

# 大変形を生じる地山へのM/d機器の適用性

青野 泰久<sup>1\*</sup>・塚本 晃平<sup>2</sup>・真下 義章<sup>2</sup>・熊坂 博夫<sup>1</sup>・張 海華<sup>3</sup>・芥川 真一<sup>3</sup>

<sup>1</sup>清水建設株式会社 技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17)

<sup>2</sup>清水建設・岩田地崎建設特定建設工事共同企業体 (〒409-3605 山梨県西八代郡市川三郷町下大鳥居池尻 1649-1)

<sup>3</sup>神戸大学大学院 工学研究科 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1)

\*E-mail: y.aono@shimz.co.jp

対象物に生じている変状を視覚で確認することを目指したOSV(On-Site Visualization)機器の一つであるM/d(Mechanical deformation)機器を用いて施工中のトンネルの変位計測を行った。本機器は比較的安価な糸と滑車で構成され、機械的な動きから目視により変位量を把握できる。建設時のトンネルでの計測に用いるため改良を行い、M/d機器とトータルステーションを用いた計測工Aの内空変位との比較を行った。

その結果、大きな変形を生じた断面では、M/d機器を用いた計測測線とこれに近い計測工Aの測線の内空変位の挙動は良い対応を示した。このことより、M/d機器を用いて大きな変形の発生の有無が計測位置で目視により把握できることが示された。

**Key Words :** on-site visualization, mechanical method, tunnel, deformation, field measurement

## 1. はじめに

近年の山岳トンネルの内空変位計測では、吹付けコンクリートにプリズムを設置し、トータルステーションを用いた計測が一般的である。この方法は計測に時間、労力や費用がかかり、かつ、計測結果を即座に作業中の作業員と共有できないという問題がある。また、急激な変状は、吹付コンクリートの剥落やひび割れ、地山の崩落等が発生するまで認識されないことが多く、急激な変状が発生する前に誰でもその場で対象物の状態が把握できることが望ましい。

計測対象物の変化をリアルタイムで視覚的に確認することを目指したOSV機器が芥川ら<sup>1),2),3),4),5)</sup>により提案・試行されている。Zhang et al.<sup>6)</sup>は電気を用いずに機械的な動きから変位を視覚的に把握できるM/d (Mechanical deformation) 機器を提案した。本報ではこのM/d機器の改良及びトンネル建設時の計測管理への適用性について報告する。

## 2. 八之尻トンネル工事の概要

本研究の対象としたトンネルは、中部横断自動車道八之尻トンネルである。中部横断自動車道(静岡・山梨区間)は、新東名新清水JCTから中央自動車道双葉JCTを結

ぶ延長74kmの高速道路で、八之尻トンネル(発注者：中日本高速道路株式会社、受注者：清水建設・岩田地崎建設特定建設工事共同企業体)は、増穂ICと六郷IC間に位置し、内空断面積71.3m<sup>2</sup>、トンネル延長2,469mの2車線道路トンネルである。

地質縦断図を図-1に示す。掘削距離(Tunnel Distance, 以下TD) 939m~1,550mの区間の地質は泥岩層が続いており、地山強度比は0.08~5.20と脆弱な部分が含まれている。計測工Aの計測例としてTD1,344mの位置で得られた内空変位の計測結果を図-2に示す。図に示されるように、プリズムを設置してから24時間以内の初期変位が15mm、200日後の相対変位が最大で674mm発生しており、非常に大きな変形が生じた。

なお、施工にあたっては切羽鏡の自立性を活かした曲面切羽と二重支保構造が採用され、全断面機械掘削による早期閉合が行われている。

## 3. M/d機器の構造と改良

M/d機器とは、図-3(i)、(ii)に示すように滑車や棒とそれらに連結した指針の機械的な動きから変位量の可視化を行う機器である。図-3(i)は糸と滑車を用いて、重りやばねで糸に張力を与え、二点間の変位量を糸の移動量から滑車の回転に変換する機構の例である。糸の伸び

