

施工時データと点群データを活用した シールドトンネルの変状要因分析

佐々木 亨¹・石村 利明²・森本 智³・日下 敦⁴

¹正会員 国立研究開発法人 土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)
E-mail: to-sasaki@pwri.go.jp

²正会員 国立研究開発法人 土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)
E-mail: ishimura-t477bs@pwri.go.jp

³正会員 国立研究開発法人 土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)
E-mail: s-morimoto@pwri.go.jp

⁴正会員 国立研究開発法人 土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)
E-mail: kusaka@pwri.go.jp

都市部を中心に多く存在するシールドトンネルでは、山岳トンネルと同じく、供用後の点検において劣化等により発生したと考えられる変状が確認されており、合理的な維持管理の実施が求められる。シールドトンネルは山岳トンネルに比べ覆工目地の数が多い等の理由から、近接目視及び打音検査により多くの時間と労力が必要となることが予想されるため、新技術等を用いた効率的な点検手法の確立が必要である。本報告では、シールドトンネル施工時に得られるジャッキ推力等の掘進管理のためのデータと真円度や蛇行量といった出来形を評価するためのデータ、及び、供用後に取得した三次元の点群データを用いて、シールドトンネルの変状要因の推定を試みた結果について報告する。

Key Words: shield tunnel, maintenance, point cloud data, construction data, estimation damage factor

1. はじめに

シールドトンネルは都市部を中心に多く存在し、道路や鉄道、共同溝など幅広い用途で用いられており、今後その採用数は増加することが予想される。シールドトンネルにおいても、山岳トンネル同様、供用後の点検において劣化等により発生したと考えられる変状が確認されており、適切な維持管理が求められる。特に、道路トンネルにおいては利用者の安全・安心の観点から、変状を早期に発見し、必要に応じて適切な対策を講じる必要がある。しかしながら、シールドトンネルは山岳トンネルに比べ覆工目地の数が多い等の理由から、近接目視及び打音検査により多くの時間と労力が必要となることが予想されるため、新技術等を用いた効率的な点検手法の確立が必要である。

また、シールドトンネルでは施工時に掘削土量やマシンのピッチング角、ジャッキ推力等の掘削管理を行うために必要なデータ（施工時データ）と、真円度や蛇行量といったトンネルの出来形を評価するデータ（出来形

データ）が一定間隔で計測されているのが一般的である。これらのデータはトンネルごとに多量に蓄積されており、トンネル周辺の地盤状況や施工時にトンネルに作用した負荷等を記録したものであり、非常に有用であるが、現時点では維持管理段階まで十分に引き継がれているとは言い難い。これらのデータとシールドトンネルの変状を分析し、相関性を把握することができれば、変状要因の推定が可能となり、適切な維持管理及び適切な対策を講じることが可能となると考えられる。加えて、真円度や蛇行量等のシールドトンネルの形状を示すデータは、供用後にトンネルに生じる土圧等の影響を受けて変化する可能性が考えられるが、供用後にこれらの断面形状の変化を計測した事例は少ない。近年、山岳トンネルの維持管理等で活用されている三次元レーザー計測技術をシールドトンネルに適用し、施工直後からの断面形状の変化を定期的に把握することが可能となれば、施工時データ等と併用し変状の発生を早期に把握することが可能となり、より適切な維持管理が可能であると考えられる。

筆者らは、供用後 10 年以上経過しているシールド工

法で施工された共同溝において、近接目視及び打音検査を実施するとともに、3D スキャナーを用いて三次元の点群データを取得することで現在の変状実態及び断面形状を取得し、リング毎に現在の変状実態および断面形状の変化を整理した。加えて、施工時の施工時データと出来形データ、及び三次元点群データと近接目視で得られた変状実態を比較・分析した。ここでは、調査した共同溝の中で複数の変状確認されたシールドトンネルを対象に維持管理における三次元点群データの活用可能性について検討するとともに、変状要因及び変状時期の推定を試みた結果について報告する。

2. 現況調査

建設後 10 年以上経過している A トンネルについて近接目視及び打音検査による変状実態の調査¹⁾と、3D スキャナーを用いた三次元断面計測を行い、現在の共同溝の状態を確認した。調査を実施した共同溝の諸元を表-1 に示す。トンネル外径は 3780mm、セグメント厚は 190mm、セグメント幅は 1300mm であり、継手構造はリング間及びセグメント間ともに曲がりボルトを採用している。また、継手面には施工時のずれを防止する目的で表面に緩衝キーと呼ばれる凹凸をつけた構造を採用している。トンネル周辺地盤は、各トンネルともに N 値約 10~40 の沖積層の砂質土・粘性土の互層が主体であった。

