トンネル覆工の力学的挙動のモデル化に関する基礎的研究

山口大学大学院創成科学研究科	学生会員	○持田	新太郎
松江工業高等専門学校	正会員	岡崎	泰幸
山口大学大学院創成科学研究科	正会員	林	久資

1. はじめに

山岳トンネルでは,支保工で地山の変状を安定させ, トンネルの覆工を施工することが一般的である. その ため, 覆工には力学的な性能を期待せず ¹⁾, 無筋コンク リートで施工されることが多い. しかしながら, 一部 トンネルでは外力を受けたような変形やひび割れが発 生することもあり、大規模変状や第三者被害が生じる 可能性がある. 例えば, 覆工背面に空洞が存在する場 合, 上部の土塊の堆積に伴う荷重作用により, 場合に よっては覆工が突発的に崩落するため²⁾,緩み鉛直圧等 の外力が無筋コンクリート覆工の力学的な安定性に及 ぼす影響を的確に把握する必要があると考えられる. そこで、松岡ら³⁾や野城ら⁴⁾は、無筋コンクリート覆工 の破壊プロセスや、その圧ざを表現できる解析モデル を提案している.しかしながら、これらの研究では、 覆工の力学的挙動のモデル化を行う際に、圧縮破壊前 後のひずみ硬化・軟化特性、引張破壊後のひずみ軟化 特性といった一般的なコンクリートの力学的特性をす べて十分に考慮しておらず、外力が作用した際の覆工 の力学的挙動を忠実に再現できているとは言い難いの が現状である.

そこで、本研究では、外力が作用した際の無筋コン クリート覆工の力学的な挙動をより忠実に表現できる 解析モデルを提案することを目的として、覆工の形状 を模擬した覆工模型の載荷実験を行い、圧縮破壊前後 のひずみ硬化・軟化特性および引張破壊後のひずみ軟 化特性を考慮した数値解析を行うことで、覆工模型の 挙動を再現できるか検討する.

2. 覆工模型の載荷実験

(1) 覆工模型の作製条件と実験概要

覆工模型は、道路トンネルの標準断面図¹⁾を参考に、
 図1(a)のような形状とし、表1の配合を用いて無筋コンクリートで3供試体作製した.





図2 覆工模型の荷重-変位関係

日で脱型を行った後,実験室内にて気中養生を行った. そして,打設後91日経過後に図1(a)に示すような載荷 実験を荷重制御で行い,ロードセルを用いて,天端に 生じる荷重(反力)Pを計測した.なお,上昇する下面 の変位uはダイヤルゲージを用いて計測を行った.

(2) 実験結果

図2に2.(1)の実験で得られた荷重-変位関係を示す. ここでの荷重-変位関係は,初期荷重(0.14kN)が得ら れた後の関係を示している.図2より,3供試体におい て,ピーク荷重に到達するまでは,荷重-変位関係はお およそ線形的に増加することがわかる.そして,ピー ク荷重に到達後,荷重が徐々に減少することがわかる. また,ピーク荷重から変位が約0.4~0.9mm 程度増加す ると天端部のひび割れが貫通することがわかった.

キーワード 山岳トンネル, 覆工, 数値解析, ひずみ硬化・軟化特性

連絡先 〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1 山口大学大学院創成科学研究科 進士研究室 TEL0836-85-9332

3. 数値解析による実験結果の同定

本研究では、三次元有限差分法コード FLAC3D を用 いて解析を行い,実験時の覆工模型の挙動が再現可能 か検討する. そこで、本研究では、塑性ひずみの増加 に伴い粘着力や引張強度を増加または減少することに よって、材料のひずみ硬化・軟化特性を表現できるモ デルである Strain Hardening/Softening Mohr-Coulomb Model を使用する、このモデルを使用するにあたり、本 研究では、一軸応力下におけるコンクリートの圧縮破 壊前後のひずみ硬化・軟化特性および引張破壊後のひ ずみ軟化特性が図3のような応力-ひずみ関係になるよ うに式(1)~(3)を用いてモデル化した 3)4)5). 式(2)中の k については,一軸圧縮試験での圧縮強度が設計基準強 度を超えていたことから 1.0 とした. また, 式(1), (3) 中のαとβの値については、α=200、β=260を用いる例 が多いが⁴⁾⁵⁾,本研究では、上述したαとβの値を随時 変更して数値解析を実施した.本概要では、その一部 の解析結果として α=1000, β=10 のとき, α=2000, β=10 のときの数値解析結果を示す.また、その際のその他 の解析物性値については,表2に示すように設定した.

解析モデルの拘束条件については,覆工模型の載荷 条件と整合するように天端上部の鉛直方向変位と底面 端部の水平方向変位を変位拘束条件とした(図1(b)参 照).そして,解析モデルの底面に一定に増加する変位 uを与えながら,随時解析モデルに生じる荷重(反力) を取得した.

4. 実験結果と解析結果の比較および考察

図4 に覆工模型の載荷実験結果と数値解析結果の荷 重-変位関係の比較を示す.図4より,数値解析結果を みると,実験時の覆工模型と似たような挙動を示して いることがわかる.この結果より,αおよびβの値を十 分に検討することで,実験時の覆工模型の挙動をおお よそ再現することができると考えられる.

5. まとめと今後の課題

コンクリートのひずみ硬化・軟化特性を考慮した数 値解析を行うことにより、実験時の覆工模型の挙動を おおよそ再現することができた.しかしながら、数値 解析における検討が十分であるとはいえないため、 様々な条件を変更し数値解析を実施していく必要があ ると考えられる.



- (1) $\sigma_t = f_t \times exp(-\alpha \times (\varepsilon \varepsilon_t))$(1)
- (2) $\sigma_c' = \mathbf{k} \times \mathbf{f}_c' \times (\epsilon'/\epsilon_c') \times (2 (\epsilon'/\epsilon_c'))....(2)$
- ③ σ_c' = f_c'×exp(-β×(ε'-ε_c')).....(3)
 ここで,k:一軸圧縮強度が設計基準強度を下回る不良率から決まる係数

α:引張軟化係数, β: 圧縮軟化係数

図3 一軸応力下におけるひずみ硬化・軟化特性 3)4)5)

表2 解析物性值



図4 載荷実験結果と数値解析結果の比較

参考文献

- 1) 土木学会:2016 年制定トンネル標準示方書[共通編]・同 解説/[山岳工法編]・同解説, pp.20.109-110, 2016.
- 2) 土木学会:トンネルライブラリー第 12 号 山岳トンネル 覆工の現状と対策, p.66, 2002.
- 3) 松岡ら: ひび割れを考慮したトンネル覆工解析に関する 研究, 土木学会論文集, No.554/III-37, pp.147-155, 1996.
- 4) 野城ら: 圧縮破壊後の軟化を考慮した無筋コンクリート 山岳トンネル覆工の数値解析手法に関する研究, 土木学 会論文集 C, Vol.65, No.4, pp.1024-1038, 2009.
- 5) 新井ら:鉄筋腐食と断面欠損による RC はりの曲げ挙動 に関する解析的研究,コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.3, pp.169-174, 2007.
- Itasca Consulting Group Inc. : FLAC3D Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions Constitutive Models, p.I-59, 2012.
- 7) 藤田ら: Plane Concrete の内部摩擦角と引張強度について の一考察, J.Struct.Constr.Eng., AIJ, No.494, pp.7-14, 1997.
- 8) 土木学会:コンクリート標準示方書[設計編], p.43, 2017.