

報告 小径バルーン構造によるトンネル覆工コンクリート養生システムの開発と養生効果の調査

梶尾 孝之*1・細田 暁*2・揖斐 剛*3・八巻 大介*4

要旨: 本報告では NATM トンネルの覆工コンクリートの養生のために開発した養生システムの開発の経緯と各種機能について示し、さらに実現場へ適用して本養生システムの適用性と養生効果を検証した。小径バルーン構造による養生システムは、小径バルーンの長さを変化させることでトンネル断面の変化に追従できるシステムである。養生システムがトンネル覆工コンクリート面に密着して養生シートの覆工面との間に適切な養生空間を創造することを可能にした。また、実現場において養生システムを設置して、実現場への適用性を確認し、表層透気試験と表面吸水試験によりコンクリートの緻密化の効果を示した。

キーワード: NATM, 覆工コンクリート, 養生, 小径バルーン構造, 表面吸水試験, 品質確保

1. はじめに

わが国の社会資本ストックのうち道路・鉄道は約40%を占めており¹⁾、そのうち道路トンネルは、約1万箇所²⁾で総延長は5000kmに及んでいる。図-1に道路種類別のトンネル箇所数を示す²⁾。トンネルの多くは高度成長期に施工されたものが多く、20年後には施工後50年を経過するトンネルの数が増加するため、メンテナンス等の対策が講じられている。

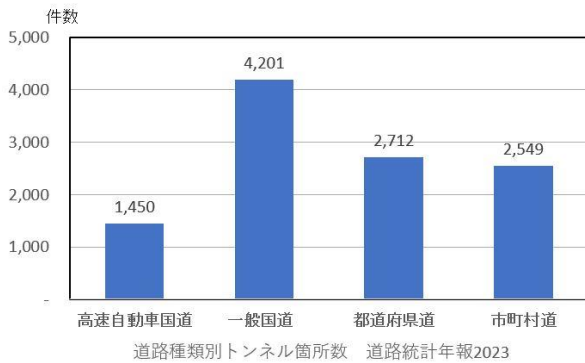


図-1 道路種類別トンネル箇所数²⁾

一方で、新設トンネルは年間約400工区で施工されており、そのうち山岳トンネルは約270工区である³⁾。山岳トンネル施工法は NATM 工法が主体であり発破等による掘削後、支保工の建込みとロックボルトの打設、遮水シートの施工の後に覆工コンクリートが施工される。覆工コンクリートは、機能面では、風化等の影響からトンネルアーチ形状を保持するとともに、地山の変形や崩落の防止、事前に施工されたロックボルトや遮水シートを保護し、浸出水(湧水)の処理の目的で施工される。また環境面では長期間にわたり内空断面の美観を整える

目的で施工される。社会資本ストックの延命化が検討される中で、新設トンネル構造物を長期に渡り健全な状態で保持するため、覆工コンクリートは施工時の品質管理を十分に行い、可能な限り密実でクラックが発生しないように施工時での品質確保が必要である。

2. 開発の背景と目標

2.1 従来工法の利点と欠点

トンネル覆工コンクリートの養生工法は多くの工法が提案されてきたが、従来の覆工コンクリートの養生工法には以下に示す改善・改良すべき課題があった。

- トンネル断面に合わせた養生システムを現場毎に製作するため、工事終了後に大量の廃棄物が生じること
- 道路トンネルでは一般部と拡幅部(非常駐車帯)の断面用の2基の養生システムが必要であること
- 水を散布する工法は、水源の確保から給水までのシステム全体が複雑で現場施工が煩雑であること
- 養生システム全体重量が大きい場合、トンネル内で牽引移設作業の安全確保が容易でないこと



写真-1 既存の養生システム例(給水養生型)

*1 大嘉産業(株) 産業資材事業部 開発部(正会員)

*2 横浜国立大学大学院 都市イノベーション研究院 教授 博(工)(正会員)

*3 大嘉産業(株) 産業資材事業部 開発部

*4 西松建設(株) 北日本支社 土木技術部 計画課



写真-2 既存の養生システム例（養生シート貼付型）

既存の養生システムの概要を写真-1、写真-2、表-1に示す。

これらの課題の改善・改良を目標に新しい覆工コンクリートの養生工法の開発を実施した。

2.2 新工法開発の目標策定

新工法の技術開発にあたり、次にあげる内容を開発目標として開発に取り組んだ。

- 再利用可能で廃棄物がほとんど出ないシステムとすること。
- 1つのシステムで任意の断面に適用可能で、一般部、拡幅部などトンネル内での断面変化にも同じシステムで対応可能であること。
- 養生シートを備えた小径バルーンを覆工面に密着させ、養生空間を創ることで若材齢コンクリートの水分だけで保湿養生を可能にすること。
- 軽量で現場内での移動、移設作業が安全、簡便に行えること。