(1) 変状実態調査

供用中の A トンネルで確認された代表的な変状を写真

-1 に示す。確認された変状としては、セグメント隅角部・継手部・継手面のうき・はく離（欠けも含む）、注入孔からの漏水、クラック、遊離石灰の析出等である。

図-1 に A トンネルで確認された全変状について、変状の種類と変状箇所を示す。なお、本調査で分類・整理した変状の種類は図-2 に示す通りとし、変状数には施工時から現在までの概ね 10 年の間で補修等を行い既に回復している変状も含んでいる。図-1 より、A トンネルで確認された変状の内訳としては、セグメント継手部の

表-1 調査対象トンネル諸元

	調査延長 (m)	215
	完成年	2009
	土被り (m)	約12
	外径 (mm)	3780
	セグメント厚 (mm)	190
	セグメント幅 (mm)	1300
継手構造	セグメント間 リング間	曲がりボルト (緩衝キーあり)



a) 隅角部のうき b) 注入孔からの漏水（遊離石灰）



c) セグメント継手部のうき d) 縦断方向のひび割れ

写真-1 代表的な変状

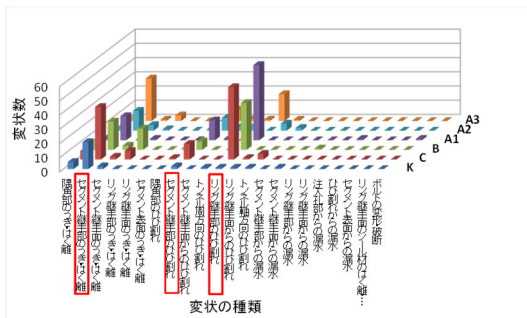


図-1 A トンネルの変状種類及び変状箇所

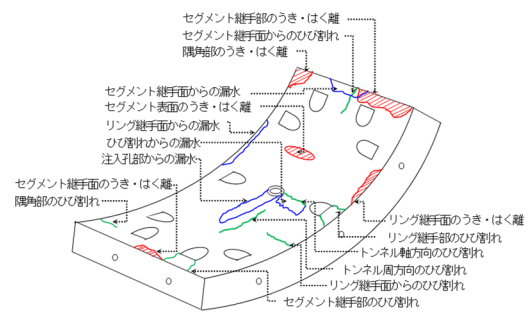


図-2 変状種類

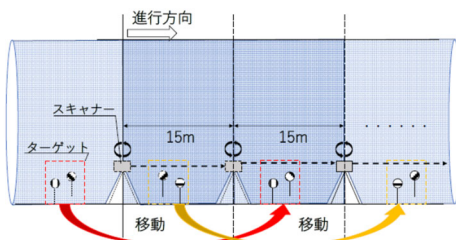


図-3 三次元断面計測方法の概略図

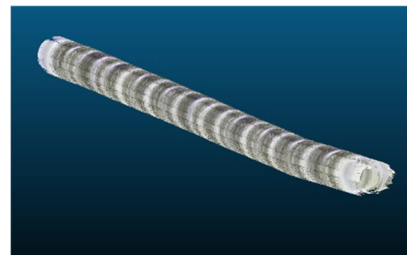


図-4 A トンネル取得点群（俯瞰図）

うき・はく離とリング継手部のひび割れが多く、その他、リング継手部のうき・はく離とセグメント継手部からのひび割れが多く発生していた。変状はKセグメントに隣接するB(C)セグメントだけでなく、その隣のA1・A2セグメントでも変状が確認されている状況であった。

(2) 三次元断面計測について

a) 使用機材及び計測方法について

2. (1) で変状実態を調査した区間において3Dスキャナーを用いた三次元レーザー計測を実施した。使用した3Dスキャナーは非GPS環境においても加速度センサーによって自己位置を認識し、点群に相対座標を付与できる設置型のものとした。点群座標取得精度は1.9mm@10mである。

図-3に今回実施した三次元レーザー計測方法の概念図を示す。計測は15mピッチを標準とし、計測機器とターゲットの盛替えを繰り返しながら調査範囲全体が包含されるように三次元の断面形状を取得した。この時、盛替え前の計測時に設置していたターゲットの一部を残置し、盛替え後の計測時に読み取らせることで機械が同位置と認識し、精度の高い連続した点群が取得できるように配慮した。

