

3Dスキャナー測定によるトンネル変状評価手法

安田 賢哉^{1*}・宮沢 一雄²・鶴原 敬久³・山家 信幸⁴・村山 暢⁴

¹株式会社ネクスコ・エンジニアリング東北 仙台東事業所（〒980-0031 仙台市若林区六丁目字南99-1）

²東日本高速道路株式会社 東北支社 山形工事事務所（〒990-2226 山形市西越42-2）

³応用地質株式会社 東北支社 技術部（〒983-0043 仙台市宮城野区萩野町3-21-2）

⁴株式会社ネクスコ・エンジニアリング東北 道路技術部（〒980-0013 仙台市青葉区花京院2-1-65）

*E-mail: k.yasuda.sa@e-nexco.co.jp

トンネルの路面隆起に関しては、従来目視観察により変状状況を把握し、レベル測量などの測量手法を用いて変位量を2次的に把握していた。最近では、3Dスキャナーによる点群データを用いることで、変状範囲の特定などその状況を把握することが報告されている。しかし、現況の路面には縦断勾配や轍掘れなどの不陸により、変位量を正確に把握することは困難な場合がある。

本稿では、3Dスキャナーによる測定データを用いて、路面の隆起や側壁の変形を精度よく実測し評価した結果について示す。また、3Dスキャナー測定によるトンネル変状調査への適用性について考察する。

Key Words : tunnel, maintenance management, upheaving, observation management

1. はじめに

トンネルを含む土木構造物は、1960年代の高度経済成長以降急激に導入されたため、現在でも必要不可欠な社会基盤として活用され続けている。しかし、約50年以上経過した現在では、維持管理の観点や社会情勢により、これらの構造物を要求される施設の性能に対応させるためには、大規模更新および大規模修繕による効率的な対策を講ずることが必要とされている¹⁾。

一方、トンネル内では路面の隆起事象が顕在化し、内空断面の縮小および建築限界の侵害等で、通行車両の走行性へ悪影響を及ぼすようになってきている。

今回対象となったトンネルは、NATM 工法で施工された高速道路トンネルで、供用を開始して約 17 年後に側壁 1 スパンに内装タイルを貫通して覆工コンクリートに幅 0.8～2.0mm の水平ひび割れが生じていることを発見した（写真-1）。隣接するスパンにはひび割れなどの顕著な変状は認められなかったものの、当該スパンにはひび割れの他に、側壁下半部と監査路でのはらみ、隣接スパンとの段差、円形水路呑み口開口幅の縮小等の変状、ならびにコンクリート舗装の路面にもひび割れが生じていた。

そこで、側壁にひび割れが発生した箇所を中心に、3Dスキャナーによる3次元形状測定を適用して路面および覆工の変形状況を調査した。3Dスキャナーとは、対



写真-1 側壁と路面に生じたひび割れ

象となる構造物表面にレーザー等を照射しその凹凸を感知して、点群データと呼ばれる複数の3次元座標データを取得する装置のことをいう。

その結果から、路面に関しては一定勾配からの変化量を解析することにより、隆起範囲を明確にすることが可能であることが判明した。また、覆工部については多数の断面データを作成しそれらを比較することで、変形の範囲を確認できた。これらの解析の結果、変状はトンネ

ル縦断方向には数m程度の狭い範囲のみでしか発生していないことが分かり、後続する詳細調査において調査範囲を絞り込むことが可能となった。

本稿では、3Dスキャナーによる測定データを用いて、路面の隆起や側壁の変形を精度よく実測し評価した結果について示すと共に、3Dスキャナー測定の特長とトンネル変状調査への適用性について考察するものである。

2. 調査概要

(1) トンネル概要

調査対象となった高速道路トンネルは、1997年より供用を開始した福島・新潟県境に位置する延長2,759mの長大山岳トンネルであり、当該箇所は上半先進ショートベンチカット工法による機械掘削で施工された。

分布地質は、新第三紀中新世の凝灰角礫岩・流紋岩等の火山碎屑岩類および火山岩類を主体としており、特に変状のあった1スパンには脆弱化した流紋岩質凝灰角礫岩の薄層（厚さ10m未満）が分布することが工事記録により分かっていた。トンネル施工時の岩判定においては、亀裂の発達によりゆるみ・肌落ちをするが、ハンマーでの打音が高い金属音であったことから岩自体の強度は高いと評価された。そのため、支保パターンはインバートがないCⅡとなった。

