

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 21 日現在

機関番号：17201

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560488

研究課題名（和文） 回転型ラインセンサによる全視野ひずみ計測方法に関する基礎的研究

研究課題名（英文） Fundamental study on strain measurement method by revolving line sensor type full-field optical measurement machine

研究代表者

伊藤 幸広（ITO YUKIHIRO）

佐賀大学・工学系研究科・准教授

研究者番号：90223198

研究成果の概要（和文）：本研究は、ひずみ発生前後の 1 組の画像を用いデジタル画像相関法によりひずみを計測する撮影装置として、回転型ラインセンサによる全視野ひずみ計測装置の開発を行ったものである。PC 構造物の作用応力を計測する新しい手法として、本装置を用いた応力解放法について検討を行った。また、本装置によって鉄筋の腐食に起因するコンクリート表面に発生するひずみ分布を計測し、鉄筋腐食モニタリング手法としての可能性についても検討を行った。

研究成果の概要（英文）：The revolving line sensor type full-field optical measurement machine has been developed for surface strain measurement purpose by analyzing the pre-event and the post-event images through the digital image correlation method. A new stress relief method to measure the existing stress of PC structures by using this machine was developed. Furthermore, in order to investigate possibility of the corrosion monitoring system using this machine, the electrical corrosion test was carried out.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2010 年度	700,000	210,000	910,000
2011 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・土木材料・施工・建設マネジメント

キーワード：ラインセンサ，ひずみ，画像，スキャナ，コンクリート，鋼材，走査，デジタル画像相関法

1. 研究開始当初の背景

我が国は、既に老朽化した社会資本を多く抱え、その劣化や機能低下によるトラブルや事故が数多く報告されるようになってきた。特に、コンクリート構造物では、JR 福岡トンネルや各所の高架橋からのコンクリート片剥落事故より明らかなように、材料の劣化が人命に関わる重大な事故を引き起こす原

因となる。また、材料部分は健全でも、基礎の支持状態や設計外力の変化または設計・施工不良により、過大な応力が局部的に集中している構造物は現状で数多く存在する。このような構造物は地震時に剥落や倒壊の確率が高く、国民の生命・財産を脅かす危険性を含んでいる。

現在、コンクリート構造物の検査としては、

外観変状、鉄筋の発錆、中性化、塩害、アルカリ骨材反応などが一般に行われているが、これらの検査は主に材料の劣化度を調べるものである。剥落危険箇所の特定期間や耐荷性能、耐震性能を調べるためには、構造物や部材に生じている応力状態やひずみを計測する方法が有効であるがこの種の検査はほとんど実施されていない。一般に、コンクリート構造物の応力やひずみを計測する方法としては、鉄筋計、埋込み型ひずみ計、光ファイバーなどを埋設するか、表面にひずみゲージを貼付する方法がとられる。しかし、いずれの方法も構造物内外に配線が必要なこと、計測機器類の設置作業や計測機器類の維持管理が煩雑であること、計測コストが高価なこと等の問題があり、普及の障害となっている。

老朽化構造物の剥落危険箇所や耐荷・耐震性を検査し、国民の生命・財産の保全および社会資本ストックの延命化を図るためには、安価で簡易に応力やひずみを計測する方法を早急に開発する必要がある。

2. 研究の目的

近年の CCD 素子や CPU などのハードウェアの急速な進歩に加えて画像解析ソフトの拡充から、ここ数年デジタル画像を利用した変位やひずみの計測技術が提案されるようになってきた。デジタル画像相関法による変位・ひずみ計測方法もその一つで、変形前と変形後の 1 組のデジタル画像内で対応する各ピクセルの移動量をコンピュータ解析により、サブピクセル精度で求める方法である。したがって、部材の面内の変位やひずみの計測においては、変形前と変形後の表面画像を撮影するのみでよく、従来の変位計やひずみゲージ計測が持つ、設置や維持管理の煩雑さ、配線などの問題がない。また、デジタル画像による変位やひずみ法のもう一つの大きな特徴は、撮影した画像内の任意の位置および方向（軸）の計測、すなわち全視野計測が可能となる点であり、ひずみゲージの 1 点・1 軸計測に対して大きな優位性を持つ。

