

大断面シールド発進防護工としての 縫地工法の適用例とその考察

A CONSIDERATION AND APPLICATION OF VERTICAL AND HORIZONTAL ANCHOR BOLTS AS A LAUNCHING PROTECTION FOR EXTRAORDINARILY LARGE DIAMETER SHIELD MACHINE

西林聖武¹⁾・矢萩秀一²⁾・中島誠三³⁾・守山 亨⁴⁾・関本 昇⁵⁾

Masatake NISHIBAYASHI, Shuuichi YAHAGI, Seizou NAKAJIMA, T ooru MORIYAMA, Noboru SEKIMOTO

As launching protection for extraordinarily large diameter shield machine in urban areas , the special anchors have been first introduced in Japan , proving lesser influence to the surrounding ground and the analysis-based execution of the work . The aim of this method is to obtain a monolithic ground condition by installing those anchors vertically and horizontally at the launching portal . The anchor bolts were made from grass fiber which were easily removed by cutter head of the shield machine .

This paper explains the execution plan , monitoring plan and the result of the work , then considers applicability of the anchors as the protection measure for launching the shield machine .

Key words : shield , launching protection , vertical and horizontal anchors , analysis-based execution

1. はじめに

帝都高速度交通営団は、建設中の地下鉄7号線南麻布工区において、留置線を含む3線区間を掘削外径14.18mの世界最大級の抱き込み式親子泥水式シールド工法により施工した。麻布駅（仮称）からのシールド発進に際して、発進口の開放径は14.44mと過去最大級となった。発進防護工は、掘削対象地山の自立性が高いこと、施工場所が都心部であること、計測により地山の補強効果が確認できること、施工スペースに有利なことなどを考慮して、縫地工法を採用した。

縫地工法は山岳トンネルで施工実績があり、ボルトにより地山を一体化させて地山の補強を図る工法である。本工事では、ボルト軸力および周辺地山の挙動を計測し、事前予測解析結果と対比しながら慎重な施工管理を実施することにより、周辺に影響を与えることなくシールドを発進させることができた。

本稿は、情報化施工を通して得られた結果を基に、縫地工法のシールド発進防護工への適用性に関する考察について述べる。

2. 発進防護工の概要

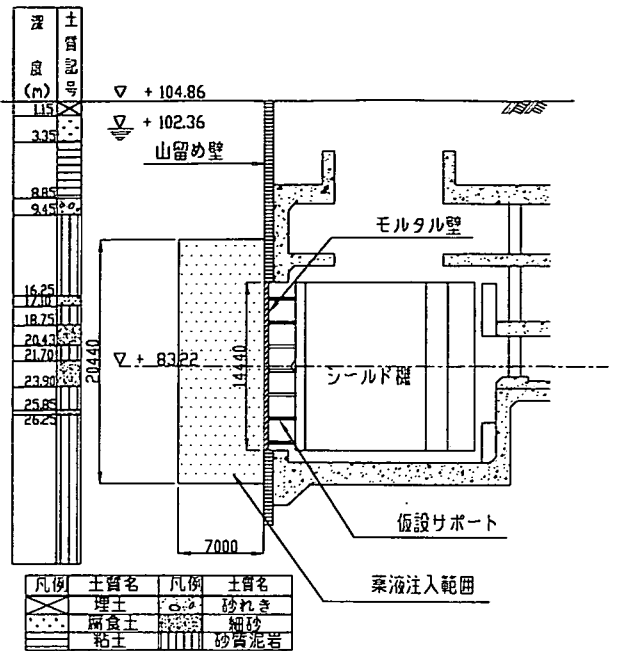
-
- | | |
|---------|--------------------------|
| 1) フェロー | 帝都高速度交通営団建設本部副部長 |
| 2) フェロー | 帝都高速度交通営団建設本部設計部次長 |
| 3) | 帝都高速度交通営団7号線白金工事事務所副所長 |
| 4) 正会員 | 佐藤工業㈱東京支店工事担当課長 |
| 5) | 佐藤工業㈱土木本部技術部門シールドグループ副課長 |

