

コンクリートの引張側構成則が山岳トンネル覆工の数値解析上の耐荷力に及ぼす影響

国立研究開発法人 土木研究所 正会員 ○田村賢人, 菊地浩貴, 佐々木亨, 日下敦

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、経験的に定められた設計基準強度 18N/mm^2 、設計巻厚 30cm のプレーンコンクリートが採用されている。今後、品質向上やコスト縮減等を目的とした新技術・構造が想定される一方で、覆工の力学特性等について要求される性能水準やその評価手法は十分確立されておらず、導入にあたっての課題である。そのため、これまでに載荷実験や数値解析による耐荷力特性の検討が進められている。その一環として、例えば、コンクリートの引張側の破壊エネルギーを仮定した数値解析モデルにより、覆工載荷実験の再現解析¹⁾が試みられている。一方でコンクリートの引張側構成則については、ひび割れの発生および進展を数値解析上で表現することを目的に種々のモデルが提案されているが、それらが耐荷力へ及ぼす影響については明らかになっていない。そこで、本検討では、数値解析におけるコンクリートの引張側構成則が覆工の耐荷力に及ぼす影響について検討した。

2. 数値解析の概要

本検討では、有限要素法により、過去に実施された実物大の覆工を模擬した載荷実験²⁾の再現解析を行った。その際にコンクリートの引張側構成則を変更したケーススタディを実施し、それらが解析結果、特に耐荷力に与える影響を検討した。

図-1 に数値解析モデルの概略図を示す。覆工の形状寸法は、覆工載荷実験に合わせ、外径 9.7m 、覆工厚 30cm 、トンネル軸方向長さ 1.0m の半円形とした。覆工部材には三次元のソリッド要素を適用し、脚部は完全拘束とした。地盤反力バネの位置は実験時のジャッキ位置と同様に 10° ピッチでバネ要素によりモデル化した。なお、バネ定数は実験の設定値である 400kN/mm とし、引張力は発生しない構成則とした。覆工材料の圧縮側の構成則については、コンクリート標準示方書³⁾を参考に、図-2 に示す通り二次曲線を適用し、一軸圧縮試験における圧縮破壊時のひずみ ϵ_{c0} 以降は応力一定と仮定した。図-3 に引張側の構成則を示す。CASE1 はコンクリートの破壊エネルギーを考慮して引張軟化する構成則であり、これを適用することで、構造全体の耐荷力に至るまでの、ひび割れや曲げ圧縮破壊といった破壊過程を再現できることが確認されている¹⁾。CASE2 は引張軟化曲線を考慮せずに直線的に軟化させた構成則である。CASE3 は、引張強度に達したのちに強度が低下せずに応力一定となることを仮定した構成則、CASE4 は引張強度を考慮しない構成則である。図中の各物性値は表-1 の通りとした。

載荷については実験と同様、全断面 40kN で予備載荷後、 $80\sim 100^\circ$ に対して、強制変位を与えた。その際、強制変位により覆工の変形を制限しないよう、引張力が発生しない結合要素を介して変位を与えた。なお、非線形解析の収束計算にはニュートンラプソン法を用い、収束判定条件はエネルギーノルムが 0.1 を下回ることにし、最大反復回数は 50 回とした。

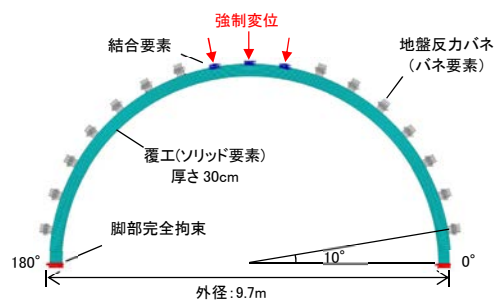


図-1 解析モデル概略図

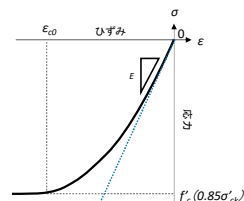


図-2 圧縮側の構成則

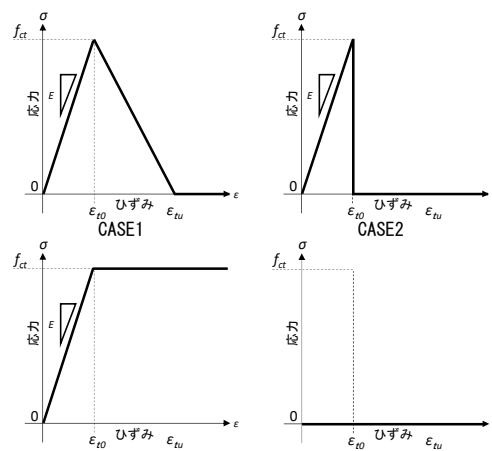


図-3 引張側の構成則

キーワード 山岳トンネル, 覆工コンクリート, 耐荷力, コンクリートの引張軟化

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 (トンネル) TEL : 029-879-6791

3. 数値解析結果

図-4に実験および解析における天端にかかる荷重と天端変位の関係を示す。ひずみが ϵ_{t0} に達した時点でひび割れが発生し、一般にコンクリートの限界圧縮ひずみとされる -3500μ に達した時に圧縮破壊が発生すると仮定すると、CASE2を除く各ケースは、天端部、肩部の順にひび割れが発生した後、天端部、肩部の順に圧縮破壊する、構造が不安定になる前の破壊過程を概ね再現できている。CASE2は天端のひび割れが発生し、進展する過程で計算が収束せず発散した。CASE2以外のケースの結果を比較すると、天端合計荷重が2200kN未満では、荷重変位関係は概ね一致し、天端内空側が圧縮破壊する荷重及び変位は近い値となった。一方、構造が不安定になるとされる肩部付近の圧縮破壊が発生する段階では、荷重変位関係に差が生じ、最も差が大きいCASE3とCASE4を比べると、肩部が圧縮破壊時の天端合計荷重に271kNの差が生じる結果となった。

