

長尺鏡止めボルトの施工実績と 適用範囲に関する検討

大塚 勇¹・青木 智幸²・岡部 正³・森本 真吾³

¹正会員 大成建設株式会社 土木本部土木設計部 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿1-25-1)

E-mail: ohtsuka@ce.taisei.co.jp

²正会員 大成建設株式会社 技術センター地盤・岩盤研究室 (〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町344-1)

³正会員 株式会社ケーエフシー トンネル技術室 (〒105-0014 東京都港区芝2-5-10)

山岳トンネルの補助工法で、切羽の安定対策に用いられている鏡止めボルトは、施工技術や材料性能の向上によりボルトの長尺化が進んでおり、長尺鏡止めボルトの施工実績が増加している。しかしながら、長尺鏡止めボルトを適用した各現場において、施工されたボルト本数、オーバーラップ長などの実績データや現場の地質に関する情報は個々の論文で報告されているだけで、十分にまとめられていないのが現状である。そこで、FIT管を用いた長尺鏡止めボルトの施工実績を調査し、それを採用した各現場の地山条件について整理し、長尺鏡ボルトの適用範囲について検討を行った。また、いくつかの代表的な地山条件で三次元逐次掘削解析を行い、長尺鏡止めボルトによる切羽補強効果の違いについて検討を行った。

Key Words : long facebolting, performance record, applicable range, three-dimensional excavation analysis

1. はじめに

近年、山岳トンネル工法であるNATMが都市部で採用される事例が増えている。低土被りで地表面に構造物が存在する場合や低強度、低剛性の脆弱な地山を掘削する場合に、切羽の安定や地表面沈下の抑制に対する対策が必要となっている。また、補助ベンチ付き全断面掘削で加背を大きくしトンネルの早期閉合を行う場合や、第二東名神道に代表されるトンネルの大断面化に伴い、切羽の自立性は重要な課題となっている。このような背景から、切羽および切羽前方を直接補強する鏡止めボルトの施工事例が増えており、切羽の安定対策として多くの現場で採用されている。

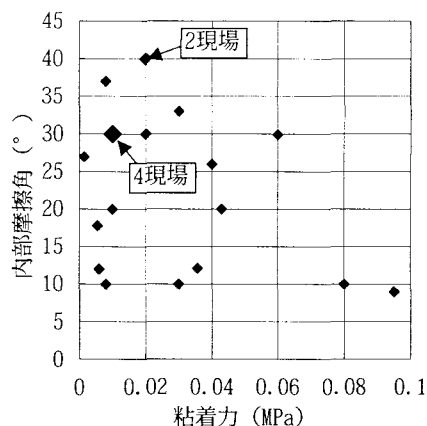
最近では、施工技術の発展により長さ10m以上の長尺な鏡止めボルトの施工が可能となり、特にFIT管を用いたケースが増えている。FIT管は外径76mm、内径60mmのGFRP製のボルトであり、軸方向の強度は高く母材部で約1,000kNの耐力を有するが、せん断方向の強度は低く、掘削によって容易に切断できる。自穿孔タイプの二重管方式で削孔することにより、孔壁が崩れることなく、切羽前方により長く削孔することができる。また、流動性が高く強度も高い注入材によって、長尺なボルトを確実に地山に固定することができる。

施工事例の増加と伴に、長尺鏡止めボルトの岩盤補強効果に関する研究や施工事例の報告が多く発表されている。多種多様な地山条件で長尺鏡止めボルトは採用されており、ボルトの本数や長さなどの仕様は各現場で異なる。

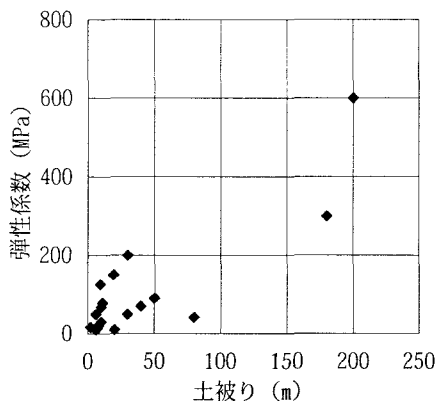
そこで、本報告では長尺鏡止めボルトであるFIT管に関する発表論文や資料などをまとめて、ボルトの仕様やボルトを採用した現場の地山条件を整理し、分析を行った。また、分析結果をもとに、代表的な異なる地山条件で三次元掘削解析を行い、長尺鏡止めボルトによる岩盤補強効果の違いについて検討した。

