

側圧が作用するトンネル覆工の挙動に関する一考察

(独)土木研究所 正会員 ○砂金 伸治, 日下 敦, 真下 英人, 角湯 克典

1. はじめに

トンネルに発生する変状は天端, アーチ部といった部位の観点や, ひび割れの発生, うき・はく離といった現象の観点など, さまざまな観点から分類できる. 変状の中で最も現れやすく, 比較的発見しやすいのは覆工や坑門に発生するひび割れであると言えるが, ひび割れを一見しただけでは, 緩み土圧, 偏土圧, 膨張性土圧, 水圧等といった原因を即座に特定できるとは限らない.

近年, NATM によって施工されたトンネルにおいて側壁にひび割れが発生する変状が報告されている. その原因は膨張性土圧の作用, 写真-1 のように何らかの理由で排水機能が発揮されない状態での水圧の作用, 大規模な地震力の作用等が考えられる. これらの変状はトンネルに側圧が作用することにより発生したものと考えられるが, この場合の覆工の挙動のメカニズムは不明確な点が多く残されている.

本稿では, トンネルの覆工に過大な側圧が作用すると想定した実大規模の載荷実験を実施し, ひび割れやひずみの発生状況等を検討した結果, および実験を再現した数値解析の結果について報告する.



写真-1 水圧によるひび割れ

2. 研究方法

写真-2 に実験状況を示す. 実験ではトンネル覆工載荷装置¹⁾を用い, 外径が 9.7m の半円形, 厚さ 30cm, 高さ 1m のコンクリート供試体を横に寝かせる形で作成し, 外側から中心方向に荷重を作用させた. 供試体の下部にはテフロン板等で摩擦を除去した支承を配置し, 支点脚部の拘束は回転のみを自由とした.

図-1 に本実験における載荷の形式, および角度を付して定義する座標を示す. 荷重を作用させるジャッキは 10 度ピッチの 17 断面で 1 断面につき上下 2 本で, 供試体の下より 25cm と 75cm にその中心部が配置されるようにセットし, 供試体の破壊まで載荷を行った. 載荷の手順は 20kN/1 本の荷重を全ジャッキで作用させた後, 10~50 度および 130~170 度部分のジャッキ 20 本で荷重制御により載荷を継続した. 残りのジャッキ 14 本はバルブを閉め, 供試体の変形に追従させることでジャッキ自体を地盤反力ばねと模擬した. なお, 実験終了後にジャッキのストロークと油圧の関係から算定した模擬的な地盤反力ばね定数は, ジャッキ毎にばらつきはあるものの, 概ね 100~300MN/m 程度であった. また, 表-1 に実験に使用した供試体の強度試験の結果を示す.

計測項目は載荷荷重, 供試体の変位およびひずみである. 載荷荷重は各ジャッキで計測し, 実際の載荷に使用した 20 本のジャッキの載荷荷重の平均を代表値として示した. 供試体の変位は天端(90 度)や肩部(45 度)等においてトンネル中心方向へ, 断面が縮小する方向を正として計測した.

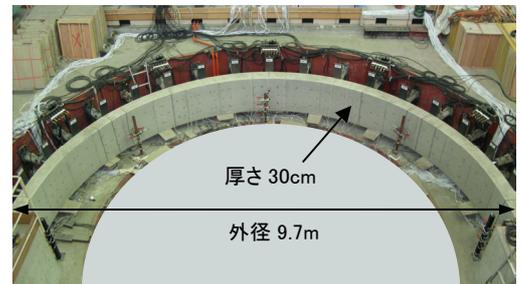


写真-2 実験状況

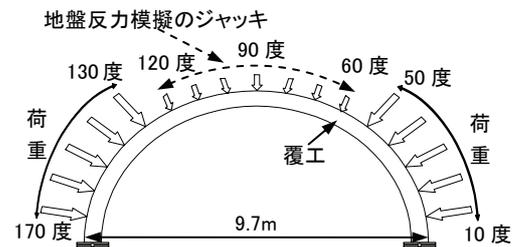


図-1 載荷の形式

表-1 強度試験結果

ヤング率(kN/mm ²)	17.91
一軸圧縮強度(N/mm ²)	16.12
割裂強度(N/mm ²)	1.62

※実験・試験実施材齢 21日

また、数値解析はひび割れの進展を考慮できる有限要素解析²⁾により実施した。解析では地盤反力ばねは引張の影響を無視し、その定数は実験結果に合致するように 100MN/m および 200MN/m、また、参考として 25MN/m および 50MN/m の解析も行った。なお、地盤反力ばね定数が 200MN/m の場合、地山の地盤反力係数に換算すると軟岩程度の地山に相当する 24MN/m³ である。

