シールドトンネルにおける覆工の温度伸縮に関する一考察

森本　智[1]・日下　敦[2]・坂本　昇[3]・砂金　伸治[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:s-morimoto@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:kusaka@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）
現　八千代エンジニヤリング株式会社（〒111-8648 東京都台東区浅草橋5-20-8 CSタワー）
E-mail: nb-sakamoto@yachiyo-eng.co.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）
現　公立大学法人 首都大学東京（〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1）
E-mail: nisago@tmu.ac.jp

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，今後の維持管理手法の確立に資する基礎資料として活用するため，トンネル内の温度・湿度，セグメント間の目開き量，二次覆工の横断目地間の開き量やひび割れ幅を約 3 年間にわたり計測した結果を報告するとともに，これらの挙動の発生要因について考察する．対象は，一次覆工（セグメント）のみのトンネルと二次覆工が施工されているトンネルの 2 トンネルとした．計測結果からトンネル内は季節に応じて温度・湿度が変化し，セグメント間の目開き量や二次覆工の横断目地間の開き量やひび割れ幅が伸縮することが確認された．この伸縮はおおむね温度の変化に応じて発生することが確認された．

Key Words: *shield tunnel, lining, long-term measurement, maintenance*

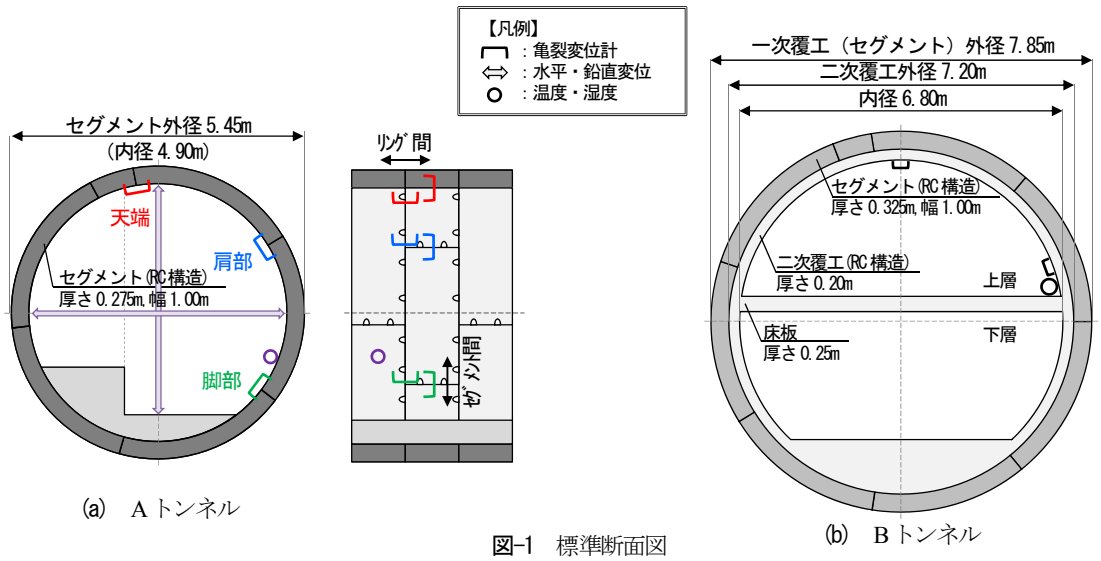
1. はじめに

道路トンネルの覆工コンクリートに求める機能として，「トンネルの構造安定性の確保」および「利用者の安全性の確保」がある．これらの機能を確保するためには，トンネルに変状等が発生した場合，構造に応じた覆工の挙動を踏まえ，変状の発生原因を適切に判定し健全性を診断する必要がある．NATMにおける覆工の挙動は，長期計測結果から覆工の温度と覆工の横断目地間の伸縮の関係等が報告されている事例がある [1]．一方，シールドトンネルの覆工の挙動は，筆者らにより，シールド工法により建設された共同溝において目視調査 [2]，および覆工のひび割れ幅等の計測結果の報告 [3]があるものの短期の計測期間において得られた結果について論じたものにとどまっている．