デジタル画像を利用した計測方法については、物理学や機械工学の一部の研究者によって盛んに行われているが、これまでに提案されている方法では、構造物の維持管理を行う際に必要となる 1000μ 以下のひずみ領域での高精度な計測は実現できていない。この理由としては、デジタル画像を撮影する装置にレンズを付けた CCD カメラ（デジタルカメラを含む）を用いているため、レンズの収差により画像にゆがみを生ずること、および照明条件を常に一定にできないことが大きな誤差要因として存在するためである。

これらの問題を解決し微小ひずみ領域で高精度な計測を実現するために、研究代表者

はラインセンサを用いたひずみ計測方法を開発した。ラインセンサとは、市販のフラットベッドスキャナに代表されるような、CCD 素子が直線上に配置されたラインセンサを光源とともに副走査（平行移動）させることで 2 次元画像を撮影する装置である。このラインセンサをデジタル画像計測の撮影機器として用いると次のような多くの利点がある。

- ・光源が一定：閉塞された状況で読取るため外部の光の影響を受けない。屋外計測に適応できる。
- ・広範囲の画像を取込むことができ、全域に渡りひずみがない：CCD カメラ法ではレンズの収差によるひずみの補正が必要となる。画像周辺に行くほど誤差が大きくなる。
- ・寸法の校正作業が不要：読取りセンサ部と被測定物との距離が常に一定のため、毎回同一縮尺の画像が取得できる。CCD カメラ法のようにスケールを画像に写し込む必要がない。
- ・操作が簡易：装置が軽量で、測定対象物に押し当てるのみで撮影でき特殊な技術が不要である。計測時の振動の影響を受けにくい。

以上のような背景とこれまでの研究成果を踏まえて、本研究では以下の事項を達成することを目的に研究を行った。

- ①一般の技術者が、ひずみ計測による維持管理を現場で簡易にできるようにするため、可搬性があり、操作が簡易で、計測コストが安価なラインセンサスキャナによるひずみ計測装置を開発する。
- ②開発した計測装置の誤差要因を調べ、装置および解析プログラムの改良により、ひずみの計測誤差が数%以内となるような高精度の計測手法を確立する。
- ③配線が不用で可搬性があり、操作が簡易であるという装置の特徴を活かしたこれまでにない新たな維持管理手法の提案を行い、実験的に検証を行う。

3. 研究の方法

本研究では、CCD 素子が直線上に配置されたラインセンサを光源とともに副走査（平行移動）させることで 2 次元画像を撮影し、ひずみ発生前後の 1 組の画像を用いデジタル画像相関法によりひずみを高精度に計測する撮影機器および方法について検討を行った。また、現場計測において誤差を生ずる要因を取り上げ、その影響度および解決方法について検討を行った。さらに、本装置を用い

た新しい維持管理手法として、次の2つの方法について検討を行った。第1は、プレストレス力測定する応力解放法の新しい手法として、本装置により応力解放部分の表面画像を取得し、画像処理によって局所的なひずみ分布を測定し、2次元 FEM 解析を行うことにより現有プレストレスを推定する方法である。第2に、本装置によって鉄筋の腐食に起因するコンクリート表面に発生するひずみ分布を計測し、鉄筋腐食モニタリング手法としての可能性について検討を行った。

(1) 誤差要因に関する実験

全視野ひずみ計測装置の外観を写真-1に示す。改良した部分としては、本装置にマイクロメーターを四隅に取り付け、焦点をより正確かつ容易に合わせることを可能にした、センサの温度変化による計測誤差を把握するために温度計を装着した、現場での計測において、位置決めボルトの締め過ぎによる本装置にかかる負荷を考慮しフレームの四隅にストッパーを取り付けた、などである。

誤差要因を検討するための実験としては、まず、フロートガラスに砂目模様の塗装を施したものを焦点距離を変えながら、各焦点距離でスキャンし、最も鮮明な画像が取れる焦点距離の選定を行った。加えて、各焦点距離毎の画像を解析し、焦点距離の許容範囲を検討した。装置の取り外しによる誤差を特定するために鉄板に砂目模様の塗装を施した面を、水平時と鉛直時においてそれぞれ3回取り外しを行ってスキャンし、デジタル画像相関法による画像解析でひずみを算出した。スキャン対象面の汚れによる影響においては、スキャンする面を泥で汚しその後洗い流すことにより影響を調べた。