2. 1 土質および発進防護工の概要

本工事のシールド発進防護工の対象となる土質は、上総層泥岩（Ka-C）と上総層細砂（Ka-S）との互層である。上総層泥岩の一軸圧縮強度は $1,800 \sim 2,800 \text{ kN/m}^2$ であるが、部分的に細砂を挟んでいたりと、一部細かく亀裂が入っている複雑な性状の地層である。

上総層細砂は透水係数が $10^{-3} \sim 10^{-4} \text{ cm/sec}$ 、間隙水圧はシールド中心位置で 190 kN/m^2 となっている。

発進防護工は、低圧浸透注入による薬液注入（インナー工法）を行った。これは、上述したような上総層泥岩と細砂層を薬液注入により地盤改良し、止水と大断面切羽の自立を目的としたものである。インナー工法は立坑内の狭隘な施工条件でも水平施工が可能であり、手前から一定区間毎に薬液注入して、効果を確認しながら所定の範囲を改良する工法である。



2. 2 切羽面開放状況

改良効果を確認後、山留め壁（H鋼 芯材）を下方から順番に撤去した。撤去後は、肌落ち防止を目的としてモルタル壁（ $t = 45 \text{ cm}$ ）を打設し、養生後シールド機面板から仮設サポートを設置した。山留め壁撤去開始からシールド発進準備が終了するまで約 60 日間を要した。薬液注入範囲と山留め壁撤去終了時の状況は、図-1 の通りである。

図-1 シールド発進状況

シールド発進準備が完了し、仮設サポートを撤去しようとしたところ、モルタル壁にクラックが発生しており、一部変形している仮設サポートも見受けられた。このままの状態では仮設サポートを撤去することは困難と判断し、安全を期してシールドと切羽面の間を山砂で埋め戻し、新たな発進方法の検討を行った。

シールド発進準備が完了し、仮設サポートを撤去しようとしたところ、モルタル壁にクラックが発生しており、一部変形している仮設サポートも見受けられた。このままの状態では仮設サポートを撤去することは困難と判断し、安全を期してシールドと切羽面の間を山砂で埋め戻し、新たな発進方法の検討を行った。

2. 3 発進防護工の比較

シールド発進工法について以下の3案を比較検討した。各工法の概要は以下のとおりである（図-2 参照）。

① 案：縫地工法（垂直縫地ボルト＋水平縫地ボルト）

垂直、水平縫地ボルトにより地山を連結、一体化することで地山の安定を図り、切羽面を開放させるものである。

② 案：立坑増設埋戻し工法

既設立坑前面に新たに仮設立坑を増設し、増設した立坑土留壁までシールドを移動させる。増設した立坑を順次埋め戻しを行いながら山留め材の撤去を行う。

③案：隔壁増設埋戻し工法

シールド後方の仮セグメント部に隔壁を設置し、シールド上部まで埋戻しを行う。既設立坑の中床版を密閉して泥水圧に耐えられるように補強し、シールドを発進させるものである。

①案については、地山補強効果の確認方法やシールドによる縫地ボルトの切削性の問題、②案については、新設立坑施工時における道路上作業スペース確保と土留め壁芯材（約 30 ～ 40 m）引抜き施工の問題、

