

長尺鏡ボルト工の適正配置に関する解析的評価

Evaluation by the analysis about the proper arrangement of long length face bolting

西崎晶士¹・宮本健太郎²・羽馬徹³・岡部正⁴

Shousi Nishizaki, Kentarou Miyamoto, Toru Haba, Tadashi Okabe

¹正会員 清水建設(株) 土木事業本部 技術第二部 (〒105-8007 東京都港区芝一丁目2-3シーパンスS館)

²正会員 清水建設株式会社大阪支店土木部 (〒541-8520 大阪府大阪市中央区本町3-5-7御堂筋本町ビル)

³正会員 (株)ケー・エフ・シー 技術部 (〒105-0014 東京都港区芝二丁目5-10)

⁴正会員 (株)ケー・エフ・シー トンネル技術室 (〒105-0014 東京都港区芝二丁目5-10)

E-mail:okabe.tadashi@shimz.co.jp

It seems that the number of job-site adopting the long length face bolting method has increased in the recent construction method of tunnel in the mountain. In order to prove such a tendency, the actual data have been collected. The research works for this method have become active in parallel with increase in its construction sites. Particularly, some noteworthy theses are published due to no establishment of technical standard on arrangement of long length face bolt.

This report tries to analytically study the support effect referring to the parameter and arrangement of long length face bolt which were not focused in the past.

Key Words : long length face bolting, arrangement, 3D-analysis

1. はじめに

最近の山岳工法トンネル工事において、長尺鏡ボルト工の実績が増加傾向にあると思われる。そこで、まず、その状況を実績データにより裏付けた。

実績の増加と同様に、長尺鏡ボルト工の研究も活発化している。特に、長尺鏡ボルトの配置法については確立した技術基準がないことから、道廣¹⁾らの研究など、いくつかの注目すべき論文が発表されている。

本報告は、これまでの研究で着目されていない配置のパラメータおよび配置法について支保効果を解析的に検討したものである。

2. 鏡ボルトの採用動向

山岳トンネル掘削に、鏡ボルトが使用されるようになって約30年が経過し、資機材、施工法の開発改良の結果、現在では切羽の安定のために欠かせない補助工法となっている。近年の鏡ボルトは長尺化が加速され、単なる鏡面の安定を目的にしたものから、先行変位の抑制効果を利用した、沈下対策工法ある

いは周辺地山の総合的な安定対策工法へと姿を変えてつつある。^{2), 3)}

そこで、(株)ケー・エフ・シーの過去5年間のGFRP製鏡ボルトの納入実績から採用動向を分析した。

トンネル発注量、発注トンネルの地質条件の違いなどにより、採用現場数は増減しているが、明らかに長尺化が進んでいる傾向が読み取れる(図-1)。

1999年度に全体の20%程度であった10m超の鏡ボルトは、2003年度には全体の55%にまで増加した。

図-2は、直近の2003年度の実績を用いて、長さ別にどのようなボルト材料が採用されたかを分析した結果である。

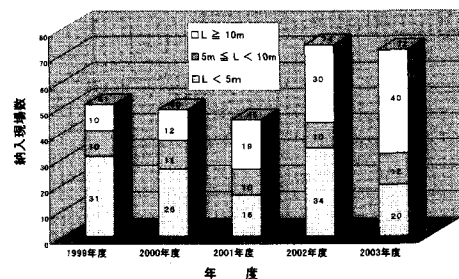


図-1 1打設長別鏡ボルト採用動向

棒状のGFRPボルトが採用された事例は、孔壁が概ね自立し削孔後にボルトの挿入が可能なケースである。1打設長が長くなると孔壁の自立が困難となり、二重管削孔方式で打設するΦ76パイプ状の材料の採用が増加する。10m超では全体の80%が二重管削孔方式で施工されている。