図-4に点群取得状況を示す。断面形状や線形、設置物、セグメント及びリング間の目地・継手部について概ね確認できる結果が得られた。点群の精度検証方法及び詳細な分析結果については、紙面の制約上割愛する。

b) 点群データから算出した断面形状と施工時の比較

取得した点群から灯具等の不要なものを除去し、各リングの中心位置を算出した後、各リングの中心位置からの誤差が最も小さくなるように線形近似を行い中心軸を算出する。この時、中心軸の端部(820R)の蛇行量が施工時の出来形と一致するように中心軸を平行移動し各リングの中心軸を算出した。この中心軸と設計線形を比

較する事で現在の蛇行量を算出した。また、各リングの内空幅と内空高さを点群から読み取り、設計半径との差分を取ることで真円度を算出した。ただし、Aトンネルは供用後に路床が設置されているため、点群から読み取れた内空高さに設計路床高さを加算して内空高さを計算した。ただし、路床は場所打ちで施工されているため、今回算出された内空高さにはそれらの施工誤差を含んでいることに留意が必要である。

図-5に点群データから算出した蛇行量を、図-6に点群データから算出した真円度を示す。図より、蛇行量及び真円度ともに、ばらつきはあるものの施工時と同程度の値を示していることが分かる。このことから、点群データから蛇行量及び真円度等の出来形を算出することで、施工時に一定間隔でしか取得されていないトンネル線形や内空変位のデータを補完することができるとともに、現況のトンネルの状態を確認することができると考えられる。なお、Aトンネルは供用後の外力による顕著な変状は認められておらず、施工時と現在の蛇行量及び真円度に差がないことは妥当であると考えられる。

3. 変状要因分析

山岳トンネルにおいてはMMS(Mobile Mapping System)を用いて取得した三次元の点群データを用いて点検支援を行う取組みが実施されており²⁾、既往の研究成果ではMMSにより取得された点群データを用いた変形モード解析を実施することで覆工目地の段差や外力の影響を受けているスパンの抽出が可能とする見解もある^{例えば、4)及び5)}。本報告ではこれらを参考に、シールドトンネルにおいてレーザ計測により取得された点群データを用いた変形モード解析を実施し、変形とひび割れやうき・はく離等の変状の関係性及び施工時データから考えられる変状

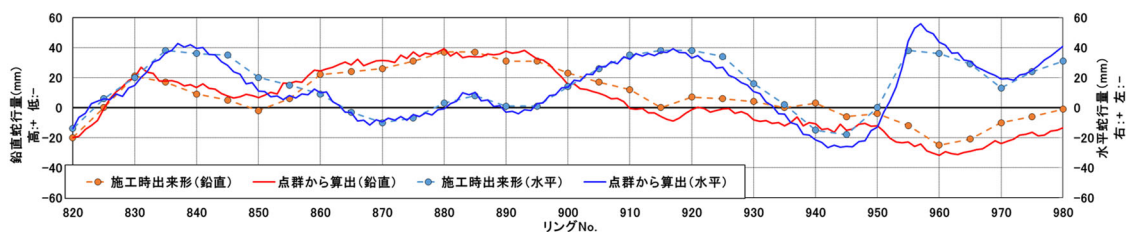


図-5 Aトンネルにおける蛇行量(破線:出来形 実線:点群)

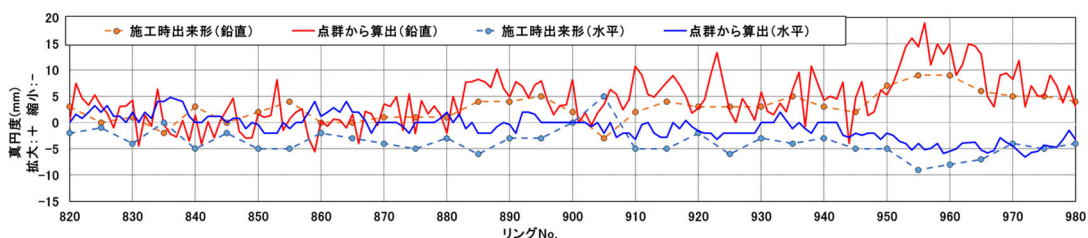


図-6 Aトンネルにおける真円度(破線:出来形 実線:点群)

