

超長尺ボーリングを用いた地質・地下水情報の取得と周辺の水環境保全対策への活用

大成建設株式会社 関西支店 土木部 正会員 ○藤本 昭弘
大成建設株式会社 関西支店 土木部 正会員 小杉 勝之
大成建設株式会社 東京支店 土木部 正会員 加藤 宏征

1. はじめに

新名神高速道路（近畿自動車道名古屋神戸線）は、本線の半分以上がトンネル構造となっている。国定公園や自然公園等、自然環境を保全する上で重要な地域においては、トンネル構造とすることにより地形の改変を最小限に留める計画としたためである。

これにより、北摂地域の森林・渓谷が分布する山地部を通過し、既成の市街地や人家集落を避けることもできた。茨木市と箕面市の市境部に位置している箕面トンネル東工事は、当該区間で最長の4,997mを誇る箕面トンネル（図-1）のうち、東坑口側の2,501mをNATMで施工する道路トンネルである。東坑口より約1,000mの地点において土かぶり約18mで勝尾寺川と交差するが、勝尾寺川周辺は豊かな自然、豊かな水環境であり、周辺地域住民による水利用が盛んなためトンネル施工による水環境への影響を最小限に抑える必要があった。そこで高速道路では初めてとなる超長尺ボーリングを採用し、切羽前方の地質・地下水情報を取得すると共に、その結果を水環境保全対策に活用した。ここではそれについて述べる。



図-1 位置図

2. 箕面トンネル東工事の概要

(1) 全体概要

箕面トンネルは、茨木市佐保地区（東坑口）を起点とし、箕面市下止々呂美地区（西坑口）に至る上り線4,997m、下り線4,982mのトンネルで、そのうち箕面トンネル東工事は、東坑口から上り線2,480m、下り線2,501mであり、坑口の高盛土、橋台2基、橋脚2基を含む工事である。

(2) 地形概要

地形は主として標高250～550mの山地であり、主要河川沿いには狭い平地が分布している。主要河川は、東坑口盛土下方に佐保川、トンネルと交差する勝尾寺川がある。

(3) 地質概要

地質は基盤岩である古生代の超丹波帯、中生代の丹波帯である。丹波帯は東工事区間に広く分布しており、主として頁岩や頁岩主体の混在岩であるが、流紋岩や石英斑岩が貫入している。工区境付近より西側には超丹波帯が広く分布しており、砂岩・砂岩優勢頁岩・砂岩互層である。図-2に地質縦断図を示す。

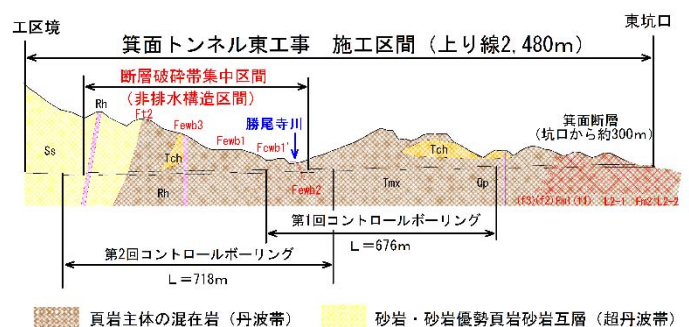


図-2 地質縦断図

キーワード：超長尺ボーリング，水環境保全対策，非排水構造，地下水情報化施工

連絡先 〒542-0081 大阪府大阪市中央区南船場 1-14-10 大成建設(株) 関西支店 土木部 TEL06-6265-4600

コントロールボーリングは、トンネル施工速度と比較して極めて速く掘進することが可能であり、早い段階でトンネル前遠方の湧水状況や地質状況を把握でき、対策工の検討に十分な時間の確保が可能となる。

(2) 工法概要

超長尺先進ボーリングは、方向制御可能なコントロールボーリングである。トリコンビットによるノンコアボーリングであり、ビット後方のダウンホールモータに高水圧をかけビットを回転させる（図-5に削孔ビット概要を示す）。



図-5 削孔ビット概要

ダウンホールモータの後方には孔曲り計測ユニットがあり、水平・傾斜角をリアルタイムで計測している。計測ユニットは非磁性パイプ内にあり、センサー部、通信部、バッテリー部で構成されている。削孔水はロッドと地山間を通り排水槽へ送られ、マッドスクリーンによりスライムが除去される。残りの排水は削孔水としてリサイクルする。図-6にコントロールボーリング概要を、図-7にボーリングマシン制御ユニット概要を示す。

