

軸力と曲げモーメントが作用するトンネル覆工の耐荷力に関する数値解析的検討

(独)土木研究所 正会員 ○日下敦, 砂金伸治, 河田皓介
国土技術政策総合研究所 正会員 真下英人

1. はじめに

山岳トンネルの覆工の力学的挙動に関しては、既に多くの研究が行われ、実大規模の載荷実験¹⁾等によって、外力が作用する条件下における覆工の破壊メカニズムも解明されてきている。しかしながら、実大規模の載荷実験の再現解析を行った事例は限定的で、覆工を設計する上での実務上の解析手法も確立されていないのが現状である。そこで本検討では、実トンネルにおける覆工の設計手法の確立に資する第一段階として、既往の実大規模の覆工載荷実験で得られた覆工の耐荷力について再現解析を試みた。

2. 再現する覆工載荷実験の概要

本検討で再現する覆工載荷実験は、文献¹⁾におけるケース A-1 とした。載荷条件は図-1 に示すとおりであり、覆工の天端部と肩部付近で軸力と曲げモーメントの作用による曲げ圧縮破壊（圧ざ）が発生するパターンで、地山からの反力が得られる状態で天端部に荷重が作用した場合を想定している。覆工供試体は外径 9.7 m、厚さ 30 cm の半円形で、目標基準強度 18 MPa のプレーンコンクリートで製作されたものである。

図-2 は、実験により得られた天端部に作用する荷重（天端部のジャッキからの載荷荷重の平均値）と天端部の変位の関係を示したものであり、天端内側の引張ひびわれ、両肩部外側の引張ひび割れ、天端外側の圧ざ、両肩部内側の圧ざを経て、荷重 381 kN/本で構造全体の全体の破壊に至っている。また、図-3 は最大荷重時の覆工のひずみ分布を示したものである。実験結果から、軸力と曲げモーメントが作用する載荷条件の場合は、天端部と両肩部の 3 箇所断面において圧ざが発生することにより覆工構造全体の破壊に至ることが明らかになっている¹⁾。

3. 解析の概要

解析は、非線形解析における解の収束において比較的有利な有限差分法プログラムにより行った。解析モデルは図-4 に示すとおりであり、覆工供試体は要素幅 5 cm を基本とした。ジャッキは十分に剛な弾性体、反力ばねは実験上のばね値に相当する弾性係数を有する弾性体とした。ジャッキおよび反力ばねと、覆工の間にはインターフェイス要

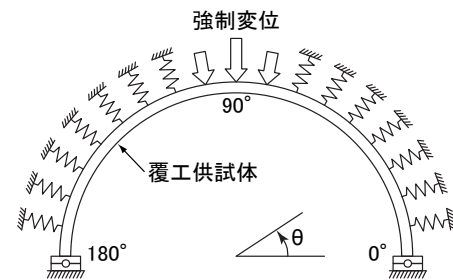


図-1 再現する実験の概要

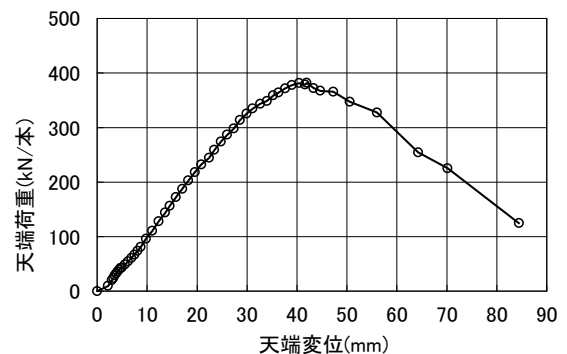


図-2 天端部の荷重-変位関係（実験）

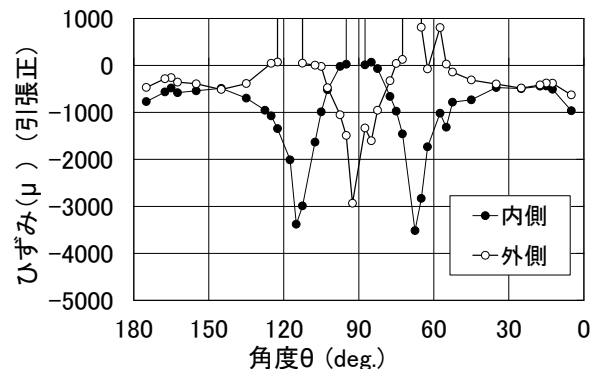


図-3 最大荷重時の覆工のひずみ分布（実験）

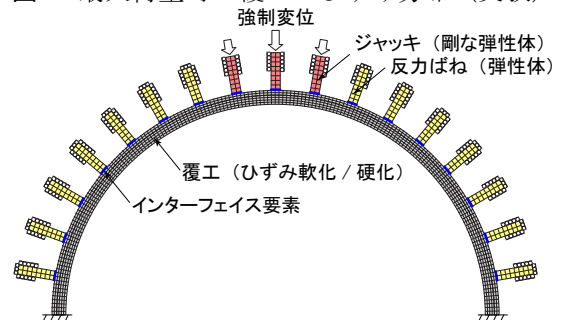


図-4 解析モデルの概要

キーワード トンネル, 覆工, 耐荷力, ひずみ軟化, 数値解析

連絡先 〒305-8516 つくば市南原 1-6 (独)土木研究所 道路技術研究グループ(トンネル) TEL 029-879-6791

表-1 解析で用いた覆工の初期物性値

項目	値
ヤング係数	22 GPa
ポアソン比	0.2
粘着力	5 MPa
内部摩擦角	10 degree
ダイレーション角	0 degree
引張強度	2.3 MPa

