

トンネル吹付けコンクリートの面的厚さ管理技術

切羽吹付け作業のリアルタイムかつ定量的な管理が可能に

木下 勇人・竹中 計行・宮本 真吾

山岳トンネル工事では、切羽の崩落・肌落ち防止のためにコンクリート吹付け作業を行う。しかし、従来の吹付け作業は、オペレーターが切羽近傍で目視により厚さを確認して施工するものであり、吹付け厚さの定量的な管理が課題とされてきた。筆者らは、レーザー距離計を複数台用いて吹付け厚さを計測するシステムを2021年に開発したが、計測は複数の“点”に留まり、切羽の吹付け状況を“面”で把握できるシステムへの移行が課題として残った。今般、吹付け作業中にコンクリート厚さを面的かつリアルタイムに定量把握できるシステム「T-ショットマーカー フェイス」を開発したので、技術概要と現場実証実験の内容および結果について紹介する。

キーワード：山岳トンネル， NATM， 吹付けコンクリート， 面的計測， 三次元点群， 品質管理

1. はじめに

山岳トンネル工事では、切羽からの岩石落下等（肌落ち）による労働災害の発生が見られ、この肌落ち災害では、その半数近くが死亡または休業1ヵ月以上と重篤度が高い。厚生労働省は、山岳トンネル工事における切羽近傍の労働災害の防止を図るためのガイドライン¹⁾を2016年12月に公表、2018年1月には更なる安全性向上のために改正している²⁾。ガイドラインでは地山状況に応じて適切な切羽への吹付け厚さ（例えば、地山等級Ⅲ又はCクラスで30mm、地山等級Ⅱ又はDクラス以下で50mm）を最低限確保するとあり、当社では、ガイドラインに沿った吹付け作業を行っている。

従来の切羽への吹付け厚さ管理は、吹付けオペレーターが切羽近傍から目視で厚さを確認していた。この方法では、オペレーターの感覚や技量により厚さにばらつきが生じるため、まず複数台のレーザー距離計を用いて吹付け厚さをリアルタイムに計測するシステム「T-ショットマーカー」を開発^{3),4)}し、吹付け厚さの定量的管理を可能とした。これは、レーザーを照射した複数の計測点の厚さ情報から切羽全体の吹付け厚さを類推して管理するものであるが、切羽面積が大きくなると厚さを類推する範囲も同様に大きくなることから、詳細に切羽面全体を計測できるシステムへの移行が課題として残った。

以上から、作業中のコンクリート吹付け厚さを面的

に、かつ定量的に管理できるリアルタイム計測システム「T-ショットマーカー フェイス」を開発した。本報では、開発技術の機能や特長について述べた後、開発に当たってトンネル現場で行った実験内容と結果について述べる。

2. 技術の概要

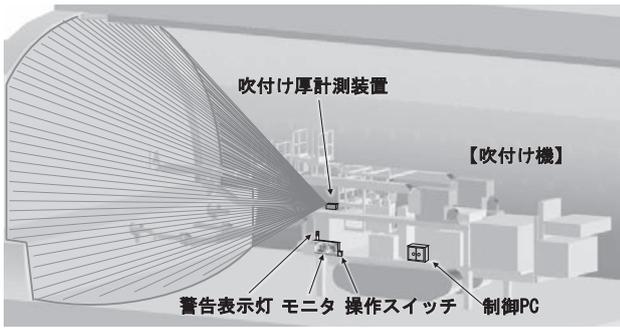
本技術は、コンクリート吹付け作業中の高粉塵環境下で切羽に吹付けられたコンクリートの厚さをリアルタイムに計測し、表示するものである。この技術により、オペレーターは鏡面の吹付け厚さを適宜定量的に把握しながら吹付け操作を行うことができる。本技術が有する主要な機能および特長を以下に述べる。

(1) 吹付け機へのシステム一括搭載

システムの構成機材は、**図-1**および**写真-1**に示すように吹付け厚計測装置、制御PC、モニタ、操作スイッチおよび警告表示灯であり、全ての機材は吹付け機に搭載される。そのため、吹付け機を切羽近傍にセットした後は操作スイッチを押すだけで計測が開始可能であり、施工サイクルに影響を与えることなく即座に吹付け作業が開始できる。

