

## 地 下 水 (III)

## トンネルと地下水

広 田 孝 一\*

## 1. トンネルの湧水

トンネルを掘ると水が出る。一般に延長が長く地表下深いものには大湧水をとまうことが多い。ことに山脈を横断するトンネルにおいては例外なく湧水が多い。古い例では丹那トンネル、清水トンネルのごとき、また近くは目下工事中の信州大町より黒部第四ダムに向つて掘られている長大トンネルのごときである。また河底トンネル、海底トンネルのごときは湧水のあることは当然であるが、湧水を防止することと出た水を排水する能力がトンネルの成否を支配する大きな問題となる。小さなトンネルにおいても水が出れば作業能力が低下する。また水量のみならず水温、水圧等も作業の難易に関係が深い。

例えば丹那トンネルの最大湧出量のあつたのは西口の7800 ft 火山荒砂層で120コ(1コ:1 ft<sup>3</sup>/sec)の湧出があり、坑外の広場まで洪水のようになった。また東口9100 ft では非常に水圧となり、削岩機と人間もろともはねとばされたこともあり、ボーリングの4" 孔から2コの水が噴出し、噴出口から16 ft も飛ぶほどの勢いであつた。圧力を計ると300 lbs/in<sup>2</sup>であつた。ボーリングロッドを挿入するためにはロッドにロープをつけ、両側に5人づつでこれを引いて押し入れたが、切れたときにはロッドが20 ft も飛ばされた。清水トンネルでは土合口8550 ft で断層に当り、約110 ft の断層区間に6.2コの水があり、それまでの湧水と合計して12.6コとなつたので、別に排水トンネルを作るために断層区間の掘進を中止して排水の完了までに1カ年を要した。しかし断層区間は温度7°Cの高圧地下水が減水せずに噴出し、これを強行突破して坑奥の良好岩盤に到達できたのである。7°Cでダイナマイトは凍るので非常に危険であつた。4°Cのごときはさらに注意を要する。

海底トンネルの例としては関門トンネルがあるが、下関方は岩質良好のため山岳トンネルと同じ工法により、門司方はカコウ岩のマサであるため圧縮空気とシールドを使用した。下関方は大きな断層のため湧水と崩壊を防ぐためグラウティングによつて防水につとめた。そのため海底区間最大湧水量は3.2コであつた。しかし突然の

大湧水はシャフト内のポンプの排水能力限度に関係があるので非常に懸念された。門司側のシールドにおいてはマサを進行中はよかつたが、600 mより700 mの区間に貝ガラまじり青粘土層が出てきて、その下層が貝ガラのみ層となり、これは主として大形のカキの堆積であつて、自由に水を透すものである。しかもこの区間は土被りわずかに7 m程度の非常に危険な状態であつた。最初青粘土の出たときは1/30コの水で26 lbs/in<sup>2</sup>の空気圧を用いたが、貝ガラ層が上つてくるにつれて湧水が増大し、湧水量1/5コとなつたときに泥土を押し出し、径50 cm くらいの空洞を生ずるに至つた。さらに貝ガラ層のみとなつたときには1/2コの水となり、空気圧37 lbs/in<sup>2</sup>とすることによつて、かろうじてこの区間を切り抜けた。湧水温度の高い例としては水路トンネルがある。高温の地下水というのはつまり温泉のことである。温泉はその成因が降雨の浸透による循環水ではなく、岩漿よりH<sub>2</sub>Oが分離して出てきた岩漿水と考えられるものである。会津湯本の水路トンネルでは58°Cであつた。また第三黒部の水路トンネルでは95°Cの高熱水のため、冷水をポンプでかけながら1時間交代で作業したということである。シンブロントンネルにおいては、冷水の湧出口からわずかに1 m 離れて高温の温泉が湧出したことも報ぜられている。

## 2. 湧水の根拠とその通路

トンネルの湧水は山の大小、地形、地質、トンネル延長、地表下の深さ等種々のことに関係する。あるときは浸み出すごとく、あるいは雨のしたたるごとく、または土砂降りのごとく、さらに大量となればキレツ、空ゲキ等より噴出する。このような水が掘進とともに減少または涸渇することもあり、少量がいつまでも残ることもある。また完成後の坑口排水量は降雨量とある関係を持つ。このような問題はトンネルの掘られる場所が山体地下水のどのような所に掘られるかということによるのである。

