青函トンネル海底部の地質

——断層と湧水——

北川修三*・前田憲一**

The Geological Outline of the Undersea Portion of the Seikan Tunnel

Shuzo KITAGAWA and Kenichi MAEDA

Abstract

There are many faults in area of Kunnui Formation, but few in Kuromatsunai Formation.

It seems to the reason of the geological age and of which Kunnui Formation is mainly underlain by solid character's rock (tuff, lapilli tuff, and tuff breccia) and Kuromatsunai Formation is fluid quality (mudstone).

The biggest fault is F. 10 fault which appeared in about 33 km. The thrust length seems to about five hundred meters, because Fukuyama Formation is in fault contact with Kunnui Formation (Kn 4).

About one kilometer of Kunnui Formation (tuff and mudstone, Kn 2~Kn 4) near the fault is squeezing ground, and the maximum earth pressure amount to 2.0 MPa.

Excavating of main tunnel carried out by the circular short bench (with spring line drift) method after elavolate grouting.

On the other hand, during the construction there were four accidents of water intrushing in the area of fault zone.

Every restoration work took about five to twelve months.

In the fault zone, as advance boring came to deadlock, investigation for proving was carried out by short drilling (coring and noncoring) from working face and side well.

To prevent water intrushing, new technologies of measuring must be developed to grasp the process of seepage and loosening of the ground. This is very important task for maintenance of tunnel.

Meanwhile, chemical quality of seepage water is almost near that of sea water and is alteration sea-water type by exchange of ion, and partially is hot-spring type.

1. はじめに

海底部のトンネル掘削では、特に断層の位置、破碎帯の規模および滞水状況を早期に把握し、綿密な止水注入並びに掘削の計画をたてることが最も重要である。青函トンネルでは海上からの調査による海底地質図（縮尺 2 万分の 1）を参考にして、抗道の地質調査結果（先進導坑、作業坑では縮尺 1/200、本坑では縮尺 1/1000 の地質図を作成）および先進ボーリングから得られる情報に基き、切羽先方予想図（縮尺 1/1000 で数百メートル間の地質並びに湧水状況を記載したもの）を作成して工事のための基礎資料としたが、断層破碎帯およびその周辺

の影響帯では先進ボーリングが難航し、切羽からのコアボーリングやさぐりさつ孔（通常は 1 孔につき数 10 メートル）により前方探査を行なわざるをえず、破碎帯の規模や滞水状況を十分に調査出来ないことがあった。また一方、止水注入後のさぐりさつ孔（チェック孔）でも止水注入の効果を十分に把握出来なかったことがあり、いずれも断層破碎帯の部分で 4 回の異常出水事故を経験している。

本稿では主として、異常出水の原因となった断層の性状と海底部の湧水の水質（化学分析結果）についてその概要を述べる。

なお、本稿は応用地質 24 巻 第 3 号の「青函トンネル海底部の地質（その 1）——地質調査方法と地質の概要——」、24 巻 第 4 号の「青函トンネル海底部の地質（そ

* 日本鉄道建設公団本社

** 日本鉄道建設公団青函建設局

の2)——層位と不整合——」に続くものであり、地質層序表(その1, 表4)等を参照していただきたい。

2. 断層について

2.1 津軽海峡西口付近の断層の分布状況

津軽海峡西口付近一帯の地質図(図-1)によれば新第三紀訓縫層より下位の地層分布域で断層が多く、それより上位の八雲層や黒松内層の分布域では極めて少ない。これは主として岩質に起因するものと考えられ、最も広く分布している訓縫層と黒松内層を比べてみると、訓縫層は、泥岩部分もあるが火山礫凝灰岩や凝灰角礫岩を主体とする礫を含む脆性の硬質岩で構成されているため、地殻変動を受けた際に断層を生じやすく、一方ほぼ均等の細粒子からなる軟質泥岩を主体とする黒松内層は訓縫層に比べて脆性度が低い^{くんぬい}ため断層の少ない褶曲構造を生じやすいものと考えられる。坑道の掘削結果を見ても黒松内層の部分ではトンネル料程 29.4 km の向斜軸付近で最大落差 15 m の断層が認められたが、断層の数は少なく大半は落差 0.5 m 以下の面なし断層であり、訓縫層の部分では落差数 10 メートルから数百メートルに達するものが数多く認められた。また、訓縫層の中の断層では、断層面に沿って玄武岩等の岩脈が貫入していることが多く、破碎帯や変質粘土帯が生じている。

最も落差が大きく、破碎帯の広い断層は、トンネル料程 33 km 付近に出現した F.10 (F. は Fault の略で、海上からの調査の段階で名付けられた断層名)で訓縫層とその下位の福山層(トンネルルート付近では新第三紀層の最下位層で、本地域の基盤岩である古生層の上に不整合でのっている)が断層面で接しており落差数百メートルに達するものと推定される。福山層は熔結凝灰岩や安山岩質凝灰岩などの硬質岩からなり、これが硬質で脆性の古生層(陸上部では主として片理の発達した粘板岩からなり、海上弾性波探査の結果では、P 波速度約 5.0 km/sec)に接しているため地殻変動の影響が、大きな落差の断層となって表われたものと推定される。

