

三次元トンネル掘削解析による変位制御型支保工の補強効果

鹿島建設(株) 正会員 ○横田泰宏 伊達健介 石井雅子 熊谷丈瑠 升元一彦 黒川紗季
北村義宜 宇津野衛
熊本大学大学院 才ノ木敦士

1. はじめに

近年、国内外において、膨張性地山や大きな地圧を受ける大深度においてもトンネル掘削プロジェクトが計画されることが多くみられる。そのような場合、大きな地圧が作用して、従来用いられてきた剛な支保では支保耐力を超過し、脆性的な崩壊を誘発する恐れがある。そこで、筆者らは変形を制御しながら、徐々に大きな地圧に抵抗することで鋼製支保工、吹付コンクリート、ロックボルトに作用する応力を軽減させることができる新しい変位制御型支保工¹⁾の開発を進めてきた。本稿では、実トンネル掘削に適して支保工仕様を検討することを目的とし、変位制御型支保工をモデル化した三次元トンネル掘削解析を実施した結果を報告する。

2. 三次元トンネル掘削解析による変位制御型支保工の補強効果

(1) 数値解析モデル

数値解析には、汎用有限差分法コードFLAC3D (ITASCA社²⁾)を用いた。FLAC3Dは大変形を伴う非線形な材料挙動(広範囲の塑性化や崩壊など)を安定してシミュレーションできる陽的有限差分法に基づき構築されている。本稿では、変位制御型ロックボルト、鋼製支保工(変位制御部)および吹付コンクリート(変位制御部)で構成された変位制御型支保システムの効果を検討することを目的として、幅50m、奥行50m、高さ50mの立方体の中心部に半径5m、長さ30mの円形トンネルをモデル化し、1m毎の逐次掘削解析を実施した。数値解析の境界・初期条件として、モデルの外部境界面に対して垂直な方向の変位を固定し、深度1000mに相当する土圧(25.5 MPa)を等方等圧で付与した。図-1のとおり、変位制御型ロックボルトは10本/断面、鋼製支保工(変位制御部)は8か所/断面、吹付けコンクリート(変位制御部)は8か所/断面を独自のプログラミングにより非線形な構造要素でモデル化した。どの変位制御部材も、第一区間、第二区間及び第三区間から構成されるトリリニアな応力ひずみ関係(図-2)を付与している。一方、通常部材には降伏せず剛性一定の線形弾性体でモデル化した。地山の構成則には、モール・クーロンの破壊基準を用いた弾塑性型の構成則を採用した。地山の基本物性値及び支保部材の物性値は表-1及び表-2に示す通りである。

(2) 数値解析結果

図-3は、通常の支保と変位制御型支保を導入した場合の各部材に発生する応力について図化した結果である。これらの結果を見ると、ロックボルト、鋼製支保工、吹付けコンクリートともに、通常の支保では降伏してしまう

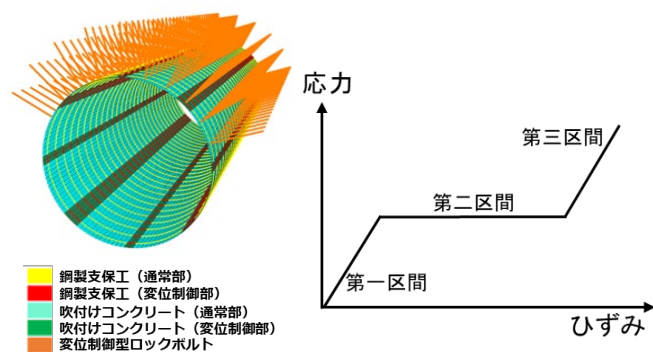


図-1 数値解析モデル

図-2 トリリニアな
応力ひずみ曲線

表-1 地山基本物性値

土被り(m)	1000	粘着力(MPa)	3.3	ポアソン比	0.25
弾性係数(GPa)	1.63	内部摩擦角(°)	41		

表-2 支保工基本物性値

	鋼製支保工 ヤング率 (GPa)	吹付コンクリート ヤング率 (GPa)	ロックボルト 地山との結合バネ値 (MPa/m)
変位制御部 (第一区間)	3.4	3.4	第一区間 84.07
変位制御部 (第二区間)	0.02	0.02	第二区間 2.08
変位制御部 (第三区間)	3.4	3.4	第三区間 15.78
通常箇所	200	3.4	-

キーワード： 三次元トンネル掘削解析, 鋼製支保工, 吹付けコンクリート, ロックボルト

連絡先 〒182-0036 東京都調布市飛田給2丁目19-1 鹿島建設(株)鹿島技術研究所 TEL 042-485-1111

ような応力が発生しているのに対し、変位制御型支保を導入した場合は、変位を適切に制御することで、支保工に過剰な応力を発生させずに掘削を完了できるという結果を得ることができた。

