

リアルタイム位置計測システムを併用した 水平長尺コントロールボーリング工法の開発

Horizontal Long Control Boring Method and Real Time 3D Location
Measurement System

鈴木恒男¹・北原秀介²・笹尾春夫³・井ヶ田徳行⁴・佐藤知則⁵

Tsuneo Suzuki, Shusuke Kitahara, Haruo Sasao, Noriyuki Igeta and Tomonori Sato

¹正会員 (独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構 計画部 (〒231-8315 横浜市中区本町6-50-1)

E-mail:tsu.suzuki@jrtt.go.jp

²正会員 (独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構 設計技術室 (〒231-8315 横浜市中区本町6-50-1)

³フェロー会員 工博 鉄建建設株式会社 エンジニアリング本部 (〒101-8366 東京都千代田区三崎町2-5-3)

⁴住鉱コンサルタント株式会社 試錐部 (〒110-0008 東京都台東区池之端2-9-7)

⁵ケミカルグラウト株式会社 技術本部 (〒107-8309 東京都港区元赤坂1-6-4)

In recent tunneling projects, the alignment of tunnel is often given priority, resulting in construction in adverse topographical and geological conditions. If high-pressure water inflow is forecast, it is necessary to investigate the structure and characteristics of the aquifer in the planned alignment. So, boring survey should be done in advance, with drainage boring according to necessity. This paper reports the overview of the horizontal long boring and the control system in the railway tunnel.

Key Words : control boring, 3D location measurement, drainage

1. はじめに

トンネル施工では、掘削中の突発湧水による工事の中断等、不測の事態を避けるために、事前に水抜きボーリングを先行して実施することが重要である。しかし、多量の湧水を伴うような複雑な地質環境においては、ボーリング孔壁の崩壊等、技術上の問題があることや、ボーリング基地の設置位置に制約があるなど、既存技術のみでは効率的な水抜き工の施工が困難であることが多いのが現状である。

今回、多量の湧水のために切羽の安定性が損なわれる恐れのある山岳トンネルにおいて、トンネル掘削予定路線上の滞水状況をあらかじめ把握し、トンネル到達以前に合理的に水位低下を図ることを目的として、リアルタイム位置計測システムを併用した水平長尺コントロールボーリングシステムを開発した。当システムは、崩壊性の劣悪な地山条件下で孔壁保護対策を実施しながら掘進することが可能なケーシング追従型のボーリング技術と、ボーリング先端位置を三次元位置計測システムによりリアルタイ

ムに把握し、予定位置に向けてボーリング孔の方向を正確にコントロールすることができる方向制御技術の開発を目的とした。

2. 試験施工の概要

システムの試験施工は、山岳トンネルの1工区で行った。当工区の地質は、坑口部より約2,800mは第四紀の砂、砂礫、シルト、凝灰角礫岩の未固結堆積層であり、その後の約1,000mは新第三紀の固結度の低い泥岩、砂岩からなる地層である。これらの地層中をトンネル施工するに先立ち、あらかじめ地質状況を確認し、地下水位を低下させることが重要であると考えられた。そのため、今回、湧水を伴う未固結地山における水平長尺ボーリング工法の技術開発と、その適用の可能性を確認することを目的として工事を実施した。

