

ボアホールカメラを用いた切羽前方探査 と超大断面トンネルの施工

山田浩幸¹・向井盛夫²・大内浩之²・村上孝男³・山本俊夫⁴

¹正会員 株式会社鴻池組 大阪本店 土木設計部 (〒541-0057 大阪市中央区北久宝寺町 3-6-1)

²正会員 日本道路公団 関西支社 大津工事事務所 (〒520-2153 大津市一里山 3-40-25)

³株式会社鴻池組 大阪本店 栗東トンネル東工事 (〒525-0072 草津市笠山 1-394-2)

⁴株式会社鴻池組 本社技術研究所 (〒305-0003 茨城県つくば市桜 1-20-1)

第二東名・名神高速道路では従来の2車線トンネルの2倍の掘削断面積(175 m²)を持つ3車線トンネル(偏平大断面)の建設が進められている。このような偏平大断面のトンネルを施工するにあたり、詳細な地質を把握し安全かつ効果的な施工を実現する目的でTBM導坑先進工法が採用されている。

栗東トンネル東工事は地形上の理由もあり上半先進工法による施工が実施され、本坑拡幅方式による集じん機坑(掘削断面積 252 m²)が採用されたため、補強対策等の設計検討を行うためにTBMにかわる前方地山の把握を実施する必要があった。本論文では、集じん機坑の設計検討にあたり実施したボアホールカメラによる切羽前方探査の概要とその効果に関して報告するものである。

キーワード：偏平大断面、前方探査、ボアホールカメラ、集じん機坑、交差部補強

1. はじめに

第二名神高速道路の栗東トンネルは片側3車線で掘削断面積が約180 m²、縦横比0.65程度の大断面トンネルとして計画され、現在NATMによる掘削を完了している。このような大規模の掘削に関しては地下発電所等の良好な岩盤での施工は見られるものの、道路トンネルのような線状構造物としては第二東名・名神高速道路が初めてであり、大断面トンネルの施工を合理的かつ安全に進めるため、TBM導坑先進拡幅工法や上半中壁分割工法が採用されている。

栗東トンネルにおいても西工事ではTBM導坑先進工法で施工が進められたが、東工事に関しては、坑口部の地形が急峻でありTBMの転回が困難であることから、上半先進工法が採用された。

さらに、掘削断面積が250 m²を超える集じん機坑および補機室や連絡坑との交差部の施工に関しては、TBMにかわる地質情報把握の必要性があったため、コアによる調査に加えてボアホールカメラを用いた切羽前方探査を行い、補強対策等の設計検討を実施した。

