

大変形地山に対する鏡ボルトの作用メカニズムと効果に関する検討

鉄道総研 正会員 ○嶋本敬介 野城一栄
 鉄道・運輸機構 正会員 高橋源太郎 湯澤謙一郎
 京都大学大学院 正会員 朝倉俊弘

1. はじめに

近年、切羽鏡面の安定や地表面沈下の抑制の目的で、未固結地山部あるいは大変形地山部においては長尺鏡ボルトが補助工法として用いられる事例が多い。しかし、鏡ボルトに関する研究は数多く行われているものの、現状では鏡ボルトの配置や長さ、本数といった仕様は、トンネル（あるいは各工区）ごとに、地質条件や内空変位等の条件に応じて決められており、統一された設計手法は確立されていない。そこで筆者らは、合理的な設計手法を確立するため、既往の計測データの分析、現地試験、土槽実験、数値解析等により研究を進めている。その中の大変形地山を想定した模型実験とそのシミュレーション解析を実施した結果を報告する。

2. 土槽実験の概要

地山強度と比べて地圧が大きいなどの原因で切羽が不安定となり押出すような、大変形地山における鏡ボルトの作用効果および切羽前方地山の挙動を確認することを目的として、1/30 スケールの土槽実験を行った。

実験概要図を図1に示す。縦600mm、横600mm、深さ900mmの土槽に低強度のモルタルを打設し、トンネル上半掘削後の状態を模擬するため、1/30 スケールのアルミ製の半円トンネル模型（厚さ3mm、深さ100mm）をセットし、トンネル模型内にはモルタルが進入してこないように切羽面板を付けた状態で養生する。切羽面板には鏡ボルト模型をセットしておく。モルタル硬化後、切羽面板を取り外し、図1のように側方からジャッキにより載荷板を介して載荷する。載荷は5分で1mm載荷し5分観察を1ステップとし、載荷板変位が15mmに到達するまで載荷した。

なお、模型の鏡ボルトにはステンレス製ボルト（外径 $\phi=5\text{mm}$ 、肉厚 $t=0.5\text{mm}$ 、長さ $l=350\text{mm}$ ）にサンドペーパーを巻いたものを使用した。なお、鏡ボルト模型のうち、1本については、図2に示すように、ボルトの内面にはFBGセンサ付きの光ファイバを接着剤で貼り付けており、ボルトに発生するひずみが計測できる。

実験ケースを表1に示す。

3. 数値解析の概要

図1の実験をモデル化した3次元数値解析を実施した。解析には有限差分法による解析ソフトFLAC3Dを使用した。境界条件は、6面全てをローラー支持としており、トンネル模型の内部は要素がなく切羽面はフリーとなっている。この状態で切羽に向かって左手の面に変位速度を与え、15mmまで押込む解析を実施した。解析ケースは実験と同じく表1に示す通りである。また鏡ボルト模型は、軸剛性、曲げ剛性を表現でき、地山ーボルト間のすべりを考慮できる構造要素である「Pile要素」によりモデル化した。「Pile要素」の入力物性値（ばね剛性や付着強度等）

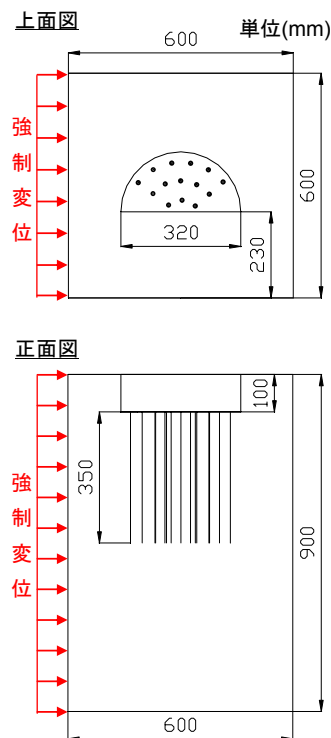


図1 実験概要図

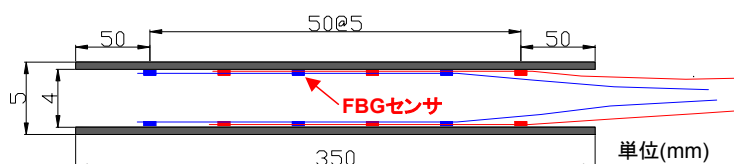


図2 鏡ボルト模型のサイズ、ひずみ計測位置模式図

表1 実験ケース

ケースNo.	鏡ボルト本数	鏡ボルトの配置
ケース1	0本	
ケース2	5本	
ケース3	14本	

キーワード 山岳トンネル、切羽補強工法、模型実験 数値解析

連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38 鉄道総合技術研究所構造物技術研究部 TEL:042-573-7266

に関しては、切羽押し出し量がある程度実験結果と一致するように設定した。その他、低強度モルタル、アルミ製トンネル模型に関する入力物性値は表2の通りである。

表2 解析入力物性値

	低強度モルタル	アルミ製トンネル模型
解析モデル	Mohr-Coulomb 弾完全塑性体	弾性
単位体積重量	15.9 kN/m ³	24.5 kN/m ³
縦弾性係数	25 MPa	70 GPa
ポアソン比	0.37	0.30
せん断強度	0.15 MPa	—
内部摩擦角	15°	—

