

鉄道一般
車両
施設
電気
運転・輸送
防災
環境
人間科学
浮上式鉄道

山岳トンネルの盤ぶくれ対策工の効果を予測する

山岳トンネルにおいて、供用開始後に盤ぶくれ（路盤隆起）が徐々に進行し、軌道変位となって現れることがあります。この盤ぶくれ現象は、比較的緩慢に進行することが多く、ただちに安全性を脅かすことは少ないですが、現象が自然と収まることは少なく、維持管理上の問題となる場合もあります。供用中のトンネルにおける盤ぶくれ対策は、^{きょうあい}狭隘なトンネル空間において、夜間の間合いで施工ができ、かつ十分な効果を発揮することが求められます。ここでは、盤ぶくれ現象のメカニズムについて示したうえで、数値解析による盤ぶくれ対策工の効果の予測評価手法について紹介します。



嶋本 敬介
Keisuke Shimamoto
防災技術研究部
地質研究室
主任研究員
【専門分野】山岳トンネル



野城 一栄
Kazuhide Yashiro
構造物技術研究部
トンネル研究室
室長
【専門分野】山岳トンネル

はじめに

盤ぶくれは、鉄道トンネルでは列車が高速でレール上を走行することから、走行安定性に影響を与えるおそれがあります。

また、盤ぶくれが確認された場合、とくにスラブ軌道などの省力化軌道の場合には軌道高低の調整は難しく、盤ぶくれ対策はととも重要な課題といえます。

トンネルの盤ぶくれ対策としては一般的にインバートの新設や打ち替えが有効とされていますが、そのためには

鉄道では、線路下の掘削が必要となり、施工時間が長くかかります。供用中の鉄道トンネルにおいて長期間の作業を実施するには、ダイヤ変更や列車運休の手配が必要となるため、社会的影響を考えると現実的ではありません。そのため、^{きょうあい}狭隘なトンネル空間で、列車が通らない夜間の限られた時間でも施工することができる鉛直下向きへのロックボルト打設（**図1**）による対策を実施するケースが一般的です。

一方で、ロックボルトでは十分に盤ぶくれを抑えることができず、追加対



(a)打設状況



(b)打設完了後の状況

図1 下向きロックボルトによる盤ぶくれ対策

策が必要となる事例がいくつか見られます。このとき、より効果的な対策工を実施することが必要とされますが、ロックボルトの追加といった対策しか選択肢がないのが現状です。

今まで述べた背景を踏まえ、ここではまず、盤ぶくれのメカニズムについて概説したうえで、数値解析による盤ぶくれ対策工の効果の予測評価手法について示し、夜間の間合いで施工可能ないくつかの対策工の効果について、評価した結果¹⁾を紹介します。

盤ぶくれのメカニズム

盤ぶくれのメカニズムはスクイージング（塑性化にともなう押し出し）とスウェリング（吸水膨張）の二つに大きく分けられます。それぞれについて、想定されるメカニズムを模式図として図2に示します。

スクイージングによる盤ぶくれは、地山強度比（地山の軸圧縮強さに対する土かぶり荷重の比）が小さい場合に見られる現象です。トンネルを掘削すると、路盤部では、水平方向応力が増加し、鉛直方向応力は小さくなります。このような応力状態の路盤部において、水が供給され、スレーキング（☞参照、図3にスレーキングの例を示します）により強度低下することで、路盤部地山が破壊して盤ぶくれが生じます。

スウェリングによる盤ぶくれは、路盤部に集まった地下水によって、膨潤性粘土鉱物が吸水膨張することで地山が膨れて路盤が隆起する現象です。

スクイージングおよびスウェリングを単純化すると図4のように示せます。スクイージングによる盤ぶくれは、図4(a)のように、強度劣化にともなう地山のせん断破壊が大きな原因であり、地山に正のダイレイタンス特性（☞参照）があればさらに盤ぶくれが助長されます。スウェリングは膨潤性

