

盛土直下でのトンネル掘削による 地表面沈下発生傾向の分析

西内 瑞生¹・鈴木 健²・林 久資³・森本 真吾⁴・進士 正人⁵

¹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: b037ve@yamaguchi-u.ac.jp

²正会員 西松建設株式会社 (〒105-6407 東京都港区虎ノ門 1-17-1 虎ノ門ヒルズビジネスタワー)

E-mail: takesi_suzuki@nishimatsu.co.jp

³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

⁴正会員 ドボクリエイト株式会社 (〒755-0097 山口県宇部市常盤台 2-16-1 山口大学研究推進機構 C206)

E-mail: charlie@dobocreate.jp

⁵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

都市部に建設されるトンネルでは、トンネル掘削により地上の構造物に大きな影響を及ぼし、最悪の場合は地表面陥没・崩壊を生じる場合がある。特に、地表部の積極的な土地利用により大規模な切土や盛土が施工された条件下で建設されることが多い都市 NATM では、事前の挙動予測が難しいだけでなく、対策工の選定や施工時の現場計測による解析結果のフィードバックが特に重要である。そこで本研究では、盛土が厚く堆積した条件下に建設されたトンネルの地表面沈下傾向を解明し、地表面沈下対策として補助工法や早期閉合を併用した場合の、沈下抑制効果の分析および地表面沈下発生要因を分析した。

Key Words: ground surface settlement, early closure, numerical analysis

1. はじめに

都市部に多くみられる小土被りや未固結地山等の厳しい施工条件下でトンネルを掘削する場合、トンネルを掘削することにより周辺の地山に緩み領域が発生し、グラウンドアーチの形成が難しく地上の構造物に大きな影響を及ぼし、最悪の場合は地表面陥没・崩壊を生じる可能性がある。例えば、福岡地下鉄七隈線延伸工事¹⁾では、地山の強度や厚さが局所的に不足する難透水性風化岩であることに加え、高い地下水圧が作用する条件下でトンネルが施工されていたが道路が陥没する事故が発生した。

また、地表部の積極的な土地利用により大規模な切土や盛土が存在する条件下でトンネルを施工する事例も多い。大和御所道路新田東佐味トンネル南工区工事²⁾は、盛土の直下を原地山の土被り 0.5D 以下でトンネルが通過せざるを得ない区間があり、グラウンドアーチの形成が困難であるため、先進導坑から地山改良を行い切羽の抜け落ちや直上盛土の沈下を防止しながら施工した事例

表-1 A トンネル諸元

補助工法		掘削地山	弾性係数 E(MPa)
注入式フォアポーリングと鏡ボルトの併用		砂質シルト	73
閉合距離 (m)	掘削幅 D(m)	土被り H(m)	計測点数
5.0	10.4	14	24

である。

このように、地表面沈下に関して厳しい制約条件下でトンネルを施工する場合は、事前の挙動予測を行うと共に、対策工の選定や施工時の現場計測による解析結果のフィードバックが必要不可欠である。

小土被り地山にトンネルを施工した際の計測結果を示した既往研究に着目すると、著者らは小土被りでの施工事例³⁾における地表面沈下対策として注入式フォアポーリング等の補助工法と早期閉合を併用した場合の地表面

沈下曲線に着目した。Aトンネル(表-1)の施工において各計測点の結果から得られた地表面沈下曲線(図-1)を曲線近似により平均化すると、切羽到達時の応力開放率が50%の応力解放曲線で近似できる、すなわち先行沈下量と切羽通過後の沈下量とのバランスがおおよそ等しいことを報告している。しかしながら、曲線近似をする前の個々の地表面沈下計測値(青プロット)に着目すると、バラツキが生じている。このバラツキは、地山物性や土被りの他に、フォアポーリングや早期閉合のような対策工の軽重によって生じていると考えられる。さらに、Aトンネルには図-2の概略図に示すように、トンネル直上にN値が5以下の脆弱な盛土層が存在する。これらの地表面沈下発生要因になりうる施工条件から、事前に沈下量を予測する必要がある。

しかしながら、これまでの研究成果では、連続体的な手法を用いた数値解析による切羽挙動や地表面沈下の事前予測精度について言及されたものはみられない。現在におけるトンネル掘削は、都市部に多くみられるような厳しい地山条件下において、トンネル線形の設定によっては長距離にわたって小土被り区間が続くことも考えられ、地表面崩壊が起こるリスクも高い。

