

長尺鏡ボルトの効果について

Evaluation on the effect of face bolts

徐 景源¹, 土門 剛², 西村 和夫³

Kyoungwon Seo, Tsuyoshi Domon, Kazuo Nishimura

¹学生会員 工修 首都大学東京 大学院工学研究科博士課程 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)

E-mail ; seo-kyoungwon@c.metro-u.ac.jp

²正会員 首都大学東京 都市環境学部研究員 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)

³正会員 工博 首都大学東京 都市環境学部教授 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)

In recent years, Face bolt used in combination with steel pipe umbrella in many cases. It is to be considered that make up for both methods' shortcomings. In this paper, a series of numerical tests was carried out to investigate the effect of reinforcement by substitute face bolt for steel pipe of umbrella. It is founded that a part of face bolts were substitutable for steel pipes.

Key Words : face bolt, three dimensional excavation analysis, umbrella method

1. はじめに

切羽鏡部の押出し挙動（以下、水平変位とする、図-1の座標参照）が顕著に生じることが予測される場合は、天端部の緩みも抑制しなければならない場合が大部分であり、2つ以上の補助工法の併用が普通である。

長尺鏡ボルト（以下、鏡ボルトとする）の施工の際は別の補助工法も採用する場合が多く（83%）、その中でも長尺鋼管フォアパイリング（以下、先受け工とする）との併用が全体の49%を占めている¹⁾。鏡ボルトと先受け工の併用は両工法の短所を補うために不可欠であると思われるが、逆に機能の重複もあり、鋼管は鏡ボルト工より経済性、施工性、環境への影響などいくつかの短所もある。また、複数の補助工の採用は作業工程にも影響を与え、品質管理や工期管理なども厳しくなる可能性がある。

ここで、本稿では両工法を併用する際、鏡ボルトの打設パターンを変えることによって先受け鋼

管の打設本数を減らし、経済性や施工性が高められるボルトの打設パターンについて分析する。鏡ボルトの打設パターンに対して筆者²⁾らは、トンネル変形モードおよび打設角度を変えることによって掘削断面および後方の変位抑制効果が異なることを明らかにした。

本稿は先受け工の代わりとして鏡ボルトに角度を持たせて打設し、経済性や施工性の向上を図ると同時に補強効果を最大限に発揮する施工パターンの提示を目的として有限差分法（FLAC3D）を用いて分析したものである。

2. 鏡ボルトと先受け工の比較

以下に鏡ボルトと先受け工の施工特性について簡単な比較を行う。鏡ボルトには近年使用実績が急増しているGFRP管の物性値をモデルとして採用する。また、鏡ボルト工法との比較対象として選択した先受け工は様々な種類があるが、鏡ボルト工と頻繁に併用しており、その中でも、採用実

績がもっとも多い³⁾長尺鋼管先受け工法以下先受け工とする)を対象とする。

表-1 に両工法の長所および短所について示す。先受け工法の長所としては周辺地盤の確実な効果を得られるが、短所として

- 薬液の注入による周辺地盤の環境問題
 - サイクルタイムの増加
 - 工事費の増加
 - 場合によっては拡幅が必要
 - 別途の水抜きボーリングが必要
- などが挙げられる。

表-1 鏡ボルト工と先受け工の長所および短所

対象 工法	先受け工		鏡ボルト工	
	長所	短所	長所	短所
断面拡幅		必要(工法によっては不要)。	不要。	
鋼管及びボルトの切断	掘削と関係ない。		FRP 製は切断作業が要らない。	ケーブルボルトや鉄筋などは別途の作業が必要。
地下水対策		場合によっては別途の水抜きボーリングが必要。	別途の水抜きボーリングが不要(切羽部分)。	
削孔面積		鏡ボルト工法より約 35% 大きい。	削孔の面積が先受け工より小さい。圧入式の場合は不要。	
環境面		注入材による周辺地盤への環境問題。		
切羽補強効果		やや小さい	確実な補強効果が得られる。	
周辺地盤補強効果	周辺および後方の効果が大きい。			やや小さい

一方、鏡ボルト工は切羽の水平変位に対しては効果的であるが、ボルトが無くなる後方の変位抑制効果は低いとされ、また、ケーブルボルトや鉄筋などのボルトは別途の切断作業が必要となる。

両工法の大きく違う点は先受け工は掘削部周囲に打設されるため掘削が進んでも地盤の中に全長が残っている状態となるが、鏡ボルトは掘削領域に打設されるため掘削とともに切断されて無くなるのが特徴である。

