

トンネル補助工法に関する模型実験

The model test on the tunnel auxiliary method

徐 景源¹，土門 剛²，西村 和夫³
Kyoungwon Seo・Tsuyoshi Domon・Kazuo Nishimura

During the excavation of tunnel, such problems as subsidence of the ground surface, collapse of tunnel face, sometimes occur in the area of the shallow tunnel. One method of coping with such problems is called longitudinal face bolts method. In recent years, there have been numerous studies on the behavior of tunnel face reinforced with bolts.

This study is a part of the investigation of the behavior of tunnel face reinforced with longitudinal bolts when different installation patterns. In this study, three dimensional excavation model tests were carried out to verify the effect of face bolts for securing the face stability and investigate the influence of face bolt's axial force. The results show that the longitudinal face bolts method was effective for the vertical displacement of the ground surface.

Key words ; excavation model tests, vertical displacement, axial force

1. はじめに

都市部で NATM が適用される前提条件は掘削後支保工（吹付けコンクリートとロックボルト）の施工が終了するまでの作業工程の間，切羽が自立することにある．ところが，トンネル切羽は工事中一番頻繁に事故が発生しており，切羽の自立性および切羽の不安定に伴う地表面沈下，トンネル周辺部の地盤の緩みなどが問題となる場合が多い．

全世界の崩壊資料を分析した HSE（Health Safety Executive）によれば¹⁾，図-1 のように 49 箇所の事例の中で 90%以上が切羽および 1 次支保が完了後に発生しており，特に無補強の切羽で 36%の崩壊が発生し，切羽の安定性を強調している．

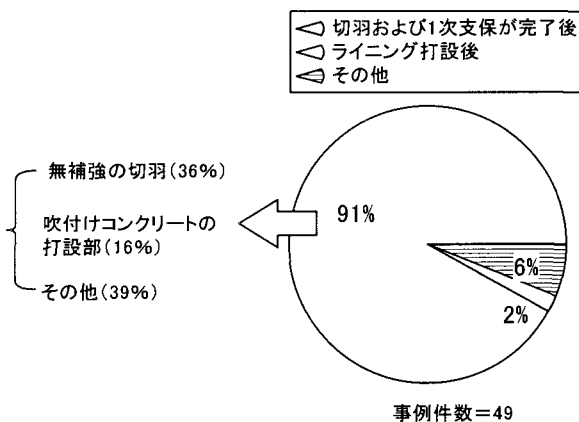


図-1 トンネル崩壊事例の分析（HSE 資料）

キーワード；トンネル模型掘削，鏡ボルト，軸ひずみ，地表面沈下量

¹徐 景源 工修 首都大学東京 大学院工学研究科博士課程

²土門 剛 正会員 首都大学東京 都市環境学部研究員

³西村 和夫 正会員 工博 首都大学東京 都市環境学部教授

これに対して、トンネル補助工法の一つである鏡ボルトは主に鏡面の崩落、肌落ち、切羽周辺地山の緩み防止に卓越的な効果があるとされており、設計項目に関する数多くの実績が蓄積されている²⁾。

従来はケーブルボルト、鉄筋等の短尺ボルトを切羽前方に挿入してきたが、近年は大口径長尺ボルトを挿入し、かつ積極的に切羽の変形に対処している傾向がある。これらの現場測定、室内実験に関する研究は数多くなされているが^{3), 4)}、掘削過程を考慮した補強効果を究明したものは少ないと言える。また、鏡ボルトは他の補助工法と違って掘削と同時に切断して無くなるのが特徴であり、ボルトが無くなった切羽後方の補強効果に対しては不明な点が多い。そこで本稿では、新たな地盤材料として銅散弾を用い、鏡ボルトの補強効果に関する模型実験およびその分析結果について報告する。

2. 実験方法

今までの先受け工および鏡ボルトの実験ではトンネルの掘削過程は、掘削のモデル化が難しく手間がかかるため現場のように逐次掘削は行われていない場合が多く、代わりに地中にボルトなどを予め設置し、切羽止め板を引抜くことによって掘削をモデル化してきた。このような実験では、補強材による切羽前方の補強効果は評価できるが、切羽後方の効果は評価が難しい。

