

インバート形状とトンネル構造耐力の関連性に関する実験的検討

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 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、完成後比較的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いる。本報では、前述の背景も踏まえ、既往のインバート形状や作用荷重の影響を考慮した模型実験を行い、盤ぶくれや地震等による外力が作用した際のトンネルの挙動を再現し、構造耐力の比較を行った結果について報告する。

2. 研究方法

写真-1 に本研究で使用した実験装置および模型等の設置イメージを示す。実験装置は、載荷用エアシリンダーを使用し、荷重を与えることで地山モデルを変形させ、地山モデルおよびトンネル模型の挙動を観察する。実験で使用したトンネル模型は、塗り壁材:豊浦砂:水=1:8:4 で混合し作製した。トンネル模型の形状は通常の技術基準類等に示されている従来型に加え、インバートの半径比率を変化させて三角形にしたもの、さらにインバート部分を厚肉化し平面としたもの（以下厚底平面形）を考えた。なお、アーチ部の半径は40mm、厚さは5mmである。また、インバート部の半径はアーチ部との比が1:2または1:3、厚さは5mm（厚底平面形は10mm）である。模擬地山は、粒径 ϕ 2.5mm と ϕ 5mm のステンレス棒を使用し、混合重量比が ϕ 2.5mm: ϕ 5mm=3:2 となるように、400×400mm の実験装置に充填し、中にトンネル模型を横に倒して設置した。

表-1 に実験ケースを示す。実験では、トンネル模型を下辺から2D（Dはトンネル径で160mm）の位置に設置した。ケース1~4では、盤ぶくれを想定し、トンネル模型の下方向から中央3本、また、ケース5、6では地震時荷重等の外力を想定し、トンネル模型の右方向から7本のシリンダーで等分布荷重を与えた。載荷は、50kPa/20sec で行い、950kPa まで載荷またはトンネル模型が崩壊した時点で実験を終了した。ひび割れの観察は、載荷中にトンネル模型内側から都度目視により行った。さらに、地山モデルには4cm 間隔（トンネル模型周り4D 四方は2cm 間隔）、トンネル模型には45° 間隔で標点を設置し、画像解析により変位を計測した。図-1 にトンネル模型に標点を設置した角度の定義を示す。

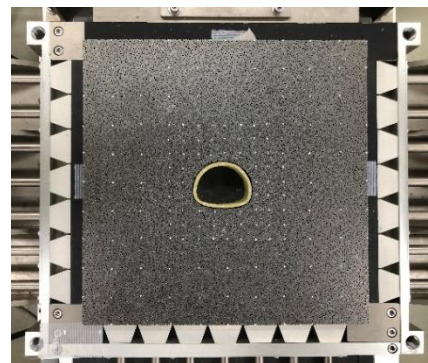


写真-1 実験装置および模型設置位置

表-1 実験ケース

ケース	形状	載荷方向
1	従来型	下方向
2	1:2三角	
3	1:3三角	
4	厚底平面	
5	従来型	横方向
6	1:2三角	

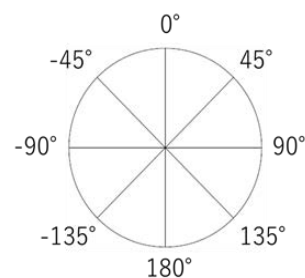


図-1 角度の定義

キーワード 山岳トンネル, インバート, 盤ぶくれ, せん断力, 模型実験
連絡先 〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1 TEL042-677-1111

3. 研究結果

図-2(a)および(b)にインバート隆起量を示す。図-2(a)はケース1~4、図-2(b)はケース5,6の結果である。図-2(a)において、载荷の初期段階において、変位がほとんど変化しない区間がある。これは地山に微小な空隙等が存在し、载荷によってそれが移動することなどが生じることで荷重がトンネル模型に伝わらず、変位が生じないためと考えられる。図-2(a)より、厚底平面形は、従来型とインバート隆起量および挙動に同様の傾向がみられた。また、1:3 三角形は、インバート隆起量が最も大きいことがわかる。さらに、1:2 三角形は、隆起量はわずかに大きいものの、挙動は類似の傾向を示す。载荷の方向を変化させた図-2(b)からも従来型と1:2 三角形の挙動は同様の傾向がみられ、インバート隆起量の差は微小であった。なお、天端およびインバートの変位と鉛直方向内空変位を比較すると、トンネル天端も隆起方向へ変形したが、その量はインバート隆起量と比較して小さいものであった。

