

山岳トンネルの盤ぶくれメカニズムと対策工の効果

嶋本 敬介* 野城 一栄* 川越 健**

Floor Heave Mechanism and the Effect of Countermeasures for Mountain Tunnels

Keisuke SHIMAMOTO Kazuhide YASHIRO Takeshi KAWAGOE

In mountain tunnels, floor heave may gradually progress, so that its countermeasures possibly be required. However, the occurrence mechanism of it has not been fully revealed at present. Therefore, a design method for the countermeasures against floor heave has not been established so far. In this study, we first conducted a literature survey on the cases of floor heave to study its occurrence mechanism. Then, by a model experiment, we reproduced the mechanism estimated from the literature survey. Based on the results, this paper proposes an occurrence mechanism of the floor heave and the countermeasure against the floor heave. The effect of the proposed countermeasure is evaluated by numerical analysis.

キーワード：山岳トンネル, 盤ぶくれ, 岩石, 含水比, 対策効果, 数値解析

1. はじめに

山岳トンネルにおいて、トンネル完成後に路盤の隆起（盤ぶくれ）が徐々に進行し、軌道変位となって現れることがある。この盤ぶくれ現象は、比較的緩慢に進行することが多く、直ちに安全性を脅かすことは少ないが、現象が自然に収まることは少なく、何らかの対策が必要となる場合が多い。

トンネル完成後に徐々に進行する盤ぶくれのメカニズムについては、一般にスクイーピング（塑性化に伴う押し出し）やスウェリング（吸水膨張）で説明されることが多い¹⁾が、現状では十分解明されているとは言えない。また、盤ぶくれが発生した場合の対策工の設計法についても確立されているとは言えない状況である。そこで本研究では、盤ぶくれ事例の文献調査を実施し、事例から推定されるメカニズムを模型実験で再現することで、盤ぶくれのメカニズムについて検討する²⁾。さらに供用中に盤ぶくれが確認された場合に実施される対策工の効果を数値解析により評価する³⁾。

2. 推定される盤ぶくれメカニズム

図1に、スクイーピングとスウェリングによる盤ぶくれの模式図を示す。スクイーピングによる盤ぶくれは、地山強度比（地山の軸圧縮強さの土被り圧に対する比）が小さい場合、特に拘束圧の小さい路盤部において水平方向応力に対して鉛直方向応力が小さくなるため塑性化し、路盤が隆起する現象である。また、スウェリン

グによる盤ぶくれは、路盤部に水が集まり、路盤部の膨潤性粘土鉱物が吸水膨張し、路盤が隆起する現象である。

スクイーピングおよびスウェリングによる盤ぶくれの単純化したメカニズムを図2に示す。スクイーピングは、地山の強度が小さいことが主たる要因であるが、含水に伴う強度低下が大きな影響を与えているものと考えられ、ダイレイタンシーが大きければさらに盤ぶくれが助長される。スウェリングは膨潤性粘土鉱物の吸水による底面間隔（結晶の底面同士の間隔）の拡大が主な原因であり、全体的に体積膨張することで盤ぶくれが生じる。

両者とも、インバート下地山の含水状態の変化が大きな要因となっており、年単位の長期間にわたって、徐々に含水比が掘削時から増減することにより、長期間にわ

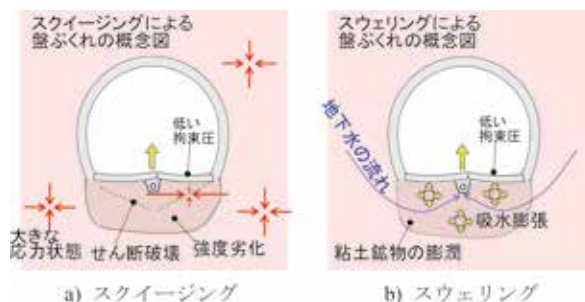


図1 盤ぶくれメカニズムのイメージ図¹⁾

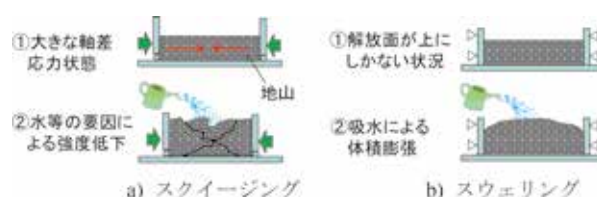


図2 盤ぶくれメカニズムの単純化したメカニズム

* 構造物技術研究部 トンネル研究室

** 防災技術研究部 地質研究室

たる盤ぶくれが進行するものと考えられる。

本論文では、盤ぶくれメカニズムについて、3章では文献調査、4章では模型実験について述べ、5章でそれらの結果に基づきメカニズムを推察し、6章で数値解析により対策工の効果を評価する。