(3) 坑内機材配置

東坑口から約 500mの地点に第1非常駐車帯があり、その拡幅部にボーリングマシンとプラント設備を配置した。図-8に坑内機材配置図を、写真-1に非常駐車帯部における施工状況を示す。

(4) 方向制御と曲線掘進

図-9に示すように、計画のボーリング掘進位置は、トンネル断面より右下に約5mの位置となる。この位置は、計測器が鉄製の支保工やロックボルトから影響を受けないよう離隔を取った位置である。掘削中は同位置から離れないようコントロールを行った。

また、トンネルと並行の縦断勾配（下向きに1.53度）、平面線形（R=2500m）で掘進を進めた。

方向制御を行う場合は、先端のトリコンビットとダウンホールモータとの間に装着されたベントサブと呼ばれる装置により0.93度ほどビットの方向が曲げてある（実績に基づく値であり1.5度まで対応が可能。図-6参照）。このベントサブの方向を曲げる方向にセットし、孔壁に支点をとり方向を変えていく。その結果、本来の線形に沿った掘進が可能であった。

(5) 掘進実績

計画時の総作業日数は65日、平均削孔速度は40m/日であった。実施総作業日数は75日で、ボーリングマシン据え付け、資機材搬入、プラント設置で12日、掘進期間は51日、ケーシング抜管と仮設撤去で12日であった。ただし、口元から200mまでの間は亀裂が発達し極めて脆弱であり、掘進時にジャーミング（ロッド拘束）が頻発し孔壁崩壊対策としてセメンテーションを繰り返し行った時間を含んでいる。削孔径φ200mmの深度200mまでの地山脆弱区間では、孔壁崩壊対策（削孔ロッド引き抜き、セメンテーション、養生、リボーリング）、ビット交換1回を含めた平均掘進速度は16.7m/日（2方昼夜作業）であり、崩壊対策を除くと29.4m/日であった。また、深度200mから終点676mまでのφ120mm裸孔掘進区間では、平均掘進速度は27.9m/日（ビット交換1回を含む）であり、最大掘進速度は46.5m/日であった。

当初計画では、超長尺先進ボーリングの準備開始は、トンネル掘削がボーリング掘進開始位置より50m進んだ段階で行うものであったが、発破掘削における安全な離隔確保とベルトコンベアずり出し設備や換気台車との位置関係により、切羽が120m程度先行した段階でボーリング作業を開始することとした。ボーリング掘進完了時、切羽より160m先行しており、これを期間に直すと2ヶ月程度となる。