本論文は集じん機坑ならびに交差部の設計検討の目的で実施したボアホールカメラによる切羽前方探査の概要とその調査結果に基づく設計検討事例に関して報告するものである。

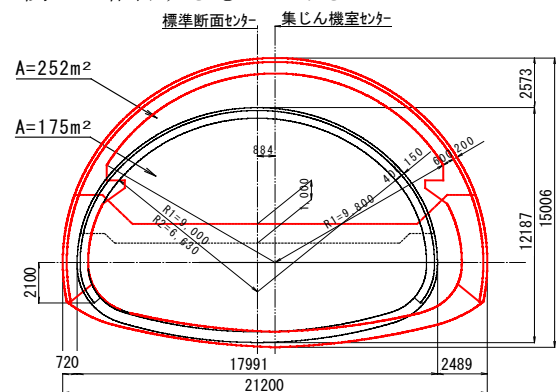


図-1 本坑、集じん機坑標準断面比較図

2. 対象工事の概要

(1) トンネル概要

栗東トンネルは第二名神高速道路の信楽IC～大津JCT間に位置する全長3.8kmの山岳トンネルである。トンネル掘削は作業横坑から東西に上下

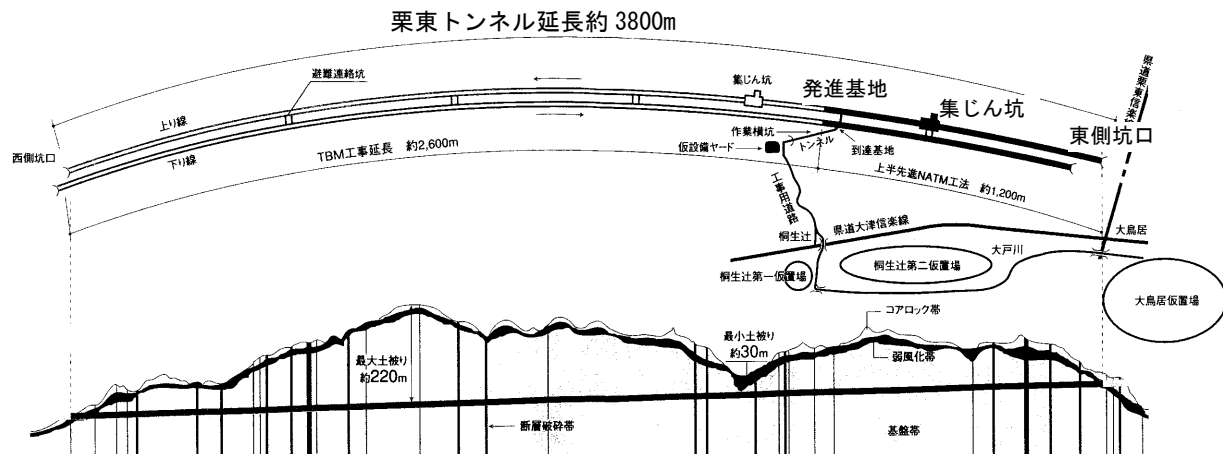


図-2 栗東トンネル概要図

ら東側の上下線約 1.0km を上半先進 NATM により施工している。

なお、第二東名・名神高速道路では、このような超大断面を NATM で掘削するために表-1 に示すように支保材料に高規格の材料が採用された。

(2) 地形・地質概要

栗東トンネルは、湖南アルプスと呼ばれる信楽山地の北西に位置する金勝山（標高約 567m）の南山麓域に位置している。周辺地山の表層土は流亡・侵食が多く、急斜面では裸地が発達しており、稜線上には数mもある風化残留核が岩塔状に露頭している。コアストーンは中生代白亜紀の田上花崗岩で、新鮮で硬質な粗粒黒雲母花崗岩で構成されている。地山弾性波速度は約 5.0km/sec、一軸圧縮強度は約 150N/mm²と非常に硬質な岩盤であるが、軟質な断層破砕帯周辺には、小断層、せん断帯が多く存在し、施工時に突発的な湧水を伴うものもあると予想されていた。

(3) 集じん機坑の概要

一般的に高速道路の長大トンネルの換気設備は本坑にループ状のバイパストンネルを掘削して、その中に設置する方式が主流であるが、本トンネルにおいては本坑を拡幅しトンネル頂部に換気設備を設置する計画がなされていた。（区間延長 L=73m）。

したがって、集じん機坑のトンネル掘削断面積は本線部の標準断面よりさらに大きな断面となり、第二東名・名神高速道路の中でも最大の超大断面（掘削断面積 252 m²）トンネルとなった。

表-1 第二東名・名神高速道路 高規格支保構造

工 種	従来の規格	新材料の規格	目 的
吹付けコンクリート	$\sigma_{280} = 18\text{N/mm}^2$ $\sigma_{10} = 5\text{N/mm}^2$	$\sigma_{280} = 36\text{N/mm}^2$ $\sigma_{10} = 10\text{N/mm}^2$ $\sigma_{3H} = 2\text{N/mm}^2$	・吹付けコンクリートを高強度化することで吹付け厚さを低減することが可能 ・初期発現強度を高く拘束力を高めることで支保効果の向上が図れる
	ブレンコンクリート	支保パターンにより鋼繊維補強コンクリートも使用	・吹付けコンクリートに靱性を持たせることで設計厚さを更に低減できる ・鋼アーチ支保工を省略できる
鋼アーチ支保工	SS400 降伏点強度 245N/mm ² 引張り強度 400N/mm ²	SS590 相当品 降伏点強度 440N/mm ² 引張り強度 590N/mm ²	・従来の H-200 支保工と同等の耐力（曲げ、軸力）を高規格鋼 H-154 で確保できることから、軽量化による経済性と施工性の良いこの材料で代替が可能
ロックボルト	耐力 12～18t	耐力 17t 高耐力 30～40t	・高耐力化で本数を少なくするパターンや、深部のゆるみと浅部の小崩落を対象とする2種類のロックボルトを組み合わせたパターンで経済性と施工性ならびに安定性を兼ね備えたものとなる
二次覆工コンクリート	$\sigma_{280} = 18\text{N/mm}^2$	$\sigma_{280} = 30\text{N/mm}^2$	・二次覆工コンクリートを高強度化することで設計厚さを低減することが可能
	ブレンコンクリート	SF などの混入	・鉄筋を鋼繊維補強などに変更することで経済的なものとなる

