

検査機器

モアレ縞の原理を用いたひずみのモニタリング

Strain monitoring using the moire fringe principle

ひずみ可視化デバイスの開発と適用例

(株)計測リサーチコンサルタント 大町 正和
広島大学 高木 健

1. はじめに

2012年12月に発生した篠子トンネルの天井板落下事故以降、国土交通省は橋梁やトンネルの点検基準の法定化や5年に1回の定期点検の義務化など構造物の維持管理体制の整備を進めてきた。

これら社会資本の維持管理は非常に重要であるが、維持修繕予算の減少や橋梁などの保全業務に携わる専門技術者が減少していく現状では適切な維持管理を継続できなくなる可能性がある。

近接目視を基本とする定期点検ではマンパワーに頼る部分が多く、専門技術者が不足することが予想される近い将来では誰でも簡単に構造物の状態を知ることができるモニタリング技術が渴望される。また、2019年には定期点検要領が改訂され、定期点検にICTを活用した計測・モニタリング技術の導入が認められ、今後益々モニタリング技術の重要性は高まつてくると考えられる。

従来、構造物のモニタリングではセンサをデータロガー等に接続して実施するが、電源の確保や、頻繁にメンテナンスが実施できないなどの問題がある。また、初期導入コストも比較的高価であるため、実施に至らないケースも多々ある。

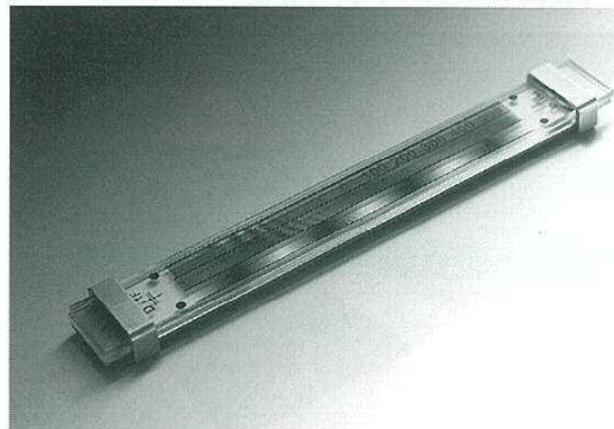


写真1 ひずみ可視化デバイス

そこで筆者らは、モニタリング項目の一つである“ひずみ”に着目し、安価で、誰でも簡単に計測できるとともに、遠隔・非接触計測が可能なひずみ計測手法の確立を目指して、ひずみ可視化デバイス（写真1）を開発した。

本稿では、筆者らが開発したひずみ可視化デバイスの性能と測定方法、および実際の構造物への適用例を紹介する。

2. ひずみ可視化デバイスの概要

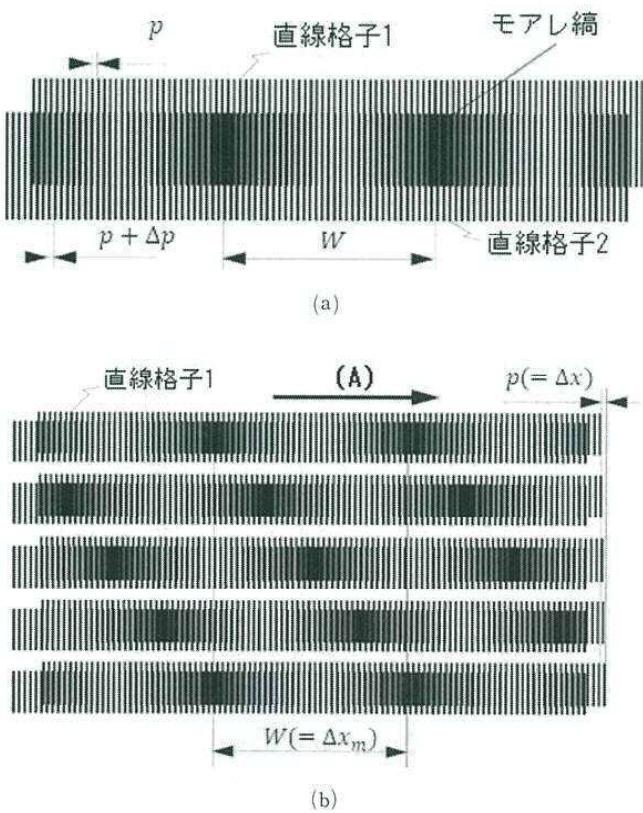
(1) 特徴

ひずみ可視化デバイスは、モアレ縞の原理を用いた新たなひずみ計測用のセンサであり、次のような特徴を有している。

- ① 定量的にひずみを可視化できる。
- ② 電気的な要素を一切使用しないため電源を必要とせず、電気的な故障がない。
- ③ 電気的ノイズの影響を受けない。
- ④ 一般的なデジタルカメラ等により、遠隔・非接触で目視よりも高精度にひずみを計測することができる。
- ⑤ メンテナンスが容易である。