トンネルを掘ると水が出る。しかし深いトンネルでも部分的には乾いていることもあり、また部分的には多量の湧水の出ることがある。空ゲキや間ゲキのないときに乾いており、キレツの発達しているときに湧水が多い。砂利、砂層等、水の流動しうる地層がある場合は水が出る。このような水は地下水であるが地表に近づくほど圧力が減り、つい流動する水のない所がある。そのような点を連ねた面を地下水面という。つまり地表下ある深さにおいて到達する水面をいい、一般に地表面の傾斜に従つて流れる。地下水の根源は降雨の地下に浸透したものが地中の間ゲキを伝わつて下降し、地下水面の上に積み上つてゆく。すなわち浸透が多量のときは地下水面は上昇するが、降雨のないときは地下水流動によつて地下水面は低下する。流動して低きに流れた地下水はどこかで地表面を切り、そこで湧水となつて湧き出す。このようにし

\* 正員 電源開発KK土木調査部地質課長

て地下水位は高低変化を生ずるが、降雨の補給と湧水点の湧出とは一定限度内にある。降雨のない季節すなわち渇水期における谷川の水は渇水量を示す。であるから渇水量は純粋の地下水の湧出の集りと見ることができる。

山体に飽和された水が地下水であつて、これが高さより低きに向つて徐々に流動するが、どのような通路を通るかということが問題である。砂、砂利のごときものはその空ゲキ間を一様に通るが、古い段丘または第三紀時代、または洪積期の礫層のごとくやや固結の程度の進んだものでは砂利、玉石等の空ゲキを砂、粘土等が十分に填充しているので、水の透る所は土の中のアリのスの孔のごとく、不規則ながらも連続した小さな空ゲキが水道となつてゐる。一般に水の乾いたあとは黒色の沈殿物がついてゐる。また一様に透るものとしては火山灰、火山砂層のごとき、あるいは粗粒の新しい凝灰岩のごときものは一様に水が動く。岩石の場合はキレツ、節理、地層面等がわずかでも間ゲキを有する場合水が透る。岩石自体も空ゲキを有する。例えば砂岩の空ゲキ率は5~20%であり、カコウ岩は0.3~0.8%のごときである。しかしこれは含水状態と乾燥状態の比であつて流動する水ではない。従つて上述のようなキレツ、間ゲキがおもな通路である。さらに断層破砕帯はきわめてよい通路となるので、遠方の地下水まで流動させることが可能である。また石灰岩の空洞は地下の自然トンネルのようなもので、大量の水が自由に動くが、洞穴の方向は不規則である。

### 3. トンネル湧水の出かた

(a) 浸み出すような出かた 地表下浅いトンネルまたは大トンネルでも、坑口付近によく見られることであるが、何となしに岩ハダが濡れておりカンテラの光に反射して光つて見えるが、水として流れてはいない。従つて下水にまともな水は流れるほどの水はない。このようなものは地下水面以上の部分であつて、降雨の地下に浸透したものが地中の空ゲキを伝わつて下降しつつある状態のものである。いずれは下方の地下水面に合すべき水である。トンネル掘削には何も障害とはならないが、粘土ハダを滑りやすくするので、落盤を起すことはある。

(b) 雨のようにしたたるもの トンネルの導坑は毎日何mかの進行をするので岩質がキレツ、間ゲキの多いときは雨のごとく水てきが落ちる。野帳や図面等を拡げても濡れて困るような程度のものである。下水は流れるというほどでなくても、わずかながら流れる水となる。このような水は地下水面以下に入つたときの状態である。しかし一般にこのような水は、トンネルの切羽が進むにつれていつも切羽についてゆき、後方約100m以上離れた所は以前掘進中水があつた所も乾いてしまう。これはトンネル掘削によつて地下水が湧出するために地下水面が順次低下するためである。低下した地下水面はトンネルの基盤まで下つてからはそれ以下は低下せず、基