また，シールドトンネルにおいては，二次覆工に材質劣化に伴うひび割れ等の変状が発生する場合がある [2]．材質劣化による変状の発生や進行は，トンネル内の温度変化等によるコンクリートの伸縮が長期にわたり繰り返し発生することによる影響を受けると考えられる．しかし，変状への影響を検討するうえで基礎的なデータとなり得る温度変化やそれに伴う覆工の伸縮等の知見は限られている．

また，都市内の長大道路トンネルでは，夏季にトンネル内温度が最大 45℃まで上昇した事例 [4]がある．シールド工法による道路トンネルの整備が増加しており，これらのトンネルにおいても，都市内の長大道路トンネルでの事例と同様にトンネル内の温度・湿度等の環境が変化することが想定される．そのため，シールドトンネルの維持管理においては，トンネル内の環境変化による影響について着目することが重要であると考えられる．

本稿では，トンネル内の温度・湿度，セグメント間の目開き量，二次覆工の横断目地間の開き量・ひび割れ幅を約 3 年間にわたり計測した結果およびその関連性等を分析した結果について報告する．



(a)　A トンネル　　(b)　B トンネル

図-1　標準断面図

2.　対象トンネル

(1)　A トンネル（一次覆工（セグメント）のみ）

A トンネルは，シールド工法により建設された共同溝で 2003 年に完成している．延長は 1,100m 程度，最大土被りは 27m 程度，内径は約 4.9m である．掘削断面周辺の地質は，沖積粘性土または洪積砂質土が主体である．**図-1** (a) に標準断面図を示す．セグメントは RC 構造でセグメントの形状寸法は厚さ 275mm，縦断方向長さ（幅）1,000mm，周方向長さ（弧長）3,260mm である．継手構造は直ボルトタイプを用いている。なお，二次覆工は施工されていない．

(2)　B トンネル（二次覆工あり）

B トンネルは，シールド工法により建設された共同溝で 1997 年に完成している．延長は 650m 程度，最大土被りは 25m 程度，内径は約 6.8m である．掘削断面周辺の地質は，沖積粘性土または洪積砂質土が主体である．**図-1** (b) に標準断面図を示す．一次覆工のセグメントは RC 構造で厚さ 325mm，幅 1,000mm，弧長 3,380mm である．二次覆工は RC 構造で厚さ 200mm，打設スパン長さ 9m である．トンネル内は占用物件の配置の都合等により，厚さ 250mm の床版が水平方向に設置され，上下二層構造となっている．B トンネルは，完成から 5 年程度経過した時点に，二次覆工に漏水を伴うひび割れが発生し，本対策として止水注入工が施工され，対策後 10 年程度経過した時点の調査により，健全な状態を維持していることが確認されている [2].

3.　計測・観察方法

両トンネルにおいてトンネル内の温度・湿度，A トンネルではセグメント間の目開き量，B トンネルでは二次覆工の横断目地間の開き量や二次覆工に発生しているひび割れ幅を計測した．計測された値は，温度・湿度を除き計測開始時を初期値ゼロとしてその後の変化値として整理した．また，B トンネルでは二次覆工のひび割れを目視にて観察した．なお，両トンネルともに 1 日に 1 回程度の頻度でトンネル内の空気の入れ換えを目的とした換気運転を行っている。

(1)　A トンネル

計測項目は，トンネル内の温度・湿度，セグメント内のコンクリート温度（表面から内側へ 30mm 程度の深さ），トンネルの断面変形（水平・鉛直変位），セグメントの目開き量とした．セグメントの目開きはセグメント間とリング間を対象とし，セグメント間は B セグメントと K セグメントの間とした．断面変形は非接触型変位計，目開き量は亀裂変位計を用いて計測した．本調査は 2016 年 3 月頃に開始し，断面変形は 2016 年 7 月頃，セグメント内の温度は 2017 年 3 月に追加設置した温度計により測定した．計測機器の配置を**図-1** (a) の標準断面図にあわせて示す．

(2)　B トンネル

目視観察は近接目視により実施し，把握できたひび割れは 0.3mm に満たない微細なものも含め記録した．計測項目は，トンネル内の温度・湿度，二次覆工の横断目地間の開き量とひび割れ幅とした．目地間の開き量・ひび割れ幅は亀裂変位計によりそれぞれ計測した．計測箇所は，目地間は天端付近とし，ひび割れは縦断方向に発生したもの（幅の増減は横断方向に変化）として 2 箇所選定した．亀裂変位計の配置を**図-1** (b) の標準断面図，また，後述する**図-6** の変状展開図にあわせて示す．

