

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は, 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

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, 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 $40\mu\text{m}$, 非反射部 $40\mu\text{m}$ のパターンが繰り返され, 最小 $40\mu\text{m}$ 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 $4\text{nm}(4\times 10^{-9}\text{m})$ 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

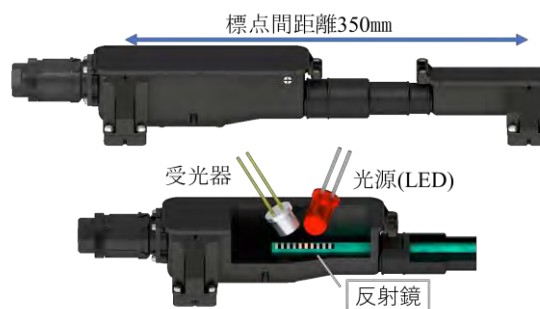


図-1 光変位センサの外観および内部構造

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载荷試験の 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 床版载荷試験概要

3.1 供試体および载荷条件

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 径間連続鉄桁橋の約 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/mm^2 、曲げ強度は 6.0N/mm^2 であった。

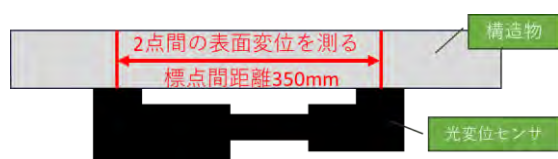


図-2 表面変位を計測する際の光変位センサの設置

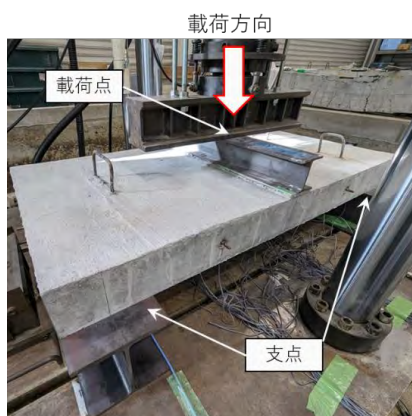


写真-1 疲労試験の供試体外観

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。载荷点には 100mm 角の H 鋼を使用し、RC 床版上面の中央に载荷を行った。供試体と载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。