①縫地工法

②立坑増設埋戻工法

③隔壁増設埋戻工法

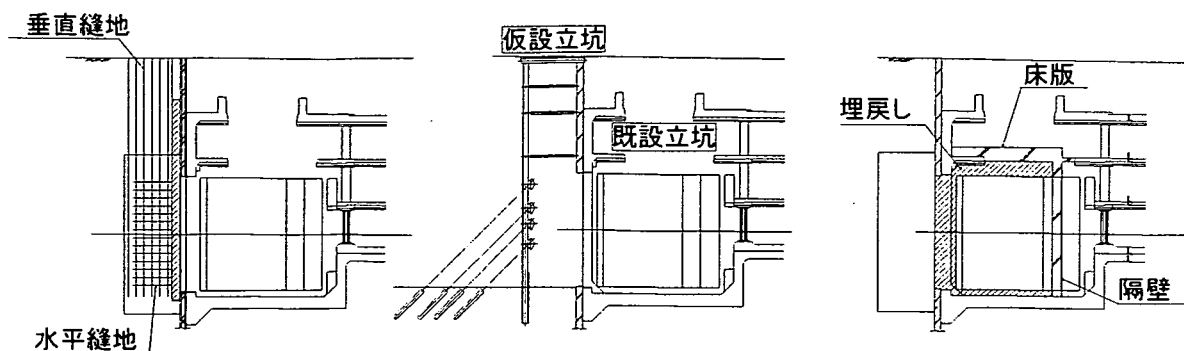


図-2 発進防護工比較図

③案については、仮設壁の止水性およびシールドや仮セグメントの浮き上がり防止に関する問題が考えられた。

比較検討の結果、計測により地山の補強効果が確認できること、切削可能な新素材ボルトを選定できること、施工スペースや工程面で有利なことから①案の縫地工法を選定した。

3. 発進防護工としての縫地工法の概要、課題と対策

3.1 工法概要

今回採用した発進防護工としての縫地工法は、シールド発進部の地山中に垂直および水平方向に新素材ボルトを設置し、発進口開放時の地山の安定を図るものである。垂直縫地ボルトは地上からボーリングで削孔して新素材ボルトを建て込み、モルタルを充填することにより設置した。水平縫地ボルトはシールド前面の埋め戻し土を上部より段階的に掘削し、水平削孔した孔中に新素材ボルトを挿入し、セメントミルクを充填することにより設置した。

3.2 縫地工法適用への課題

シールドの発進防護工として、縫地工法を適用する際の主な検討課題は以下の通りである。

1) シールド切削に対するボルトの適性

縫地ボルトは、従来、鋼棒が使用されてきたが、近年ではガラス繊維製等の新素材ボルトも多く使用されている。

本工事の場合、地山中にボルトを設置した状態でシールドを地山に貫入させるので、縫地ボルトをシールドカッターで切削することを想定しなければならない。新素材ボルトは、軽量で容易に切断できるという特徴を持つが、シールドの切削性やカッタービットで切削した場合のボルトの破砕状況等については不明である。ボルト切削片がビットにからみつくことによる余掘り量の増大、切削に伴うビットの破損、カッタートルクの増大等への検討が必要である。また、水平縫地ボルトの施工に当たっては、シールド面板と切羽地山までの距離が約 2.6m と狭いことを考慮する必要がある。

2) 縫地工法の設計手法

シールド発進防護工に対する縫地工法の適用は初めてのことであり設計方法は確立されていない。山岳トンネルの補助工法において垂直縫地工法の設計方法が示されているが、補強効果の定量的な解明がなされて

いないため、いまだ設計方法について確立されていないのが現状である。11山岳トンネルにおける垂直縫地工法の設計方法としては、次の方法が示されている。

- ① 過去の類似地山での実績を参考にする方法
- ② すべり面に対して鉄筋（ボルト）をせん断杭として評価する方法
- ③ 地山のせん断強度の改良効果をFEM解析により評価する方法

本工事においては、切羽面の変形状態、周辺への影響の重大性、今後の汎用性等を考慮して、これら3つの方法を参考に設計方法を十分検討して選定する必要がある。また、設計の妥当性を確認するため、地山挙動の定量的な把握が必要と考える。

3. 3 課題への対策

1) 縫地ボルト選定

実際のビットを用いたガラス繊維ボルトの切削試験結果を基に検討した結果、ガラス繊維の新素材ボルトはシールドカッターで切削可能であり、シールド掘進への影響は小さいとの判断が得られた。表-1 にボルトの仕様を示す。ボルトの形状は、『ふしの付いたタイプ』（異形棒鋼のタイプ）と『より線のタイプ』がある。モルタルとの付着を考慮すると『ふしの付いたタイプ』が有利である。本工事の場合、垂直縫地用は『ふしの付いたタイプ』を用い、水平縫地用は施工スペースの制約から、ボルト設置時に曲げやすい『より線のタイプ』のボルトを採用した。

2) 設計方法

今回の設計方法は、地盤条件の類似した都市NATMの実績を参考にして縫地ボルトの配置間隔を定め、次に縫地ボルトによる抑止力を考慮した円弧すべり面法により切羽の安定性照査を行うこととした。

