

令和6年度

一般社団法人日本トンネル技術協会研究助成報告書

助成番号：JTA-R6-助3

山岳トンネル建設時における作業者の
肌落ち災害低減に資する研究

令和8年5月25日

助成研究者氏名	林 久資
助成研究者所属	摂南大学

目次

第1章	はじめに	1
第2章	LiDAR センサの概要および反射強度の測定原理	2
第3章	実験概要および試験体の作成について	5
第4章	実験結果および考察	12
第5章	まとめと今後の課題	15

1. はじめに

現在、日本の山岳部でのトンネル施工は、NATM (New Austrian Tunneling Method) で行われることが一般的である。NATM が主流になる以前のトンネル施工方法である矢板工法に比べるとトンネル建設工事による災害発生頻度は大幅に減少したものの、全建設業のそれよりも依然として高い状態にある。そこで、厚生労働省はトンネル施工での肌落ちによる労働災害の防止を図るため「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」を H28 年に策定され、さらには H30 年には改正が行われた。

このガイドラインでは、事業者が講ずることが望ましい事項として、①切羽への立入りを原則として禁止、②肌落ち防止計画の策定、実施、変更、③切羽責任者の選任、④具体的な肌落ち防止対策があげられている。特に、④の具体的な肌落ち防止対策は、切羽での肌落ちのリスクを低減させるものであり、鏡吹付け、鏡ボルト、浮石落とし、水抜き・さぐり穿孔、切羽変位計測、設備の防護対策、フォアポーリング、長尺フォアパイリングなどが示されている。その中でも、鏡吹付けは、トンネル切羽鏡面にコンクリートを吹付ける工法であることから基本的に山岳トンネル工事が行われるすべての現場で適用可能であり、小規模な肌落ちを防止するために有効な工法であると考えられる。

切羽から抜け落ちる岩塊を吹付けコンクリートで保持するためには、鏡吹付けコンクリートの強度や厚さが一定以上必要となる。鏡吹付けコンクリートの必要強度や厚さに関する研究としては、例えば Kikkawa ら²⁾は吹付けコンクリートの弱材齢時の押し抜き強度を測定可能な装置を開発し、押し抜きメカニズム、落石を防ぐための吹付けコンクリートの圧縮強度と厚さの関係を解明している。

一方で、トンネルの施工現場において鏡吹付けコンクリートの強度や厚さを測定するには、切羽面付近には原則人員が立ち入らないことが好ましいため遠隔・非接触でコンクリートの強度を知ることができる手法を用いるべきであるが、現状そのような方法は多くは見られない。そこで、本研究では LiDAR センサから得られる赤外線反射率に着目し、吹付けコンクリートの圧縮強度を遠隔で推定できるかを検討する。

2. LiDAR センサの概要および反射強度の測定原理

LiDAR センサは、レーザー光を対象物に照射し、反射して戻ってくるまでの時間を計測することで、対象物までの距離を算出する計測装置である。この原理により、対象物の位置情報を三次元的に取得し、高密度な点群データとして表現することが可能である。

また、LiDAR センサは距離情報に加えて、対象物表面から返ってくるレーザー光の強度情報も取得できる。本研究で使用した LiDAR センサの外観を図 1 に示す。



図 1 本研究で用いた LiDAR センサ

本研究では、LiDAR センサとして Livox 社製 AVIA を使用した。AVIA は、MEMS ミラー方式を採用した LiDAR センサであり、微小な可動ミラーを高速に駆動することでレーザー光の走査を行う構造を有している。この方式により、従来の回転式 LiDAR と比較して小型、軽量化が可能であり、設定の自由が高い点が特徴である。

MEMS ミラーによる走査は、ランダム性を含む非周期的な走査パターンを形成するため、短時間の計測であっても視野内を広くカバーする点群データを取得できる。この特性により、測定時間の違いによる点群分布の偏りが生じにくい。

また、本センサは、各点群データに反射強度値が付随する形式で出力される。これにより、三次元形状情報と反射特性を同一データとして扱うことが可能である。

なお、本研究で使用した AVIA の主な使用を表 1 に示す。

表 1 Livox AVIA の仕様

項目	内容
質量	498g
特徴	軽量・コンパクト
最大測定距離	450m
非反復走査FOV	70.4°×77.2°
反復走査FOV	70.4° × 4.5°
最大リターン数	トリプルリターン
点群データレート	≥ 240,000points/s
距離精度	約2cm
防水性能	IP67

