

シールドトンネルの基礎的な挙動に関する現地計測

森本 智・砂金伸治・日下 敦・坂本 昇

1. はじめに

シールドトンネルはこれまでに都市部等の道路トンネルや共同溝の整備に多く用いられてきている。今後は、長期に亘る経年劣化に加え、環境条件や使用条件の変化等により変状が発生し、その性能が低下し、補修、補強が必要となる場合が想定される。シールドトンネルで発生している変状として、漏水、ひび割れ、断面欠損、過大な変形および鋼材の腐食による耐力の低下や覆工のはく離等があるが、その変状の実態、原因、発生メカニズムや対策工の効果等において明確ではないところがある。

これまでにシールドトンネルの変状事例について筆者らが調査した結果¹⁾によると、変状が多く発生しているトンネルの多くは30年以上前に建設され、継手部の止水材に非膨張性のシール材が用いられているトンネルである。それらのトンネルにおいては、変状の種類として漏水が多く発生している。一方、近年建設された継手部の止水材に膨張性のシール材を用いたトンネルについては、漏水の発生頻度が少ないが、今後、経過年数の増加に伴う変状が懸念される。そのため、シールド工法におけるトンネルの維持管理の手法を確立するにあたって、平常時の長期的な基礎的な挙動を把握し、トンネルを構成するセグメントや継手等の耐久性を検討する指標を得ることが重要であると考えている。

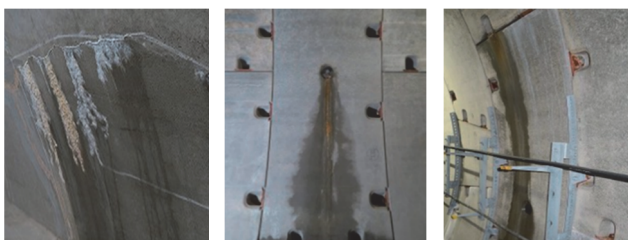


写真-1 シールドトンネルでの変状事例

ひび割れ 漏水 (注入孔) 漏水 (継手間)

本稿では、シールド工法により構築されたトンネルにおいて、概ね1年にわたってトンネル内の環境や覆工の周方向や縦断方向等の基礎的な挙動の計測結果の報告をするとともに、トンネルの挙動が発生する要因の一つとして、トンネル内の環境の変化等に着目して分析を行った結果について報告する。

2. 対象トンネル

トンネルの挙動の現地計測の対象は、シールド工法により建設された2つの共同溝で、二次覆工があるトンネルと一次覆工（セグメント）のみのトンネルの覆工構造の異なるトンネルである。

2.1 Aトンネル（二次覆工あり）

Aトンネルは二次覆工があり1997年に完成した共同溝で、延長は650m、最大土被りは約25m、外径は7.85mである。図-1にAトンネルの標準断面図を示す。一次覆工はRCセグメントでAセグメントの形状寸法は厚さ325mm、幅1,000mm、長さ3,380mmである。二次覆工はRC構造で厚さ200mm、打設スパンは9mである。トンネル内は占用物件を配置するため厚さ250mmの床版を水平方向に設置し上下の二層構造となっている。

本トンネルは、二次覆工のひび割れや漏水を伴うひび割れ等の変状が一部区間にて確認されたが、ひび割れ注入工等の対策工が施され、直近の点検結果では健全な状態が確認²⁾されている。

2.2 Bトンネル（一次覆工（セグメント）のみ）

一次覆工（セグメント）のみのBトンネルは、2003年に完成した共同溝で、延長は1,103m、最大土被りは約27m、外径は5.45mである。図-2にBトンネルの標準断面図を示す。一次覆工は、RCセグメントで、Aセグメントの形状寸法は、厚さ275mm、幅1,000mm、長さ3,260mmである。

3. 計測方法

トンネルの挙動の計測方法は、トンネル内の環

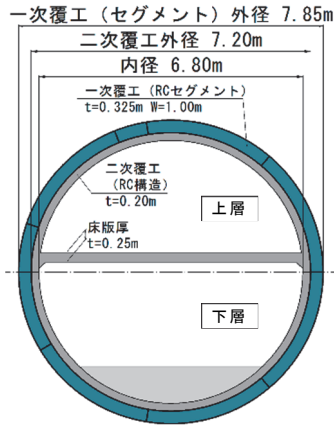


図-1 標準断面図 (Aトンネル)