(2) 切羽全体の面的計測

吹付け厚さを三次元で把握するための計測機として、切羽形状を面的かつ高速・高密度に計測可能な



図一 1 T-ショットマーカ- フェイスの概要図

表一 1 3D-LiDAR の諸元

機種名	LIVOX AVIA
外観	
レーザー波長	905 nm
レーザークラス	クラス 1
反射率	190 m@10%, 260 m@20%, 450 m@80%
視野角	H : 70.4 度, V : 77.2 度
距離精度	<20 mm@20 m
ポイント率	240,000 点 / 秒
耐環境性	IP67
寸法・重量	91 × 61.2 × 64.8 mm ・ 498 g



(a) 厚さ計測装置



(b) その他機材

写真一 1 吹付け機へのシステム機材設置状況

(3) リアルタイム計測 & 表示

作業員のボタン操作による計測開始後は、作業中の吹付け厚さは常時計測可能となり、取得した厚さ情報は吹付け機に設置したモニタにカラー表示される(図一 2 参照)。表示画面は約 5 秒間隔で最新情報に更新されるため、オペレーター他の作業員・職員は、吹付け状況をいつでも定量的に確認できる。

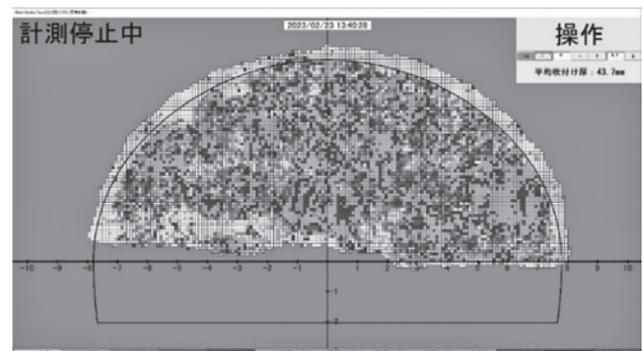
(4) 高精度の吹付け厚計測

図一 3 に吹付け中の吹付け厚さの 3 次元点群データを示す。吹付け厚さを粉塵の中でも高精度に計測するため、粉塵や吹付け材の跳ね返りなどの影響を低減するノイズカットフィルタ機能を装備している。更に 2 軸の傾斜計を計測装置に取り付けて、吹付け厚さの評価時に計測角度のデータによる補正も行なって、精度良く連続モニタリングできるようにしている。

(5) 出来形帳票の自動生成

吹付け作業終了後は、計測結果を整理し、出来形を含めた施工記録を帳票として自動で作成、出力され(図

3D-LiDAR を、後述する現場実験での比較検証結果により選定、採用した(表一 1 参照)。この 3D-LiDAR は、1 秒間に 240,000 点を計測でき、広い視野角を有するため、計測対象の大きい大断面トンネル施工においても 1 台で切羽全体の形状を把握することができる。また、3D-LiDAR を取り付けた吹付け機が、切羽全体を厚さ計測範囲内に収められる位置に確実に停車できるよう、目印となる計測中心を示すレーザーを装備する工夫も施している。