3. 小径バルーン構造による養生工法の開発

3.1 養生工法の概要

図-2、写真-3に小径バルーンを用いた養生システムを示す。

本工法は直径15cmの小径バルーンをトンネル延長方向1.5m毎に配置し、小径バルーン内に注気することで養生シートを持ち上げて覆工面に押し当てる構造である。

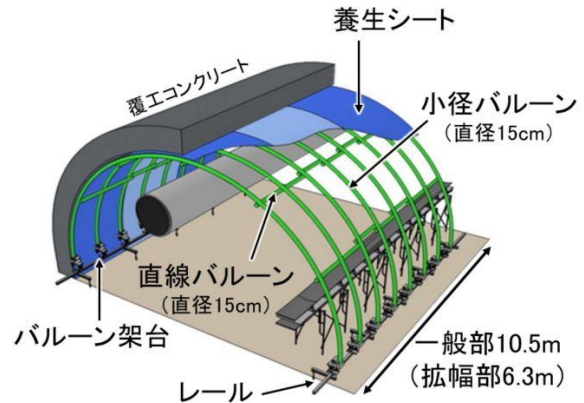


図-2 小径バルーンを用いた養生工法概略図



写真-3 小径バルーンを用いた養生システム

既存の養生工法はトンネルのアーチ形状が現場毎に異なるため、現場毎に養生システムと養生材料を設計・製作し、使用後には廃棄する必要があった。

小径バルーンはトンネルのアーチ形状に極めて良く追従することができ、養生シートの覆工面への密着性が向上し、覆工面と養生シートの間に密閉空間を形成する。

表-1 既存の養生システムの概要

	給水養生型	シート貼付型
構造	<ul style="list-style-type: none"> 組立てた鋼材の外側に養生シートを展張する 養生シートと覆工コンクリート面の隙間に給水して養生環境を保持する 	<ul style="list-style-type: none"> 粘着シートを覆工面に貼り付けることで養生環境を保持する 粘着シートの防水、保湿性能に期待する
施工性	<ul style="list-style-type: none"> 鋼材組立作業に合わせて鋼材を搬入 鋼材の組み立てに合わせて養生シートおよび給水システムを設置する 	<ul style="list-style-type: none"> 高所作業車を用いて粘着シートを貼り付けるだけの作業であり、施工は容易である
長所	<ul style="list-style-type: none"> コンクリートの浸水養生の環境を構築することができる 	<ul style="list-style-type: none"> 粘着シート単体の施工で完了できるため施工面で有効である
短所	<ul style="list-style-type: none"> トンネル断面の変化に追従できない システム全体の重量が大きく、移動、移設が容易でない 給水用の水源の確保し、給水システムの構築が必要 現場の走行路に水が溜まる可能性がある 	<ul style="list-style-type: none"> トンネル断面全体を覆う場合は、シート材料の取り換え手間がかかる 大量の廃棄物が出る 覆工面が結露したり、湿度が高い場合は張り付かない

トンネル延長方向にはアーチ状の小径バルーンと同素材の直線バルーンを配置して小径バルーンによるフレーム構造の形状と安定性を保持する構造とした。小径バルーンの内圧は制御装置で一定 (1MPa) に制御され、内圧の管理範囲を外れた場合は自動的に加圧・減圧するシステムを備えており、空気漏れが生じた際の安全性を確保している。

小径バルーンを用いた養生工法は、布製の袋体で製作されており、鋼材を組み合わせて構築する養生工法に比べて軽量で取り扱いが容易である。また、巻き取り装置に巻き取った小径バルーンの長さを調整して使用することが可能であるため、同じ養生システムを異なる断面のトンネルに転用することが可能である。

