

土被り 1,000mでの不良地山帯・大量湧水帯との挑戦

- 東海北陸自動車道 飛驒トンネル 貫通までの軌跡 -

中日本高速道路㈱ 中部支社 清見工事事務所 所長 寺田 光太郎

1. はじめに

飛驒トンネルは、東海北陸自動車道最後の未開通区間である、飛驒清見IC～白川郷IC間に位置する全長 10.7km の高速道路トンネルである。トンネルの特徴としては、縦断勾配が白川側（富山側）から河合側（名古屋側）に向け2%の一定上り勾配となっていること、最大土被りが約 1,000mと非常に大きいことなどが挙げられる。

以上のような条件から、上り勾配で白川側からの急速施工を基本とし、道路に供用する本坑、緊急時および維持管理に使用する先進坑ともに TBM による片押し施工とし、平成 10 年 2 月に掘削を開始した。

ともTBMで計画された。

1) 先進坑TBM

先進坑TBMの必要内空断面は、工作車又は消防車と人が通行できる必要内空断面を確保し、経済性を検討し径4.5mのTBMとした。

形式は、跡津川断層に起因する破砕帯が発達し、地下水も豊富と判断されること、月進300m程度の実績も考慮し、さらに作業の安全性を考慮して、フルシールド型を採用した。

2) 本坑TBM

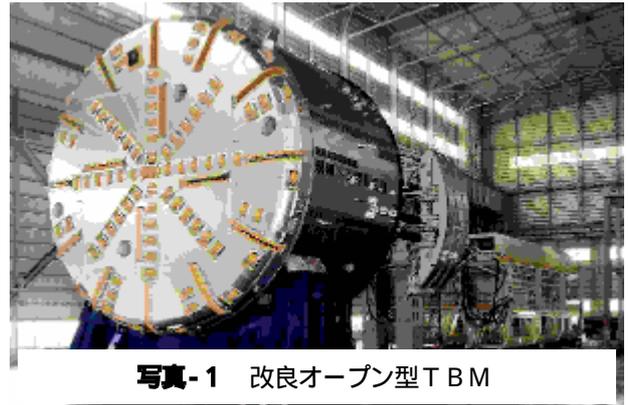


写真-1 改良オープン型TBM

本坑で採用したTBMは、掘削径12.84mと世界最大級のものであり、従来のオープン型と単胴シールド型の両方の機能を併せ持ち、良好地山での急速施工性と不良地山への対応を念頭に改良オープン型を開発した。(写真-1)すなわち、B・C級地山ではメイングリッパによる坑壁の反力で、メインビームを介してカッターヘッドに推力を与えるオープン型式の掘削を行うもので、支保としては吹付けコンクリート、ロックボルトのNATM支保を用いるもの及び現地製作したトンネルライナーとした。ライナー支保はこれを反力としてシールドジャッキにより推力を与える単胴シールド型式とした。また、不良地山対策として先進ボーリングや長尺鋼管フォアパイリング、鏡ボルトなどの補助工法を、TBM内から施工できる装置を常備した。

4. 大量湧水帯を伴う超不良地山帯の施工

4.1 先進坑工事（避難坑）

4.1.1 白川花崗岩帯でのTBM掘削

先進坑は平成9年7月に着手し、作業横坑、発進作業坑を掘削し、坑外でTBMを組立後、平成10年2月に発進した。

発進直後から600m区間の白川花崗岩帯の地質状況は、地山強度は100MPa程度、切羽湧水量は最大50 $\frac{l}{min}$ で切羽の自立性もおおむね良好で掘進は比較的順調に推移した。この施工



2. 地質概要

飛驒トンネルを構成する地質は大きく4種類に分類される。白川側坑口から中生代（白亜紀）の白川花崗岩類、中生代（白亜紀）の濃飛流紋岩類、先三畳紀の飛驒片麻岩類、中生代（ジュラ紀～三畳紀）の船津花崗岩類の順に分布しており、中央部には花崗斑岩の貫入が確認されている。(図-2)

