

3次元 FEM 解析によるロックボルト工支保効果の定量的評価

An evaluation study on effect of rock bolt method in 3-Dimensional FEM Analysis

北海道大学大学院工学研究科 ○ 学生員 吉田美奈子(Minako Yoshida)
 北海道大学大学院工学研究科 正 員 小池明夫(Akio Koike)
 北海道開発局開発土木研究所 正 員 池田憲二(Kenji Ikeda)
 北海道大学大学院工学研究科 フェロ- 三上隆 (Takashi Mikami)

1. まえがき

トンネル設計における NATM 工法の 3 次元解析は、一般に膨大な手間と計算量を必要とするため 2 次元的なモデル化での解析が一般的であった。その際、切羽の進行に伴い応力開放率を考慮した掘削相当外力を作用させることにより、擬似 3 次元的に解析することができる。従って実際に 3 次元モデルを用いることによって、切羽付近の地山変形状を正確に把握することが重要になる。同様に、ロックボルト工の扱いも経験に基づく 2 次元断面での評価が一般的である。ロックボルトは強度の小さい軟弱地盤においては掘削による地山の変形の抑制、塑性化の防止、塑性領域の拡大抑制など、地山の安定性を高める効果を持つ。また、コンクリート支保工との併用による効果も期待される。そこで、本研究では 3 次元有限要素法を用いて解析を行いロックボルト工の支保効果を段階施工解析評価検討することを目的とする。

2. 解析方法

(1) 周辺地山について

本研究において、対象となるトンネルは地表から 10 m 程度の山岳トンネルを想定している。(鉛直方向応力: $-\gamma h$ 、水平方向応力: $-\gamma h$ が作用) 周辺地山は一様応力場とし、解析対象全領域において弾性挙動を示すものとする。

ここで、 γ : 地山の単位体積重量、 h : 地表面よりトンネルまでの深さ、 k : 側圧係数 ($=1$) である。

(2) 段階施工解析について

段階施工解析では各 step での変位増分が式(1)により求められ、掘削変位として評価される。また、応力は各 step によって算出される応力の総和で評価される。

解析には有限要素法汎用プログラム DIANA を用いた。地山、支保コンクリートには六面体 20 節点アイソパラメトリック要素 (積分点 $2 \times 2 \times 2$)、ロックボルトには 3 節点埋込鉄筋要素 (積分点 2) を用いた。

$$[K]\{\Delta u\} = \sum \int_S [N]^T \{q\} ds - \sum \int_V [B]^T \{\sigma\} dV \quad (1)$$

$[K]$: step での全体剛性マトリクス

$\{\Delta u\}$: step での変位増分

$[N]$: 形状関数 $[B]$: 歪み-変位マトリクス

$\{q\}$: 単位体積あたりの表面力ベクトル

$\{\sigma\}$: 前 step までの全応力

3. 解析モデル

(1) トンネル断面形状と解析モデル

トンネル断面は直径 $D=11\text{m}$ の 3 心円トンネル (断面積 $A=63.4\text{m}^2$) とし、本研究ではモデル 1 として無支保トンネル、モデル 2 としてコンクリート支保トンネル、モデル 3 としてコンクリートおよびロックボルト支保トンネルを扱う。

(2) 解析領域と境界条件

解析領域は対称性より、1/2 断面とし、図-1 に示すようにトンネルの直径 11m に対して側壁より水平方向に 11m、天端上方に 11m、踏前下方に 11m、切羽前方に 10m、切羽後方に 20m をとった。境界条件はそれぞれの面に対して法線方向を拘束している。

(3) 地山緒元と解析ケース

解析に用いた物性値は表-1 の値を用いた。解析は図-2 に示すように一段階目に 2m 掘削を行い、二段階目の掘削時に一段階目に掘削された場所に支保工を施す。

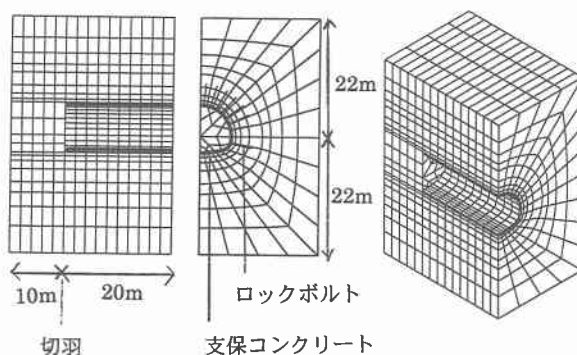


図-1 解析モデル図

表-1 材料物性一覧

	物性値		
	ヤング率E (tf / m ²)	ポワソン比 μ	単位体積重量 γ (tf / m ³)
地山	50,000	0.35	2.5
コンクリート	240,000	0.167	2.5
ロックボルト	21,000,000	0.2	7.6