図一 2 吹付け厚さ表示画面

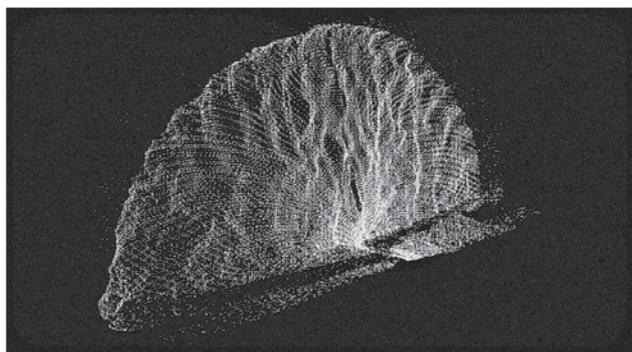


図-3 ノイズカット後の切羽計測点群



写真-2 機種選定実験状況

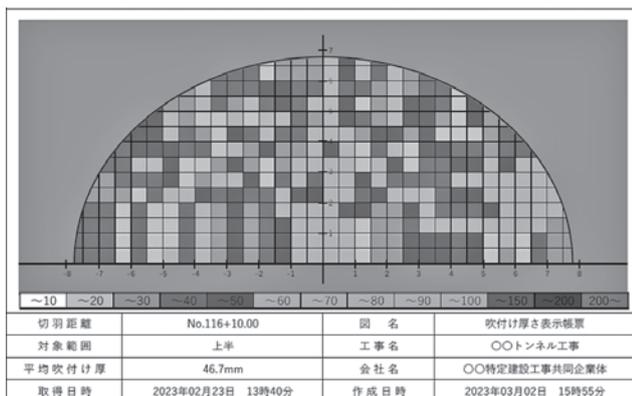


図-4 出来形帳票出力イメージ

—4 参照), 現場管理の利便性, 生産性の向上にも配慮されたシステムとなっている。

3. 現場実証実験

国内山岳トンネル工事現場にて, 次に示す3段階の実験を行って開発を進めた。ステップ1として3D-LiDARの機種選定を目的とした実験を, ステップ2として簡易版のシステム(以降「プロトタイプ」と称す)での性能確認および課題抽出のための実験を, ステップ3として改良を施したシステム(以降「改良タイプ」と称す)での性能確認実験を行った。本章では, これらの各ステップの実験内容と結果について述べる。

(1) 3D-LiDARの機種選定実験

ステップ1では, 3D-LiDARの機種選定実験および選定した3D-LiDARの精度確認試験を実施した。機種選定実験は写真-2に示すように3機種の3D-LiDARを並べ, 現場の高粉塵環境下での性能検証を行った。その結果, 表-1に示したLIVOX社製の3D-LiDARが, 他製品より計測精度や点群データの面的な取得率や計測範囲等で優れていたため, これを選定した。

計測精度については, スラリー急結剤を使用した吹付けコンクリートの施工を実施している2車線道路トンネル工事にて確認した。選定した3D-LiDARと精度を比較するための3Dスキャナ(FARO Focus S150)を吹付け機側方に三脚設置し, 各機器で吹付け前後の切羽面をそれぞれ計測し, その差を吹付け厚として算出した(写真-3)。この精度確認実験では, 3D-LiDARと3Dスキャナにそれぞれ基準点を付与することで, 取得した計測点群をトンネル座標系に変換・統一して比較する手法を採用した。なお, 各測点の吹付け厚の値としては100mm四方内の計測点群の平均値を採用した。この四方内平均値について, 切羽面上の測点24点で比較した結果, 選定した3D-LiDARは3Dスキャナと比較して吹付厚さを最大13mm, 平均2.3mmの精度で計測可能なことが確認できた(図-5)。

以上の結果から, 3D-LiDARを使用して吹付けコンクリートの施工中に精度よく計測を行い, 吹付け厚さの算出が可能であると判断し, 以降の開発を進めた。

(2) プロトタイプ性能実験

プロトタイプの現場環境下での動作状況と, オペ

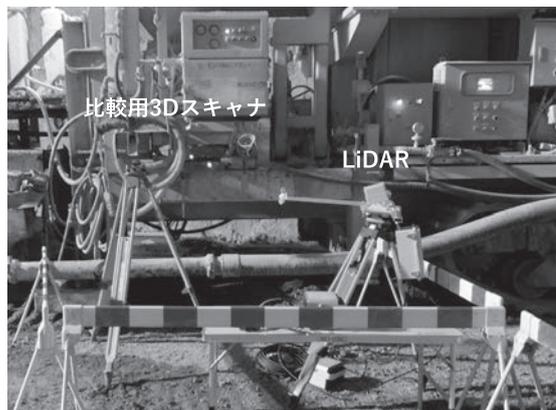
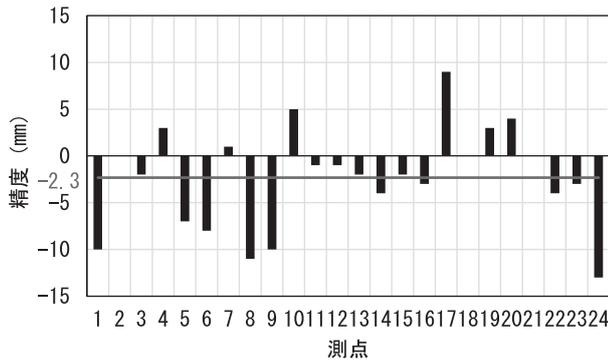