この2ヶ月でWTの起終点位置の検証を行った。

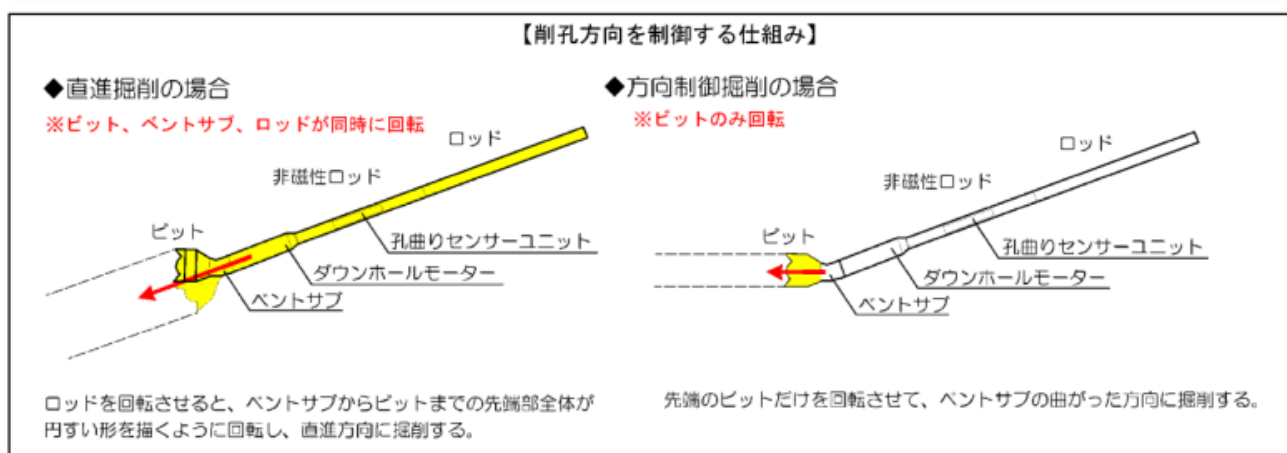
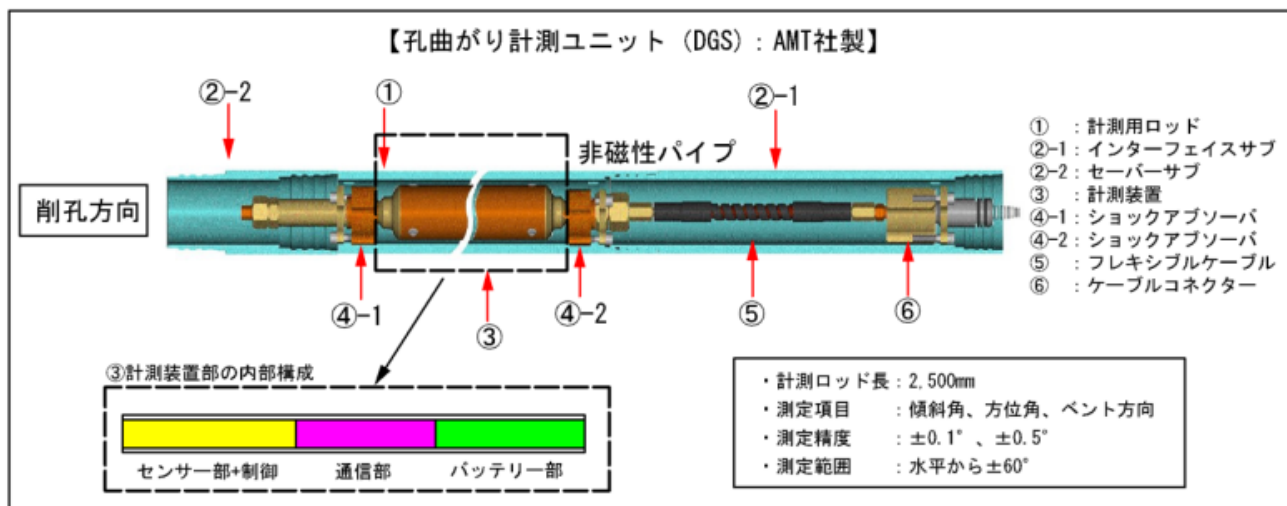
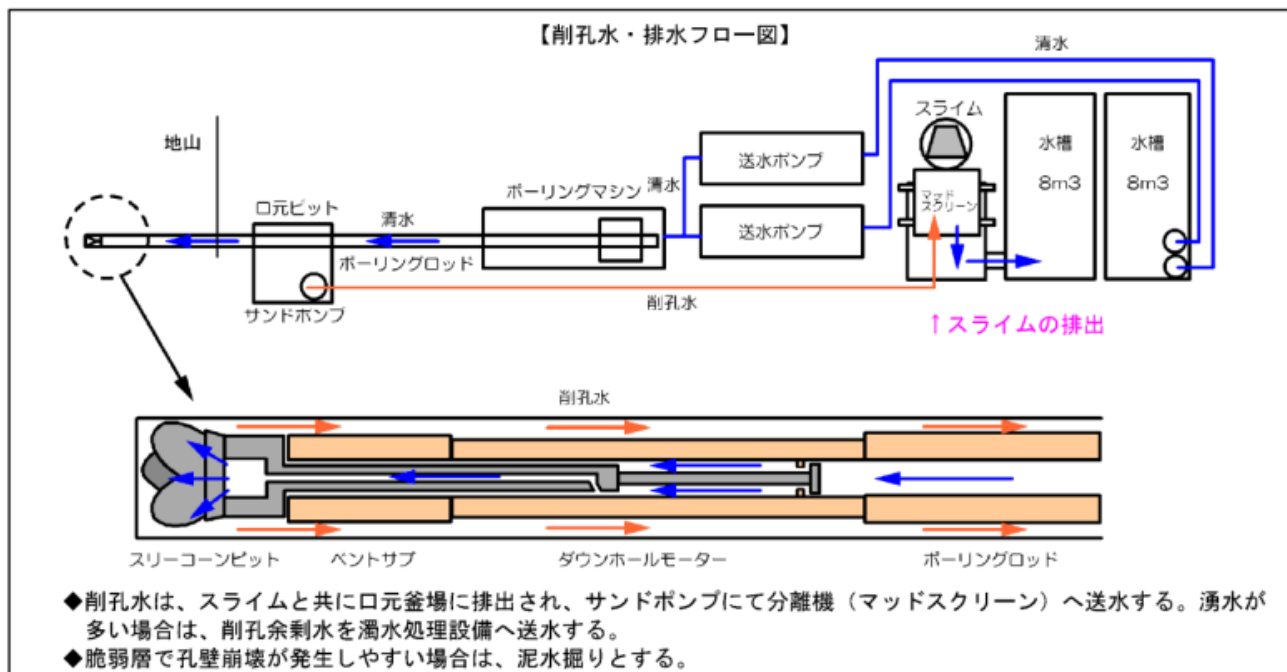


