

矢板工法で施工されたトンネルにおける 覆工形状計測に関する一考察

土門 剛¹・菅原 健太郎²・大窪 克己³

¹正会員 中電技術コンサルタント(株) 道路交通部 (〒734-8510 広島市南区出汐 2-3-30)
E-mail: tsuyoshi.domon@cecnet.co.jp

²正会員 (株)地層科学研究所 土木設計・計測事業 G (〒242-0017 神奈川県大和市大和東 3-1-6)
E-mail: sugawara@geolab.jp

³正会員 中日本ハイウェイ・エンジニアリング東京(株) (〒160-0023 東京都新宿区西新宿 1-23-7)
E-mail: k.ohkubo.ab@c-nexco-het.jp

トンネル覆工にひびわれが観察された場合, その原因が外力によれば大規模な補強工が必要となる可能性があり, 一方その原因が外力以外であれば補修工で十分な場合もある。

本研究では, トンネルのひびわれ原因が外力によるものか否かを判定する手法の開発を最終目的に掲げ, その第一ステップとして MMS 計測により矢板工法で施工されたトンネルを対象として覆工の形状を詳細に計測および分析した。得られた覆工形状の特徴とひびわれとの関連性について, 当時の施工方法を踏まえながらひびわれ発生原因を推定する方法を検討した結果を報告し, 最後にトンネル点検におけるトンネル覆工の形状計測の活用について一つの考え方を提示する。

Key Words: timbering support method, lining shape, Mobile Mapping System, periodic inspection

1. はじめに

対策工が必要となる古いトンネルの多くは矢板工法で建設されており, 建設から 50 年以上経過したトンネルも多い。このようなトンネルでは, 覆工にひびわれが観察された場合, 外力が原因と判断される場合がほとんどである。その一方, 施工後にひびわれが観察されたにも関わらず, 長期間ひびわれの成長やその範囲の拡大のないトンネルが多いのも事実である。現状では, ひびわれ原因が外力によれば大規模な補強工が必要となる可能性が高く, 一方その原因がコンクリートの硬化過程等外力に起因するもの以外であれば補修工で十分な場合もある。

そこで本研究では, トンネルのひびわれ原因が外力によるものか否かを判定する手法の開発を最終目的に掲げる。その第一ステップとして, 矢板工法で施工されたトンネルを対象に MMS 計測により覆工の形状を詳細に計測し, 計測データを処理する方法を提案する。つぎに, 得られた覆工形状の特徴とひびわれとの関連性について, 当時の施工方法を踏まえながらひびわれ発生原因を推定する方法を検討した結果を報告する。最後に, トンネル点検におけるトンネル覆工の形状計測の活用について一つの考え方を提示する。

2. トンネル覆工におけるひびわれ原因に関する 既往研究

現在の標準工法である NATM により施工された覆工と矢板工法で施工された覆工とでは, 恒久構造物としての機能に対する考え方には違いがある。

NATM の場合は, 一次支保工により地山の変形が収束したことを確認したうえで, 覆工コンクリートが施工されるため, 覆工には基本的に荷重が作用しないものとされる。これに対し, 矢板工法の場合は, 荷重(外力や施工時荷重など)を受け持つと考えるのが一般的である。したがって, 矢板工法により施工された覆工でひびわれが観察された場合には, これが外力によるものであるか, それ以外の覆工コンクリート硬化過程等において生じたものであるかを区別するとともに, 補修工もこれに応じて選択する必要がある。

外力による覆工コンクリートの変状やひびわれについては, たとえば文献1)および2)では, その発生メカニズムが詳細に分析され, その結果が整理されている。したがってこれらにより, 点検時の観察結果をもとに要因を特定し, 適切に対処することが可能である。

覆工コンクリートの硬化過程で発生するひびわれに関しては, これまでに様々な研究が行われてきた(た

と文献 3) ～12)) . これらに基づけば、覆工コンクリートの硬化過程では、温度変化による収縮、自己収縮、乾燥収縮などの体積収縮が発生し、これがひびわれの原因と考えられる。この場合の体積収縮ひずみはいずれも 10^{-4} のオーダーであり¹³⁾、覆工の変形は数 mm、セントルの形状やコンクリート打設時の施工精度などの形状効果を考慮してもせいぜい数 cm であると考えられる。このような覆工コンクリートの硬化過程に起因したひびわれであれば、外力によるものとは異なり構造の安定を脅かすものではないと考えられる。ただし、現状では観察されたひびわれが覆工コンクリートの硬化過程に起因したものであることを特定する手段に乏しい。

そこで、本研究では矢板工法で施工され、かつ、ひびわれの観察結果から、概ね覆工コンクリートの硬化過程に起因するひびわれが発生していると判断できるトンネルを対象として、覆工の形状を詳細に計測した。得られた形状の特徴とひびわれパターンとの関連性を調べ、形状の計測からひびわれの原因を推定する方法を検討した。なお、計測には計測時間の短さや通行止めの必要がないことから、移動体からのレーザスキャニングを採用した¹⁴⁾。