供用後12年経った2009年実施の詳細点検では、当該スパンのアーチ部に斜め方向のひび割れが1条あるのみで、特段大きな変状は確認されていなかった。しかし、それから5年後の詳細点検（2014年）において写真-1に示す変状を確認した。

(2) 調査手法

本調査では、測量学的手法としてレベル（水準）測量と、今回検討に供する3Dスキャナーによる3次元形状測定を実施した（写真-2）。



写真-2 3Dスキャナー測定状況

まず、3Dスキャナーの結果の原点にできる、隆起量がない範囲を把握するために、調査対象となるトンネル全線において、路面高さをレベル測量により測定した。レベル測量では、左右両路肩（LとR）および道路中央（CL）の3測線を設定し、トンネル延長方向に概ね10m間隔で往復測定をした。

次に、3Dスキャナーによる3次元形状測定では、当該スパンを中心としたトンネル延長方向に約30mの範囲で路面ならびに覆工面の点群データを取得した。

詳細には、路面ならびに覆工の形状を把握するため、平均50mm間隔の点密度で測定を行った。また、斜め方向の測定によるデータ密度に疎密を発生させないために、トンネル縦断方向に概ね20m間隔で3Dスキャナーの計器を盛り替えて測定を行った。

本測定で取得できた点群データより等高線図やスライス断面図等を作成して、トンネル内空面の凹凸状況を把握することとした。

3. 調査結果

(1) レベル測量

各測点の標高値は、両坑口に設置した仮ベンチマークの標高値に舗装仕上がり標高値を与えて算出した。本トンネルにおけるレベル測量結果を図-1に示す。

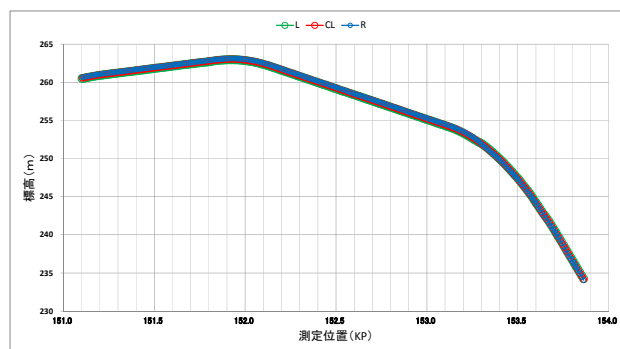


図-1 レベル測量結果（標高：m）

次に、図-1のレベル測量結果から、舗装仕上がり標高との差分を算出した。なお、起点側坑口の道路中央（CL）の標高は今回測定された標高と同じとして処理するため、その地点での差分はゼロとなる。一方、終点側坑口部では測量に起因した10mm未満の沈下が認められた。坑口部はDⅢ坑口パターンで強固に施工されていることから、このような沈下を生じるとは考えにくい。

そこで、両坑口部では変状が発生していないと仮定した。図-2に示す手法を用いて、変状が発生していない区間を結んで、結んだ線との離れを路面隆起量として類推することとした。なお、図-1より勾配変化点がトンネ

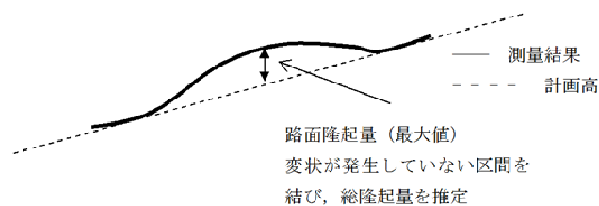


図-2 路面隆起量の推定（イメージ）²⁾

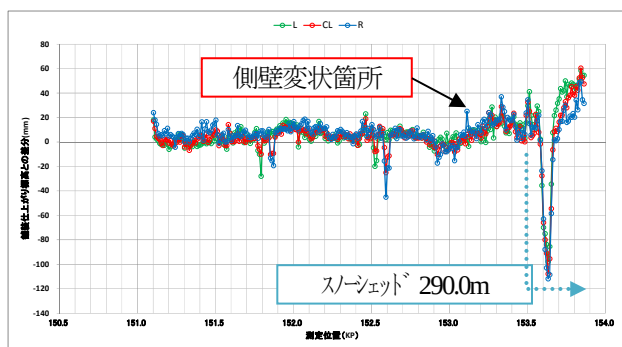


図-3 路面隆起量 (mm)

ル内に2箇所認められることから、3区間に分けて路面隆起量を類推した。

その結果を図-3に示す。側壁変状箇所では、上り線側（R側）で凸部が認められた。また、これ以外にも隆起・沈下を示す箇所が複数認められたが、現地の状況では特段異常はなかった。

