

長大山岳トンネル施工を見据えた 長尺先進ボーリング技術の開発

山本 雄介^{1*}・二村 亨²・萩原 博之³・生森 敏⁴

¹正会員 東海旅客鉄道(株)東海道新幹線21世紀対策本部 (〒108-8204 東京都港区港南二丁目1番85号)

*E-mail:yuusuke.yamamoto@jr-central.co.jp

²非会員 東海旅客鉄道(株)東海道新幹線21世紀対策本部 (〒108-8204 東京都港区港南二丁目1番85号)

³非会員 国際航業(株)社会基盤事業部 (〒183-0057 東京都府中市晴見町二丁目24番1号)

⁴非会員 鉦研工業(株)工事営業本部 (〒171-8572 東京都豊島区高田二丁目17番22号)

大土かぶりでの長大トンネルの施工では、坑内からの水平ボーリングによる地質確認、水抜きボーリング等が重要であるが、ボーリングの性能としては高速掘進、正確な方向制御、大口径掘削が要求される。筆者らはこれらの要求を満たすボーリング工法の開発を試みた。工法はダウンホールモータを使用した方向制御機能を有するもので、大出力の専用マシンも新たに製作した。坑内で延長300mと900mの試験施工を行った結果、方向制御は±10m以内、平均掘進速度18m/d(連続掘進47m/d)と従来のボーリング機械を上回る性能を示すとともに、トンネル湧水への水抜き効果も確認した。さらに地質情報把握の一手段として、掘削機械データによる地山評価を試み、基本となる評価手法とその検証方針を設定した。掘進速度、方向制御、地山評価手法には課題が残るが、今後実績や検討を積み、改善・改良していきたい。

Key Words :downhole motor, direction control boring, high speed boring, drainage boring

1. はじめに

トンネル等を含む路線計画に際しては、空中写真撮影、地表踏査、物理探査、水文調査のほか、地質調査ボーリング等を実施して、計画地の地形・地質情報を得ることが施工リスクを軽減するうえで非常に重要である。とくにボーリング調査は地下深部の地山を直接確認できるため、もっとも信頼性の高い調査法といえる。しかし、山岳地域における土かぶりの大きな長大トンネルとなると、ボーリング調査は地形の急峻さや搬入路確保の難しさなどの立地条件や経済的、技術的制約から、容易に実施できないのが現状である。

そうした状況下、近年のトンネル施工では「切羽前方探査」と称して、トンネル切羽から水平ボーリングを実施して計画路線の地質確認が行われるようになった。しかし、現状では①トンネル施工速度を大幅に上回る速度での掘進が難しい、②計画路線に沿う形での掘進が難しく正確な切羽前方の地質確認ができない、などの問題があり、調査成果をトンネル施工に十分に反映しきれていないと思われる。

筆者らは、こうした「切羽前方探査」としての水平ボーリングでは、①高速掘進、②方向制御、③地質評価技

術を飛躍的に発展させる必要があると考え、これらを満足する新たなボーリング技術の開発を試みてきた。

その経緯についてはすでに二村他(2010)¹⁾で述べたとおりである。その後、延長900mの水平ボーリングを実施するとともに、地質評価の一手段となるボーリング機械データによる地山評価手法についても検討し、より実用性の高いボーリング技術と認識できるまでに至った。ここでは最近の開発経緯を含めて、その概要を報告する。

2. 技術開発の主目的

土かぶりの大きな長大山岳トンネルで、坑内から行う水平ボーリングをより確実なものにすることが重要である。よって、技術開発の目的は次の3点とした。

- ① トンネル施工の確実な長期見通しを得るために、切羽前方約1,000m程度の地質情報を先進ボーリングにより常に把握できること。
- ② 切羽前方の地質情報を正確に把握するため、トンネル計画線と一定の距離を保って掘削できるような方向制御すること。
- ③ 切羽の安定した掘削を可能ならしめるよう、切羽