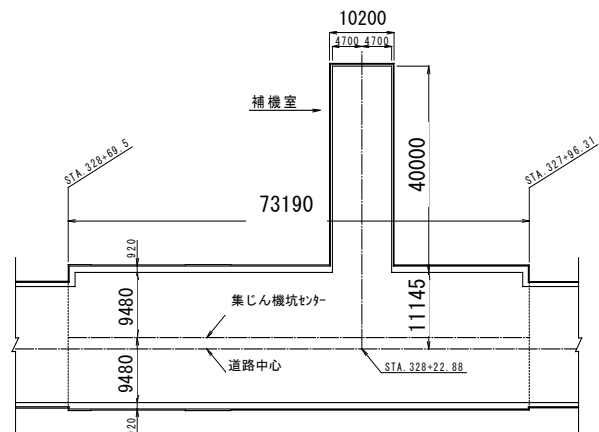


図-3 集じん機坑平面図（S.L.盤）

3. 地質調査の目的と概要

本トンネルの集じん機坑のような超大断面を掘削する際には、事前に前方地質状況を把握することにより的確な支保パターンの選定を行うことが施工時の安全確保のためには重要となる。

西工事ではTBM導坑先進で施工を行っているため、本坑掘削前に全線にわたり地質情報が得られ、そのデータに基づく拡幅工事を進める事ができた。

しかしながら、東工事では上半先進工法を採用しているため、事前の地質情報としては、弾性波速度等の地質調査のデータしかなく、詳細な地質情報を得る必要があった。そこで、掘削に先立ち追加地質調査を実施し、集じん機坑施工区間の地質構造の推定を試みた。

調査項目としては、集じん機坑の設計支保パターンや補強対策の必要性を判断することができるよう、以下に示す調査を実施した。

①オールコアによるボーリング調査

岩盤状況（節理、割れ目状況、風化変質の程度、岩盤区分、湧水状況）を把握する。

また、亀裂に介在する粘土成分の分析を粉末X線回折により実施し、膨脹性粘土鉱物の有無の確認と施工への影響の検討する。

②ボアホールカメラによる孔壁観察

不連続面の分布状況や湧水状況に関してボアホールカメラによる映像をデジタル化して、コアと対比する事で地質構造を推定する。

③湧水状況の確認

湧水量の確認や水質分析により湧水供給源の特定や施工時の影響について検討する。

特に標準部における前方探査手法の確立といった観点から通常のボーリング調査に加えてボアホールカメラによる地質状況の観察を行い、ボーリングコアとの対比や調査の妥当性の確認と適用性に関する検討を行った。

4. 調査結果の概要

既施工区間とコアによる調査結果を図-5 にまとめた。大きな破砕帯が3本存在しており、破砕帯周辺は多亀裂帯で変質が激しく、一部はマサ化

したり、節理表面には厚い粘土が付着した粘土混じりの岩盤となっているものと想定された。

特にボーリング調査時に突発湧水を伴った破砕帯F-③の出現する区間 STA.328+20 以降は非常に脆くなっていた。

一方、切羽に連続して分布すると考えられる大きな節理面（不連続面）が3本（J-①～J-③）想定された。一部の節理間には茶褐色から緑色の粘土を介在しており、部分的に油目が発達しているような状況で湧水がつけば滑りやすくなるものと想定された。

なお、粘土成分中には膨脹性粘土鉱物であるスメクタイトが多量に含有されていることを確認したが、粘土層は限定された狭い範囲であり、地山全体としては相対的に量が少ないため変状に至る程の含有量ではないものと判断された。

