

青函トンネル調査工事報告

北原正一*

1. はしがき

青函トンネルについて、鉄道建設審議会は、昭和 45 年 9 月 16 日「資金調達の見途が次第、可急的速かに、工事線に昇格させることが適当である」との主旨の答申を運輸大臣に行ない、昭和 46 年 4 月には工事線に指定される見通しとなった。これに先だち、昭和 45 年 5 月 19 日に日本鉄道建設公団は、青函トンネルの調査報告書を運輸大臣に提出し、その中で、「先進ボーリングによって前方の地質を予知しながら、セメントを主体とする注入によって、海底部の湧水を止め、また軟弱な断層破砕帯を強化することができる、ということを中心として、海底部でも安全にトンネルを掘削することができ、青函トンネルの完成により、北海道と本州の輸送改善がなされ、その国家的経済効果は絶大なものがある」との意見を述べている。以下、調査結果の概要と技術的な問題点について述べる。

2. 調査の経過

津軽海峡の横断ルートとしては、東ルートと西ルートが考えられるが、水深と地形地質などを考え、最初から西ルートに限って調査を行なった。調査は昭和 21 年に開始され、地質調査を主目的として、ボーリング、物理探査、潜水観察、その他外部から行ないうるあらゆる手段で実施されてきた。その間、昭和 30 年には海底部の地質図を作製し、さらに昭和 36 年には海上からの海底部の地質探査法として新しく登場したスパーカー（音波探査）の力を借り、詳細な海底部の地質図を作製した。その後、海底部の地質図は再度の精密調査の結果、昭和 44 年に改訂された。また昭和 30 年には、海上保安庁に依託して、2 m コンターの海底地形図を作製している。

* 正会員 日本鉄道建設公団青函トンネル調査事務所所長

昭和 38 年、新たに内部から正確な地質状況の確認と、長大海底トンネル掘進上の技術的課題の解決をはかるべく、調査坑の掘削を始めることになった。

掘削はまず昭和 39 年北海道側調査坑から開始し、先進ボーリング、止水注入、吹付けコンクリートなどの試験を実施しつつ、斜坑 1210 m を掘削し、さらにトンネル掘進機を用いて水平調査坑の掘削を進め、昭和 44 年 9 月、比較的大きな断層 F 50 を突破し、現在また F 10 断層を入念なセメント注入と側壁導坑式掘削法により、ほとんど突破したところである。1 月 31 日現在の切羽は、斜坑底から 1768 m である。本坑予定線に沿った補助調査坑も、45 年 5 月からトンネル掘進機が稼働し始め、現在の切羽は、斜坑分岐点から 1460 m である。その間、水平調査坑で苦勞した F 50 断層を難なく突破している。

本州側調査坑は、昭和 41 年着工し、北海道方と同様な諸試験を実施しながら、斜坑 1315 m の掘削を進め、昭和 45 年 1 月斜坑底に到達、現在坑底設備を施工中である。水平調査坑の切羽としては、1 月末現在、116 m である。この間、竜飛安山岩中にある割目、岩脈の性状に留意し、ほとんど連続して止水注入を行ない、とくにその不良箇所、湧水多量箇所では、注入を入念に行ない種々の注入方法の研究を行なった。昭和 44 年 2 月、斜坑底より約 90 m 手前の位置で断層 F 15 に遭遇し、このトンネル工事において、ほぼ最大と思われる圧力を持った湧水を経験したが、入念な注入により、止水と地盤強化に成功し、今後の断層の突破に自信を得ることができた。

調査坑は、昭和 46 年 1 月末までに、本州側 1431 m、北海道側 4413 m、合計 5869 m 掘進した。

なお、技術的諸問題の解明においては、公団内に青函トンネル技術調査委員会を設け、学識経験者を委員に委嘱して慎重に審議を重ねてきた。またとくに、このトンネルの岩盤力学上の問題の究明については、土木学会に依頼して青函トンネル土圧委員会を設置していただき研