2. 長尺鏡止めボルトの施工実績

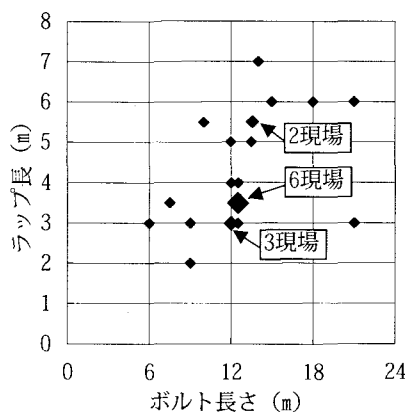
文献や資料など^{1) - 15)}を参考に33現場について、長尺鏡止めボルトの施工実績や地山条件などを調査した結果を報告する。長尺鏡止めボルトの施工実績としては、ボルトの長さ、オーバーラップ長、打設密度、注入材の種類などについて調べた。地山条件としては、地山の弾性係数、粘着力、内部摩擦力、一軸圧縮強度などの地山物性値や地質について調査した。また、長尺鏡止めボルトを採用した区間のトンネル断面や土被り、併用した補助工法についても調べた。



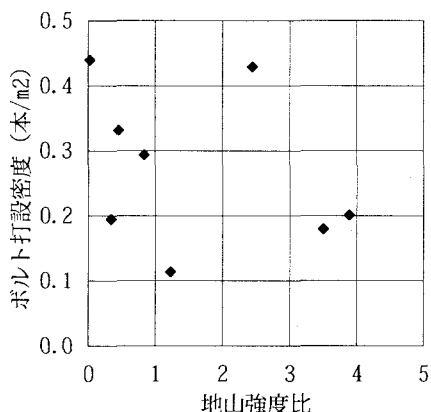
(a) 粘着力と内部摩擦角の関係



(b) トンネル土被りと地山の弾性係数の関係



(c) 長尺鏡止めボルトの長さとおバーラップ長の関係



(d) 地山強度比と長尺鏡止めボルトのボルト打設密度の関係

図-1 長尺鏡止めボルトの施工実績と地山条件のまとめ

(1) 施工実績のまとめ

図-1に長尺鏡止めボルトの施工実績とそれを採用した現場の地山条件をまとめた。大きいマーカーは複数の現場で同じ値であることを示している。

(a) 図では、粘着力が0.05MPa以下で長尺鏡止めボルトが採用されているケースが多い。粘着力が0.01MPa、内部摩擦角 ϕ が30°の現場が4つあり、この物性値付近の実績が特に多い。また、地山粘着力が大きくても内部摩擦角の小さい、いわゆる粘性系地山についても採用事例がある。次章で解析を行う代表的な地山条件としては、粘着力が小さく内部摩擦角の大きい砂質系地山 ($C: 0.01\text{MPa}$, $\phi: 30^\circ$) と、粘着力が大きく内部摩擦角の小さい粘性系地山 ($C: 0.05\text{MPa}$, $\phi: 15^\circ$) について検討を行う。

(b) 図では、弾性係数は200MPa以下、土被りは50m以下の低土被りで長尺鏡止めボルトが採用されているケースが多い。土被りと弾性係数には正の相関がある。次章の解析的検討では、弾性係数を150MPa、土被りを10mと

する。

(c) 図では、長尺鏡止めボルトの長さが長いほどオーバーラップ長も長くなる傾向にある。ボルト長が12mまたは12.5mで、それぞれオーバーラップ長が3m、3.5mの組合わせが多い。ボルト長は最長21mまでの実績がある。

(d) 図では、一軸圧縮試験結果が分かった現場が少なかつたため、点数が少ないが、地山強度比が小さいほどボルトの打設密度が大きくなるのが分かる。ここで、ボルトの打設密度とは、打設された長尺鏡止めボルトの本数を掘削断面積で割ったものであり、補助ベンチ付き全断面掘削の場合には、上下半の断面積を用い、上半先進の場合には、上半の断面積とした。補助ベンチ付き全断面掘削の場合には、上半のみにボルトを打設しているケースが多いが、上下半に打設している場合もある^{5) 13)}。次章で行う解析では、打設密度を平均的な値である0.3本/㎡とする。

