講演概要　サンプリングモアレ法による鉄道橋のたわみ測定と精度比較

白崎　広和[1]　栗林　健一[1]　齊藤　岳季[1]
李　志遠[2]　津田　浩[2]　王　慶華[2]　樋口　哲也[2]

[1]正会員　東日本旅客鉄道株式会社 JR東日本研究開発センター フロンティアサービス研究所
（〒331-8513 埼玉県さいたま市北区日進町二丁目479番地）
E-mail:hirokazu-shirasaki@jreast.co.jp

[2]国立研究開発法人産業技術総合研究所（〒305-8568茨城県つくば市梅園1-1-1中央第2）

規則的な模様の位相変化から変形分布を評価するサンプリングモアレ法は，従来のたわみ測定の手法に比べて，デジタルカメラの画像を撮影して位相解析するだけで構造物全体の変形の測定が簡便にできることが特徴であり，測定に費やす労力，コストを大幅に低減でき，測定に必要な用地の制約を受けることが少ないのが利点である．

今回，鉄道橋において，従来の接触式リング式変位計との比較測定に加え，橋軸方向および橋軸直角方向から複数の測点での測定を実施して，実用性についての精度比較検討を行った．その結果を報告する．

Key Words : *Sampling Moiré method, Repeated-pattern marker, Deformation measurement, Structure health monitoring*

1.　はじめに

列車荷重が繰り返し作用する鉄道橋においては，変状が発生して健全性が低下すると，たわみが増大するため，それを計測することが指標のひとつになる[1)]．たわみの測定は鉄道橋桁と地面間にワイヤー等を設置して直接測定する方法が従来から用いられてきたが，測定箇所が多くなるほど，時間と労力が多く費やされるほか，構造物直下に作業スペースが必要となる．また測定に際して道路の通行規制など制約を受けることが多い．

規則的な模様の位相変化から変形分布を評価するサンプリングモアレ法[2)3)]は，従来のたわみ測定の手法に比べて，デジタルカメラの画像を解析するだけで構造物全体の変形の測定が簡便にできることが特徴であり，測定に費やす労力，コストを大幅に低減でき，測定に必要な用地の制約を受けることが無い．今回，鋼鉄道橋において，従来法であるリング式変位計との比較測定に加え，橋軸方向および橋軸直角方向からや複数の測点の測定を実施して，実用性について比較検討を行った．

2.　サンプリングモアレ法について

モアレとは，幾何学的に規則正しく並ぶ線など模様を二枚重ねし，そのうちの一方を少しずらして重ね合わせた時に生ずる縞状の斑紋のことをいう(図-1参照)．一方のわずかな移動，回転もこのモアレ縞を利用することで，大きな位相変化として観察することができる．

構造物の変位測定には，規則正しく配置されている部材の周期的模様や予め設置した格子模様のターゲット（モアレマーカー）を利用する．モアレ縞を発生させるには，もう一つの周期的模様が必要となるが，サンプリングモアレ法ではデジタルカメラのイメージセンサーを利用する．構造物の周期的模様をデジタルカメラで撮影すると規則的に配列されたイメージセンサーに周期的模様の輝度情報が記録される．変形前後に撮影した画像に対してダウンサンプリングと輝度補間の画像処理を施して生成されるモアレ縞の位相分布変化を解析し，構造物の変形分布を算出することが

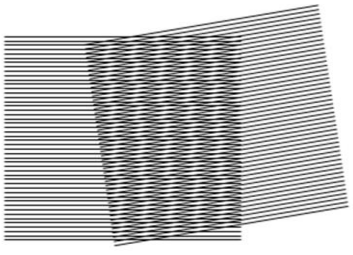

図-1 モアレの例

できる．

この手法を用いることで，周期的模様ピッチの1/1,000の精度で構造物の変形量を測定できる．例えば，周期的模様の間隔が1mであれば1mmの変位量を検出することが可能である．また，この手法は光学的手法であるため，1台のカメラで複数箇所のたわみを測定できることが利点である[4]．