3. 解析モデル

(1) 地盤および支保工の条件

解析領域の幾何学的形状を図-1 に示す。土被りは低土被りを想定して 20m、トンネル半径は 6m とする。初期応力状態は重力により発生させ、初期土圧係数は 0.55 とした。掘削は右から 1m ずつ逐次掘削を行った。また、地盤は弾塑性モデルとし、破壊基準は Mohr-Coulomb の基準である。表-2 に地盤および支保工と吹付けコンクリートの合成部材の物性値を示す⁴⁾。

(2) 鏡ボルトと先受け工の打設状況

両工法の差を検討するため一般的な鏡ボルトと先受け工の併用パターンを考えて見る。ここで、先受け工と鏡ボルトの配置形状、本数、物性値などは表-3、4 のように想定する。

先受け工は等価弾性係数としてモデル化し、天端付近に分析用鋼管 1 本を打設することにする。等価弾性係数の算出時の改良ゾーンの弾性係数は想定した地盤と類似した現場で行われた実験結果を用いる⁵⁾。鏡ボルトはパイル要素としてモデル化し、付着特性は御手洗⁶⁾らの引抜き試験結果を用いる。

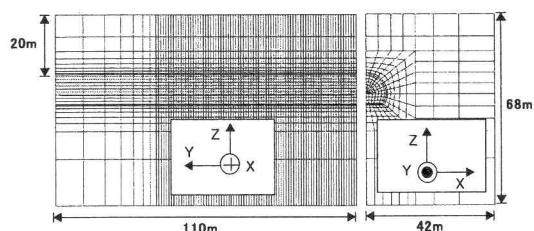


図-1 解析モデルの幾何学的形状

表-2 地盤と合成部材の物性値

	単位体積 重量 (KN/ m ³)	弾性係数 (Mpa)	ポアソ ン比	粘着力 (Mpa)	内部摩 擦角 (°)
地盤	16	20	0.35	0.02	30
合成 部材	23.8	8.65E3	0.25	厚さ 0.25m	

表-3 先受け工の打設状況

対象工法	先受け工法	打設範囲	180°
1 断面本数	29 本	打設ピッチ	0.45m
1 シフト	12.5m	ラップ長	6m
鋼管径	φ114.3mm(t=6)	総打設シフト	11
鋼管変形係数	2.1E5 (MPa)	解析要素	等価弾性係数 計測用鋼管1本打設

表-4 鏡ボルト工法の打設状況

対象工法	鏡ボルト工法	打設パターン (水平ボルト)	円周状 (3列)
1 断面本数	18 本	打設密度	0.5 (本/m ²)
長さ (m)	12m	総打設シフト	11
ラップ長	6m	変形係数	2.0E4 (MPa)
径	外径 76mm (内径; 60mm)	解析要素	パイル
せん断剛性; 8.48E4 (kN/m ²), 付着強度; 3.0E4 (kN/m)			

(3) 先受け工鋼管の代替として打設した鏡ボルトの概念

経済性および施工性の観点から先受け鋼管 1 本の打設は鏡ボルト 2 本の打設と等しいと想定する。ここで、先受け工の鋼管を 1 本減らし鏡ボルト 2 本を打設した補強結果が同一であるか、もしくは変位が小さくなれば、経済的施工の観点からも鏡ボルト 2 本打設の有意性が認められることになる。この時、着目すべき点は、代わりに打設した 2 本のボルトが先受け工の 1 本の鋼管と地盤改良を代替できるかということである。

先受け工の鋼管を減らすと等価弾性係数が減少し、減らした鋼管の代わりに鏡ボルトを図-2 の A-line に集中して打設する。A-line に集中した理由としては、切羽中心部のボルトは水平方向から大きく外れるほど切羽の水平変位が大きくなる既往の結果⁷⁾から、掘削領域の外側に打設するため A-line に集中して打設することにする。この時、ボルトの打設角度は上向き (27°) で打設するこ

とにする。鏡ボルトの効果は主に軸力に依存しており、軸力は変位モードに大きく左右されるため鋼管の代わりに打設するボルトの打設角度の選定が重要な要因となる。

ここで、上向き (27°) に打設した理由は切羽後方の変位を抑制するため、無補強の場合の変位ベクトルの発生傾向、ボルトが掘削領域を外れることによる残長などを考慮して定めた。代替のボルトの配置概念を図-2, 3 に示す。このような打設は図-3 から分るように切羽中央部の水平打設ボルトは掘削と同時に切断されるが、角度を持たせたボルトは切羽が進んでも長さ 12m のうち、約 11m が地盤に残る状態となる。

