

種々の施工条件下における地表面沈下傾向予測に関する基礎的研究

山口大学大学院
西松建設
山口大学大学院
山口大学大学院

学生会員
正会員
正会員
フェロー会員

○西内 瑞生
鈴木 健
林 久資
進士 正人

1. 研究背景および目的

都市部に多い、未固結小土被り地山や山岳部の坑口近傍では、トンネル掘削による地表面沈下をコントロールできない場合、地上の重要構造物に影響を及ぼし、最悪の場合は地表面陥没・崩壊が生じるケースが数多く報告されている。このように施工が難渋することが予測される地山条件下にトンネルを施工する場合は、事前の挙動予測や、対策工の選定、施工時の現場計測が不可欠である。

ちなみに、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¹⁾地表面沈下抑制対策として長尺先受け工法と早期閉合を併用した場合の地表面沈下曲線を複数示し、それらを曲線近似により平均化すると、切羽到達時の切羽直上の地表面沈下量(先行沈下量)と同地表面の収束沈下量との関係は、ほぼ等しいことを報告している。しかし、曲線近似する前のそれぞれの地表面沈下曲線に着目すると、バラツキが生じているデータも多い。

このバラツキは、フォアパイリングなどの切羽前方地山の改良、先行沈下の抑制を目的とした補助工法、並びに切羽通過後の地表面沈下の抑制を目的とした早期閉合それぞれの対策効果のバランスによって生じていると考えられ、その効果バランスを施工前に予測できれば、収束沈下量の精度良い予測が可能となる。また、トンネル施工中には予測結果を現場計測によって検証でき、支保仕様変更の一助になると考える。

本研究では、地表面沈下対策として補助工法と早期閉合を併用した場合のトンネル施工を数値解析によりシミュレートし、対策工の違いによる切羽前方および後方の地表面沈下傾向を把握する。ここでは、地表面沈下対策を簡便にシミュレートできる解析方

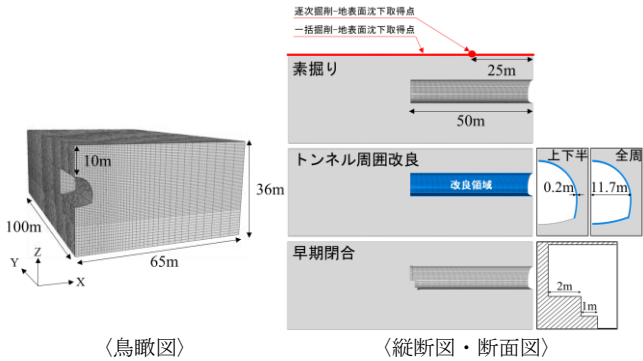


図-1 解析モデル図

表-1 解析入力物性値

地山					
	弾性係数 E(MPa)	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)
切羽前方	67	14	0.35	40	35
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	6000	0.2	0.2	
鋼アーチ支保工					
規格	単位体積重量 γ(kN/m ³)	弾性係数 E(MPa)	ポアソン比 ν	断面積 A(m ²)	断面 2次モーメント I _x (m ⁴) 断面 2次モーメント I _y (m ⁴)
HH-154	78	200,000	0.3	4.719 × 10 ⁻³	2.00 × 10 ⁻⁵ 6.89 × 10 ⁻⁶

法を提案し、数値解析によって得られた地表面沈下傾向を示す。検討にはトンネル掘削解析で多くの実績が見られる三次元有限差分法数値解析コードのFLAC3Dを用いた。

2. トンネル掘削影響解析の簡便化

図-1の縦断面図に示すように、未固結小土被り地山や坑口近傍において、早期閉合を併用したときの地山の改良効果の評価では、閉合距離を考慮した逐次掘削解析が多く採用されている。しかし、ここでは地山改良効果をより簡便に模擬するため、一括掘削による結果と逐次掘削による結果を比較した。すなわち、一括掘削では坑口から50m地点までを一括で掘削した。逐次掘削については、施工手順に従い、坑口から50m地点までを1mずつ掘削することとした。そして、支保工を模擬しない素掘りの場合、支保工を模擬する改良を行う場合を想定し解析を実施した。