2.2 断層の性状

2.2.1 竜飛斜坑 1222.80 m 付近(水深 25 m, 土被り 215 m)の出水断層

(1) 地質および調査の概要

最初の異常出水地点の断層であり、図-2 に示すように、ガラス質安山岩と凝灰岩層(凝灰質シルト岩及びその上位の砂質凝灰岩)の間に坑道に斜交して玄武岩と安山岩の岩脈が貫入している地帯で、貫入する以前は断層であったと推定される。このうち玄武岩の部分に断層すべり面(N18°W 65°NE)および角礫状の粘土化した部

分がある。これらの地層は、陸上部の竜飛安山岩類の一部であり、北海道側の訓縫層の最下位の Kn1 に対比させている。

図は、断層突破後の坑道状況を示しており、異常出水の発生した時点(切羽位置 1222.80 m)では、注入横坑の G₂ は掘削されていない。出水以前には、先進ボーリングの TB3 号孔が実施されており、出水切羽付近では、坑道の右側壁から右へ 10 m 離れて天盤の上方 20 m の位置にあり、断面図には描かれていない。また、切羽からのコアボーリング B41, B42-1, B4 横坑からの B42-2 が実施されている。TB3 号孔では深度 362~365 m まで玄武岩の破碎帯、それ以深は、砂質凝灰岩となっており(いずれも図の右側で範囲外)、多量の湧水があったため、セメンテーションで多大の時間を要し、ボーリング自体が難航した。(ワイヤライン式のコアボーリングで掘進長 521 m で 11 箇月を要した)一方、切羽ボーリング B41, B42-1 は破碎帯と推定される部分で掘進不能となっているが、湧水は無かった。

以上により、この付近の玄武岩岩脈の走向がほぼ南北方向で、坑道と斜交する傾向が認められていたこともあって、先進ボーリングは右側 1 本だけであるが、1217.00 m の切羽前方に多量の地下水を胚胎した安山岩と玄武岩の破碎帯があることが推定され、切羽止水注入が実施された。[注入時の 1 孔当り最大湧水量 1000 l/min, 最大湧水圧力 25 kgf/cm², 注入孔数 36 孔, 薬液注入量(LW) 259 m³, セメント注入量 28 m³]

(2) 異常出水状況

昭和 44 年 2 月 13 日, 1222.80 m に達した際、切羽の左下に変質した軟弱な安山岩が出現し、約 50 l/min の湧水があった。125H 型支保工を 1.3 m 間隔で建込み、矢板で左側壁を縫地し、切羽にも約 2 m² の鏡押えを行った。

2 月 14 日、右側の堅固な安山岩に発破をかけ、ずりを 2 台(約 5.4 m³)取った時、4 時 30 分頃より切羽の左側約 1/3 が坑口側に押し出される(崩壊量約 10 m³)と共に湧水が 1 m³/min に増加し、125H 型支保工 6 基の左側壁側が坑口方向に凸に変形した。湧水は、左側壁に出現した黒色ガラス質安山岩と玄武岩脈(部分的に粘土化している)の境目(隙間)から顕著に認められ、間歇泉のように放出と停止をくり返ししながら次第にその量が増加した。間隙水圧が上昇して割目に詰った粘土が流された時濁水となり、これが次第に澄んだ水となって流出した後湧水が一時止り、再び濁水が流出するものと考えられる。2 月 15 日 6 時 50 分、左側からのみ流出していた湧水は急にその量が増加すると共に、アーチ部から

図-2 竜飛斜坑 1220 m 付近地質平面図及び縦断面図

も湧水が流出し、土砂は切羽から支保工4基目まで押し出された。この時点で湧水量は約 $4 \text{ m}^3/\text{min}$ であった。その後約10時間後、最高の $11 \text{ m}^3/\text{min}$ となり、以後次第に減水し、2日後約 $5 \text{ m}^3/\text{min}$ に着いた。なお湧水の水質は海수에極めて近いものであることが化学分析の

結果判明した。〔水没区間長 151 m, 流出土砂埋没区間 15 m (土砂量約 300 m^3)〕

(3) 復旧工事の概要と掘削後の観察

バルクヘッドコンクリート構築後、 G_2 横坑を掘削し、図に示すように G_2 , B_4 の両横坑からコアボーリング

43-1 から 43-7" までを実施して玄武岩や安山岩の岩脈の走向等を把握した後、復旧のための止水注入が実施された。〔注入時の1孔当り最大湧水量 1500 l/min, 最大湧水圧力 25 kgf/cm², 注入孔数 241 孔, セメント注入量 2118 m³, LW 注入量 348 m³, その他薬液注入量 82 m³〕

