

画像解析に基づくコンクリート構造物の ひび割れ検知手法

箕浦 慎太郎* 渡辺 勉* 後藤 恵一*
徳永 宗正* 上半 文昭*

Crack Detection Method for Concrete Structure Based on Image Analysis Method

Shintaro MINOURA Tsutomu WATANABE Keiichi GOTO

Munemasa TOKUNAGA Fumiaki UEHAN

With the speeding up of trains, there is concern about excessive response due to resonance caused by a train running on a railway concrete bridge. In order to maintain concrete bridge structures properly, it is important to measure the location and the width of cracks generated during trains running. In this study, a crack detection method for concrete structures based on an image analysis method called Sampling Moiré Method was developed. In addition, as a result of experiments conducted using a model bridge, PC sleepers and PRC specimens, it was confirmed that the width and the location of fine cracks generated in concrete structures can be measured with high accuracy and dynamically using this method.

キーワード：画像解析，サンプリングモアレ法，ひび割れ，コンクリート，PRC 構造

1. はじめに

コンクリート構造物に発生するひずみやひび割れは、当該構造物が受けた荷重履歴や耐久性を評価する直接的な指標となるため、その状態あるいは発生するまでの予兆を正確に把握することが、維持管理において非常に重要である。特に鉄道構造物では、列車の高速走行により発生する比較的高周波で微細なひずみやひび割れを高精度に計測する手法が求められている。

近年、列車の高速化に伴い、PRC 橋梁の共振現象が懸念されている¹⁾。既往の道路橋での研究より、繰り返し荷重を受ける PRC 部材では曲げひび割れの発生、進展が実験及び数値解析によって確認されている²⁾。鉄道用 PRC 橋梁でも共振現象によりひび割れの進展や疲労が問題となる可能性があり、このような構造物に発生する微細なひび割れの発生位置や幅を定量的に管理することが重要である。しかしながら、PRC 部材に発生するひび割れは、列車非在線時には閉じてしまうため、従来の目視による検査のみでは定量的な確認が困難である。

画像計測に基づきコンクリート構造物の変位やひずみを非接触で計測する手法に関する研究は数多く行われているが^{3) 4)}、列車走行時に PRC 部材に発生する動的な微小ひずみや高精度なひび割れの計測手法の開発・検証は十分とは言えない。そこで本研究では、列車通過時にコンクリート構造物に生じる微細なひび割れの幅や位置を動的に計測することを目的として、サンプリングモアレ法を応用したひび割れ検知システムの開発を実施するとともに、本手法による動的なひび割れ幅の計測精度及びひび割れ可視化の可否について検証を行った。

レ法を応用したひび割れ検知システムの開発を実施するとともに、本手法による動的なひび割れ幅の計測精度及びひび割れ可視化の可否について検証を行った。

2. ひび割れ検知システムの概要

図1にひび割れ検知システムの概要を示す。本研究では、これまで主に高精度な変位やひずみ計測に用いられたサンプリングモアレ法⁴⁾を応用し、動的に高精度なひび割れ計測が可能なシステムを開発した。サンプリングモアレ法では計測対象へのターゲット形成が必要であるが、比較的短い露光時間で、サブピクセルでの高精度な計測が可能であり、画像解析時の計算負荷が少ないという利点がある⁵⁾。既往の研究では、この手法を用いて静的な構造物のひび割れ等を検知する手法が各種提案さ