図-6 コントロールボーリング概要

【ボーリングマシン制御ユニットのコントロール盤】



【コントロールパネル画面例】

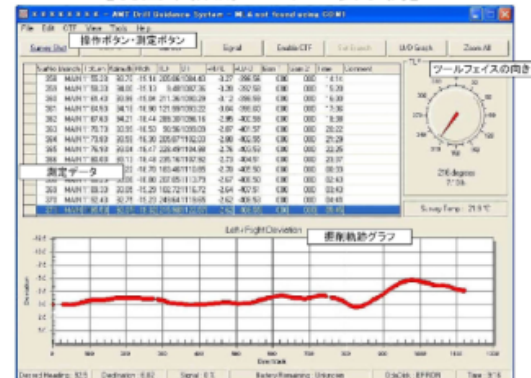


◆ボーリングデータ記録装置（BDR）により、時間、掘削深度、推進力（給進力）、ロッド回転数、ロッド回転トルク、送水量、送水圧力等のデータを、削孔長1.0cm毎に記録し、エクセル出力。

【孔曲り計測用パソコン】



【孔曲り計測モニター表示例】



◆傾斜角、方位角、ツールフェイスの向き等を表示（傾斜角、方位角は画面を切り替える）

図-7 ボーリングマシン制御ユニット概要

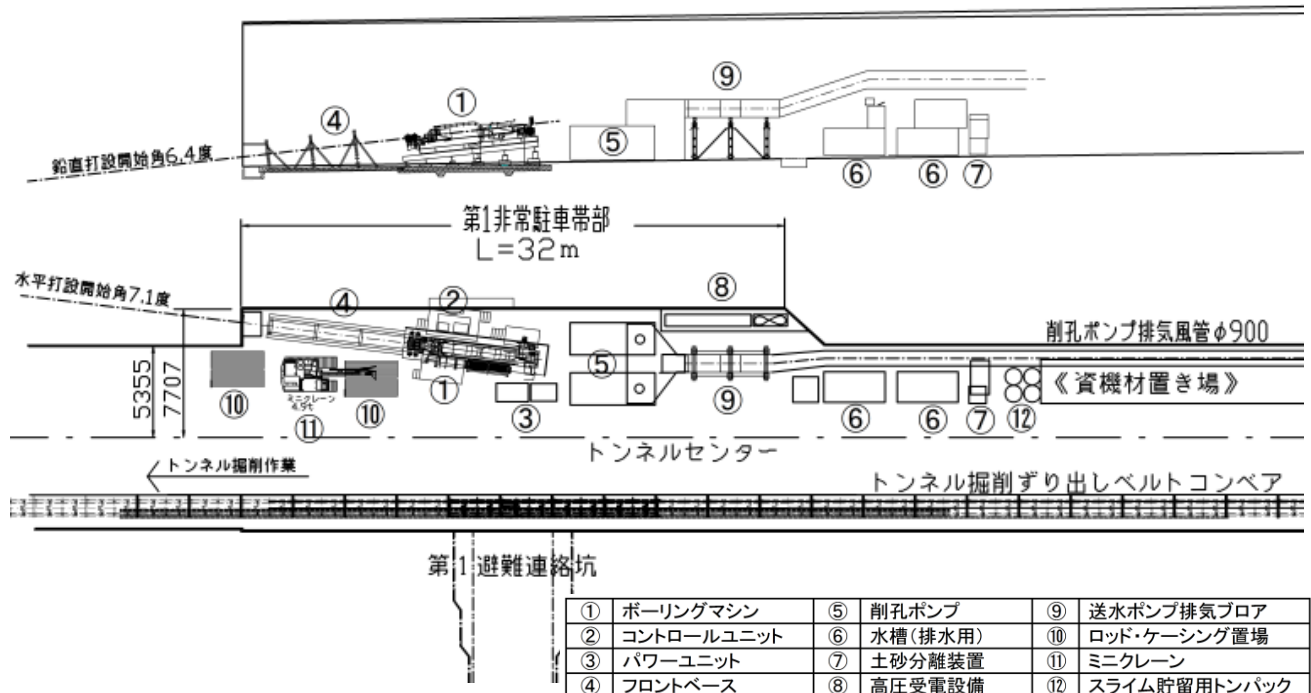


図-8 坑内機材配置図



写真-1 非常駐車帯部における施工状況

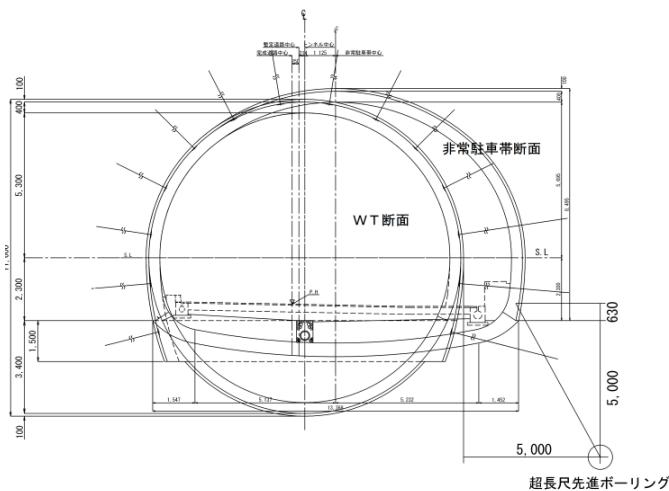


図-9 超長尺先進ボーリング位置図

5. 非排水構造区間の検証と修正

(1) 当初の非排水構造区間の設定

WT区間の起終点部はトンネル縦断方向の地下水流動を抑制する理由から、透水性の低い地山内に配置することが重要である。そこで、透水性の低い健岩内にWT区間の端部を1D(約12m)配置する。健岩部とは、透水係数 $k=2.7 \times 10^{-7} \text{m/sec}$ ($2.7 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$)以下の地山を示す。