3. 文献調査による事例分析

3.1 事例分析対象

山岳トンネルの盤ぶくれメカニズムの把握を目的に、盤ぶくれ事例の文献調査を実施した。分析対象は日本国内の公表文献から得られた26トンネルの事例とした。

3.2 盤ぶくれトンネルの地域的特性

図3に、事例調査で得られた26の盤ぶくれトンネル（Aトンネル～Zトンネル）の位置を日本地図上に示す。地図には新第三紀中新世の火山活動に伴う堆積物が厚く分布するグリーンタフ地域も併せて示している。グリーンタフ地域ではスメクタイトを含有する凝灰岩や泥岩が厚く堆積しており、そのような地域で盤ぶくれトンネルが多いことがわかる。

盤ぶくれは同じような場所で発生しており、地質的要因が非常に強く関係する変状であるといえる。近隣に盤ぶくれトンネルが存在している場合には、同様の地質で同様の被害を受けることがないように建設時に十分注意が必要であると言える。

3.3 文献から得られる情報

今回調査した文献から得られた事例の内、盤ぶくれメカニズムに関する記述を表1に示す。これより、地山と水の接触が疑われる状況で盤ぶくれが発生した事例が多いことがわかる。

このような事象のメカニズムを把握し、事象発生を未然に防止することは極めて重要であると考えられる。特に示唆に富むのがJトンネルの事例⁷⁾であると考えられる。Jトンネルは供用から17年経過した2008年8月13日の1日で250mmの盤ぶくれが突如として発生し、その後、調査と対策のため、3か月間の全面閉鎖（上り線トンネルの対面通行）を余儀なくされている。

文献7では、メカニズムとして、供用中から長い間、中央排水管の水が路盤部に浸透していた可能性を指摘している。インバート隆起が急激に進行していることから、トンネルへの作用土圧が急激に増加したと考えられる。

この事例では、8月13日までは、路盤部に水はそれほど供給されていなかったが、8月13日に、インバートの損傷をきっかけに、一気に水が供給され、作用土圧が急増し、急激な盤ぶくれに至った可能性が推測される。



図3 盤ぶくれトンネルの地域的特性²⁾

表1 文献調査により得られた盤ぶくれ事例の情報

トンネル名	文献における記述
Dトンネル (鉄道在来線 単線) ⁴⁾	盤ぶくれ対策の下向きロックボルト打設期間中に盤ぶくれが急激に約30mm進行した。その原因として、ロックボルト削孔水を地山が吸収し膨張したことが挙げられている。
Eトンネル (高速道路避 難坑) ⁵⁾	掘削時は水に乏しい環境であったが、供用後は、結露による水たまりを確認したことから、結露水が徐々に底盤に浸透して強度低下が進行したと推測されている。
Fトンネル (鉄道在来線 複線) ⁶⁾	盤ぶくれ対策の下向きロックボルト打設時に、路盤から2m以浅が急激に隆起したことが示されており、ロックボルトの削孔水の影響と推測されている。
Jトンネル (高速道路) ⁷⁾	インバートに抱き込まれた中央排水管の流下水が、損傷したインバートから流出し、盤ぶくれが下流側に向けて順次進行したことが示されている。
Qトンネル (新幹線) ⁸⁾	地山は吸水膨張性に富んでいるものの、掘削時には湧水がなく、完成後の盤ぶくれを想定しづらい状況にあったことが示されている。

3.4 事例分析結果から推測するメカニズム

文献8では、盤ぶくれが発生した新幹線トンネル11トンネル17工区の626切羽について、完成後の盤ぶくれがあった位置での切羽となかった位置での切羽の、切羽観察記録の湧水量が分析されている。その結果、完成後に盤ぶくれが生じた切羽位置の94%が、湧水量なし、または滲水程度であり、盤ぶくれが生じていない切羽の75%を大きく上回っていることが示されている。

