

Experimental and Computational Study on Rock Bolt Modelling and its Application on a New Type of Energy-Absorbing Rock Bolt

ロックボルトモデルの構築と新しい変位制御型ロックボルトへの適用

横田 泰宏 Yasuhiro Yokota

1. はじめに

山岳トンネルや地下空洞の構築において、ロックボルトは鋼製支保工や吹付けコンクリートと並び必要不可欠な支保部材の一つである。そのため、ロックボルトの補強効果を検討した研究がこれまでも数多く行われてきた。しかし、ロックボルトとその定着材（モルタルやレジンなど）の間で生じる付着切れや定着材の内部に発生するクラックなど、ボルト-定着材間の境界挙動がロックボルトの補強効果に及ぼす影響について理解は十分でない。また、大土被りトンネルや膨張性地山を掘削する際には、地質不良部において過剰な変位が発生し、ロックボルトなどの支保部材が損傷することで、事故の発生、工期の遅延、工費の増加といった問題が生じる恐れがある。

本研究では、まず初めにボルトと定着材近傍の境界挙動をモデル化したせん断試験を行い、その試験結果を再現できる数値解析モデルを不連続変形法（以降、DDA と表記）によって構築した。次に、そのモデルを活用して、地山の大変形に追従でき、その変形を制御する機構を備えた新しい変位制御型ロックボルトのアンカー形状を検討し、補強メカニズムの検証を行った。その後、大変形が生じる条件で2次元トンネル掘削シミュレーションを行い、一般的に用いられる全面定着型ロックボルトに対する新しいロックボルトの優位性を示した。

2. 室内せん断試験と不連続体解析によるロックボルトモデルの構築

ロックボルトと定着材の境界面を簡易に模擬（Fig. 1）したせん断試験を行い、DDAによって付着切れや定着材内部に生じたクラックまで再現した。一例として示した実験と数値解析の比較結果を見ると、定着材の強度を変化させることにより生じたクラック発生状況の差異とせん断応力-せん断変位曲線の違いの何れも概ね表現できていることが分かる（Fig. 2）。

本ロックボルトモデルを活用することで、ロックボルトのアンカー形状（例えば、ロックボルトリブ角度、リブ間隔、リブ形状）や定着材条件（例えば、定着材強度、定着材厚さ）が及ぼす境界挙動の違い（付着切れやクラック分布状況）にまで着目してロックボルトの補強効果に及ぼす影響を詳細に評価できるようになった。本研究によって得られた、上述したロックボルト形状パラメーターの各推奨値を Table 1 に纏める²⁾。

3. ロックボルトモデルを用いた新しい変位制御型ロックボルトのアンカー形状及び補強メカニズムの検討

一般的に用いられる全面定着型ロックボルトは、大きな支保荷重を負担できる一方で、トンネルに大変形が生じると破断する恐れがある。さらに、鉱山分野で近年開発されたエネルギー吸収型ロックボルトは、比較的大きな支保荷重を担保しながら大変形に追従することができるものの、どこまでも変形に追従するため、周辺地山を過度に緩める恐れがある。そこで、荷重を負担しながら、大変形に追従し、ある地点で再び剛性を増加させるコンセプトで開発が進められてきた新しい変位制御型ロックボルトの補強性能を本ロックボルトモデルを用いた引抜試験シミュレーションにより検証した。Fig. 3 は、ボルトモデルと解析より得られた荷重-変位曲線である。この結果、特殊なアンカー機構が適切に機能し、変位に追従した後に再度荷重を負担する挙動が示された。Fig. 4 は、解析結果を通じて確認した新しいロックボルトの補強メカニズムである³⁾。

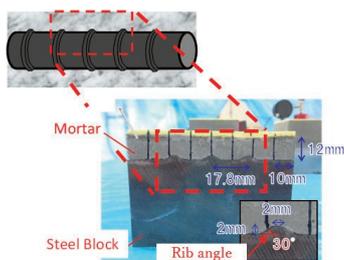


Fig. 1 簡易ロックボルトモデル (Simplified Rock Bolt Model)

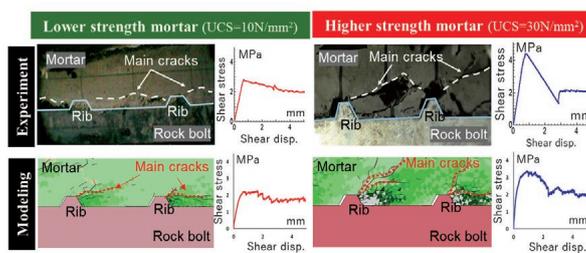


Fig. 2 せん断試験と数値解析結果の比較 (Comparison between Shear Test and Simulation Results)

Table 1 ボルト形状推奨値 (Recommendation for Bolt Configuration)

Rock bolt parameters	Recommendation
Rib angle	$60^\circ < \text{Rib angle} < 90^\circ$
Ratio of mortar and rib height (α)	$9.0 < \alpha < 12$
Rib space (1.0D = 17.8 mm)	$1.0D < \text{Rib space} < 1.5D$
Rib shape (C.R.=Corner Radius)	Square or slightly rounded corner ($0.0\text{mm} < \text{C.R.} < 1.0\text{mm}$)

