

外力作用下のトンネルの力学的特性に及ぼす打継ぎ目の影響に関する基礎的検討

東京都立大学 ○大川 玲央 中里 倫子 梶 拓史 河田 皓介 砂金 伸治

1. はじめに

一般的な山岳トンネルでは覆工とインバートの形状の違いや、施工の都合上、隅角部周辺に打継ぎ目を有することが多く、その部分が構造的な境界になると考えられる。例えばトンネルに外力が作用した場合などは覆工に生じる応力がスムーズに伝達されることが望ましいことなどから、打継ぎ目が弱部とならないように壁面に対して極力直交に仕上げるのが一般的であると考えられる(写真 1)。また、インバートによる拘束が要因となって覆工にひび割れが発生したり、外力作用時には打継ぎ目に開口等が生じたりする可能性もある。



写真 1 打継ぎ目の構造

しかし、これまで山岳トンネルにおいて、打継ぎ目に対する設計時のモデル化の考え方や、施工方法は経験的に扱われており、その特性に関する議論は限定的であったと考えられる。近年、膨張性地山の変状対策として既設トンネルに後打ちでインバートが施工されることや、施工の省力化等を目指した新技術が検討される場合等がある。今後、覆工が有する性能の明確化や新しい概念のトンネル構造の導入を検討するにあたって、打継ぎ目の力学的特性を把握し、それがトンネル構造全体の挙動に及ぼす影響を考慮し、構造全体としての安全性や合理性を確保する必要がある。

本研究では、外力作用時の覆工とインバートの打継ぎ目の力学的特性を評価し、施工時、維持管理時の留意点や対策を提示することを目的として、室内模型実験を行った。その結果について報告する。

2. 研究方法

写真 2 に本研究で使用した実験装置および模型の概要を示す。実験装置は 400mm 四方の土槽と 3 方にエアシリンダーを設置した載荷装置である。実験は、載荷用エアシリンダーで荷重を与えることで地山模型を介してトンネル模型を変形させ、ひび割れと変位を観察した。地山模型は、直径 2.5mm と 5mm のステンレス棒を 3:2 で混合した。トンネル模型は、塗り壁材:豊浦砂:水を 1:8:4 で混合したものを使用した。実験ケースは打継ぎ目が①なし、②隅角部(従来)、③インバート中央、④隅角部(水平)、⑤インバート中央+隅角部、⑥天端部、⑦肩部の 7 ケースとし、土槽中央に設置したトンネル模型に対して盤ぶくれを模擬した下方載荷(下方から上方)、及び地震時荷重等を模擬した横一方向載荷(右から左)を行った。なお、打継ぎ目の表面処理や他材料による接着等を行わず、打継ぎ目が十分に接するように設置した。

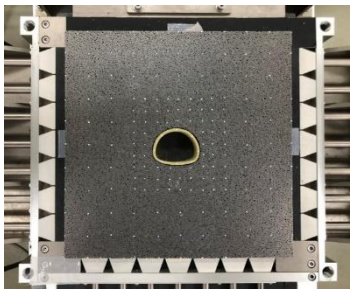


写真 2 実験概要図

3. 研究結果

3.1 下方載荷

下方載荷した際の主なひび割れ発生位置を表 1 に、鉛直内空変位を図 1 に示す。全体として主なひび割れの発生位置は、インバート中央部や隅角部であり、同箇所が構造上の弱部となっていることを確

表 1 ひび割れ状況(下方載荷)

ケース	主なひび割れ発生位置
① 打継ぎ目なし	インバート中央
② 隅角部(従来)	インバート中央
③ インバート中央	隅角部(外)
④ 隅角部(水平)	インバート中央
⑤ 中央+隅角部	インバート
⑥ 天端部	インバート中央
⑦ 肩部	インバート中央、隅角部(外)

(外): 覆工外側のひび割れ

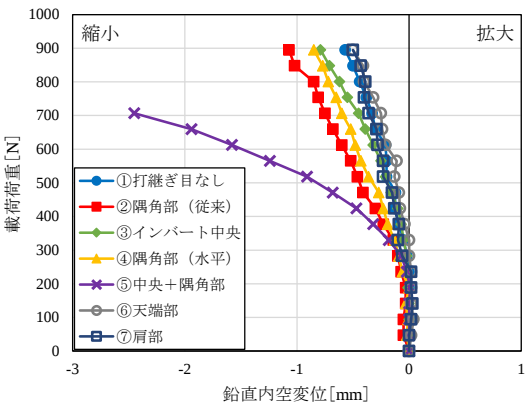


図 1 鉛直内空変位(下方載荷)

キーワード 山岳トンネル, 打継ぎ目, インバート, 盤ぶくれ, セン断力, 模型実験
連絡先 〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1 TEL: 042-677-1111

