インフラ構造物に作用する応力の見える化 — ひずみ可視化シート —

Visualization of stress acting on infrastructures

- Strain Visualization Sheet-

○梅本 秀二(計測リサーチコンサルタント)
松尾 恵輔(計測リサーチコンサルタント)
大町 正和(計測リサーチコンサルタント)
宮本 則幸(計測リサーチコンサルタント)
正 高木 健(広島大) 正 石井 抱(広島大)
正 青山 忠義(広島大)

Shuji UMEMOTO, Keisoku Research Consultant Co., umemoto@krcnet.co.jp Keisuke MATSUO, Keisoku Research Consultant Co. Masakazu OMACHI, Keisoku Research Consultant Co. Noriyuki MIYAMOTO, Keisoku Research Consultant Co. Takeshi TAKAKI, Hiroshima University Idaku ISHII, Hiroshima University Tadayoshi AOYAMA, Hiroshima University

In order to realize visualization of stress acting on infrastructures, the authors developed "Strain Visualization Sheet" based on the principle of Moiré fringes. Strain Visualization Sheet is a revolutionary device which makes it possible to check strain values with the naked eye, and also enables highly precise measurements of strain values by using an ordinary digital camera. As an additional advantage, it is not necessary to provide an electrical power source for the device. In addition, Strain Visualization Sheet is a self-temperature compensated device, it is unaffected by temperature during strain measurements of the concrete and steel materials used as construction materials in infrastructures, and strain measurement with an accuracy of >20 μ is possible. As Strain Visualization Sheet is low in cost and enables any user to grasp the stress acting on infrastructures in a simple manner, we are confident that it can make an important contribution to operation and maintenance (O&M) of infrastructures in the future.

Key Words: Strain Visualization Sheet, Moiré Fringes, Self-Temperature Compensated Type

1. はじめに

インフラ構造物に作用する応力の見える化を実現するため に、モアレ縞の原理を用いた「ひずみ可視化シート」を開発 した. ひずみ可視化シートは、ひずみの値を肉眼で確認でき るとともに、一般的なデジタルカメラでより高精度にひずみ を計測することが可能である.しかも、デバイスへの電源供 給を必要としない画期的なひずみ計測用デバイスである.ま た, ひずみ可視化シートは, 従来のひずみゲージと同様に自 己温度補償型であるため、インフラ構造物の建設材料である 鋼やコンクリートのひずみ計測に際して温度の影響を受けず, 20μ ε 未満の誤差で高精度にひずみを計測することができる. このような特徴から、ひずみ可視化シートをインフラ構造物 に適用することによって、インフラ構造物の維持管理におい て重要な応力情報を、高精度なのに低コストで、誰でも簡単 に得ることが可能となる.本論文では、フィールドに適用す るために改良したひずみ可視化シートについて述べるととも に,その精度検証試験および自己温度補償の確認試験の結果 について報告する.

2. 原理

まず、ひずみ可視化シートの測定原理であるモアレ編について簡単に説明する. 図1(1)に示すように、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のモアレ編と呼ばれる縞が現れる. このモアレ縞 は2つの直線格子を重ね合わせることにより生じ、これらの 関係^[1]は式(1)となる.

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

図1(2)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、 微小変位p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とする.さらに、視認性を向上させる ため、高木ら^[2]の提案する式(2)を採用し、直線格子2をn個のピッチpの縞を一塊として、これを $np+\Delta p$ おきに配置し



Fig. 1 Moiré fringe



Fig. 2 Appearance of Strain Visualization Sheet



Fig. 3 Structure of Strain Visualization Sheet

て高拡大率のモアレ縞を得る.このとき,発生するモアレ縞 のピッチ W はで表され,拡大率 $M \operatorname{tr}(np+\Delta p)/\Delta p$ となる.

$$W = \frac{np + \Delta p}{\Delta p} \cdot p \ (= Mp \) \tag{2}$$

この原理を用いて微小変位を拡大表示することにより、数値(文字)の可視化や画像処理による微小変位の算出が可能 となる.その微小変位 Δp を標点間距離 L で除すことによりひ ずみ ε (= $\Delta p/L$)を算出している.