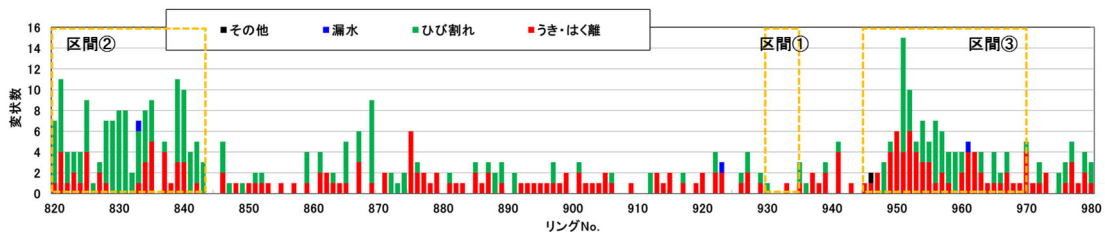


図-7 各リングの変状数内訳

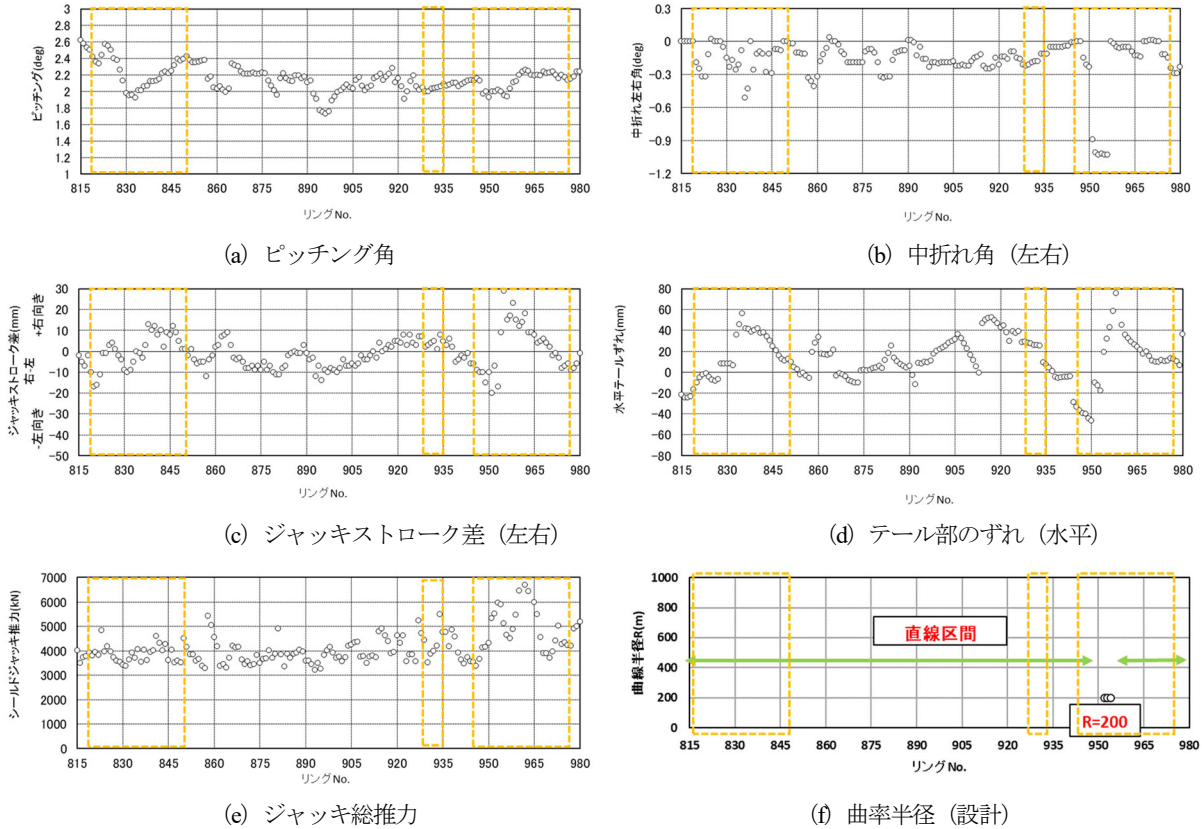


図-8 Aトンネルの施工時データ (抜粋)

要因について分析を行った。ただし、今回の検討対象としたトンネルでは施工直後のトンネルの状況を取得できていないため、出力される変形及び変状がどのタイミングで発生したのかについては筆者の推測であることに留意が必要である。

図-7にAトンネルの各リングの変状数を示す。Aトンネルでは、調査対象とした全区間で概ね2個程度の変状が確認されたが、その中で特に変状が多く発生しているのは821R~845R(区間②)、950R~965R(区間③)の2区間であった。本報告ではこの2区間と比較として変状の少ない930R~935R(区間①)の計3区間に着目し分析を行った。図-8にAトンネル施工時に取得された施工時データのうち、顕著な変化が示されているデータを抜粋して示す。

