

サンプリングモアレ法による非接触変位計測システム

Non-Contact Displacement Measurement System using Sampling Moiré Method

宮 下 和 大 株式会社 IHI 検査計測 研究開発センター研究開発グループ
 倉 内 友 己 株式会社 IHI 検査計測 計測事業部計測技術部
 郡 亜 美 株式会社 IHI 検査計測 計測事業部計測技術部

近年、非接触で変位や振動数計測が可能な一手法として、サンプリングモアレ法が注目されている。本手法は、カメラで格子ターゲットを撮影し、その画像を解析することで変位を計測するものである。本稿では、サンプリングモアレ法の概要と、一般的に用いられている格子ターゲットの代替としてボルト集合部を用いた場合の確認試験の結果を紹介する。それらの結果から、サンプリングモアレ法の変位計測性能を明らかにした。

In recent years, the sampling moiré method has been attracting attention as a non-contact technique for measuring displacement and frequency. In this method, a lattice target is photographed with a camera and by analyzing that image, the displacement can be measured. This paper presents an overview of the sampling moiré method and the results of confirmation tests using spar connecting bolts as an alternative to a lattice target. Through these results, the displacement measurement performance of the sampling moiré method was clarified.

1. 緒 言

近年、高度経済成長期に建設された多くの構造物が設計寿命を迎えており、健全性の評価がますます重要となっている。これら健全性の評価の指標としては、その変位または振動数を計測することが有効である。

従来の変位または振動数の計測手法として、接触式の加速度計や変位計が用いられてきたが、これらは構造物各部への取付けが困難となる場合がある。近年注目されている非接触で変位や振動数を計測する手法として、サンプリングモアレ法がある。本手法は、カメラで格子ターゲットを撮影し、その画像を解析することで変位を計測するものである。特長としては、従来の接触式加速度計や変位計に比べ、計測箇所での計測器の設置が不要であり、配線作業の簡素化などが可能である。通常、サンプリングモアレ法では、格子ターゲットを計測箇所に張り付ける必要がある。しかし、格子ターゲットを張り付けるには、足場を組むなど手間や費用が掛かってしまう。そこで、橋梁の中にある規則性をもつ模様を利用して、ターゲットレスで計測可能な方法の確立が重要となってくる。

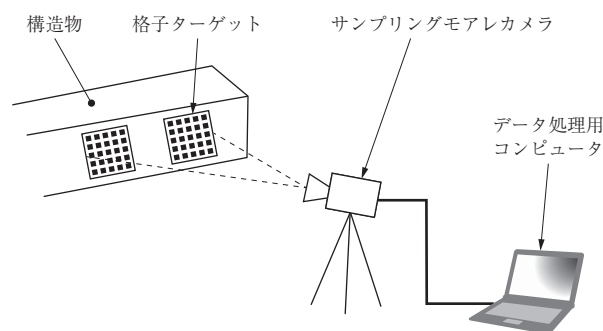
本稿では、このサンプリングモアレ法の概要を紹介し、一般的に用いられている格子ターゲットの代替としてボルト集合部を用いたターゲットレス手法を確立するための性能確認試験結果を報告する。

2. サンプリングモアレ法の概要

サンプリングモアレ法は、計測対象物に既知の格子ピッチのターゲットを張り付け、ターゲットをカメラで撮影することで変位を計測する手法である⁽¹⁾。さらに、複数の格子ターゲットを撮影することで、複数点同時に変位を計測することも可能である。

第1図にサンプリングモアレ法による変位計測システムの構成を示す。本手法では、サンプリングモアレカメラを用いて、構造物に張り付けた格子ターゲットを撮影し、データ処理用コンピュータで撮影した画像を解析することにより、変位または二次元の変位分布を計測する。