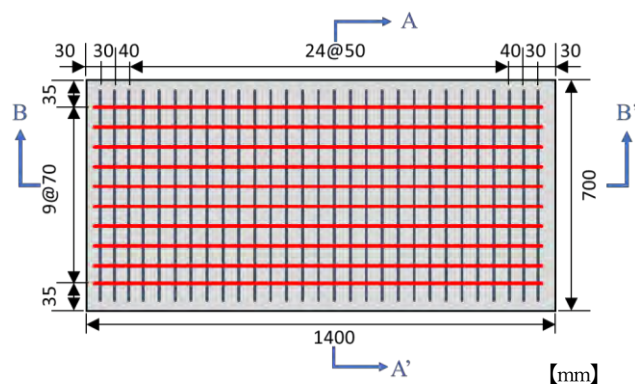


図-3 RC 床版供試体の下側配筋図

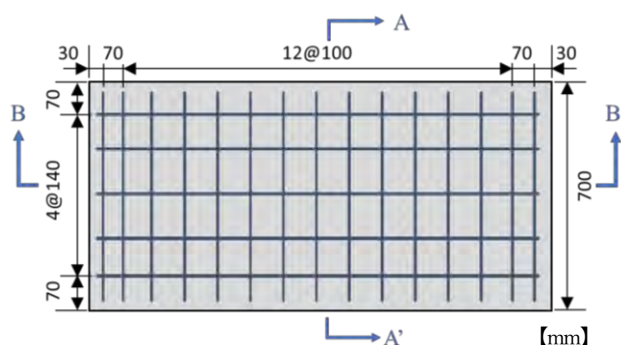


図-4 RC 床版供試体の上側配筋図

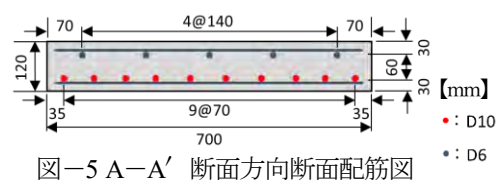


図-5 A-A' 断面方向断面配筋図

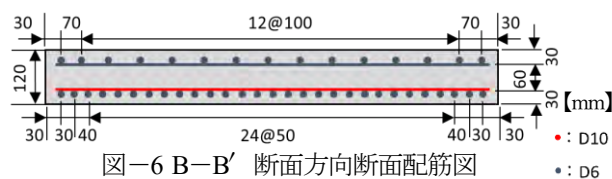


図-6 B-B' 断面方向断面配筋図

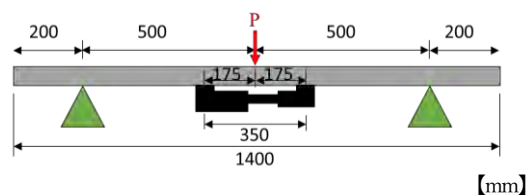


図-7 载荷試験の簡略図

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ツ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）ー荷重の結果を示す。除荷時の光変位センサの接着点間の変位量は 0.173mm（494 μ 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。

