

サンプリングモアレ法による トンネル掘削中の坑内変位の監視

谷 卓也¹・前田 芳巳²・津田 仁³・林 正浩⁴

¹正会員 大成建設株式会社 技術センター土木技術研究所 (〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬344-1)
E-mail:takuya.tani@sakura.taisei.co.jp

²正会員 株式会社共和電業 技術本部 (〒182-8520 東京都調布市調布ヶ丘3-5-1)
E-mail:y-maeda@kyowa-ei.co.jp

³正会員 株式会社共和電業 技術本部 (〒182-8520 東京都調布市調布ヶ丘3-5-1)
E-mail:tsuda-h@kyowa-ei.co.jp

⁴正会員 大成建設株式会社 九州支店 (〒810-8511 福岡県福岡市中央区大手門1-1-7)
E-mail:h-masa@ce.taisei.co.jp

施工中の山岳トンネルにおいては、日常管理計測の一つとして坑内変位計測が実施される。掘削中の地山挙動を連続的に捉えたい場合や、施工管理上の理由で計測頻度を上げたい場合、容易に連続計測を実施するには、自動追尾型の光波測距儀を用いる等の対応が必要となる。著者らは、近年、様々な産業分野で採用され、低廉化してきたサンプリングモアレ法による画像計測を、連続した坑内変位計測に適用することを試みた。この手法を用いると、1mm以下の微小な変位を高速（例えば60fps）に捉えることができる。今回、下半盤下げ掘削時のトンネル天端部における試験計測では、従来手法では難しかった詳細な変位挙動を1秒単位で把握できたことから、その計測結果を示すと共にサンプリングモアレ法による坑内計測適用への課題、および今後の展望について述べる。

Key Words : *sampling moiré method, displacement monitoring, automatic measurment, mountain tunnel*

1. はじめに

施工中の山岳トンネルでは、地山挙動の監視による施工管理を主な目的として、トンネル内の計測に適した光波測距儀（以下、「トータルステーション」と呼称）を用いた坑内変位計測が実施される。この計測は日常管理計測の一つとして行われ、掘削に伴って計測断面内に生じる天端部の沈下や側壁部の変位を、計測断面の位置と切羽の離れや変位速度に応じて所定の頻度で捉える。多くの場合、計測断面は10～20m間隔で設定され、1つの断面あたり3～5箇所に設けられたターゲットの変位を、1日あたり1～2回の頻度で計測される。

施工管理上の必要性等から、この地山挙動を高頻度に把握したい場合、トータルステーションを計測断面近くに都度持ち込んで計測を実施するか、坑内に自動追尾型のトータルステーションを存置して、一定の時間間隔でデータ取得を行うことになる。しかしながら、自動計測を行うには、一つの切羽に対し高価な専用機器を一つ供

する必要がある上、掘削の進行に伴う機器の盛替え、養生やメンテナンス等も容易ではない。

そこで筆者らは、近年様々な産業分野で採用されるようになってきたサンプリングモアレ法による画像計測を、トンネルの坑内変位計測に適用するための検討を進めてきた。図-1に示す専用カメラと格子状の紋様を有するターゲットによる画像計測は計測範囲が広く（トンネル坑内においては、80mまでの適用性を確認）、かつ精度も



図-1 ズームレンズを取り付けたサンプリングモアレカメラ

高い（0.1mm以上が期待できる）ため、地山の挙動を連続的かつトータルステーションよりも高い精度で捉えることができ、掘削による地山の挙動をより詳細に把握できると考えた。

今回、トンネル施工の現場で実施したサンプリングモアレ法による試験計測では、1秒間隔で下半掘削時の天端の挙動を捉える事ができた他、その変形挙動は、同一箇所で行ったトータルステーションによる計測結果とも整合的であり、施工状況のモニタリングや高頻度の自動計測にも適用できることが確認できた。

本稿では、サンプリングモアレ法の利点や特徴を計測結果とともに示し、トンネル坑内計測への適用性と残された課題と今後の展望について述べる。

2. サンプリングモアレ法

(1) 基本原理²⁾

規則正しく並んだ直線群のパターンを2つ重ねたとき、元の格子とは異なる干渉縞（モアレ）が生じる。モアレの場合、単位長さ当たりの直線の距離間隔である周波数（空間周波数）の差がモアレの空間周波数になることから、格子同士の相対変位をモアレの移動量として拡大することができる。この性質を利用して、古くは精密さを要する機械の位置決めや、近年では覆工コンクリートのひび割れ幅の変化量の計測に適用されている¹⁾。