そこで本研究では、盛土が厚く堆積した条件下に建設されたトンネルの地表面沈下傾向を解明し、地表面沈下対策として補助工法や早期閉合を併用した場合の、沈下抑制効果の分析および地表面沈下発生要因を分析した。トンネル掘削影響解析には三次元有限差分法数値解析コードのFLAC3Dを用いた。

2. 実施工における地表面沈下発生要因分析

Aトンネルは、表-1に示すような小土被りで脆弱な盛土層が存在する地山に、フォアポーリング等の補助工法および早期閉合を併用してトンネルを掘削した事例である。図-1の青プロットで示すように各計測点から得られた地表面沈下量にはバラツキが生じており、そのバラツキは各地点の施工条件に左右されたものと考えられる。土被り、近接構造物、地質、支保工等の施工条件のうち、最終沈下量に主として影響を及ぼす条件を明らかにするため、本章ではAトンネルの地表面沈下量と施工条件の関係について分析を行う。

まず、上記の施工条件のうち土被りに着目するため、図-3に各計測点の土被りと最終地表面沈下量を示す。このグラフより、土被りが14m程度と同程度の区間が存在していることが読み取れる。この区間は、図-2の概略図に示すように地表に盛土層が分布している。しかしながら、土被りが同程度である盛土区間において最終沈下量は6mmから12mm程度と幅があることから、本施工条件下

