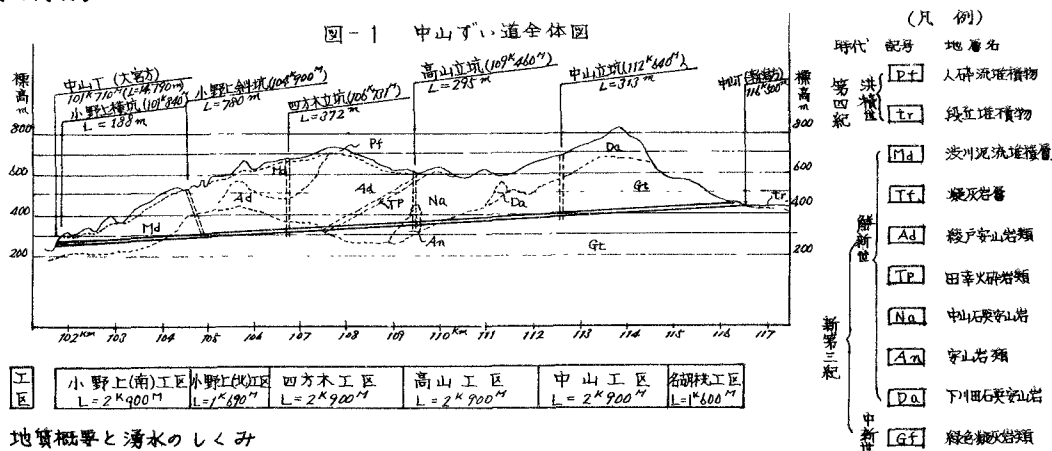


日本鉄道建設公団東京新幹線建設局 正員 小林素一

1 まえがき

上越新幹線は昭和45年5月に成立した全国新幹線鉄道整備法に基づき、昭和46年度より着手されているが、その一部である中山トンネルは群馬県のはば中央部に位置し、子持山及び小野子山の両火山の中間を貫く、延長14km 790mの長大山岳トンネルであり、上越新幹線工事中においては、大清水トンネルに次ぐ規模であり、世界でも山岳トンネルとしては6番目の長大トンネルとなる。現在工事は、図-1に示す6工区に分割して進められているが、トンネル中間部の3立坑は、我国の鉄道トンネル工事において前例のない深度の立坑であり、中山立坑を除いた横坑、斜坑を含めて予想外の大量湧水に遭遇し、工事の進捗に対して湧水による作業能率の低下、湧水処理のために投ずる膨大な工事費、坑内排水により発生する漁業補償、周辺の湧水、水田の冷水対策等の諸問題をかえながら掘進が進められている。

今回は、その中の四方木立坑を中心に、上越新幹線中山トンネル立坑工事における湧水対策と、止水について述べてみたい。



2. 地質概要と湧水のしくみ

各地質調査の結果、本トンネルの基盤岩は新第三紀の各層がガガリの四角にわたり隆起沉降作用を起こし、随所に浸蝕がみられ、四方木、高山立坑附近において盆地状の凹地形が形成され、その後第四紀に入り、盆地状の凹地形に両火山の安山岩熔岩、火山礫、火山岩塊等がいくつかの時期にわたって噴出し、現在のような地形を形成したと考えられる。この凹地形の地層内の大部分は、種々の大きさの岩塊、凝灰岩、および火山灰で構成され無秩序に堆積しており、岩質変化が著しい地質状況を特徴としており、四方木立坑の湧水源となっている凝灰角礫岩の地層は、全体的に未固結であり、土砂状を呈しところどころに火山灰を薄く夾在し、クラックもかなり発達しているなどの複雑な地山様相を呈している。又各所に調査ボーリングで確認された安山岩層等の不透水層が確認されたが、湧水圧測定の結果図-2からみて連続性のある不透水層でなく、立坑部の大半が湧水性の凝灰角礫岩から成っているので、立坑坑底部に達するまで今後も種々の湧水によるトラブルに遭遇することが予想される。換言すれば、四方木立坑はこのような地質概要の中で膨大に破圧された不透水層との戦いを余儀なくされた、かつて前例のない長大立坑工事となり、我国屈指の難工事といっても過言ではないと思う。

