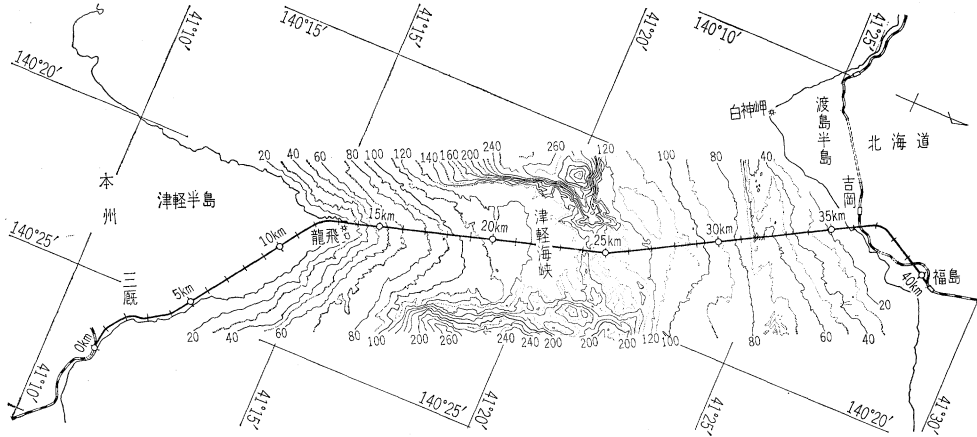


図-2 津軽海峡等深線図



面の両側は急崖をなしており、東側には水深 250 m、西側には水深 350 m の海盆がある。地形上からルートは当然この浅帯部の中に選ばれる。

なお北海道側の沖合には、1 km 内外の幅を持った海底砂礫丘が、東北東に延々とつらなっている。

3. 海底地質の調査方法

海底地質の調査方法といっても、その原則は陸上の場合となら異なる所がない。すなわち海底の表面を観察し、資料を採取すること、および海底下の深所をボーリングし、物理的に探査することである。しかし海底地質の調査は陸上のそれと異なり、種々の困難をともなっている。そのおもな原因としては、海底は厚い水の壁で隔てられていること、および海上作業は海況気象の影響を受けやすいことである。この水の厚壁を突破するためには、調査は非常に大掛りなものとならざるを得ない。また津軽海峡は海上平穏の日が少なく、このために作業期間は夏季だけに限られた。また海上から陸上の目標までの距離が遠いために、夾角が小さくなりまた同時に両岸の見える機会が少なく、測角に大変不便を来たした。このように調査地点を正確に測定することの困難さと、海潮流が早いことは、同一地点に長時間静止したり、再び立もどって測定や調査をくり返すことをほとんど不可能にした。このことは調査を進めて行く上において障害となるばかりでなく、精度の上にも大きく関係する問題である。

(1) 海底観察

昭和 35 年 9 月東海サルベージ KK 所有の白鯨号により、17 測線を観察した。津軽海峡の海水は透明度がよく、一面に砂礫でおおわれた部分、あるいは凝灰岩の箇所では 20 m 以上と思われる切り立った絶壁などが観察された。

(2) 海底資料の採取

昭和 28 年から 30 年にかけて 1982 地点の、また 37 年には龍飛側の 68 地点のドレッジングを行なった。その方法は船からドレッジャーを引きずって、海底表面から資料を引っかき受る方式である。ドレッジングは海底地質調査の第一段階として不可欠のものであり、そのデータにより地質分布の大勢が判明した。

また 35 年には船上から操作できる沈潜式浅尺試錐機により、27 地点の 1 m 程度のボーリングを行なった。

(3) 海底ボーリング

海底ボーリングは 37 年以来、円筒法により行なっている。円筒法というのは長い鉄製の円筒を海中に立て、あらかじめ数箇所沈めておいたアンカーに、ワイヤで緊結固定する。そして円筒の上にプラットフォームを設けて、試錐機を設置する方法で、山口市十郎氏により創案された日本独特のものである。37 年には吉岡沖で水深 22.5 m の箇所まで深さ 201 m、昨年は同じく吉岡沖で水深 41 m の箇所まで深さ 200 m のボーリングに成功した。

