

盤膨れした高速道路トンネルを通行止めせずに インバート再構築

RECONSTRUCTION OF THE INVERT CONCRETE THAT WAS DEFORMED BY
HEAVING IN THE EXPRESSWAY TUNNEL WITHOUT ROAD CLOSURE.

松田 正道^{1*}・天野 淨行²・下村 哲雄³・中野 清人⁴

Masamichi MATSUDA^{1*}, Kiyoyuki AMANO², Tetsuo SHIMOMURA³, Kiyoto NAKANO⁴

In the works of The Nikkure-yama inbound Tunnel on the Joshin-etsu Expressway, they encountered expansive mudstone and max. approx. 300 cm of crown settlement occurred. They overcame the bad ground with applying an almost circular tunnel cross-section and the tunnel opened as two-lane expressway in 1993. Further, the route for the outbound line was widely changed taking the swelling pressure zone of the former tunnel into account. It was completed in the 2003 and all four lanes were put into service. On 5th August, 2010, heaving of road surface was found at the vicinity of the outbound 56.5 KP(kilometer post) in which an invert concrete was installed but not applied circular tunnel cross-section. We rebuilt invert concrete as a measure against heaving that damages inverts. We conducted the works applying control standards and placing emphasis on monitoring under condition of lane-closure. This report gives information on the causes of damages on invert concrete and the effects of countermeasures.

Key Words : Tunnel deformation, Heaving, Rebuilding Invert concrete, Road closure

1. はじめに

日暮山トンネルは，東京方面から長野へ向かう上信越自動車道に位置する，延長 2km 級の 2 車線のトンネルである．盤膨れしたⅡ期線は，Ⅰ期線の超膨圧区間を考慮してルート変更（2002 年完成）したが 8 年後 5cm の路面隆起が発見された．変状区間は，建設時に脆弱な泥岩・凝灰岩互層が予測よりも早く出現したため，急激な変位を抑えるべく急遽インバートで早期断面閉合した箇所である．本件は，日本の高速道路で初となる車線規制下において盤膨れ対策（インバート再構築）を，安全かつ効率的に実現させたものである．本報はまず，建設時と対策工施工時のデータを整理分析し，膨張性地山の性状を整理した．次に対策工の設計・施工方法について触れ，対策工施工時の状況とその計測結果から，対策工の効果と評価を論じる．併せて今回の検討で明らかにできた変状原因について論じるとともに，湧水が長期的に影響する場合の課題についても言及する．

2. 新設時の記録と供用後の変状

(1) Ⅰ期線新設時の記録¹⁾

日暮山の地質は堅固な安山岩が主体であるが，トンネル中央部付近約380mは脆弱な泥岩区間，いわゆる超膨

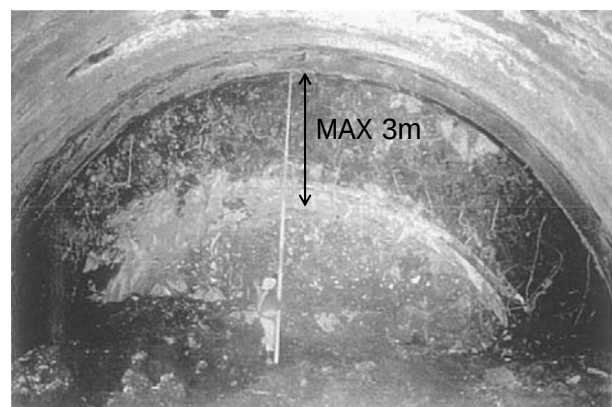


図-1 Ⅰ期線の支保工沈下状況

キーワード：トンネル変状、盤膨れ、インバート再構築、通行止め

¹非会員 東日本高速道路株式会社 関東支社 管理事業部 East Nippon Expressway Company Limited, (E-mail:m.matsuda.ab@e-nexco.co.jp)

