

既設トンネルの変状の進行および 対策工の効果に関する考察

砂金 伸治^{1*}・河田 皓介¹・日下 敦¹・淡路 動太¹・石村 利明¹

¹土木研究所 道路技術研究グループ（〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6）

*E-mail: n-isago@pwri.go.jp

道路トンネルでは、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程度を管理し、必要に応じて対策を実施している。しかし、トンネルの供用後に覆工コンクリートや路面に、外力によるひび割れや盤ぶくれ等が発生している例も散見されている。これらの変状は通常の施工段階や点検段階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場合が多い。本報では、矢板工法によって建設された既設のトンネルにおいて、長期にわたって変状の発生状況と地山挙動に関するデータを観察・計測した結果や数値解析結果よりトンネルの変形と地山の状況の関連性および対策工を検討する場合の留意すべき内容を明らかにした。

Key Words : tunnel, swelling rock, in-situ test, numerical analysis, inverted arch structure

1. はじめに

道路トンネルでは、施工時に観察・計測等を通じて地山等級に見合った支保工を選択し、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、要領¹⁾²⁾等に基づいて点検を実施し、変状の有無やその程度を管理し、必要に応じて対策を実施している。しかし、トンネルの供用後に覆工コンクリートや路面に外力によるひび割れや盤ぶくれ等が発生している例も散見されている³⁾。これらの変状は時間の経過とともに進行すると考えられ、メカニズムの解明も試みられている⁴⁾が、通常の施工や点検段階で得られる範囲のデータのみから、変状の進行を詳細に議論することには限界がある場合が多いと考えられる。

筆者らはこれまで矢板工法によって建設されたトンネルにおいて、変状の発生状況や地山挙動に関して観察・計測を行ってきた⁵⁾⁶⁾。本報は継続して得られた計測結果をもとに変状の進行を分析するとともに、対策工としてインバートに着目し、その効果に関して簡易な数値解析をもとに考察した結果について報告する。

2. 検討方法

(1) 検討対象トンネル

図-1 に検討の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廃道となっている2車線道路トンネルで、延長が915mと報告されている⁵⁾。トンネル内では顕著な盤ぶくれの区間が3箇所存在しており、それぞれ区間①～③と称する。資料によれば、区間①と②の地質は第三紀の泥岩、区間③は凝灰質砂岩と記録されている。

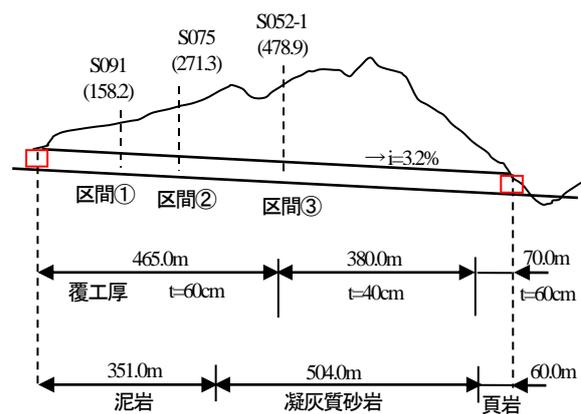


図-1 対象トンネル

(2) 計測データの収集・分析

図-1 に示した区間①～③に対して5カ年にわたり計測等によりデータを収集し、対象トンネルの変形の分析を行った。なお、計測等は概ね毎年10～11月に実施し

ている。また、地山特性に関する調査として、2年目の時点で区間③において深度15mの水平方向および鉛直方向2箇所φ66mmのボーリングを実施した。その際、鉛直方向のボーリング孔内に変位計を6点設置し、2年目以降の地中変位を計測した。さらにトンネル全体の挙動を把握する目的で区間①～③内の1断面ずつで内空変位を計測するとともに、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。なお、これらの区間ではインバートは設置されていない。

(3) 数値解析による検討

トンネルで顕著な盤ぶくれが生じた場合、対策を実施するが、対策工が発揮する効果は荷重の作用メカニズムによっても異なると考えられる。本研究では、盤ぶくれが生じている状況下においてインバートを設置することに着目し、トンネル構造に関する定性的なメカニズムを簡易な2次元弾性有限要素解析によって検討した。