表-5 に解析ケースを示す。先受け鋼管を 29 本としたケースから減らし始め、すべての鋼管を鏡ボルトとしたケースまでの 5 ケースを実施した。

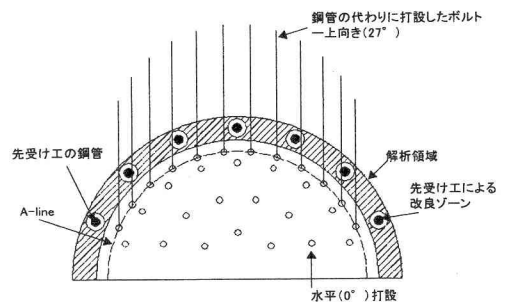


図-2 先受け鋼管の代わりに打設したボルトの概念(トンネル横断面)

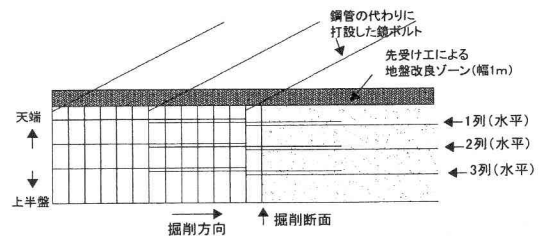


図-3 先受け工の代わりに打設した鏡ボルトの概念図(トンネル縦断面)

表-5 解析ケース

ケース (全断面基準)	代替率 (%)	先受け工			鏡ボルト	
		打設 本数	減らし 本数	等価弾 性係数 (MPa)	鏡ボルト (代替 本数)	鏡ボルト (水平打 設)
鋼 (29) +ボ (0) ; 比較基準	0	29	0	6.4E2	0	18
鋼 (19) +ボ (20)	31	19	10	4.3E2	20	18
鋼 (15) +ボ (28)	51	15	14	3.5E2	28	18
鋼 (9) +ボ (40)	65	9	20	2.3E2	40	18
鋼 (0) +ボ (58)	100	0	29	0	58	18

・鋼：先受け鋼管，ボ：鋼管の代わりに打設した鏡ボルト
 ・地盤改良体の弾性係数：657MPa（ウレタン注入の現場試験値）
 ・原地盤の弾性係数：20 MPa

4. 解析結果および考察

(1) 掘削断面への影響

以下に鋼管の代わりに打設した鏡ボルトによる補強効果を示す。図-4の凡例にある「鋼 (数字)」は先受け工鋼管の打設本数であり、「ボ (数字)」は減らした鋼管の代わりに打設した鏡ボルトの本数を意味する。また、縦軸の変位低減率は

$$\frac{(\text{無補強の変位量} - \text{補強の変位量})}{\text{無補強の変位量}} \times 100$$

として定義する。

a) 切羽水平変位への影響

図-4に切羽中央部（高さ3m地点）における1ラップ長間（6m）の水平変位の低減率を示す。鋼管を減らさなかったモデル（鋼 (29) +ボ (0)）の変位抑制効果が最も大きい。鋼管をボルトで代替する本数が31～65%までは切羽水平変位の差はそれほどでもない。ところが、すべての鋼管を代替したモデル（鋼 (0) +ボ (58)）は14%程度増加した。これは、代わりに打設した鏡ボルトの位置が掘削線に近づいており、鏡ボルトは鋼管より弾性係数が1/10であり、管の直径も66%に過ぎないため置き換えるほど変位が大きくなると思われる。また、長尺先受け工は打設地点から約

10° 以内の上向きに打設するが、本稿の鏡ボルトは上向き27°に打設したので、ボルト先端（地盤奥側）にいくほど打設密度が急激に低くなるため変位が大きくなったと思われる。

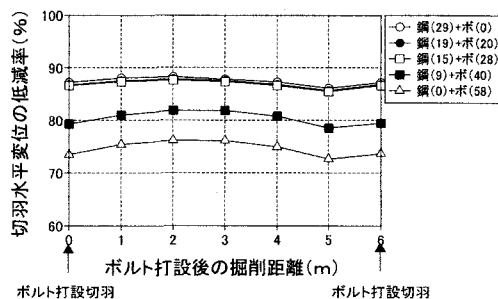


図-4 水平変位の抑制効果（低減率）

b) 周辺地盤への影響

図-5に先受け工の代替率による掘削断面（ボルト打設後3m掘削時点）における変位低減率を示す。横軸は鋼管をボルトで置き換えた代替率であり、縦軸は変位低減率を示す。水平および側壁の変位は代替率が大きいほど若干減少し、100%置き換えたときは低下している。これに対して、天端および地表面の変位は代替率65%までは若干効果が増加し、100%置き換えたときは急激に低下している。