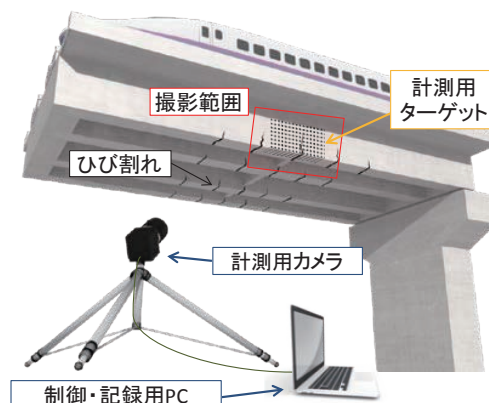


図1 ひび割れ検知システムの概要

* 鉄道力学研究部 構造力学研究室

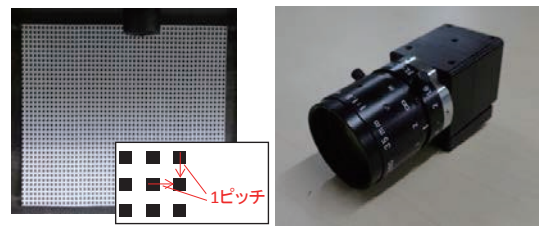
特集：鉄道力学

れているが、微細なひび割れを動的に計測する手法についてはまだ確立されていない。そこで、本研究ではひび割れの動的な検知手法を開発し、その計測精度やコンクリート構造物への適用可能性の検証を行った。

本研究で開発したひび割れ検知システムでは、まずあらかじめひび割れの発生が予想される箇所周辺にターゲットを形成する。そして列車走行時にこのターゲットを小型のカメラで撮影し、得られた撮影画像を解析することでひび割れの位置や幅等を詳細に計測する。撮影の制御と画像の記録、簡易な解析はカメラと USB3.0 ケーブルで接続された汎用ノート PC とにより行う。計測装置は小型カメラ、三脚、ノート PC で構成され、計測現場までの持ち運びや設置が容易である。

図 2 に計測で使用するターゲット及びカメラを示す。ターゲットは図 2 (a) に示すような格子模様である（以下、格子状ターゲットと呼ぶ）。格子状ターゲットの領域や格子サイズは任意に設定可能である。格子状ターゲットの隣り合う黒い正方形の間隔（ピッチ）を変更することで分解能の調整が可能であり、その分解能は格子ピッチの 1/500 である。本研究では簡易にターゲットの形成が可能なマグネット及びシール式のターゲットに加え、コンクリートのひび割れ計測に適用するために、後述するスタンプ及びカッティングシートを用いたひび割れに追従するターゲット形成方法を提案した。計測に用いたカメラについては、本システムでは列車通過時に構造物に発生する微小なひび割れを動的に検知するために、図 2 (b) に示すような 220 万画素で最大 170fps での撮影が可能な CMOS モノクロカメラ（Ximea 製 Xiq MQ022MG-CM）を使用した。

図 3 にひび割れ検知手法の概要を示す。本研究では、列車在線時にのみひび割れが開口することを利用し、撮影した列車非在線時の画像と在線時のひび割れ開口時の画像それぞれに対し、サンプリングモアレ法を用いてターゲット領域内の相対変位を高精度に計測し、その差を求めることで微小なひび割れを検知・可視化することが可能なアルゴリズムを開発した。ひび割れ計測の際には、ひび割れの発生が予測される地点の周辺に図 3 に示すような格子状ターゲットをあらかじめ形成しておく。計測ではターゲットを形成した範囲を撮影し、撮影データを解析する。解析時には撮影画像中のターゲットの領域を微小な領域に分割し、その分割した領域ごとでひび割れ発生前後の相対変位を算出する。相対変位算出後、隣り合う領域間で相対変位の差を計算し、その差が閾値よりも大きな領域でひび割れが発生したとみなし検知する。また、ひび割れ発生位置が分かっている場合には、ターゲット内で任意に領域を指定し、その領域間の相対変位を計測することでひび割れ幅の算出も可能である。



