

実規模のトンネル挙動に及ぼすインバート形状の影響に関する解析的考察

東京都立大学 ○棗 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 田邊 修平

1. はじめに

供用中の山岳トンネルにおいて盤ぶくれが顕在化し対策を求められる事例が増加しつつある。考えられる補強対策の1つとしてインバートを新設あるいは再設置する方法があるが、通行規制の実施や限られた空間での作業が求められる、施工性・経済性の面で劣る場合があることが課題として認識されてきている。こうした背景を踏まえ、筆者らはインバートの形状に着目し、従来型とは異なる新たなインバート形状を仮定した上で、一定程度の耐荷力を保持しつつ施工を単純化することが可能となる構造について検討を進めてきた¹⁾。その中で、主に模型実験を中心とした検討により、インバートの形状を三角形や厚底平面とした構造について、施工速度の向上が見込め、施工上の合理性を有する上に、従来の構造と同程度もしくはやや劣る程度の耐荷力を保持して補強効果を期待できる可能性があることがわかり、適用できる地山条件によっては新しい合理的なインバート構造として検討の余地があるとした。一方、生じる断面力や構造全体の挙動の把握など、より大きなスケールの実験や解析等における検討を課題として挙げた。

本稿では、上記の課題に対する検討の一手法として、実規模のトンネルを想定した解析モデルを作成し、異なる地山条件下においてインバートの形状を変化させた場合、トンネル構造の力学的挙動に対して与える影響について考察した。

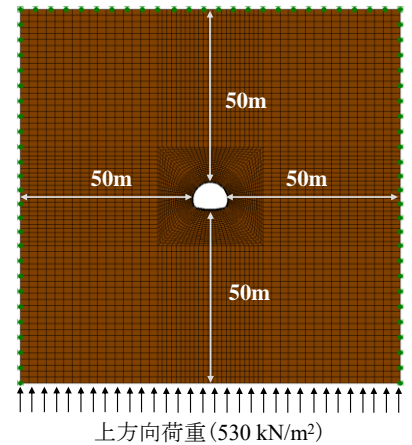
2. 解析手法

2.1 解析モデル

図-1に解析モデルを示す。覆工コンクリート、周辺地盤ともに弾性体と仮定した。上面で鉛直方向を拘束、両側面で水平方向を拘束し、境界面の影響を十分に考慮して、トンネル周面から全方向に50mの解析領域を設けた。盤ぶくれ現象の要因となる荷重を模擬するため、既往研究²⁾に基づき、モデル底面に上方向の荷重を載荷した。荷重の大きさについて、DII地盤でインバートが存在しないモデルに対して荷重を載荷し、約150mmの路面隆起を生じる530kN/m²とした。この路面隆起量については、中野ら³⁾の検討において示された盤ぶくれ対策事例を参考とした。これらの条件下でインバート形状を変化させ、挙動の差異について検討を行った。

2.2 解析ケース

表-1に解析ケース、表-2に物性値を示す。従来型、三角形、厚底平面の3種類のインバート形状に着目し、CII・DIIの地山条件下で比較を行った。内空断面は図-2に示すように実規模のトンネルを想定し、全ケースで直径10m、厚さ300mmとした。



上方向荷重(530 kN/m²)

図-1 解析モデル

表-1 解析ケース

地山条件	CII	DII
インバート形状		
従来型	#1	#4
三角形	#2	#5
厚底平面	#3	#6

表-2 解析物性値

	CII地山	DII地山	覆工コンクリート
弾性係数 (N/mm ²)	1000	150	22000
ポアソン比	0.30	0.35	0.20
単位体積重量 (10 ⁻⁵ N/mm ³)	2.3	2.1	2.3
引張強度 (N/mm ²)	0.20	0.040	1.8

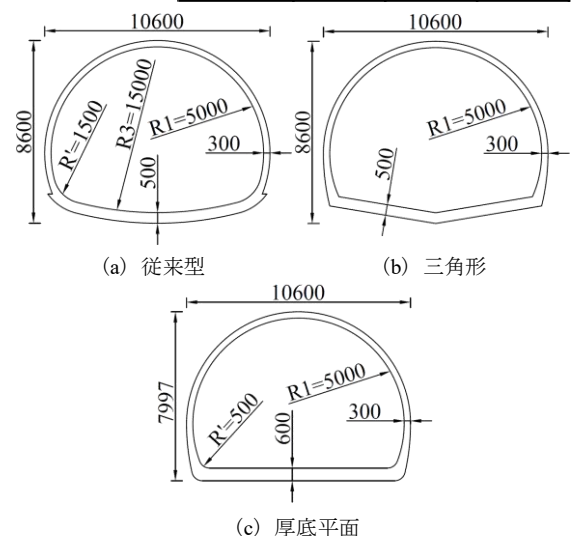


図-2 断面諸元

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)