本稿の試験はすべて株式会社共和電業製のサンプリングモアレカメラ DSMC-100A を用いた。このサンプリング



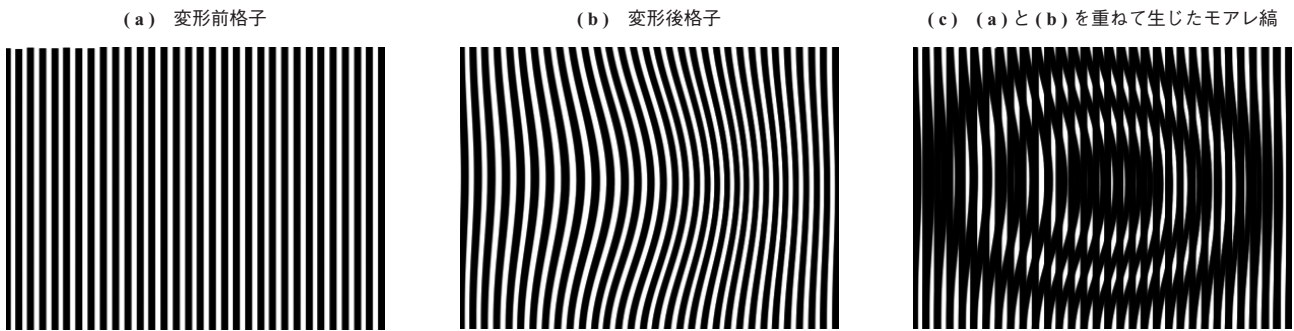
第1図 サンプリングモアレ法による変位計測システム
 Fig. 1 Displacement measurement system using sampling moiré method

モアレカメラは、フレームレートが最大 500 fps (frames per second) と高いため画像の高速撮影が可能であり、動変位の計測にも適用できる。

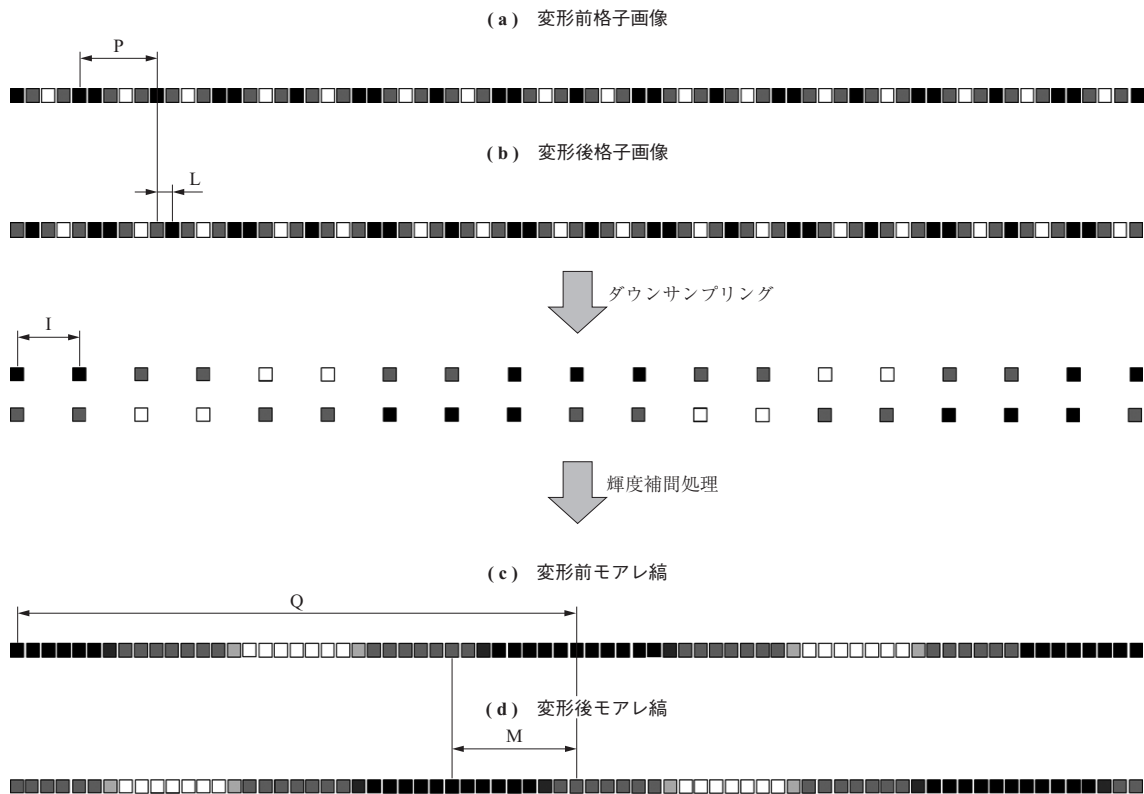
サンプリングモアレ法は、撮影した変形前格子と変形後格子を重ねることで発生するモアレ縞^{じま}を利用して、高精度で変位を計測する手法である。モアレ縞とは規則正しい繰り返し模様^{じま}の周期のずれにより発生する縞模様のことである⁽²⁾。モアレ縞の例を第 2 図に示す。

