不連続体解析による変位制御型ロックボルトの補強メカニズム

鹿島建設(株)　正会員　○横田泰宏　伊達健介　岩野圭太　岡田侑子　黒川紗季　宮石雅子
ナンヤン工科大学　Zhao Zhiye　Nie Wen

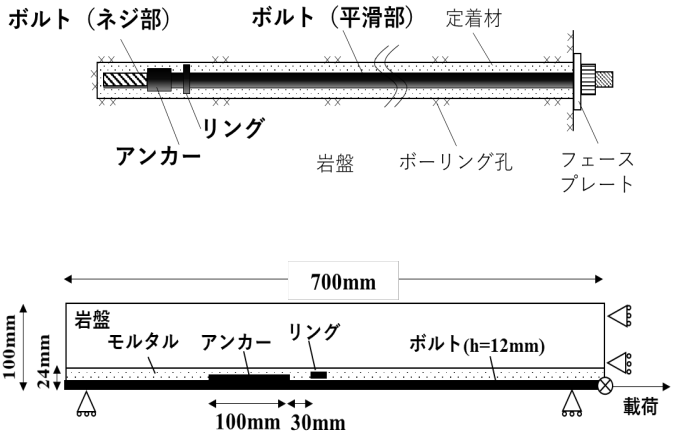
１．はじめに

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ならび必要不可欠な支保部材である．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にも数多く行われてきた．筆者らは，これまで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ロックボルトモデルを不連続変形法によって構築してきた [1), 2)]．本研究では，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について，制御機構の中心となるアンカー部およびリング部をモデル化して補強メカニズムの検証を行った．

２．新しい変位制御型ロックボルト形状と補強メカニズム

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負担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新しい変位制御型ロックボルトの開発を進めてきた．この変位制御型ロックボルトの補強性能を，構築した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．**図－1** は，変位制御型ロックボルトのコンセプト図とロックボルトモデルによりアンカー部近傍をモデル化した図である．変位制御型ロックボルトは，主にボルト，アンカー，リングの三要素で構成される．ロックボルトモデルは，ロックボルトと定着材間の境界挙動や定着材内に生じるクラックまで詳細に再現できる数値解析モデルである．本検討では，アンカーは 100 mm，リングとアンカーの離れは 30mm と設定した．ボルトの端部において，**図－1** に示した矢印の方向に引抜荷重を載荷することで，引抜試験を簡易に再現している．**表－1** は，変位制御型ロックボルトおよび定着材に用いたモルタルの物性値である（基本ケース）．

図－2 は，引抜荷重を載荷した際にモルタル内に発生した水平応力分布図とクラックの分布状況である．



図－1　変位制御型ロックボルトモデル
コンセプト図（上）と数値解析モデル図（下）

表－1　変位制御型ロックボルト及び
モルタル物性値（基本ケース）

材料	パラメータ	値	材料	パラメータ	値
モルタル	単位体積重量	23(kN/m^3)	ロックボルト	単位体積重量	78(kN/m^3)
	弾性係数	7.3(GPa)		弾性係数	200(GPa)
	ポアソン比	0.2		ポアソン比	0.3
	内部摩擦角（初期/残留）	40/42.5(°)	ボルト-モルタル境界	内部摩擦角（初期/残留）	35/30(°)
	粘着力（初期/残留）	8.5/3.0(MPa)		粘着力（初期/残留）	0.5/0.0(MPa)
	引張強度（初期/残留）	1.8/1.0(MPa)			

キーワード：　ロックボルト，不連続体解析，トンネル，大変形
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