前方の高圧・大量の湧水を事前にできるだけ抜い
 (水圧を低減させておいて) おくこと。

3. 長尺ボーリング技術の現状

我々が目標とする1,000m級のボーリングは、これまでワイヤライン工法またはシールドリバース工法が用いられてきている。筆者等のこれまで実施してきた長尺ボーリング(表-1)は、坑外からの実施であるが、いずれもこの2工法によっている。これらの実績を、掘進能率、孔曲がりの二つの観点から分析すると以下のようになる。

表-1 ボーリングの実績

	掘削方式	掘削機械	深度	実掘進時間	掘進速度
鉛直	1 普通工法	D2K	160m	576h	6.1m/d
	2 WL工法	TL-2000	470m	1547h	6.7m/d
	3 WL工法	TXL-3	836m	1954h	9.4m/d
水平	1 WL工法	GSR-100	1200m	4021h	6.6m/d
	2 WL工法	TL-2000	900m	3608h	5.5m/d
	3 WL工法	GSR-100	1025m	3488h	6.5m/d
	4 WL+SR工法	TOP-LS16	692m	2621h	5.8m/d

(注) ・掘削方式は WL(ワイヤライン)、SR(シールドリバース)。
 ・対象ボーリングは鉛直100m、水平500m以上とした。
 ・実掘削時間は、掘削作業の始～終日時の中で、トラブル対策も含めた時間を計上。掘進速度は22時間/日で換算。

(1) 掘進能率

表-1に示したボーリングについて、その掘進実績工程を鉛直と水平別に分けて示したのが図-1である。これらの図から次のことがいえる。

- ① 平均掘進速度は鉛直で7.4m/d、水平で6.1m/dである。極端な速度の違いはない。
- ② 掘進速度は掘進延長とともに低下する傾向があり、400～600m以浅では8.8m/d、それ以深では6.6m/dである。当然ながら掘進延長が増すほど掘進速度が落ちる。とくに水平3の900m以深では2.2m/dとなっている。
- ③ 水平1の800～900m、水平2の700～800m、水平3の780m以深は掘進速度の低下が著しい。破碎帯地質であり、コア詰まり、大量湧水等が頻発し

