

# トンネル掘削に伴う地下水排水影響を考慮した 地表面沈下予測解析について

鈴木 健太<sup>1</sup>・林 久資<sup>2</sup>・進士 正人<sup>3</sup>

<sup>1</sup>学生会員 山口大学大学院 創成科学研究科 (〒775-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)  
E-mail: a017veu@yamaguchi-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 山口大学大学院助教 創成科学研究科 (〒775-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)  
E-mail: hayashi@yamaguchi-u.ac.jp

<sup>3</sup>フェロー会員 山口大学大学院教授 創成科学研究科 (〒775-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)  
E-mail: shinji@yamaguchi-u.ac.jp

都市部の地山条件は小土被りかつ未固結であることが多く、トンネル掘削による地表面沈下の影響が大きく生じることがある。また、トンネルが掘削される地山は地質の違いや風化により不均質であることがあり、トンネル掘削に伴う地下水排水によって地山の圧密沈下が発生することも考えられる。そこで本研究では、トンネル掘削による地山変形挙動と同時にトンネル掘削に伴って地下水が湧水として排出された場合の地表面沈下影響の把握を目的とし、トンネル掘削による力学的影響およびトンネル掘削による排水に伴う地下水位低下を考慮した連成解析を用い、分析を行った。この結果、地山条件の違いが地下水の排水挙動に影響を与えることが分かり、地表面沈下量にも差異を生む可能性があることが分かった。

**Key Words:** tunnel, ground surface settlement, groundwater

## 1. はじめに

近年、補助工法の進歩や施工コストの低減などの理由から、都市部においても山岳工法によるトンネル掘削が増加している。しかし、都市部では地質条件が小土被り・未固結地山であることが多いため、図-1の概略図のようにトンネル掘削による地表面沈下の影響が大きく生じることがある。地表面沈下が大きく生じるケースとしては、都市部における地表面近傍の地山の中には、宅地造成のための盛土材や風化が進行している地山が不均質に分布していることがあり、トンネル掘削による応力再配分過程に伴うグラウンドアーチの形成が十分に行えないことや、トンネル掘削に伴い、盛土部や風化帯から地下水が湧水として排水されることなどがある。このように、小土被り・未固結地山の地質条件下ではトンネル掘削による応力再配分に伴う変位挙動に加え、地下水位低下に起因する圧密現象が生じる可能性があることを想定するべきである。さらに、地表面に多くの構造物が存在する都市部では事前の地表面沈下量の予測が重要であると言える。

例えば、広島高速道路1号福木トンネルは、最大土被

り45mでトンネル直上に変電所をはじめとした重要構造物が存在し、地下水位がトンネル天端25~30m上方の高い位置にある条件下でトンネル掘削を行うことが計画された。このトンネルでは、トンネル掘削に伴い大きな地表面沈下が発生したことが報告された。分析の結果、この地表面沈下の大半は基盤岩である花崗閃緑岩盤の微細な割れ目が地下水位の低下により即時的に体積圧縮したためと報告されている<sup>1)</sup>。

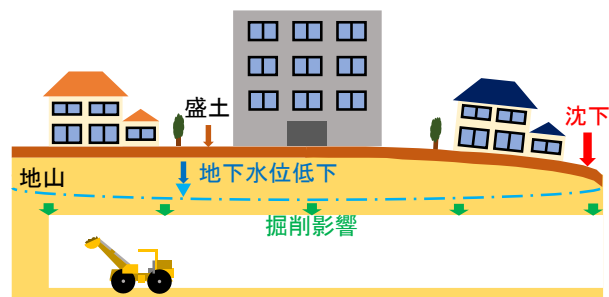


図-1 地表面沈下の概略図

現状、このような地表面沈下の予測において、一般的に用いられている解析手法が全応力解析であるが、トンネル掘削によって地下水位低下が懸念される場合には、地下水を考慮した数値解析手法が望ましい。しかし、解析コストや解析時間の観点から用いられているケースは少ない。また、トンネル計画・設計段階において、全応力解析、地下水を考慮した解析のどちらが好ましいかを判断する指標は現在において見られない。

