

数値解析による斜面下における垂直縫地の力学的挙動に関する考察

東京都立大学 学生会員 ○雨宮智久 舘林祐人
東京都立大学 正会員 河田皓介 砂金伸治 西村和夫
西日本高速道路総合サービス沖縄株式会社 正会員 城間博通

1. はじめに

グラウンドアーチの形成が難しいトンネル坑口部や土被りが小さい箇所では、トンネル周辺地山が不安定となり、地表面沈下や斜面の不安定化が生じ易い。このような場所にトンネルの補助工法として、地表面から鉄筋等を垂直に挿入定着する垂直縫地工法が用いられる場合があるが、本工法の設計法としては類似の施工事例による経験的な方法が主であり、定量的な手法が確立されているとは言い難い状況にある。また、近年では本工法の適用にあたって斜面の安定化を併せて期待している事例も散見される。本研究では、垂直縫地工法を適用した3次元解析を実施し、斜面下における、縫地ボルトの打設条件が及ぼす補強効果の影響と、当工法のメカニズムの考察を行った。

2. 研究手法

本研究では、トンネル縦断方向の打設条件や切羽の進行と本工法の効果など実施工に近い検討を行うために、3次元有限差分法（解析コード：FLAC3D）による数値解析を実施した。図1に解析モデル、図2に垂直縫地ボルト（以下、ボルト）の打設条件、表1に解析物性値を示す。地山等級は本工法が適用されることが多い坑口部を想定したE等級とした。モール・クーロンの破壊基準を用いた弾塑性体によって地山をモデル化し、内部摩擦角および粘着力を30度、20kPaにとした。すべてのケースでトンネル土被りは1D（D=掘削幅、11.3m）としており、トンネル部は高速道路の二車線トンネル断面の標準坑口パターンを参考とした。トンネル支保工は、吹付けコンクリートと鋼アーチ製支保工の等価剛性を算出した合成部材としShell要素によりモデル化した。ボルトはbeam要素によってモデル化し、D32の鉄筋を用いた物性を設定した。トンネル縦断方向の地山全域にボルトを等間隔に打設した。1m²あたりのボルトの本数を打設密度、横断面に対してボルトを挿入する範囲を打設幅、ボルトを挿入する地表面からの深さを根入れ深さと呼称し、これらそれぞれ変更した9つの打設パターンを、地表面の傾斜の異なる二つの地山モデルから検討を行った。実施した18ケースの詳細を表2に示す。

3. 研究結果

図3に、各打設条件と掘削終了後の天端及び地表面沈下量の関係を示す。これらのグラフは、横軸を各打設条件においてボルトの使用量が増加するように設定し、各打設条件と垂直縫地工法の適用による変位抑制効果を定量的に表している。根入れ深さは、ボルトの長さによって表し、補強無のケースはボルトの使用量を0としている。地山モデルの違いに着目すると、天端沈下量に関しては、同様の打設条件であっても地表面に傾斜を設けた条件において大きくなる傾向がある。地表面沈下量に関しては、地表が水平の場合より、斜面峰側では沈下量が増加し、斜面谷側では沈下量が減少している。このことから、地表面の傾斜によりトンネル掘削による影響が斜面上方へと拡大していると考えられる。打設密度に着目すると、どちらの地山モデルにおいて

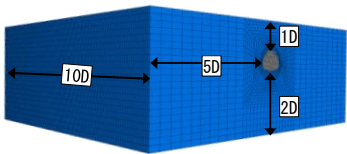


図1 解析モデル

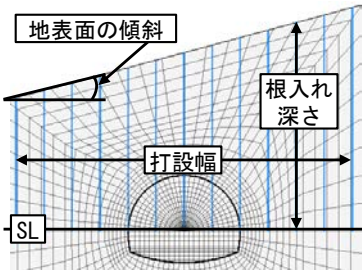


図2 ボルトの打設条件

表1 解析物性値

モデル	構造要素	弾性係数 [MPa]	ポアソン比
地山	solid	5.00 × 10 ⁴	0.4
垂直縫地ボルト	beam	2.05 × 10 ⁵	0.3
トンネル支保工	shell	8.90 × 10 ³	0.2
インバート	shell	4.00 × 10 ⁴	0.2

表2 解析ケース

	地表面の傾斜	打設密度	打設幅	根入れ深さ
#1	#O-a 水平 or 斜面 15度 (#O-b)	補強無		
#2		0.3本/m ²	3.0D	SLまで
#3		0.06本/m ²		
#4		1本/m ²		
#5		0.3本/m ²	1.5D	脚部まで
#6			1.0D	
#7			3.0D	SL+5mまで
#8				天端まで
#9				