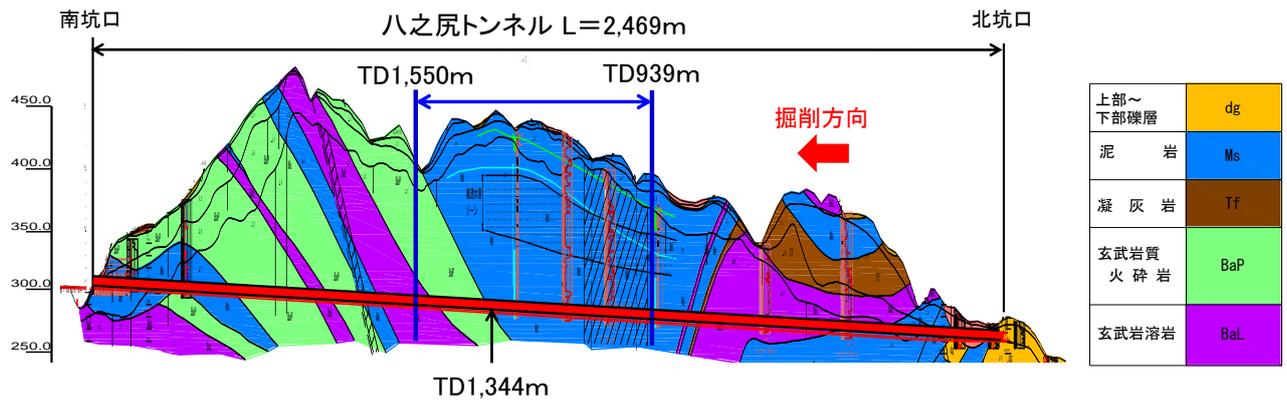


図-1 八之尻トンネルの地質縦断面図

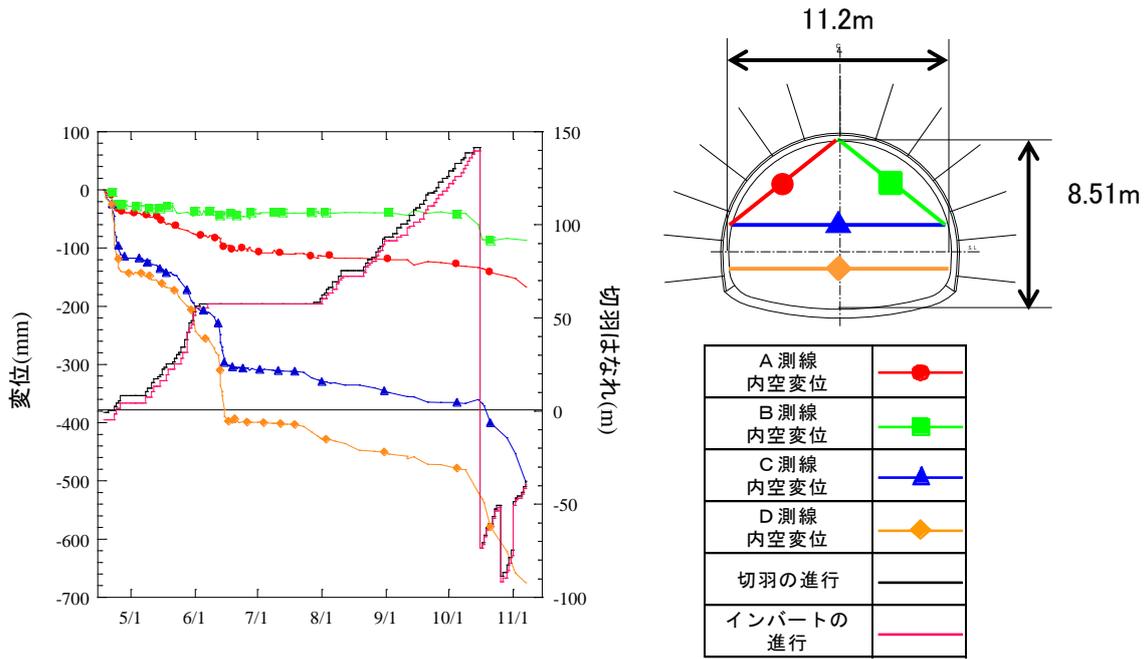


図-2 計測工 A の結果 (TD 1,344m)