なお、湧水のないケースが盤ぶくれのない切羽も75%と比較的多い理由としては、そもそも盤ぶくれした箇所があるトンネルを分析対象としているため、盤ぶくれしやすい地質である泥質な軟岩地山が多く、泥質な地山は切羽からの湧水量が比較的小さいためと考えられ

る。このことや、今回の文献調査結果を総合して、以下のような盤ぶくれのメカニズムが仮説として考えられる。

「湧水が少なく、含水比が低い地山に、トンネル完成後に上流から排水管等を経由して水が供給され、吸水することにより強度低下し盤ぶくれが生じる。透水係数が低い泥岩地山では吸水して強度低下するのに時間がかかり、長期にわたって劣化が進行する場合もある。」

つまり、トンネル掘削前は、地山は土被り圧で拘束され、三軸圧縮状態であるため、地下水位以下で飽和していても劣化は進行しない。しかし、掘削後は、応力解放により軸差応力が大きくなり、割れ目が開口し緩みが発生する。掘削時に湧水があれば、割れ目に水が浸透し、掘削の時点で強度が低下し、掘削時の変位が大きくなるとともに構造的にも対応されるが、掘削時の湧水が少なければ、掘削後すぐには変位が顕在化せずに、構造的な対応がなされないまま完成後に水の供給で劣化し、盤ぶくれに至る。特に、インバート部の掘削をした後、コンクリートを打設するまでの時間が長い等、地山が乾燥する履歴を受けた場合、完成後の水の供給でより劣化しやすいと考えられる。

4. 水との接触による盤ぶくれの再現実験

前章では、文献調査の結果から、完成後の盤ぶくれはインバート下の地山が水と接触し、強度低下することがその一因と考えられた。そこで本章では、乾燥したインバート下地山が水と接触し、強度低下することで盤ぶくれが発生し得るかを確認するために、実際のトンネルの切羽より採集した岩石試料を用いた模型実験を実施した。

4.1 実験手順

実験概要図を図4に示す。本実験は、トンネル切羽から採取した泥岩をトンネル模型のインバート下に配置し、側圧を与えた状態で模型外から水を与えて吸水させ、その時の挙動を確認するものである。

トンネル模型は新幹線トンネルの1/50スケールのモルタル製である。実際のトンネルの掘削後のインバート下地山の応力状態は水平方向応力が卓越することから、それを表現するために、水平方向に荷重を与えた。なお、覆工側壁部の背面側には10mm厚のEPS（発泡スチロール）を貼り付けている。剛性が相対的に小さいEPSが存在することによりインバート下地山は水平応力卓越となり、トンネルを掘削した時のインバート下の応力状態（図1a）が模擬される。模擬地山には低強度モルタル（一軸圧縮強さ $q_u=0.5\text{MPa}$ 程度）を用いた。

実験の手順を以下に示す。

[1] 作製した模型を、トンネル延長方向を鉛直方向に向けて土槽中央に設置し、模擬地山として低強度モル

タルを、インバート下には入り込まないように仕切りを設けた上で、トンネル模型の周囲に打設する。

[2] 低強度モルタル硬化後、インバート下に、乾燥炉にて絶乾状態とした泥岩を敷設する。泥岩は粒径26mm未満に砕いたものを用い、所定の粒径分布となるようにふるい分けを行い、隙間は6号珪砂で充填する。

[3] 土槽上面に蓋をして平面ひずみ状態に近づけた上で、土槽左側面に対し、載荷板変位を変位制御（0.2mm/分）で、所定の載荷応力（600kPa）になるまで与える。

