

山岳トンネルにおける合理的なインバート補強法に関する実験的考察

東京都立大学 ○石井 祥旭 棗 拓史 砂金 伸治
東日本高速道路(株) 三上 尚人 田邊 修平

1. 研究背景・目的

既設トンネルにおいて生じる盤ぶくれに対する対策工の1つとしてインバートを新設または再設置する方法がある。その施工に際してはトンネル内の通行規制を行う必要がある場合が多く、渋滞や交通事故のリスクが増加する。そのため、トンネル構造として合理的な耐荷力を確保しながら、施工における工期を短縮することが求められており、これらを踏まえた合理的なインバート構造の設計手法の確立が求められている。

本研究では、一定の耐荷力を有する新たなインバート構造の成立性について検討することを目的とし、様々な形状のトンネル覆工模型に対して载荷実験を行った。また、2次元 FEM 解析を用いて模型実験の再現解析を行うことで、実験の妥当性を評価するとともに、トンネル覆工模型に発生する応力の比較を行った。さらに、膨張性地山の挙動を模擬した解析を行い、新たなインバート構造の耐荷力の評価を行った。

2. トンネル形状による耐荷力に関する模型実験

2.1 実験概要

図-1 に実験装置の概要を示す。本実験はせん断変形を与えることで覆工模型に荷重を付与することを模擬し、それが覆工模型の挙動に与える影響を検討するものである。模擬地山の諸元を表-1 に、覆工模型の物性値を表-2 に示す。実験ケースは表-3 に示す。ケース 1~2 は既存の馬蹄形のインバートを念頭に置いた実験であり、ケース 3~6 はその形状を変更したもので、ケース 3~4 は、本来円形に結ばれているインバートを直線で結び、逆三角形の形状としたもの、ケース 5~6 はインバート部分を掘り下げずにそのまま平面に接続したケース、また、平面部分の厚さを増したケースである。また、実験では補強板として木材またはスチレンボードを採用(表中では長さを考慮し木、長木、また、スチと表記)し、ケース 7~15 は、平面インバート形状のトンネル底盤部に補強板を設置したケース、ケース 7~9 は覆工模型のインバート部分を切断して補強板を設置したケース、ケース 10~12 はインバートに直接設置したケース、ケース 13~15 は隔離をとった位置に設置したケースとした。

2.2 実験結果

実験結果を表-3 に示す。なお、比較は上述の装置の与変位置で比較し、変位置が大きいほど耐荷力を有すると考えた。その結果、形状を変更したケースは 1:2 馬蹄と厚底平面が高い耐荷力を示した。また、三角形の場合は馬蹄形ほど半径比による影響が小さくないと考えられ、1:3 馬蹄と同程度の耐荷力を示した。また、補強板を設置したケースは作用荷重の影響も考えられるが、全て覆工左側から破壊した。底盤に木材を直接設置したケースは高い耐荷力を示し、厚底の平面と同様に右肩部から破壊した。隔離をとったケースや柔らかい材料の補強板を設置する場合、補強効果が低く、想定した効果が得られない可能性がある。

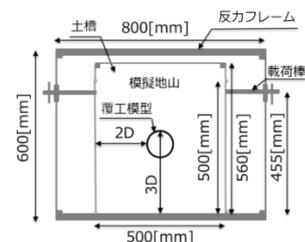


図-1 模型実験装置概要

表-1 模擬地山の諸元

材質	アルミ合金
長さ(mm)	100
直径(mm)	1.6:3.0
重量比	3:2
単位体積重量(kN/m ³)	21.4
粘着力(N/mm ²)	0
内部摩擦角(°)	30

表-2 覆工模型の物性

圧縮強度(MPa)	0.4
引張強度(MPa)	0.06
弾性係数(MPa)	41

表-3 実験ケース・結果

ケース	形状	破壊(mm)	破壊位置
1	1:2馬蹄	51	インバート
2	1:3馬蹄	37	インバート
3	1:2三角	32	インバート
4	1:3三角	41	インバート
5	平面	30	インバート
6	厚底平面	48	右肩
7	無-木	45	左側面
8	無-長木	36	左側面
9	無-スチ	46	左側面
10	直-木	56	右肩
11	直-長木	42	左側面
12	直-スチ	38	インバート
13	離-木	41	インバート
14	離-長木	22	インバート
15	離-スチ	30	インバート

表-4 解析物性値

	アルミ棒	覆工模型	木板
弾性係数(N/mm ²)	5	41	4320
内部摩擦角	30°	-	-
粘着力(N/mm ²)	0	-	-
単位体積重量(N/mm ³)	2.15×10 ⁻⁵	1.05×10 ⁻⁵	1.05×10 ⁻⁵
ポアソン比	0.2	0.3	0.3

キーワード 山岳トンネル, インバート, 模型実験, 数値解析, 盤ぶくれ

連絡先 〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1 Tel 042-677-1111 (代表)