トンネルは、起点側坑口より約2,300m付近で土被り約30m程度の沢部を通過する。トンネル切羽が

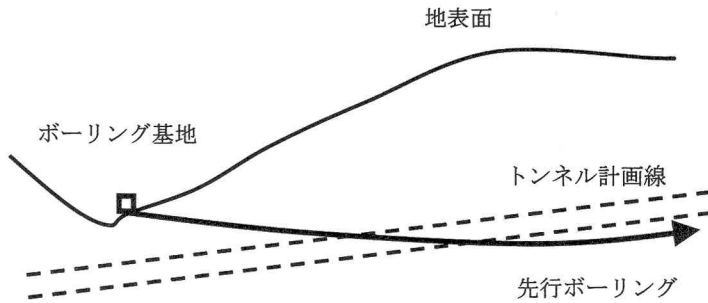
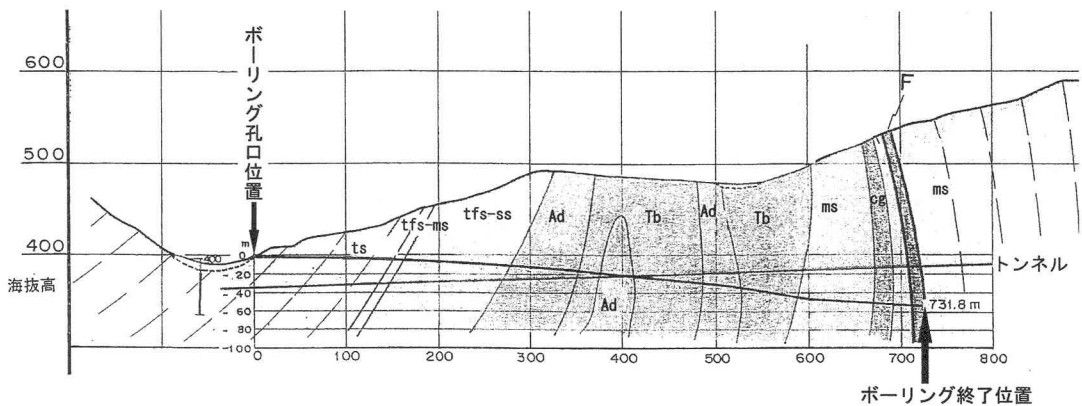


図-1 先行水抜きボーリングの概念図



- | | |
|-----------------------------------|--------------------------|
| ts : 崩壊性堆積物。安山岩質の基質中に火山岩の細・中礫が混じる | tfs-ms : 凝灰質泥岩 |
| tfs-ss : 凝灰質砂岩 | Ad : 安山岩質集塊岩 |
| ms : 砂質泥岩 (厚さ 10m 程度の玉石混じり層を挟在) | Tb : 凝灰角礫岩 |
| cg : 砂礫層 (未固結, 多量の崩壊物発生) | F : 崩壊層 (崩壊著しく, 多量の湧水あり) |

図-2 地質縦断面図

到達する以前に、この直上付近の地表にボーリング基地を設置し、ボーリング掘進方向をトンネル掘削方向へ向けて制御するものである(図-1)。ボーリング孔口部では下向きで掘削するが、トンネル計画線付近に到達した時点で方向を徐々に修正し、トンネル計画線と平行に近づく。この間、地質、湧水状況の調査の他、トンネル切羽の進行に先駆けた水抜き孔として活用することを目的としたものである。

(1) 地質概要

ボーリング孔の口元より約150mまでは土石流堆積物であり、一部に安山岩の巨礫を含む。150m以

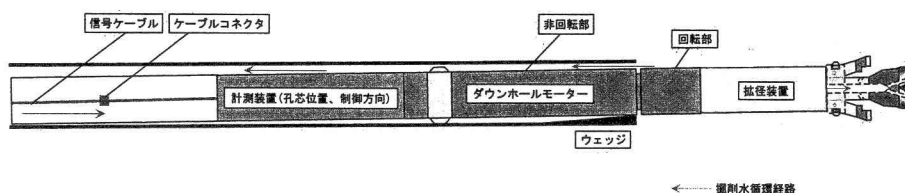
深は、砂岩、凝灰岩、凝灰角礫岩など、更新世に形成された固結度の低い地質が連続する。この区間では、安山岩の火山岩塊が含まれている。また、深度約600m以深では下盤側の地層に移行するが、固結度は低く軟質である(図-2)。