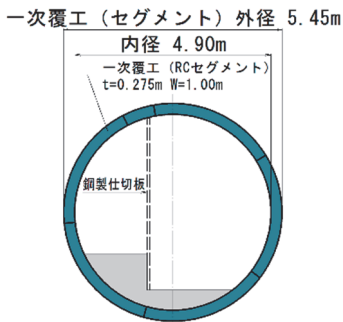


図-2 標準断面図 (Bトンネル)

境の変化や覆工の周方向や縦断方向の挙動を把握するため、トンネル内に温湿度計、二次覆工の目地間や一次覆工の継手間に亀裂変位計を設置し、10分間隔で測定を実施した。温度、湿度を除く計測の初期値は、計測開始時を0として整理した。

3.1 Aトンネル (二次覆工あり)

図-3にAトンネルでの計測機器配置図、写真-2に計測機器設置状況を示す。二次覆工の天端、側壁部の目地部の計2カ所に亀裂変位計と側壁部に温湿度計を設置した。計測機器の設置位置は立坑より180m、土被り25mの地点であり、上下二層の断面のうち二次覆工に変状の履歴があり内空断面に余裕があった上層とした。

3.2 Bトンネル (一次覆工 (セグメント) のみ)

図-4にBトンネルでの計測機器配置図を示す。一次覆工のセグメント間 (周方向)、リング間 (縦断方向) の継手部に各3カ所 (天端、肩部、側壁部) の計6カ所に亀裂変位計と側壁部に温湿度計を設置した。計測機器の設置位置は、立坑より76m、土被り24mの地点である。

4. 計測結果

4.1 計測結果

本計測において、トンネル内の環境は、外気と

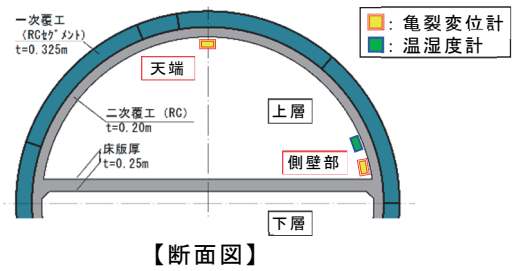
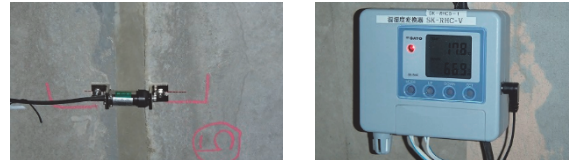


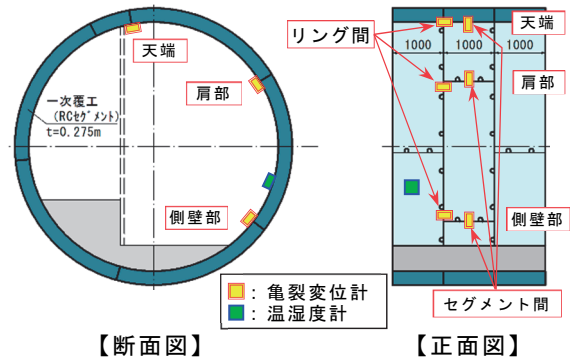
図-3 計測機器配置図 (Aトンネル)



亀裂変位計 (天端)

温湿度計 (側壁部)

写真-2 計測機器設置状況 (Aトンネル)



【断面図】

【正面図】

図-4 計測機器配置図 (Bトンネル)



写真-3 計測機器設置状況 (Bトンネル・側壁部)

の接触が少ないと考えられる共同溝でも年間を通じて長い周期で温度、湿度の変化があり、特に夏季の数ヶ月は多湿な環境であった。二次覆工の目地間や一次覆工の継手の変位は、季節変動に応じた温度の変化とほぼ同様の傾向で伸縮の発生が確認された。変位量の最大、最小発生時期は、坑内温度の変化に比べ遅れて発生した。