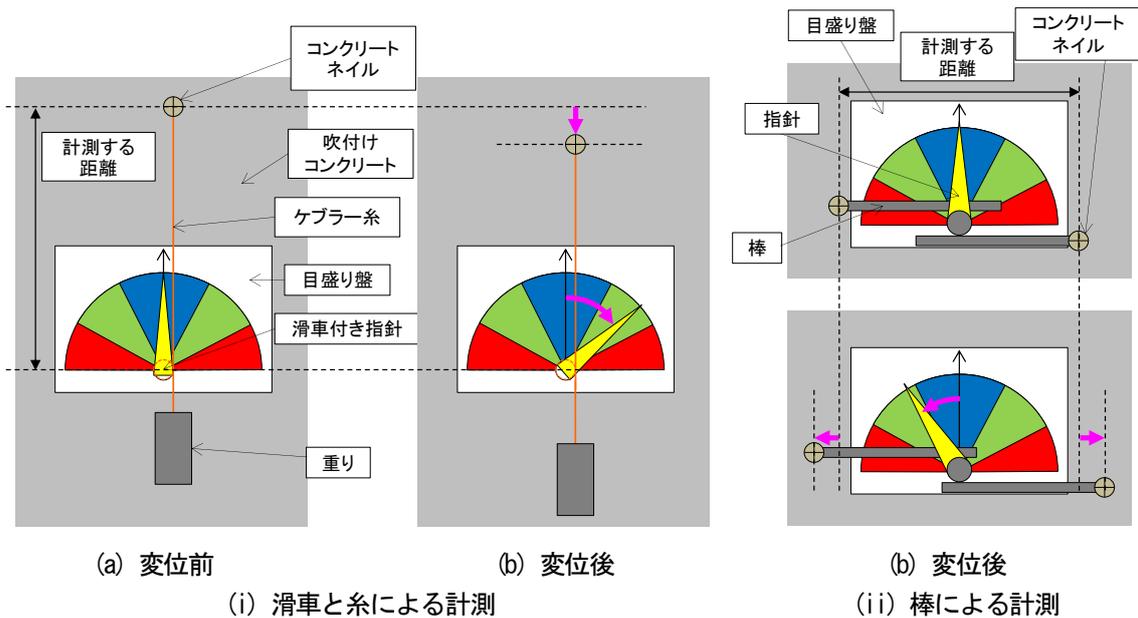


図-3 M/d 機器の概要

表-1 改良前と改良後のM/d機器の構造

	改良前	改良後
目盛り盤の色	白, 青, 緑, 赤を基調とした色	マゼンタ, 橙, 緑, 水色を基調とした色
目盛り盤の保護	ラミネート	ラミネートとアクリル板の併用
針の材質	ポリプロピレン	プラスチック
糸に張力を与える方法	重り (500g程度)	ばね (800g程度)
変位の変化量の把握に関して	計測者しか把握できない	マーカを設置し, 誰でも把握可能
目盛り盤の設置方法	アンカーボルト	アンカーボルト, アングル, 緩衝材を併用

