

掘削土量が低減可能となる新たなインバート構造の力学的性能の評価実験

国立研究開発法人土木研究所 正会員 ○小泉悠 日下敦
東京都立大学大学院 正会員 梶拓史 中里倫子 河田皓介 砂金伸治
東日本高速道路株式会社 正会員 大津敏郎 三上尚人 田邊修平

1. はじめに

近年、供用中の山岳トンネルにおいて、風化地山や粘土鉱物を有する地山の体積膨張（swelling）や、周辺地山からの塑性土圧の作用（squeezing）に起因する盤ぶくれ（路面隆起）が発生し、対策工事が必要となる事例が増加している。盤ぶくれ対策としては、インバートの追加設置が有効とされる。ただし、同工事をトンネル活線下で実施する場合、半断面施工が基本となり、導入できる掘削機械等が小型となること等による施工効率の極端な低下が課題となる。そこで、標準的なインバートに対し、掘削土量を低減できる新たなインバート構造について検討し、模型実験により力学的性能や破壊に至るまでの変状発生モード等を比較評価したので、ここに報告する。

2. 実験方法および検討ケース

インバート形状をパラメータとした同種の実験的検討が、これまで、トンネル周辺地山をステンレス棒で模擬した実験装置により進められてきた¹⁾。ただし、ここで用いるトンネル模型は全幅 80mm 程度と小型であり、概略的な挙動の把握は可能であるが、模型に発生するひずみ等にも着目した詳細な分析は困難であった。そこで、本検討では全幅 600mm 程度のトンネル模型を埋設できる二次元載荷実験装置を用い、トンネル模型の変位や内外面のひずみ等を測定しながら、盤ぶくれを模擬した荷重を載荷した。模型実験の概要を図-1 に示す。トンネル模型は実大規模の概ね 1/20 となるようモルタルにより作製し、覆工の厚さは 20mm、内径 R_1 は 280mm とした。掘削土量を低減できるインバート構造について机上検討し、表-1 に示すケース 1～4 を模型実験に供した。路盤面（F.L.）以下の掘削土量について、標準となるケース 1 を基準（100%）とした場合、ケース 3 が約 40%と最小で、ケース 2 が約 60%であった。ケース 4 は 70%を下回るよう中央部の掘削深さを設定した。

実験装置内にトンネル模型を設置した後、模型周辺に乾燥砂を投入した。実験装置に上蓋をして3本の油圧ジャッキにより載荷し、ジャッキの平均変位が 1mm 増加するごとに各種計測を実施した。また、上蓋に設けた円形の窓より、模型内面のひび割れの発生状況を観察記録した。なお、実験時、円柱供試体によりモルタルの圧縮強度を管理したが、各ケースで有意な差はなく、平均 22.7N/mm²であった。

3. 各ケースの最大荷重および模型の破壊過程

載荷ジャッキの合計荷重と平均変位の関係を図-3 に示す。また、載荷終了後、上蓋を取り外した際に撮影したトンネル模型の破壊状況を写真

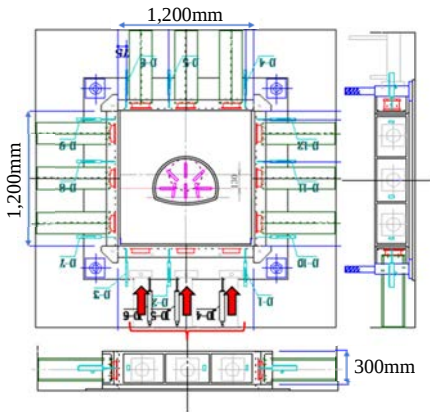
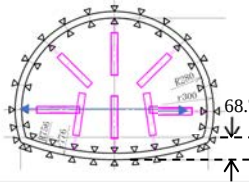
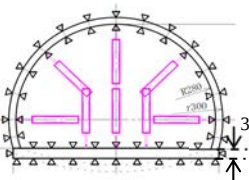
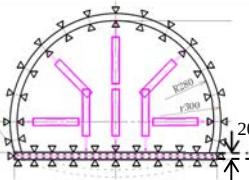
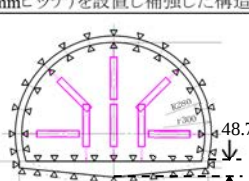


図-1 模型実験の概要

表-1 実験ケースの概要

ケース	名称・掘削土量比	構造概要・計器設置図
1	標準・100%	 インバート半径: 2.7× R_1 とした標準的な構造
2	フラット厚肉・59.5%	 インバートの形状: フラット、厚さ: 30mm (標準の1.5倍)とした構造
3	フラット鋼材補強・39.7%	 インバートの形状: フラット、インバート中に鋼管 (φ9.5, t0.8, 50mmピッチ)を設置し補強した構造
4	五角形・68.1%	 インバートの底面は三角形、上面はコンクリート打設の施工性を考慮してフラットとした構造

キーワード トンネル、インバート、模型実験、掘削土量、最大荷重
連絡先 〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6 TEL 029-879-6791

