

鉄道トンネルで発生している変状実態に関する一考察

A CONSIDERATION ON THE STATE OF DEFORMATION OCCURRING IN A RAILWAY TUNNEL

込山 実¹・伊藤 信²・菅藤 太郎³・山村 啓一⁴

Minoru KOMIYAMA¹, Sin ITO², Taro KANTOU³, Keiichi YAMAMURA⁴

In order to grasp the current situation of the tunnel, we confirmed the condition of occurrence of deformation occurring in the tunnel. As a result, the deformations occurring in the tunnel were mostly cracked, we confirmed occurrence trends due to differences in geology, climate and distance from the entrance of tunnel, but also we confirmed occurrence trends due to the influence of individual factors. In the analysis of flaking concrete in tunnel, the mortar for repairing was the most frequent, and it was confirmed that these were influenced by water leakage and freezing and thawing action. We report the future maintenance policy based on the above matter.

Key Words : railway, tunnel lining, maintenance, deformation, aging

1. はじめに

JR東日本が所有し維持管理を行っているトンネルは，新幹線で延長約440km，坑数約200坑，在来線で延長約520km，坑数約1,000坑に及ぶ．それらのトンネルの経年を図-1に示す．現在，5割強のトンネルが経年50年を超えており，20年後には全トンネルの約9割が経年50年を超える．これらトンネルの経年の進行に対して，維持管理に関わる技術者の数は，社会的な少子化の影響に伴い減少していくと想定される．そのため，今後の維持管理においては，これまで以上に効果的かつ効率的な検査，措置を計画的に実施していく必要がある．

本稿では，効果的かつ効率的な検査，措置に資する知見を得ることを目的として，トンネル内で発生する変状分析を行い，その傾向を確認した結果を報告する．

2. 分析概要

トンネル内で発生する変状は，トンネルの健全度に影響を与える．トンネルの健全度は，構造物自体の健全度

と，はく落に対する健全度に区分される¹⁾．そこで，トンネル本体の健全度に影響する変状とはく落について，それぞれ発生傾向の分析を行った．

3. トンネル本体の健全度に影響する変状の分析

(1) 分析の対象となるデータ概要

トンネル本体の健全度に影響する変状の分析では，トンネル覆工表面撮影車²⁾のデータを分析の対象とした．トンネル覆工表面撮影車で得られたデータは，変状展開図に変換される．変状展開図は撮影画像に基づき作成す

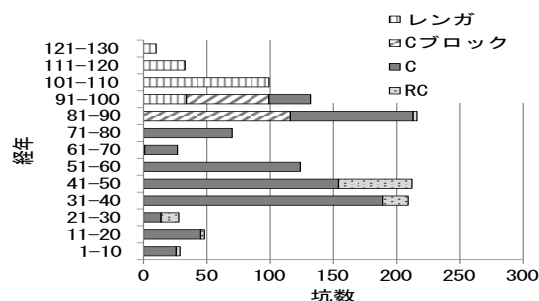


図-1 JR東日本の鉄道トンネルの経年分布

キーワード：鉄道，トンネル，メンテナンス，変状，経年

1 正会員 東日本旅客鉄道株式会社 構造技術センター East Japan Railway Company (E-mail:m-komiyamai@jreast.co.jp)

2 正会員 東日本旅客鉄道株式会社 鉄道事業本部 East Japan Railway Company

3 正会員 ジェイアール東日本コンサルタンツ株式会社 技術本部 防災計画部 JR East Consultants Company

4 正会員 東日本旅客鉄道株式会社 鉄道事業本部 East Japan Railway Company

るため、検査者の技術力の影響を受けないデータとなる。今回は、変状展開図から変状のデータを抽出し、変状分析を行った。

(2) 分析の対象となるトンネル概要

変状分析を行う前段として分析の対象となるトンネルの覆工材質を把握した。新幹線トンネルはすべてコンクリートであるが、在来線は多様であるため、トンネルの延長を覆工材料別に区分し整理した(図-2)。これらの結果から、新幹線、在来線とも覆工材質はコンクリートが総延長の多数を占めていることが確認された。