これらの結果からは、掘削断面においては先受け鋼管の一部を鏡ボルトで置き換えられると思われる。

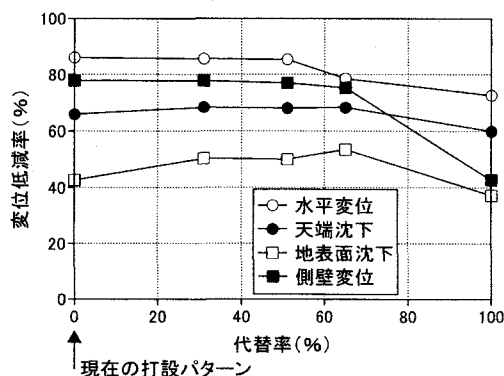


図-5 鋼管の代替による変位低減効果（掘削断面）

(2) 切羽後方への影響

図-6 に掘削断面から 3D 後方地点の変位低減率を示す。天端、地表面および側壁の変位はボルトで置き換えたモデルの方が大きいな効果を発揮しており、21~65%までの代替率による効果の差はほとんど見られない。一方、100%置き換えた際は掘削断面の変位の傾向と同様に急激に低下している。

先受け鋼管を 100%代替した際に、変位の低減率が急激に減少するのは次のように考えられる。まず、本稿は先受け工の評価を鋼管と改良ゾーンの等価弾性係数としてモデリングしたので鋼管の 65%を置き換えても改良ゾーンの弾性係数は原地盤の 10 倍以上であることから先受け工による周辺地盤へのシェル状の支持帯が形成され、これによってトンネルの安定性が確保されと考えられる。トンネル周辺部の物性値が原地盤より高い状態で鋼管の一部をボルトで置き換える場合はボルトと改良ゾーンの相乗効果によってもっと安定的になるが、鋼管の 100%を置き換えたときの変位抑制は主にボルトの軸力に依存し、先受け工による改良効果が無くなって変位が大きくなったと思われる。鋼管の打設間隔が広がった時の改良ゾーン形成がシェル状にできない場合は本解析と異なり、結果の発現傾向は異なる。

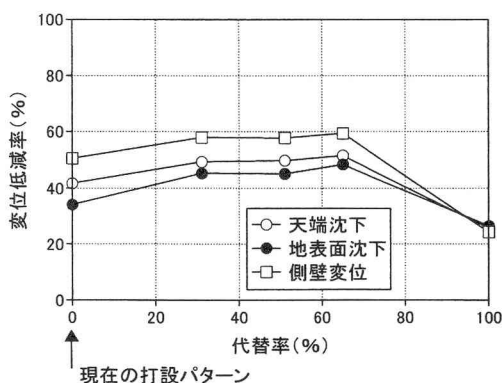


図-6 鋼管の代替による変位低減効果 (3D 後方)

(3) 弾塑性領域の分布

図-7 に先受け鋼管の代替率による弾塑性領域の分布を示す。図-7 の (b) は無補強 (a) と比べて周辺地盤と切羽前方に対して大きいな塑性領域の減少効果を示している。代替率 100% の (d) は天端、周辺領域において若干増加しているが、(c) の場合は代替率 0% より周辺地盤の塑性領域が小さくなっている。弾塑性領域の分布からは先受け鋼管を一部置き換えることも可能と思われる。

(4) 軸力の分析

図-8 に代替率 51% の時の置き換えた鏡ボルトと鋼管の増分軸力を示す。横軸は補強材と切羽の距離を表す。鏡ボルトと先受け工の鋼管は打設角度、材質、直径などが異なるので直接比較することは難しいが、両方とも一時的に無支保状態になる切羽近傍で圧縮の増分が最大になる傾向が見られる。また、切羽前方に位置する鏡ボルトは引張りの軸力が急激に低下している。これらのことから、鏡ボルトの角度を持たせて打設することによって鋼管のような先受け効果も期待できると思われる。

