

報告

光エンコーダを応用した高精度表面変位センサによる RC床版の疲労載荷試験の変位計測

工藤慎之輔*, 井上和真**, 川崎佑磨***, 小西優真****, 桑野響****

*太陽誘電株式会社,第二事業本部新事業推進室 (〒370-8522 群馬県高崎市栄町8-1)

**博(工), 群馬工業高等専門学校准教授, 環境都市工学科 (〒371-8530 群馬県前橋市鳥羽町 580)

*** 博(工), 立命館大学准教授, 理工学部環境都市工学科

(〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

****立命館大学博士前期課程学生, 理工学研究科環境都市専攻

(〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

微細な変動を検出可能な光エンコーダの技術を応用した、表面変位を nm オーダーで計測できる光変位センサの活用が期待されている。このセンサは、広い範囲の微細な表面変位の変化を検知できるため、RC床版等の橋梁の維持管理業務に活用できる可能性がある。本稿では、RC床版を対象にした疲労載荷試験の変位計測に光変位センサを適用し、得られた結果から、RC床版のモニタリングへの適用性について評価した。

キーワード : RC床版, 表面変位センサ, 光エンコーダ

1. はじめに

日本全国に 73 万橋梁以上ある橋梁の約 59%が 2032 年までに建設から 50 年以上経過し老朽化を迎える¹⁾。橋梁の老朽化に対応すべく、予防保全を通じて、既設橋梁の長寿命化を図る観点から、2013 年に道路法が改正され、2014 年度から国で定める統一的な基準に基づいて 5 年に 1 回、近接目視による点検が義務化された²⁾。

近接目視は点検者の経験や知見に依存することが多く、人材・技術者不足により、対象物に近接し、目視点検を行える人材も年々減少しているため、点検業務の人手は将来的に不足することが見込まれている。

上記の課題を鑑み、将来にわたって持続可能な街づくりの実現のために、IoT センサなどの技術を活用し、橋梁等インフラ構造物の維持管理業務の効率化を図っていく必要がある。そこで本稿では、微細な変位を測ることができる光変位センサを橋梁の RC 床版の維持管理に活用できるか検討するために、RC 床版を対象にした疲労載荷試験により、光変位センサの適用性を評価した。

2. 光変位センサの構造

光変位センサは、光リニアエンコーダを応用したものである。図-1 にその外観および内部構造図を示す。図-1 に示す通り、センサ内部に反射部と非反射部の繰り

返しパターンが刻まれた反射鏡と光源 (LED)，受光部があり、光源からの光を反射鏡が反射することでパターンが検出される。反射鏡がパターンの配列方向に移動すると反射状態も変わるために、反射状態を受光部で観測することによって移動量を計測することができる。

今回の試験で用いた反射鏡は反射部 40μm, 非反射部 40μm のパターンが繰り返され、最小 40μm の分解能で移動量を検知できる。さらに光エンコーダは、受光したパターンを電気的に解析することで分解能を上げることが可能である。本研究では 4nm(4×10^{-9} m) の分解能を持った光エンコーダを使用した。また、光変位センサのサンプリング周波数は 200Hz である。

