

長尺鏡ボルトの施工動向と挙動特性の解析的研究

APPLICATION TREND OF LONG LENGTH FACEBOLTING AND ANALYTIC STUDY OF ITS BEHAVIOR CHARACTERISTICS

西崎晶士¹⁾・羽馬徹²⁾・岡部正^{2)*}

Shoushi Nishizaki, Tohru Haba, Tadashi Okabe

Under recent NATM tunnel construction, for ground where unstable faces exist or where many restrictions stipulated against ground deformation in surrounding area, it becomes popular to utilize an auxiliary method such as forepiling, facebolting and so on to solve such problems. For this reason, a previous study regarding the effect of various face stabilizing measures was reported and this study made it clear that the effect utilizing long length face bolting was very much high. In this report, to grasp present situation for applying long length facebolting in Japan, the project references of recent facebolting including short length were examined and analyzed. As a result, it showed that the number of references applying long length facebolting has recently increased very much. It seems that level-up of application technique contributed to this tendency. In case that a plane for applying facebolting is made, it is important to comprehend correctly its dynamic effect. In this report, behavior characteristics and effect of long length facebolting in comparison with its short length was made by 3D nonlinear numerical analysis (FLAC3D) for confirmation.

Key words : NATM, face stabilization, facebolting, long length facebolting, 3D numerical analysis

1. はじめに

最近のNATMによるトンネル工事においては、切羽で不安定現象を呈する地山や掘削に起因する周辺地盤変形に対する制約が大きな工事では、先受け工、鏡ボルト工などの補助工法を用いて対処することが一般的になっている。そのため、各種補助工法による切羽安定対策工の効果に関する研究をこれまで報告¹⁾²⁾してきたが、これらの研究では長尺鏡ボルト工の切羽安定化効果が極めて高いことが明らかになった。そこで、本報告では、まず、長尺鏡ボルト工の我が国における施工状況を把握するため、短尺鏡ボルト工も含めた最近の鏡ボルト工の施工事例を調査整理分析した。その結果、長尺鏡ボルト工の適用事例が最近急増傾向にあることが明らかになった。その要因としては、施工技術の向上によるところが大きいと考えられるが、今後の鏡ボルト工の適用を計画する際には、力学的な効果に関する正確な理解も重要と思われる。そこで、本報告では3次元数値解析を用いて長尺鏡ボルト工の挙動特性、効果を短尺鏡ボルト工と対比して確認することを試みた。尚、使用した解析コードはItasca社製FLAC-3Dである。

2. 鏡ボルトの採用動向

鏡ボルトは約25年程前から切羽鏡の安定を目的とした補助工法として適用されてきた。1打設長3~4mのGFRPボルトを1~2m程度のラップを確保して1~2掘進毎に打設する施工方法が一般的であったが、10年程前から材料や施工法の改良が進み、一度により長いボルトを打設して施工効率と作用効果を高める努力が続けられ

1) 正会員 清水建設(株) 土木本部 技術第二部

2) 正会員 (株)ケー・エフ・シー 技術部 (* トンネル技術室)

てきた。最近、二重管削孔技術を応用して孔壁が自立しない脆弱な地山においても、長さ 20m 程度の長尺 GFRP (Glass Fiber Reinforced Plastics) 管を打設できる工法が開発され、切羽鏡の安定はもとより、先行変位抑制を視野に入れて前方地山を積極的に補強する施工事例が見受けられるようになった。そこで、(株)ケー・エフ・シーの 1999 年 4 月から 2002 年 3 月までの 3 年間の鏡ボルト納入実績を基に採用動向を分析した。1 打設長 5m 未満を短尺ボルト、5m 以上を長尺ボルトとし、長尺ボルトについてはさらに 5m 以上 10m 未満と 10m 以上に分けて、年度毎にその推移を整理したのが、図-1 である。本調査の年度ごとの総数は異なるが、短尺ボルトの採用比率が低下し、長尺ボルト、特に 10m 以上の採用比率が増加する傾向にあることが明らかになった。5m 以上 10m 未満の採用比率は、ほとんど変化していない。

また、同じ 1 打設長区分において過去 3 年間に使用された補強材の種類を分析したのが図-2 である。鋼製のフリクション式ボルト以外は全て GFRP 製である。各長さ区分で最も使用比率の高い補強材の種類が明確に異なっている。

