

### 塑性圧を受ける山岳トンネルに対するロックボルトの効果に関する数値解析的検討

(公財) 鉄道総合技術研究所 正会員 ○嶋本 敬介, 野城 一栄

#### 1. はじめに

山岳トンネル供用後に塑性圧を受け、補強工が必要となることがある。塑性圧を受けるトンネルでは、内空断面の縮小が見られるが、その速度としては年間数 mm 程度と緩慢な場合も多く、時間的な余裕がある場合は、十分に調査、計測をし、その結果に基づいて補強工の仕様を決定する。この時、補強工の効果を予測してどの程度の補強が必要かを判断できることが望ましいが、特にロックボルト補強工に関しては、数値解析でその効果を精度よく表現することが難しいのが現状である。そこで本稿では、数値解析により、いくつかのモデル化方法でロックボルトの変形抑制効果を評価するとともに、数値解析上、ロックボルトの効果が適切に評価できない原因を考察した。

#### 2. 解析条件

解析には有限差分コード FLAC3D を用いた。解析モデル図を図-1 に示す。トンネル断面はインバート・りょう盤なしの鉄道単線トンネル、覆工は厚さ 40cm の無筋コンクリート、背面空洞あり（空洞を弾性係数 10MPa、ポアソン比 0.1 の弾性体として表現）とした。土被りは 200m、側圧係数は 0.3 として、地山に土被り荷重を初期応力として与えた上で、上面境界の鉛直変位を固定することで表現した。覆工と地山との相互作用は滑りと分離を表現できる interface 要素によりモデル化している。

解析ケースはロックボルトのモデル化方法に着目して図-2 に示す 5 ケースを設定した。

解析モデルのトンネル延長方向 (y 方向) は 1m のみをモデル化しており、y=0, y=1 の y 方向変位を拘束することで平面ひずみ状態を表現している。y 方向にはメッシュを 2 分割としており、ロックボルトは y=0.5m 位置にモデル化することで、トンネル延長方向に 1m ピッチでロックボルトが打設されている状況表現した。

ロックボルトは独立した構造要素 (Cable 要素) にて表現した。Cable 要素は近接する地山要素、覆工要素の節点との相対変位に応じて荷重が発生し、周面摩擦抵抗を超える荷重が作用した場合には周辺要素との滑り (付着切れ) が表現されるモデルとなっている。Case5 は付着強度を非常に大きく設定することで付着切れしないモデル化とした。また、Case2, Case5 では覆工内面と Cable 要素の節点の相対変位が生じないようにモデル化することでベアリングプレート表現した。

地山、覆工、ロックボルトの物性値は文献 1) と同じとしている。地山の物性値は地山強度比を 1 として、地山の軸圧縮強さを決定し、その他の物性値は軸圧縮強さとの相関式を用いて決定した。地山およびコンクリートは Mohr-Coulomb の破壊規準に従う弾完全塑性体としてモデル化し、コンクリートは引張破壊による軟化についても表現した。Case2, Case4 ではロックボルトの降伏荷重は 200kN としており、それ以上の軸力を負担できないようモデル化している。

トンネル掘削解析を応力解放率 100% の条件で実施し、その後、覆工をモデル化し、続いてトンネル完成後の解析として、地山全体の強度 (せん断強さ、内部摩擦角) をステップ毎に低下させることにより、トンネル周辺地山の塑性化に伴う押し出し圧によるトンネル変状を表現した。地山強度は全地山要素について 50 ステップに分けて低下させている。