究を進めている。

3. 地 質

(1) 地形および地質分布

海峡付近では、最大水深 136 m の平坦部が南北に延び、その東西にそれぞれ 300 m 以上の海釜が存在する。この地域で卓越する構造軸の走向は、ほぼ南北であって、西より白神岬—権現崎、越越岬—竜飛岬および泉沢—襲月の 3 隆起軸と、その間に福島—小泊および木古内—今別の 2 沈降軸とが、それぞれ南北方向に存在している。これらの構造軸の近傍に、南北あるいは北北東、南南西の走向の断層がいくつか存在している（図—1）。

この地域は、古生層および先第三紀の花崗岩類を基盤とし、その上を新第三紀の中新世に属する火山岩、火山砕礫岩および堆積岩類が厚くおおっている。火山岩の分布は、とくに本州側に多く、新第三紀初頭の火山活動の中心の一つが本州側海底と考えられ、北海道側には、その砕礫岩が広く分布する。これらは、総称していわゆるグリーンタフ地域に属し、裏日本全体に広く分布するものの一部である。

海峡に分布する地質は、① 古生層、② 福山層（溶結凝灰岩）、③ 吉岡層（シルト岩、油母頁岩を含む）、④ 訓縫層（凝灰岩、シルト岩、火山礫凝灰岩）、⑤ 古期安山岩類（安山岩、火山角礫岩、凝灰角礫岩）、⑥ 八雲層

（硬質頁岩、シルト岩）、⑦ 黒松内層（シルト岩、砂岩）、⑧ 流紋岩、⑨ 玄武岩、⑩ 瀬棚層（礫岩、シルト岩）などで、トンネルの路線はこれらのうち ④～⑩ までの地質を通過する。その分布は図—2、3 のとおりである。

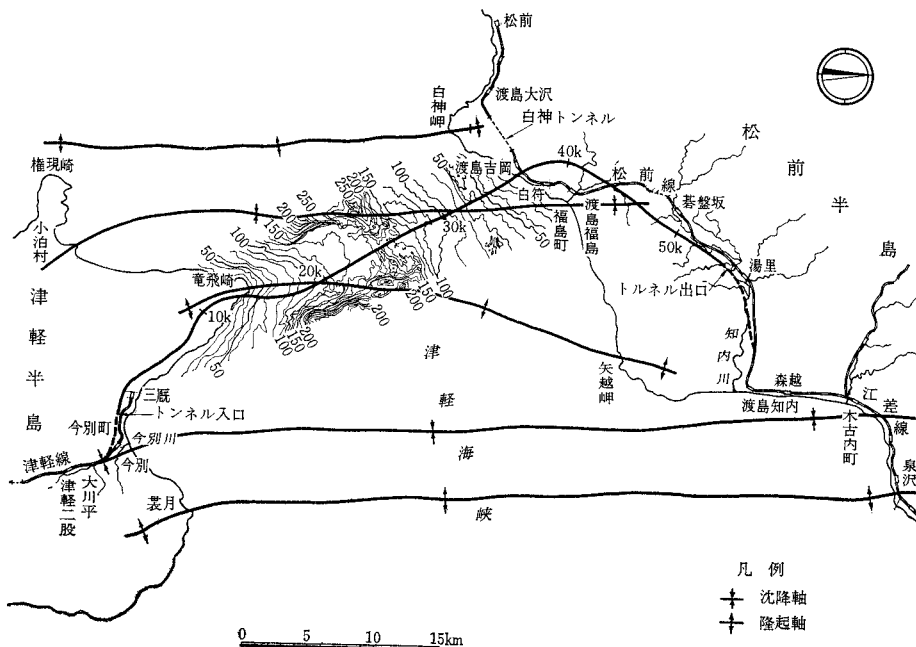
(2) 性 状

前述の岩石類の強度は、おおむね通常のトンネル掘削ではとくに問題のない地質である。これらの岩石の中で比較的水を通し易いのは、主として本州側にある安山岩類と、玄武岩類である。これらの割目は、セメントあるいは薬液の注入により、容易に止水できることがわかった。トンネルが遭遇する断層は、かなり顕著なものが海底部で 9 本あり、これらの周囲も割目が多く軟弱化しているが、慎重な計画で入念に注入を施工すれば、十分止水、固結できるものであると考えられる。

なお、海底下で遭遇する湧水は、本州側火山岩中ではほぼ海水に近いものであるが、北海道側凝灰岩中では、海水の影響はあまり受けていない。また、この水圧は、北海道側、本州側ともに土かぶりに関係なく、水面からの水頭にほとんど等しい大きさであることが確認された。