盤高にある下水に流れこむこととなる。つまりトンネルの両側にある導水勾配を持つた地下水面ができることなのである。

(c) 特定のキレツから多量に出るもの 大きな山体を貫く長大トンネルの場合によく見られるものである。坑口から相当深く掘り進んだ場合、すでにある程度の湧水はあるが、目立つようなものもないときに突然大きな湧水に出合うことがある。小さな下水はあふれてトロ線のレール上面まで水をかぶるようになる。このような水は大きなキレツ間ゲキにもとづくものであつて、断層破砕帯のような場合が多い。ある方向に長く連続したキレツであつて、水の流動に対してはきわめて抵抗少きものであるから、遠方から地下水を多量に運んでくる。従つて大湧水となり容易に減少または涸渇しない。清水の土合口8550ftなどはそのいちじるしい実例である。

清水トンネルは6マイルの長大トンネルであつて、全部閃緑岩およびカコウ閃緑岩と予想されたので、堅岩トンネルとして準備が進められ、土合口は堅硬なる閃緑岩となつたので1300ftよりベンチ式全断面掘削によつて掘進したが、2400ftの地点で断層に遭遇し、0.6コ<sup>の</sup>湧水もともなつたので、ベンチ式を再び新奥式に改めて順調な進行を見たが、8550ftより湧水急激に増加し8689ftにおいて6.2コ<sup>の</sup>湧水となり、坑道に水が充満して水深深く運搬作業が十分でないので、排水トンネル完成までの1年間進行が止つた。この間湧水量に変化がなかつた。この湧水は断層キレツによるものである。石英閃緑岩中に貫入したアプライト岩脈の部分に生じた断層と考えられ、N15°W 75Nの走向傾斜を有し、トンネルの方向とは約45°に斜交するものである。断層は堅岩に無数のキレツを生ぜしめたが、断層粘土はともなつていながつたので土砂押出しはなかつた。断層位置と方向から見て湯檜<sup>と</sup>倉上流一ノ倉沢付近から茂倉、谷川岳側の急崖とはほぼ一致する。トンネル内の破砕部分110ft間は7°Cの冷水が高圧大量に湧出するので困難しながら突破した。坑奥は再び閃緑岩となり全く湧水のない所もあつた。間ゲキを有するキレツがなかつたため、その後1.2コ<sup>の</sup>湧水があつたのみで坑口合計12.6コであつた。

このような大山脈を横断するトンネルにおいて、大キレツ群をとまなう断層に當つた場合は、清水においても黒部においても同様と考えられるが、水源は非常に遠方のものまで集めているはずである。山体の地下水は断層の大キレツ、これと交叉する小キレツ等全体の空ゲキをみたして、高さより低きに徐々に流動し、付近の溪谷に湧水となつて湧出していたものである。山上の万年雪からくる0°Cの水は、山体の地熱に対するクーリングウォーターの作用をなしていたものである。そこへトンネルを掘り当てたので、地熱によつて温められた水が中途からトンネルへ湧出することになつたので7°Cとなり、

4°C となつてあらわれているのである。

(d) 断層粘土の厚層に掘り進んだ場合 断層は地カクの一部が重力または横圧力の作用によつて垂直および水平分力の合力の方向に動いて地カクにくい違いを生じたものである。同じ場所が何回も動くのでそのつど岩石は破碎され、くい違いの面には粘土ができる。逆断層は傾斜緩かであるが正断層は垂直に近い。断層粘土は断層角礫を含むが、粘土はきわめて水密であるために水を透さない。アースダムの心壁粘土のごとくである。しかしそれに接する断層破碎帯は硬い岩石が破碎されて無数のキレツを生じているので、きわめてよく水を透す性質を持つている。このような厚い粘土を持った断層が垂直に近く立っているときに、トンネルがこれを貫こうとする場合にどのようなことが起るであろうか。日本における数多いトンネル工事中に断層粘土を貫いて湧水および土砂流出で困難した例は実に数が多い。しかし普通の場合はトンネルが地表下あまり深くないことと、山脈横断型でなく山のスツに沿うトンネルの場合が多いので、湧水はあつてもまもなく減水してしまうので、大きな事故ともならずあまり困難なしに通過してしまう。ところが山脈横断型で地表下深い場合には、トンネルの両側から多量の水を集め、しかも水圧が高いので非常な困難をきたすのである。

丹那トンネルはこのような種類のトンネルとして最も代表的のものである。全体で6カ所の大きな断層があつたが、そのうち西口12000ftと東口9000ftのものが最も大きかつた。西口12000ftは、トンネルのほぼ中央に近く、丹那盆地の直下で地表下520ftの所を掘進した。断層粘土とその湧水で困難したのみならず、大湧水で困難している最中に昭和5年11月の北伊豆地震でこの大断層が7.5ft水平に移動したことは有名である。