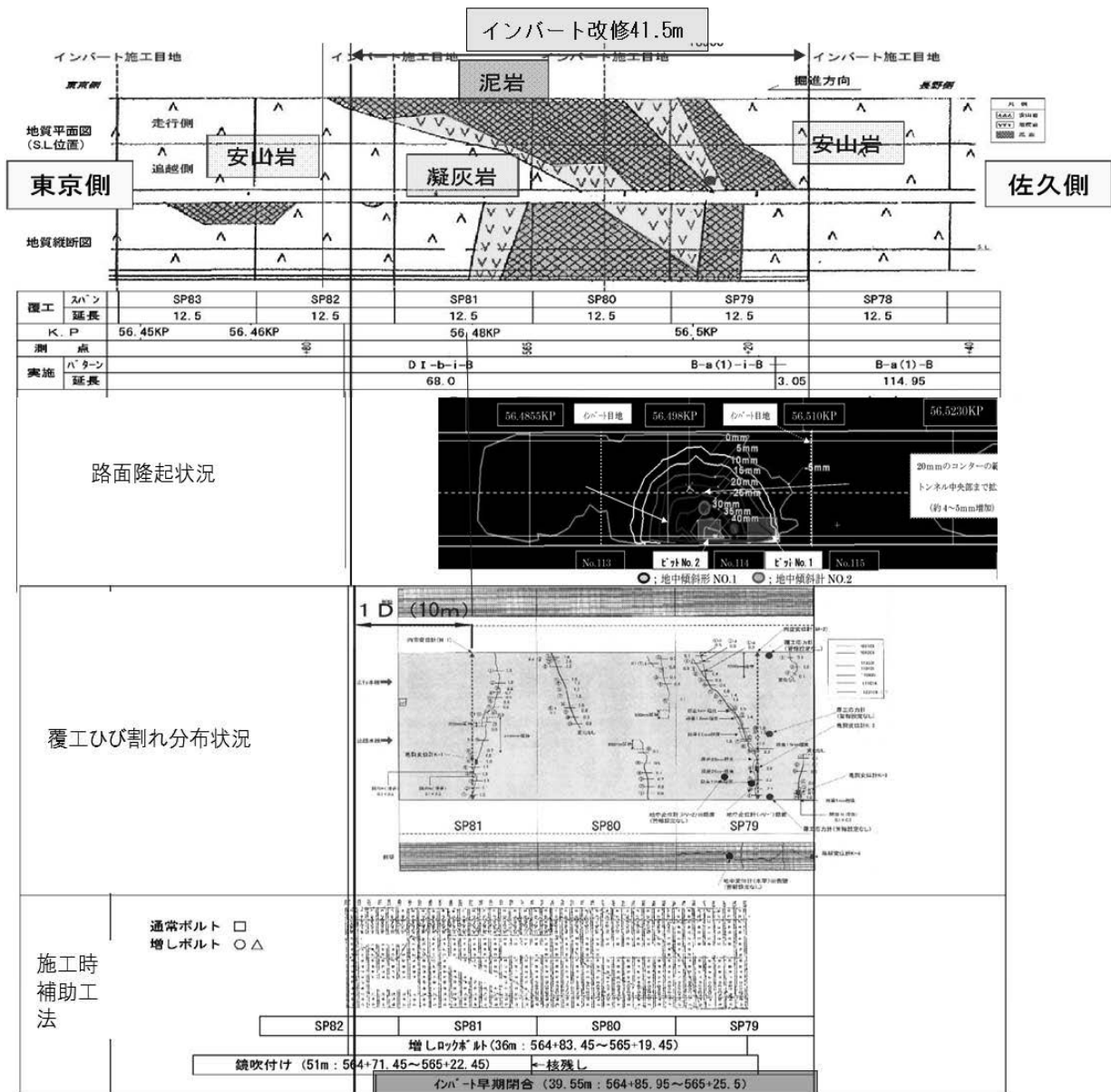
²正会員 東日本高速道路株式会社 関東支社 技術部 East Nippon Expressway Company Limited.

³正会員 株式会社大林組 Obayashi Corporation.

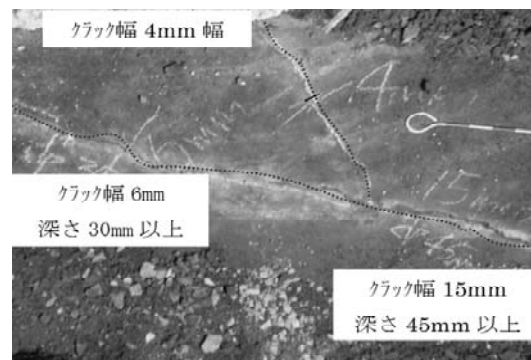
⁴正会員 株式会社ネクスコ東日本エンジニアリング Nexco-East Engineering Company Limited.

