

山岳トンネルの盤ぶくれ対応に関する基礎解析

東海旅客鉄道(株) 正会員 ○伊藤 直樹 安原 真人
川元 隆史 細川 聡一郎
(公財)鉄道総合技術研究所 正会員 大原 勇 野城 一栄 嶋本 敬介

1. はじめに

近年新設された山岳トンネルは、調査段階における地中探査方法の高度化や NATM を標準とした工法の採用に加え、地山性状に相応しい多様な補助工法の併用により、より地山に適した施工を行っているにもかかわらず、トンネルの底盤部を構成するインバートの一部が隆起する盤ぶくれ現象（以下、盤ぶくれと記載）が発生している。盤ぶくれは、地盤の劣化による強度低下によるものや、粘土鉱物の吸水によるものなどが挙げられるが、その詳細な発生メカニズムは解明しきれていない。そこで建設時において盤ぶくれの発生を抑制する観点から、その対応方法を検討するにあたり、トンネルの各部材が盤ぶくれに対してどこまで耐荷性能があるのかについて、数値解析により比較検証した。ここでは、①インバートに設置する鋼製支保工（以下、ストラットと記載）の有無、②軌道構造を支持する路盤コンクリート（以下、路盤と記載）の有無、③インバート半径/上半半径（以下、R 比と記載）について、数値解析結果に基づき、盤ぶくれに対する効果について報告する。

2. 解析条件

(1) 解析モデル

モデル化の構成要素はインバート部、中埋め部（コンクリート）、覆工部（コンクリート）、吹付けコンクリート、地山であり、ロックボルトについては今回対象外とした。また、中央排水管は空洞とすることでモデル化した。解析領域については、小林ら¹⁾の検討を参考に、上下及び側方に 1.5D 程度とした（図-1）。

(2) 解析用物性値

地山は、Mohr-Coulomb の破壊基準に従う完全弾塑性体としてモデル化した。解析に用いる地山物性値は、アイデンら²⁾、赤城ら³⁾、蔣ら⁴⁾による一軸圧縮強度と各種の物性値の相関関係を参考に設定した（表-1）。

(3) 解析手順

小林ら¹⁾の検討を参考に、インバートと地山との境界面を二重節点として分離したうえで、インバート下面に鉛直上向きに等分布荷重を載荷圧として設定し、100kPa まで徐々に増加させることで盤ぶくれを表現した（図-1）。境界条件は、全面ローラー支持とした。小林ら¹⁾の検討と同様、重力は無考慮であり、初期応力解析及び掘削解析は実施していない。載荷圧を徐々に上げていき、塑性領域図上で底盤部のいずれかのメッシュに最初に塑性化が生じた時点を「ひび割れ発生」とし、その載荷圧を「盤ぶくれ耐荷力」として評価した。

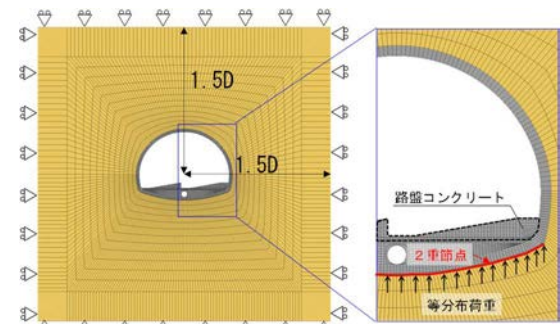


図-1 解析モデルと盤ぶくれ圧付与イメージ

表-1 解析に用いた地山物性値

項目	単位	物性値
一軸圧縮強さ	(Mpa)	1
単位体積重量	(kN/m ³)	20
変形係数	(MPa)	90
粘着力	(MPa)	0.294
内部摩擦角	(deg)	29.14

表-2 解析ケースの条件

	インバート半径/上半半径	ストラット 有無	路盤 有無	路盤強度 (N/mm ²)
CASE 1	2.6	無	無	—
CASE 2	2.6	有	無	—
CASE 3	2.6	無	無	—
CASE 4	2.6	無	有	27
CASE 5	1.2~2.6	無	有	27
CASE 6	1.5~2.6	無	有	50

3. 解析結果

ストラットの有無 (CASE1・2)、路盤の有無 (CASE3・4)、路盤強度の違い (CASE5・6) による盤ぶくれ耐荷力についてそれぞれ評価した (表-2)。CASE5 及び CASE 6 においては、インバート R を変数として解析を行った。

