

# ひずみ可視化デバイスの撮影角度がひずみ算出精度に与える影響

梅本 秀二\*, 高木 健\*\*, 石井 抱\*\*, 大町 正和\*,

松尾 恵輔\*, 宮本 則幸\*, 松田 浩\*\*\*

## Effect of the Shooting Angle of the Strain Visualization Device on the Strain Calculation Accuracy

Shuji UMEMOTO, Takeshi TAKAKI, Idaku ISHII, Masakazu OMACHI,

Keisuke MTSUO, Noriyuki MIYAMOTO and Hiroshi MATSUDA

The Strain Visualization Device developed for structural health monitoring in the Operation and Maintenance of infrastructures can check the amount of strain with the naked eye. In addition, the amount of strain can be calculated with an accuracy of  $10 \mu\epsilon \pm 10 \mu\epsilon$  ( $2\sigma$ ) by taking an image with a digital camera and analyzing the image. In applying the Strain Visualization Device to an actual structure, the effect of the shooting angle on the strain calculation accuracy was verified based on the shooting conditions in the field, and the shooting angle that secured the measurement accuracy was clarified. When applied to the strain measurement of a concrete bridge and photographed while paying attention to the shooting angle, the strain can be accurately measured, and the applicability of the strain visualization device to the strain measurement of the actual structure was verified.

**Keywords:** Strain visualization device, Structure health monitoring, Operation and maintenance, Digital image analysis, Shooting angle

### 1. 緒 論

高度経済成長期に建設された多くの社会インフラの経年劣化が急速に進んでいる。厳しい財政状況や専門技術者の不足が問題となる中、これらの社会インフラを効率的・効果的かつ合理的に維持管理することが課題となっている<sup>1)</sup>。これらの課題を解決する手段の1つとして、センサ技術やICTを活用したモニタリングによる構造物の健全度の診断や異常検知がある。モニタリング項目は、対象とする構造物やその劣化状態により異なるが、コンクリート構造物や鋼構造物に共通して重要なモニタリング項目として挙げられるのが、“ひずみ”である<sup>2)</sup>。現在、社会インフラのモニタリングで使用されているひずみのセンサは、主として、ひずみゲージ、ひずみ計と呼ばれる様々な測定原理の電気式変換器や光ファイバなどが挙げられる<sup>2)3)4)5)</sup>。これらのセンサは、信頼性の高い計測データが得られることから、様々なモニタリングで長く適用されている。一方で、システムの導入や維持にかかるコスト、過酷な環境下における安定的な動作、インフラの寿命や点検サイクルに対するシステムの寿命、電源の確保など、多くの課題も残されている<sup>2)5)6)</sup>。筆者らは、これらの課題を解決すべく、モアレ縞を応用

し、ひずみを可視化するデバイス (Fig. 1) を開発した<sup>7)</sup>。モアレ縞は古くから研究されており<sup>8)9)</sup>、変位の計測に応用されてきた。近年では、社会インフラのモニタリングへの応用として、撮影した画像にサンプリングモアレ法の位相解析を適用したサンプリングモアレカメラが開発され、実橋梁のたわみ計測に適用されている<sup>10)</sup>。サンプリングモアレカメラは、遠隔・非接触で動的な変位を高分解能で計測できる点において優れており、社会インフラの効率的・効果的な維持管理に寄与することが期待される。一方で、特殊なカメラを使用するため導入コストが高くなること、電源を必要とすることなどから、先述した課題が残る。また、構造部材に発生するひずみを対象とした計測技術ではない。

これに対し、ひずみ可視化デバイスは、①ひずみを定量的に可視化、②電源不要、③自然環境下10年相当以上の耐環境性、④自己温度補償<sup>11)</sup>、⑤低コスト、などの特徴を持ち、構造部材に発生するひずみの長期モニタリングに適している。



Fig. 1 Schematic illustration of the strain visualization device (SVD)

原稿受付 2020年2月10日

\* 株式会社 計測リサーチコンサルタント (〒732-0029 広島県広島市東区福田 1-665-1)

\*\* 広島大学大学院工学研究科 (〒739-8511 広島県東広島市鏡山 1-3-2)

\*\*\* 正会員 長崎大学大学院工学研究科 (〒852-8521 長崎県長崎市文教町 1-14)

ひずみ可視化デバイスの計測方法は、肉眼でひずみを直接読取する方法とデジタルカメラなどで撮影したデジタル画像を解析してひずみを算出する方法がある。前者は  $50 \mu\epsilon$ 、後者は  $10 \mu\epsilon \pm 10 \mu\epsilon (2\sigma)$  の精度で計測できる。ひずみ可視化デバイスをデジタルカメラで撮影し、画像解析にてひずみを算出する場合、精度の高いひずみ値を得るためには、定点かつ同条件で撮影することが求められる。特に、ひずみ可視化デバイスは、測定原理上、撮影する角度がひずみ算出精度に影響する。一方で、Fig.2に示すように、実構造物に適用したひずみ可視化デバイスをデジタルカメラで撮影する場合、定点かつ同条件で撮影することは簡単ではない。したがって、ひずみ可視化デバイスを実構造物へ適用する上で、撮影角度とひずみ算出精度の関係を明らかにしておく必要がある。