図-3は、同じ2003年度のデータから、1打設長の違いにより、使用される注入（定着）材の種類について分析した結果である。

1打設長5m未満ではモルタルを定着材とした充填式施工が中心で、一部で中空ボルトの中空部からウレタン系材料を注入する施工法も採用されている。1打設長5m以上10m未満では、6m程度までは充填式施工の事例も若干あるが、多くが中空ボルトの中空部からモルタル系あるいはウレタン系の注入材を注入する方式が中心であり、ややモルタル系材料の採用事例が多い。10m超では、Φ76のGFRP管を用いるケースが中心となっており、管内に注入用補助部材を挿入して、長尺材料全長に渡ってバラつきのない注入が行われている。注入材の採用件数としては、ウレタン系とモルタル系がほぼ同数である。

鏡ボルト長尺化は、長尺先受け工法の普及が一つの引き鉄になったと考えられるが、結果として最も無防備な応力開放面である切羽鏡の変形や押出しの問題に焦点を当てるきっかけとなった。鏡の変形は、基本的事項ではあるが、計測や評価が難しく、これまで十分な研究が行われて来たとは言えない。長尺鏡ボルトの普及によって、切羽前方地山の挙動を定量的に評価する機会が増加することは、山岳トンネル、都市トンネルの合理的な設計・施工に役立つものと期待される。

3. 長尺鏡ボルト工の適正配置に関する検討

GFRPを用いた長尺鏡ボルト工は、切羽前方地山を補強し、切羽の安定を図ることを目的としている。しかし長尺鏡ボルト工は切羽前方を含めた3次元構造として捉えなければならず、その設計方法についてはまだ確立されていないのが現状である。

本研究では長尺鏡ボルト工の設計に役立つような適正配置に関する検討を数値解析手法により行った。解析には有限差分法に基づいた3次元解析コード「FLAC3D（Itasca社製）」を使用した。

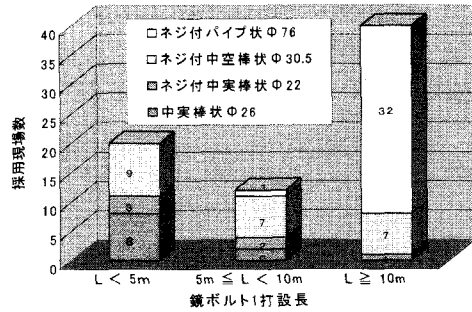


図-2 鏡ボルト形状別採用状況(2003年度)

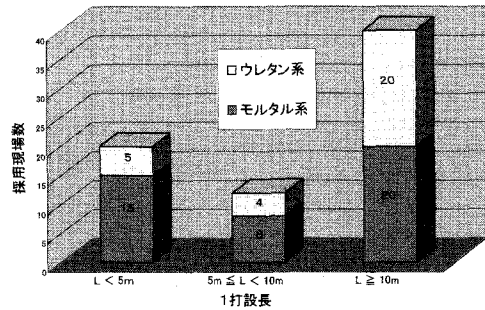


図-3 1打設長別の注入材採用状況(2003年度)

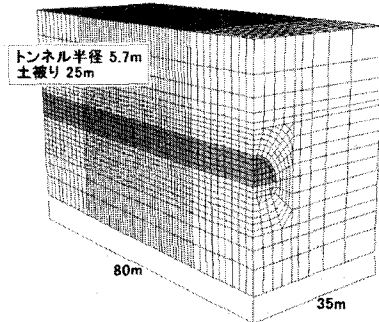


図-4 解析モデル図

表-1 入力物性値

	単位体積重量 (γ) KN/m ³	弾性係数 (E) MPa	ポアソン比 (ν)	粘着力 (c) MPa	内部摩擦角 (ϕ) °
地山	19	50	0.4	0.01	30

	単位体積重量 KN/m ³	弾性係数 MPa	断面積 m ²	グアウトせん断剛性(kbond) MN/m ²	グアウト付着強度(sbond) MN/m
長尺鏡ボルト(GFRP)	17.5	20,000	1.71E-03	8.19E+02	7.60E-02

