

小土被りトンネル掘削における地下水の影響の数値解析的検討

京都大学

学生員

○越山

峻資

京都大学

学生員

賀島

諒太

京都大学工学研究科

正会員

岸田

潔

1. はじめに

小土被り地山において、地下水の影響下でのトンネル掘削中に崩壊に至った例が報告されている¹⁾。地下水水面下でトンネルを掘削すると、掘削に伴う排水により間隙水圧が変化し、地盤の応力状態が変化すると考えられる。そのため、小土被りトンネルの掘削挙動の予測には、地下水挙動に伴う応力の変化を考慮することが重要である。排水による間隙水圧の現象により有効応力が増加し、地盤が塑性化しやすくなると考えられるが、既往研究では掘削中の地盤の応力状態について詳細に検討したものは少ない。そこで本研究では、小土被りトンネルについて、地下水挙動による地盤の応力状態の変化が掘削挙動に与える影響を対象に、数値解析により検討を行う。

2. 解析概要

解析は、有限差分法による弾塑性解析で実施する。本稿では、要素解析、全応力解析 (Case-1)、および有効応力解析 (Case-2) を実施する。要素解析は、排水三軸圧縮試験を想定した一要素の解析である。得られた偏差応力-軸ひずみ関係 (図-1) から、限界ひずみ²⁾ ϵ_0 と限界せん断ひずみ³⁾ γ_0 を求める。これらは、実施工でトンネルの安定性を評価するために広く用いられている指標である。要素解析の結果から、過圧密比が2の場合では、 $\epsilon_0 = 0.264\%$ 、 $\gamma_0 = 0.351\%$ となる。

解析モデルを図-2に示す。トンネル直径 $D = 10\text{ m}$ とし、本検討では土被りは D とする。既往研究^{4), 5)}を参考に、トンネル下方に $4D$ 、側方に $12D$ の解析領域を設定し、モデル下方にピン支承、側方にローラー支障を設定する。Case-2 では、水理境界として、解析領域の上端と右端を静水圧での水圧固定条件に、解析領域の下端と左端を非排水条件に設定する。また、トンネル境界での水理境界は、掘削の進行に合わせて、応力解放率が0%では非排水、40%で排水条件となるよう線形的

に間隙水圧を変化させた。地盤は修正 Cam-Clay モデルによる弾塑性体として表現する。また、地下水の挙動は Darcy 則と Biot の多孔質弾性体理論⁶⁾により表現する。解析に用いた物性値を表-1に示す。OCR = 2の地盤について解析を行い、結果を比較、検討する。

3. 解析結果と考察

応力解放率と天端の変位の関係 (地山特性曲線) と、

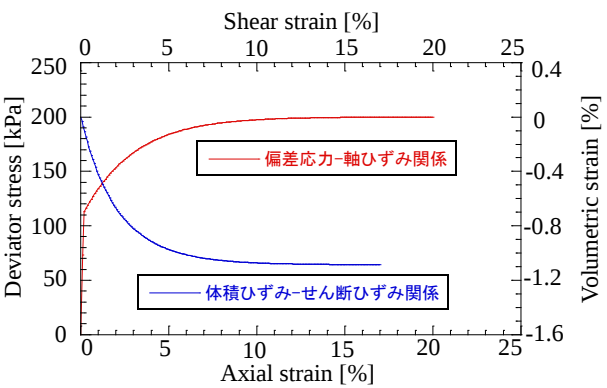


図-1 要素解析の結果

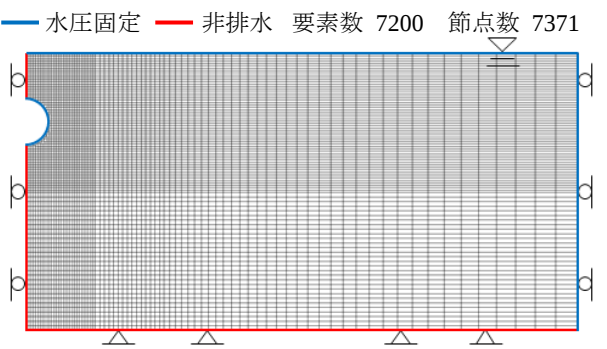


図-2 解析メッシュ、解析領域と境界条件

表-1 本解析で用いた物性値

乾燥密度 [kg/m ³]	1805	膨潤指数	0.0022
土粒子の比重	2.65	過圧密比	2
空隙率	0.319	側圧係数	0.5
限界状態の応力比	1.2	ポアソン比	0.33
圧縮指数	0.03	透水係数 [cm/s]	1.0×10 ⁻⁴

キーワード トンネル、数値解析、小土被り、土-水連成解析、地山特性曲線

連絡先 〒615-8246 京都市西京区京都大学桂 C1-2 338 号室 京都大学大学院工学研究科 TEL : 075-383-3232

各ケースでの限界ひずみを図-3 に示す。有効応力解析 (Case-2) では、応力解放率 40 %ほどで変位が大きくなりはじめ、最終的に全応力解析 (Case-1) と比較して著しく大きな変位が生じている。また、Case-1 では応力解放率 70 %ほどで、Case-2 では応力解放率 60 %ほどで、それぞれ限界ひずみに達している。