3. 有限要素法による模型実験の再現解析

3.1 解析概要

解析では二次元有限要素法を用いた。解析で入力した物性値を表-4に、解析モデルを図-2に示す。載荷方法については、実験同様、地山の右方向から三角形分布の強制変位を最大30mm与えた。また、解析ケースとしては模型実験におけるケース1~6, 10および13について解析を行った。なお、表-4のアルミ棒に関する入力物性値については、数ケースにおいて覆工模型の変位の結果を実験結果と照合することで設定した。

3.2 解析結果

解析結果の一例として、各形状の最大主応力のコンター図を図-3に示す。図中の数値は応力の最大値とそれを示した位置を記している。馬蹄形のケースでは半径比を大きくすることで発生する応力の最大値が大きくなるが、三角形のインバートどうしで比較すると応力の最大値やその分布において大きな差異は生じない。平面インバートではインバート部分や右下の隅角部に広く応力が集中するものの、底盤を厚くすることで応力の集中が解消されることが分かる。また、補強板を直に設置したケースは、他のケースで生じているインバート部の応力が発生せず、側壁部に応力が分散する形であった。離隔をとった位置に補強板を設置するケースでは、覆工自体に作用する応力は平面インバートと類似しているが、最大値に関しては小さくなっている。

4. 膨張性地山を考慮したトンネル解析

4.1 解析概要

盤ぶくれによりインバートが変状するケースが多いことから、本解析では上記で用いた各形状のトンネル覆工模型に対し地山の底盤部に上方向に強制変位を最大10mm与える解析により耐荷力の比較を行った。解析モデルや入力物性値は再現解析と同様である。

4.2 解析結果

解析結果の一例として、各形状の最大主応力のコンター図を図-4に示す。馬蹄形や三角形のケースは、半径比を小さくすることで応力の分布範囲が縮小する傾向が見られる。また、三角形インバートにおいて、半径比を大きくしていくと頂点部分において応力が生じるようになっていく。平面のケースは、インバート上部や左右の隅角部の外側に応力分布が見られたが、底盤を厚くすることで隅角部に発生していた応力が減少した一方、インバート部に発生する応力の大きさは増加した。補強板を直接設置したケースでは、応力分布が拡大しインバート全体に応力が発生するようになったが、発生する応力の大きさについては減少している。離隔をとった位置に補強板を設置したケースでは、発生する応力の大きさが増加していることから耐荷力は低下していると考えられる。なお、3.2の結果と比較した場合、挙動に関する差異が見られるため、荷重の影響を考慮した検討が必要である。

5. まとめ

新たなインバート構造を念頭に置いた検討を通じて、インバート形状の違いや補強板の材料や設置位置によって、トンネル構造の耐荷力に与える差異が生じることを確認した。特に半径比の小さい馬蹄形や厚底平面、インバート直下に硬い材料の補強板を設置するケースではトンネル構造の耐荷力が向上する傾向にあるが、補強板の設置条件によって、トンネル構造の耐荷力が低下する可能性もある。今後の課題として、作用荷重の影響を考慮した模型実験の実施、より大きなスケールの実験等による耐荷力の比較を行うことが挙げられる。

参考文献

1) 森田, 砂金, 西村: トンネル覆工の大変形破壊挙動に関する実験的考察, 土木学会トンネル工学報告集第30巻, I-40, 2020年11月

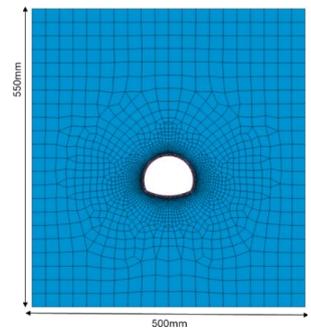


図-2 解析モデル

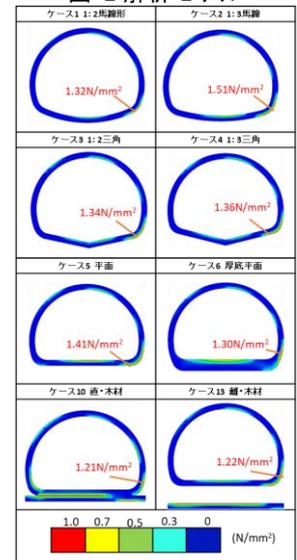


図-3 再現解析結果

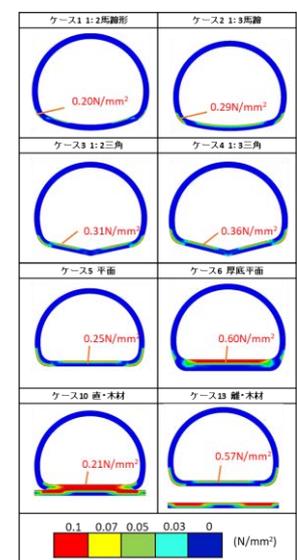


図-4 解析結果
(膨張性地山)