



青函トンネルを出て東京へ向かう北海道新幹線

1. はじめに
2. 青函トンネルの概要と基本コンセプト
3. 幾多の困難を克服した新たな技術の開発
4. 維持管理
5. 世界における青函トンネル
6. 青函トンネルの課題・展望

北海道と本州を繋ぐ世界最長の海底トンネル －新たな技術で困難を克服した青函トンネルの建設－

講演者略歴



深沢 成年
鉄道・運輸機構
審議役



家田 仁
政策研究大学院大学
教授



土谷 幸彦
元鉄道・運輸機構
副理事長



服部 修一
鉄道・運輸機構
参与



朝倉 俊弘
京都大学
名誉教授

青函トンネルは、延長53.85kmの世界最長の海底鉄道トンネルとして、調査斜坑着工から24年の歳月をかけ1988（昭和63）年3月に開業した。以来、本州と北海道を繋ぐ重要幹線として安定した輸送を確保しており、極めて重要な国民の財産となっている。その建設は23kmに及ぶ海峡下の高水圧、不良地質という極めて困難な環境下にあって全く未知への挑戦であったが、幾多の困難を新たな技術を開発することにより克服した。青函トンネル工事で開発された技術はその後の我が国のトンネル技術の発展に大きく貢献した。

1. はじめに

着工以来19年を経て4度の異常出水を初め数々の苦難を克服し、1983（昭和58）年1月、先進導坑が貫通した。しかし、当時国鉄は赤字に苦しみ国鉄改革の議論の真っ只中であり、青函トンネルを取り巻く環境も厳しいものであった。

そのような中、貫通の前年に公開された映画『海峡』の主演女優であった吉永小百合さんが祝典に駆けつけるとともに、作業員総合令役の森繁久彌氏から次の祝電が届いた。「世紀の青函に風が通る 誰が何を言おうとこの大事業に万歳を送る 讃えるべし 人間の小さき力をもってこの大事業をなし得たことを はるか東京の空から盃をあげる 乾杯!」。吉永小百合さんの美しい笑顔と森繁久彌氏の祝電に建設に携わった者は励まされ、再び自信を取り戻した。長年の夢が実を結び、これまでの幾多の苦労が吹き飛んだ瞬間であった。

その後、国鉄分割民営後の1988（昭和63）年3月在来線の津軽海峡線として開業を迎えた。さらに2016（平成28）年3月に北海道新幹線が開通し、青函トンネルに新幹線が通ることとなったのである。

本稿は、日本鉄道建設公団職員として建設に直接携わった土谷・服部・深沢の3名が経緯、計画・調査・施工、技術開発、維持管理を取りまとめた。このうち施工については、本坑工事JVの元鹿島建設一條勝氏と元大成建設梶修氏のご協力をいただいた。京都大学名誉教授の朝倉先生からはトンネル工学の立場から建設の意義について、政策研究大学院大学教授の家田先生からは施設活用観点から課題と展望についての知見をいただいた。

2. 青函トンネルの概要と基本コンセプト

(1) 青函トンネルの歴史

古くは江戸時代の末期、松前藩の参勤交代において松前・三尻間の舟運があった。明治の中期から後期にかけては東京から青森、小樽から函館までの鉄道が整備され、青森と函館を結ぶ航路が1908（明治41）年に国によって開設された。これが青函連絡船の始まりと言われている。

その後、陸路についても議論され、当時の国鉄の技術部門では津軽海峡と宗谷海峡をそれぞれ海底トンネルで抜け、間宮海峡を渡り東京からハバロフスク、ハルピンを結ぶ壮大な大陸縦断超特急が構想されていたが、戦況の悪化など社会情勢も厳しく、構想自体が立消えになったようである。

実際に青函トンネルの調査に着手したのは、1946（昭和21）年である。前年の空襲で青函連絡船が壊滅的な被害を受けた中、敗戦による国土荒廃からの復興の観点から北海道が注目され、陸路による連絡手段について調査が開始された。

調査は海峡部の地質調査を中心に進められていたが、1954（昭和29）年9月に台風15号が襲来し、青函連絡船洞爺丸など5隻が沈没し犠牲者1,400名を超える大海難事故が発生した。この夏に北海道で開催された国民体育大会にご臨席のため、洞爺丸をご利用された昭和天皇は、この大海難事故を悼み、「その知らせ 悲しく聞きて わざはひを ふせぐその道 疾くところ折れ」と詠まれた。