3. 工事に伴う湧水処理

トンネル工事に伴う湧水処理として、山岳トンネルの水平坑道では、水抜法が多く採用されているが、立坑においては排水設備の設置、および保守が非常に困難なことから止水法が普通実施されている。しかしながら止水法の実施にあたっては、止水掘進の交互作業と工期の関係上長大立坑においては慎重にならざるを得ない。この交互作業の実例としては、斜坑ではあるが青函トンネル調査斜坑（1315^m）で実施された例によると、排水設備として坑内総湧水量が約4.5^l/minに対して、坑内排水設備は24^l/minの設置を行ない斜坑工事を4年6ヶ月の月日を費やし完了している。

四方木立坑においても現在9^mの排水設備に対して、坑内排水量がオーバーしないよう心掛け止水に専念してきたが、既設の排水設備で今後の残る立坑工事を完了するには種々の問題があり、現在立坑部の総排水量を最大15^l/min以内にとどめるべく、排水処理設備を含む排水設備の増設を計画中である。

このようにして立坑工事としては前例のない排水設備の増強と、止水工法の併用で今後ますます処理にくくなる湧水に立ち向かっている。

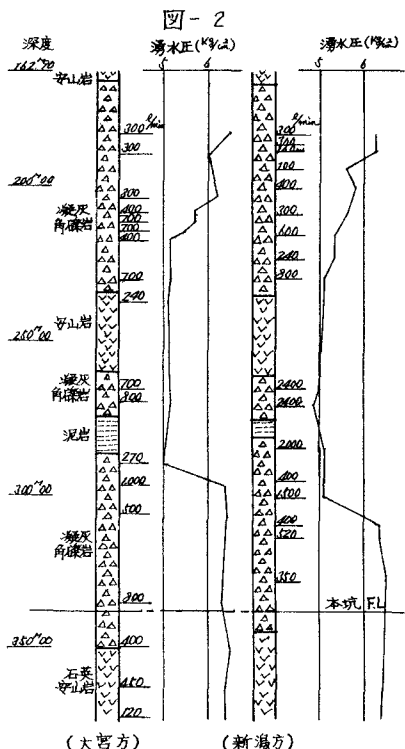
4. 四方木立坑における止水工法の経過と計画

四方木立坑の湧水対策は、坑底からの注入工事を実施してきたが、今までに体験した事は、注入対象地盤が比較的未固結な凝灰角礫岩であり、角礫の粒径が5^{cm}～3^mと地質が不均一で注入有効範囲の設定が難しい。マトリックスのシルト～細砂は未固結な状態を示し、歪（圧密歪み）、亀裂を生じ透水はこの亀裂を通るものが多く部分的には大きな角礫とマトリックスの境からもみられ、透水の原因である亀裂は必ずしも連続的でなく透水の経路は極めて複雑である。パッカーのセットが常に同一ヶ所であるので、ステップ注入を行なっているが、注入深度が大きくなるに従い注入区間長が大きくなり注入の精度が低下する。

このような状態での注入材料による注入効果をみると、けん漏液注入材料（CM、LW等）は浸透範囲が非常に小さく、特にCMの場合には亀裂に対してすぐ閉塞を起こし十分な止水が期待できない。又注入材料が希釈されて、所定の注入範囲にとどまらず、リークされる可能性が大である。溶液型注入材料（日東SS-30R）は、高分子系注入材料として日東SS-30Rを使用した、マトリックス部の細砂、微細砂等には注入材料がよく浸透しサンドゲル化を示し、弾力性の固結がされ、止水効果が顕著に現われた。膨状に充填された注入材料が高圧によって相互にマトリックス部分を一時的に圧密させているが、注入範囲（カバーロック）が立坑掘さく面から薄いために掘さく時の発破等による影響で地山がゆるみ、水が浸透してくる。この際充填された低粘度の注入材（単味の薬液）が湧水と共に押し出される。

以上により言えることは、注入終了後に坑底よりチェック孔を実施し効果確認を行った上で掘さくを開始したとしても、カバーロックが充分確保されていない部分では出水が起こる可能性があるため、注入有効範囲の設定が難しいことより、注入材料をCM、LW、日東SS等を複合して使用し、再注入を行ない充填量の増大を計るために反復した注入を実施し、掘さく時には極力地山のゆるみを押えることが必要と思われる。

又注入域が完全に止水された弾性体と考え、注入域外からの静水圧がかかるのであれば、トンネル中心からYの点における接線応力を σ_x 、法線応力を σ_y とすれば



$$\sigma_r = P \cdot (\alpha^2 - \alpha'^2) / (\alpha^2 - 1) \quad \sigma_t = P \cdot (\alpha^2 + \alpha'^2) / (\alpha^2 - 1)$$