張性泥岩であった。この区間では、図-1のように激しい天端沈下、支保工の脚部沈下と水平変位が生じ、水平変位にあっては初期変位速度で50mm/日を記録している。最大変位はSTA.563+30付近で、天端沈下3120mm、上半

内空変位2997mmに達した。そこで剛な支保構造を選択して3回もの縫返しを実施し、当該区間の突破に約3年の期間、多大な労力をかけて1992年7月に貫通している。このような特筆すべき大きな変形が生じ難工事を強い



No2ピット インバート損傷



No1ピット インバート損傷

図-2 路面隆起状況とピット掘削調査時のインバート損傷状況

れた、日本で難工事で有名なトンネルである。

(2) II期線新設時の記録

盤膨れしたII期線は、I期線へ影響を与えないように、当初計画位置からルートを変更し、I期線から平面的に100m 離し縦断的に24m 下げることで、帯水層からの湧水を避けて比較的安定した泥岩層に計画された²⁾。

全長2051mのII期線は東西工区に分けて発注され、西工区が先に1038mの工区境地点まで到達している。西工区は、堅固な安山岩と予測されていたが、STA.565付近において脆弱な泥岩・凝灰岩互層がトンネル下部から予想よりも早く出現した。最大で上半内空変位70mm、天端沈下25mm程度が発生したため、支保パターンをBからDI（2ランクダウン）に変更し、鏡吹付けや核残し等の鏡面補強と増しロックボルトで補強を行い、最終的にインバートコンクリートで早期閉合して変位を収束させた。この地点が、本報の本題である供用後に盤膨れが顕著となった箇所であるが、建設時には膨張性が著しいと判断されるレベルの変位までは発生しておらず、膨張性の調査は行っていない。

(3) 供用後の変状状況

建設時の記録および2010年11月時点の路面隆起状況とピット掘削調査時のインバートの状況を図-2に示す。変状状況は以下のとおりである。

- ・最大隆起量50mm程度、隆起延長18.5m程度
- ・インバートコンクリートに80mm開口した貫通ひびわれを確認。中性化が進行し、損傷してから長期間経過している。
- ・変状発見後の路面隆起の変位速度は22.7mm/年。内空変位の変位速度は1~2mm/6ヶ月
- ・覆工コンクリートには幅1.0mm程度の横断方向ひび割れが連続しているが、覆工コンクリート応力は小さい。
- ・舗装版の鉄筋には、引張強度の3割程度の引張力が作

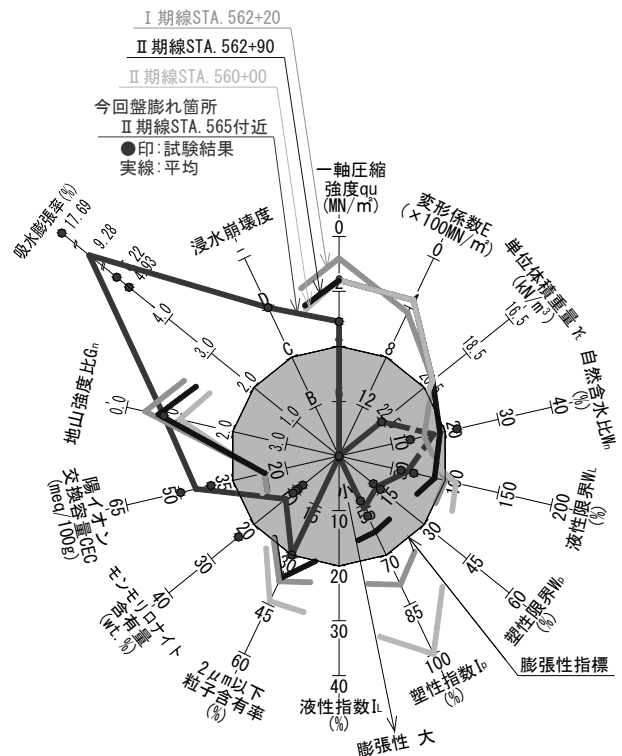


図-3 膨張性に関する試験結果

用し、地圧を受けていた。

(4) 膨張性地山

盤膨れ対策の調査・施工段階において実施した土質試験のうち、膨張性に関する試験結果をI期線・II期線建設時のデータ²⁾と合わせて図-3に整理した。一軸圧縮強度と地山強度比は、建設時の数値よりやや小さいが膨張性が高い。陽イオン交換容量は建設時よりも膨張性の大きい。今回新たに実施した、浸水崩壊度、吸水膨張率においては顕著な膨張性が確認された。なお、膨張性指標はトンネル標準示方書³⁾、JH判定基準⁴⁾、盃山トンネルの事例⁵⁾を参考に設定した。

A. インバート一括再構築案	B. インバート分割再構築案	C. マイクロパイル補強案	D. インバート内巻補強案
効果◎ コスト× 施工性◎	効果◎ コスト○ 施工性△	効果△ コスト○ 施工性○	効果△ コスト◎ 施工性○

図-4 工法比較

全体を定性的に捉えると、特に吸水や浸水崩壊による劣化により膨張の大きい地質といえ、盤膨れの要因になっていると判断できる。

3. 対策工法と計測管理

(1) 工法選定

供用中の高速道路を改修する工事となるため、一般走行車への影響を考慮して対策工法を図-4 のとおり、①効果、②コスト、③施工性の観点から比較検討した。盤膨れ対策としての効果を十分確保し、将来に渡って安定した構造とするため、インバート再構築案とした。現状Ⅱ期線を通行止めするインバート再構築案(A)は、迂回にかかるコストが膨大となるため、施工性には劣るがインバート2分割再構築案(B)を採用した。