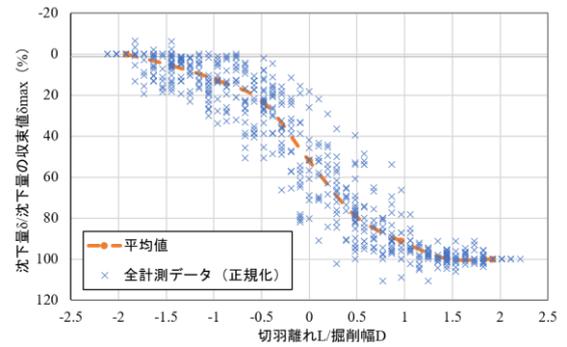


図-1 Aトンネルの計測データ整理結果³⁾

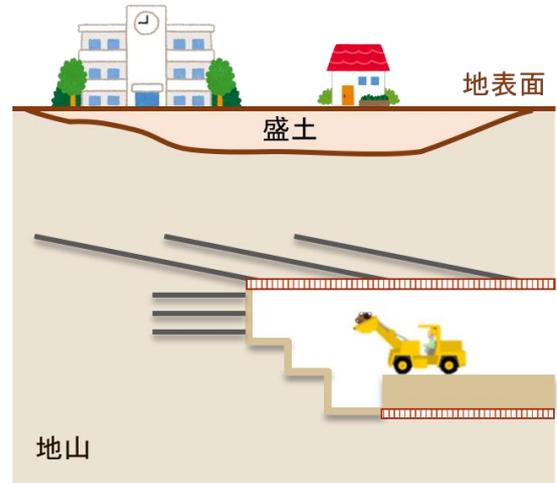


図-2 Aトンネルの概略縦断面図

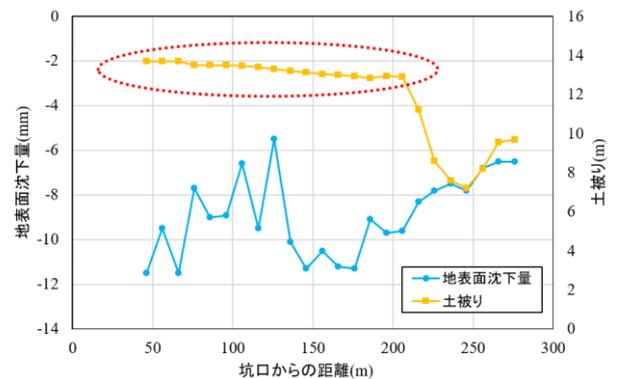


図-3 地表面沈下量と土被りの関係

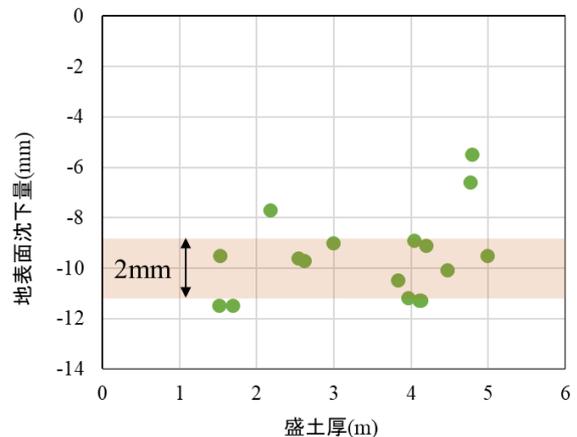


図-4 地表面沈下量と盛土厚の関係

表-2 解析ケースおよび盛土層の入力物性値

解析ケース	盛土層厚 (m)	弾性係数 E(MPa)	Eb/EI	単位体積重量 γ (kN/m ³)	ポアソン比 ν	粘着力 c(kN/m ²)	内部摩擦角 ϕ (deg)
1	2.0	3.2	0.06	14	0.35	8	5
2	3.0						
3	3.5						
4	4.0						
5	5.0						
6	2.0	10.4	0.2				
7	3.0						
8	3.5						
9	4.0						
10	5.0						
11	2.0	26	0.5				
12	3.0						
13	3.5						
14	4.0						
15	5.0						
16	2.0	41.6	0.8				
17	3.0						
18	3.5						
19	4.0						
20	5.0						

表-3 トンネル周辺地山および支保工の入力物性値

地山				
単位体積重量 γ (kN/m ³)	弾性係数 E(MPa)	ポアソン比 ν	粘着力 c(kN/m ²)	内部摩擦角 ϕ (deg)
13	52	0.35	35	20
吹付けコンクリート				
設計基準強度 f _{ck} (N/mm ²)	単位体積重量 γ (kN/m ³)	弾性係数 E(MPa)	ポアソン比 ν	吹付け厚 t(m)
36	22	800	0.2	0.2

では土被りと地表面沈下量には相関はみられなかった。ただし、施工条件のうち土被りを同一の条件とすることができるため、ここからは土被りが同程度の盛土区間のみ着目する。

盛土区間は、土被りは同程度であるが盛土厚は均一でなくそれによる影響に着目するため、図-4に盛土厚と最終地表面沈下量の関係を示す。地表面沈下量が9.0mm~11.0mmの2.0mm間に多くの点が分布しており同程度であるが盛土厚は1.5m~5.0mと幅があり、盛土厚と最終地表面沈下量に明確な相関は確認できなかった。したがって、盛土厚が異なる場合でも地表面沈下量は同程度であることから、土被りが均一であれば盛土層の強度や厚さは掘削に影響しないと推察される。