図-3

$$(\text{但し、} \alpha = R/R_a \quad \alpha' = R/r)$$

この時の最大応力は、 $r = R$ の時の σ_t 即ちトンネル周壁にかかる周辺応力で

$$\sigma_r = 0 \quad \sigma_{t \max} = P \cdot 2\alpha^2 / (\alpha^2 - 1)$$

となる。これによると、 $\sigma_{t \max}$ は α が2.5倍位になるとほとんど一定値に近づくことが解る。このことは周辺応力を小さくしようとする際にカバーロックをむやみに大きくしても効果が薄いことを意味する。

四方木立坑においては、注入孔1孔当りの注入有効範囲の設定が難しい事から逆に止水壁形成に対しては、カバーロックを大きくすることは注入孔の増加を意味することになり、工事の工期、工費に大きくひびき注入工事をいっそう複雑化することになるのではなかろうか。

5. 周辺注入工事について

このように争々ぐり状態で坑底注入を実施してきたが、大中の工期の遅れを回復すべく、立坑深度162^M90をGとして立坑周辺に注入基地通廊を設置し、掘さくが必要となる止水、補強工を立坑掘さくと並行すべく周辺注入工事を計画した。工事は図-4の通り、立坑深度162^M90～298^M00の135^M間を注入しようとするもので、注入孔が鉛直長孔せん孔となること。地質が不安定であり、パーカッション方式によるせん孔が困難なこと。立

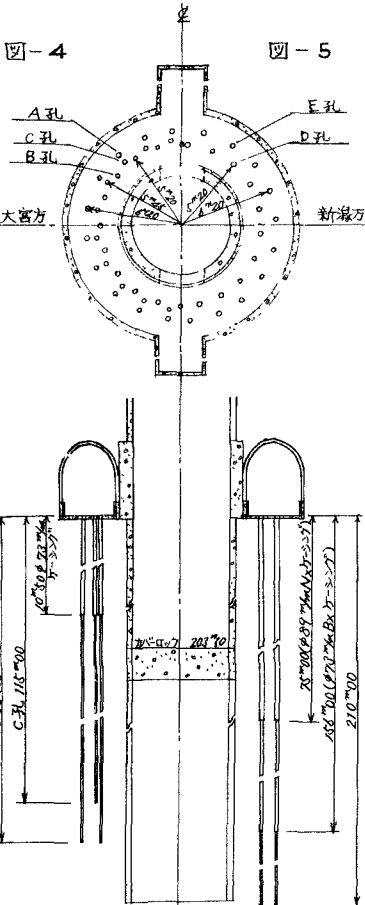
坑掘さくの進捗になるべく支障をおよぼさないこと。注入対象地山の透水係数が $10^{-3} \sim 10^{-4} \text{ cm/sec}$ と思われ注入有効範囲がきわめて小さい。地山が未固結状であることより、掘さく時の発破によるゆるみの影響によるライニング後の湧水、揚水費を極力小さくする。

この事から施工計画は、注入孔は $\phi 66 \text{ mm}$ (ロータリー方式) ノンコーボーリングとし、A孔、B孔を注入孔とし、A孔、B孔の順で注入しC孔はチェック孔、及び追加注入孔として用いる。注入方法は1.5ショット方式の7.5^mのショートステップ注入とし、パッカーセットは前回注入範囲とする。注入材料は、四方木立坑の地質に対して、CM注入の浸透が不適であり、岩盤の亀裂を開塞させてしまうことが実績より判明、又岩盤に対して止水が完全であれば良いという事になるが、ブランドルが平行板においてグラウチングされ、均衡を保たれた平均圧力Pを与える関係式を導いているが

$$P = C \cdot (\pi/2 + l/2 \cdot e) \quad c: \text{粘着力} \quad e: \text{平行板の中} \\ l: \text{無限大の長さ}$$

Ex. 立坑において、立坑深度300^Mにおいて10^{cm}のクラックがあったとしても、カバーロック2^M30に対しては、 $P = 30.14 \text{ kg/cm}^2 > 21.4 \text{ kg/cm}^2$ (但し、 $C = 2 \text{ kg/cm}^2$, 粘土、セメントグラウトの場合)

となり、10^{cm}のクラックがあったとしても十分安全であることから、注入材料は、⑤1号珪酸ソーダ75%溶液と普通ポルトランドセメントによるLW注入と、浸透性のよい高分子系注入材料の日東SS-30Rを使用することとした。注入最終圧力については、調査ボーリングでの段階注水試験結果による岩盤の限界強度+10^{kg/cm}^2前後とし、地盤内の微小亀裂をも}



