

現地計測に基づく既設トンネルの変状の進行に関する考察

砂金伸治・真下英人・石村利明

1. はじめに

道路トンネルでは、施工時には観察・計測等を通じて地山等級に見合った支保工を構築し、変形が収束していると判断した後に覆工を施工する。また、供用時には定期的に点検を実施し、変状の発生の有無やその状態を把握している。しかし、供用後に外力によるひび割れや盤ぶくれ等の変状がトンネルに発生している例も報告されている¹⁾。このような変状は時間の経過とともに緩慢に進行することが多く、メカニズムの検証も行われている²⁾。しかし、通常の施工や後の点検で得られる範囲でのデータのみから変状の進行を詳細に議論することには限界があることも多い。

筆者らは変状の進行する状況を把握し、トンネルの変形のメカニズムを解明するために、矢板工法による既設のトンネルにおいて、地山の特性を把握したうえで、変状の状況の観察やトンネル構造に関する計測を行っている³⁾。本稿ではこれまでの3年間に計測した結果をもとに上述の観点により考察した結果を報告する。

2. 調査・計測の対象トンネル

図-1に本分析で対象としたトンネルのイメージを示す。対象トンネルは、過去よりトンネル内で顕著な盤ぶくれ区間が存在するとの情報があった東日本に存在する2車線道路トンネルである。当時の資料によれば、施工は昭和38～42年に行われ、延長が915mと報告されており、現在は廃道になっている。施工は木製支柱式支保工を使用して建設され、掘削工法は底設導坑先進上部半断面工法との記録がある。

また、同トンネル内には最大で90cm以上を示す盤ぶくれ区間が坑口より約160m、270mおよび480m程度付近の3箇所が存在する。これらをそれぞれ盤ぶくれ区間①～③と称する。資料によれば、盤ぶくれ区間①と②の地質は第三紀の泥岩、

区間③は凝灰質砂岩、また、覆工厚は盤ぶくれ区間①と②で60cm、区間③で40cmとの記録が存在する。

この盤ぶくれ区間①～③において遠望目視によって覆工等の状況を観察したところ、盤ぶくれに加え、覆工にひび割れや曲げにより圧縮状態の損傷を生じる「圧ざ」、せん断破壊等が多く発生し、一部には漏水が見られた。そこでこれらの区間を主な対象として詳細な調査や計測を行った。

詳細な調査や計測は3カ年に渡って実施した。具体には1年目は11月中旬、2年目は翌年の10月下旬、3年目はさらに翌年の11月上旬に実施し、概ね1年経過毎の変状や変形に関する特性等を把握した。トンネルの変状に関する調査として、1年目は覆工に対して近接目視により観察を行い、打音試験および写真撮影を実施するとともに変状の判定を行い、ひび割れ展開図を作成した。また、2年目および3年目は、そのうち特に顕著な30箇所の変状に着目し、その進行等の情報の補完を行う観点で同様の調査を行った。変状の判定は表-1に示す判定区分⁴⁾に基づいて行い、1年目の調査の時点を基準とし、27箇所を3A、1箇所を2A、2箇所をAと判定したものを対象とした。なお、変状の判定は覆工の変形やひび割れの発生、うき・はく離等に対して行われるが、特に判定区分が3Aとは変状が大きく通行者・通行車両に対して危険があるため直ちになんらかの対策が必要と位置づけられるものであり、構造物の機能が著しく

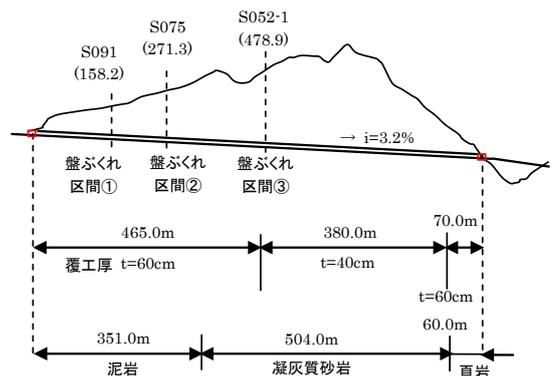


図-1 計測実施トンネル

低下していると判断されるものである。

また、地山特性に関する調査として、2年目の調査において盤ぶくれ区間③に、深度15mまで水平方向および鉛直方向の2箇所までφ66mmのボーリングを実施してコアを採取し、その範囲で地山や覆工コンクリートの背面等の調査を行った。また、採取したコアを用いて一軸圧縮強さ、ヤング率等の項目に加え、浸水崩壊度^{*}や膨張性粘土の有無などを把握するための岩石試験を行った。加えて、鉛直方向のボーリング孔を活用して地中変位計を6点設置し、2年目から3年目の調査にわたって地中変位の変化を計測した。

