

山岳トンネル覆工の耐荷力の評価に関する数値解析的検討

国立研究開発法人 土木研究所 正会員 ○菊地浩貴，日下敦，佐々木亨
国土技術政策総合研究所 正会員 大久保剛貴，谷口勝基

1. はじめに

山岳トンネルの覆工は、通常断面の道路トンネル一般部の場合、設計巻厚 30cm のプレーンコンクリートが一律に採用される。品質向上やコスト縮減等を目的に種々の新技術が想定される一方で、耐荷力といった力学的特性等について要求される性能水準や評価手法は十分に確立されておらず、導入にあたって課題である。そこで、本報告では覆工の耐荷力の評価手法の確立に向けた基礎的な検討として、実大規模の覆工載荷実験で得られた覆工構造全体の耐荷力について再現解析を試みた。部材のモデル化には、材料の非線形性を考慮でき、近年鉄筋コンクリートでの適用事例が増え有効な方法とされるファイバー要素¹⁾を試行的に適用した。

2. 覆工載荷実験の概要

対象とした覆工載荷実験は文献²⁾のものとし、概要を図-1、表-1に示す。載荷実験では、まず全ジャッキで予備載荷(40kN/本)後に、外力として天端からのゆるみ土圧を想定し、80, 90, 100°のジャッキを内空側へ強制変位させている。載荷以外のジャッキは圧縮バネとして地山を模擬し、ジャッキ毎に僅かなばらつきはあるものの地盤反力係数は約 470MN/m³となっている。

3. 数値解析の概要

図-2に数値解析モデルの概略図を示す。数値解析には骨組構造解析を用い、ファイバー要素を適用した。ファイバー要素とは、材料非線形性を考慮した梁要素であり、平面保持、要素半区間の曲率一定を仮定する。また、断面をセルに分割し、各セルに応力-ひずみ関係を定義する。要素の伸縮量と材端のたわみ角からセル毎に軸方向ひずみを算出し、対応した応力を算出するモデルである。セル分割数は覆工厚方向に 10(1セル当り 30mm)とした。

図-3のとおり覆工材料の構成則は、コンクリート標準示方書¹⁾を参考に、圧縮側については、一軸圧縮試験における圧縮破壊時のひずみ ϵ_{c0} 以降の応力を一定、引張側については、引張強度を考慮しないモデルとした。構成則中の各物性値には表-1を適用した。載荷条件としては、10°毎に全断面 40kN で予備載荷後に、80, 90, 100°の節点に対して、実験で構造全体の耐荷力に達した時の各ジャッキの荷重の比(80° : 90° : 100° $\approx$ 8 : 11 : 6)で段階的に荷重を与えた。反力バネは、載荷点を除き引張が作用しない 10°毎の圧縮バネとし、実験で得られたバネ定数にて地盤反力を再現した。

4. 数値解析結果

4-1. 解析における構造全体の耐荷力の定義

数値解析における構造全体の破壊は、力学的な釣り合い点が求められず解が発散した解析ステップとし、解析モデルが有する覆工構造全体の耐荷力は、解が収束した最終のステップにおける荷重値とした。

既往の実験結果³⁾から、図-1のような載荷条件の場合、覆工には曲げモーメントと軸圧縮力が発生し、天端と両肩部の3箇所では-3500 μ 程度の圧縮ひずみが生じた。キーワード 山岳トンネル、覆工コンクリート、耐荷力、数値解析、ファイバー要素

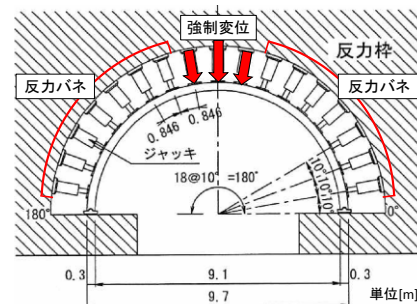


図-1 実験概略図

表-1 実験条件

圧縮強度 σ_{ck}	-25.4N/mm ²	※
弾性係数 E	19.3kN/mm ²	※
一軸圧縮試験における 圧縮破壊時のひずみ ϵ_{c0}	-2200 μ	※
材料	プレーンコンクリート	
覆工厚	300mm	