-1 に示す。ケース 1 では、変位 5mm のときインバート内面の中央で、曲げモーメントによる引張りひび割れと考えられるひび割れが観察された。その後、変位 21mm で覆工内面の天端でもひび割れが発生するなど変状が進展し、最終的には変位 45mm で脆性的に破壊した。インバートの中央と隅角部の中間付近 ($\theta=330^\circ$) において、軸圧縮力の卓越に伴うせん断破壊が生じたものと考えられた。次に、インバート形状をフラットとしたケース 2 及び 3 であるが、ケース 1 と同様、いずれも変位 5mm でインバート内面の中央で曲げ引張りひび割れが発生した。ケース 2 では、このひび割れの幅が徐々に拡大しながらインバートが折れ曲がり、砂が流入するに至った。ケース 3 は、銅管による補強効果により、多数の細かなひび割れが分散して発生した。最終的にはアルミ棒とともにインバート中央で折れ曲がり、破壊した。ケース 2 及び 3 では、模型の破壊が延性的で荷重が減少した後、再び緩慢に増加した。これは模型が耐荷力を失うことで、模型左右の地山へと荷重が配分されたためと考えられた。これよりケース 2 及び 3 の最大荷重は、図-2 の実線部の荷重の最大値とし、破線部は参考までに表示した。なお、模型のインバート中央での隆起変位とジャッキの平均変位の関係を図-3 に示す。ケース 2 ではジャッキ変位 18mm 以降、ケース 3 ではジャッキ変位 26mm 以降で、模型の隆起変位が急増しており、インバートの変位抑制性能が顕著に低下していたことが認められた。最後にケース 4 では、ケース 1~3 と異なり、インバート中央での曲げ引張りひび割れは認められず、変位 6~9mm で中央と隅角部の中間付近 ($\theta=205^\circ, 335^\circ$) でひび割れが発生した。最終的には変位 34mm で脆性的に破壊し、ケース 1 と同様、せん断破壊によるものと考えられた。

以上、各ケースの最大荷重を図-4 に示す。ケース 1 を基準 (100%) とし、ケース 2~4 の最大荷重の比率により各々の力学的性能を評価すると、まずケース 2 は 25% で最小であった。ケース 3 及び 4 はともに約 50% であったが、掘削土量の低減効果を踏まえると、実用化の可能性があると考えられる。ただし、実現場で生じる盤ぶくれが、本载荷実験のどの程度の荷重値に対応するか等は今後の課題であり、現場計測結果の分析や数値解析により検討を進めていく。また、力学的性能以外に、変状の発生モードや隆起変位の抑制性能でも各ケースで異なる傾向が示されたため、新たな構造を検討する上で考慮する必要がある。

4. まとめ

盤ぶくれ対策に有効なインバートの追加設置に関し、掘削土量を低減できるインバート構造の開発に取り組み、二次元载荷実験装置を用いた模型実験の結果を報告した。新たに提案したインバート構造は、標準的な構造に対して力学的性能に劣るものの、掘削土量が 3~5 割低減できるという利点がある。引き続き現場適用に向けて検討を進めていく所存である。

参考文献 中里倫子ら：インバート形状とトンネル構造耐力の関連性に関する検討，トンネル工学報告集，Vo.32，I-36，pp.1-10，2022。

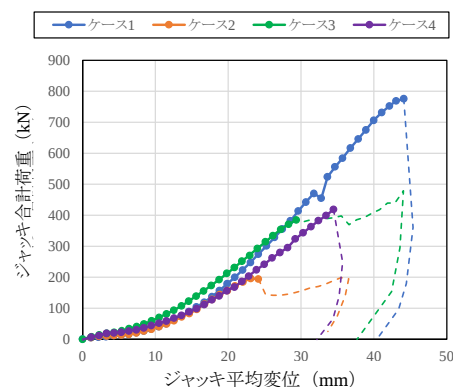


図-2 载荷ジャッキの合計荷重と平均変位の関係

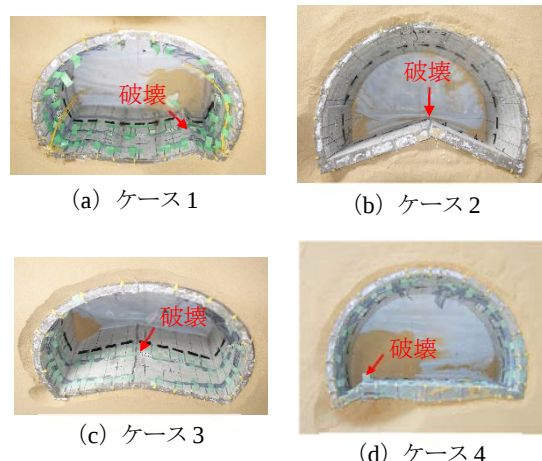


写真-1 模型の破壊状況

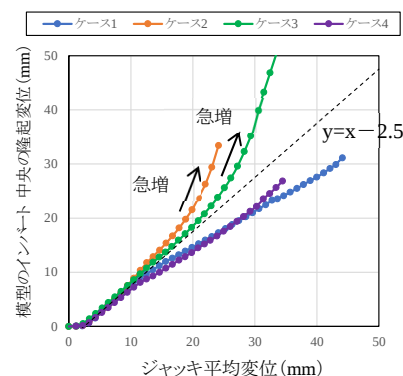


図-3 模型の隆起変位とジャッキ変位の関係

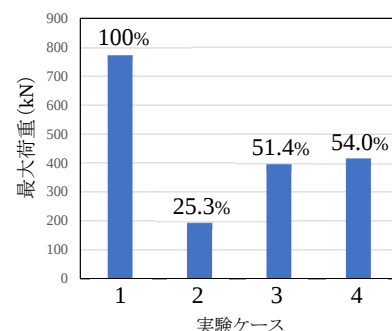


図-4 各ケースの最大荷重