小土被りトンネルの土-水連成 掘削解析における過圧密比の影響

越山 峻資¹・岸田 潔²

1学生会員 京都大学修士課程 工学研究科都市社会工学専攻(〒615-8540京都市西京区京都大学桂) E-mail: koshiyama.shunsuke.47s@st.kyoto-u.ac.jp

²正会員 京都大学教授 工学研究科都市社会工学専攻(〒615-8140京都市西京区京都大学桂) E-mail: kishida.kiyoshi.3r@kyoto-u.ac.jp

小土被り地山におけるトンネル掘削では、掘削に伴う排水により間隙水圧が減少し、地盤の応力状態が 変化する.また、小土被り地山はその成因により様々な過圧密比を示す.そのため、小土被りトンネルの 掘削挙動を予測するには、地下水と過圧密比が地盤に与える影響を考慮することが重要である.既往研究 でも地下水を考慮した土-水連成の掘削解析が行われてきたが、これらは過圧密比を考慮できないモデル での解析が主であった.本稿では、小土被り地山を修正 Cam-Clay モデルで表現して土-水連成の有効応力 解析を行った.掘削解析の結果について、地山特性曲線、応力経路、せん断ひずみの分布等から検討し、 過圧密比が地下水面下での小土被りトンネル掘削に与える影響について考察した.

Key Words: tunnel, coupling analysis, shallow overburden, overconsolidation ratio

1. 序論

小土被り地山におけるトンネル掘削の崩落では、地下 水の影響が指摘されているケースがある¹⁾.地下水面下 でトンネルを掘削すると、トンネル掘削に伴う排水によ り間隙水圧が減少するため、地盤の応力状態が変化する と考えられる.排水や浸透の条件によっては、全体的あ るいは局所的に応力状態が急変する可能性がある.また、 小土被り地山は成因によって様々な過圧密比(OCR)を示 し、OCR は地盤挙動に大きく影響すると考えられる.

したがって、小土被りトンネルの掘削解析にあたっては 地下水と過圧密比の影響を考慮することが重要であると 考えられる. Khalid²は実際の事例¹⁾をもとに小土被りト ンネル掘削の全応力解析を実施し、OCR を含む様々な 材料パラメータが掘削時の地山挙動に与える影響を検討 したが、地下水の挙動は考慮されていなかった.そこで 本研究では、地下水面下での小土被りトンネル掘削に過 圧密比が与える影響を対象に、土-水連成の掘削解析に より検討を行った.

本研究では、有限差分法による弾塑性解析を実施した. はじめに要素解析を行い、実施工でトンネルの安全性を 定量的に評価する指標として用いられる限界ひずみ ϵ_0^{3} , ⁴と限界せん断ひずみ γ_0^{5} を求めた.つぎに掘削解析を行 い,限界ひずみと限界せん断ひずみを用いてトンネルの 挙動を評価するとともに、有効応力経路などとの比較に よって掘削時の地盤の状態について検討した.地盤は修 正 Cam-Clay モデルによる弾塑性体として表現し、地下 水の挙動は Darcy 則と Biot の多孔質体理論により表現し た.

2. 解析条件

解析に用いた物性値を表-1 に示す.物性値は要素解 析と掘削解析とで共通である.

要素解析のモデルを図-1 に示す. 排水三軸圧縮試験 を想定した一要素での解析であり、モデル側方から拘束 圧 100 kPaを、上端からひずみ速度 1.0×10^3 %/cycle を与 えることにより試験を表現した.

掘削解析のモデルを図-2 に示す.均一な地盤の中に, トンネル直径 D=10mで全断面掘削することを想定した. 既往研究など^{の~8}を参考に,トンネルの下方に4D,右 方に12Dの解析領域を設定し,領域の側方にローラー 支承を,下方にピン支承を設定した.水理境界条件につ いては,解析領域の上端と右端を静水圧で固定した水圧 固定条件に,下端と左端を非排水条件に設定した.トン ネル側壁は、掘削の進行に合わせて、応力解放率0%で は静水圧に、40%では排水条件となるように、線形的に 水理境界条件を変化させた. 土被りH=Dの地盤につい てOCR=1,2,および4の条件で全応力解析と有効応力解 析を行うとともに、H=Dでの挙動をより詳細に評価す るため、H=05DおよびH=2Dの地盤についてもOCR= 2の条件で有効応力解析を行った. トンネルの掘削過 程は、トンネル壁面に初期応力場となるよう応力を作用 させ、その応力が応力解放率にしたがい減少するよう設 定することで表現した. 本稿では、応力解放率が 40% のときにモデル化した断面に切羽が到達すると仮定した.

3. 結果と考察

k

Δ

(1) 要素解析

要素解析から得られた偏差応力-軸ひずみ関係-体積ひ ずみ関係を図-3 に示す.ここから、つぎの式によって 限界ひずみと限界せん断ひずみを求めることができる.