3. レーザスキャニングによるトンネル覆工の形状計測と計測データ処理方法

(1) 移動体からのレーザスキャニング手法

計測には、三菱電機(株)製のMMS (Mobile Mapping System) を用いた(図-1)。レーザスキャナは、既設のものにZ+F社製のスキャナを増設し、点群密度や計測精度を向上させた。具体的には、精度誤差は10 mmから0.5 mm、計測速度は最大13 575 pixel/secから最大1 016 000 pixel/sec、回転速度は75 Hzから200 Hzまで向上した。また、スキャナの設置位置を変更し、従来の斜め45°照射から覆工壁面と直交したスキャンができるよう垂直照射に変更してビーム径の大きさによる誤差を最小化した。

移動体から計測された三次元点群データ(以下点群データと称す)は、トンネル軸方向に対して螺旋状に分布し(図-2)、その軸方向の間隔は走行速度に比例する。本研究では、軸方向の点群間隔が10 cm以下となるように、また一般交通への影響を与えない速度を設定することとし、約70～80 km/h(断面間隔約7.8 cm～9.0 cm)にて計測を実施することとした。

(2) 点群データの処理方法

計測された点群には、トンネル表面に関連するノイ

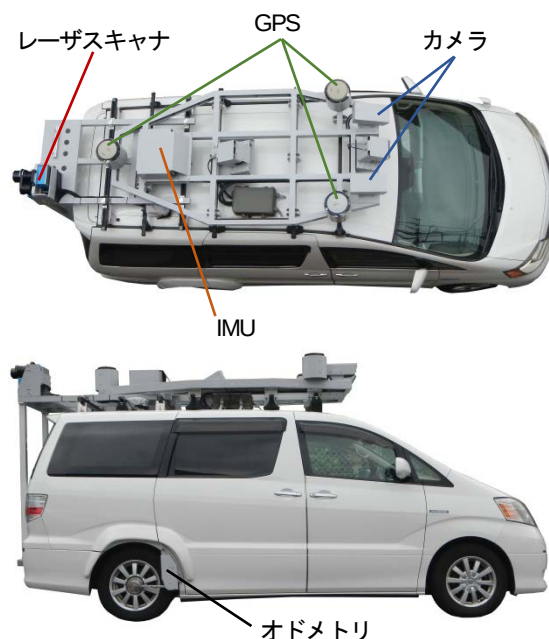


図-1 車載型MMS外観

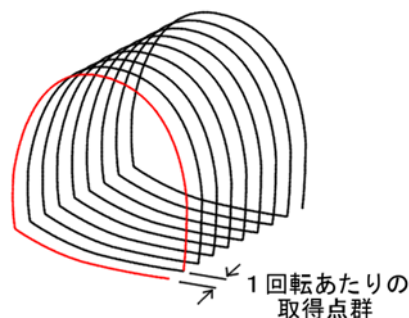


図-2 移動体から計測した三次元点群データの螺旋分布

ズや計測システム自体が有するノイズが含まれている。そこで以下に示す通り、これらのノイズを最小化し、覆工形状の計測精度を向上させる処理方法(5ステップ)を構築した。

【STEP 1】覆工コンクリート三次元点群の読み取り

計測点された三次元点群データを読み込み、計測エラーやノイズを取り除く。また、照明やケーブル等の付帯設備、所定の厚みを持つ補修、補強および漏水防止工等の点群データについては、この段階で取り除く。

【STEP 2】トンネル仮中心軸と断面方向の設定

適当な座標軸を仮定し、トンネル縦断方向に一定の間隔で仮断面を作成する。断面と点群との交点を求め、水平方向の最遠点どうしを結んだ線上に、最上部の点から下した垂線との交点を求め、これを断面の仮中心点とする。仮中心点を連ねて仮中心軸を設定し、これと直行するように断面を設定する(図-3)。