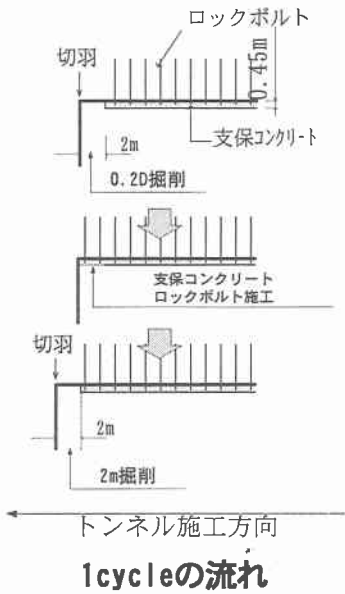
ロックボルト断面積: 0.00049m²

長さ: 4m

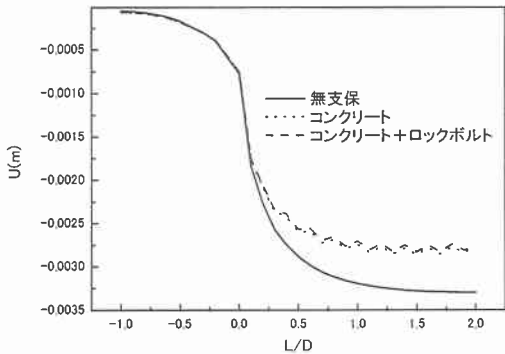
表－２ 支保コンクリート天端での
円周方向応力

切羽からの 距離 (L/D)	コンクリート	コンクリート ＋ ロックボルト
0	0.0000	0.0000
0.1	0.0000	0.0000
0.2	-24.4997	-23.9492
0.3	-29.9951	-29.2709
0.4	-36.3289	-35.4323
0.5	-39.3026	-38.3981
0.6	-42.3229	-41.3895
0.7	-43.7264	-42.7986
0.8	-45.2102	-44.2860
0.9	-45.9376	-45.0228
1	-46.7182	-45.8111
1.1	-47.1388	-46.2381
1.2	-47.5880	-46.6943
1.3	-47.9733	-47.0857
1.4	-48.3723	-47.4973
1.5	-49.1315	-48.2693
1.6	-49.9670	-49.1375
1.7	-52.2525	-51.4405
1.8	-55.3469	-54.5796
1.9	-64.0749	-63.1331
2	-46.3567	-45.7604

(tf/m²)



図－２ 段階施工工程

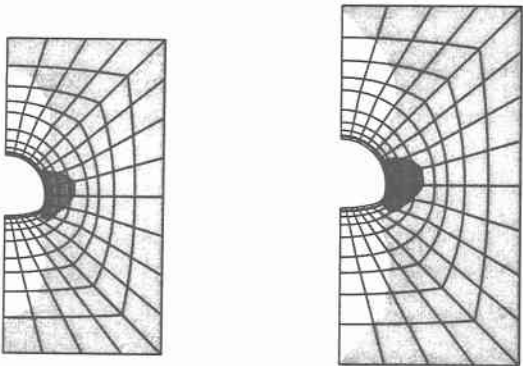


図－３ 天端鉛直変位

4. 解析結果と考察

表－２はトンネル天端変位を示している。横軸には切羽からの距離（掘削進行方向負）をとり、縦軸に天端の掘削変位をとっている。無支保の場合と比べてコンクリートおよび、コンクリートとロックボルト支保を施した場合の方が天端の変位が 15%程抑えられていることがわかる。コンクリートのみ打設した場合とコンクリートとロックボルトを施した場合での比較では、若干ロックボルトを施したときの方が変位は抑えられることがわかるが、大きな違いは見られなかった。しかし、表－２より、切羽後方 1D の場所でのコンクリート支保部の応力では、ロックボルトを施した場合、25.0 t/m² の応力が作用している条件では約 1.0 t/m² の応力の軽減が見られる。よって、コンクリート覆工には、ロックボルトを施したことによる応力軽減効果があるといえる。

次に切羽後方 1D での地山の応力（ σ_y ）分布図を示す。これより、ロックボルトによる内圧効果のため耐荷能力が高まり、一様に変形することによって地山アーチを形成することが分かる。特に、トンネル側壁部での応力は、 -107t/m^2 から -59.3t/m^2 と、約半減している。以上より、ロックボルト工はコンクリー



a) コンクリート支保のみ b) コンクリート+ロックボルト

図－４ 切羽 1D 後方断面 σ_y 応力分布図

ト支保部に対して応力を低減させる大きな効果をもつといえる。

5. おわりに

本研究では段階施工解析は、全断面掘削としたが、今後の研究課題としては 1 次覆工と 2 次覆工とにコンクリート支保部を分け、また掘削方法も全断面掘削から上半、下半掘削に分けてより実際の施工状態に近づけて解析を行う。

参考文献

- 1) 西岡隆・松本嘉司 著：トンネルの設計理論 構造計画研究所
- 2) トンネル標準示方書[山岳工法編] ：土木学会
- 3) 道路トンネル設計施工料要領 平成 7 年 6 月 ：（社）北海道開発技術センター