本稿では、ひずみ可視化デバイスをデジタルカメラで撮影する際に、撮影角度がデジタル画像解析のひずみ算出精度に与える影響を検証し、撮影角度とひずみ算出精度の関係を明らかにする。また、その結果を踏まえ、ひずみ可視化デバイスをコンクリート橋のひずみ計測へ適用し、実構造物への適用性を検証する。

## 2. ひずみ可視化デバイス

### 2.1 外観および構造

ひずみ可視化デバイスの外観を Fig. 3 に、構造を Fig. 4 に示す。ひずみ可視化デバイスは、主として、線格子や文字状の格子を生成したガラス製のフロントプレートおよびリアプレート、鋼製の温度補償板から構成される。Fig. 3 の表示部分は3種類の縞模様で構成され、上段は、ひずみを定量的に可視化するために  $100 \mu\epsilon$  毎の目盛状に配置した縞であり、中段および下段は、デジタル画像解析用の縞である。中段は、ひずみを検出するための縞、下段は、解析の精度向上を図るための変化しない縞である。標点間距離は、鋼構造およびコンクリートに適用できるように  $105 \text{ mm}$  としている。電気的な要素は一切使用していない。

### 2.2 測定原理

ひずみ可視化デバイスの測定原理には、モアレ縞の原理を用いている<sup>12)</sup>。Fig.5(a)のように、ピッチ  $p$  の直線格子1とそのピッチよりも  $\Delta p (\ll p)$  ほど大きいピッチ  $p + \Delta p$  の直線格子2を重ねると、これらの直線格子1, 2より大きなピッチ  $W$  のモアレ縞と呼ばれる縞が現れる。これらの関係は Eq. (1) で表される。

$$W = \frac{p + \Delta p}{\Delta p} \cdot p \quad (1)$$

Fig. 5 (b) のように直線格子1を (A) の方向にピッチ  $p$  ほど動かすと、モアレ縞は (A) の方向にピッチ  $W$  ほど動く。つまり、変位  $\Delta x$  を視覚的に  $(p + \Delta p)/\Delta p$  倍に拡大表示することができる。この拡大率を  $M$ 、モアレ縞の移動量を  $\Delta x_m$  とすると、これらの関係は Eq. (2) となる。