(2) 測定原理

第1図(a)に示すように、ピッチ p の直線格子1とそのピッチよりも Δp ($\ll p$) 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 の縞が現れる。これをモアレ縞と言う。ひずみ可視化デバイスは、このモアレ縞の原理を用いている。直線格子のピッチとモアレ縞のピッチの関係は式(1)で表され、ピッチ p は、モアレ縞によって視覚的に $(p + \Delta p)/\Delta p$ 倍に拡大表示することができる。この拡大率を M とする。



第1図 モアレ縞の原理

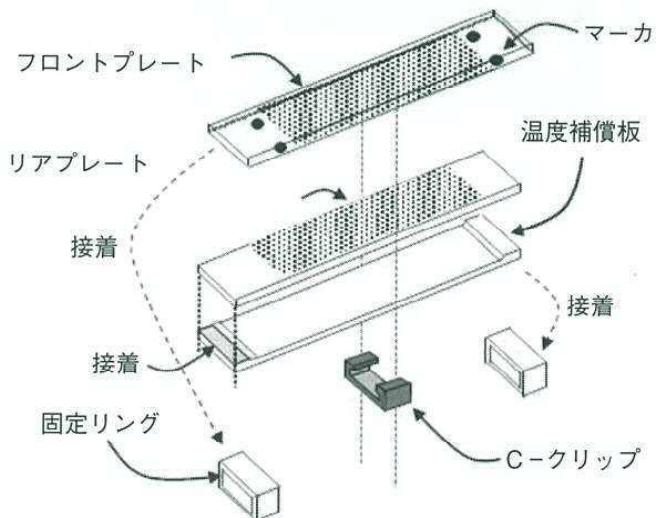
$$W = \frac{p + \Delta p}{\Delta p} \cdot p \quad \cdots(1)$$

第1図(b)のように直線格子1を(A)の方向に Δx ほど動かした場合のモアレ縞の(A)の方向の移動量 Δx_m は式(2)で表される。つまり、変位 Δx を視覚的に M 倍に拡大表示することができる。この原理で、非常に微小な変位の計測、およびひずみの可視化を可能にしている。

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

(3) 構造と仕様

第2図にひずみ可視化デバイスの構造を示す。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、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長さ、幅、厚さは、それぞれ120mm、17mm、6.8mmであり、標点間距離は105mmである。また、ひずみ可視化デバイスは3種類の縞模様で構成されている。上段は、ひずみ値を肉眼で直読することのできる $100\mu\epsilon$ 每の目盛状の文字縞であり、中段は画像処理によってひずみを計測するための縞である。下段は、画像解析の精度向上のための変化しない縞である。



第2図 ひずみ可視化デバイスの構造

第1表 ひずみ可視化デバイスの仕様

標点間距離	105mm
判読容量	±500 $\mu\epsilon$ (F.S.=1000 $\mu\epsilon$)
可視化分解能	50 $\mu\epsilon$
非直線性	±1% of F.S.
繰り返し精度(2σ)	±10 $\mu\epsilon$
外径寸法	W:17×H:6.8×L:120mm

以上の構造で開発したひずみ可視化デバイスの仕様を第1表に示す。

3. 計測方法

(1) 目視による計測

第3図に可視化部分のひずみ値の変化の例を示す。ひずみ値は100 $\mu\epsilon$ ごとの数値の最も濃く表示されている数字を読み取ることで得られる。二つの数字が同じような濃さで表示される場合はその数値の間を読み取ることで50 $\mu\epsilon$ の分解能でひずみ値を得ることができる。

