

記憶に残る工事 4. 昭和 58 年 4 月号 (第 398 号)



## 特集\*青函トンネル先進導坑貫通記念 青函トンネルで開発した施工技術

井上俊隆\* 星加博二\*\*

秋田勝次\*\*\*

### 1. はじめに

去る1月27日、先進導坑の貫通式が盛大に挙行政され、有史以来初めて北海道は本州と陸路により結ばれ、新しい時代を画することとなった。

昭和39年5月、福島町吉岡において、北海道側調査斜坑の掘削に着手以来18年余、幾多の人々の熱望、意欲、協力、辛苦の結果、先進導坑の貫通は達成され、本トンネルの完成を確実なものとした。本トンネルの未掘削区間は、海峡中央部で2km余りとなり、昭和60年度完成が見込まれている。

このトンネルの施工にあたっては、約40年前関門トンネルを完成させたのをはじめ、数多くの難工事を克服した、鉄道トンネル技術の総力が結集されたのはもちろん、海底炭坑掘削の経験等関連する周辺技術の協力と、諸先輩の英知が発現された。以下に青函トンネルの施工技術のあらましを述べることにしたい。

### 2. 青函トンネルの特色とその施工法

青函トンネルの特色は次の3点に要約される。

① 総延長53.85kmと比類なく長大である。  
② そのうち23.3kmが北海道を本州と隔てる津軽海峡下にある海底トンネルである。

③ とりわけ海底下で地質が不良である。

施工上の特徴としては、

① 無限の貯留量(リザーバ)を持つ海底下で、高被圧水(25kg/cm<sup>2</sup>)下のトンネル掘削という未経験な分野

\* INOUE Toshitaka

日本鉄道建設公団青函建設局次長

\*\* HOSHIKA Hiroji

日本鉄道建設公団青函建設局技術課長

\*\*\* AKITA Katsuji

日本鉄道建設公団青函建設局技術課

であり、しかも万が一にも失敗は許されないため、施工技術の開発を含め調査工事(先進導坑)と本工事がきびすを接して行われたこと。

② 海底下の延長が長く、しかも可能な限りの事前調査によっても地質等の地山条件が不明確なため、本坑を掘る手段として先進導坑、作業坑の2本の導坑を先行して施工した。またそれへのアプローチとして本州側、北海道側にそれぞれ斜坑、立坑を掘削した。

③ 海峡中央に向って低くなる線路こう配のためトンネル湧水の強制排水が必要であり、また坑内の大々的な強制換気、工事用資材、機器の確保、ずり運搬等の輸送が大規模かつ重要な問題である。