3. ひずみ可視化シート

3.1 ひずみ可視化シートの構造

ひずみ可視化シートの外観を図2に、構造を図3にそれぞ れ示す.パターンを生成した2枚のガラスプレートと温度補 償用の鋼製の温度補償板から構成され、固定リングでユニッ ト化されている.外形寸法は17mm×120mm,厚さ8mmで あり、標点間距離は105mmである.また、ひずみ可視化シ ートは3種類のモアレ縞で構成されており、上段の文字の部 分はひずみ可視化用、中段は画像処理によるひずみ算出用、 下段は画像処理の精度を向上させるための参照モアレである.

3.2 格子パターンの仕様

上段の可視化部分における格子パターンのピッチ p, Δp , 繰り返し回数 n はそれぞれ 0.1mm, 0.01mm, 73 回で拡大率 Mは 730 倍である.また,中段の画像処理部分における格子パ ターンは,それぞれ 0.07mm, 0.00025mm, 1 回で拡大率 Mは 280 倍である.格子パターンの生成技術が飛躍的に向上したた



Fig. 4 Structure of pattern glass

め、中段の画像処理部分はピッチpおよび Δp をこれまでより 小さく設定することができるようになり、繰り返し回数1回 でもこれまでと同様の拡大率を確保することが出来るように なった.

3.3 パターンガラスの構造

パターンガラスの構造を図4に示す.ガラスへのパターン の生成にはフォトマスクの技術を用いている.フロントガラ スの裏面に格子パターン1を生成し,バックプレートの表面 に白下地材を塗布の後,格子パターン2を生成し,それぞれ オーバーコートしている.

4. 精度検証試験

試験装置外観を図5に、変位制御部を図6に示す. 試験装置は、変位ステージ、レーザー変位計(繰り返し精度0.05µm) とそれらの制御用 PC, ひずみ可視化シート撮影用の USB カ メラ(解像度200 万画素)とリアルタイム画像処理装置から 構成される. USB カメラは、ひずみ可視化シートから90cm の高さに設置し、照度を一定に保つため照明を設けた.

4.2 試験方法

4.1 試験装置

初期値を計測したのち、5μm ピッチで変位(ひずみ 45με 相当)を与え、USB カメラによりひずみ可視化シートを連 続撮影した.撮影した連続画像は、リアルタイム画像処理装 置にてリアルタイムにひずみを算出し、5μm 毎のひずみ値を 記録した.

1P1-B04(2)



Fig. 6 Displacement control unit



Fig. 7 Change in strain value of visualization part

Fig. 5 Appearance of test equipment



4.3 目視による計測

可視化部分のひずみ値の変化を図7に示す.ひずみ値の読 取り方は、目視にて確認できる数字の個数を数え、個数が7 個の場合は4個目の数字,個数が8個の場合は4.5個目の数 字を読取る.図7の最上段の画像のように、数字が左右に分 かれる場合は、例えば左側の数字の塊の右端の数字から数え 始め、次に右側の数字の塊の右端の数字から個数を数えて合 計する.検証の結果は、90µε毎の発生ひずみに対して、±50µε の精度でひずみ値を可視化できていることが分かる.

4.4 画像処理による計測

変位ステージで発生させたひずみに対するひずみ可視化シ ートの画像処理の結果を図8に示す.画像処理による計測結 果は,発生ひずみと非常によく一致している. 誤差は-8~+ 15με であり、目視による計測よりもさらに高精度にひずみを 計測できることが確認できた.

