

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月31日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560102

研究課題名（和文） 非接触変位場計測に基づくリアルタイムき裂モニタリングシステムの開発

研究課題名（英文） Development of Real-time Crack Monitoring System Based on Non-contact Measurement of Displacement Field

研究代表者

日下 貴之（KUSAKA TAKAYUKI）

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号：10309099

研究成果の概要（和文）：

近年、インフラ構造物等の経時劣化や強度不足が問題視される中、構造物の健全性をリアルタイムに監視する計測システムが注目されている。本研究では、申請者らが開発を進めてきた画像情報に基づく非接触変位場計測システムを基礎として、コンクリート構造物等の表面き裂をリアルタイムに定量評価できる計測システムを構築することを試みた。その結果、様々な性状のコンクリート表面に発生したき裂を精度よく検出できる計測システムを構築することに成功した。

研究成果の概要（英文）：

Recently, structural health monitoring systems for infrastructures have attracted the attention of many researchers. In this study, a novel health monitoring system based on non-contact measurement of displacement field has focused on as a crack detection system for concrete structures. The results suggested that the proposed system could precisely evaluate the initiation and propagation of cracks occurring near the surface of the structures.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学，機械材料・材料力学

キーワード：損傷力学，ヘルスマニタリング

## 1. 研究開始当初の背景

近年、インフラ構造物等の経時劣化や強度不足が問題視される中、構造物の健全性をリアルタイムに監視するシステム（Structural Health Monitoring system, SHM システムと略記）が注目されている。SHM システムは、概ね、光ファイバー等を用いた構造物埋込型のものと、赤外線等を用いた非接触型のものに

大別できる。前者、後者ともに、短所・長所を有するが、特に、後者では、比較的広範囲を効率的に監視でき、既設構造物への適用にも向くことから、国内外で精力的に研究開発が進められている。本研究も、後者に属する技術であるが、可視光画像を元データとすること、評価対象物の力学情報を積極的に活用することで、既存の手法よりも簡便で信頼

性の高いシステムを構築することができる  
と期待される。

## 2. 研究の目的

本研究では、申請者らが開発を進めてきた画像情報に基づく非接触 SHM システムを基礎として、コンクリート構造物等の表面き裂をリアルタイムに定量評価できる SHM システムを構築することを試みた。これまでの申請者らの研究で明らかになった課題は、(1)各種評価パラメータがき裂検出感度に及ぼす影響が不明であること、(2)長期使用や外乱等に対する安定性が不十分であること、(3)既設構造物への応用が考慮されていないこと等であった。本研究では、これらに加えて、評価パラメータの変更が容易なデジタル画像関連法をシステムに実装することを含めて、以下の4項目を検討課題とした。

### (1) 非接触き裂監視システムの試作

デジタル画像関連法を用いた非接触変位場計測システムを構築し、申請者らが開発した手法を用いて、き裂発生状態を可視化できるシステムを試作する。

### (2) き裂検出感度に及ぼす因子の解明

仮想グリッドの形状や寸法等の測定パラメータ、ひずみ場をき裂情報に変換するための評価パラメータ等がき裂検出感度に及ぼす影響を解明する。

### (3) システムのロバスト化・安定化

評価対象物の状態変化(表面性状変化、温度変化等)を自己補正し、長期安定的(5年程度を想定)に動作可能な評価手法(アルゴリズム)を開発する。

### (4) システムのベースラインレス化

現状では、基準画像(ベースライン)と評価画像を比較しき裂診断を行うが、既設構造物の即時診断への応用を考慮して、ベースラインを必要としない評価手法を開発する。

## 3. 研究の方法

本研究は、評価対象物の力学状態を厳密に解析し、画像データを定量的なき裂情報に変換することによって、コンクリート構造物等の表面き裂をリアルタイムに監視できるシステムの構築を狙ったものである。また、屋外での長期使用等にも対応すべく、種々の外乱に対しても十分なロバスト性と安定性を有するシステムの構築を目指している。さらに、既設構造物の即時診断にも対応すべく、ベースラインを必要としないシステムの構築を目指している。具体的には、以下に示すように、平成21年度に非接触き裂監視システムの試作およびき裂検出感度に及ぼす因