本装置の使用環境温度による影響を調べるため、恒温装置を使用し環境温度を変化させひずみ誤差を検討した。

(2) 現有プレストレス推定法に関する実験

本実験では、ポステン PC 梁試験体を製作し、まず両端支持の死荷重のみが作用する状

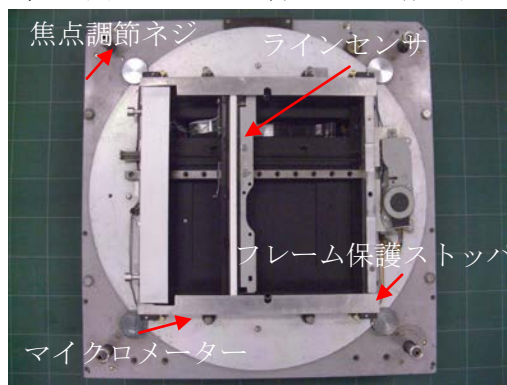


写真-1 全視野ひずみ計測装置の外観

態で試験体下面にスリットを切削することにより応力解放試験を行った。次に、試験体を曲げひび割れが発生するまで载荷した後、試験体下面を上向きし、死荷重が作用しないように多点支持した状態で応力解放試験を行った。ひずみの計測は、スリット切削前後の表面画像をラインセンサスキャナを用いた全視野ひずみ計測装置にて取得し、画像解析によりひずみ（対称点間距離の変化率）を求めた。プレストレス力の推定方法は、取得画像上でスリットの両側に標点を設定し、その対称点間距離の変化率を求め、所定の応力を作用させたスリット断面の2次元 FEM 解析によって得られた対称点間距離の変化率と照合することによりプレストレス力を推定した。

(3) 腐食モニタリングに関する実験

本実験では、鉄筋を短期間で腐食させるために電食試験を行った。電食試験供試体の概要は、図-1に示すとおりである。外形は、370mm（幅）×470mm（長さ）×240mm（高さ）であり、内部には黒錆を除去した D19 の異形鉄筋をかぶり 40mm に配置した。ひずみ計測面は上面であり、計測面以外はシリコンシーラントにより被覆し防水した。計測面には長期的なモニタリングを可能にするために、写真-2に示すような直径 10mm の円を白色ペンキを塗布し形成した。白色円のピッチは前後左右とも 20mm であり、ペンキにより被覆された面積を計測面全体の 20%にし、塩化物イオンの浸透を阻害しないようにした。さらに、白色円内には階調値の変化をもたせ画像解析精度が上がるように、黒色ペンキにより砂目模様を付けた。コンクリートの

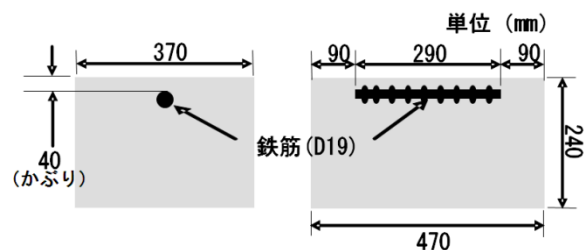


図-1 供試体の概要

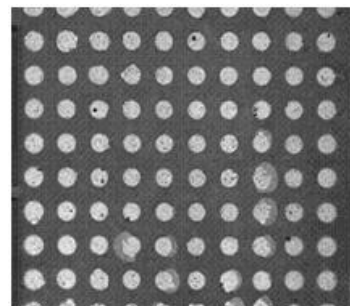


写真-2 表面処理状況

呼び強度は 24N/mm² であり、打設後 4 週間は空中で養生し、その間に表面処理や被覆を行った後に電食試験を実施した。電食試験方法としては、供試体を 3% 塩化ナトリウム水溶液に浸漬し、0.02A の直流電流を鉄筋に通電した。