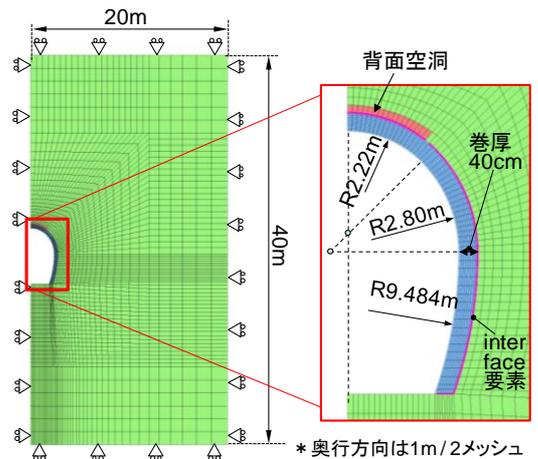


図-1 解析モデル図

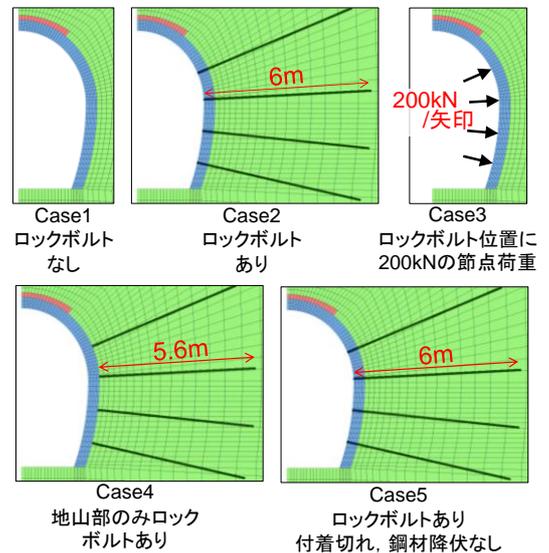


図-2 解析ケース

キーワード 山岳トンネル, ロックボルト, 数値解析

連絡先 〒185-8540 国分寺市光町 2-8-38 TEL:042-573-7266

3. 解析結果

図-3にSLより1.6m下(路盤より1.5m上)の水平測線の内空縮小量の経時変化を示す。塑性圧による変状では内空変位が長期間にわたって一定速度で進行することが一般的であることに鑑み、ロックボルトなしのケースが2mm/年の一定の変位速度であると仮定して地山の強度低下と経過時間を関連付け、時間軸を導入した。図-3よりCase2~Case4は変位抑制効果が同程度(25%程度)でありCase5は変位速度を半分以下に抑制できていることがわかる。Case3は、初めから200kN節点荷重により内

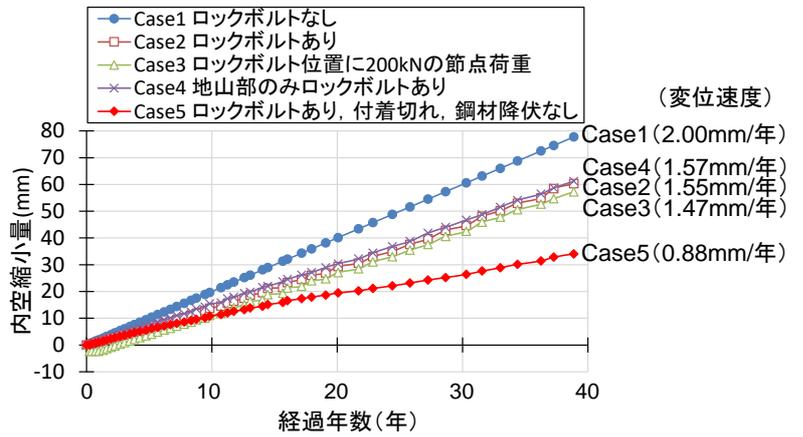


図-3 内空縮小量の経時変化

圧を与えているため、他のケースのロックボルト軸力が200kNに到達するまで(8年経過時頃まで)は最も大きな効果を発揮していたが、それ以降はCase2, Case4と変わらない結果となった。