4. 調査・計測結果

(1) A トンネル

図-2 に A トンネル内の温度・湿度の変化を示す．例年，トンネル内の温度は 8 月頃に最大 20 度程度，2 月頃に最小 12 度程度となり，年間を通じた温度差は 8 度程度であった．湿度は夏季の数ヶ月間は多湿となる傾向にあった．図-3 にトンネルの断面変形（水平・鉛直変位）を示す．水平変位，鉛直変位ともに，10 月頃に最大となり 2 月頃に最小となった．その変位差は，水平変位で 2.9mm 程度，鉛直変位で 2.7mm 程度であった．図-4 にセグメント間の目開き量，図-5 にリング間の目開き量を示す．セグメント間，リング間の目開き量は，ともに 9 月頃に最少となり 3 月頃に最大となった．目開き量の差は，セグメント間は天端で 0.060mm，肩部で 0.089mm，脚部で 0.055mm となり，各部位はおおむね同程度となった．一方，リング間は天端で 0.207mm，肩部で 0.038mm，脚部で 0.057mm となり，天端においては肩部・脚部と比較し大きな変形が確認された．

(2) B トンネル

図-6 に目視観察で得られた B トンネルの変状展開図を示す．完成から 15 年経過した時点における目視観察で確認された変状 [2]を黒字で，その後，新たに確認された変状を赤字で示す．新たに確認された変状は，前回までの目視観察で確認されたひび割れから進展したものが多く，その幅は 0.3mm 未満の微細なものであった．外力の作用が疑われるひび割れは確認されなかったことから，乾燥収縮や温度変化による材質劣化に起因するひび割れと考えられる．また，漏水対策を実施した箇所 [2]においては新たな漏水の発生等はなく，健全な状態を維持していることが確認できた．

図-7 にトンネル内の温度・湿度の変化を示す．例年，トンネル内の温度は 15 度から 23 度程度の範囲で変化し，湿度は夏季の数ヶ月間は多湿となる傾向にあった．図-8 に横断目地間の開き量とひび割れ幅を示す．目地間の開き量，2 箇所のひび割れ幅ともに，9 月頃に最少となり，3 月頃に最大となった．目開き量の差は 0.83mm 程度，ひび割れ幅の差はひび割れ①は 0.35mm 程度，ひび割れ②は 0.35mm 程度であった．

以上の結果から，対象トンネルはともに共同溝で外気との換気が少ないものの，季節に応じて温度・湿度が変化し，夏季の数ヶ月は多湿な環境であったが，セグメント間の目開き量，二次覆工の横断目地間の開き量やひび割れ幅は，季節に応じて変化を繰り返すことが確認された．