3. 試験内容

(1) 計測場所

測定は，支間21mの上路プレートガーダー形式の鉄道橋にて橋梁のたわみ測定を行った．

(2) 計測方法

a) 接触式変位計

接触式変位計は，リング式変位計を使用して橋桁のたわみ測定を行った(図-2参照)．

橋桁部にピアノ線を引き，繋いでいるリング式のひずみゲージの値を読み取るとこで変位量を得ている．この場合は垂直方向のたわみ量を知ることができる．

b) サンプリングモアレ法による測定装置

測定に先立ち，橋の0点，1/4点，1/2点，3/4点，1点および橋台にそれぞれモアレマーカーを設置した(図-3参照)．

モアレマーカの格子は50mm間隔で，輝度に差が出るように白色と黒色のドットタイプの２次元縞模様としている．これにより，x方向およびy方向の変位量をサンプリングモアレ法より算出できる．材質は，道路標識等で使用されている「再帰性回帰フィルム」を用いることで，日陰でも光源を当てることで確実にデータを収集できるように工夫した．

モアレの計測装置は，市販されるデジタルシネマカメラと大型雲台付三脚で構成される．センサーのサイズは約36×24mmで約1810万画素のカメラを使用し，24fps(毎秒24コマ)で動画撮影したデータを使用した．

また，測定方向は橋軸直角方向からと，橋脚上から橋軸方向の二方向から測定を実施した．橋軸直角方向については，遠景と近景との違いを比較するため各々1台設置した（図-4参照）．

図-2 リング式変位計設置状況

(3) 測定項目

橋桁のたわみは，橋軸方向に等分に４分割した3点にて測定値を比較した．

(4) 対象列車

測定は16本の列車にて行った．計測時の列車速度は時速約85kmであった．本実験では，特急列車と普通列車および貨物列車の3種類の列車を対象にリング式変位計およびサンプリングモアレ法でたわみ測定を行った．

a) 特急列車

E257系 9両編成　(3本)、E351系12両編成　(1本)

b) 普通列車

E233 系 10 両編成 (10 本)

c) 貨物列車

EH200型電気機関車+貨車(2本)

4. 試験結果

(1) 橋軸直角方向から測定した変位量との比較

a) 鉛直方向のたわみ量

接触式変位計とサンプリングモアレ法の鉛直方向の測定結果を比較した結果，特急列車，普通列車，貨物列車とも，どちらの測定結果でも顕著な差は無かった．

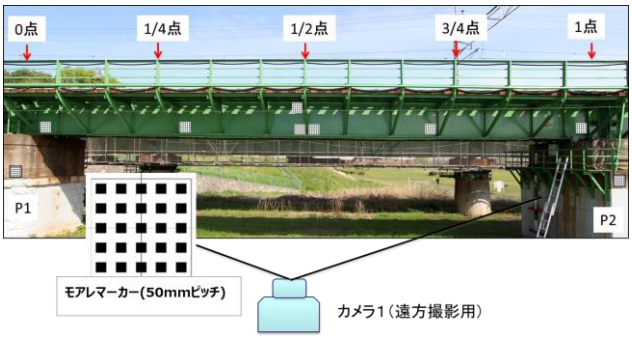

図-3 モアレマーカー設置状況

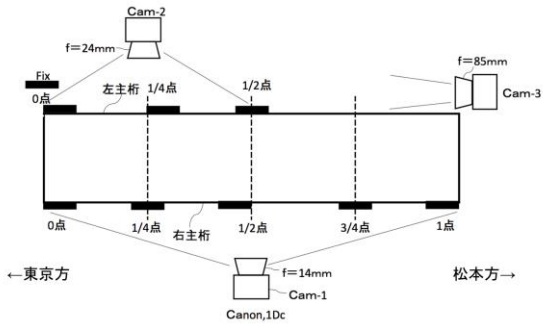

図-4 たわみの計測位置とカメラの配置

その測定値の差は特急列車の場合で0.02～0.38mmであった(図-5,表-1参照).