4. 実験および数値解析の結果

(1) 切羽押し出し量

図3に各ケースの切羽中心部の押し出し量と載荷板変位の関係を示す。これより、解析においては特に載荷板変位10mm以降において、ボルトによる切羽押し出し量抑制効果が顕著である。載荷板変位10mmはボルトなしのケースで塑性領域が出始めた時点であり、ボルトにより低強度モルタルの塑性化を抑制したことがわかる。実験結果においても、解析結果ほどは顕著には現れなかったものの、ボルトにより、低強度モルタルの破壊を抑制することにより、切羽押し出しの進行を弾性的な挙動に抑える効果が確認された。これは、実験後土槽を掘り出し、目視で確認したところ、ボルトなしのケースでは地盤にせん断破壊面が生じていたのに対し、ボルトありのケースでは、ボルトありのケースでは切羽周辺の破壊が確認されなかったことからわかる。

(2) ボルトの軸力

図4に光ファイバつき鏡ボルトで計測されたひずみを元に算定した軸力と数値解析で求めた軸力の比較を示す。これより、

実験、解析共にボルト5本のケースの方がボルト14本のケースよりも発生する軸力は大きく、ボルトの本数を増やすことにより1本当たりの軸力の負担は軽減されることがわかる。また、軸力がピークの箇所までが塑性領域であると考え、模型実験の結果によると、塑性領域は切羽から150mm付近であることがわかる。トンネルの半径が160mmであるため、トンネル脚部から約45°程度の角度で塑性領域が存在すると推定される。

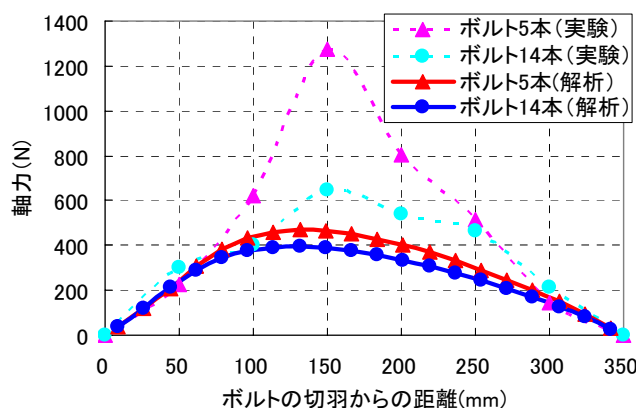


図4 ボルトに作用する軸力(載荷板15mm 押込み時)

結果によると、塑性領域は切羽から150mm付近であることがわかる。トンネルの半径が160mmであるため、トンネル脚部から約45°程度の角度で塑性領域が存在すると推定される。

(3) せん断ひずみコンター図

図5に数値解析結果における載荷板変位15mm時のトンネル中心断面でのせん断ひずみコンター縦断図を示す。ボルトなしのケースでは切羽部で、ひずみの大きな領域が広がっているのに対して、ボルトがあるケースではせん断ひずみが発生する領域が狭くなっていることがわかる。

5. おわりに

大変形地山における鏡ボルトの効果について、模型実験と数値解析により検討した。今後、実トンネルを想定したパラメータ解析等により研究の深度化を図る。

参考文献

- 1) 高橋, 湯澤他: 未固結地山に対する鏡ボルトの作用メカニズムと効果に関する検討, 第64回土木学会年次学術講演会, VI-293, 2009

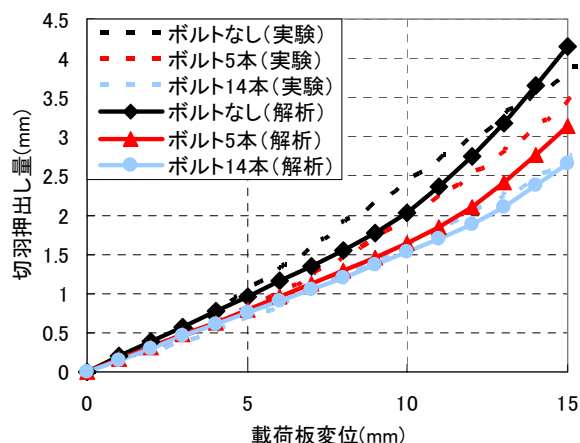


図3 切羽押し出し量と載荷板変位の関係

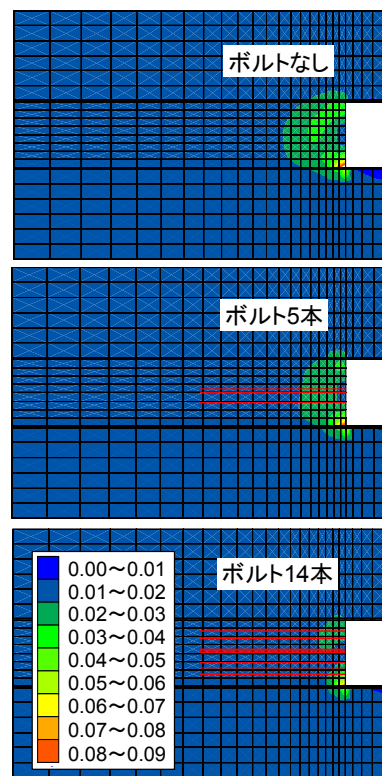


図5 せん断ひずみコンター図