(1) 区間①(820R~845R)に関する分析

図-9に当該区間における変状展開図を、図-10に現況断面の中心軸を基準とした設計断面からの差分コンター

を示す。本検討では設計断面と現況断面の中心位置が路床や変形の影響により、図-6に示す真円度とコンターの変形量が必ずしも一致していないが、隣接するセグメントの色差を比較し各リングの相対的な変形について以下に考察する。

図-9より、この区間は前述の通りAトンネルの中でも比較的に変状が少ない区間である。図-8の施工時データに関しても局所的な変化はほぼ生じておらず、施工時にセグメントに損傷を及ぼすほどの外力が作用した可能性も小さいと考えられる。また、図-10の設計断面からの差分コンターは全体的に黄色を示しており、設計断面からのずれが少なく、真円に近い状態を保っていることがわかる。これらのことから、当該区間ではセグメントに損傷を与えるような施工時荷重は発生せず、また、供用後も外力等による変形を受けていないことが推測される。

(2) 区間②(820R~845R)に関する分析

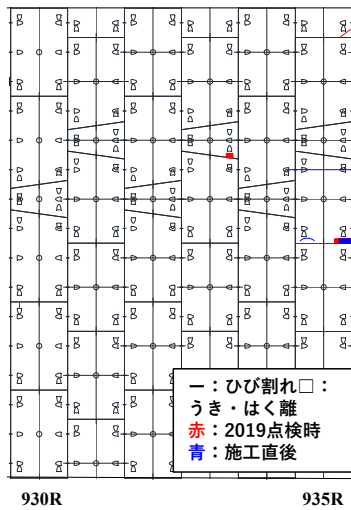


図-9 区間①の変状展開図