3.2 基礎実験

(1) バルーン (チューブ状の袋体) 形状の検討

バルーン (チューブ状の袋体) をトンネルのアーチ形状に沿わせるため、図-3 に示す直径の異なる二種類 (φ15cm, φ50cm) のアーチ形状のバルーンを製作し、写真-4、写真-5 に示すようにバルーンの立ち上がりとアーチ形状を繰り返し検討した結果、内圧を 1MPa とした場合、直径 15cm の小径バルーンの方が屈曲、折れシワ等の変形が発生せずアーチ形状に立ち上がることを確認した。さらに施工技術総合研究所のトンネル実験施設で照明、風管等、実現場の仕様に見合う荷重を載荷し変形特性を確認して実用化に向けた改良を行った。

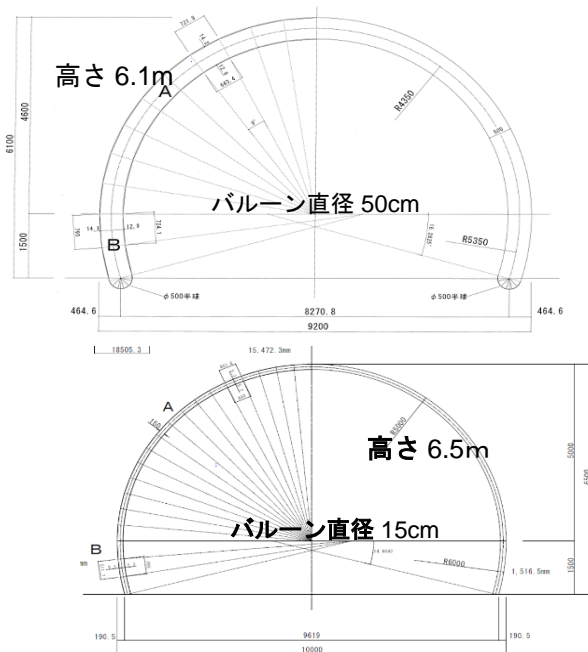


図-3 バルーン(チューブ状の袋体)形状の検討断面図

(2) 養生システムの立ち上げ機構の検討

トンネルの断面変化に適用可能な養生システムとするた

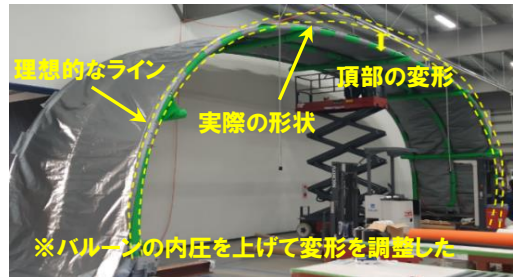


写真-4 室内実験の状況 (バルーン直径 15cm)

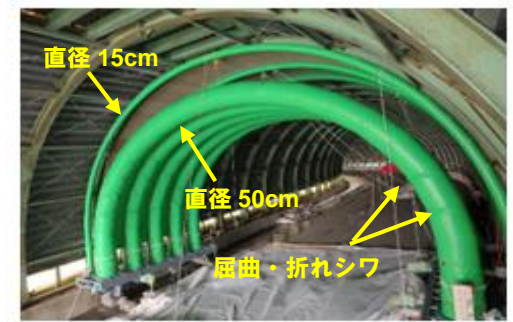


写真-5 バルーン形状の検討実験の状況

め、小径バルーンに注気可能な長さを変化させる機能を持たせること、また覆工コンクリート面に密着させるための構造を検討した。その結果、注気されるエアを遮断して巻き取る装置を製作することで長さ調整を可能にした。また、覆工コンクリート面への小径バルーンの密着には、写真-6、図-4 に示すジャッキアップ機能とスライド機能を備えた基部構造とした。ジャッキアップ機能とスライド機能は、システムの移設時には覆工面と養生システム間に隙間を作り、移設作業を容易に行うことを可能にした。



写真-6 小径バルーン立上げ機能

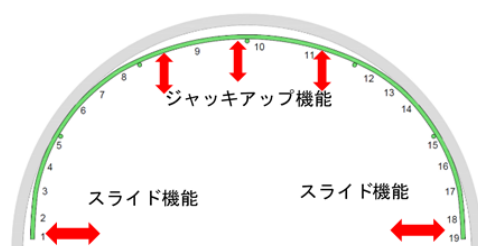


図-4 ジャッキアップスライド機能の模式図

小径バルーン底部の架台をジャッキアップしスライド機能を用いてバルーンを覆工面に密着させて密閉した養生空間を創造する。また、移動、移設時にはスライド機能を用いて小径バルーンを覆工面から離し、さらにジャッキダウンを行うことでシステム全体を覆工面から離し、スムーズな移設を容易にする。