基本計画段階（平成6年度）での地形地質は、最大土被り約1,000mで、花崗岩類、濃飛流紋岩類、飛驒片麻岩類等の、いずれも一軸圧縮強度1,000～2,000kgf/cm²の硬質岩盤で想定していた。また、路線沿いには跡津川断層をはじめとする複数の断層破砕帯が発達していた。当初設計時の地山分類は、D級地山がすべて不良地山でも全体の8.5%（1km程度）であり、比較的良好な地山と判定していた。

3. 掘削方法について

飛驒トンネルの本坑・先進坑は急速施工を目的として、両方

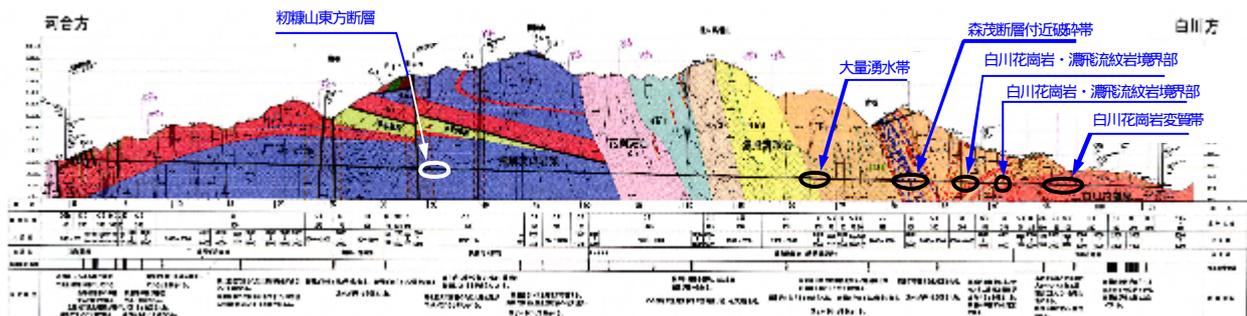


図-2 トンネル地質縦断面図

で、最大日掘進長 28.5m、月進 383m を記録した。

4.1.2 白川花崗岩変質帯における NATM 施工

初期掘進以来順調に掘進していた TBM 掘削は、当初予定していた地質とは違い、白川花崗岩～濃飛流紋岩境界付近に接近す



図 - 3 白川花崗岩変質帯での施工状況

るにつれ熱水変質が顕著になり、坑口から約 1 km 地点で御母衣断層の派生断層に起因すると思われる破碎帯に遭遇し大規模な切羽崩壊が発生した。この崩壊のため、TBM のカッターヘッドが弱層に突入したことから、突発湧水とともに崩落した切羽から土砂状のずりとして、チャンバに流入した。この対策としてチャンバ内からシリカレジンを注入して土砂の流出を止めるとともに、水抜きを兼ねたボーリング坑を施工してボーリングを実施した。(図 - 3) その結果、前方 L=130m 区間に、崩落箇所と同様の花崗岩変質帯の存在が確認され、TBM 上部を切抜げ、切羽崩落部の改良を実施するとともに、TBM 側部に迂回坑を施工して、掘削工法を TBM から一旦 NATM に変更した。

4.1.3 白川花崗岩～濃飛流紋岩境界付近での TBM 掘削

TBM の再発進後の(白川花崗岩～濃飛流紋岩境界付近)区間(920m)は、風化・熱水変質により地山の細片化、粘土化が進行しており、部分的なレンズ状の弱層に地下水を貯存する不安定な状況での施工となった。この区間は切羽での小崩落や土砂流出、TBM 後胴盛替え時の岩塊の崩壊が頻発したため、TBM 後胴部での安全性向上のため、支保部材として鋼製ライナーを採用し、最も耐荷重の大きいタイプでは、装備のシールドジャッキの使用が可能な設計とした。