光変位センサは構造物に貼付けることで構造物の 2 点

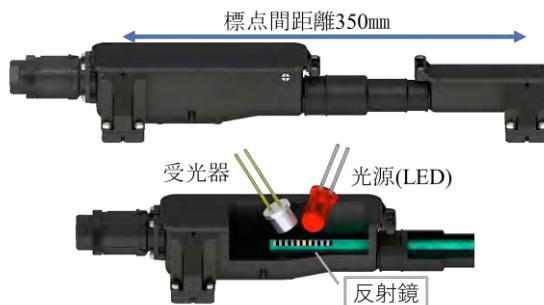


図-1 光変位センサの外観および内部構造

間の表面変位の変化の計測が可能であり、表面変位を計測する場合には、図-2に示す形で構造物に設置し、構造物の表面の2点間の距離を計測する。この2点間の距離の変化を表面変位とする。この表面変位は、光変位センサの標点間距離350mmで除することによって、ひずみとして換算することができる。先行研究として光変位センサによって橋梁の表面変位計測を行うことにより橋梁上を通行する過積載車両を検知する研究があり、総重量30tを超えるような過積載車両の検知可能性を検証した³⁾。光変位センサは通信機能を有しており、RC床版の微細な表面変位を長期間遠隔で取得できる。取得したデータにてRC床版の表面変位が急激に増加するなどの傾向が見られた場合に目視によらず、RC床版の劣化が進んでいるという判断ができる可能性がある。今回の報告では疲労載荷試験のRC床版の表面変位を計測し、表面変位の増加傾向を調査することでRC床版の維持管理への適用性を検討した。

3. RC床版載荷試験概要

3.1 供試体および載荷条件

写真-1に、供試体の外観を示す。実験供試体はA活荷重で設計された5本の主桁とRC床版を有する2径間連続鋼桁橋の約5分の3の大きさのRC床版である。供試体寸法は、長さ1400mm×幅700mm×厚さ120mmであり、RC床版下面の主鉄筋はD10とし、その他の鉄筋はD6とした。配筋図は図-3～図-6に示す。コンクリートの強度試験は材齢119日目に試験を実施し、コンクリートの圧縮強度は41.3N/mm²、曲げ強度は6.0N/mm²であった。



図-2 表面変位を計測する際の光変位センサの設置

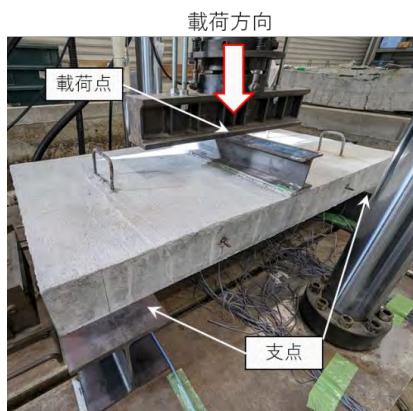


写真-1 疲労試験の供試体外観

図-7に示すようにRC床版を支える支点は端部から200mm幅である。載荷点には100mm角のH鋼を使用し、RC床版上面の中央に載荷を行った。供試体と載荷点に使用しているH鋼の間は、キャッピングを行い、平坦を出したうえで接触させている。