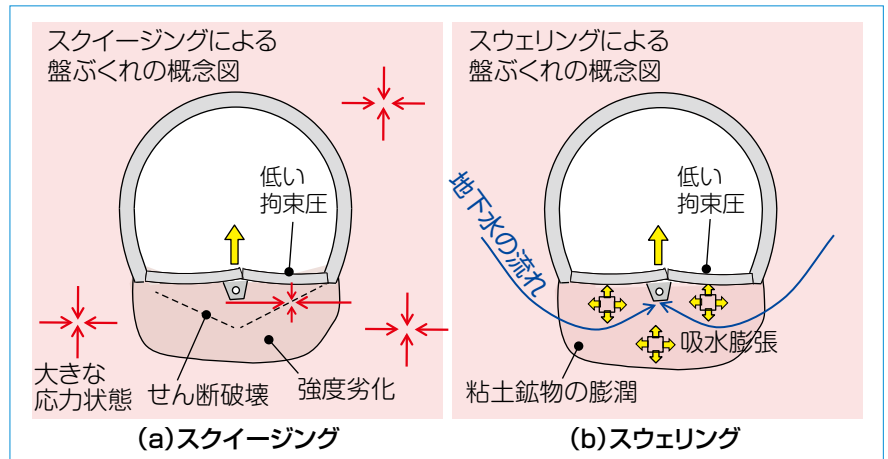


図2 盤ぶくれメカニズムのイメージ図

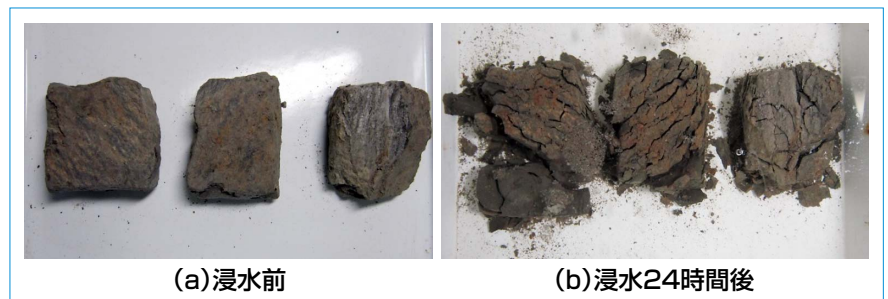


図3 スレーキング状況

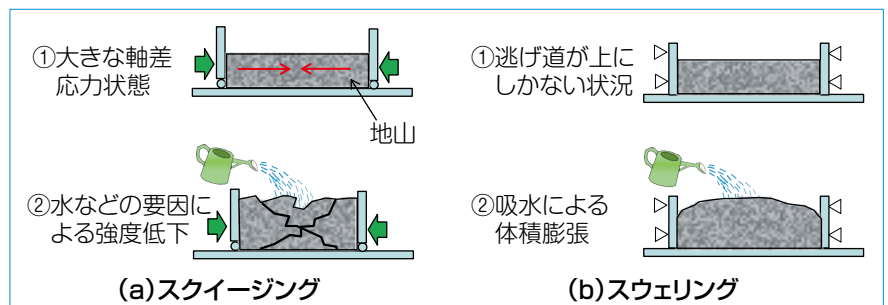


図4 盤ぶくれメカニズムの単純化したイメージ図

粘土鉱物の吸水膨張が主な原因であり、図4(b)のように地山が体積膨張することで盤ぶくれすると考えられます。

スウェリングが盤ぶくれにつながることもありえますが、日本における盤ぶくれは、基本的には地山の強度が

徐々に低下することにより、スクイージングし、盤ぶくれするケースが多いと考えられています²⁾。そこで、以降の解析では、地山の強度を徐々に低下させる「地山劣化モデル」により盤ぶくれを表現します。

☞ スレーキング

スレーキングとは、土塊、岩塊が、乾湿の繰り返し作用を受けて細片化、土砂化する現象です。地圧による変形が問題となるトンネルは、スレーキングしやすい泥岩、凝灰岩などの軟岩地山に多いことが確認されています。