また、地山の挙動を定量的に把握するため、切羽面の水平変位および縫地ボルト軸力の計測管理を実施した。ガラス繊維ボルトの軸力計測は、図-3 のような起歪筒式軸力計^{2),3),4)}（直接ボルトにゲージを貼付けずにボルト軸力を測定する計器）を採用した。

表-1 縫地ボルト仕様

種 類	使用場所	外径 (外径)	引張強度	せん断強度	単位重量
FRP 棒(中空型) ガラス繊維+ ビニルエステル	垂直縫地	30.5 mm (14.0) mm	180 kN	40 kN	10 N/m
FRP より線(中空型) ガラス繊維	水平縫地	26.2 mm (12.0) mm	165 kN	15 kN	6.9 N/m

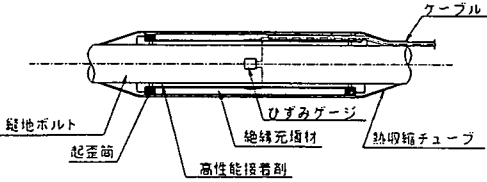


図-3 ボルト軸力測定器

3. 4 縫地ボルトの計画と配置

縫地ボルトの配置間隔は、対象地盤（洪積層の泥岩と細砂の互層）が都市部における縫地ボルトの施工実績に類似することや、モルタル壁のクラック状況から切羽付近の地山内にすべり面の形成が想定されることから、1 m 間隔に設置することを基本とした。

縫地ボルトの抑止力を考慮した切羽の安定性照査の手順を以下に示す。

- ① 円弧すべり面法を用いて補強前の切羽面をモデル化し、すべり安全率が1となる地盤物性値を逆算する。計算に用いたパラメーターは以下のとおりである。

固定値：単位体積重量=19 kN/m³、内部摩擦角=30°、すべり面
変動値：地盤の粘着力（計算結果=22 kN/m²）

なお、すべり面は事前に切羽周辺をモデル化したF E M解析を実施して設定した。

② 図－４に示すすべり土塊（重量：W）に対して、水平縫地ボルトの引張強度（P_{ha}）やせん断強度（P_{sa}）のすべり面方向に対する成分をすべり抑止力（P_r）と考えた。一方、垂直縫地ボルトは、許容引張力P_{va}をすべり抑止力と考え、複数のすべり面に対して計画安全率 F_s=1.2 を満足することを確認する。水平縫地ボルトのグラウト材は設計基準強度 42N/mm²を使用し、縫地ボルトとグラウトの許容付着応力度は1N/mm²と仮定して、すべり面より地山側に必要定着長が確保できるボルトについてのみ抑止力を考慮した。

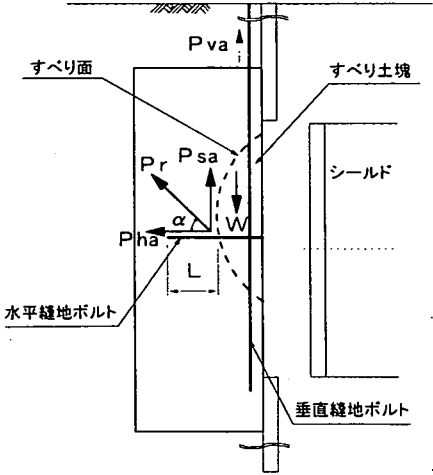
垂直・水平縫地ボルトの施工範囲としては、ボルト打設時の止水性確保のため注入外周から 2 m 以内とした。また、切羽面の肌落ち防止や水平縫地ボルト頭部の定着を目的としてモルタル杭を打設した。垂直・水平縫地ボルトの配置図を図－５に示す。

ボルト種別	評価式	すべり土塊中の評価
水平縫地ボルト	引抜き抵抗 $P_{rt}=P_{ha} \times \cos \alpha$ せん断抵抗 $P_{rs}=P_{sa} \times \sin \alpha$	土塊とボルトは定着
垂直縫地ボルト	吊り下げ抵抗 P_{va}	