長尺鏡止めボルトと他の補助工法を併用しているケー

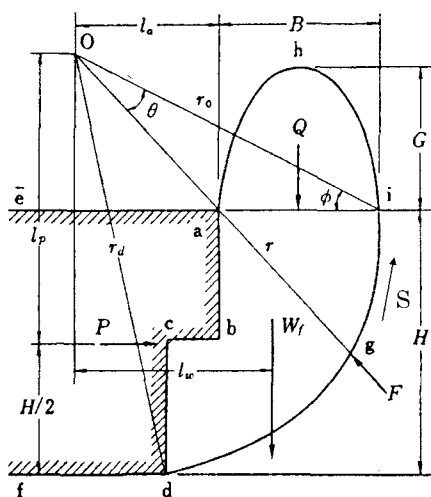


図2 村山の式による切羽の釣り合い

スが多く、長尺鋼管フォアパイリング、パイプルーフおよびプレライニングなどの先受工や薬液注入工との併用事例が多い。そのため、上記の地山物性値は、他の補助工法により見掛け上大々くなっている可能性がある。

(2) 村山の式による長尺鏡止めボルトの打設密度の設計

長尺鏡止めボルトの打設密度の設計方法は確立されていないのが現状である。既往の調査結果⁶⁾と同様に、今回の事例調査でも、実績による経験的手法によって打設密度を設定している場合が多く、その他の方法としては、村山の式⁷⁾による簡易計算的な方法が用いられている⁴⁾。

ここで、村山の式により求められる打設密度について検討する。図-2に示すように、村山の式では、切羽前方のゆるんだ地山がすべり面に沿って切羽を押出そうとする力に対して、すべり面の抵抗力および切羽を拘束する力で抵抗すると考え、必要な切羽拘束力Pを求める。

(1) に示すように、点Oまわりのモーメントの釣り合い式から、切羽を抑える必要内圧Pを求めると式(2)のようになる。

$$W_f \cdot l_w + Q \left(l_a + \frac{B}{2} \right) = P \cdot l_p + \frac{C}{2 \tan \phi} (r_d^2 - r_o^2) \quad (1)$$

$$P = \frac{1}{l_p} \left\{ W_f \cdot l_w + Q \left(l_a + \frac{B}{2} \right) - \frac{C}{2 \tan \phi} (r_d^2 - r_o^2) \right\} \quad (2)$$

式中の記号は、図-2に示す通りである。W_fはすべり土塊の重量、Qはゆるみ土塊の重量、Pは切羽拘束力である。

調査した各現場で、土被り、トンネル高さ、地山の強

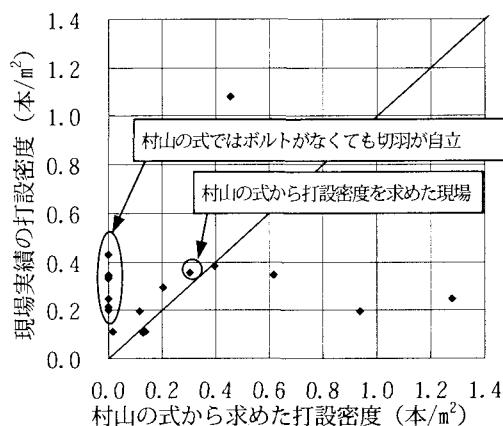


図3 村山の式から求めた打設密度と現場実績の比較

度定数(c, φ)、単位体積重量を入力条件として、対数線分で仮定した切羽前方のすべり面を変化させて、最大となる必要内圧Pを求めた。FIT管の継ぎ手部の耐力は200kNであるため、求めた必要内圧Pを200kNで割り、長尺鏡止めボルトの必要な打設密度を求めた。

図-3には、村山の式から求めた打設密度と現場の実績を各現場で比較した図を示す。実際に、村山の式から打設密度を決めた現場⁴⁾では、安全率を1.2に設定しているものと思われる。村山の式から求めたものと現場実績がほぼ等しくなる場合もあるが、村山の式では打設密度が0となり長尺鏡止めボルトが必要ないと判断されるケースが多く、実績と合わない。これらの現場では、地山の粘着力が大きい傾向にある。村山の式では、力の釣り合い式で切羽の安定性を評価しており、地山の弾性係数などの変形特性については考慮していない。また、地山の破壊や塑性化後の挙動も考慮されない。