(a) 格子状ターゲット (b) 撮影用カメラ

図 2 計測で使用するターゲット及びカメラ

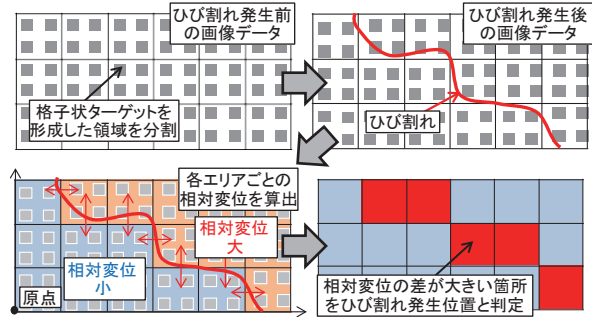


図 3 ひび割れ検知手法の概要

3. ひび割れ検知システムの検証方法

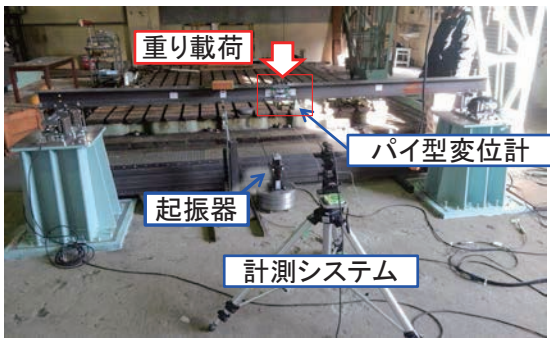
3.1 模型橋梁を用いた動的計測の検証

図 4 に模型橋梁を用いた検証の概要を示す。本検証では、模型橋梁を用いてひび割れの位置や形状が判明した理想的な条件でのひび割れ幅の動的計測精度の検証を行った。模型橋梁の桁は H 鋼から成り、スパン 2800mm である。ひび割れについては、図 4 (b) に示すように、スパン中央部で部材を分割し、それぞれの上フランジのみを当て板とボルトで接合することで再現した。比較対象として、パイ型変位計を用いた計測も同時に行った。格子状ターゲットのピッチは 1mm ピッチ（分解能は 0.002mm）とし、パイ型変位計の上下にマグネットを接着して配置した。ターゲットの撮影時のフレームレートは 150fps とした。なお、ひび割れ検知システムとパイ型変位計との比較の際には、模擬ひび割れ発生位置の断面においては、分割されたそれぞれの H 鋼は変形せず平面保持が成り立つものとし、パイ型変位計の上下に設置された格子状ターゲットから得られた変位を、パイ型変位計と同じ位置の変位に換算することにより比較した。

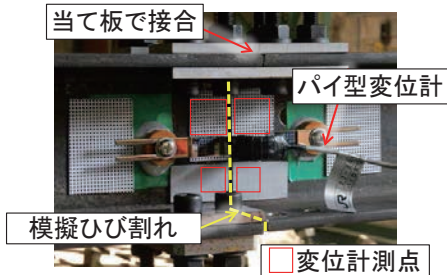
表 1 に計測ケースを示す。計測では模型橋梁のスパン中央部に重りを載荷した際の静的なひび割れ幅と、スパン中央部の直下に設置してワイヤーで模型橋梁と接続された起振器（㈱サンエス製 SSV-125）で加振した際の動的なひび割れ幅を計測した。

3.2 PC まくらぎを用いた曲げ破壊試験時の計測の検証

図 5 に対象とした PC まくらぎの曲げ試験の状況を示す。本検証では、実際にコンクリート部材に発生するラ



(a) 模型橋梁を用いた計測の状況



(b) ひび割れ計測位置の拡大（側面）

図4 模型橋梁を用いたひび割れ計測試験

表1 計測ケース

	载荷方法
静的载荷	模型橋梁のスパン中央部に10kgの重りを载荷
動的加振	模型橋梁のスパン中央下部に設置した起振器により10Hzで加振
	模型橋梁のスパン中央下部に設置した起振器により20Hzで加振

ランダムなひび割れを計測可能であるかどうかを検証した。コンクリート部材の例としてPCまくらぎを対象とし、曲げ試験時に発生するひび割れに対してひび割れ位置の可視化及びひび割れ幅の計測を実施した。曲げ試験はJIS E1201に基づきレール位置での正曲げ試験を実施した。対象としたPCまくらぎは、プレテンション式6号PCまくらぎである。また曲げ試験時の载荷スパンは700mmである。

表2に検証で使用したPCまくらぎを、図6にPCまくらぎに形成したターゲットを示す。今回の試験では、コンクリートのひび割れに追従するターゲットの効果的な作成方法の検討として、カッティングシート（図6(a)、格子ピッチ10mm）とスタンプ（図6(b)、格子ピッチ2mm）の2種類の方法により格子状ターゲットを形成し、ひび割れの発生、ひび割れの分布及びひび割れの幅が検知可能であるか検証を行った。スタンプによるターゲットの形成では、一辺が35mmの正方形のターゲット形成用スタンプを複数回押すことで形成した。