$$\Delta x_m = M \cdot \Delta x \quad (2)$$

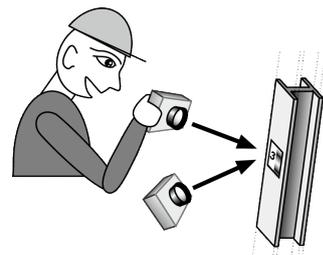


Fig. 2 Shooting image with a digital camera on site

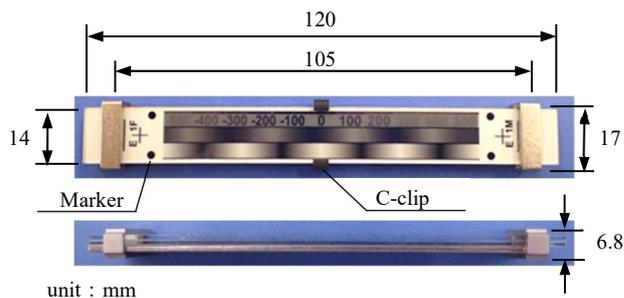


Fig. 3 Appearance of SVD

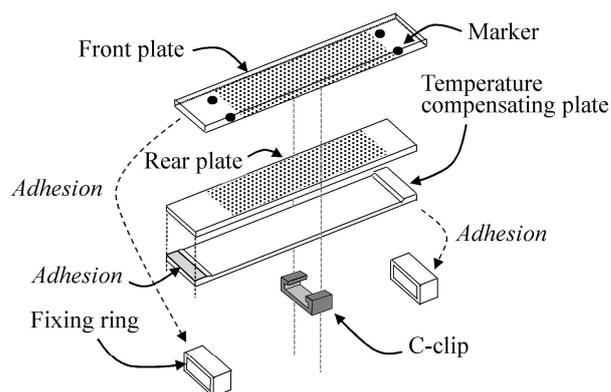


Fig. 4 Structure of SVD

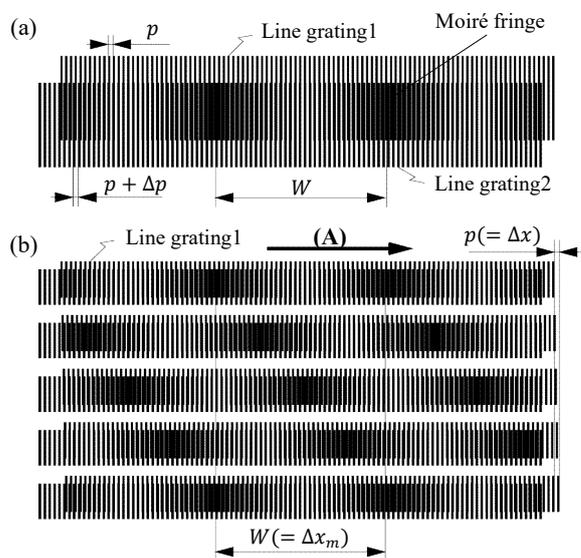


Fig. 5 Example of a moiré fringe

このように、モアレ縞の原理を用いることにより、ひずみレベルの微小変位を視覚的に拡大表示することができる。

### 2. 3 デジタル画像解析によるひずみの算出方法

デジタルカメラで撮影したひずみ可視化デバイスのデジタル画像からひずみを算出する方法を示す<sup>13)</sup>。デジタルカメラで撮影する場合、本デバイスを必ずしも正面から撮影できるとは限らない。正面から撮影できない場合、奥は小さく、手前は大きく撮影されるため、本デバイスの外径は歪んだ四角形に撮影されてしまう。そこで、Fig. 3 および Fig. 4 に示す本デバイスの四隅のマーカ（黒丸）をもとに、外径が長方形になるように透視変換を用いて画像処理した後、モアレ縞をトリミングし、Fig. 6 (a)のように  $i, j$  軸を定義する。トリミングした画像の大きさを  $(I, J)$  とし、 $(i, j)$  の位置にある画素の輝度値を  $e(i, j)$  とする。また、撮影した画像では、単位長さが  $l$  画素で撮影されたとする。

まず、それぞれの  $i$  における  $j$  軸方向の輝度値の平均  $f(i)$  を求めると、 $f(i)$  は、

$$f(i) = \frac{\sum_{j=0}^{J-1} e(i, j)}{J} \quad (3)$$

となる。次に、 $f(i)$  を Eq. (4) の sin 曲線  $g(i)$  に近似する。

$$g(i) = A \sin\left(\frac{2\pi}{lW}i + \theta\right) + B \quad (4)$$

$f(i)$  と  $g(i)$  の例を Fig. 6 (b)に示す。 $g(i)$  に近似するためには、モアレ縞の輝度値の振幅  $A$ 、輝度値のオフセット  $B$ 、モアレ縞の位相  $\theta$  を求める必要がある。そこで、Eq. (4) を

$$\begin{aligned} g(i) &= A \cos \theta \sin \frac{2\pi}{lW}i + A \sin \theta \cos \frac{2\pi}{lW}i + B \\ &= A_1 k_1(i) + A_2 k_2(i) + B \end{aligned} \quad (5)$$

とする。ただし、

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= A \cos \theta \\ A_2 &= A \sin \theta \\ k_1(i) &= \sin \frac{2\pi}{lW}i \\ k_2(i) &= \cos \frac{2\pi}{lW}i \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

である。このとき、最小二乗法により  $A_1, A_2, B$  を求めることができる。そして、振幅  $A$  および位相  $\theta$  は、2変数逆正接  $\text{atan } 2(x, y)$  を用いると、次式のように求まる。

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2} \quad (7)$$

$$\theta = \text{atan } 2(A_1, A_2) \quad (8)$$

次に、変位  $\Delta x$  が生じていないときのモアレ縞の画像を Fig. 7 (a)とする。モアレ縞の輝度値を Eq. (4) に近似し、そ

のときの位相  $\theta$  を  $\theta_0$  とする (Fig. 7 (c)における曲線(i))。変位  $\Delta x$  が生じると、モアレ縞は Eq. (2) より  $\Delta x_m$  だけ移動する。よって、画像上では  $l\Delta x_m$  だけ移動し、Fig. 7 (b)の画像となる。位相  $\theta$  が Fig. 7 (c)における曲線(ii)のように位相  $\theta_0$  に対し  $\Delta\theta$  だけ移動した場合、これらの関係は、

$$l\Delta x_m = \frac{lW}{2\pi} \Delta\theta \quad (9)$$

となる。Eq. (1), (2), (9)より、変位  $\Delta x$  は次式となり求めることができる。

$$\Delta x = \frac{p}{2\pi} \Delta\theta \quad (10)$$

標点間距離を  $L$  とすると、ひずみ  $\varepsilon$  は、Eq. (9)より、次式で算出することができる。

$$\varepsilon = \frac{p}{2\pi L} \Delta\theta \quad (11)$$

ただし、以上の方法では  $|\Delta\theta|$  が  $\pi$  より大きくなる場合、圧縮または引張方向かの判断ができなくなる。したがって、 $|\Delta\theta|$  が  $\pi$  未満となる頻度で撮影する必要がある。