1 打設長 5m 未満では、充填式施工が中心となることから $\Phi 26\text{mm}$ の中実棒状ボルトが約 60% を占めている。5m 以上 10m 未満では、1 打設長が長くなるほど充填式施工が困難になること、ボルトを繋いで施工する必要が生じることから、注入式施工が可能な $\Phi 30.5\text{mm}$ (中空部 $\Phi 14$) のネジ付き中空棒状ボルトの採用が中心(65%)となっている。10m 以上では、孔壁の自立や、注入精度の維持が難しくなることから、二重管方式で穿孔する $\Phi 76\text{mm}$ (内径 $\Phi 60$) の GFRP 管の採用が 70% を超えている。特殊な事例として、ネジ接続が可能な水膨張鋼管型フリクション式ボルト(長さ 20m ; 4m $\times$ 5 本繋ぎ)を採用した現場もあった。

2001 年度の 10m 以上の採用実績 19 件に関して、さらに詳しく分析を行った。1 打設長分布においては、12m 以上 13m 未満の実績が 12 件と最も多い(約 61%)ことが分かった(図-3)。

これらの現場において、併用した補助工法を調べると、ほとんどが鋼管あるいは GFRP 管を用いた注入式長尺先受け工を実施しており、先受けと鏡ボルトの 1 打設長を合わせることによって、効率的な施工サイクルを維持しながら、合理的な切羽前方地山の補強を行おうとする傾向が読み取れ

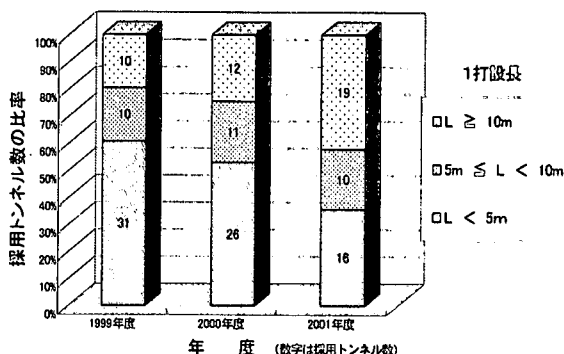


図-1 1 打設長別鏡ボルト採用動向の推移

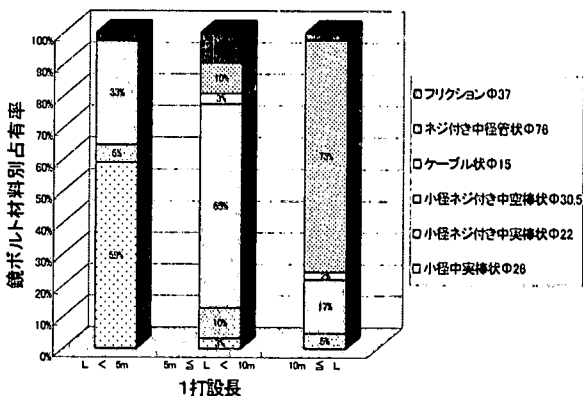


図-2 1 打設長別鏡ボルト材料占有率

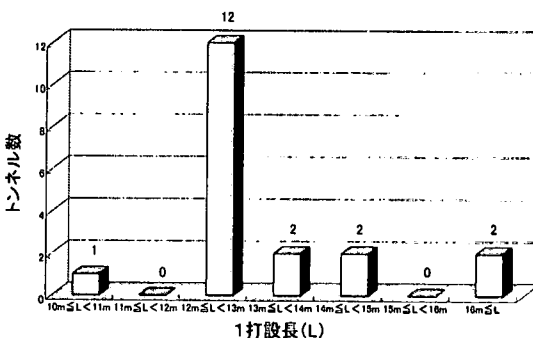


図-3 長尺鏡ボルト 1 打設長分布(2001 年度; 10m 以上)

る。

補強材は概ね鏡 1~2m² 当り 1 本の割合で施工されており、短尺鏡ボルトと同様の打設密度であった。定着・注入材料は、セメント系とウレタン系の材料がほぼ二分する比率で適用されている。セメント系は、注入式ロックボルト用のドライモルタルがほとんどで、超微粒子セメントと急硬材の 1.5 ショット型の注入材も一部で使われている。ウレタン系では、シリカレジンとウレタンの使用比率が約 2:1 である。