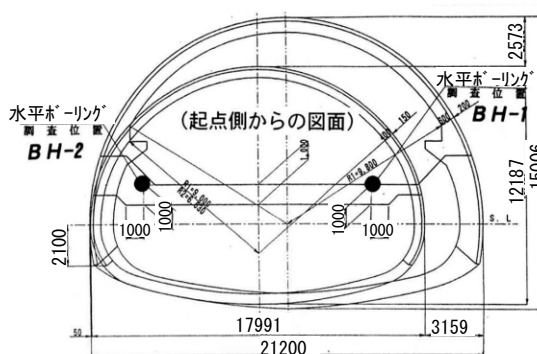


図-4 水平ボーリング調査位置図

トンネル湧水に関してはBH-2（延長L=73m）において深度 57.5m までは 10 ㍓/分の湧水であったが、その後水量が増大し深度 66m まで掘進したところ急激に水圧が上昇し、650 ㍓/分の湧水が認められたものの、その後は降雨に関わらず 80 ㍓/分の一定の値に落ち着いた。

水質分析の結果からもボーリング孔からの湧水は沢筋から直接流入しているのではなく、地表から浸透した雨水が、標高 600m あまりの竜王山の山体中に発達した花崗岩の節理間に賦存したものと考えられ、季節や降雨状況にさほど左右されずに恒常的な湧水量を示すものと判断された。

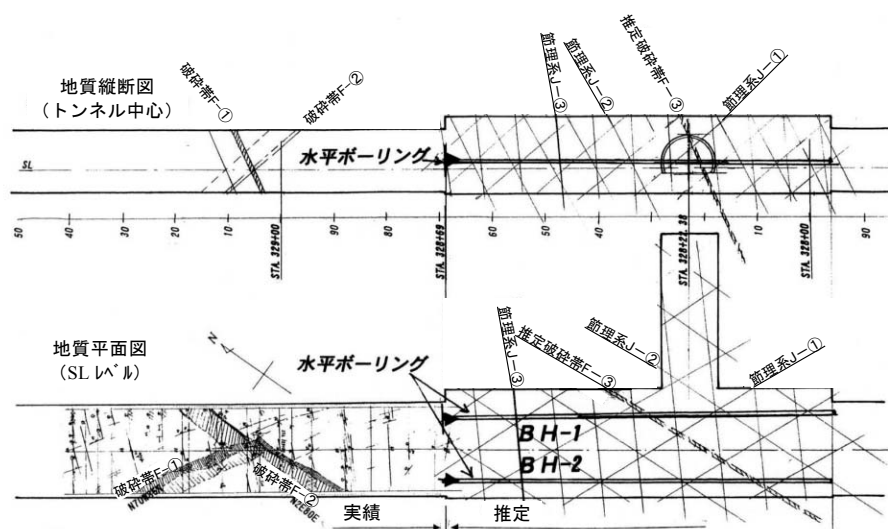


図-5 集塵機坑付近の地質状況の推定

5. ボアホールカメラによる前方探査

使用したボアホールカメラは写真-1 に示す管内観察や空洞調査に用いられているカメラ径48mmの曲げ押し可能な坑内観察用カメラである。

操作は簡単で障害物がない限り、カメラを孔内にケーブルで押しながら挿入していくものである。

当初、湧水が多いため撮影に対する支障が懸念されたが、若干水圧による抵抗があったものの、記録画像にはほとんど影響がなかった。

観察記録状況は写真-2 に示すとおりである。

コアボーリングの掘削延長は73mであるが、破碎帯では、カメラの挿入が多少困難となるもののケーブル最大長L=55mまで記録を実施できた。

測定時間は、準備、片づけ作業も含めて2箇所で計約1時間程度であった。

画像は8mmビデオに記録し、DVに編集し直して解析に用いた。この測定方法の短所として

①画像の上下位置が不明であること。

②画像に表示される深度がケーブルの送りから読み上げられるため若干誤差を生じること。

の2点が懸念されたが実際の調査では上下の関係は湧水の水面状況から判断でき、深度に関しては採取コアと比較したキャリブレーションを行うことで、ボーリングコアによる深度に修正することが可能となり、特に問題はなく作業することができた。

ボアホール画像による地質構造の推定にあたっては、孔壁画像とコアの状況を比較して、実際の不連続面の状態がどのような歪んだ画像に見えるのかを確認した。図-6に幅約1cmの介在物を挟んだ亀裂の比較の例を示す。