さらに、終点側坑口の290m区間は、開削工法により施工されたスノーシェット構造であるため、この付近から概ね100m程度の間で約100mmの大きく沈下した傾向が認められた。

(2) 3Dスキャナーによる3次元形状測定

図-4にトンネル横断形状のスライス断面図の例を示す。

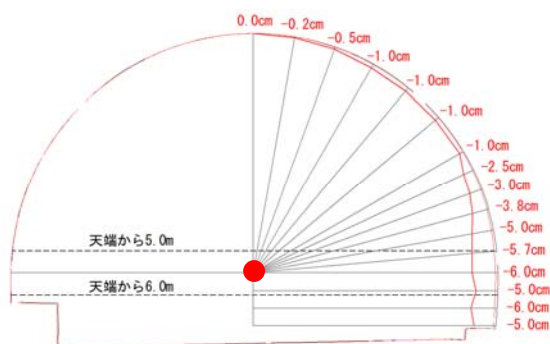


図-4 トンネル断面形状測定結果例³⁾（赤丸が固定点）

健全な断面と変状が認められた断面とを重ね合わせ、それらの差を変位とした。図-4の赤線は右側壁の変位のみを10倍に拡大して表現したものである。

アーチ天端付近では、施工誤差と思われる1cm程度の

小規模な差異が認められる一方、側壁部では明らかに内空側へはらんでおり、その最大値は6cmであった。

図-5に路面の等高線コンターマップを示す。

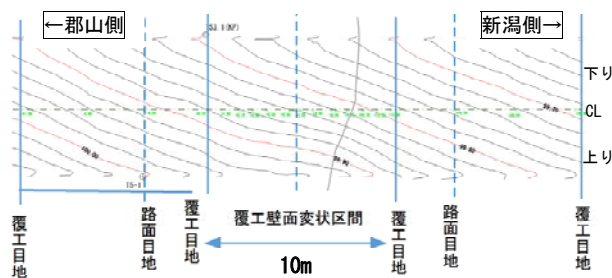


図-5 路面等高線図（等高線間隔は2cm）³⁾

路面にはトンネル縦断方向および横断方向にそれぞれ勾配があるため、変状のない路面の等高線は一定間隔の斜線として表現される。本トンネルでの結果は、隣接するスパンでの路面に異常はなく、覆工目地および路面目地部での変化も特に認められなかった。しかし、上り線路肩付近の覆工壁面変状区間（図-5中央下半部）においては複数の等高線が波打って乱れており、定性的ではあるが路面の変状を示すことができた。

次に、代表地点での結果として図-6および図-7に横断方向と縦断方向の路面形状をそれぞれ示す。横断方向には2.0%、縦断方向には0.8%の勾配が認められ、図-7の青線中央部の約5m区間において凸部が認められた。

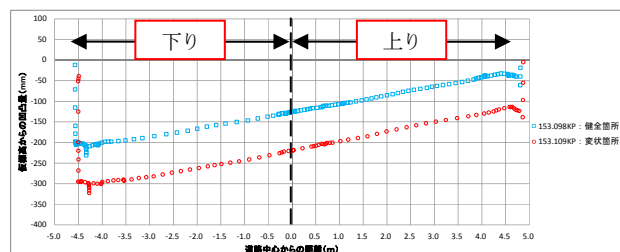


図-6 横断路面形状（青：健全箇所、赤：変状箇所）

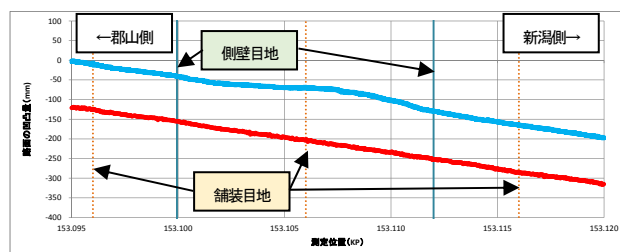


図-7 縦断路面形状（青：上り線側、赤：下り線側）

図-8に横断方向の路面勾配を控除した結果を示す。

詳細にみると、上り線・下り線ともに轍掘れにより発生したと考えられる2～3mm程度の凹みが認められた。また、青色のプロットに着目すると、下り線側は概ね平

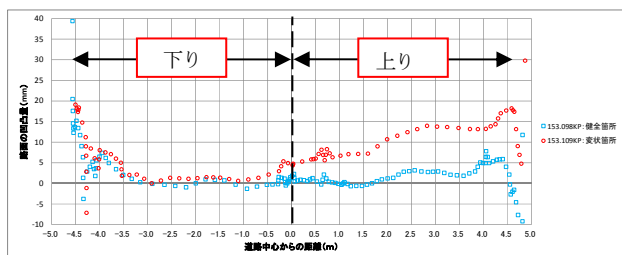


図-8 横断勾配を控除した路面形状
(青：健全箇所，赤：変状箇所)