そこで本研究では、都市部の地質条件として挙げられる小土被り・未固結地山においてトンネルが掘削される場合の地表面沈下をトンネル掘削による応力再分配に起因するものと、掘削に伴って地下水が湧水として排水された場合の圧密影響によるものの両者を考慮した連成解析を行い、トンネル掘削による地下水排水が地表面沈下に及ぼす影響が大きい地質条件と限定的な地質条件について検討を行った。

## 2. 解析方法

本研究では、有限差分法 3 次元数値解析コード (FLAC3D) を用いた。図-2 に解析に用いたモデル図を示す。トンネルは半径 5m の上半部半断面をモデル化した。解析領域は幅 108m、高さ 77m とし、地表面付近に 5m の盛土層を設けた。この盛土層は地下水低下によって圧密現象が生じることを想定した。モデルの奥行きは 1m とし、2次元平面ひずみの挙動を呈するものとした。

盛土と地山の力学モデルは弾性体としており、表-1 に用いた物性値を示している。地質条件の違いとして、地山の風化度合いを考慮することで比較を行った。風化度合いの違いを再現するために、盛土下部地山の風化が限定的（弱風化ケース）と風化が進行している（強風化ケース）の 2通りの解析を行った。ちなみにこれらの違いとしては、風化が進行している地山では風化に伴って弾性係数が減少し、間隙率と透水係数が増加したと想定し、弾性係数と間隙率および透水係数を変化させた。地下水の弾性係数に関しては、地山と同値に設定した。

境界条件は地表面以外をローラー固定とし、水理境界は地下水位が地表面までであるものとした上で、地下水の供給を考慮するためにモデル右端の間隙水圧を固定した。

解析手順は、まず、地山と地下水の物性値を与え、初期応力解析を行った後に、トンネル掘削解析を実施した。また、トンネル掘削部の間隙水圧を 0 にすることで排水を再現し、これを排水が収束するまで行った。

## 3. 解析結果および考察

まず、各ケースにおける排水の収束と時間の関係を確認するために、トンネル直上領域における排水開始からの間隙水圧分布を示す。間隙水圧の取得位置は図-2 の黄線の枠で示す地表面からトンネル天端部までの地点で、その距離は 20m である。

まずは弱風化ケースに着目し、図-3 に弱風化ケースの間隙水圧分布を示す。この図より、盛土下部の地山部分では排水時間を経るごとに初期間隙水圧の赤線から低下が見られ、排水時間 14 日経過後には変化がほぼ見られなくなった。これより、弱風化ケースに関しては排水時間 14 日後の時点において、排水は短期的に見ると収束状態にあり、排水が完了したと判断した。一方で、間隙水圧が定常状態に至ったと判断した排水から 14 日経過した時点において、盛土部の間隙水圧は初期間隙水圧から変化していないことが読み取れる。