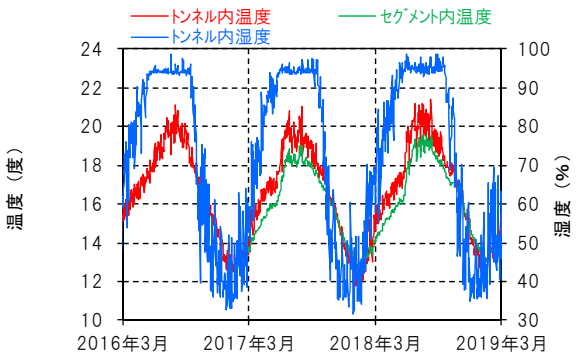


図-2 トンネル内の温度・湿度（A トンネル）

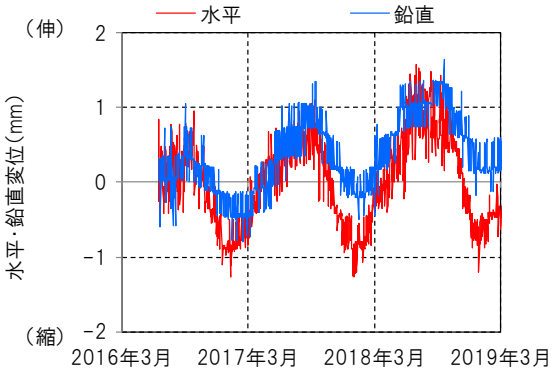


図-3 断面変形（A トンネル）

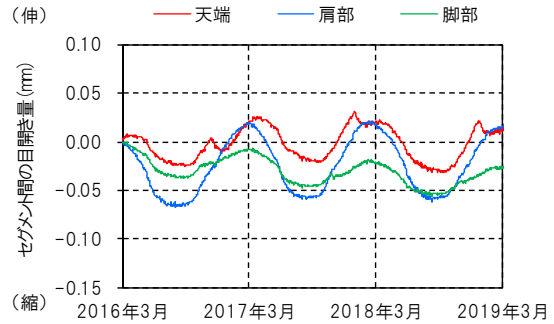


図-4 セグメント間の目開き量（A トンネル）

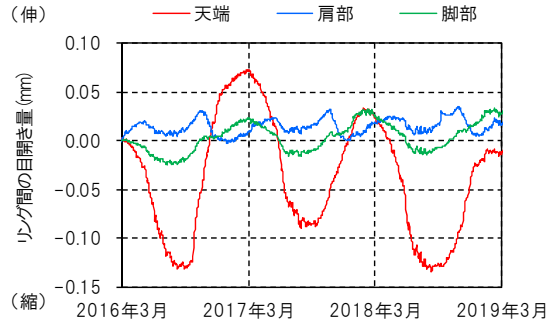


図-5 リング間の目開き量（A トンネル）

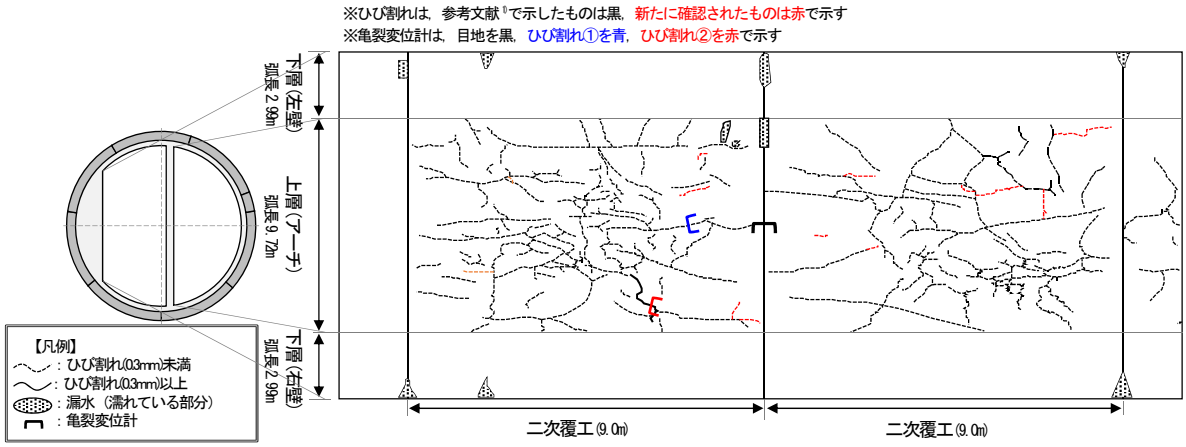


図-6　変状展開図（B トンネル）

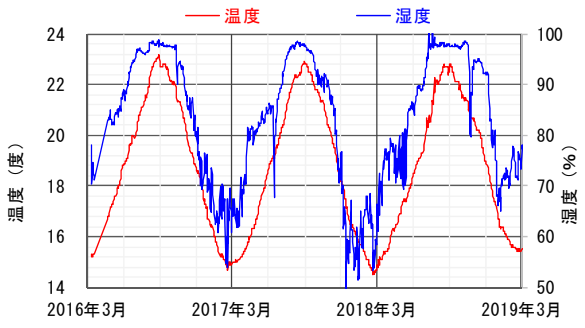


図-7　トンネル内の温度・湿度（B トンネル）

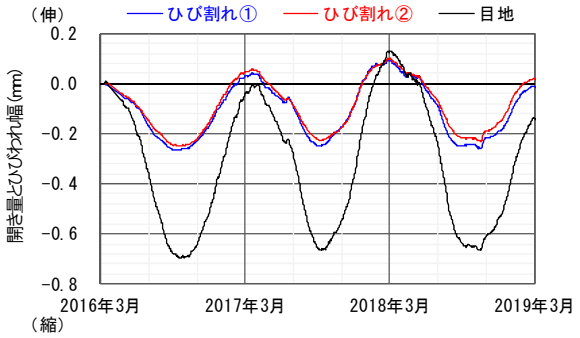


図-8　目地間の開き量とひび割れ幅（B トンネル）

5.　温度変化に伴う覆工の挙動

4．で示した結果をふまえ，温度差に伴うコンクリートの伸縮量の推定値として，温度差，部材長，熱膨張係数の積から算出できると仮定し，トンネル内の温度変化とコンクリートの伸縮量の関係について考察する．ここでの部材長は，縦断方向の部材長さ（A トンネルはセグメント幅= 1.0m，B トンネルはスパン長=9.0m）または周方向の部材長さ（A トンネルはセグメントの弧長=3.26m，B トンネルは内径 6.8m の円の周長=21.3m）と仮定した．熱膨張係数は RC 構造物の値（10×10^{-6}/℃）とした．

(1)　一次覆工（セグメント等）の挙動