サンプリングモアレカメラで撮影した格子画像を解析し、変位量に変換する過程を第 3 図に示す。格子ターゲットは一次元の場合を検討する。格子間ピッチは P 、格子ターゲットの移動量を L とする。まず、サンプリング

モアレカメラで撮影した 1 枚の変形前後の格子画像 (第 3 図 - (a) , - (b)) に対して、一定の間引き間隔 I でダウンサンプリングを行う。第 3 図の例では、4 ピクセル置きに間引かれている。次に、間引いた格子画像間に輝度補間処理を行い、グラデーションをかけてモアレ縞 (第 3 図 - (c) , - (d)) を発生させる。このとき、モアレ縞間ピッチは Q 、格子ターゲットからモアレ縞に変換された移動量は M で表される。格子画像の微細な移動量 L をモアレ縞に変換することで、大きな移動量 M に変換されることが分かる。最後に、取得したモアレ縞の濃淡を波に見立て、モアレ縞を位相解析することで変位量を求めることができる⁽³⁾。



第 2 図 モアレ縞の発生例
Fig. 2 Example of moiré fringes



第 3 図 サンプリングモアレ法による画像解析過程
Fig. 3 Image analysis process using the sampling moiré method

以上のように、格子模様の微細な変形をモアレ縞で表現することで、より大きな位相差として捉えることができ、より高い精度で変位量を検出することができる。サンプリングモアレ法では、格子ターゲットのピッチの 1/100 ~ 1/1 000 程度の精度で変位を計測することが可能である⁽⁴⁾。

変位の算出には、撮影した画像をピクセルごとに演算を行い、格子に相当する部分の平均値を格子ターゲットの変位量として出力している。そのため、画像撮影の際に生じるショットノイズなどの影響を少なくし、良好な繰り返し精度が得られる。

3. サンプリングモアレ法の確認試験

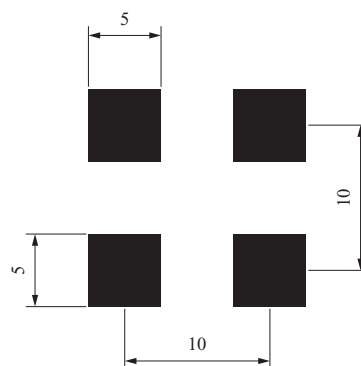
サンプリングモアレ法を用いた計測結果の一例を紹介する。実計測における主な誤差要因は、計測対象と計測器間の温度差による空間の揺らぎやカメラを据え付けた床面の振動などの外乱が挙げられる。ここではサンプリングモアレ法で格子ターゲットを用いて、変位計測と振動計測を行った。

3.1 カメラと対象物の距離と精度の関係

カメラと計測対象物との距離の精度に対する影響を調査するために、カメラと計測対象の距離を 5, 10, 30, 60, 100 m と変化させて計測した。また、環境の違いによる影響を調べるために昼間と夜間で計測した。試験方法としては、格子ターゲットを取り付けた 1 軸ステージを用い、横方向に 1 mm の変位を与えた。サンプリング周波数は 15 Hz とし、計測値は 3 秒間の平均値とした。計測に用いた 10 mm ピッチの格子ターゲットを第 4 図に、格子ターゲットの模式図を第 5 図に示す。また、昼間と夜間のそれぞれの計測時の状況を第 6 図に示す。



第 4 図 計測用格子ターゲット (10 mm ピッチ)
Fig. 4 Lattice target for measurement (10 mm pitch)



第 5 図 格子ターゲットの模式図 (単位: mm)
Fig. 5 Schematic diagram of lattice target (unit: mm)

夜間は周囲が暗く、サンプリングモアレカメラで格子模様を識別できないため、計測位置から白色ホロライトを用いて格子ターゲットに照射した。昼間と夜間の各計測距離による計測値の結果を第 7 図に示す。