なお、地山状況、補強効果を確認しながら、セメント系、ウレタン系両方を使い分けている事例もあった。「当初適用段階では鏡ボルトの定着を目的としてセメント系の材料を使用し、鏡の安定性（施工効果）、湧水状況や地質の変化、注入・充填の確実性等を確認しながら、状況が悪化した場合、あるいは悪化が予見された場合に、ウレタン系注入材に切り替えて定着の精度を高める、あるいは鏡ボルト周囲の地山を積極的に改良する」といった考え方が適用されているようである。

3. 長尺鏡ボルトの代表的な施工パターン

前項の採用動向分析を基に、最新の実績から長尺鏡ボルトの最も標準的な施工パターンを設定し、同じ打設密度で長尺と短尺の鏡ボルトを施工した場合の 2 ケースについて、三次元数値解析を行ってその施工効果を比較することとした。鏡ボルトの施工パターンには格子配置、千鳥配置、円周配置があるが、ここでは図-4 に示すような、円周配置とした。

4. 解析条件

(1) 地山条件

対象地山は切羽の自立が困難で補助工法が必要となるような状況を想定した。表-4 に地山の入力物性値を示す。

地質は砂質系の均等地山を想定し、土被りを 20m、側圧係数は 0.55 とした。また、地山は弾塑性モデルとし、破壊条件は Mohr-Coulomb の基準である。

(2) トンネル断面

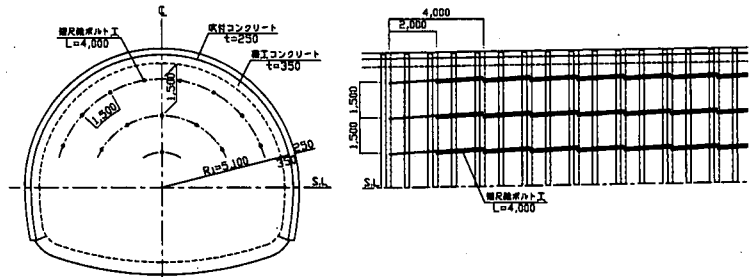
掘削断面は、図-4 に示すように 2 車線道路トンネルを想定した形状寸法とし、支保工としては DⅢパターン程度を想定して、鋼製支保工 H-200、吹付コンクリート $t=25\text{cm}$ とした。

(3) 解析領域

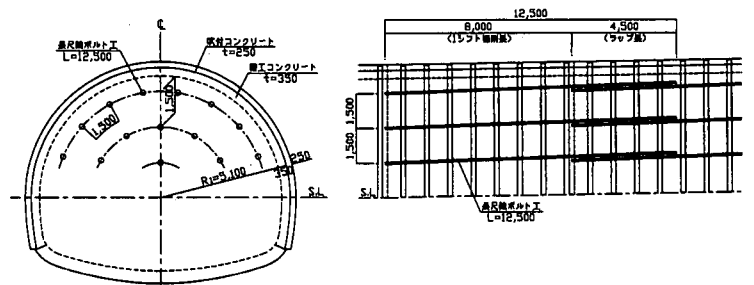
解析領域図を図-5 に示す。境界条件は地表面を自由面、他の面はローラー境界とし、対称性を利用し、解析領域は半断面とした。

(4) 支保工のモデル化

表-4 に支保工の入力物性値を示す。吹付コンクリートと鋼製支保工は合成部材としてシェル部材により、モデル化を行った。



(a) 短尺鏡ボルト (L=4.0m、 ϕ 26)



(b) 長尺鏡ボルト (L=12.5m、 ϕ 76)

図-4 鏡ボルト施工パターン概要図

(5) 鏡ボルトモデル化

長尺鏡ボルトと一般的な短尺鏡ボルトは、特殊なケースを除き、GFRP 製の材料が使用されているが、ボルト径や剛性が大きく異なる。また、施工時の削孔径も異なることから、単位長さ当りの鏡の押し出し挙動に対する抵抗力（引抜き耐力）もおおのずと違いがあることから、それぞれの特性を考慮したモデル化（付着特性を考慮したモデル）を行って解析した。表-5 に鏡ボルトの入力物性値を示す。なお、グラウトの付着特性に関する物性は設定した地山条件に近い現場で実際に行った引抜き試験の結果を基に設定した。