【STEP 3】点群のフィルタリングと代表点の選定

設定した各断面において、半径方向に一定角度($\Delta\theta$)内、トンネル延長方向に一定距離($2\Delta L$)内の点群を

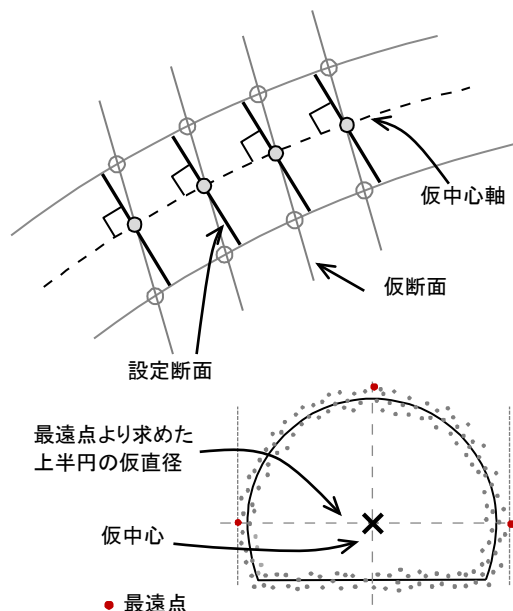


図3 トンネル仮中心軸と断面方向の設定

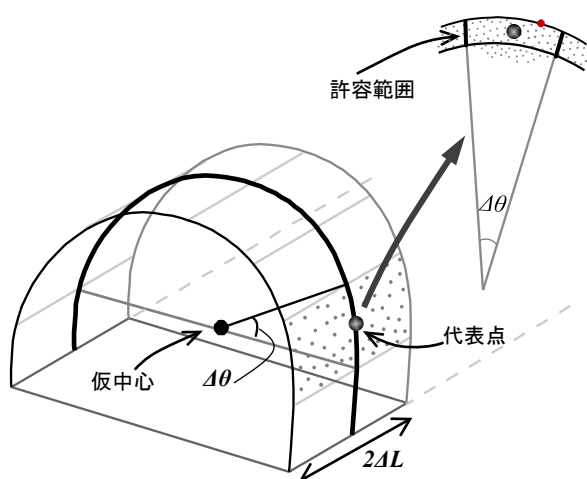


図4 点群データのフィルタリングと代表点の選定

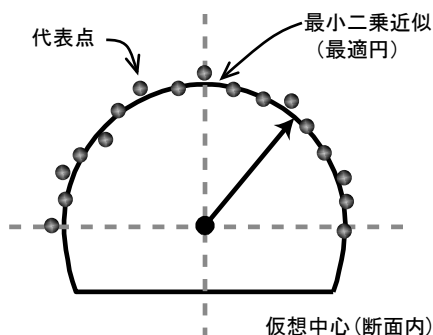


図5 最適円による曲率半径の測定

対象に、仮中心軸に対する最遠点から一定の許容範囲内の点群を抽出する。抽出された点群の座標を単純平均し、この範囲における「代表点」の座標とする。これにより測定値自体、反射強度あるいはビーム径の影響によるばらつきを最小化する（図-4）。

【STEP 4】最適円による曲率半径の測定

各断面について、代表点が円弧の近傍にあると仮定し、この円弧の中心と曲率半径を最小二乗法により求める。求められた円を最適円とする（図-5）。

【STEP 5】最適円との距離表示

各断面の代表点について、最適円の中心点からの距離と最適円の半径との差を求め、これを最適円からの距離として表示する。

4. 覆工形状計測の分析結果と考察

(1) 計測の対象

レーザスキャニングにより覆工の形状計測を、矢板工法で建設されたSトンネルを対象として実施した。

本トンネルは、上り線（Ⅰ期線）と下り線（Ⅱ期線）からなり、それぞれで供用開始時期および施工方法が異なる（表-1）。また、トンネル延長は上下線ともに128mであり、最大土被りは約12.5mである（図-6）。

表-1 矢板工法で建設されたSトンネルの概要

	上り線 (Ⅰ期線)	下り線 (Ⅱ期線)
供用開始	昭和44年3月	昭和52年4月
施工方法	上半先進	側壁導坑先進
覆工	逆巻き R=4.3 m	順巻き R=4.6 m
スパン長	8.4 m	7.2 m
断面図		

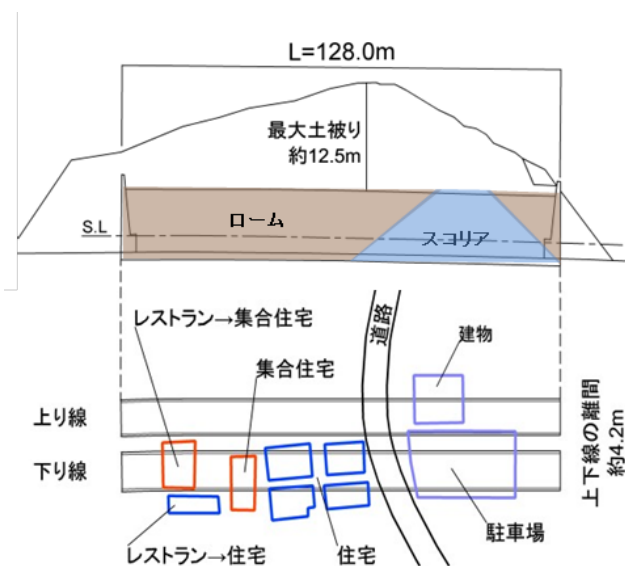


図-6 Sトンネルの周辺状況（概略）

表-2 Sトンネル供用後のイベント

時系列	イベント
昭和44年3月	一期線（上り線）共用開始
昭和52年4月	二期線（下り線）共用開始
昭和54～58年	下り線直上（下り方向坑口以外）に建物建設
昭和58～63年	下り線下り方向坑口直上にレストラン建設
平成17年度	詳細点検B実施
—	レストラン取り壊し→更地
平成23年度	詳細点検B実施
平成24年	更地となった個所に集合住宅建設
平成27年度	詳細点検B実施

表-2に、Sトンネル供用後のイベントを示す。

(2) ひびわれ分布（詳細点検）

本トンネルにおける詳細点検Bは、平成17年および23年に実施されており、点検により作成されたひびわれ展開図からは、新たなひびわれの発生や進展はほとんど認められていないことを確認している。平成23年度（平成24年2月）に実施されたひびわれ展開図（ひびわれ幅1.0mm以上）を図-7に示す。