3.3 PRC 供試体を用いた繰り返し载荷の動的計測の検証

図7に対象としたPRC供試体の概要を、図8に繰

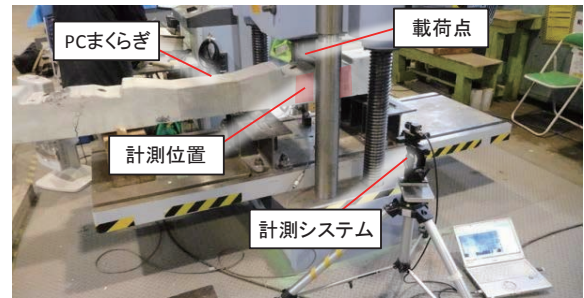
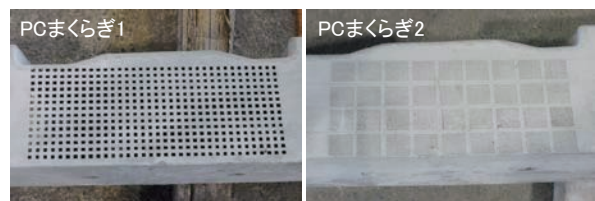


図5 PCまくらぎの曲げ破壊試験の状況

表2 計測対象としたPCまくらぎ

まくらぎ番号	ターゲット	ピッチサイズ
PCまくらぎ1	カッティングシート	10mm
PCまくらぎ2	スタンプ	2mm



(a) カッティングシート (b) スタンプ

図6 PCまくらぎに形成した格子状ターゲット

り返し载荷試験時の様子を示す。本検証では、実際のPRC橋梁に列車通過時に発生するひび割れ計測の可能性を検証するために、PRC供試体を用いた繰り返し载荷試験を実施し、PRC部材にランダムに発生し、载荷時と非载荷時にプレストレスにより開閉する微小なひび割れを動的に計測可能かどうかを検証した。本検証では、後述するPCまくらぎを用いた検証結果を考慮し、図8に示すようにピッチサイズが2mmのスタンプにより形成したターゲットを使用した。一辺が50mmの正方形のターゲット形成用スタンプを用いて、供試体側面のスパン中央部付近を中心に隙間なくターゲットを形成した。

表3に载荷方法と計測方法を示す。载荷方法は、まずPRC供試体を200kNまで静的に载荷・除荷し、その後20kN～200kNの範囲で5Hzで载荷した。撮影時のフレームレートについては、静的载荷・除荷中には5fpsで、動的载荷中には50fpsで撮影した。静的载荷・除荷時および繰り返し载荷時において、供試体最下端部でのひび割れ幅の計測と、供試体側面に発生したひび割れの可視化を行った。供試体の撮影範囲は、水平方向は約600mm、鉛直方向は約250mmとし、供試体長手方向の中心が画面の中心となるように撮影した。

4. ひび割れ検知システムの検証結果

4.1 模型橋梁を用いた動的計測の検証結果

図9に模型橋梁を用いたひび割れ幅の計測結果を示す。図9より、0.1mm程度より微小な変位領域に対して

特集：鉄道力学

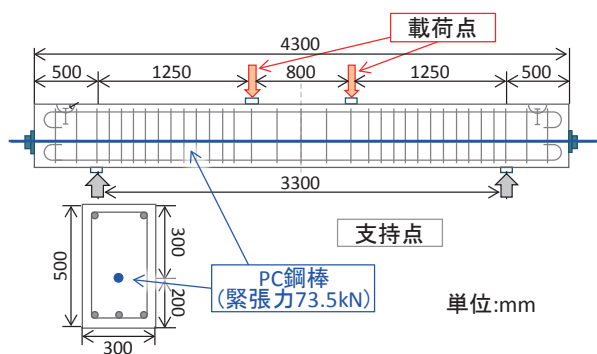


図7 PRC 供試体概要

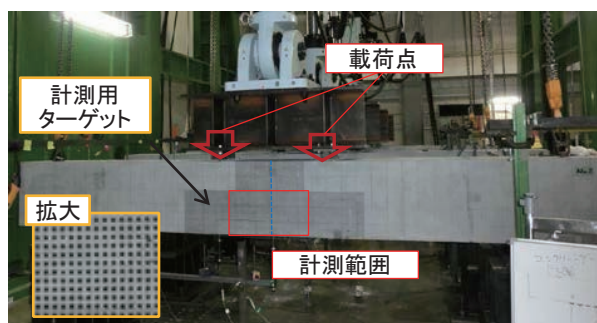


図8 繰り返し荷重試験の状況

表3 荷重方法と計測方法

	荷重方法	計測方法
静的荷重	0kN から 200kN まで荷重後、0kN まで除荷	220 万画素で 5fps で撮影
動的荷重	20kN ~ 200kN の範囲で 5Hz で繰り返し荷重	220 万画素で 50fps で撮影