(1) 長尺鏡ボルト工の打設ピッチに関する検討
長尺鏡ボルト工の設計手法は確立されていないのが現状であることから、現在長尺鏡ボルト工の本数

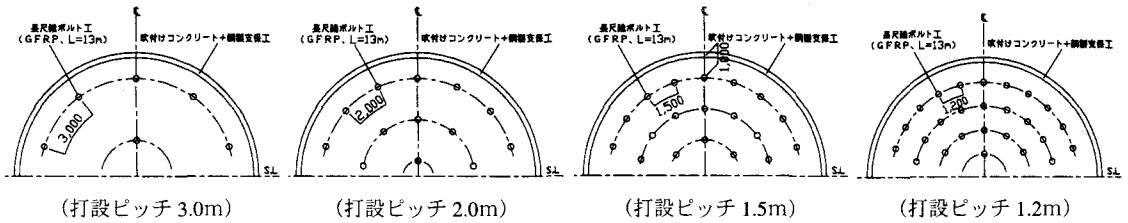


図-5 解析ケース（打設ピッチ比較）

は、施工事例からの経験的手法により決定されることが多いようである。本節では数値解析により打設ピッチの違い（＝打設本数の違い）による切羽鏡部への影響の比較を行った。

解析モデル図を図-4に示す。トンネル掘削径は5.7mとし、土被りは20mとした。地山および支保、長尺鏡ボルト工の入力物性値を表-1に示す。地山条件については、軟質な砂質系地山を想定した。長尺鏡ボルト工の数値解析におけるモデル化についてはこれまで多くの研究が行われている。大塚ら⁴⁾は引抜き試験よりFLAC3Dにおける長尺鏡ボルト工の付着特性に関する入力値を決定している。本解析では上記の文献を参考にφ76のGFRP管の入力物性値を設定した。長尺鏡ボルト工の長さは13m、1シフト掘削長は9mとしている。掘削は検討切羽位置まで20m間を1m逐次掘削した。

長尺鏡ボルト工の打設ピッチの異なる4ケースを解析ケースとして設定した（図-5）。

図-6に各ケースにおける切羽鏡部押し出し量を示す。打設ピッチを狭くし打設本数を増やすことにより鏡面の押し出し量は少なくなり、より確実な切羽前方地山の補強ができることが示されている。

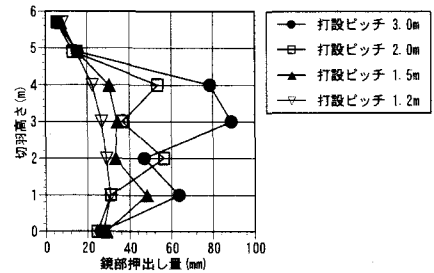


図-6 切羽鏡部押し出し量（打設ピッチ比較）

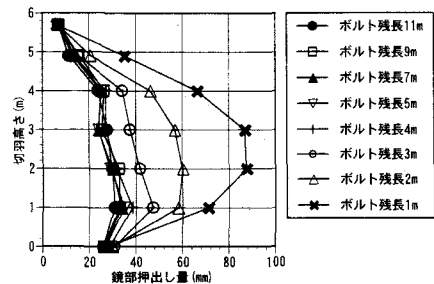


図-7 切羽鏡部押し出し量（ボルト残長比較）

(2) 長尺鏡ボルト工の残長に関する検討

長尺鏡ボルト工の打設時に次のシフトが打設される直前のボルト残長は切羽前方地山の補強効果に大きく影響する要素のひとつであると考えられる。ここでは長尺鏡ボルト工の残長による周辺地山への影響の比較検討を行った。地山条件は(1)と同様である。長尺鏡ボルト工の長さは13mとし、打設ピッチは1.5mとしている。この章ではボルト残長が短くなるまで掘削を行うが次の長尺鏡ボルト工の打設は行わない。

