

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

東京都立大学 〇 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 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。盤ぶくれは車両の安全な走行を阻害し、放置することで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り対策が求められる。既に盤ぶくれを含め顕著な変状が生じているトンネルに対して補強対策を講じる必要があることは自明であるが、将来的な変状の発生が懸念される区間に対してもインバートを順次設置していくことが重要であると考えられる。盤ぶくれに対する最も基本的な対策のひとつがインバートの新設または再設置による補強工であるが、供用中の実施には多くの課題がある。力学的な面での課題としては、補強に伴う上半側での変状の発生が助長されるといった知見のみならず、施工性の面では、狭い空間において路面掘削等の規模が大きい一連の工事を行わなければならないことが挙げられる。また、経済性の面では、施工に伴う交通規制の影響を最小限に抑える必要があり、社会的影響の大きさが挙げられる。そのため、施工速度の向上が見込める等、合理的なインバート構造の検討を行う必要性が高まっていると考えられる。こうした背景を踏まえ本研究では、トンネル構造として成立性を担保しつつ、施工の省力化を図ることを念頭に置いた新たなインバート形状を仮定し、盤ぶくれを模擬する模型実験を通して新形状の実現性を検討した。

2. 実験手法

写真-1 に載荷開始時と終了時の実験土槽、図-1 に実験フローを示す。表-1 に諸元を示すトンネル覆工模型を作製後、土槽底面から高さ 200 mm の位置に模型を設置した後、表-2 に諸元を示すアルミ棒を高さ 500 mm まで積載し、断面変形量の測定を行うため、模型の断面(天端・インバート中央部・左右 SL の計 4 点)に標点をマーキングした。また、地山内に一定の間隔(50 mm ピッチを基本、模型周辺は 25 mm)で標点を設置し、実験時の地山全体の挙動を把握することで、盤ぶくれ現象の再現としての妥当性を確認した。実験装置の制約上、土槽に与える変形に対して地山が追従することができるだけの余裕を確保する必要があるため、本実験では土槽の上部 50 mm にウレタンフォームを充填し、写真-1(a)のようにセッティングした。載荷は 30 秒毎に 1 mm ずつ与えることで実施し、土槽正面に設置した画像解析用の定点カメラにより変形の過程を撮影・記録し、併せて目視による観察によりひび割れ発生タイミングおよび位置の観察・記録を行った。載荷を繰り返した後、写真-1(b)のようにアルミ棒がトンネル内部に流入して内空断面を保持できなくなった時点を崩壊と見なして実験を終了し、ケース間で断面変形量やひび割れの発生傾向、崩壊時の与変位量等を比較して傾向を分析した。続いて、図-2 に実験ケースを示す。#1 を基本形状とし、一般的な 2 車線道路トンネルの約 1/100 のスケールで、インバート部の構造半径比(インバート部 R3/上半アーチ部 R1)を 3.0 と

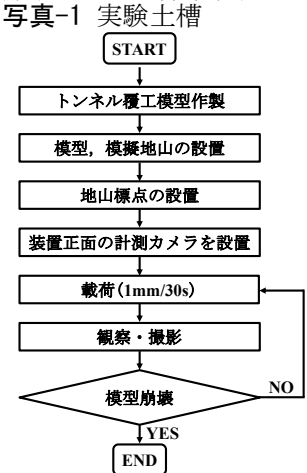
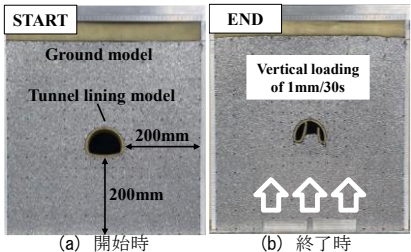


図-1 実験フロー
表-1 模型諸元

圧縮強度 (N/mm ²)	0.4	弾性係数 (N/mm ²)	42
引張強度 (N/mm ²)	0.06	単位体積重量 (N/mm ³)	1.05×10 ⁻⁵

表-2 模擬地山諸元

径 (mm)	φ ₁ =1.6, φ ₂ =3.0
重量混合比	φ ₁ :φ ₂ =3:2
内部摩擦角 (deg)	30
粘着力 (N/mm ²)	0
単位体積重量 (N/mm ³)	2.14×10 ⁻⁵

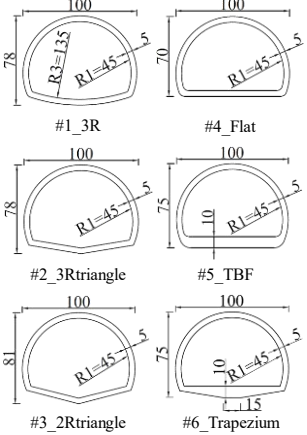


図-2 実験ケース

キーワード 山岳トンネル, インバート, 盤ぶくれ, 模型実験
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)

したものである(以下, 3R). #2 については, #1 の上半アーチの端部とインバートアーチの中央部を単純な直線で結び三角形として施工の省力化を図る形状であり, #3 については構造半径比が 2.0 である円形インバートをもとに三角形とした形状である(以下, 各々 3Rtriangle, 2Rtriangle). #4 はインバート部を平面にしたもの(以下, Flat)であり, インバートが未設置である条件に最も近いケースである. #5 は平面の底盤の厚さを 2 倍(10 mm)に増して厚底とした形状(以下, TBF)であり, 円形や三角形と比較して底盤部の掘削断面積を減少させ, 施工の省力化や工期短縮を図ることを想定している. #6 は TBF の外側を三角形とすることでさらに掘削断面積の削減を図る形状(以下, Trapezium)である.