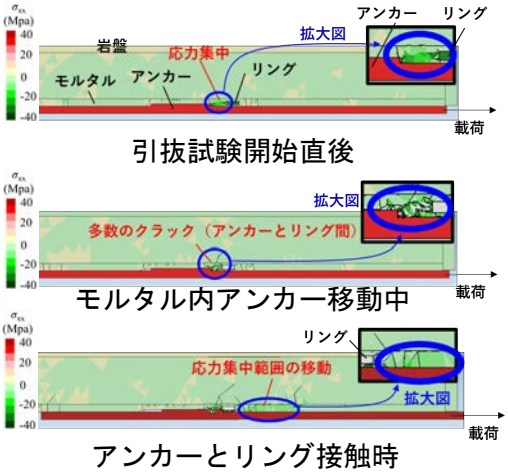
© Japan Society of Civil Engineers

また，**図－3** 中に示す実線は，数値解析結果から得られた荷重-変位曲線である．解析では，引抜開始直後（水平変位 5 mm まで）は，アンカーとリング周辺に応力が集中し，荷重-変位曲線は線形挙動を見せた（初期抵抗区間）．次に，引抜荷重の増加に伴って，荷重-変位曲線の傾きは小さくなり，最終的には荷重が一定に近い値を示した（水平変位 5 mm から 30mm の範囲）．この区間では，アンカーがモルタル内部を引抜方向へ移動する様子が確認できた．アンカーの移動に伴って，アンカーとリング間のモルタル内には多数のクラックが生じていることが確認できた（変位制御区間）．最終的に，アンカーがリングに接触した際には，応力集中の範囲がリングの前方へ移動した（水平変位 30mm 以降）．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（最終抵抗区間）．

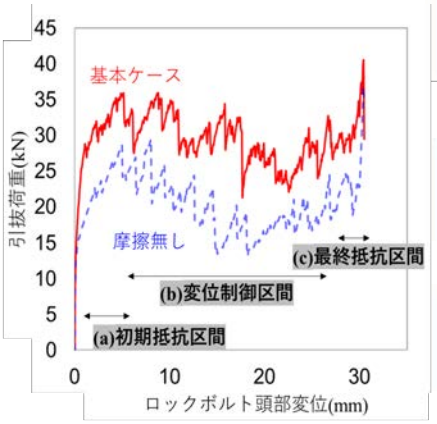
また，**図－3** 中に示す破線は，補強メカニズムの更なる理解のために，ロックボルトとモルタル間の定着力に関するパラメータスタディを実施した一例である．この結果は，境界面に沿った摩擦力を考慮せずに引抜シミュレーションを行ったケースである．摩擦力を考慮しなかったケースと基本ケースを比較すると，初期ピーク力が約 20%低下したことが分かった．その後は，実線で示した基本ケースと同様にトリリニアに近い挙動を示し，最終的には変位に追従した後に再度荷重を負担する傾向が確認された．この結果，ボルトと定着材間の付着力は，初期ピーク荷重に影響を与えるため，変位制御区間に移行する荷重を決定する際には，定着材間の付着力（摩擦力と付着長さ）を適切に設定する必要がある．**図－4** は，これらの解析結果を通じて得られた新しい変位制御型ロックボルトの補強メカニズムである．初期抵抗区間では，ボルトやアンカーとモルタルの境界面で抵抗が生じる．次に，変位制御区間ではアンカーがモルタル内を移動することで変位を許容する．最終抵抗区間では，アンカーがリングに接触し，リングの抵抗によって変位を抑制することができる．

３．おわりに

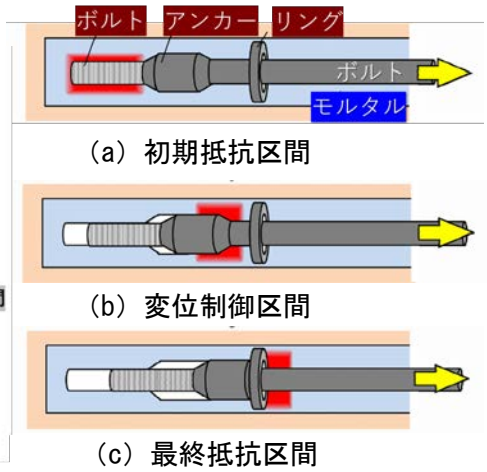
これまでに構築したロックボルトモデルを用いて，新しい変位制御型ロックボルトの制御機構の中心となるアンカーおよびリングをモデル化し，補強メカニズムを検証することができた．補強メカニズムに基づいた変位制御型ロックボルトの支保要素単体としての性能が確認できたため，トンネル掘削シミュレーションを行い，大変形が生じるトンネル掘削時において従来型ロックボルトに対する優位性を検証していく所存である．



図－2　モルタル内水平応力分布とクラック発生状況



図－3　数値解析から得られた荷重-変位曲線



図－4　変位制御型ロックボルトの補強メカニズム

参考文献

1) 岡田侑子，岩野圭太，伊達健介，横田泰宏，小泉悠，宮石雅子, Zhao Zhiye, Nie Wen：ロックボルトと定着材間の境界挙動を模擬した基礎実験，土木学会第 75 回年次学術講演集，III-82, 2020.
2) 横田泰宏，伊達健介，岩野圭太，岡田侑子，小泉悠，宮石雅子, Zhao Zhiye, Nie Wen：ロックボルトと定着材の境界挙動評価のための数値モデリング，土木学会第 75 回年次学術講演集，III-81, 2020.

© Japan Society of Civil Engineers