4. 先進ボーリング

前述のように、断層、湧水帯は、注入を主体とする入念な工法を用いれば、安全にトンネルを掘ることは可能であるが、それにはまず先方の地質、断層、湧水箇所を



図—1 海峡地形図

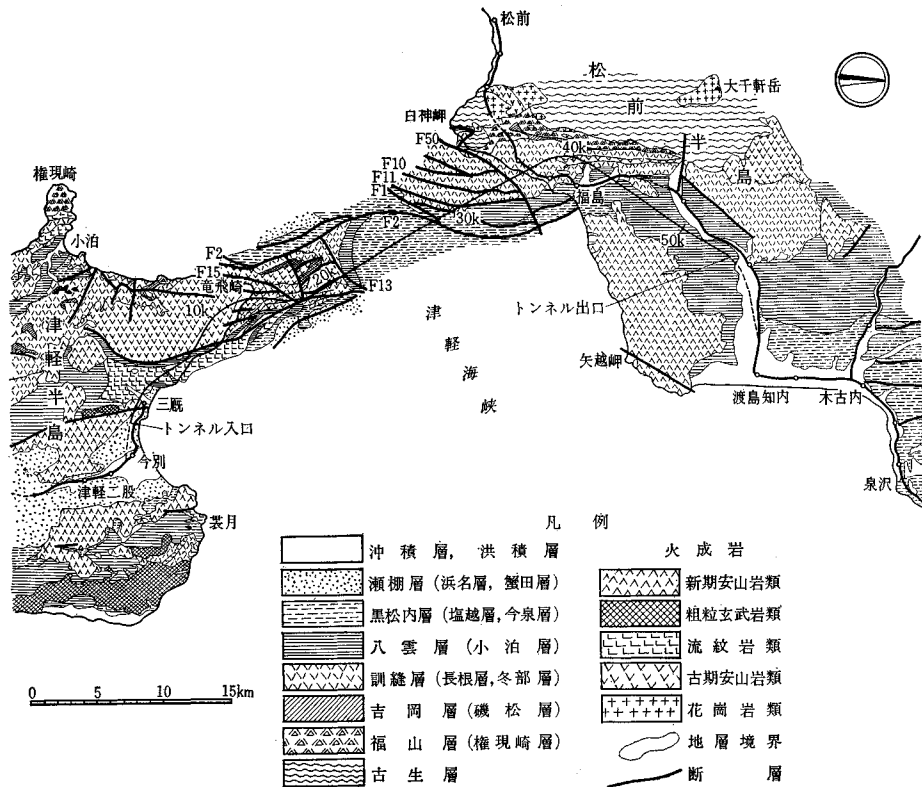


図-2 津軽海峡西口付近地質平面図

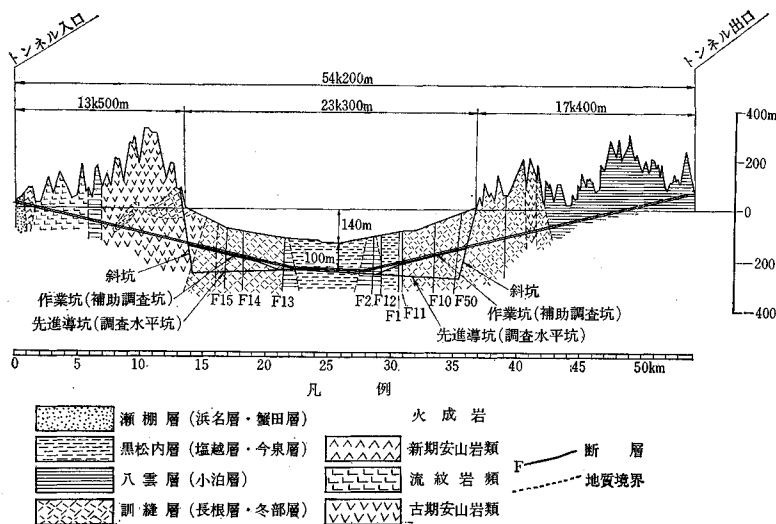


図-3 青函トンネル地質縦断面図

予知する必要がある。そのために、われわれは先進ボーリングを採用した。図-4は吉岡方の先進ボーリングの施工図である。

ボーリングの機械は、普通の垂直掘りのものを水平に用いたもので、800 m まで掘進実績がある。この先進ボーリングは、原則として切羽から掘るのではなく、横坑

を掘り、そこからトンネルに平行してボーリングし、前方の地質を探る。吉岡方はトンネル掘進機を使用している、その速度月進 300 m に合わせ、約 300 m おきにボーリング横坑を左右交互に設け、そこからボーリングしている。

