

インバート形状がトンネル構造の補強効果に与える影響に関する解析的考察

東京都立大学 ○中里 倫子 棗 拓史 河田 皓介 砂金 伸治
東日本高速道路株式会社 大津 敏郎 三上 尚人
国立研究開発法人土木研究所 日下 敦 小泉 悠

1. はじめに

近年、供用中の山岳トンネルにおいて、完成後長期の時間経過後に盤ぶくれが顕在化する事例が増加している。盤ぶくれはトンネルの健全性や構造の安定性に悪影響を及ぼす恐れがあるため、対策を施す必要がある。盤ぶくれが生じるトンネルにみられる共通点として、インバートの未設置やインバート設置区間の構造耐力不足があり、これらの対策のひとつとして供用中におけるインバートの新設が考えられる。しかし、限られた空間や期間内での作業となることから、施工性や経済性の面で合理化が求められている。これらを踏まえ、工期や工事費を削減できる合理的なインバート構造の検討を行う必要があると考えられる。

筆者らは、従来型の構造とは異なる新たなインバート形状を仮定したうえで、一定程度の耐荷力を保持しつつ、施工の単純化が可能となる構造について検討を進めている¹⁾。本報では、盤ぶくれによる外力の作用を模擬した模型実験の再現解析を行い、トンネル模型の断面変形量や発生する応力の傾向等の観点からインバート形状がトンネル構造の補強効果に与える影響について考察し、仮定した新たなインバート形状の実現性を検討した。

2. 解析手法

数値解析は有限要素法を用い、図-1 に示すように既往の模型実験¹⁾におけるトンネル覆工模型およびアルミ棒積層体を二次元弾性体によりモデル化した。また、解析領域はアルミ棒積層体の土層部をモデル化して幅500mm、高さ500mmとし、トンネルの境界部との離隔は側方と下方ともに200mm ずつ確保した。Step1 の初期応力解析（自重解析）では、モデル底面で鉛直方向、両側面で水平方向の変位を拘束し、上面は拘束せずに自由面とした。Step2 以降は、モデル底面の中央部幅250mm の範囲に上向きの強制変位を1mm ずつ与えて計10mm まで载荷し、計11 ステップの解析を実施した。なお、Step2 以降の载荷時における上面の境界条件について、模型実験では下方からの载荷により地山全体が上方に持ち上がる挙動を示したが、実験は小土被り区間や地山表面の変動等を前提としていないため、本解析ではモデル上面の鉛直変位を拘束した。解析物性値は表-1 に示す通りである。アルミ棒積層体の弾性係数とポアソン比は、3R を用いてパラメトリックスタディを実施して実験結果と比較をすることで決定した。その他の物性値は模型実験の材料諸元と同様の値である。解析ケースは、表-2 に示すように上半アーチの半径R1 に対するインバート半径比R3 に着目するとともに、インバート形状を変更し合計7 ケースとした。

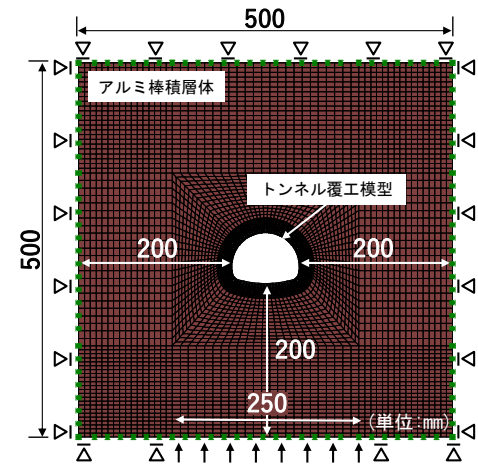


図-1 解析モデル

表-1 解析物性値

	アルミ棒積層体	トンネル覆工模型
弾性係数 E (N/mm ²)	0.05	42
単位体積重量 γ (N/mm ³)	2.14 × 10 ⁻⁵	1.05 × 10 ⁻⁵
ポアソン比 ν	0.49	0.30
引張応力 T (N/mm ²)	0	0.06

表-2 解析ケース

#1_3R	#2_3Rtriangle	#3_2Rtriangle	#4_Flat	#5_TBF	#6_Trapezium

キーワード 山岳トンネル、インバート、盤ぶくれ、数値解析
連絡先 〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1 東京都立大学 TEL：042-677-1111 (代表)

3. 解析結果

結果の一例として、インバート隆起量と天端沈下量の総和である鉛直内空変位量を図-2、主応力ベクトル図を図-3に示す。図-2より、#1,#2,#3の剛性(与変位-変位量関係の傾き)は概ね一致しており、与変位5mmまでにおける実験結果と一致している。#4について、実験では与変位1mmで変状が生じるため解析結果よりも剛性が低い。図-3より、応力の集中箇所は全ての形状で、インバート部および隅角部に曲げによる応力集中が生じていることがわかった。これは、模型実験においてインバート内側および隅角部外側に引張りひ割れが生じたことと一致する。しかし、本解析は弾性解析であるため、模型実験におけるひび割れ発生後の剛性の変化を考慮できないことに留意する必要がある。以上より、変位の傾向や応力集中に関して模型実験を概ね再現できる解析モデルであると検証できた。