3. トンネル掘削解析による地表面沈下発生傾向の再現

図-4より、トンネル直上の地表に盛土層が存在していても、トンネル掘削により生じた緩み領域が盛土層より下に収まる場合は、盛土層の強度や厚さは地表面沈下に

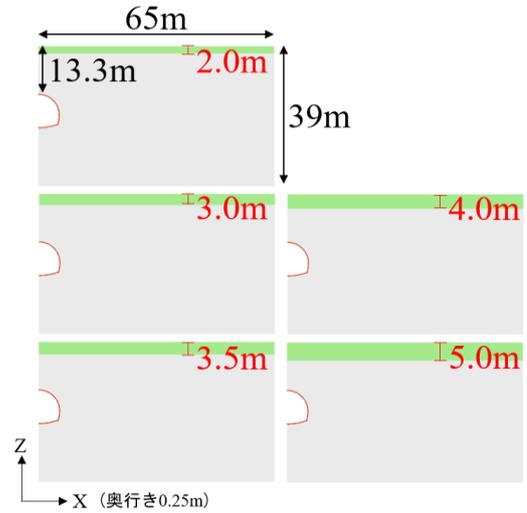


図-5 解析モデル横断面図

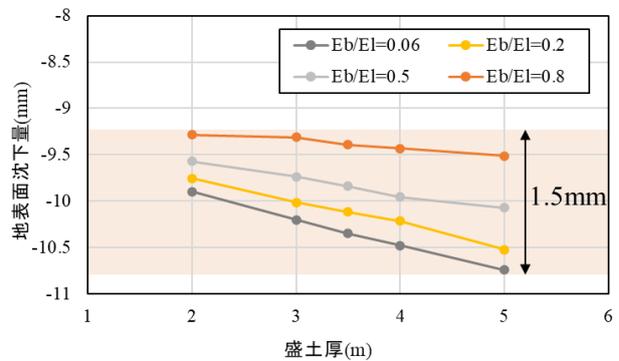


図-6 20ケースの地表面沈下量

影響しないと仮定した。そこで本章では、盛土層の厚さや強度が、トンネル掘削により及ぼす地表面への影響を調査するため、以下の条件で数値解析を実施した。

地表に盛土層が分布しているAトンネルの地山条件を想定し、盛土厚および盛土層の弾性係数を変化させた場合の地表面への影響を、表-2に示す20ケースについて数値解析により調査した。20ケースのうちケース3は、Aトンネルの地山条件である盛土層厚3.5m、トンネル周辺地山の弾性係数(EI)に対する盛土層の弾性係数(Eb)の割合が0.06であることを再現したケースである。トンネル径を11.7mとして全断面を一括で掘削し、同時に吹付けコンクリートを設置した。トンネル周辺地山および支保工の入力物性値は表-3に示すように設定した。掘削と吹付けコンクリートの設置を同時に行っているため、地表面沈下量が、Aトンネルで計測された地表面沈下量の平均値である10mm程度となるよう吹付けコンクリートの弾性係数を設定することで、掘削と吹付けコンクリート設置の間の応力解放を再現した。本章で採用する解析モデルでは、解析や評価の容易さを考慮し、図-5に示す奥行き0.25mの三次元モデルを二次元平面ひずみ状態に模擬した断面とした。

以上の条件で解析を実施した結果を図-6に示す。この

図は、盛土層の弾性係数を変化させた場合の地表面沈下量を盛土厚ごとに整理した。盛土層の弾性係数を3.2MPa～41.6MPaに、盛土厚を2.0m～5.0mに変化させても、地表面沈下量は9.3mm～10.8mmと1.5mmの間に分布していることが確認できる。これは、図-4より得られた、盛土厚は1.5m～5.0mと幅があるが地表面沈下量が9.0mm～11.0mmの2.0mm間に収まっている結果と整合性がある。さらに、図-7に塑性領域を示す。全ケースにおいて塑性領域は同一であり、盛土層より下に留まっていることが確認できた。

これまでの結果より、地表に盛土層が分布している地山にトンネルを掘削した場合、掘削により生じた塑性領域が盛土層より下に留まっていれば、盛土層の強度や厚さは地表面沈下量に大きく影響することはないことが確認できた。

4. まとめ

本報告では、盛土が厚く堆積した条件下に建設されたトンネルの地表面沈下傾向を解明し、地表面沈下対策として補助工法や早期閉合を併用した場合の、沈下抑制効果の分析および地表面沈下発生要因を分析した。実現場の計測データを分析した結果と数値解析による検討結果から、地表に盛土層が分布している地山にトンネルをし



図-7 20 ケース共通の塑性領域

た場合、掘削により生じた塑性領域が盛土層より下に留まっていれば、盛土層の強度や厚さは地表面沈下量に大きく影響することはないことが確認できた。

参考文献

- 1) 国立研究開発法人土木研究所：福岡地下鉄七隈線延伸工事現場における道路陥没に関する検討委員会報告書，2017.
- 2) 一般社団法人日本トンネル技術協会：高盛土直下を先進導坑から地山改良を行い掘削，トンネルと地下第49巻，第7号，pp.17-24，2018.
- 3) 鈴木健，森本真吾，林久資，進士正人：早期閉合採用時のトンネル縦断方向地表面沈下曲線に関する考察，トンネル工学報告集，第29巻，I-38，2019.

(2020. 8. 7 受付)

ANALYSIS OF GROUND SURFACE SETTLEMENT TREND BY TUNNEL EXCAVATION JUST UNDER THE EMBANKMENT

Mizuki NISHIUCHI, Takeshi SUZUKI, Hisashi HAYASHI, Shingo MORIMOTO and Masato SHINJI

In tunnels constructed in urban areas, excavation of tunnels has a great influence on the structures on the ground, and in the worst case, surface depression/collapse may occur. In particular, in urban NATM, which is often constructed under conditions where large-scale cuts and embankments are constructed due to active land use on the surface, not only is it difficult to predict the behavior in advance, but also the selection of countermeasure works and It is especially important to feed back the analysis results by site measurement during construction. Therefore, in this study, the ground subsidence tendency of the tunnel constructed under the condition that the embankment was thickly deposited was elucidated, and the subsidence suppression effect and the ground surface subsidence were analyzed when the auxiliary construction method and early closing were used together as the ground subsidence countermeasure. The factors causing subsidence were analyzed.