さらに、断面の変形に関する調査として、1～3年目の調査時に区間①～③のそれぞれ1断面ずつで変形を計測し、内空変位の経年変化を算定したとともに、その区間で路面の縦断方向の変位を水準測量にて計測した。

3. 調査・計測結果および考察

3.1 はく落に関する結果

顕著な30箇所の変状に関して、点検による判定や観察等を行った結果を分析した。表-2に対象とした変状の箇所における変状現象の区分と、1年目の調査の結果を受けた2年目および3年目の調査において見られた変状のはく落数を示す。2年目においては、1年目で3Aと評価されたうち18箇所、2Aと評価されたうち1箇所の合計19箇所、また3年目においては、1年目で3Aと評価されたうち新たに5箇所を含む合計24箇所に変状の一部もしくは大部分がはく落した状況が確認された。部位の分類はアーチが全26箇所中で2年目で19箇所、3年目で22箇所ではく落しており、側壁および水平打継目の変状では3年目で2箇所のはく落が見られた。本結果より、豆板、スケーリング等が生じている場合の変状のうち、3Aと評価され

た変状に関しては実際に1年程度以内ではく落が生じることが多く、また、ひび割れやコールドジョイント沿いに生じている変状部分についても、2年程度以内ではく落が生じることが多かった。また実際にはく落が生じた要因を推定すると、材質劣化の進行に加え、漏水の凍結膨張などによるはく落の進行が考えられた。このことから、判定区分が3Aとなった場合は実際に2年以内ではく落を生じることが多く、現場においても早急な対策が求められることが分かる。

3.2 地山の変形メカニズムに関する考察

地山の挙動と特性の関連性を把握するために、区間③のボーリング結果と変状現象の関連性について考察した。写真-1にボーリングを実施した直近の側壁の変状状況を示す。側壁では圧が生じており、覆工コンクリートの落下が見られた。また、その付近では天端に圧の発生も認められた。

図-2に区間③の地山特性の分析結果を示す。ボーリングの採取コアによれば、覆工コンクリートや路盤の背面では、断層粘土や断層角礫が認められ、粘土鉱物としてスメクタイト^{*}や緑泥石、雲母類も確認された。また、CEC試験^{*}を実施したところ、膨張性の特性が出やすい交換性ナトリウムが多く確認された。また、トンネルの下方約

表-2 変状現象区分とはく落数

変状現象区分	変状の全数 (1年目)	はく落数	
		2年目	3年目
		上段:アーチ部(計26箇所) 下段:側壁部(計4箇所)	
ひび割れ:ひび割れ沿い、コールドジョイント沿い	10	8	7
		2	2
ひび割れ:圧ざ	2	2	1
		0	-
覆工の材質劣化:豆板、スケーリング、ポップアウト	10	10	9
		0	-
補修材劣化:セメント系材料	7	5	4
		2	0
その他	1	1	0
		0	-
計	30	26	22
		4	2

表-1 本検討における判定区分

	覆工コンクリートの変形、移動、沈下	覆工コンクリートのひび割れ	覆工コンクリートのうき・はく落
3A	変形、移動、沈下などしており、構造物の機能が著しく低下しているもの	ひび割れが大きく密集している。また、せん断ひび割れが生じ、進行が大きいと認められるもの	アーチ上部のひび割れの密集・圧ざによるうき、はく落が生じコンクリート塊が落下するおそれのあるもの
2A	変形、移動、沈下などしており、近いうちに構造物の機能低下が予想されるもの	ひび割れが大きく密集している。また、せん断ひび割れが生じ、進行が認められるもの	側壁部のひび割れの密集・圧ざによるうき、はく落が生じコンクリート塊が落下するおそれのあるもの
A	変形、移動、沈下などしているが、進行が緩慢であるもの	ひび割れがあり、進行が認められるもの	-
B	変形、移動、沈下などしているが、進行が停止しており、変状が再発するおそれのないもの	ひび割れがあるが、進行が認められないもの	-

^{*}土木用語解説：浸水崩壊度、スメクタイト、CEC試験

10m、側方約10mが断層破碎帯に相当する地質で、特に下方約7~8m、側方約1~2mでは地山が粘土状を呈していることが判明した。その区間はボーリングが無水で実施でき、また、下方では水の存在により地山が緩んでいる可能性が高いことが分かった。さらに深い部分ではボーリングの範囲内では塊状の砂質泥岩であると考えられた。

