

=事例に学ぶ=

山岳トンネル機械掘削工法

機械化工法研究会 編

吉井書店

参考資料－4 大規模海底トンネル機械掘削工法の例

1. まえがき

世紀の大事業として注目を集め、1988年に開業した青函トンネルは、年間300万人の旅客と600万トンの貨物を通し、北海道と本州の大動脈としての役割を着実にはたしつつある。

本トンネルは延長54kmで最大水深140mと深く、地質も悪く、大量出水等多くの困難な問題を克服し、本坑掘削に13年もの歳月をついやした。

そして1980年、英仏両国の条約調印で再開されたドーバー海峡トンネルは、1988年本格掘削が開始され、わずか3年間で開通し、1994年5月に開業した。

本トンネルは、延長50kmであるが、水深は60m程度で地質も20~40 MPaのブルーチョークであり、比較的安定した状況で、青函に比較して掘削しやすいトンネルとなっていた。

こうしたことから、本トンネルには徹底した機械化工法を適用し、 $\phi 8.8m$ 、 $L=14m$ の大型掘削機が採用され、延長17km・月進500mという長距離高速掘進が実現し世界の海底トンネル技術の進歩に多大の貢献をしたものとして高く評価されている。

こうした状況のなか、これまで高水圧で延長が長く難工事で工期も長くかかりすぎ、実現性が低いものとされていた海底トンネルについての認識も変わり始め、ベーリング海峡、ジブラルタル海峡、スンダ海峡、日韓トンネル等技術的な面からの検討も一部に始められてきている。

以上のような状勢のなか、これまでの施工実績や各種掘削工法について検討を加え、実験を行うなどして、海底トンネルの新しい工法として大規模機械化掘削工法の基本条件をまとめたので、我が国にとって最も近い韓国との鉄道トンネルという事での事例としてその概要を以下に述べる。

参考資料-4

2. 海峡トンネルの概要

2. 1 延長・水深

日本と韓国間のトンネルの概要を示したのが図2.1で、海峡部を主体としておよそ延長で190kmもあるが、中間に壱岐島、対馬、巨濟島があり、海底トンネルとしては呼子～壱岐島が25km、壱岐島～対馬が53km、そして最も長い対馬～巨濟島が66kmとなる。

最大水深は各々50m、120m、150mとなり、計画土被りをドーバー海峡並みの50mとして計画すると、トンネルに作用する最大水圧は1MPa、1.7MPa、2MPaとかなり大きくなる。

表2.1 世界の海底トンネル比較

項目 トンネル名	総延長 距離	海峡幅	最大 水深	土被 り	水 圧 (水深+ 土被り)	岩強度	トンネル 断面	覆工	工期 掘削	工費
青函トンネル	54Km	23.3Km	140m	100m	2.4MPa	5~15MPa	複線 新幹線 内径φ9.7m	コンクリート厚 70cm	13年	約5300 億円
ユーロトンネル	50Km	37Km	60m	50m	1.1MPa	2~40MPa	単線2本 内径φ7.6m	セメント厚 40cm	3年	約1兆 5000 億円
日韓トンネル	191Km	65Km 49Km 28Km	150m	50m	2.0MPa	数MPa ~ 40MPa	円形複線 内φ10.0m 面積79m ²	セメント厚 コンクリート厚 40+40cm	6~7 年	約3兆 6000 億円