小径バルーン内部に注気するエアユニットは、トンネル坑内での注気作業時に小さなスペースで作業が可能にするために小型コンプレッサーと内圧制御装置を中心とするコンパクトな装置とした。小径バルーン内の空気の内圧を測定、制御する機能を備え、減圧時には自動的に空気を注入するシステムになっており、養生システムの一部として坑内に併設される。

(3) 小径バルーンの荷重載荷試験と構造解析

施工技術総合研究所の模擬トンネル実験場で小径バルーンへの荷重載荷実験を行い、小径バルーンの変形量を計測した。荷重の大きさと載荷位置を図-5、載荷実験の状況を写真-7に示す。ジャッキアップ機能を用いた場合、高所作業車を用いて小径バルーンが覆工コンクリート面に沿って密着していることを触手で確認した。

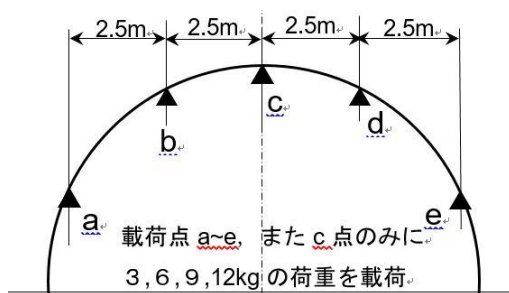


図-5 荷重大きさと載荷位置



写真-7 トンネル実験施設での載荷実験の状況

載荷荷重と変形量のデータから小径バルーンの構造解析を有限要素法非線形解析ソフト「ANSYS」を用いて行った。解析断面を図-6、解析結果を図-7、図-8に示す。

アーチ形状の小径バルーンを基部の架台に取付けることで解放状態からトンネル断面に沿って変形し、その反力で覆工面に密着する結果となった。

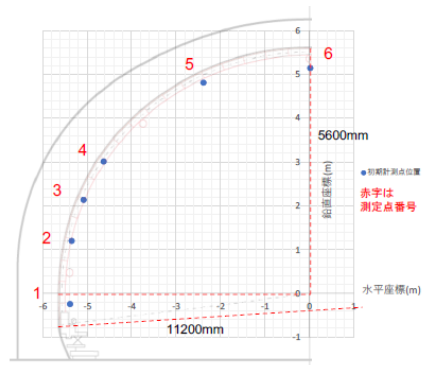


図-6 バルーン形状の解析断面図

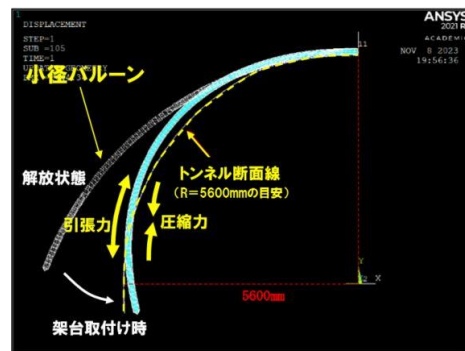


図-7 小径バルーンの形状解析結果 (その1)

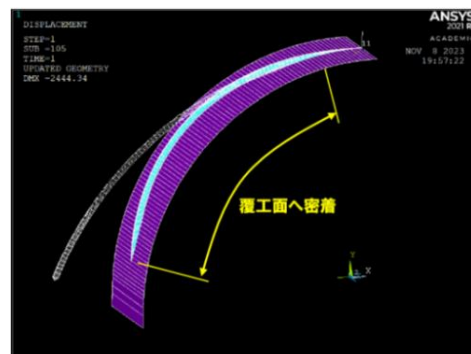


図-8 小径バルーンの形状解析結果 (その2)

表-2に小径バルーンの接触力の解析値(N)を示す。150mm以上のジャッキアップを行うことで小径バルーンはトンネル覆工面に接触すること、接触力はトンネルアーチ底部が大きいことがわかった。

表-2 覆工面へのバルーンの接触力の解析値 (N)

250mm	952.2	218.8	211.1	210.4	208.1	105.1
200mm	453.0	189.0	182.1	180.3	178.0	89.8
150mm	3.3	138.3	128.2	129.0	126.1	63.3
100mm		94.1	64.7	62.5	60.4	29.7
50mm			22.2	14.7	9.7	3.9
0mm						
ジャッキアップ	測定点1	測定点2	測定点3	測定点4	測定点5	測定点6