LiDAR 計測では、特定の波長を有するレーザー光を対象物に照射し、その反射特性を計測する。

本研究で使用した LiDAR センサは、波長 905nm の近赤外領域に属するレーザー光を用いている。近赤外領域のレーザー光は、可視光と比較して材料表面の色の影響を受けにくい一方で、表面の粗さや含水状態などの物理的性状を反映した反射特性が得られやすいことが知られている。このため、近赤外領域のレーザーは、人工衛星や航空機、地上センサなどを用いて対象物を非接触で観測するリモートセンシング分野や建設分野において広く利用されている。一方で、リモートセンシングやハイパースペクトルカメラなどの波長特性を利用した物体の強度の推定などには、複数波長を複合的に用いることが一般的であるが、本研究で用いる LiDAR センサは、905nm の単一波長となる。

LiDAR センサは、高密度な点群データを取得できる特性から、多様な分野で利用されている。代表的な利用分野としては、地形測量や三次元マッピングが挙げられる。航空機や車両に搭載された LiDAR によって地表面を計測し、地形モデルや都市の三次元モデルを作製する手法は、土木計画や防災分野において広く用いられている。

さらに、森林計測や送電線計測などの分野では、LiDAR のレーザーが植生の隙間を通過して複数回反射する特性を利用し、地表面や構造物の形状把握する研究が進められている。これらの応用例の一つとして、LiDAR を用いて森林の点群を取得した例を図 3-3 に示す。これらの用途では、取得される点群の密度やリターン数が計測精度に影響を与えるため、センサの走査方式や性能が重要となる。建設分野においても、LiDAR は構造物や施工対象の

形状計測に活用されている。近年では、点群データを用いた非接触計測手法として、施工状況の把握や形状評価に利用される例が増えている。

3. 実験概要および試験体の作成について

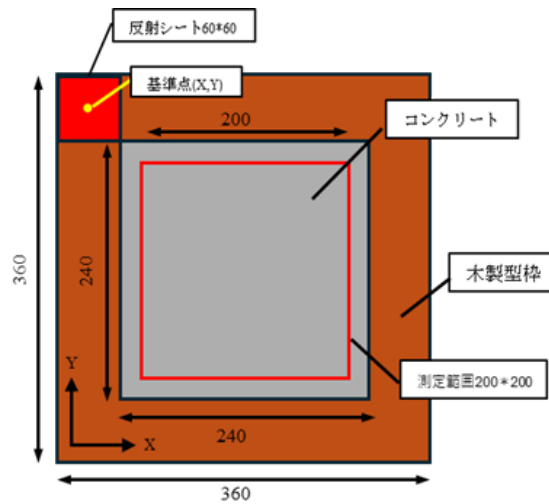


図2 本研究で作成する試験体

表2 コンクリートの配合

種類	セメント	細骨材	粗骨材	水
詳細	太平洋セメント	4号珪砂	6号碎石	水道水
重量(kg)	17.82	27.33	37.95	4.83
比率	1	1.5	2.1	0.3

赤外線反射率による強度推定の可否を調べるため、図2に示す測定用試験体を3体作製した。コンクリートの材料は表1に示す材料を使用した。本研究では、材料条件による影響を極力排除するため、混和剤および吹付けコンクリートに通常用いられる急結剤は使用していない。

コンクリートは所定の配合に従い、各材料を投入後、容器内において器具を用いて均一となるまで十分に練り混ぜた。図3に、供試体作製時におけるコンクリートの練り混ぜ状況を示す。



図3 コンクリート供試体作製時における練り混ぜ状況

練混ぜ後のコンクリートを木製型枠内に流し入れ、型枠内に空隙が生じないように適切に締固めを行った。図4に、木製型枠に打設した直後の供試体の様子を示す。その後、金ごてを用いて表面を平滑に仕上げた。

型枠は、LiDAR測定時のガイドとして使用するため、供試体作製後も脱枠せず保持した。LiDARによる反射強度測定用供試体は木製枠を用いた平板状供試体とし、その寸法は240mm×240mmとした。本研究では、反射強度測定用として平板状供試体を3個作製した。

また、これとは別に、圧縮強度試験用として円柱状供試体を作製し、各材齢につき3本ずつ、合計13材齢×3本の計39本とした。圧縮強度試験は供試体を破壊する試験であるため、同一供試体を複数材齢で使用することはできない。なお、これらの供試体はいずれも同一条件で作製したコンクリートを用いている。