表-1 解析に用いた物性値

1805 0.0022 乾燥密度 [kg/m³] 膨潤指数 2.65 1, 2, and 4 OCR 土粒子の比重 0.319 0.5 空隙率 側圧係数 0.33 限界応力比 1.2 ポアソン比 圧縮指数 0.03 透水係数 [cm/s] 1.0×10^{-4} ひずみ速度 C 拘束圧

1 m



1 m

 Δ

$\varepsilon_0 = q_f / E \tag{1}$

$$\gamma_0 = (1 + \nu)q_f / E_{50} \tag{2}$$

ここで、 q_f はピーク時の偏差応力、vはポアソン比、Eは初期弾性係数、 E_{50} は 50%強度割線弾性係数である. 偏差応力-軸ひずみ関係から、各 OCR について表-2 に示 す結果が得られた.

(2) 掘削解析

以下に掘削解析の結果を示す.はじめに*H*=Dのケースでの解析結果を示し、つぎに*H*を変えたケースの結果との比較を示す.

a) H=Dのケース

全応力解析と有効応力解析で得られた地山特性曲線 (GRC)を図-4 に示す.いずれの OCR においても,有効 応力解析では全応力解析よりも大きな変位が生じている ことが分かる.また,OCR が小さいほど変位が大きく なることが確認できる.OCR = 1 の地盤は正規圧密であ るため,載荷された時点で地盤が降伏して塑性ひずみを 生じる.そのため OCR = 1 の地盤では掘削の初期から応



図-3 要素解析による偏差応力-軸ひずみ-体積ひずみ関係

表-2 要素解析から求めた限界ひずみおよび限界せん断ひずみ

OCR	1	2	4
ε ₀ [%]	1.76	0.264	0.311
γ ₀ [%]	3.99	0.351	0.414



図-4 *H*=Dの解析でのGRC

カ状態の変化に伴い地盤が塑性化し、大きな変位が生じ ていると考えられる. OCR = 2の地盤では、有効応力解 析のケースのみ途中から顕著に変位が生じており、応力 解放率 40 %程で地盤が塑性化していると考えられる. OCR = 4 の地盤では、GRC が直線的であり、地盤が弾性 挙動に留まっていると考えられる.

つぎに、限界ひずみによるトンネルの安定性の評価を 行う.実施工では切羽が到達してから変位の計測をはじ めるので⁹,本稿でも、先行変位を除いて、切羽到達時 点(応力解放率 40%)を起点に計測した変位を限界ひ ずみ分の変位と比較する.OCR = 1およびOCR = 2のケ ースでは限界ひずみに到達し、OCR = 4のケースでは到 達しなかった.OCR = 1の全応力解析・有効応力解析, およびOCR = 2の有効応力解析のケースでは、限界ひず みに到達する時点ですでに大きな変位が生じている.限 界ひずみ到達前に地盤が塑性化して、トンネルの安定性 が低下している.本研究のような小土被り条件では、限 界ひずみにより危険であると判断するよりも早い段階で、 トンネルが不安定化していることになる.

応力解放率80%における、トンネル周辺での最大せん断ひずみの分布を図-5に示す. OCRによって凡例の

幅が異なるため注意されたい. いずれの OCR において も、有効応力解析では全応力解析よりも全体的にひずみ が大きいことが分かる. また, OCR が小さいほどひず みが大きくなることが確認できる. OCR = 1および4の 地盤では、有効応力解析では全応力解析と比較して、ひ ずみの大きい範囲が横方向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 = 2 の地盤では, 有効応力解析では全応 力解析と比較してひずみが著しく大きい. つぎに, 限界 せん断ひずみによるトンネルの安定性の評価を行う. OCR = 1の地盤では、限界せん断ひずみに達している領 域が確認されないが、この時点で大きな変位が生じてい ることは GRC からも明らかであり、トンネルの安定性 が低下していると考えられる.本研究のような小土被り 条件では、限界ひずみにより危険であると判断するより も早い段階で、トンネルが不安定化していることになる. また, OCR = 2の地盤では, 有効応力解析では全応力解 析に比べて限界せん断ひずみに達している範囲が広く、 トンネルの安定性がより低いと考えられる. OCR = 4の 地盤では、限界せん断ひずみに達している領域が確認さ れないことから、地盤が弾性挙動に留まっており、トン



上段が全応力解析,下段が有効応力解析,黒の点線で 限界せん断ひずみに達したおおよその範囲を示す. 図5 最大せん断ひずみの分布(応力解放率80%)

ネルも安定していると考えられる.