④ 先進導坑はもともと先行して掘進し、本工事のための調査と技術開発を兼ねるため公団直轄で行われた。

このトンネルは海面下240mと深いため一般の山岳トンネル工法によるしか方法がないが、高被圧水下の不良地質を確実に掘り進めるため、

① 前方の地質、湧水の状況等を事前に知るため水平先進ボーリングを行う。

② 湧水を確実に止め、地山を改良するため、注入を行うことを基本とした。

20km余の海底下の施工においては大小の断層、異常な土圧、異常出水などさまざまな困難に直面したが、苦心の末、無事克服することができた。

今後の課題としては、

① 本坑の完成

② 防災対策(特に火災対策)を含めた保守開業設備

③ 保守管理体制

④ 多目的利用

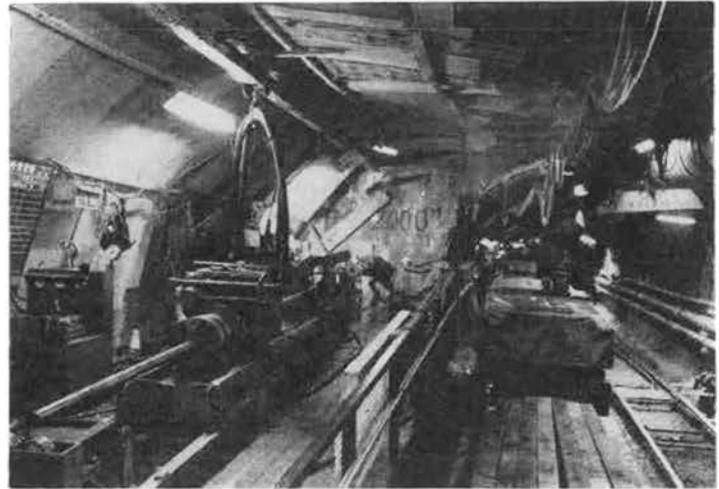
等である。なお、工事誌の作成、施工技術の集大成、継承も重要な課題である。

### 3. 先進ボーリング

事前に十分な地質調査が不可能な海底トンネルを掘進するにあたり前方予知のため水平先進ボーリングの開発は重要な課題の一つであった。調査用斜坑の掘削当初から WL (ワイヤライン) 工法によりコアボーリングを行い、湧水の有無に重点をおいて調査を実施するときにはより高速掘進のできるトリコンビットによるノンコア工法を採用し対処していた。しかしながら、昭和 47 年度から粘土鉱物 (主にモンモリロナイト) を多量に含む吸水膨張性の崩壊しやすい地層や断層破砕帯に遭遇することが多くなってからは、特に WL 工法ではアニューラ面積が狭いためにスライムを十分に排出できず、ロッド抑留のトラブルが多くなり、掘進能率が著しく低下した。このため圧力掘り工法、ケーシング掘り工法、二重管掘り工法、エア掘り工法、リバース工法などを試行しながら試すい機、付帯器具の種々の改善、ならびに開発を行い効果をあげたが、崩壊しやすい地層および高圧湧水を伴う被圧環境下においては、昭和 50 年以降リバース工法 (単管および二重管式) が最良の工法として採用され、掘進速度が良好でコア採取率もよく、確実に切羽から 500 m 以上先進させるに至っている。

先進ボーリングの基地としては掘込式の横坑方式ではなく、坑道を拡幅して横坑型とした坑道拡幅型横坑方式の方が作業性、切羽前方への先進性がよいことから昭和 50 年より採用するに至っている。

水平先進ボーリングの大きな問題の一つに長尺化した場合の精度があげられるが、孔曲りを最小限にいくとめるためスタビライザの使用、またビットおよびロッドの



写真一 先進ボーリング基地 (坑道拡幅型横坑方式)