図4 木製枠に打設した直後のコンクリート供試体

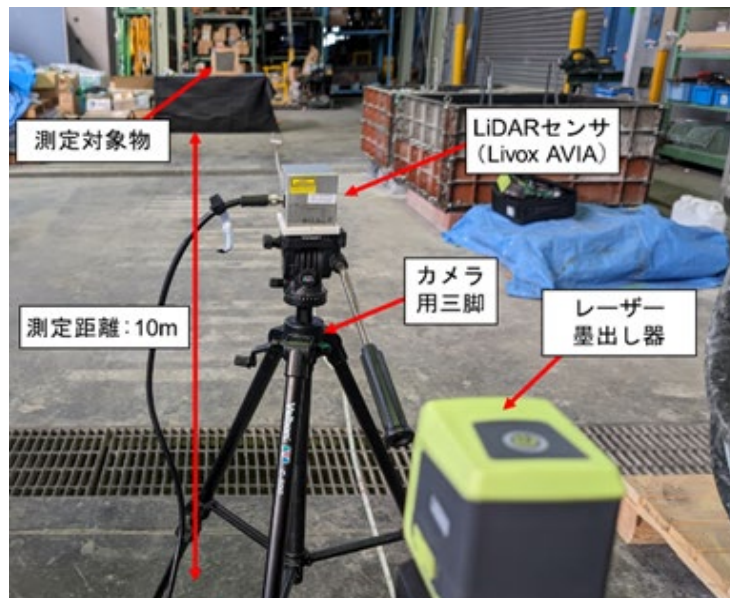


図5 測定状況

試験体のコンクリートを打設した後、LiDAR センサ (Livox 社 AVIA) による赤外線反射率の測定、水分計 (ケツト科学研究所 HI-520-2) による水分の測定、圧縮試験機 (島津製作所 AGS-10kNX) による圧縮強度の測定を行った。LiDAR センサによる赤外線反射率の測定は図-5 に示すように試験体と LiDAR センサ間の距離を 10m とし、水平器とレーザー墨出し器を用いて試験体と LiDAR センサが正対するように設置した。LiDAR センサの波長は

905nm（赤外線），測定間隔は秒間 240,000 点である．測定は 60 秒間とし，位置基準を決めるために木製型枠に反射シートを貼付した状態での測定を行った後，コンクリートの赤外線反射率を調べるために，反射シートを除去して測定を行った．水分量の測定は，水分計を用いてコンクリート表面の 4 隅と中心の 5 点を測定した．圧縮強度は，コンクリート打設時に $\phi 100 \times 200 \text{mm}$ の供試体を作製し，圧縮試験が可能な強度になった時点から試験を開始した．荷重速度は毎秒 0.2N/mm^2 の速度に設定した．

圧縮試験は，LiDAR 測定で取得した反射強度データと圧縮強度の関係を把握するため，圧縮試験用に作製した円柱状のコンクリート供試体を用いて実施した．供試体の形状および寸法 JIS A 1108 に準拠して成形した．圧縮強度試験に用いた供試体の外観および破壊状況を図 6 に示す．

圧縮試験は，AGS-10KN および UH-F1000KNX の圧縮試験機を用いて一定速度で荷重を加え，供試体が破壊するまでの最大荷重を記録した．得られた最大荷重から圧縮強度を算出した．



図 6 圧縮強度試験用コンクリート供試体の外観(左：荷重前，右：破壊後)

水分量試験は，LiDAR 測定で取得した反射速度データとコンクリート表面の含水状態との関係を把握するため，同一試験体から採取した試料を用いて実施した．

水分量測定には，コンクリート水分計 HI-520-2((株)ケツト科学研究所製)を使用した．本水分計は，試験体表面に測定部を接触させることで，非破壊的に表面近傍の水分量を測定する装置である．

測定は，LiDAR による反射強度測定と同一材齢において実施し，測定位置は LiDAR による反射強度測定領域内における供試体表面の左上，右上，左下，右下および中央の計 5 点と

した。これら5点の測定値の平均値を、各材齢における供試体表面の水分量として用いた。

本研究では、LiDAR 測定により取得した反射強度データを三次元点群データとして処理・解析するため、オープンソースの点群処理ソフトウェアである Cloud Compare を使用した。Cloud Compare は、大規模な点群データの可視化や任意視点からの表示が可能であり、本研究における点群データの確認作業に適したソフトウェアである。



図7 LiDAR 計測を実施した現場の実景写真

図7に、LiDAR 測定を実施した実際の現場状況を示す。LiDAR は計測範囲内の地物を面的に取得するため、周辺構造物を含む現場全体の点群が得られる。

LiDAR センサから取得した生データは、CSV 形式に変換した後、Cloud Compare に取り込み、三次元点群として可視化した。これにより、三次元空間における点群の分布状況を把握するとともに、各点の座標情報に反射強度が一体として取得されている対応関係を確認した。

