

山岳トンネル覆工の耐荷性能・変形性能に関する基礎的検討

鉄道総研 正会員 野城 一栄 ○長岡技大 学生員 茶木 勇太

1. はじめに

山岳トンネル覆工は安定した地山に建設される場合、通常は無筋コンクリートとなるが、坑口部、小土被り部では、将来的な荷重の作用の可能性を考慮して RC 構造とする場合がある（図-1）。完成後に山岳トンネル覆工に荷重が作用する事態を想定し、コンクリートの破壊、鉄筋の降伏を考慮した数値解析により、無筋コンクリート覆工、RC 覆工について、耐荷性能・変形性能を調べた結果について述べる。

2. 解析条件

コンクリートの圧縮破壊後の軟化挙動を考慮した数値解析手法¹⁾を用い、実際のトンネルを想定した数値解析を行って、実トンネルの耐荷性能や変形性能を算出する。対象トンネルは、NATM による新幹線トンネルとした（図-2）。また、対称性を考慮して半断面のモデルとした。覆工およびインバートは平面ひずみ要素により、地山は地盤ばねによりモデル化し、覆工に直接節点荷重を与えた。解析入力値を表-1 に示す。固結度が低い地山を想定し、弾性係数 E は 30MPa とした。鉄筋はコンクリートの要素と節点を共有するはり要素として、主鉄筋のみをモデル化した。コンクリートのモデルについては、アーチ構造を有するトンネル覆工の限界状態を精緻に表現するために、引張強度到達後や圧縮強度到達後の軟化挙動をモデル化することのできる解析手法²⁾を用いている。なお、解析上、圧縮破壊後にひずみが 10,000 μ を超えた時点で圧ざと判定した。解析手法については、事前に 1/5 スケール模型実験結果の再現解析を行い、妥当性を確認している³⁾。解析ケースについては、構造（無筋/RC、巻厚）に着目した計 3 種類を設定した。ケース 1（無筋）は一般的な巻厚 30cm とし、ケース 2（無筋）は比較用として巻厚 60cm とし、ケース 3（RC）では、巻厚 60cm とし、鉄筋は D25@250mm の複鉄筋として設定した。ケース 1, 2 は側壁とインバートの接合部をピン結合としているが、ケース 3 は側壁とインバートを一体（剛結合）としてモデル化している。ケース 1～3 について、2 つの荷重パターン（水平土圧のみ、鉛直土圧と水平土圧 $K_0=0.5$ ）で解析を実施した。

3. 解析結果

(1) 荷重パターン 1：水平土圧のみ

図-3 に、破壊時のトンネルの変形状況、覆工のひずみの分布を示す。ここで、破壊時は、ケース 1, 2（無筋）についてはトンネルの内面あるいは、インバートに圧ざが発生する時を、ケース 3（RC）についてはコンクリートに圧ざが発生する時、すなわち、RC 構造物として耐荷力を失う時をもって定義した。

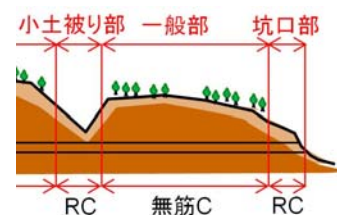


図-1 山岳トンネルにおける覆工構造の使い分けの例

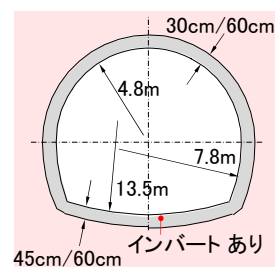


図-2 解析対象としたトンネル

表-1 解析入力値

	項目	入力値
コンクリート	圧縮強度 f_c	24 N/mm ²
	引張強度 f_t	1.9 N/mm ²
	弾性係数 E_c	2.5×10 ⁴ N/mm ²
	引張弾性係数 E_t	2.5×10 ⁴ N/mm ²
	ポアソン比 ν	0.2
地山	変形係数 E	30 N/mm ²
	地盤反力係数 k	36×10 ³ kN/m ³
鉄筋	鋼材種類	SD390
	主筋	D25@250mm
	主筋のかぶり	75mm
	弾性係数 E_s	200 kN/mm ²
	引張降伏強度 f_{syk}	390 N/mm ²

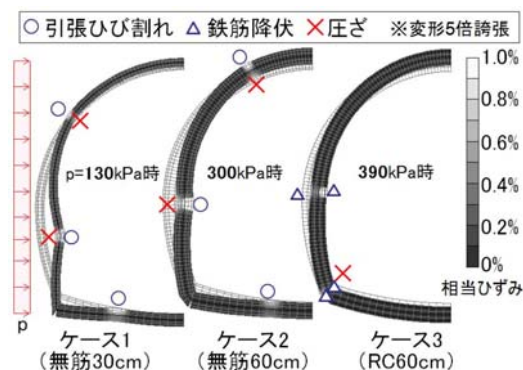


図-3 トンネルの変形状況、ひずみ分布（荷重パターン 1）

キーワード 山岳トンネル、覆工、耐荷性能、変形性能

連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38 公益財団法人鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部（トンネル）