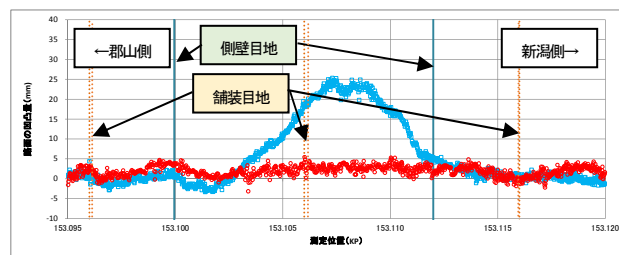


図-9 縦断勾配を控除した路面形状
(青：上り線側，赤：下り線側)

坦であるが、上り線側は比高差5mm程度の不陸が認められた。この付近には変状は認められないことから、施工誤差によるものと考えられる。

横断端部には、円形水路や監視員通路などがあり、形状が大きく変化しているため、厳密に隆起量を計算することが難しい。したがって、舗装施工後の出来高標高が分かったとしても、施工精度や輻掘れの影響などにより、5mm程度の誤差が生じることが分かる。

図-9に縦断方向で路面勾配を控除した結果を示す。

今回の測定では、目視点検及び路面縦断測量の結果から変状の発生していない区間を予め把握し、変状区間の両側に変状していない区間を含むように3Dスキャナー測定を行った。路面は、事前調査で下り線側には変状が認められず健全であり、上り線の1スパンのみ変状が確

認されていた。図-9に示したように下り線のデータは凹凸がほとんど認められない結果となった。上り線側は事前調査で変状が認められた範囲だけに最大で25mm程度隆起していることが求められた。