4. 研究成果

(1) 誤差要因に関する実験

最も鮮明にスキャニングできる焦点距離を調べた結果、焦点距離は 1.2mm であることが判明した。これについての判断基準は、目視に加え、各焦点距離におけるひずみ解析で標準偏差が最も小さい値を示した焦点距離であることから決定した。

取り外しによって生じた誤差は、水平、鉛直いずれの方向に装置を設置した場合でも誤差は小さく 3μ 以下であった。取り外しによる影響はほとんど無いといえる。水平設置における実験の結果を表 - 1 に示す。

汚れによる影響に関しては、泥を表面に塗る工程を 10 回繰り返しスキャニングした結果、6 回目まで精度が得られることが明らかとなった。悪天候を想定して激しい汚れを付着させたため、途中塗装が剥がれたが、塗料の耐久性は十分にあることが実証された。

装置の使用環境温度の影響としては、温度変化によって見掛け上のひずみが発生するが、見掛けひずみは環境温度と比例関係にあるため現場では温度補正が可能となる。

(2) 現有プレストレス推定法に関する実験

両端支持の死荷重のみが作用する状態での応力解放試験については、高精細な画像が取得できず対称点間距離の測定精度が低くプレストレス力の推定には至らなかった。

対称点間距離の変化率は画像処理による測定値と FEM 解析値が良く一致した (図 - 2)。これより、プレストレス力による PC 梁

表 - 1 取り外しによる影響 (水平)

水平時			
比較	画像組み合わせ	ひずみ μ	(絶対値)平均ひずみ μ
初期画像	①-②	0	1
	①-③	-2	
	②-③	-1	
初期画像-1回目	①-①	2	1
	①-②	1	
	①-③	1	
	②-②	1	
	②-③	1	
	③-③	2	
初期画像-2回目	①-①	2	1
	①-②	2	
	①-③	0	
	②-②	2	
	②-③	1	
	③-③	2	
初期画像-3回目	①-①	-2	3
	①-②	-3	
	①-③	-4	
	②-②	-3	
	②-③	-4	
	③-③	-3	

試験体の下縁の応力度は 9.24N/mm² と推定され、設計時の理論値 9.54N/mm² との誤差は 3.1% であった。図 - 3 にはスリット近傍のひずみ分布を表したコンター図を示す。スリットに近い領域で応力解放による引張ひずみが発生していることが確認できた。

(3) 腐食モニタリングに関する実験

電食開始から 583 時間後 (24 日後), 630 時間後 (26 日後), 659 時間後 (27 日後), 706 時間後 (29 日後) のコンクリート表面の X 軸方向のひずみ分布を図 - 3 に示す。コンクリート表面の X 軸方向とは、鉄筋長手方向の直角方向である。凡例においてプラスは引張ひずみであり、マイナスは圧縮ひずみを示す。X, Y 軸の目盛は画像のピクセル数であり、鉄筋は X 軸の約 4300 ピクセルの位置に図の上下方向に配置されている。また、黒色の実線はひび割れの位置を示している。ひずみ分布を求める画像解析において初期画像は、供試体を塩水中に浸漬し 432 時間後 (18 日後) の吸水膨張が終了した状態の表面画像を用いた。

電食開始から 583 時間後に、図の上部にひび割れ幅 0.06mm 程度の微細なひび割れが発生し、その周辺には 1000μ 以上の引張ひずみが線状に集中した領域が確認できる。な