また、図-2に鉛直方向への地中変位の計測結果を示した。これより、地表から断層粘土または断層角礫に至る部分と考えられる深度が8m程度までの領域で変位が発生しており、上述のボーリング結果とほぼ合致した。このことは、トンネルの盤ぶくれは断層粘土の厚さに比例して生じている可能性が高いと示唆される。ただし、深度が浅くなるにつれて累積変位量が大きくなる結果とはなっていない計測点も見受けられ、変位の変化に関して今後も注視する必要があると考えられる。

図-3に区間③の路面高さを計測した結果を示す。これより著しい隆起量を示す区間が比較的短い区間長に限定されていたことが分かる。計画高さから盤ぶくれによる隆起量を計算し、隆起速度を算出したところ、1~2年目で最大で24mm/年程度であった。また、2年目の計測時点でボーリングを行い、地中変位計を設置したところ2~3年目の隆起速度は最大で56mm/年程度となり、その最大値が得られた位置はボーリングを行った位置と一致した。これはボーリングにより局所的に地山が乱されたり、穿孔時に水を使用した等による影響によって隆起が促進された可能性が考えられる。それ以外では、1~2年目の路面高さの変化よりも2~3年目の変化が小さくなっており、時間の経過とともに変位の変化量が少なくなっていることが分かる。

さらに、区間③のボーリングを実施した断面で内空変位を計測した。その結果、1~2年目で約1.0mm/年、2~3年目で約6.7mm/年で断面が縮小する方向に変形した。内空変位の速度も増加していることが分かったが、路盤の変形速度との関連性についてはさらなる分析が必要である。

以上より、実際の変形の速度を比較すると側壁の収縮より盤ぶくれの方が顕著である。この現象は上述のボーリングによる地山特性の分析結果と併せて考えると、粘土状を呈している地山の厚さに関連して変形が生じ、坑内での変状の発生に



写真-1 側壁の変状状況の例

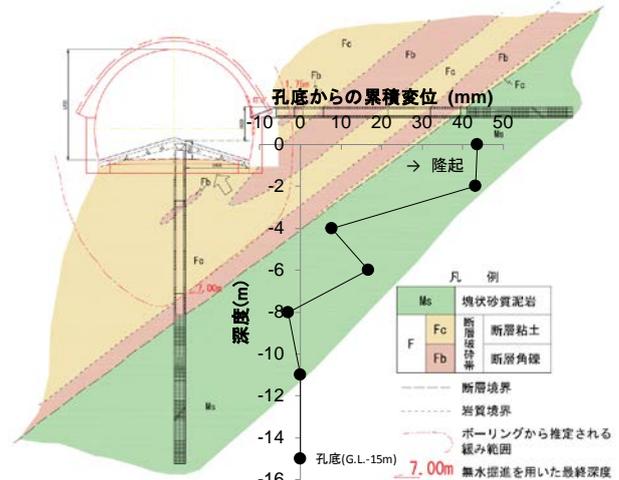


図-2 ボーリングによる地山特性の分析結果および地中変位

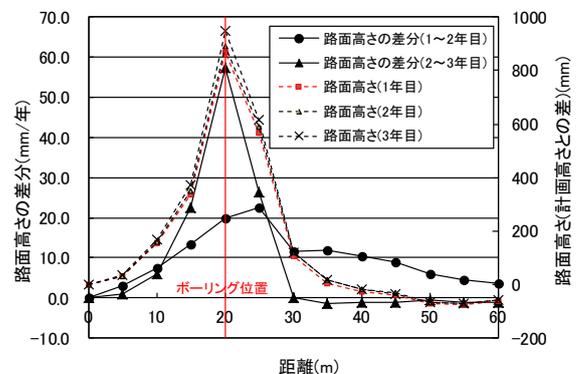


図-3 水準測量による路面高さ計測結果(盤ぶくれ区間③)

至っていると考えられる。すなわち、地質の詳細な情報と、その厚さが得られることで変形量や構造体に作用する外力が推定できる可能性がある。ただし、定性的な情報にとどまるが、区間③では湧水も見られており、その関連性の検討も必要であると考えられる。なお、この区間③においては2~3年目に関して新たにひび割れの発生が10箇所観察されている。これらについても、構造の影響を考慮し、引き続き分析を行う必要である。