も本システムがパイ型変位計と同程度の精度でひび割れ幅を計測可能であることがわかる。また実際のコンクリート構造物の計測対象となる 20Hz 程度以下の動的な挙動に対しても高精度にとらえることが可能であることが確認できた。これより実際の構造物におけるひび割れの動的計測に対応可能であると考えられる。

4.2 PC まくらぎを用いた曲げ破壊試験時の静的計測の検証結果

図 10 に PC まくらぎの曲げ試験における荷重変位曲線及び、ひび割れを挟む位置のターゲットの相対変位と荷重荷重の関係を示す。なお、PC まくらぎの曲げ試験ではひび割れは複数個所に発生するが、図 10 で対象としたひび割れは荷重点の直下に発生したひび割れである。図 10 (b) に示すようにターゲット間の相対変位の増加の度合いが大きくなる点(変曲点)でひび割れが発生した。また、今回の計測では、PC まくらぎ 2 により細かい格子ピッチのターゲット(スタンプにより形成したターゲット、格子ピッチ 2mm)を用いたため、PC まくらぎ 1 と比較してノイズの少ない計測結果が得られた。

表 4 に曲げ試験時に目視によりひび割れ発生を検知した荷重と、本システムを用いてひび割れ発生を検知した

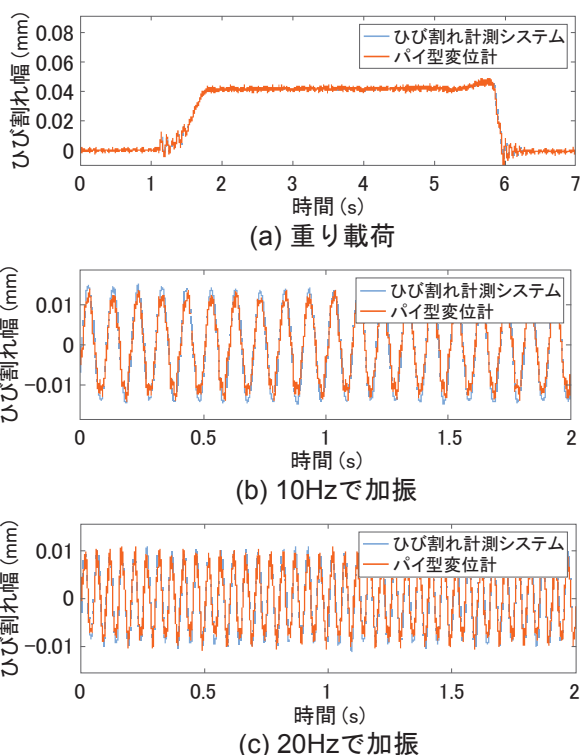


図9 模型橋梁を用いた計測結果

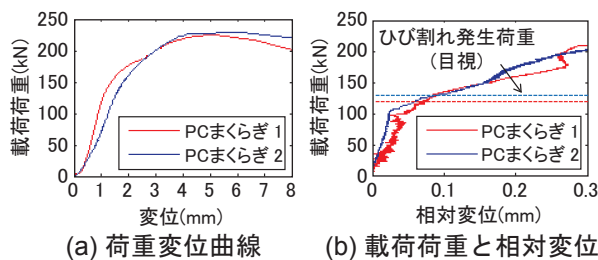


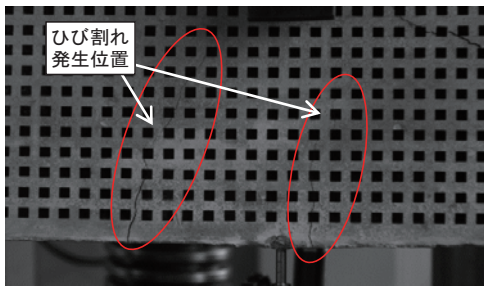
図10 荷重荷重と変位の関係

表4 ひび割れ発生荷重

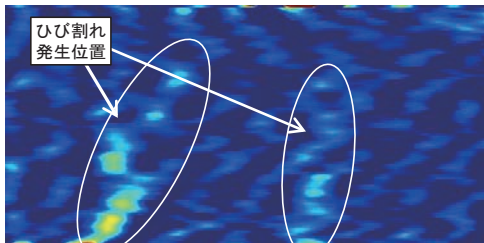