3. 三次元逐次掘削解析による岩盤補強効果に関する検討

前章で調べた長尺鏡止めボルトの施工実績より、代表的な地質条件を設定し、三次元逐次掘削解析を行い、長尺鏡止めボルトによる岩盤補強効果について検討し、異なる地質条件による岩盤補強効果の違いについて比較する。

(1) 解析方法

解析は三次元有限差分法⁸⁾によって行った。対象としたトンネルは、道路トンネルの暫定二車線トンネルとした。上半のトンネル半径を6.2m、下半の高さを2m、インバートの深さを1.41mとした。鋼製支保工はH150を掘進長1.0m毎に設置し、吹付けコンクリートの厚さは0.2mと

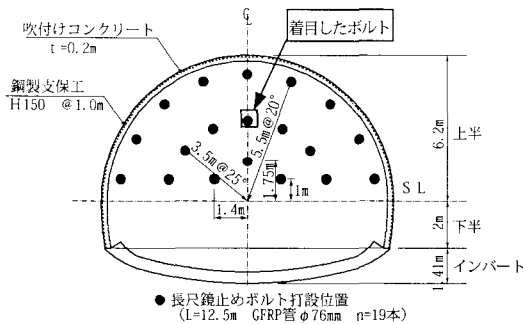


図4 解析に用いた支保パターン図

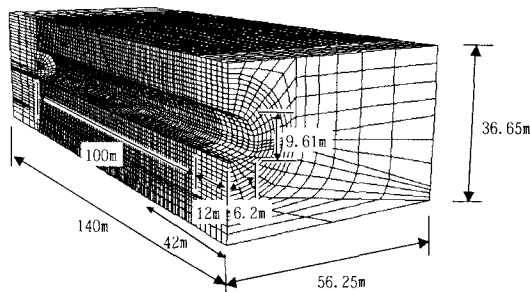


図5 解析モデル図

した。なお、ロックボルトは解析で考慮していない。また、長尺鏡止めボルトはFIT管とした。解析に用いた支保パターン図を図-4に示す。長尺鏡止めボルトは前章の施工実績より、上半切羽全体に約1.5mピッチで均等に19本配置し、打設密度を0.3本/㎡とした。長尺鏡止めボルトは、掘削によりボルトの残長が短くなった際にオーバーラップさせて次のシフトの長尺鏡止めボルトを施工するのが通常である。しかし、オーバーラップによって、長尺鏡止めボルトの効果が連続的に作用すると考え、オーバーラップ長の影響の検討については割愛し、解析上は解析領域全長に渡って長いボルトを打設した。

a) 解析モデル

解析モデル図を図-5に示す。前章の施工実績より、土被りは10mとした。鉛直土圧は土被り相当圧とし、側圧係数を0.5として水平土圧を算定した。トンネル下部、トンネル側部の境界については、それぞれ掘削断面から2D、5D程度離し、掘削の影響が及ばないように設定した。また、掘削の対称性から半断面のモデルにしている。境界条件は、上面を地表面として自由面に、他の5面はローラー境界とした。

b) 解析用物性値

地山と支保の物性値を表-1に示す。地山の弾性係数とポアソン比は、軟弱な地山を想定し、前章の施工実績と日本道路公団試験研究所「トンネル数値解析マニュアル」¹⁹⁾よりDII等級の物性値を採用した。吹付けコンクリートはシェル要素で、鋼製支保工はビーム要素でモデ

表-1 解析入力物性値

	名称	単位	入力値
岩盤	弾性係数	MPa	150
	ポアソン比	—	0.35
	単位体積重量	kN/m ³	20
吹付け コンクリート	弾性係数	GPa	4
	ポアソン比	—	0.2
	厚さ	m	0.2
	単位体積重量	kN/m ³	23
鋼製支保工 (H150)	弾性係数	GPa	205
	ポアソン比	—	0.3
	断面積	m ²	3.97×10^{-3}
	断面二次モーメント(強)	m ⁴	1.62×10^{-5}
	断面二次モーメント(弱)	m ⁴	5.63×10^{-6}
	単位体積重量	kN/m ³	78.5
長尺鏡止め ボルト	弾性係数	GPa	38
	ポアソン比	—	0.3
	断面積	m ²	1.71×10^{-3}
	断面二次モーメント	m ⁴	1.00×10^{-6}
	せん断剛性	MN/m ²	819
	付着強度	kN/m	280
	破断強度(継ぎ手部)	kN	200
	(母材部)	kN	1,000