この断層はトンネルと約60°に交わり断層粘土の厚さは約20mであつた。南側第一水抜坑がこの断層粘土を通過し終つたと同時に、大湧水は粘土を多量に押し出して水抜坑を約400ft埋め戻してしまつた。この大断層に到達するまでももちろん水はあつたが、水量は次第に減少していた。これは掘進とともに地下水面が低下していつたからである。しかるに断層粘土の背後の水は、粘土にさえぎられて本来の地下水位を保つている。ちょうどアースダムの心壁粘土に、穴があいたような結果となつたのである。丹那盆地には数年以前より地質調査のため深い垂直ボーリングが4本下されてきた。そのうち1本を地下水観測のために残してあつた。このボーリング施工中には水圧高い地下水が、地表面上高く自噴したのであるが、トンネル両口の切羽が次第に盆地に近づくに従つて自噴をやめ、ついに地表面下に低下していつた。これを毎日測定して地下水面の低下を観測していたのである。この断層の大湧水までは坑口の総湧水量41コで

あつたが、大湧水で急に87コとなつた。それは6月24日であるが粘土押し出しのため湧出口が次第につまつて、7月1日には坑口総湧水量はもとの湧水量にもどつた。このとき盆地ボーリングの地下水面水位は地表下82.5ftであつたものがその当日突然126.5ftまで降下し、7月2日から水位が上昇、次第に上昇率もにぶくなり8月11日には110ftとなつた(図-1, 2, 3参照)。これは明らかに断層背後の地下水の状態を示す。

このような高圧地下水が断層粘土を押し出すのでは、いつまでも断層通過はできそうもないので迂回孔を何本も掘り、各切羽から多数のボーリングをして、なるべく多くの水を排出せしめた。いずれも断層粘土に接した所で掘進をやめ、粘土の流出がないように水だけを排出するようにつとめた。また水圧が低い所ならば粘土層を楽に通過できるという見込みのもとに、約500ft手前に130ftのシャフトを切り上り、これより水平に進んで断層背後の水を抜いて低下せしめるようにつとめた。こう

図-1 断層粘土突破のときの湧水

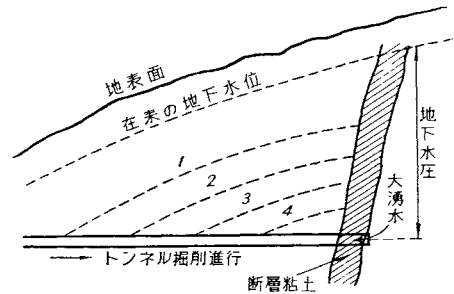


図-2 丹那西口湧水量と丹那盆地地下水位の関係

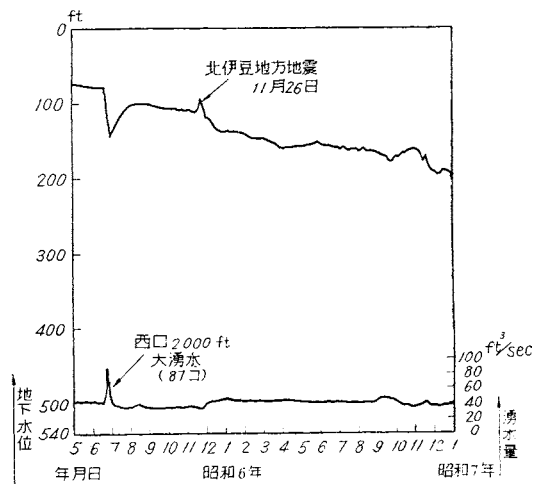
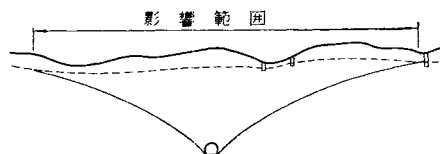


図-3



して迂回坑は合計 11 本を掘り、立坑も第三立坑まで掘った。また同時に北側第一迂回孔には十分なグラウティングを施し、これを突破口とした。最初の大湧水が昭和 5 年の 6 月で、グラウティングした迂回孔による突破に成功したのが昭和 7 年 6 月であった。