図-9 に A トンネル内の温度とセグメント間の目開き量の関係を示す．セグメント間の目開き量は，温度の変化とおおむね傾向が一致する関係にあるものの，その傾きは温度変化によるコンクリートの伸縮量の推定値と比較し小さい値となった．図-10 に温度とリング間の目開き量の関係を示す．リング間の目開き量は，肩部・脚部においては温度の変化とおおむね傾向が一致する関係にあるものの，その傾きは温度変化によるコンクリートの伸縮量の推定値と比較し小さい値となった．一方，天端においては温度変化によるコンクリートの伸縮量の推定値と比較し大きい値となった．このことは，温度変化によるコンクリートの伸縮に加え，他の要因として，伸縮方向に対し角度を有する B セグメントと K セグメント間の目開き量が軸力の作用により複雑な挙動として現れている可能性が考えられる．

(2)　二次覆工の挙動

図-11 に B トンネルの温度と横断目地間の開き量・ひび割れ幅の関係を示す．目地間の開き量とひび割れ幅は，温度の変化とおおむね傾向が一致する関係にあることがわかる．また，その傾きは，熱膨張係数と部材長の積で表されるコンクリートの伸縮量と比較し，目地間の開き量ではおおむね同程度となり，ひび割れ幅では小さな値となった．このことは，温度変化により発生するひずみは，縦断方向は横断目地に集中し，横断方向は複数あるひび割れ等に分散するためであると考えられる．さらに，温度変化と目地間の開き量の関係はループを描くような履歴となり，温度の変化に遅れて目地間の開き量が変化していることを示している。計測値を確認したところ，目開き量が最大となる時期は最低温度を記録した時期から約１ヶ月の遅れ，目開き量が最小となる時期は最高温度を記録した時期から約１ヶ月の遅れとなっていた。この挙動は，温度変化とひび割れ幅の関係においても同様であった。

