

数値解析における変形制御型ロックボルトのモデル化検討

鹿島建設(株) 正会員 ○小泉 悠 岡田侑子 黒川紗季 升元一彦 横田泰宏

1. 変形制御型ロックボルトの概要

高地圧下に施工される海外のトンネルや鉱山において、支保の脆性的な破断の抑止を目的として、地山の変形に追従可能な支保部材の開発がなされてきた。これを踏まえ、筆者らは、高地圧に伴う押出し性地山や膨張性地山への対策として、変形制御型ロックボルト（以下 RB と記す）の開発に取り組んできた¹⁾。開発したボルトの構成を写真-1に示す。引抜き荷重に対し、本ボルトが①ネジ部～モルタル間の付着による初期抵抗部、②スリーブがモルタルを圧壊しながら移動する中間抵抗部、③スリーブがリングに当たり、両者一体となってモルタルを圧壊する最終抵抗部のトリリニアな挙動を示すことを確認した（図-1）。このトリリニアカーブは、ネジ部の長さやスリーブ～リング間の距離を調整することで、現場で任意に制御できる。ただし、この変位制御の効果を最大化するためには、地山の硬軟・地圧を入力値とする数値解析によるシミュレーションが必要であるため、本ボルトのモデル化について検討した。

2. ロックボルトのモデル化とバネ関数の同定

変形制御型 RB の構成・挙動を考慮し、有限要素解析において、トラス要素（1 要素）の先端にバネ要素を取り付け、トリリニアカーブを表すバネ関数を与えることでモデル化することとした（図-2 (a)）。また、比較対象となる従来の全面定着型 RB については、トラス要素で表し、地山要素と節点を共有するモデル化（剛結）が一般的である（図-2 (b)）。一方、ボルトと地山の弾性係数が異なることや、定着材と地山との付着特性を考慮し、トラス～地山要素の節点間にバネを挿入し、ボルト～地山間の相対変位を表すモデル化もみられる（図-2 (c)）²⁾。本検討では、これら 3 種のモデル化を対象に解析を実施し、考察する。

図-2 (a) (c) に示すモデルについては、バネ値を同定するため、引抜き試験の再現解析を実施した。解析モデルを図-3に示す。有限要素解析には 2D/3D 地盤解析ソフト GTS-NX を使用し、過去に実施した変形制御型 RB、全面定着型 RB の引抜き試験の結果に整合するよう、バネ関数を同定した。なお、地山は変形係数 2000MPa の弾性体で、いずれのボルトも長さ 3.0m、弾性係数 $2.1 \times 10^5 \text{MPa}$ とした。ここでの変形制御型 RB のスリーブ～リン

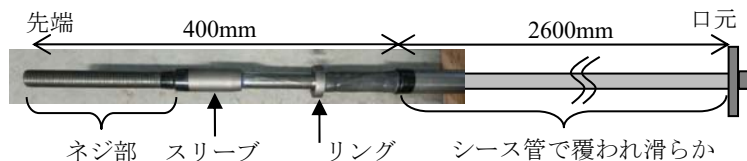
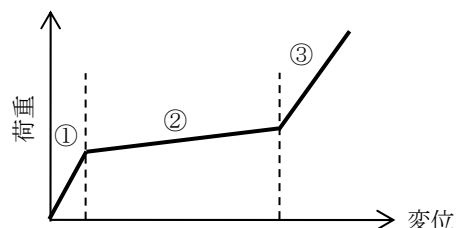
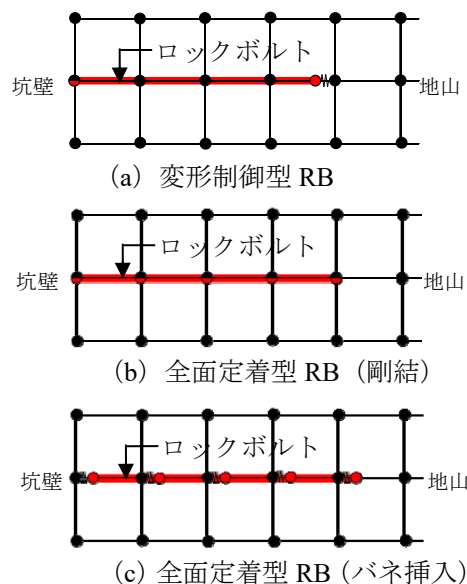
写真-1 変形制御型ロックボルトの構成
(プロトタイプ L=3.0m)

図-1 変形制御型ロックボルトの挙動



- 地山要素の節点
- トラス要素の節点
- 地山・トラス要素での共有節点
- トラス要素
- バネ要素

図-2 変形制御型 RB および全面定着型 RB のモデル化

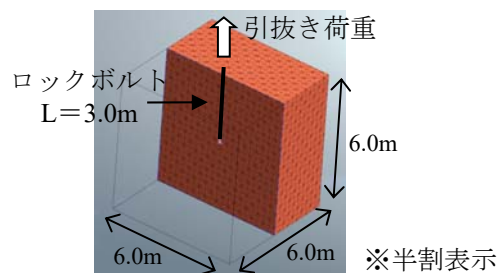


図-3 引抜き試験の再現解析モデル

キーワード 数値解析, 変形制御, ロックボルト, モデル化, 引抜き試験, 破断

連絡先 〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1 鹿島技術研究所 岩盤・地下水 Gr. TEL 042-489-6646