表-2 解析ケース

	粘着力C (MPa)	内部摩擦角φ (°)	備考
ケース1	0.01	30	砂質系地山
ケース2	0.05	15	粘性系地山

ル化した。なお、長尺鏡止めボルトは、地山とボルトの付着特性を考慮でき、曲げ剛性を有するパイル要素とし、せん断剛性および付着強度は引抜き試験²⁰⁾の結果より設定した。

c) 解析ケース

地山はMohr-Coulombの降伏規準に従う完全弾塑性体としてモデル化し、地山の強度定数は前章の施工実績を参考に設定した。表-2の解析ケースに示すように、強度定数の異なる2つのケースについて検討を行った。

d) 解析手順

最初の12m区間は1メッシュが2mであるため、2mを一回で掘削し、掘削した坑壁に吹付けコンクリートを打設して、2mピッチに剛性を2倍にした鋼製支保工を設置するサイクルである。12m～112mは掘進長が1mであり、吹付けコンクリートと鋼製支保工を掘削後に設置した。

掘削方法は上半先進掘削工法とし、上半掘削時の解析結果を比較することにした。

(2) 解析結果

図-6にトンネル縦断方向の塑性領域図を示す。ケース1ではトンネル切羽から地表面まで塑性領域が到達している。長尺鏡ボルトを打設することによって、トンネル前方の塑性領域が縮小していることが分かる。ケース1のほうが、ケース2に比べて塑性領域を低減する範囲が広く、長尺鏡ボルトによる抑制効果大きい。

図-7には鏡面の最大せん断ひずみ分布図を示す。ケー

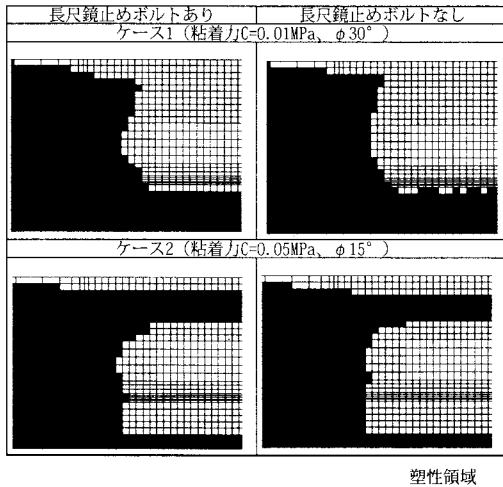


図6 塑性領域図

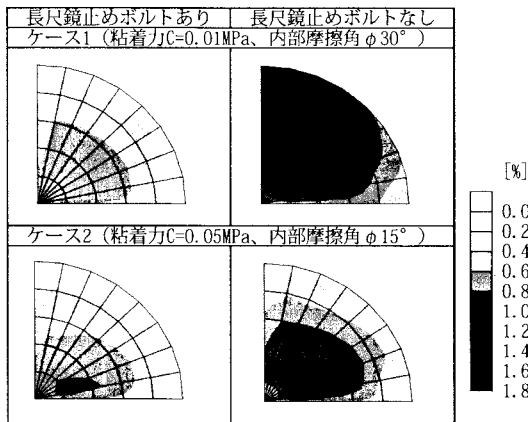
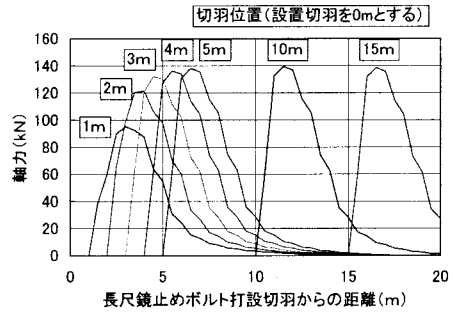