(4) 物理的探査

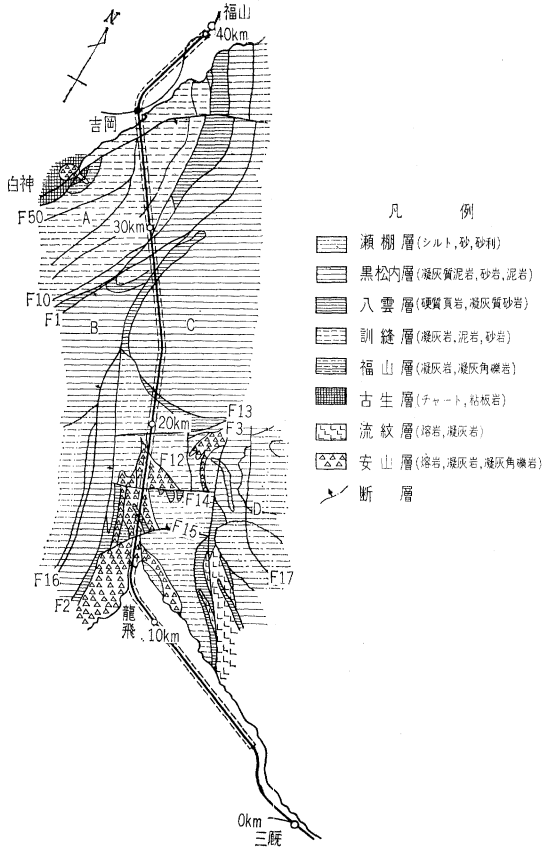
物理的探査としては 28 年から 30 年にかけて地震探査を、また 37 年には磁気探査を行なった。しかし最も成果をあげたのは、34 年および 36 年に行なった音波探査である。音波探査は今まで障害となっていた「水の厚壁」の特質を積極的に活用し、音響測深機の技術を改良、拡大したものである。数百ないし数千サイクルの低周波の強力な音源を用い、音波の海底下地層中への浸透力を増大させ、地層中の種々の物理的不連続面から反射させて、地質構造が一目でわかる連続的地質断面図を自動的に描こうとするものである。小型船 1 隻で自由に行動しつつ、毎時 5 km ぐらいの速さで調査することができる。34 年には 28 測線 208 km、36 年には 42 測線 309 km の地質断面図を描いた。その結果これまで岩石の分布から間接的に推定していた断層、不整合などの地

質構造や、地層の傾き、褶曲軸などが、連続的な構造断面図の上で直接確認することができ、大成功を収めた。

4. 地質の概要

上に述べたような種々の調査により、津軽海峡の海底は図-3に示すように、F₁、F₂、F₃の断層によりA、B、C、Dの4区域に大別されることがわかった。

図-3 津軽海峡地質図



(1) A 区域

この区域では北海道側の陸上で見られる各地層および

構造を、大体追跡することができる。すなわち白神岬を中心にはほぼ南北に走る古生層を核とする大きな背斜からなり、その東側に新第三紀の福山、訓縫、八雲、黒松内の各地層が東に傾きながら順次に現われている。

(2) B 区域

A、B 両区域を画する F₁ 断層は東南落ち気味の右ずれの大断層で、数条の副断層をともなっている。この断層から南では訓縫層以下は海底深く没し、八雲層よりも若い黒松内層が広く露出している。B区域のトンネル通過地点は、F₁、F₂の両断層に挟まれた地溝状地帯で、中に小背斜や断層を挟み、全体としてややもめた地帯と解される。

(3) C 区域

C区域の北半は海峡の中央部分で、地質構造上本海域中で最も安定した部分である。一大盆状向斜を形成し、黒松内層が広く分布している。

C区域の南半には再び訓縫層相当の緑色凝灰岩類が発達する。竜飛沖 6~7 km 以内では諸種の火山岩類をともなっており、往時の激烈な火山活動の中心に近かったことを示している。したがって岩石の分布も複雑で断層なども多いと思われる。音波探査も火成岩地帯に対しては有効でなく、地質図に示すところも確度の低い推定にとどまっている。