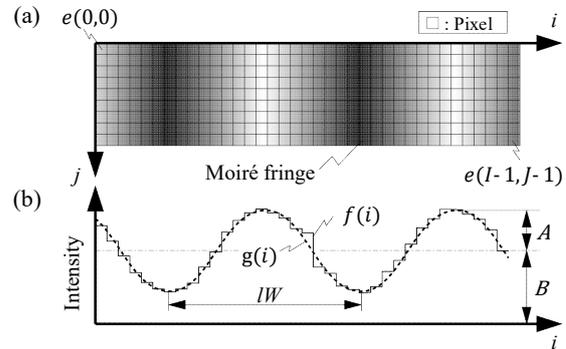


Fig. 6 Intensity of a moiré fringe and corresponding fitted curve

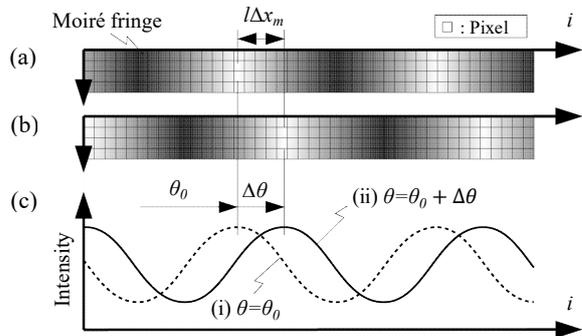


Fig. 7 Phase of a moiré fringe

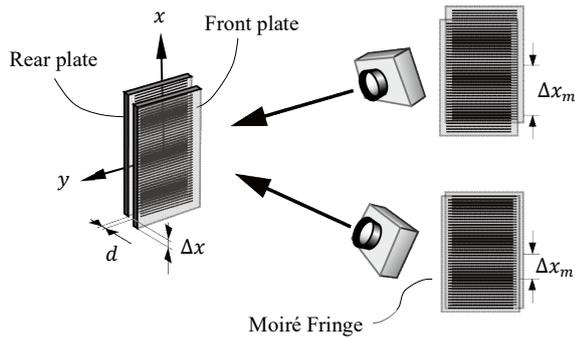


Fig. 8 Difference in the amount of moiré fringes movement depending on the shooting angle

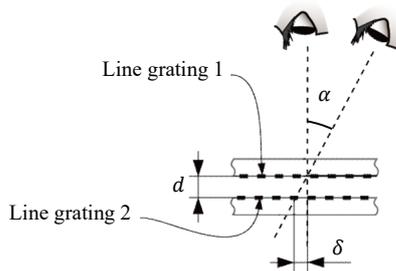


Fig. 9 Difference in overlapping linear grids due to parallax

### 3. 撮影角度がひずみ算出精度に及ぼす影響およびその対策

#### 3. 1 撮影角度がひずみ算出精度に及ぼす影響

直線格子 1 が生成されたフロントプレートと直線格子 2 が生成されたリアプレートの間に隙間  $d$  が存在する場合、Fig. 8 のように異なる方向から撮影すると、実変位  $\Delta x$  に伴うモアレ縞の移動量  $\Delta x_m$  が異なって見える。これは、Fig. 9 に示すように、視差の影響により 2 枚のプレートに生成された直線格子の重なり見え方に違いが生じるためである。角度  $\alpha$  の方向から観察すると、直線格子 2 は  $\delta$  だけずれて重なりが観察される。このとき、 $\delta$  は次のように表される。

$$\delta = d \cdot \tan \alpha \quad (12)$$

その結果、デジタル画像解析におけるひずみの誤差  $\varepsilon_{error}$  は、

$$\varepsilon_{error} = \frac{d \cdot \tan \alpha}{L} \quad (13)$$

として算出される。

#### 3. 2 撮影角度が及ぼす影響への対策

前節で述べたように 2 つのプレートの間に隙間  $d$  が生じると、画像解析時にひずみ算出誤差が生じる。したがって、2 つのプレートは接触し、隙間  $d$  が 0 となるのが好ましい。そこで、Fig. 3 および Fig. 4 に示すように C 留具