(2) 設計手法

道路トンネルにおいて盤膨れ対策として施工されたインバート構造は、インバート半径を上半半径の2倍程度とし、一般的なインバートよりも円形に近い形状が採用される場合が多い⁵⁾。代表的な類似事例として、山形自動車道盃山トンネル⁶⁾があり、インバート半径が上半半径2倍の10mの無筋コンクリートとしている。また、盃山トンネルの事例から、コンクリートの設計基準強度

を 24N/mm^2 と設定した。岩石試験から得られた膨張圧 0.15N/mm^2 をモデル化してFEM弾性解析⁷⁾を行い、インバート半径10mの妥当性を検証した。

先行側の既設インバート撤去から後行側の新設インバート打設完了まで少なくとも1ヶ月を要するため、先行側既設インバート撤去時の応力解放による側壁からの押し出しが懸念された。そこで、図-5のように新設インバートの上部の押し出し対策インバートを新設インバートと一体として打設し、後行側既設インバートと早期断面閉合することとした。また、先行側既設インバート撤去後、押し出しによる変状が発生する可能性もあるため、新設コンクリート打設前に押し出し対策ストラット

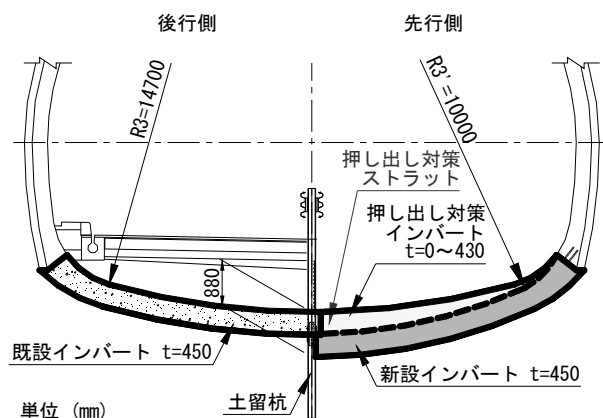


図-5 分割施工時の早期閉合方法