写真-3 計測実験状況

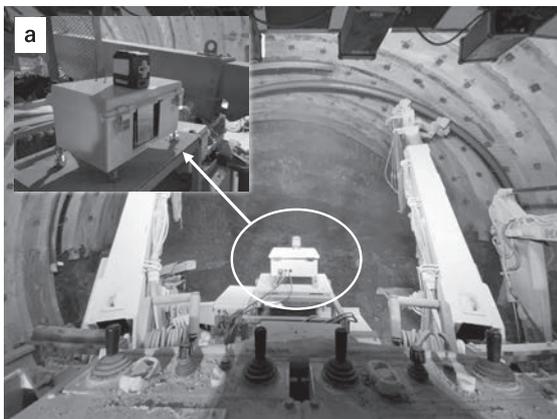


図—5 吹付け厚さ計測結果

レーダーが厚さ情報を参照しながら吹付けが可能であることを確認するために、計測精度の確認実験と同じ現場で検証試験を実施した。

(a) プロトタイプの様相

プロトタイプの厚さ計測装置は、写真—4に示すように3D-LiDARと姿勢補正用の2軸傾斜計、計測中心明示用のクロスレーザー、簡易シャッター筐体で構成し、吹付け機の運転席前方に強力マグネットで固定した。その他のシステム機材は、吹付け機の左側方に集中的に配置し、昇降部付近に制御PCを、前方ア



(a) 厚さ計測装置



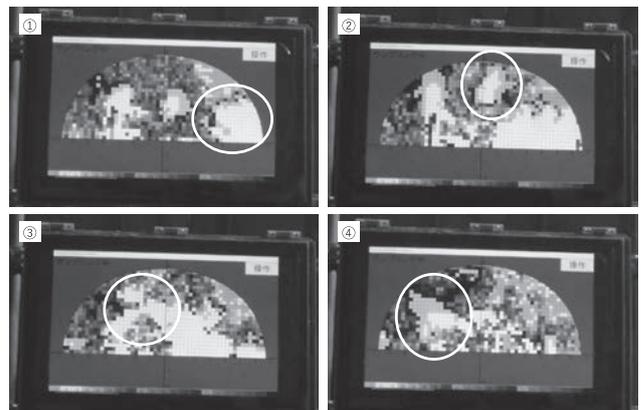
(b) その他機材

写真—4 プロトタイプ設置状況

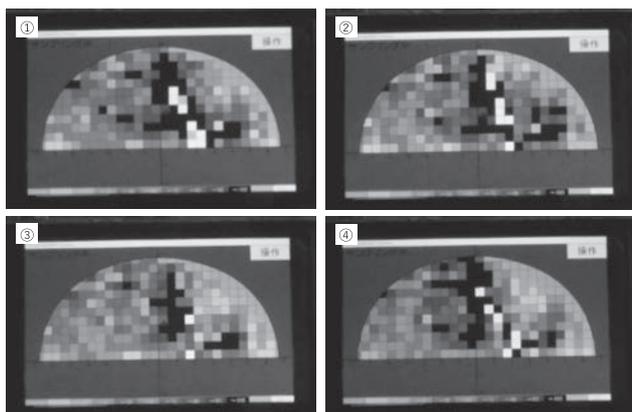
ウトリガ付近に操作スイッチと警告表示灯を、後方ホースリールの傍らに大型モニタをそれぞれ設置した。各機器は吹付け機の電源と連動する仕様とし、吹付け機のエンジン始動と同時に起動し、移動中にセットアップが完了する。吹付け機が切羽に到着した後は、人力で操作スイッチを押下することで警告表示灯の点灯と同時に初期計測を開始し、その後は自動的に常時計測へと移行する。システム稼働中は常に警告表示灯が緑点灯しており、不具合時には赤点滅とアラート音で周囲に知らせる。作業終了時は、再度操作スイッチを押すことでデータが保存されシステムが終了する仕様とした。

(b) プロトタイプの実験結果

実験の結果、計測開始から終了までシステムが正常に動作し、目的に吹付け厚さを計測・評価できることを確認したが、いくつかの課題も確認された。図—6に5秒間隔で更新する連続した4つの厚さ表示画面を示すが、切羽の各所でメッシュの色が一樣に定まらず絶えず変化する事象（以下、「ドリフト」と称する）が散見された。これは、吹付け作業に伴って切羽前方に粉塵が発生し、計測機が徐々に移動する粉塵を捉えた影響と考えられたことから、計測アルゴリズムの見直しを行った。点群の除外条件を検討し、メッシュ毎に5秒後の吹付け厚さが300 mm以下となる点群のみを採用して平均化するアルゴリズムに修正した。同時に、画面に複数の色が存在すると吹付け厚さを確認し難いとするオペレーターからの指摘より、表示色を青色基調に変更した。修正仕様で計測した結果、除外条件の変更により計測値のドリフトは大幅に改善した（図—7参照）。これにより、吹付け作業中の3D-LiDAR計測では、粉塵等の影響と考えられるノイズを除去できると判断できた。また、実験後に厚さ計測装置の防護状況を確認したところ、多量の粉塵の筐体内部への侵入が確認された。さらに、稼働中の3D-LiDARは