以上から、縦断方向に測線を設定し、道路勾配を控除することで路面隆起量と隆起範囲を把握できることが分

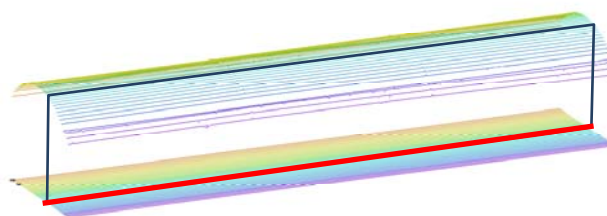


図-10 縦断方向の路面データ抽出の概念図

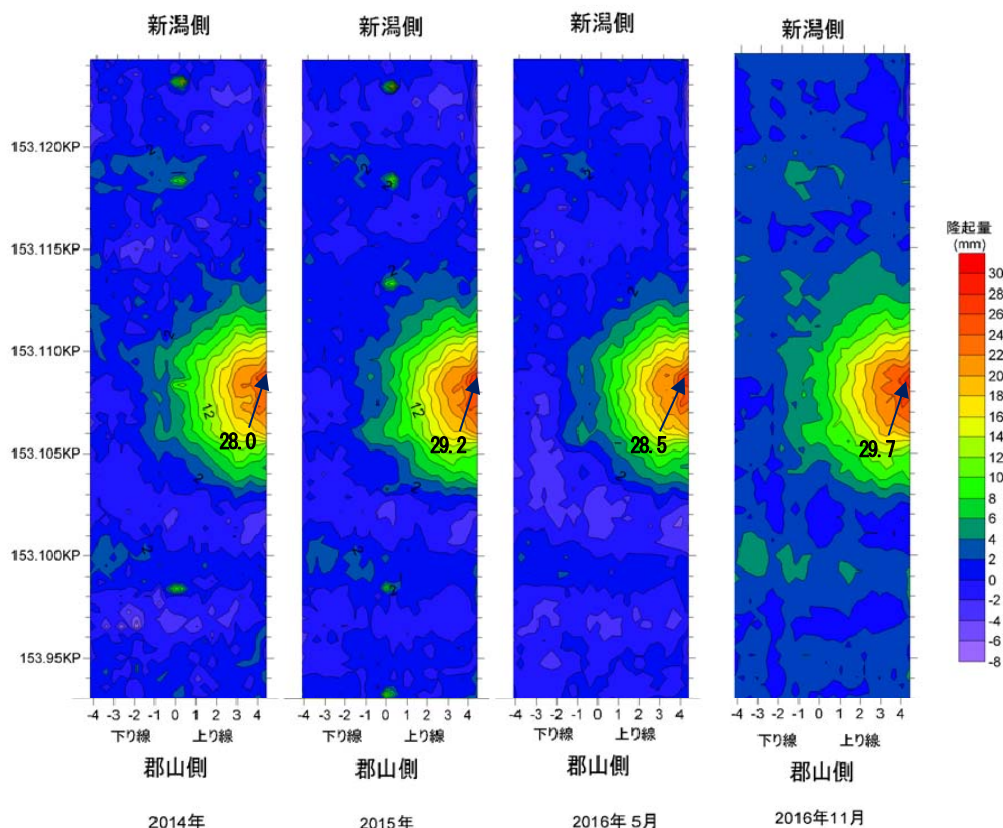


図-11 3D スキャナー測定による路面隆起分布 (数値はピークの値 mm)

かる。そこで、図-10に示したように縦断方向の路面データ抽出するために、横断方向に25cm間隔で3Dデータのサンプリングを行い、各測線ごとに図-9に示したような路面隆起の分析を行った。解析の結果から得られた路面隆起量を用いて路面の隆起分布をコンターマップとして図-11に示した。

図-11に示される路面の変状箇所には、最大約30mm隆起の同心円構造として表現され、路面1スパン内の狭い範囲に収まっていた。また、隆起のピークと路面のひび割れ発生位置は概ね対応していることから、3Dスキャナーで特定した路面隆起範囲は現場の変状状況と対応していることが確認された。なお、図-11に示す3箇年では顕著な変位の進行は認められないと判断される。

同様な処理を側壁に対して行った場合、側壁のはらみが水平ひび割れを中心に認められ、その最大値は6cmであった（図-12）。

なお、トンネル内空水平変位を変状発見時より継続して測定しているが、はらみの進行並びに顕著な変位は認められていない。

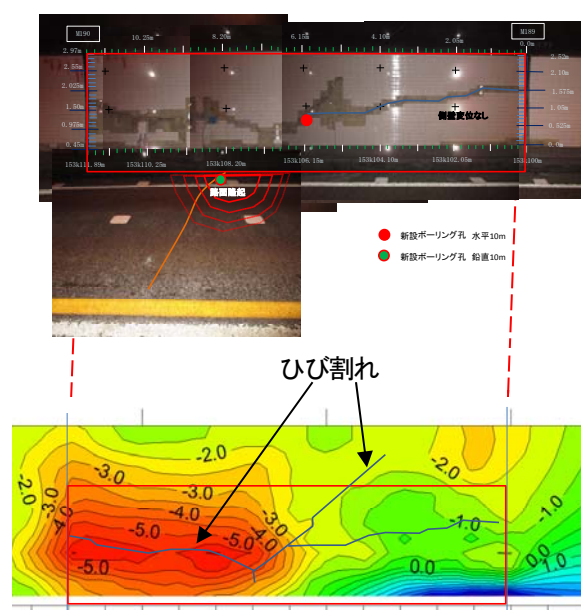


図-12 側壁の変状状況（上）と解析結果（下）

4. 議論

(1) 路面隆起および側壁変状メカニズム

本トンネルの地質は新第三紀中新世の火山砕屑岩類などであるが、安田ほか（2015b）のボーリング調査結果⁴⁾によれば、変状箇所付近の地質はすべて緑灰色を呈した凝灰角礫岩であった。また、凝灰角礫岩は風化や変質の程度の違いにより、健全・堅硬な部分、変質が進んだ部分、およびせん断応力により破碎された部分の3種に分

類された。その中でも変質が進んだ部分とせん断応力により破碎された部分とが形成する脆弱層は、約10mの薄い層厚で傾斜角がほぼ垂直となってトンネルと交差して分布していることが判明している。

本トンネルは、広域的にはグリーンタフ変動地域に位置することから、凝灰角礫岩中にスメクタイト等の膨張性粘土鉱物が含まれる可能性が高い。

建設時にインバートが施工された箇所では変位が抑制され顕著な変状は認められなかった。しかし、インバートがない当該箇所では、岩石そのものが有する脆弱性に加え、それに含有する粘土鉱物の吸水膨張現象により、変位・変状が顕在化したと考えられる。また、その脆弱層は層厚10m程度であったことから、変状はごく一部で局部的に発生したと考えられる。