(3) 全体的な変状傾向の分析

トンネルが置かれる環境は様々であり、同じ年代、材料及び施工法であっても発生する変状の傾向は異なる可能性がある。そのため、全体的な変状の傾向と個々のトンネルの変状の傾向の両面から分析を行うこととした。本節では、全体的な変状の傾向に関する分析結果を示す。対象トンネルには、様々な覆工材料のトンネルがある。これらの覆工材料が異なるトンネルを画一的に分析した場合、変状発生傾向が捉えにくくなる可能性がある。そのため、分析対象の覆工材料を新幹線、在来線とも多数を占めるコンクリートに限定することとした。更に、コンクリートトンネルは施工法も様々であるため、施工法についても比較的延長が長い山岳工法(矢板工法、NATM)で施工されたトンネルを対象とした。

また、対象とする変状についても画一的な分析では発生傾向が捉えにくくなる可能性があるため、対象とする変状を限定することとした。コンクリートトンネルにおける変状種別ごとの発生割合を図-3に示す。この結果から、発生割合が5割以上を占めるひび割れに限定して分析を行うこととした。なお、分析における指標は、各トンネルに発生したひび割れの数を延長あたりに換算した数値(以降、ひび割れ数)を用いることとした。

なお、分析における着目点としては、これまでの既往の研究³⁾や知見¹⁾等を参考にして、①施工年代、②グリーンタフ地域、③ひび割れの発生位置の各々について、ひび割れ数との関係を分析した。

a) 施工年代とひび割れの数の関係

施工年代とひび割れ数の比率(以降、ひび割れ比率)の関係について分析した。新幹線は2010年代のひび割れ数を、在来線は1990年代のひび割れ数を基準値1として、施工年代ごとのひび割れ比率を算出した。その結果を図-4に示す。図-4より新幹線トンネルにおける2010年代のひび割れ比率は、他の年代に比べ低いことがわかる。これは、矢板工法に代わり主流となったNATMにおいて、施工法、品質管理が近年改良されているためと推測される。一方、在来線では建設年代とひび割れ比率に明瞭な

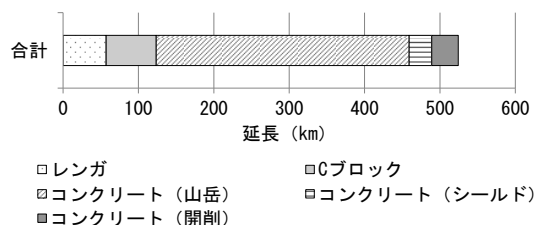


図-2 覆工材料別延長(在来線)