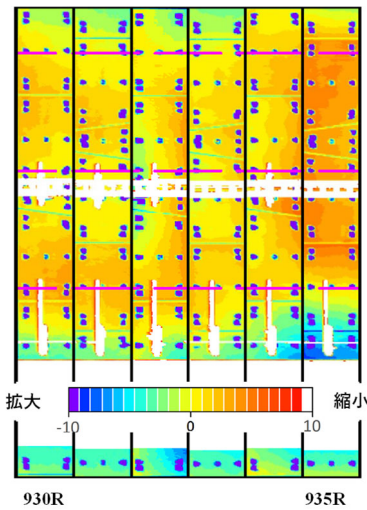


図-10 区間①の設計断面からの差分コンター

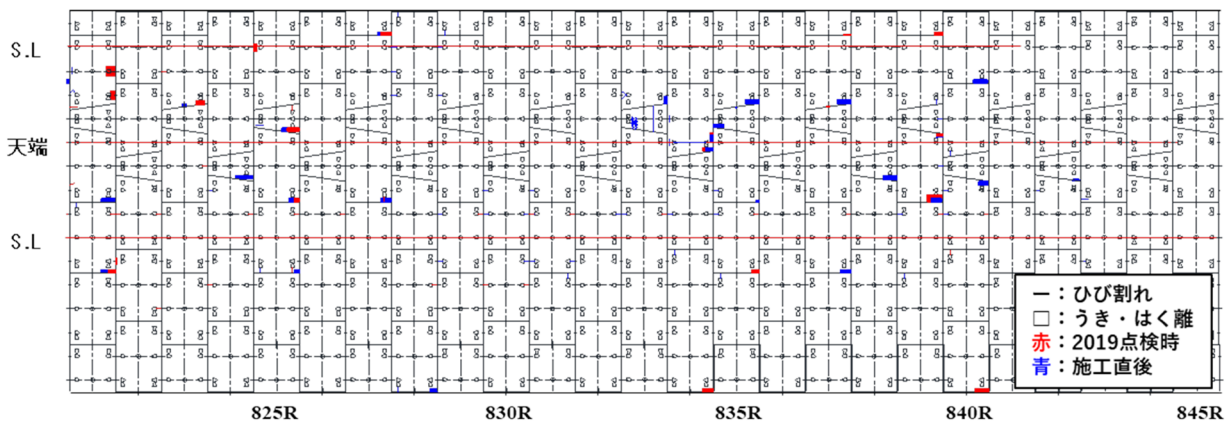


図-11 区間②の変状展開図

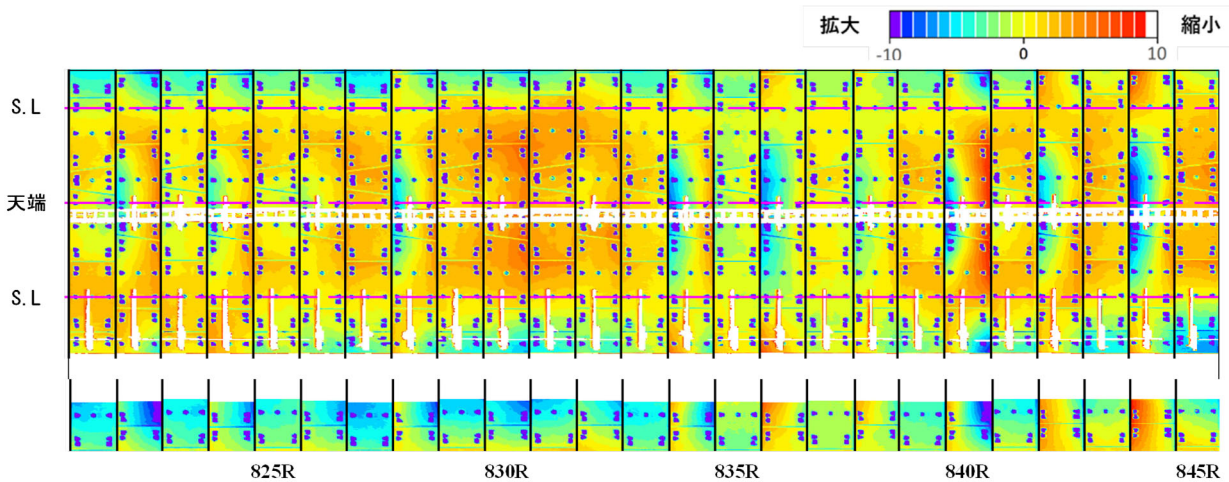


図-12 区間②の設計断面との差分コンター (スパン軸合わせ)

図-11 に当該区間の変状展開図を、図-12 に現況断面の中心軸を基準とした設計断面 (真円) からの差分コンターを示す。

図-7 及び図-11 より、区間②においてはうき・はく離よりもひび割れが多く発生しており、その多くがリング継手部のひび割れであった。当該区間では鉛直蛇行量及び水平蛇行量の急激な変化 (図-5) やピッチング角、テ

ール部のずれ及び左右のジャッキストロークの局所的な変化が発生しており、掘進時に蛇行修正を試みたことが推測される。また、当該区間は真円度の大きな変化は確認できない (図-6) が、図-12 の差分コンターでは、全体的な傾向としては区間①同様に設計断面からの差はずれは小さい傾向がある一方で、局所的に1リング内や隣接するリング間の縦断方向で変位量の差が大きく発生し