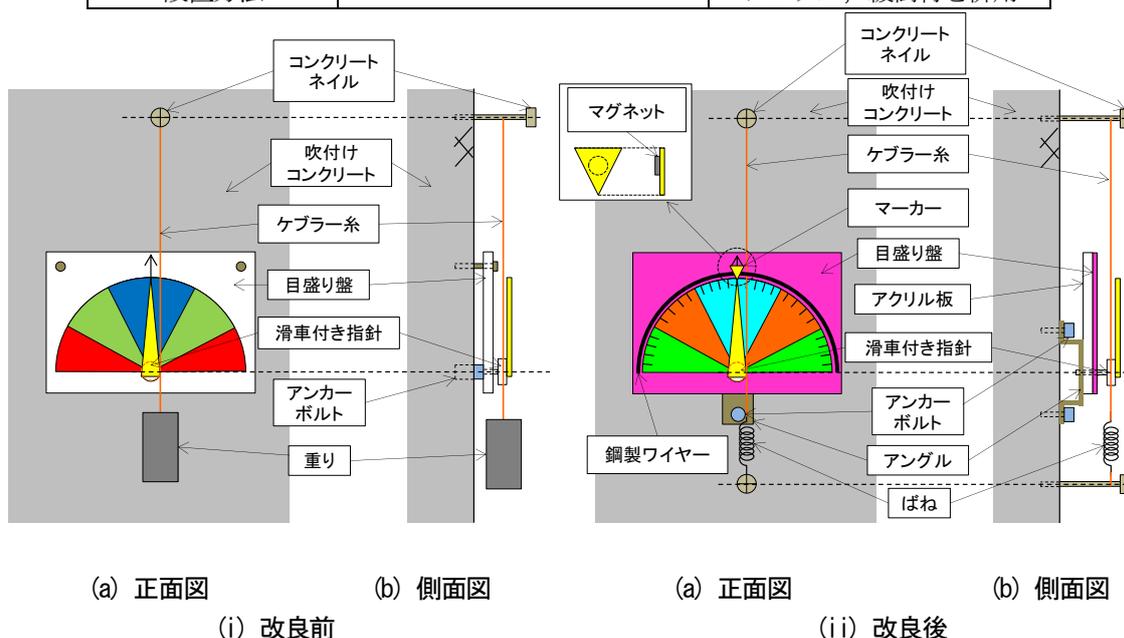


図-4 M/d機器の構造の改良

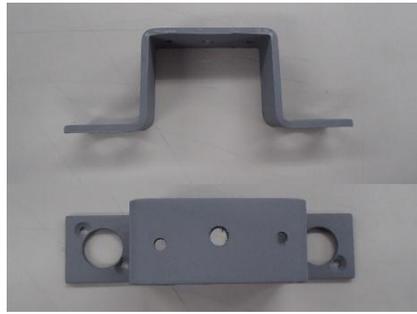
縮みが計測値に及ぼす影響を除去するために、ケブラー糸が用いられる。ケブラー糸は弾性係数が70,500MPa、引張強さが2,000MPa以上、熱膨張率が $4.0 \times 10^{-6} \text{cm/cm}^\circ\text{C}$ であり、伸びが生じにくく頑丈な糸である。図-3(ii)は棒を用いて二点間の変位を棒の回転に変換する機構の例である。回転する部材に指針を取付け、目盛り盤と併用することにより変位量を可視化するため、PC等が無い場合でも計測箇所での計測結果を確認することが可能である。費用に関して比較を行うと、トータルステーションとプリズムを用いる従来の方法は約23,000円/断面(八之尻トンネルの実績より)であるのに対し、M/d機器を用いる方法は約2,500円/断面と約1/10の費用で計測を行うことができる。今回は材料費のみの試算であるが、実際には製造コスト、人件費等が上乗せされる。

(1)M/d機器の構造の改良(トンネル計測への適用に当たって)

M/d機器の改良前と改良後の構造を表-1、図-4に示す。従来の目盛り盤の色は白、青、緑、赤を基調としていた

が、坑内での作業を行う際に目立つようマゼンタ、橙、緑、水色を基調とした目盛り盤に改良した。また、重りで糸に張力を与える場合、風により重りが揺れること、吹付け面と重りの接触により張力を正確に与えられないこと、糸が切断した場合に重りが落下し危険であることから、重りの代わりにばね(E637, SUS304WPB)を用いて張力を与える機構とした。さらに、目盛り盤は従来は紙等による印刷物にラミネート加工した柔なものであったが、このままでは目盛り盤の折れや曲がりにより正確な計測値が得られないことや、湿気により目盛り盤が劣化することから、アクリル板に目盛り盤を張り付けた剛のものとした。