(2) 掘削工事概要

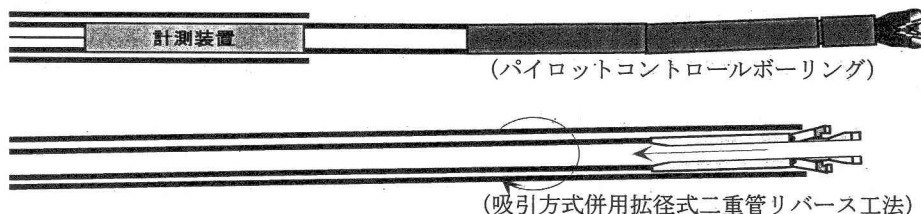
掘削の計画と実績を表-1に示す。各掘削段の施工概要は以下の通りであった。

a) 一段目掘削

二重管エアハンマー掘削を開始したが、口元法面へのエア噴出のため、深度8.3mから二重管のパイロット先行型に変更し、深度71.0mまで掘削した。



図－3 拡張式二重管追従掘削工法（当初の基本開発工法）



図－4 パイロットコントロールボーリングと吸引方式併用拡張式二重管リバース工法

表－1 掘削の計画と実績

段数	掘削径 ϕ (mm)	計画区間 (m)	実施区間 (m)	掘進 能率 (m/日)	工法等	計測	備考
一段目	282.0	0-70	0.0 - 71.0	—	内管パイロット掘削、 外管パイロット孔拡張	村田式	
二段目	230.3	70-300	71.0 - 89.0 89.0 - 277.6	— —	二重管掘削 拡張式二重管掘削	村田式＋特殊ジャイロ	
三段目	184.0	300-700	277.6 - 372.1 277.6 - 544.5	2.0 5.1	拡張式二重管掘削 パイロットコントロール掘削 ＋拡張式二重管リバース掘削 (口)	特殊ジャイロ リアルタイム計測(ジャイ ロ)	崩壊層、 掘削後埋戻し
四段目	146.0	700-1100	544.5 - 674.0 674.0 - 731.8	10.6 2.1	パイロットコントロール掘削 ＋拡張式二重管リバース掘削 (口)	リアルタイム計測(ジャイ ロ)	崩壊層、多量湧水

外管の外周はセメントにより固定した。

b) 二段目掘削

当初はエアハンマー掘削を行う計画であったが、一段目でのエアハンマー掘削におけるエア噴出を考慮し、エアハンマー掘削から流体を循環させる二重管掘削工法に変更した。掘削中、深度277.1m付近にて約700l/minの湧水が発生し、深度277.6mで一時的掘削を中断した。この中断期間中、外管の拘束（締付け）が徐々に進行して掘削が困難な状態となったことから、この深度で本区間の掘削を終了した。

c) 三段目掘削

ジャイロによる位置計測システムを組み込んだ拡張式二重管追従掘削工法（図－3）により掘削を開始した。しかし、崩壊の著しい地質のために掘削が難航し、深度372.1mで崩壊層突破が困難となり、掘削を一時中断した。

その後、三段目掘削孔の埋め戻しを実施し、1サイクル12m程度のダウンホールモーターによるパイロットコントロール掘削と拡張式二重管リバース掘削を組み合わせた工法（図－4）に変更して掘削を再開した。しかし、拡張式ビット部の脱落、外管ネジ部の弛み等の不具合があり、これに伴う外管抜管のために崩壊が進行し、崩壊物の排除が困難な状況となった。このため、深度367.1mで再度セメンチングを行い、掘削孔を埋め戻し、崩壊箇所を固定した。

拡張装置の補強、改良を行い、また、礫およびスライムの排除効率を向上させるため、拡張装置の内径拡大や吸引式リバース工法（後述）を採用することにより、再発進後は良好な礫、スライムの排除を行うことができた。