各ケースにおける,トンネル天端・トンネル斜め上 方・スプリングラインでの全応力経路・有効応力経路を 図-6に示す.応力解放率5%ごとに点をプロットしてい る.OCR が小さいほど,応力経路が降伏曲面に達しや すく,地盤が塑性化しやすいことが確認できる.OCR が小さい地盤ほど変位や最大せん断ひずみが大きくなる のは,地盤が塑性化して塑性ひずみが生じやすいためで あると考えられる.また,有効応力解析では,掘削の初 期に平均有効応力が大きく増加する傾向が認められる.

これは掘削に伴う排水により間隙水圧が減少することが 理由であると考えられる.この平均有効応力の増加によ って、有効応力解析では全応力解析に比べ、応力経路が 降伏曲面に到達しやすい傾向がある.特に、OCR=1・2 のケースでこの影響が顕著である.OCR=1のケースで は、応力状態は初期から降伏曲面上にあり、排水に伴う 有効応力の増加によって、降伏曲面が著しく拡大するよ うに応力状態が変化している.OCR=2のケースでは、 全応力解析の応力経路はおおむね降伏曲面の内側に留ま っているのに対し、有効応力解析の応力経路は応力解放

率40%ほどで降伏局面に達している. OCR=2のケース について図-4のGRCを見ると、全応力解析ではGRCが 直線的であるのに対し、有効応力解析では GRC が応力 解放率 40%ほどで折れ曲がって大きな変位が出ている ことが確認でき、このときの応力解放率は応力経路が降 伏曲面に達したときの応力解放率とほぼ等しい. OCR =2の地盤では、全応力解析では地盤がほとんど塑性化 しないのに対し、有効応力解析では排水に伴う平均有効 応力の増加によって地盤が塑性化しやすくなり、大きな 塑性ひずみを生じる. このため、全応力解析と有効応力 解析とで、GRC や最大せん断ひずみに大きな差異が生 じていると考えられる. したがって、トンネル掘削に伴 う地下水の排水があった場合、間隙水圧の減少によって 平均有効応力が増加し、地盤が塑性化しやすくなること で、トンネルの安定性が低下し、大きな変位やせん断ひ ずみが生じる可能性がある.一方で、排水に伴い平均有 効応力が増加することで,応力経路が限界状態線から遠 ざかるため、有効応力解析では全応力解析に比べ、せん 断破壊に対しては安全側になっていると考えられる.他 に、OCR=4のケースでは、全応力解析・有効応力解析





ともに応力経路が降伏曲面の内側に留まっている.両者 とも地盤が塑性化しなかったため,GRC や最大せん断 ひずみの分布にも大きな差が生じなかったと考えられる. また,トンネル斜め上および S.Lの応力経路を見ると, 全応力解析では破壊または降伏しなかった OCR でも, 有効応力解析では破壊または降伏している場合があり, 地下水の排水があった場合,特に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.

以上をまとめると、地下水面下での小土被りトンネル の掘削においては、地盤の OCR が小さいほど地盤が塑 性化しやすくなるため、トンネルの安定性が低下すると 考えられる.また、地下水の排水があった場合、間隙水 圧の減少に伴う平均有効応力の増加によって地盤が塑性 化しやすくなるため、トンネルの安定性が低下する可能 性があると考えられる.特に,OCR = 2程度の過圧密な 地盤においては、排水の有無によって地盤が塑性化する か弾性に留まるかが変わり、地山挙動に大きな差が生じ る可能性があると考えられる.一方で、平均有効応力の 増加によって応力経路が限界状態線から遠ざかるため, せん断破壊に対しては安全になると考えられる.また, 小土被りで OCR の小さい地盤では、限界ひずみ・限界 せん断ひずみによって危険であると判断するより前に地 盤が塑性化して大きな変位やせん断ひずみが生じる可能 性があるため、早い段階でトンネルの安定性の低下を警 戒することが重要だと考えられる. 加えて、地下水の排

水の影響を受けるトンネルでは、特にトンネル側方の安定性が低下する可能性があると考えられる.

b) 土被りの影響

H = Dの地盤での解析における地山挙動をより詳細に 検討するため、比較としてH = 0.5 DおよびH = 2 Dの地 盤についても、OCR = 2の条件で有効応力解析を行った. 以下に結果を示す.

各土被り厚での GRC を図-7 に示す. H = 0.5 DのケースとH = Dのケースとは類似した挙動を示している. 応力解放率 40%から急激に変位が増加しはじめ,最終的にはH = 2Dのケースよりも大きな変位が生じている.



図-7 各土被り厚での GRC

H=0.5DとH=Dの地盤は、H=2Dの地盤より変位を生 じやすい状態にあると考えられる. 応力解放率 20%か ら60%までH=2Dのケースで他のケースよりも大きな 変位が生じているのは、排水に伴う圧密沈下の影響だと 考えられる. 圧密沈下による変位の大きさは土被り厚に 依存するため、土被りの大きなケースで土被りの小さな ケースよりも大きな変位が生じていると考えられる.