[4] 荷重を保持したまま、24時間後に図4のホースでインバート下地山に十分水を吸収させる。

なお、トンネル延長は300mmであり、鉛直高さ300mm分の水圧は3kPaであることから、インバート変位に対する水圧の影響は十分小さい。

実験に用いる岩片と同じ岩片を炉乾燥後に浸水させると、図5のように、完全に泥状化する岩片や割れ目が発生しない岩片等が混在している状況であった。

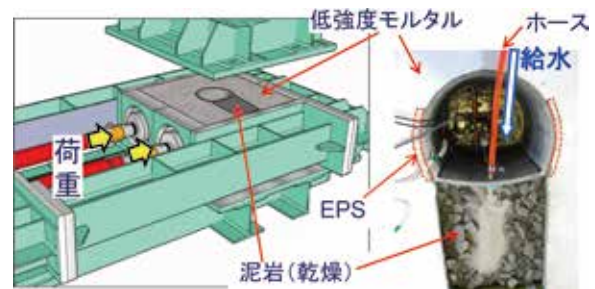


図4 実験概要図

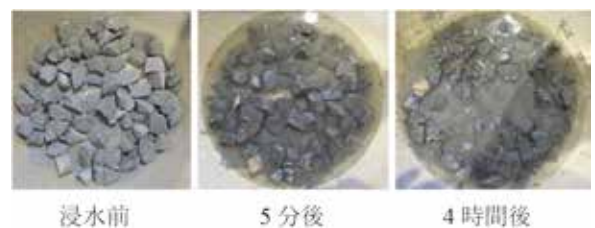


図5 模型実験で使用了ものと同じ岩石の浸水状況

4.2 実験結果

図6にインバートに作用する土圧、インバート変位（盤ぶくれ）の経時変化を示す。これより、掘削を想定した初期載荷後、荷重保持をしている間にクリーブ的な盤ぶくれがまず発生する。その盤ぶくれが概ね収束したところで、乾燥したインバート下の泥岩に給水することで、インバートに作用する土圧の急激な上昇および急激な盤ぶくれの進行が確認された。

図7に実験前後の粒径変化を示す。図5に示した通り、拘束のない状況では、乾湿の変化により泥状化（ス

レーキング)する岩片も多かったが、本実験のように、三軸応力状態のインバート下であれば、水浸しても盤ぶくれは進行するものの岩片は泥状化せず、見た目ではわからない程度に若干粒径が全体的に小さくなる程度であった。

実際の盤ぶくれトンネルにおいても、インバート下を確認すると、顕著に地山が劣化しているわけではない場合も多い。すなわち、インバート下地山が、肉眼観察では顕著な劣化が見られず、多少亀裂が増加する程度であっても、盤ぶくれを発生させる程度の地山の劣化は進行し、盤ぶくれに至っている場合があると考えられる。

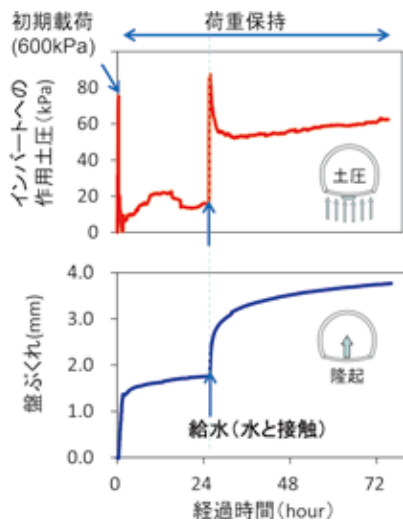


図6 インバートに作用する土圧，盤ぶくれの経時変化

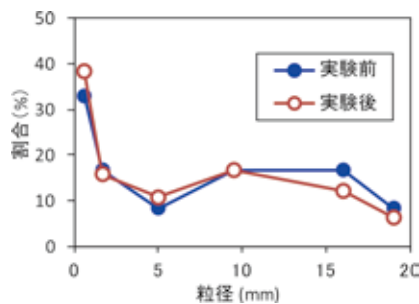


図7 粒径分布(割合)

4.3 模型実験結果から推測するメカニズム

本実験の結果、以下のことがわかった。

- ・含水により劣化しやすい地山において、インバート下の地山が乾燥している状況で水が接触した場合、インバートに作用する土圧が増加し、一旦は収束していた変位が増加することを模型実験により示した。
- ・インバートコンクリートの損傷等により、インバート上部の排水管を流れる水が、インバート下地山に給水されると、急激に盤ぶくれが進行する可能性もあり得ることが確認された。

・実験結果より、完成後に発生する盤ぶくれのメカニズムの1つとして、以下のことが考えられる。

- [1] 掘削により、路盤部地山の鉛直方向応力は小さく、水平方向応力は大きくなり、軸差応力が拡大して不安定になるとともに、割れ目が開口し、緩みが発生する。この緩みにより、飽和時の含水比が上昇し、吸水して劣化する余地が生まれる。さらに、掘削時の湧水が少ない場合は、掘削時に路盤が乾燥するため、完成後さらに吸水して劣化する余地が生まれる。
- [2] インバート打設後、徐々に、あるいはある時点で排水管損傷等により急激に水が供給された場合に、インバート下地山が吸水し強度低下する。
- [3] 強度低下により、保持できなくなった応力が解放、再配分され、インバートに作用する土圧が増加し盤ぶくれが生じる。