※円柱供試体の一軸圧縮試験の結果より

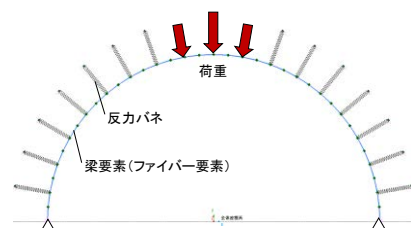


図-2 解析モデル概略図

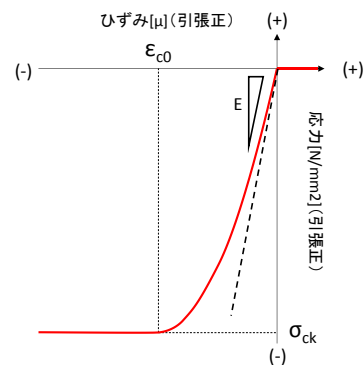


図-3 覆工材料の構成則

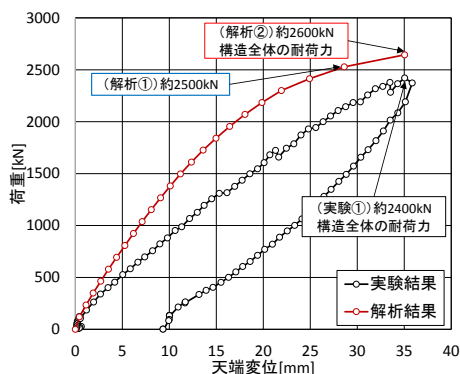


図-4 荷重変位関係

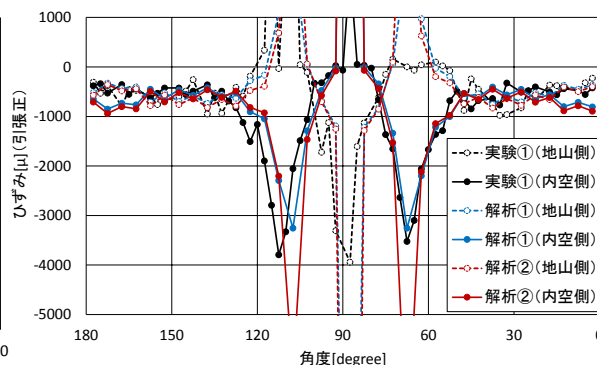


図-5 ひずみ分布

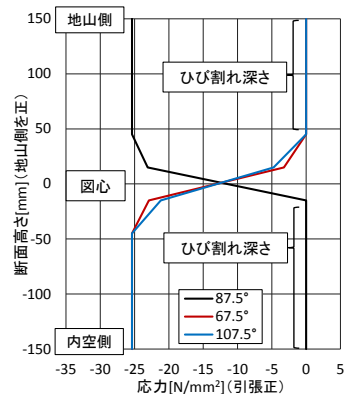


図-6 断面の応力分布

ずみを目安とする曲げ圧縮破壊が発生することで覆工全体の破壊に至ることが明らかになっている。このことから、数値解析で得られたひずみ分布と実験で得られたひずみ分布を比較し、覆工全体の破壊モードおよび断面破壊が再現できていることを確認する。

4-2. 実験結果および解析結果

図-4 に実験および解析における荷重（载荷ジャッキの合計値）と天端部の変位の関係を示す。実験では約2400kNで構造全体の耐力に達した（実験①）（载荷重の低下が確認された時点で除荷）。解析では、4-1 のとおり破壊を定義すると、構造全体の耐力は約2600kN（解析②）となり、耐力力を概ね再現できた。一方で、変形勾配には差異が生じた。以下に、ひずみ分布と断面破壊に関して実験と解析の比較結果を示す。

図-5 に実験および解析について、図-4 に対応したひずみ分布を示す。実験結果より、耐力に達した実験①では、天端地山側（87.5°）、両肩部内空側（67.5°、112.5°）の3箇所で-3500~-4000μの圧縮ひずみ、その他の断面は両肩部地山側を除き小さな圧縮ひずみが発生しており、天端、両肩部で曲げ圧縮破壊、その他の断面で全断面圧縮応力が生じて構造全体の耐力に達していることが分かる。解析結果より、解析①で両肩部内空側（67.5°、107.5°）が圧縮ひずみ-3200μ程度に達し、最終的に解析②で実験と同様に天端と両肩部の3箇所の圧縮ひずみが卓越し、内外反対側には引張ひずみが生じて構造全体の耐力に達した。これは、今回対象とした実験で得られた破壊モードおよび既往の研究で明らかになっている破壊メカニズムと一致する。

図-6 に数値解析で構造全体の耐力と評価したステップ（解析②）の断面の応力分布を示す。天端および両肩部の3箇所の断面は、圧縮縁で圧縮応力 σ_{ck} が生じる一方で、引張側（天端は内空側、肩部は地山側）のひび割れ深さは、断面高さの50%未満であることが分かる。プレーンコンクリート覆工の断面の曲げ圧縮破壊は、圧縮側は終局圧縮ひずみ、引張側は限界ひび割れ深さ（中立軸）を断面高さの50%とすることが提案されている⁴⁾。これより、3箇所の断面は曲げ圧縮破壊に相当する状態であり、実験で得られた断面破壊と一致する。

5. まとめ

材料非線形性を考慮したファイバー要素を用いて、曲げモーメントと軸圧縮力が発生する条件における覆工载荷実験の再現解析を試みた。数値解析における構造全体の破壊を、力学的な釣り合い点が求められず解が発散した解析ステップとし、構造全体の耐力力を、解が収束した最終のステップにおける荷重値と定義すると、曲げモーメントと軸圧縮力が発生する条件における覆工については耐力力の検討が可能となることが分かった。一方で、変形勾配は実験と解析に差異が生じたことから、破壊までの過程における耐力力の評価等には留意が必要であり、今後の検討課題である。また、曲げモーメントが卓越する条件や、軸圧縮力が卓越する条件についても検討を行い、覆工構造全体の耐力力を評価できる解析モデルの検討を行いたいと考えている。

参考文献

- 1) 土木学会：2017年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，pp.106-107,180-182，2018.3
- 2) 石村利明，砂金伸治，日下敦：炭素繊維シートを鋼材により固定した場合のトンネル補強効果に関する実験的検討，第72回年次学術講演会，2017.9
- 3) 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F，Vol.64，No.3，pp311-326，2008.
- 4) 併進工法設計施工研究委員会：併進工法設計施工マニュアル（都市トンネル編），pp.68-77，1992.8