モアレ縞の原理を用いたひずみ可視化デバイスの実用化に向けた検証

(株) IHIインフラ建設 正会員 〇小林 崇

- (株)IHIインフラ建設 正会員 工修 赤松 輝雄
- (株)計測リサーチコンサルタント 梅本 秀二
- (株)計測リサーチコンサルタント 大町 正和

キーワード:モアレ縞、ひずみ可視化デバイス、耐候性・耐腐食性、動的モニタリング

1. はじめに

わが国では、橋梁のストック数が膨大となり、供用期間を50年超える橋梁数も増加している。これら の橋梁では老朽化が進んでおり、国土交通省は平成26年より効率的な維持管理を行うために5年に1回の 頻度で近接目視を基本とする定期点検を実施、橋梁の損傷状況の把握、健全性の診断を行っている。橋 梁の近接目視では、鋼部材の腐食や亀裂、破断、コンクリート部材や床版のひび割れや浮き、そのほか 支承の機能障害など外観変状の把握が行われる。これに対して梅本らは、構造物に作用する応力を目視 により確認できる新たなデバイスとしてモアレ縞の原理を用いた「ひずみ可視化デバイス」を開発した ¹⁾。ひずみ可視化デバイスは、文字形状の格子としたモアレ縞によりおおよそのひずみを目視により確

認できる(図-1)。また、一般的なデジタルカメラの画像を解 析することで高精度なひずみが確認でき、足場のない箇所での望 遠やドローンによる撮影にも対応できる。これに加え、ひずみの 確認に特別な測定器や電源を使用しないことから、主として電気 式のセンサーが使用される構造物の応力状態を計測する新たな手 法としてモニタリングなどへの活用も期待できる。

本稿では、ひずみ可視化デバイスの点検やモニタリングなどへ の実用化に向けて行った耐候性や耐腐食性などの耐久性,輪荷重 により発生する動ひずみへの適用性の検証について報告する。

2. ひずみ可視化デバイスの概要

2.1 モアレ縞の原理

モアレ縞は、図-2(a)に示すようにピッチpの直線格子1とそのピッチより Δp (《p)ほど大きいピッチ $p+\Delta p$ の直線格子2を重ねると現れる格子1、2より大きいピッチWの縞であり、その関係は式(1)で表される。

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

図-2 (b) のように、格子1を右方向にピッチp ほど動かす と、モアレ縞は右方向にピッチWほど動く。つまり、微小変位pを視覚的に拡大表示することができる。ひずみ可視化デバイス は、この原理を用いて拡大表示することで数値の可視化や画像 処理による微小変位の算出を可能とし、その微小変位 Δp を標 点間距離Lで除することでひずみ ϵ (= Δp /L) を算出する。



図-1 ひずみ可視化デバイス



図-2 モアレ縞の原理

表-1 ひずみ可視化デバイスの仕様

標点間距離	105mm
判読容量	$\pm 500 \mu \varepsilon$ (F.S.=1000 $\mu \varepsilon$)
可視化分解能	$50\mu\varepsilon$
非直線性	1% of F.S.
繰返し精度(2σ)	$\pm 10 \mu \varepsilon$
外形寸法	17mm×120mm×6.8mm
極性	+:引張, -: 圧縮

2.2 ひずみ可視化デバイスの構造と仕様

ひずみ可視化デバイスは,格子を生成した2枚のガラスプレートと温度補償用の鋼製の板で構成され,固定リングでユニット化されている。ひずみ可視化デバイスの仕様を表-1に,形状を図-3に,構造を図-4にそれぞれ示す。

3. 耐久性の検証

3.1 耐候性の検証

ひずみ可視化デバイスの耐候性を検証する。検証は耐候性促 進試験機で太陽光の紫外線波長に近いキセノン光を照射する ことにより行い,試験の条件はJIS K7350-2「プラスチック-実験室光源による暴露試験方法-第2部:キセノンアークラン プ」を参考にした。表-2に試験条件を示す。ここで,促進耐

候性試験では何時間が屋外暴露試験の何年に相当 するかという時間的関係が課題となる。本検証で は、ひずみ可視化デバイスに求める耐候性を定期 点検2回分となる10年とし、放射照度180W/m²でメラ ミンアルキド系の焼付塗料で促進試験を実施した 場合、光沢を指標として促進倍率を計算すると赤 色で150時間、白色で250時間が暴露1年分に相当す

るとのデータ²⁾より,紫外線積算量で比を取った2000時間を暴露 10年相当とした。試験では,一定時間経過ごとに試験機より試 験体を取り出し,目視により構成材料の表面の割れの有無や変 色を確認するとともにデジタルカメラ画像の解析,貼付した平 板を曲げたときのモアレ縞の動作を確認した。