4.2 Aトンネル (二次覆工あり)

図-5にAトンネルにおけるトンネル内の温度、湿度および二次覆工の目地間の変位量の計測結果を示す。

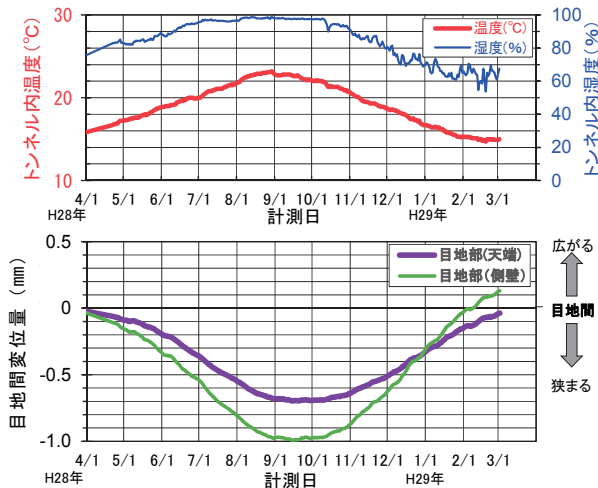


図-5 A トンネル 計測結果

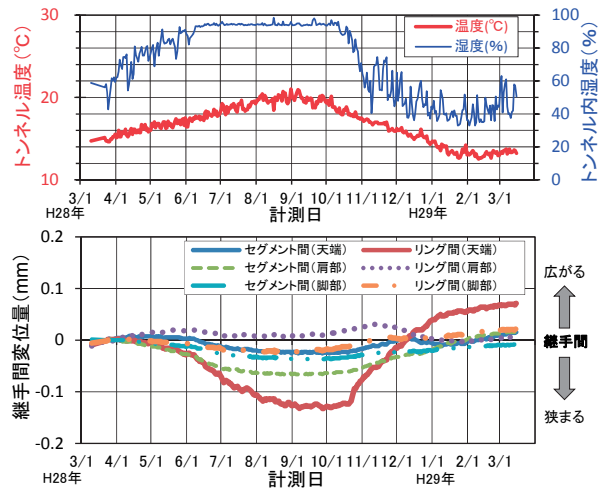


図-6 B トンネル 計測結果

4.2.1 トンネル内の温度、湿度

トンネル内の温度は最高が8月末、最低が2月中旬、湿度は7月上旬～10月中旬で90%以上の高湿度が継続し、最低が2月中旬に計測された。トンネル内の環境変化は、温度差で約9℃、湿度差で約40%が確認された。トンネル近傍のアメダス観測所で計測された温度、湿度³⁾と比較すると、温度差は約32℃、湿度差は約70%であり、坑内は坑外に比べ温度、湿度の変化は小さい。

4.2.2 目地間の変位

目地間の変位は、側壁および天端とも最小値が9月中旬、最大値が3月中旬に計測された。目地間の変位は、側壁で約1.1mm、天端で約0.7mmであった。

4.3 Bトンネル（一次覆工（セグメント）のみ）

図-6にBトンネルにおけるトンネル内の温度、湿度および一次覆工の継手間の変位量の計測結果を示す。

4.3.1 トンネル内の温度、湿度

トンネル内において、温度は最高が8月末、最低が2月上旬、湿度は6月中旬～10月中旬で90%以上の高湿度が継続し、最低が2月上旬に計測された。トンネル内の環境は、温度差で約8℃、湿度差で約60%の変化が確認された。トンネル近傍のアメダス観測所で計測された温度、湿度³⁾と比較すると、温度差は約30℃、湿度差は約60%であり、トンネル坑内は坑外に比べ温度の変化は小さいが、湿度の変化は同程度であった。

4.3.2 継手間の変位

継手間の変位は、リング間およびセグメント間とも最小値が9月上旬～下旬、最大値が3月中旬

に計測された。継手間の変位は、リング間では天端が最大で約0.2mm、セグメント間では肩部が最大で約0.1mmが確認された。

5. 考察

今回の計測結果により、シールド工法によるトンネルにおける二次覆工の目地間や一次覆工の継手間の伸縮は、1年間程度の周期で発生していることが確認された。この周期で伸縮が発生する要因として想定されるのは、坑内環境の変化と地下水水位の変動である。

坑内環境の変化と二次覆工の目地間や一次覆工の継手間の伸縮の相関については、温度、湿度の変化時期とほぼ同様の傾向で確認された。変位量の最小、最大発生時期は、温度の最高、最低時期に比べ約1ヶ月後の時間差があり、これはトンネル内の気温と覆工内部のコンクリート温度の変化する時期の違いによるものと想定される。

山岳工法における覆工の挙動を長期計測した実績⁴⁾では、覆工内部の温度の最高、最低発生時期は、坑内温度の最高、最低発生時期より約1～2ヶ月遅れて発生し、ひび割れ幅は覆工内温度や坑内温湿度等の変化の影響を受けることが明らかとなっている。この関係は本トンネルにおいても同様であると考えられるが、道路トンネルと共同溝といったトンネルの用途や坑口などが常時開放されることによる影響等については今後の検証が必要である。

一方、温度変化に伴うコンクリートの収縮変形については、温度変化に比例し、変位量は温度差、部材長、熱膨張係数(RC構造物： $10 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)