今回用いている滑車は糸を巻きつけている部分の直径が21mmである。指針は変形を視認するために重要な部材であり、折れや曲がりを防ぐ必要がある。そこで、指針の材質をポリプロピレンからプラスチックに変更することとした。また、前回計測時からの変位の増加量が把握できるように、目盛り盤に鋼製ワイヤーと磁石を取り付けたマーカを設置することとした。また、写真-1



(i) π型



(ii) L型

写真-1 アングル

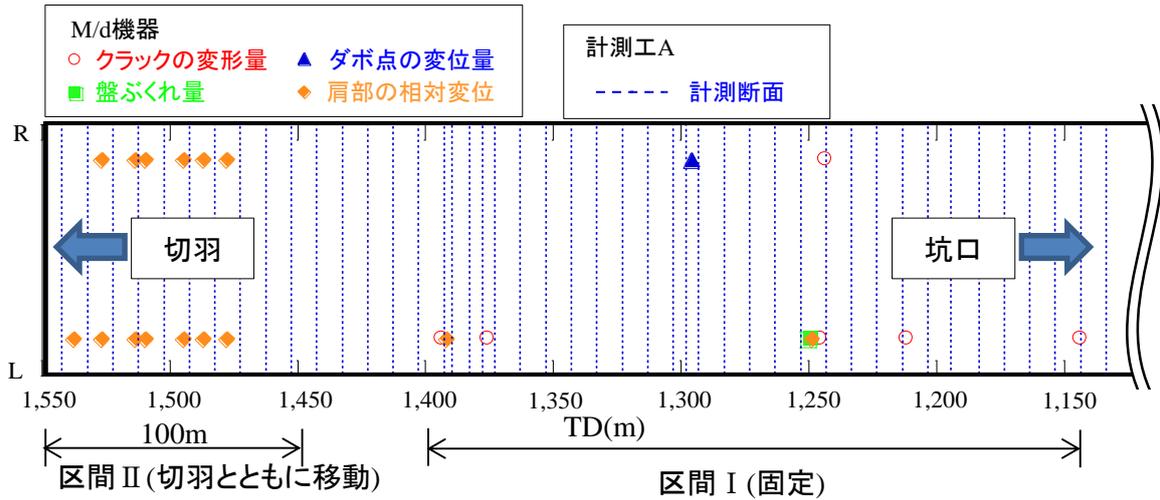
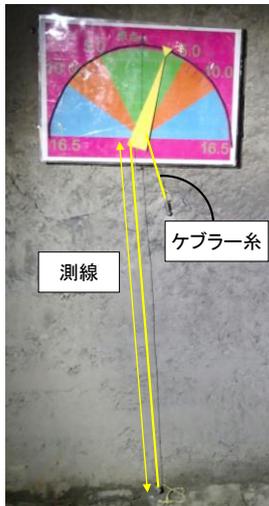