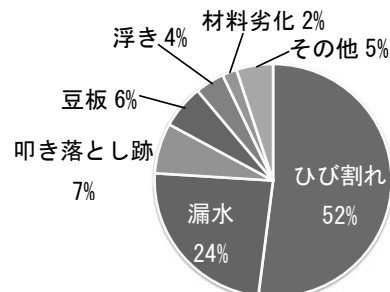


図-3 コンクリートトンネルにおける変状割合

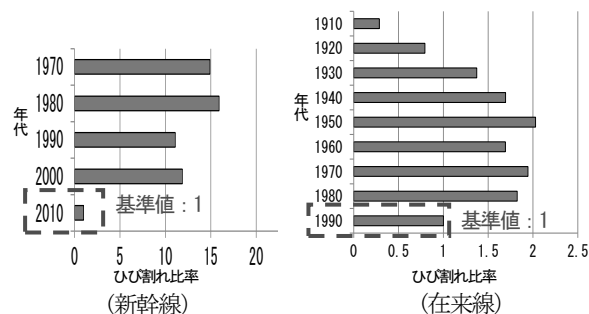


図-4 施工年代とひび割れ比率の関係

凡例 ■ グリーンタフ地域



図-5 グリーンタフ地域と鉄道路線の位置関係

関係性はみられず、古い年代ほどひび割れ比率が高い傾向は見られなかった。

b) グリーンタフとひび割れの数の関係

既往の知見より、グリーンタフ地域に位置するトンネルでは、塑性圧によるひび割れが発生しやすいと言われている¹⁾。そこで、トンネルがグリーンタフ地域に位置するのか、その他の地域に位置するのかを区分し、分析を行った。グリーンタフ地域と鉄道路線との位置関係を図-5に示す。分析は新幹線、在来線別に行い、いずれもその他の地域を基準としてひび割れ比率を算出した。結果を図-6に示す。グリーンタフ地域のトンネルはその他の地域と比較し、新幹線、在来線ともにひび割れ比率が高い傾向が確認された。また、既往の知見より複線トンネルと単線トンネルでは、単線トンネルのほうが塑性

圧の影響を受けやすいと言われている¹⁾。断面形状の違いによる傾向を確認するため、在来線トンネルを単線、複線に区分し、ひび割れ数の分析を実施した。結果を図-7に示す。単線トンネルでは、グリーントフ地域のトンネルがその他の地域と比較してひび割れ比率が高い傾向が確認された。

これらの結果より、グリーントフ地域のトンネルでは、塑性圧の影響によりひび割れが発生しやすく、断面形状によりその影響を受けやすいことが確認された。

c) ひび割れ発生位置と数の関係

既往の知見より、トンネルの坑口付近にはひび割れが発生しやすいと言われている。そこで、トンネル内の坑口付近及びそれ以外の区間のひび割れの発生傾向について分析を行った。

分析では、各トンネルの坑口(入口及び出口)からトンネル中間部まで、10mを1区間として分割し、各々の区間のひび割れ数を算出した。次に、最も坑口よりの区間のひび割れ数を基準とし、各区間のひび割れ比率を算出した。分析は、全体の傾向と地域別に分析を行った。

最初に、全トンネルに対する分析結果を図-8に示す。この結果から、坑口付近のひび割れ比率が高く、坑内に入るにつれ、ひび割れ比率が減少する傾向が確認された。

次に、図-9に、トンネルが位置する地域を5分割(首都圏、北関東、甲信越、北東北、南東北)し、分析を行った結果を示す。各地域の中でも、北東北では、ひび割れ比率が坑口から坑内に入るにつれ減少する傾向が、他の地域に比べ明確に確認された。この原因として、寒冷地である北東北では、温度変化の影響が他の地域より大きいため、坑口付近にひび割れが多く発生していると推測される。

(4) 個々のトンネルの変状傾向の分析

前節でコンクリートトンネルのひび割れに着目して、全体的な発生傾向を既往の研究等により得られた知見と比較して検討を実施した。その結果、グリーントフ地域とひび割れ比率の関係では比較的明確な傾向を示す結果が得られたものの、坑口からの距離とひび割れ比率の関係では一様な傾向は得られない結果も見られた。この原因は、個々のトンネルの地形、地質、施工環境等の相違の影響と推測される。そのため、個々のトンネルの地形、地質、施工環境等の情報とひび割れ数の関係性について分析を行った。

a) 分析の対象となるトンネル

分析では、ひび割れが多く発生しており、地形、地質、施工環境等の記録が多く存在するトンネルを対象とすることで、地形、地質、施工環境等とひび割れの発生傾向の関係が見えると考えた。そこで、それらの地形、地質、施工環境等の記録が比較的多く存在している新幹線のト

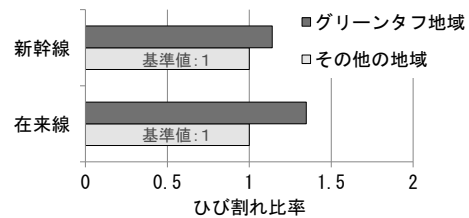


図-6 グリーントフ地域とひび割れ比率の関係(新幹線・在来線)