図7 最大せん断ひずみ分布図

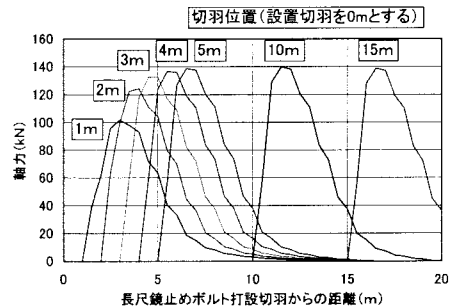
ス1では、長尺鏡止めボルトがない場合に、最大せん断ひずみの大きな領域が鏡面の中心付近に現われるが、ボルトを打設することによって、大幅にひずみ量が減少することが分かる。一方、ケース2では、ボルトを打設することによって、若干最大せん断ひずみが減少するが、ケース1よりも抑制効果は低い。

図-8には長尺鏡止めボルトに作用する軸力を示す。着目したボルトは図-4に示すように、鏡面中心のボルトである。両ケースともに切羽の進行に伴い、軸力が増加し、切羽の位置が4mで最大軸力となり、それ以上切羽が進行しても軸力は変わらない。ケース1とケース2を比較すると、作用する軸力の最大値も分布形状もほぼ同様な結果である。

両ケースで長尺鏡ボルトに作用する軸力は同等であるにもかかわらず、ケース1のほうがボルトによる岩盤補強効果が大きい。ケース1では、内部摩擦角が大きいいため、長尺鏡止めボルトによって地山に拘束圧を与えるこ



(a) ケース1 (粘着力0.01MPa、内部摩擦角 30°)



(b) ケース2 (粘着力0.05MPa、内部摩擦角 15°)

図8 長尺鏡止めボルトに作用する軸力

とで、いわゆる内圧効果により地山の塑性化をより抑制する効果があるものと考えられる。

4. まとめ

長尺鏡止めボルトの施工実績を調べた結果、以下のことが分かった。

- ① 粘着力が0.05MPaよりも小さい場合に長尺鏡止めボルトが適用されている事例が多い。
- ② 土被り50m以下の低土被りトンネルで採用される場合が多い。
- ③ 低土被りで採用されている事例では、全てのケースで弾性係数が200MPa以下の低剛性の地山である。
- ④ ボルト長が長いほど、オーバーラップ長も長い。
- ⑤ 地山強度比が低いほど、ボルトの打設密度が高い。

村山の式から求めた打設密度と施工実績を比較したが、多くの現場で異なる結果となった。切羽の安定性評価には、地山の強度特性だけでなく、弾性係数などの変形特性も考慮する必要があるものと考えられる。

施工実績を参考に、土被りの小さいトンネルについて、異なる地山の粘着力と内部摩擦角を設定し、長尺鏡止め

ボルトの岩盤補強効果の違いについて3次元掘削解析を用いて検討した。その結果、砂質系地山（内部摩擦角が大きく粘着力が小さい）では、粘性系地山（内部摩擦角が小さく粘着力が大きい）よりも長尺鏡止めボルトによる岩盤補強効果が大きくなることが分かった。したがって、他の補助工法の併用、湧水の有無、近接構造物への影響の有無など、現場によって施工条件が異なるため長尺鏡止めボルトの適用範囲を一概に示すことはできないが、砂質系地山におけるトンネルの方が長尺鏡止めボルトによる補強工がより効果的であると考えられる。これは、内圧効果による地山の強度増加を有効に利用する点で合理的であるといえる。