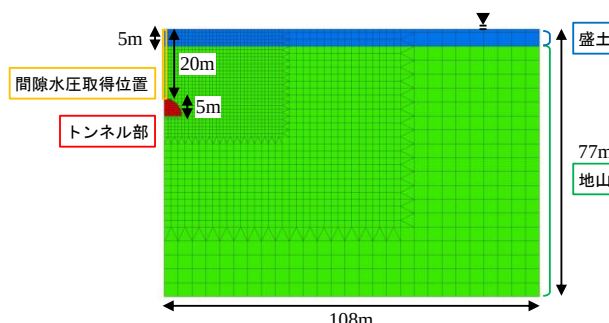


図-2 解析モデル

表-1 入力物性値

|        |                             |                        |                             |                        |
|--------|-----------------------------|------------------------|-----------------------------|------------------------|
| 盛土     | 単位体積重量 (kN/m <sup>3</sup> ) |                        | 20                          |                        |
|        | 弾性係数 (MPa)                  |                        | 11.6                        |                        |
|        | ポアソン比                       |                        | 0.35                        |                        |
|        | 透水係数 (cm/s)                 |                        | 1.0 × 10 <sup>-7</sup>      |                        |
|        | 間隙率                         |                        | 0.44                        |                        |
| 弱風化ケース |                             |                        | 強風化ケース                      |                        |
| 地山     | 単位体積重量 (kN/m <sup>3</sup> ) | 21                     | 単位体積重量 (kN/m <sup>3</sup> ) | 21                     |
|        | 弾性係数 (MPa)                  | 170                    | 弾性係数 (MPa)                  | 20                     |
|        | ポアソン比                       | 0.35                   | ポアソン比                       | 0.35                   |
|        | 透水係数 (cm/s)                 | 1.0 × 10 <sup>-5</sup> | 透水係数 (cm/s)                 | 1.0 × 10 <sup>-2</sup> |
|        | 間隙率                         | 0.056                  | 間隙率                         | 0.5                    |

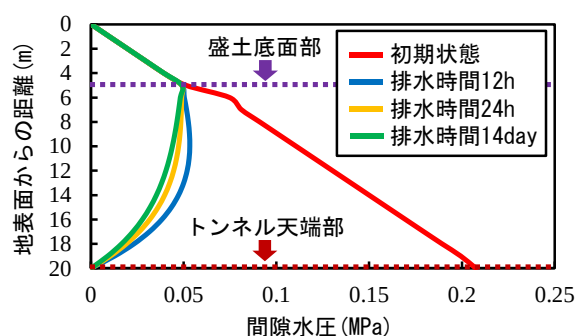


図-3 弱風化ケースの間隙水圧分布

そこで、図-4に弱風化ケースにおける盛土底面部、地山中間部、トンネル天端部の排水開始からの間隙水圧の推移を経時的に示す。ちなみに地山中間部とは、盛土・地山境界から8m地点を指す。トンネル掘削部からの地下水排水により、地山中間部およびトンネル天端部の間隙水圧が時間経過とともに低下している様子が見られる。しかし、盛土底面部の間隙水圧の推移は0.05MPaと一定であり初期状態から変化が見られず、地下水が排水されていないことが読み取れる。このことよりトンネル掘削に伴う地下水排水を短期的にみると、盛土下部の地山の風化が限定的である弱風化ケースにおける地下水排水はトンネル周辺地山に留まり、トンネル上部領域の地下水が大きく排水されることは起こらないことが予想できる。さらに数ヶ月、数年のような中長期的な挙動を再現する場合、盛土部の間隙水圧が低下する可能性もあるが、トンネル建設現場では降雨等による復水影響が想定できるため、本研究では短期的な数値解析結果をもってこの後の評価を行うこととした。

次に、強風化ケースに着目し、図-5に間隙水圧分布を示す。これより、赤線で示す掘削前の間隙水圧分布から、掘削による地下水排水により盛土部と地山部の両者の間隙水圧が低下していることが確認でき、排水時間12時間後以降には変化がほぼ見られなくなった。このことから、強風化ケースにおける排水の収束は排水時間12時間と判断した。

強風化ケースにおける排水開始からの間隙水圧の推移を図-6に経時的に示す。弱風化ケースによるグラフ(図-4)と異なり、トンネル掘削部からの地下水排水により、地山中間部およびトンネル天端部の間隙水圧の低下だけでなく、盛土底面部の間隙水圧が経時的に低下しており、盛土部の地下水排水が行われていることが確認できる。このことから、盛土下部の地山の風化が進行している強風化ケースでは、トンネル周辺地山や盛土の地下水位が低下するため、沈下が顕著に表れるのではないかと想定できる。

最後に、本解析の2つのケースにおける地表面沈下量を示し、トンネル掘削に伴う応力再配分過程や地下水低下による沈下影響を解明する。また、トンネルの地表面沈下予測解析に多く用いられている全応力解析の結果も併せて示し、地下水排水による地表面沈下影響を把握できるようにした。