上り線のひびわれ展開図を見ると、ひびわれはクラウン部に集中する傾向にある。肩部付近には縦断方向のひびわれが見られ、一部のスパンにおいてスパン中央付近に横断方向のひびわれが発生している。上半脚部付近におけるひびわれは僅かである。

下り線のひびわれ展開図では、ひびわれは上半全体に分布している。天端部から上半肩部付近において縦断方向ひびわれが発生しており、スパン中央部付近に発生している横断ひびわれは脚部まで到達しているものが多く見られる。また、上り線より後に建設されたにもかかわらず、ひびわれの頻度が高くなっている。

これらの違いは、供用後上部に建設された建物による鉛直荷重の影響、または施工方法に起因するものと

推定できる。前述のとおり、供用後に建設された建物は下り線上部に集中しているため、建物による鉛直荷重が影響している可能性がある。施工方法の違いによる影響の可能性としては、覆工に対する拘束効果が考えられる。覆工背面の拘束効果の差違は、上下線で地表形状がほぼ同一であることから同様に作用していると仮定した場合、覆工上半脚部の拘束効果の違いによるものと考えられる。一般に、温度や乾燥収縮によるひびわれは、構造物の拘束効果が大きいほどが発生しやすい傾向にあることが知られている。下り線では、上半覆工コンクリートよりも先に側壁コンクリートが建設されているため、覆工が逆巻きで建設された上り線よりも、上半脚部の拘束効果が強く、体積収縮によるひびわれが発生しやすかったものと推測できる。

また、下り線では13スパンと14スパンを境界にして、ひびわれ発生パターンがやや異なる。13スパン以前と比較すると、14スパン以後は上半肩部から側壁にかけての縦断方向のひびわれは減少しているが、天端の縦断方向ひびわれはやや多く発生している。縦断方向のひびわれは斜め方向に変化しており、とくに15スパンにはひびわれが亀甲状に発生している。スパン2でも、ほぼ矩形状に閉合したひびわれが肩部付近に観察され、またスパン8と9では、天端付近に放射状のひびわれが見られている。ただし、これらのスパンは、他のスパンよりも縦断方向のひびわれが少ない傾向にある。一般に放射状、亀甲状および閉合ひびわれは外力により発生しやすいとされており（たとえば文献1））、これらの区間では何らかの外力による影響を受けている可能性があると考えられる。

2, 8, 9, 14～18スパンを除くと、外力によって発生するとされているせん断ひびわれや圧ぎは認められないことから、大部分はコンクリートの体積収縮に起因するなど外力以外の原因によるひびわれと推定できる。

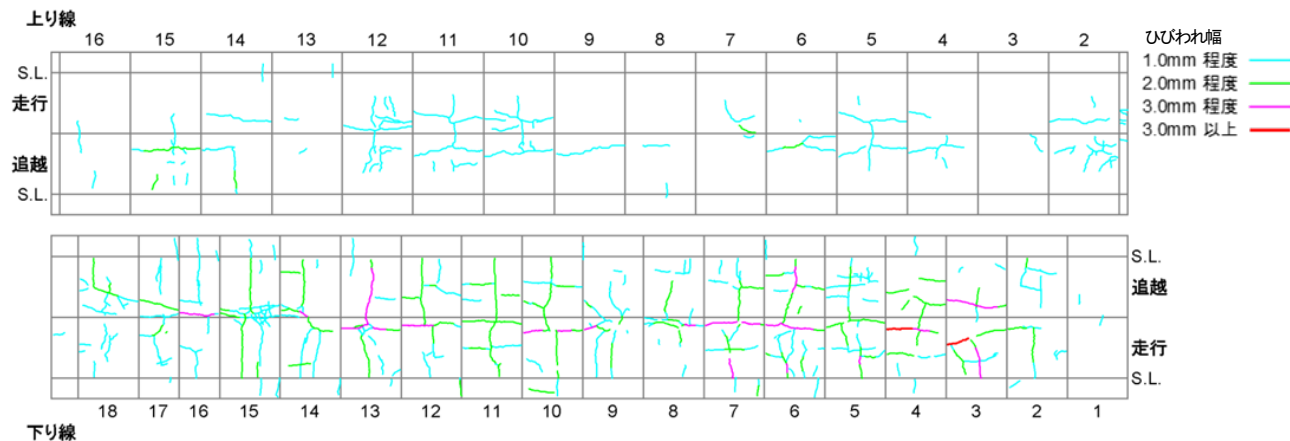


図-7 ひびわれ（ひびわれ幅1.0mm以上）展開図（数字は施工スパン名）

(3) 覆工形状の特徴とひびわれとの関連性

a) スパン内での曲率半径の分布

図-8に、レーザスキャニングにより得た点群データの一例（下り線）を示す。点群の濃淡は、レーザの反射強度を示している。本トンネル覆工は、バラセントルにより建設されており、得られた点群データからも、バラ型枠の形状などが確認できる。