また、複数想定される断層破碎帯を網羅するように区間を設定した。図-10に非排水構造区間の地質縦断面図、図-11に透水性の低い健岩部概念図を示す。

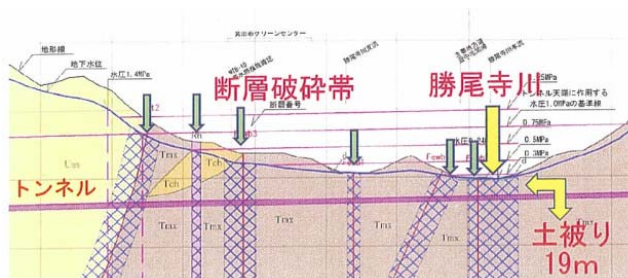


図-10 非排水構造区間の地質縦断面図

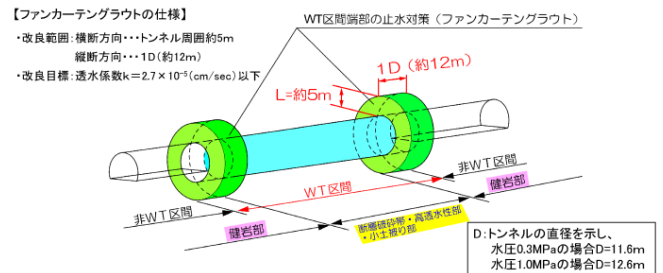


図-11 透水性の低い健岩部概念図

(2) 非排水構造区間の検証方法

① 観測井による覆工水圧の設定

WT区間に観測井を複数設置し、季節変動や降雨の影響を加味し実際の地下水位を観測し、覆工水圧の設定を実施。

② 超長尺先進ボーリングでの水理地質情報把握

区間湧水量、削孔地質分析、削孔エネルギー解析等から当初設定されたWT区間を検証し、修正する。

③ トンネル掘削時の検証方法

②で微修正したWT起終点に対し、切羽から100m級の長尺水平ボーリングを実施し、区間透水係数を確認。

④ 掘削切羽の地山状況

実際の掘削時の切羽観察記録により地山・湧水状況を確認し、必要であれば切羽側壁にて透水試験を実施する。

(3) 超長尺先進ボーリングの掘進データによる地山評価

超長尺先進ボーリング施工時における掘進データはボーリングマシンと高圧ポンプに設置されている各種センサーにより測定を行った。記録されるデータとしては、深度、送水圧、送水量、掘進速度、ロッド回転トルク、ロッド回転数、マシン推進力があり、深度1cmごとに自動記録される。