掘削は周壁導坑先進上半先進工法(図の施工順序参照)によって行われた。メッセル工法により周壁導坑を掘削し、コンクリートにより埋戻し後、上半、下半及びインバート部分を施工している¹⁾。インバートコンクリート打設部分の底盤の観察で、セメントグラウト脈は玄武岩の角礫状部に最大幅 30 cm のものが1条認められ、また角礫状部の一部から 80 l/min の湧水があった。安山岩岩脈と凝灰岩層の境界には 3 cm~8 cm 幅のセメントグラウト脈が連続して入っており、境界付近は変色しているが堅固である。

(4) 異常出水の原因について

断層破砕帯付近に多くの水道があり、グラウトで一時充填されていた部分が掘削に伴う緩みにより開口し、水圧によって脆弱な部分が破壊されたためと考えられる。

2.2.2 33 km 付近 F.10 断層 (本坑 33.0 km 地点で水深 60 m, 土被り 119 m)

(1) 地質および調査の概要

F.10 および出水断層 (昭和 49 年 1 月 8 日, 北海道側の作業坑 3509.60 m で異常出水のあったところで次項で述べる) が図-3 に記載されている。

F.10 は走向がほぼ南北で、傾斜の変化の激しい逆断層 (32 k 950 m 付近で他の断層で切られて不連続となっており、作業坑では NS 65°~70°E, 本坑では N 5° W 90°) で、作業坑で訓縫層 (Kn 4 の褐色泥岩) とそれより下位の福山層 (安山岩質凝灰岩) が接していることから落差は数百メートルに達するものと推定される。

この断層の影響を受けているためと考えられるが、周辺一帯は、膨張性地山となっており、先進導坑および作業坑の先進ボーリング(ワイヤライン式コアボーリング)がモンモリロナイトを多含する泥岩や凝灰岩の分布域で難航し、工法の変更を余儀なくされた。作業坑では 3 k 041 m から開始の SB-9 号孔は 223 m で掘進不能となり、それ以降は切羽から数 10メートルのさぐり孔(ノンコア)やコアボーリングによって前方探査を行ないながら掘進している。その後ボーリングの試験を重ねて二重管リバース工法¹⁰⁾が開発され、作業坑から本坑調査のためのコアボーリング MB1~MB8, および ①~⑩が実施され、F.10 および出水断層が探査された。

本坑の地質は大別すると、④ 33 k 200 m~33 k 500 m 間

は軟質の凝灰岩~泥質凝灰岩とやゝ硬質の褐色泥岩の互層部分で断層が多い。(時代は Kn 2 に属する) ⑤ 33 k 000 m~33 k 200 m 間は F.10 の破砕帯に沿った最も軟弱な地帯(粗粒凝灰岩——C. Tf——の一軸圧縮強度は 30 kgf/cm² 前後)で Kn 3 に属する。⑥ 32 k 800 m~33 k 000 m 間は、F.10 破砕帯を含み、貫入岩の玄武岩及び福山層の安山岩質凝灰岩の分布域で地下水を胚胎している。⑦ 32 k 760 m~32 k 800 m 間は出水断層破砕帯となる⁷⁾。

本坑の地質は、上記ボーリングの他、図に示すように作業坑側壁(本坑側)の弾性波探査結果(受振点間隔 3 m 及び 5 m)からも予測されており、次に述べる土圧測定結果と共に本坑掘削のための資料となっている⁶⁾。

(2) 土圧測定について

上記 F.10 に沿った Kn 2 および Kn 3 の分布域で、まず、作業坑、先進導坑でストレインゲージ、カールソン型ひずみ計およびロードセルにより土圧を測定し、その結果に基いて本坑での土圧を推定して岩盤分類を行っている。

土圧測定について概要を述べると、最大土圧は先進導坑で 200 tonf/m², 作業坑で 150 tonf/m² 程度であり、この付近では、一般に掘削後約 20 日間で平衡に達しており、20 日目の土圧を 100% とすれば、2 日目で 50%, 5 日目で 75%, 10 日目で 90% と大きい土圧が非常に早く発生している。

本坑では、後に述べる周壁導坑および上半部で測定しているが、ほぼ想定通り最大値は 200 tonf/m² に達している。また、鉛直土圧は、水平土圧より一般に 30~40 tonf/m² 多い⁸⁾。

(3) 掘削結果について

F.10 に接近した Kn 3 の分布域で、作業坑、本坑共に掘削が難航し(作業坑では湧水がなかったので止水注入を行わずに F.10 を突破しているが、本坑では入念な注入が行われた)、図に示すようにそれぞれ縫い返しを行なっている。特に本坑では 33 k 200 m 付近で強大な土圧のために鋼管支保工の沈下ならびに座屈が著しく、上半部分をコンクリートで埋戻しを余儀なくされ、それ以後スプリングラインの位置に周壁導坑を先進させてコンクリートで中埋め後、円形ショートベンチ工法で掘削するスプリングサイロット工法が採用されている。作業坑でのロードヘッダーによるショートベンチ工法に対して本坑でのスプリングサイロット工法というそれぞれ不良地質に対処した工法が F.10 の方向に沿って採用されていることから岩盤状態を対比することが出来る。