図-7に各ボルト残長における鏡部押し出し量を示す。ボルト残長が3m以下になると鏡部の押し出し量が増加する傾向がみられる。このことから、鏡面の押し出し量を効果的に抑制するためにはラップ長を4m以上確保したほうがよいことがわかる。

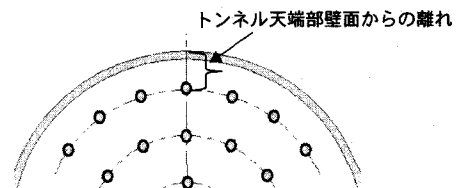


図-8 トンネル天端部壁面からの離れ

(3) トンネル天端壁面からの離れに関する検討

長尺ボルト工の天端壁面からの離れ（図-8参照）についての適正配置についてはこれまで特に技術的知見は無かったと思われる。そこで、トンネル天端壁面からの離れの周辺地山への影響について検討した。解析ケースは打設ピッチを1.5mとし、トンネル天端壁面からの離れを1.5m、1.0m、0.5mとした3ケースを設定した（図-9）。地山条件については(1)と同様である。

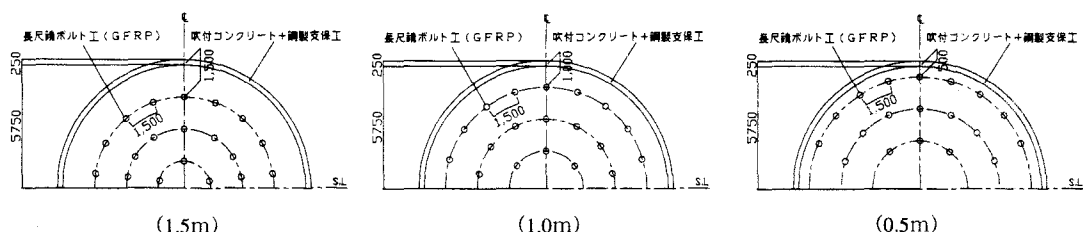


図-9 解析ケース（天端部壁面からの離れ比較）

掘削方法は対象切羽位置まで一括掘削解析としている。

図-10は各ケースにおけるトンネル天端周辺地山の変位量を示したものである。トンネル天端部壁面からの離れが大きくなるに伴い、天端部周辺地山の変位も増加する傾向がみられる。また、図-11は、各ケースに長尺先受け工（材質GFRP製、長さ12m、打設ピッチ0.45m、120°範囲）を併用した場合の解析結果である。併用した長尺先受け工の打設配置図を図-12に示す。表-2には各ケースにおける鏡部押出し量最大値を示す。長尺先受け工と長尺鏡ボルト工を併用することにより天端部壁面の離れが大きい場合にもトンネル天端周辺地山の変位量は抑制されている。以上より、特に長尺先受け工との併用をしない場合、トンネル天端壁面からの離れについては十分吟味する必要があると考えられる。