いままでの調査経験により、このような先進ボーリングで目的を一応達成できることがわかった。しかし、問題がないわけではない。図-4でわかるように、水平ボーリングには孔曲りが生ずる。孔曲りに関しては、まずその測定、次に修正が必要である。測定にはトロパリーヤ

スペリーサンを使用している。これらは、ワイヤーの先の非磁性のコンテナチューブの中にコンパスを内蔵したもので、ボーリング孔の中に水でコンテナチューブを送り込み、孔の方向と傾斜角を測るものである。測定点の位置はワイヤーの長さで測り、方向と傾斜角はコンパスで測る。トロパリーヤは、その地点でコンパスを固定

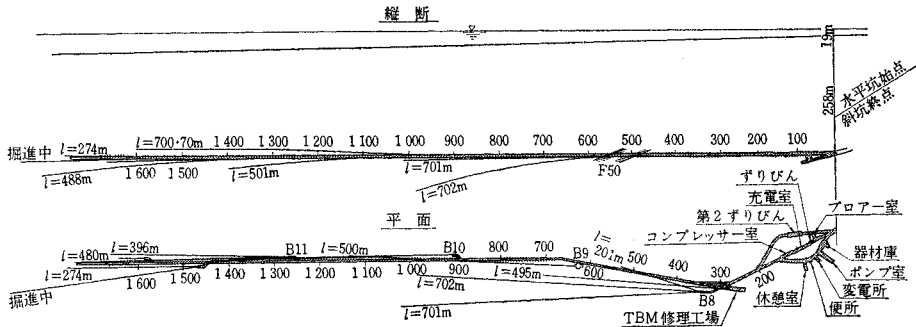


図-4 北海道方吉岡水平調査坑先進ボーリング図

し、コンテナチューブとの相対角度を測り、スペリールサンは、その角度および方位をチューブ内で写真にとって判定するものである。孔曲り測定の際には、通常ビットやロッドを抜かねばならないので、時間がかかる。掘進中に、ロッドを引き抜かず孔曲り測定ができるようにくふうする必要がある。修正には、弯曲部にセメントを注入し掘り直しているが、やはり時間がかかる。むしろ、曲りを修正するよりも、もう1本ないし2本ボーリングして、それらを総合して地質を判定したほうが得策の場合がある。孔曲りなしの掘削は、このような機械ではむつかしく、トンネルとの離れが30m以内になるように経験を積む以外方法がないがあまり容易ではない。前述のように、トンネル掘進機が月進300m進むときには、先進ボーリングはノンコアでない間に合わない。このようなときは、おおむね地質がよいので、それを確認するため、また、湧水点や悪い地質の位置を探るためにはノンコアボーリングでよい。地質を精査する必要があるときは、その部分だけコアを取っている。

さらに掘進長2000mの先進ボーリング機を開発し、目下試験中である。これには孔曲りの修正にアメリカのダイナドリルを併用している。また、ソビエト製のエレクトロドリルを輸入し、試験中である。これは、掘進長4000m級で石油の探査に使われているものであるが、掘進そのものの能率はよい。ダイナドリルもエレクトロドリルも先端部だけが回転するものであり、孔曲り修正には、先端に近くサブバントという1°程度の曲り管を使用している。いずれも掘進中に孔曲りを測定できる装置がないと、前述のように、孔曲り測定のつど、ロッドを引き抜かねばならず、全体の掘進能率は激減する。目下その測定装置を研究中であり、ソビエトからその装置インクリノメーターを近く輸入する予定である。