(6) 解析ステップ

解析ステップを図-6 に示す。解析における掘削は 20m までを一括掘削、その後 60m を 1m 逐次掘削とした。（上半のみ掘削）

5. 解析結果と考察

解析ケースは、(a)鏡ボルト無し、(b)短尺鏡ボルト、(c)長尺鏡ボルトの 3 ケースとした。

(1) 変位量

図-7 は、各ケースにおける変位量分布図である。(a)鏡ボルト無しでは、鏡部に最大 20cm の押し出しが発生しているが、この変位量は一般的に切羽の自立が困難なレベルである。また、既掘削部の天端部に 12cm 程度の沈下が発生している。(b)短尺鏡ボルトと(c)長尺鏡ボルトを比較すると、鏡の押し出し量は短尺鏡ボルトで最大 14cm(鏡ボルト無しで発生した変位量の 70%)、長尺鏡ボルトで最大 6cm(鏡ボルト無しで発生した変位量の 30%) となっており、切羽自立の限界押し出し量を 7cm 程度とすれば⁹⁾、短尺鏡ボルトの抑制効果は不十分であり、長尺鏡ボルトで安定化が達成されていることが分かる。

(2) 塑性領域

図-8 は、各ケースにおける塑性領域図である。灰色のブロックが塑性化した領域を示す。

鏡ボルト無しのケースでは、鏡部前方に 6m(縦断方向メッシュは 1 マス 1m) の塑性領域が発生している。また、既掘削部の上部地山に 4m 程度の塑性領域が発生しており、切羽周辺が不安定な状態となっている。短尺鏡ボルトと長尺鏡ボルトを比較すると、鏡部前方の塑性領域は短尺鏡ボルトが 5m と大きな塑性領域の抑制効果がみら

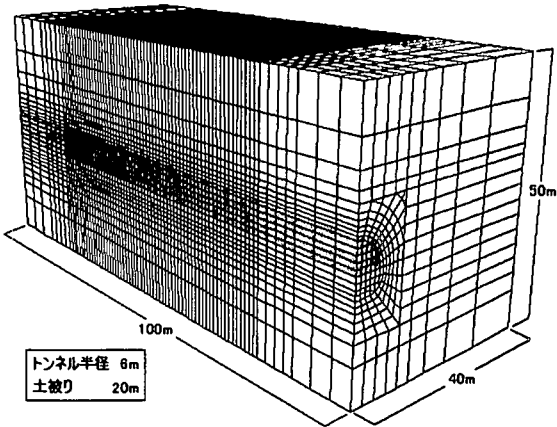


図-5 解析領域

表-4 入力物性値（地山、支保工）

	単位体積重量 (γ) KN/m ³ (t/m ³)	弾性係数 (E) MPa (kgf/cm ²)	ポアソン比 (ν)	粘着力 (c) MPa (kgf/cm ²)	内部摩擦角 (ϕ) °
地山	20 (2.0)	50 (500)	0.35	0.01 (0.1)	30
吹付コンクリート+ 鋼製支保工	23.8 (2.38)	8,650 (86,500)	0.25	—	—

表-5 入力物性値（鏡ボルト）

	単位体積重量 (γ) KN/m ³ (t/m ³)	弾性係数 (E) MPa (kgf/cm ²)	断面積 (A) m ²	グラウト 付着剛性 N/m/m	グラウト 付着強度 N/m
短尺鏡ボルト	17.5 (1.75)	20,000 (200,000)	2.14E-4	33E3	15E6
長尺鏡ボルト	17.5 (1.75)	20,000 (200,000)	1.71E-3	120E3	67E6