サンプリングモアレ法は、変位測定を行う対象物に貼付または印された格子状のターゲットをデジデジタルカメラで走査（サンプリング）することでモアレ縞を発生させ、基準となる画像と変位後の画像のモアレ縞を解析することで、変位量を評価、計測する方法である。図-2にサンプリングモアレ法によりモアレ縞が発生する状況を模式的に示す。この図では、カメラに記録される水平方向の画像を3列のみ示す。

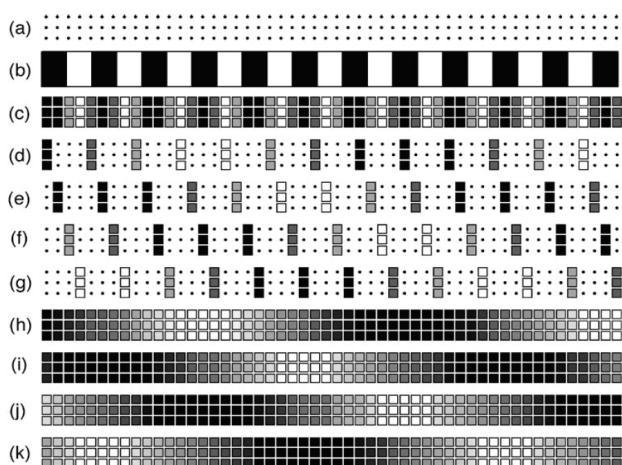


図-2 サンプリングモアレ法の原理²⁾

デジタルカメラに採用されている画像素子は多くの画素の集合体で図-2(a)のように配置されている。カメラで図-2(b)に示す格子を撮影すると、対象物の明さを図-2(c)の様に捉える。この画像を等間隔に起点を変えながら間引き（サンプリング）すると、図-2(d)～(g)のようなモアレ縞が得られ、さらにデータの抜けた部分を線形的に補間すると図-2(h)～(k)の様により明瞭なモアレ縞が得られる。これらをカメラ内の演算装置で処理、解析することにより、変形に関する情報が得られるようになっている。モアレ縞の位相解析方法および変位量の評価方法の詳細については、Ri³⁾の文献を参照されたい。

(2) 特徴と精度

デジタルカメラを用いた計測については、一般に撮影画像に写された2点間の距離を、その間の画素の個数を元にして計測するという原理のことが多い。そのため、最小分解能は、撮影画像の画角と画素数の制約を受ける。

サンプリングモアレ法による計測は、測定対象物に貼付された格子パターンのモアレ画像を用いることで、変位が拡大されて計測できるため、分解能は画素数の影響を受けるものの、前述の方法と比較して同じ画素数のカメラで撮影した場合、より微小な変位が計測可能である。

試験計測で用いたサンプリングモアレカメラ（以降、「SMC」と表記）は、格子間隔の1000分の1の分解能を有するものであり、一つの格子に対して10個の画素が含まれていれば所定の精度が確保できるとされている。ここに、5mmの格子間隔のターゲットを用いた計測を行うと、5 μ mの分解能を有することになる。なお、一つのカメラの画素数は固定されているため、主に撮影範囲に応じて計測精度が規定されることになる。

(3) 計測ターゲット

図-3に計測に使用した2次元の格子ターゲットを示す。計測は2次元平面上の変位を測定するため、鉛直方向と水平方向の2つの直線群を重ねた、格子状の紋様が印刷されたシートを使用する。それぞれ、要求する計測精度

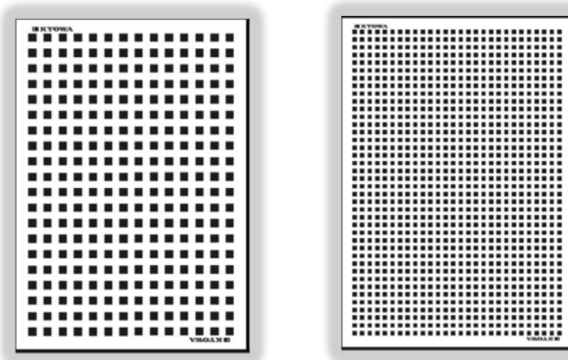


図-3 計測用ターゲット

表-1 使用した SMC および表示プログラムの仕様

計測精度※1	XY 変位：0.05mm, θ 変位：0.021°
測定周期	1～200 (fps)
計測時間※2	最大 60 秒
電源	AC 100V (AC アダプタにて DC12V)
画素数	2048×2048, ピクセルサイズ 5.5×5.5(μm)
レンズマウント	F マウント
サイズ・重量	カメラ本体 Φ105mm×120mm, 1.3kg
コントロール ソフトウェア 動作環境	OS：Windows7 Professional 64bit メモリ：8GB SSD：256GB