図8に、Cloud Compare 上で表示した点群データを示す。図8(a)は現場全体の点群を正面から表示したものであり、LiDAR により面的に取得されていることを示している。また、図8(b)は同じ点群を側面方向から表示したものであり、点群が奥行きを持つ三次元的な構造として取得されていることが確認できる。

また、図8(a)の中の赤色で示した領域は、本研究のコンクリートの解析対象範囲である。この赤色表示は、解析対象範囲であり、位置を明確にするため、当該領域の反射強度を人為的に最大に設定して表示している。一方、その他の点群の色分けは反射強度に基づくものであり、Cloud Compare に実装されている一般的なカラースケール(青-緑-黄-赤)を用いて、青色から赤色へと変化するにつれて反射強度が大きくなることを示している。

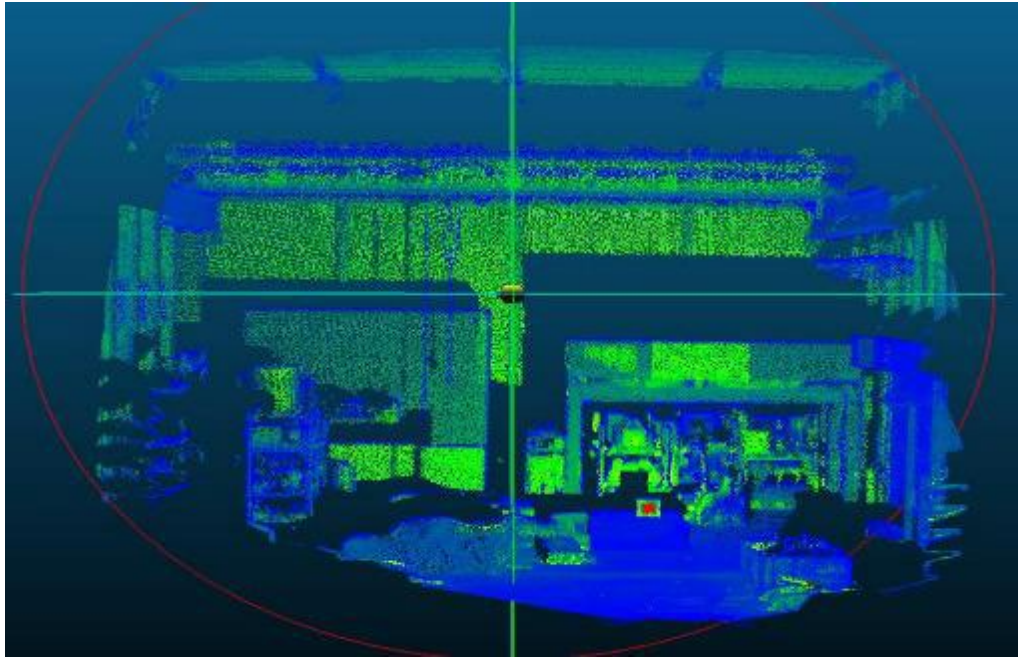


図 8(a) Cloud Compare による点群表示（正面表示）

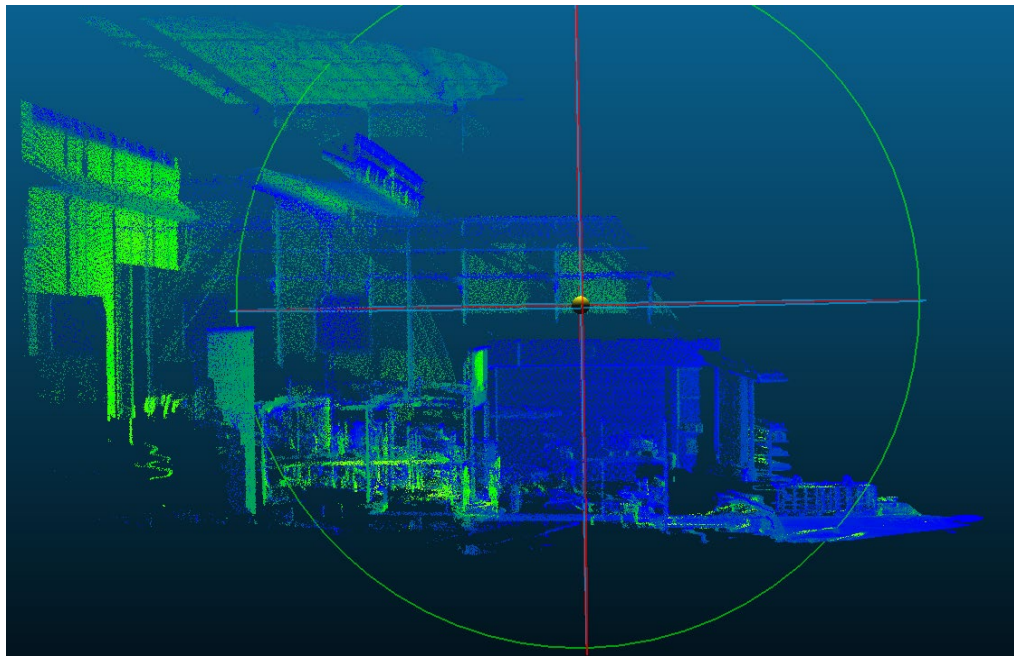


図 8(b) Cloud Compare による点群表示（側面表示）

コンクリート供試体については、反射シートから求める基準座標は、基準点から X 軸の正の方向に 50mm, Y 軸の負の方向に 50mm に進んだ位置とした。さらに、基準座標から X 軸の正の方向に 200mm, Y 軸の負の方向に 200mm の範囲を解析対象領域とした。(図 9 参照)

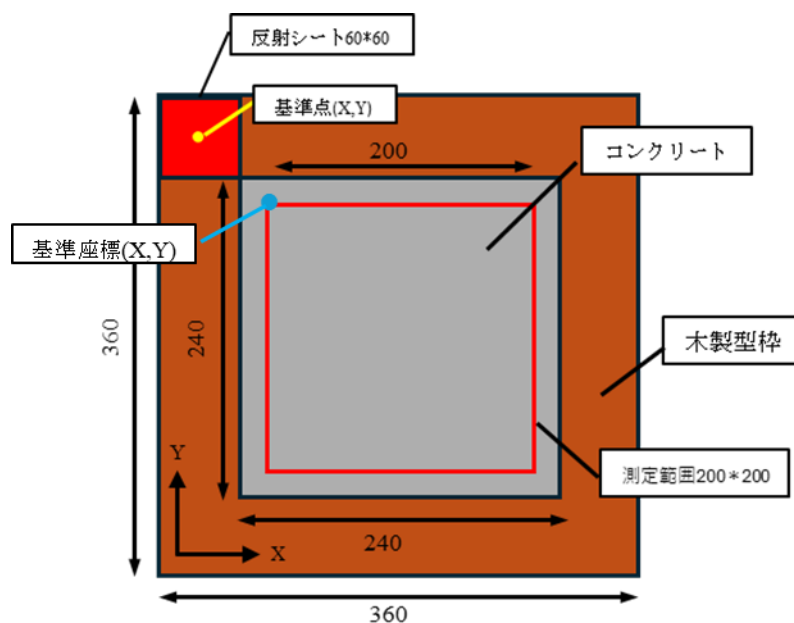


図 9 コンクリート供試体に対する解析対象領域