洞爺丸事故を契機にトンネル建設の機運は一気に高まり、本州と北海道を結ぶトンネルの掘削の実現可能性を探るものへと調査対象も広がっていったのである。1964

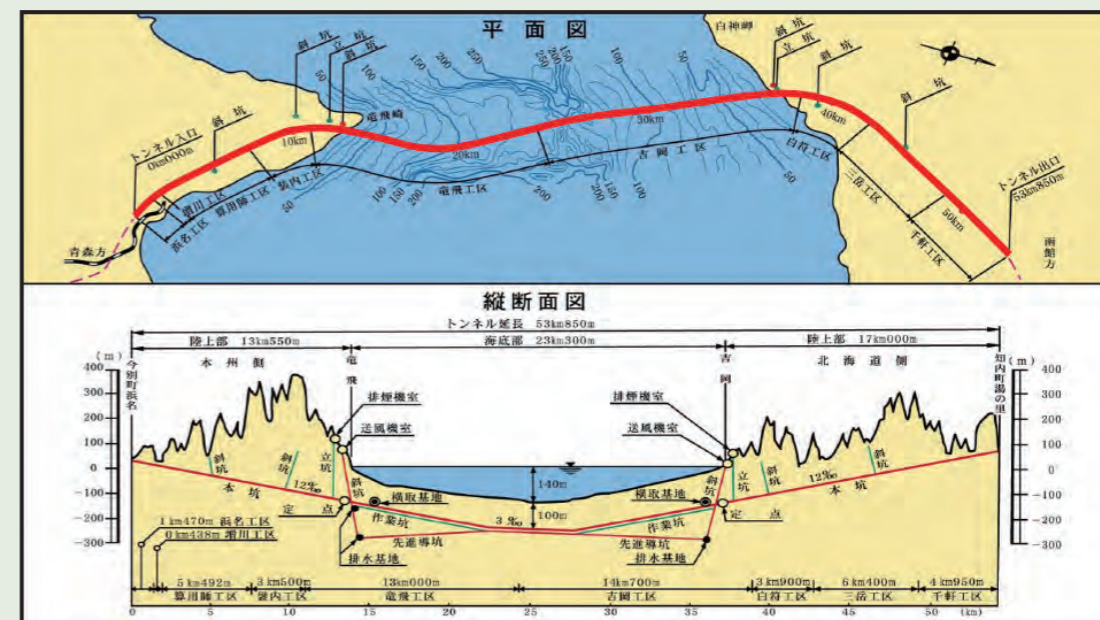


図1 青函トンネル平面図・縦断面図

(昭和39)年には北海道側の調査斜坑に掘削着手し、その2年後には本州側の竜飛でも調査斜坑掘削を開始した。

1971(昭和46)年4月に津軽海峡線を調査線から工事線とする旨の指示が運輸大臣より出された。合わせて設計上配慮する旨の通達が出され、青函トンネルは将来新幹線を通す計画として本設工事に着手することになったのである。

(2) トンネル計画の策定

① ロケーションと海底地形

津軽半島を通る西ルートは下北半島を通る東ルートと路線長もトンネル延長も大きな差はなかったが、地形地質調査を進めた結果、海峡部の地質状況は東ルートでは水深が270mあるのに対して西ルートでは約半分140mである(図2)。さらに、東ルートは那須火山帯の中央部を通り火山作用による非常に難しい地質の中を通らざるを得ないということが判明し、以後の調査は西ルートに限定された。海峡部の海底には尾根のような地形があり、馬の背状になった堆積岩の中央部を通るようにルートを設定することとなった。

② 平面線形と縦断線形

鉄道構造物では一般的に曲線区間を走る場合、遠心力による慣性力が働くため、曲線半径と速度に応じて軌道面を傾けて内外軌に高低差(カント)設けることにより走行安定性を確保している。平面線形については、当時建設中の山陽新幹線では半径R4,000mが最小曲線半径であったが、貨物列車、旅客列車並びに新幹線を共に通すという特殊性から新幹線260km/h、在来線70km/hを前提として各種検討・調査を進めた結果、青函トンネルは最小曲線半径にR6,500mを採用することとした。

縦断線形については、トンネルの最小土被りを石炭鉱山安全規則と海底炭鉱での知見、さらには堆積岩層の地質性状などから100mと設定し、水深140mと合わせて青函トンネルは海面下240mを通過することとなり、そのため陸上から長距離の勾配区間が必要となった。また、勾配区間で車両故障により列車が停止した際、再起動して自力でトンネル坑外まで走行する運転上最も厳しい条件を想定し、車両モーターの温度上昇等の負荷を考慮して最急勾配は12%とし、陸上部からのアプローチを含めて青森県今別町と北海道知内町を結ぶ延長53.85kmの世界最長となるトンネル計画となった。

③ 断面形式

断面形式については単線並列型と複線型を検討した。列車走行時の空気抵抗や換気条件、保守作業など使用面と、掘削や覆工コンクリートの工事数量、掘削中の湧水

量など施工面、将来の揚水の経費を勘案し、またこれまでの施工実績から複線断面トンネルでも十分に安全に施工は可能であるという結論が得られ、断面形式は複線型と決定した。

(3) 施工

青函トンネルの建設に当たっては、主要な課題として「工期の短縮施工」「施工の安全性」「耐海水性」の3つが挙げられた。工事の成否の鍵となる海底部においては、本坑の他に斜坑底から上り勾配で先行する先進導坑と、斜坑の中間より本坑に並行して設置する作業坑により本坑工事を支援する計画とした(図3)。