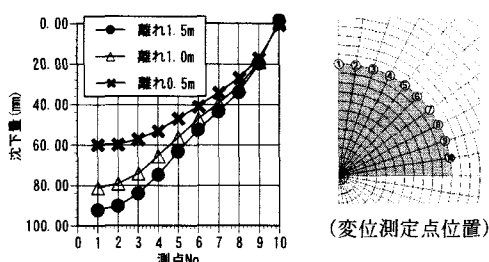


図-10 トンネル天端周辺地山変位量

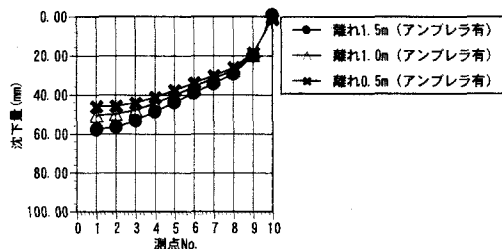


図-11 トンネル天端周辺地山変位量（長尺先受け工併用）

(4) 長尺鏡ボルト工の縦断配置に関する検討

これまで長尺鏡ボルト工の縦断的な配置については、AGF工法にみられるような長尺アンブレラ工法に合わせた1シフト掘削長、ラップ長が選定されているようである。アンブレラ工法の場合、打設長は打設角度と支保工の離れの関係により現状の12m程度以上の打設は厳しい。長尺鏡ボルト工の場合は、切羽前方地山に向かってほぼ水平に打設できるため、長さの制約はない（但し施工上の都合による長さの限界はある）。より経済的な配置をするためにはできるだけ1シフト掘削長を伸ばし、断面における本数が倍となるラップ部分を少なくすることである。また、長尺鏡ボルト工本数を半分の千鳥配置とし、1シフト長9mを固定、ボルト長を変化させたそれぞれのケースについても対象とし、図-13に示すような7ケースについて比較解析を行った。

図-14に各ケースにおける切羽鏡部押出し量を示す。最も問題となると思われる次シフト打設前（ボルト残長最小時）に着目する。1断面における必要本数を13本とすると、ケース①～③については断面当り13本での最小ボルト残長は4.5m確保されてい

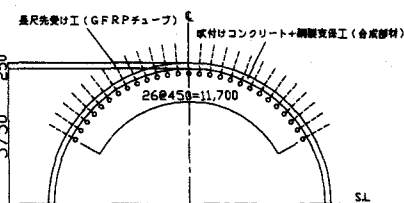


図-12 長尺先受け工配置図

表-2 鏡部押出し量最大値

	天端壁面離れ(m)	鏡部押出し量最大値(mm)
長尺先受け工 無し	1.5	77.8(天端付近)
	1.0	65.8(天端付近)
	0.5	73.6(下部)
長尺先受け工 有り	1.5	58.9(天端付近)
	1.0	54.9(天端付近)
	0.5	70.4(下部)

る。ケース④～⑦は各シフトにおいて6本、7本の千鳥配置であるが、ケース④、⑤については必要本数（13本）が満足されたボルト残長は確保されておらず、ケース①～③に比較し、鏡部の押出し量が大き