本研究では、LiDAR 反射強度、水分量および圧縮強度について、材齢の異なる条件で測定を行った。そのため、表 3 に各材齢における試験実施状況を整理して示す。図中の○は、当該材齢において実施した試験を表している。

表 3 材齢ごとの各試験の実施状況

コンクリート 材齢 (h)	6	7	8	9	10	11	12	25	26	27	28	29	672
LiDAR測定	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
水分量測定	—	—	—	—	—	○	○	○	○	○	○	○	○
圧縮強度試験	—	—	○	—	○	—	○	○	—	—	—	—	○

4. 実験結果および考察

各材齢におけるコンクリート供試体の LiDAR 反射強度の分布特性について検討する。各材齢につき三本の供試体を用いて測定を行い、得られた反射強度データを基に旗ひげ図、棒グラフおよび加積曲線を用いて比較・分析を行った。

なお、本研究では解析の都合上、測定した材齢をいくつかの区分に整理して図示している。具体的には、打設後 6,9,12 時間を早期、25,27,29 時間を中期、672 時間を長期として分類した。

図 10 に、各材齢におけるコンクリート供試体の LiDAR 反射強度の分布を箱ひげ図で示す。箱ひげ図は、各材齢における反射強度の中央値および四分位範囲を示すことで、材齢間における反射強度の代表値の変化とばらつきの違いを比較することが可能である。

図より、早期材齢では反射強度の中央値は比較的低い値を示しており、四分位範囲も小さいことが確認された。一方、中期～後期材齢では中央値が高反射強度側へ移動することがわかった。中期～後期材齢では、ばらつきが多少大きくなるものの、材齢が進むにつれて LiDAR センサから得られる反射強度は大きくなる傾向が確認出来た。