また、盤ぶくれ現象に対する補強対策であることを想定し、従来型においてはインバート厚さを 500 mm、擦り付け部の半径は 1.5 m とした。三角形について、従来型の覆工端部とインバート中央部を直線で結んだ形状とし、厚さを 500 mm とした。厚底平面について、平面部の厚さを覆工の 2 倍である 600 mm とし、擦り付け部の半径は従来型よりも小さい 0.5 m とした。

3. 解析結果

解析結果の一例として、図-3 に最大主応力コンター図を示す。盤ぶくれを生じさせる荷重を模擬した下方からの突き上げによって生じる応力の傾向が、インバートの形状や地山の性状によって変化していることがわかる。

インバートの形状で比較すると、以下のことがわかる。

- i. 三角形は、従来型と比較して隅角部の外側に引張応力の集中が生じている。
- ii. 厚底平面は、三角形と比較して隅角部外側の応力集中は軽減される一方、平面部の内空側において引張応力の集中域が拡大しており、下方からの突き上げによる曲げの影響を強く受けていると考えられる。

次に、地山条件で比較すると、以下のことがわかる。

- iii. CII のケースでは、インバート形状の違いによる差は比較的小さく、地山条件によっては三角形と厚底平面は閉合構造としての実現性を期待できる可能性があると考えられる。これは既往の検討¹⁾と整合性が取れている。
- iv. DII のケースでは、インバート形状による応力分布の差異が顕著に現れている。発生する応力の大きさから、いずれもインバートの内空側が最も破壊されやすいと推測されるが、三角形については隅角部の外側に同程度の応力が生じており、構造上の弱部となる可能性がある。また、厚底平面については、平面部の内空側に大きな引張応力が広く分布しており、曲げに強い構造とするための補強が必要となると考えられる。

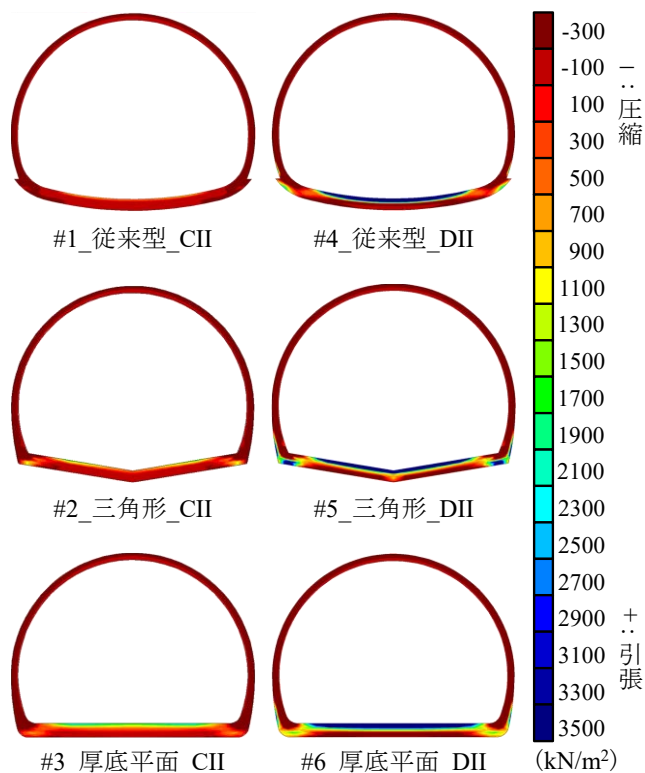


図-3 最大主応力コンター図

4. 結論および今後の課題

実規模のトンネルを想定したモデルを作成し、盤ぶくれを生じさせる荷重を模擬する载荷条件下においてインバート形状を変化させた数値解析を実施した結果、覆工やインバートの応力の発生傾向がインバート形状や地山の性状により変化することがわかった。地山が比較的良好な場合、三角形や厚底平面といったインバート形状は、閉合構造としての実現性を期待できると考えられる。一方、従来型と比較して構造上の弱部を生じる可能性があり、実施工に適用する際にはそれらを補完することが求められると推測され、その手法とともに今後の検討課題である。また、弾塑性解析等の異なるモデルを用いた場合の検討や、载荷方法や規模を変更した実験の実施等を通して、インバート形状の違いによる盤ぶくれ抑制効果の差異について定量的に評価していく必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 棗拓史, 石井祥旭, 砂金伸治, 三上尚人, 田邊修平: 山岳トンネルにおける補強対策の合理化に関する考察, トンネル工学報告集, 第 31 巻, I-19, 2021.11.
- 2) Isago N, Kawata K, Kusaka A and Ishimura T, Long-term deformation of mountain tunnel lining and ground under swelling rock condition, Geomechanics and Tunnelling, Vol 8, Issue 5, pp380-386, 2015.
- 3) 中野清人, 安積淳一, 宮沢一雄, 渡邊浩之, 土門剛, 西村和夫: 盤ぶくれ現象を考慮した対策インバート構造の合理化に関する研究, 土木学会論文集 F1(トンネル工学), Vol. 75, No. 1, 40-55, 2019.