また、図-4に盤ぶくれ区間①における路面高さ、図-5に盤ぶくれ区間②における路面高さの計測結果をそれぞれ示す。盤ぶくれ区間①の変形速度は

1～2年目で28mm/年、2～3年目で36mm/年であった。内空変位については距離がほぼ35mの地点で計測した結果であるが1～2年目で5.8mm/年、2～3年目で4.4mm/年で断面が縮小する方向に変形しており、路盤の隆起速度は増加、内空変位の変位速度は減少している。また、区間②においては路盤の隆起速度は減少し、内空変位の変位速度は増加する傾向にあった。

区間①～③の計測結果より、今回の計測では内空変位と隆起速度が共に減少する現象は見られなかった。これは、計測結果の一部からその断面の変位の収束が判定出来ない場合があると考えられる。すなわち、対策工を設計する場合、構造体に作用する外力が推定可能でも、その値が変形が今後どの程度継続するか依存することになり、1つの計測データからは判断できない場合もあると言える。なお、ひび割れの増加は区間①では存在せず、区間②では6箇所を観察された。ひび割れの増加によって変形が開放されて、変形が生じない可能性もあることから、これらの関連性に関してもさらなる分析が必要である。

4. おわりに

本報では、既設トンネルにおいて、変状の状況と地山データの観察や計測結果をもとに、変状の進行に関して考察した。覆工の点検時による評価と実際のはく落の関係を明らかにしたとともに、ボーリングによるデータに基づいて、トンネルの変形のメカニズムや変状の発生との関連性を把握した。今後は、路盤の隆起、内空変位、地中変位の計測を継続的に行い、変状の発生との関連や、変位の発生深度が変化するかどうかといった検討とともに、トンネル構造の状態を考慮して数値解析を行い、変形等の現象の解明を行う予定である。

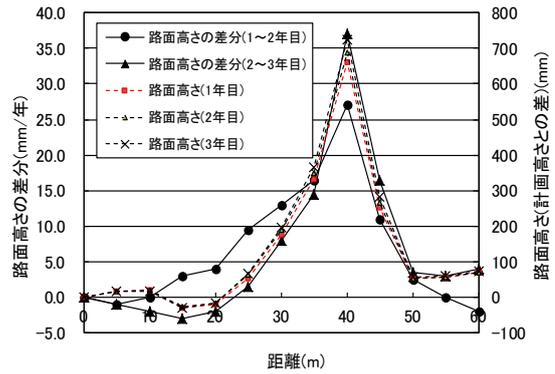


図-4 水準測量による路面高さ計測結果 (盤ぶくれ区間①)

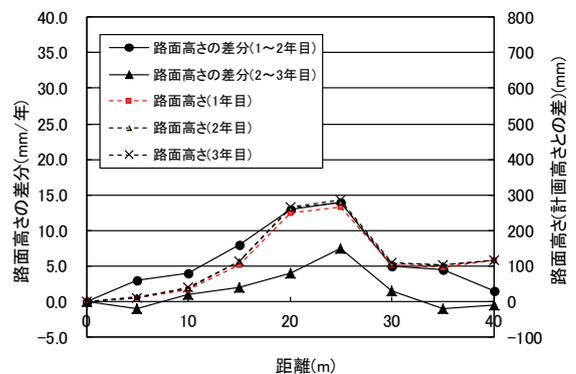


図-5 水準測量による路面高さ計測結果 (盤ぶくれ区間②)

参考文献

- 1) 奥井雄三、太田裕之、早川泰史、伊佐治晋：緩慢に進行する盤ぶくれ現象の調査とトンネルの安定性評価に対する一考察、トンネル工学報告集、第20巻、pp.85～92、2010.11
- 2) 野城一栄、嶋本敬介、小島芳之、高橋幹夫、松長剛、朝倉俊弘：地山劣化モデルによるトンネル変状の再現解析とその長期予測への適用、土木学会論文集C、Vol.65、No.1、pp.107～119、2009.2
- 3) 砂金伸治、日下敦、真下英人、角湯克典：現地計測結果に基づく既設トンネルの変形メカニズムに関する考察、第47回地盤工学研究発表会 平成24年度発表講演集、pp.1275～1276、2012.7
- 4) (社)日本道路協会：道路トンネル維持管理便覧、1993

砂金伸治



(独)土木研究所つくば中央研究所
道路技術研究グループトンネル
チーム 上席研究員、博士(工学)
Dr. Nobuharu ISAGO

真下英人



(独)土木研究所つくば中央研究所
道路技術研究グループ長、博士
(工学)
Dr. Hideto MASHIMO

石村利明



(独)土木研究所つくば中央研究所
道路技術研究グループトンネル
チーム 総括主任研究員
Toshiaki ISHIMURA