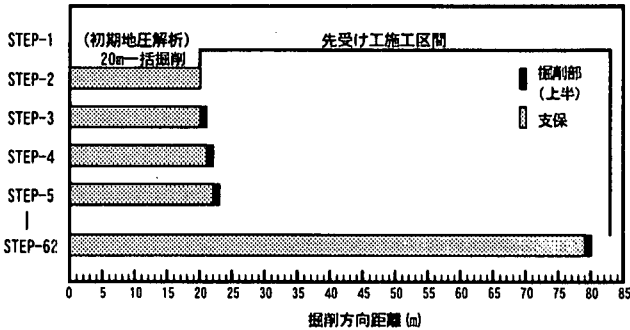
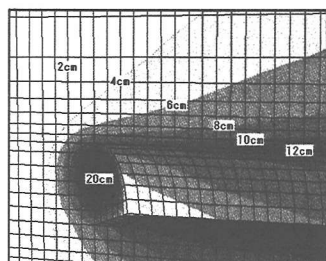
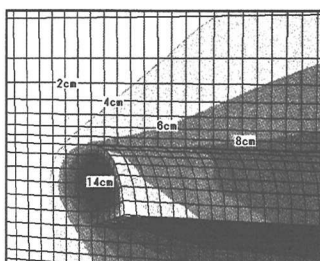


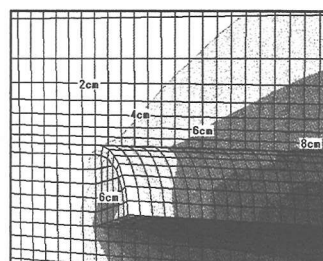
図-6 解析ステップ



(鏡ボルト無)

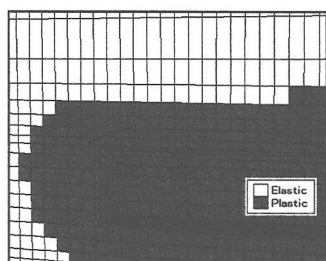


(短尺鏡ボルト)

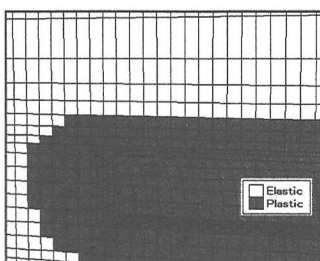


(長尺鏡ボルト)

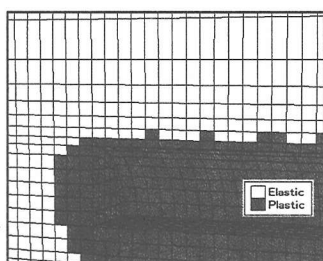
図-7 変位力分布図



(鏡ボルト無)



(短尺鏡ボルト)



(長尺鏡ボルト)

図-8 塑性領域図

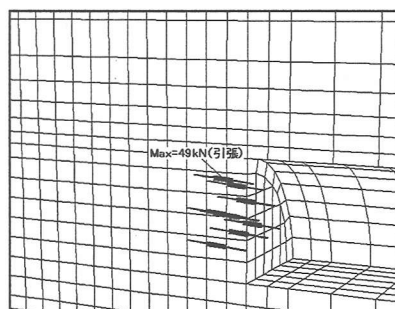
れないのに対し、長尺鏡ボルトは 3m となり顕著な抑制効果がみられる。また、短尺鏡ボルトの場合は、1 打設長が塑性領域に含まれるのに対し、長尺鏡ボルトでは、弾性域における定着長が長いことが分かる。

(3) 鏡ボルトに発生する軸力

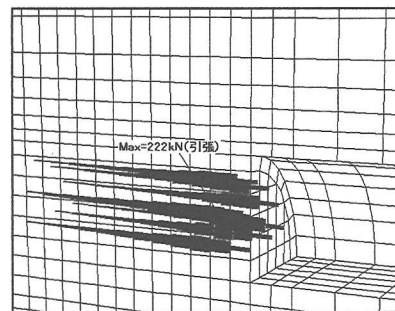
図-9 は、短尺鏡ボルトと長尺鏡ボルトの軸力分布図である（鏡ボルト打設後、1m 掘削時点）。発生する軸力はともに引張である。短尺鏡ボルトの最大発生軸力 49kN に対し、長尺鏡ボルトでは 222kN とほぼ接続部の耐力に相当する大きな軸力が発生している。長尺鏡ボルトの軸力分布状況は、塑性領域部に最大軸力が作用しており、また塑性領域の更に前方にも軸力が発生しているため、塑性領域より前方の定着長も必要であると考えられる。