グ間距離は 30mm であった。トライアルアンドエラー解析の結果、図-3 に示すように解析結果と実験結果が整合した。このときのバネ関数を図-4 に示す。

3. トンネル掘削解析の数値実験結果とその考察

前章で同定したバネ関数を用い、2次元のトンネル掘削解析を実施した。トンネルは直径 10m の円形とし、ボルト長 3.0m、弾性係数 $2.1 \times 10^5 \text{MPa}$ とした。地山は D I 級の不良地山を想定し、Mohr-Coulomb の降伏基準を用いた。入力物性値を表-1 に示す。解析手順は、等方等圧の初期地圧を与えた後、変位をリセットし、ボルト導入後、応力解放を 10% ずつ、100% まで進めた。得られた解析結果からボルト軸力を調べ、軸力の最大値がある応力解放のステップ（ステップ N）で 300kN（ボルト素材部の破断耐力）に到達した場合、再度解析を実施し、ステップ N+1 以降でボルトを無効化させ、これによりボルトの破断を再現した。

初期地圧 6.0MPa のケースについて、ボルト軸力の最大値と応力解放率の関係を図-5 に、壁面変位と応力解放率の関係を図-6 に示す。図-5 より、全面定着型 RB（剛結）、全面定着型 RB（バネ）、変形制御型 RB の順で、ボルト軸力の最大値が 300kN に到達し、破断が想定された。次に、図-6 より、応力解放率 70% までで、ボルトの種類および有無によらず、壁面変位はほぼ同一であった。本ケースでは、応力解放率 70% から、坑壁近傍で塑性域が発生・拡大し、坑壁とボルト先端部の相対変位の増加により、ボルトの引張抵抗性能が発揮されることとなる。しかし、この時点で破断が想定され、無効化された全面定着型 RB（剛結およびバネ）は変位抑制に寄与せず、本ケースの特に応力解放率 90% においては、変形制御型 RB が変位を最もよく抑制できた。

4. まとめ

高地圧下でのトンネル工事において、開発した変形制御型 RB の効果を最大化するためには、数値解析に基づく設計検討が重要となる。そのためのモデル化を検討し、2次元掘削解析に適用した結果を考察した。変形制御型 RB の効果は、地山の硬軟・地圧といった地山条件に依存し、これらパラメタリックスタディの結果については別報にて報告する所存である。また、吹付けコンクリートや鋼製支保工等、他の支保部材についても変形制御型のモデル化検討を進めていく。

参考文献

- 1) 岩野圭太ら：変形制御型ロックボルトの開発，土木学会第 72 回年次学術講演会予稿集，pp.739～740，2017.
- 2) 土木学会：山岳トンネルにおける模型実験と数値解析の実務，pp.164～166，2006.

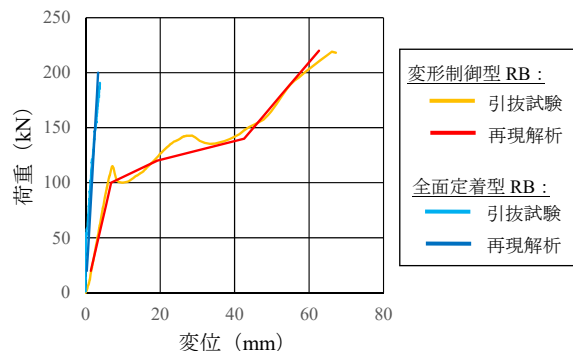


図-3 引抜き試験およびその再現解析の結果

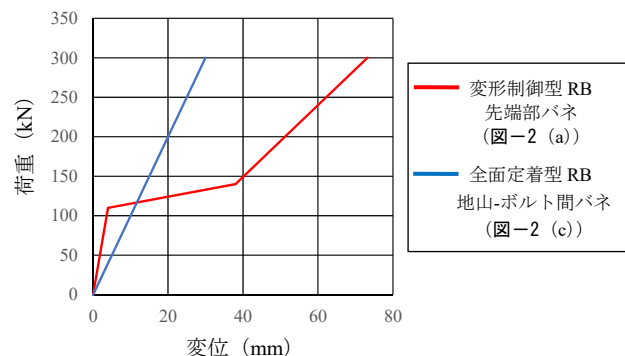


図-4 同定したバネ関数

表-1 地山物性値

項目	値	単位
変形係数 E	500	MN/m^2
ポアソン比 ν	0.35	—
粘着力 c	0.5	MN/m^2
内部摩擦角 ϕ	35	deg

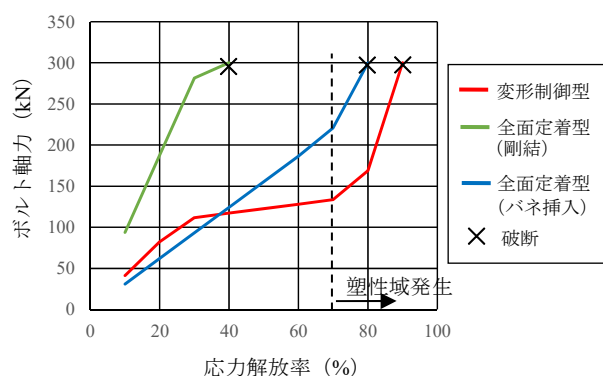


図-5 ボルト軸力と応力解放率の関係

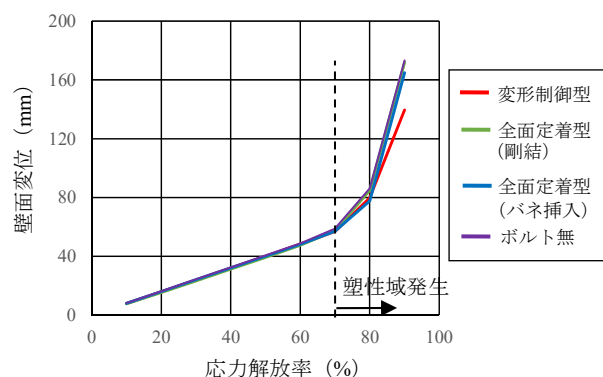


図-6 壁面変位と応力解放率の関係