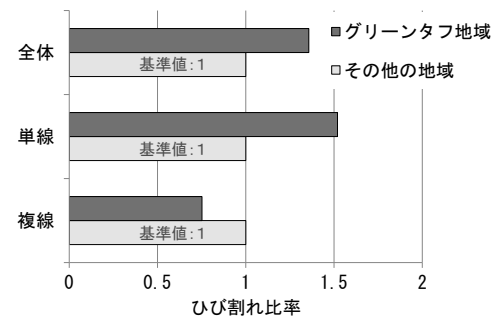


図-7 グリーントフ地域とひび割れ比率の関係(断面形状別)

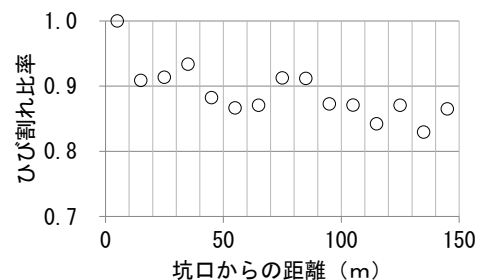


図-8 坑口からの距離とひび割れ比率の関係

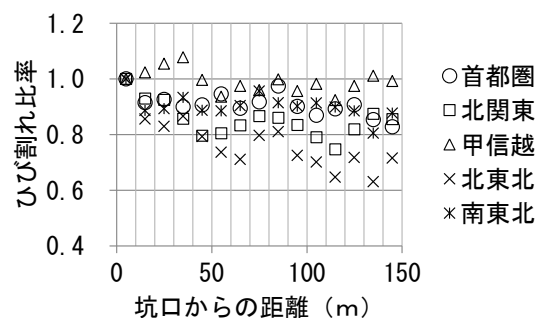


図-9 坑口からの距離とひび割れ比率の関係(地域別)

ンネルを対象とし分析を行った。本稿ではひび割れ比率上位2トンネルの分析結果を示す。

b) 分析結果

図-10に分析を実施したトンネルの結果を示す。まず、Aトンネルのひび割れ比率が高い区間は、断層破碎帯と地山の状態が比較的悪いことが影響していると推測される。次に、Bトンネルのひび割れ比率が高い区間は、NATMが導入され間もない時期にNATMを適用した区間の他、地山の状態が比較的悪い場合に採用される側壁導坑先進上部半断面工法で施工された区間であり、地山の

状態が比較的悪いことが影響していると推測される。

このように、個々のトンネルにおいてひび割れが発生した要因として、地質や施工法が関係している結果が見られた一方で、施工法や工事誌より地山条件が悪い区間であるがひび割れ比率が低く、上記分析結果と異なり、因果関係が明確では無い区間があることが確認できた。

4. はく落の分析

(1) 分析の対象となるデータ概要

トンネル内で発生するはく落の分析では、JR東日本でこれまで発生したはく落事象のデータを分析の対象とすることとした。図-11に2003年6月から2016年6月に発生した無筋コンクリート覆工のトンネルのはく落事象を、トンネル本体と補修工で区分して整理した結果を示す。この結果より、無筋コンクリート覆工のトンネルにおいて、列車運行に影響を与えるはく落の約6割は、補修工で発生していることが分かる。このことから、はく落の分析では補修工のはく落事象のデータを対象として、分析することとした。

(2) 分析の対象となる補修工概要

補修工のはく落事象ではモルタル、シート工、導水材等がはく落（垂下含む）している。はく落したものの内訳を示したのが図-12であり、モルタルのはく落が約9割を占めることが確認された。

トンネルに使用されるモルタルは補修モルタルと迫め部モルタルに区分できるが、はく落したモルタルの内、約6割が補修モルタルであることが確認されたため、補修モルタルに着目して分析を行うこととした。

(3) 補修モルタルのはく落傾向の分析

分析における着目点は、国土交通省が実施した類似の検討を参考とした⁴⁾。この検討では、鉄道で発生したはく落事象を分析しており、得られた知見の一つとして、はく落事象の一部が漏水及び凍結融解等の水に起因したものであることを述べている。そのため、それらの要因と関係する項目として、①漏水の有無、②坑口からの距離、③はく落発生時期の3項目を仮定し、はく落事象との関係について分析した。