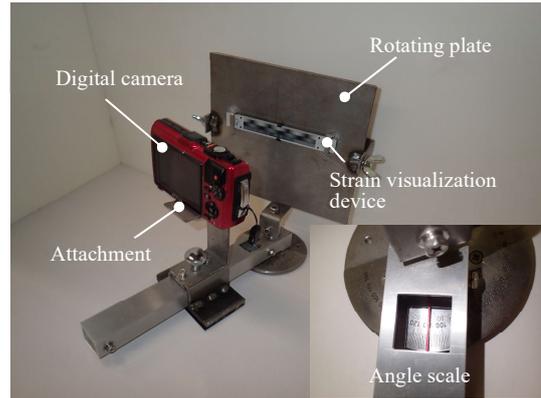


Fig. 10 Experimental device

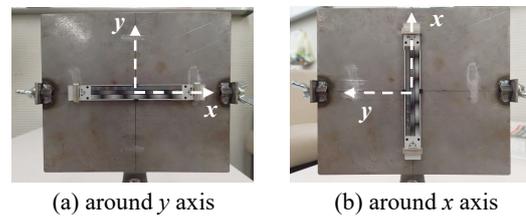


Fig. 11 Installation direction of SVD

を用いて 2 つのプレートをそれぞれ押さえつける方向に力が加わるようにし、常に接触が保たれるようにしている。しかし、耐久年数を 10 年程度確保するために表面をコーティングしていること、格子を形成しているクロムの薄膜に厚みがあること、および表面の粗さが影響して、隙間  $d$  を 0 にすることはできない。これらの影響を 4 章にて検証する。

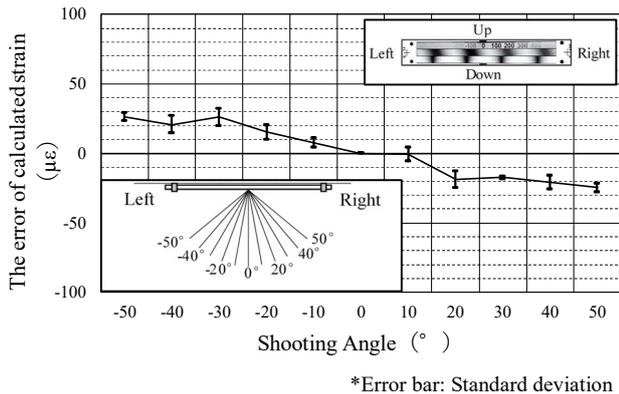
### 4. 撮影角度に対するひずみ算出精度の検証

#### 4. 1 試験装置

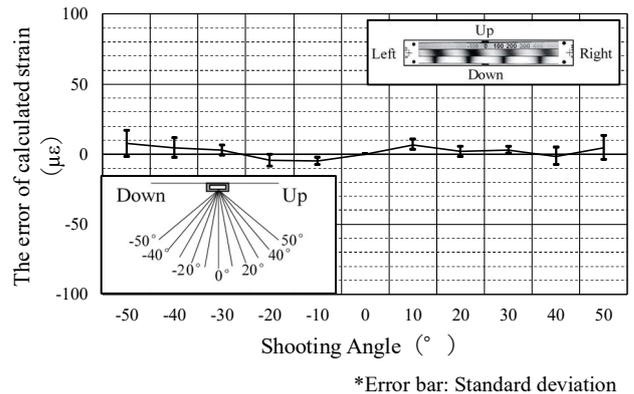
試験装置を Fig. 10 に示す。試験装置は、カメラ取付治具と回転プレートから構成される。カメラ取付治具は、被写体との撮影距離を調整できるようスライド式とし、回転プレートは、底部の目盛り版で角度を読取れる構造とした。また、 $y$  軸回りに撮影角度を変える場合は、Fig. 11 (a) に示すように、 $x$  軸回りに撮影角度を変える場合は Fig. 11 (b) に示すように、回転プレートにひずみ可視化デバイスを設置した。

#### 4. 2 試験方法

試験は、回転プレートを各軸回り  $-50^\circ \sim 50^\circ$  範囲を  $10^\circ$  ピッチで回転させることで撮影角度を変更し、各角度で画像を撮影・デジタル画像解析を実施した。この試験を 10 回繰り返し、デジタルカメラに正対した撮影角度 ( $0^\circ$ ) に対する各角度のひずみ算出結果の差を求め、誤差とした。ひずみの算出は画像解析プログラム  $\eta$  にて実施し、10 個のデータのうち最大と最小の値を外れ値として残りの 8 点の平均値を求めた。撮影条件は、撮影距離 16.5 cm、解像度  $1920 \times 1440$ 、焦点距離 8 mm とし、フラッシュ無しで撮影した。



(a) Shooting angle around y axis and strain calculation accuracy



(b) Shooting angle around x axis and strain calculation accuracy

Fig. 12 The relationship between the shooting angle and strain measurement accuracy