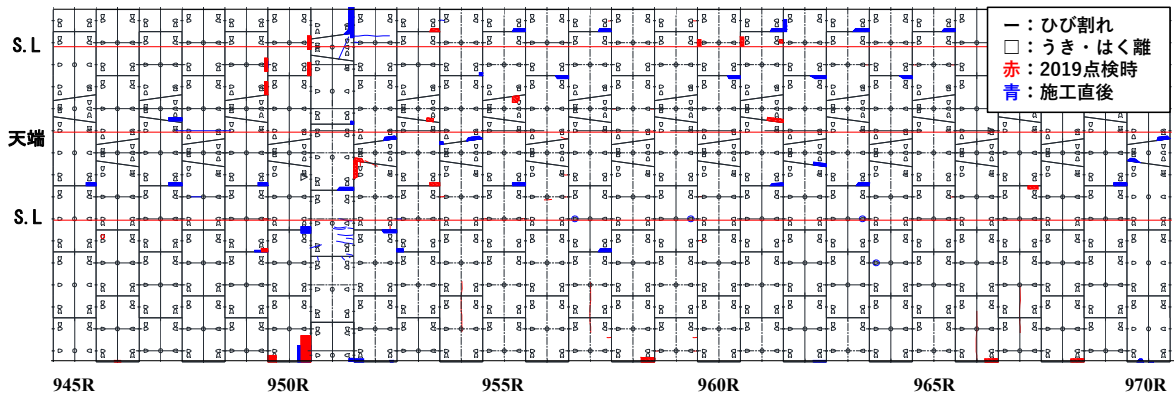


図-13 区間③の変状展開図

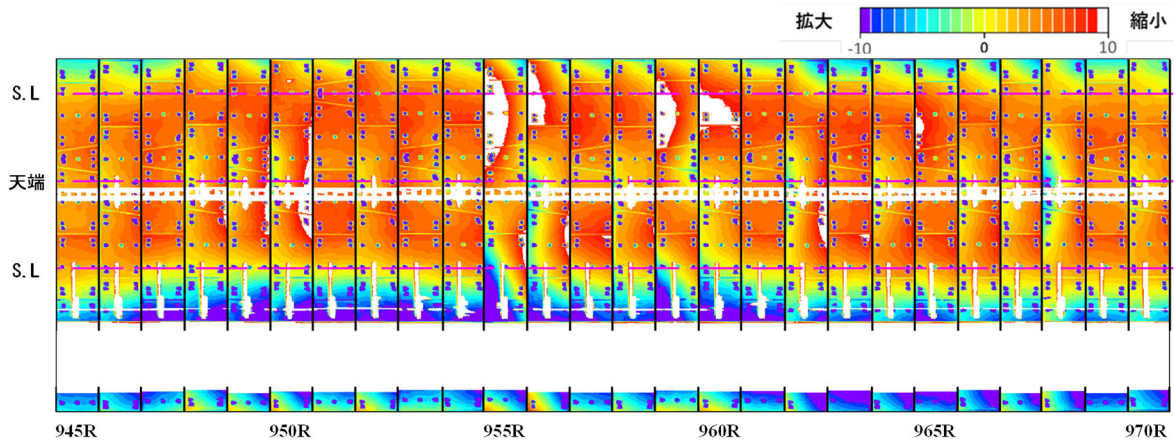


図-14 区間③の設計断面との差分コンター（スパン軸合わせ）

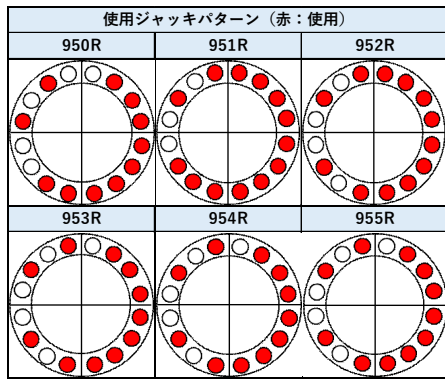


図-15 使用ジャッキパターン図

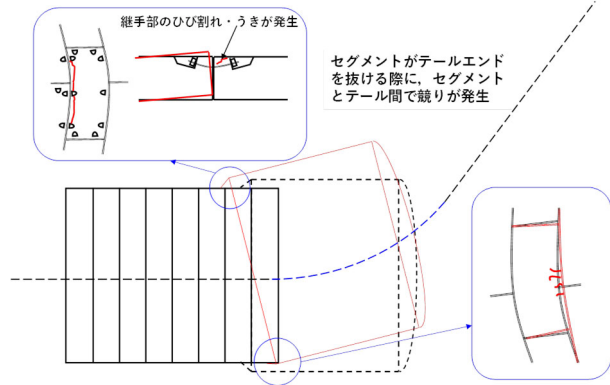


図-16 テール部とセグメントの競りによる変状イメージ⁶⁾

ていることがわかる。これらのことから、当該区間では蛇行修正を実施したことにより局所的に縦断方向のずれが生じ、目違いが拡大したことにより、リング継手部に負荷がかかりひび割れ等が発生した可能性が考えられる。

既往の研究において真円度の変化と変状の関係が報告されている³⁾が、点群データを用いた変形解析を行い、図-12に示すようなコンターを作図することにより、当該区間のように真円度が著しく変化していない区間での縦断方向の局所的な変位を把握し、変状が発生している箇所を予測できる可能性があることがわかった。

(3) 区間③ (945R~970R) に関する分析

図-13に当該区間の変状展開図を、図-14に現況断面の中心軸を基準とした設計断面（真円）からの差分コンターを示す。

当該区間では、KセグメントとB・Cセグメントの継手部、B(C)セグメントとAセグメントの継手部（うき・はく離が多く発生している。当該区間では水平蛇行量が大きく変化しており（図-5）、鉛直・水平の真円度も他の区間に比べ大きく変化している（図-6）。図-14に示すコンターにおいても、全体的に変状の少ない区間①のコンター（図-10）に比べて全体的に赤くなっ

ており現況の断面が何らかの理由で設計断面から変形していることが把握できる。また、図-8より、当該区間では急曲線（R=800m）施工を行ったため中折れ角の急激な変化やピッチング角の変化、左右ジャッキストローク差やテール部の水平方向のずれが拡大している。これらのことから、当該区間ではテールクリアランスの不足や隣接するセグメントの落ち込みによるKセグメント挿入時のスペース不足により目違いや目開き、トンネルの変形が発生し、これらの変状が発生した可能性が想定される。