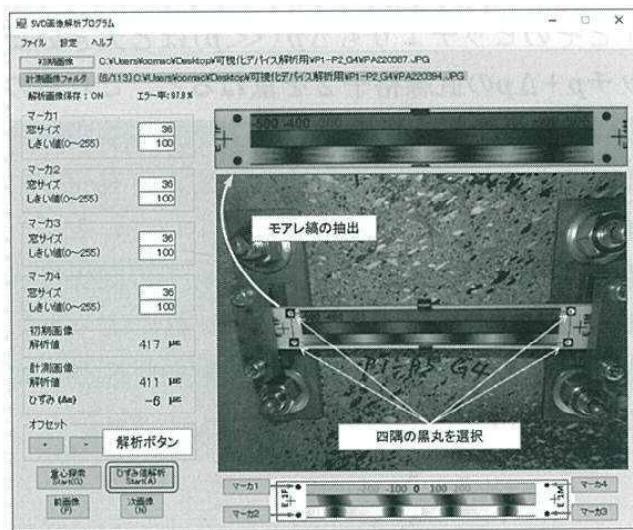


第3図 可視化部分のひずみ値の変化

(2) デジタルカメラによる計測

デジタルカメラによる計測はひずみ可視化デバイスになるべく正対し、四隅にある黒丸が十分に映り込むように撮影をする。撮影の際にはカメラのフラッシュやLEDライトまたは撮影者側の背景がひずみ可視化デバイスに映り込まないようにする必要がある。

撮影した画像は第4図に示すひずみ算出用アプリケーションで解析することでひずみ値を算出することができる。ひずみ算出用アプリケーションでは静止画像の取り込み、モアレ縞の抽出、モアレ縞の輝度値分布の理論値と計測値のフィッティングの手順で解析が行われる。実際の操作は、ひずみ可視化デバイスの四隅の黒丸を選択し、解析ボタンをクリックするだけでひずみ値の算出が可能である。



第4図 ひずみ算出用アプリケーション

4. ひずみ可視化デバイスを用いた調査・モニタリング事例

(1) 概要

ひずみ可視化デバイスを用いた橋梁の調査・モニタリング事例を紹介する。

写真2に対象橋梁の外観を、第2表に対象橋梁の諸元を示す。対象橋梁は鹿児島県にある3径間ポストテンション方式PC単純T桁橋（5主桁）である。

この橋梁は架設から46年経過しており、アルカリ骨材反応によるひび割れが主桁の橋軸方向に多数発生している。この橋梁においてひずみ可視化デバイスを設置し、載荷試験時のひずみ計測を実施した。



写真2 橋梁の外観

第2表 対象橋梁の諸元

橋長	102.230m
桁長	30.750 + 40.750 + 30.550m
支間長	30.050 + 39.950 + 29.850m
有効幅員	車道: 6.750 m, 歩道: 1.500 m
全幅員	9.250m
上部工構造形式	ポストテンション方式PC単純T桁橋(5主桁)
架設年	1975年

(2) 計測器の配置

第5図に計測器の配置を示す。計測対象をA1-P1径間およびP1-P2径間とし、ひずみ可視化デバイスはA1-P1径間ではG3桁とG4桁に、P1-P2径間ではG1桁とG4桁のひずみゲージ近傍にそれぞれ設置した。

写真3にひずみ可視化デバイスの設置状況を示す。ひずみ可視化デバイスの設置は専用の取付治具を使用し、アンカーボルトを用いてコンクリートに固定した。

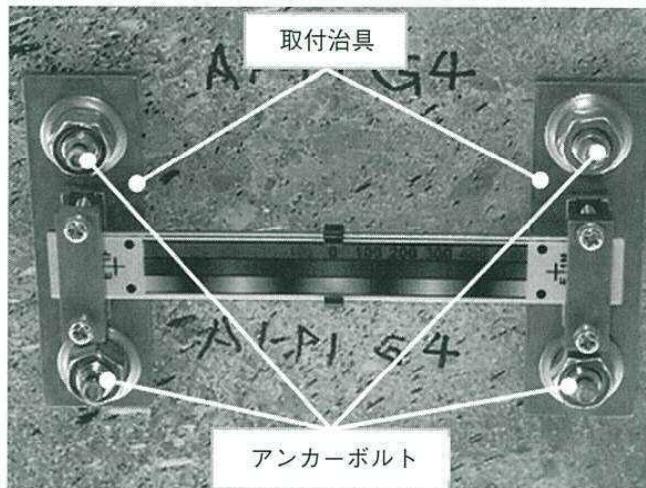
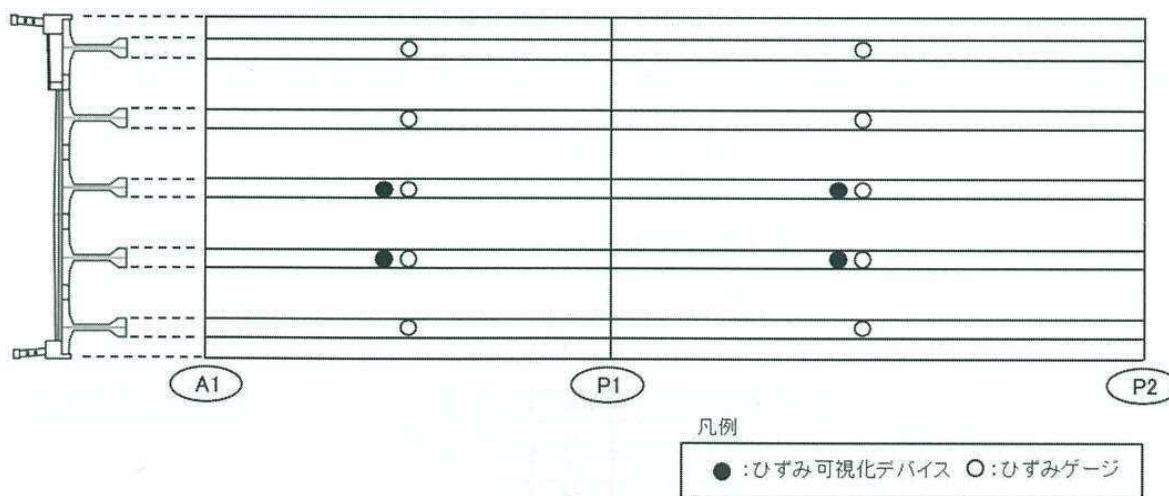