参考文献

- 1) 北川修三, 梶原雄三, 鈴木恒男, 川原一則: 二重支保工法で膨張性地山を克服, トンネルと地下第 32 巻 6 号, pp. 7-16, 2001.6.
- 2) 溜渕孝治, 笠松弘治, 小川澄, 畔高伸一, 伊藤省二: 双設トンネルにおけるトンネル荷重発生機構に関する研究, トンネル工学研究論文・報告集第 11 巻, pp.135-140, 2001.
- 3) 遠藤元一, 及川淳, 青山昌二, 篠崎秀敏: 盛土造成地を改良 New PLS 機で施工, トンネルと地下第 33 巻 5 号, pp. 17-25, 2002.5.
- 4) 小西康人, 海原卓也, 小野隆利, 須川智久: 鉄道直下の函体けん引に鏡補強ボルトを採用, トンネルと地下第 36 巻 2 号, pp. 7-16, 2005.2.
- 5) 清水利郎, 尾畑洋, 松尾勉, 手塚仁, 岡部正: 長尺切羽補強工を施工した切羽前方地山の挙動について, トンネル工学研究論文・報告集第 13 巻, pp.225-230, 2003.
- 6) 木梨秀雄, 白旗秀紀, 加藤健治, 松田安則, 羽馬徹: 低土被り未固結地山における長尺鏡ボルトの挙動計測, トンネル工学研究論文・報告集第 14 巻, pp.217-224, 2004.
- 7) 高橋浩, 新野義昭, 大坪稔哉, 岡田憲明, 森本真吾: 低土被り部における長尺鏡ボルトの支保効果, トンネル工学研究論文・報告集第 14 巻, pp.225-230, 2004.
- 8) 大塚勇, 青木智幸, 谷卓也, 小杉勝之, 竹津英二, 小島隆: 膨張性地山における長尺鏡ボルトの切羽補強効果の検討, トンネル工学研究論文・報告集第 14 巻, pp.23-30, 2004.
- 9) 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, 土木学会論文集 No.743/III-64, pp.213-222, 2003.
- 10) 大塚勇, 青木智幸, 谷卓也, 佐原圭介, 後藤光理, 平野逸雄: 低土被りトンネルにおける長尺鏡止めボルトの軸力および曲げモーメントの計測結果, 土木学会第 60 回年次学術講演会 3-217, pp.433-434, 2005.
- 11) 田口芳範, 斎藤貴, 貝原登, 宇田誠, 笹尾春夫: 崩落物堆積区間における薬液注入と長尺先受工を併用した天端・切羽安定対策, トンネル工学研究論文・報告集第 13 巻, pp.189-194, 2003.
- 12) 宮野前俊一, 森田篤, 松井幹雄, 酒井照夫, 梨本裕: 未固結地山における切羽安定対策工の効果に関する一考察, トンネル工学研究論文・報告集第 14 巻, pp.107-114, 2004.
- 13) 土田淳也, 前田智之, 浅川敏以, 武内秀木, 内田智視: 軟弱変質帯におけるトンネル坑口部の施工, トンネル工学研究論文・報告集第 14 巻, pp. 187-194, 2004.
- 14) 山田浩幸, 大谷朋彦, 斎藤泰信: 地滑り跡地形を呈する坑口部における軟弱地山対策の設計と施工, トンネル工学研究論文・報告集第 14 巻, pp. 115-122, 2004.
- 15) ジェオフロンテ研究会, 長尺鏡ボルトの施工実績調査とその分析その 2, pp. 109-123, 2000.
- 16) ジェオフロンテ研究会, 切羽前方コアに着目した新しいトンネル工法, pp. 36-37, 2002.
- 17) 村山朔郎, 遠藤正明, 橋場友則: 機械化シールドの推進性能に関する土質力学的考察, 第 1 回土質工学研究発表会, pp.75-79, 1966.
- 18) Itasca Consulting Group, Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions (FLAC3D), ver. 2.1, 2002.
- 19) 日本道路公団試験研究所: トンネル数値解析マニュアル, 3 章 p.26, 1998.
- 20) 大塚勇, 青木智幸, 小川哲司, 足達康軌, 田中崇生: 各種ボルト材による鏡ボルトの岩盤補強効果について, 第 33 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.73-78, 2004.

STUDY ON PERFORMANCE RECORDS AND APPLICABLE RANGE OF LONG FACEBOLTS

Isamu OHTSUKA, Tomoyuki AOKI, Tadashi OKABE and Shingo MORIMOTO

Facebolting is often used as an auxiliary tunnelling method to increase face stability in mountainous areas. Due to remarkable advancement in construction techniques and material quality, the bolt length has been getting longer, and more and more performance records of using the facebolts have been reported. On the other hand, reviewing the published papers shows that each one presents actual number of bolts and overlap lengths used or on geological information only for that specific site, and that the overall effectiveness of the facebolts are not fully investigated.

In order to examine the applicable range in the use of the long facebolts, performance records of long FIT pipe facebolts have therefore been reviewed along with their geological conditions. For several representative geological conditions extracted, three-dimensional tunnel excavation analyses were also performed to examine the difference in reinforcing effect by long facebolts.