認した。鉛直内空変位は、すべてのケースでトンネル模型は鉛直方向に縮小した。このとき、天端とインバートは共に隆起したが、天端の上方への変位に比べてインバートの隆起量が大きかった。また、⑥天端部や⑦肩部のようなアーチ部に打継ぎ目を設けたケースの変位量は他のケースと比べて小さく、打継ぎ目の影響は小さいが、インバートや隅角部に打継ぎ目を設けた②～⑤のケースでは①、⑥、⑦のケースに比べて鉛直変位が大きく、打継ぎ目の存在による影響を受けることが考えられた。特に、⑤中央+隅角部は、下方からの外力に対して曲げが発生しやすいインバート中央部と隅角部に打継ぎ目があることで、インバート中央部が過剰に隆起して脆性的な破壊に至る可能性がある。また、④隅角部(水平)では、下方からの荷重に対しては従来の構造と同じような挙動を示すことがわかった。

3. 2 横一方向載荷

横一方向載荷した際の主なひび割れ発生位置を表 2 に、鉛直内空変位を図 2 に示す。④隅角部(水平)は、②隅角部(従来)とは異なり、隅角部でもひび割れが確認された。また、⑦肩部は、載荷方向と反対側の肩部の打継ぎ目周辺の内側で圧が生じた。横一方向

表 2 ひび割れ状況(横一方向載荷)

	ケース	主なひび割れ発生位置
①	打継ぎ目なし	インバート中央, 隅角部
②	隅角部(従来)	インバート中央, 側壁
③	インバート中央	SL, 肩部
④	隅角部(水平)	インバート中央, 隅角部
⑤	中央+隅角部	インバート
⑥	天端部	インバート, 隅角部(外)
⑦	肩部	肩部(圧), インバート中央

(外)：覆工外側のひび割れ, (圧)：圧ざ

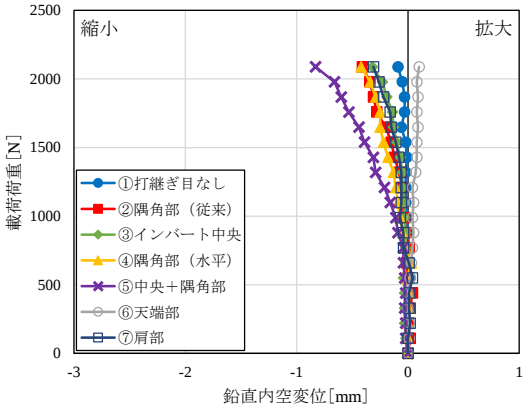


図 2 鉛直内空変位(横一方向載荷)

載荷においても鉛直変位は縮小傾向を示す。このとき、天端付近はほぼ変位せずインバートは隆起するが、下方載荷に比べて鉛直内空変位は小さい状況であった。また、水平内空変位はほとんど変位しないが、これはアーチ、側壁部の曲率がインバート部よりも小さく変形しにくいためと考えられる。⑥天端部は、打継ぎ目が動きやすいことで天端部がやや隆起し、鉛直方向に僅かに拡大したと考えられる。また、隅角部に打継ぎ目を設けた②、④、⑤のケースはいずれもやや鉛直変位が大きくなった。特に、⑤中央+隅角部では、下方載荷と同様にインバート中央部の隆起による鉛直方向の縮小が顕著に見られた。

4. 考察

インバートを左右で分割施工する場合はインバート中央部に打継ぎ目を設けることになることが多いと考えられ、盤ぶくれや地震時荷重等の外力によってインバート中央部が過剰に隆起しやすく、脆性破壊を引き起こす可能性もあるため、打継ぎ目の付着力やせん断抵抗を向上させる等の対策の検討が必要となることが考えられる。また、隅角部の打継ぎ目を水平に設定する場合には、側方からの荷重に対して、従来の構造とは異なる位置でひび割れが生じたり、打継ぎ目周辺での挙動が異なったりすることが想定されるため、上述の点に加え、維持管理においても配慮すべき事項の検討が必要になることが考えられる。さらに、肩部付近で打継ぎ目を設けたトンネルでは、地震時荷重等の外力が作用した際に、打継ぎ目の内側周辺で圧が生ずる可能性も考えられるため、打継ぎ目周辺の状況や変状が発生している場合には特に注意して点検を行い、何らかの対策を講じることを検討する必要も考えられる。

5. おわりに

小規模な供試体を用いた室内模型実験により、打継ぎ目の位置や角度を変えたトンネルに盤ぶくれに伴う隆起や地震時荷重等の外力が作用した際のひび割れ挙動や変形などのトンネル構造の挙動を確認した。その結果、打継ぎ目の位置や角度が変状の発生状況やトンネルの変形に影響を及ぼすことがわかった。このことは、場合によっては打継ぎ目がトンネルの構造に不利に働く可能性も考えられ、設計時や施工時等に何らかの配慮が必要となることを示唆していると考えられる。

今回は限られた載荷条件や地山条件、また打継ぎ目の状況の再現であったため、今後はそれらの影響を検討するとともに、実スケールでの実験や数値解析による詳細な挙動と覆工やインバートに発生する応力について模型実験や数値解析を通じて検討を行う必要がある。