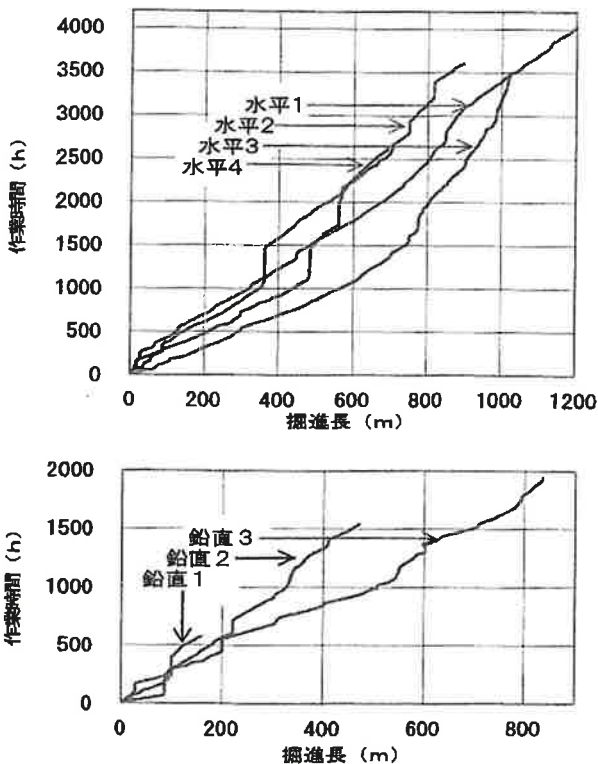


図-1 ボーリングの掘進実績工程¹⁾

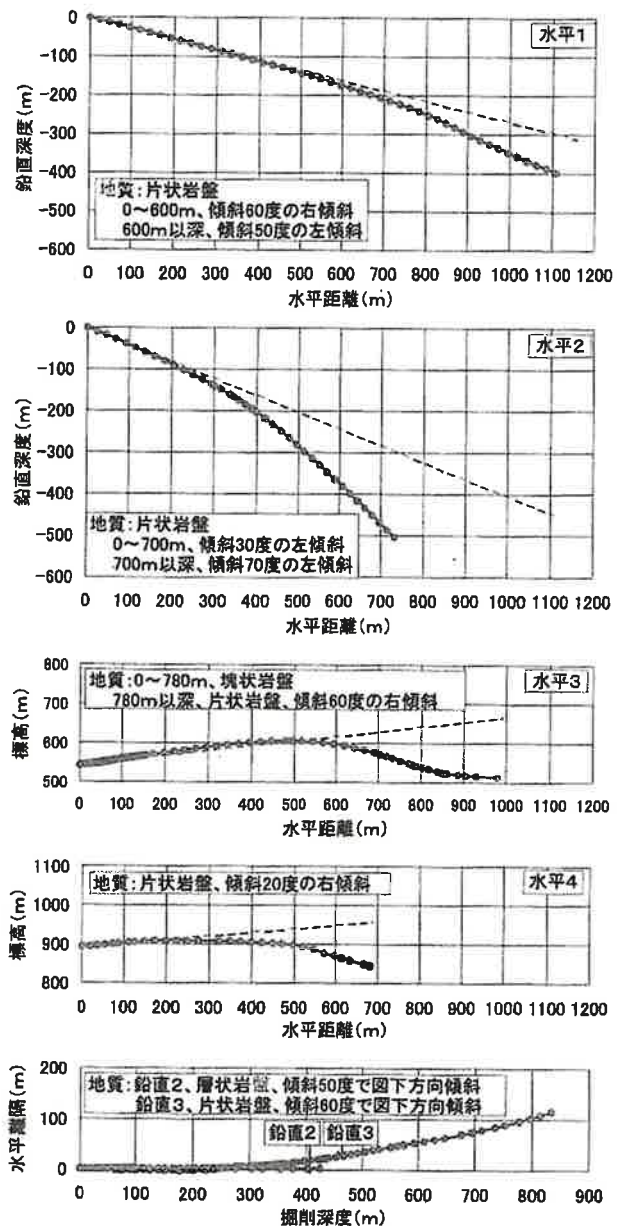


図-2 ボーリング孔の孔曲がり計測結果¹⁾

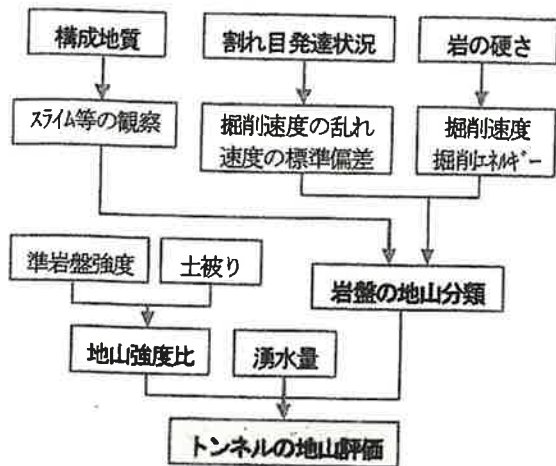


図-14 機械データによるトンネル地山評価手法概略手順

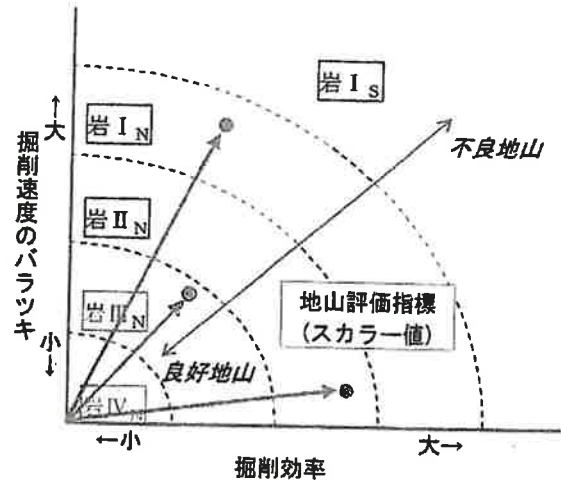


図-15 地山評価指標の概念図

評価のほか、上述のような方法で得た情報等を含め総合的に判断していくことになるが、本発表では、岩盤の地山分類の指標となる「岩の硬さ」と「割れ目発達状況」を掘削機械データにより評価することについて、その評価手法の考え方と検証方法を示す。