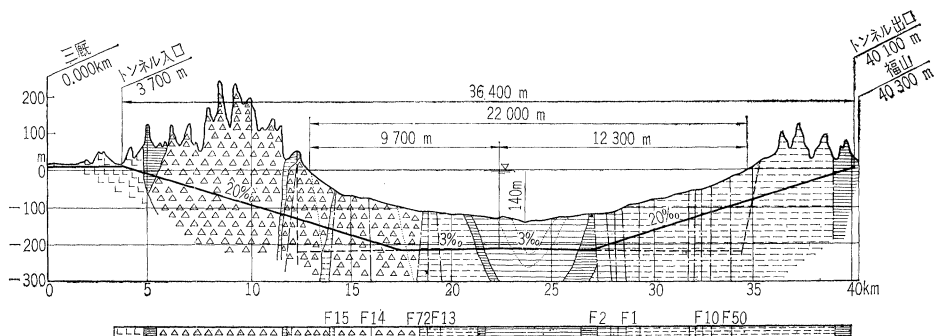
(4) D 区域

火山岩類と黒松内層瀬棚層相当の若い地層が現われており、トンネルには関係のない区域である。

またルート沿いの地質断面図を示すと図-4のとおりである。これより本州方の大約 1/3 は津軽半島先端部に引続く火山岩地帯を、北海道方の大約 1/3 は北海道側陸地部と同じ緑色凝灰岩および泥岩からなる訓縫層中を、また中央部の大約 1/3 は若い黒松内層を通ることになる。そして F₁、F₂ の両断層をはじめ、いくつかの群小断層をどこかで横断するのは避けられない。

一般に火山岩は冷却にともなう多くの節理や空けきが生ずるので、湧水の可能性が多い。また黒松内層のよ

図-4 地質縦断面図



うな軟岩はきわめて掘削しやすく、特にトンネルボーリングマシンには最適の地質である。しかし一度高圧多量の湧水に遭遇すると急速に洗掘され、弛緩崩壊するおそれがある。

5. 青函間の輸送要請

北海道の面積は 78 509 km² あり全国の 21.2%, 人口は 5 101 000 人で全国の 5.4%, 人口密度は 65 人/km² で全国平均の 1/4 である。また 1 人当りの国民所得は全国平均の 89.8% で、東北、北関東よりも大である。このように少ない人口密度で豊富な資源を有する北海道は日本のホープであって、政府も北海道開発法により重点的に開発を進めており、生産額も逐年増大しつつある。これに対応して青函航路の輸送量も、ここ 10 年間に旅客は 1.7 倍に、貨物は 1.4 倍に増加した。さらに昭和 50 年には、表-2 に示すような輸送要請があるものと想定される。

表-2 青函航路輸送量の想定

年 度	旅 客	貨 物
	万人	万 t
昭和 37 年	(100) 312	(100) 550
38	331	564
39	346	596
40	(116) 362	(112) 614
41	377	635
42	392	658
43	407	678
44	423	700
45	(141) 439	(131) 720
50	(167) 520	(155) 850

注：カッコ内の数字は昭和 37 年を 100 とした指数である。

青函間の輸送は 8 月が繁忙期であって、38 年の実績によれば 1 年間の旅客輸送量の 13.8%, 貨物のその 8.5% を 8 月中旬に輸送している。今 1 個列車の旅客輸送人員を 500 人、貨物輸送トン数を 627 t とし、昭和 50 年 8 月における 1 日平均所要列車本数を計算すれば、旅客列車 46 本、貨物列車 38 本、合計 84 本となる。