しかし、本区間は、ルーズな基質に硬質の礫を含

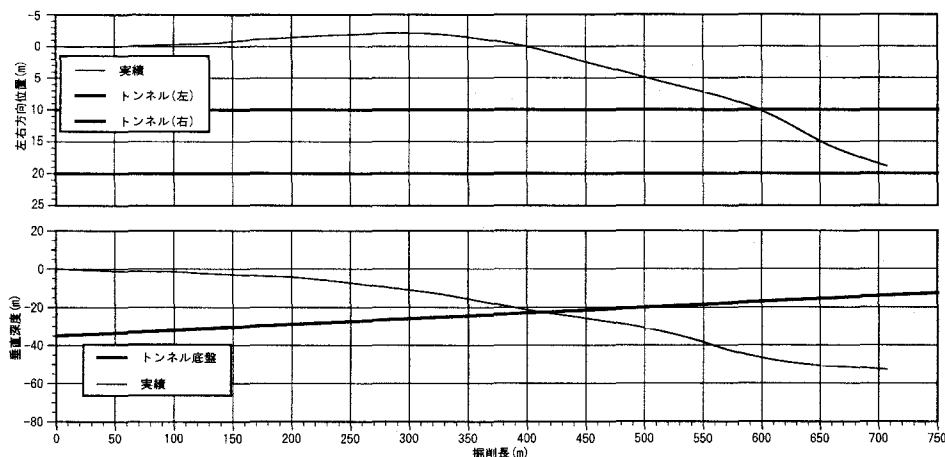


図-5 ボーリング軌跡の実績

む硬軟差の著しい地質状況であったことから、安定した掘削孔の形成がなされなかった。その孔芯軌跡が蛇行することにより掘削時の回転抵抗が増加する傾向にあり、深度544.5m掘削時において回転トルクがボーリングマシン能力とパイプの強度の限界に達したため、この深度で三段目掘削を終了した。

d) 四段目掘削

三段目と同様ダウンホールモーターによるパイロットコントロール掘削と拡張式二重管リバース工法で掘削を開始した。拡張装置は三段目掘削時に構造の改良を重ねたことにより、本区間においてはスライムおよび崩壊物等の排除の問題はなく、掘削は順調であった。しかしながら、深度724.8mで著しく規模の大きい崩壊層に遭遇した。崩壊層の状況と湧水量から現状の掘削技術では、この崩壊層を突破し、掘削を継続することは困難であると判断し、この深度において掘削工程の全てを終了した。なお、ボーリング軌跡の計画と実績の比較を図-5に示す。

3. ボーリングシステムの開発

従来、水平長尺ボーリングは膨張性地山や土砂地山における孔内崩壊や高圧湧水等により掘削が制限され、これらを解決するための技術的課題は多かった。また、垂直ボーリングと異なり、泥水を効率的に利用することが難しいことから、破碎帯等の脆弱層の突破には、ケーシングパイプの挿入が必然であった。さらに、深度が増すにつれて孔曲がりが大きくなり、掘削に支障をきたす場合が多かった。

今回の工事では、崩壊性地山における掘削工法の改良を重ね、拡張式二重管追従掘削、拡張式二重管リバース掘削およびパイロットコントロール掘削工法の開発を行い、今後の技術開発課題を提起した。今回開発した水平長尺ボーリングにおける掘削、コントロール技術の実績と課題をまとめて以下に示す。

(1) ボーリング工法

a) 拡張式二重管追従掘削工法

孔壁保護と孔芯制御を可能とするために新規開発した掘削システムである。既存技術をもとにして二重管掘削の内管先端部に拡張式ビットを装着し、さらにコントロールボーリングで多くの実績を有するダウンホールモーターを組み込んだ複合型の掘削システムである（前掲の図-3）。これは、所定深度まで掘削が終了した段階で、ビット、内管を引き揚げることで孔内にケーシングを残留設置する工法であり、ビットの軸回転力は水圧を利用したダウンホールモーターにより伝達するシステムである。