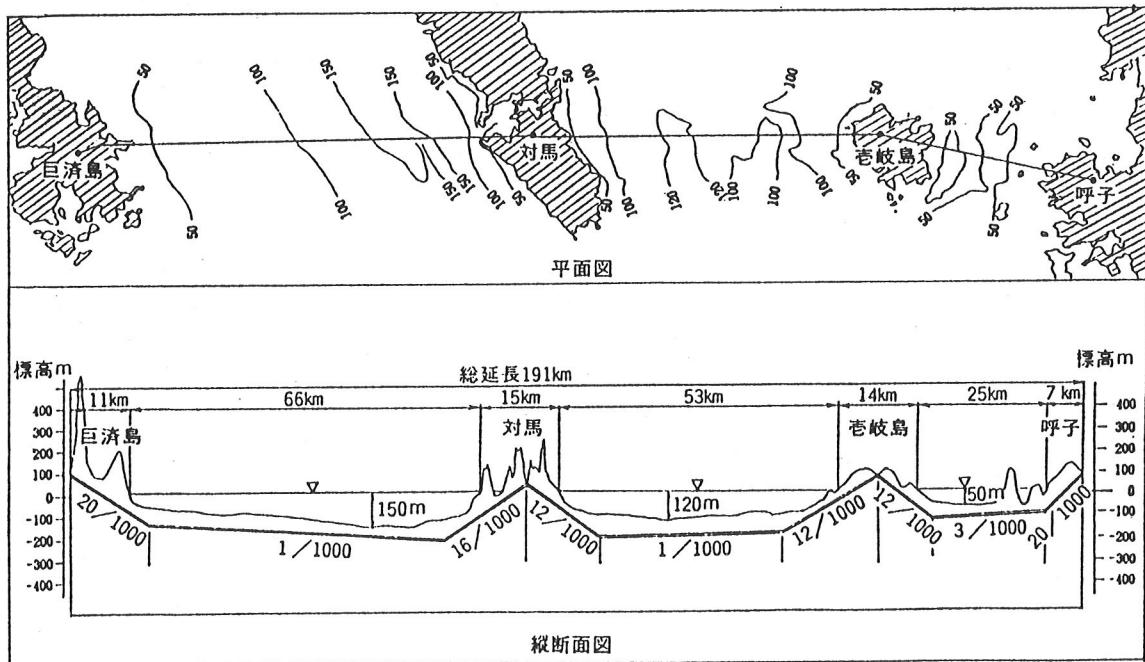


図2.1 日韓トンネル平面図および断面図

山岳トンネル機械掘削工法

2. 2 地 質

佐賀県・呼子～韓国・巨済島間を結ぶ路線の地質は次のとおりである。

呼子～巨済島間の地質は第三紀（漸新世～中新世）の砂岩・頁岩・礫岩・凝灰岩等の堆積岩類と火山噴出岩や玄武岩、花崗岩等の火成岩類および第四紀相当と推定される新期堆積物が分布している（図2.2）。海底トンネルではこれらの地質が掘削対象地山となる。各々の地質の分布する長さは堆積岩類が110km、火成岩類が30km、新期堆積物が50kmである。

断層は陸上部では壱岐島に東西性の規模の大きいと考えられるものが認められる他は、特に土木地質的に問題になるようなものはない。海底部には路線に現れると考えられる断層は南北性のものが4～5条存在すると推定されている。

工学的性質のうち一軸圧縮強さは、第三紀の堆積岩類では45 MPa、火山噴出岩や玄武岩類では60 MPa～100 MPa、花崗岩類では100～150 MPaで比較的良好な岩盤であると推定されている。また、海峡部にかなりの広範囲に分布すると考えられる新期堆積物は、詳細は明らかではないが数MPa程度の軟らかいものと推定されている。

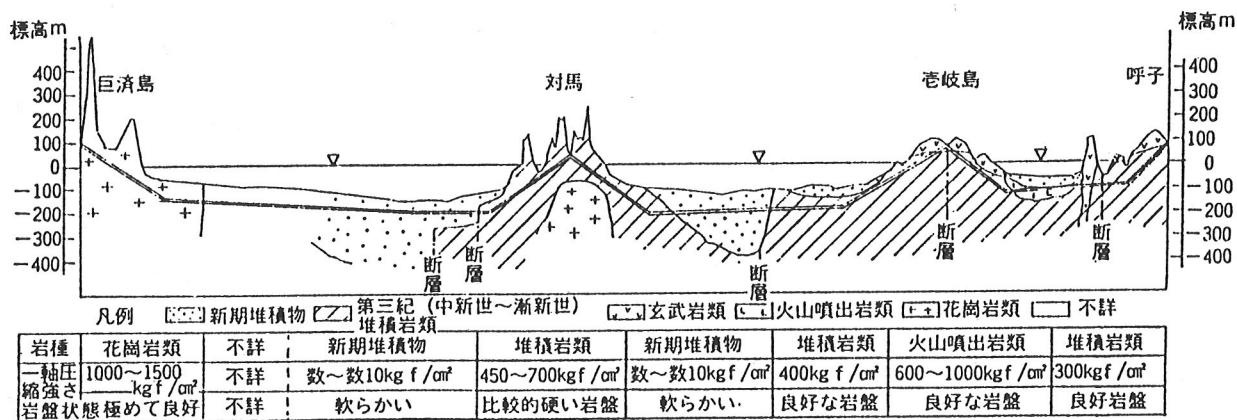


図2.2 日韓海峡地質断面図

2. 3 トンネル断面

トンネル断面については機械化掘削を前提とした円形断面とし、ドーバートンネルのように単線トンネル方式とした場合の経済性、トンネル完成までの工期、技術的困難度を検討した結果、青函トンネルと同様の複線トンネル方式を基本とすることとした（図2.3）。