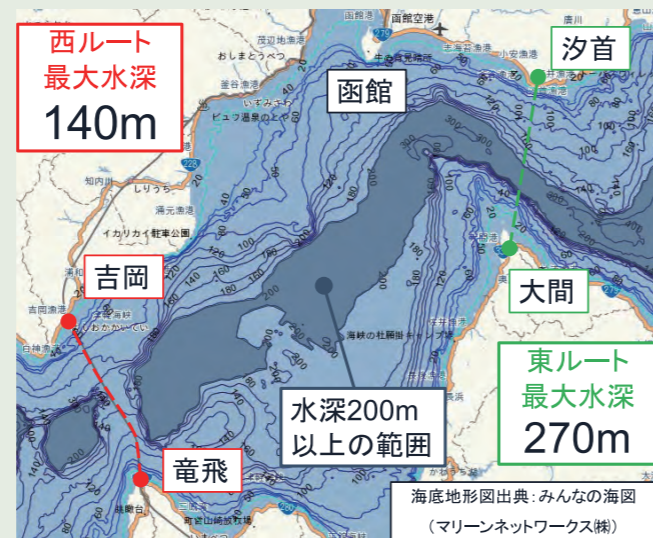


図2 津軽海峡の海底地形

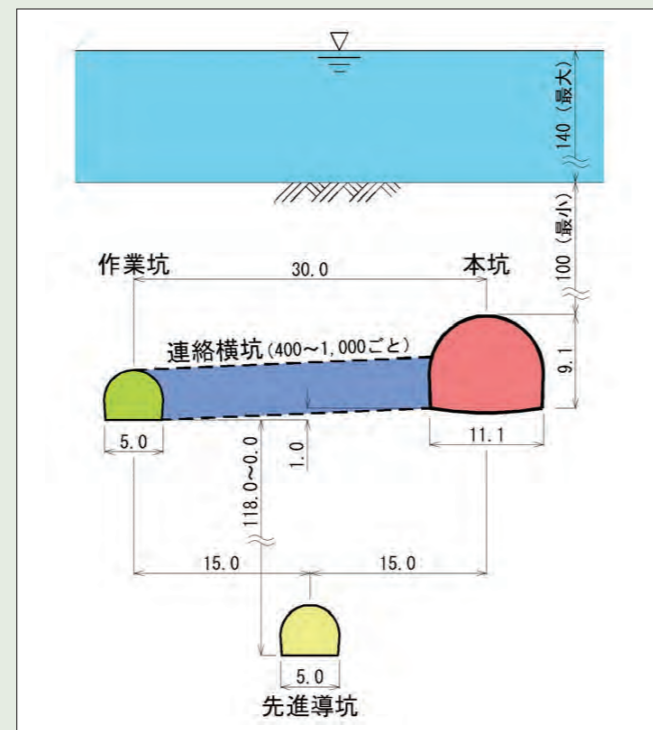


図3 海底部標準断面図(単位:m)