弾性波探査結果では、動的ポアソン比 0.38~0.43,

図-3 32 k 700 m~33 k 500 m 間，作業坑・本坑地質平面図及び縦断面図

動的ヤング率 $2.8 \sim 6.0 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ の値を示しており、岩盤としての性状は相当不良な状態である⁶⁾。

2.2.3 吉岡作業坑 3509.60 m (本坑換算 32 k 746.85 m) 付近 (水深 58 m, 土被り 134 m) 出水断層

(1) 地質及び調査の概要 (図-3 参照)

前項の F. 10 に近接する部分で、作業坑が F. 10 を通過して堅硬な福山層の安山岩質凝灰岩に入ったため、3470 m からショートベンチ工法から発破による全断面掘削工法に変更して掘削が行われた。3502 m で断層に遭遇して破砕帯に入り、3509.60 m に達した時点で、変状著しいため縫い返しを行なっている。

先進ボーリングが行われていないため、切羽からさぐりさつ孔により前方を探索しているが、破砕帯は探知されていない。

湧水については、この切羽の近傍でさぐり孔により2度探知されている。1度目は切羽 3445 m から左上方 16 m 地点で、1000 l/min の湧水があったが3日後 44 l/min に減少した。水質分析の結果は、塩分濃度が低い (総イオン量が海水の約 1/3) のものであった。

2度目は、切羽 3467 m から 50 m 地点で 360 l/min の湧水があったが1日後に枯渇したため、溜り水と判定され、止水注入は行なっていない。

(2) 異常出水状況

昭和48年12月15日に3509.60 m に到達後、正月休みをはさんで縫い返し (3498.75 m から馬蹄形から円形支保工に変更) を行なっていた時に出水している。

昭和49年1月8日に3509.60 m 切羽より、1.40 m 後方の天盤の厚さ 20 cm の吹付けコンクリートをピック掘りしていたところ、5時30分頃土砂を伴った 360 l/min の湧水が間歇的に流出してきた。(これ以前には切羽付近には湧水がほとんど無かった) 約1日間この水量が前後する脈動状態が続いた後、最高約 12 m³/min に達し、3日後には 200 l/min に減少した。なお、水質は海水に極めて近いものであることが化学分析の結果判明した²⁾。〔水没区間長 800 m, 土砂埋没区間長 60 m (約 1,100 m³)〕

(3) 復旧工事の概要と掘削後の観察

まず、流出土砂の法尻である 3445 m にバルクヘッドを構築し、その後方側壁からコアボーリングを3孔 (1孔平均 70 m) 実施して破砕帯を調査した。斜め左に向けて行なった No. 3 孔の 43.5 m 付近で 360 l/min の湧水 (湧水圧力 19 kgf/cm²) があり、同時に灰白色の多孔質な浮石質凝灰岩 (流出土砂にも多量に混入しているもの) の存在を確認した。その後、3460.50 m の位置にバルクヘッドを構築し、その手前に埋没していた機械を

撤去し、流出土砂部分および周辺地盤部分に注入を行なってから土砂を取り除いて前進して 3484.90 m にバルクヘッドを構築した。続いて 3450 m 付近右側の注入用ビットから2本のコアボーリング (No. 4 孔は 54 m, No. 5 孔は 75 m) を行なって崩壊地点の 3509.60 m 付近を探索し、断層破砕帯およびその上部の硬質な熔結凝灰岩と、さらに上部の軟質な粗粒凝灰岩の存在を確認した。ここで再び流出土砂並びに周辺地盤に対して注入を行うため、3450 m 付近の安定した安山岩質凝灰岩の分布域に (坑道の左右に) 注入横坑を掘削して注入を行ない、3507.15 m まで前進して再びバルクヘッドを構築した。この前進に併行して右側の注入横坑から二重管リバース工法を採用して先進ボーリングを行なった。このボーリングで 35 m から破砕粘土に遭遇し、48 m から多孔質凝灰岩、71 m から玄武岩に変わり、1000 l/min の湧水があった。さらに 87 m 付近から砂質凝灰岩になって 1200 l/min の湧水と共に 4 m³ の土砂が流出した。89 m 以降は局部的にコアは破砕され、湧水も多かったが安定した凝灰角礫岩であった。このボーリングの結果、坑道では破砕帯が 3530 m 付近まで続き、3545 m に玄武岩岩脈があり、多孔質の凝灰岩を挟んで多量の地下水を胚胎していることが判明した。

その後、3507.15 m から地盤注入を行なった後、3519.20 m まで掘削して再びバルクヘッドを構築した。支保工は肉厚 8.2 mm の 8 インチ鋼管を用い、建込後、モルタルを鋼管の中に注入している。工法はショートベンチ工法を採用した。

崩壊部分の 3507.15 m ~ 3509.60 m 間は多孔質の凝灰岩が流出したもので、この間の支保工3基はアーチの肩付近で切断され、天盤からの岩塊でねじり倒されている。