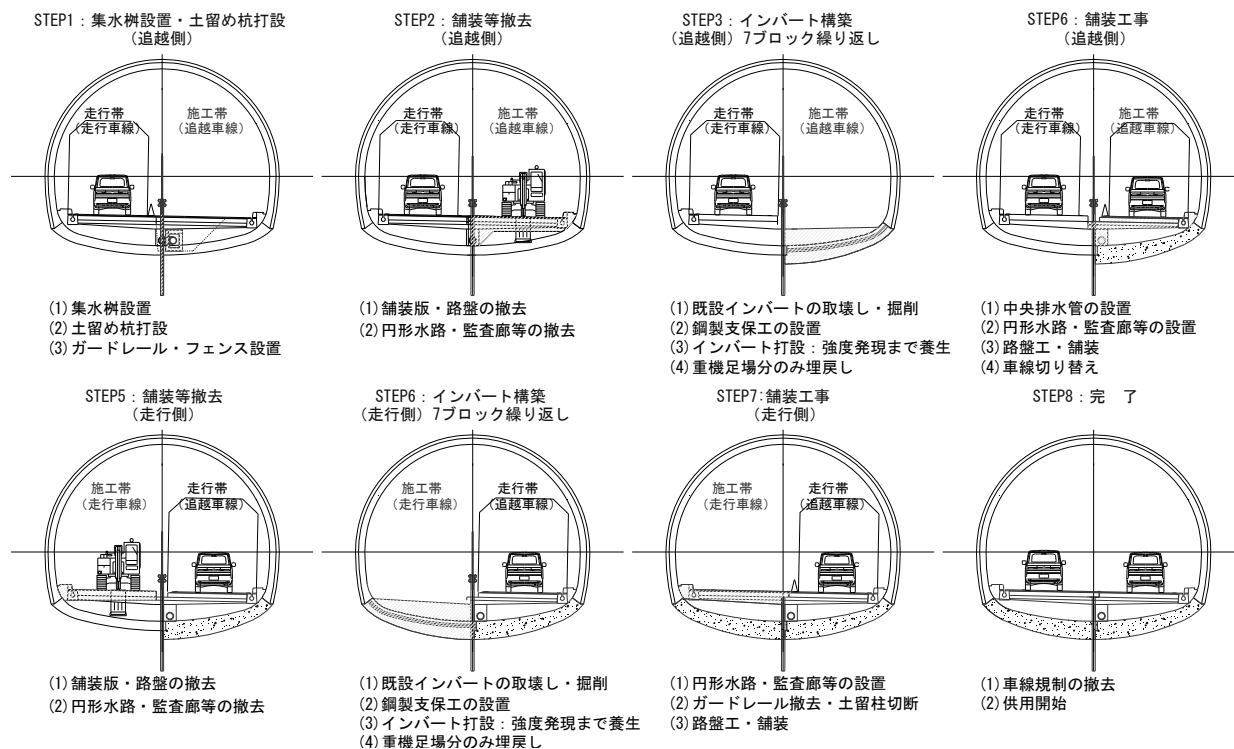


図-6 施工ステップ

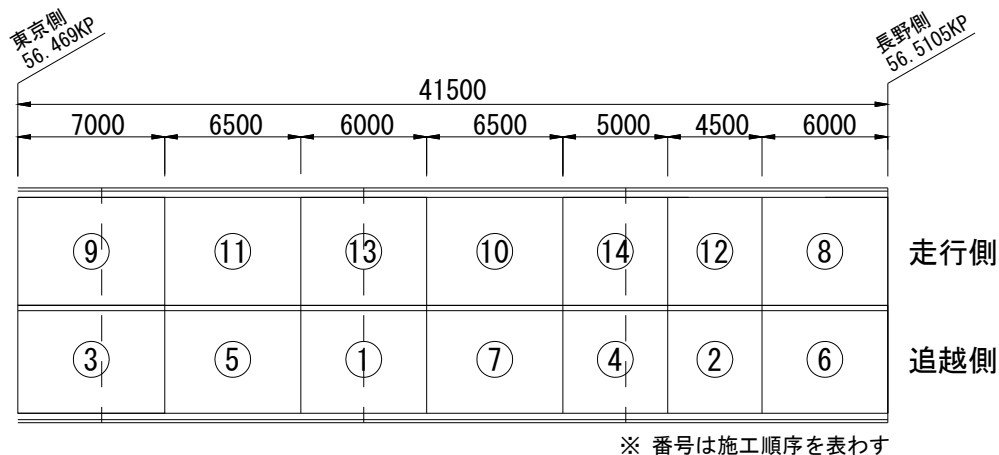


図-7 インバート施工順序

(HH-154×151×8×12@1.5m) も設置することとした。

また、既設インバート撤去時に既設覆工コンクリートに有害な変状を及ぼさないよう、1 サイクル施工延長をパラメータとして3次元弾塑性 FEM 解析⁹⁾を行い、1 サイクル施工延長を6.5m と設定した。

(3) 施工方法

図-6 に施工ステップを、図-7 にインバート施工順序を示す。施工延長41.5mを走行車線側7ブロック、追越車線側7ブロックの計14ブロックに分割した。損傷が大きいと想定された追越車線側から着手し、その後、車線を切替えて走行車線側を再構築する計画とした。1ブ

ロックのサイクルは、インバート取壊し～地山掘削～支保工設置～コンクリート打設となるが、覆工変状防止の観点から隣接したブロックは連続して施工しない順序とした。一般車走行側は、道路構造令で特例的に認められる最小限の幅員しか確保できないため制限速度を通常時の80km/hから50km/hに下げ、視認性の高い標示を設置して事故防止を行うこととした。