地震と地下水の関係に面白い事実がある。昭和 5 年 11 月 26 日の未明の北伊豆地震で丹那断層が動いた。このとき丹那盆地の地下水位観測ボーリングの水位は急激に 14 ft 上昇、また坑内湧水も地震と同時に増加した。盆地の地下水位はまもなく低下したが坑内湧水の増加量は約 6 カ月続き、地表各地の湧水もその量は一様に増加した。ただし沢を流れているような水は地震と同時に涸渇した。これら地表の状況も約 6 カ月で以前の状態にもどった。地震の震動により地中の空ゲキの水が、瞬間的に量はわずかながらも急速な運動をしたために地中の空ゲキ、岩石キレツ、断層破砕帯等すべての部分が一瞬にして掃除されたような状態となつたものと考えられる。

水路トンネルにおいては北海道足寄のトンネルの例がある。この断層はトンネルと斜交していたので、湧水崩壊後に断層が空洞として残つた。地質は粗粒の軽石、荒砂等をふくむ凝灰岩であつたが、これに断層が生じたので、断層部分は非常に軟かい砂質粘土状の充填されたようなものであつた。それで水とともに流し出されたのである。このようなものを通称ガマと称し、新しい凝灰岩地帯にはときどき見られるものである。

(e) 河底または海底の場合 河底または海底の場合にはトンネルの上方に無限の水源を有する場合であつて、前記断層通過のときのように、多数の水抜坑によつて地下水位低下を待つことは絶対にできない。ゆえに最初に記したごとく、関門ではグラウティングと圧気シールド工法によつたのである。ダム地点の地質調査のために河底を横断する坑道が掘られることがある。この場合は調査のみが目的であつて、トンネルを作るのではないから一般に特殊工法は用いない。河岸に立坑を掘り下げ、その下端にポンプ場を設け、そこから河底を横断する方向に掘進する。坑内の湧水量と排水能力との関係が重要である。御母衣においては左岸の立坑は 4 in ポンプ 9 台を必要とした。それで湧水が多いにもかかわらず河を横断して対岸の大断層の背後まで掘進することができた。ポンプの用意不足の場合、または切羽湧水多量で危険となつたため、途中で中止した事例もある。河底坑道位置は河底下の岩石厚 7 m 以上とるのが普通である。河底の坑道においては河の水面以下あまり深くないので、水圧はわずかであるが、地下が浅いため一般にキレツは多い。また小断層は必ずあるので、これらキレツからの湧水は非常に多い。特に断層によつて破砕を受けたカ所ははなはだしい。河底または海底ではないがトンネル全延長にわたつて明らかに地下水水面以下を掘ることがある。

例えば地下発電所より長い放水路によつて放水口へ導くような場合である。この場合は山のスロに沿うが、一方は川であるから川の水位下の水圧はトンネルに加わり、トンネルの湧水量いかにかわからず、この水圧と水量は減少せしめることができない。ゆえにこの場合は水底トンネルと同様、防水と揚水能力の問題となるので、地質とその透水性を考へて十分な準備が必要である。

#### 4. トンネルと地形の関係

山間溪谷に沿うトンネルは山のスロをぬう。山間の鉄道、例えば飯田線は天龍川に沿つて下り大嵐において山脈を横断する。土讃線は吉野川に沿つて上流に至り、根曳峠にて山脈を横断して高知平野に下る。また発電用の水路はほとんど河川に沿うものであるが、流域変更によつて発電するものは山脈横断型のトンネルを必要とする。溪谷に沿い山のスロをぬうトンネルは、延長の割合に湧水量少く、山脈横断型は湧水量が多い。溪谷に沿うものは山体の地下水を片側のみから受けるが、山脈横断型は両側から受けるので湧出量が多い。