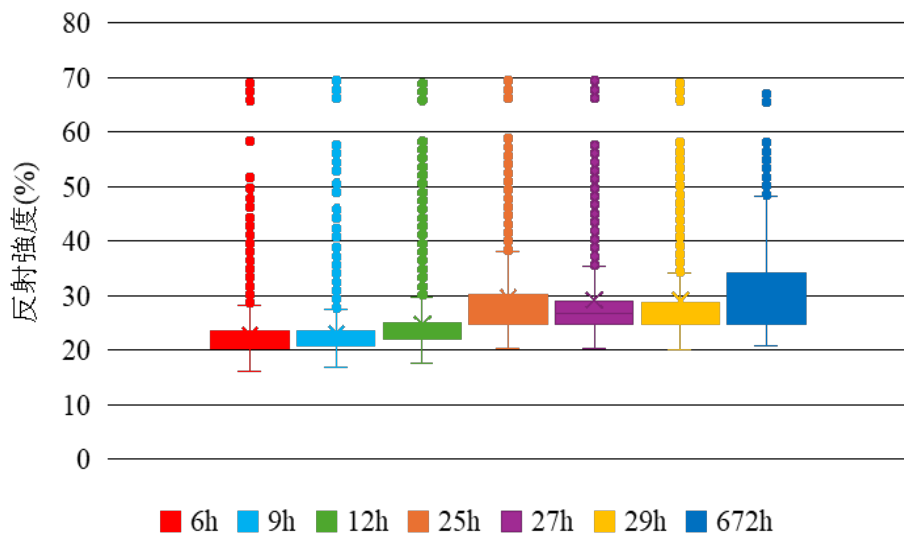


図 10 各材齢の反射強度分布の箱ひげ図

図 11 に、材齢ごとに取得したコンクリート供試体の反射強度データを統合して示したヒストグラムを示す。

図より、初期材齢では反射強度は主に 20~30%付近に集中して分布しており、低反射強度側に分布のピークが確認される。中期材齢では、分布の中心が高反射強度側へ移動するとともに、分布範囲が拡大していることが分かる。さらに、後期材齢では、高反射強度側の割合が増加し、分布全体が高反射側へ偏る傾向がみられた。

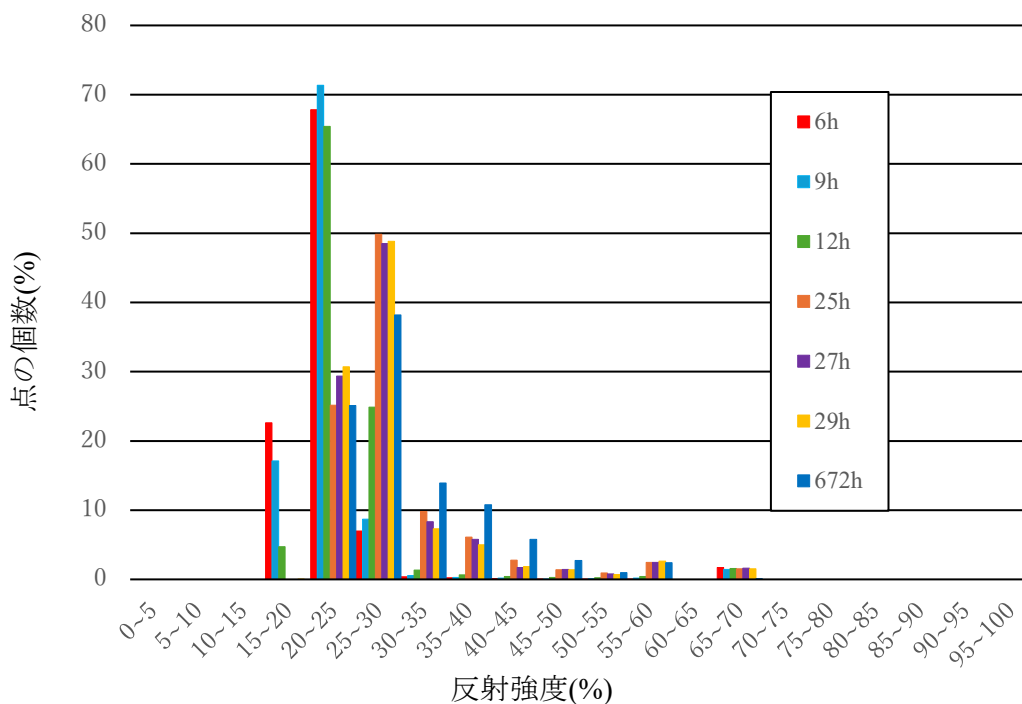


図 11 コンクリート反射強度分布（ヒストグラム）

次に、コンクリート供試体に対して取得した LiDAR 反射強度データの分布特性を、加積曲線を用いて整理・比較する。加積曲線は、反射強度の全体的な分布傾向を累積割合として表現するものであり、材齢の違いによる反射特性の変化を把握するのに有効である。