図-5 計測工 A, M/d 機器の計測箇所



(i) クラックの上下



(ii) 支保工脚部の上下

写真-2 計測区間 I の設置状況

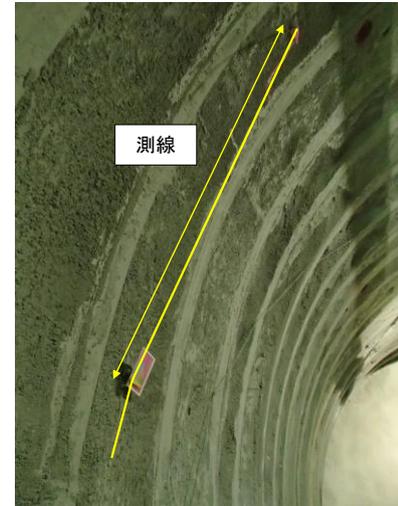


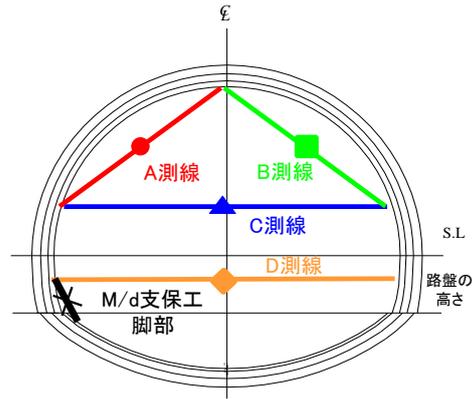
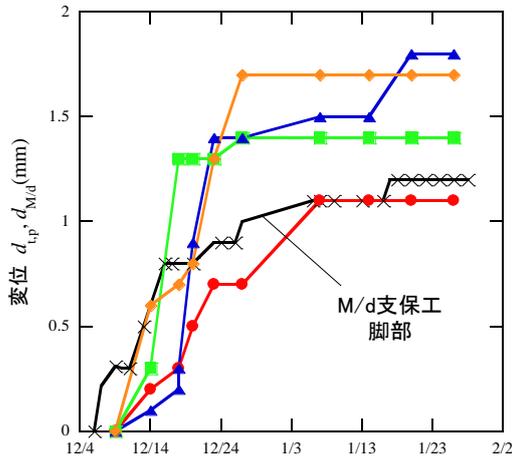
写真-3 計測区間 II の設置状況 (肩部)

に示すπ型アングル, L型アングルを用いることで, 用途に応じて目盛盤の設置方向を変えられるようにした. さらに, アングルと吹付け面の間に緩衝材を挟むことにより, 吹付け面の凹凸に関係なく目盛盤を設置できる機構とした.

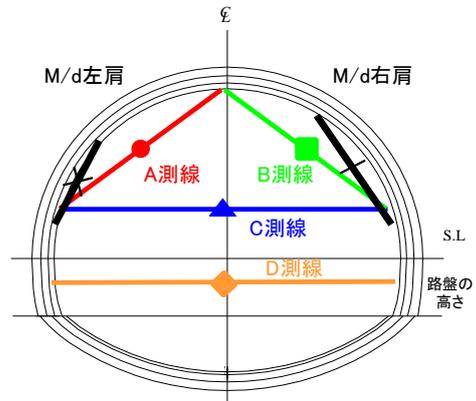
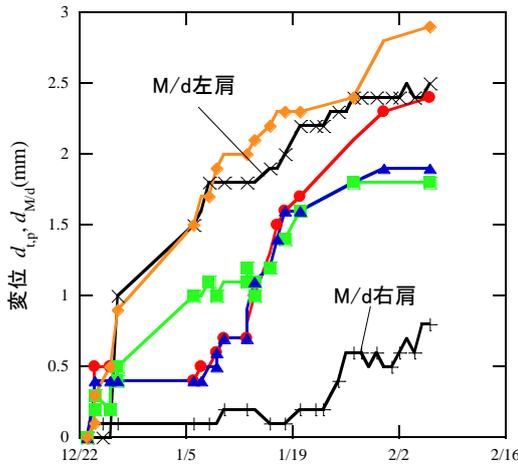
(2) 設置箇所

今回実施した計測箇所と計測項目を図-5に示す. M/d 機器はTD1,145~1,400mのクラックの変位や盤ぶくれの計

測を行う区間 I と掘削直後からの変状を計測するために切羽から100m以内の区間 II に設置した. NEXCOの施工管理要領<sup>7)</sup>では, 「1mm以下の変位量が二週間以上計測された場合, 監督者と協議の上, 計測を終了する」と記載があり, 区間 I では計測工 A による計測を終了していたが, クラックや盤ぶくれが確認されているため, 写真-2(i), (ii)に示すようにクラックの上下, 支保工脚部の吹付けコンクリートに計測点(コンクリートネイル)を設置した. (図-4参照)



(i) TD1, 214mにて計測工 A, TD1, 213mにて M/d 機器で計測(支保工脚部)



(ii) TD1, 474mにて計測工 A, TD1, 478にて M/d 機器で計測(肩部)