5. 自己温度補償の確認試験

被測定材に接着したひずみ計測用センサは、外力によるひ ずみ以外に温度変化があると, 被測定材とひずみ計測用セン

サの線膨張係数の違いなどにより見掛けのひずみを生じる. 自己温度補償型のひずみ計測用センサとは、温度変化により 発生する見掛けのひずみを最小にしたセンサである.ひずみ 計測用センサの代表的なひずみゲージでは、適合材に接着し た場合,規定された温度範囲において±1.8µε/℃以内のものを 自己温度補償ゲージと呼ばれている.使用頻度の高い 20~ 40℃間は±1µɛ/℃以内となっているゲージもある. ひずみゲ ージは、被測定材に適合するようにひずみゲージ抵抗素子材 の抵抗温度係数を調整することにより自己温度補償を実現し ているのに対し, ひずみ可視化シートは, その構成材料およ び構造により、被測定材(コンクリート、軟鋼)に適合する 自己温度補償を実現している.

5.1 試験装置

試験装置には恒温恒湿低温槽(以下 恒温槽という)を採 用した. 恒温槽は、制御された温湿度環境に試料を暴露させ ることが可能な機器である.プログラム運転により、任意の 温湿度環境の繰り返し試験を行うこともでき、温湿度による 試料の形状変化の確認や各種電気機器の特定温湿度環境にお ける作動確認などにも活用することができる機器である.

1P1-B04(3)



Test piece (surface)

Test piece (back)

Fig. 9 Sensor arrangement



Fig. 10 Installation of test piece and USB camera in the thermostatic chamber

5.2 試験体

寸法 50mm×150mm (t=1.6mm)の鋼板 (SPCC:線膨張係 数 11.7με/C)を試験片として使用した.試験片のセンサの配置を図9に示す.鋼板の表面にひずみ可視化シートと比較対象用としてひずみゲージを貼り付け,裏面にもひずみゲージを設置して,温度による鋼板の曲げの発生の有無を確認した.なお,鋼板の温度を計測するため,鋼板裏面に熱電対温度計を貼り付けた.

5.3 試験方法

ひずみ可視化シートを貼り付けた試験片および撮影用の USB カメラを恒温槽内に設置し(図10),外部のリアルタイ ム画像処理装置に接続した.同様にひずみゲージおよび熱電 対の各信号線を外部のデータロガーに接続した.初期値を計 測したのち, -20℃~70℃まで 10℃ピッチで温度を変化させ, 試験片の温度がその設定温度に達した際のひずみ可視化シー トおよびひずみゲージの値を記録した.

5.4 見掛けのひずみ特性

試験片の温度と見掛けのひずみの関係を図11に示す.ひ ずみ可視化シートの見掛けひずみ特性は±1.0µℓ/℃未満を示 しており,自己温度補償されていることが確認された.また, 特筆すべきは,ひずみ可視化シートの見掛けのひずみは,



Fig. 11 Apparatus strain-temperature of test piece diagram

温度補償範囲が広く、70℃の高温下においても 20µε 程度, -20℃の標点下においても-20 µε と非常に小さいことである. 以上のことから,温度補償板を構造に組み込んだひずみ可視 化シートは、ひずみゲージ以上の見掛けのひずみ特性を有す る自己温度補償型のセンサであることが検証された.

6. おわりに

インフラ構造物に作用する応力の見える化を実現するため にひずみ可視化シートを開発し、フィールドへの適用に向け てその改良と検証を行った.その結果、精度、見掛けのひず み特性ともにフィールドにおける適用性を満足することが確 認できた.引き続き、フィールドにおける耐久性の検証、設 置方法・計測方法の簡素化、さらなる低コスト化に取り組ん でいく予定である.

参考文献

- [1] 山田朝治, 横関俊介, "モアレ縞・干渉縞応用計測法", コロナ社, pp.1-46, 1996.
- [2] Takeshi, T., Idaku, I., Shuji, U., Hideyuki, O., Noriyuki, M. and Takuji,O., "Development of micro displacement visualization sticker that achieves measurement of 1 micrometer," No.11-5 Proceedings of the 2011 JSME Conference on Robotics and Mechatronics 1P1-F08, 2011.