まずは、図-7に弱風化ケースの全応力解析結果とトンネル掘削後に地下水が排水された排水時間ごとの結果(連成解析)を、C.L.からの距離と地表面沈下量の関係で示す。全応力解析のC.L.直上の地表面沈下量は5.9mmであるのに対し、連成解析のC.L.直上の地表面沈下量は排水時間を経るごとに増加しており、排水が収束したと思われる排水時間14日後には33.2mmであった。全応力

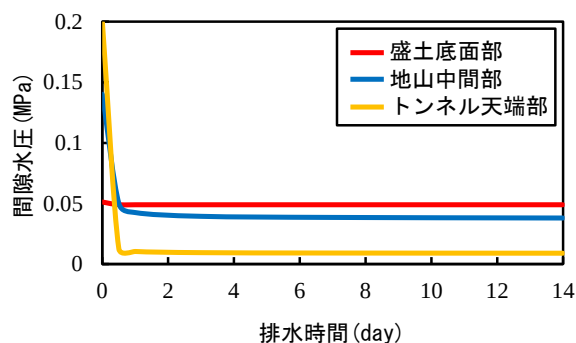


図-4 弱風化ケースの間隙水圧の推移

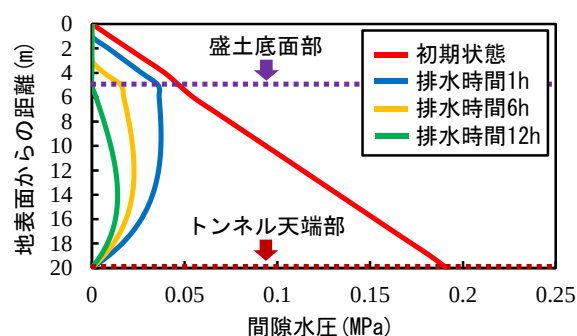


図-5 強風化ケースの間隙水圧分布

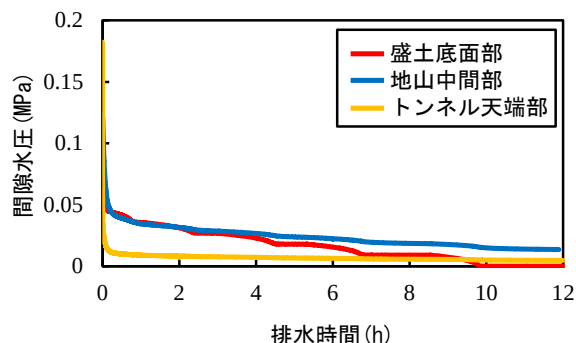


図-6 強風化ケースの間隙水圧の推移

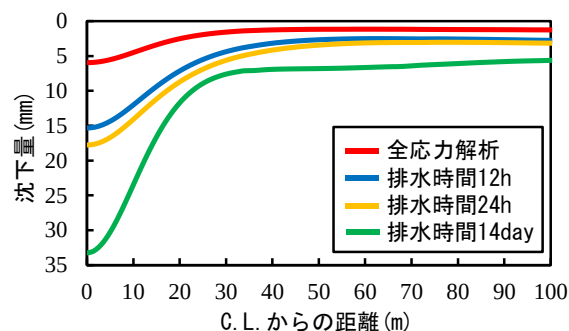


図-7 弱風化ケースの地表面沈下量

解析の地表面沈下量に比べ、連成解析は 27.3mm の差異が生じており、この差異は地下水排水による圧密沈下影響によるものと考えられる。

これより、トンネル掘削で一般的に用いられている全応力解析を用いた地表面沈下量予測では、トンネル掘削によって地下水が排水されるような地山条件下では、地表面沈下量に差異が生じる可能性があることが分かった。