この画像を基準にこれより大きな亀裂すなわち亀裂幅1cm以上の不連続面を抽出してその面の状態や大まかな走向・傾斜を判読した。その結果を図-7に示す。

孔壁が乱されているものは破碎帯と表現し、1cm以下の亀裂は節理として細線で表現した。

なお、ボーリング延長線上に何も記載されていない区間は、節理もない（潜在亀裂は除く）硬い花崗岩が分布しているところである。

図-7より、BH-1孔では2つの破碎帯と3本の不連続面が判読され、BH-2では2つの破碎帯と4本の不連続面が抽出された。両者の位置関係を総合的に判断して、最終的に調査範囲では大きな破碎帯（F-①～F-③）が3帯、連続性のある不連続面（J-①～J-⑥）が6本想定された。

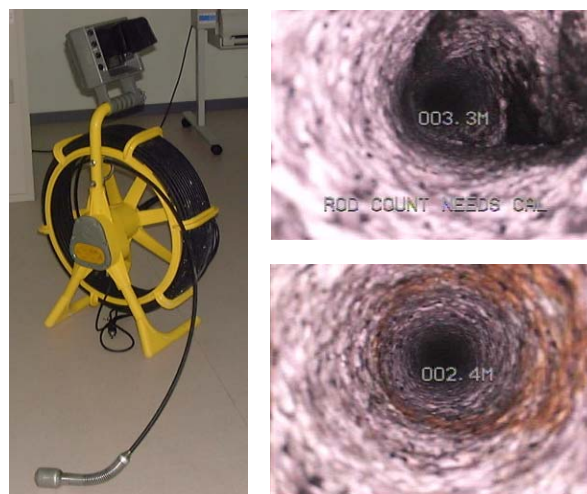


写真-1 ボアホールカメラと画像例



写真-2 切羽での観察状況