4. 施工時の状況

インバートは図-8、図-9 のとおり舗装の最大隆起箇

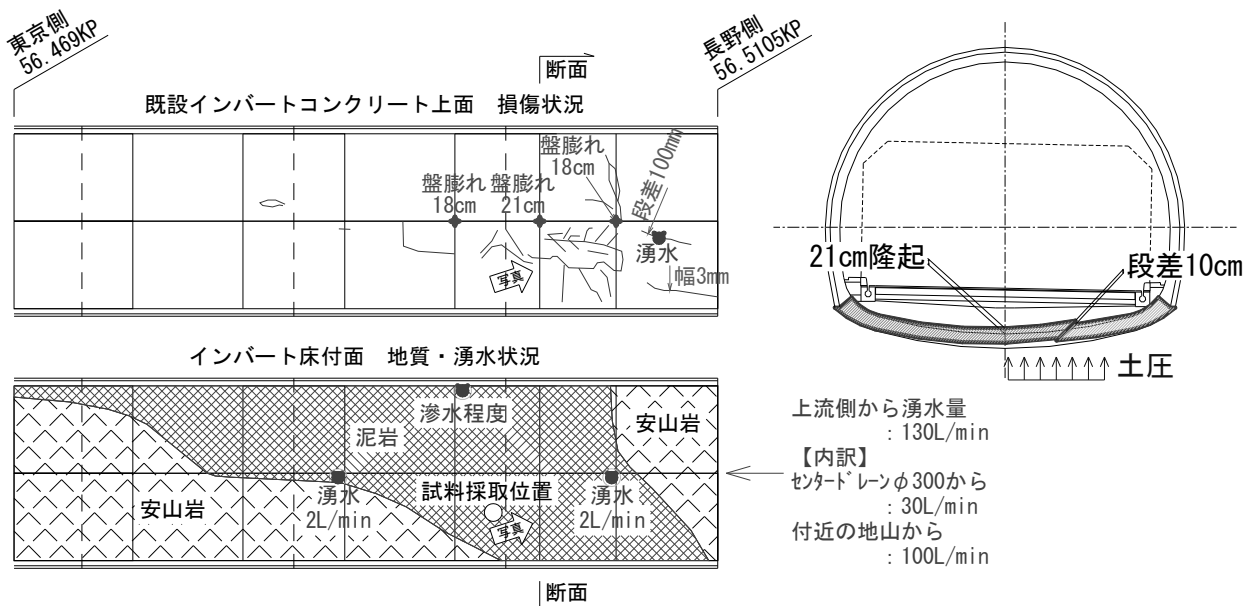


図-8 インバート損傷、地質、湧水の状況



図-9 インバート損傷状況

上流側センタードレーンからの湧水

釜場から30L/min排水

付近の地山から
流入 100L/min



図-10 上流側からの湧水

所を中心に損傷、最大で 21cm 隆起し、コンクリートを貫通するひび割れが入っていた。ひび割れの主方向は 45°で、せん断破壊を起こしていた。ひび割れの開口幅も最大で 10cm 以上開いていた。

盤膨れの著しい箇所は、図-8 に示すとおり泥岩層であった。掘削時には泥岩の底面から 2L/min の湧水が確認されたが少量であり、被圧水ではないと考えた。施工箇所の上流側から 130L/min の湧水が流れてきていた。図-10 のように、そのうち中央排水管 (φ300) 内を流れていたのは 30L/min であり、残り 100L/min は中央排水管周辺の地山から掘削面に流入している状況であった。上流側から集まる湧水が既設インバートコンクリートに貫通したひび割れ内を伝って泥岩層内に入り込むことで泥岩が強度低下・膨張を起こしたことが変状の原因であることを目の当たりすることができた。

5. 対策工法の効果と評価

(1) 早期閉合効果

図-11 は、最も変状の大きい測点における内空変位の経時変化である。変位は先行側の既設インバート撤去時に顕著であり、応力解放による割合が大きいと考えられる。施工ステップごとの変位速度を検証すると、既設インバート撤去開始後すぐに応力解放により 0.2mm/h で変位が進行した後、掘削途中で 0.04mm/h に速度が下がった。掘削後すぐにストラットを取り付けたものの、変位速度に変化はなく、インバートコンクリート打設完了と同時に変位が収束した。コンクリートに湿潤・加温養生を行うことで、5 時間後には 4N/mm² 程度

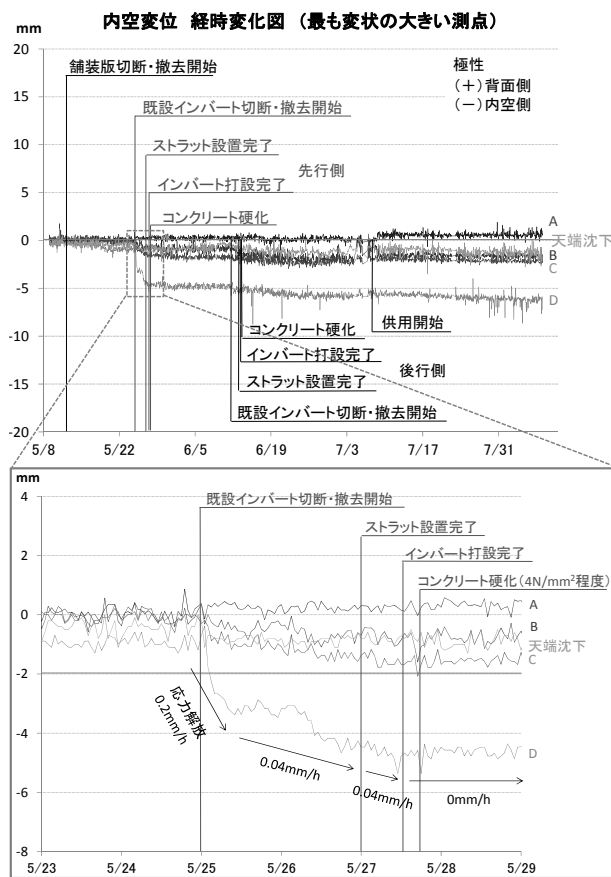


図-11 施工中の内空変位

まで強度を発現させたことも早期閉合の面から有効であったと考えている。

また、応力測定の結果からインバート単位長さあたりの軸力換算でコンクリートは 3,600kN/m であるのに対しストラットは 180kN/m 程度と比率にして 1:20 であり、