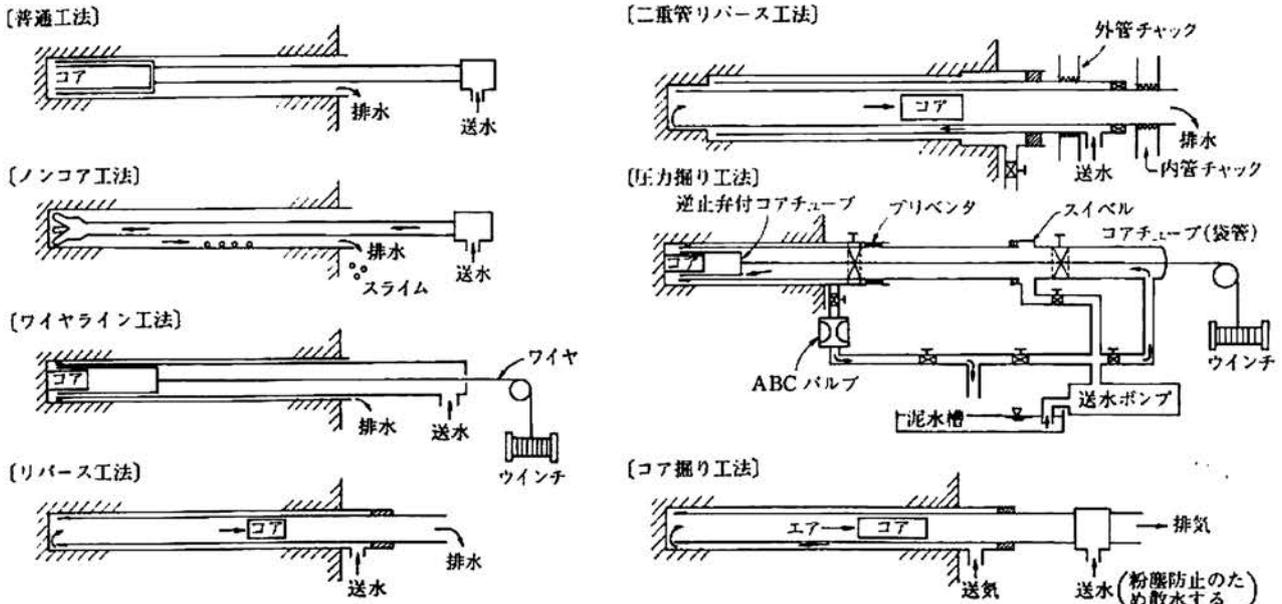
組合せ、ロッドの回転数、給圧力の変化により孔曲りを修正し、維持していく技術も習得した。さらにスペーサンによる孔曲り測定を併用し、ボーリング孔の軌跡の把握に努めている。

先進ボーリングは直轄施工されたが、施工総延長は 120 km に達している。また水平先進ボーリングの最大掘進長としては北海道方先進導坑においてリバース工法により昭和 56 年 3 月に 2,150 m を記録している。

### 4. 注入工法

海底トンネルを安全確実に効率よく掘削するためには、無限の貯留量を持つ湧水を確実に止め、軟弱破砕帯の地盤改良を行うことが最も重要な条件であり、適切な注入工法の開発が調査工事段階から主要な課題の一つであった。

調査斜坑時代から注入を余儀なくされ、普通セメント



図一 ボーリング工法の概念図

による注入を主体とし、補助的に3号水ガラスを使用した LW 注入により対処していたが、止水効果、作業性、経済性に難点があり、注入材料、注入工法の大幅な改善をめざし委員会等を設置して検討してきた。この中で、注入材料については低モル比の水ガラス ( $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}=2.2$ ) と高炉コロイドセメントを組合せることにより高強度で浸透性がすぐれ、耐久性のよい材料が開発され、グラウトとしての物性値としては表-1に示すように材令3日で一軸圧縮強度が  $20 \text{ kg/cm}^2$  以上、ゲルタイム2分以上が優に得られるに至った。このセメント水ガラスグラウトのゲルタイムを適切に取り地山に注入することで、高圧湧水を伴う破碎帯をも突破することに成功した。また、注入作業のスピード化を図るため同時多孔注入の常用化を推進させ、2~4孔の並行作業を定着させることに成功した。

注入用さく岩機、注入ポンプについては、坑内の狭隘な場所に供されるためできるだけコンパクトなものとし、PR-123 型さく岩機、HFV-5D 型注入ポンプ、ダブルコンポンプを多用し、すべて台車上に搭載して機動力の向上、操作の簡易化を図った。

注入の設計、施工については、岩質により堅岩、軟岩、破碎帯と大別した標準を定め、先進ボーリング、さぐり孔からの湧水等の情報をフィードバックさせながら管理をし、目標とした止水効果を達成した時点でチェック孔を掘り、安全を確認してから掘削をするものとした。図-2 に本坑における注入計画標準模式図を示す。

このほか、多量の湧水にみまわれた陸上部（算用師工区、袋内工区）においても注入の必要に迫られたが、セ

表-1 低モル比セメント水ガラスグラウトの物性値

水ガラスモル比	セメント		混合比	ゲルタイム	圧縮強度 (kg/cm <sup>2</sup> )
	高炉コロイドセメント	セメントミルク W/C			
2.2	スラグ率	100%	1:1	1'31"	77.0
⑤/号		150	1:1	2'27"	21.6
75%液	55%	200	1:1	3'40"	13.3