(4) 漏水とはく落事象の関係

漏水の有無が確認されたはく落事象を対象に、漏水の有無別に整理した結果を図-13に示す。この結果から、漏水が有る箇所が発生した事象が約9割を占めることが確認された。

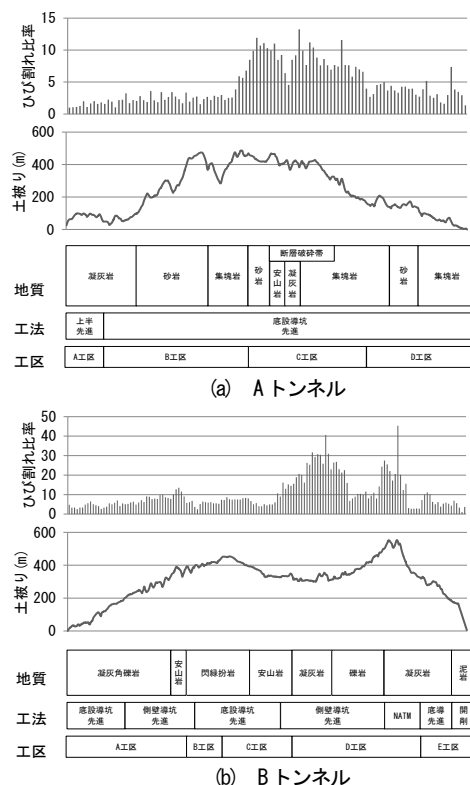


図-10 ひび割れ比率と土被り等の関係

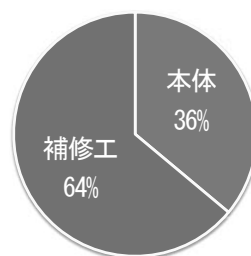


図-11 無筋コンクリート覆工のトンネルで発生したはく落事象（2003年6月～2016年6月）

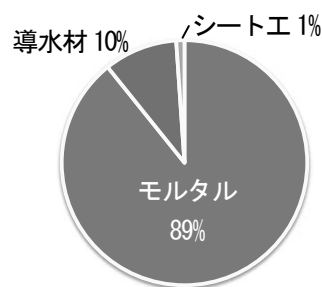


図-12 補修工のはく落事象内訳

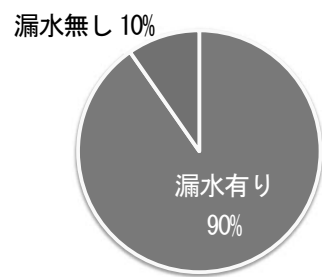


図-13 補修モルタルはく落事象内訳（漏水有無別）

(5) 発生位置とはく落事象の関係

はく落事象が発生した位置を、坑口からの距離別に整理した結果を図-14に示す。この結果から、坑口から100m未満で発生した事象が約6割を占めることが確認された。また、それらの内訳ではアーチ部で発生したものが約6割を占めることが確認された。

(6) はく落発生時期とはく落事象の関係

はく落事象を発生時期別に整理した結果を図-15に示す。この結果から、発生時期は2～5月に発生した事象が約6割を占めることが確認された。

(7) 補修モルタルのはく落原因

これらの分析結果を踏まえて、漏水の有無、坑口からの距離、発生時期を重ね合わせて整理した結果を図-16に示す。この結果から、坑口から100m未満の漏水がある箇所で、融雪期を含み比較的温度変化が大きいと推測される2～5月に発生した事象が約5割を占めることが確認された。そのため、補修モルタルのはく落の原因の一つとして、国土交通省の分析結果と同様に、漏水及び凍結融解作用の影響が考えられる。

5. まとめ

(1) 施工年代とひび割れの数関係

新幹線のトンネルでは、施工法、品質管理の改善による影響で、ひび割れの数が少ない年代が見られた。一方、在来線のトンネルでも、直近の施工年代ではひび割れの数が少ない傾向が見られた。