☞ ダイレイタンス

せん断力を受けた時の体積変化をダイレイタンスといいます。せん断力を受けて間隙が増加し、体積が増加する場合は正のダイレイタンスです。

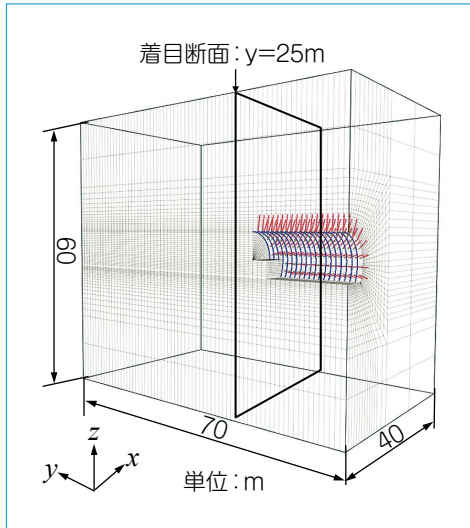


図5 解析モデル

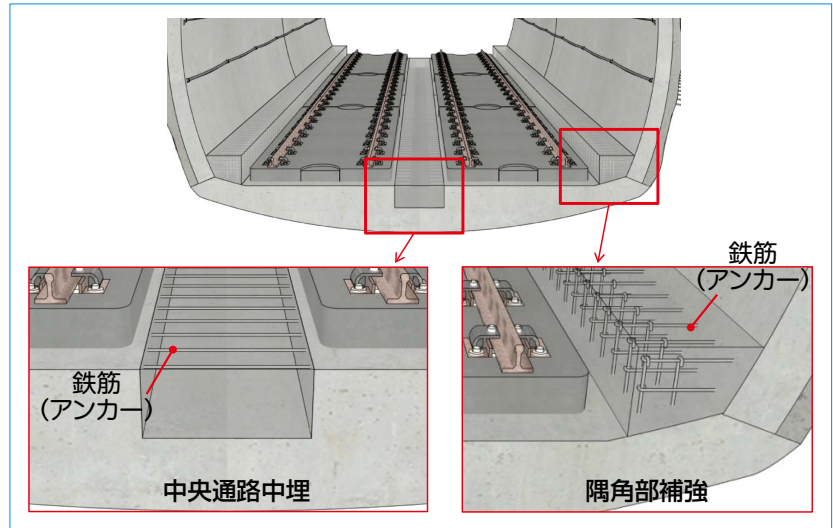


図6 検討した対策方法

数値解析条件

数値解析には、トンネルや地盤の解析などで一般的に使われている有限差分コードFLAC3Dを使用しました。数値解析モデルを図5に示します。土かぶりは200mとして、地山に土かぶり荷重を初期応力として与えました。トンネルの形状は新幹線標準断面としました。

1m掘削の都度、掘削した1m分の吹付けコンクリート、鋼製支保工、ロックボルトを計算に追加していきます。これにより、NATMによる施工をモデル化した三次元逐次掘削解析を行います。これに続いて完成後の盤ぶくれを表現する解析を実施します。完成後の変状発生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ました²⁾。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を基に強度低下と経過年数をあらかじめ関連づけ、完成後10年経過時までの解析を実施しています。

地山の物性値にはある変状トンネルの再現解析時の実績の物性値を採用しました。

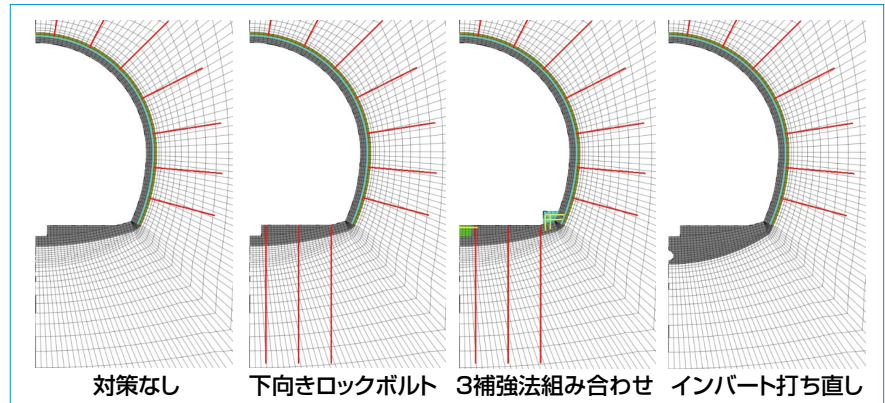


図7 補強工の盤ぶくれ抑制効果の予測評価ケース

対策工のモデル化

短い間合いで施工可能な対策として、図6に示す中央通路中埋と隅角部補強を検討しました。図7に数値解析による補強工の盤ぶくれ抑制効果の予測評価ケースを示します。実施したのは、対策なし、下向きロックボルト、下向きロックボルトと中央通路中埋と隅角部補強の3補強法組み合わせと曲率が小さくて分厚いインバートへの打ち直しの4ケースです。

中央通路中埋、隅角部補強のアンカーをCable要素で表現しています。Cable要素は、質点を軸ばねでつなぎ、せん断ばねとスライダーにより、周辺

要素との滑りや分離を表現する構造要素です。アンカーの根入れ長はすべて285mmとしています。アンカーについては、削孔径22mm、鉄筋径19mm、降伏荷重164kNとしてモデル化しました。縦断方向については、250mmピッチでモデル化しています。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ません。下向きロックボルトは、削孔径65mm、鉄筋径25mm、長さ6mとし、Cable要素で表現しています。ロックボルト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ています。