5. セメントおよび薬液注入

海底トンネルの掘削において、もっとも重要なことは、湧水を止めることと、水圧を受けている軟弱層を固

結強化することである。われわれはその手段としてセメントを主体とする注入工法を採用した。現在までの調査坑の注入の経験によって、今後遭遇するであろう岩石の亀裂からの湧水の止水はもちろん、断層の軟弱湧水帯の止水や固結に対して自信を持つことができた。竜飛調査坑では湧水が多く、ほとんど全区間注入による止水を行なってから掘削し、吉岡調査坑では、湧水箇所は連続しておらず、湧水箇所のみ注入している。

注入の主体は、セメントミルクの注入で、水セメント比100~600%程度で注入している。リークのあるときおよび早く注入液を固結させたいとき、ならびにセメントミルクが入りにくいときに、LW工法(セメントと水ガラスを使用)を用いている。また、さらに微細な空隙に注入するとき、とくに仕上げの注入においては、ユリロックやスミロックなどの、尿素系の注入材を用いている。セメントは、強度と耐久性や使用の簡便性などにすぐれ、廉価でもある。ポルトランドセメントの約半分の大きさ(おおむね40μ以下の粒子の大きさ)のコロイドセメントを開発し使用しているが、かなり成績がよいと考えている。

前述のように、湧水の水圧は海面からの水圧(最大28kg/cm²程度)を持っており、したがって、注入圧も60~100kg/cm²を用いている。竜飛斜坑の断層F15で経験したところによれば、約70kg/cm²の高圧で注入されたセメントや薬液は、軟弱な箇所へ強引に入り込み、軟弱部を圧迫し、脱水せしめて固結させている。注入液と軟弱部が一樣に混合されるのではなく、セメントあるいは、薬液の固まり(一部は混合したり浸透したりしている)と、圧迫されかなり脱水された軟弱部のある程度固結したものが、相当にしっかりした地盤を構成していることがわかった。

岩石の割れ目に注入された場合は、岩盤の強度はその岩石の強度に近いものと考えられるが、軟弱湧水帯に注入し、それを固結させた場合の当該地盤の強度が、どれほどであるかは施工上大切なことであるが、正確にはつかめない。何とかその点を解明するように、いろいろと

測定法を研究中である。竜飛の断層 F15 の突破にあたっては、注入後の地盤強度を 10 kg/cm² と仮定し、掘削面外側 10~12 m まで注入孔を配置して注入した。このとき、注入範囲をきめるのに参考にした一つの計算に次のようなものがある。

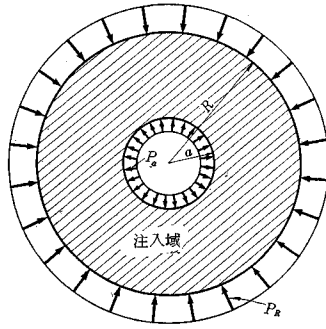


図-5 注入域と外力との関係

注入域内を一応弾性体と考えると、安定条件として次式が成り立つ(図-5)。

$$\frac{P_a + C \cot \varphi}{P_R + C \cot \varphi} = \frac{1 - \sin \varphi}{1 - (a/R)^2 \sin \varphi}$$

$$\therefore P_a = -C \cot \varphi + \frac{(P_R + C \cot \varphi)(1 - \sin \varphi)}{1 - (a/R)^2 \sin \varphi}$$

ここに、 a : 掘削半径

R : 注入半径

P_a : 支保圧力(支保工、覆工などの反力)

P_R : 注入域外圧

φ : 内部摩擦角

C : 粘着力

またこれを、しわい度合 $n = \sigma_{ca} / \sigma_{ta}$ (σ_{ca} は岩盤圧縮強度、 σ_{ta} は同引張強度) で示し、Mohr-Coulomb の強度説にしたがって $C \cot \varphi$ 、 $\sin \varphi$ を n と σ_{ca} に換算すれば、

$$P_a = \frac{-\sigma_{ca}}{n-1} + \left(P_R + \frac{\sigma_{ca}}{n-1} \right) \frac{1 - \frac{n-1}{n+1}}{1 - \left(\frac{a}{R} \right)^2 \frac{n-1}{n+1}}$$