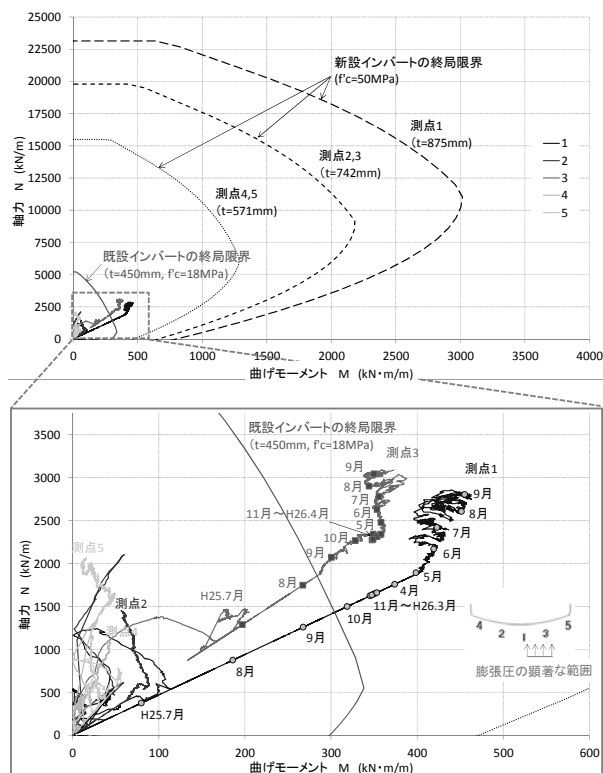


図-12 断面性能曲線と実測値

ストラットの荷重分担率は小さい。しかしながら、ストラットは急激な変状が発生した場合もしくは偏圧が作用する場合の安全余裕代としての役割を果たすと考えている。

(2) 部材断面耐力

終局限界状態を表す新設及び既設インバートコンクリートの断面性能曲線に、コンクリート応力計から得られる実測値をプロットしたグラフを図-12 に示す。新設イ

ンバートコンクリートの材齢 7 日強度 $=50\text{N/mm}^2$ に基づいて断面性能曲線を描いた。対策工完了後 14 ヶ月経過時点において軸力 $2,800\sim 3,100\text{kN/m}$ 、曲げモーメント $350\sim 450\text{kNm/m}$ が作用しており、新設インバートの終局限界状態に対して十分余裕を持った安全率を確保できている。

一方、既設断面と同じ構造のインバートを実施したと仮定すると、インバート半径が新設断面より大きいことからグラフにプロットした実測値よりもさらに大きい曲げモーメントが作用していたことが想定される。また、対策工完了 2 ヶ月後の 9 月には終局限界を超えていることから、地圧に対抗できずに安定を損ねることになっていたと考えられる。

曲げモーメントが発生しているのは、膨張圧の顕著な範囲である測点 1 と測点 3 である。また、対策完了から 10 ヶ月経過後の平成 26 年 5 月までは曲げと軸力がほぼ比例して増加する傾向があり、5 月以降は曲げには収束傾向が、軸力には収束傾向があるものの若干増加している状況が見られる。インバートを再構築し、湧水を供給する一因であったひび割れを無くしたことで、対策前に比べて膨張させる要因が減少しているものと考えられる。測点 3 の曲げが 5 月以降ほぼ完全に収束しているのに比べて測点 1 の曲げは微増傾向が見られるが、これはトンネルセンターである測点 1 は湧水が最も集まりやすいことなどの影響も考えられる。

(3) 盤膨れの原因

今回の一連の検討を通して明らかになった盤膨れの原因、およびメカニズムを図-13 に示す。前述したように、既設インバートの構造では部材断面耐力が不足していたこと、コンクリートの中性化調査でひび割れが入ってから長期間経過していたことから、既設インバートは若材齢時に地圧を受け、局所的に変形して潜在的な分離面が