さらにその頃までにはオーナードライバーの率が英仏並みになって、ドーバー海峡トンネルの輸送量推定と同様に、全旅客の 12.7% が自動車で旅行し、自動車 1 台につき 2.9 人の旅客が自動車輸送専用列車で、自動車とともに青函間を通過するものと仮定すれば、列車本数はさらに増加する。今自動車輸送専用列車の長さを 500 m とし、自動車 100 台を積むものとして計算すれば、旅客列車 40 本、自動車輸送専用列車 10 本、貨物列車とあわせて 88 本となる。

単線鉄道でこれだけの列車本数を通すためには、4 km 置きに信号場を設置する必要があり、しかも輸送量の増加によりすぐに行き詰ってしまう。それゆえ初めから単線トンネル 2 本を掘削する必要がある。こうすることに

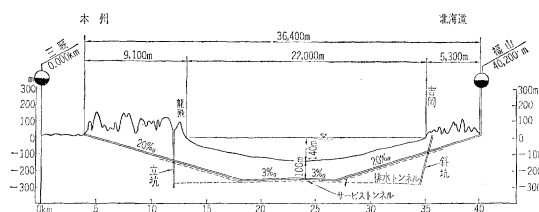
よりトンネルは、昭和 50 年の想定輸送量の 3 倍の輸送要請に応えることができる。

現在の鉄道連絡船の輸送力をもってしては、昭和 50 年の想定輸送量を輸送することはとうてい不可能であって、連絡船の増備、バースの増設を必要とする。しかも年々の輸送要請の増加に対して、年々設備の増強が必要なのである。これに反して青函トンネルは十分ゆとりのある輸送力と、暴風などによっても支障されない輸送手段とを提供してくれる。

6. 青函トンネル計画の概要

上に述べた輸送要請に応じうる青函トンネルは、どのような規模のものであるか。図-5 は計画縦断面図である。海底部の延長は 22 km、陸上の取り付け部は本州方

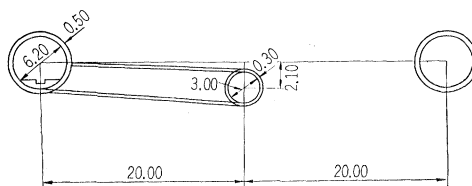
図-5 トンネルの計画縦断面図



で 9.1 km、北海道方で 5.3 km、合計総延長は 36.4 km である。勾配は 20% と 3% とを組み合わせた W 型をしている。最急勾配を 20% としたのは、東北本線、函館本線、室蘭本線、干才線を経由して東京から札幌に至る線路の改良計画が、最急勾配を 10% としているの、トンネル区間には補機を使用するものとして 20% としたのである。海底面からの土かぶりの最小は約 100 m としている。

断面は図-6 に示すような円型の単線型トンネル 2 本を併列するのが有利であると考えている。海底部分の本トンネルの間には、内径 3 m のサービストンネルを配している。さらに W 型の最低点と両岸の立坑底または斜坑底とは、同じく内径 3 m の排水トンネルで結ばれる。

図-6 トンネルの計画横断面図



(1) 排水トンネルとサービストンネル

排水トンネルとサービストンネルとは本トンネルの掘削に着手する前に、パイロットトンネルとして掘削される。そして地質を精査し、本トンネル施工のための

資料を収集する。下り勾配のトンネルを掘進することは非常な困難がともなうから、パイロットトンネルの掘進はまず排水トンネルから始めてW型の最低点に達し、つぎにサービストンネルの掘進に移る。海上からする調査により地質の状態は相当の程度までわかっているけれども、常に水平ボーリングにより地質の状態を確かめながら、必要ならばセメント注入または薬液注入を行ない、湧水を止め地盤を固結させてから掘進しなければならない。

パイロットトンネルでF₁、F₂あるいはF₁₄、F₁₅などの断層を経験して、初めて本トンネルの施工が可能であるかどうか判断されるのである。またその工費、工期についての目鼻がつくのである。本トンネルの着工が決定したならば、パイロットトンネルはサービストンネルとして、つぎのような役目を持つことになる。本トンネルの地質不良箇所、湧水箇所には、サービストンネルから注入を行ない、あらかじめ地盤を固結させ湧水を止め、本トンネルの掘削に支障のないようにしておく。さらにまた本トンネルの工事中は連絡坑を通じて換気排水に、完成後は排水通風に役立たせる。

