

覆工の曲げ引張破壊時の力学的挙動および損傷状態の把握のための実験的検討

国土交通省 国土技術政策総合研究所 正会員 ○近藤 健太, 藤原 茜, 佐藤 正, 西田 秀明

1. はじめに

山岳トンネルの標準支保パターンは実績に基づき経験的に定められているため、トンネルに係る新技術の開発・導入促進などにあたっては、要求性能や限界状態を明確にする必要がある。このため、著者ら¹⁾は覆工の耐荷性能を明らかにするための検討を行っているが、本報ではこの一環として実施した、曲げ引張破壊型となる覆工の破壊時の損傷状態や、耐荷力、変形能を把握するための載荷実験の結果について報告する。

2. 実験概要

実験の状況を写真1、概略を図1に示す。実験は、国立研究開発法人土木研究所が所有する覆工載荷装置を用いて行った。

本装置は、半円形の反力枠に、半径方向に水平載荷できる油圧ジャッキを10度ピッチで17カ所に設置可能である。

供試体は、2車線道路トンネルに相当する内径9.1m、覆工厚30cm、長さ100cmの半円形の無筋コンクリート構造である。コンクリートの配合、物性値をそれぞれ表1、表2に示す。

反力枠に配置した油圧ジャッキのうち、10～40°、140～170°のジャッキを用いて変形係数500MPa（地山等級DI）相当の地盤バネを模擬した。ここで、過去に実施された同様の載荷実験²⁾では油圧の給油バルブを閉じることで地盤バネを模擬していたため、ばね定数は制御不可能で載荷中に変動するものであったが、今回の実験では実挙動に近い地盤反力状態を再現するために、ばね定数が一定となるようにジャッキに生じる反力に対して変位を制御した。この状態で、供試体に90°のジャッキで変位制御（載荷速度1mm/min）により荷重を漸増させた。ジャッキの先端には載荷板（長さ100cm、幅40cm）を設置した。供試体端部（0, 180°）の固定条件はピン支点とし、また、下面の縁切りにはテフロンシートを使用した。なお、実験時のジャッキ制御方法の詳細は表3に示すとおりである。

3. 実験結果

図2に、天端荷重-天端変位関係を示す。載荷に伴い、天端（90°）内側、肩部（65, 115°）外側、側部（40°）内側の順にひび割れが発生し、破壊に至った。ひび割れ発生時の荷重が直前のステップより低いのは、ステップ完了時に計測・観察を実施しており、ひび割れが発生した影響で荷重が低下したためと考えられる。荷重は肩部ひび割れ発生直前で最大となる。天端ひび割れ発生時の荷重は、最大荷重の85%程度で、ひび割れ発生後も荷重の上昇が見られる。最終的に側部ひび割れ発生時に耐荷力が完全に失われた。

写真2は、天端部のひび割れ状況、図3はひび割れ観察図である。天端以外のひび割れ箇所に関しても同様で、ひび割れに分散性は見られず、また、ひび割れ深さは発生時点で覆工厚の50%程度に達した。実験終了時に

キーワード 山岳トンネル, 覆工, 耐荷力
連絡先 〒305-0804 茨城県つくば市旭一番地

国土交通省 国土技術政策総合研究所 道路構造物研究部構造・基礎研究室 TEL 029-864-7189



写真1 載荷装置および供試体全景

表1 コンクリート配合

セメント 種類	呼び強度 [N/mm ²]	スランプ [cm]	粗骨材 最大寸法 [mm]	W/C [%]	s/a [%]	空気量 [%]
普通	21	15	20	61.8	46.7	4.5

表2 コンクリート物性値

材齢 [日]	圧縮強度 [N/mm ²]	弾性係数 [N/mm ²]	ポアソン比	圧縮強度に対応 するひずみ[μ]
14	21.9	16950	0.16	-2281

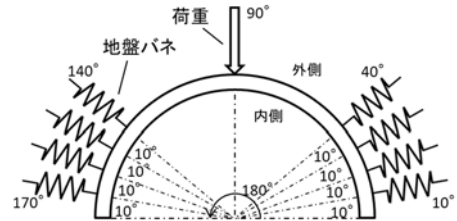


図1 実験概略図

表3 実験時のジャッキ制御方法

ステップ	制御方法等
0	初期値計測
1	90°、10°～40°、140°～170° ジャッキ載荷 (荷重制御: 10kN) ※90, 40, 140, 150, 30, 20, 160, 170, 10° の順に実施 ※90° は10kN載荷後直ちに变位固定制御
2～4	10°～40°、140°～170° ジャッキ載荷 (荷重制御: 12, 14, 16kN) ※8本同時制御、90° ジャッキは固定制御継続
5～8	安定確認のための計測
9	10°～40°、140°～170° ジャッキをバネ制御へ変更 (バネ係数: 400kN/mm)
10～26	90° ジャッキ載荷 (変位制御: 0.2mm/ステップ)
27	除荷(実験終了)

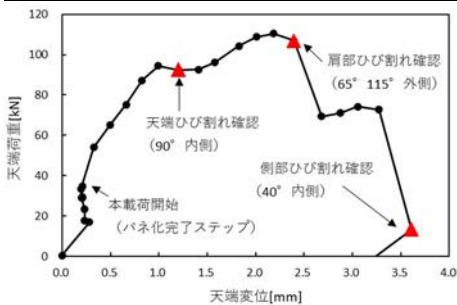
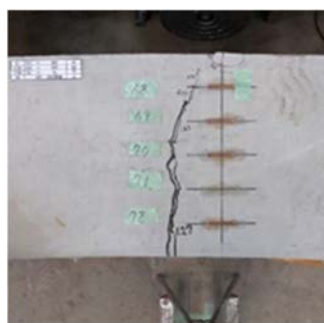