従来の二重管掘削では外管先端部のビットの交換は外管の抜管を伴うこと、先端部における内、外管の一体性の確保に難があったことから、本システムでは、内管先端部に外管掘削のための拡張式ビットを装着することにより内、外管の併進を可能にした。また、内管、外管の先端部に特殊キー加工を施すことで外管は内管の推力を伝達して、ボーリングマシンによる口元からの押し込み力に加えて、悪地質区間での外管の追従性の向上を図った。

しかし、ロッドは非回転方式であることから、崩壊物の排除が困難になる等の問題が生じ、掘削は難

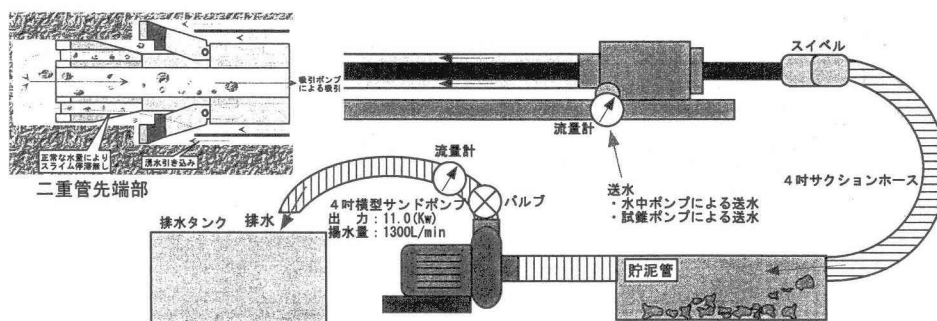


図-6 吸引ポンプによる拡張式二重管リバース工法

航した（三段目掘削）。現状では、この工法は崩壊を伴うルーズな地質には適合しないが、崩壊物の合理的な排出システムを開発することで、今後有効な工法に成り得ると考えられる。

b) 拡張式二重管リバース工法

拡張式二重管追従掘削工法で掘削が難航した崩壊層を突破するために、新規開発した掘削システムであり、既存の二重管リバース工法に拡張装置を融合させ、外管を残置してビット交換を可能にしたシステムである。三段目の再掘削から採用し、多くの改良を加え、礫を多く含む崩壊性の地質で良好な施工性が確認できた。

なお、本掘削工法では、外管も回転させるため、掘削時のジャイロによる位置検出と方向制御は困難であり、③のパイロットコントロール掘削と挿入計測の併用が必要であった（前掲の図-4）。

c) パイロットコントロール掘削工法

コントロールボーリングで多くの実績を有する工法で、ダウンホールモーターを用いてパイロット孔としてコントロール掘削を行った。方向は、ダウンホールモーターの角度調整機構により任意方向へ制御可能なものである。パイロット孔の拡張は上記②の拡張式二重管リバース工法を採用した。

コントロールの結果は、比較的自立性のある地質状況下では計画に沿った軌跡を描いたが、極めてルーズな地質状況下では、孔芯修正に必要な地盤反力が得られず、降下傾向を示し、良好な成果は得られなかった。

d) 内アップセットロッド

管体ネジ部に対し、中央部が肉薄となっているパイプで、曲がりに対して柔軟性があるとともに、重量が既存パイプと比較して30%程度軽減される。このため強制的な孔芯修正により生じる管体のねじ部

への抵抗が軽減され、本工事では四段目掘削で比較的良好な成果を挙げた。

e) 吸引式リバース循環

拡張式リバース工法掘削時に頻繁に生じた水圧上昇を解消するために用いた手法で、排水側からの吸引と低圧ポンプによる送水を同時に行うものであり、本工事で初めて実施した工法である。崩壊物による循環水経路の閉塞の兆候が生じて、送水圧力の異常上昇が無く、循環水の外管と孔壁間への逸流が生じにくくなる。また、吸引によりスムーズなスライムの運搬が行われた（図-6）。