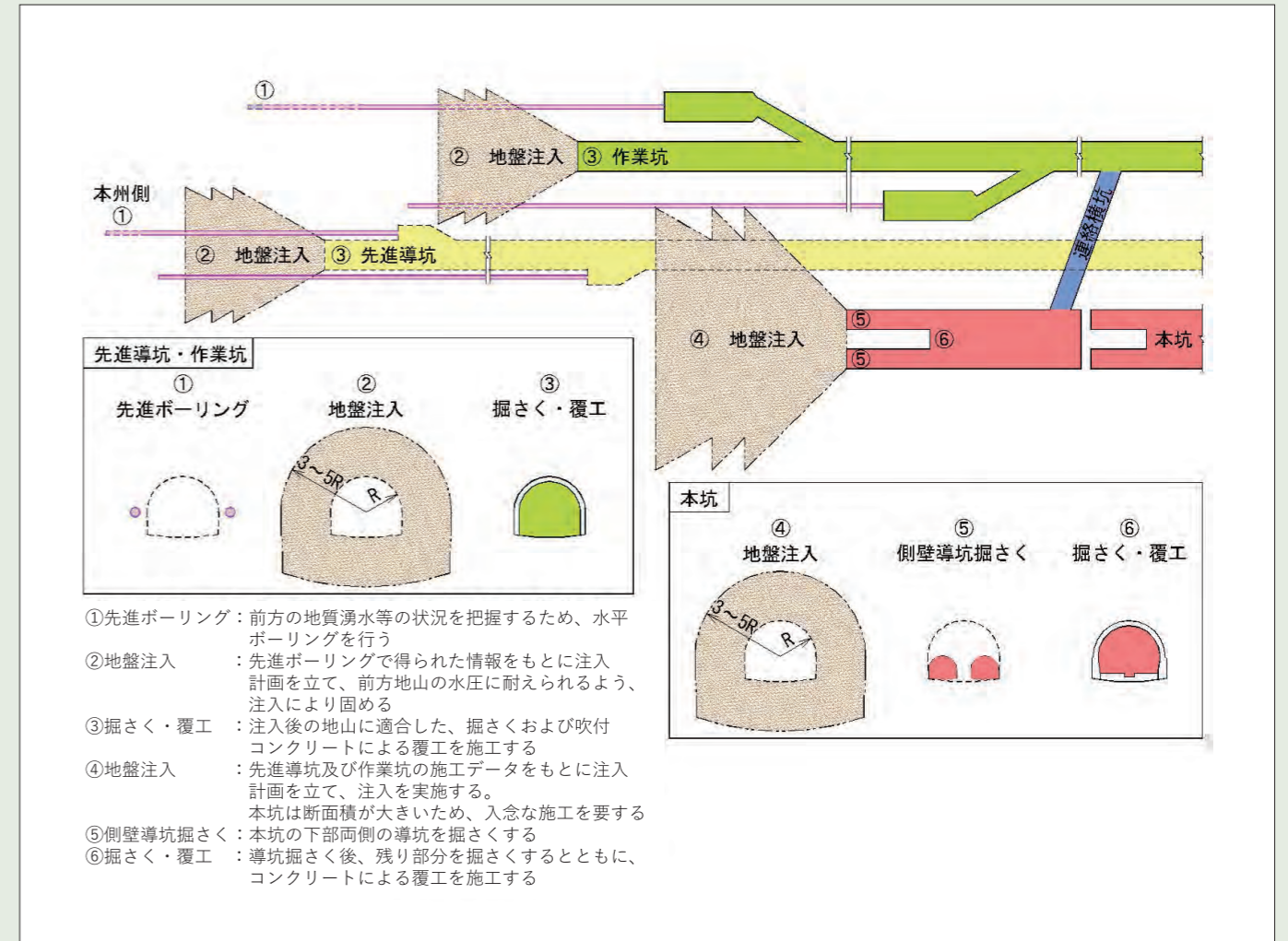


図4 先進導坑・作業坑・本坑の施工順序

先進導坑、作業坑では掘削に先立ちトンネル両側から交互に先進ボーリングを実施して地質や湧水等の情報を把握、これらの情報を基に地盤注入を行い、止水、補強された地山を掘削するパターンを繰り返していた。

本坑の工期短縮に対しては、先行する作業坑より連絡坑を設け、常に3箇所は本坑切羽が同時に稼働するように掘削が進められた(図4)。斜坑、先進導坑、作業坑の有機的な連携と本坑の同時多切羽施工体制により、本坑海底部は13年間で掘削を完了したが、仮に、作業坑がなければ片押しとなり、実績の月進27mからは36年間を要したものと推定される。また、新たに開発した先進調査ボーリング、地盤注入、吹付コンクリートの技術が安全性の向上に大きく貢献した。耐海水性については、漏水防止工の実用化、耐海水性の吹付材料・コンクリートが新たに開発された。

本坑掘削は、まず左右の側壁導坑を施工し、その後上半を切り広げ、最後に下半を掘削する側壁導坑上部半断面先進工法(サイロット工法)(写真1)を標準工法とした。



写真1 本坑海底部の施工状況

建設工事は順調な掘削ばかり続いたわけではなく、斜坑、作業坑において4回の異常出水に遭遇した。中でも1976(昭和51)年5月には吉岡作業坑が約4,600m進捗した地点の切羽から最大70t/分の大出水が発生し、その後方3,000mを超える区間が水没した。水没区間が先進導坑に繋がる換気連絡立坑に達して先進導坑に落下すれば、出水量が斜坑底の排水能力を上回るため海底部の