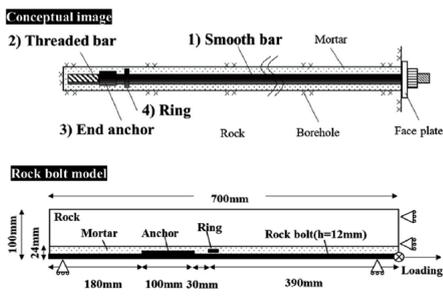


Fig. 3 変位制御型ロックボルトモデルと得られた荷重-変位曲線
(Numerical Model of Deformation-controlled Bolt and Load-displacement Curve)

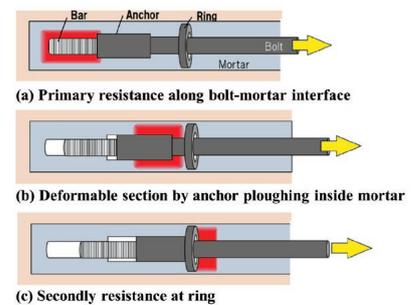
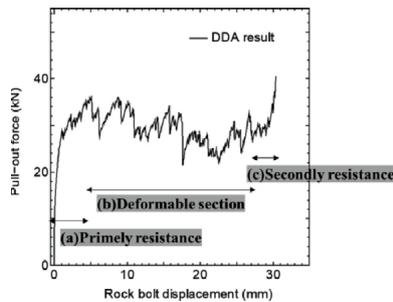


Fig. 4 変位制御型ロックボルト補強メカニズム
(Support Mechanism of Deformation-controlled Bolt)

4. トンネル掘削シミュレーションによる新しいロックボルトの優位性検証

新しい変位制御型ロックボルトについて、大変形が生じるトンネル掘削時における優位性を検証するため、二次元 DDA トンネル掘削シミュレーションを行った³⁾ (Fig. 5)。事前に、二次元掘削シミュレーション向けの変位制御型ロックボルト要素を開発し、引抜試験結果を再現できることを確認した。Fig. 6 は、掘削シミュレーションより得られた主応力分布、ロックボルトせん断力及び軸力分布である。生じた大変形により、全面定着型のロックボルトは 3 本が破断したことに対し、変位制御型ロックボルトは同じ地山条件にも関わらず、掘削後も破断せず支保荷重を負担していることを確認した。大変形が生じるトンネルを対象として、新しい変位制御型ロックボルトの従来ロックボルトに対する優位性を示すことができた。

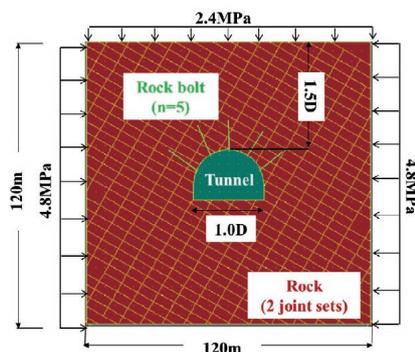


Fig. 5 二次元トンネル掘削解析モデル
(2D Tunnel Excavation Simulation Model)

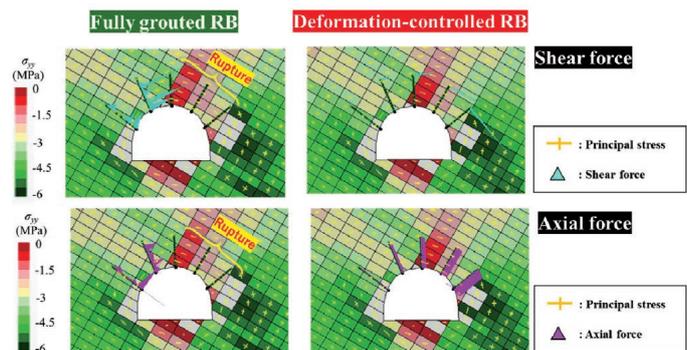


Fig. 6 掘削解析結果：主応力分布，せん断力分布，軸力分布
(Simulation Results: Principle Stress, Shear Force and Axial Force)

5. おわりに

本研究では、トンネル掘削において不可欠な支保部材の一つであるロックボルトのボルトと定着材間の境界挙動を評価できる数値モデルを DDA により構築した。また、構築したロックボルトモデルを用いて、新しい変位制御型ロックボルトのアンカー形状の検討や補強メカニズムの検証を行った。最後に、大変形が生じるトンネル掘削シミュレーションにより、新しいロックボルトの優位性を示すこともできた。今後、開発されたロックボルトを用いた原位置試験や試験施工が行われ、大土被りトンネルや膨張性地山で活用されていくことが期待される。

参考文献

- 1) Yokota et al. ; Laboratory and Numerical Study on the interface behaviour between the rock bolt and bond material. Rock Mech. Rock Eng, 2018, <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1629-4>.
- 2) Yokota et al. ; Effect of bolt configuration on the interface behaviour between a rock bolt and bond material: A comprehensive DDA investigation. Comput. Geotech. 105, 2019, pp.116-128, <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2018.09.017>.
- 3) Yokota et al. ; Development of a new deformation-controlled rock bolt: numerical modelling and laboratory verification. Tunnelling and Underground Space Technology 98, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103305>.

キーワード: トンネル, ロックボルト, せん断試験, 引抜試験, 不連続変形法, 大変形

Keywords : tunnel, rock bolt, shear test, pull-out test, Discontinuous Deformation Analysis, large deformation