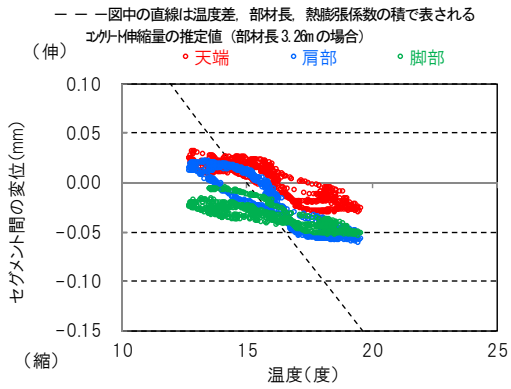


図-9　温度とセグメント間の目開き量の関係
（A トンネル）

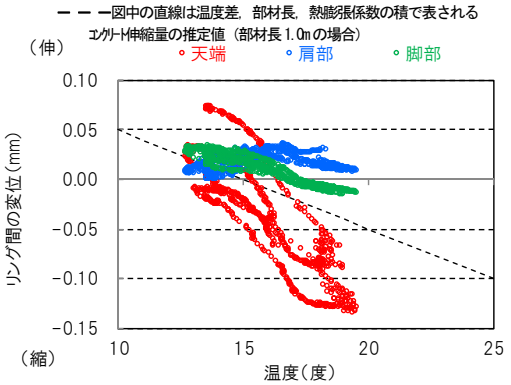


図-10　温度とリング間の目開き量の関係
（A トンネル）

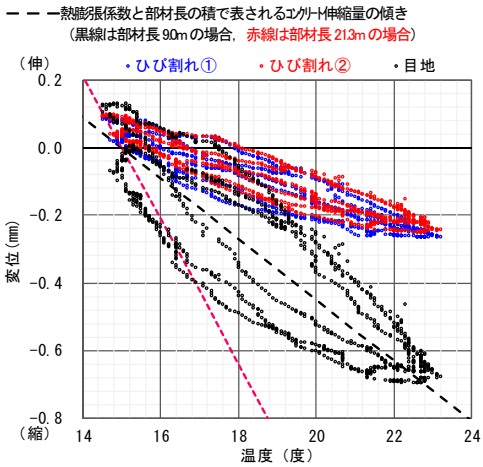


図-11　温度と目地間の開き量・ひび割れ幅の関係
（B トンネル）

6.　おわりに

シールド工法により構築されたトンネルにおいて，トンネル内の温度・湿度，セグメント間の目開き量，二次覆工の目地間の開き量やひび割れ幅について約 3 年間にわたり計測した結果，以下の知見が得られた．

1)　本調査を実施したシールドトンネルにおいては，トンネル内は季節に応じて温度が変化し，それに応じて，セグメント間の目開き量，二次覆工の目地間の開き量やひび割れ幅が伸縮することが確認された．

2)　セグメント間の目開き量は，伸縮方向の部材長に応じて発生量に違いが出ることが確認された．

3)　二次覆工の目地間の開き量は熱膨張係数と部材長の積で表されるコンクリートの伸縮量と同程度となることが確認された．このことは，温度変化により発生する縦断方向のひずみは横断目地に集中するためと考えられる．

4)　二次覆工のひび割れ幅は熱膨張係数と部材長の積で表されるコンクリートの伸縮量と比較し小さな値となることが確認された．このことは，温度変化により発生する横断方向のひずみは，複数あるひび割れ等に分散するためと考えられる．

セグメントや二次覆工は温度の変化に応じて収縮し，セグメント間の目開き量や二次覆工の目地間の開き量等は繰り返し変動する．一方で，このような挙動は長期間にわたり繰り返し発生することになるが，セグメントや二次覆工の劣化，継手や止水材の長期耐久性にどのような影響を与えるかは十分に解明されておらず今後の課題である．

シールドトンネルの維持管理においては，目地付近やひび割れが確認された付近においては，近接目視による点検に加え，打音検査や漏水状況の把握をあわせて行い，セグメントのうき・はく離や継手部等の劣化が発生していないか確認することが重要であると考えられる．

謝辞

本計測は，国土交通省関東地方整備局東京国道事務所，近畿地方整備局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．関係各位に深甚なる謝意を表す．

参考文献

1)　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

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)　坂本昇，森本智，砂金伸治，日下敦：シールドトンネルの覆工における挙動発生要因に関する一考察，トンネル工学報告集，第 27 巻，Ⅱ-5，2017.11

4)　矢崎巧：首都高速中央環状線山手トンネル内の温度上昇抑制対策の概要，地下空間シンポジウム論文・報告集，第 20 巻，C2-4，2015.1.

(2019. 8. 9 受付)

SEASONAL MOVEMENT OF TUNNEL LINING IN ACTUAL SHIELD TUNNELS

Satoshi MORIMOTO, Atsushi KUSAKA, Noboru SAKAMOTO and Nobuharu ISAGO

Many shield tunnels have been constructed in urban areas, which should be maintained properly to confirm the structural stability and secure the users' safety. However, the influence of tunnel environments including a seasonal fluctuation of temperature on the mechanical behavior of lining is uncertain in many cases. In order to examine the above and establish maintenance method of the tunnel by shield tunneling method, we report on the result of the basic behavior of tunnel lining refering measurement for approximately 3 years. From the measurement results, the fluctuation of temperature in the tunnel was confirmed according to the seasonal change, as well as, the expansion and contraction of the joint of lining and segment. This expansion and contraction was confirmed with the same tendency as the change in temperature with annual change, while a time lag exists.