トンネルの変形は 5 倍に誇張して示す。また、覆工のひずみは、von Mises(VM)相当ひずみで示す。なお、この式は絶対値であるため、引張により生じたひずみ、圧縮により生じたひずみの両方が白色で表示されている。肩部や SL 部でひずみが大きくなっている。また、相当塑性ひずみが 1%を超えた箇所について圧縮相当と判定することにし、発生箇所を図中に記載した。変形については、水平方向に荷重を作用させているため、トンネルの水平内空が縮小し、天端が鉛直に隆起するように挙動する。インバートにより脚部の変位が抑えられ、水平内空の縮小はスプリングライン（以下 SL）位置にて最も大きくなる。同じ荷重の場合は、変形はケース 1（無筋 30cm）>ケース 2（無筋 60cm）>ケース 3（RC 60cm）の順で小さくなった。覆工のひずみ（破壊）については、ケース 1, 2（無筋）は、SL 内面、アーチ肩背面、インバート左側内面で引張ひび割れが発生し、ケース 3（RC 60cm）は、SL および側壁とインバートの接合部（インバート隅角部）で鉄筋が降伏した。

(2) 荷重パターン 2 : $K_0=0.5$

図-4 に、トンネルの変形状況、覆工のひずみの分布を示す。変形については、全体的に沈下しながら鉛直内空が縮小する変形モードとなっている。同じ荷重の場合は、変形はケース 1（無筋 30cm）>ケース 2（無筋 60cm）>ケース 3（RC 60cm）の順で小さくなった。ケース 1, 2（無筋）では、インバートが破壊して大きく変形している。覆工のひずみ（破壊）は、ケース 1, 2（無筋）では天端内面、アーチ肩背面、側壁下部内面、インバート左側内面で引張ひび割れが発生し、ケース 3（RC 60cm）では、インバート隅角部、インバート中央部内面で鉄筋が降伏した。

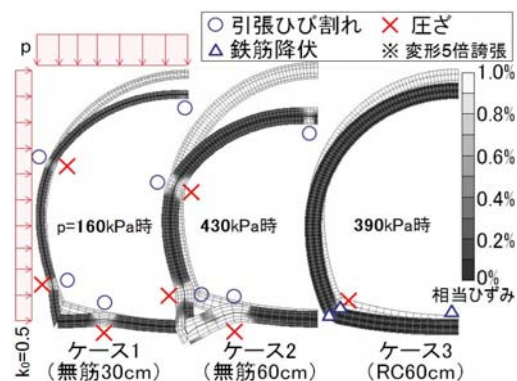


図-4 トンネルの変形状況、ひずみ分布
(荷重パターン 2)

4. 耐荷性能と変形性能

図-5, 6 に荷重～変位曲線を示す。図中には今回定義した破壊が生じた時期を合わせて記入した。どちらの荷重パターンについても、傾向としては同様であった。すなわち、ケース 1, 2（無筋）は小さな荷重でひび割れが発生するが、その後も荷重を維持できている。また、圧縮が生じる時の水平内空縮小率は 1%以上であり、適度な耐荷性能、変形性能を有している。同じ巻厚（60cm）で比較すると、ケース 3（RC）はケース 2（無筋）に比べて剛性、耐荷力に優れている。したがって、巻厚を増加させること、RC 構造とすることにより、トンネルとしての剛性や耐荷力が増加することがわかる。

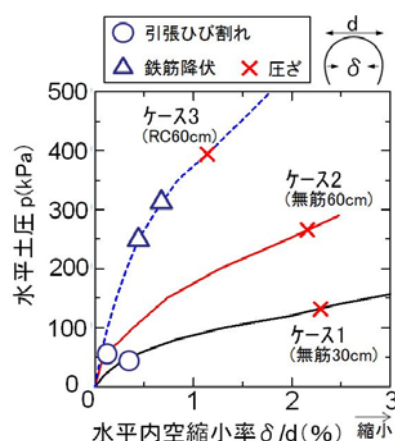


図-5 荷重～変位曲線
(荷重パターン 1)

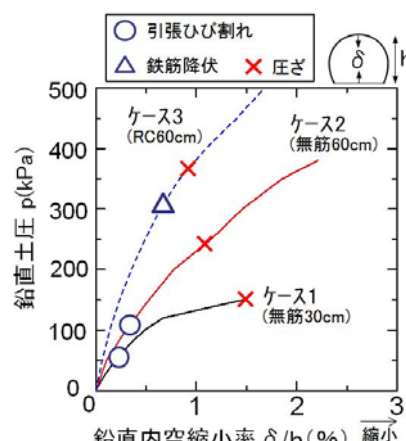


図-6 荷重～変位曲線
(荷重パターン 2)

5. まとめ

以上の結果から、材料ごとのトンネルへの適用性は以下のように整理できる。なお、この傾向は、模型実験¹⁾と同様である。無筋コンクリート覆工は、適度な耐荷性能、変形性能を有しており、一般的な地山（荷重の作用を想定する必要がない条件下）で適切と考えられる。ただし、変形に伴い圧縮が生じるので、ひび割れや変形が確認された段階で、定期的な監視・計測を行い、変形量に応じて圧縮（剥落）が生じないように剥落対策などを行う必要がある。RC 覆工は、剛性、耐荷性能が高く、坑口部や小土被り部など荷重が想定でき耐荷性能が求められる場合に優位性がある。

参考文献

- 1) 野城一栄他：種々の材料からなる山岳トンネル覆工の変形破壊挙動に関する研究，土木学会論文集 F1, Vol.71, No.2, pp.78-94, 2015.