図-6 計測工 A の変位 ( $d_{t_p}$ ) と M/d 機器の変位 ( $d_{M/d}$ ) の経時変化の関係

区間 II は急な変状や支保工の建込後の変位の計測を目的としている。C, D測線に沿って M/d 機器を設置した場合、重機の往来により糸が切断されるため、区間 II では写真-3 に示すように肩部に M/d 機器を設置した。

#### 4. 結果および考察

##### (1) M/d 機器による変位の計測の適用性

計測工 A (トータルステーション) より得られた内空変位を  $d_{t_p}$ 、M/d 機器により得られた相対変位を  $d_{M/d}$  とする。区間 I, II における  $d_{t_p}$  と  $d_{M/d}$  の日変化の一例を図-6 に示す。図-6 において、各測線を比較すると、測線が一致していないため、計測工 A の内空変位と M/d の測線の相対変位量を直接比較することはできないが、図-6 (i) に示す  $d_{t_p}$  と  $d_{M/d}$  の増加の挙動や、図-6 (ii) に示す左肩部に設置した M/d 機器の計測測線の相対変位は、これに近い A, C 測線の内空変位の挙動に概ね良い対応を示している。ただし、図-6 (ii) の右肩部に設置した M/d 機器の計測結果のように、他の測線の挙動と一致していない計測も見られた。以上から、M/d 機器により計測位置で変形の発

生の有無を目視により定性的に把握できると考えられる。

##### (2) 設置箇所の選定

M/d 機器を設置した測線に近い計測工 A の計測測線の内空変位  $d_{t_p}^*$  と M/d 機器により得られた変位  $d_{M/d}$  との差の絶対値  $|d_{t_p}^* - d_{M/d}|$  と  $d_{t_p}^*$  の関係を図-7 に、無次元化した計測工 A, M/d 機器の計測値の差の比率  $a$  と  $d_{t_p}^*$  の関係を図-8 に示す。ここに、 $a$  は次式で定義される。

$$a = |d_{t_p}^* - d_{M/d}| / d_{t_p}^* \quad (1)$$

図-7 より、 $d_{t_p}^*$  と計測値の差の絶対値  $|d_{t_p}^* - d_{M/d}|$  の相関は見られないが、図-8 より、無次元化した計測値の差の比率  $a$  は  $d_{t_p}^*$  が大きいほど小さくなっている。このことは、小さな変位が生じている状態では、計測誤差、重機の移動による振動、局所ファンによる風の影響を計測結果に及ぼしたと考えられる。このため、M/d 機器は大きな変位を把握するのに適している。