も、打設密度が大きくなるにつれ、天端及び地表面沈下量が減少し、打設密度の変化に対する沈下量の減少が緩やかになっている。このことから、地表面の傾斜に関わらず、打設の間隔を小さくし、ボルトを密に打設することで変位抑制効果の向上を期待できるが、それは比例関係とは必ずしもならないことが推察される。打設幅に着目すると、どちらの地山モデルにおいても、打設幅が大きくなるにつれ、天端及び地表面沈下量が減少しているものの、1.5Dより大きくなると、沈下量の減少が緩やかになる傾向がみられる。また、斜面における打設幅に対する地表面沈下量の変化は、峰側と谷側で異なる傾向を示している。前述したように斜面では地山の挙動がトンネルに対して非対称であることを考慮すると、トンネル掘削による影響範囲と適切な打設幅に関する検討を地山や斜面の条件を考慮に入れて行う必要があると考えられる。根入れ深さに着目すると、どちらの地山モデルにおいても、ボルトの長さが長くなるにつれ、天端及び地表面沈下量が減少しているものの、根入れ深さが脚部より深くなると、沈下量の減少が緩やかになっている。このことから、地表面の傾斜に関わらず、ボルトの根入れは脚部と同程度の深さ（図4）とすることで、変位抑制効果を十分に発揮させることができると推測される。

図5に地表面が水平の地山における地山内応力の横断方向の分布を示す。トンネル掘削後の応力を掘削前の応力で除することにより、地山応力を基準化しており、1に近いほど、応力変化が少ないことを表す。トンネルSLから12m上方の地山では、トンネル掘削後に生じた鉛直応力や水平応力の減少が垂直縫地の適用したケースでは抑制されている。トンネルSL付近地山では、鉛直応力や水平応力の増加が抑制されている。これらから、垂直縫地工法を適用することでトンネル掘削による地山内の応力変化が抑制されることが考えられる。これにより地山の变形が抑制され、図3に見られるトンネルや地山の変位抑制効果が得られると推察される。

4. 結論および今後の課題

本研究から、斜面下において、垂直縫地ボルトの打設条件を変化させることで、変位抑制効果を向上させることが期待できるが、それらは比例関係ではない可能性があることが分かった。また垂直縫地工法の適用により、地山内の応力変化を抑制することができ、トンネル掘削に伴う変位の抑制につながると考えられた。斜面下では、打設条件の変化に対する地山挙動が一様でない場合も見受けられたため、トンネルに対して対称的に打設条件を設定するのは合理的でない可能性がある。適切な打設条件の提案に向け、トンネル掘削による影響範囲等との関連性も含めた検討が今後必要である。

参考文献

- 1) 東日本高速道路株式会社 中日本高速道路株式会社 西日本高速道路株式会社：トンネル数値解析マニュアル，2018.2
- 2) 東日本高速道路株式会社 中日本高速道路株式会社 西日本高速道路株式会社：トンネル標準設計図集，2014.7

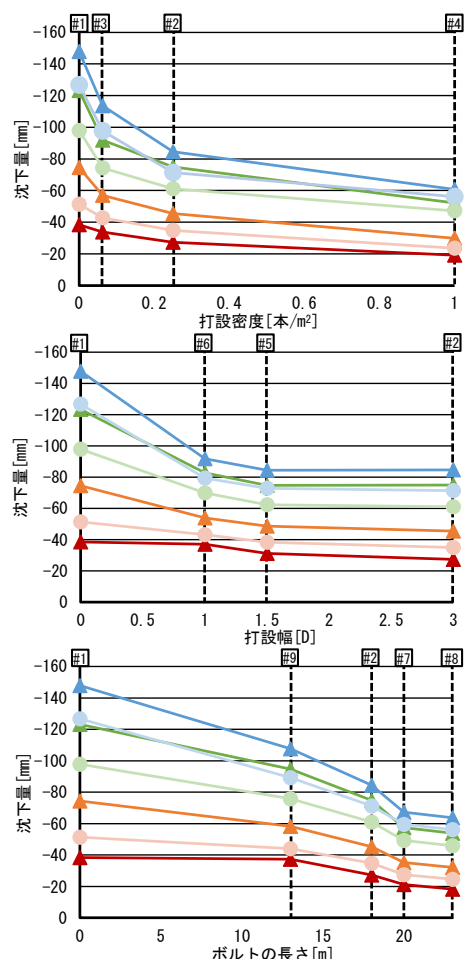


図3 打設条件と各沈下量の関係

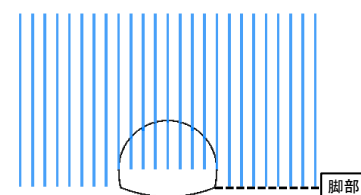


図4 脚部までの根入れ

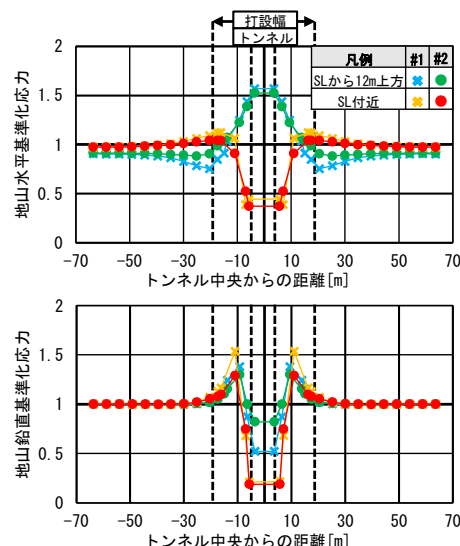


図5 地山内の応力分布