

第Ⅲ部門

地下水面下での小土被りトンネル掘削における過圧密比の影響

京都大学大学院工学研究科 学生員 ○越山 峻資
 京都大学大学院工学研究科 学生員 賀島 諒太
 京都大学大学院工学研究科 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事例が報告されている¹⁾。小土被り地山はその成因により様々な過圧密比 (OCR) をとり、OCR はトンネルの掘削挙動に大きく影響する。そのため、小土被りトンネルの掘削挙動の予測には、地山の OCR を考慮することが重要である。OCR が小さいほど地盤が塑性化しやすくトンネルが不安定になると考えられるが、既往研究では OCR を考慮した研究は少なく、特に地下水の影響下での掘削挙動に対する OCR の影響は十分に検討されていない。そこで本研究では、地下水の影響下での小土被りトンネル掘削挙動に OCR が与える影響を、数値解析により評価する。また、要素解析を実施し、トンネルの安定性を評価する指標として限界ひずみと限界せん断ひずみを算定する。

2. 解析手法

掘削解析は、有限差分法 (FLAC2D) による弾塑性解析で実施する。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、OCR = 1 では、 $\epsilon_0 = 1.76\%$ 、 $\gamma_0 = 3.99\%$ となり、OCR = 2 では、 $\epsilon_0 = 0.264\%$ 、 $\gamma_0 = 0.351\%$ となる。

解析のモデルを図-2 に示す。トンネル直径を $D = 10\text{ m}$ 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、モデル側方にローラー支承、下方にピン支承を設定する。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固定した排水条件に、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排水条件を変化させた。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 = 1 (正規圧密) と OCR = 2 (過圧密) の地盤について解析を行い、結果を比較、検討する。

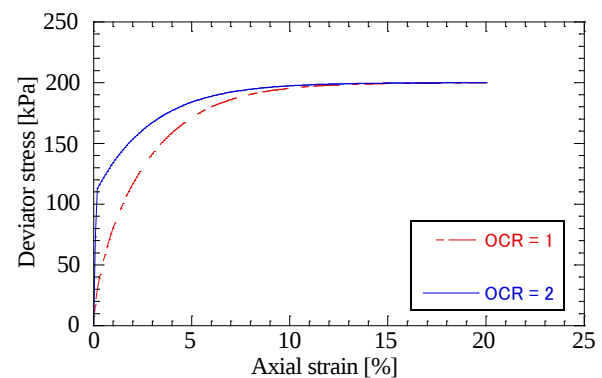


図-1 要素解析の結果

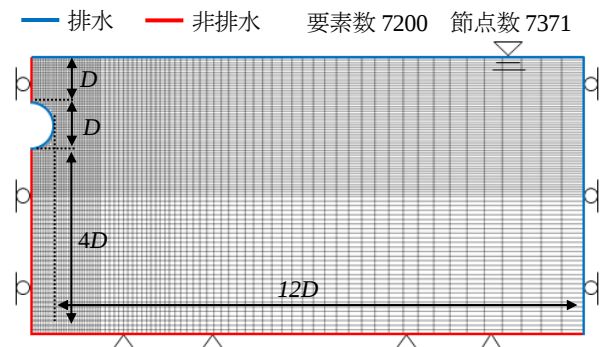


図-2 解析メッシュ、解析領域と境界条件

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	OCR	1 or 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}

Shunsuke KOSHIYAMA, Ryota KASHIMA and Kiyoshi KISHIDA

koshiyama.shunsuke.47s@st.kyoto-u.ac.jp

トンネル掘削過程は、トンネル壁面に初期応力場となるように応力を作用させ、その応力を減少させること（応力解放）により表現する。本検討では、応力解放率が 40 % で切羽が到達すると想定する。