また、断面としては内径10m、内空面積80m²におさえ、高速列車運行を想定し、

参考資料-4

断面内のすれ違い抵抗、風圧等を考慮して全断面を有効に活用する梁支持、スラブ軌道を採用し、下部空間を保守用、異常時対応、換気、排水等複合活用するよう計画した。

さらに、将来の通信、エネルギー問題に対応して下部空間の一部に光通信ケーブル、超電導電力輸送設備を設置するよう配慮した。

覆工としては $1 \text{ MPa} \sim 2 \text{ MPa}$ の土圧、水圧を想定し最大推力等から設計厚を 80cm とし、これまでの施工実績を検討し、直打ちコンクリート 40cm、セグメント 40cm の安全で確実な合成構造覆工とすることとした。

以上のように、日韓トンネルは延長が 191km であるが中間に島が存在し、最長部で 66km 最大水深 150m であり大方の岩強度も 40 MPa 程度でこれまでの海底トンネルと比較して桁はずれの状況ではなく、実現性は高いものと考えられ、その技術的方向としては高水圧性能の高い大規模な高速掘削・覆工機械化工法が適当であろうとの見解が得られた。

3. 新工法の概要

前述のトンネルを対象に検討を加えた結果、掘削についてはドーバー等の実績からローラーカッター、ビットカッターを装着し、硬軟両層に対応した TBM を主体とし高水圧下での止水性と地山に密着した安全で耐久性の高い覆工体を構築する要件から、裏込め注入のかわりに直打ちライニング工法を用いセグメント工法と併用した掘削・覆工機械として計画・設計した。