5. 盤ぶくれメカニズムの推察

以上の文献調査、模型実験の結果から、トンネル完成後の盤ぶくれメカニズムとして、図8のようなシナリオを想定した。なお、同図は盤ぶくれが発生する場合のシナリオのフローであり、地山強度比がある程度小さく、スレーキングする軟岩地山を前提としている。

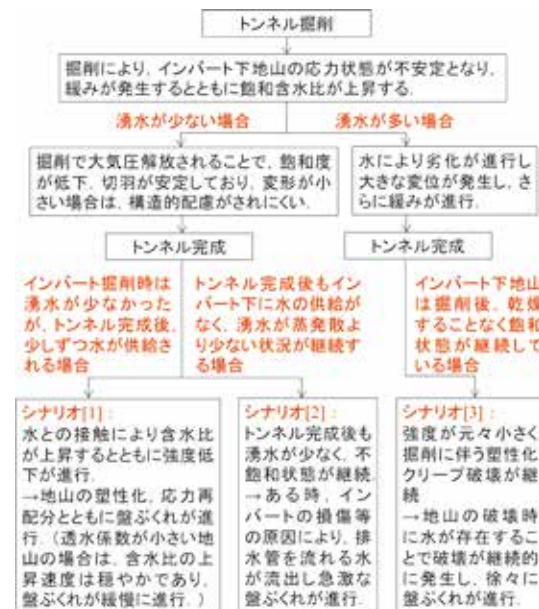


図8 山岳トンネルの盤ぶくれシナリオ

完成後の盤ぶくれ事例の94%が湧水なしまたは滲水程度であったという報告⁵⁾を考えると、シナリオ [3] のケースは比較的少なく、シナリオ [1] が最も多いと考えられる。シナリオ [1] やシナリオ [2] のような盤ぶくれメカニズムを考えると、掘削時は水が少なく、トンネル完成後、排水管を流れる水の量が多い場合は、そうで

ない場合よりも盤ぶくれリスクが高いと考えられる。

シナリオ [1] の「インバート掘削時は湧水がなく、乾燥していたが、トンネル完成後、少しずつ水が供給される場合」については、上流側からの排水管等を経由した供給や、掘削による緩みに起因する新たな水みちの形成等が考えられる。

6. 数値解析による対策効果の評価

本章では、下向きロックボルト等の盤ぶくれ対策工の効果を数値解析により評価する。数値解析による盤ぶくれは、4章の模型実験で再現した現象と同じく、大きな応力状態（初期地圧からトンネルを掘削した状態）にある地山が強度低下することにより表現した³⁾。

6.1 解析条件

解析モデル図を図9に示す。土被りは200mとして、地山に土被り荷重を初期応力として与えた上で、上面境界の鉛直変位を固定した。側圧係数は1としている。トンネル形状は新幹線標準断面としている。NATMによる掘削を三次元逐次掘削解析によりモデル化し、引き続いて完成後の盤ぶくれを表現する解析を実施した。完成後の盤ぶくれは掘削時の地山の緩みの影響を考慮した地山の強度低下で表現した。完成後の解析については実トンネルの変状再現解析結果⁸⁾を基に強度低下と経過年数を予め関連付けており、完成後10年経過時までの解析を実施している。

地山の物性値は表2の通りとした。地山およびコンクリートはMohr-Coulombの破壊規準に従う弾完全塑性体としてモデル化し、コンクリートは引張破壊による軟化についても表現した。

図10に解析ケースを示す。実施したのは、対策なし、下向きRB（ロックボルト）、下向きRBと中央通路中埋と隅角部補強の3補強法組合せ、曲率が小さくて分厚いインバートへの打直しの4ケースである。中央通路中埋と隅角部補強は、短い間合いでも施工可能な対策として提案した構造補強工であり、図11に概要図を示す。

