

垂直縫地の力学的効果と適用性に関する解析的考察

東京都立大学 ○雨宮智久 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 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ことがあるが、本工法の設計法としては類似施工事例による経験的な方法が主であり、定量的な方法が確立されているとは言い難い。そこで本研究では、垂直縫地工法を適用した3次元解析を実施し、地山の条件や補強の規模といった条件に着目し、その適用性や補強効果に関する考察を行った。

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次元有限差分法による数値解析を実施した。解析は有限差分法（解析コード：FLAC3D）を用いた。図1に解析モデル、図2に垂直縫地ボルトの打設条件、表1に解析物性値、図3に解析フローを示す。地山等級は本工法が適用される地山条件の悪い坑口部を想定したE等級とし、地山はモール・クーロンの破壊基準を用いた弾塑性体とした。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二車線トンネル断面の標準坑口パターンを参考とした。吹付けコンクリートと鋼アーチ製支保工は等価剛性を算出したShell要素を用いており、垂直縫地ボルトは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。地山要素においてはトンネル縦断方向の全域にボルト打設し、挿入深さはトンネルSLまでとした。隣接するボルト間の最小距離を打設間隔、断面に対してボルトを挿入する範囲を打設幅と呼称することとし、それらと地山の内部摩擦角と粘着力をパラメータとして検討を行った。実施した8ケースの詳細を表2に示す。

3. 研究結果

本研究において、解析モデルの中央断面（奥行60m地点）を対象断面とし、その断面における結果に着目し、検討を行った。

図4に対象断面に対する切羽の位置と天端沈下量の関係を示す。垂直縫地工法を適用したケースでは、適用していないケースに比べ、天端沈下量は小さい。粘着力が小さいケースでは、他の条件のケースと比べ、変位が大きく生じている。しかし補強による最終変位の減少割合に着目すると、case2ではcase1に対し4割程度、case4ではcase3に対し、また、case6ではcase5に対し両者とも2割程度の減少となった。また、ボルトの打設条件について、case7ではcase1に対し2割程度、case8ではcase1に対し4割程度の減少がみられ、同様の地

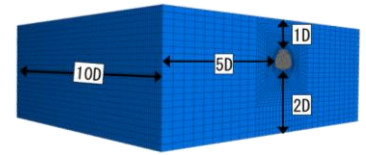


図1 解析モデル

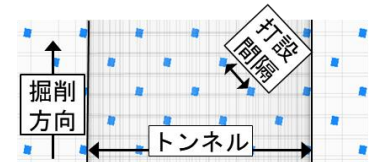
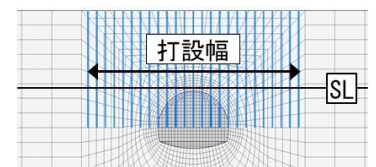


図2 ボルトの打設条件

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
吹付けコンクリート + 鋼アーチ	shell	8.90×10^3	0.2
インバート	shell	4.00×10^4	0.2

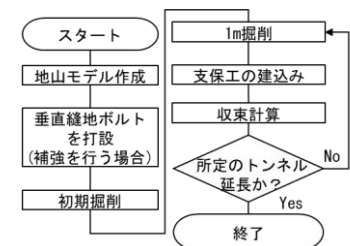


図3 解析フロー

表2 解析ケース

解析ケース	内部摩擦角 [°]	粘着力 [kPa]	打設間隔 [m]	打設幅 [m]
case1	30	20	補強無	
case2			2.0	34
case3	30	200	補強無	
case4			2.0	34
case5	20	200	補強無	
case6			2.0	34
case7	30	20	4.0	34
case8			2.0	17

キーワード 山岳トンネル, 補助工法, 垂直縫地工法, 数値解析, 有限差分法

連絡先 〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1 東京都立大学 TEL042-677-2785

山条件の case2 と case7 の減少割合と比較すると、打設間隔を広げた case7 の変位抑制効果は小さい。さらに case2, case8 では切羽の到達前から変位抑制効果が明確に表れているのに対し、case7 では切羽通過後から変位抑制効果が明確に表れている。このことから切羽到達前の変位の抑制効果にも打設間隔が関係していると考えられる。

図 5 にトンネル中央からの距離と最終地表面沈下量の関係を示す。地表面沈下量に関しても、垂直縫地工法を適用したケースにおいて変位が減少しており、粘着力が小さいケースで大きな変位が生じている。補強による変位の最大減少割合は、case2 では case1 に対し 4 割程度の減少がみられるが、case4 では case3 に対し、また、case6 では case5 に対し両者とも 1 割未満程度の減少にとどまった。ボルトの打設条件について、case7 では case1 に対し 2 割程度減少、case8 では case1 に対し 4 割程度の減少がみられ、打設間隔を広げた case7 の変位抑制効果が小さい。これらの結果から、大きな変位が生じやすい地山条件において、垂直縫地の変位抑制効果が大きく表れ、打設幅より打設間隔の方が、変位抑制効果への影響が大きいことが解析的にも明らかになった。