子の解明、平成22年度にシステムのロバスト化・安定化、平成23年度にシステムのベースラインレス化に取り組んだ。

### (1) 非接触き裂監視システムの試作

申請者らによるこれまでの検討では、格子法を用いて変位場計測を行ってきた。しかし、この手法では、評価対象物に標点をマーキングする必要があり、検討を効率的に行うことが困難であり、実用化にも向かない。このことから、本研究では、近年、普及が著しいデジタル画像関連法を用いて変位場計測を行うことを試みた。また、一般に、デジタル画像関連法では、パターンマッチングに使用するテンプレートのサイズ等のパラメータが、同定される変位場の精度や分解能に大きな影響を及ぼすことが知られている。このことから、本研究では、画像関連パラメータが変位場計測に及ぼす影響を明らかにし、き裂診断に適した画像関連パラメータを抽出することを試みた。

### (2) き裂検出感度に及ぼす因子の解明

本研究では、画像データ上に生成した仮想グリッドを基準にき裂診断を行うため、仮想グリッドの形状や寸法等の測定パラメータが、き裂検出感度に直接影響する。また、これまでは最大主ひずみに着目し検討を行ってきたが、より高度な診断を行うためには、他のパラメータにも留意する必要がある。このことから、研究では、これらのパラメータがき裂検出感度に及ぼす影響を解明することを試みた。また、試作したき裂監視システムについて、コンクリート製4点曲げ試験体を用いて実証試験を行った。

### (3) システムのロバスト化・安定化

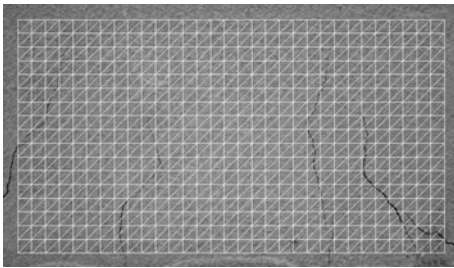
屋外に設置された構造物等では、日照や湿度等の影響のほか、苔等の付着による表面性状変化を無視することはできない。また、構造物によっては、SHMシステム設置時点で、すでに損傷を生じている場合も有り得る。このことから、本研究では、様々な外乱の影響を自己補正し、長期安定的に動作可能なき裂診断手法を開発することを試みた。また、試作したき裂監視システムについて、コンクリート製4点曲げ試験体を用いて実証試験を行った。

### (4) システムのベースラインレス化

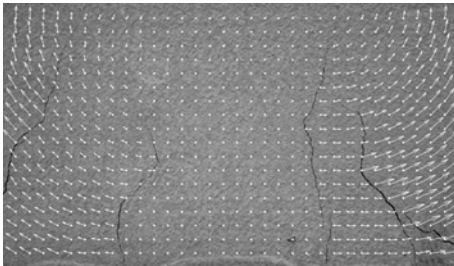
本システムの短所の一つは、ベースラインデータを必要とする点にある。長期的に監視する構造物の場合には、このことは大きな問題にならないが、本システムを既設構造物の即時診断等に应用する場合には、重大な障害となり得る。このことから、本研究では、構造物が受ける荷重変動や温度変化等を利用



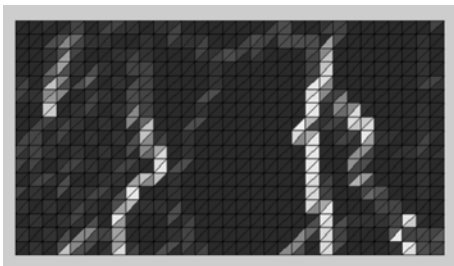
(a) 画像データの取得



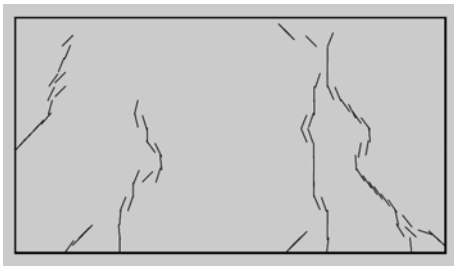
(b) 仮想グリッドの生成



(c) 変位場の算出



(d) ひずみ場の算出



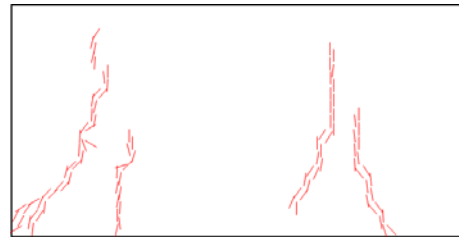
(e) き裂分布の同定

図 1 . 提案するき裂検出システムの概要

して、平均離散化ひずみを算出することを試みた。また、試作したき裂監視システムにつ



(a) 評価対象のデジタル画像



(b) 提案手法によるき裂同定結果

図 2 . 提案手法によるき裂同定結果

(無地コンクリート試験体)