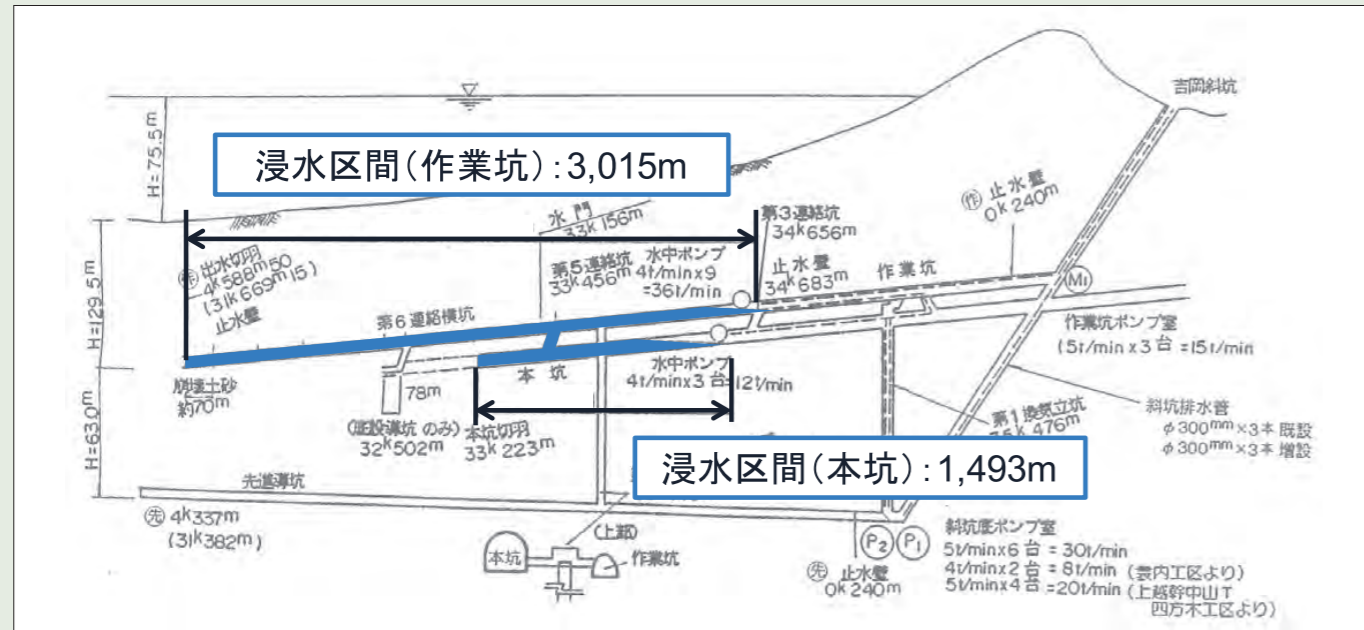


図5 吉岡作業坑の異常出水状況

生命線であるポンプ座が水没し、その復旧はほとんど不可能となる危機に直面した。この危機的状況に対して、坑内に流入する水は本坑掘削区間を水瓶とすべく導水して時間を稼ぎ、その間に追加の揚水ポンプを工事中の上越新幹線のトンネル現場等から調達するなど様々な方法を講じて何とかこの大出水事故を凌ぐことができた(図5)。

3. 幾多の困難を克服した新たな技術の開発

青函トンネルで導入・開発した技術の主なもの挙げられる(表1)。赤字で示したものは青函トンネル工事で開発された技術である。地形地質調査、設計・施工から環境対策まで海底トンネルを建設するために開発すべき技術を当時の指導者は調査段階から的確に認識しており、その課題に対して20歳代中心の若手技術者が実現させてきたということを強調しておきたい。

① 詳細な海底地形図の作成

ルート近傍について1954～55(昭和29～30)年に海上保安庁水路部による音響測探によって、約8kmの幅

で2mコンターの1/20,000の海底地形図が出来あがっていた。この地形図がその後の地質調査やルートの詳細な検討のベースとなり、大いに貢献することになった。

② 海底部の地質調査

表層地質の分布を把握する目的で、海底の岩石のサンプルを採取するドレッシングが行われた。予定ルートの両側、幅7kmの範囲で2,000点のサンプルが採取できたとの記録が残っている。次に海底に感振器を設置した起爆による弾性波探査が行われた。この結果から懸念された古生層と新第三紀層の境界面が、トンネル予定深度より深いところにあることが分かった。

この他に音波探査、空中磁気探査や海上ボーリングなどの調査を駆使して掘削前に作成された地質想定図は、掘削後の実績と比べて地層の出現順序や地質構造等に大きな差がなく、その精度に改めて感心させられる。これで絶対という調査方法はないが、様々な探査方法を組合せることによってこれらの成果が得られている。当時の技術者は地形地質の重要性を深く認識していた。

③ 測量

現在のようなGPSの無い当時において、青函トンネルの測量精度の確保は掘削技術とともに大きな課題であった。地球の曲率を考慮した測地測量が必要であり、津軽海峡を挟む大三角網の全辺長を測量する三辺三角測量を高性能の測距儀を使用して毎年実施した。

北海道と本州では座標系が異なっていたことから、原点をトンネル近くに設置し、曲率による誤差を小さくすること、全ての座標を正の絶対値の小さな値とし計算上の利便を図ることを目的として、工事専用の座標系(0

分類	項目	青函トンネルの建設技術	
地形地質調査	事前	海上弾性波探査	海底に感振器を設置し、起爆による地震波を測定
	施工中	ドレッシング	船で採取箱を曳航し海底面の岩片を採取
		音波探査	スパーカー(音波発信機)
設計・施工	掘削	水平先進ボーリング(コア採取)	リバース工法、二重管リバース工法
		測量	渡海三角水準測量(極地座標を作る)
	注入	掘削方式	側壁導坑先進上部半断面工法(レール方式)
		吹付コンクリート	低モル比セメント水ガラスLWグラウト
環境対策	高強度支保工	フープ筋入り鋼管支保工	
	排水処理	炭酸ガスによる排水処理(pH処理)	

表1 青函トンネルで導入・開発した技術

系)を独自に設けた。

一方、渡海水準測量では地球の曲率による誤差(球差)、光の屈折による誤差(気差)の補整が必要であった。そこで両岸から同時に対岸の鉛直角を観測することで、気差を相殺する同時観測法を採用した。さらに精度を向上させるため、標高の異なる上下2点から対岸の上下2点の計4点を同時観測する4点同時観測法を採用した。