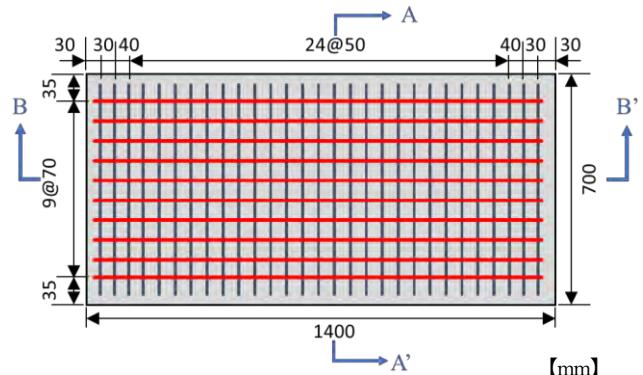


図-3 RC床版供試体の下側配筋図

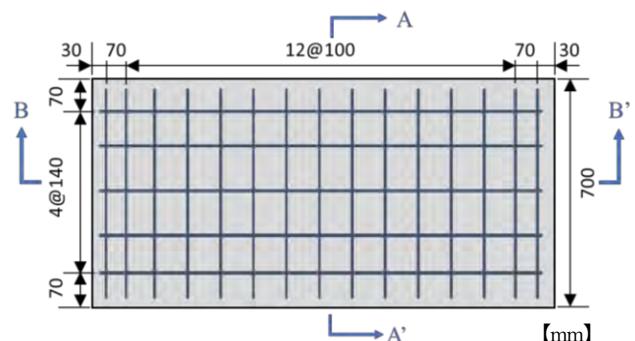


図-4 RC床版供試体の上側配筋図

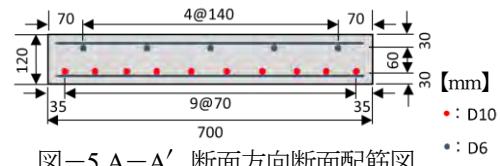


図-5 A-A' 断面方向断面配筋図

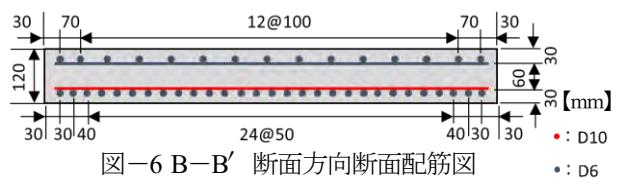


図-6 B-B' 断面方向断面配筋図

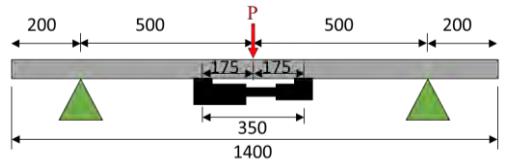


図-7 載荷試験の簡略図

光変位センサは、供試体において最もひずみ値の大きく出るRC床版の支間中央に設置した。設置方法は実橋の床版に設置する際と同じアクリル系の2液混合の接着剤を使用した。接着の際には、センサの接着面をパーティクリーナーで洗浄した後に接着を行った。光変位センサの取付けは静的載荷試験前の無載荷状態の際に行った。コンクリートに貼付けた状態は写真-2に示す。

3.2 RC床版への疲労試験の載荷条件

疲労試験では、供用開始から20年以上経過し軽微な損傷を有する既設RC床版に対して、交通荷重による損傷の進展を光変位センサによって追跡する事を想定する。よって、RC床版に初期の曲げひび割れを与えるために、事前に静的曲げ載荷試験を行った。無載荷状態から載荷荷重を2.5kNずつ増やし、曲げひび割れが確認できるまで載荷を行った。35kN時に目視で曲げひび割れが確認されたため、静的曲げ載荷試験を終了した。図-8に静的曲げ載荷試験時の表面変位（光変位センサの出力）-荷重の結果を示す。除荷時の光変位センサの接着点間の変位量は0.173mm（494 μe 相当）であった。

疲労載荷試験の載荷荷重は10kN～35kNを振幅とした正弦波を荷重制御で与え、載荷周波数は5Hzとし、200万回の繰り返し載荷を与えた。なお、100万回繰り返し毎に供試体を試験機から取り出し、ひび割れ幅の確認を行った。疲労載荷試験の載荷条件を図-9に示す。

4. RC床版の疲労試験結果

図-10に、疲労載荷試験で光変位センサにて取得したデータの一例として、疲労載荷回数150回～175回目のサンプリング周波数200Hzの表面変位波形を示す。表面変位も載荷条件の通り正弦波で変化していることがわかる。光変位センサのサンプリング周波数は200Hzと大きく、全データをグラフに描画するとデータ量が膨大となるため、図-11の概念図に示す通り、以降のグラフでは200ポイント間隔毎に最大値、最小値、中央値を抽出しプロットした。