図—6 厚さ表示画面の経時変化



図一七 除外条件変更後の厚さ表示画面の経時変化

非常に高温となることも確認された。以上から、高温多湿かつ高粉塵環境となる実際の吹付け作業での長期運用に耐えうる仕様への改良が必要と判断した。

(3) 改良タイプ性能実験

改良タイプの実現場への適用性の確認を目的に、前述のプロトタイプと同じ現場にて性能実験を実施した。

(a) 改良タイプの変更点

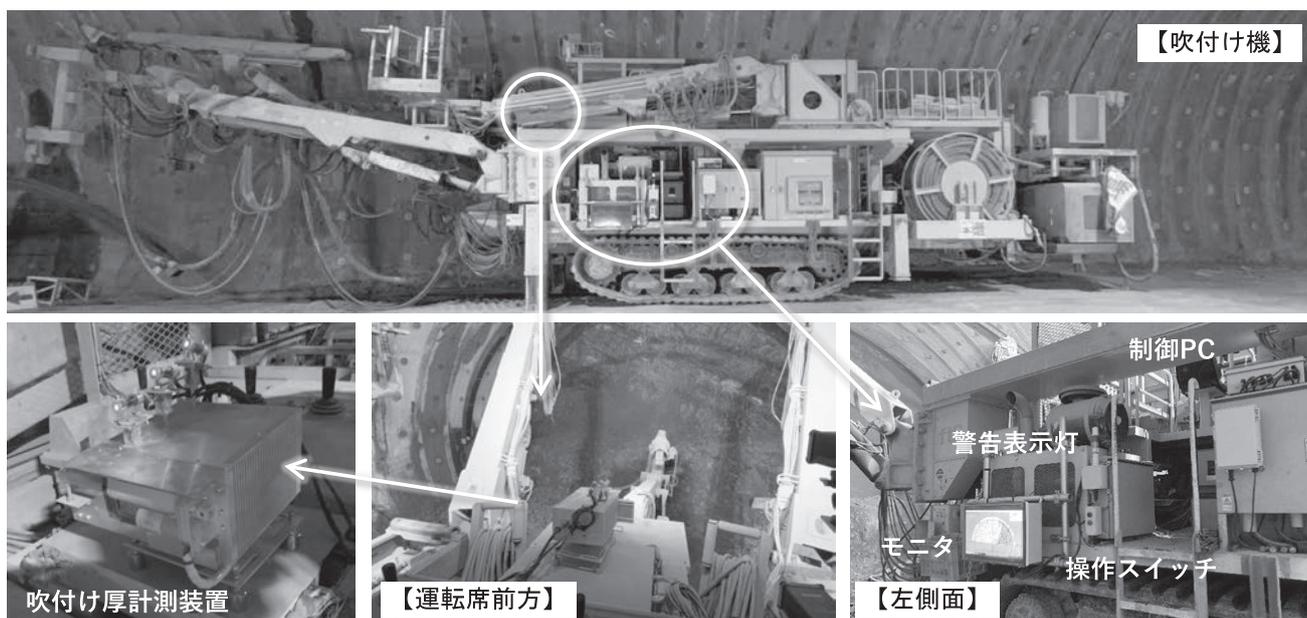
改良タイプのハード面の変更点は、写真一五に示すように筐体をアルミ製に変更して放熱性能の向上を図るとともに、計測に合わせて自動で開閉する電動シャッターを装備して、筐体内部への粉塵の侵入を極力低減する仕様とした。また、モニタの設置位置を後方ホースリール部から前方アウトリガ付近へと変更することで、吹付けオペレーターが作業中に容易に厚さ情報を確認できるようにした。また、計測中心明示用レーザーは視認性を確保するため、レーザーポイン