(1) ストラットの評価

ストラット有無の結果を図-2に示す。今回は、ひび割れ発生までの比較的小さな載荷圧の評価であり、この領域においては圧縮側に配置しているストラットの効果は小さく、ストラットの有無による盤ぶくれ耐荷力の違いは見られなかった。ただし、ひび割れ発生後、載荷圧が一定以上大きくなると、ストラットが引張部材として働き、変位抑制効果が確認できた。

(2) 路盤有無と路盤強度の違いによる評価

路盤有無による評価を図-3に、路盤強度の違いによる評価を図-4に示す。路盤がある場合の盤ぶくれ耐荷力は、無い場合に比べ約2.2倍となり、盤ぶくれの抑制効果が確認できる。更に、路盤の強度を27N/mm²から50N/mm²に上げることで、盤ぶくれ耐荷力はさらに1.4倍程度上がることも確認できた。これは路盤の無い場合では中央排水管の敷設によりコンクリート厚さが局所的に薄い部分でひび割れが発生することがわかっており、ここに路盤の厚みが増すこと、あるいは強度が上がることでひび割れに対する耐荷力が上がったと考える。もとより、R比とひび割れ発生時の載荷圧の相関は高いことは一般的に知られているが、インバート半径を小さくする (円形に近づける) ことで、盤ぶくれの耐荷力が大幅に向上することを改めて確認した (図-4)。

4. おわりに

本検討では、盤ぶくれによって発生するひび割れ発生に着目し、ストラットの有無、路盤の有無、路盤強度が盤ぶくれに寄与するかを比較検証した。盤ぶくれ時の引張領域にある路盤の有無や強度は大きく寄与することを確認した。更に、インバート半径は盤ぶくれの耐荷力に大きく寄与し、R比を小さくする (円形に近づける) ことで、盤ぶくれの耐荷力が大きく改善することを改めて確認した。これらの結果より、底盤部の検討をする際は、R比と各要素を組み合わせて適切に評価していくことが重要である。

参考文献

1) 小林寛明, 上野光, 磯谷篤実, 嶋本敬介, 岸田潔: 完成後の盤ぶくれを防ぐ新たなインバートの抑制効果, 土木学会論文集 F1(トンネル工学), Vol. 75, No. 1, pp. 116-129, 2019. 2) アイダノオメール, 赤木知之, 伊藤 孝, 川本眺万: スクイーピング地山におけるトンネルの変形挙動とその予測方法について, 土木学会論文集, No. 448/III-19, pp. 73-82, 1992. 3) 赤木知之, アイダノオメール, 伊藤 孝, 川本眺万: スクイーピング地山におけるトンネル壁面変位の予測と支保の設計, 第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp. 719-724, 1994. 4) 蔣宇静, 江崎哲郎, 横田康行, 禰 秀和: 地山特性曲線に影響を及ぼす要因の定量的分析, 第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp. 767-772, 1994.

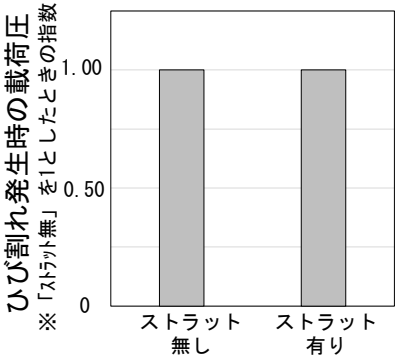


図-2 ストラットの影響評価

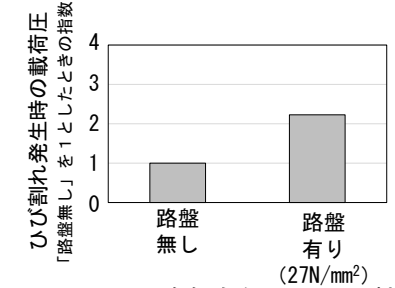


図-3 路盤有無による比較

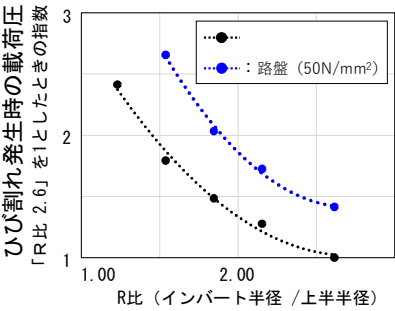


図-4 インバート R とひび割れ耐荷力 (路盤強度 27 N/mm² 及び 50 N/mm²)