写真-2 先進導坑注入基地（ダブルコンポンプ）

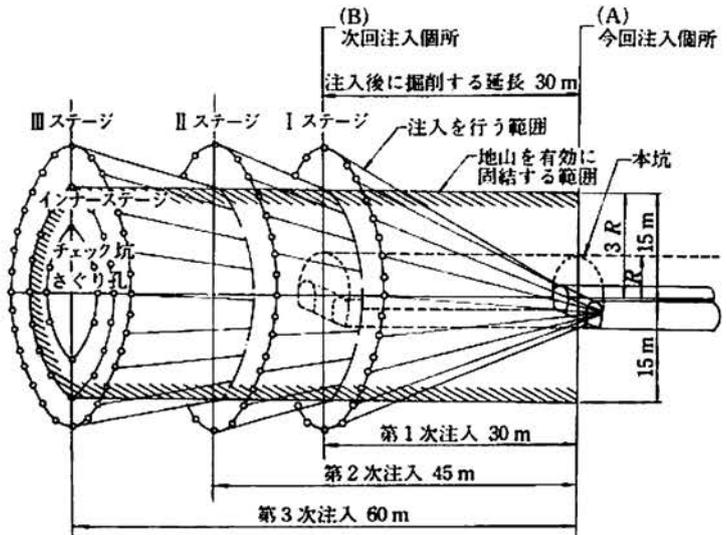


図-2 注入計画標準模式図 (13本坑)

メント系注入材料でありながらゲルタイムを自由にコントロールができ、強度も高く排水処理の容易なデンカES 注入を施工し、よい効果をあげるに至った。

注入しなければ掘れない、また将来の永久的揚排水量をおさえなければならない青函トンネルの特殊条件下において、注入工法を能率的、経済的、かつ安全なものとして確立したことは、数多い青函トンネルの技術開発の中でも特筆すべきものの一つと思われる。

### 5. 吹付コンクリート

近年のトンネル掘削技術の進歩（特に NATM 工法）に伴い、トンネルの1次覆工として吹付コンクリート工法が広く採用されるようになった。青函トンネルでは北海道側で昭和 40 年1月、本州側で昭和 41 年5月に西ドイツからトルクレット式吹付機を導入して以来、現在に至るまで種々の改良を経て大量の吹付コンクリートを施工し、日本のトンネル工事における吹付コンクリート施工の草分けの役割を果たしている。

トルクレットによる乾式工法は、粉塵発生量が多く、作業環境を悪化させること、ノズルマンの掘で加水するため単位水量の管理が困難なことなどの欠点を有する反面、施工が容易であり、また圧送距離が長くとれるなどの利点をもって、昭和 49 年にアリバ式吹付機が導入されるまで青函トンネルにおける吹付機の主役として活躍してきた。

一方、湿式工法として昭和 47 年3月にコンパルナス式吹付機、昭和 47 年8月にスピロクリート式吹付機がそれぞれ導入された。乾式吹付に比べて粉塵発生量が少なく、吹付けられたコンクリートの品質にバラツキが小さいなどの長所を有するが、材料の品質管理の煩雑さ、圧送距離が短くホースの閉塞を生じやすいなど施工性に大きな問題があり、大量使用には至らなかった。その後

トルクレット式吹付機の性能を上回る同じ乾式吹付機としてアリバ式吹付機が昭和 49 年 5 月に導入され、現在に至るまでアリバ 260 型吹付機が主に使用されている。アリバ式吹付機は同じ乾式吹付機のトルクレットと同様の長所、短所を有しているが、トルクレット式に比べて取扱いが簡単で、かつ吐出量も大きいいため施工性においてすぐれ、トルクレット式吹付機に替わって用いられるようになった。