ここに、 $\sigma_{ca} = 10 \text{ kg/cm}^2$ 、 $n = 3$ 、 $\varphi = 30^\circ$ とし、外圧 30 kg/cm² (水圧 25 kg/cm²、土圧 5 kg/cm²) と仮定すれば

$$P_a = -5 + \frac{3.5 \times 0.5}{1 - 0.5(a/R)^2} \text{ kg/cm}^2$$

P_a と R/a の関係は、図-6 のようになる。注入範囲の効果的な点としては、 $R/a = 3.5 \sim 4.0$ の付近である。 $a = 4 \text{ m}$ とすると、 $R/a = 14 \sim 16 \text{ m}$ となり、掘削面外側 10~12 m となる。もちろん、この論には大きな仮定がいくつ

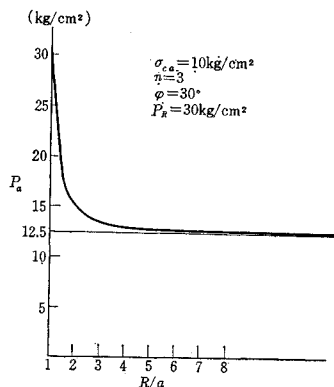


図-6 注入半径と内空半径との比と安定に必要な支保圧力の関係



写真-1 注入後の竜飛斜坑 F15 の断層破碎帯

があり、これがそのまま合うとは考えられないが、一つの目安としたのである。以上のようにして注入したのち F15 の掘削は慎重に行ない、まず周壁導坑をメッセル方式で掘ったが、前述のように軟弱部はよく固結し、ピックハンマーでなければ掘りにくい程度であり、土圧も大きなものは認められなかった(写真-1)。

高压湧水帯の突破の過去の実例を見ると、注入を併用していても、ほとんどが水抜坑(または孔)による湧水の減少によっている。F15 の場合、水抜ボーリングにより 80 万 t の水を排水したが、湧水量も水圧も減らなかった。また、水もほとんど海水に近かった。したがって、どうしても注入によって湧水を押える以外に方法はなかったが、注入によって高压湧水帯の突破に成功し、自信を得たことは大きな収穫であった。注入後の掘削にあたっては、なお安全のために、注入域の外側 5~10 m の所に水抜きボーリング孔を約 20 本掘り、毎分 10 t 程度の排水を継続したが、排水孔周辺の水圧は 25 kg/cm² のものが²、不正確ではあるが 17 kg/cm² くらいに下がった徴候が見受けられた。

注入によって改善される透水係数は、本調査坑において、岩盤かぶりの平均として $10^{-4} \sim 10^{-5} \text{ cm/sec}$ 程度のものが²、 $10^{-6} \sim 10^{-7} \text{ cm/sec}$ 程度に減少しているようである。

断層破碎帯や、軟弱湧水帯を除いては、覆工に水圧を掛けないような設計がよいと思う。湧水は排水に経費がかかる¹⁾ (1 m³/min の排水費は電力費だけでも 800 万円ほど²⁾) ので、つとめて注入によって止水する必要がある。しかし、掘削の進行を上げるためには、硬岩の場合 100 l/min 以下の水は止水しないで進み、あとから止水注入するのがよい場合もあると思うが、あとからの止水は比較的高価につき、また施工もしにくい欠点があるので、総合的に検討の必要がある。そのほか、注入に対しては注入範囲と設計外圧の関係、切羽注入のスピードアップ、多孔同時注入、より浸透し易い注入材料やより強度の出る注入材料の開発などの研究が必要である。また、先進

ボーリング、機械掘削などの関連から、より小型で強力な注入器材の開発と、施工法の研究も必要である。

6. コンクリート吹付工

トンネル掘削直後のコンクリート吹付けは、岩盤に密着した覆工ということで、岩盤の安定に良い効果があり本調査坑では、一次覆工として、二次覆工までの比較的長い期間の仮覆工として用いている。とくにトンネル掘進機で高速掘進を行なっている場合、その後方には、換気の風管やいろいろな管類、その他の設備がせまい空間(調査坑の掘削径 3.6~4.0 m)にあるので、普通のコンクリート覆工を行なうことは、著しく進行を阻害する。吉岡方調査坑では、厚さ約 10 cm の吹付けコンクリートを使用しているが、長期間の仮覆工として有効な方法である。