(2) 掘削機械データによる地山評価手法

a) 岩の硬さ

ここでいう岩の硬さは、岩石（岩片）の硬さだけでなく、破碎などによる岩盤全体の軟質化を含む。今回、ロッドを押し込む推力や回転トルク及び先端ビットの回転トルクにより地山に伝達するエネルギーを一定とした場合、軟らかい岩盤ほど掘削速度が上がる、すなわち掘削できる体積が大きくなる、という相関関係を想定し、岩の硬さを「掘削効率」という指標を設定して評価することとした。掘削効率は、単位時間当りに掘削した土量を掘削に費やしたエネルギーで除した値とした。

b) 割れ目の発達状況

掘削はトリコンビットで行っており、掘削原理としてはビット先端を岩盤に押し付けて回転させることによって、ビット先端のチップが岩盤に食い込んで割っていく形をとる。そのため割れ目などの分離面の多寡によって掘削速度にバラツキが生じることを想定し、割れ目の発達状況を掘削速度のバラツキという指標を設定して評価することとした。

c) 地山評価指標

地山分類は図-15に示すように掘削効率と掘削速度のバラツキの関係となるが、グラフ上の位置が原点から遠くなるほど不良地山であるといえる。よって原点からグラフ上の位置までのスカラー値によって地山の良否が評価できると考え、このスカラー値を地山評価指標とした。

d) 地山評価手法の検証方針

坑内300mボーリング実施区間については、その後ト

ンネル施工が完了している。現在、上述した地山評価手法を基本として解析を行い、トンネル施工実績とを比較し、その妥当性の検証を行っているところである。

検証においては、掘削ツールズ編成による取得データの差、ボーリング機械の操作条件による取得データの違い、掘進長に応じたエネルギー損失が掘削機械データに与える影響を考慮して行う必要がある。また、地山評価指標の設定は上述したものにこだわらず、様々な評価指標を設定し、検証を行っていくことで、確度の高い指標の模索をしていく必要がある。今後、様々な地質での機械データを取得し、検証に必要なデータ数を増やしていくとともに、上述のツールズやボーリング機械の操作条件などによる機械データの変化を踏まえ、評価手法を改善・改良していく。

7. ボーリングの水抜き効果

トンネル坑内で行う水平ボーリングは、切羽前方の地質を把握することだけでなく、前方の地下水を排除することも重要な目的となる。このボーリング工法では掘削孔径が最小φ121mmと、ほかの工法に比べて大きく、その分地下水排除の効果が大きくなる。

図-16は坑内300mボーリングにおける掘進時の孔口からの湧水量とトンネル切羽湧水量を比較したものである。ボーリングは切羽手前80m付近より掘削を開始し、掘削深度100m地点で切羽を追い越し、300m到達時点で切羽前方170mに到達した。こうした位置関係によりそれぞれの湧水量に次のような変化が見られる。

- ・ボーリング孔が切羽に追いつくまでの間は、坑内湧水量はほとんど発生していない（50～80m間）。
- ・ボーリング孔の80～200m間で累積的に湧水量が増加しているが、坑内ではボーリングが先行する100m