一方、乾式にも湿式にも属さない「SEC 吹付コンクリート工法」がリブコンエンジニア（株）と青函建設局とで共同開発され、現在一般にも徐々に用いられつつある。SEC 吹付コンクリートシステムは 図-3 に示すように 2 系統よりなる吹付システムである。すなわち、1 次側は SEC モルタルをポンプ圧送し、2 次側は骨材（急結剤を添加）を乾式吹付機により空気圧送し、ノズル付近で両者を合流させて吹付ける工法である。この工法は乾式同様の圧送距離がとれるうえに、吐出量が大きく、粉塵発生量およびはね返りが少なく、吹付コンクリートとしての品質バラツキが小さいなど種々の利点を有することが判明しており、理想的な吹付工法と考えられ、今後ますます汎用されることが期待される。

6. SEC 工法

青函トンネルでは断層破碎部での 200 t/m<sup>3</sup> 以上の大土圧に対処するためフープ鉄筋付モルタル中詰鋼管支保工の採用に至ったが、新幹線断面に対する検討では軸力で 1,000 t 以上の耐力が必要であることが判明した。鋼管支保工の耐力に関しては中詰モルタルの品質が最も大きな要因であると考えられるため、高品質のモルタルを必要とし、その要求される基本条件としては

- ① 初期強度、長期強度がともに高いこと ( $\sigma_3=200$  kg/cm<sup>2</sup>,  $\sigma_7=300$  kg/cm<sup>2</sup>,  $\sigma_{28}=400$  kg/cm<sup>2</sup> を目安)。
- ② 適当な打設機械で十分に充填可能な流動性を有す

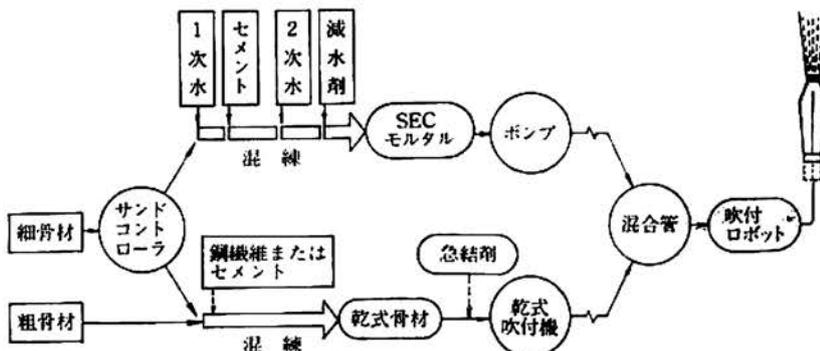


図-3 SEC 吹付工法系統図



写真-3 先進導坑の吹付コンクリート

ること。

- ③ ブリージングが少なく、また材料の分離抵抗性が大きいこと。

これらの諸条件を満たすためリブコンエンジニアリングと共同で種々の実験を行ったところ、モルタルの特性に関して砂の初期表面水率が大きく寄与することが明らかになり、SEC 工法が極めて有効であると考えられた。SEC とは Sand Enveloped with Cement の略であり、SEC 工法とは砂の表面にセメント粒子を付着させて水セメント比の小さいキャピラリー状のセメントペーストの皮殻を形成するようにしたものであり、このセメントペーストの水セメント比を 15~30% に調整しておく、後で水を添加して流動性のよいモルタルあるいはコンクリートの状態にしても皮殻は壊れることなく、全体として 図-4 のような状態になる。

実際の製造方法としては、まず砂の表面水率を一定にするための機械であるサンドコントローラを通過させることにより砂の表面水率を調整し、次に表面水率を所定の値とするため調整水 (W<sub>1</sub>) を添加して混練し、同時に粗骨材も投入する。このあとセメントを投入して混練し、骨材の造殻を行い、最後に残りの混練水 (W<sub>2</sub>) および必要な減水剤を添加して混練する。以上により SEC コンクリートが得られる。