周辺の地山の押出しによりスラスト推力が上昇したため、切羽崩落対策として注入を実施した。停止期間の 2 日間に TBM の拘束が発生した。対策として、水抜きボーリングと水抜き坑掘削に、4 ヶ月要した。

再開後も計 4 回の拘束を受け、白川側から約 2.0km 付近で第 5 回目の拘束を受けた。地質状況から TBM 掘進の継続は困難と判断し、再び NATM への変更を余儀なくされ、この間に、全面的なマシンの改造を行い、TBM の再発進まで約 2 年を要した。

4.1.4 NATM による森茂断層帯の施工

この NATM 区間は、基岩の細片化により切羽全体が粘土混じりの土砂状を示し、鏡面の押出し・崩壊や湧水にとまなう切羽流出等で、切羽の自立性が著しく低下した。地形地質の再踏査等により森茂断層帯に突入したと考えられた。また、地山の強度

も、変形係数で 200～300Mpa (CL 級) と小さく、土かぶりも 600m を超えていたことから、トンネル幅の 6% を超える大きな内空変位が発生した。このため、小掘削断面(25m²)を上下半に加背割りし、高強度鋼繊維吹付けコンクリートを採用し、鏡吹付けやフォアパイルリング等の補助工法を併用した。

支保についても、地山強度比が 0.5 を下回り、大きな変形特性を呈したことから、トンネル断面積に比べ剛性の高い支保構造とした。特に粘土化の著しい(白川側から約 2.5km)の区間は、掘削幅 B=6.0m に対し最大で 325mm という大きな内空変位が発生し、ロックボルトの破断、吹付けコンクリートの破壊、鋼アーチ支保工の座屈等、甚大な変位が発生した。これに対し、上・下半掘削時に鋼アーチ支保工(H-150)+SFRC(t=350mm)を施工した後、高強度によるインパート吹付け(t=250mm)を設置するという高剛性の支保工を採用したにもかかわらず、30mm/日を超える大きな初期変位速度の発生により、支保工が頻繁に破壊した。このため、総支保量は同じであるが、アーチ部における吹付けコンクリートを、掘削時に t=250mm、インパート後方で t=100mm と段階的に施工し、多重支保構造を採用することで対応して、支保の破壊を低減した。

4.1.5 本坑通過に伴う先進坑の変状発生

この森茂断層帯で、先進坑施工の 1 年後、本坑切羽の通過に伴う応力再配分により、鋼アーチ支保工の破断や盤膨れ等の大きな変位が発生した。(写真 - 2) 危険回避のための応急の補強措置を行っていたが、平成 15 年 5 月 3 日、突然に本坑上半切羽位置から後方 70m の区間で、インパートコンクリートが破壊し瞬時に底版が 50cm～80cm の高さで隆起した。その後盤膨れは徐々に進行し、最終的には延長 120m に渡り、最大 1.2m の規模に達した。このため、H 形鋼によるストラットを加えて剛性を増したインパートの再施工を行うとともに、破壊した吹付けコンクリートを除去した上で H-150 と t=200mm の補強コンクリートを施工した。

4.2 本坑工事



写真-2 本坑接近後の盤膨れ

本坑の施工は、仮設ヤードから作業坑(L=297m)を経て交差部(坑口から290m)に達し、交差部から両坑口に向けて NATM 掘削を開始したが、先進坑の掘削状況から、不良地山区間を避け、TBM 組立基地を交差部から 280m の位置とした。しかし、不良地山区間が TBM 組立基地よりも更に前方へと連続していることが判明したため、NATM で掘り進むこととした。

この区間終了まで、TBM 移動のための大断面が必要であるた

め、上半先進掘削で行った。(掘削断面:152m² 上半:81m²)