(2) グリーンタフとひび割れの数関係

新幹線、在来線いずれにおいてもグリーンタフ地域のトンネルは、その他の地域のトンネルと比較してひび割れの数が多い傾向が見られた。更に、その傾向に断面形状が関係している傾向が見られた。

(3) ひび割れの発生位置と数の関係

全体的な傾向では、坑口から坑内に入るにつれ、ひび割れの数が増加する傾向が見られた。

地域別の傾向では、北東北のトンネルで、坑口から坑内に入るにつれてひび割れの数が増加する傾向が、他の地域より明確に見られた。

これらの傾向の原因として、温度変化による凍結融解作用が影響していると考えられる。

(4) 個々のトンネルのひび割れ発生要因

個々のトンネルの傾向では地形、地質、施工環境とひ

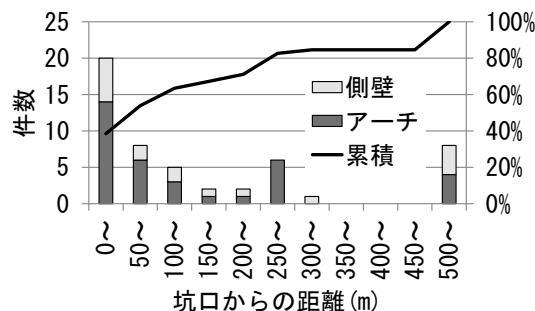


図-14 補修モルタルはく落事象内訳（発生位置別）

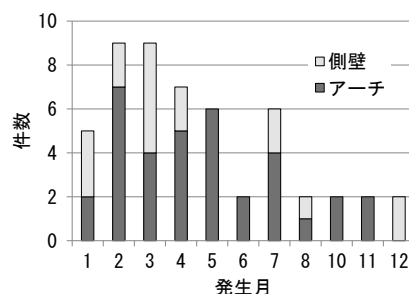


図-15 補修モルタルはく落事象内訳（発生時期別）

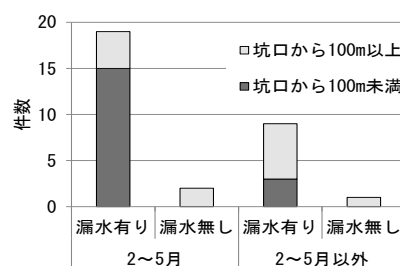


図-16 補修モルタルはく落事象内訳
(漏水有無、発生位置及び時期別)

び割れの発生状況について一様な傾向は見られなかった。

(5) 補修工のはく落

補修モルタルのはく落の傾向では、坑口から100m未満のアーチ部・漏水箇所が発生する傾向があり、原因の一つとして、凍結融解作用の影響が考えられる。

6. 今後の取組み

(1) トンネル本体の維持管理

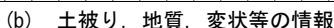
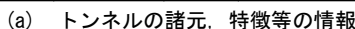
今回の分析により、トンネル本体の健全度に影響する変状としてひび割れを例として、その発生に一定の傾向を確認することができた。一方で、傾向に沿わないひび割れの発生状況も確認されている。この原因は、トンネルが置かれた環境や施工法、構造条件等が様々であり、ひび割れの発生する原因は個別の要素の影響が大部分を占めている可能性が考えられる。そこで、今後の維持管理を更に効果的かつ効率的に実施していくためには、各トンネルの施工年代、地域、地質、施工法及び変状分布などの情報を整理したトンネルカルテの整備を進めてい

(2) トンネル補修工の維持管理

7. おわりに

参考文献

- 1) 国土交通省鉄道局監修，鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編）トンネル，pp125-145，丸善，2007.
- 2) 鈴木延彰：トンネル覆工表面撮影車の導入，日本鉄道施設協会誌，8，pp623-625，2000.
- 3) 石村 利明，砂金 伸治，笹田 俊之：道路トンネルの点検結果に基づく変状実態に関する一考察，地下空間シンポジウム論文・報告集，VOL20，pp165-170，2015.
- 4) 国土交通省鉄道局：鉄道構造物の維持管理に関する基準の検証について，2014



- 162 -