第 7 図より、すべての計測結果において、格子ターゲットのピッチの 1/100 に当たる 0.1 mm 以下の計測精

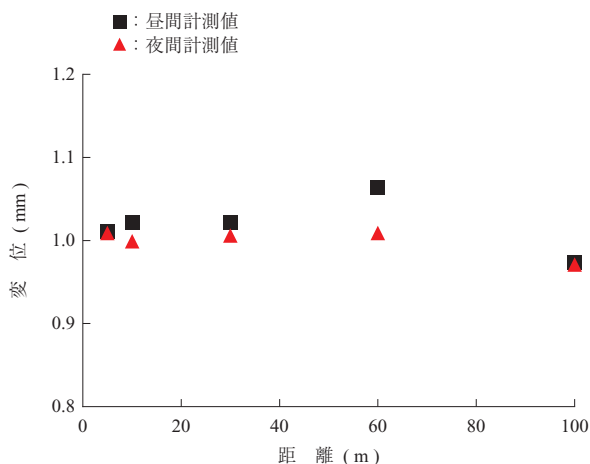
(a) 昼間の計測状況 (10 m)



(b) 夜間の計測状況 (10 m)



第 6 図 計測時の状況
Fig. 6 Measurement situation



第 7 図 各計測距離における変位量
Fig. 7 Displacement amount at each measurement distance

度が得られていることが分かる。また、それぞれの距離で静止状態（変位 0 mm）における計測データのふらつきを確認するため、サンプリング周波数 15 Hz で 10 秒間計測したときの標準偏差を求めた。その結果を第 1 表に示す。

第 1 表より、昼間と夜間ともに格子ターゲットとの距離が長くなるに従い標準偏差が大きくなる傾向が確認できる。昼間と夜間の違いについては、10 m 以下の計測条件では双方に大きな違いが見られなかったものの、30 m 以

第 1 表 各計測条件における標準偏差
Table 1 Standard deviation under each measurement condition

計測距離 (m)	昼間計測時の標準偏差 (mm)	夜間計測時の標準偏差 (mm)
5	0.004	0.007
10	0.010	0.009
30	0.055	0.029
60	0.146	0.108
100	0.228	0.142

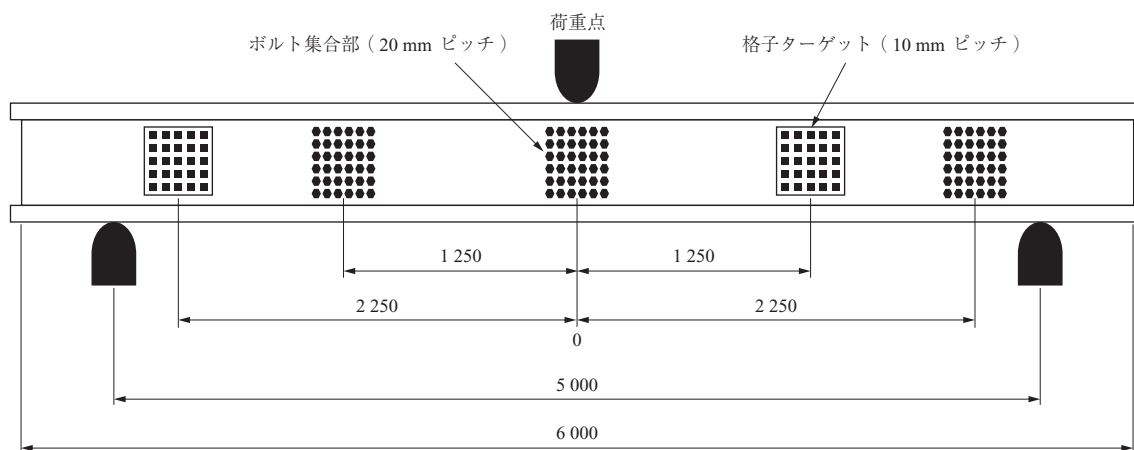
上の計測条件では昼間の方がより標準偏差が大きくなる結果が得られた。この要因としては、昼間は地面が温められ空気の揺らぎが生じやすく、撮影した像が揺らぐためと考えられる。また、格子ターゲットまでの距離が長くなるにつれて空気の揺らぎの影響を大きく受けるため、長距離ほど標準偏差が大きくなったと予測される。

以上の結果から、長距離ほど環境起因の標準偏差が大きくなり、30 m までの距離では標準偏差は格子ピッチの 1/100 (0.1 mm) 以内であるが、60 m 以上の距離では格子ターゲットのピッチの 1/100 を超える標準偏差が生じ得ることを確認した。