表-2 にひび割れの発生時の荷重および主な発生場所を示す。以下、ひび割れを発生順に「第1, 第2, 第3 ひび割れ」と称する。下方向から载荷するケースにおいて、従来型(ケース1)と1:2 三角形(ケース2)は、第1 ひび割れから第2 ひび割れの発生までの荷重差が大きい傾向がみられ、ひび割れが発生してから構造耐力に至るまでの余裕は大きいと考えられる。実験の状況から三角形の頂点部分が突っ張る状態になることで、下方向からの荷重に対して強い構造となり、結果としてひび割れ発生時荷重の間隔に同様の傾向が表れたと考えられる。また、1:3 三角形(ケース3)は、実験ケースの中で唯一崩壊まで至った形状であり、第1 ひび割れ発生時の荷重は大きい。以降のひび割れ発生時の荷重差は小さい傾向がみられ、ひび割れが生じてから構造耐力に達するまでの余裕が小さくなっていると考えられる。なお、形状が三角形のケース(ケース2, 3)は、隅角部にひび割れが発生したが、隅角部の角度が鋭角であるためひび割れが発生しやすくなった可能性がある。厚底平面形(ケース4)は、崩壊した1:3 三角形と同様に、ひび割れ発生時荷重の差は小さいことがわかる。インバート中央部に生じたひび割れは、インバート厚の半分程度まで進展し、本実験の条件下では貫通までには至っていなかった。

また、横方向から载荷するケースにおいて、従来型(ケース5)および1:2 三角形(ケース6)は、ひび割れ発生時のタイミングおよび発生箇所と同様の傾向がみられた。

以上より、厚底平面形は、従来型とインバート隆起量が同等であるが、盤ぶくれに対し急激な崩壊をする可能性があることから引張への抵抗を検討する必要がある。1:3 三角形は、盤ぶくれに対しインバート構造としての耐荷力が低くなる可能性があることがわかった。また、1:2 三角形は、従来型と比較し、盤ぶくれに対しては同様の挙動をとり、地震時荷重等の外力に対してはインバート隆起量および挙動に同様の傾向がみられることがわかった。

4. おわりに

本研究での载荷条件においては従来と異なる形状を有するインバートにおいても従来と同等程度の耐荷力が得られる構造であり、形状によっては合理的な構造を提案できる可能性があることを示した。今後の課題としては、载荷条件や地山条件、構造部分の剛性差による影響を考慮した検討を行うとともに、解析的な検討を行い、インバート形状とトンネル構造耐力の関連性、さらには合理的な施工方法に関して検討を行う必要がある。

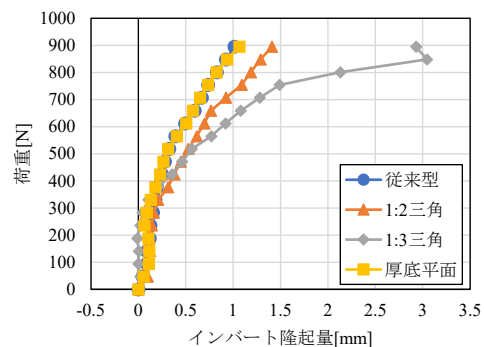


図-2(a) インバート隆起量(ケース1~4)

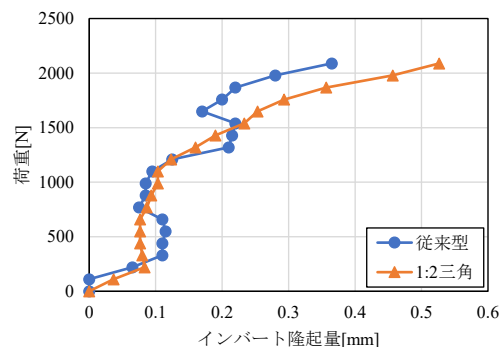


図-2(b) インバート隆起量(ケース5,6)

表-2 ひび割れ発生時荷重および発生場所

ケース	ひび割れ発生時荷重[kPa]			主な発生場所
	第1	第2	第3	
1	350	800	850	インバート中央部
	-165°内側	180°内側	165°内側	
2	450	800	850	インバート中央部, 隅角部
	180°内側	-150°内側	135°内側	
3	600	750	850	インバート中央部, 隅角部, 覆工
	-165°内側	165°内側	180°内側	
4	350	550	—	インバート中央部, 隅角部
	-165°内側	180°内側	—	
5	650	900	—	インバート中央部, 隅角部
	180°内側	105°内側	—	
6	700	800	900	インバート中央部, 隅角部
	165°内側	150°内側	-150°内側	