中央通路中埋、隅角部補強のアンカーはCable要素で表現した。Cable要素は、質点を軸バネで繋ぎ、せん断ばねとスライダにより、周辺要素との滑りや分離を表現する構造要素である。アンカーの削孔径22mm、鉄筋径19mm、埋め込み長は285mm、降伏荷重164kNとしてモデル化した。縦断方向には、250mmピッチとしている。平面ひずみ状態の二次元的な状況を想定し、軸方向鉄筋はモデル化していない。下向きRBは、削孔径65mm、鉄筋径25mm、長さ6mとし、Cable要素で表現している。RBは頭部とインバート上面で相対変位が生じないようにすることで座金を表現した。

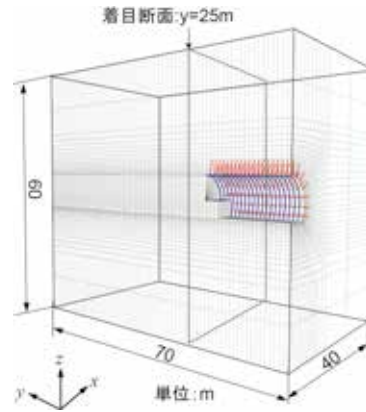


図9 解析モデル

表2 地山の物性値

物性		単位	物性値
土被り	h	m	200
一軸圧縮強さ	q_u	MPa	2.0
地山強度比	C_r	-	0.5
単位体積重量	γ	kN/m ³	20
弾性係数	E	MPa	206
ポアソン比	ν	-	0.36
粘着力	c	kPa	580
内部摩擦角	ϕ	°	31
ダイレイタンス角	λ	°	10
側圧係数	K_0	-	1.0

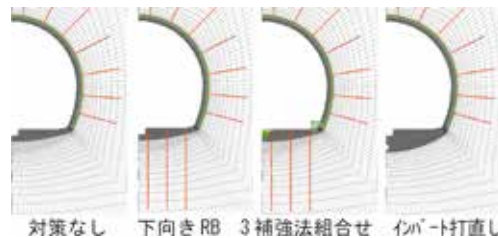


図10 補強工の盤ぶくれ抑制効果の予測評価ケース

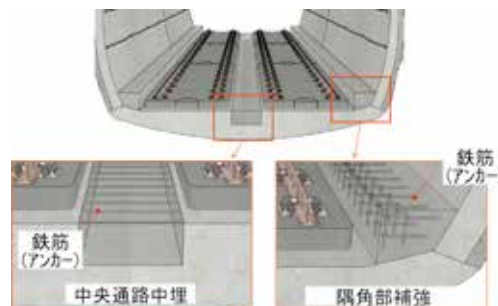


図11 中央通路中埋と隅角部補強

6.2 解析結果

図12に中央通路位置における盤ぶくれの経時変化を、地山のせん断強さの経時変化とともに示す。地山のせん断強さ c は地山の緩みに応じて低下させているため、場所によって c は異なるが、この図では最も強度低下の大きい要素の c を示している。これより、いずれの対策工

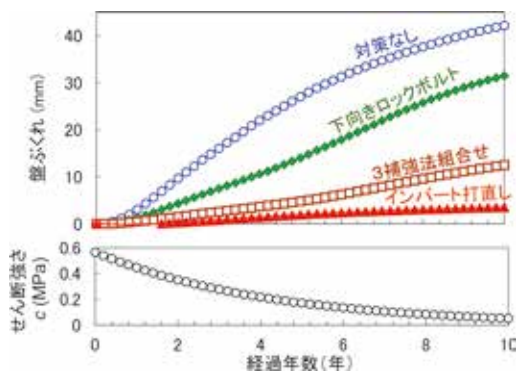


図 12 盤ぶくれの経時変化

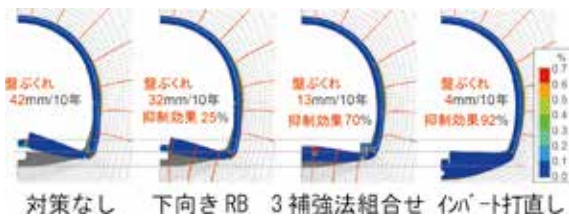


図 13 引張ひずみコンター図 (変形倍率 30 倍表示)