また，機関車の重量が大きい貨物列車で最大のたわみ量が測定されたが，その差はほとんど無かった.

b)　水平方向の変位量

サンプリングモアレ法による測定では，従来用いられてきた接触式変位計では測定することが困難であった水平方向(X方向)の変位量も容易に測定することができた(図-6，図-7参照).

(2)　橋軸方向からの測定

橋梁下が道路や河川である場合，接触式変位計での測定は困難となる．サンプリングモアレ法では，橋脚上に測定機器を設置して橋軸方向での測定を試験的に実施した．その結果，カメラをしっかり固定できれば橋軸方向からの撮影でもたわみ量を測定できることがわかった(図-8参照).

(3)　相関関係

前述の比較のグラフから，従来から用いられてきた接触式変位計による測定値と，サンプリングモアレ法により測定した測定値には顕著な差は認められないことがわかった．各々の値の相関関係について検討を行った結果，両手法は高い相関関係~~が~~にあることがわかった(図-9参照).

(4)　ターゲットのテストケース

サンプリングモアレ法による測定では，格子模様のモアレマーカーを使用して接触式変位計との比較を行ったが，試験的に鉄道橋表面に存在するリベット(100 mm間隔)を繰り返し模様とみなし，それを用いた変位計測法[5]を適用してたわみ計測を実施した.

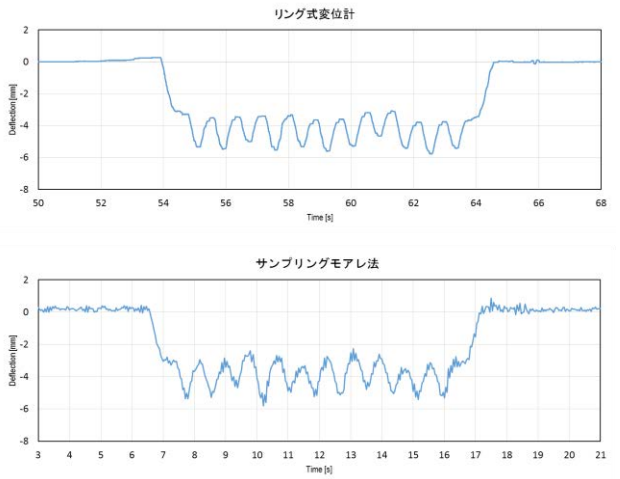

図-5 たわみ測定結果(特急列車 Cam-2)

図-6 水平方向の座標関係

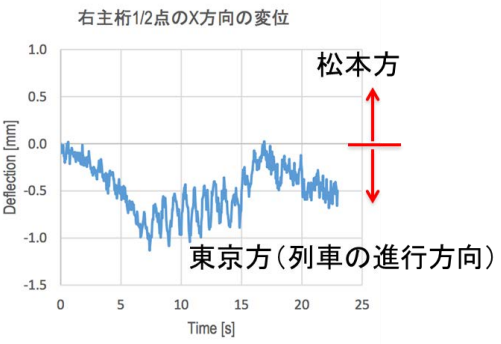

図-7 水平方向の変位量

図-8 サンプリングモアレ法による橋軸方向の測定状況

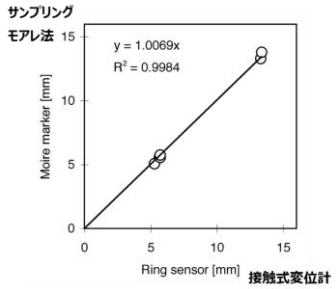

図-9 接触式変位計とサンプリングモアレ法との相関性

表1　各車両での最大たわみ量の比較（単位：mm）

号車	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
リング式変位計	−5.34	−5.48	−5.00	−5.53	−5.33	−5.60	−5.28	−4.66	−5.42	−5.77	−5.42
ｻﾝﾌﾟﾘﾝｸﾞﾓｱﾚ法	−5.36	−5.28	−4.67	−5.80	−4.95	−5.22	−5.13	−4.78	−5.04	−5.42	−5.32
差（モアレー変位計）	−0.02	0.20	0.33	−0.27	0.38	0.38	0.15	−0.12	0.38	0.35	0.10

測定の結果，モアレマーカーに比べてややばらつきが大きいが，リベット模様を用いてもモアレマーカーと同等の最大たわみ値を得ることができた.

