

## 論文の要旨

題目 実構造物の維持管理に適用できるモアレ縞を用いたひずみ可視化デバイス  
(Strain Visualization Device capable of Structural Health Monitoring using Moiré Fringes)

氏名 梅本 秀二

我が国は、1950～1970年代にかけて、戦後の経済復興とともに急速に高度経済成長を遂げた。我が国には、現在、全国に道路橋約73万橋、道路トンネル約1.1万本、治水・利水に関する河川管理施設約1万施設、港湾岸壁約5千施設が存在する。これらの多くが、高度経済成長期に建設された構造物であり、今現在で社会インフラの30～40%が建設後50年以上を経過していると想定され、10数年後の2033年には、建設後50年以上を経過した社会インフラは50%～70%近い割合に達すると予測されている。近年、建設後の経過年数の増加に伴い経年劣化が急速に進行し、次々と損傷が顕在化している。これらの社会インフラを効率的・効果的に維持管理するためには、構造物のヘルスマモニタリングが重要となる。重要なモニタリング項目として挙げられるのが、構造部材の応力度を把握する“ひずみ”である。しかしながら、厳しい財政状況の中、構造物のヘルスマモニタリングを実施できていない現状があり、如何にして、効率的・効果的かつ合理的な社会インフラのヘルスマモニタリングを低コストで実現するかが課題となっている。これらの課題を解決する手段の1つとして提案するのが、「モアレ縞を用いたひずみ可視化デバイス」である。このひずみ可視化デバイスを実構造物の維持管理に適用するためには、耐久性、自己温度補償、計測精度が求められることから、本研究では、これらの要求性能を満足するひずみ可視化デバイスの実用化を図った。

第2章では、ひずみ可視化デバイスの測定原理と基本構造を示した。モアレ縞の原理によって、微小変位を拡大表示できることを示し、新たな格子パターンによって、その拡大率を大きくするとともに、視認性を向上させた。また、文字格子を100  $\mu\text{m}$  毎の目盛状に配置することにより、ひずみ値を視覚的に見ることを可能とした。次に、デジタル画像からひずみ値を抽出する方法を示した。モアレ縞の輝度分布をsin曲線近似し、変位後のsin近似曲線との位相差から変位を算出し、ひずみ可視化デバイスの標点間距離Lで除すことによりひずみを算出する。最後に、原理・方法に基づき製作したひずみ可視化デバイスの基本仕様を示した。モアレ縞は、格子パターンが生成された2枚の透明のガラスを重ね合わせることによって生じる。表示部分は、ひずみを可視化するモアレ縞、画像処理用のモアレ縞、画像処理の精度向上のための参照縞から構成され、ひずみを可視化する部分のモアレ縞は、拡大率を731倍とした。また、画像処理用のモアレ縞は、拡大率が281倍となるように格子パターンを生成し、ひずみの可視化と高精度なひずみ計測を可能とした。ひずみ可視化デバイスを構成する部品は、自然環境下において長期間耐えうる材質を選定した。フロントプレートとリアプレートには、湿潤膨張が無く、あらゆる環境性能に優れた結晶化ガラスを採用するとともに、これらをユニット化する鋼製の固定リングには亜鉛ニッケル合金メッキを施し、耐候性、耐腐食性共に自然環境下10年相当以上を有する耐久性の高いひずみ可視化デバイスを実現した。

第3章では、温度の影響を受けない自己温度補償の構造と原理を提案した。ひずみ可視化デバイスの基本構造に対し、温度補償板を追加する構造を提案し、温度補償板の長さを構造部材のひずみ

検出範囲と同じ長さにし、温度補償板の線膨張係数を構造部材と同じにすることで、温度の影響をキャンセルする原理を示した。次に、これを実装した自己温度補償型ひずみ可視化デバイスを製作し、その温度特性試験を実施した結果、ひずみ可視化デバイスの見掛けひずみは、 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ の温度範囲において $\pm 1.0\text{ }\mu\epsilon/\text{ }^{\circ}\text{C}$ 未満であることが確認され、自己温度補償型のひずみゲージと比べても優れた温度特性を持っていることが検証できた。よって、温度の影響を受けない、自己温度型ひずみ可視化デバイスを実現できた。

第4章では、デジタル画像処理によるひずみの計測精度 $\pm 20\text{ }\mu\epsilon$ 、目視によるひずみ計測精度 $\pm 50\text{ }\mu\epsilon$ を目標精度とし、変位ステージによる精度検証を行うとともに、構造部材への適用を想定して、鋼製試験体の引張試験による従来型のひずみゲージとの比較検証を実施した。まず、画像処理によりひずみを算出する方法では、ひずみ可視化デバイスの計測範囲である $-500\text{ }\mu\epsilon\sim +500\text{ }\mu\epsilon$ の間を、サブミクロンフィードバックステージを用いて $20\text{ }\mu\epsilon$ ずつ変化させ、 $20\text{ }\mu\epsilon$ 毎にデジタル画像を取得し、画像処理によりひずみを算出した。発生させたひずみに対し、ひずみ可視化デバイスは $-12\text{ }\mu\epsilon\sim +2\text{ }\mu\epsilon$ の精度で計測でき、目標精度 $\pm 20\text{ }\mu\epsilon$ を満足することを検証した。目視による計測方法では、同様に $100\text{ }\mu\epsilon$ ずつ変化させ、 $100\text{ }\mu\epsilon$ 毎にデジタル画像を取得し、可視化部分の文字を読み取った。その結果、目標精度 $\pm 50\text{ }\mu\epsilon$ を満足することが検証できた。次に、実構造物での適用を想定し、鋼製の試験体にひずみ可視化デバイスを設置して引張試験を実施し、従来型のひずみゲージと比較検証した。試験の結果、ひずみゲージとの差は目標精度 $\pm 20\text{ }\mu\epsilon$ 以下を満足し、構造部材にも適用できることが検証できた。よって、ひずみ可視化デバイスは、実構造物の維持管理に適用できる計測精度を有することが実証できた。