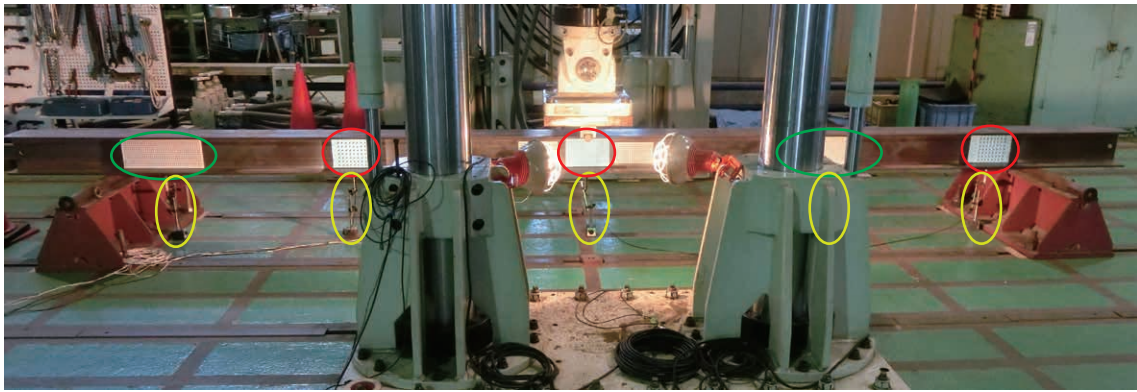
3.2 橋梁の接合ボルトをターゲットとした場合の計測結果

試験方法は、橋梁の桁を模擬したボルト集合部を取り付けた H 鋼の 3 点曲げをした。H 鋼の模式図を第 8 図に示す。H 鋼の全長は 6 m、支点間距離を 5 m とした。ボルト集合部は、荷重点および荷重点から左に 1 250 mm、右に 2 250 mm の所に 3 か所取り付け、また、ボルト集合部の計測結果の比較として、10 mm ピッチの格子ターゲットを荷重点から右に 1 250 mm、左に 2 250 mm の所に 2 か所取り付け、H 鋼の 3 点曲げ試験状況を第 9 図に示す。ボルト集合部と格子ターゲット下に接触式変位計を取り付け、サンプリングモアレ法と接触式変位計の計測結果を比較した。接触式変位計としては、共和電業社製の高精度な変位センサ DTK-A を用いた。この変位センサの定格容量は 30 mm、非直線性は $\pm 0.3\%$ RO (Rated Output) である。

ボルト集合部の拡大図を第 10 図に示す。本試験で、ターゲットとした六角ボルトは径 10 mm、ボルト間の

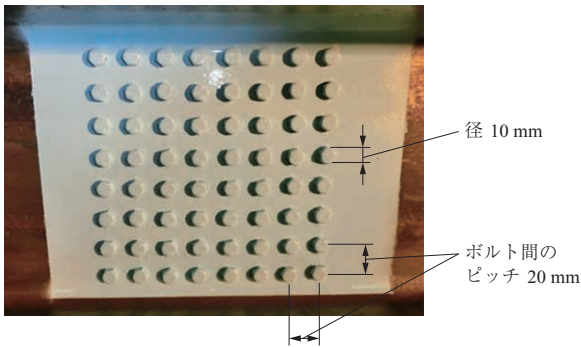


第 8 図 H 鋼の模式図 (単位: mm)
Fig. 8 Schematic diagram of H beam (unit: mm)



(注) ○ : ボルト集合部
○ : 格子ターゲット
○ : 変位計

第 9 図 3 点曲げ試験状況
 Fig. 9 Situation of three-point bending test



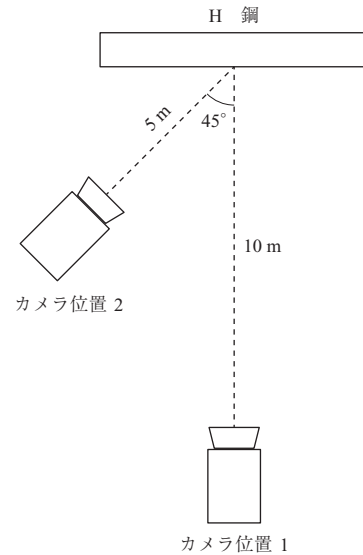
第 10 図 六角ボルト集合部 (8×8 個)
 Fig. 10 Hexagon bolt assembly (8×8 pieces)