3519.20 m から地盤注入後、破砕帯を続けて掘削したが、3524.20 m から切羽の肌落ちが目立ち、上半の掘削面にレジンアンカーを打設した。(異形棒鋼 $\phi 22 \text{ mm}$, $l=5 \text{ m}$) 3529.70 m から多孔質の凝灰岩が現われ、浸出水があり、剥落が多くなったため 3530.70 m で掘削を止め、バルクヘッドを構築した。これにより出水断層を突破したが、破砕帯は、主として、破砕による粘土、粘土化したソーブストーン様の岩石からなり、一部に硬質な礫を主とした断層角礫が認められた^{2), 7)}。

(4) 流出土砂について

流出して坑道を埋めた土砂の礫の種類は、多い方から順に下記の通りであり、礫径は 2 mm から 60 ~ 70 cm 角まで雑多である。

① 赤褐色、緑色等の多様の色を示す粘土化した細粒

凝灰岩（ソープストーン様）

- ② 多孔質、珪質の石英安山岩、石英安山岩質凝灰岩
- ③ 細円礫を散含あるいは層状に含む細粒凝灰岩、他に、緑色斑点を持つ泥質凝灰岩、安山岩質凝灰岩

上記の①は安山岩質凝灰岩の背後に、また②の石英安山岩質凝灰岩は①の背後に分布していることが今までのボーリング等の調査で明らかになった。このことから、流出土砂の供給源は、主として出水地点の直上部であり、側方からの移動はほとんど無かったものと考えられる⁷⁾。

(5) 異常出水の原因について

- ① 断層破砕帯は角礫状の部分があり、従って透水性が高く地下水貯留能力があった。
- ② 断層の両側は亀裂に沿ってかなりの地下水を胚胎しうる福山層からなっていた。
- ③ 破砕帯部分はピックで容易に掘れる程度で、せん断強度が小さい。

以上の環境条件から掘削後、坑道の周壁および切羽をコンクリート吹付けにより保護したことにより、坑道背面に浸出水が蓄積され、その水圧が破砕帯のせん断強度を越えたために異常出水となったものと考えられ、流出後急激に減水した理由としては急激な大量の流出により、水路に目詰りを生じたためと考えられる⁷⁾。

2.2.4 竜飛作業坑 3689.90 m (本坑換算 16 k 890.00 m) 付近 (水深 78 m, 土被り 102 m) 出水断層

(1) 地質および掘削前の調査の概要 (図-4 参照)

Kn1の凝灰岩の中に玄武岩岩脈が貫入している地帯で、断層破砕帯（影響帯）の中で出水事故が起きている。

吉岡のF.10付近と同様に崩壊しやすい変質した凝灰岩と玄武岩のためにワイヤライン式の先進ボーリングが難航し、右側の16 k 415.50 mからのTSB-7号孔が276 mで掘進不能となっており、左側1本 (TSB-8号孔)しか実施しておらず、しかも湧水源となった玄武岩の岩脈は、その幅の変化が激しいためボーリングでは探知されていない。従って先進ボーリングでの湧水も少なかった。このため、切羽からのコアボーリング、さぐりさっ孔によって湧水並びに破砕帯を探知し、止水注入後掘削しているが、掘削中に湧水並びに変状を認め、増枠を施工して掘削続行中に異常出水となった。〔上記破砕帯に対する2回の切羽止水注入 (16 k 830.90 m および 16 k 864.80 m から) では最高湧水圧力 18 kgf/cm²、1孔当り最大湧水量 1600 l/min、注入孔数 41 孔、注入量 528 m³〕⁷⁾

掘削は 16 k 869.60 m から 9 m 間は粘土化した破砕

帯を含む岩質となったので円型断面で 150H 型支保工間隔 0.9 m、吹付けコンクリート (20 cm 厚) 併用のショートベンチ工法とし、16 k 878.60 m より 10 m 間は地質がやや好転したので、インパート付き 150H 型支保工間隔 1.0 m とし、ピック掘り、一部発破工法で掘削直後、吹付けコンクリート (20 cm 厚) を施工した。この 10 m 間で支保工に変状が認められたので切羽側 5 m 間に増枠を 5 基施工した。その後支保工ピッチを 0.7 m に変更し、縫地によりピック掘りで 1.4 m 掘削し 16 k 890.00 m に達した。この時点で右側踏前より約 20 l/min の湧水があった。

(2) 出水状況

昭和49年12月5日19時、作業坑 16 k 890.00 m で支保工の建込みを終了し、吹付けコンクリートを右手側より施工開始した。吹付け中、切羽の右側踏前付近にある残湧水約 20 l/min が 30~50 l/min に脈動的に増加した。3.5時間後に、6 m³/min に増加し、以後約5日間最高 10 m³/min に達する脈動をくり返した後、3.6 m³/min に減少した。水質は塩分濃度が海水の約 70% とやや低い、海水が地山を浸透してくる過程でイオン交換を行なって変質したものと考えられる⁴⁾。〔水没区間 130 m, 土砂埋没区間 70 m (土砂量 1,300 m³)〕