4.2.1 作業坑の施工

不良地山部における本坑の施工では、先進坑のみによる水抜きでは効果が十分でなく、湧水に伴う切羽の崩落が頻繁に発生した。また濃飛流紋岩までの断層破碎帯は地質が非常に複雑で、先進坑のデータのみでは本坑の地質状況を正しく把握することが難しいことから、先進坑の反対側に水抜きと地質調査を兼ねた作業坑をNATMで施工することとした。当初跡津川断層(派生断層)付近までの想定としたが、地質状況から1km手前までとした。この作業坑と避難坑の2本あることで水抜き効果が高まり、不良地山に遭遇した際には、詳細な地質情報があることで効率的かつ迅速な対応が可能となり、全体的な進捗にも良い効果があった。

特に、森茂断層区間の脆弱地山区間の掘削に対して、作業坑の掘削情報から地山特性を解析し、大断面の本坑掘削の支保検討に用いた。また、工程確保のため不良地山の前方に廻りこみ、掘削箇所を増やすことで工程短縮に多大な効果があった。

4.2.2 森茂断層での本坑変位対策

この区間は、本坑上半部掘削と同様に、切羽の自立が困難となり掘削後の変位量が大きくなった。作業坑は掘削を優先することから、補助工法を最小限とするため、断面積をタイヤ工法が可能な最小断面(22m²)に縮小して対応した。しかし、切羽の安定は図れたが、後続の本坑上半切羽の接近によって、解放応力の影響を受け、支保の変状と盤陥れが生じた。このため、作業坑の車両限界を確保するために、数回の盤下げと縫返しを余儀なくされた。

今後、土被りが600m以上となり、先進坑および作業坑の掘削でも300mmを越える変位となり、本坑掘削時にはさらに大きな変位が生じることが予想され、断面および支保設計を再検討するものとした。

施工に専用機械が必要となる。注入による地山改良効果が想定でしかない。費用対効果が非常に悪い上半掘削時に仮インポートが必要な状況となった場合、仮インポートに変位抑制効果の大半が依存し、対策工の効果がさらに小さくなるという問題があった。つまり、変位を支保内圧で押さえ込む事は不可能もしくは非常に非効率であり、また、ベンチ掘削時に降に縫返しの必要が生じた場合、施工高さが機械の適用範囲外となるため、変形余裕量を1000mm確保する断面を採用し、情報化施工により適時最適な対策(断面、支保)を実施しながら施工することとした。

坑口から約2.0km付近より森茂系断層の粘土化帯および破碎帯が出現し始め、本坑上半掘削切羽の安定性は著しく損なわれ、土被りの増加とともに天端沈下・内空変位とも増大し、施工状況が悪化の一途をたどった。土被りの大きな断層粘土化帯と破碎帯に対し、効果的かつ経済的と考えられる切羽安定対策を種々試行したが、十分な結果が得られなかった。よって、上半中央底設導坑を50m程度先進させ、拡幅掘削を行った。(図-4)この方法で約400mの施工を行ない、中央底設導坑の効果により、上半変位が200mmを超えるような不良地山においても、注入等の補助工法をほとんど使用することなく、掘削すること

ができた。

5. 大量湧水帯の突破(先進坑工事)

先進坑は、白川から約2.6km付近で森茂断層の大変位区間を突破し、CL~CM級の比較的良好な岩盤に入ったため、TBM掘進に切り替え掘進を開始した。掘進は切羽前方探査工を実施して突発湧水に備えながら進められた。しかし、白川から約3.25km付近にて切羽崩落、次いで約3.26km付近でも大量湧水とともに切羽が崩落し、TBMが拘束された。TBM上部の切り掘げを準備し、TBMを後退させてライナーを外したところ、後方でも崩落および空洞の発生が確認された。注入工法併用による切り掘げのみでは、TBM掘進の再開が困難と判断した。このため、拘束後の対策としては、崩落箇所の地山改良と水抜き対策を重点的に行った。