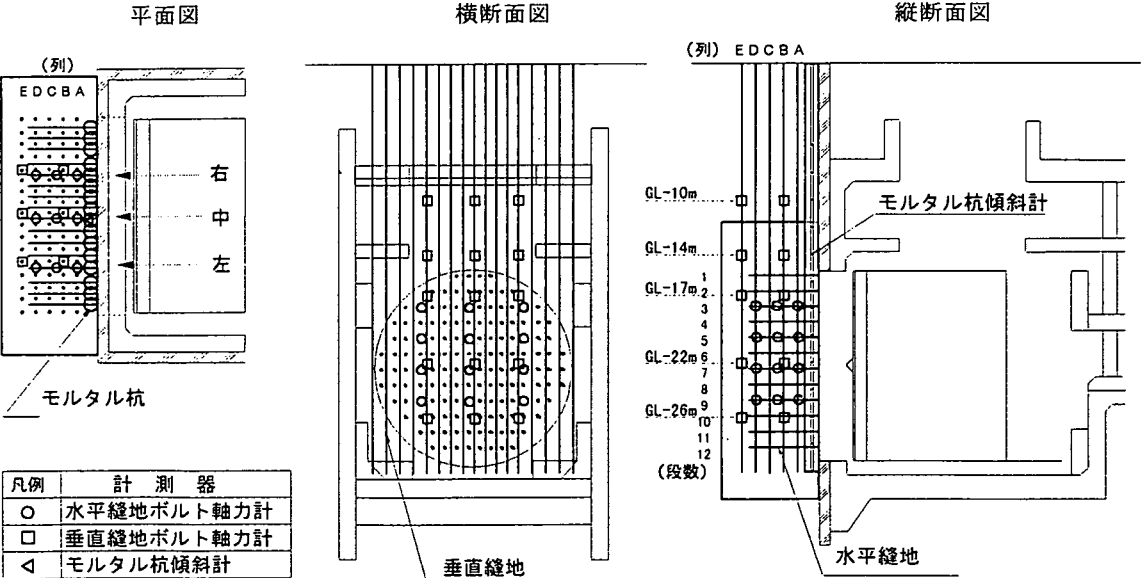
3. 5 計測管理計画

水平縫地ボルトで切羽前面を補強しながら埋め戻し土を掘削する場合の切羽の変形量や縫地ボルトに生じる軸力について予測計算を行った。

計算モデルとしては、モルタル杭を開口部の上下端で単純支持された土留壁と仮定し、水平縫地ボルトはモルタル杭と定着されたグラウンドアンカーと考えて土留弾塑性計算モデルで表現した。作用土圧としては、想定すべり領域内の土塊だけによる土圧を載荷し、掘削・縫地ボルト施工の全 13 ステップをモデル化して計算した。なお、地下水については止水注入が施されているため考慮しなかった。



図－４ ボルトの滑り抑止効果



図－５ 縫地ボルト配置計画

図－6は、最終掘削完了までのモルタル杭の変形状態を示したものであり、モルタル杭の最大変位量は 10mm と計算された。また、曲げモーメントから考慮すると、杭にはクラックが発生する可能性が高く、それに伴う変位増加が予想されたが、施工管理値は安全を考慮し 10 mm とした。水平縫地ボルトについては予測解析での最大軸力 12kN を、一方、垂直縫地ボルトについては許容引張力の 80kN を管理値とした（表－2）。

4. 計測結果

4. 1 モルタル杭の変位量

図－7 は掘削段階毎における傾斜計の計測結果によるモルタル杭の水平変位量の変化を示したものである。

4 次掘削終了時での最大変位は、開口部上端から 1.6 m 下（図－7 ☆）で 4.6mm となり、当初の土留弾塑性モデルによる予測計算の当該ステップ最大変位 1.3 mm に対して 3 倍以上の値が計測された。さらに、開口部上端から約 2.5 m 下でモルタル杭にクラックも見受けられた。予測を上回る変位量が計測され、このような状況下で施工を継続すると、モルタル杭の変位量が管理値を大きく越えることが想定された。