まくらぎ番号	ターゲット	目視	本システム
PC まくらぎ 1	カッティングシート	130kN	102kN
PC まくらぎ 2	スタンプ	120kN	105kN

荷重の比較を示す。本システムにおけるひび割れ発生荷重は、図 10(b) の変曲点の荷重である。表 4 より、今回の試験では本システムは目視よりも早い段階でひび割れの発生を検知可能であった。またひび割れ幅と荷重荷重の関係の本システムを用いた計測により取得可能であることがわかる。

図 11 に本計測で得られた PC まくらぎ 1 のひび割れ分布図を、図 12 に PC まくらぎ 2 のひび割れ分布図を示す。図 11 (a) 及び図 12 (a) は撮影画像、図 11 (b) 及び図 12 (b) は相対変位の差を求めることで得られたひび割れ可視化画像である。図 11 より、PC まくらぎ 1 では、大まかなひび割れ位置の特定は可能であったが、形成したターゲットのピッチサイズが大きく可視化の際の分解能が低かった。計測で対象とするコンクリート表

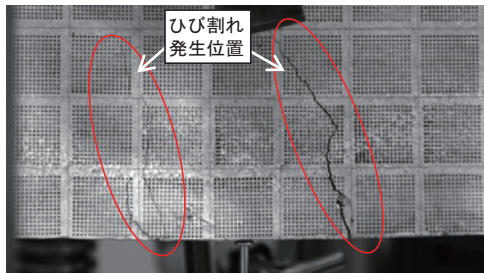


(a) 計測範囲及びひび割れ発生状況

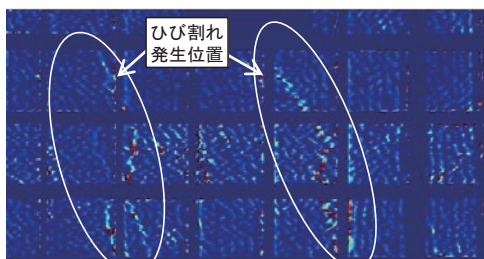


(b) ひび割れ可視化結果

図 11 ひび割れ分布 (PC まくらぎ 1)



(a) 計測範囲及びひび割れ発生状況

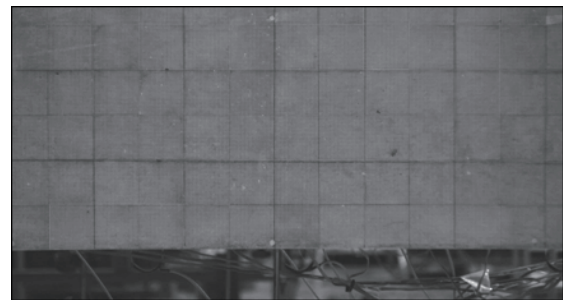


(b) ひび割れ可視化結果

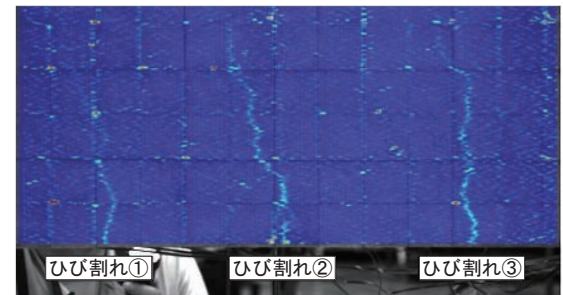
図 12 ひび割れ分布 (PC まくらぎ 2)