応力解放率 80 %における最大せん断ひずみの分布を図-4 に示す。Case-2 ではCase-1 より全体的にひずみが大きく、限界せん断ひずみに達している範囲も広い。

トンネルの天端とスプリングライン (以下 S. L.) における、各ケースでの有効応力経路を図-5 に示す。応力解放率 5 %ごとに点をプロットしている。Case-1 では、天端は降伏状態に達しておらず、S. L.は応力解放率 70 %で降伏状態に達している。Case-1 では、応力解放率 70 %程度までは、地盤は弾性挙動に留まっていると考えられる。Case-2 では、天端は降伏状態に達していないが、S. L.は応力解放率 40 %で降伏に至っている。地下水の影響で Case-1 より小さい応力解放率で地盤が塑性化しており、結果として Case-1 より天端変位や最大せん断ひずみが大きくなっていると考えられる。また、この時の応力解放率は、地山特性曲線が限界ひずみに達する時の応力解放率より小さいため、限界ひずみ到達前に地山が塑性化しており、トンネルの安定性が低下することへの注意が必要だと考えられる。一方で、Case-2 では応力解放率 0 ~ 40 %で平均有効応力が増加して応力経路が限界状態線から遠ざかっていることから、排水により有効応力が増加することで、応力状態はせん断破壊に対しては安全になっていると考えられる。

4. おわりに

本研究では、小土被りトンネルの掘削に伴う地下水の排水が、地盤の応力状態とトンネル掘削挙動に与える影響を、数値解析により検討した。解析結果から、排水により間隙水圧が減少して有効応力が増加し、地盤が塑性化しやすくなることがわかった。また、地下水面下での小土被りトンネルの掘削では、限界ひずみによる評価だけでは、トンネルの安全性を判断するには不十分な可能性があることがわかった。

参考文献

- 1) 鉄道・運輸機構：北陸新幹線，柿原トンネル陥没事故について，<https://www.jrnt.go.jp/08-2Press/pdf/h29/pressh2909>

08.pdf (2019 年 3 月 28 日閲覧)，2017。

- 2) 櫻井春輔：トンネル工事における変位計測結果の評価法，土木学会論文報告集，No.317，pp.93-10，1982。
- 3) 櫻井春輔ら：トンネルの安定性評価のための限界せん断ひずみ，土木学会論文集，No.493/III-27，pp.185-188，1994。
- 4) 田村武，足立紀尚：トンネル掘削解析における領域設定について，土木学会論文集，No.701/III-58，pp.231-242，2002。
- 5) Yoo, C.: Ground settlement during tunneling in groundwater drawdown environment – Influencing factors, Underground Space, Vol.1, No.1, pp.20-29, 2016。
- 6) Biot, M. A.: General theory of three-dimensional consolidation, Journal of Applied Physics, Vol.12, No.2, pp.155-164, 1941。

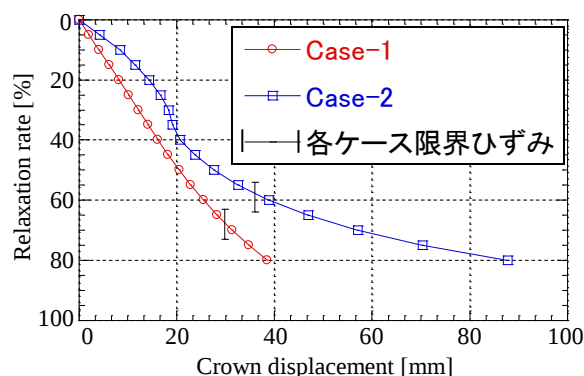


図-3 地山特性曲線

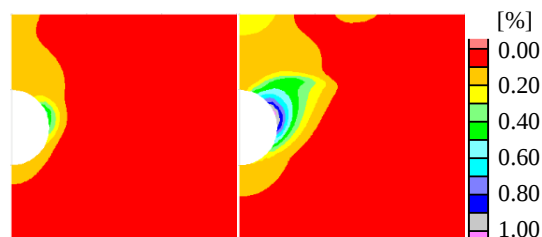


図-4 最大せん断ひずみの分布 (応力解放率 80 %)

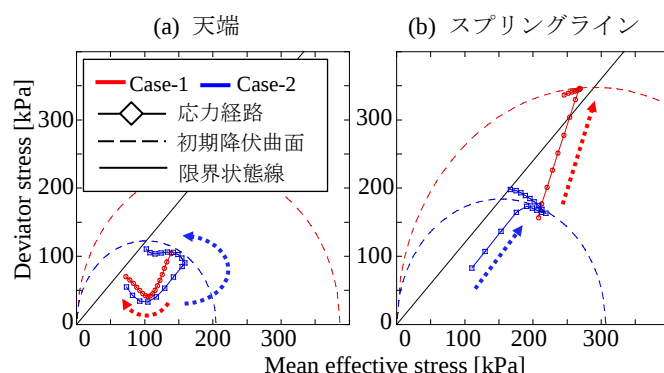


図-5 有効応力経路