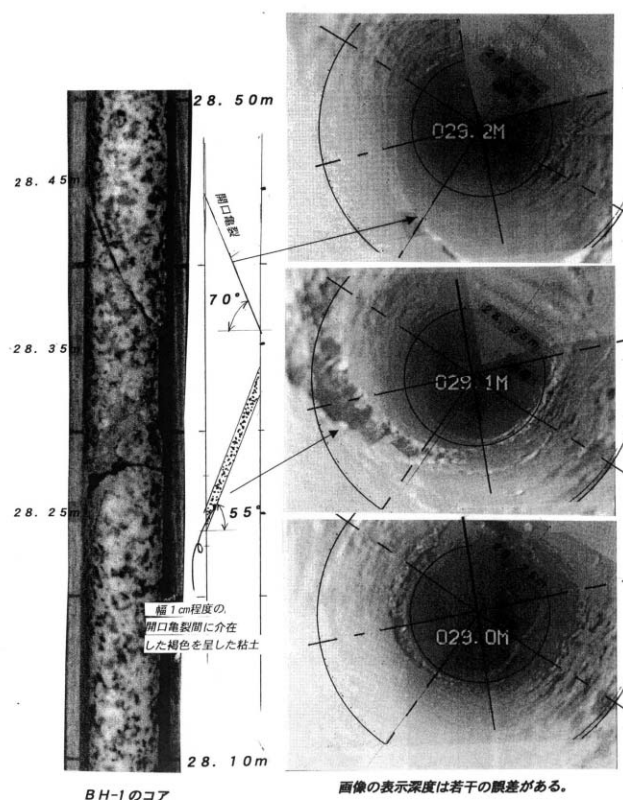


図-6 孔壁画像とボーリングコアの比較

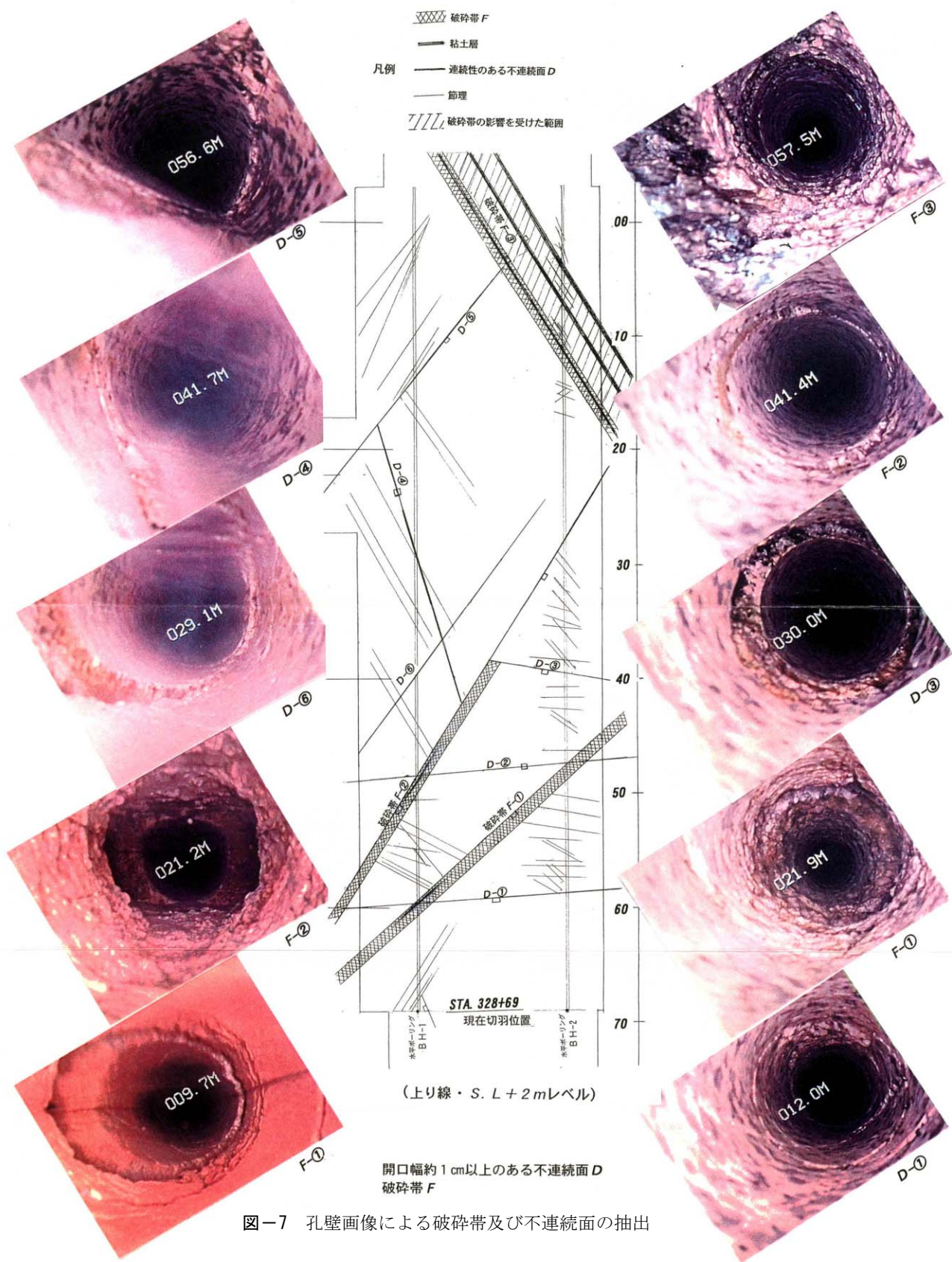


図-7 孔壁画像による破砕帯及び不連続面の抽出

6. 集じん機坑の施工と前方探査の効果

集じん機坑の掘削にあたっては、このような超大断面において一旦地山のゆるみを大きく許した場合、その対策工が非常に大規模なものとなり、本坑（標準部）から集じん機坑への拡幅部の施工方法についても、拡幅量がかなり大きくなるため慎重に検討して施工を進める必要があった。

したがって、前述のとおり切羽前方探査による地質分析を行い、適切な支保を選択し、図-8に示す事前補強を行った上で掘削を実施した。施工順序は、上半掘削、下半掘削、盤下げインバートコンクリート打設、覆工コンクリート打設の順で実施した。