面の微小なひび割れの可視化のためには、より小さいピッチサイズのターゲットが必要であると考えられる。また図 12 より、PC まくらぎ 2 のケースでは、図 11 の PC まくらぎ 1 のケースと比較して比較的高い分解能で微小なひび割れを特定可能であったが、ひび割れが発生していない位置やターゲットを形成していないエリア付近にもノイズが現れた。これはスタンプによるターゲット形成時に PC まくらぎ表面の不陸や汚れによってターゲットの一部にゆがみや欠けが発生し、それらが画像処理の際にノイズとして現れたことと、ターゲットを形成していない部分付近では変位計算に用いる縞模様が適切に形成できないことがその原因と考えられる。

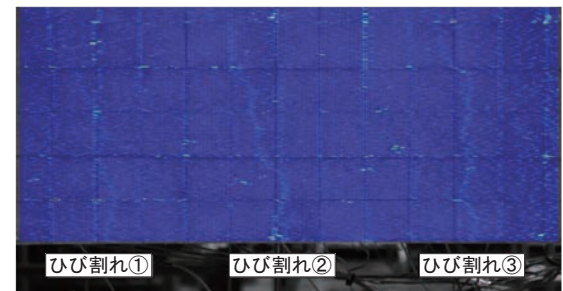
以上のことから、ひび割れ可視化の際には、2mm 程度のピッチサイズのターゲットを使用し、ターゲット形成



(a) 撮影画像



(b) 静的載荷後のひび割れ可視化状況



(c) 静的除荷後のひび割れ可視化状況

図 13 PRC 供試体に発生したひび割れの可視化結果

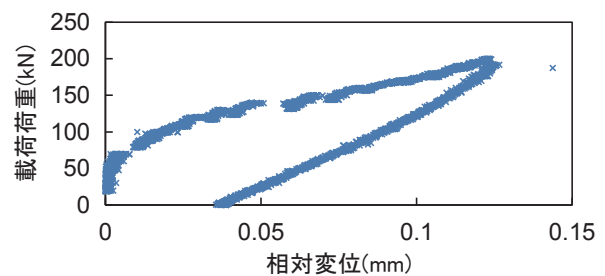


図 14 載荷荷重と相対変位の関係
(ひび割れ②の最下端部)

前にある程度対象の汚れや不陸等を取り除き、可能な限り隙間なくターゲットを形成するのがよいと考えられる。

4.3 PRC 供試体を用いた繰り返し載荷の動的計測の検証結果

図 13 に静的載荷試験時のひび割れの可視化結果を示す。図 13 (b) より、撮影範囲内ではひび割れが分散し 3 本のひび割れが発生する様子と、それらのひび割れが鉛直上向きに進展していく様子が確認でき、本システムを用いて静的載荷時のひび割れの発生位置を可視化できることが確認された。また図 13 (c) に示す除荷後のひび割れ可視

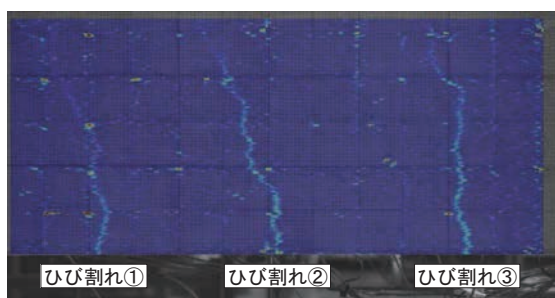
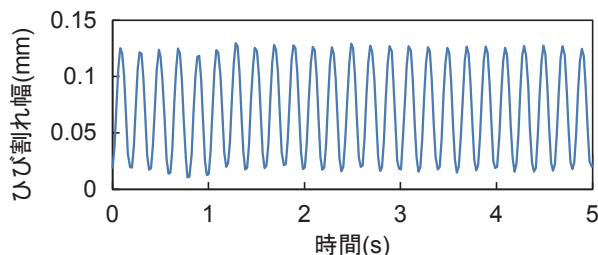


図 15 繰り返し载荷試験中のひび割れ可視化状況

図 16 繰り返し载荷試験中のひび割れ幅
(ひび割れ②の最下端部)