※1：静止対象物計測時の標準偏差 [5mmピッチの2次元格子を距離20m]，気候条件等により変化

※2：トンネル計測用に長時間計測対応にカスタマイズ

や計測範囲に応じた格子間隔のターゲットを使用する。また、望遠レンズ等のF値の大きい暗いレンズを使用せざるを得ない場合、ターゲットに照明をあてて、モアレ画像を得るために十分な照度を確保する必要がある。

3. サンプルングモアレ法による坑内変位計測

(1) 機器および配置

表-1に示す仕様のSMC（ひかり社製）およびコントロールソフトウェア（共和電業製）を用いて計测试験を実施した。表示システムのプログラムは、標準仕様においては、撮影した写真を一つ前の写真と比較して、変位量の増分を評価するようになっているが、今回の試験では、カメラに障害物が映り込んで比較対象となる画像に異常があった場合でもエラーにより計測が中断しないよう、参照先画像を計測開始時の画像にするなどの改良を施した。

機器の配置は、図-4に示す坑内計測断面の天端部の図-5の位置に、反射材が塗布されたシートに格子状模様が印刷されたターゲット（図-3参照）を20cm四方に加工して2点設置した（1点は予備）。SMCとターゲット間の水平位置での距離は35mであった。

SMCの設置状況写真を図-6に、設置したターゲットの状況を図-7に示す。図-6には、導坑部のトンネルの鋼製支保工に、溝形鋼を加工した架台上に取り付けられた SMCとLED照明を見ることができる。また、図-7には、拡幅部の天端に設置された、SMC計測用の格子状ターゲットと、その左側にトータルステーションによる坑内変位計測用のターゲットが小さな光の点として見える。

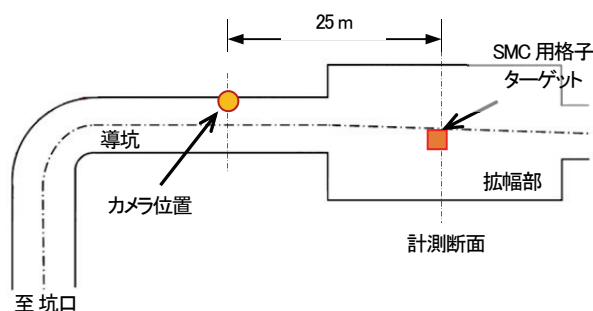


図-4 機器の配置（平面図）

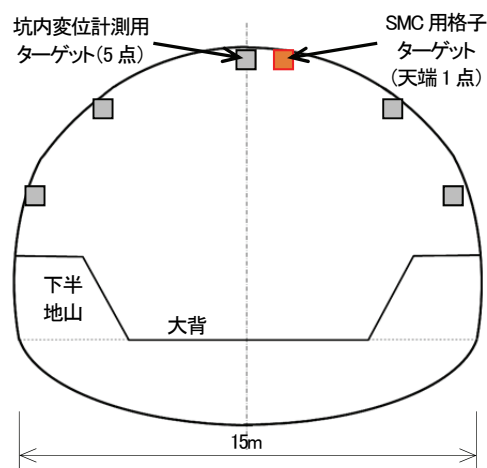


図-5 SMC用ターゲット位置（横断面図）



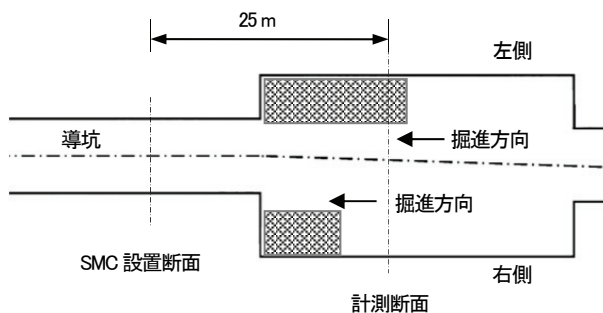
図-6 SMC 設置状況



図-7 天端に設置したターゲット

(2) 計測時の作業状況

計測は、図-8に示す拡幅区間の下半左側の約5mの掘削開始直前から実施した。ハッチの部分が無掘削部で、今回計測期間中に掘削の対象となった箇所である。左下半5m掘削後の下半支保工建て込みと吹付け、ズリ出し作業、右下半の掘削3mと吹付けの合わせて19時間の計測時間であった。