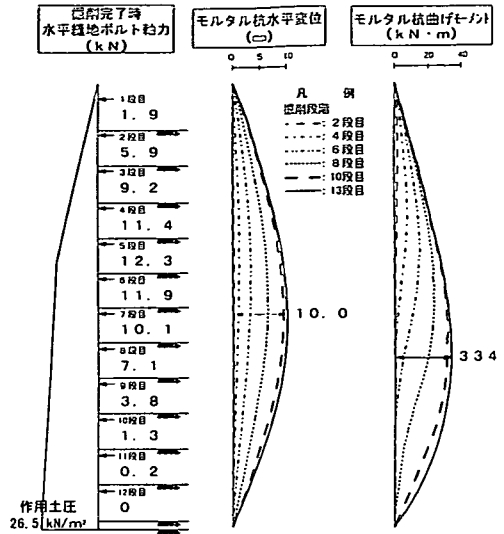
そこで 4 段目縫地ボルト施工時に安全を期するため、増し縫地ボルトを施工した。施工位置は、クラックの上下 0.5 m の高さに 2 m 間隔とし、ボルト施工本数は、計 10 本である。なお、増し縫地ボルトは水平縫地ボルトと同様の長さとした。その結果、6 次掘削以降、開口部上端から 1.6 m 下での水平変位はほとんど進行が止まり、増し縫地ボルトは有効に働いたと考えられる。

掘進が進行するとともに最大変位の発生位置は、下方に移動した。最終的には、開口部上端から約 3.6 m 下（図－7 ★）で最大変位 9 mm が発生し、当初の土留弾塑性モデルから予測した管理値の 10 mm に対してほぼ同程度で施工管理することができた。

4. 2 水平縫地ボルト軸力

3、5、7、9 段目の水平縫地ボルトについて、それぞれ切羽の左、中央、右の計 12 本の軸力計測用縫地ボルトを設置した。これらは、各々坑口から 1.5、3.0、4.5 m の位置に軸力計が取り付けられている。

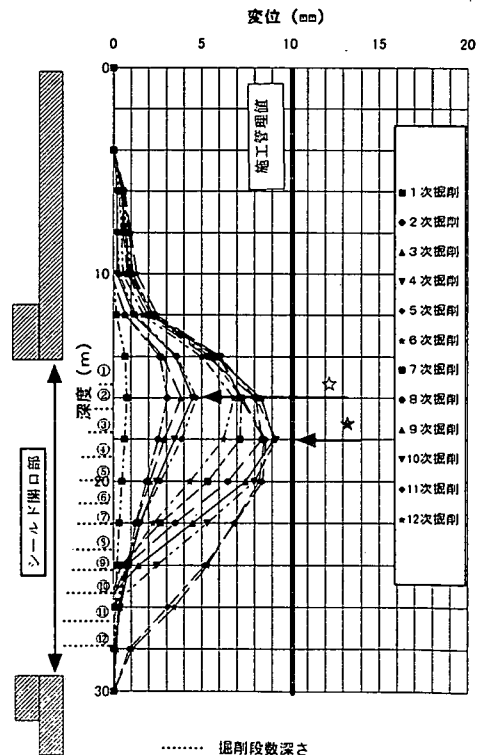
図－8は、切羽中央の水平縫地ボルト軸力（3、5、7、9 段目）についてシールド前面掘削との関係を表したグラフ



図－6 計測管理値予測計算結果

表－2 施工管理値一覧表

モルタル杭の水平変位		10 mm
縫地ボルト軸力	水平	12kN /本
	垂直	80kN /本



図－7 モルタル杭水平変位量測定結果

である。(3 段目の 1.5 m のボルト軸力は、7 次掘削以後計測不能となった。)

縫地ボルト軸力は掘削とともに増加し、引張力は最大で 7 段目の 6 kN であった。これは、ボルトの管理値 12 kN に対し 50 % と小さい値であった。また、5 段目以深のボルト軸力は、いずれも 11 次掘削で引張力は最大となっており、それ以後大きな変化はなかった。これは、11 次掘削終了時に、モルタル杭の変形が終了していることと一致する。

計測した軸力が小さいことから地山の挙動を推定すると、補強された地山中には、水平縫地ボルトに引張力を発生させるような土塊のすべり面の発生は無く、ボルトにより地山が一体化して挙動したものと思われる。