図-4に各ケースの変位量とロックボルト軸力のコンターを示す。変形を10倍にして示している。これより、トンネルは側壁脚部がすぼむように変形しており、ロックボルトにより側壁の押し出しを抑制できていることがわかる。ただし、既往の事例分析事例<sup>1)</sup>によると、事例は少ないものの、ロックボルトによる路盤隆起抑制効果は50%~100%であるが、解析結果では降伏するほど大きな軸力が発生しているにも関わらず変位抑制効果が25%となっており、ロックボルトの効果が数値解析上、過小評価されている可能性も考えられる。

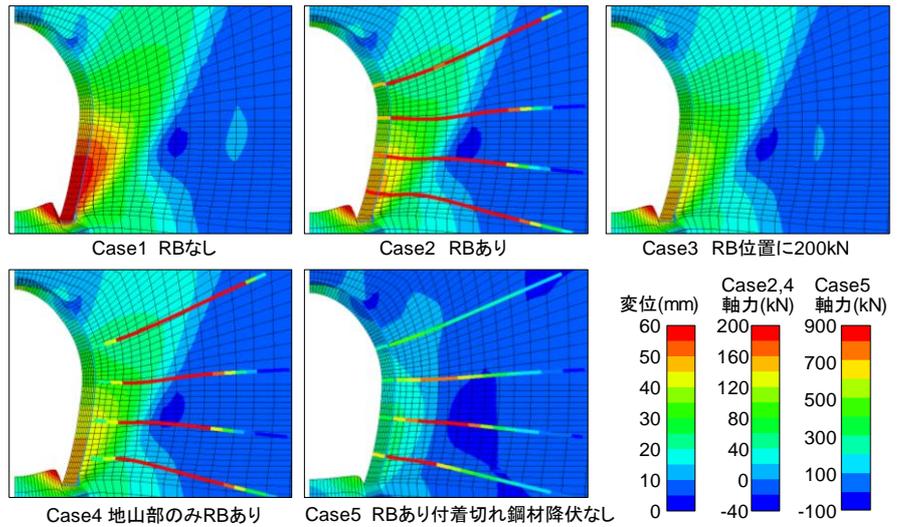


図-4 変位量とロックボルト軸力のコンター図 (39年経過時, 変形10倍)

4. 解析結果の考察

今回の解析条件では、Case2とCase3の変形抑制効果が数値解析上はあまり変わらないという結果となったが、実現象としては、ロックボルトはベアリングプレートを通じて覆工内面に与える内圧効果以外にも、地山補強効果<sup>2)</sup>があると考えられるため、Case2の方が、効果が大きくてしかるべきと考えられる。実際の塑性圧の現象としては、亀裂から劣化が進行し、亀裂が開口して押し出し圧として覆工に作用すると考えられ、ミクロに見れば不連続な現象である。ロックボルトがあれば、この亀裂開口の発生率を抑制できるものと思われるが、このような効果を連続体の解析では十分効果を表現できないものと思われる。これにより、数値解析の方がロックボルトの変位抑制効果も小さくなる傾向があるものと考えている。

Case2とCase4の変形抑制効果が同程度であったことに関しては、地山と覆工の境界部と覆工表面との間の相対変位がほとんど発生していないため、頭部ベアリングプレートのモデル化の与える影響は小さかったものと考えられる。すなわち、Case2は覆工内面に200kNのせん断力がロックボルトから伝達されているが、Case4はトンネル近傍の地山に200kNのせん断力を伝達しており、両者に大きな差はない結果となっているものと考えられる。

5. おわりに

対策工の効果を数値解析で事前に予測して対策工を設計する需要は大きく、ロックボルトのモデル化の精度を向上させることは今後の山岳トンネルにおける重要な課題の1つであると考えられる。

参考文献

- 1) 嶋本, 野城, 小島, 塚田, 朝倉: 建設時の影響を考慮した山岳トンネルの路盤隆起現象とその対策工に関する研究, 土木学会論文集 F1, Vol.69, No.2, pp.105-120, 2013.
- 2) 土木学会: トンネル標準示方書 [山岳工法編]・同解説, p.89, 2016.