次に、強風化ケース（図-8）に着目する。全応力解析の C.L.直上の地表面沈下量が 55.1mm に対し、連成解析の C.L.直上の地表面沈下量は弱風化ケース同様、排水時間を経るごとに増加しており、排水が収束したと思われる排水時間 12 時間後には 188.6mm であった。これらの結果より、トンネル周辺地山の風化が顕著である場合は、地表面沈下量に大きな影響を与える可能性があるし、このような地山条件下のトンネル掘削解析を全応力解析によって行った場合は、地表面沈下量を見誤る可能性があるため注意が必要であることがわかった。

#### 4. まとめ

本研究では、都市部の地質条件として挙げられる小土被り・未固結地山においてトンネルが掘削される場合の地表面沈下をトンネル掘削による応力再分配に起因するものと、掘削に伴って地下水が湧水として排水された場合の圧密影響によるものの両者を考慮した連成解析によって、予測を行った。そして、トンネル掘削による地下水排水が地表面沈下に及ぼす影響が大きい地質条件と限定的な地質条件を検討することを念頭に、地山条件の違いによる沈下量や排水挙動に与える影響分析を行った。

この結果、地下水の排水挙動において、風化の違いで間隙水圧の減少傾向が異なることが分かった。短期的な経時変化に対して、盛土下部の地山部分の風化が限定的

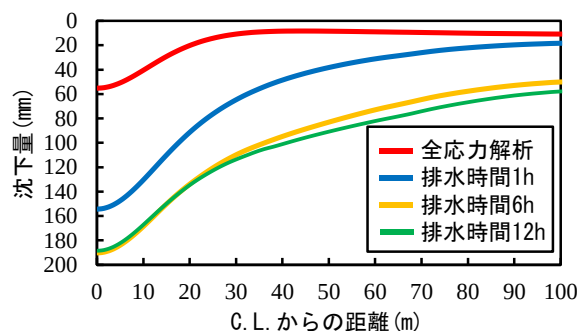


図-8 強風化ケースの地表面沈下量

なケースでは、地下水排水はトンネル周辺地山に留まり、盛土部分では変化が見られなかった。一方で、盛土下部の地山の風化が進行しているケースに関しては、トンネル周辺地山と同様に盛土からも地下水が排水された。

また、地表面に盛土が分布かつ盛土下部の地山の風化が進行しているケースにおいて、盛土下部の地山の風化が限定的な場合と比べ、地表面沈下量に大きな影響を与える可能性があることも分かった。

本研究結果より、トンネル掘削によって地下水位低下が懸念される場合、特に風化が顕著な地山においてトンネルを掘削する際には、地下水位低下を考慮することができ数値解析手法で、地表面沈下量を予測および検討することが好ましいことが分かった。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：トンネルライブラリー24 実務者のための山岳トンネルにおける地表面沈下の予測評価と合理的対策工選定，pp.178-179，2012。
- 2) 関根一郎，西牧均，石垣和明，原敏昭，斎藤章：岩石の比抵抗値とその力学的性質との関係，土木学会論文集，NO.541/III-35，pp.75-86，1996。

(2021. 8. 6 受付)

## PREDICTION ANALYSIS OF GROUND SURFACE SETTLEMENT CONSIDERING INFLUENCE OF GROUNDWATER DRAINAGE CAUSED BY TUNNEL EXCAVATION

Kenta SUZUKI, Hisashi HAYASHI and Masato SHINJI

The ground conditions in urban areas are mostly small overburden and unconsolidated, and tunnel excavation may cause a large impact on the ground surface settlement. In addition, the ground where the tunnel is to be excavated may be heterogeneous because of geological differences and weathering, and groundwater drainage caused by tunnel excavation may lead to consolidation and settlement of the ground. In this study, we aimed to clarify the deformation behavior of the ground caused by tunnel excavation as well as the effect of ground surface settlement in case groundwater is drained as tunnel spring water during tunnel excavation. For this purpose, coupled analysis was conducted to predict the ground surface settlement during tunnel excavation in small overburden and unconsolidated ground. As a result, it was found that the difference of the ground condition affects the groundwater drainage behavior and may cause the difference of the ground surface settlement.