の積より算出できる。表-1に各トンネルの覆工部材長を用いて、今回の計測結果での温度差より変位量を試算した結果を示す。Aトンネルで計測した二次覆工の目地間における変位量は、計算値に比べ同程度の値となっている。一方、Bトンネルのセグメントのリング間やセグメント間の変位量は、計算値に比べ小さい値となった。この原因として、一次覆工は土圧や水圧の作用による断面拘束や、継手による拘束を受けることから、セグメントの挙動にもそれらが影響したと考えられる。

地下水位の変動については、近傍のデータを入手できたAトンネルで検証したが、本計測期間内で水位差が約10cm程度と大きな変動はなく、この変動の範囲内では覆工の伸縮への影響は、ほぼ無いと想定される。

表-1 温度変化に伴う収縮変位量 (計測値、計算値)

| 計測部位 | 部材長 (m) | 計測値 | | 計算値 |
|-------|-------------|----------|----------|----------|
| | | 温度差 (°C) | 変位量 (mm) | 変位量 (mm) |
| Aトンネル | 二次覆工 目地間 | 天端 | 8.5 | 0.70 |
| | | 側壁 | | 1.12 |
| Bトンネル | リング間 | 天端 | 8.4 | 0.20 |
| | | 肩部 | | 0.04 |
| | | 側壁 | | 0.05 |
| | セグメント間 | 天端 | | 0.04 |
| | | 肩部 | | 0.08 |
| | | 側壁 | | 0.04 |

温度差: 本計測期間内での坑内の最高温度と最低温度の差
 変位量: 本計測期間内での目地間や継手間の最大・最小変位量の差
 計算値: 部材長、温度差(計測値)を用いて算出
 変位量(mm) = 温度差(°C) × 部材長さ(mm) × 熱膨張係数
 (熱膨張係数: RC構造物10×10⁻⁶/°C)

6. おわりに

シールド工法により構築された二次覆工ありのトンネルおよび一次覆工のみのトンネルにおいて、挙動を長期計測した結果、以下の知見が得られた。
 ・今回計測したシールド工法によるトンネルでは、一次覆工の継手間、二次覆工の目地間の伸縮が年間を通じた周期で発生することを確認した。これより、覆工の挙動は供用期間に

おいて継続的に発生することが想定される。

- ・覆工の挙動は、坑内温度の変化に対し多少遅れて発生していることが確認され、現時点の考察では坑内環境の変化が主な要因と推定される。
- ・覆工の挙動について、温度変化に比例すると仮定し算出した値と比較した結果、一次覆工のセグメント間・リング間と、二次覆工の目地間では異なる傾向となり、現時点の考察では構造条件の違いによると推定される。

今回計測したトンネルは、外気との接触が少ない共同溝であったが、今後、整備の増加が見込まれるシールド工法による長大道路トンネルにおいては、外気の侵入や車両の排熱により坑内環境の変化がより大きくなることも想定される。

今後は、長期にわたるトンネルの挙動計測を継続し結果を精査するとともに、漏水等の変状との関連性について検証し、効率的な維持管理手法の確立に資する検討を行っていきたいと考えている。

謝 辞

本計測は、共同溝を管理する東京国道事務所、大阪国道事務所の全面的な協力により得られたものである。本計測の携わる関係各位に深甚なる謝意を表す。

参考文献

- 1) 森本智、日下敦、石村利明、砂金伸治：シールドトンネルにおける変状発生メカニズムに関する研究、トンネル工学報告集、第25巻、II-3、2015.11
- 2) 森本智、砂金伸治、石村利明、日下敦、坂本昇：シールドトンネルにおける変状対策工の効果に関する研究、トンネル工学報告集、第26巻、II-6、2016.11
- 3) 気象庁アメダス HP 過去の気象データ検索：<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>
- 4) 笹田俊之、砂金伸治、石村利明：長期計測結果にもとづいたトンネル覆工の挙動に関する考察、トンネル工学報告集、第24巻、I-3、2014.12

森本 智



土木研究所道路技術
研究グループトンネル
チーム 研究員
Satoshi MORIMOTO

砂金伸治



土木研究所道路技術
研究グループトンネル
チーム 上席研究員、
工博
Dr. Nobuharu ISAGO

日下 敦



土木研究所道路技術
研究グループトンネル
チーム 主任研究員
Atsushi KUSAKA

坂本 昇



土木研究所道路技術
研究グループトンネル
チーム 交流研究員
Noboru SAKAMOTO