また、5mごとに削孔スライムを連続採取し、スライム分析により岩種、破碎帯の確認を行った。また、区間湧水量は5mごとに行った(増水時はその都度)。

WT区間の起終点を決める指標として以下の項目を設定した。

- ① 区間湧水量
- ② 地質状況
- ③ 削孔エネルギー係数

- ④ 水文モニタリングによる周辺水環境への影響
 ⑤ 透水係数 $k = 2.7 \times 10^{-7}$ (m/s) 以下の健岩に
 起終点を配置する

図-12 に非排水構造区間詳細検討フローを示す。
 各種削孔データより削孔エネルギー係数を算出し、
 地山評価を行った。削孔エネルギー係数は、マシン推
 進エネルギー、モータ回転エネルギー、ロッド回転エ
 ネルギーを用い、マシン推進力補正、ビット回転エネ
 ルギーの推力補正と送水圧補正を行い算出した。

ノンコアボーリングの地山評価では、削孔時に消
 費したエネルギーによる評価が主流である。
 超長尺先進ボーリングの施工時は、トンネル掘削作
 業も並行して行われている。今回、地山分類基準を設
 定するうえでは、トンネルの施工実績（切羽観察記録
 の切羽評価点）とボーリングによる削孔エネルギー
 係数とを比較した。図-13 に削孔エネルギー係数と地
 山分類との関係を示す。