図-2に解析領域の例を示す。領域はトンネルの中心から周囲に5D(D:トンネル外径)を確保した。また、土かぶり相応があると判断したことから、上方と側方の変位は完全固定とし、荷重を底面から上方に作用させることで、盤ぶくれを模擬することとした。解析では実測された内空変位と盤ぶくれによる変形量が合致するように、下方からの荷重 P_v とポアソン比 ν をトライアル計算により求め、トンネルに発生するインバートの軸力および曲げモーメントを算出し、その傾向を比較した。

表-1に解析ケースを示す。合致させる変形量は、値として特に大きく得られた1～2年目および2～3年目の計測結果を使用し、インバートの効果は2～3年目の変形を算定することにより求めた。2次元解析を行うにあたって応力解放率を設定し、それにより ν を算定した。なお、実際の施工では掘削・盤下げ等を実施するが、その定量的な評価がなされていない。本研究では表-1に示すように、応力解放率をケースA～Dとして変化させることで解析を行い、その値から ν や P_v を求めた。

表-2に解析諸元を示す。トンネルの諸元は過去の施工記録、また、地山の諸元はボーリングによって得られた岩石供試体の試験値をもとに決定した。

3. 検討結果

(1) 計測データに関する考察

地山の挙動と特性の関連性を把握するために、区間③におけるボーリングの結果および変状現象との関連性について考察した。

図-3に区間③の地質の構成状況および2～5年目の地中変位の変化を示す。上述したように区間③は凝灰質砂

岩が大部分を占めるものと想定されたが、ボーリングのコアより、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、スメクタイトや緑泥石、雲母類が確認された。併せてCEC試験を実施したところ交換性ナトリウムが多く含まれており、膨張性を示すことが分かった。

鉛直方向の地中変位の計測結果より、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7～8m程度までの領域で変位が発生している結果が得られた。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があり、引き続き変位の発生に関して注視する必要がある。また、2～3年目と3～4年目にかけては大きめの変形が生じたが、4～5年目では変形量が前年とほぼ変わらない結果となった。また、側壁方向では、同様の地質は側壁から1～2m程度であった。これらの地質ではボーリングの掘進は無水で行うことが可能であり、側方より下方の方が水の存在等により地山が緩んでいる可能性が高いことが分かった。それより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。

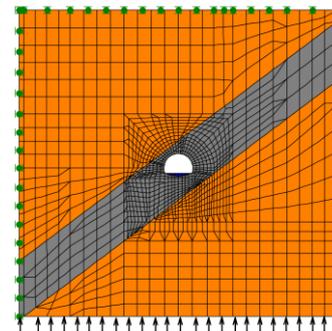


図-2 解析領域

表-1 解析ケース

ケース	内容
1	1～2年目の再現解析
2	2～3年目の再現解析
3-1	インバート(応力解放率A, 2年目施工)
3-2	インバート(応力解放率B, 2年目施工)
3-3	インバート(応力解放率C, 2年目施工)
3-4	インバート(応力解放率D, 2年目施工)
4-1	インバート(応力解放率A, 3年目施工)
4-2	インバート(応力解放率B, 3年目施工)

応力解放率(インバート部の掘削-インバートの施工)
A: 40%-60%, B: 30%-70%, C: 10%-90%, D: 90%-10%

表-2 解析諸元

	ヤング率 [MPa]	ポアソン比	その他
地山 (標準部)	2477	0.30	密度2.5g/cm ³
地山 (破碎帯部) 覆工および インバート	6 22000	(解析に より決定) 0.20	密度2.0g/cm ³ 覆工厚400mm または600mm

図-4 に区間③の水準測量により路面高さを計測した結果を年あたりの変形速度として表した結果を示す。この区間では中央部のみが大きく隆起しているとともに、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。変形速度は1~2年目では最大で24mm/年程度であった。また、2年目の計測時にボーリングを行い地中変位計を設置したが、直後の2~3年目の変形速度は最大で56mm/年程度となり、その位置はボーリングを行った位置と一致した。しかし、3~4年目、4~5年目では最大値が17mm/年、25mm/年と若干数値が減少したとともに、最大値が得られる地点もやや変わっていることが分かる。このことから、ボーリングを行った直後は局部的に地山が乱されたり、掘削時に水を使用した等による影響によって盤ぶくれが促進された可能性があるが、その影響が時間経過とともに少なくなったと考えられる。

図-5 に区間③のボーリングを実施した断面の内空変位を示す。それぞれ1~5年目の1年間毎で約1.0mm/年、約6.7mm/年、約5.2mm/年、約2.3mm/年で断面が縮小する方向に変形した。内空変位の変形速度は路面高さの変形速度と概略的な傾向は一致していると考えられる。