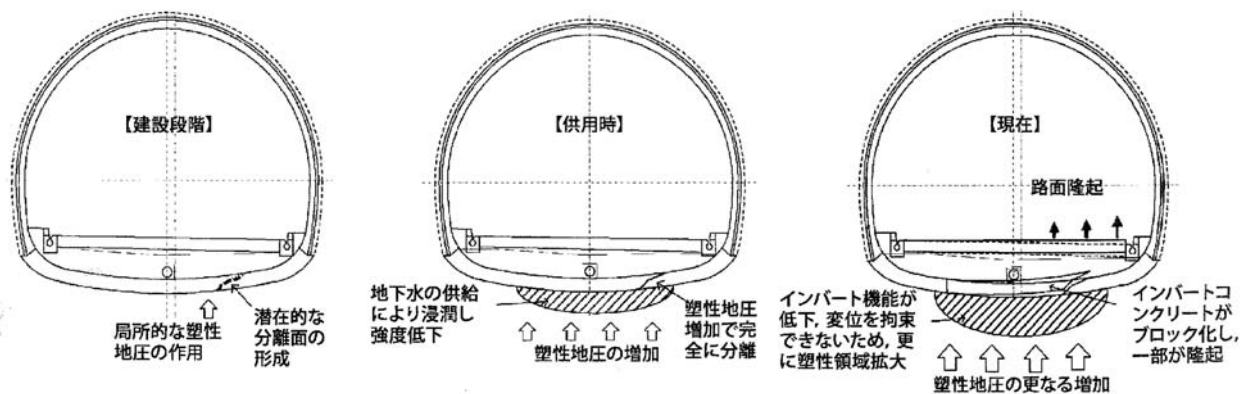


図-13 盤膨れのメカニズム

形成されていた。分離面を残したまま硬化しトンネルは一旦安定したが、中央排水管からひび割れ等を伝って水が集まりやすい条件のもとで泥岩が強度低下し、長期間かけて塑性地圧が増加した。インバートの拘束機能が低下してさらに塑性領域が拡大し、路面隆起に至った。

6. おわりに

繁忙期を避け、2013年5月9日（ゴールデンウィーク明け）から7月の3連休前（7月12日）までに対策工事を無事完成させた。そのために24時間連続の超突貫工程に挑み、変状が一般車に与えるリスクや車線規制横を高速車両による事故リスクを最小限に抑え、綿密な調査設計・施工計画と施工管理について徹底した。その結果、日本の高速道路で初めて車線規制下でのインバート構築工事が実現できた。

現地においてインバートの損傷と隆起、路面の隆起など変状状況、地質・湧水の状況を確認しながら、計測結果によって変位状況を確認し対策工の評価ができたことは非常に有意義であった。

膨張性地山は地質や場所、湧水の状況によって膨張性の特性は大きく異なる。したがってその対策には十分な調査が必要で、最終的には過去の事例や数値解析を活用し、設計・施工を含めた様々な知見に基づいた総合的な

判断が重要となる。今回得られた数々のデータや知見を、今後新設するトンネルインバートの設計や、施工中に膨張性地山に遭遇した採用の対応に活用していただければ幸いである。

参考文献

- 1) 中村良明, 羽田勝, 木曾伸一: 超膨張性泥岩を克服, 上信越自動車道日暮山トンネル, トンネルと地下, Vol.24, No.1, pp.7-14, 1993.1.
- 2) 谷井敬春, 下田哲史, 高橋浩, 菊地裕一, 釜谷薫幸: 日暮山トンネルにおける早期閉合を目的とした導坑先進工法について, 第11回トンネル工学研究論文・報告集, pp.207-214, 2001.
- 3) 土木学会: トンネル標準示方書, 山岳工法・同解説, pp.37, 2006.
- 4) 大嶋健二, 城間博通, 伊藤哲男, 村地栄次, 久保田龍郎: 変状トンネルの要因分析に基づいたインバート設置基準の提案について, 盤膨れ変状における判定指標, JH判定基準(案)。
- 5) 丸山勝, 中野清人, 天野淨行, 下村哲雄: 61日間連続車線規制によるインバート再構築工事, 上信越自動車道日暮山トンネル, トンネルと地下, Vol.44, No.12, pp.17-28, 2013.12.
- 6) 佐久間智, 菅原徳夫, 多田誠, 遠藤祐司: 供用中に発生した急激な盤ぶくれ変状を復旧する, 山形自動車道盃山トンネル(上り線), トンネルと地下, Vol.40, No.12, pp.27-37, 2009.12.
- 7) 下村哲雄, 秋好賢治, 天野淨行, 中野清人: 高速道路車線規制下におけるインバート再構築工法の評価, 第24回トンネル工学報告集, 2014.12