#### 4. 3 撮影角度とひずみ算出精度

Fig. 12 に試験結果を示す。図中のエラーバーは、標準偏差を示している。y 軸回りに撮影角度を変えた場合 (Fig. 12(a)),  $\pm 10^\circ$  の範囲におけるひずみ算出誤差は  $\pm 10 \mu\epsilon$  未満となり、 $\pm 20^\circ$  以上になると  $\pm 20 \sim 30 \mu\epsilon$  のひずみ算出誤差が認められた。ひずみ算出結果の標準偏差は、 $\pm 10^\circ$  の範囲で  $3 \sim 5 \mu\epsilon$ 、 $\pm 20^\circ$  以上で  $1 \sim 6 \mu\epsilon$  と撮影角度による大きな差異は認められなかった。試験結果を Eq. (13) の  $\tan$  曲線で近似すると、フロントプレートとリアプレートの隙間は  $2.7 \mu\text{m}$  と求められた。製造上の仕様では、各プレートの格子を形成するクロムの厚みが  $0.20 \mu\text{m}$ 、そのコーティングの膜厚が  $0.07 \mu\text{m}$  であるため、表面の粗さによって約  $2 \mu\text{m}$  相当の隙間  $d$  があることが分かった。次に、x 軸回りに撮影角度を変えた場合 (Fig. 12(b)) では、撮影角度に依らず、ひずみ算出誤差は  $\pm 10 \mu\epsilon$  未満であった。この結果は、x 軸回りに撮影角度を変えても視差の影響がないことを示している。一方で、ひずみ算出結果の標準偏差は、撮影角度が  $\pm 30^\circ$  の範囲では  $2 \sim 4 \mu\epsilon$  であるが、 $\pm 40^\circ$  を超えると  $6 \sim 9 \mu\epsilon$  と大きくなった。

試験結果より、y 軸回りの撮影角度を  $\pm 10^\circ$  の範囲、x 軸回りの撮影角度を  $\pm 30^\circ$  の範囲とすることで、ひずみ算出精度は、ひずみ可視化デバイスの計測精度  $10 \mu\epsilon \pm 10 \mu\epsilon$  ( $2\sigma$ ) を満足することが明らかになった。

### 5. コンクリート橋のひずみ計測への適用

#### 5. 1 コンクリート橋の概要

コンクリート橋は、撤去が予定されていた長崎県内の RCT 桁橋 (単径間スパン約 8 m) であり、1954 年に G2-G6 が架設され、1959 年に G1, G7 が増設された現在 7 主桁で構成される架設後約 60 年が経過した橋梁である。

#### 5. 2 計測器の配置

ひずみ可視化デバイスは、G4 桁および G7 桁を対象に、桁中央下面の橋軸方向に設置した。Fig. 13 に計測器の配置を示す。

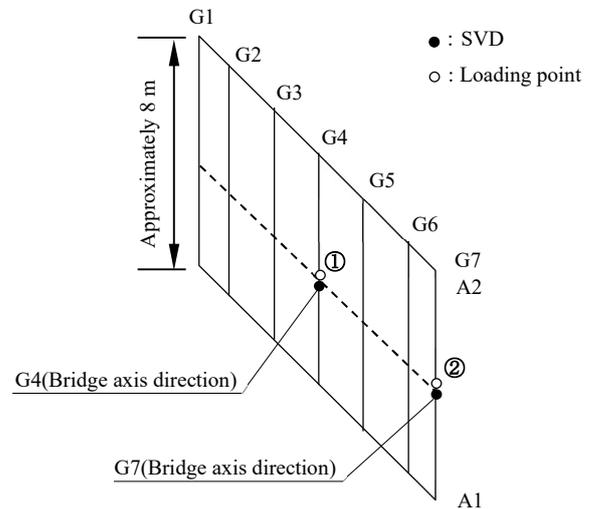


Fig. 13 Sensor arrangement and loading point

#### 5. 3 計測方法

Fig. 13 に示す載荷位置に  $100 \text{ kN}$ /個のコンクリートブロック 1 個または 2 個を上載し、その載荷ステップごとに計測を行った。計測は、一般的なデジタルカメラ (STYLUS TG-3 : OLYMPUS) を用いた。2 章で述べた画像処理を確実にできる画像が 1 枚あれば十分な精度でひずみを計測できるが、現場で効率よく画像を取得するためにデジタルカメラを手持ちで撮影することを考えると、手振れやピンボケなどの人為的なミスが生じる可能性がある。本計測もデジタルカメラを手持ちで撮影したため、人為的なミスを回避するために 5 枚ずつ撮影した。撮影条件は、撮影距離約  $15 \text{ cm}$ 、解像度  $1920 \times 1080$ 、焦点距離  $7 \text{ mm}$ 、フラッシュ無しとし、視差によるひずみ算出誤差およびひずみ算出結果の標準偏差を出来るだけ小さくするため、橋軸方向の撮影角度が  $\pm 10^\circ$  以内、橋軸直角方向の撮影角度が  $\pm 30^\circ$  以内となるように留意して撮影した。画像解析プログラム<sup>7)</sup>を用い

