

サンプリングモアレ法に基づくコンクリート構造物のひび割れ検知手法

鉄道総研 正会員 ○箕浦 慎太郎
 鉄道総研 正会員 渡辺 勉

鉄道総研 正会員 徳永 宗正
 鉄道総研 正会員 上半 文昭

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は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。近年画像解析等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が数多く行われているが¹⁾、動的で高精度な微小ひずみやひび割れの計測に対する検証は十分等とは言えない。そこで本研究では、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手法の開発を実施するとともに、本手法の精度検証を実施したので報告する。

2. ひび割れ検知システムの開発 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²⁾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ターゲットの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³⁾。ターゲットは図1(b)に示すような格子模様である(以下、格子状ターゲット)。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り、その分解能は格子ピッチの1/500である。本研究では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随するターゲット形成方法を提案した。本システムでは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、200万画素で最大170fpsでの撮影が可能なCMOSモノクロカメラを使用した。

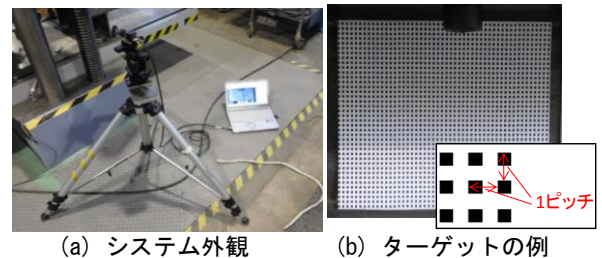
図2にひび割れ検知手法の概要を示す。本研究では、撮影したひび割れ発生前後の画像から、サンプリングモアレ法を用いてターゲット領域内の相対変位を高精度に計測し、その差を求めることで微小なひび割れを検知し可視化することが可能なアルゴリズムを開発した。ひび割れ計測の際には、図2に示すように、ひび割れの発生が予測される地点の周辺にあらかじめ格子状ターゲットを設置しておき、その範囲内をさらに微小な領域に分割し、その分割した領域ごとでひび割れ発生前後の相対変位を算出する。相対変位算出後、隣り合う領域間で相対変位の差を計算し、その差が閾値よりも大きな領域でひび割れが発生したとみなし検知する。また、ひび割れ発生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もひび割れ幅の算出が可能である。

3. 開発したシステムの検証

3.1 検証方法

(1) 模型橋梁を対象とした動的試験 図3に対象とした鋼製の模型橋梁とひび割れ計測位置を示す。スパン中央にひび割れを模擬した鋼製の模型橋梁を用いて、本システムの動的計測への適用性についての検証を行った。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接着して配置した。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。模型の加振は起振器((株)サンエス製SSV-125)により実施した。

(2) PCまくらぎを対象とした曲げ破壊試験 図4に対象としたPCまくらぎと曲げ試験の状況を示す。曲げ試験はJIS



(a) システム外観 (b) ターゲットの例

図1 ひび割れ検知システムの概要

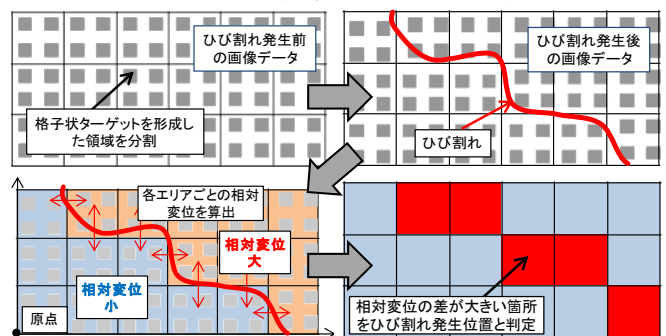


図2 ひび割れ検知手法の概要

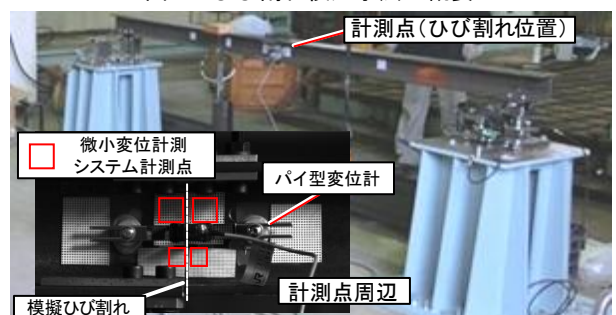


図3 模型橋梁の概観とひび割れ計測位置



図4 PCまくらぎの曲げ破壊試験の状況



(a) カッティングシート (b) スタンプ

図5 PCまくらぎに形成した格子状ターゲット

E1201に基づきレール位置での正曲げ試験を実施した。載荷スパンは700mmである。図5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作成方法の検討として、カッティングシート(図5(a), 格子ピッチ10mm)とスタンプ(図5(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。

3.2 検証結果

(1) 模型橋梁を用いた動的試験 図6に模型橋梁を用いた計測結果を示す。図6より、本システムが0.1mm程度より微小な変位領域に対してもパイ型変位計と同程度の精度でひび割れ幅を検出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、150fpsで撮影することでその挙動を高精度にとらえることが可能であることが確認でき、実際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。