特に水抜き対策では、水抜きボーリングだけでは十分な効果が期待できないため、水抜き坑(矢板工法)を施工するとともに、切羽前方探査工を実施することとした。この対策により、切羽からの湧水量が大幅に減少させることができ、TBMは再発進した。なお、空洞の処理についてはレジ系注入剤(シリカレジ)で充填した。

6. 本坑TBMによる掘削

本坑の地質は、白川側坑口から約3,000mの地点より、比較的自由性の良い安定した濃飛流紋岩となり、先行する先進坑および作業坑の切羽観察・施工データと両坑による水抜きの効果も認められたことから、平成16年1月より、TBMの掘進を開始した。直径約13mの大断面TBMによる山岳トンネルの掘削は、国内外で初めてで、最初の200m区間は試験施工と位



写真-3 アーチライナー施工状況

置付け、機能確認と調整、各補助工法の試験などを行いながらの掘進とした。同区間の亀裂の発達した濃飛流紋岩は、岩自体の強度は十分大きいですが、亀裂により切羽の小崩落が想定されるため、支保に全周アーチライナー(写真-3)を用いた、シールド掘進で行った。この区間では、切羽で複数の卓越した節理面で組み合わせり、カッタヘッド前面の地山が大きなブロック状に抜け落ちる現象(以下「先掘れ」と呼ぶ)が多発した。この先掘れは特に下半部に多く発生し、形成される空洞はあかも古墳の石室のような形状で、奥行きは3mから最大7mにも達し、上半部がオーバーハングの状態となることも多かった。この先掘れのため、圧砕によるカッタヘッド面盤のディスクカッタの掘削は行われず、面盤又は外周ドーム部のカッタによる二次破碎となり、カッタヘッドチャンパーに取り込まれる掘削と

なった。そのため、角のある大きなずりによるベルトコンベヤの損傷やホッパー部の閉塞トラブルが頻発した。また、切羽と面盤の間で崩落した岩盤の二次破砕による、面盤の外周付近やカッタ、スクレーパー等の磨耗が顕著であった。ちなみにこの時岩塊の強度は 150～490MPa、石英含有率は、95%と非常に高い値を示した。この先掘れの発生は、濃飛流紋岩の特性と TBM 掘削径の大きさから考えて避けられないため、先掘れが TBM 断面外に広がらないよう、先進ボーリング等により確認された不良地山部分では、長尺鋼管フォアパイリング (AGF) による補強を行いながらの掘進とした。

花崗斑岩層境となつてからは、AGFの施工なしに掘削できる区間が大部分となり、平成16年3月には月進252mを記録した。

7. 土被り 1,000m 下における高圧流動化粘土層との遭遇

先進坑 TBM は、白川側からの掘削延長 5,800m 付近から飛騨片麻岩帯に入った。この地質は一軸強度が 200MPa と堅硬で亀裂間隔も大きく、支保パターンもアーチ部無支保の B パターンを部分的に採用できた。

湧水を伴う破砕帯で 2 回の TBM 拘束はあったものの、平成 17 年 9 月時点では、既に河合側坑口から 3,100m まで NATM 掘削がによる迎掘りが、貫通まで 310m (白川側掘削延長 7,300m 地点) となった時、TBM は再々度の拘束を受けた。事前の前方探査ボーリングで、厚さ 2～3m とかなり厚い粘土層が確認されていたが、湧水もほとんどないが、粘土層の内空側への変位による TBM 拘束を警戒して、事前に掘削径を通常よりもさらに 50mm (半径) の余裕を拡大して掘削を進めた。掘削に当たっては、掘進、盛替え (後導の前進) 時の反力不足の可能性も考慮し、シールド推進が可能なスチールライナーに変更した。

粘土層からの湧水はほとんどなく、ある程度の自立性を有しており小規模な崩落のみであったが、TBM 前胴部が硬岩部に達したとき、中胴部分が高圧粘土に締付けられ、TBM 拘束された。