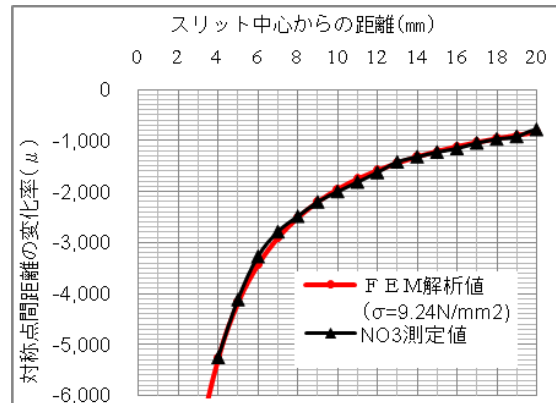


図 - 2 画像解析値と FEM 解析値の関係

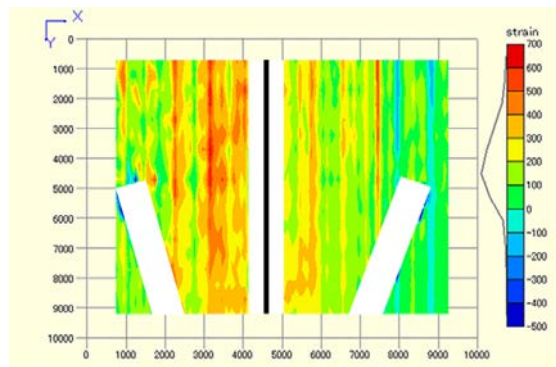
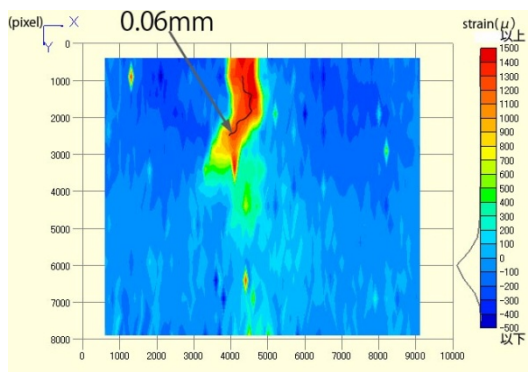
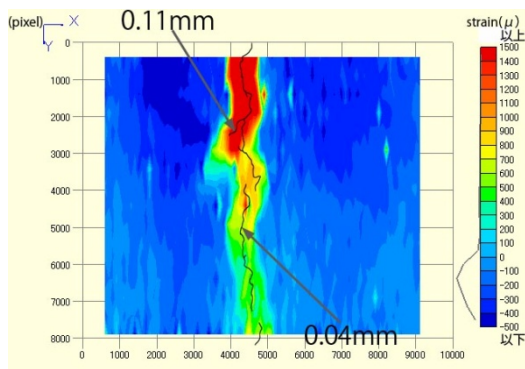


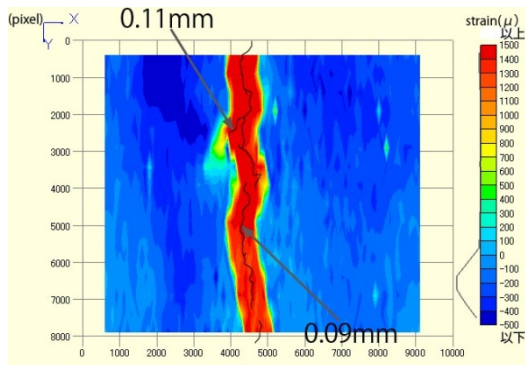
図 - 3 スリット近傍のひずみ分布



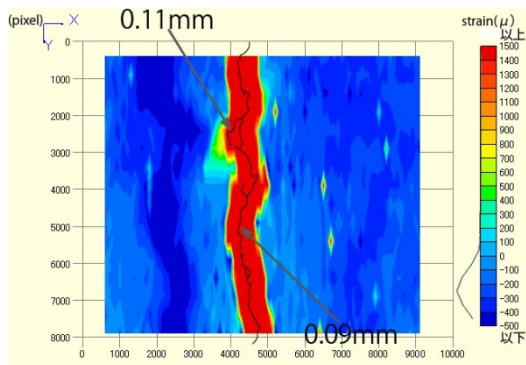
(a) 583 時間後 (24 日後)



(b) 630 時間後 (26 日後)



(c) 659 時間後 (27 日後)



(d) 706 時間後 (29 日後)

図-4 供試体表面のひずみ分布

お、図の中央部付近には 400~700 μ 程度の引張ひずみ領域が存在している。630 時間後

では、583 時間後に確認された引張ひずみ集中領域がさらに下方まで進展し、幅 0.04mm 程度のひび割れがその間に成長している。この時、上部のひび割れは 0.11mm と幅が拡大している。さらに 659 時間後には引張ひずみ領域が下方まで 1000 μ 以上となり、下方のひび割れ幅が拡大している。706 時間後は、659 時間後と引張ひずみ領域およびひび割れ幅とも変化が見られないが、引張ひずみ領域の左側に平行して圧縮ひずみ領域の形成されている。