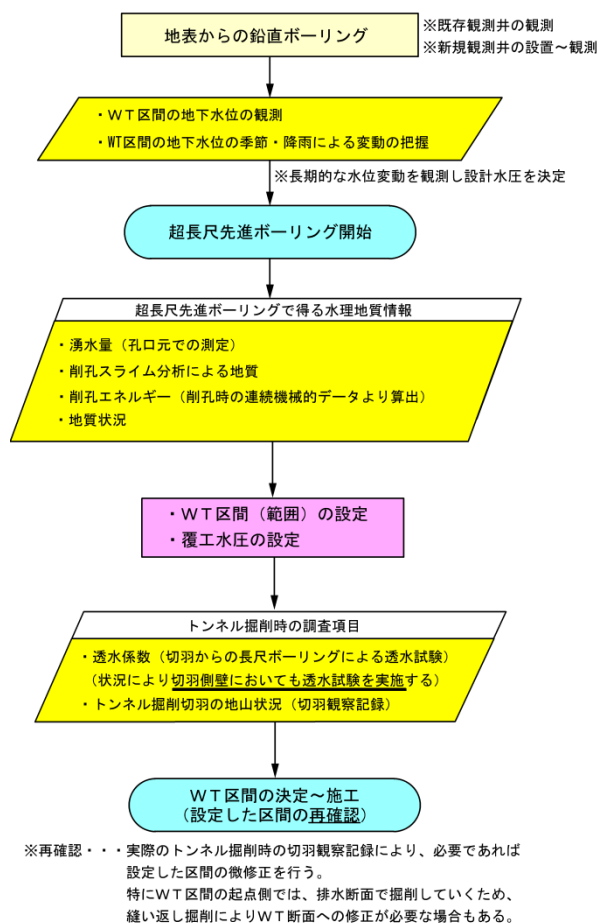


図-12 非排水構造区間詳細検討フロー

		3	20	130	850 (MN・m/m ³)
地山分類	D II	D I	C II	C I	B

図-13 削孔エネルギー係数と地山分類

(4) 超長尺ボーリングの水理地質情報

による非排水構造区間の修正

図-14 に得られた水理地質情報を示す。ボーリン
 グ時に区間湧水量が最も多かった 488m 付近までは
 C II が主体であり、C I が点在していた。また、488
 m 以深では C II が主体であるが、勝尾寺川交差部付
 近で D I が密集していた。区間湧水量は、深度 488
 m 付近（当初計画の非排水構造起点位置より約 50m
 東坑口側）で急激に増加し、削孔スライムの径は、
 それまで 1mm 程度の小さいものであったが、5mm を
 越える大きなものまで混入するようになった（亀裂
 が多いため）。また、同地点までは削孔エネルギー係
 数が $100 \text{ MN} \cdot \text{m}/\text{m}^3$ 程度あったものが、 $30 \text{ MN} \cdot$
 m/m^3 以下へ低下した。削孔水も青灰色から茶褐色
 に変わり、ジャーミングが繰り返し発生し、削孔水
 の逸水も見られた。また、勝尾寺川交差部付近にあ
 る 2 か所の地下水位観測地点で水位が低下し始めた。
 このように、明確な地下水環境への影響が確認され
 たため、影響の出していない深度 488m 地点に非排水
 構造区間の起点位置を修正した。（上下線とも東坑
 口側へ約 60m 移動）また、変更した WT 起点位置周
 辺の透水係数を調べたところ、同じ位置で健岩部と
 の境界を確認することができた。最終的には、切羽
 が修正した非排水構造区間の起点位置に到達した
 段階で、切羽湧水量、水文モニタリング結果、およ
 び切羽観察記録により最終確認を行ったところ、切
 羽周辺において湧水量が約 $200 \text{ L}/\text{min}$ 増加し、破碎
 部も確認されたため、非排水構造区間の起点位置の
 決定を行った。

6. おわりに

今回、道路トンネルでは前例のない超長尺先進ボ
 ーリング（コントロールボーリング）を採用したこ
 とにより、切羽前方の地質状況、湧水状況を早期に
 把握することができた。その結果、トンネル施工を
 安全・計画的に進める事が出来た。また、超長尺先
 進ボーリングによって事前に得られた水理地質情
 報を生かし、迅速かつ的確な水環境保全対策を実施
 する事が出来た。

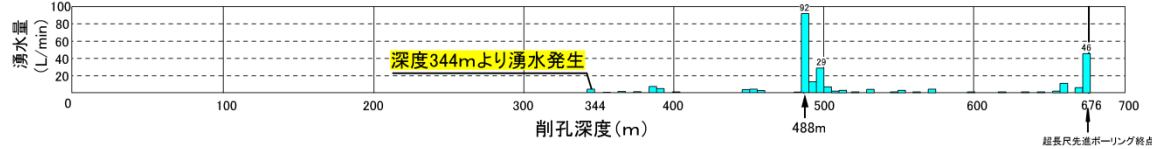
【超長尺先進ボーリングの水理地質情報・削孔データ解析結果】

■超長尺先進ボーリングによる水理地質情報や削孔データ解析等により、WT区間起点位置の仮設定を行う。

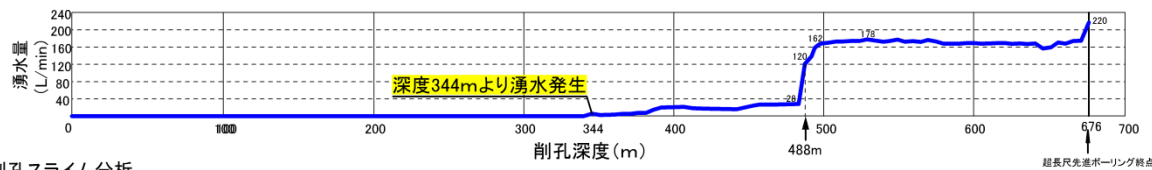
■超長尺先進ボーリングの区間湧水量・口元湧水量・削孔エネルギー係数・削孔時機械データ等から、総合的に判断すると、深度488m (TD1,004m:STA.224+83.7)から断層破碎帯と考えられる。この位置を上り線WT区間起点位置と仮設定する。

■上り線の長尺先進ボーリングの透水試験結果より、透水係数 $k=2.7 \times 10^{-7}$ (m/s)以下の健岩部は、超長尺先進ボーリングで仮設定した起点位置 (TD1,004m)より5m手前までとなる。しかし、湧水の発生により観測井へ影響を及ぼしたのがTD1,004m地点である。ことと、WT起点部の手前には1D (延長12m)ファンカーテングラウト部があり、この区間もWT構造となることから、**上り線のWT起点位置は、TD1,004m:STA.224+83.7**と考える。