(4) 支保部材に発生する軸力

図-10 は支保部材（Shell 要素）に発生する軸力の各断面の分布図である。また、図-11 は天端に発生する横断方向の軸力のトンネル縦断方向分布図である。切羽直近では、鏡ボルト無し、短尺鏡ボルトのケースの発生軸力はほぼ等しく、長尺鏡ボルトは大きい値となった。しかし、その後鏡補強工無し、短尺ボルトのケースは、切羽から離れるに依じて、軸力は増加して収束する傾向に対して、長尺鏡ボルトのケースは軸力分布にばらつきはあるものの、切羽か



(短尺鏡ボルト)



(長尺鏡ボルト)

図-9 鏡ボルト軸力分布図

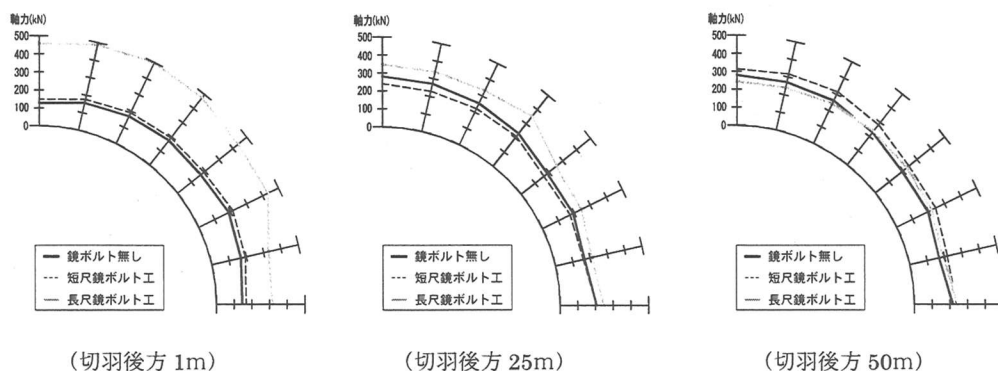


図-10 支保工断面軸力分布図

ら離れるに応じて軸力は減少し、その後一定の軸力分布を繰り返す傾向がみられる。これは長尺鏡ボルトは前方地山の拘束効果が大きいいため、切羽付近において応力解放率が小さいためであると考えられる。

また、鏡ボルト有りの両ケースは鏡ボルト無しのケースと異なり、波打った形状となっているが、掘削における鏡ボルトの残長、ラップ長等による鏡部の断面剛性の違いによるものではないかと考えられる。

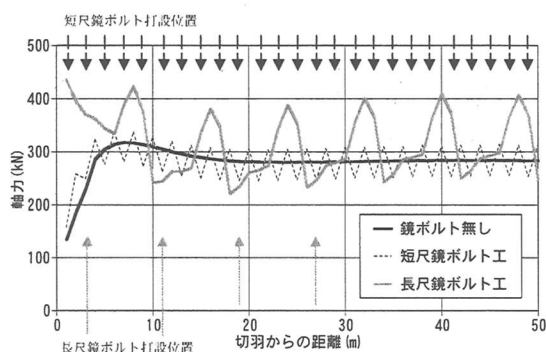


図-11 支保工天端部軸力分布図

6. まとめ

最近の鏡ボルトの使用実績を分析した結果、短尺鏡ボルトの採用比率が低下し、長尺鏡ボルト（特に 10m 以上）の採用比率が増加している傾向が明らかになった。この傾向は材料と施工技術の向上によるところが大きいと思われるが、脆弱地山での先進ボーリング等による前方探査による地山予測が一般的になりつつあることも一因と考えられる。

また、本報告で長尺鏡ボルトの力学的な効果について、解析的な検討により短尺鏡ボルトとの違いを確認することが出来たが、このような力学的効果への理解が長尺鏡ボルトの採用根拠になることを期待したい。

尚、今後の課題としては長尺鏡ボルト採用現場における支保工を含めた計測結果の蓄積を通じて効果の更なる確認が望まれるところである。

参考文献

- 1) 竹林、西崎、他：切羽安定対策工に関する解析的考察、トンネル工学研究発表会 2000
- 2) 西崎、羽馬、他：3 次元数値解析による切羽安定対策工の効果に関する考察、トンネル工学発表会 2001
- 3) 道廣、吉岡：鏡止めボルトの作用効果を三次元 FEM で解析、トンネルと地下、2002.6