7. トンネル掘進機

爆破工法に比し、地山をゆるめないことと、高速掘進の可能性から、トンネル掘進機による掘削を試みた。北海道方調査坑において、圧縮強度 100~1 000 kg/cm² の凝灰岩層を掘削し、また兵庫県相生において圧縮強度 3 000 kg/cm² の流紋岩層の試験掘削を行ない、硬軟いずれの岩質に対しても切削能力がすぐれていることが判明した。吉岡調査坑に入れたトンネル掘進機はウォールマイヤー型で、掘削機構はフライス切削方式である。昭和 46 年 1 月 31 日現在総計 2 711 m を掘削した。調査坑の掘削径は 3.6~4 m である。当初は、圧縮強度 100~200 kg/cm² の軟質岩層の掘進に際し、肌落ちが多く難航したが、肌落ち防止と、グリッパー直後における H 型支保工のそう入に便利なように、ループプロテクターなどを取り付け改良した結果、支保工を入れながら月進 260 m、日進 26 m の掘進速度を出すことができ、有効な掘削方式

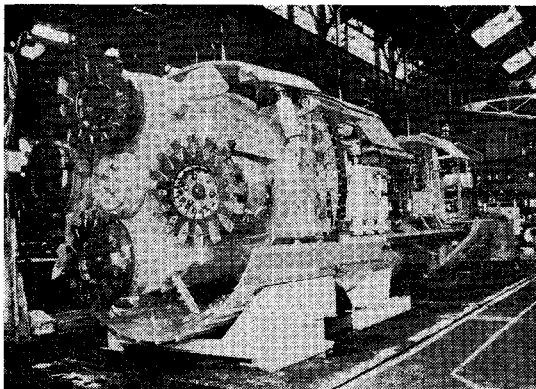


写真-2 ウォールマイヤー型トンネル掘進機

であることが立証された。また、この型の機械は、山が悪くなったとき、切羽におけるせん孔、注入、支保工などの作業のため、作業員がカッタードラムの間から、比較的容易に出入することができる。しかしながら、トンネル掘進機による施工において、地質の変化、とくに軟弱岩層に対する適応性、関連他作業との合理的な組合せなど、なお能率化すべき事項があり、さらには本坑用大型機の開発等についての研究を進め、逐次発展させていく必要がある。

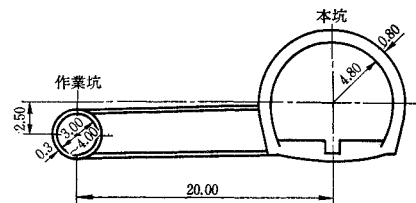
8. 掘削方法

以上の調査坑における諸種の掘削実績によれば、機械によっても、また爆破によっても、せん孔位置と火薬の種類、使用量などを考慮すれば、海底下の掘削が新幹線複線断面でも可能であることがわかった。

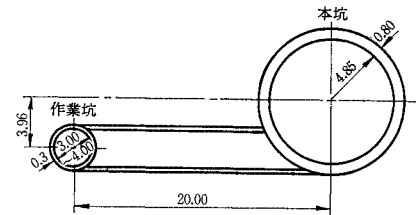
9. トンネルの工事計画

本トンネル計画では、海底部の延長ができるだけ短く水深の浅い大陸棚の下をとおり、かつ、本州側火山岩地帯では、できるだけ岩脈の少ないところを通るようにし海底部の最小かぶりを 100 m、勾配を 12% としてルートを選定すれば、トンネル延長は約 54 km となる(図-2, 3)。

このトンネルの海底部の施工については、次のように考えている。まず、地質の確認のため、従来の調査水平坑をそのまま先進導坑として先行させ、これよりやや遅れて、本坑に平行する作業坑(現在は補助調査坑)を掘進する。これらの掘進にあたっては、常に先進ボーリング



(1) 複線馬蹄形の場合



(2) 複線円形の場合

(単位 m)

図-7 トンネル配置図

により前方の地質を確認し、必要な場合は注入を行なう。

作業坑の掘進に遅れて進む本坑掘削に必要な止水注入は、この作業坑から前もって施工しておくほか、とくに地質不良の箇所については、場合によっては、あらかじめ作業坑から迂回し、本坑を小断面の導坑に分割して掘削するような特殊工法を採用し、本坑の覆工までを先行して完成しておく。