ピッチは 20 mm とした。六角ボルトの個数は 8×8 個とした。サンプリングモアレカメラの位置を第 11 図に示す。本試験では、H 鋼の正面から 10 m 距離のカメラ位置 1 から計測した。カメラ位置 2 の計測結果は、3.3 節にて説明する。

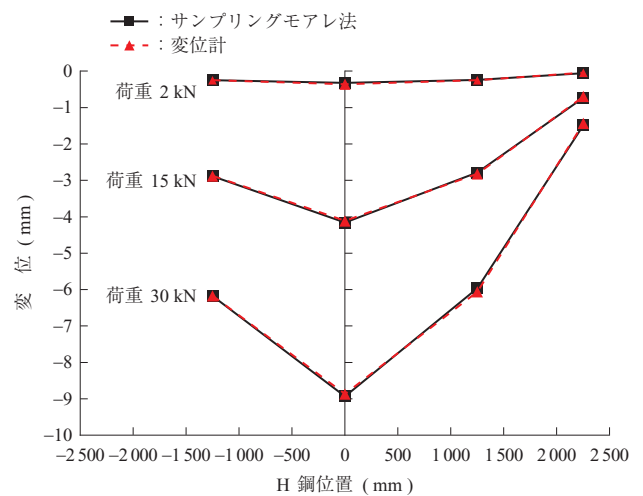
H 鋼中央に 2, 15, 30 kN の静的荷重を載荷した試験結果を第 12 図に示す。図の横軸は H 鋼の位置を表し、縦軸は H 鋼の変位量を表している。

第 12 図から、載荷荷重のいずれに対しても、ボルト集合部のサンプリングモアレ法による計測結果と接触式変位計の計測値はよく一致した。また、両者の変位の差がボルト間ピッチの 1/100 である 0.2 mm 以内に収まっていることが確認された。ボルト集合部と格子ターゲットの計測値は同程度の値を示すことが確認された。以上の結果から、ボルト集合部を格子ターゲットの代わりとして用いて、静的な変位の計測が可能であることが明らかとなった。

次に、載荷荷重を 8 kN とし、加振周波数を 3 Hz で H 鋼を振動させる動的荷重試験を行った。H 鋼の荷重点



第 11 図 サンプリングモアレカメラの位置
 Fig. 11 Position of sampling moiré camera



第 12 図 静的荷重試験結果 (正面方向)
 Fig. 12 Static load test results (front direction)

の所にあるボルト集合部を計測対象とし、試験結果を第13図に示す。

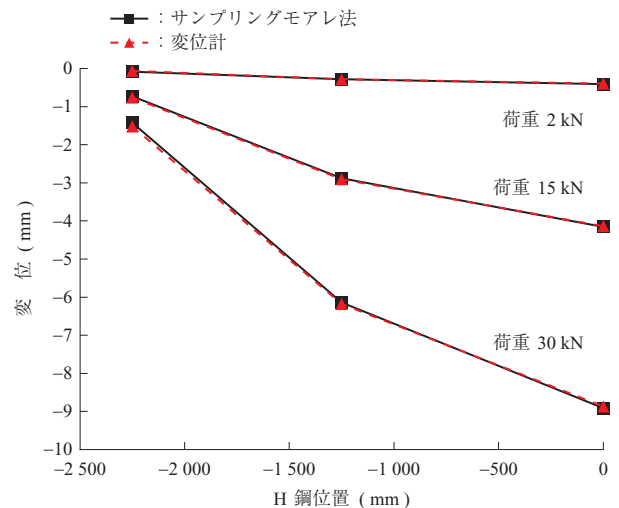
第13図から、ボルトをターゲットとしたサンプリングモアレ法と接触式変位計による変位量や周波数がよく一致していることが確認された。また、第13図の結果を高速フーリエ変換 (FFT) 解析すると、両者の周波数は 3.0 Hz であり、加振周波数の 3 Hz と一致した。これらのことから、ボルト集合部をターゲットとして用いても、静的または動的変位の計測が可能であることから、ボルト集合部は格子ターゲットを代替できることを確認した。

3.3 格子ターゲットに対する角度の影響

通常、計測対象物の正面からターゲットを狙えるような好条件は少なく、計測対象物のターゲットの正面の方向から角度を変えて計測することになる。そこで、本節では角度の異なる条件で変位を計測し、計測精度に与える影響について検証した。