図-5に促進試験2068時間を経過したひずみ可視化デバイス およびキセノン光の照射により劣化した例として旧型のひずみ 可視化デバイスの外観を示す。旧型のひずみ可視化デバイスは, 格子の生成に使用した樹脂の劣化により表面でベタつきや剥離

を生じ、739時間で画像の解析が不能となった。こ れを受けて格子の生成材料を金属メッキに改良し たひずみ可視化デバイスは、2000時間経過後も画 像の解析、動作とも問題ないことが確認された。

3.2 耐腐食性の検証

「自動車用材料腐食試験方法」を参考にした。表-3に試験条件を示す。JASO M609と同等のJIS H8502 「めっきの耐食性試験方法」では、銚子や直江津のような海岸部での暴露1年の腐食量と連続中性塩水噴 霧試験240時間の腐食量が同等であり、JIS H8502による複合サイクル試験は連続中性塩水噴霧試験の3 倍程度の腐食促進効果があるとされている³⁾。これより、80時間の試験を海岸部での暴露1年相当とし、 ひずみ可視化デバイスに求める耐腐食性を耐候性と同様10年以上として試験時間を800時間とした。試 験では、耐候性試験と同様に一定時間経過ごとに試験機より試験体を取り出し、発錆の有無やデジタル



図-3 ひずみ可視化デバイスの形状



図-4 ひずみ可視化デバイスの構造 表-2 耐候性試験の条件

スーパーキセノンウェザーメータ
照射:102min, 照射+水噴霧:18min/1サイクル
約 2000 時間
180W/m ² (波長範囲 300-400nm)
ブラックパネル温度 63℃ 湿度 50%RH, 槽内温度 : 38℃



(a) 2068 時間後(劣化無し)



(b) キセノン光の照射で劣化した例図-5 耐候性試験後の外観

表-3 耐腐食性試験の条件

試験機	複合サイクル試験機
サイクル (8hr)	塩水噴霧 (5%NaCl水溶液、槽内温度:35℃):2hr 乾燥 (槽内温度:60℃,湿度30%RH) :4hr 湿潤 (槽内温度:50℃,湿度95%RH) :2hr
試験時間	約 800 時間

カメラ画像の解析、モアレ縞の動作を確認した。

図-6に800時間の複合サイクル試験後のひずみ可視化デバイスの外観を示す。ここでは、腐食劣化した例として表面処理の異なる旧型のひずみ可視化デバイスも併せて示した。劣化した旧型のひずみ可視化デバイスの鋼製部品は、無電解ニッケルメッキ(5μm×1層)の表面処理が施されていたが、最初に確認した121時間ですでに発錆、動作しない状態であった。これに対して鋼製部品に亜鉛合金メッキ(5μm×2層)の表面処理を施したひずみ可視化デバイスは800時間経過時点で発錆は見られていない。最終的に試験を終了した暴露約19年に相当の1520時間後でも発錆はなく、動作や計測精度も問題なく高い耐腐食性を有することが確認された。

4. 動ひずみ計測への適用性の検証

梅本らは、ひずみ可視化デバイスの開発に際して鋼桁の静的曲げ載 荷試験やモルタル円柱供試体の圧縮試験などひずみの発生速度が緩 やかな状態でその性能を確認している^{4),5)}。しかし、構造物のひずみは 収縮や温度変化などによっても生じるため、定期点検など異なる条件

のなかで確認したひずみを単純に比較することは難し い。このため、点検やモニタリングに適用した場合には、 同じ重量の車両を通行させて生じるひずみや一定時間車 両を通行させてその間に生じるひずみの量と頻度で評価 することも考えられる。そこで、床版の走行疲労試験に際 して床版下面にひずみ可視化デバイスを設置、ビデオカ メラで撮影したモアレ縞の挙動を解析して、輪荷重の走 行により生じる動ひずみの計測への適用性を検証した。

走行疲労試験を行う試験体は、長さ2.06m,幅2.8m,厚 さ220mmで直角方向にプレストレスを導入した床版2体を RC構造で接合した幅380mmの間詰部を有する長さ4.5m(床 版支間2.5m)の床版である。試験は、床版上に並べた500mm ×200mmのブロック上の中央より±1.5mの範囲で鉄輪を 時速7.2km(2400回/h)で走行させて行う。ひずみ可視化 デバイスは、床版下面で直角方向に1ヶ所(測点A)、走行 方向に2ヶ所(測点B,C)設置、併せて配置した電気式のひ ずみゲージと比較した。図-7に走行疲労試験の状況を、 図-8に床版の形状と走行範囲、ひずみの計測位置を、図 -9に計測状況を示す。ここで、動画の撮影には解像度 200万画素の高解像度CMOSカメラ(USBカメラ)を使用、サ ンプリング速度を測点A,Bは5Hz、測点Cは15Hzとした。