また、坑内測量は開放多角測量とならざるを得なかったが、坑内の測量環境の良い作業休止期間に高性能の機器を使用して坑口からの繰り返し測量を実施し、その精度を高めていた。

これらの測量技術を駆使し施工を進めた結果、先進導坑貫通後に両坑口より実施した確認測量での出合差(=貫通誤差)は、水平方向(トンネル直角方向)で644mm、水平方向(トンネル延長方向)で19mm、鉛直方向で196mmという小さな値であった。

④ 水平先進ボーリング

写真2は、先進導坑での水平先進ボーリングの状況である。右側が先進導坑で、ボーリング機械を据え付ける空間をほぼ数百mおきに左右千鳥で拡幅して設置した。当時、左右に1本ずつ以上先進ボーリングが先行していない限り切羽を進めてはならないという原則の下、効率的に作業を進める必要があり、当初はワイヤーライン工法が採用されたが、その後リバース工法を開発した。リバース工法は、ロッド外周に送水する工法で多量の湧水が存在する青函トンネルでの施工条件に合致した工法であり、最長で2,150mの水平先進ボーリングを可能とした。

⑤ 注入

一般の山岳トンネルでは、排水することによって覆工コンクリートには水圧を作用させないことが原則である。しかしながら、青函トンネルは無限の水量と高水圧という環境下にあり、水圧に対抗する覆工耐力は不可能であることから、トンネル周囲の地山を地盤注入で改良し、この注入域で水圧に対抗するという考え方を採用した。注入範囲の設定はトンネルの支保反力との関係から、トンネル外径の3～4倍と決めた(図6)。注入材料も独自に開発

しており、浸透性、早期強度、耐久性を重視して高炉微粒子スラグセメントと低モル比水ガラスの2液を注入孔直前で混合させる方法(LW注入)を採用した。注入圧力は水圧の3倍とし最大8MPaと高圧になるため、大量の注入を高圧で行えるポンプの開発も重要であった。

⑥ 吹付コンクリート

調査斜坑の掘削が始まった1964(昭和39)年から吹付コンクリートに注目し、西ドイツから吹付コンクリート機械を輸入した。当時は現在主流の湿式の機械は大きかったため、コンパクトで機動性に優れた乾式を採用していた。水の混合も作業員が感覚で直接操作することから、水セメント比の管理は正確にできず、はね返りや強度のバラツキも多く、作業員の腕前に頼る方法であった。しかしながら、吹付コンクリートの有効性に早くから着目し、施工実績を踏まえ改良を積み重ねた結果、現在のNATMにつながったものと考えている。



写真2 先進導坑での水平先進ボーリング

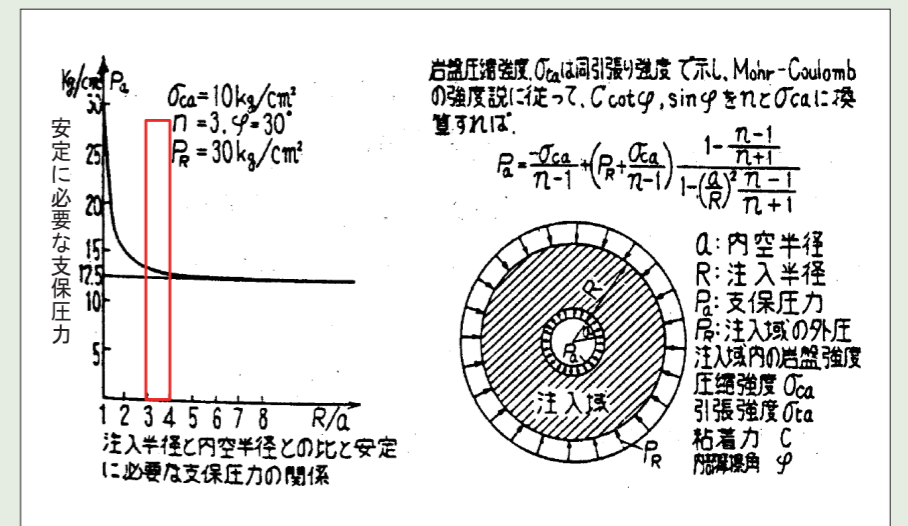


図6 注入範囲の考え方

⑦断層区間の掘削

先進導坑と作業坑において強大な膨圧に苦勞した区間では、本坑掘削時の膨圧対策として円形断面スプリングサイロット工法を採用した。作業坑の計測から計算した耐力1,000tを得るため、12インチ鋼管にフープ筋を入れ、さらに28日強度40MPaの高強度モルタルを詰めた支保工を70cmピッチで建て込んだ。ブリージングの少ない充填性の良い高強度モルタルの開発がSECの開発に繋がり、SECはその後の青函トンネルの吹付コンクリートに応用され、現在のトンネル施工技術に繋がっている。