凝灰角礫岩薄層は本トンネルと交差して分布しているが、変位・変状が顕在化したのは上り線側の路面と側壁のみである。アーチ部や下り線側には目立った変状は出現していないため、今後の点検・調査において見落としが無いように留意すべきと考える。

(2) 3Dスキャナー測定の実用性について

測定結果を分析したところ、縦断方向にデータを抽出し道路勾配を控除することにより、精度のよい路面の変形状態を把握することが可能であると分かった。これは高速道路の路面は縦断方向に平滑さを求められている構造であることが起因していると考えられる。このように、日常的な維持管理（段差修正工や路面切削工等）で縦断方向に平滑さを保っていても、それ以上の路面隆起や変状が生じた場合には、今回のような手法により精度良く路面隆起の状況を把握することができる。

一方、横断方向には轍掘れや施工誤差などの種々の要因が含まれる上、円形水路や監視員通路があり不動点を設定しにくいなどの問題点がある。このように、対象とする計測面の特徴を考慮したデータ分析により、3Dスキャナー測定結果から誤差を取り除き、より妥当な評価が可能になると考える。

なお、このような調査に先立って、目視による変状箇所の抽出や、路面縦断測量による定量的な変状箇所の抽出は、効率的な調査を行う上では重要であると考えられる。特に、3Dスキャナー測定のデータ処理においては、変状していない箇所も含めた調査箇所の設定が必要となるため、路面縦断測量の精度が解析結果に大きく影響するものと考えられる。

5. まとめ

路面変状箇所の隆起状況を把握するため3Dスキャナ

一を用いたデータ処理手法を提案した。この手法で得られた結果により、路面隆起の範囲と変位量を精度よく定量的に把握することができた。これに後続するボーリング調査の数量や地点選定の際には、この結果を有効活用することができた⁴⁾。

また、安田ほか (2017) ⁵⁾では路面トータルステーション測定との比較を行い、それと同程度の精度で測定することが可能であることを示した。

様々な測定手法がある中、測定箇所の特性に応じた手法の選択が重要と考える。今後、各測定の基礎的な研究と現場での応用事例が増え、ユーザーにとって選択肢が多い環境となることを期待する。

謝辞：東日本高速道路株式会社東北支社技術部をはじめ、助言・指導を頂いた関係者各位に対し記して御礼申し上げます。

参考文献

1) 山田隆昭，中田雅博，殿垣内正人，大津敏郎：高速道

路トンネルの大規模修繕に関する検討，トンネルと地下，Vol.45，No.8，pp.39-48，2014。

- 2) 東日本高速道路株式会社 建設・技術本部 技術・環境部 技術企画課：盤膨れに伴うトンネル補強対策工法に関する技術資料，pp79，2015。
- 3) 安田賢哉，菊池慎司，宮沢一雄，鶴原敬久：既設道路トンネルの路面・覆工変形に関する調査事例の紹介，平成 26 年度東北支部技術研究発表会講演要旨集 (CD-ROM)，Ⅲ-34，公益社団法人土木学会東北支部，2015a。
- 4) 安田賢哉，菊池慎司，宮沢一雄，鶴原敬久，増渕善明，長瀬 修，永井 宏：高速道路トンネルに生じた変状とトンネル地質特性，第 50 回地盤工学研究発表会 (札幌大会) 講演要旨集 (DVD-ROM)，794，公益社団法人地盤工学会，2015b。
- 5) 安田賢哉，斎藤 建，鶴原敬久，小林大介，芳賀博文，宮沢一雄：3D スキャナーを用いた路面隆起変位測定手法の提案，平成 28 年度土木学会東北支部技術研究発表会講演要旨集 (CD-ROM)，Ⅲ-30，公益社団法人土木学会東北支部，2017。

EVALUATION METHOD OF TUNNEL DAMAGES BY 3D LASER-SCANNING MEASUREMENT

Kenya YASUDA, Kazuo MIYAZAWA, Takahisa TSURUHARA, Nobuyuki Yambe and Itaru MURAYAMA

In the past, displacement situation was understood by the watch observation. And the amount of displacement was observed by level measurement in 2 dimensional(2D) way. Using point group data collected by 3D scanner, many reports are recently published that the areas of displacement are specified. But it is too difficult to observe the amount of displacement precisely, because unflatness, for example slope and wear nut, exist on the road surface.

This paper shows the result of precise measurement and evaluation of displacement and we considered the application properties for tunnel investigation of 3D scanning measurement.