#### 5. トンネル湧水と地下水の変化

溪谷に湧水があり、ここへ出る地下水は山体の地表面にはほぼ平行している場合、山上のある点の地下水面から湧水点までの比高を  $h$  とし水平距離を  $l$  とすれば  $h/l$  は動水傾斜であつて、湧出口の断面を  $A$  とし、湧出量を  $Q$  とすれば  $Q = K \cdot \frac{h \cdot A}{l}$  であるから降雨による浸透補給量が  $Q$  より大ならば  $h$  は高くなり、 $Q$  もまた増大する。浸透が  $Q$  より小ならば  $h$  は低下し  $Q$  もまた減少する。山沿いのトンネルの湧水はこのような水の出かたをする。この公式は山体が一樣の砂のごときのもので、これに水が飽和した場合の公式で、実際のトンネルは岩質やキレツの変化が多いので、この公式をあてはめることはできない。部分的に  $K$  の値が種々の値をとつてからである。しかし山全体として全部を平均すれば何か  $K$  の値に似たようなものがあるはずである。 $Q$  と  $A$  が変わらない場合に、 $K$  が小ならば  $h$  は大となるか、あるいは  $h$  も変わらないとすれば  $l$  が小となる。つまり透水性の小さい山にトンネルを掘つた場合は湧水があつて、地下水が低下してもその影響は遠方までおよばない。

山脈横断型トンネルにおいて透水性大なる地質においては地下水低下の影響は遠方におよび、しからざるものは近い。この関係は丹那トンネルにおいて地表の井戸、湧水地、溪流の流量等、数百の点について長年測定して、トンネル坑内湧水量との関係を調べた結果、トンネル中央を南北に延びる大断層を境界とし、東側は安山岩質集塊岩、温泉余土等が多く、西側は砂層、キレツある泥岩層、砂集塊岩等が多かつたので平均した透水系数が異なる。東口の地下水水面低下による地表影響範囲よりも西口の影響範囲の方が大であつたことは、山体の平均透水性の相違と考えられる。

トンネル掘削前は直上高く地下水面があつたが、坑内湧水によつてトンネルに基面まで地下水が下つた場合、両側に動水傾斜にた新しい地下水面が考えられる。この場合工事中の湧水は新旧地下水面間の水、すなわち山体の含水量が出てしまうのであるから、それだけ加わつて出るので大湧水となることもあるが、掘削後基面まで低下したときの湧水は、影響範囲内に降つた雨の浸透補給が新しい地下水面上に積つて、それが動水傾斜面に沿つて水圧を加え、坑内への湧水となるのであつて、溪谷の自然湧水の場合と全く同様である。ゆえに溪谷の自然湧水は、降雨なき渇水期にも湧出して溪谷に流入し、このような湧水がいくつか集まつて、溪谷の渇水量を形造しているのであるが、トンネルの湧水も同様に降雨なき渇水時期にも湧出する水は同じくその山の渇水量であるはずである。この事實は地質異なる種々の山脈横断型トンネルの湧水量と、その地方の河川渇水量とを比較したところ、非常によく比例していた。

表—1

トンネル名	100 m 当り湧水量 (l/sec)	付近の渇水量 (l/sec) 1 km <sup>2</sup> 当り	地 質
丹 那 西	20.15	33.1	集 塊 岩
丹 那 東	11.91	33.1	〃
宮	7.75	15.9	石 英 斑 岩
清 水 土 合	7.66	17.4	閃 緑 岩
仙 山 東	5.10	—	〃
呉	1.29	—	風化カコウ岩
海 部	0.66	14.8	粘 板 岩
仙 山 西	0.24	—	凝 灰 岩
下 久 野	0.23	10.09	風化カコウ岩

表—1 で見ると明らかなように、丹那のごとくカコウ火山性の山地においては 100 m 当りの湧水量が多く、同時に河川の渇水量も非常に多い。これに反し粘板岩、風化カコウ岩のごときは、トンネルに湧水量も少ないが河川の渇水量も少ない。地表の諸湧水点または溪流内へ湧出する地下水が、トンネル内への湧出と置きかわつたと考えてさしつかえない。この理論をさらに進めるならば、これから掘ろうとするトンネルの湧水量を、地表河川渇水量により、ある程度の予測ができると考えられる。

### 6. トンネル完成後の湧水量

トンネル工事中には湧水がともなうのは普通であつて、ある場合は大湧水となる。そして坑口の合計湧水量は非常に多いことがある。これは山体の含水量が人工的なトンネル掘削ということによつて一時に流出したからである。こうして在来の地下水面は低下し、トンネルの両側もしくは片側に新しい地下水面ができて、その地質に応ずる動水傾斜をもつて一応地下水面は落ちつく、これが新しい地下水面である。そしてその面はハイパボラのような形を持つて旧地下水面に一致し、その点までが渇水影響範囲となるのである。降雨のあつたときはその浸透によつて地下水面が上昇するので、トンネルの湧出量が増し影響範囲が小さくなり、渇水時期が永く続く