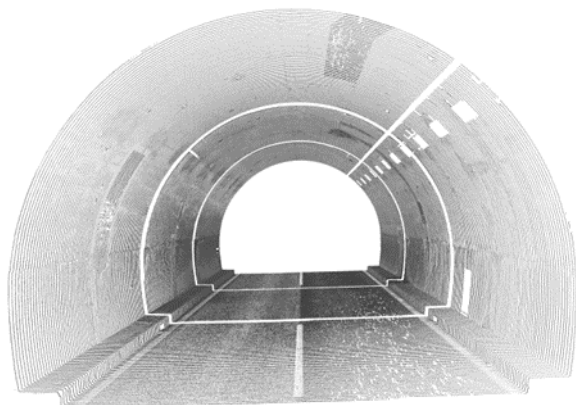
前述したひびわれ発生パターンの分析では、下り線の一部のスパンにおいては、外力によりひびわれ分布が変化した可能性があるかと判断した。このことを踏まえた上で、覆工形状の分析を行った。なお、上下線ともに坑門工の影響を排除するため、両坑口部を除く各スパンを対象とした。また、各スパンでは漏水防止工が含まれる点群は省いたため、実際のスパン長より0.5 m程度短くなっている。

覆工の各スパンでは、トンネル延長方向に対して0.5 mピッチで断面を作成し、3. で示した手法により曲率半径とこれからの偏差を求めた。図-9および図-10に、上り線及び下り線それぞれの一スパン内の各断面で求めた曲率半径の分布を示す。図の横軸はスパン端部からの距離（以下、スパン距離）を示すが、漏水防止工を省いた箇所を起点（0 m）としている。縦軸は曲率半径を示し、分析した全スパンを重ねて図化している。

図を見ると、上半部の曲率半径は、上り線では設計半径の4.3 mを中心に分布し、下り線では設計半径の4.6



(a) トンネル覆工（下り線）の全体図



(b) 付帯設備、漏水防止工の点群データを取り除いた状態（下り線：9～11 スパン）

図-8 スキャニングした点群データの例

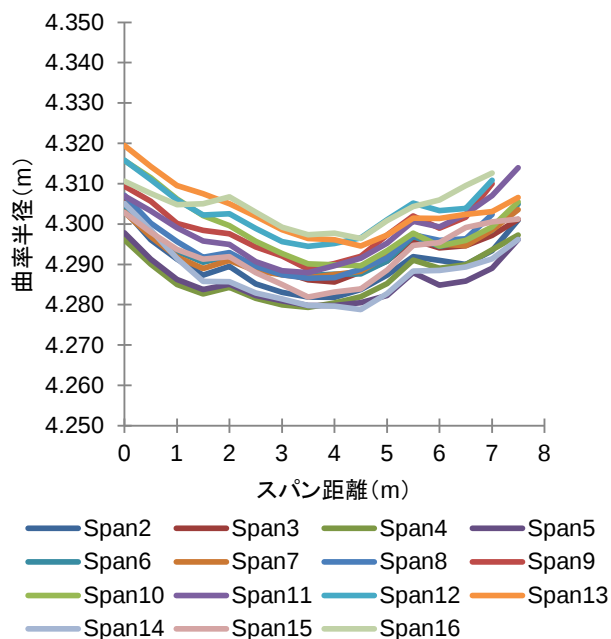


図-9 曲率半径（上り線）

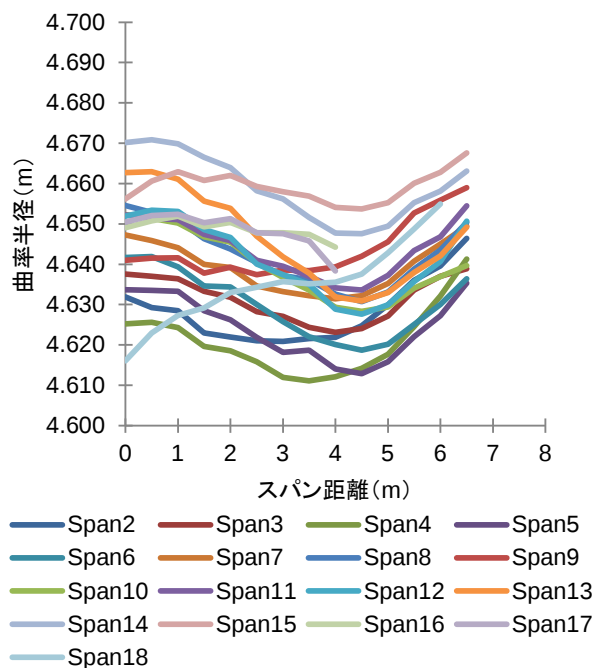


図-10 曲率半径（下り線）

mを上回るスパンが多いことがわかる。また、スパン中央部付近で曲率半径が小さくなる傾向があること、この傾向がほとんどのスパンで同様であることが示されている。これらの傾向は上下線ともに共通である。ただし、スパン毎の絶対値は、上り線で平均して2 cm程度、下り線は4 cm程度の範囲でバラツキが認められる。

また、上り線2 m付近と6 m付近にて確認できる局所的な段差については、ほぼ全スパンでその傾向が示されている。コンクリートの硬化過程やトンネル供用後に、全スパンで共通箇所における変形（スパン距離2および