すぐに上部の切詰め掘削を開始したが、その鏡面に押し出し等の現象が発生したため、バルグヘッドコンクリートを構築して切詰めを中止した。この粘土層は浸水崩壊度が極めて高いため、小規模な崩落をきっかけ掘削時に呼び込んだ湧水が粘土層を塑性流動化し高圧粘土となった。さらに後の調査で判明したことだが、約 20m 先には 6MPa を超える高圧湧水帯が存在していたため、湧水を助長する要因となったものと考えられる。この高圧粘土により厚さ 40mm の鉄板前胴・中胴胴体部が変形し、中胴の点検窓から土砂が流入し始め、その後も、TBM 機内への土砂流入が継続し、1 週間後にはほぼ完全に土砂で埋まり、TBM 機内が埋没した。この時点で TBM 胴体部の変形、駆動部の破壊、電装関係の故障等は致命的であり、TBM 再掘削は困難であると判断された。塑性流動化した粘土が、TBM 機内を通してトンネル坑内へ流出し始めたため、セメント系注入材による改良注入を実施し、塑性流動化現象を沈静化させた。

これに続いて、粘土層の地質調査、水抜きボーリングの基地として、また、将来的には避難坑本線として使用する目的で左側から迂回坑を掘削開始した。13m 程度掘削した時、高圧粘土が厚さ 30cm の鏡吹付けを押し割り、切羽を崩落し、その土砂により迂回坑全体及び避難坑の一部も埋没した。図 - 4) 迂回坑の崩落が沈静化した後、右側から長尺ボーリングを削孔した結

果、切羽前方 20m より奥に 6MPa におよぶ高圧湧水帯の存在が判明した。この湧水帯は何層かの粘土層に細分化され介在しており、未掘削区間周囲の水圧を低減するため、水抜きボーリング坑を掘削し、水抜きボーリングを実施した。



河合からの掘削は、当初、熱水変質帯の挟在する亀裂性の岩

図 - 4 拘束状況と迂回坑施工状況図

盤で、全体に風化が進んでいる地質と予想され、しかも下り勾配(2%)で施工するという条件から難工事が予想された。しかし、施工は比較的順調に進み、平成 17 年 9 月段階で 3,157.4m に達していたため、強制排水の増設や非常時における排水設備の増強をして、平成 18 年 3 月に NATM 掘削により貫通することができた。

本坑は、複雑に分布している粘土層の把握を目的として、河合側 NATM 切羽から調査導坑を先進させた。本坑 TBM はその後も調査導坑のリーミング掘削を進めていったが、最終的には調査導坑を約 5m 残した位置で切羽が崩落して TBM 掘削を終了し、河合側から NATM による迎え掘りにより掘削を完了した。この掘削完了位置で崩落した粘土層は先進坑 TBM を破壊した粘土層と連続しており、崩落によるゆるみの拡大により湧水量が漸増していき、崩落が助長されていった経緯が再確認された。

9. おわりに

最大土被りが 1,000m に達する飛騨トンネルでは、避難坑の重要な役割として本坑掘削前に地質状況を把握して、地下水位を低下させておくことにある。この避難坑が約 10 年に及び施工中には幾多の不良地山や大量湧水の遭遇により、悩まされたが平成 10 年 8 月の掘削開始から約 8 年 5 ヶ月の歳月をかけ、ようやく貫通させることができた。現在は、ダクト工、二次覆工や連絡坑工事を施工している。

この貫通は、太平洋と日本海を隔てる山脈に風穴が開いたというだけでなく、平成 19 年度末の東海北陸自動車道 18.5km の全線供用に向けて大きな弾みとなる。さらに、飛騨トンネルを含む約 2.5km の区間が完成すれば、東海地方と北陸地方が直接結ばれ、経済、文化、観光など、両地域の幅広い交流や発展が期待される。

参考文献

4) 寺田光太郎・森山守・松原利之・築地功「土被り 1000m6MPa を越える高圧湧水で貫通」トンネルと地下 2007 年 2 月