

三次元模型実験による覆工の外力性変状の進行過程に関する一考察

(国研) 土木研究所	正会員	○佐々木 亨
〃	正会員	菊地 浩貴
〃	正会員	日下 敦
〃	正会員	田村 賢人
〃	正会員	廣田 彰久

1. はじめに

供用後の山岳トンネルにおいて、外力を受けた際の最終的な変状パターンや破壊形態については既往の研究¹⁾で明らかとなりつつあるが、供用開始後に覆工が外力を受けて最終的な破壊に至るまでの変状の進行過程については十分に整理されていない場合があり、仮に点検で兆候段階の変状を早期に発見したとしても、外力性変状かどうか確証を持った判断が難しい場合がある。また、近年覆工の耐荷力等を把握するために実施される実物大の覆工載荷実験では、様々な外力を受けた際の耐荷力や二次元的な変状状態を把握することはできても、実トンネルのような三次元的な現象を検討するには限界がある。そこで本研究では、簡易縮尺模型実験によりゆるみ荷重が作用した場合の覆工の三次元的な変状の進行過程について把握を試みた結果を報告する。

2. 実験の概要

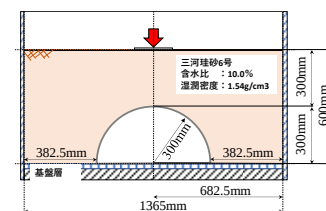
本実験では荷重形態として「ゆるみ荷重」を想定し、覆工の段階的な変形及び変状過程を確認した。実験に用いた模型の概略図を図-1に示す。模型の大きさは実トンネルのおおよそ 6/100 スケールを想定し、トンネル直径 (D) 600mm, 模型の奥行き 1000mm, 土被り 300mm (0.5D) とした。また、トンネルから側壁までの距離はおおよそ 0.5D 確保した。周辺地山は三河珪砂 6 号を含水比 10%, 湿潤密度 1.54g/cm^3 となるように締め固めて作製し、覆工模型は模型の縮尺に合わせ実際の覆工の有する一軸圧縮強度 18N/mm^2 の 6/100 程度となるように石こうを用いて覆工厚さ 20mm となるように作製した。なお、覆工模型は実大スケールで 1 スパンあたり 10m を想定し、200mm, 600mm, 200mm の三分割で作製した。また、覆工目地は実トンネル同様に縁切りした状態で設置した。

覆工に作用させる外力は地盤模型の地表面に載荷板 (200×200mm) を設置し、油圧ジャッキを用いて地表面に段階的に強制変位を与えることで模擬し、図

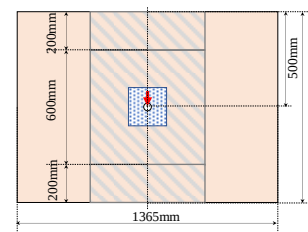
-1 に示す模型中央において 1 ステップあたりの強制変位量が 5mm 程度となるように載荷を行った。本実験では地表面に強制変位を与えることで外力を模擬しているため、地表面位置においてロードセルによる荷重値の計測と変位計による強制変位量の計測を行った。また、覆工模型の変形モードを把握するために覆工内部に変位計と覆工の内外面にひずみゲージを設置し、覆工内面についてはウェブカメラを設置して変状の進展状況を逐次確認できるようにした。覆工外面については地盤内であり実験途中の経過は確認できないため、実験終了後に模型を掘り出して確認した。

3. 実験結果

図-2 に模型に与えた強制変位量と作用した荷重値の関係を、図-3 に強制変位量と内空変位量の関係を示す。ただし、計測機や計測方法の不具合により、荷重値は全体的に想定された値よりも小さい結果となった。図-2 より、与えた強制変位



a) 正面図



b) 断面図

図-1 実験模型概略図

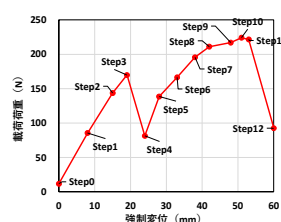


図-2 強制変位と荷重関係

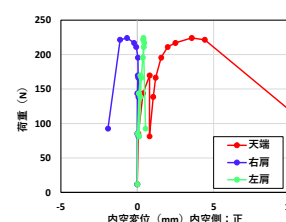


図-3 荷重-変位関係

連絡先 〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6 (国研) 土木研究所道路技術研究グループ TEL 029-879-6791