トンネル覆工模型の変位量より、インバート部が深い形状や、TBFやTrapeziumのようにインバート部の断面剛性が大きい形状は鉛直方向の変位の抑制が可能であると考えられる。TBFとTrapeziumについて、模型実験では早い段階でインバートにひび割れが生じて隆起量が増大し、平面形状としたFlatに次いで鉛直方向の変位が大きくなる。これより、弾性域においては下方からの外力に対し変形を抑制するが、インバートのひび割れ発生後は耐力が低下しやすい構造であると推測される。

応力の値および分布傾向より、インバート部を深い形状にすることで、応力が低減することがわかる。インバートを三角形とした2Rtriangleや3Rtriangleは、隅角部外側において引張応力が最大となるため、下方からの外力に対して隅角部が構造上の弱部になる可能性が示唆される。Flatは、インバート中央部内空側の引張応力が最も大きく、下方からの外力による曲げの影響を強く受けることが示唆される。TBFは、インバートを厚肉することでFlatと比較して応力が低減していると考えられる。Trapeziumは、インバート内空側の引張応力がTBFに次いで小さい値となる。また、その発生箇所はインバート部の厚さが増える箇所付近となり、模型実験における引張りひび割れの発生箇所と一致する。TBFとTrapeziumは、模型実験ではFlatに次いで早期に崩壊し、解析での応力の大きさと一致しない。これは、断面剛性が大きいことが影響していると考えられる。

4. まとめ

本報では、数値解析により盤ぶくれによる外力の作用を模擬した模型実験の再現を行い、断面変形量や発生する応力の傾向等の観点からインバート形状がトンネル構造の補強効果に与える影響について考察した。解析結果より、インバート形状の変化はその断面変形量や応力の発生傾向に影響を与えることを確認したとともに、形状によってはトンネル下方からの外力の影響を大きく受け、構造上の弱部になりうる箇所が存在する可能性が示唆された。今後は、地山の状態や複数の外力作用下での挙動を明らかにするとともに、ひび割れ発生等に伴う構造全体としての剛性の変化が、トンネル構造の補強効果や構造耐力の低下に及ぼす影響などを考慮できる手法を用いた検討が必要である。また、適応対象の選定手法の検討、合理的な構造に対する要求性能を考慮した定量的評価手法の確立が必要である。

参考文献

1) 棗ら：インバート形状がトンネル構造の補強効果に及ぼす影響に関する実験的考察，土木学会第78回年次学術講演会（投稿中）

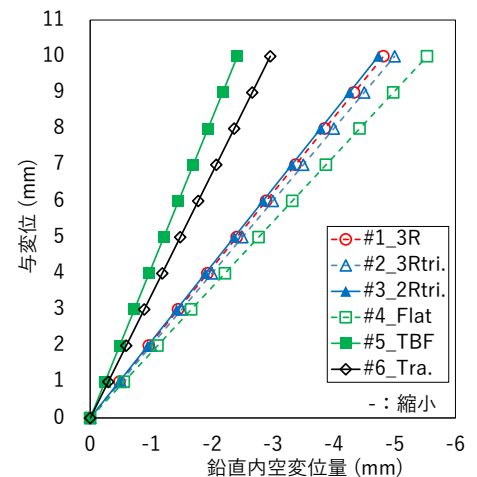


図-2 鉛直内空変位量

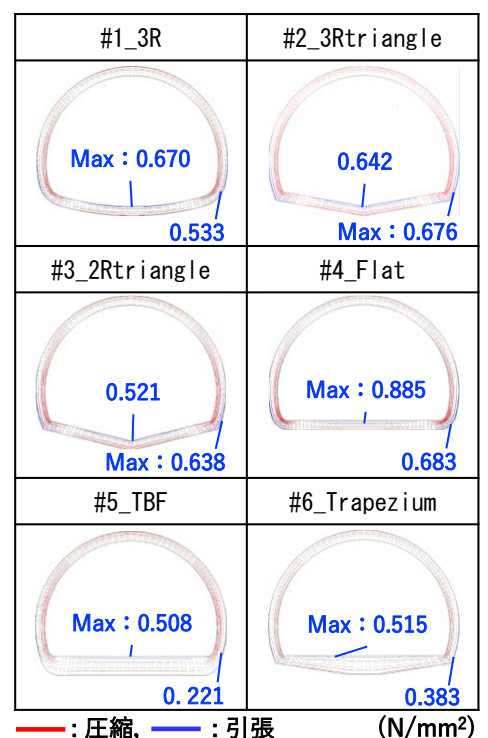


図-3 主応力ベクトル図