このように事前処理の行なわれたところを、本坑は両斜坑方から掘進してゆく。

なお、この先進導坑および作業坑は、工事中は、注入、ずり出し用、排水用として利用するほか、完成後は排水路、保守用通路等として利用するものである。

本海底トンネルの総延長は、前述のように約 54 km (海底部約 23 km) となる。なお、将来、新幹線とのおおす計画が決定された場合、新幹線と現在線を併用することを考えており、その場合、複線トンネルを 1 本にするか、単線トンネルを上下線べつべつに 2 本にするか、国鉄と研究中である。

以上の工事計画によると、準備工事期間を含め工期はおおよそ 8 年、工費は軌道、電気などを含めると総額で約 2 000 億円と推定されている。

10. 青函トンネルの経済的意義と効果

青函連絡船の輸送量は、北海道の開発および日本経済の拡大傾向を反映し、着実に増加してきた。また、今後の輸送需要は、東北本線などの輸送条件が現在のままであっても、昭和 42 年度(旅客 4 200 万人、貨物 6 900 万人)に対して、昭和 60 年には旅客は約 2.2 倍、貨物は約 2.5 倍が見込まれる。

トンネルで本州と北海道が結ばれ、さらに新幹線の完成など輸送改善が行なわれた場合には、時間距離を大幅に短縮し(東京—札幌間・5 時間 50 分)、多くの誘発を生み、昭和 60 年には旅客は新全国総合開発計画によれば、現在の約 6 倍、貨物は別の試算によれば、約 5 倍の輸送需要が見込まれる。

このように輸送需要が増大するほか、流通経費の減少により発生する生産所得の増加も非常に大きく、青函トンネルの建設が、わが国経済に与える影響は顕著なものがあり、北海道、東北にはきわめて大きな影響を与えるものと思われる。

トンネル完成後は、送電など多くの目的に利用することも考えられる。

11. む す び

以上、青函トンネルの調査結果の概要と技術的な問題点について述べたが、このような地質の海底トンネルは世界で初めてであり、前途に種々の障害があることと思う。われわれは大地に足を踏んまえ、着実に、謙虚に、これらの諸問題の解決にあたり、一日も早く、少しでも安く、しかも安全に完成させたいと思う。大方の諸賢のご指導、ご鞭撻を願う次第である。なお、トンネルボーリングマシンの実績については、本号 9~16 ページを参照されたい。

参 考 文 献

- 1) 粕谷逸男：海底トンネルの諸問題，土木学会誌，53 卷 11 号，1968 年 11 月。
- 2) 粕谷逸男：青函トンネルについて，日本ダム協会，トンネル工事講演集，第 2 集，1965 年 8 月。

(1970.11.6 受付)

コンクリート・ライブラリー案内

3. 異形鉄筋を用いた鉄筋コンクリート構造物の設計例 700 円 会員特価 600 円 (〒70)
10. 構造用軽量骨材シンポジウム 500 円 会員特価 400 円 (〒70)
14. 第 2 回異形鉄筋シンポジウム 1 100 円 会員特価 900 円 (〒90)
15. ディビダーク工法設計施工指針 (案) 700 円 会員特価 650 円 (〒80)
17. MDC 工法設計施工指針 (案) 700 円 会員特価 500 円 (〒80)
18. 現場コンクリートの品質管理と品質検査 700 円 会員特価 550 円 (〒80)
20. フライアッシュを混和したコンクリート

- の中性化と鉄筋の発錆に関する長期研究 500 円 会員特価 450 円 (〒50)
21. バウル・レオンハルト工法設計施工指針 (案) 500 円 会員特価 450 円 (〒80)
22. レオバ工法設計施工指針 (案) 700 円 会員特価 650 円 (〒80)
23. BBRV 工法設計施工指針 (案) 900 円 会員特価 800 円 (〒80)
24. 第 2 回構造用軽量骨材シンポジウム 1 100 円 会員特価 950 円 (〒80)
28. コンクリートの品質管理に関する基礎研究 200 円 会員特価 180 円 (〒50)
29. フレシネー工法設計施工指針 (案) 1 100 円 会員特価 1 000 円 (〒80)
<以下続刊>