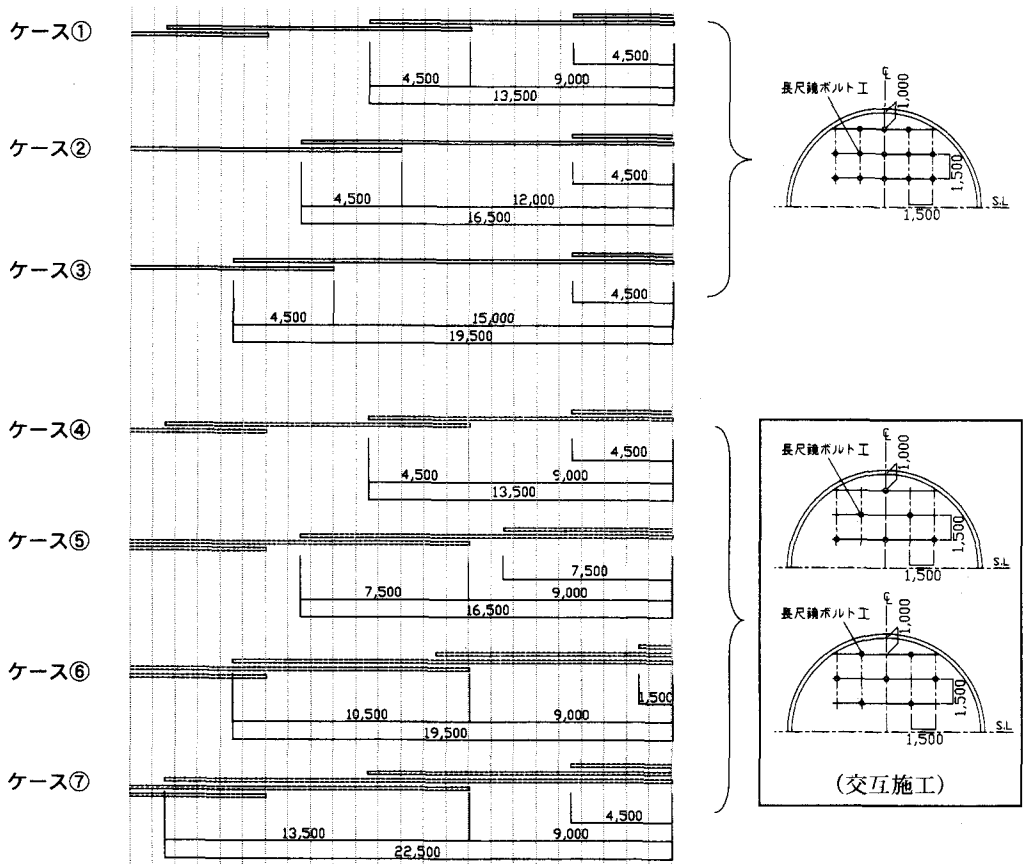


図-13 解析ケース（縦断配列比較）

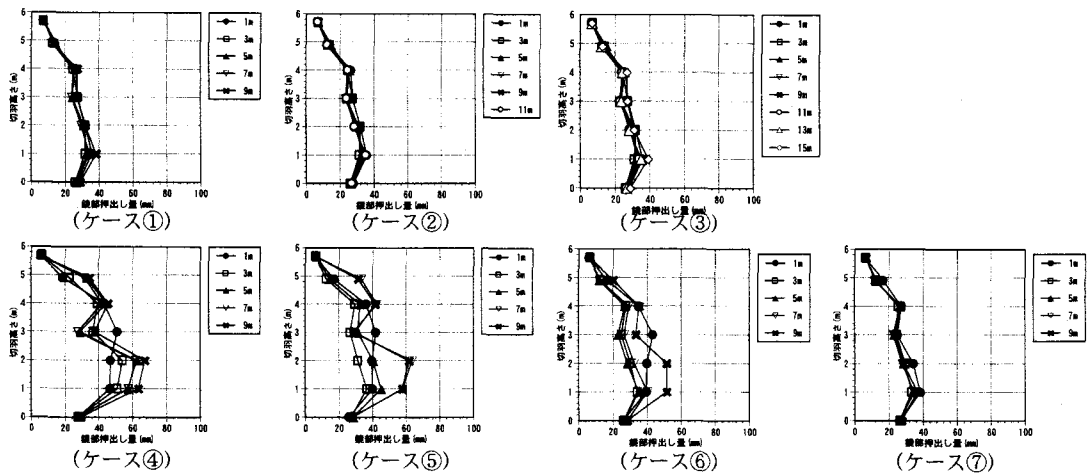


図-14 切羽鏡部押出し量（縦断配列比較）

い、ケース⑥、⑦については必要本数が満足されたボルト残長は確保されているが、残長4.5mのケース⑦はケース①～③と同様な押出し量分布であるのに対し、残長1.5mのケース⑥は押出し量が多い結果となった。