(b)腐食劣化した例 図-6 耐腐食性試験後の外観



図-7 走行疲労試験状況



■ :03 #14(ET/14) ■ :電気:07 # / = :電気:07 # / = : 図 - 8 床版形状およびひずみ計測位置



(a) 計測状況
(c) モニタリングカメラ
図一9 床版下面ひずみ計測状況

図-10に動ひずみの計測と併せて確認した床版中央に350kN・450kNの面荷重を静的に載荷したときのひずみを示す。測点Aでは引張ひずみが確認され、350kN載荷時の値は電気式ひずみゲージに比べてひずみ可視化デバイスは20µ程度大きい。測点Cでは圧縮ひずみが確認され、その値は12µ程度小さい。また、測点Bは電気式ひずみゲージ、ひずみ可視化デバイスとも値が小さく、比較の難しい誤差程度である。

図-11に測点A,Cにおける輪荷重によるひずみの発 生挙動を示す。ここで、 測定されたひずみは、 静的載荷と 同様に測点Aではひずみ可視化デバイスが電気式ひずみ ゲージに比べて大きく、測点Cでは小さい値であったが、 両者のひずみの挙動を比較するため、圧縮側のピーク値 が概ね一致するようひずみ可視化デバイスの挙動をスラ イドさせて示している。測点Aでは図-8の右側から来た 鉄輪が中央を過ぎて左側で折り返す前後で、測点Cでは左 側の折り返し時点で差異が見られる。ひずみ可視化デバ イスの構造上、強制的に発生するひずみには追従したが、 瞬間的なひずみの解放に対して若干遅れた可能性があ る。ただし、挙動とそのピーク値はほぼ一致しており、輪 荷重の走行により生じる動ひずみの計測へのひずみ可視 化デバイスの適用性が示された。また,この時のサンプリ ング速度は、5Hzの測点Aに比べて15Hzの測点Cの精度が良 く、データの容量からも15Hz程度が適当である。

5. まとめ

モアレ縞の原理を用いたひずみ可視化デバイスは,目 視によりおおよそのひずみを,画像の解析により高精度 なひずみを確認でき,また,ひずみの確認に電源などを必 要としないことから,構造物の応力状態のモニタリング などへの活用が期待できる。ひずみ可視化デバイスの点 検やモニタリングへの実用化に向けて行った耐候性や耐 腐食性,動ひずみ計測への適用性の検証により得られた 知見を以下に示す。





(a) 測点 A(サンプリング速度 5Hz)



・ひずみ可視化デバイスは、紫外線に対して10年、大気腐食に対しては20年近い耐久性を有する。

・ひずみ可視化デバイスは、ビデオカメラで撮影した動画の解析により動ひずみの計測が可能である。

ひずみ可視化デバイスは、直線格子を数字の形状とすることによりひずみの可視化を可能としており、 画像解析によりその精度は向上する。また、今回の検証で動ひずみの計測は、カメラをノートパソコン に繋いだ状態で動画を撮影した。近年、点検などにタブレットが活用されている。これを用いて現地で 撮影、その場で画像解析を行うことより迅速に高精度なひずみを確認でき、また、ケーブルや電源を使 用せず動画の撮影が可能であり、より実用性が向上するものと思われる。

【参考文献】

- 1) 梅本秀二・松尾恵輔・大町正和・宮本則幸・高木健・青山忠義:インフラ構造物に作用する応力の見 える化ーひずみ可視化シートー,ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集,1P1-B04,2017.
- 2) スガ試験機(株):耐候性を極める, https://www.sugatest.co.jp/function/(閲覧日2020,5,14).
- 3) (財)日本ウエザリングテストセンター:促進暴露試験ハンドブック〔Ⅱ〕促進腐食試験,2009.4.
- 4) 梅本秀二・高木健・大畑秀之・宮本則幸・岡本卓慈・石井抱:モアレ縞を用いたひずみ計測および可 視化技術,実験力学, Vol. 12, No. 3, pp. 201-206, 2012. 9.
- 5) 梅本秀二・大町正和・宮本則幸・岡本卓慈・高木健・石井抱・青山忠義:ひずみ可視化シートの改良 とコンクリートへの適用,土木学会第68回年次学術講演会,VI-108, pp.215-216, 2013.9.