試験方法としては、第11図のように、H鋼の斜め 45° 方向、5 m 距離 (カメラ位置 2) から、変位を計測した。荷重点および荷重点から左に 1 250 mm の所にあるボルト集合部、荷重点から左に 2 250 mm の所にある格子ターゲットを計測対象とした。H鋼中央に 2, 15, 30 kN の静的荷重を載荷した試験結果を第14図に示す。

ボルト集合部と格子ターゲットは、ともに格子ピッチの 1/100 以内の変位計測精度が得られた。これより、計測時に格子ターゲットと撮影カメラの角度は必ずしも垂直である必要はなく、計測対象の正面方向から角度を変えた条件でも変位計測への適用が可能であると考えられる。

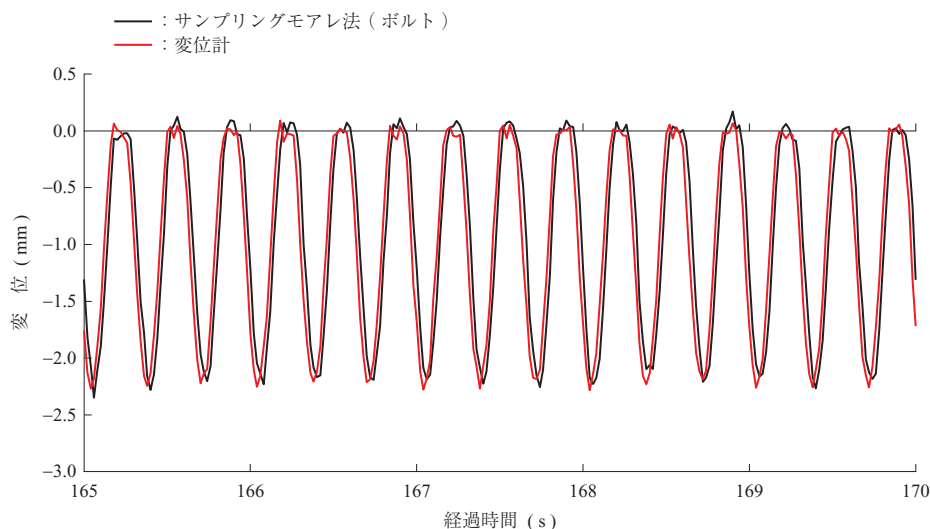


第14図 静的荷重試験結果 (45° 方向)
Fig. 14 Static load test results (45° direction)

4. 結 言

サンプリングモアレ法は、非接触で変位や振動数計測が可能で有用な手法である。今回のサンプリングモアレ法の確認試験の結果から、以下のことが明らかになった。

- (1) サンプリングモアレカメラと格子ターゲットの距離が 30 m 以下で、格子ターゲットピッチの 1/100 の変位計測精度を得られることが確認された。
- (2) ボルト集合部は、格子ターゲットの代替が可能であることが確認された。
- (3) 斜め方向からサンプリングモアレ計測しても、正面方向と同等の精度が得られることが確認された。



第13図 動的荷重試験結果 (H鋼中央部)
Fig. 13 Dynamic load test results (center of H beam)

— 謝 辞 —

カメラと対象物の距離における試験の実施に当たっては、福井大学学術研究院工学系部門知能システム工学講座藤垣元治教授から多くのご協力をいただきました。ここに記し、深く感謝いたします。

参 考 文 献

(1) S. Ri, M. Fujigaki and Y. Morimoto : Sampling Moiré Method for Accurate Small Deformation Distribution Measurement, *Experimental Mechanics*, Vol. 50, No. 4, (2010. 4), pp. 501 - 508

- (2) 森本吉春, 藤垣元治, 梶谷明大 : サンプルングモアレ法による変位・ひずみ分布計測, *真空*, Vol. 54, No. 1, 2011年1月, pp. 32 - 38
- (3) 李 志遠, 王 慶華, 有川秀一, 米山 聡 : 面内変位分布計測におけるデジタル画像相関法とサンプルングモアレ法の比較研究, *実験力学*, Vol. 15, No. 4, 2015年12月, pp. 303 - 308
- (4) 藤垣元治, 原 卓也, 生駒 昇, 村田頼信 : 列車通過時における鉄道橋の動的な変位計測へのサンプルングモアレカメラの適用, *実験力学*, Vol. 12, No. 3, 2012年9月, pp. 179 - 184