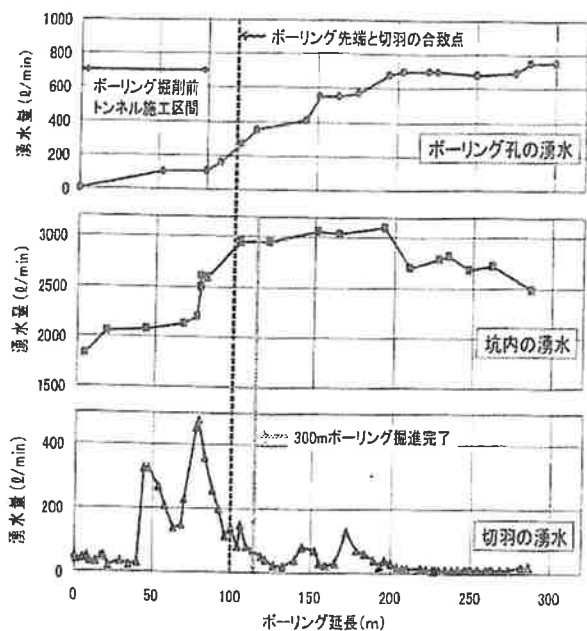


図-16 坑内300mボーリング湧水と坑内湧水の比較¹⁾

以降孔内湧水量が一定となっている。200m以降はむしろ減少している。

- ・切羽からの湧水は、ボーリング孔が先行しはじめて急激に減少している。
- ・切羽湧水が減少したとはいえ、150m付近、170m付近の湧水増加はボーリング孔での湧水増加区間とほぼ一致する。

以上のことは、このボーリング孔が切羽前方の水抜き孔として非常に有効であり、また切羽からの湧水の多寡を予測するうえでも重要なデータを取得できることを示唆するものである。掘削孔径が $\phi 120\text{mm}$ 以上と大きいこと、掘進速度が速いため切羽前方の地下水を長時間排除できることから、従来のボーリング工法以上に水抜き効果を発揮するものと考え

8. 結論

長大山岳トンネルの施工に必要な切羽前方の地質確認、水抜きボーリングを行うためには、高速掘進、正確な方向制御、大口径掘削等の性能が要求される。これらを満たす長尺先進ボーリング技術の開発を試み、ボーリングマシン製作、試験施工を行った。その結果、以下の結論を得た。

- ・長距離、大口径、方向制御掘進が可能なDD-330でのリードドリル工法を、地質調査を目的とした1,000mボーリングに適用した。その結果、平均掘進速度34m/d（連続最大183m/d）、方向制御 $\pm 5\text{m}$ 以内という良好な結果を得た。
- ・DD-330をトンネル坑内に入れて作業するには大きすぎるため、坑内専用の小型かつ高出力の機械（マシンとツール）を製作し、その性能試験を行った。
- ・掘削ツールの性能確認では、平均掘進速度42m/d（連続76.5m/d）となり、高速掘進の性能を実証した。
- ・新たに開発したボーリング機械での施工では、平均掘進速度18m/d（連続47m/d）、方向制御 $\pm 10\text{m}$ 以内の結果を得、若干の課題を残すものの高速掘進、方向制御掘進の性能を実証した。
- ・ボーリング機械データを解析して地山評価を行うために、評価指標として「掘削効率」「掘削速度のバラツキ」を設定した。今後は検証を重ね、手法の確度を高めていく。
- ・坑内水平ボーリングには切羽前方の地下水排除の目的もあるが、水抜きボーリングとして十分な機能を果たすことが確認できた。
- ・今回行ってきた一連のボーリング施工で、トンネル坑内先進ボーリングとしての機能を確認してきたが、方向制御や、掘進速度向上、孔壁崩壊トラブル対策など、今後取り組むべき課題を明確にした。施工実績を積み増し、さらなる改善を図っていきたい。

謝辞：本工法の開発は、国際航業(株)技術センター長の大島洋志氏の着想から始まったものである。「ボーリング技術は青函トンネル以来技術革新がない、土被りの大きな長大山岳トンネルの施工にはどうしてもボーリング技術の飛躍的な発展が必要」という氏の持論のもと、終始指導していただいた。また、現地を担当する関係各位においては、トンネル内における施工の問題点、改善方法について助言をいただいた。これらの方々に謝意を表します。

参考文献

- 1) 二村亨, 梅村哲男, 萩原博之, 生森敏: 先進ボーリング技術のブレークスルーを目指して—長尺・高速掘進・孔曲がり制御などの技術開発—, トンネルと地下, vol.41, No.8, pp.45-55, 2010.