図2 天端荷重—天端変位関係



(a) 供試体内面 (b) 供試体上面
写真2 ひび割れ発生状況（実験終了時撮影）

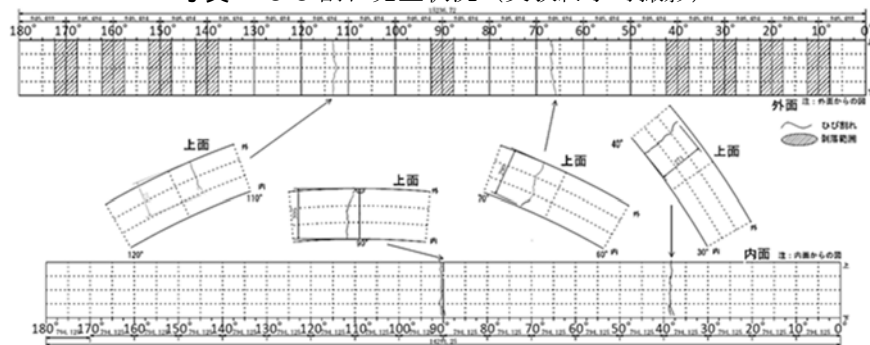


図3 ひび割れ観察図（実験終了時）

天端の上面外側に剥落が確認されたが、ひずみ計測値から圧壊ではなく、載荷板との接触による影響と考えられる。

図4は、ひび割れ発生前後の供試体の半径方向変位である。なお、90°の内側への変位は強制変位の入力値に相当する。天端ひび割れは内側へ1mm程度の変位で生じた。肩部ひび割れ発生から、外側への変位が現れ始めた。側部ひび割れ発生時は50~80°で変位が大きく、ひび割れ発生前後の変位差が天端、側部ひび割れ発生前後に比べて大きい。

図5は、ひび割れ発生時の覆工供試体の周方向のひずみ分布である。表2の物性値から推定されるひび割れ発生ひずみは約100 μ であるが、100 μ を超過してもひび割れが発生していない場合もある。

図6は、天端内面のひずみ進展図である。ひび割れ発生よりも前に引張りひずみが最大となり、圧縮ひずみへと転じる。また、ひび割れに近いほど、ひずみの減少が早く始まる。

図4 変位分布（半径方向）

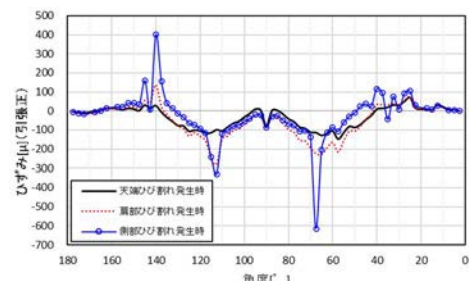
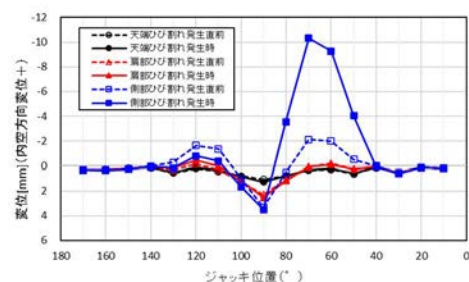


図5(a) ひずみ分布（内面）

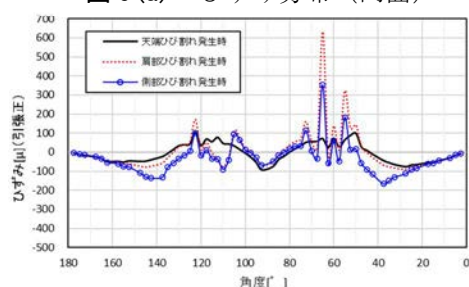


図5(b) ひずみ分布（外面）

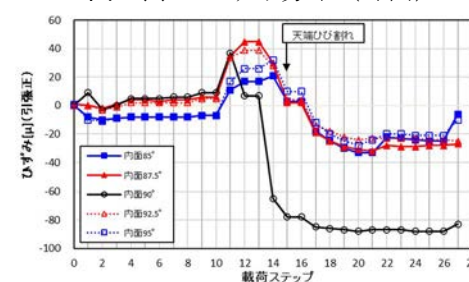


図6 天端の内面ひずみの推移

4. まとめ

・ひび割れの発生箇所、及び破壊までの荷重－変位関係、肩部ひび割れ発生時の変形モードの変化、ひび割れの特徴について、既往の研究と同様の傾向が見られた。

・ひび割れ発生時に、周辺の引張りひずみが解放されることや、ひび割れ周辺でも圧縮ひずみが生じることが確認された。これらは、ひび割れ発生時に、ひずみが局所的に卓越しているためと考えられる。

今後は、得られたデータを踏まえて、覆工の耐荷性能について解析的検討を進める予定である。

5. 謝辞

本実験の遂行に当たり、土木研究所の菊地浩貴氏をはじめ関係者には終始適切な助言を賜りました。ここに感謝の意を表します。

6. 参考文献

- 1) 藤原茜, 谷口勝基, 佐藤正, 七澤利明: 地山の変形係数をパラメータとした山岳トンネルの覆工に関する数値解析的検討, 土木学会第77回年次学術講演会, V-628, 2022.
- 2) 真下英人, 砂金伸治, 城間博通, 馬場弘二: トンネル覆工の薄肉化に関する共同研究報告書, 土木研究所共同研究報告書第275号, 2001. 3