3. 実験結果

写真-2 にひび割れの発生傾向を示す. それぞれ崩壊直前の段階を示しており, ひび割れ箇所に記載の数字は発生した時点の与変位量を表す. いずれの形状においても载荷の初期段階(与変位量 1~3 mm)においてインバート中央部にひび割れが発生し, その後隅角部外側にひび割れが生じており, インバート形状間の顕著な差はみられない. 全て開口ひび割れであり, 曲げモーメントの発生により生じた引張り側のものと推測される. 次に, 図-3 に鉛直内空変位量の比較を示す. 各ケース, 崩壊に至る直前までの変形過程を示している. 载荷に伴いインバート部が隆起し, 全ての形状において鉛直方向に縮小する変形モードとなった. インバート形状間において顕著な差が生じているが, これは主にインバート隆起量の差に起因するものである. 同一の与変位量に対するインバート隆起量を比較すると, $3R < 3Rtriangle < 2Rtriangle < TBF < Trapezium < Flat$ の関係が概ね成立する. 三角形の 2 ケース(#2, #3)は従来の円形(#1)と比較して载荷初期の変形に大きな差は生じていない一方, 隅角部にひび割れが発生した与変位量 5~6 mm(写真-2)の時点から崩壊に至るまでの間隔が短くなっており, 変状発生の影響を受けやすいことが示唆される. また, Flat, TBF, Trapezium は载荷の早い段階で変位が増大しており, 下方からの外力による曲げの影響を大きく受けていると考えられる. 続いて, 図-4 にケース間における崩壊時与変位量の比較を示す. 本実験ではその値が大きいほど, インバートが有する補強効果が大きいものとみなし, 各ケースにおける結果のばらつきを考慮して比較を行った. 基準ケースである 3R(#1)の平均値を 100%とし, 各ケースの割合を示している. 三角形のケース(#2, #3)については構造半径比の変化による影響は小さくなっている. これは三角形が円形と比較して, ひび割れ等の変状によって剛性が低下しやすいことを示唆していると考えられる. 一方, Flat(#4)については従来構造の 27%程度であるが, 三角形(#2, #3)は 70%程度, また, 平面部を厚くした TBF(#5)では 59%, Trapezium(#6)では 45%程度まで向上しており, 一定の補強効果を期待できる可能性を示している. したがって, 三角形や厚底平面等のインバート形状は, 従来の円形と比較して変形抑制や補強効果の面でやや劣ることは否定できないが, 適切に適用対象を定めることを前提として, 施工の省力化が見込める等を総合的に考慮すると, 合理的なインバート構造として検討の余地があると考えられる.

4. まとめ

本報では, 盤ぶくれ現象を模擬する模型実験を通して, 本研究で提案する新たなインバート形状の成立性を検証し, 合理的なインバート構造として検討の余地があることを示した. 今後は, 解析的な検討も含め, 適用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, 打継ぎ目を設けたケースや複数の外力作用下における検証等, 実構造への適用を目指す場合の検討が課題となる.

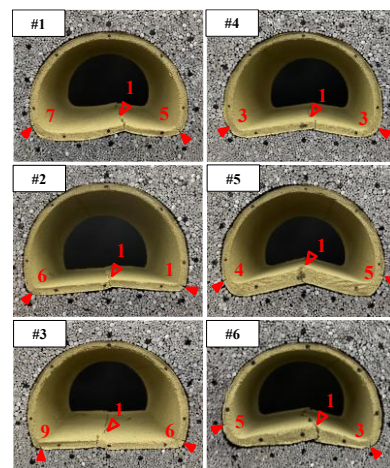


写真-2 ひび割れの進展

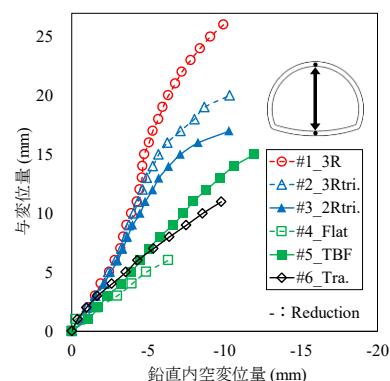


図-3 鉛直内空変位量の比較

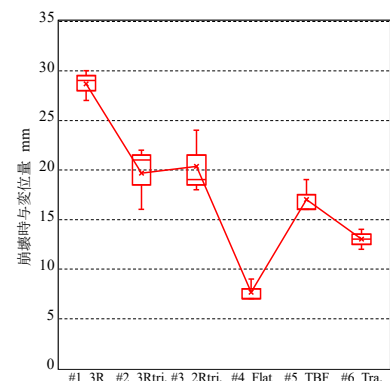


図-4 崩壊時与変位量の比較