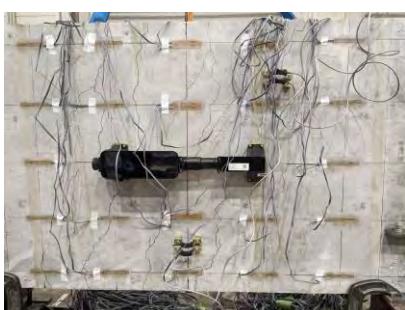


写真-2 RC床版下面への光変位センサの貼付け状況

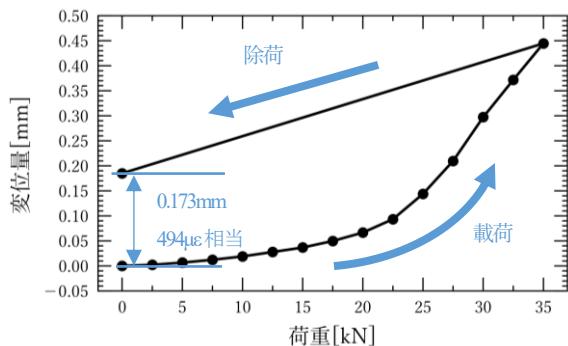


図-8 静的曲げ載荷試験の光変位センサ出力

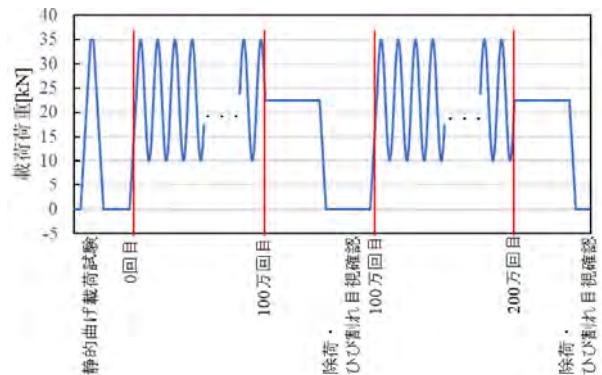


図-9 疲労載荷試験の載荷条件

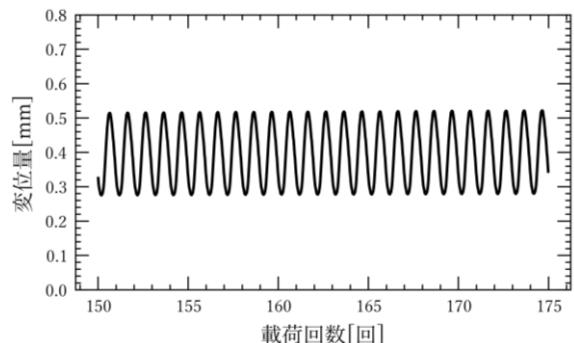


図-10 疲労載荷試験の150回～175回目のサンプリング周波数200Hz波形

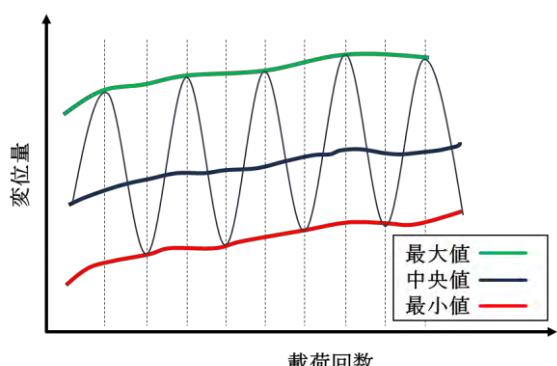


図-11 疲労載荷試験データのリサンプリング概念図

図-12 に、1回～100万回の疲労載荷試験の表面変位を、図-13 に 100万回～200万回の疲労載荷試験の表面変位を示す。疲労試験開始時の無載荷状態と試験後除荷した後の表面変位の差を見ると、1回～100万回の試験では0.255mm (729 μ m相当) の光変位センサ間の変位量の増加