そこで、本実験では、新たな地盤材料を用いて、実際の鏡ボルトの施工のように、掘削→鏡ボルト打設→掘削（同時にボルト切断）の作業工程をモデル化し、鏡ボルトの補強効果に対して分析する。表-2 に実験に使用したボルト、地盤材料および掘削方法などについて整理した。

(1) 実験材料

本模型実験では、地盤材料として、銅散弾、ワセリン、酸化亜鉛を 200:1:0.3 の重量比で練混ぜた人工材料を使用する。ここで、銅散弾の有効径 (D_{10}) は 0.88mm、均等係数 (U_c) は 2.18、 D_{60} は 1.92mm である。

銅散弾系材料を用いた理由には、長所として①地盤にある程度の粘着力を持たせることができる、②水を使用しないため実験中に物性値が安定している、③材料が重いので締め固めの違いによるばらつきを避けられる。④長期間保管が可能である、⑤掘削後ある程度切羽の自立が可能である、ことによる。ところが、短所としては①材料が重いので取扱いにくい、②ワセリンを使用するので一定の温度管理が必要となるなどの点が挙げられる。

地盤の作製は高さ 30cm を 6 層に分けて、1 層ごとに 23gf/cm² の荷重で締め固めを行い、計 6 回の締め固めを行った。表-1 に作製した地盤の物性値を示す。

表-1 地盤の物性値

密度 (g/cm ³)	弾性係数 (kgf/cm ²)	内部摩擦角 (°)	粘着力 (kgf/cm ²)	均等係数 (U_c)
5.4	30	35	4	2.18

(2) 鏡ボルト

鏡ボルトはアクリル製の長さ 160 mm、一辺 2 mm の正方形の棒にエポキシ樹脂で砂を付着させたものを用いた。砂を付着すると直径約 3 mm の円形棒の形になる。鏡ボルトの打設はトンネルを 1 ステップ

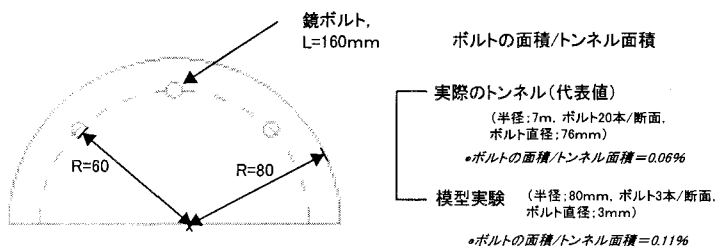


図-2 鏡ボルトの配置およびトンネル/ボルトの面積比

(20 mm) 掘削後、地山に差込む方法で打設し、次の掘削時、切羽後方の1ステップ分(20mm)を切断しながら掘削を進めた。このとき、軸力の計測は土槽20～36cm区間を掘削しながら行った。

また、ボルトの配置は、円周状の1列で3(本/断面)を打設し、ラップ長はボルト長の半分である8cmとした。ボルトの本数は予備実験を通じて決定し、ラップ長を考慮して打設したので、実際は1断面当り6本のボルトが存在することになる。図-2に鏡ボルト打設の概念を示す。

(3) 掘削方法

図-3のように地盤材料を土槽に詰込んだ後に、仕切板を取って重力による切羽の破壊を発生させ、破壊部が安息角になるとライニング材を挿入することで掘削をモデル化した。その後、前述のステップで所定の位置(440mm)まで掘削した。

(4) 実験土槽

実験に用いた土槽は幅0.88m、奥行き1.08m、高さ0.6mのアルミ製である。また、トンネル幅は160mm、高さ80mmの半円形である。図-3の左に実験の概要を、右に地盤作製を完成した際の写真を示す。