トンネル湧出量は減少し、渇水範囲も拡がる。しかし雨は1年を通じて降つたりやんだりするから、その影響には限度がある。最少限度の量すなわちその地方に長く降雨のなかつた季節における湧水量は渇水量であつて、いつまでも続く性質のものである。ただしこれは大きなトンネルの場合である。

小さなトンネルにおいては渇水時期では、地下水低下のためトンネルの湧水は全く渇濁してしまうが、雨季には相当に湧水がある。その時間的關係も早く現われる。ところが中位のトンネルで山脈横断型のトンネルでは完全に渇濁することはないが、雨の影響は数日後に現われその増加率は急激でない。長大トンネル、例えば丹那のごときは季節的に雨季の影響が数カ月後に現われ、全体として増減の差は非常にわずかである。これは範囲が広く、地表下深いために浸透した雨が地中を降下して、新しい地下水面に合するまでに非常に時間を要するので、季節的の雨以外の豪雨のごときは平均されてしまう。

### 7. その他の問題

完成したトンネルはコンクリート巻立によつて湧水が止つたように見えるが、実際はインバートのないものはもちろんのこと、インバートがあつてもジョイントその他のキレットから湧出するので下水に水は流れる。従つて地下水は一度下つたものは容易に上昇しない。水路の圧力トンネルのごときは、ろう水防止に十分の考慮がはらわれている。グラウティングは十分に施工され、ジョイントに鉛のコーキングを施されているところまでである。しかし断水して坑内検査のときは、もどり水と称して巻立より噴水のごとく水が何か所も噴き出すのであつて、完全防水ということではできない。それゆゑトンネル掘削によつて一度低下した地下水位は、容易なことで以前の水位まで回復することはできない。かりに完全防水ができたとしても、地中の空ゲキ率と降雨の浸透率とを考へて、1年間の雨量が何ミリ地中に貯えられるかを計算するならば、数百 m 低下した地下水が以前の水位にもどるためには非常な年月を要するはずである。ましてトンネルの巻立は完全防水でないから地下水圧が上昇すれば、ろう水も増大するので、とても以前の地下水面に回復することはできない。湧水が自然に止る現象として寒地における坑口付近の湧水が凍結することがある。この場合巻立裏側に接する地質が空ゲキある凝灰岩のような場合は、氷圧が働いてコンクリート巻立を變形させる。しかし春になつて氷が融けるとまたもとへもどる。

今後のトンネル工事として津軽海峡の海底トンネル、明石海峡がトンネル案となつた場合、あるいは近くは御母衣、奥只見等の長大なる放水路等は、いずれも水面以下のトンネルで無限に渴れることのない水の下を掘らなければならぬ。丹那のごとく数多き迂回坑によつて多量の水を出して地下水低下をはかることはできない。今

後グラウティングその他湧水を防止する方法の発達が最も望ましいことであるが、大湧水の難所を突破する意気込みを失わないことが何より大切である。

#### 【追記】 トンネル湧水の特殊な地質

トンネル湧水例として火山堆積層に断層がある場合の珍しい例がある。火山地方は安山岩、集塊岩、凝灰岩等が普通であるが、特に固結の程度が少ない凝灰岩に断層があつた場合、トンネル工事として非常に困難を生ずる場合がある。

北海道の火山堆積層には新旧いろいろの堆積物があるが、現在火山形の明らかなもの、従つて頂上近くには噴気孔、あるいは硫気孔のあるものでは火山裾の堆積物もきわめて新しいので、固結の程度もあまり進んでいない。例えば大雪山の西斜面にある江卸発電所の水路のごときは、ある部分は堆積火山砂を通過したことがある。このときは全く固結していない砂層であるために、トンネルが浅いにもかかわらず大湧水があつて、迂回坑を数本掘削し、なおかつ通過できなかつたので、斜坑によつて切上つて地下水の水圧が少い上部の水を抜いて、地下水低下を計り、ようやく通過した実例がある。しかしこれは前述の山脈横断型でなかつたので、まもなく地下水低下の目的を達したので貫通できたのであるが、山脈横断形でこれに断層があつた例として、北海道の足寄水力発電水路工事の実例がある。