(3) う回坑による断層突破までの経過概要

TSB-8の結果より左側 (西側) に玄武岩の貫入の少ない地帯があることが推定されたこともあり、先進ボーリング TSB-8B による追加調査の後、16 k 765 m より左側に分岐して進むことになった。その後分岐した新作業坑の掘進に併行して、旧作業坑の分岐点付近および、新作業坑の 16 k 850 m 付近の注入横坑から7本のコアボーリングを行なって断層破砕帯を調査した後、注入横坑から出水部分に対して止水注入が実施された⁴⁾。

調査ボーリングの結果、16 k 800 m~16 k 900 m の付近では、岩脈を伴う破砕帯の幅は 20~25 m で東側限 (上盤との境界) は比較的明瞭に境されており、上盤の地質は砂質凝灰岩、泥岩 (Kn2 に相当する) などであることが判明すると共に、断層の一般走向は N10~15° W と推定された。さらに 16 k 900 m~17 k 100 m 間については、切羽からボーリング2本が実施された結果、断層はうねりながら次第に作業坑に近づく傾向を認めたので、17 k 100 m 地点から、作業坑はさらに 20° 西方へ向って掘進し、17 k 200 m 付近から断層の走向とはほぼ一致する方向で直進することになった。その後も切羽ボーリングや TSB-11, TSB-12 および TSB-11 の先進ボーリングによって破砕帯が坑道にほぼ平行していることを確認しながら進行している。

地質は 17 k 450 m 付近から（石英安山岩質）凝灰岩より上位の砂質凝灰岩、泥岩等の堆積岩類が優勢となり、岩盤状態は安定し、17 k 600 m 付近まで掘進は順調に進んだ。

この間に行われた先進ボーリング TSB-12、TSB-11 によって前者は 522～530 m、後者は 213～223 m 間で、それぞれ破砕帯とこれに伴う湧水（それぞれ 1600 l/min と 3000 l/min でいずれも水質は海水に極めて近いもの）が認められた。

この破砕帯がその後実施された TSB-11 横坑からの追加ボーリングによって出水断層の延長に相当するものと判定され、掘削の結果 17 k 673 m 右側壁から 17 k 687 m 左側壁に抜ける断層として認められた。破砕幅は 20～25 m で、地質は凝灰岩を取り込むが上下盤共に褐色泥岩である。その走向傾斜は N25°W 80°NE であり、上盤側派生の断層面として 17 k 691.4 m 右側壁で N30°～43° W80°NE、17 k 696.7 m 右側壁で N42°～52° W 72°～80°NE が認められ、この間が破砕帯を形成している。この破砕帯の掘削は止水注入後、150H 型円形支保工を 0.7 m 間隔で建込むピックおよび自由断面掘削機（アルピネマイナー）併用によるショートベンチ工法によって行われた。17 k 700 m 以降の出水断層は左手に抜けたが、この追跡については 18 k 200 m 地点で TSB-14B ボーリングによって坑道から約 170 m 離れた位置で確認した。したがって 17 k 700 m～18 k 200 m 間では走向 N25°W 前後であることが確認された⁷⁾。〔上記破砕帯に対する 2 回の切羽止水注入（17 k 642.60 m およ

び 17 k 671.50 m から）では最高湧水圧力 19 kgf/cm²、1 孔当り最大湧水量 1300 l/min、注入孔数 108、注入量 1017 m³〕

なお、その後この断層は、本坑等でその延長部分をそれぞれ入念な止水注入によって無事突破しているが、その概要は表-1 の通りである⁷⁾。

(4) 異常出水の原因について

玄武岩岩脈が水道となっており、掘削に伴う緩みにより亀裂（グラウトで一時充填されていた部分を含む）が開口し、不透水層の凝灰岩層背後の間隙水圧の上昇によって脆弱な破砕部分が破壊されたため土砂流出を伴う異常出水となったものと考えられる。

2.2.5 吉岡作業坑 4588.50 m（本坑換算 31 k 667.95 m）付近（水深 76 m、土被り 128 m）の 5.6（出水）断層

(1) 地質および掘削前の調査の概要（図-5 参照）

Kn1 の砂質凝灰岩（一軸圧縮強度 100 kgf/cm² 前後）、火山礫凝灰岩（同 140 kgf/cm²）の分布域の断層であり、4536.30 m からの第 20 回注入、4557.80 m からの第 21 回注入を実施後、掘削して出水切羽に到達している。第 20 回注入では、4615 m までを注入しているが、切羽から 40 m 付近で 200～400 l/min の湧水があり、また上向きのせん孔では 40～44 m 付近でジャミングをしているので、断層破砕帯の可能性のあることが考えられているが、坑道の左側を進んでいる SB-10 先進ボーリングでも断層を探知していないこともあり、特に不安定な岩盤とは判定されなかった。