(5) 変位の可視化

今回のサンプリングモアレ法による測定結果をベクトルによる図示による可視化することも可能とした（図-10）．本稿では静止画であるが，動画にて可視化することも実現している.

5. まとめ

本研究では従来のリング式変位計と画像計測手法であるサンプリングモアレ法での測定値の比較検討を行った結果，確認できた事項を以下に示す.

・遠方撮影または近景からのモアレ計測結果と，リング式変位計との結果は概ね同じであることを確認できた.

・橋軸方向からの画像撮影でも橋梁のたわみ量を測定できた.

・部材表面のリベット模様を活用すれば，モアレマーカを貼り付けることなく橋梁のたわみを計測できることを確認できた.

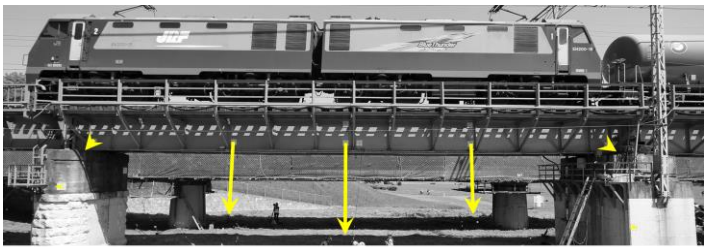

図-10 サンプリングモアレ法による測定結果の可視化

6. おわりに

本鉄道橋以外の構造物にもサンプリングモアレ法による変位測定に応用できることが期待できる.

今後は，適用範囲の拡大やターゲットの要件等をさらに研究を続けていく所存である.

参考文献

1) Y. Fujino, and M. Abe : “Structural Health Monitoring in Civil Infrastructures – Research Activities at the Bridge and Structure Laboratory if the University of Tokyo”, Proc. 1st Int. Conf. on Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructure, pp.39-50 (2003)
2) 李志遠・森本吉春・藤垣元治：サンプリングモアレ法による構造物の非接触変位分布計測, 検査計測, Vol.14, No.5 pp.1-6 (2009)
3) S. Ri, M. Fujigaki, and Y. Morimoto : “Sampling Moiré Method for Accurate Small Deformation Distribution Measurement”, Experimental Mechanics, Vol.50, No.4 pp.501-508 (2010)
4) 李志遠・津田浩：変形分布計測によるインフラ構造物診断技術の開発, 非破壊検査, Vol.63, No.10 pp.515-521 (2014)
5) S. Ri, S. Hayashi, S. Ogihara, and H. Tsuda : “Accurate Full-field Optical Displacement Measurement Technique Using a Digital Camera and Repeated Patterns”, Optics Express, Vol.22, No.8 pp.9693-9706 (2014).

(2017.4.7 受付)

Deflection measurement of railway bridge by Sampling moiré method and precision comparison with conventional sensor

Hirokazu Shirasaki, Kenichi Kuribayashi , Takeki Saitou (East Japan Railway Co.)
Shien Ri, Hiroshi Tsuda, Qinghua Wang, Tetsuya Higuchi (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

Deflection of bridges can be a parameter to secure their structural integrity because the rigidity declines with damage. The deflection of a railway bridge was measured by the sampling Moiré method and the measurement accuracy was compared with a contact-type extensometer conventionally employed. Experimental results obtained from both techniques showed a good agreement and a comparable precision.