(3) 計測結果

SMCの1秒サンプリングによる計測結果を、施工内容と合わせて図-9に示す。また、SMCによる計測結果の移

図-8 計測中の掘削位置（平面図）

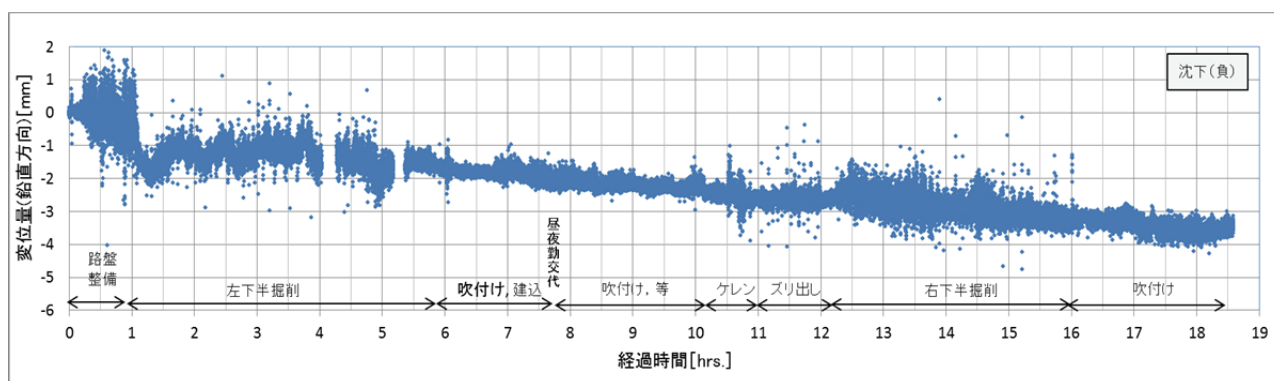
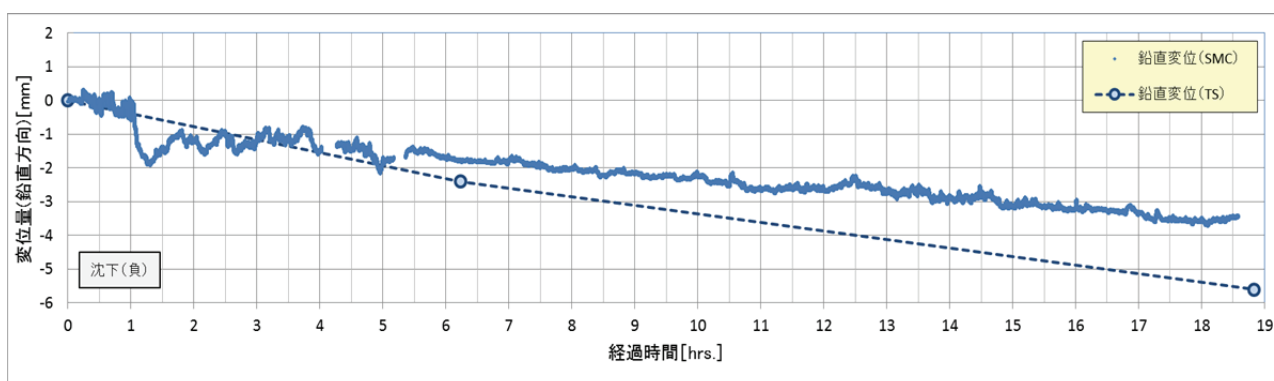
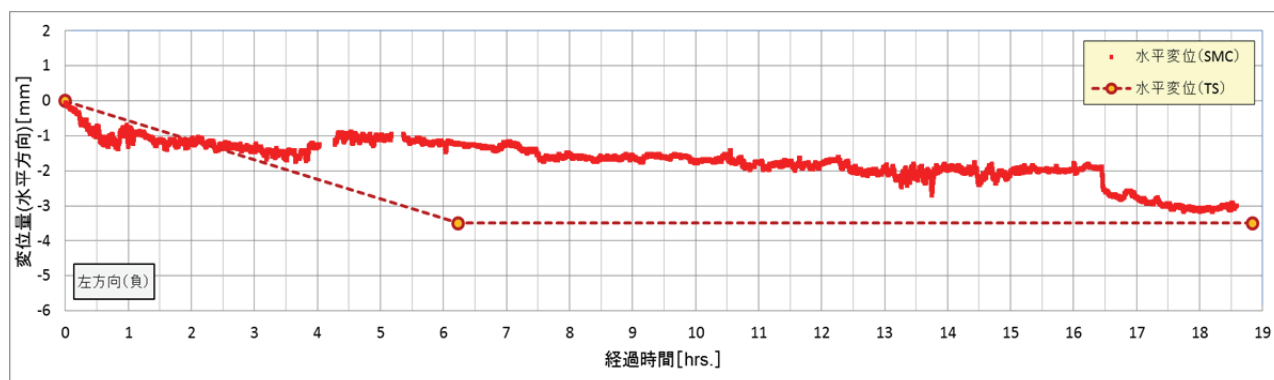