表-1 竜飛出水断層の坑道別地質状況と掘削工法

坑 道 名	破砕帯区間長	上盤の地質	下盤の地質	掘 削 工 法
作 業 坑 (17 k 690 m 付近)	25 m	褐色泥岩	褐色泥岩	円形ショートベンチ工法（ピック及び自由断面掘削機） 150H リング支保工
第 5 連絡坑 (17 k 020 m 付近)	26 m	硬質褐色泥岩	粘土化著しい軽石質石英安山岩質凝灰岩	円形ショートベンチ工法 150H、200H リング支保工
先 進 導 坑 (17 k 690 m 付近)	60 m	硬質褐色泥岩	モンモリロナイトを多含する軟質凝灰岩及び火山礫凝灰岩	全断面掘削工法（ピック及び小発破） 200H 馬蹄形支保工（インバートストラット付）
第 4 本 坑 (16 k 800 m 付近)	60 m	凝灰質砂岩及び褐色泥岩	小割目の発達した軟質凝灰岩	サイロット工法 250H コンクリート巻厚 1.0 m

その後実施された右側の SB-11 先進ボーリングは、出水切羽付近では坑道右側壁から 10 m 離れて、高さは天盤の上方 19 m の位置にあるが、深度 202 m (作業坑程で 4566 m 地点) で 4000 l/min の湧水と共に 3~4 m³ の土砂流出があった。このため、4557.80 m で切羽を止め、補助注入として第 21 回注入を行なったが、9 孔で総湧水量が 69 l/min と湧水は少なく、92 m³ を注入して掘削が続けられた。(第 20 回注入では、注入孔数は 29 孔、注入量 290 m³)

掘削中、4576 m 付近から亀裂および湧水が多くなり、4584.30 m から支保工間隔を 1.0 m から 0.7 m に縮め、縫い地で上部半断面を鏡止めしながら全断面をビック掘りで進めたが出水切羽付近の天盤や側壁から数 10 l/min の湧水があった⁷⁾。

(2) 出水状況

昭和51年5月6日、2時25分、4588.50 m の切羽鏡止め作業中、天端より 15 l/min の湧水があり、(4 m 手前の) 4584 m 付近の湧水 (30 l/min 程度) が止った。1 時間後に 4 m³/min、さらに 11 時間後に最高の 85 m³/min に達し、3 日後約 20 m³/min、以後少しずつ減少しながら、2 箇月後 16 m³/min まで減少。なお、水質は海水に極めて近いものと判定された⁵⁾。〔水没区間長、作業坑 3015 m、本坑 1395 m、土砂埋没区間 74 m (約 1000 m³/min)〕

(3) 迂回坑による断層突破までの経過概要

作業坑 1573 m および本坑 34 k 604 m 付近にバルクヘッドを構築した後、強制排水を行なって、流出土砂の法尻の 4515 m に再びバルクヘッドを構築した。その後、ルート変更が検討され、出水切羽から 139 m 後方の 4449.30 m より西側へ迂回坑を掘削することとし、迂回坑の進行方向に 3 孔 (1 孔につき 100 m 前後) の調査ボーリングを行ない、また先進導坑からも作業坑へ向けて破碎帯調査のため 5 孔 (1 孔につき 100 m 前後) の調査ボーリングを行なった後、止水注入しながら掘削して断層を突破している⁵⁾。〔破碎帯に対する注入としては 4609.28 m からの第 22 回注入と 4639.38 m から第 23 回注入があり、1 孔最大湧水量は、200 l/min、最大湧水圧力 20 kgf/cm²、合計注入孔数 165 孔、注入量 1726 m³〕

作業坑は 4662 m から断層破碎帯に入り、断層の走向傾斜は N10°E 60°SE、地質は火山礫凝灰岩で、岩片を手で容易に崩せる程、軟弱化しており、4664 m、4669 m、4674 m の 3 箇所に厚い粘土層 (最大 40 cm) が確認され、肌落ち等が顕著になり不安定な状態となった。断層破碎帯は 4690 m までの 28 m 間であり、断層上盤の

境界は、粘土帯を伴わず漸移的に良好な地山に移行している。掘削工法は、4661.77~4718.48 m までショートベンチ工法 (発破工法) で、150H 円型支保工を 0.7 m 間隔で建込んでいる。なお、この断層は、出水月日にちなんで、5.6 断層と名付けられた。

その後サイロット工法で掘削した本坑での破碎帯は、東側導坑で 31 k 711 m~31 k 700 m (11 m 間)、西側導坑で 31 k 706 m~31 k 701 m (5 m 間) に出現し、下盤側の境界が明瞭な厚さ 5 cm 以内の褐色粘土を伴う逆断層 (走向傾斜 N30°E 40°SE) で垂直落差は約 30 m。作業坑のように厚い粘土は認められないが、粘土化して軟化した火山礫凝灰岩の中に、すべり面の顕著な小断層や亀裂が集中的に発生している。

なお先進導坑では破碎帯が認められず、31 k 610 m 付近 (先進導坑距離程 4110 m) の断層が 5.6 断層の延長部分と判定された⁷⁾。SB-10 ボーリングでも破碎帯が認められなかったこともあり、破碎幅の変化の激しい断層と推定される。