SEC モルタルおよび コンクリ

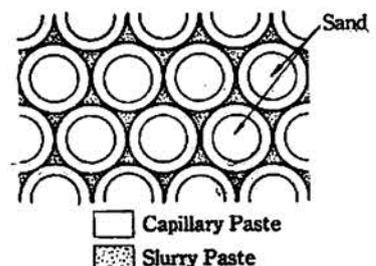


図-4 SEC コンクリートのモデル

ートに関する種々の実験を行った結果、SEC 工法には次のような特徴のあることが認められた。

- ① プリージングが少ない。
- ② 骨材の分離、沈降に対する抵抗性が大きい。
- ③ 強度がアップし、しかも品質にバラツキが小さい。
- ④ 流動性がよいため圧送性にすぐれている。

このように SEC 工法は従来工法に比較して、コンクリートの諸性質を大幅に改善するものであり、これにより施工性の向上、また構造物としての品質の向上が図れるものと思われる。実際に青函トンネル本州方の坑門コンクリートの本体部分は SEC コンクリートで施工しており、良好な施工結果を得ていることから、今後ますます活用されるべきものと期待できる。

### 7. 膨張性地山における施工法 (周壁導坑先進円形ショートベンチ工法)

北海道側吉岡工区 33 km 付近は F-10 断層の影響帯により地山が脆弱化しており、200 t/m<sup>2</sup> もの強大な土圧が計測され、地盤支持力も小さいことから沈下に弱い円形ショートベンチ工法では対処しきれず 沈下と膨圧に強い 図-5 のような周壁導坑先進円形ショートベンチ工法を採用した。この工法とフープ鉄筋付鋼管支保工の組合せで F-10 断層の強大な土圧に十分対処可能と判断された。この工法の特徴としては次のような点があげられる。

- ① 上半支保工底板相当部分の支圧面積が大きくなるので沈下が小さくなる。
- ② ベンチカット工法の弱点である下半切羽付近にお

表-2 推定土圧別支保工形式

推定土圧	高強度鋼管支保工形式
70~130 t/m <sup>2</sup>	10 in 鋼管支保工フープ筋付：肉厚 90 mm，フープ筋 φ 22 mm，SD-35，σ <sub>c</sub> =400 kg/cm <sup>2</sup>
130~200 t/m <sup>2</sup>	12 in 鋼管支保工フープ筋付：肉厚 10.3 mm，フープ筋 φ 22 mm，SD-35，σ <sub>c</sub> =400 kg/cm <sup>2</sup>

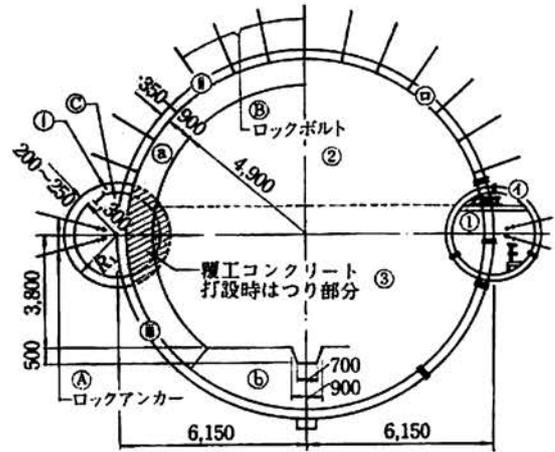


図-5 周壁導坑先進円形ショートベンチ工法

いて、上半支保工の荷重を周壁導坑の梁で受けもてるので緩みが最小に押えられる。

③ 上半掘削に先だって導坑を掘削できるので前方地質状況、湧水の確認ができる。

施工手順としては、スプリング部分に円形小断面導坑を先行して掘削し、ロックアンカーを打設し、コンクリートで断面を埋戻し、地耐力の増強を図る。その後、円形ショートベンチ工法によりトンネル全断面をフープ鉄筋付鋼管支保工を使用し施工する。最後に吹付を施工後ロックボルトを打設する。この工法により沈下も少な