4. 養生効果の確認

4.1 温湿度測定と覆工コンクリートの品質試験

トンネル実現場において養生の効果を検査した。覆工コンクリートはセントルを用いての打込み後、セントルでの養生を1日行い、脱型直後から本システムによる養生を開始し、6日間養生を行った。覆工のコンクリート配合は21-15-20Nであり、水セメント比は59.9%となっている。なお、試験期間中は、トンネルは掘削中で貫通していない環境である。

写真-8、写真-9に覆工面への密着状況および品質試験状況を示す。小径バルーンがトンネルアーチ断面に沿って密着し、小径バルーンが養生シートを覆工コンクリートに押し当てている状況を確認した。



写真-8 小径バルーンの覆工面への密着状況

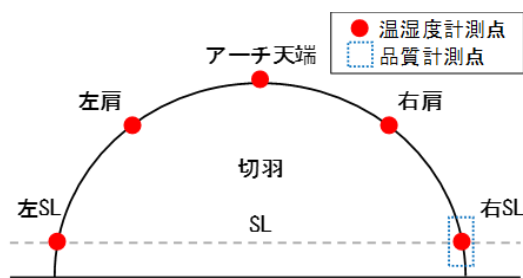


図-9 温湿度と品質計測位置図

養生シート内の温湿度の確認のため、図-9の各計測点にて、養生シートと覆工コンクリートの間にセンサを設置した。比較検討を行う目的で、同じブロックにてセントル養生のみ（脱型後は無養生）の箇所にも同様のセンサを配置して計測を行った。

覆工コンクリート打込み後の約1か月後に品質試験として、1) 表面吸水試験 (SWAT) および、2) 表層透気試験 (Torrent 法) を図-9のSLの高さで行い、同ブロックのセントル養生のみの結果と比較を行った。



写真-9 品質試験の実施状況

4.2 温湿度測定と覆工コンクリートの品質試験

図-10に左SL部での養生中の温湿度履歴、図-11に天端部での温湿度履歴を示す。

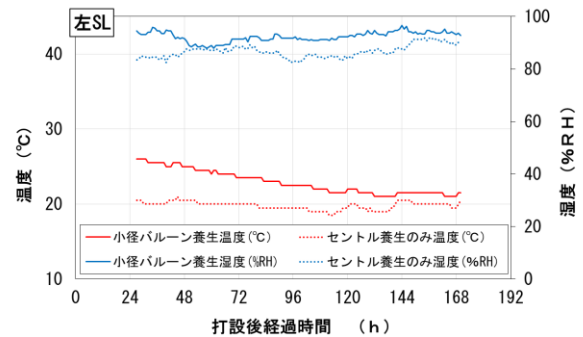


図-10 S L部における温湿度履歴

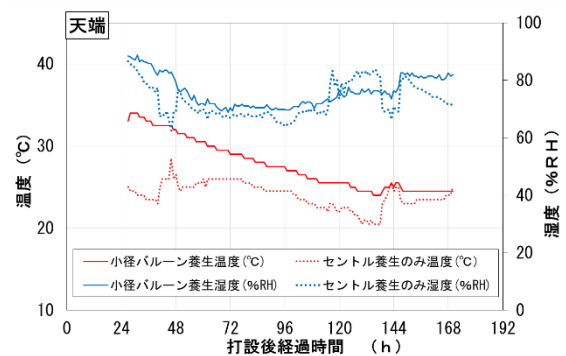


図-11 天端部温湿度履歴

SL 付近の養生シート外では養生中の平均温度が 20℃程度に対し、養生シート内では、初期に 26℃程度まで上昇し水和反応が収束するにつれて緩やかに下降している。天端部においては、暖かい空気が上部に滞留するため、SL 部よりも 5℃程度高く、養生シート内の初期温度は 34℃程度となった。また、湿度は養生外の空間においても 80%程度と高い湿度の環境下であった。一方で、SL 部の養生シート内では 90%に近い湿度を維持しており、養生シートの高い保温保湿効果を確認した。なお、図中の一時的な著しい変化は、養生区間付近での重機の稼働による影響である。次に、覆工コンクリートの品質評価として、各試験の評価ランクを表-3に示す。