化図より、PRC 供試体では静的载荷時に発生したひび割れは、除荷後には概ね閉じてしまうことが確認された。

図 14 に供試体中央に発生したひび割れ（図 13 ひび割れ②）の静的载荷試験時の相対変位と载荷荷重の関係を示す。図 14 より、ひび割れが発生していない PRC 供試体の载荷荷重が約 70kN 以上の領域において相対変位の増加割合が大きくなっており、70kN 付近でひび割れが発生したと考えられる。200kN まで载荷した時点で、相対変位は約 1.25mm となった。除荷時には荷重の減少に伴い相対変位は減少し、0kN まで除荷した際には約 0.03mm の残留ひび割れが生じることが確認できた。

図 15 に図 13 と同じ範囲で計測した繰り返し载荷時のひび割れの可視化結果を示す。また図 16 に中央部に発生したひび割れ（図 13 ひび割れ②）について供試体最下端部でのひび割れ幅の時刻歴波形を求めた結果を示す。図 15 より、繰り返し载荷時においても静的载荷時と同様にひび割れ位置の可視化が可能であることが確認された。また図 16 より、繰り返し载荷時にも微細なひび割れのひび割れ幅の計測が可能であることが確認された。

以上の結果より、本システムは、PRC 橋梁の微細なひび割れの可視化やひび割れ幅の動的な計測への適用の可能性が示された。

5. まとめ

本研究では、列車走行時の微細なひび割れを動的に計測することを目的として、サンプリングモアレ法を応用したひび割れ検知システムの開発を実施するとともに、本システムによる動的ひび割れ計測の精度とひび割れ可視

化の検証を行った。得られた知見は以下の通りである。

- (1) 模型橋梁を用いた理想的な条件での動的なひび割れ計測精度の検証結果より、本システムは、0.1mm 以下の微小なひび割れであっても、実際のコンクリート構造物の計測で対象となる 20Hz 程度以下の動的な挙動を高精度に計測可能であることを確認した。
- (2) PC まくらぎの表面にランダムに発生するひび割れの静的な計測の検証結果より、本システムは PC 部材に発生するひび割れを目視よりも早く検知でき、発生したひび割れの位置を可視化できることを確認した。
- (3) PRC 供試体にランダムに発生するひび割れの動的な計測の検証結果より、PRC 部材に生じる微小なひび割れの幅を動的に計測可能であり、またひび割れ位置の可視化も可能であることが確認され、本システムは列車通過時にコンクリート構造物に発生する微小なひび割れ計測への適用の可能性が示された。
- (4) PC まくらぎ及び PRC 供試体を用いた検証により、本計測システムを用いて、ひび割れ幅と载荷荷重の関係を取得可能であることを示した。

今後は本システムを用いた橋梁や高架橋等の実構造物の計測の実施、遠距離計測手法やカメラの振動抑制手法の開発を行う予定である。またコンクリート構造物の载荷荷重とひび割れ幅の関係をあらかじめ本システムや数値解析で把握しておき、ひび割れ計測結果から構造物の荷重履歴や各部材の健全度評価等を検討していく予定である。

文献

- 1) 曾我部正道, 松本信之, 藤野陽三, 涌井一, 金森真, 宮本雅章: 共振領域におけるコンクリート鉄道橋の動的設計法に関する研究, 土木学会論文集, No.724, I-62, pp.83-1002, 2003
- 2) 真鍋英規, 川谷泰山, 玉越隆史, 石尾真理, 春田健作: PC 梁部材におけるひび割れ性状に及ぼす繰り返し载荷の影響に関する研究, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.9, pp.417-424, 2009
- 3) 出水亨, 松田浩, 伊藤幸広, 木村嘉富: デジタル画像相関法を用いた撤去 PCT 桁橋の载荷試験時における変位, ひずみ, ひび割れ計測, コンクリート工学論文集, Vol.34, No.2, pp.1411-1416, 2012
- 4) 玉井博貴, 生駒昇, 原卓也, 藤垣元治: サンプリングモアレ法による土木構造物の変位・変位角・振動数等の計測, 建設コンサルタンツ協会近畿支部研究発表会論集, No.46, pp.112-1-112-6, 2013
- 5) 李志遠, 王慶華, 有川秀一, 米山聡: 面内変位分布計測におけるデジタル画像相関法とサンプリングモアレ法の比較研究, 実験力学, Vol.15, No.4, pp.303-308, 2015