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、各ケースでの限界ひずみを図-3 に示す。いずれのケースでも、OCR が小さいほど変位が大きい。また、いずれの OCR でも、有効応力解析 (Case-2) では全応力解析 (Case-1) より変位が大きい。OCR = 2 のケースにおいて、Case-1 では地盤がおおよそ弾性挙動に留まっているのに対し、Case-2 では地盤の変位が大きく塑性挙動を示している可能性があり、地下水の影響の有無により地盤挙動が大きく異なると考えられる。OCR = 1 の Case-1・2 と OCR = 2 の Case-2 では、限界ひずみに達する前に地盤が塑性挙動を示していることから、実際のトンネルの安定性と、限界ひずみによる評価が一致しない可能性がある。

つぎに、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。いずれのケースでも、OCR が小さいほど全体的にひずみが大きい。また、いずれの OCR でも、Case-2 では Case-1 より全体的にひずみが大きい。OCR = 1 のケースでは、Case-1 と比べて Case-2 でひずみの大きい領域が側方に広がる傾向があり、トンネル側方の安定性が低下している可能性があると考えられる。また、OCR = 1 のケースでは、限界せん断ひずみに達した領域が見られないが、GRC から地盤が塑性化していると考えられることから、実際のトンネルの安定性と、限界せん断ひずみによる評価とが一致しない可能性がある。OCR = 2 のケースでは、Case-1 と比べて Case-2 のひずみが著しく大きく、地下水の影響の有無により地盤挙動が大きく異なると考えられる。

4. おわりに

本研究では、地下水の影響下での小土被りトンネル掘削挙動に対する OCR の影響を、数値解析により検討した。まず、OCR が小さいほどトンネルが不安定になることがわかった。つぎに、OCR = 2 前後の地盤では、地下水の影響の有無により地盤挙動が大きく異なることがわかった。また、OCR の小さい地盤では、実際のトンネルの安定性と、限界ひずみ・限界せん断ひずみによる評価とが一致しない可能性があることがわかった。最後に、OCR が小さく地下水の影響を受ける地盤では、特にトンネル側方

の安定性が低下する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、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.93-100，1982。
- 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。

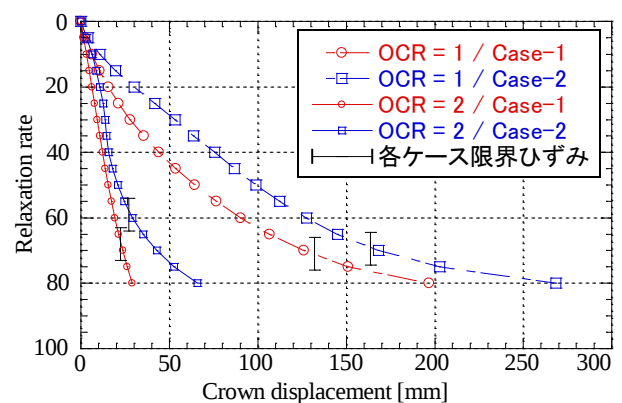
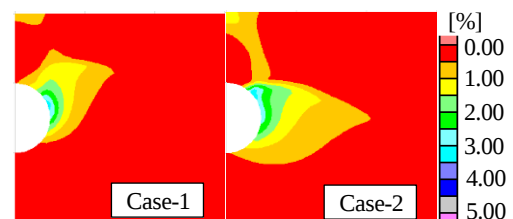
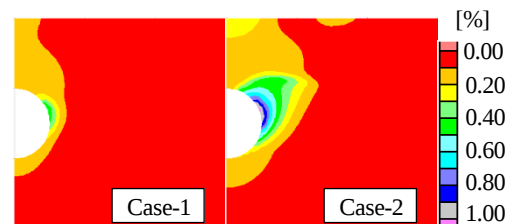


図-3 地山特性曲線



(a) OCR = 1 ($\gamma_0 = 3.99\%$)



(b) OCR = 2 ($\gamma_0 = 0.351\%$)

図-4 最大せん断ひずみの分布（応力解放率 80 %）