反射強度分布の全体像をしめすためにすべての材齢を同一図中に示した加積曲線と、材齢の進行に伴う変化を明瞭に示すために代表的な材齢を抽出した二種類の加積曲線を図 12 に示す。弱材齢では低い赤外線反射率の分布が多く、材齢が進むほど比較的高い赤外線反射率の分布が増えることがわかる。

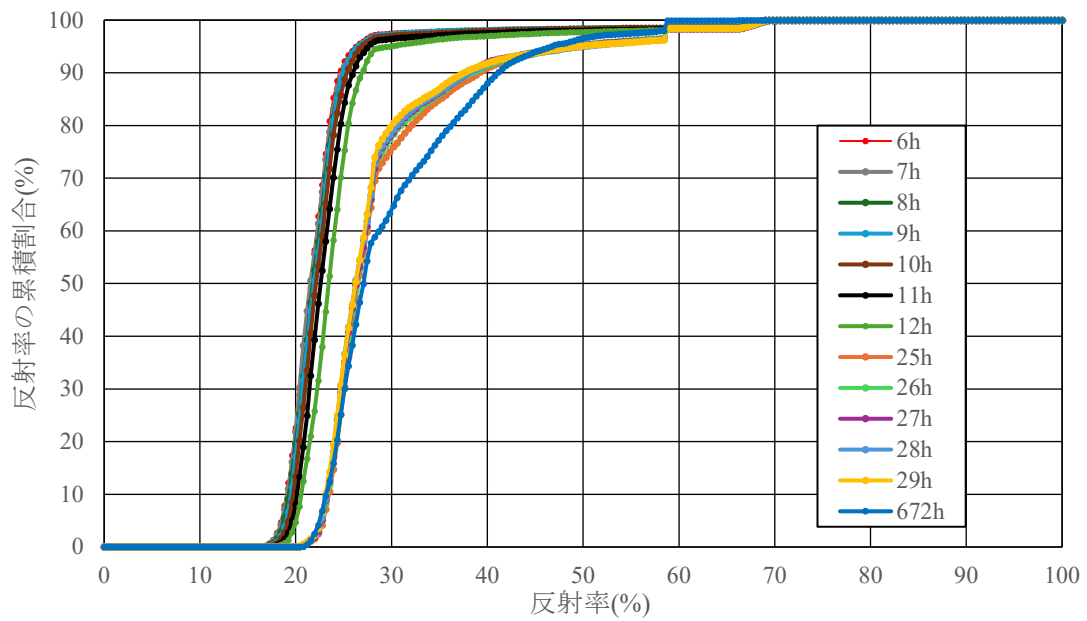


図 12(a) 全材齢におけるコンクリート供試体の LiDAR 反射強度の加積曲線

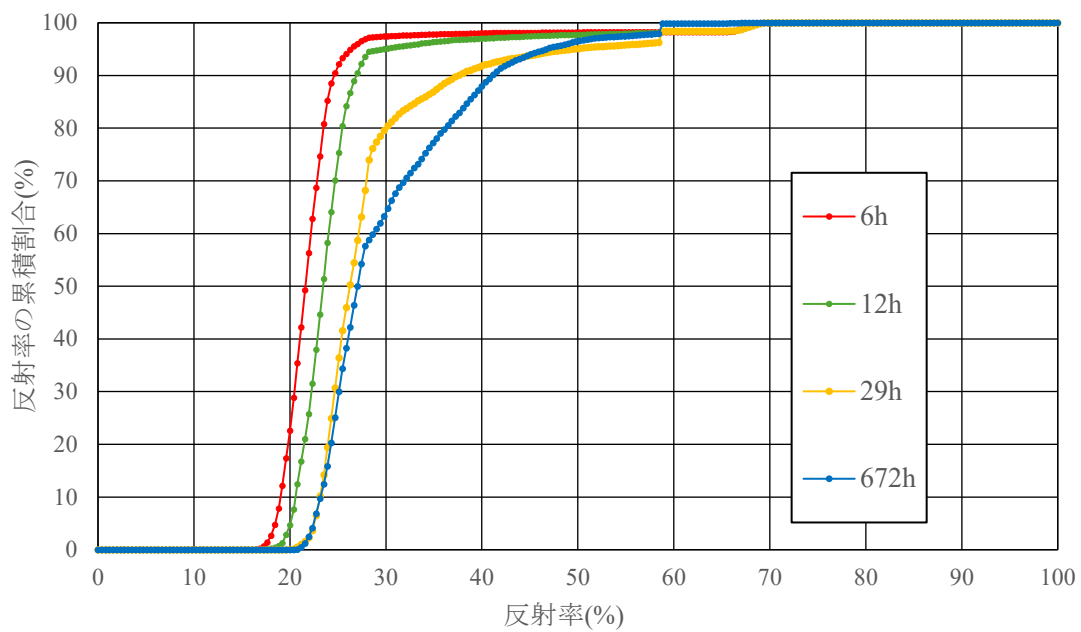


図 12(b) 代表材齢におけるコンクリート供試体の LiDAR 反射強度の加積曲線

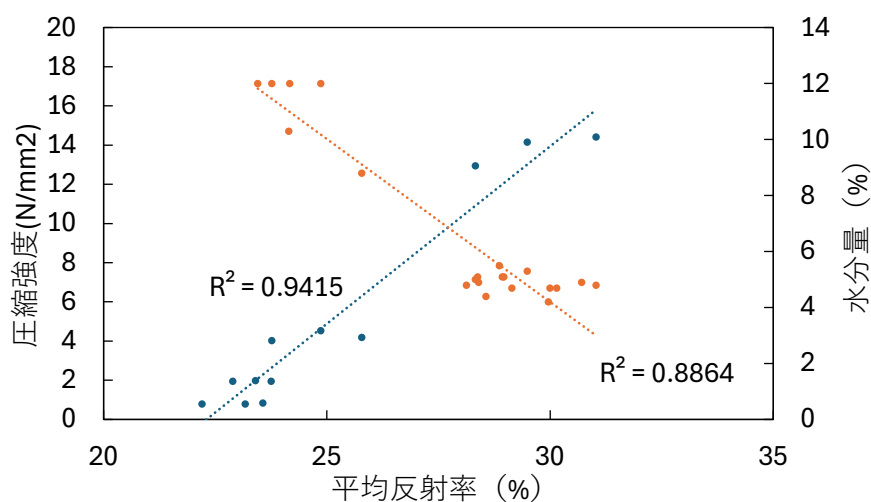


図 13 反射強度と圧縮強度および水分量の関係

図 13 には各材齢時の試験体の平均赤外線反射率と、水分量、圧縮強度のグラフを示す。平均赤外線反射率と圧縮強度では正の相関が、平均赤外線反射率と水分量では負の相関が得られ、決定係数は約 0.94 と約 0.89 と高い結果となった。

今回の実験ではコンクリートの平均赤外線反射率と圧縮強度・水分量にはそれぞれ $R^2=0.94$, 0.89 という強い相関が確認できた。この結果により、LiDAR センサでコンクリートの赤外線反射率を測定することによってトンネルの鏡吹付けコンクリートの圧縮強度が推定できる可能性が示唆された。また、赤外線反射率からコンクリートの表面の水分量を推定できる可能性も示唆された。

5. まとめと今後の課題

LiDAR センサによる吹付けコンクリートの強度推定の可否を調査するため、基礎実験として LiDAR センサによって得られるコンクリートの赤外線反射率と圧縮強度の関係を調べる実験を実施した。その結果、赤外線反射率から水分量・圧縮強度を推定できる可能性があることが分かった。今後、水分量・圧縮強度の推定の精度が高くなれば LiDAR センサによる鏡吹付けコンクリートの強度推定が現実的なものとなる可能性がある。さらには、トンネルでは湧水箇所の特特定や既設トンネルの結露の確認・シート接着工の施工の可否を調べるのに活用できる可能性がある。ただし、今回の実験は普通コンクリートに対して LiDAR センサと測定対象の距離が一定・正対する条件で行った試験であり、吹付けコンクリートのように添加剤が加えられ、表面に凹凸のあるコンクリートに対して同様の結果が得られるかについては今後も検討が必要である。

謝辞

本研究は、令和 6 年度一般社団法人日本トンネル技術協会研究助成を受けて実施したものである。また、実験およびデータの取りまとめにあたっては、株式会社ケー・エフ・シーの協力を得た。ここに記して、深く感謝の意を表する。