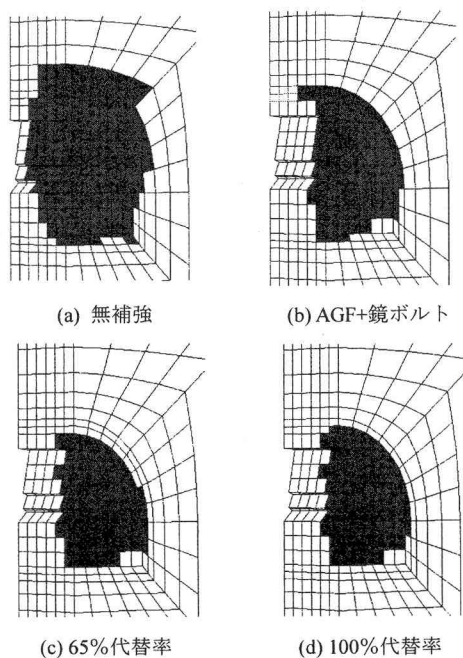
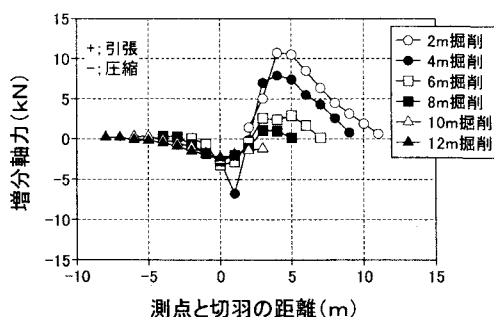
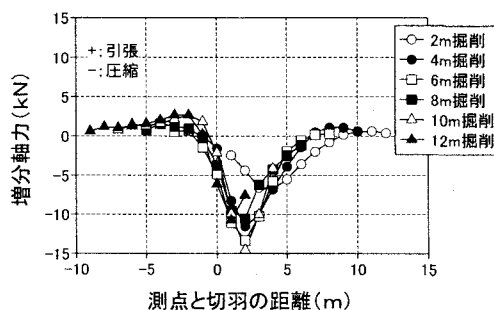


図-7 鋼管の代替率による弾塑性領域の分布



(a) 鏡ボルト



(b) 鋼管

図-8 鏡ボルトと鋼管の増分軸力

5. 結論

本研究では、先受け工の代わりに角度を持たせて鏡ボルトを打設し、変位抑制効果に対して分析した。本解析から得られた知見を以下に示す。

- (1) 切羽の水平変位においては、先受け鋼管を51% (14本) 置き換えるまでには1%以内の差が見られるが、65% (20本) 以上置き換えると低減率の差が大きくなり、すべての先受け工を置き換えると14% (絶対値; 25mm) 程度変位が増加する。
- (2) 掘削断面後方の天端沈下と地表面沈下においては先受け工の2/3程度を置き換えるまでは基準モデル(先受け鋼管のみ)より効果的であり、すべてを置き換えると変位が大きくなる。
- (3) 切羽の水平変位、天端、地表面沈下の抑制効果の観点から見ると先受け工と鏡ボルトの材

質および補強メカニズムなどは大きく異なるが、経済的な鏡ボルト工で先受け工の鋼管の一部を置き換えて代わりに施工することも可能であると考えられる。

今回の解析では補助工法の中でも現在多く用いられている長尺先受け工と長尺鏡ボルトに焦点を絞って両工法の置き換えに対して数値解析的検討を行った。今後、この結果に基づいて実験的検証を行う予定がある。

参考文献

- 1) 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
- 2) 徐 景源, 土門 剛, 西村 和夫, トンネル変形モードに応じた長尺鏡ボルトの打設効果について, トンネル工学研究論文集, 第15巻, 2005
- 3) 竹林亜夫, 西坂晶士, 羽場徹, 岡部正, 切羽安定対策に関する解析的考察, トンネル工学研究論文・報告集第10巻, pp.1-8, 2000.
- 4) 日本鉄道建設公団, NATM設計施工指針, p. 321, 平成8年2月.
- 5) 中尾 次生, 関本 宏, 居相 好信, 西野 健一郎, 住宅密集地下・含水未固結地山を掘る・神戸市高速道路2号線 長田トンネル, pp.119-130, 第30巻2号, 1999年2月
- 6) 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
- 7) 徐景源, 土門剛, 西村和夫: 鏡ボルトの打設角度が補強効果に及ぼす影響, 土木学会第60回年次学術講演会, p. III-219, 平成16年9月