(2) トンネルボーリングマシン

海底部分22kmは両岸の立坑または斜坑からの2切端だけで掘進しなければならない。しかもパイロットトンネルでは、水平ボーリングにより地質状態を確かめ、その上注入までやって掘進しなければならないから、普通の掘削法では能率を上げることができない。そこで考えられるのはトンネルボーリングマシンである。

トンネルボーリングマシンは、アメリカのロビンソン式、ソ連のメカニカルシールド、オーストリアのウォールマイヤー式などが代表的である。これらのうち機械の機構、掘削すべき岩石の強度などから、ウォールマイヤー式が有利であると判断して、直径3.6mのものを現在製作中である。このボーリングマシンの1時間当りの進行は、安山岩帯で1.8m、新第三紀の堆積岩帯で2.5mぐらいを見込むことができるから、1日の実働時間を7時間としても、1日の進行はそれぞれ12.6m、17.5mとなり、普通工法の1日実働24時間の進行よりもはるかに大となる。その上ボーリングマシンによる掘進は岩石を切り削ることによって行なわれるから、爆破による掘進のように地山をゆるめることがない。このことは海底を掘進する場合に、特別重要な意義を持っている。それはせつかく注入によって止水効果をあげたとしても、爆破によるきれつで湧水を招くようなことがあってはならないからである。

またボーリングマシンによる掘削断面は円形で、地山に相当の目があってもハダ落ちによる凹みができないから、力学的にも安定した形である。その上地山をゆる

めていないから支保工、覆工も、爆破による場合よりも軽いものですすことができる。また余掘もないから覆工を地山に密着させることができる。これらの点からボーリングマシンは海底部の掘削に最も適したものであり、したがってパイロットトンネルばかりでなく、本トンネルの掘進にも、大型のトンネルボーリングマシンを使用することが望ましい。

(3) 本トンネル

本トンネルの掘進は、その通過地点に対してサービストンネルから注入により止水効果をあげ、不良地質に対しては地盤固結をしておけば、ボーリングマシンにより下り勾配で掘進することも可能であろうし、またその実働時間もサービストンネルの場合より多くとることができるであろう。したがって海底部分22kmに対し両岸の立坑または斜坑からの2切端だけで十分である。ボーリングマシンは非常に高価な機械であるから、切端の数をふやしてその台数を増やすことは得策ではない。

本トンネルの1時間当りの掘進量がサービストンネルのそれと同じであるとすれば、そのずり量は1時間につき150m³、250tとなる。本トンネルのずり出し用シャフトは、これ以上の容量を持たせなければならない。ボーリングマシンは岩石を切り削って掘進するのであるから、この場合多量の熱を発生する。これを冷却させるためにサービストンネルを入気坑として、多量の冷たい空気を連絡坑を通じて切端に送ってやる必要がある。こうすれば大口径の換気管は、連絡坑から切端までの短区間で済むことになる。支保工としては鋼わくを使用する箇所もあるが、大部分は吹付けコンクリートによって行なう。

(4) 吹付けコンクリート

最近西ドイツ、スイス、オーストリアでは吹付けコンクリートを支保工の代りに使っている。新しい掘削面に5cm程度のコンクリートを吹付けると、コンクリートは岩石の割れ目や凹みを填充し、平滑な内空断面を形成する。これは5cm厚のコンクリートが支保工として地山の荷重を負担するのではなく、掘削面からある深さの地山にアーチ作用をさせることによって、荷重を負担させるのである。しかも内空断面が平滑であるから、応力集中も起こらず最も理想的な防護工ということができよう。