⑧計測

山岳トンネルにおける計測は今では常識であるが、青函トンネルではトンネル本体の工事着手以前の試験坑や調査坑の時代から計測に取り組んでいた。1968（昭和43）年には試験坑で吹付コンクリートのひずみ測定など、先進的な取組みも行われていた。

⑨環境対策

環境対策としては、それまで地盤注入などの影響で高いpHの排水を硫酸で中和していたが、環境に配慮したCO₂で中和する排水処理方法を開発し、青函トンネルで初めて採用した。

4. 維持管理

海底下・高水圧下のトンネルであることから、覆工コンクリート、吹付コンクリート、注入域の3つの健全性についてモニタリングを施工中の段階から現在まで継続して実施している。計測と分析の積み重ねが世界初の長大海底トンネルの維持管理に大いに役立っている。

総湧水量は開業前に25m³/分ほどであったが、緩やかに減少してきており現在は18m³/分程度に落ちついてきている。この内、海底部の湧水量は当初合計12m³/分程であったが、2008（平成20）年頃には8m³/分程まで漸減してきており、その後はあまり変化がない。湧水量の状況からも間接的ながら注入域は健全であると判断している。

本坑の内空変位については、軌道短絡や感電、触車を防ぐため非接触の3次元計測システムを独自に開発し測定している。変位は最大で±4mm程度に収まっており、十分健全であると判断している。また、海底部の地質不良箇所4地点ではそれぞれ50m間隔3断面でトンネルの軸方向や半径方向にひずみ計を配置し、覆工コンクリートのひずみ測定を行っている。ひずみ量は当初と比較して200μm程度の増減であり、問題ないレベルであると判断している。

計測・観測結果から本坑については健全と判断してい

るものの、覆工コンクリートを打設していない先進導坑の一部で変状を把握しており、計画的に補修を実施することとしている。

このように青函トンネルでは長年の観察、計測データの積み重ねにより維持管理を続けている。

5. 世界における青函トンネル

(1) 青函トンネルに至る道

有史以来、我々は多くのトンネルを手がけており、失敗、成功、技術開発を積み重ねて今日に至っている。その中で青函トンネルは超長大・海底下・難地質条件を克服してつくったものである。必要な技術を開発するという意欲をエンジンとして、鉄道建設魂というガソリンを注ぐことによって、完成に至ったものと思う。

鉄道トンネル技術の変遷を見ると、英国人技師の指導を得た最初の鉄道トンネルである石屋川トンネルから僅か9年後には600m以上のトンネルを日本人だけの力で掘っている。それ以来、ダイナマイトの使用、地質調査の実施、電力の利用、場所打ちコンクリート、シールド工法など様々な技術開発が進められ、今日の技術に繋がっている。

基本的にトンネルの技術開発というのは、いかに安全に掘るか、その上で早く掘るか、さらにその上で安く掘るかということに尽きるが、これらを目的として多くの技術開発が積み重ねられてトンネルが作られてきている。トンネルの技術は、ニーズに応じて改善され次に伝えられていくことを繰り返し、そのような先人達の技術の積み重ねのもと、さらに青函トンネルで様々な技術開発がなされて完成したわけである。

(2) 青函トンネルから歩む道

青函トンネルの成功は、それ以降の難しい施工条件のトンネルの計画、設計・施工に非常に大きな勇気を与えたものとする。青函トンネルの完成以降、英仏海峡トンネルをはじめ多くの長大・海底トンネルが着工・完成している（表2）。

名称	国	位置	延長	用途	着工	供用
東京湾横断道路	日本	川崎・木更津	9.6km	道路 (シールド)	1989年	1997年
英仏海峡トンネル	イギリス フランス	ドーバー海峡	50.5km	鉄道 (TBM)	1986年	1994年
グレートベルト・リンク(イーストトンネル)	デンマーク	シェラン島 -フェン島	8.0km	鉄道 (TBM)	-	1997年
オーレスン・リンク	デンマーク スウェーデン	シェラン島 -スコーネ地方	4.1km	道路・鉄道 (沈埋)	1995年	2000年
マルマライ	トルコ	ボスポラス海峡 イスタンブール	13.6km	鉄道 (沈埋) (シールド)	2004年	2013年
港珠澳大橋トンネル	香港 マカオ	香港-広東省(珠海市)-マカオ	7.0km	道路 (沈埋)	2009年	2018年