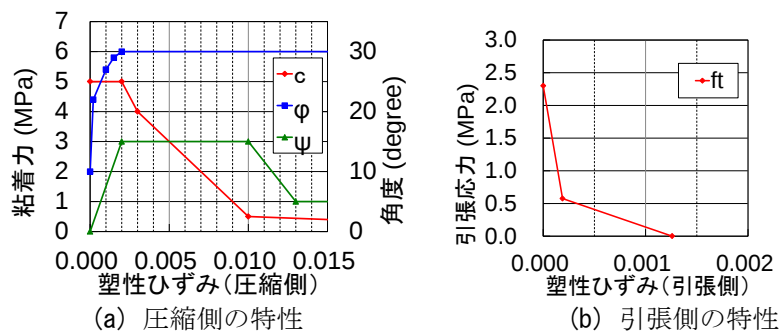


図-5 解析で用いた覆工のひずみ硬化/軟化特性

素を設置し、両者間で引張応力の伝達をゼロとした。

覆工の材料には、初期物性値として表-1の値を用いるとともに、破壊後はひずみ硬化/軟化モデルを適用した。粘着力 c 、内部摩擦角 ϕ 、ダイレーション角 ψ については図-5(a)に示すように塑性圧縮ひずみの関数と仮定した。これらの値は、一軸圧縮状態におけるプレーンコンクリートの耐荷力およびポストピーク強度において、要素実験レベルの再現が可能であることが示されている²⁾。また、引張強度 f_t については、コンクリート標準示方書の引張軟化曲線を参考に、図-5(b)に示すように塑性引張ひずみの関数と仮定した。

4. 解析結果

図-6は、解析における天端部の荷重-変位関係である。天端内側の引張破壊、両肩部外側の引張破壊の天端外側の圧縮破壊、両肩部内側の圧縮破壊を経て、最大荷重 400 kN/本に到達し、覆工構造全体の破壊に至った。

図-7は、最大荷重時の覆工のひずみ分布を示したものである。天端外側および両肩部内側の圧縮ひずみは、圧縮ひずみが $3,000\mu$ を超えるか、それに近い値を示しているとともに、反対側は解析上で $1,000\mu$ を超える引張ひずみが生じており、覆工構造全体の破壊が生じた段階ではこれらの断面で曲げ圧縮破壊が発生していることが分かる。

これらの現象は、実験で得られた結果と良好に一致しており、本検討で示した覆工材料モデルを用いることで、軸力と曲げモーメントが作用するトンネル覆工の耐荷力を把握できる可能性があることが分かった。

5. おわりに

本検討では、ひずみ軟化/硬化を考慮できる覆工材料を適用して、軸力と曲げモーメントが作用する条件下における実大規模の覆工載荷実験の再現解析を試みた。その結果、本検討で示した覆工材料モデルを用いることで、軸力と曲げモーメントが作用するトンネル覆工の耐荷力に関する検討が可能となることが分かった。ただし、変位については実験結果と解析結果に違いがあったため、変位の再現性については課題が残っていると言える。

今後は、曲げモーメントが卓越する条件等、他の荷重条件における覆工載荷実験の再現性等を検証した上で、外力が作用する条件下における覆工設計手法の確立に資する検討を行っていきたいと考えている。

謝辞 本研究の一部は、JSPS 科研費 24760385 の助成を受けたものである。

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研究, 土木学会論文集 F, Vol.64, No.3, pp.311-326, 2008.
- 2) 日下敦, 砂金伸治, 真下英人: 内巻き補強された覆工の全体耐力に関する要素実験の再現解析, 土木学会第 68 回年次学術講演会概要集, III-250, pp.499-500, 2013.

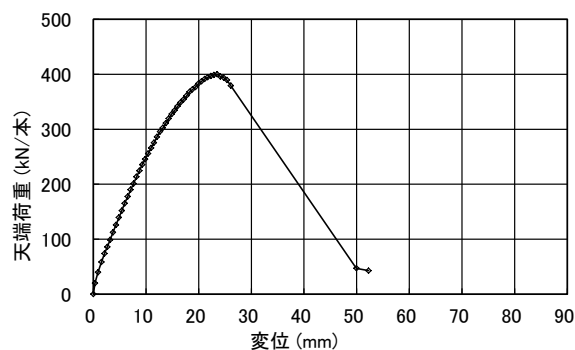


図-6 天端部の荷重-変位関係 (解析)

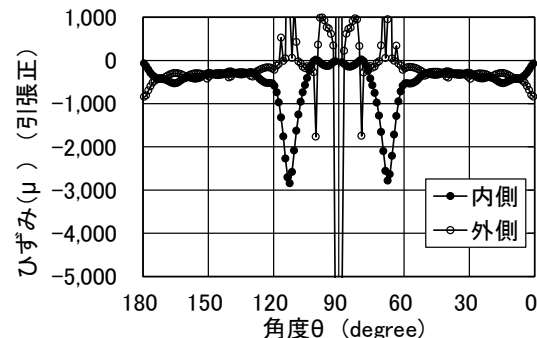


図-7 最大荷重時の覆工のひずみ分布 (解析)