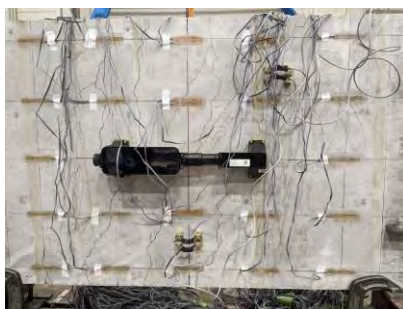


写真-2 RC 床版下面への光変位センサの貼付け状況

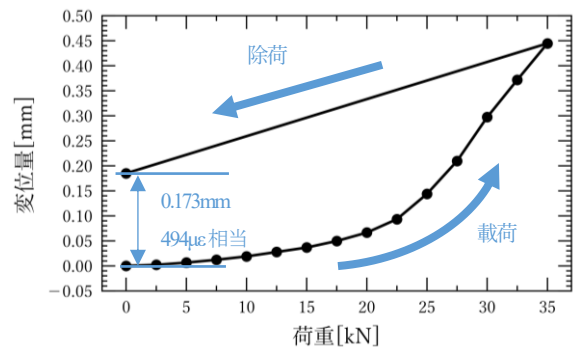


図-8 静的曲げ載荷試験の光変位センサ出力

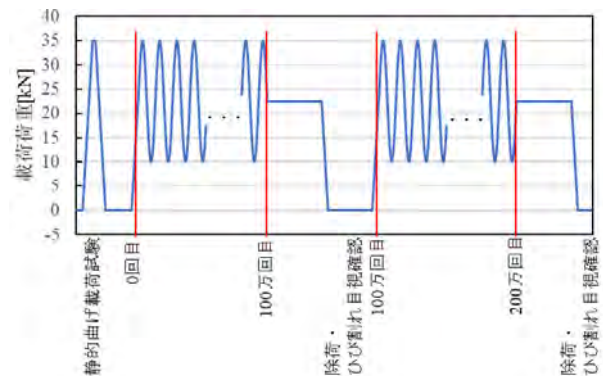


図-9 疲労載荷試験の載荷条件

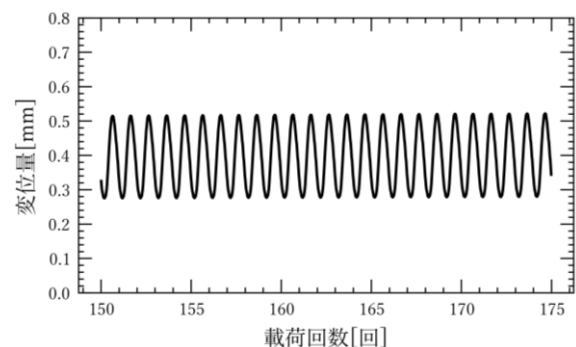


図-10 疲労載荷試験の 150 回～175 回目のサンプリング周波数 200Hz 波形

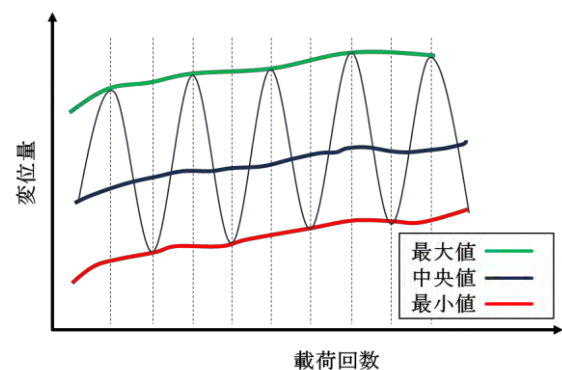


図-11 疲労載荷試験データのリスampling概念図

図-12 に、1 回～100 万回の疲労荷重試験の表面変位を、図-13 に 100 万～200 万回の疲労荷重試験の表面変位を示す。疲労試験開始時の無荷重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 相当) の光変位センサ間の変位量の増加

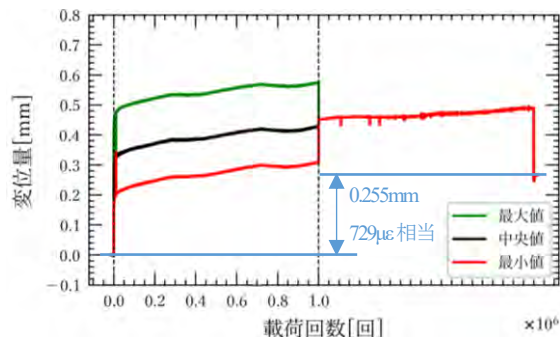


図-12 1 回～100 万回の疲労荷重試験の表面変位

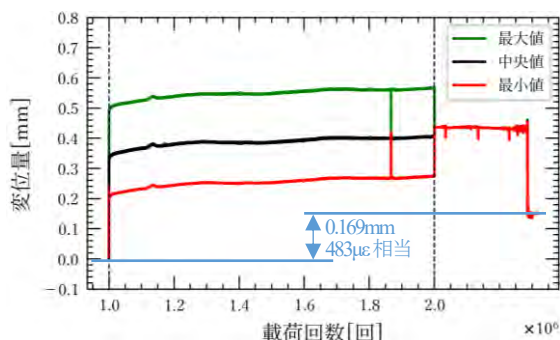
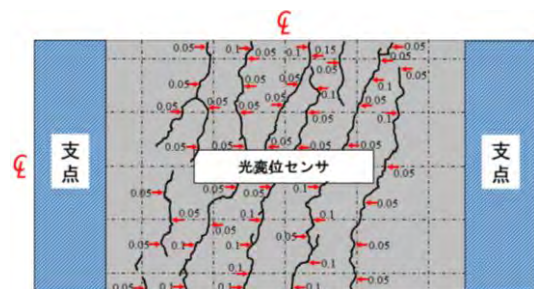
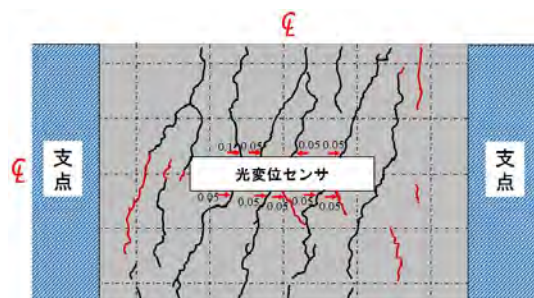


図-13 100 万回～200 万回の疲労荷重試験の表面変位



(a) 100 万回荷重後



(b) 200 万回荷重後

図-14 RC 床版下面のひび割れスケッチ

が確認でき、静的曲げ荷重試験の際の変位量 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 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 に疲労荷重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 万回荷重後までに発生したひび割れであり、赤線が 200 万回荷重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 床版の疲労荷重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荷重試験を行い、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定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/yobohozen/tonikumi.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 回日本道路学会，論文番号 2005，2021.11.

(2024 年 7 月 12 日受付)