以上より、本装置を用いることによりひび割れが発生する以前から、コンクリート表面において鉄筋腐食による引張ひずみが集中する領域を確認できることが明らかとなった。すなわち、本装置により鉄筋の腐食状況をモニタリングできる可能性を示した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 9 件)

- ①出水享, 松田浩, 伊藤幸広, 甲斐靖志: 8 年経過したポストテンション PCT 桁橋の各種調査, コンクリート工学年次論文集, 33 巻, 査読有, pp.1483-1488, 2011
- ②本山慎一郎, 伊藤幸広, 深町卓也, 谷本健太, 松田浩, 出水享: ラインセンサタイプ全視野ひずみ計測装置を用いた表面ひずみ計測装置に関する研究, 日本実験力学会講演論文集, 10 巻, pp.278 - 280, 2010
- ③M. Uchino, T. Okamoto, K. Hida, Y. Ito, P. Sumitro and H. Matsuda: Strain analysis method using multi-rosette analysis by digital image correlation method, The Fifth International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, pp.2557-2562, 2010
- ④出水享, 肥田研一, 伊藤幸広, 松田浩: 応力解放法による PC 構造物の現有作用応力の推定方法の開発, プレストレストコンクリート技術協会第 19 回シンポジウム論文集, 19 巻, 査読有, pp.241-246, 2010
- ⑤Sunaryo Sumitro, Yukihiro Ito, Masakazu Uchino, Kenichi Hida, Akira Demizu and Hiroshi Matsuda: Line sensor scanner for structural health monitoring, 4th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure (SHMII-4), pp.22 - 24, 2009
- ⑥内野正和, 岡本卓慈, 肥田研一, 伊藤幸広, 松田浩: デジタル画像相関法を用いたマルチロゼット解析法による円孔周辺のひずみ解析手法の検討, 実験力学, Vol.9, No.2,

査読有, pp.14-20, 2009

〔学会発表〕(計9件)

- ①伊藤幸広, 増田大喜, 内田慎哉, 出水亨, 松田浩: ラインセンサスキャナタイプ全視野ひずみ計測装置を用いたコンクリート構造物の維持管理方法の提案, 第55回日本学術会議材料工学連合講演会講演論文集, 2011.10, 京都教育文化センター
- ②谷本健太, 伊藤幸広, 原田耕司, 松田浩, 出水亨, 内野正和: 光学的全視野ひずみ計測法を用いた鉄筋腐食モニタリングに関する一実験, 土木学会第66回年次学術講演会講演概要集, 2011.9, 愛媛大学
- ③Paul Sumitro, Chris Roney, Tony Khan, Yukihiro Ito, Hiroshi Matsuda: Optical Monitoring Techniques for Bridge Maintenance and Safety, The 6th International Workshop on Advanced Smart Materials and Smart Structures Technology ANCRiSST2011, 2011.6, 中国大連
- ④原田耕司, 谷本健太, 伊藤幸広: 全視野ひずみ計測装置を用いた鉄筋腐食モニタリングに関する基礎的研究, 土木学会第65回年次学術講演会講演概要集, 2010.9, 北海道大学
- ⑤伊藤幸広: 屋外計測現場で適用可能なひずみ計測装置の開発, 応力・変位場計測法および解析法の基礎と応用に関する研究集会, 九州大学西新プラザ, 2010.1

〔産業財産権〕

出願状況(計1件)

名称: コンクリート内部の鉄筋腐食計測方法

発明者: 伊藤幸広, 本山慎一郎, 原田耕司

権利者: 佐賀大学, 西松建設

種類: 特許

番号: 特願 2010-136874

出願年月日: 2010年6月16日

国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ等

<http://toshi1.civil.saga-u.ac.jp/itoy/index.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

伊藤 幸広 (ITO YUKIHIRO)

佐賀大学・工学系研究科・准教授

研究者番号: 90 223198