表-3 はトンネルを 30m 掘削後に切羽から 20m 後方における断面において、解析結果及び変位制御型支保による低減効果（低減効果＝（通常支保－変位制御型支保）/通常支保）をまとめた結果である。破断しない弾性部材を通常支保工として採用したケースと比べてロックボルトでは 82%の引張力が、鋼製支保工では 87%以上の圧縮力が低減できていることが確認できる。吹付けコンクリートでは、前述の二つの支保部材と比較して低減効果は小さいが、約 21%の圧縮力が低減されている。一方で、変位を制御することで発生応力を低減させていることから、天端沈下量では約 22%沈下量が増加し、塑性領域も約 7%大きくなっていることも確認できる。また、図-4 は、土被りをパラメータとした解析結果のうち、ロックボルト最大軸力を比較した結果である。これより地山条件に応じて変位制御型支保工による低減効果が変化することが確認できた。

想定されるトンネル変形量や塑性領域の増大を制御することが重要であるが、今回の三次元トンネル掘削解析による効果検証の結果、大きな地圧が作用し、従来用いられてきた剛な支保工では支保耐力を超過し、脆性的な崩壊が懸念されるような地山条件において、変位制御型支保工の優位性を示すことができた。

3. おわりに

本稿では、膨張性地山や大土被り地山を掘削した際に大変形によって従来の剛な支保工が脆性的に破壊される可能性があるという課題に対し、変位制御型支保工の導入によりその課題を回避できるかトンネル掘削解析により評価した。その結果、変位制御部を導入することで周辺岩盤の挙動に変化が生じ、支保に作用する荷重を低減させることが可能となり、脆性的な破壊を避けられる可能性があるということが分かった。実際には、様々な地山条件に遭遇するため、地山物性を試験や計測により正しく評価したうえで、地山条件に応じた支保仕様を検討し、適切なタイミングで適用することが必要である。今後は、地山条件ごとに、支保の個数、打設のタイミングなどをパラメータとした数値解析的検討を進め、新しい変位制御型支保工の優位性が得られる条件を特定していく所存である。

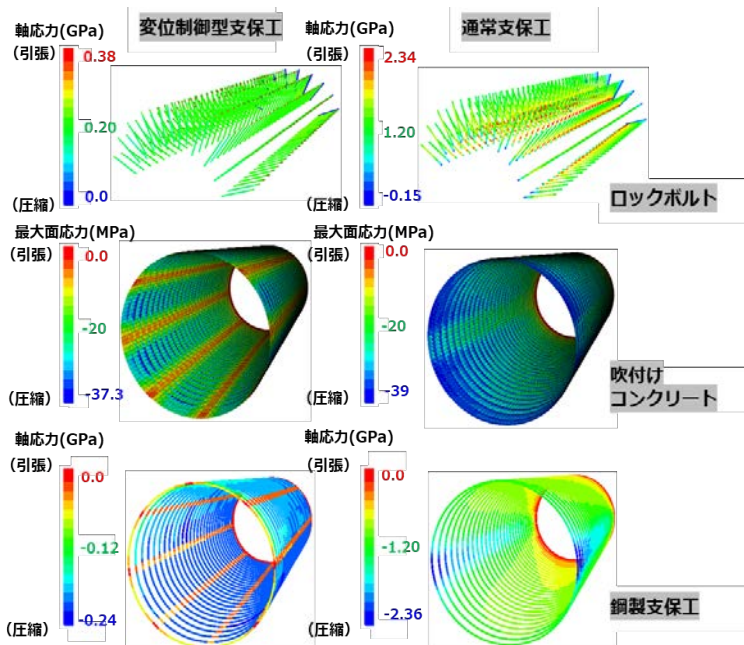


図-3 数値解析結果（左：変位制御，右：通常支保）

表-3 変位制御支保工の効果一覧

	変位制御	通常支保	低減効果
塑性領域 (m)	6.4	6.0	-6.7%
天端沈下 (mm)	180	147	-22.4%
ロックボルト軸力 (GPa)	0.38 (引張)	2.19 (引張)	82.7%
吹付けコンクリート応力 (MPa)	22.2 (圧縮)	28.1 (圧縮)	21.1%
鋼製支保工軸力 (GPa)	0.22 (圧縮)	1.74 (圧縮)	87.4%

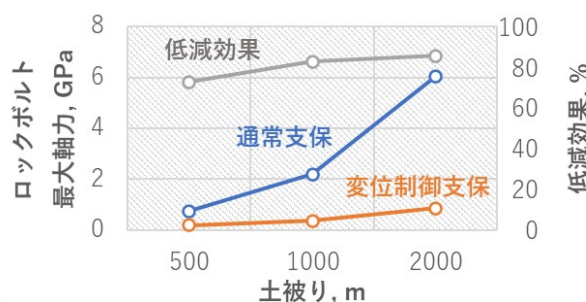


図-4 土被り別の変位制御型支保工の効果

参考文献

- 1) 北村義宜, 横田泰宏, 伊達健介, 小泉悠, 宇津野衛: 大土被りトンネルにおける変位制御型段階式二重支保工の開発, トンネル工学報告集, 第 29 巻, I-37, 2019.
- 2) Itasca Consulting Group, Inc.: FLAC3D - Fast Lagrangian Analysis of Continua in Three-Dimensions, Ver. 7.0. Minneapolis, 2019.