(2) PC まくらぎを対象とした曲げ破壊試験 図7に曲げ試験時の荷重変位曲線及び、ひび割れを挟む位置のターゲットの相対変位と載荷荷重の関係を示す。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7で対象としたひび割れは載荷点の直下に発生したひび割れである。図7(b)で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。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を用いたため、ノイズの少ない計測結果が得られた。図7よりひび割れ幅と載荷荷重の関係把握することができる。また、表1に曲げ試験時の目視と本システムでのひび割れ発生を検知した荷重の比較を示す。ひび割れ検知システムにおけるひび割れ発生荷重は、図7(b)の変曲点の荷重である。表より、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ることがわかる。またひび割れ幅と載荷荷重の関係より、ひび割れ計測の結果から構造物の載荷荷重などを評価ができる可能性を示した。

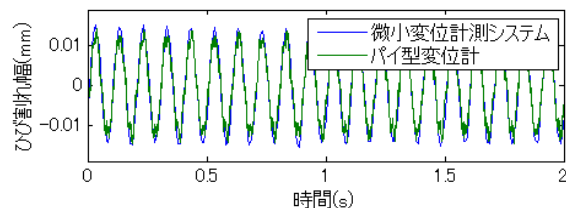
図8に本計測で得られたPC まくらぎのひび割れ分布図を示す。図8では、図7(b)での変曲点の相対変位を閾値として用いた。図8(c)は図8(b)で算出した相対変位の差を求めることで算出した。図8より、PC まくらぎに発生したひび割れの分布を検知可能であることがわかった。

以上の結果より、あらかじめひび割れ幅と荷重の関係を本システムや数値解析で把握しておくことで、実構造物においてもひび割れ計測結果から作用した荷重等を推定できる可能性があることがわかった。実構造物におけるひび割れ検知の閾値の決定方法は、撮影画像中に目視可能なひび割れがある場合にはそのひび割れ幅を計測して決定する方法や、目視可能なひび割れが存在しない場合には既往の計測結果や数値解析結果等から決定する方法等が考えられる。

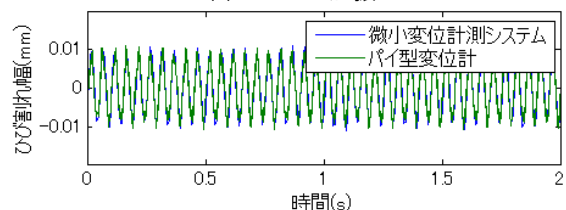
4. まとめ 本研究で得られた知見は以下の通りである。(1) 本研究で開発したサンプリングモアレ法に基づくひび割れ検知システムは、構造物の微小な動的変位も計測可能であることを確認した。(2) PC まくらぎを用いた曲げ破壊試験より、ひび割れの発生やひび割れの分布を検知可能であることを確認した。今後は本システムを用いた橋梁や高架橋等の実構造物の計測の実施、遠距離計測手法やカメラの振動抑制手法の開発を行う予定である。

参考文献

- 1) 出水享他：デジタル画像相関法を用いた撤去PCT桁橋の載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
- 2) 玉井博貴他：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、N0.46, pp.112-1~112-6, 2013
- 3) 李志遠他：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

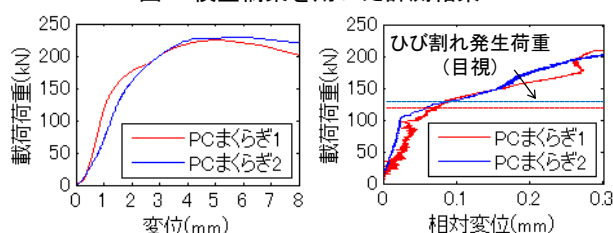


(a) 10Hz で加振



(b) 20Hz で加振

図6 模型橋梁を用いた計測結果



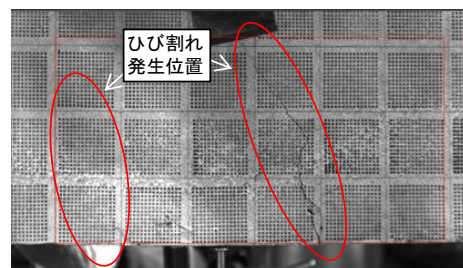
(a) 荷重変位曲線

(b) 載荷荷重とひび割れ幅

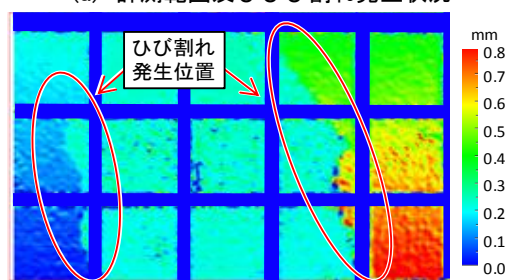
図7 載荷荷重とひび割れ幅の関係

表1 ひび割れ発生荷重

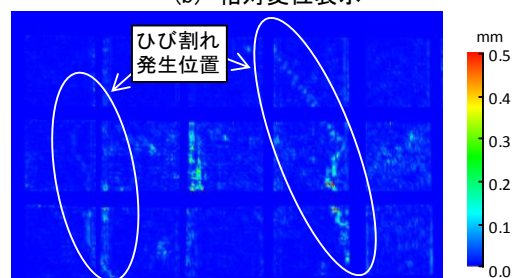
	ターゲット	目視	システム
PC まくらぎ 1	カッティングシート	130kN	102kN
PC まくらぎ 2	スタンプ	120kN	105kN



(a) 計測範囲及びひび割れ発生状況



(b) 相対変位表示



(c) ひび割れ可視化結果

図8 ひび割れ分布