図 6 に、各地山条件におけるトンネル周辺の塑性領域、図 7 にトンネル中央から 0m, 8.5m, 17m 離れているボルトに生じている軸力（正 ;引張、負 ;圧縮）を示す。垂直縫地による変位抑制効果が大きく見られた case1, 2 ではトンネル周辺から広域に塑性領域が生じているのが確認できる。しかし case3~6 では、塑性領域の広がり小さく、地山の挙動は弾性領域内にとどまっている。またボルトに生じている軸力のグラフから、case1 において塑性領域が生じている範囲に打設されているボルト（0m, 8.5m）の軸力が各ケース間で大きく異なっている。しかし、いずれのケースにおいても地山が弾性領域になっている範囲に打設されているボルト（17m）の軸力は各ケース間での違いは少ない。このことから垂直縫地ボルトの補強効果は地山の塑性領域と関係があり、地山が弾性挙動を示すような条件においては、得られる補強効果は小さい結果が得られている。

4. 結論および今後の課題

本研究から、掘削により塑性領域が発生し易い地山条件下において垂直縫地による変位抑制効果が大きく表れ、掘削による地山挙動が弾性範囲にとどまる条件においては、変位抑制効果が小さいことがわかった。また垂直縫地ボルトの打設幅より打設間隔の方が変位抑制効果に与える影響が大きいことが明らかになった。これらのことから、地山が不安定で、掘削による変位が大きくなることが想定される条件下において垂直縫地工法の適用は高い効果が得られ、ボルト 1 本ずつの離隔を重視した設計を検討する必要があると言える。今後は、ボルトの挙動を含めたボルトの打設方法の考察を実際の計測データ等を用いて行うとともに、近年、垂直縫地工法を斜面の安定性を期待して採用している事例が多いことから、斜面に適用した場合の力学的挙動について検討する予定である。

参考文献

- 1) 日本道路公団試験研究所 試験研究所資料第 358 号 トンネル数値解析マニュアル 1998.10
- 2) 西日本高速道路株式会社 トンネル標準設計図集 2014.7

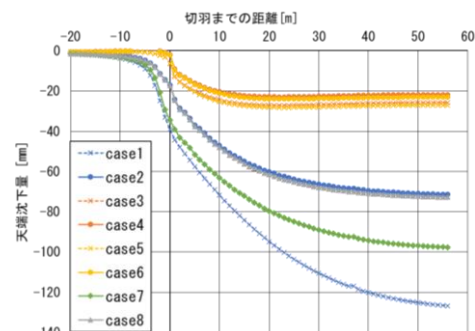


図 4 天端沈下量

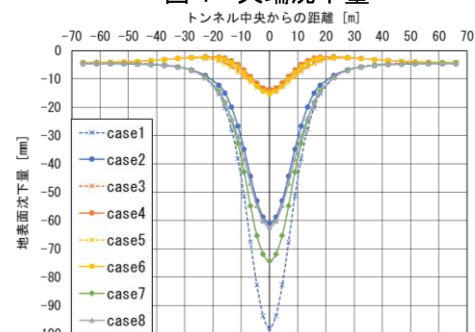


図 5 地表面沈下量

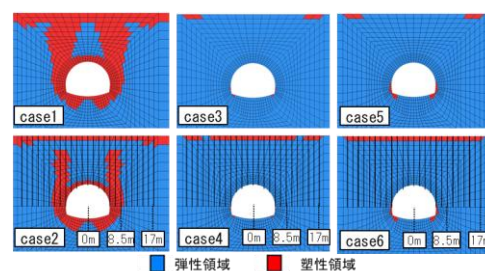


図 6 塑性領域

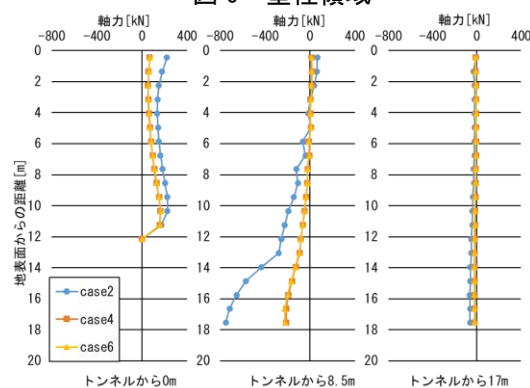


図 7 垂直縫地ボルトの軸力