いて、コンクリート製 4 点曲げ試験体を用いて実証試験を行った。

#### 4 . 研究成果

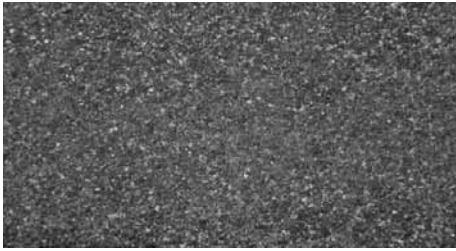
前述の検討項目ごとに、主要な研究成果を以下にまとめる。

##### (1) 非接触き裂監視システムの試作

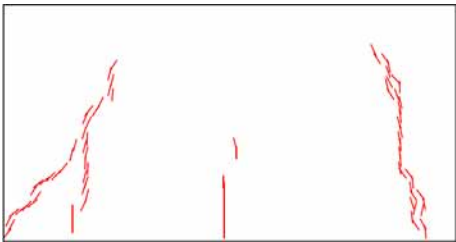
図 1 に提案するシステムのフローを示す。図に示すように、このシステムでは最初に対象物のデジタル画像を取得し、デジタル画像上に所定の寸法の仮想グリッドを生成する。次に、画像相関法を用いて、対象画像を基準画像と比較することによって、仮想グリッドの変位場を算出する。得られた変位場と仮想グリッドの幾何学的情報から求められるひずみ - 変位マトリックスを用いて、仮想グリッドのひずみ場を算出する。最後に、申請者が考案した評価式を用いて、ひずみ場をき裂開口量に変換し、き裂分布を同定する。検討では、画像相関法を適用する際のサブセットサイズに着目し、サブセットサイズがき裂の同定精度に及ぼす影響を定量的に評価した。その結果、サブセットサイズが小さすぎると、き裂を検出過剰（き裂がない部分に対してき裂があると誤同定すること）となる頻度が増し、逆に、サブセットサイズが大きすぎるとき裂を検出欠落（き裂がある部分に対してき裂がないと誤同定すること）となる頻度が増すことが明らかになった。

明らかになった。

##### (2) システムのロバスト化・安定化



(a) 評価対象のデジタル画像



(b) 提案手法によるき裂同定結果

図3．提案手法によるき裂同定結果  
(加飾コンクリート試験体)

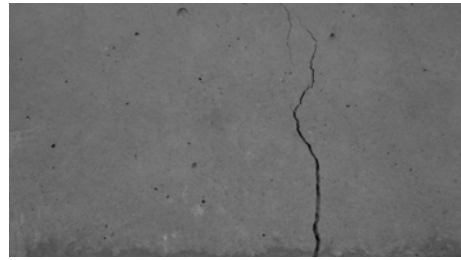
図2に無地コンクリート試験体に対するき裂同定結果を示す．図から，試作したシステムは検査対象物のき裂分布を的確に同定していることが分かる．また，評価画像の解像度，仮想グリッドのサイズなどがき裂の同定精度に及ぼす影響を検討した．その結果，評価画像の解像度に関しては，高解像度であるほど検出過剰，検出欠落ともに減少することが明らかになった．一方，仮想グリッドのサイズに関しては，サイズが大きすぎる場合には，検出欠落の頻度が増すことが明らかになった．

### (3) システムのロバスト化・安定化

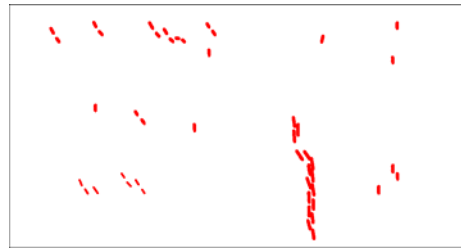
図3に加飾コンクリート試験体に対するき裂同定結果を示す．図から，評価対象のデジタル画像上にほとんでき裂が表れていないにもかかわらず，試作したシステムは加飾層の下の検査対象物のき裂分布を的確に同定していることが分かる．タイル張りのコンクリート梁など，他の試験体についても，図3と同様の結果が得られており，試作したシステムでは，実構造物に多く見られる表面が加飾されたコンクリート構造物に対してもき裂分布の同定が可能であることが明らかになった．このことは，従来のデジタル画像を用いたき裂同定システムに対する大きなアドバンテージであり，本システムがき裂そのものを監視しているのではなく，き裂によって生じるひずみ場の変化に着目していることに起因している．