図-5に、肩部(67.5°)におけるCASE2を除く各ケースのひずみ分布を示す。引張側構成則の違いにより、CASE3、CASE1、CASE4の順に中立軸が内空側に近づき、圧縮力を受け持つ面積が小さくなっていることがわかる。天端圧縮破壊が発生する天端合計荷重1700kNの時点では内空側の圧縮ひずみに差は見られないが、2500kNの時点では、圧縮力を受け持つ面積が小さいほど内空側の圧縮ひずみが大きくなっている。これにより、荷重レベルが大きい領域では、荷重変位関係および肩部の圧縮破壊が発生する変位に差が表れたと考えられる。

以上より、コンクリートの引張側構成則の違いは、耐荷力の検討のような荷重レベルが大きい場合においては、一般に曲げ圧縮破壊で構造全体の耐荷力が決定されるような荷重条件の場合でも、荷重変位関係や耐荷力に影響することが示唆された。

4. まとめ

本検討では、コンクリートの引張側構成則が覆工の数値解析上の耐荷力に与える影響を明らかにすることを目的として、数値解析によるケーススタディを実施した。その結果、本検討に用いたモデルでは、荷重が比較的小さい領域における荷重変位関係に差は生じない一方、耐荷力については、コンクリートの引張強度を考慮したケースの方が大きく算出されることが明らかになった。今後は、本検討で得られた知見を基にコンクリート覆工の耐荷力の検討を進めるとともに、一般に引張部材として用いられる鉄筋が覆工の耐荷力へ及ぼす影響について載荷実験や数値解析から確認する予定である。

参考文献

- 1) 菊地浩貴, 日下敦: ファイバー要素を用いた山岳トンネル覆工の耐荷力に関する数値解析的検討, 第31回トンネル工学研究発表会, 2021. 11
- 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) 土木学会: 2017年制定コンクリート標準示方書[設計編], pp. 180-182, 2018. 3

表-1 解析物性値

項目	値	備考
圧縮強度 $f'c$	N/mm^2 21.6	$0.85\sigma'ck$
引張強度 ft	N/mm^2 1.99	$0.23\sigma'ck^{2/3}$
終局圧縮ひずみ ϵ_{c0}	μ 2,200	一軸圧縮試験より
引張強度に達したときのひずみ ϵ_{t0}	μ 103	ft/E
ひび割れ開口幅に相当するひずみ ϵ_{tu}	μ 500	破壊エネルギーを考慮して設定
弾性係数 E	N/mm^2 19,307	一軸圧縮試験より

※管理供試体の一軸圧縮試験より $\sigma'ck = 25.4[N/mm^2]$ とした。

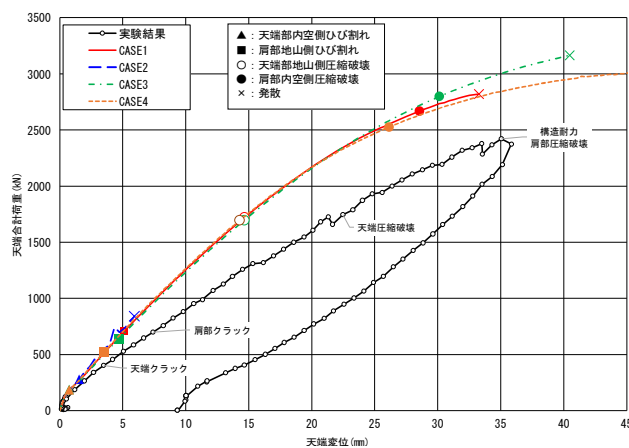


図-4 荷重変位関係

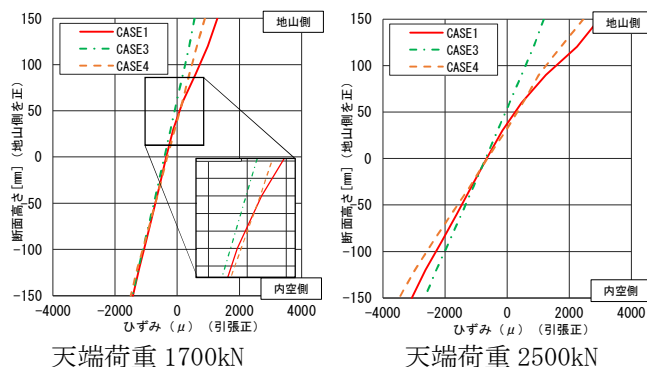


図-5 肩部の断面ひずみ分布