(2) 位置計測システム

1,000m程度の長尺ボーリングを確実に施工するためには、ボーリング位置を常に把握しながら、方向を修正する必要がある。従来の挿入式計測器（村田式等）は、掘削後に位置測定を行う。したがって、施工精度を上げるためには頻繁に掘削を中断して位置計測を行わなくてはならない。今回、掘削機先端に計測器を搭載することで、リアルタイムに掘削位置を知ることができ、施工精度を向上することが可能となった。

システムの計測原理は、特殊ジャイロユニットの姿勢角と削孔機の挿入距離を検出して演算することで、ボーリング機構先端部の3次元座標を得るものである。ジャイロの計測情報は耐水性の特殊ケーブルで地上まで伝送され、リアルタイムに掘削位置を確認する。また、掘削後に計測ユニットを管内で移動させる（挿入計測）ことにより掘削したボーリング孔の軌跡を再確認できる。また、計測ユニットに搭載した特殊ジャイロ装置は、掘削中に一定時間ごとの補正演算を行うことで従来のジャイロにはない高精度計測を可能にしている。

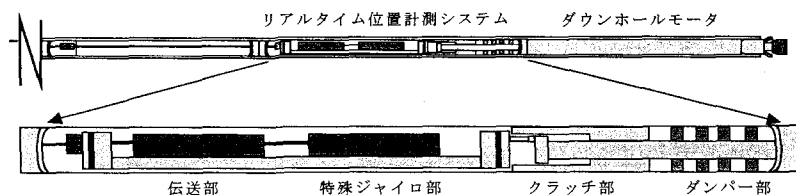


図-7 リアルタイム位置計測システム

今回開発した計測システムは、ダウンホールモーター後部にジャイロを組み込んだ計測ユニットを搭載するため（前掲の図-3）、①掘削振動による制御基盤の故障、②掘削振動による計測精度の低下、③掘削時のハンドトルクによるジャイロ部のローリングによる計測精度の低下、④高水圧下（ 10N/mm^2 ）でのデータ電送ケーブルの防水性、耐久性の低下、などの問題があった。

これらの問題を解決するため、以下のような開発を行った。

a) ダンパー機構とクラッチ機構をもつ計測器の収納ロッドの開発

ダンパー機構を設け、先端からの掘削振動を吸収し、後部に搭載されたジャイロ部への影響を極力軽減させる。また、クラッチ機構を設け、計測に影響を及ぼすローリングが発生した場合、通常は前方に押し付けられているクラッチを一旦開放し、ジャイロ部を正常な向きに修正した後に再び押し付けることで高精度計測を維持する（図-7）。

b) 高品質耐圧ケーブルの開発

循環水の流量を確保するため、ケーブルのジョイント外形を $\phi 40\text{mm}$ 以下とし、また、耐水圧 10N/mm^2 以上、伝送長 1580m で接触抵抗、線間抵抗合わせて 100Ω 以下の伝送ケーブルを開発した。

構などの技術開発が必要であると考えられる。

また、パイロットコントロールボーリングでは方向制御が可能であったが、二重管リバース工法ではロッドが回転するため、ジャイロによるリアルタイムでのコントロール掘削を実施することは不可能であった。今後はぜい弱な地質区間における掘削工法や孔芯の修正技術の開発が必要であり、この部門で先行している他分野も含め、広い視野に立って検討することが重要と考えている。

4. 評価と今後の技術課題

掘削工法の改良を重ねた結果、拡張式二重管リバース工法は、吸引式リバース循環と内アップセットロッドの導入により深度 $544.5\text{m} \sim 672\text{m}$ 間の4段目掘削では、掘削能率が前段と比較して約4倍に上昇し、礫を多く含む崩壊性の地質での掘削を可能とした。本工法で、今後の水平ボーリングの長尺化に十分貢献できるものと考えられる。しかし、今回掘削が困難であった著しい崩壊層で本工法を適用するためには、更に高度の崩壊抑制工法や崩壊物の排出機