ターを並べて設置する仕様とした。

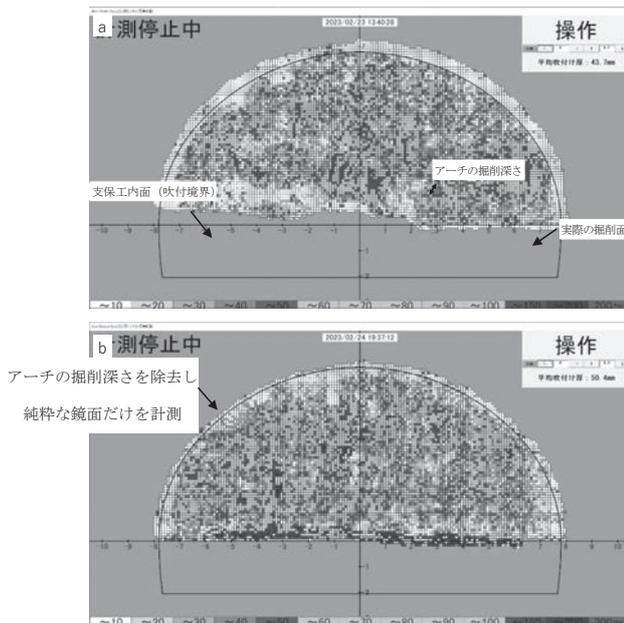
改良タイプのソフト面の変更点は、作業中の粉塵量は使用するコンクリート材料や温度変化により大きく変動するため、点群の除外条件を現場で容易に変更できる仕様にした。また、吹付け厚さの色表示やメッシュの大きさ等も現場で容易に変更できる仕様にした。

(b) 改良タイプの実験結果

複数回の吹付け作業中の実験から、本システムは高粉塵環境下においても安定的な面的計測が可能であることを確認した。吹付けオペレーターが作業中にモニタで容易に厚さ情報を確認でき、点群の除外条件を現場条件に合わせて設定することで、計測値のドリフトもほとんど発生しないことを確認した。また、実験終了後に筐体内部を確認したが粉塵の侵入は見られなかった。しかし一方で、課題として、アーチ付近の地山をどれだけ吹付けても吹付け厚さ表示が変化しない事象が確認された。図一八は吹付け中の厚さ表示画面であり、支保工内面位置を黒線で表示しているが、黒線より外側のメッシュ色がほとんど変化しなかった。これは、支保工設置のために深く掘り込まれるアーチ付近は粉塵が滞留しており、初期値計測時にこの滞留粉塵を計測することが原因と考えられた。そこで、アーチ周辺についてはノイズカットのための点群の除外条件をさらに追加した。点群除去に使用する基準点を中央の1点から、センターより左右に30度、60度のアーチ付近に左右それぞれ2点ずつ追加した。これにより、純粋な鏡面を正確に計測可能なことを確認した。



写真一五 改良タイプの設置状況



図一 8 プログラム修正前後の吹付け厚さ表示画面

4. おわりに

山岳トンネルのコンクリート吹付け作業の効率化と安全性の向上を目的にコンクリート吹付け厚リアルタイム面的計測システム「T-ショットマーカー フェイス」を開発した。開発したシステムは、現場の吹付け粉塵環境下における性能確認実験により、高精度に面的計測が可能であることを確認した。今後は、本技術を全国の山岳トンネル工事に展開し、各現場の環境や施工条件に合わせた改良を加えながら、吹付け作業の完全自動化も見据え、吹付け作業の更なる効率化と

安全性の向上を実現していきたい。

JCMA

《参考文献》

- 1) 厚生労働省：山岳トンネル工事の切羽における肌落ち災害防止対策に係るガイドライン，2016.12.26
- 2) 厚生労働省：山岳トンネル工事の切羽における肌落ち災害防止対策に係るガイドライン（改正），2018.01.18
- 3) 竹中計行，宮本真吾，宮原宏史，富川章：レーザーを用いた吹付け厚さモニタリングシステムの開発，土木学会第76回年次学術講演会，VI-439，2021
- 4) 木下勇人，竹中計行，宮本真吾，宮原宏史，富川章：山岳トンネルのコンクリート吹付け厚リアルタイム面的計測システムの開発，土木学会第78回年次学術講演会，VI-997，2023

【筆者紹介】



木下 勇人 (きのした はやと)
大成建設㈱
技術センター 生産技術開発部 地下空間技術開発室
主任



竹中 計行 (たけなか かずゆき)
大成建設㈱
技術センター 生産技術開発部 地下空間技術開発室
課長



宮本 真吾 (みやもと しんご)
大成建設㈱
土木本部 土木技術部 トンネル技術室
課長