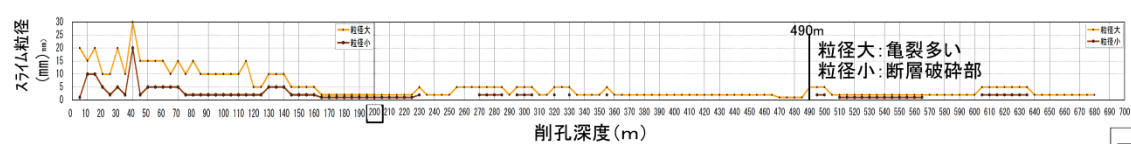
(1) 区間湧水量 (約5m間)



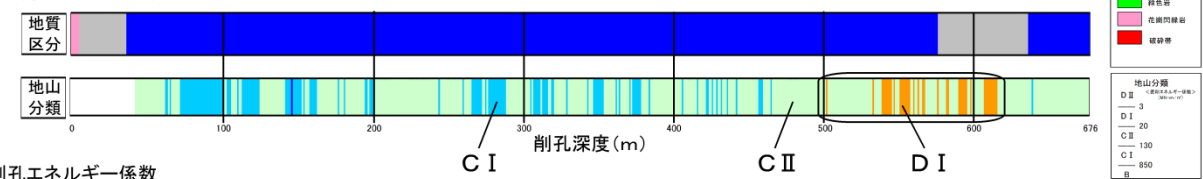
(2) 口元湧水量 (約5m毎に測定)



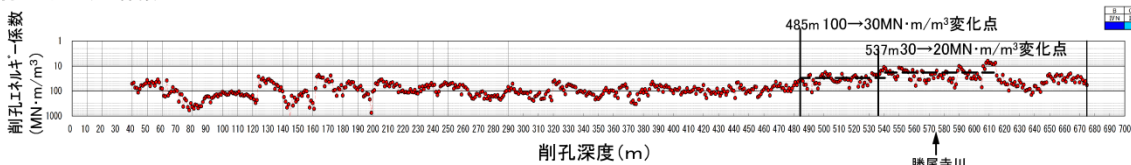
(3) 削孔スライム分析



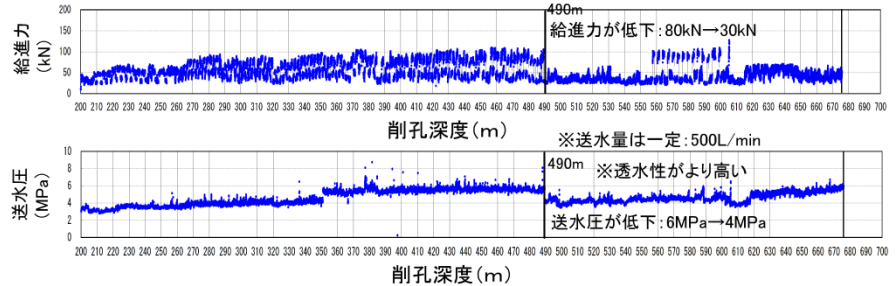
(4) 地質解析による地質区分と地山分類 (削孔エネルギー係数による)



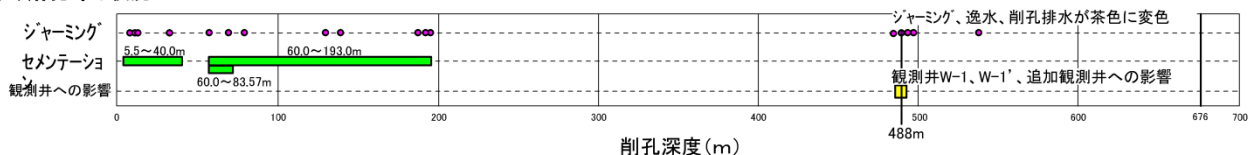
(5) 削孔エネルギー係数



(6) 削孔時の機械データ



(7) 削孔時の状況



(8) 透水試験結果

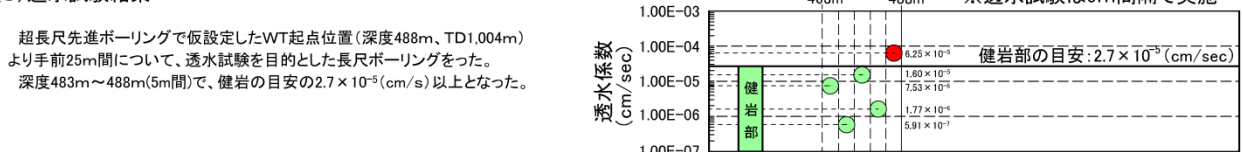


図-14 超長尺先進ボーリングの水理地質情報・削孔データ解析結果