表-3 品質試験方法と評価ランク⁴⁾

試験項目	評価ランク	良	一般	劣		
	表面吸水試験 (SWAT)	表面吸水速度 P_{600} (ml/m ² /s)	0.0 ~0.25	0.25 ~0.50	0.50 ~	
表層透気試験 (Torrent法)	評価ランク	優	良	一般	劣	極劣
	表層透気係数 kT (×10 ⁻¹⁶ m ²)	0.001 ~0.01	0.01 ~0.1	0.1 ~1	1 ~10	10 ~100

表面吸水試験の試験結果を図-12に示す。表面吸水試験では、10分時点での吸水速度 p_{600} を用いて評価を行った。セントル養生のみの試験結果は0.245ml/m²/sであり、「一般」に近い「良」に分類される評価であった。一方で、小径バルーン構造のシート養生を行った覆工コンクリートの試験結果は0.182ml/m²/sであり、26%程度の品質が向上し、高い吸水抵抗性が確認された。

表層透気試験での結果を図-13に示す。表層透気試験においても、セントル養生のみでは「劣」と評価されていた結果に対し、本養生を行うことにより、「一般」へと品質が改善し、セントル養生のみのコンクリートよりも緻密なコンクリートとなった。

これらの計測時の含水率は、電気インピーダンス式の含水計で平均4.9%であり、表層品質を適切に評価できる含水状態であった。

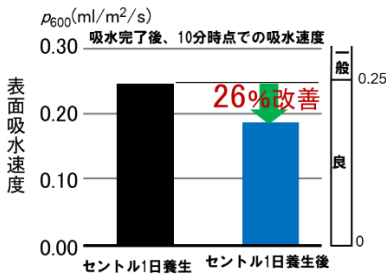


図-12 表面吸水試験 (SWAT 法) 結果

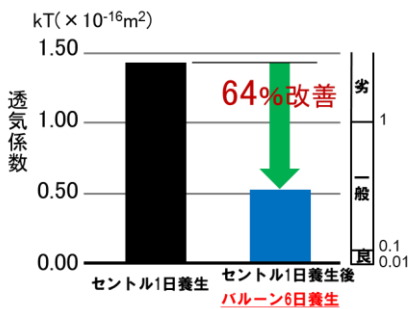


図-13 表層透気試験 (Torrent 法) 結果

5. 実現場での適用事例

本システムを実トンネル現場に適用した状況を写真-10に示す。基礎実験を行った施工技術総合研究所ではトンネル照明や風管、ベルトコンベアが無いほか、基礎面はコンクリートで舗装されており、移動用のレールの敷設が容易であった。一方、実現場で安全に設置するためには、運用中の風管や照明設備、ベルトコンベア等の付帯施設に配慮して設置しなければならないことや、地盤面の不陸を修正しながら移動用のレールを敷設する必要

があった。坑内を往来する通行車両への安全配慮が必要である。またトンネル内での断面変化には小径バルーンの長さを調整することで適用可能であることを確認した。10.5m ブロックの設置に2日、撤去に2日に時間を要した。写真-11にトンネル断面変化部の設置状況を示す。



写真-10 小径バルーン養生システム設置作業の状況

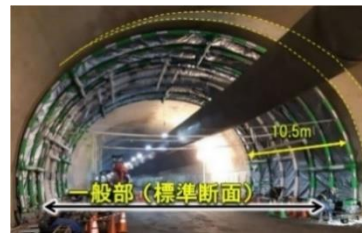


写真-11 トンネル断面変化部での設置状況

6. まとめ

小径バルーンを用いた養生工法について工法開発の経緯と養生システムの概要、養生効果について報告した。今後、さらに実現場での適用事例を増やすことでシステム全体の機能と効果を向上させることが望まれる。

謝辞：有限要素法非線形解析ソフト「ANSYS」による解析は横浜国立大学河端研究室で実施して頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 内閣府政策統括官：日本の社会資本 p.17, 2018
- 2) 国土交通省：トンネル現況総括表、道路統計年報 2022
- 3) 日本トンネル技術協会図で見る工事の推移と現況(「トンネル年報 2024」より)
https://www.japan-tunnel.org/tookei_tunnel2023 (閲覧日：2024年12月20日)
- 4) 国土交通省 東北地方整備局：コンクリート構造物の品質確保の手引き(案)トンネル覆工コンクリート編 p.75, 2021