表-2 実験方法のまとめ

地盤		ボルト		ライニング材		掘削	
材料	銅散弾系	材質	アクリル (直径3mm)			掘削間隔 (1ステップ)	20mm
締め固め	1層の厚さ 5cmを 23gf/cm ² の荷重で 締め固め	長さ	16cm	材質	- 内径 154mm の半円形円筒 - 厚み 3mm	総掘削距離	440mm
高さ	30cm	ラップ長	8cm				
		本数	3本/断面	挿入	掘削前1ステップ分を挿入	掘削方法	手掘り(切羽の傾斜が安息角になるまで持ちながら掘削を行う。
		切断	掘削より1～2ステップ遅れ				

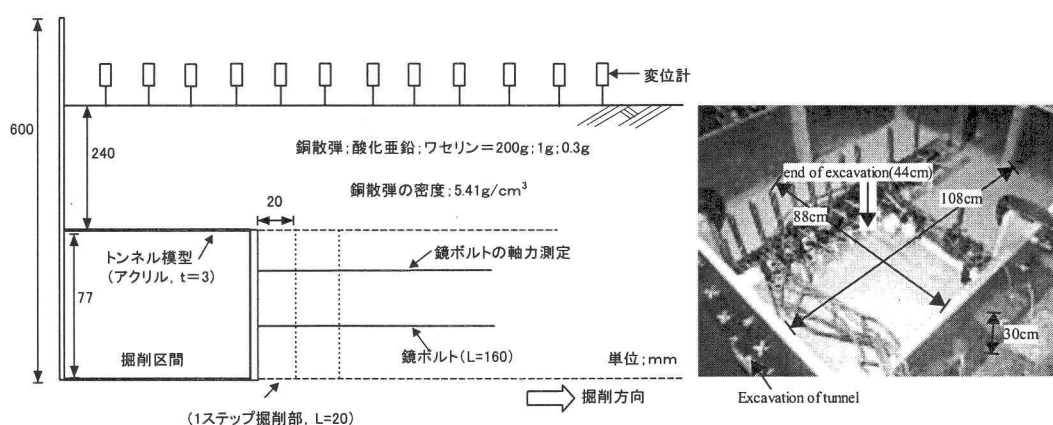


図-3 実験方法の模式図

3. 実験結果および考察

(1) 地表面沈下の抑制効果

模型実験では、鏡ボルトの有無による地表面の縦断方向と横断方向の沈下量およびボルトの軸力を調べた。図4～6に実験によって得られた結果の一例を示す。その際、沈下量はトンネル直径 ($D=160\text{mm}$) で基準化した。

図-4に32cm (2.0D) 掘削した際の縦断方向の地表面沈下量を示す。鏡ボルトによって切羽前方、切羽付近、後方ともに変位が減少していることが分る。

図-5に42cm 掘削した際の際縦断方向の地表面沈下量を示す。「ボルトなし」は切羽から後方に渡って約80mmの沈下を見せており、切羽の変位も後方と同様な変位量から掘削と同時に地表面まで破壊が起こっていると考えられる。

一方、「ボルトあり」は、ある程度変位が収束している後方の1.5Dの区間は「ボルトなし」より約23%程度減少している。さらに、掘削断面では、34%程度減少している。また、「ボルトなし」は後方2.25D地点で沈下量0.52D (84mm) 付近で収束しているが、「ボルトあり」は後方2.25D区間で0.41D～0.42Dの間に収束しており、後方1D～切羽に渡って漸進的に変位が減少していることが分る。切羽前方においては「ボルトなし」および「ボルトあり」とともに1D前方からは掘削による影響は微々であり、前方0.5Dには「ボルトあり」の方が約52%減少していることが分る。つまり、鏡ボルトが存在する切羽においては大きい変位低減効果を発揮するのが分る。

図-6にトンネルセンターラインから横断方向の切羽位置での地表面沈下量を示す。切羽は44cm (2.75D) 掘削した状態であり、右側約3Dが土槽の壁である。トンネルセンターでは「ボルトあり」が約34%程度小さくなっていることが分かる。また、「ボルトなし」は横断1.2Dの地点で変位が0に収束するが、「ボルトあり」は横断0.8Dの地点で収束している。

写真-1にトンネルを44cm (最終掘削) 掘削した際の天端沈下の様子を示す。「ボルトなし」は特に、トンネル上部 (幅16cm) に約0.21D程度の地表面沈下を見せており、横断方向にも約1D程度に渡る広い領域に沈下が生じている。一方、「ボルトあり」の場合は縦断方向および横断方向ともに大幅減少していることが分る。