(4) 異常出水の原因について

断層破碎帯付近に水道があり、掘削に伴う緩みにより亀裂 (グラウトで一時充填されていた部分を含む) が開口し、水圧により破碎帯中の脆弱な部分が破壊されたため、土砂流出を伴う異常出水となったものと考えられる。

2.3 今後の課題

異常出水箇所の地質の共通点は、湧水源となっている透水性の地質と掘削後緩みの生じやすい破碎帯等の軟弱な地質が共存していることであり、事前の徴候としてはボーリングやさぐりさっ孔等でジャミングや多量の湧水が認められていること、また、直前の掘削中に湧水や変状が認められていることが上げられる。

異常出水防止のためには、坑道周辺の滞水状況、緩み状況を把握することが必要であり、これは非常に難しい問題であるがボーリング孔の利用等による各種測定以外にはないと思われ、今後のトンネルの保守管理のためにも重要な研究課題と考える。

3. 湧水の水質

青函トンネルでは、先進ボーリングや坑道掘削時の湧水が海水の直接浸透水かどうかを現場で迅速に判定するため鉄道技術研究所化学研究室に研究並びに分析技術指導を委託し、現地試験室 (鉄道公団直轄) に適合した水質簡易分析法が確立された。

現地での分析は、先進ボーリング、切羽注入時の穿孔および坑道掘削後の切羽、側壁等の湧水を採取して行な

表-2 異常出水におけ

異常出水 年 月 日	出水箇所 (本坑換算斜程)	水 深 m	土被り m	最 大 湧水量 m ³ /min	水 温 °C	pH	化 学	
							Na ⁺	K ⁺
S44. 2.14	竜飛調査斜坑 1222.80m	25	215	11	—	8.5	405	7.0
S49. 1. 8	吉岡作業坑 3509.60m (32k746.85m)	58	134	12	19	8.4	435	6.4
S49.12. 5	竜飛作業坑 3689.90m (16k890.00m)	78	102	10	19	7.6	309	6.1
S51. 5. 6	吉岡作業坑 4588.50m (31k667.95m)	76	128	85	17	8.0	405	10.3

図-6 青函トンネル先進導坑、湧水水質分析一覧図(ヘキサダイアグラム)

っており、主な分析項目と方法は、

PH はガラス電極法、アルカリ度は中和滴定法、Na, K イオンは蛍光分析法または原子吸光分析法、Ca, Mg イオンは EDTA 滴定法 または原子吸光分析法、Cl イオンは硝酸銀滴定法、SO₄ イオンは硫酸バリウム比濁法

で行なっている⁹⁾。

海底部の湧水は海水に近いものが大半を占めるが、浸透の過程でイオン交換等によって変質海水型になっているものが多く、部分的には温泉型のものが認められる⁸⁾。

る水質分析結果一覧表

分 析 値 (epm)				SO ₄ ⁻⁻⁻ /Cl ⁻ (epm 比)	水質分類	記 事
Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻⁻			
40	109	501	41	0.08	C	
50	87	522	49	0.09	C	
41	72	387	41	0.11	C	
36	137	532	58	0.11	A	湧水の水温は、S51.5.14以降 14°Cまで下っている。

先進導坑での代表的な水質のパターンを図-6に示す。

なお、前述の4回の異常出水の水質分析結果を表-2に示す。

参 考 文 献

- 1) 北原正一 (1970): 湧水後の青函トンネル, 施工技術, 3-3.
- 2) 北村 章・鶴田博昭・佐々木幹夫 (1975, 1976): 青函トンネル作業坑の破砕帯の施工 (1), (2), 土木施工, 16 巻 15号, 17 巻 1号.
- 3) 佐賀政家・長野利幸 (1976): 海底下の膨圧 200 t/m² に挑む新技術〈青函トンネル吉岡工区本坑〉, 鉄道土木, 18-1.
- 4) 鈴木和也 (1975): 青函トンネルの施工 (7), 海底出水と復旧工事, トンネルと地下, 第6巻 12号.
- 5) 鶴田博昭・川下正行・佐々木幹夫 (1976): 青函トンネル作業坑 (吉岡方) の異常出水, トンネルと地下, 第7巻 10号.
- 6) 日本鉄道建設公団青函建設局 (青函トンネル物理探査研究委員会) (1974, 1975, 1976): 北海道方海底部坑内物理探査報告書.
- 7) 日本鉄道建設公団青函建設局 (1972~1977): 海底部坑内地質調査報告書, その1~その16.
- 8) 青山芳夫・立松英信・阿部 弘・松村宮吉 (1979): 青函トンネル坑内水の地球化学的研究, 鉄道技術研究報告, No. 1107.
- 9) 滝永 進 (1984): 国鉄における水質調査法——計画とデータ解析の基礎的指針——, 鉄道技術研究所速報, No. A-84-112.
- 10) 松下芳亮・前田憲一 (1983): 水平長尺先進ボーリング, 鉄道土木, Vol. 25, No. 3.
(昭和63年2月13日受付, 昭和63年4月22日受理)