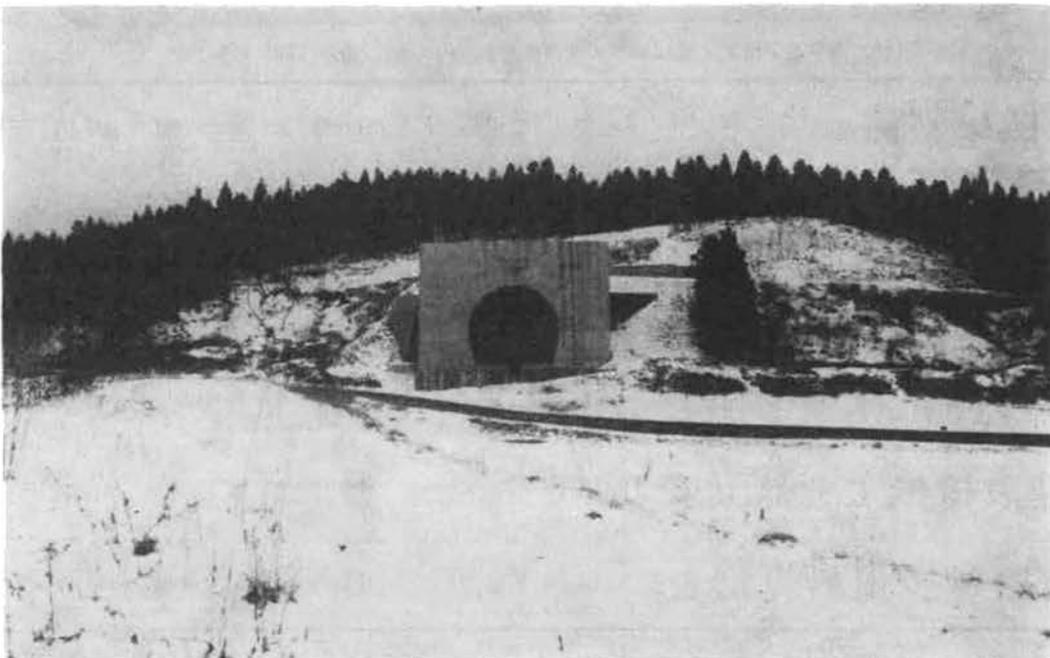


写真-4 青函トンネル入口(本州側)

く、無事膨圧区間を突破することができた。

## 8. その他

測量、トンネル掘進機、換気、揚水、排水処理設備、工事保安対策、断層突破、異常出水対策等さまざまな問題があるが、紙面の都合上割愛する。また漏水のないトンネルを造ることは、良質なトンネルとするための重要なポイントであるが、特に関門トンネル（在来線、新幹線）の経験によれば、海底部の漏水は海水に近く、塩害という厄介な問題を背負うことになる。したがって、青函トンネルでは塩害に強い材料、機器の開発を行うのはもちろん、トンネル内への漏水を可能な限り、できれば100%シャットアウトするように努めている。

## 9. おわりに

以上個々の技術の要点について述べたが、個々の技術を集大成、組織化する施工体制、集団としての技術の保



写真—5 周壁溝坑先進円形ショートベンチ工法

持がより重要と思われる。

最後にあたり、このプロジェクトを推進し、貫通に導いた諸先輩をはじめとする工事関係者に深甚の敬意を表し、また現場で指揮監督あるいは直接作業にあたった職員、作業員の方々に深く感謝いたします。また、このトンネルはひとまず在来線で供用開始される予定であるが、他の交通機関と対抗できる新幹線が北海道に乗り入れる日が早いことを願うものである。