以上より実際の変形速度を比較すると、側壁の収縮より盤ぶくれの方が顕著であることが裏付けられ、粘土状を呈している地山の厚さに関連して変形が生じ、坑内での変形の発生に至っていると考えられる。変形が収束したとは判断できず、同区間で湧水も見られていることから今後はその関連性の検討が必要である。また、区間③では覆工のひび割れの発生や進展が確認されており、変形との関連性についてさらなる分析を行う必要がある。

なお、盤ぶくれ区間①の路面高さの変形速度の最大値はそれぞれ1~5年目の1年間毎で28mm/年、36mm/年、17mm/年、24mm/年であった。同様に、盤ぶくれ区間②では、14mm/年、7.2mm/年、5.4mm/年、6.0mm/年であった。このことから、区間①および②についても計測値から変形が収束しているとは判断することは困難であった。

(2) 数値解析による対策工の効果の検討

図-6 にケース1およびケース2の解析結果を示す。ケース1ではポアソン比 ν と荷重値 P_v はそれぞれ0.465、50kN/m²とした場合に概ね解析結果と計測結果が一致し、ケース2ではそれぞれ0.48と35kN/m²となった。変位は異なるが、盤ぶくれ量と内空変位の比は概ね等しいと考えることができるため、ポアソン比に関しては概ね同様の値で得られたものと考えられる。

図-7 にケース1およびケース2の断面力の分布を示す。図中の角度はトンネルの天端を90度として、反時計回りに角度を定義している。図-7(a)より軸力はケース1がケース2に比較して大きく表れている結果が得られているが、変化の傾向の差異は顕著に表れていない。また、

図-7(b)より曲げモーメントは両ケースとも値や分布の状態はほぼ同一であった。

図-8 にケース3-1~3-4の断面力を示す。応力解放率は実際の施工では種々の影響を受け、その値は構造に作用する荷重と関連づけられるとよい。図-8(a)より軸力はアーチ部分ではほぼ同一であるが、インバートでは異なる傾向が得られた。一方、図-8(b)より曲げモーメントに関してはその逆の傾向となった。解析を単純