本研究では小土被りを模擬し土被りが1D以下になるよう、トンネル径を11.7mとし、土被りを10m

に設定した。拘束条件はモデル側面および底面を固定し上面は解放し、モデルで使用する物性値は表-1に示す通りとした。後に示す解析においても同様の解析条件とした。

2.1 支保工を模擬しないケース

掘削方法の違いのみをパラメータとするため、素掘り（対策工が不十分と仮定）により地表面沈下傾向を確認した。図-2に示す地表面沈下曲線が得られた。負は沈下を示す。逐次掘削では坑口から25m地点の地表面に着目し、切羽進行に伴う沈下量を表している。一括掘削では、坑口より50m地点まで一括でトンネルを掘削した結果を、坑口より25m地点から75m地点までの地表面沈下量として取得した。図-2に示した切羽通過までに生じる先行地表面沈下を収束変位で除した先行沈下率（図-2 枠内）に着目すると、どちらの掘削方法においても30%程度となり大きな差異はみられなかった。つまり、支保工を設置しない場合、逐次掘削の施工を一括掘削解析で置き換えることができることがわかる。

2.2 支保工を模擬するケース

次に、支保工や補助工法などの地山改良効果を考慮した場合の解析結果を示す。ここでは、図-1に示すトンネル全周を改良することで支保工を再現し、一括掘削と逐次掘削で解析を行った。

図-3に地表面沈下曲線を示す。逐次掘削においては、切羽進行に伴い沈下量が増大し切羽通過後10mで変位が収束した。しかし、一括掘削では切羽前方10mから後方にかけて地表面が隆起するリバウンド現象とみられる傾向が発生した。したがって、支保工や補助工法などの地山改良効果を模擬するためには、一括掘削解析を用いることは難しいことがわかる。

3. 簡便なモデルによる早期閉合効果の再現

2. より、支保工や補助工法などの地山改良効果を考慮する場合逐次掘削解析を用いることが望ましいという結果が得られたため、ここでは簡便に早期閉合掘削解析を模擬する手法を提案する。すなわち、ケース1：早期閉合を簡便に再現するケース（トンネル全周に支保工を設置）。

ケース2：早期閉合による効果発現が遅いケース（トンネル上下半に支保工を設置）。

ケース3：早期閉合の掘削手順、支保工設置タイミングに沿ったモデル。

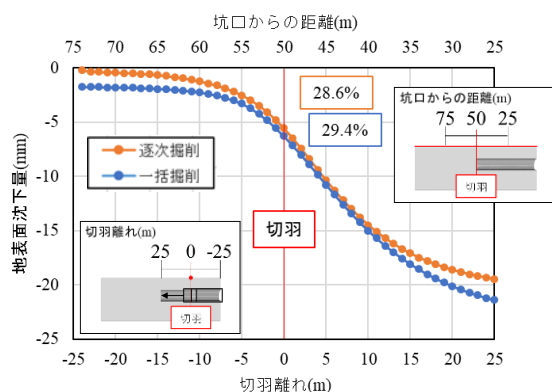


図-2 素掘り時における地表面沈下量

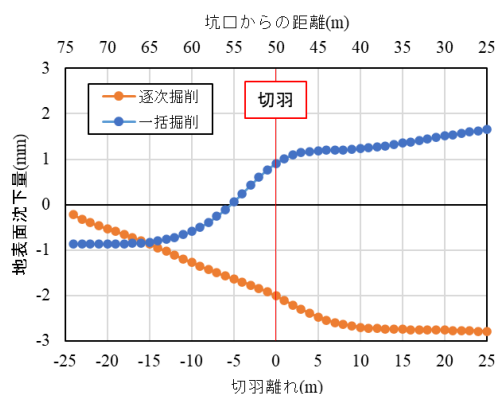


図-3 トンネル全周改良時における地表面沈下量

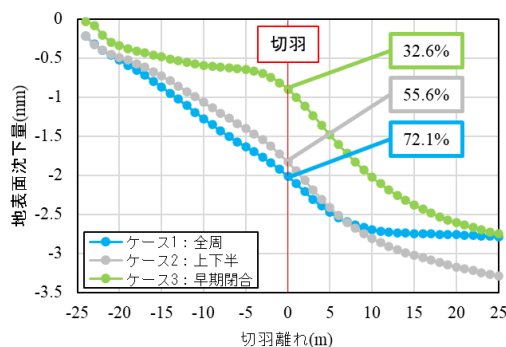


図-4 地山改良効果の再現手法による地表面沈下量

図-4の結果に着目すると、ケース1はケース2と違い、切羽後方の地表面沈下を抑制できており、早期閉合効果を簡便なモデルによって再現できていることがわかる。しかしながら、ケース1とケース3を比較すると、切羽直上の沈下量は不一致であるが、グラフ右端の切羽離れ25m地点の沈下量は一致することが分かった。

参考文献

- 1) 鈴木ら：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。