北海道中央東部の大雪山の東南方に糠平ダムを計画した。これにともなつてその水を糠平発電所、芽登第一発電所、芽登第二発電所、足寄発電所と順次発電するのであるが、これらは糠平大貯水池より東方へ向うものであつて、南北へ流れる河川を数回横断して造られるものである。従つてその末端の足寄水力発電地点も、水路延長5220mであつて、一つの河川から次の河川に導かれる形のものである。この部分は大きな山地の裾なので、水路トンネルの山頂は低平なる台地状の山地であるが、トンネル上最高150m程度の高さを有する山地であつて、やはり山脈横断型のトンネルである。

水路全延長の終端に近い所が高い台地を横断するカ所であるが、これを通過するときに非常に困難に遭遇した。

地質はほとんど火山裾の水平層堆積物であつて上部が帯広層、下部が池田層である。池田層は主として火山礫凝灰岩であつて、その下には凝灰質砂岩、頁岩、泥岩等の互層がほぼ水平に堆積し部分的には溶結凝灰岩、石英安山岩等が介在している。このような地層に水路トンネルを掘削したところ、上流部は安山岩または硬い凝灰岩の部分が多かつたのであるが、下流部は主として火山礫凝灰岩で、これに断層があつた場合、湧水で非常に困難をともなつたのである。

水路上150m程度の広い台地を横断するためには、適当な横坑位置もなかつたので斜坑を掘つた。

第三斜坑は延長212mあつて地質は全部火山礫凝灰岩であつた。最下底位に到達したとき5m手前より少量の湧水があり、矢板を打つて進んだが、一部を動かしたところ2mほどの空洞があつたので、再び矢板を打込んだ

ところ5m<sup>3</sup>/minの泥水が5分間湧出した。斜坑の坑底であるので、ポンプで排水しながら苦心するうち何回も湧水をくり返し、ついに24時間内に8回の湧水によつて212mの斜坑が135mの位置まで水没した。排出土砂の埋没区間は下部より20mであつた。この状態から考えると垂直に層状またはポケット状の間ゲキがあつて、それに火山灰が詰つていて地下水が飽和され、斜坑の掘削進行が近ずくと、ついに水圧によつて残存壁が破れて、介在物が水とともに押出されたと考えられる。これにともなつて周囲から地下水が集るときに付近を崩壊させ、一時それによつて詰るので流出が止るが、地下水位上昇とともに水圧が増大して、一度詰つたものが破られて再び坑内に押出す、ということをくり返したと考えられる。その後崩壊の手前より迂回坑を掘り水を抜くことを試みたが、同様の場所に近接したとき再び湧水があり、切羽より5m間は瞬時にして膝を没するほどに流出物で埋没し、上部のポンプも上段のポンプも第二次の噴出で押し切られ、ついに坑口より85mまで湛水してしまつた。その後排水につとめたが内部の崩落の大音響が数回くり返され、空洞が崩壊していることを知つたので、この坑道を中止した。

このため斜坑の位置を変更し、もつと地表下浅いもの、すなわち水路を山の斜面に近づけたが、同様なことが起つたので、ついに水路施工基面と同一標高より横坑によつて掘削し、湧水があつてもポンプ排水の必要がないよう、水路としては非常な迂回をして、ようやく完成することができた。しかし二度目の斜坑のときも大湧水に遭遇した。このときは斜坑底より水平坑に進んだが、断続的な出水は山鳴りとともに押しよせ、つぎつぎと土留めを乗り越え、ついに波を立てて押しよせ、ポンプは埋没し、このとき約4分間に1000m<sup>3</sup>の水量と見られた。斜坑内に水が上つているので、再びポンプ排水を行つたが、再び大音響とともに濁水が大波を立てて押しよせ、作業員は辛うじて退避した。湧水量約400m<sup>3</sup>/minであつた。以上の

写真一 北海道足寄発電地点水路トンネル内のガマ

ようなことがたびたびあつたが、これはガマと称する特殊の垂直軟弱帯であつたためである。ガマは軟質の火山灰質凝灰岩が断層によつて軟弱帯となり、地下水によつて流動しやすい状態となつたのである。