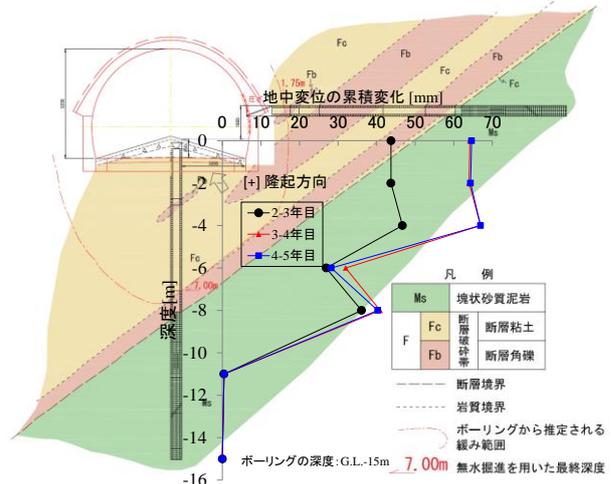


図-3 地質の構成状況と地中変位の変化

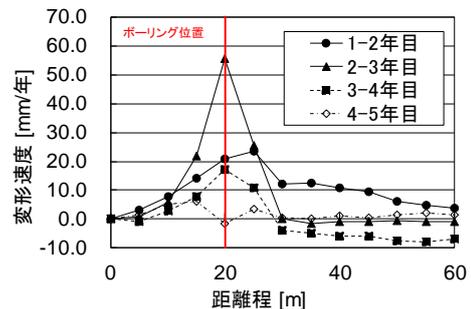


図-4 区間③の底面の変形速度

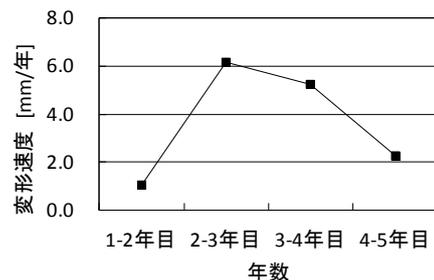


図-5 区間③(ボーリング位置)の内空変位の変形速度

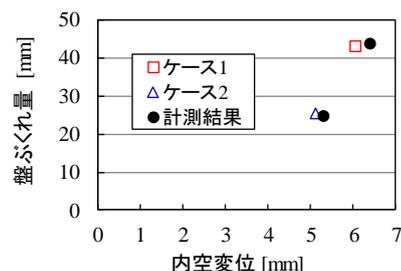


図-6 盤ぶくれ量と内空変位の関係

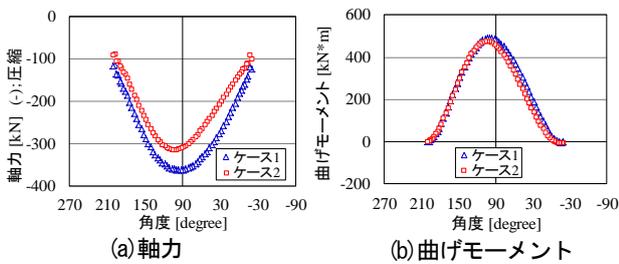


図-7 断面力分布(ケース1, 2)

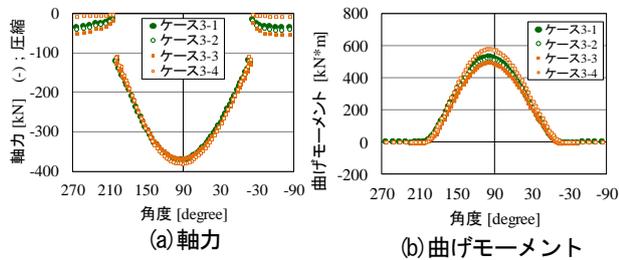


図-8 断面力分布(ケース3-1~3-4)

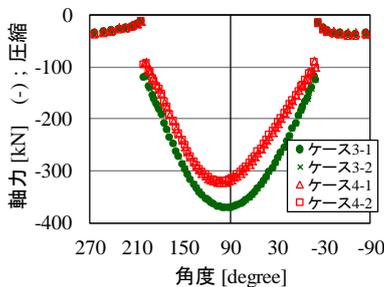


図-9 軸力分布

化しているため値自体の取り扱いには注意する必要があるが、実際の施工では、応力解放率に影響する要因によって発生する断面力が部位によっても異なる可能性があるため、設計段階では部材毎に負担させる断面力に留意する必要があることを示唆していると考えられる。

図-9にケース3-1, 3-2, 4-1および4-2の軸力を示す。これより対策工の実施時期により、アーチ部に作用する軸力が大きく異なる結果が得られていることに加え、若干ではあるが、インバートを考慮することでアーチ部の軸力が増加する傾向があることが分かる。定量的には地山の条件等による影響があると考えられるが、実際の構

造を検討するにあたっては留意すべき点と考えられる。また、本研究では定性的な検討を簡易な2次元解析で把握していることにとどまっているが、3次元による解析等を通じて詳細な検討を行っていく必要がある。

4. おわりに

本報では、既設トンネルにおいて、計測結果をもとに、変状の進行や数値解析をもとに対策工の効果に関して考察を加えた。その結果、現地計測よりトンネルの変形は粘土状を呈している地山の厚さと関連があることが明らかとなった。また、対策工の設計に対しては、変形の状態や施工を行う際の状況や過程、他の部位への影響に留意することが重要であることが解析的に明らかとなった。今後も、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、変位の発生深度の変化を検討し、地山および構造の状態を考慮した解析を行い、変形等の現象の解明を行う必要がある。

参考文献

- 1) 国土交通省道路局：道路トンネル定期点検要領，2014.6
- 2) (社)日本道路協会：道路トンネル維持管理便覧，1993
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 砂金伸治，真下英人：既設トンネルの変状の進行および変形メカニズムに関する考察，岩の力学国内シンポジウム講演集，vol.13，pp.747-750，2013.1

DEVELOPMENT OF DEFORMATION AND EFFECT OF COUNTERMEASURE FOR TUNNEL UNDER SEWLLING CONDITION

Nobuharu ISAGO, Kosuke KAWATA, Atsushi KUSAKA, Dohta AWAJI and Toshiaki ISHIMURA

Deformation during service stage is monitored by periodical inspection and countermeasures are performed as needed in road tunnel. The deformation mechanism and the effect of countermeasure are discussed through the result from in-situ measurement and numerical analysis simulating countermeasure in this paper. The mechanism of tunnel deformation when the characteristics of ground indicated a swelling condition, and the relation between the sectional force of tunnel lining and the behavior of countermeasure were quantitatively clarified. In addition, the change in the displacement depth in ground and its effect on tunnel deformation were examined on the basis of in-situ measurements.