図-9 SMCによる天端沈下計測結果（経時変化図、1秒サンプリング）



(a) 天端沈下



(b) 水平変位

図-10 SMC とトータルステーションによる計測結果（経時変化図、SMC 結果は 60 秒間データによる移動平均）

動平均値（60秒分）を、天端沈下と水平変位についてそれぞれ図-10(a)、図-10 (b)に示す。なお、各図にはSMCによる計測期間の前後と計測中に実施したトータルステーションを用いた坑内変位計測による天端のターゲットの増分変位が示されている。

a) 変位の傾向

変位量は、天端沈下量は3.5mm、水平方向の変位量（左方向に）は3.1mmであった。トータルステーションによる対応する計測値は天端沈下で5.6mm、水平変位で3.5mmと、天端沈下量はやや小さく計測されたものの値の大小および変位の向き共にほぼ整合的な結果であった。

また、沈下量が最も増加したのは、計測開始1時間後にターゲットを取り付けた計測断面にかかる左側の下半地山を掘削した時間体である。このとき観測された変位は、19時間の計測中に観測した沈下の約6割である2mmであった。天端の左側への動きについては、必ずしも沈下に対応して生じているとはいえず、特に計測開始から16～17時間における水平方向の変位の発生のみが顕著であった。

b) データの欠損とばらつき

計測期間中、機器の正常な作動を確認するために、計測開始後4時間および5時間過ぎに、計測をそれぞれ15分程中断した。この間のデータは欠損しているが格子ターゲットが明瞭に撮影され、変位量を評価していることが確認できた（図-11参照）。データのばらつきについては、ほぼ施工状況と対応してその度合いが変化しているようである。詳細は次章の考察で述べる。

4. 考察

(1) 天端の挙動

SMCおよびトータルステーション共に、天端が左側に変位する挙動を捉えた。当該計測断面付近では、導坑掘削時に非常に脆弱な地層（炭質泥岩）に遭遇しており、それが左下半に分布する箇所での掘削であったため、このような挙動が生じたと考えられる。

計測開始後16～17時間における特異な変位挙動は、吹付け作業時に、カメラの近傍で生コンの取り扱いをしており、計測終了時に汚れも目立ったことから、地山の動きではなく、カメラが動いた可能性が高い。

(2) サンプリングモアレカメラの優位点

高速サンプリングによる連続計測により、地山の挙動の内、変位の生じ方、変位速度の大小が読み取れ、通常坑内変位計測と比較して地山の挙動がより詳細に把握できることが分かった。また、計測を実施した現場は、都市部で山岳工法を採用しているため、一般の山岳トン

ネルと比較して非常に慎重に計測および評価を行っている。トータルステーションによる坑内変位計測結果も信頼性の高いものではあるが、施工中のトンネルにおける測定回数（計測頻度）には限界がある。この点でも、SMCは無人で常時連続計測できる利点がある。

さらに、トンネル坑内で実施するSMCによる計測では、吹付けコンクリート時にデータのばらつきが小さいことから、粉塵が発生する状況でも精度の良い計測が可能であることが分かった。ただし、屋外の計測でも確認されていることだが、カメラから格子ターゲットまでの間に熱によるゆらぎが生じると、画像そのものが歪んでしまうため、評価結果に影響がでるようである。トンネルの場合は重機からの廃熱の影響が懸念される。

(3) 施工状況との対応

地山の掘削の他にも、路盤整備やケレン作業時には、連続的または間欠的ではあっても瞬間的に定常時よりも大きな変位が生じている。また、ズリ出し時にもカメラを設置している箇所の近傍をズリ出し用のローダーが通過したため、特徴的な変位（振動）が観測されている。