図-9、10に前方探査結果に基づく推定地質平面図と施工時の切羽観察に基づく地質平面図を示すが、推定された地質に比べて破砕帯の方向性や連続性が若干異なったものの、破砕帯の位置や規模は概ねよく一致しており、有効性が確認できた。

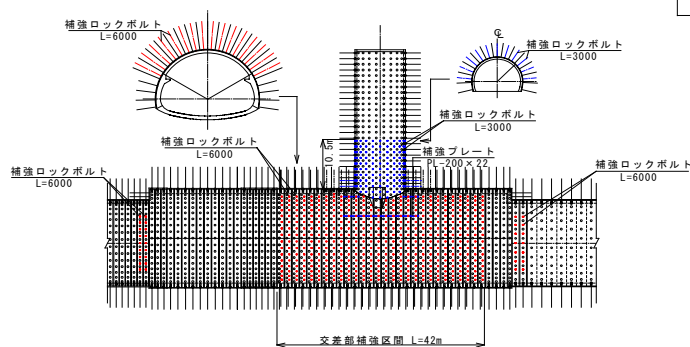


図-8 交差部補強工展開図



写真-3 集じん機坑全景

集じん機坑での前方探査手法の妥当性が確認できたことを受けて、標準部においても施工サイクルを考慮した上でホイールジャンボによる削岩孔(L=30m)により、順次前方探査を実施した。前方の地山状況を把握した上で地山の急変に備え必要な対策工を事前に検討できたことは安全かつ合理的な施工に有意義であったと考える。

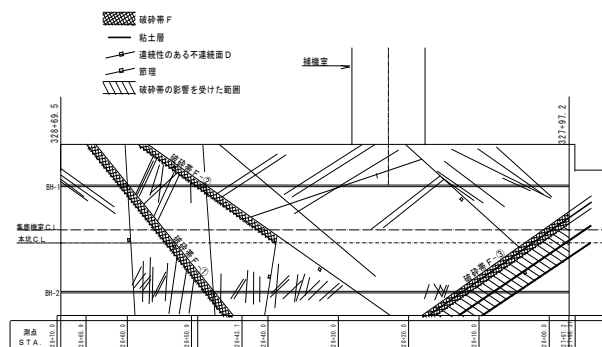


図-9 推定地質平面図（前方探査結果に基づく）

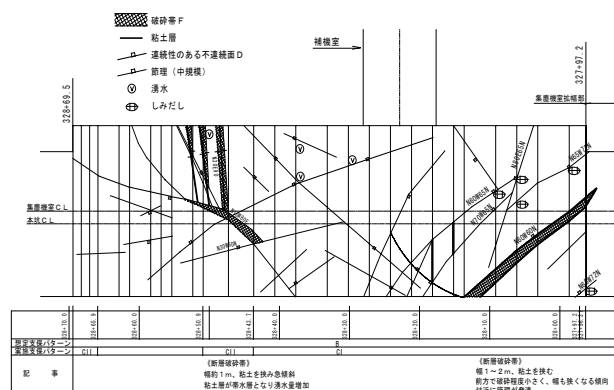


図-10 推定地質平面図（切羽観察結果に基づく）

7. まとめ

今回、ボアホールカメラより切羽前方探査を実施し、道路トンネルとしては前例のない250㎡を超える超大断面（集じん機坑）の施工を無事完了することができた。

山岳トンネルの地質調査は、従来より主として弾性波速度に基づいて実施されており、実際の施工では湧水状況や亀裂の状態、逆転低速度層の影響等により設計と異なる地山が出現することは少なくない。

近年、TSP（坑内弾性波探査）をはじめトンネル坑内から前方地山予測を行う試みがなされている。今回のボアホールカメラによる前方探査では、施工サイクルに大きな影響を及ぼすことなく実施することが可能であり、実際の亀裂状況や湧水の状態を画像として直接見ることができるため、事前の地質調査結果と合わせて総合的な判断を行うことで地質構造の推定が可能となり、事前に対策工の検討を行うことで、より安全で合理的な施工の実現に寄与するものと考えられる。

参考文献

- 1) 山田浩幸, 向井盛夫, 大内浩之, 村上孝男, 井上雅人: 250㎡を超える超々大断面(集じん機坑)の設計と施工, 土木学会第12回トンネル工学研究論文集, pp.257-262, 2002