#### 5. 終わりに

対象物に生じている変位を視覚で確認することを目指

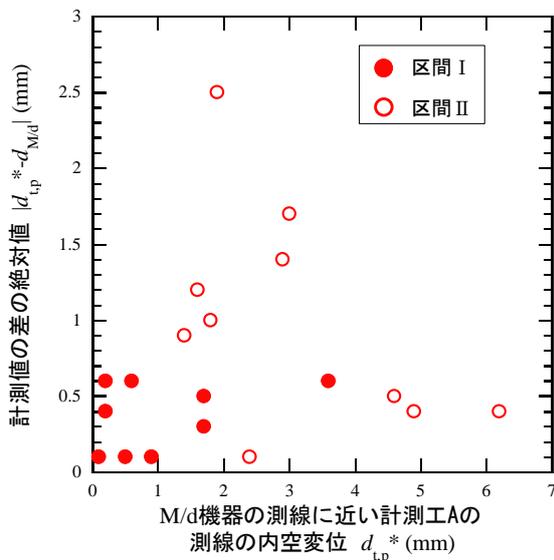


図-7  $|d_{tp}^* - d_{Md}|$  と  $d_{tp}^*$  の関係

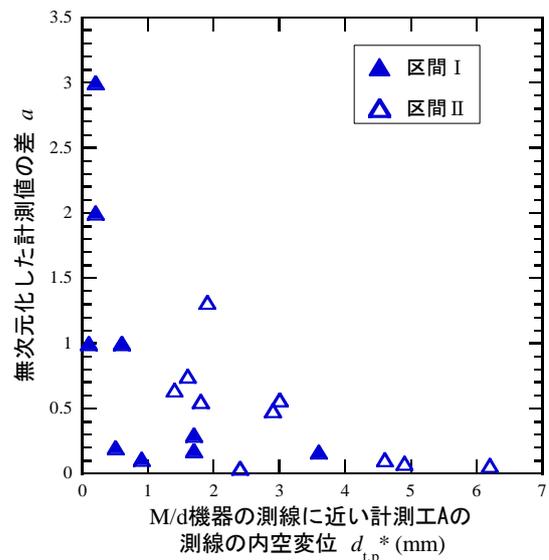


図-8  $a$  と  $d_{tp}^*$  の関係

したM/d(Mechanical deformation)機器をトンネルでの計測に用いるために改良を行い、改良後のM/d機器を用いて変状箇所のクラックの変位と盤ぶくれ量、切羽近傍の内空変位を計測し、従来の計測方法(トータルステーションとプリズム)との比較を行った。

今回の計測では、比較の変位の小さい箇所では、計測工Aの内空変位の計測結果とM/d機器を用いた計測結果により規準化した差の比率は大きく、振動や接触等の外的要因による誤差が大きいと考えられた。

また、M/d機器により得られた変位は計測測線が異なるため、従来の計測方法の内空変位と直接対比できない。しかし、計測位置が切羽に近く、大きな変位が生じている箇所では各変位の経時的な挙動が概ね一致しており、M/d機器を用いることにより、変形の挙動を定性的に把握できることを示した。

#### 参考文献

1) 芥川 真一：光の色による変位の可視化技術と教育への応用について、平成 20 年度 工学・工業教育研究講演会、pp.382-383, 2008。

- 2) 芥川 真一：防災・安全管理対策のための新技術"On Site Visualization"の現状と動向、平成 23 年度近畿地方整備局研究発表会 論文集、防災・保全部門 No.10, 2011。
- 3) 山田 浩幸, 芥川 真一：山岳トンネル工事現場における計測結果見える化技術の適用とその効果、平成 23 年度近畿地方整備局研究発表会 論文集、施工・安全管理対策部門 No.4, 2011。
- 4) 楠井 彩子, 芥川 真一, 阿部 玲子, 泉 千年, 高橋 厚志：デリー地下鉄工事における On Site Visualization の適用例、土木学会第 66 回年次学術講演会、pp.143-144, 2011。
- 5) Izumi, C., Akutagawa, S., Sekhar, C. R., Kataria, R., Abe, R and Haga, H. : On-site visualization monitoring for long span bridge on Delhi Metro Project, CURRENT SCIENCE, VOL.106, pp.1280-1290, 2014。
- 6) Zhang, H., Terashima, M., Tsujimura, K. and Akutagawa, S. : Simple mechanical methods for monitoring and data-visualization during NATM tunnel construction, Proc. of 42nd Symposium for Rock Mechanics, Tokyo, pp.38-43, 2014。
- 7) 東日本高速道路株式会社, 中日本高速道路株式会社, 西日本高速道路株式会社：トンネル施工管理要領(計測工編), p.2, 2013。

## APPLICABILITY OF M/D SENSOR TO NATURAL GROUND WHICH ARISE LARGE DEFORMATION

Yasuhisa AONO, Kohei TSUKAMOTO, Yoshiaki MASHIMO, Hiroo KUMASAKA, Haihua ZHANG and Shinichi AKUTAGAWA

The M/d (Mechanical deformation) sensor has been developed as a kind of the on-site visualization tools. This sensor consists of cheap thread and pulley, and we can obtain the displacement visually on site. We applied the M/d sensor to measure the convergence of tunnel under construction. In order to use the sensor in the tunnel, we improved the mechanism of this sensor. Moreover, we compared the measurement results using conventional method (i.e., total station and prism) and the results by the M/d sensor. In the section with large deformation, the results show similar response, and the M/d sensor is an effective tool for on-site visualization in tunnel.