以上により、SMCによる連続計測は、地山の安定性を評価するための情報となるだけではなく、施工状況を監視するデータとしても活用できる可能性が示唆されたと考える。

5. 課題と展望

適用範囲が広く、既に材料試験のひずみ測定³⁾や土木構造物のメンテナンス管理を目的とした計測⁴⁾に使用されているSMCであるが、今後、次に示す課題に対して開発をすすめ、山岳トンネルにおける坑内変位計測に適用していきたい。

(1) 計測の自動化

今後は、3台のSMCの同期による望遠撮影、または高解像度の画像素子と計測断面を広く捉えた撮影による、1断面3～5点の同時計測の実施できる技術の開発を進めて行きたい。

(2) 計測管理への適用

現状SMCによる計測は、日常管理計測である計測工Aで実施する範囲の計測を網羅できる技術にはなっていない。しかしながら、今後も画像素子の性能向上や演算処理能力の高速化は継続すると考えられるため、トータルステーションによる坑内変位計測に代わる技術となる可能性も有していると考ええる。

また、精度の向上に関連して、カメラ設置位置が不動

点であることを確認する必要があると考える。採用したSMCは3台までカメラを同期させられるため、不動点に別のSMCを設置し、施工の影響によりカメラが振動や僅かな変位を受けた場合でもその変位を補正できる。カメラ側の問題による計測誤差を低減できれば、地山の挙動をより精度良く把握することが可能になると考える。

(3) 地山評価への適用

現状の施工管理を目的とした計測では、高速のサンプリングへの要求は低いと考えられるが、変位の時間変化を詳細に捉えられれば、その特徴から地山の特性を評価できる可能性もある。今回の計測結果においても、掘削後の変位がなかなか収束しない状況を捉えているが、他の岩種であれば、様相が異なった可能性もある。今後の施工においては、岩種の変化や、同種の岩盤でも地山強度比に変化が生じることもあるため、その変化をいち早く捉えるといった施工上有益なデータとなる可能性がある。

6. 結論

SMCを用いた計測を実施し、トンネルの坑内計測で行われるトータルステーションによる計測方法よりも精度が高く、かつ変位の時間変化が詳細に確認、分析できる計測結果（変位計測のサンプリング周波数は1秒）を得た。例えば、計測断面付近の下半掘削時には、非常に短い時間で変位が生じること、計測断面近辺の掘削では

変位は継続して緩やかに生じることなど、作業内容や掘削状況によりトンネルの変形挙動がそれぞれ特徴を持つことが確認できた。

今後は、山岳トンネルの施工現場における計測でのSMCの課題を解決していき、メンテナンスを含む計測そのものの省力化を実現した、より高度なトンネル坑内変位計測技術を開発していきたい。

謝辞：本研究の一部は、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託事業「格子画像の位相解析手法を用いた高精度計測技術によるインフラ構造物のモニタリングシステムの研究開発」の一環で実施して得られた成果です。

参考文献

- 1) 堀内宏信：モアレを利用した変位計測システム，土木学会論文集，II，pp.1-6，2010.
- 2) Ri, S., Fujigaki, M. and Morimoto, Y. & M. Fujigaki & Y. Morimoto：Sampling moiré method for accurate small deformation distribution measurement, *Experimental Mechanics*, Vol.50, pp.501-508, 2010.
- 3) 飯田伊佐務，佐藤浩幸，中島富男，李志遠，津田浩：引張試験によるサンプリングモアレ法のひずみ測定の有効性確認，IIC REVIEW，No.52，pp.34-42，2014.
- 4) 玉井博貴，生駒昇，原卓也，藤垣元治：サンプリングモアレ法による土木構造物の変位・変位角・振動数等の計測，建設コンサルタンツ協会近畿支部，第46回研究発表会，No.112，pp.1-6，2013.

(2016.8.5 受付)

DISPLACEMENT MONITORING USING SAMPLING MOIRE METHOD DURING CONSTRUCTION IN MOUNTAIN TUNNEL

Takuya TANI, Yoshimi MAEDA, Hitoshi TSUDA and Masahiro HAYASHI

In recent years, measurement by sampling moiré method reduced its cost is adopted in various industrial fields. The authors executed to apply this method to a displacement monitoring of construction in mountain tunnels. This method can not only enlarge a small displacement as the large movement of phases but also can be captured at high speed such as 60 fps in frame rate. The test measurement using the sampling moiré method was carried out in the crown of tunnel. As a result, it was clear that the sampling moiré method can grasp the minute displacement behavior in seconds. This paper shows the measurement results and mentions the remaining issues and prospects of sampling moiré method.