写真3 ひずみ可視化デバイスの設置状況

(3) 計測方法

ひずみ可視化デバイスの計測方法は、デジタルカメラを用いて計測する方法とした。はじめに無載荷状態で初期の画像を撮影し、次に各載荷ケース毎に静止画を撮影した。第4図のひずみ算出アプリケーションによって撮影した画像を解析し、ひずみを算出した。なお、ひずみゲージの計測は専用の測定器で行った。



第5図 計測器の配置

(4) 載荷方法

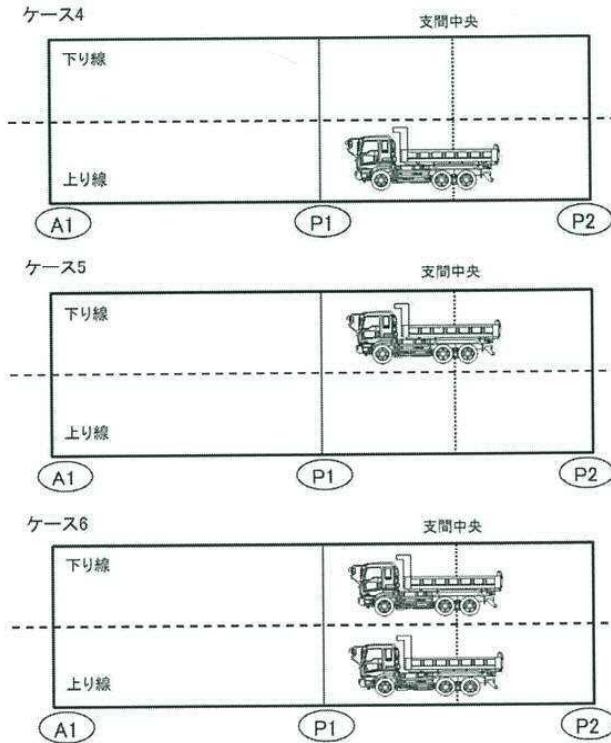
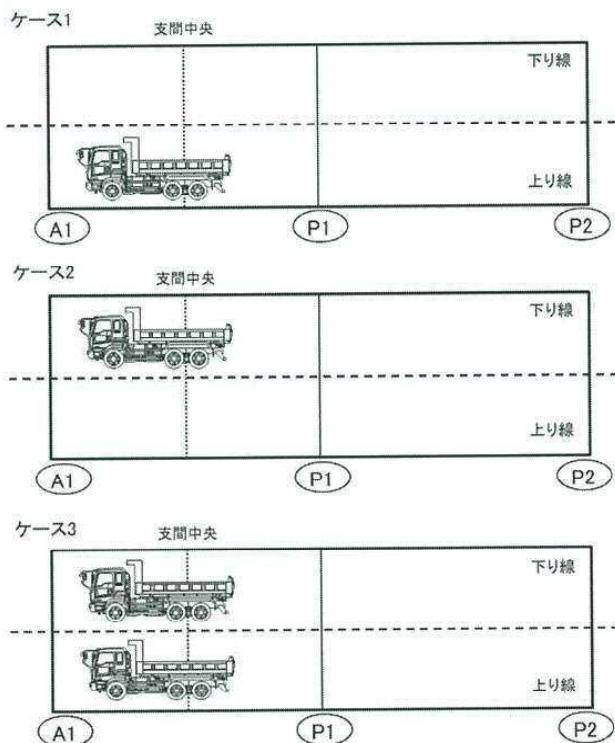
第6図に載荷試験の車両載荷ケースを示す。事前に計量した200kNのダンプトラックを載荷荷重とし、上り線に載荷するケースと下り線に載荷するケースおよび上り線と下り線の両方に車両を載荷するケースをそれぞれの径間で実施した。なお、ダンプトラックは各径間の支間中央に車両の後輪中央が載荷されるようにした。