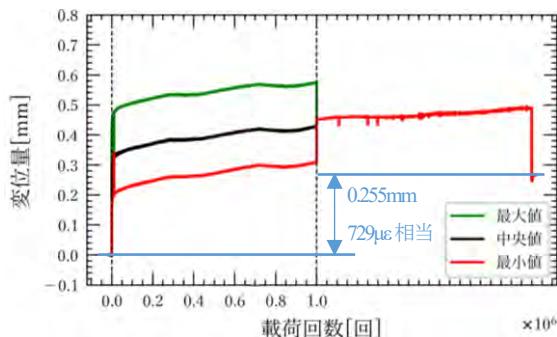


図-12 1回～100万回の疲労載荷試験の表面変位

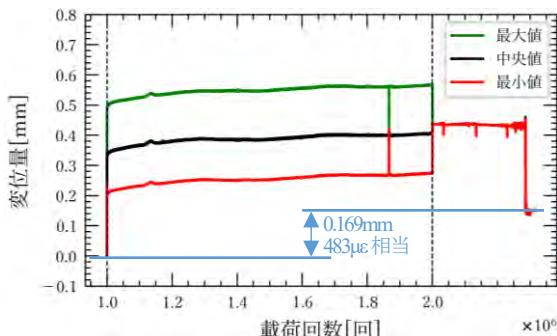
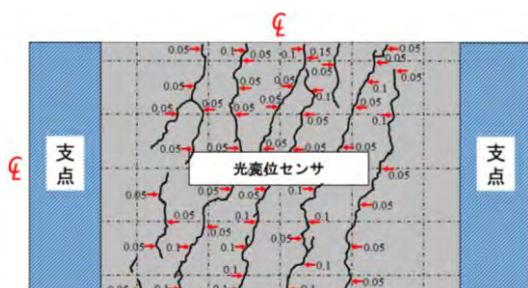
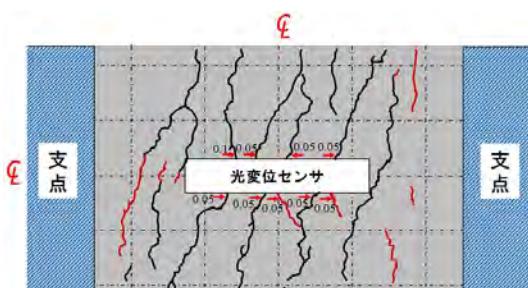


図-13 100万回～200万回の疲労載荷試験の表面変位



(a) 100万回載荷後



(b) 200万回載荷後

図-14 RC床版下面のひび割れスケッチ

が確認でき、静的曲げ載荷試験の際の変位量 0.173mm と合わせて、0.428mm 変位量が増加していることがわかる。100万回～200万回の試験では更に 0.169mm (483 μ m相当) 広がり、光変位センサ間に合計 0.597mm のひび割れが発生していると推測できる。

図-14に疲労載荷試験後のひび割れの観察結果を示す。この観察では、目視にて確認できた 0.05mm 以上のひび割れを記録した。黒線が 100万回載荷後までに発生したひび割れであり、赤線が 200万回載荷後までに発生したひび割れである。

これらの結果より 0.05mm～0.15mm 程度のひび割れが全体に広がっているため、RC床版の維持管理における健全度は II 程度 ²⁾に相当すると思われる。今回は光変位センサによる表面変位の計測によって RC床版の疲労載荷に伴う損傷が進行する際の表面変位の増加を検知することが可能であることが確認された。

5. まとめ

今回の検討から、RC床版の損傷に伴う表面変位の増加を計測できることが明らかになった。ひび割れ幅などの表面変位の追跡ができることから、今後は補修・補強の要否の意思決定に活用できるか検討を進める。

今後の課題として、RC床版の損傷がより進み、健全度がより損傷した状況となるまで疲労載荷試験を行い、より損傷した健全度においても表面変位の追跡ができるかの検討を行う。また、交通荷重を受ける実橋梁においても表面変位の計測ができるかを検討する必要がある。

光変位センサは、構造物に貼付けた 2点間の幅広い範囲の平均ひずみを計測できることから、従来の計測方法とは異なり、ひび割れを含む構造物の表面変位の量量化を実現できる可能性がある。将来的には予防保全への応用を視野に入れ、橋梁を含むインフラメンテナンスモニタリングのデジタル化による維持管理業務の効率化に貢献すべく、本技術の実用性を検証していく。

参考文献

- 1) 国土交通省：老朽化対策の取組み,
<https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozon/torikumi.pdf>
 (accessed 2024.7.5)
- 2) 公益社団法人 土木学会 鋼構造委員会：道路橋床版の維持管理マニュアル 2020, 丸善出版, 令和4年12.
- 3) 恩田康之, 船田尚吾, 小杉明史：光変位センシングを活用した過積載車両検知に向けた検討, 第34回日本道路会議, 論文番号 2005, 2021.11.

(2024年7月12日受付)