以上より、必要本数を満足した長尺ボルトの残長について考慮することが重要であると考えられる。

(5) 長尺先受け工を兼用した鏡ボルト工の打設パターン

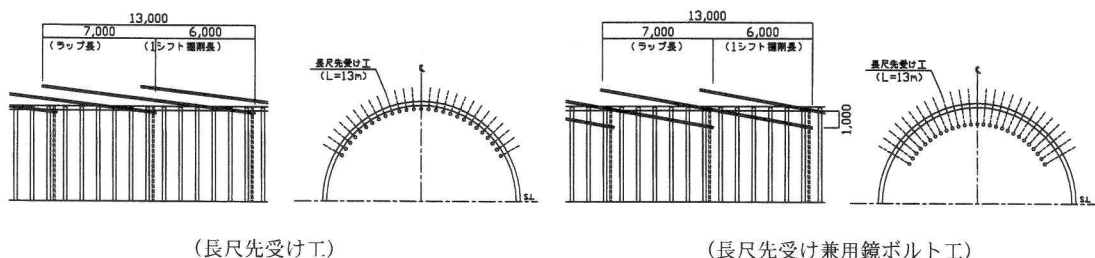


図-15 解析ケース

GFRP管による補強ボルトは切除可能なため、無拡幅タイプの長尺先受けとしても利用できるが、打設位置の自由度の利点を活用して、鏡ボルトの打設位置から長尺先受けの補強範囲まで角度をつけた配置が可能である。そこで、この長尺先受けを兼ねた鏡ボルトの打設パターンについて効果を検証した。解析における通常の長尺先受け工と長尺先受け工兼用鏡ボルト工の打設配置図を図-15に示す。両者ともに同じ材質（GFRP製）、本数、打設長、ラップ長である。

図-16に各ケースにおける最大せん断ひずみ分布図を示す。切羽位置は両者とも次シフト打設前の時点である。長尺先受け兼用鏡ボルト工は通常の長尺先受け工の打設パターンよりも天端部の発生ひずみ量、沈下量が小さく、先受け工としての効果が高いことが分かる。

図-17に各ケースにおける鏡面押出し量を示す。先受け兼用打設パターンは長尺先受け工に比較し、押出し量を抑制する効果がみられるとともに、鏡面の不安定現象の起点となる天端付近の押出し抑制効果が大きいことが分かる。

以上の解析結果は、長尺先受け兼用鏡ボルト工が切羽安定化効果に優れた打設配置法であることを示唆したものである。

4. おわりに

最近の鏡ボルト工の施工実績データによれば、施工件数の増加だけではなく、長尺ボルトが短尺ボルトの施工件数を凌駕しつつある傾向が明らかになった。この状況は、施工技術の向上のためだけでなく、長尺鏡ボルト工の切羽安定化効果や変形抑制効果への理解が浸透しているためと思われる。

長尺鏡ボルトは長尺先受け工と比較して配置の自由度が高いため、地山に応じた適正配置に関する研究余地もまだ多いと考えられる。そこで、本報告では、新たな配置法を含む長尺ボルト工の支保効果について解析的な検討を行ったが、多様な配置法の可

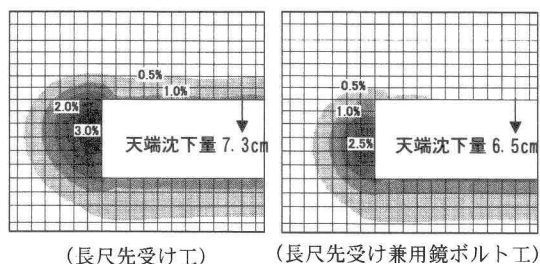


図-16 最大せん断ひずみ分布図

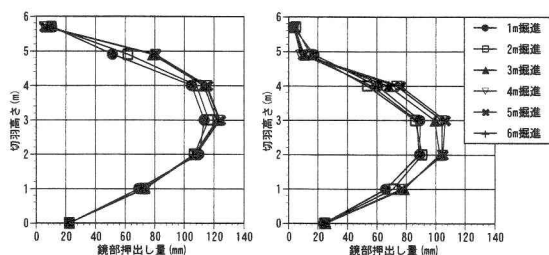


図-17 切羽鏡部押出し量

能性を示すことができたと考える。

参考文献

- 1) 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、Vol.33, No.6, pp43-48, 2002.6
- 2) 御手洗・松尾：山岳トンネルにおける長尺鏡0補強工の作用効果の評価、土木学会論文集No.743Ⅲ-64, 213-222, 2003.9
- 3) 新野・藤井：トンネル低土被り部における長尺鏡止めボルトの効果、土木学会第59回年次学術講演会論文集、6部門、pp743-744, 2004.8
- 4) 大塚、青木：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回岩盤力学シンポジウム論文集、pp73-7, 2004.1