ひずみ可視化デバイスとひずみゲージの両方を設置したA1-P1径間のG3桁・G4桁、P1-P2径間のG1桁・G4桁のひずみ測定結果について示す。第3表に載荷試験時のひずみ測定結果を示す。ひずみ可視化デバイスの値は各載荷ケース

毎に複数枚の画像を解析した結果の平均値を採用している。

ケース2のA1-P1径間G4以外はひずみ可視化デバイスがひずみゲージに比べてやや小さい値を示しているが、いずれのケースにおいてもひずみ可視化デバイスとひずみゲージは概ね同様の結果が得られており、ひずみ可視化デバイスとひずみゲージの差は最大で $19\mu\epsilon$ であった。この結果はひずみ可視化デバイスの仕様である総合精度 $\pm 20\mu\epsilon$ （非直線性： $\pm 1\%$ off F.S、繰り返し精度(2σ)： $\pm 10\mu\epsilon$ ）を満足するものであった。

なお、橋梁に設置したひずみ可視化デバイス



第6図 車両載荷ケース

第3表 載荷試験時のひずみ測定結果

載荷ケース	ひずみ可視化デバイス($\mu\epsilon$)				ひずみゲージ($\mu\epsilon$)			
	A1-P1 径間		P1-P2 径間		A1-P1 径間		P1-P2 径間	
	G3	G4	G1	G4	G3	G4	G1	G4
ケース1	24	54	-	-	32	55	-	-
ケース2	27	43	-	-	39	26	-	-
ケース3	52	64	-	-	70	81	-	-
ケース4	-	-	3	18	-	-	4	29
ケース5	-	-	8	16	-	-	27	19
ケース6	-	-	20	42	-	-	35	47

は存置しており、年に数回計測することで継続的にひずみのモニタリングを実施している。

5. おわりに

これまで構造物のモニタリングは重要構造物や大規模構造物に限られており、中小規模の構造物で継続的にデータを収集してきた事例は少ない。構造物のモニタリングを誰でも簡易に、かつ比較的安価に実施することが可能となるひずみ可視化デバイスを普及させることで、今後のモニタリング分野に貢献していきたい。

【謝辞】

ひずみ可視化デバイスの実橋梁への適用にあたっては、鹿児島県担当部局ならびに(株)久永

コンサルタントの内村氏に多大なるご協力を頂きました。ここに記して、深く感謝の意を表します。

【筆者紹介】

大町 正和

(株)計測リサーチコンサルタント 事業推進部 課長

<主なる業務歴および資格>

コンクリート構造物の調査・診断、モニタリング計画。

コンクリート診断士

<会社の主な事業内容>

土木建築をはじめ、社会基盤の構築・維持に関わる計測技術情報とその有用なサービスを提供している。顧客ニーズを汲み取り最適な技術を提案するとともに、研究開発型の企業として数々の新しい技術開発・展開を行っている。

高木 健

広島大学 先進理工系科学研究科 教授

天然ガスパイプラインのすすめ

編集：(一社)日本エネルギー学会 天然ガス部会 輸送・貯蔵分科会

B5判 本文260頁 定価 2,750円(税込)

パイプライン網の整備により、中国、韓国、ロシアなどは、強固な天然ガス供給体制を構築しつつあり、わが国でもパイプライン網について議論がなされている。その現状を理解するための一冊。

お申し込み・問合せ

日本工業出版 販売課

フリーコール
0120-974-250 netsale@nikko-pb.co.jp
<https://www.nikko-pb.co.jp/>

天然ガスハイラインのすすめ

～低炭素社会の新潮流に乗り遅れないために～



一般社団法人 日本エネルギー学会
天然ガス部会 輸送・貯蔵分科会編

© 日本工業出版