キーワード 山岳トンネル, 覆工, 外力性変状, 模型実験

量が 20mm 付近までは与えた強制変位に対し直線的に荷重が増加しているが、20mm 以降では変位と荷重の関係が曲線的に増加する傾向となった。なお、変位 24mm の段階で荷重が急激に低下しているのはジャッキを固定していた治具が動いたために正確な値が計測できていないためである。また、図-3 より、天端では荷重値が 150N（強制変位 20mm～25mm）付近で変位が急激に増加し、肩部では荷重値 200N（強制変位 40mm）付近までほとんど変位が発生しなかったが、荷重値 200N を超えた時点から変位が急激に増加する傾向が見られる。これは載荷位置直下の天端が先に破壊し、徐々に肩部まで破壊が進行したためと考えられる。

実験の載荷ステップと与えた強制変位量と変状の発生状況を表-1 に示す。変状の進展状況からも、強制変位が 40mm 付近までは覆工内面に発生した変状は天端の縦断方向ひび割れのみであり、強制変位が 40mm を超えてから急激に変状が進行している状況が確認できる。

図-2、3 及び表-1 に示す結果から想定されるゆるみ荷重作用時の覆工内面の変状の進行過程を表-2 に示す。本実験において、ゆるみ荷重が作用した際の変状は、①天端に縦断方向の引張ひび割れが発生、②天端から肩部にかけて圧縮ひび割れ及びうき・はく離が放射状に発生、③肩部に縦断方向の圧縮ひび割れが発生、④ひび割れが進行し、同心円状に閉合した圧縮ひび割れが発生、⑤ひび割れが拡大し天端の抜け落ちが発生、という順番で発生した。ゆるみ荷重作用時に天端縦断方向に引張ひび割れが発生することやゆるみ荷重作用位置周辺で限定的に変状が集中する等の傾向は既知の変状傾向²⁾と一致するが、本実験においてそれらが段階的、複合的に発生する過程を検証できた。また、今回の実験結果から、表-2 の②や③に示すような変状が発生した場合、外力が継続して作用すると変状が急激に進行し⑤のような覆工の抜け落ちが発生する可能性が示唆された。そのため、天端縦断方向の引張ひび割れやそこから放射状に発生するひび割れ、肩部縦断方向の圧縮ひび割れが複合的に発生している箇所ではゆるみ荷重による変状の進行が疑われるため注意が必要と考えられる。

4. まとめ

縮尺模型実験の結果からゆるみ荷重が作用した際の変状の進展傾向を三次元的に把握することができた。また、点検時において天端縦断方向のひび割れは多く確認できる事象であり、その多くは材質劣化が原因であるが、本実験結果から、天端縦断方向のひび割れに加え、放射状ひび割れや肩部の圧縮ひび割れが発生する等の兆候が現れた場合はゆるみ荷重を受けている可能性が高いことが示唆された。

今後は荷重形態を変えた実験や解析による耐荷力の検討を行う予定である。

参考文献

1) 真下英人, 日下敦, 砂金伸治, 木谷努, 海瀬忍: トンネル覆工の破壊メカニズムと補強材の効果に関する実験的検討, 土木学会論文集 F1, Vol. 64, No. 3, pp. 311-326, 2008.
2) 真下英人, 砂金伸治, 石村利明, 坂本昇, 笹田俊之: 道路トンネルの変状に関する研究報告書-判定・診断の考え方と変状事例-, 土木研究所資料, 第 4360 号, pp. 22-47, 2017.

表-1 実験ステップ及び変状状況一覧

載荷step	強制変位量 (mm)	載荷荷重 (N)	天端沈下 (mm)	覆工内面の変状状況 (ウェブカメラによる確認状況)
0	0	11.8	0.00	初期状態
1	8	85.6	0.07	
2	15	143.7	0.37	
3	19	169.9	0.81	
4	24	813.3	0.80	
5	28	138.7	1.04	
6	33	166.5	1.21	天端に縦断方向ひび割れが発生
7	38	195.6	1.57	
8	42	211.1	1.99	右肩部に圧縮ひび割れが発生
9	48	217.1	2.50	天端から放射状にひび割れが発生
10	51	224.2	3.57	左肩部に縦断方向の圧縮ひび割れが発生
11	53	221.6	4.42	同心円状のひび割れ（閉合） ひび割れの拡大
12	(60)	92.7	11.43	覆工の抜け落ちが発生（実験終了）

表-2 変状の進展過程

	載荷step (強制変位量)	変状進展の概要	展開図
①	step6 (33mm)	荷重の作用位置を始点に天端縦断方向のひび割れが発生	
②	step8 (48mm)	天端縦断方向ひび割れから放射状にひび割れが発生	
③	step10 (51mm)	肩部に縦断方向の圧縮ひび割れが発生	
④	step11 (53mm)	肩部の縦断方向ひび割れと放射状ひび割れが進展し、載荷位置を中心とした同心円状の閉合ひび割れが発生	
⑤	step12 (-) 実験終了	スパン中央に横断方向のひび割れが発生し、同時に同心円状のひび割れが拡大して覆工天端の抜け落ちが発生	