一方、本実験による鏡ボルトの効果は既往の研究よ

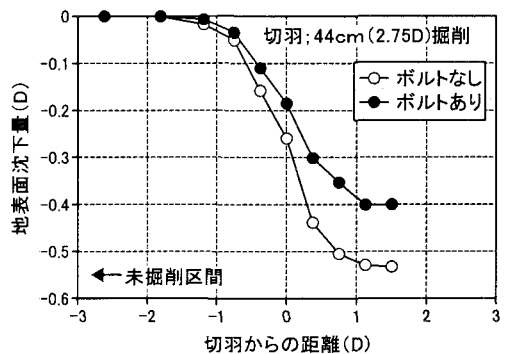


図-4 地表面沈下量 (切羽 ; 32cm 掘削)

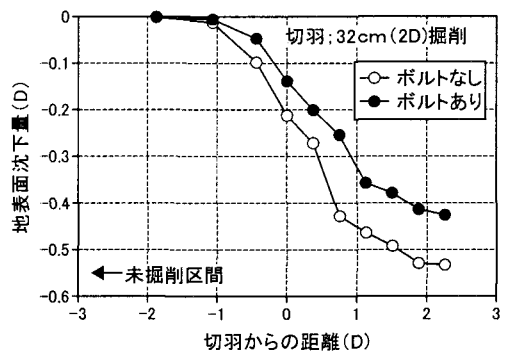


図-5 地表面沈下量 (縦断方向)

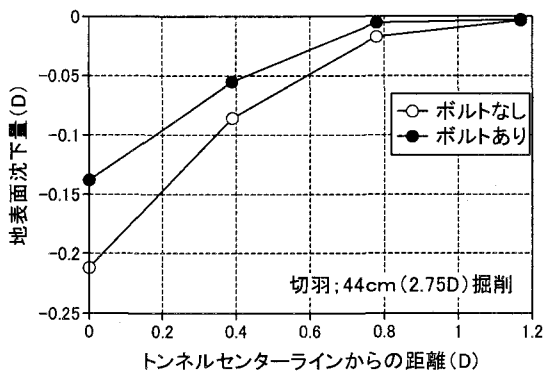


図-6 切羽位置での地表面沈下量 (横断方向)

り大きく評価されたと思われる。これは図-2の右に示したように、実験のモデル化の都合で使用した砂付着ボルトが実際の現場よりトンネル面積に対するボルトの面積がほぼ2倍以上大きかったためと思われる。

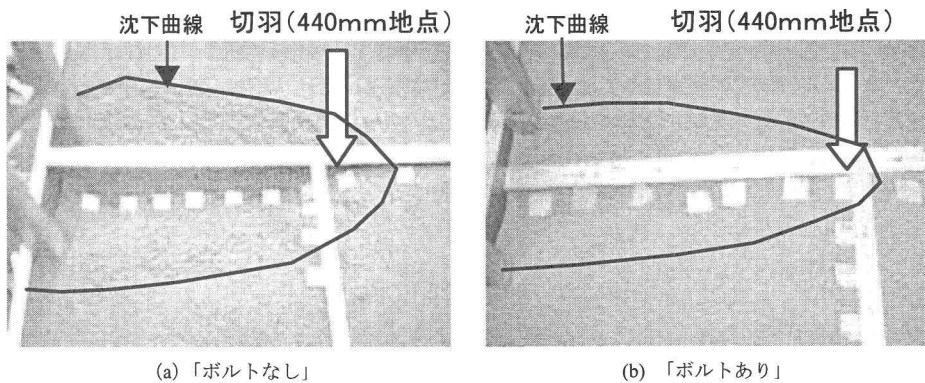


写真-1 「ボルトなし」および「ボルトあり」の実験結果

(2) 軸力の推移

図-7 にトンネル掘削時に計測したボルトの軸力を示す。ボルトを打設する時の軸力はほぼ0であり、1～2ステップ掘削までは増加し、4ステップ掘削からは大きく減少する傾向を見せている。