表2 青函トンネル完成以降の長大・海底トンネル

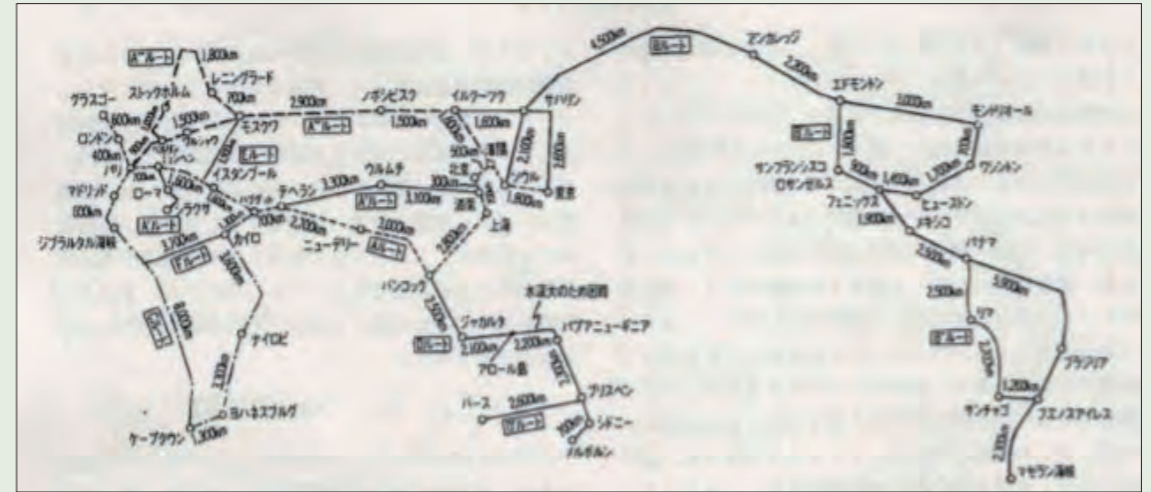


図7 海底トンネルにより陸路で結ぶ

名称	国	位置	延長
大連・煙台海底トンネル	中国	渤海海峡	約120km
台湾海峡トンネル	中国-台湾	台湾海峡	約125km
スンダ海峡トンネル	インドネシア	スンダ海峡	約33km
ジブラルタルトンネル	スペイン-モロッコ	ジブラルタル海峡	約38km
ベーリング海峡	アメリカ-ロシア	ベーリング海峡	約75km
間宮海峡トンネル	ロシア	間宮海峡	約10km
宗谷海峡トンネル	日本-ロシア	宗谷海峡	約40km
日韓トンネル	日本-韓国	対馬海峡	全約270km
豊予海峡トンネル	日本	豊予海峡	海峡部13km
紀淡海峡トンネル	日本	紀淡海峡	海峡部11km
第二青函トンネル	日本	津軽海峡	海峡部23km

表3 世界の長大・海底トンネルの構想

さらに、非常に多くの長大海底トンネルが構想されており²⁾、第二青函トンネルのように実現できたらいいなと思うようなものもある（表3）。

(3) おわりに ～青函トンネルの意義～

加えて誇るべきことは、本坑構造について現時点で欠陥・変状が出ていないということである。東海道新幹線のトンネルの総延長は約67kmであり、それに匹敵する約53kmの青函トンネルにおいて完成以来30年間にわたって何らかの補強・補修を要することなく安全に利用されていることは他に例がない。ここに青函トンネルの計画、建設に大変功績のあった持田豊氏が作成した一枚の図を紹介する（図7）。青函トンネルの偉大な功績が遠い将来、世界を陸路で結ぶような技術に確実に結びついて欲しいと心から願う。

6. 青函トンネルの課題・展望

青函トンネルの費用対効果^{3) 4)} は、B/C=1.68で悪くない。利用者便益の内訳としては77%が貨物、23%が旅客であり、貨物の便益が大きいことに着目したい。ここで課題となるのは青函共用走行区間の速度向上である。現在、共用走行によるリスク回避のため、北海道新幹線

は青函トンネル内を160km/h、明かり区間を140km/hで、貨物列車は100km/hでそれぞれ走行している。

速度向上への当面の対応としては2020（令和2）年度には時間帯区分方式を採用し、210km/h走行を計画している。共用走行区間の速度向上方策は、三線軌道を前提とした3案と三線軌道の制約を撤去した4案考えられている。第二青函トンネル案は分かりやすく、貨物の便益が見込める反面、新幹線の今の輸送規模ではトンネル1本分に相当するかどうかについて多くの意見があるところである。

青函は貨物輸送が51本/日で11,800t、新幹線は札幌開業時で34本/日と見込まれる。一方、関門は貨物60本/日で11,600t、新幹線230本/日、旅客列車100本/日であり、貨物輸送だけ見ると青函と同等であるが、旅客輸送が大きく異なる。島と島をつなぐ海峡リンクでは、青函は貨物輸送が大部分を占めており、青函トンネルの展望は貨物をどうするかということが一番のポイントであるとする。我が国の青函トンネルは重要な財産であり、より一層活用していく対応が求められている。

<参考文献>

- 1) 吉川恵也：山岳トンネルにおける技術の変遷，日本鉄道施設協会誌，No1991_4,1991.
- 2) Lotsberg World Tunnels，世界の海底トンネルプロジェクト 他
- 3) 佐藤馨一：青函トンネルの歴史とその事業評価，土木施工，2016_2,2016
- 4) 佐藤馨一：本州と北海道をつなぐ歴史といま，運輸と経済，2018_10,2018

<図表・写真の提供>

- 図1～7 (独) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構
写真1～2 (独) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構