3. 研究結果

図-2 に実験から得られた荷重変位曲線を示す。載荷荷重が 391.9kN/本に達した時点で覆工は 145~155 度付近で圧縮によるせん断破壊を生じた。なお、実験中、ひび割れの発生は目視によって観察されることはなかった。また、図-2 内に数値解析によって算定した荷重変位曲線について記す。これより、45 度の変位については変位が 4mm 程度を越えた時点から合致しなくなったが、90 度の変位については地盤反力ばね定数が 100MN/m の場合で比較的一致した。

図-3 に実験によって得られた 10~90 度の覆工のひずみの分布を示す。また、地盤反力ばね定数が 100MN/m の場合における解析的に得られた 10~90 度におけるひずみ分布を示す。これより、解析のひずみが実験より若干大きく、特に圧縮ひずみが大きく発生する部分で顕著であった傾向は見られたものの、ひずみの変化の傾向は類似した。なお、解析においても地盤反力ばね定数が 100MN/m の場合、覆工にはひび割れは生じない結果が得られ、実験結果と合致した。

図-4 に地盤反力ばね定数を 25, 50, 100 および 200MN/m と仮定した場合で、荷重が 150MN/本の場合の覆工のひずみ分布を示す。地盤反力ばね定数が小さくなるほど 40 度、すなわち側壁の内側部分でひび割れの発生が想定されるレベルのひずみが発生しやすくなると予想される。また、40 度の外側、60°の内側で比較的圧縮ひずみが大きくなるのが分かる。これより本稿で模擬した側圧が作用する場合は肩部の内側で圧縮が見られる可能性があるが、90 度付近では全断面圧縮となり、圧縮を生じるモードとはならなかった。

4. おわりに

側圧が作用すると想定した覆工の載荷実験を実施し、その結果を用いた再現解析を実施したところ、覆工の内側にひび割れが発生し、圧縮ひずみが卓越する領域を把握することが出来た。今後は、荷重の形状、地山等級や地山による支持による影響、およびトンネルの形状等をパラメータとして、側圧が作用する場合の覆工コンクリートの破壊のメカニズムを検討する予定である。

参考文献

- 1) 真下ら：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研究，土木学会論文集 F, Vol. 64, No. 3, pp. 311-326, 2008
- 2) 真下ら：トンネル覆工の耐荷力と設計に関する研究報告書，土木研究所資料第 3961 号，平成 17 年 3 月

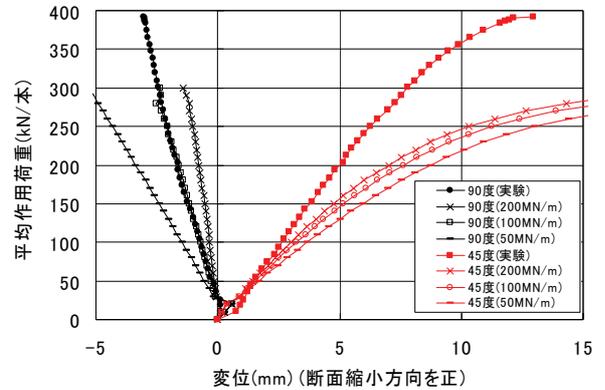


図-2 荷重変位曲線(実験, 解析)

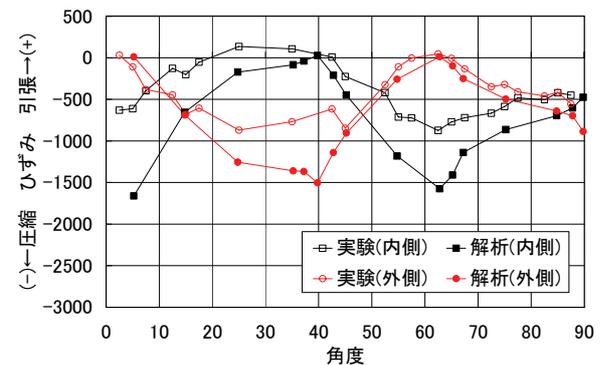


図-3 荷重-ひずみの関係(実験, 解析)

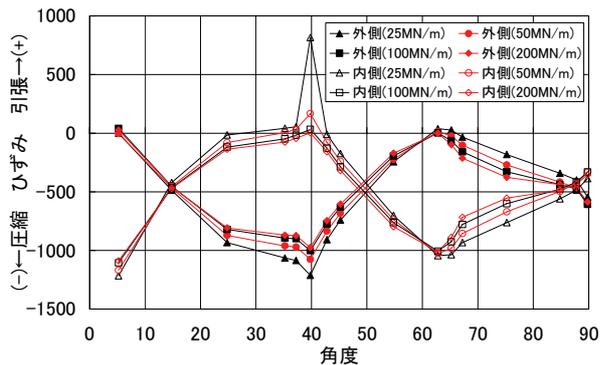


図-4 荷重-ひずみの関係(解析)