6 m) が発生したとは考えにくいいため、これはバラセン
トルによる覆工型枠形状の影響と判断できる。

b) 最適円との距離

本研究では、計測データを処理して覆工上半部の代
表点を求め、トンネル横断方向の断面について、これ
を最もよく近似する円（最適円）を最小二乗法により
求めて、この半径を曲率半径としている。この処理に
より得られた最適円と代表点との距離を図-11にまとめ
て示す。図中の黒線は最適円を示し、それ以外のカラ
ー線は代表点と最適円との距離を、半径方向に50倍拡
大して示したものである。ここでは、断面位置（スパン
距離）1.0, 3.0, 6.0 mの3断面のみ示す。また、スパン
内のトンネル縦断方向の断面における最適円と代表
点の距離の分布を図-12に示す。本図には、覆工上半
の天端、肩部および脚部における最適円からの距離の分
布を示している。

上り線では、全てのスパンにおいて最適円からの代
表点の距離は小さく、また離れのモードは類似してい
る。トンネル縦断方向の各断面で比較すると、断面毎
で離れのモードは異なる傾向にあるが、断面内では全
てのスパンで類似した分布形状となっている。

下り線の脚部については、各スパンでの最適円から
の距離は大きく数cmに達する場所もある。仮に、最適
円からの距離を変形と仮定した場合、脚部付近では表

面ひびわれ以上の変状が生じていることとなる。しか
し、ひびわれの観察結果ではこの部分に変状は認めら
れていない。

これは、下り線が側壁導坑先進工法により施工され
ていることにあって考えられる。側壁導坑先進工法で
は、トンネル上半覆工が、先に施工された側壁コンク
リートの天端に合わせて打設される。このため、上半
覆工の施工は側壁コンクリート天端の施工精度に左右
される。たとえば、覆工が上半脚部付近において上げ
越しされて施工された場合には、この部分で形状の変
化が生ずると考えられる。上り線は逆巻き工法であり、
先に上半部が施工されるため、側壁導坑先進工法に比
べて脚部の形状変化が小さいと考えられる。

5. おわりに

本研究では、矢板工法で建設された覆工コンクリ
ートに関して、レーザスキャニングによる計測を実施し、
ひびわれのパターンと覆工形状の関連性を調べた。検
討の結果得られた知見は、以下のとおりである。