これは、切羽がボルト打設地点に接近すると切羽から数cmの区間で先行変位が既に発生しているため、端部(切羽側)の軸力は低くなり、また、ボルトが短くなってくると、ボルトが切羽の破壊領域に入り、地盤から抜かれたため低下したと思われる。これらの軸力の推移から本実験のラップ長8cmは妥当な長さであると思われる。

また、1ステップ～3ステップ掘削の際、切羽の約4～6cm先で、軸力のピークとなっている。これは、ピーク点を基準として切羽～ピーク区間はボルトが地盤の変位を抑制する方向でせん断応力が作用し、ピーク点からは地盤がボルトの変位を抑制する方向にせん断応力が作用することとなるためと考えられる⁵⁾。

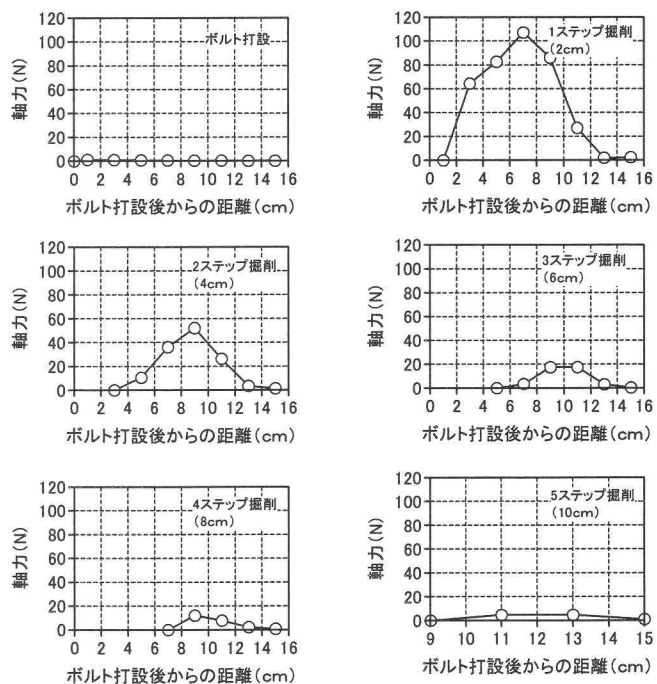


図-7 鏡ボルトの軸力

4. 終わりに

本稿では、鏡ボルトの打設パターンによる補強効果について、トンネル掘削実験を行い、鏡ボルトの有無による補強効果を報告した。以下に、本実験から得られた知見を示す。

- 1) 「ボルトあり」の場合の場合、切羽前方において約 52% 程度の変位低減効果が見られる。また、切羽においては 34% の低減効果、変位が収束する 2D 後方は約 22% の低減効果が見られる。
- 2) 鏡ボルトは掘削断面においては大きい変位低減効果を発揮するが、切羽後方に行くほど効果は減少し始め、変位が収束する地点においては掘削断面より約半分程度減少している。これらの変位抑制特性からも分るように、大きい変位が予測される場合は他の後方との併用も必要と思われる。
- 3) 本実験では、新たな人工材料である銅散弾系材料を使用して掘削実験を行ったが、比較的に安定的に実験を行うことができたと思われる。

参考文献

- 1) HSE: Safety of New Austrian Tunnelling Method (NATM) tunnels, pp.15~20, 1996
- 2) ジェオプロンテ研究会: 長尺鏡ボルトの施工実態調査とその分析, 2000 年 11 月
- 3) 御手洗 良夫, 松尾 勉, 手塚 仁, 岡本 哲也, 西村 誠一, 松井 保: 山岳トンネルにおける長尺鏡補強工の作用効果の評価, 土木学論文集, No.743/III-64, pp.213-222, 2003.9
- 4) 木梨 秀雄: 長尺鏡ボルト工法の開発とその作用効果に関する研究, 京都大学学位論文, 2004.03
- 5) Freeman, T.J.: The behaviour of fully-bonded rock bolts in the kielder experimental tunnel, Tunnels & Tunnelling, pp.37-40, 1978