当初、細砂層において縫地効果が発揮されるか疑問視していた。縫地ボルトを打設した地層は、3 段目、5 段目、9 段目が泥岩層に、7 段目が細砂層であった。軸力計測結果によると 7 段目の引張力は他の段の引張力と同程度発生しており、縫地ボルトとして有効に働いたものと思われる。

次に、地山の水平方向の挙動をボルトのひずみから推定した。地山側のボルト先端部を不動点とし、4.5 m、3.0 m、1.5 m、の位置でのひずみ量を区間長で積分し、ボルトの水平方向の伸び量を算出した。図-9 は 5、7、9 段目のボルト伸び量とその位置でのモルタル杭のボルト設置後水平変位増加量をグラフにしたものである。(モルタル杭の変位量は、計測用ボルト位置の変位量に換算した。)

図-9 からモルタル杭の変位増加量とボルト伸び量がほぼ同じ値を示している。このことは、ボルトは地山に定着しており、地山の局部的なせん断すべりもなく、地山が一体化したためと思われる。また、ボルト先端はほぼ不動であったと考えられる。

4. 3 垂直縫地ボルト軸力

図-10 に示すとおり、垂直縫地ボルトの軸力はグラウト直後に 2 kN 程度増加するものがあるが、それ以後の変化は 2 kN ~ 3 kN 程度と小さく、圧縮力は最大で約 3 kN と小さいものであった。これより、設計時に期待した垂直縫地ボルトが吊り下げ効果として働くような地盤挙動はほとんど無かったと考えられる。

今回の垂直縫地ボルトは、発進口開放作業時のものであるため、縫地ボルト手前の地盤を掘削する際の補強と考えられる。このため、設置した垂直縫地ボルトは切羽の前面に柵を設置した形とみなすことができ、吊り下げ効果よりもむしろ地山の水平方向の変形を抑える抑止杭のような効果があったと考えている。

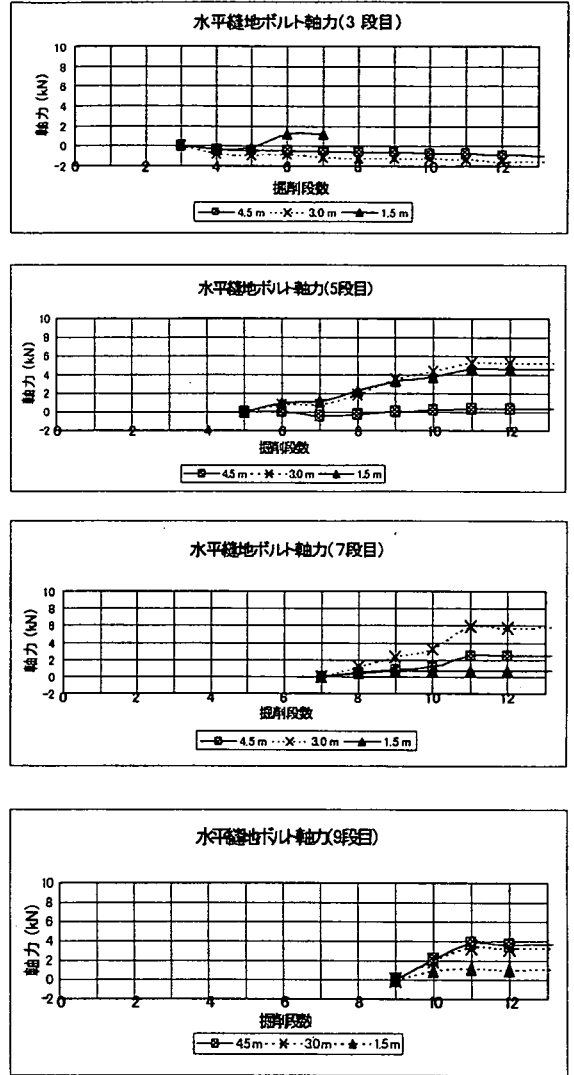


図-8 水平縫地ボルト軸力測定結果

5. まとめ

シールドの発進防護工における、垂直・水平縫地ボルトによる地山の補強効果を計測結果から述べてきた。得られた結論は次のとおりである。

(1) 縫地ボルトによる地山補強効果

縫地ボルト個々のすべり抑止機構は明確でないが、縫地ボルトの軸力計測結果によれば地山内に明確なすべり面の発生は認められず、互層地盤を一体化させる補強効果を確認することができた。掘削に伴って地山は立坑側にせり出す挙動を示し、水平縫地ボルトはこれに対して期待した引張り力で抵抗、垂直縫地ボルトは、抑止杭のような効果があったと考えられる。