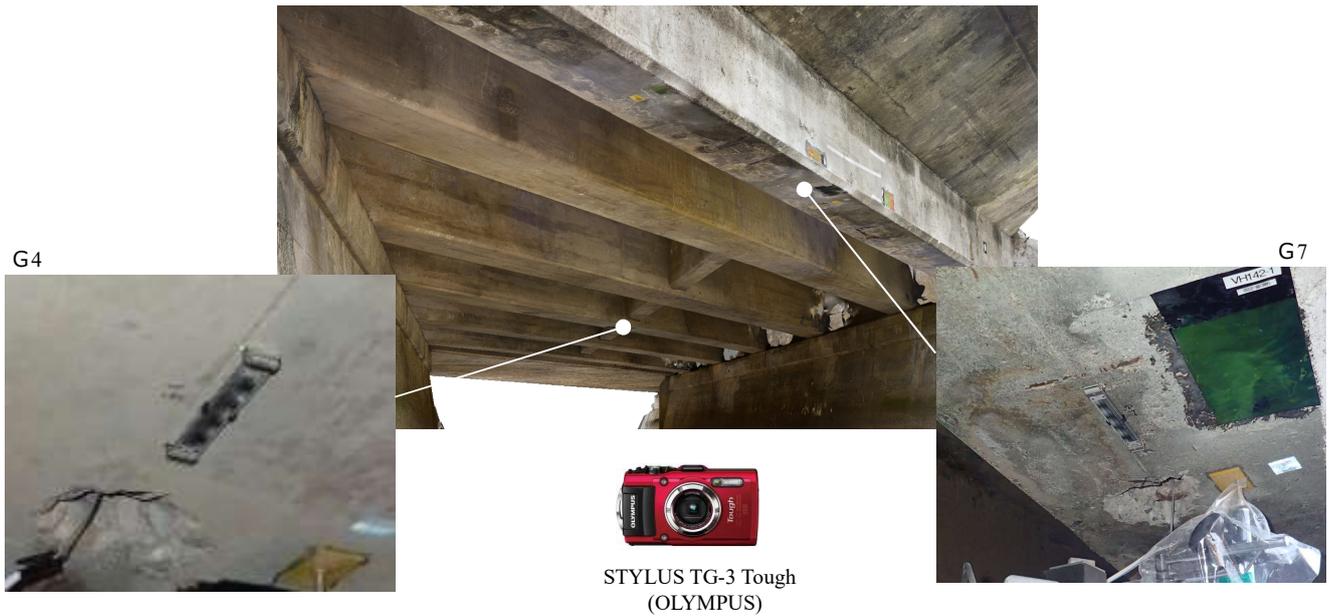


Fig. 14 Installation of SVD on RCT girder bridge

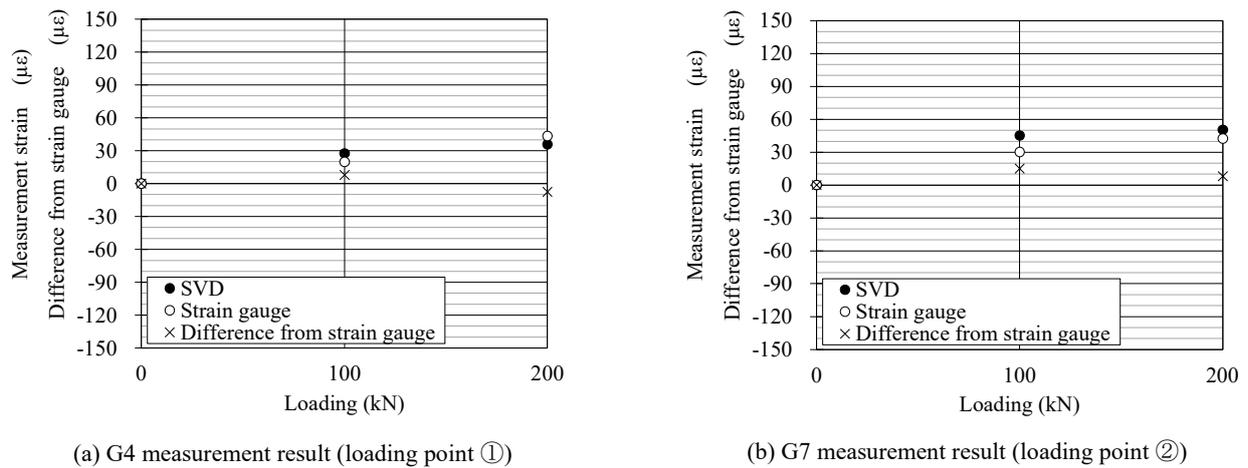


Fig. 15 Measurement results and difference from strain gauge

て、撮影したデジタル画像からひずみを算出し、平均値を求めた。

#### 5. 4 計測結果

載荷点①に載荷した時の測点 G4 の計測結果を Fig. 15(a) に、載荷点②に載荷した時の測点 G7 の計測結果を Fig. 15(b) にそれぞれ示す。また、隣接の鉄筋に設置されたひずみゲージの計測結果を併記する。ひずみ可視化デバイスとひずみゲージとの差は、測点 G4 で $\pm 8 \mu\epsilon$ 、測点 G7 で $8 \sim 15 \mu\epsilon$  と精度良くひずみを計測でき、実構造物のひずみ計測への本デバイスの適用性が実証された。

#### 6. 結論

ひずみ可視化デバイスを実構造物に適用するに当り、現場におけるデジタルカメラでの撮影条件を踏まえ、本デバ

イスの撮影角度とデジタル画像解析によるひずみ算出精度の関係を実験により検証した。その結果、y 軸回りの撮影角度を $\pm 10^\circ$ の範囲、x 軸回りの撮影角度を $\pm 30^\circ$ の範囲とすることで、 $10 \mu\epsilon \pm 10 \mu\epsilon (2\sigma)$  の計測精度を確保できることが明らかとなった。その上で、本デバイスをコンクリート橋の載荷試験におけるひずみ計測に適用したところ、ひずみゲージとの計測結果の差は $-8 \mu\epsilon \sim 15 \mu\epsilon$  と精度良く計測でき、実構造物のひずみ計測への本デバイスの適用性が実証された。

ひずみ可視化デバイスは、社会インフラの維持管理におけるモニタリングのために開発した新しいひずみ計測用センサである。本デバイスは、社会インフラの効率的・効果的かつ合理的な維持管理に貢献できると考えられる。

## 謝辞

ひずみ可視化デバイスのコンクリート橋への適用に当り、多大なる協力を頂いた長崎大学大学院工学研究科の山口浩平准教授に深く謝意を表す。

## 参考文献

- 1) Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism download directory: <http://www.mlit.go.jp/common/001016260.pdf>
- 2) Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism download directory: <http://www.mlit.go.jp/common/001016261.pdf>
- 3) Fujita, K., Sueyoshi, Y. and Matsusita, H.: Keisokukiki no genzyo to tenbo (in Japanese), *Concrete Journal*, **44-5** (2006), 13-17.
- 4) Imai, M., Igarashi, Y., Mizuno, S. and Miura, S.: Experimental study on monitoring for asphalt layer by embedded fiber optic sensor (in Japanese), *Journal of JSCE*, **68-3**, (2012), 696-706.
- 5) Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism download directory: <http://www.mlit.go.jp/common/001023294.pdf>