- ① 得られた点群から覆工上半部の代表点の並びを最
もよく近似する最適円を求め、さらに曲率半径と
最適円からの距離を分析することで、覆工形状の

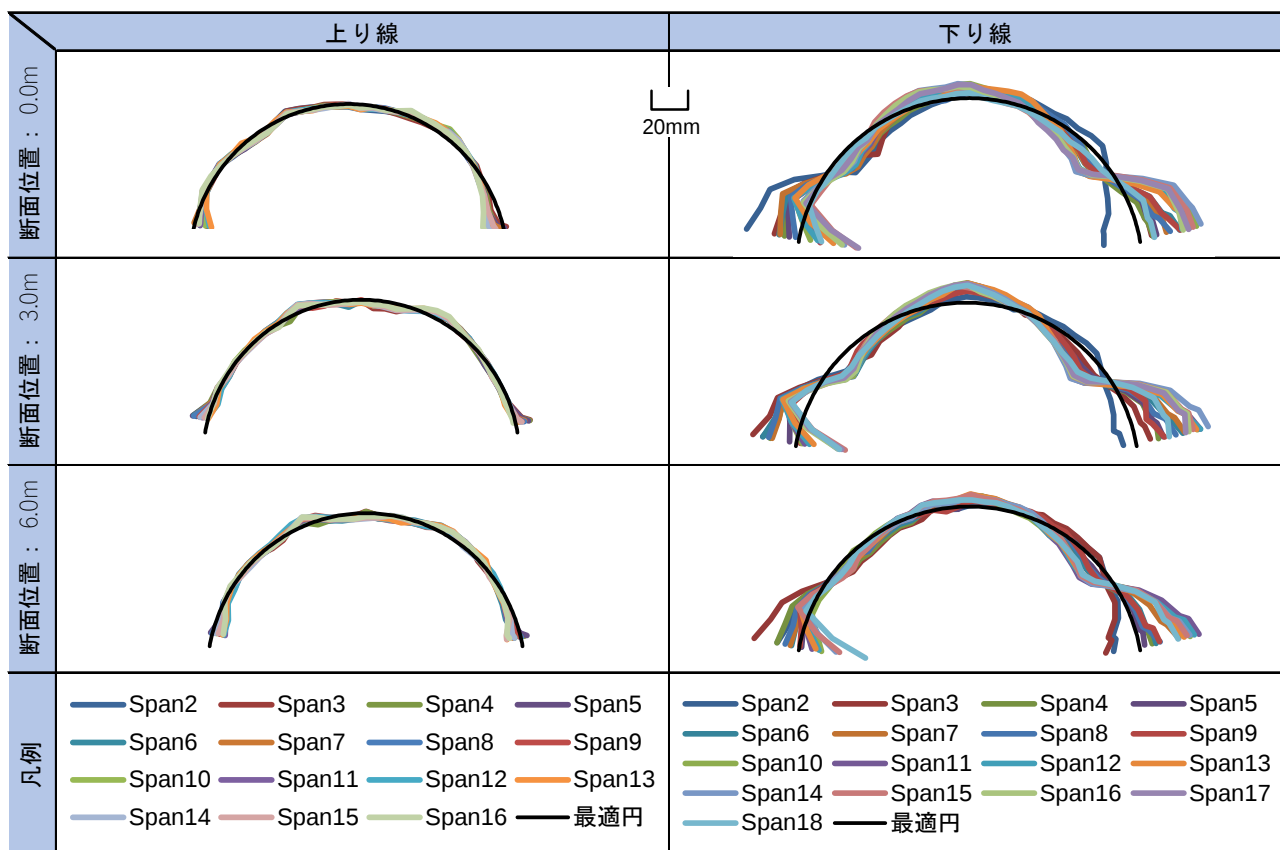


図-11 横断面における代表点と最適円からの距離分布の一例

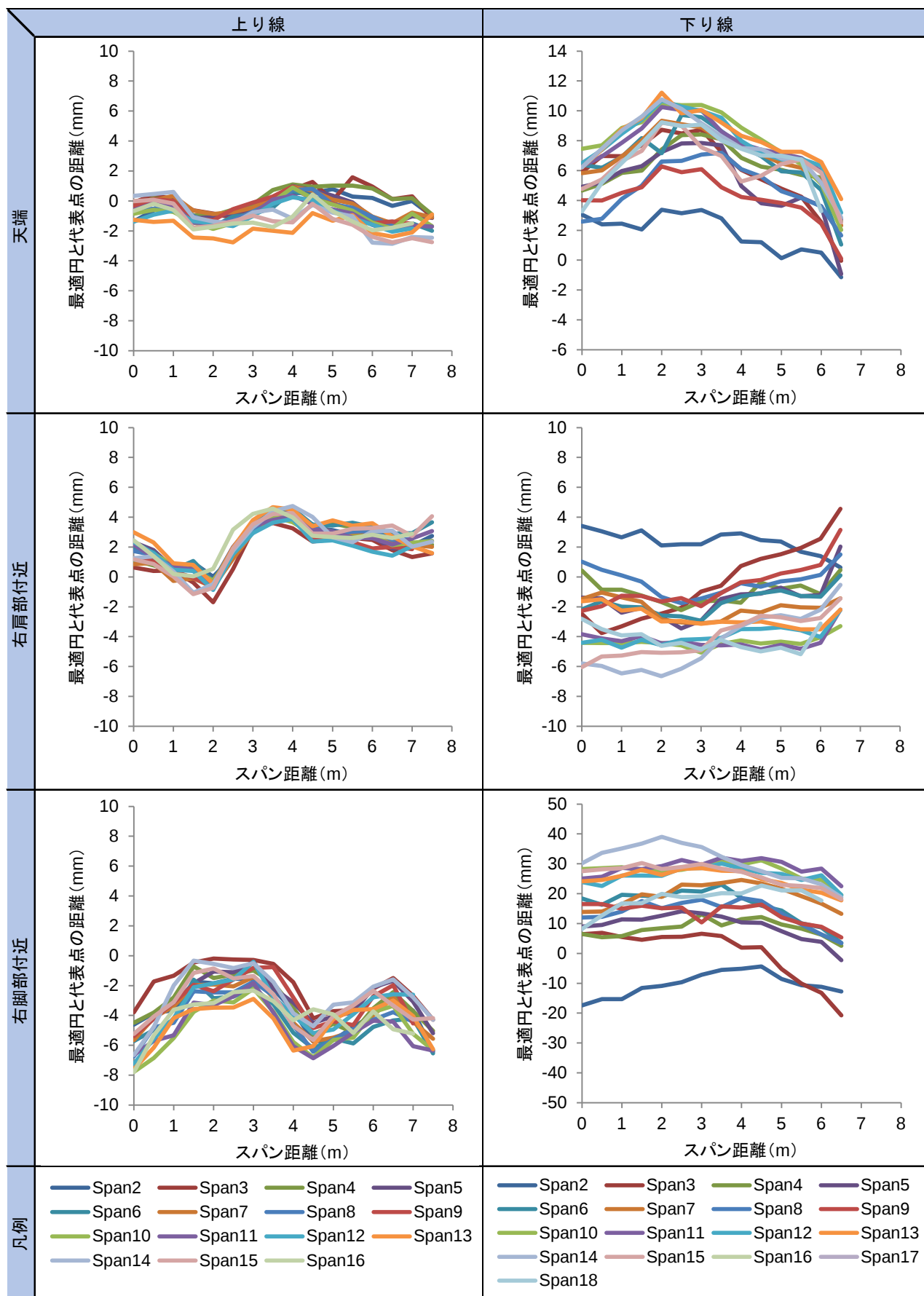


図-12 縦断方向における代表点と最適円の距離分布の一例

特徴を捉えることが可能である。

② 覆工形状について各スパン間で共通性（特徴的な

曲率半径の分布など)が見られた場合,それらは外力による覆工の変形によるものではなく,覆工コンクリートの硬化過程の変形が元々有していた型枠形状に起因するものであると判断できる.