(2) 縫地ボルトの設計方法

ボルトの配置間隔を類似実績から定め、そのボルト配置で補強した切羽の安定を円弧すべり面法を用いて確認した。施工および計測の結果、切羽面は自立したこと、各ボルトの軸力は小さいことから、地山は十分な安全性を有したと思われる。設計方法の評価・確立には、今後も事例を重ねることが必要と考える。

(3) 縫地ボルトの計測管理方法

計測管理項目は掘削段階毎のモルタル杭水平変位および縫地ボルト軸力とした。モルタル杭水平変位および水平縫地ボルト軸力の管理値の設定方法は、モルタル杭を土留め材、水平縫地ボルトをアンカー材としてモデル化した土留弾塑性計算の結果を用いた。施工中の早い時期に予測を上回るモルタル杭の水平変位が発生したが、適宜、増し縫地ボルトを施工するなどの施工管理の結果、最終的に水平変位を管理値以内に収めることができた。

シールドの発進防護工に今回初めて縫地ボルトを採用した。ボルトの素材選定から始まり、設計方法、計測管理方法まで、検討すべき課題に対して一通りの成果が得られたと判断している。本縫地工法は情報化施工が可能であること、および施工途中で追加補強が可能であることから、比較的自立性が高く、不連続あるいは部分的に緩んだ地山における大断面シールドの発進防護工として有力な工法になると考える。

参考文献

- 1) 山岳トンネルの補助工法、土木学会トンネルライブラリー第5号、1994年
- 2) 荻田、角屋、富田、川端：フェースボルト（長尺鏡ボルト）の効果確認試験（その1．試験概要と施工に関する評価）、第51回年次学術講演会、1997年9月
- 3) 松尾、中田、野村、福井：フェースボルト（長尺鏡ボルト）の効果確認試験（その2．計測の概要と全般的な軸力発生傾向について）、第51回年次学術講演会、1997年9月
- 4) 岡野、小原、後藤、大澤：フェースボルト（長尺鏡ボルト）の効果確認試験（その3．ボルト軸力分布について）、第51回年次学術講演会、1997年9月

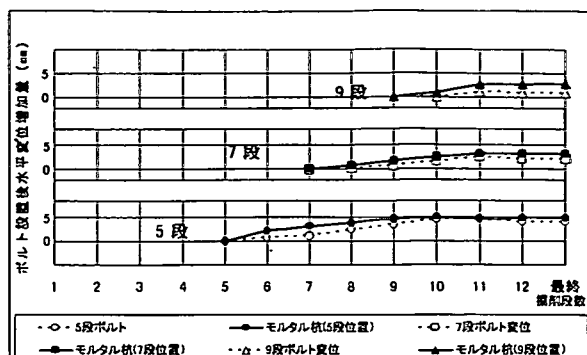


図-9 切羽面の水平変位量の比較

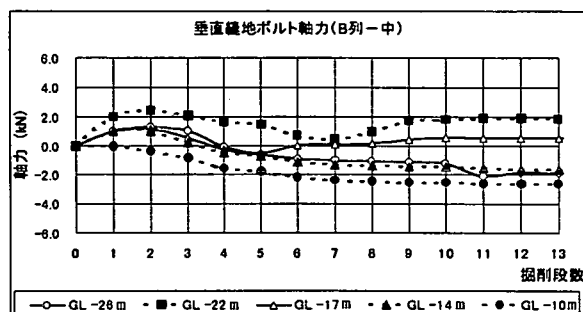


図-10 垂直縫地ボルト軸力測定結果