動的荷重作用時には、4Kの場合はひび割れの開閉が、ハイビジョンの場合はひび割れの開きが計測により確認できた。

また、本技術の鉄道高架橋を用いた現地計測への適用時には、分解能や撮影画像中におけるひび割れの位置等によりその計測精度が異なることを確認した。また、本研究では、RC桁に生じた幅0.20mm程度のひび割れの位置と幅、目視では確認困難な0.02mm程度のひび割れ幅の変化、および列車通過時の変位の変化が、本撮影条件下で動画撮影した画像を用いた手法により計測できることを確認した。

## 参 考 文 献

- 1) モニタリングシステム技術研究組合：土木構造物のためのモニタリングシステム活用ガイドライン(案)，2019
- 2) 大島優，富井孝喜，青木峻二：画像解析によるひび割れ自動検出手法について，土木学会建設技術発表会 2018 概要集，pp.90-96，2018
- 3) 佐藤祐子，渡辺健，野間康隆，西村毅，澤田純之：

輝度と幾何学的特性を用いたRC桁のひび割れ画像計測手法の開発，土木学会第73回年次学術講演会，Vol.73，V-611，2018

- 4) 野間康隆，早川健太郎，黒台昌弘，西村毅：UAVマルチコプタ撮影画像を用いたコンクリート構造物のひび割れ画像処理，リモートセンシング学会誌，Vol.38・No.3，pp.234-239，2018
- 5) 渡辺 健，東 広憲，三木 朋広，二羽 淳一郎：コンクリート構造実験を対象としたリアルタイム画像解析システムの開発，土木学会論文集E，Vol.66・No.1，pp.94-106，2010
- 6) 渡辺健，野間康隆：セメント系複合材料を対象とした形状関数による高速画像相関アルゴリズムの提案，土木学会論文集A2(応用力学)，Vol.70，No.2(応用力学論文集 Vol.17)，I\_929-I\_936，2014
- 7) 野間康隆，澤田純之，船津貴弘，西村毅，佐藤祐子，渡辺健，徳永宗正：動画を用いた引張疲労試験時のひび割れ幅計測に関する基礎的検討，土木学会第75回年次学術講演会，Vol.75，V-651，2020
- 8) 佐藤祐子，渡辺健，松岡弘大，野間康隆：動画を用いた列車通過時のRC桁のひび割れ幅の計測に関する基礎的検討，土木学会第75回年次学術講演会，Vol.75，V-652，2020
- 9) 上半文昭：鉄道構造物の遠隔非接触検査技術の開発，実験力学，Vol.17，No.4，pp.281-289，2018.

---

---

Fundamental investigation on measurement of crack width and deflection for  
tensile fatigue specimen and RC girder with train passing by means of videography

Yasutaka NOMA, Yuko SATO and Ken WATANABE

The measurement of crack widths and deflections is required in the inspection of concrete structures. In the present investigation, in-house and in-situ experiments were conducted to measure these values by means of videography. Concretely, the measurement of crack widths under the tensile fatigue experiment is performed by using methods to obtain the positions and widths of cracks by the luminance and geometric parameters from images. Furthermore, a fundamental investigation was conducted for the measurement of crack widths and deflections for RC girders during train passing by using the above method and the digital image correlation method.