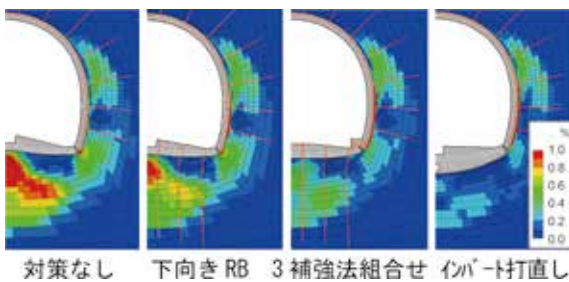


図 14 せん断ひずみコンター図 (変形倍率 20 倍表示)

でも盤ぶくれ抑制効果が見られるが、各種の対策を組合せることでより盤ぶくれを低減できることがわかる。

インバートの曲率を大きくする対策については、列車を供用しながらの短い間合いでの施工は困難であるものの、抜本的で最も効果が大きい結果となった。

図 13 に 10 年経過時の最大主ひずみ (引張ひずみ) コンター図を示す。これより、中央通路中埋により、中央通路部のひび割れは防がれているが、アンカーの埋込み端部でひび割れが発生しており、埋込み長が重要であることがわかる。

図 14 に 10 年経過時の地山のせん断ひずみコンター図を示す。構造補強により、トンネルの剛性が向上し、盤ぶくれが小さくなるとともに、地山のせん断ひずみも小さく抑えられていることがわかる。

7. まとめ

本研究では、事例分析、模型実験を実施するとともに、得られた結果に基づき、地山の含水比変化に着目した盤

ぶくれメカニズムを示した。さらに数値解析により、盤ぶくれ対策工の効果を評価した。得られた主な知見を以下にまとめる。

- 1) 文献調査により、地山と水の接触が疑われる状況で盤ぶくれが発生した事例が多く見られることを把握した。
- 2) 模型実験により、スレーキングしやすい乾燥した岩石をインバート下に配置し、応力状態を再現した上で給水すると、急激な盤ぶくれが発生することを確認した。
- 3) 掘削時の湧水、完成後の水の供給に着目して盤ぶくれメカニズムを整理した。特に、盤ぶくれのメカニズムとして、掘削時の湧水が少なく、掘削により含水比が低下した地山に、トンネル完成後、水が供給され、強度低下し盤ぶくれするというシナリオ等を示した。
- 4) 数値解析により対策工の効果を評価する手法を示した。また、各種の対策を組合せることで大きな盤ぶくれ抑制効果が期待できることを示した。

今後は、本解析手法を浸透流解析と連成させることにより、含水比変化に応じた盤ぶくれメカニズムを解析的に表現するとともに、水位低下等の対策工の評価等にも取り組むことを考えている。

文 献

- 1) 嶋本敬介, 野城一榮, 小島芳之, 塚田和彦, 朝倉俊弘: 地山の吸水膨張による山岳トンネルの路盤隆起現象とその対策工に関する研究, 土木学会論文集 F1 特集号, Vol.68, No.3, pp.65-79, 2012
- 2) 嶋本敬介, 川越健, 野城一榮, 小林寛明, 磯谷篤実: 含水比変化に着目した山岳トンネルの盤ぶくれメカニズムの推察, 土木学会論文集 F1, Vol.76, No.1, pp.34-48, 2020
- 3) 嶋本敬介, 野城一榮, 久保原猛: 供用中の山岳トンネルの盤ぶくれに対する構造補強の効果に関する数値解析, 土木学会第 72 回年次学術講演会, III-348, 2017
- 4) 木村武広: 新登川トンネルにおける補強, 新線路, Vol.65, No.5, pp.53-55, 2011
- 5) 加藤文啓, 齊藤正起, 藤原浩一, 菊山浩喜: 道東自動車道大夕張トンネルにおける変状現象に関する解析的検討, 第 51 回地盤工学研究発表会, 736, 2016
- 6) 原田聡: ロックボルト補強トンネルの長期計測, 鉄道土木, Vol.27, No.11, pp.703-707, 1985
- 7) 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, トンネルと地下, Vol.40, No.12, pp.27-37, 2009
- 8) 小林寛明, 下津達也, 上野光, 渡辺和之, 嶋本敬介, 朝倉俊弘: 長期的な盤ぶくれに対するインバート構造の抑制効果に関する基礎的研究, 土木学会論文集 F1 特集号, Vol.72, No.3, pp.I_96-I_107, 2016