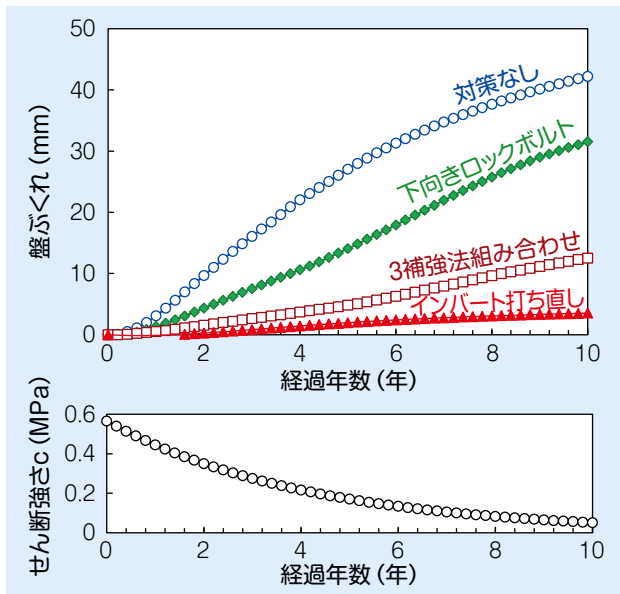


図8 盤ぶくれの経時変化

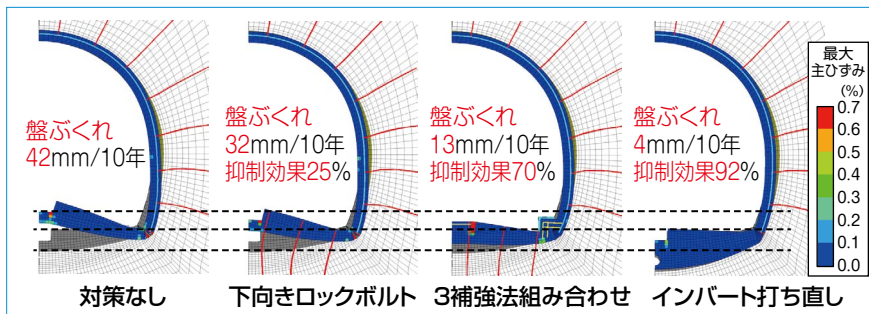


図9 10年経過時の最大主ひずみコンター図 (変形倍率30倍表示)

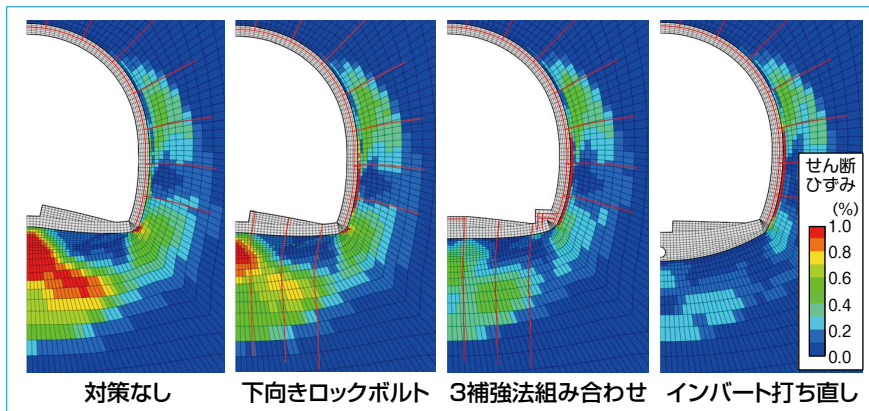


図10 10年経過時の地山のせん断ひずみコンター図

数値解析結果

図8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します。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 は異なりますが、もっとも強度低下の大き

い要素の c を示しています。

これより、いずれの対策工でも盤ぶくれ抑制効果が見られますが、各種の対策を組み合わせることにより盤ぶくれを低減できることがわかります。

インバートの曲率を大きくする対策については、列車運行に供用しながら

の短い間合いでの施工は困難であるものの、抜本的でもっとも効果が大きい結果となりました。

図9に10年経過時の最大主ひずみ(引張ひずみ)コンター図を示します。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ものの、3補強法組み合わせのケースでは中央通路部のアンカーの埋め込み端部でひび割れが発生しており、埋め込み長が重要であることがわかります。

図10に10年経過時の地山のせん断ひずみコンター図を示します。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ります。

おわりに

ここでは、盤ぶくれメカニズム、盤ぶくれ対策工の効果の予測評価手法およびその評価結果について紹介しました。

供用後の山岳トンネルの盤ぶくれ対策は狭隘な空間における限られた時間内での施工となり、その中で実施できる対策工は限られます。ここで紹介したような解析手法などを用いて効果を予測し、その上で対策工を選定することが重要となります。[RRR]

文献

- 1) 嶋本敬介, 野城一栄, 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
- 2) 嶋本敬介, 野城一栄, 小島芳之, 塚田和彦, 朝倉俊弘: 建設時の影響を考慮した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(トンネル工学), Vol.69, No.2, pp.105-120, 2013