- ③ 一部のスパンで他と異なる覆工形状分布が見られた場合,外力による覆工の変形が示唆される.
- ④ 側壁導坑先進工法のトンネルでは,覆工上半部と側壁コンクリートとの接合部の施工状況が計測結果の分析に影響を及ぼす可能性がある.

道路トンネルの点検で直接目視できるのは,トンネル覆工と路面である.著者の一人は,トンネル内の路面状態をMMS計測し,路面状態の簡易な評価手法を提案している⁴⁾.MMSにより供用時のトンネル覆工形状および路面状態を簡易に計測・評価できれば,供用時情報としてストックしトンネル維持管理業務の効率化に資するものと考えている.

一方,掘削時に切羽観察記録が電子データとして保存されているトンネルでは,切羽位置とそれに応じた地山状況を即座に参照することが可能である.いわば施工時情報である.これら供用時情報および施工時情報とがトンネル内位置情報とともに照合できれば,不具合発生時の原因解明などに役立ち,これまで以上に適切な不具合対策を取ることが可能になるものと考えられる.

参考文献

- 1) (社)土木学会:トンネルライブラリー第14号 トンネルの維持管理,2005.
- 2) (社)土木学会:トンネルの変状メカニズム,2003.
- 3) 杉浦高広,中井健司,佐藤京,西村克弘,三上隆:二次覆工のひびわれ発生に対する施工状態・環境の影響について,トンネル工学報告集,第9巻,pp.177-182,1999.
- 4) 服部鋭啓,入矢桂史郎:トンネル2次覆工コンクリートのひびわれに関する研究,コンクリート工学年次論文集,Vol.23, No.2, pp.1129-1134, 2001.
- 5) 川田雅紀,大沼博志,名和豊春,出雲健司:覆工コンクリートの温度および乾燥収縮応力のクリープ解析,コンクリート工学年次論文集,Vol.24, No.2, pp.91-96, 2002.
- 6) 馬場弘二,伊藤哲男,佐野信夫,谷口裕史,杉山律,福留和人:覆工コンクリート模擬モデルによるひびわれ制御対策比較試験,土木学会論文集F, Vol.62, No.2, pp.285-295, 2006.
- 7) 越智修,登坂敏雄,北川博通,奥利之,工藤暢章:NATM トンネル覆工のひびわれ発生に関する施工実態調査,トンネル工学報告集,第14巻, pp.287-294, 2004.
- 8) 真下英人,砂金伸治,木谷努,遠藤拓雄:トンネル覆工の収縮ひびわれに関する研究,トンネル工学論文集,第15巻, pp.1-11, 2005.
- 9) 高山博文,増田康男,仲山貴司,上村義幸,Narentorn YINGYONGRATTANAKUL,朝倉俊弘:トンネル覆工コンクリートに生じるひびわれの発生メカニズムに関する実験的研究,土木学会論文集F, Vol.66, No.1, pp.132-145, 2010.
- 10) 高山博文,増田康男,仲山貴司,重田佳幸,Narentorn YINGYONGRATTANAKUL,朝倉俊弘:トンネル覆工コンクリートに生じるひびわれの現地計測・解析と発生制御法の一考察,土木学会論文集F, Vol.67, No.1, pp.46-61, 2011.
- 11) 中村明彦,國近光生,亀谷英樹,中村秀明:覆工コンクリートの初期ひびわれ予測における熱特性値の同定とひびわれ解析,土木学会論文集F1(トンネル工学), Vol.70, No.3(特集号), pp.I_1-I_16, 2014.
- 12) 水野希典,八木弘,岩尾哲也,松岡茂,西村和夫:覆工コンクリートのひびわれ制御による長期健全性向上に向けた実験的検証,土木学会論文集F1(トンネル工学), Vol.71, No.3(特集号), pp.I_11-I_27, 2015.
- 13) たとえば,谷村充,富田六郎:第4節 体積変化制御の物理と化学,コンクリート混和材料ハンドブック,(社)日本材料学会編,2004.
- 14) 西山哲,沢田和秀,里優:わかって使うレーザ計測7.事例その4:車両搭載型レーザ計測装置の利用,地盤工学会誌,60-3, pp.63-66, 2012.
- 15) 土門剛,小西英之,小宮一公,中野清人:走行型レーザ計測によるトンネル内路面変状可視化の試み,地下空間シンポジウム論文・報告集,第23巻, 2018.

MEASUREMENT OF LINING SHAPE FOR TUNNELS CONSTRUCTED BY TIMBERING SUPPORT METHOD

Tsuyoshi DOMON, Kentaro SUGAWARA and Katsumi OKUBO

Profiles of the tunnel lining were measured using a mobile laser scanner with improved accuracy. Curvature radii of the upper section of the tunnel lining were then determined by the proposed method using the three-dimensional point cloud obtained from the laser scanning results.

The results showed the characteristic distribution of the curvature radii that were consistent throughout each installation interval of assembly form centering. It is difficult to consider that the distribution of the lining shape resulted from the deformation of the lining owing to an external force in the case when this type of distribution is observed. It is, therefore, concluded that the cracks in the lining were attributed to causes other than an external force, such as deformation of the concrete lining during the curing process.