応力解放率 80%における,各土被り厚での地表面変 位の分布を図-8に示す.グラフの左端が解析メッシュ 左端・トンネル直上にあたり,グラフの右端が解析メッ シュ右端にあたる. *H=0.5 D*および*H=D*のケースでは, トンネルに近づくにつれて地表面変位が急激に増加し, トンネル直上がすり鉢状に沈下している.一方で,*H=* 2*D*のケースでは,トンネルからの距離に対して地表面 変位の大きさがなだらかに変化し,全体が撓んだように 沈下している. *H=0.5 D*および*H=D*のケースでは掘削 によるゆるみ域が地表面に達し,*H=2 D*のケースでは ゆるみ域が地表面に達していない可能性があると考えら れる.

各土被り厚での,応力解放率 80%におけるトンネル 周辺の最大せん断ひずみの分布を図-9に示す. H=0.5D およびH=Dのケースでは,H=2Dのケースに比べてト ンネル周辺のせん断ひずみが著しく大きく,加えて地表 面までせん断ひずみの大きな範囲が連続していることが 確認できる.H=0.5DおよびH=Dのケースではゆるみ 域が地表面に達し,H=2Dのケースではゆるみ域が地



図-8 各土被り厚での地表面変位(応力解放率80%)



図-9 各土被り厚での最大せん断ひずみの分布 (応力解放率 80%)

表面に達していないと考えられる.

以上のことから, *H*=0.5*D*および*H*=*D*のケースでは ゆるみ域が地表面に達していたと考えられ, *H*=*D*の地 盤での解析は変位やせん断ひずみが生じやすい状態であ ったと考えられる.

4. 結論

本研究では、三つの過圧密比に対して、小土被り地 山・地下水面下でのトンネル掘削時の地山挙動について 検討した.要素解析・全応力解析・有効応力解析を実施 し、GRC や有効応力経路などについて考察した結果, 以下の知見が得られた.

まず、地下水面下での小土被りトンネルの掘削に置い ては、OCR が小さいほど地盤が塑性化しやすくなるた め、トンネルの安定性が低下する.また、掘削に伴う地 下水の排水によって間隙水圧が減少し平均有効応力が増 加するため、地盤が塑性化しやすくなる.特にOCR=2 前後の軽度に過圧密な地盤においては、排水の有無によ り地盤が塑性化するか弾性に留まるかが変わり、地山挙 動が大きく変化する.加えて,OCRの小さな地盤では, 限界ひずみ・限界せん断ひずみによって危険だと判断さ れるよりも前に大きな変位が生じる可能性があり、早い 段階でトンネルの安定性の低下を警戒することが重要に なる.また、地下水の排水の影響を受けるトンネルでは、 特にトンネル側方の安定性が低下している可能性がある. なお、本研究における H=Dの解析条件では、掘削に伴 うゆるみ域が地表面に達しているために、地山は変位が 生じやすい状態にあった.

参考文献

- 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.jrtt.go.jp/08-2Press/pdfh29/pressh290908.pdf (2019年8月1日閲覧).
- Khalid, M. S.: Numerical Study on the Ground Reaction Curves for Shallow Overburden Tunnels, PhD Thesis, Kyoto University, 2018.
- 3) 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.
- 4) 櫻井春輔,川嶋幾夫,大谷達彦:岩石の限界ひずみに対 する環境要因の影響について,土木学会論文集, No.463 /Ⅲ-22, pp.177-180, 1993.
- 5) 櫻井春輔,川嶋幾夫,大谷達彦,松村真一郎: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.
- 6) 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.
- 1) 土木学会:山岳トンネルにおける模型実験と数値解析の 実務, p.160, 2006.
- Yoo, C.: Ground settlement during tunneling in groundwater drawdown environment – Influencing factors, *Underground Space*, Vol.1, No.1, pp.20-29, 2016.
- 2) 土木学会:トンネル標準示方書 山岳工法・同解説, p. 254, 2006.

(2019.8.9受付)

EFFECTS OF OVERCONSOLIDATION RATIO ON HYDRO-MECHANICAL COUPLING ANALYSIS OF SHALLOW OVERBURDEN TUNNELS

Shunsuke KOSHIYAMA and Kiyoshi KISHIDA

During excavation of shallow overburden tunnels, drainage of groundwater from tunnels can affect stress states of the ground. Overconsolidation ratio (OCR), that differs depending on the origin of the ground, also has strong effects on the ground behavior. Therefore it is important to consider the effects of groundwater and OCR to predict the behavior of shallow overburden tunnels. In this study, hydro-mechanical coupling analyses using Modified Cam-Clay model were performed. From ground reaction curves, stress pathes, distribution of shear strain and others, the effects of OCR on shallow overburden tunnels under groundwater were discussed.