### (4) システムのベースラインレス化

これまでの検討では，き裂同定のために，



(a) 評価対象のデジタル画像



(b) 提案手法によるき裂同定結果

図4．ベースラインレス法による同定結果

評価画像のほかに参照画像（ベースライン画像）を用意し，両者の差分から変位場，ひずみ場，き裂分布を同定してきた．しかし，構造物の健全性を評価するためには，既設構造物を即時診断するというニーズも無視できない．そこで，本研究では，荷重変動による変位場，ひずみ場の変動に着目し，き裂先端近傍の力学状態を破壊力学的に解析することによって，き裂分布を同定することを試みた．図4にその結果を示す．図から，図2，3に示した結果と比べて同定精度は劣るものの，き裂を概ね同定できていることが分かる．ただし，本研究の範囲では，き裂同定にかなり大きな荷重変動が必要であり，実構造物の常時微動のような小さな荷重変動に対しても実用的な同定精度を得る手法の確立が必要であることが示唆された．

以上のように，本研究では，当初目的とした4つの検討項目のうち，(1)～(3)の項目については，概ね目標を達成することができた．(4)については，原理上は目標を達成することができたが，実用化に向けて改善の余地があることが明らかになった．

## 5．主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

野村泰稔，日下貴之，森本大貴，"応答アトラクタの交差予測に基づく構造異常診断法の開発と Baseline-less 型への適用可能性調査"，構造物の安全性および信頼性，7 (2011)，230-235，査読有．  
野村泰稔，中津功一朗，古田均，日下

貴之, "カオス信号入力に基づく Baseline-less 型構造異常診断法の基礎的研究", 応用力学論文集, 13 (2010), 977-984, 査読有.

[学会発表](計9件)

野村泰稔, 日下貴之, 森本大貴, "応答アトラクタの交差予測に基づく構造異常診断法の開発と Baseline-less 型への適用可能性調査", 第7回構造物の安全性・信頼性に関する国内シンポジウム, 日本学術会議(東京都), October 12-14, 2011.

Kusaka, T., Nomura, Y., Sakamoto, T., Fujii, T., "Real-time Crack Monitoring System in Concrete Structures Using Non-contact Displacement Measurements", Proceedings of the International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2011, September 19-21, 2011 (Kobe, Japan).

Kusaka, T., Nomura, Y., Nakamura, T., Ito, S., "Debonding Detection System for CFRP-reinforced Concrete Structure Based on Evaluations of Elastic Wave Propagation", Proceedings of the International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2011, September 19-21, 2011 (Kobe, Japan).  
Kusaka, T., Nomura, Y., Sakamoto, T., Fujii, T., "Crack Growth Monitoring System for Concrete Structures Based on Non-contact Displacement Measurements", Structural Health Monitoring 2011, September 13-15, 2011 (Stanford, USA).

藤井俊史, 日下貴之, 野村泰稔, "非接触変位場計測に基づくコンクリート構造物のき裂進展モニタリング", 第42回応力・ひずみ測定シンポジウム, 大田区産業プラザ(東京都), January 20-21, 2011.

中村豪志, 日下貴之, 大前 確, 野村泰稔, "PZT 素子を用いた CFRP 補強コンクリートの剥離モニタリング", 第54回日本学術会議材料工学連合講演会, ハートピア京都(京都府), October 25-27, 2010.

坂本智寛, 日下貴之, 野村泰稔, "非接触変位場計測に基づくコンクリート構造物のき裂検出システム", 第54回日本学術会議材料工学連合講演会, ハートピア

京都(京都府), October 25-27, 2010.

野村泰稔, 中津功一朗, 古田 均, 日下貴之, "カオス信号入力に基づく Baseline-less 型構造異常診断法の基礎的研究", 第13回応用力学シンポジウム, 北海道大学(北海道), August 31, 2010.  
Nomura, Y., Furuta, H., Kusaka, T., "Baseline-Free Structural Damage Detection Using Chaotic Excitation", Structural Health Monitoring 2009, September 9-11, 2009 (Stanford, USA).

6. 研究組織

(1)研究代表者

日下 貴之 (KUSAKA TAKAYUKI)  
立命館大学・理工学部・教授  
研究者番号: 10309099

(2)研究分担者

坂根 政男 (SAKANE MASAO)  
立命館大学・理工学部・教授  
研究者番号: 20111130

野村 泰稔 (NOMURA YASUTOSHI)  
立命館大学・理工学部・助教  
研究者番号: 20372667