第5章では、ひずみ可視化デバイスを実構造物に適用してデジタルカメラで撮影する場合、定点かつ同条件で撮影できない。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、視差の影響により、ひずみ可視化デバイスのフロントプレートとリアプレート間に隙間があると、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。対策は施したものの、フロントプレートとリアプレートには、ガラスコーティングおよびフッ素コーティングを施していること、格子を形成しているクロムの薄膜に厚みおよび表面の粗さが影響して2つのプレートの隙間を0にすることはできないことから、実験により、ひずみ可視化デバイスの撮影角度とひずみ算出精度の関係を検証した。その結果、撮影角度とひずみ算出精度の関係が明らかとなり、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、ひずみ可視化デバイスの目標精度 $20\text{ }\mu\epsilon$ 以下を満足することが検証された。よって、実構造物にひずみ可視化デバイスを適用しデジタルカメラで撮影する場合、撮影角度に留意して撮影すれば、計測精度が確保できることが明らかとなった。

第6章では、曲げ変形を受ける部材にひずみ可視化デバイスを適用する場合の補正係数の算出方法を示し、中立軸から部材表面までの距離と補正係数の関係を示した。算出した補正係数の妥当性を検証するため、構造部材と比べ極端に剛性の小さい鋼製フラットバー（FB）を試験体として、FBに曲げ変形を与えて、ひずみ可視化デバイスとひずみゲージで部材表面のひずみを計測する実験を行った。補正前の実験結果は、ひずみゲージの計測値に対し、ひずみ可視化デバイスの計測値が非常に大きくなったが、補正係数を適用した結果、ひずみゲージの計測値とひずみ可視化デバイスの計測値は一致し、補正係数の妥当性を検証できた。このように、補正係数を適用することにより、曲

げ変形を受ける剛性の小さい部材のひずみ計測に対しても、ひずみ可視化デバイスが適用できることを検証できた。

第7章では、4つの実構造物の載荷試験にひずみ可視化デバイスを適用し、その適用性を実証した。また、最後に、地下トンネルの維持管理に試験適用した事例を示した。構造の異なる2橋梁の載荷試験では、橋面上にコンクリートブロックとダンプトラックを載荷し、桁のたわみに伴い、桁下面に発生するひずみを計測した。各試験ともに、従来のひずみゲージの計測結果との差は $20\mu\epsilon$ 未満となり、目標精度 $\pm 20\mu\epsilon$ 以下を満足する結果を得た。送電鉄塔の載荷試験では、載荷に伴い発生する鉄塔の脚部のひずみ計測に適用した。載荷開始から破壊まで、精度よくひずみを計測することができ、目標精度 $\pm 20\mu\epsilon$ 以下を満足する結果を得た。走行疲労試験では、床版下面に発生する動的ひずみの計測に適用した。鉄輪の折り返し時点で差異が見られることもあったが、応答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適用性が実証された。最後に、地下トンネルの維持管理へ試験的に適用した。約2年間の継続計測を行っているが、ひずみ計の精度を踏まえれば、ひずみ可視化デバイスとひずみ計の値は、年間を通して、概ね一致している。ひずみ可視化デバイスによって、地下トンネルの覆工コンクリートに異常が認められないことを確認できており、約2年間の計測を通じ、ひずみ可視化デバイスが地下トンネルの維持管理に適用できることを実証した。以上、4つの実構造物の載荷試験への適用および地下トンネルの維持管理への試験適用により、実構造物への適用性が実証でき、実構造物の維持管理に適用できるモアレ縞を用いたひずみ可視化デバイスの実用化に成功した。

本研究によって、実構造物の維持管理に適用できるひずみ可視化デバイスの実用化を図ることができた。引き続き、スマートフォンでひずみを計測するためのアプリケーション、遠隔あるいはドローンを用いてデジタル画像を撮影してひずみを算出する方法、走行車両によりデジタル画像を撮影し、リアルタイムにひずみ算出する方法など、ひずみ計測の効率化についても研究を進める予定である。今後も、社会インフラの老朽化は急速に進行し、損傷の顕在化が増えていくと考えられる。本研究を基礎として適用事例を重ね、ひずみ可視化デバイスをより実用的なものにすることで、実構造物の維持管理に貢献していきたい。