また、950R～952RではSL付近に縦断方向のひび割れとリング継手面のうき・はく離及びKセグメントに隣接するセグメントのうき・はく離が多く発生している。950R付近は直線区間から急曲線区間への移行区間であることから各データの変化が著しくなっており、他のリングに比べテールクリアランスが著しく減少していた可能性が考えられる。ここで、掘進時のジャッキパターンを図-15に示す。ジャッキパターン図は切羽後方から切羽前方を見た際の左右上下を示しており、使用されたジャッキは赤色で示している。図-15からこの範囲では施工時に右側及び下部のジャッキが多く選択され、片押しとなるような極端なジャッキパターンが使用されていることがわかる。これらのことから、950R付近で考えられる変状メカニズムのイメージ図を図-16に示す。この範囲では施工時に右側及び下部のジャッキが多く選択され、他の区間に比べて偏圧やセグメントの落ち込みが顕著であった可能性が考えられる。また、片押しとなるような極端なジャッキパターンで急曲線施工を行ったため、他のリングよりもテールクリアランスが不足しており、テールとセグメントの間で競りが発生し、縦断方向のひび割れやリング間のうき等の変状が発生した可能性が考えられる。加えて、リング間の継手構造に曲がりボルトや継手面に緩衝キーと呼ばれる凹凸形状を採用していたため、継手部の変形余裕が少なく、変形時に負荷が生じやすくなっていた可能性が考えられる。

4. まとめ

本報告では、供用後10年以上経過しているシールド工法で施工された共同溝において、近接目視及び打音検査を実施するとともに、3Dスキャナーを用いた三次元断面計測により点群データを取得し現在の変状実態及び

断面形状を把握することで、リング毎の変状実態および断面形状の変化を整理し、シールドトンネル維持管理における三次元点群データの活用可能性について検討した。さらに、それらのデータを組み合わせて変状要因の推定を試みた。その結果、点群データを用いることで現況のトンネル形状を把握できることに加え、1リング毎の真円度及び蛇行量の算出や変形モード解析をすることで変状が発生している可能性のある区間の抽出が可能であることがわかった。また、それらの点群データから得られる情報と施工時データを組み合わせて分析することで施工時に発生したと考えられる変状の変状要因を推定できる可能性を確認した。施工直後から定期的に点群データを取得することで変状の進行性や変状の発生タイミングを把握することが可能であると考えられる。ただし、点群データの取得方法や整理手法については今後も検討が必要である。今後はこれらのデータを分析し、継手構造による影響や供用後の変状メカニズム等についても検討する予定である。

謝辞：本調査に当たっては国土交通省近畿地方整備局大阪国道事務所のご協力を頂いた。関係各位に深甚なる謝意を表す。

参考文献

- 1) 石村利明, 森本智, 佐々木亨, 日下敦：供用後のシールドトンネルの変状実態と施工時データの関係に関する一考察, 第34回日本道路会議論文集, No.6016, 2021.11.
- 2) 新都市社会技術融合研究会トンネル点検支援技術の高度化に関する研究プロジェクト：トンネル点検支援技術の高度化に関する研究 研究成果報告書, 2021.3
- 3) 佐々木亨, 石村利明, 森本智, 日下敦：シールドトンネル維持管理への点群データの活用に向けた一検討, 第77回年次学術講演会令和4年度全国大会, 2022.9 (投稿中)
- 4) 重田佳幸, 前田佳克, 水野希典, 海瀬忍, 前田洸樹, 山本秀樹, 安田亨：走行計測による既設トンネル覆工の外力変状評価, トンネル工学報告集, 第26巻, I-21, 2016.11.
- 5) 水口尚司, 大西有三, 西山哲, 西川啓一, 下澤正道, 石村勝伸：道路トンネルにおける画像及びレーザーデータを用いたマネジメント手法の研究, 土木工学論文集F2 (地下空間研究), Vol.71, No.1, 20-30, 2015.
- 6) 土木学会：シールドトンネルの施工時荷重, トンネルライブラリー17, pp.53, 2006.9

(2022. 8. 26 受付)

ESTIMATION OF DAMAGE FACTORS IN SHIELD TUNNELS USING CONSTRUCTION DATA AND POINT CLOUD DATA

Toru SASAKI, Toshiaki ISHIMURA, Satoshi MORIMOTO and Atsushi KUSAKA

Shield Tunnel are widely used mainly in urban areas. In shield tunnels, as well as mountain tunnels, damages have been observed that are thought to have been caused by deterioration and other factors. Therefore, it is necessary to establish a method to rationally maintain shield tunnels. This paper reports the results of an attempt to estimate the causes and timing of damage to shield tunnels using data obtained during construction, data for excavation control and evaluation of tunnel form, and point cloud data obtained after construction. As a result, the possibility of estimating the damage factor by using a combination of data obtained during construction and point cloud data was grasped.