- 6) Amino, T., Kato, E., Yamaji, T. and Hoshino, M.: Innovation of sensore monitoring technique for advanced inspection and diagnosis of piers (in Japanese), *Journal of JSCE*, **74-2** (2018), I\_13-I\_18.
- 7) Omachi, M., Umemoto, S., Takaki, T., Matsuo, K., Miyamoto, N., Ishii, I. and Aoyama, T.: Visualization of strain and new strain measurement technique, *CD-ROM Proc. The 8th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure* (2017), SS3-6.
- 8) Reid, G. T.: Moiré fringes in metrology, *Optics and Lasers in Engineering*, **5**(1984), 63-93.
- 9) Rowlands, R. E., Beazley, P. K. and Gunderson, D. E.: Moiré strain analysis of paper, *Tappl Journal*, **66-8** (1983), 81-84.
- 10) Kuribayashi, K., Fujigaki, M., Kimura, M. and Niwa, Y.: A study of railway bridges soundness evaluation method using deflection angle as a management indicator (in Japanese), *Journal of JSCE*, **62A**, (2016), 617-629.
- 11) Umemoto, S., Takaki, T., Omachi, M., Matsuo, K., Miyamoto, N., Ishii, I. and Aoyama, T.: Development of self-temperature compensated strain visualization sheet, *CD-ROM Proc. The 8th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure* (2017), SS3-3.
- 12) Takaki, T., Umemoto, S., Fujii, K., Ishii, I., Ohata, H., Miyamoto, N. and Okamoto, T.: Strain visualization sticker using moiré fringe for remote sensing, *CD-ROM Proc. 6th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management* (2012), 2212-2217.
- 13) Umemoto, S., Tanoue, S., Miyamoto, N., Takaki, T., Ishii, I., Aoyama, T. and Fujii, K.: Concrete surface strain measurement using moiré fringes, *Construction and building materials*, **67** (2014), 115-120.