地圧のある場合は鋼アーチ支保工と鉄網とを併用し、20~30cmの厚さにコンクリートを吹付ける。矢板を必要とする場合は鉄矢板、コンクリート矢板を使用し、経年によって腐食してしまう木材はいっさい使用しない。矢板の裏と地山との間は吹付けコンクリートで填充し、表も吹付けコンクリートで包んでしまう。吹付けコンク

リートは 300 kg/cm^2 程度の強度を持ち、地山と全く一体となって作用する。吹付けコンクリート施工後、地圧により地山にしたがってコンクリートにきれつが発生した場合は、ロックボルトにより補強するのが効果的である。

最近のコンクリート吹付け機は最大 25 mm までの骨材を使用することができ、容量は1時間当り $1\sim 5 \text{ m}^3$ である。しかもミキサ、吹付け機の位置から吹付け施工箇所まで、 300 m ぐらいホースで導くことも可能であるから、掘削直後に仮巻きができるわけである。この工法は従来の支保工形式に取って代って、大いに発展することが予想される。

7. 残された問題点

青函トンネルを必要とする輸送要請があり、これに応ずる計画があるならば、残され問題点は何であるか。政治財政の問題はさておき技術的問題に限るならば、海底トンネルを掘進して行く場合に本質的な問題となるのは、坑内への海水の流入、湧出、浸透である。これらはもちろん地山の透水係数と関連する。透水係数の大きいのは断層破碎帯とポーラスな火山岩とである。そこで断層の性状と火山岩の分布状態とが問題となるのであって、両者とも現在までに適確に把握する段階に立ち至っていない。

今までの調査で地質学上の大断層である F_1, F_2, F_3 のほか、中小の断層の存在することがわかっており、これらのうちのあるものについては、陸上部まで延びていて破碎帯の幅およびその程度を観察することもできる。しかしいずれも小規模であって内陸に進むにしがたい消失してしまう。そして海峽部では落差が大きいことがはっ

きりしているのに、破碎の程度も大きいことが推定される。しかしどの程度であるかはわからない。したがって土木工学的にこれらの断層が、工事にいかなる影響をおよぼすかはなお不明である。また本州側の海底約 5.4 km の間に分布する火山岩についても、今のところ明確には把握されていない。

これら不明の点を解明するための手段として、大規模な海上ボーリングが残されている。しかし最大 10 ノット にもおよぶ潮流のはげしい、また水深が 100 m を越す津軽海峡において、これを実施するまでには技術が進歩していない。また可能であったとしてもばく大な工費を必要とし、ボーリングの数によっては、試掘坑の工費を上まわることにもなりかねない。試掘坑により海底で遭遇する地質なり断層なりに直接見参して、土木工学的諸性質を見きわめようと決心した理由がここにある。

現在はまだ北海道方の斜坑に着手したに過ぎないけれども、続いて本州方の立坑に、さらに試掘坑に着手する予定である。ここにいう試掘坑とは、先に述べた排水トンネルおよびサービストンネル、すなわちパイロットトンネルに相当するものである。この試掘坑において今までにできなかった高圧湧水をやめるための注入試験、水平ボーリングの資料から最も適した注入方法を選ぶ基準の策定などに関する研究を進めるとともに、トンネルボーリングマシンの運転、吹付けコンクリート工法の習熟に力を注ぎたいと考えている。このために調査工事は直轄施工の方式で進めており、すべての研究はこれからだとの決意のもとに、いかなる難関に遭遇しようとも屈することなく、安全にして最も経済的な施工方法を確立し、自信をもって本工事に着手しうる日まで頑張り通す覚悟である。

(1964.5.30・東北大学にて講演)

海外ニュース

工事中のテージョ河大つり橋

リスボンのテージョ河大つり橋工事（本誌昭和38年11月号海外ニュース参照）は順調にすすみ、基礎工は終了し、主塔の一つは完成した（高さ 190.5 m ）。今年中には主ケーブルを張るはずという。日本からはすでに

70名に達する技術者の見学があった。

写真 ①北岸の取付高架橋工事、②北岸の（橋台）アンカー、③北塔のエレクション

（正員 金沢大学工学部 西田義親・記）