関して、注入材料を充填し地盤改良することとし、図-4のとおり240^m附近まで注入を行なってきたが、地山の強度不足と注入計画の適応性の不適確からバックが地山内にセット出来ない。立坑掘さく時に注入による影響が坑底に現われ並行作業が困難であった。注入終了後の追切りボーリングが増加し、坑内排水のPH、濁度に大きな変動が起き、排水処理が難しくなった。ロケケーシングが注入圧の影響により変状を起した。注入効果を上げるべく再注入を一部実施した際、立坑コンクリートに変圧が作用し、コンクリートの変状が起きた。高分子系注入材料の使用が、アクリルアミドの劇毒物追加指定により使用不能となった。

以上のことから、周辺注入工事の続行が不可能となり、今後の立坑工期工事内容を検討の結果、長孔注入の限界を60～70^mと判断の上、NX、BXのXシリーズケーシングを利用し、図-5の通りの周辺注入工事に変更、施工に踏み切った。ケーシング達込による210^mにおよぶ長孔注入は現在まで実例はなく、注入器具、ポンプ、注入材料を検討の結果、長孔注入における最深部の注入効果は、現在の1.5ショット方式による注入方法には疑問があり、2ショット方式を導入、2液注入を実施するに、単位時間当たり注入量、混合比率を確実に管理し、青函トンネル本州方における現地試験で良好な結果を納めている高圧2液注入ポンプ（ダブロンポンプ）の導入、注入材料を水ガラスけん濁液型としてLW、水ガラス溶液型としてCW-3を複合反復使用することで周辺注入工事を並行施工し、坑底注入、側壁注入を補助注入とすることで施工を開始している。

6. 注入工事と工事排水について

現在工事に伴う排水は、社会的、法的背景のもとに、県公害防止条例の基準を準用するとされ、放流水PH、及び濁度を規制値以下に下げ処理放流すべく排水処理設備を設け、工事排水の処理管理を行なっているが、地盤凝固剤アクリルアミドの毒性が問題となった同時期に、四方木工区工事排水の放流域の沢において、下流域の養鱒場において鱒、あゆ、ヤマメの原因不明によるへん死事故が発生（当時の放流水PH=6.9～7.1、濁度=1～2 PPM）、その後各種水質試験、鱒稚魚によるTLM試験を実施してきたが、事故当野の水の溶解性蒸気残渣が異状に多く、工事排水中の値は注入作業中が最も高く、注入された坑底掘さく土中の湧水においても異状に大きな値を示している。そこで魚類に対する溶解性塩類の影響が重視された。これはLW注入に使用する硫酸ソーダの硫酸中和液に起因するものが大部分であり、処理設備の改造、注入工事の工夫が要求され、現在工事の管理を導電計を用いて水中の導電度を測定しながら処理水の管理に万全を期している。

7. 高山立坑における湧水対策

高山立坑においても、四方木立坑同様に大量の湧水に遭遇しているが、諸工法検討の中で立坑深度200^mまで水位を低下すべく、ディーブウェル工法を採用したが、地下水の低下速度と立坑の掘進速度の関係から注入工事の併用による工事となっている。揚水、注入の併用という事の検討結果として、高山立坑においてはソレタンス注入工法の適用が併用工法に最適という事で現在施工しているが莫大な工事費を費やしての工事であり、両立坑共今後の立坑工事における止水工事の成果は、立坑掘さくに伴う湧水処理をいかに最小に止めるかにかかっていると思われる。

8. まとめ

現在、地質的に恵まれぬ硬圧地下水下における長大立坑工事は、施工最盛期を迎えているが、注入対象地盤が“岩”と程遠い固結度の低いものの中での注入工事を、注入地盤の浸透性に基づく注入処理の難しさに対し、薬の性能を主として頼ることで解決しようとする四方木立坑注入工事と、注入技術を主体として解決しようとする高山立坑注入工事の成果が、今ここにできようとしている。又硬圧地下水下にある固結度の低い地盤は、粒子の間隙に入っているある水頭を持った水をしばらく出してグラウトを注入しなければならないという点では、ディーブウェル等により水頭を下げ注入工事をやりやすくするという期待感があるが、莫大な範囲に対して湧水という問題を投げかけることで大きな障害となり、いかなる方法がよいのか限定するのは非常に困難な問題である。