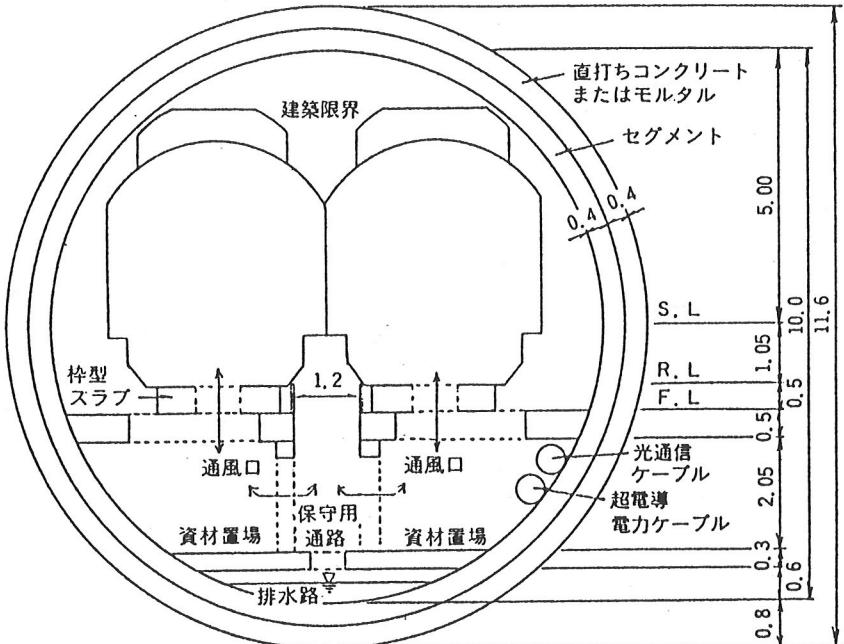


図 2.3 トンネル断面図

山岳トンネル機械掘削工法

これらの概要を示したのが図3.1、表3.1であり、外径は11.6m、長さ12.9m、

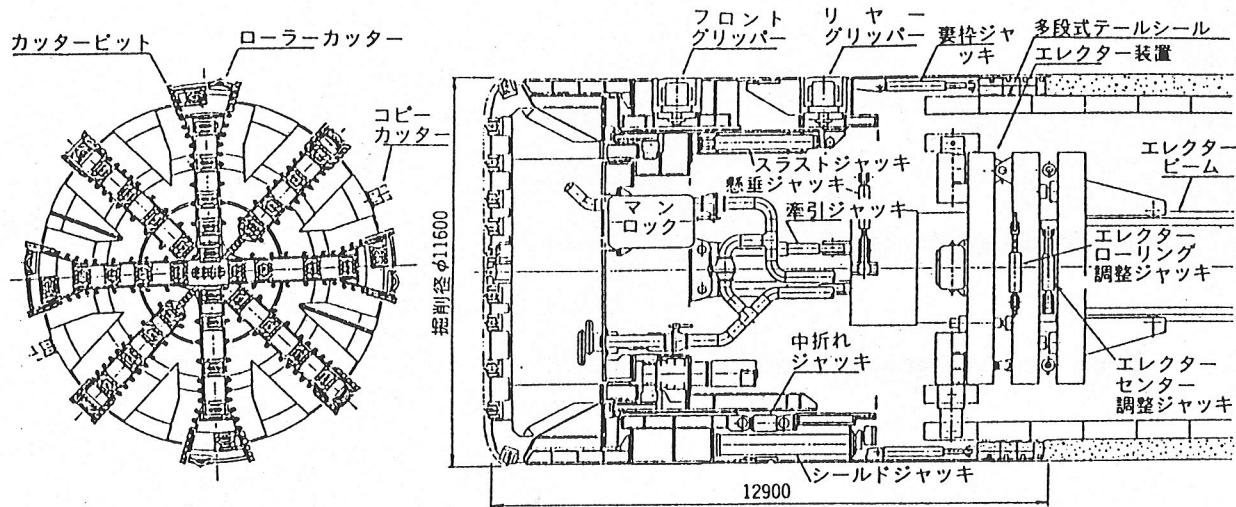


図3.1 シールドマシン

全体重量2,800t、推力21MN、長距離掘削をめざして、ローラーカッター、ビットカッター等の材質は超高強度合金、ダイヤモンド、車両タイヤ鋼練鉄等を用い、本体にはステンレス材、耐摩耗鋼材を使い特殊メッキ、塗装を行うこととした。また、掘削に対し各種カッターが磨耗し、その取換えが必要なことから、ドーバートンネルの実績を参考に先端部が1.0m程度後退できる構造とし、先端部に化学系固化剤を注入し、3MPaで固化後十分な止水ゾーンとして、マンロックからカッター交換をするように工夫している。これらの交換については、ドーバーの実績および特殊カッタービットの材質、日韓トンネルの岩質を基におおよそ2~5km程度と予想されている。

そしてTBMの推進は地山の良好な区間ではグリッパーを主体として、地山が不良な所ではセグメントを反力としたシールドジャッキ推進とし、高速性を発揮できるよう計画した。

覆工の施工についてはこれまでのセグ

表3.1 シールド掘進機諸元

掘 前 径		φ11,600mm
機 械 長 さ		12,900mm
本 体 重 量		2,800t
カッターヘッド	ト ル ク	1000t·m/2000t·m
	回 転 数	2.3rpm/1.15rpm
	動 力	2,640kW
スラスト推進ジャッキ	ストローク	1,650mm
	推 力	6,000t
シールド推進ジャッキ	ストローク	1,600mm
	推 力	21MN
最 大 水 圧		2MPa
妻 杆 ジ ャ ッ キ		125 T×30本

参考資料-4

メントの施工実績やドーバーの実績を調査・分析した結果、6段もの多段型式のテルシール装置を用いても推定される2 MPaの水圧では止水性が長期間保てないことが判明した。

また、セグメント工法の裏込め注入についても2 MPaでの連続注入で、しかも半永久的に材質が変化せず、所定の高強度が保たれセグメントと地山の間が完全に充填できるという観点から検討をしたが困難なことが予想された。

さらに、シールが磨耗した場合等のシール交換が大きな問題となった。

こうした問題を解決するため、コンクリートを連続加圧打設し、地山に密着した覆工を形成し、その止水性も高いものと評価されている直打ちコンクリートライニング工法に着目し、その打設システムについての各種高圧実験を行ってきた。基本実験として円筒容器の下部に1～3 mm程度のスリットを設け、コンクリートを打設後高水圧を作用させ骨材とセメントペーストの分離・流出状況を検討しセメントペーストが流出せず十分な止水性を有する粘性値と適正な配合条件を求めた。そして、これらのコンクリートを用いて高水圧下での打設部分機構の性能実験を繰り返し、その基本条件を決定した。

こうした実験の結果を踏まえて、総合機械実験を行った(図3.2)。この打設実験は径2.8mで1 MPa

程度の水圧下で実施したが、打設実験結果等から流動性コンクリートの充填部については水圧が高くても一部にコンクリート中の水分が絞り出されるが、外部の水は流入せず高い止水性が保たれることが判明した(写真-1)。

また、打設されたコンクリートは地山とセグメントの間に完全に充

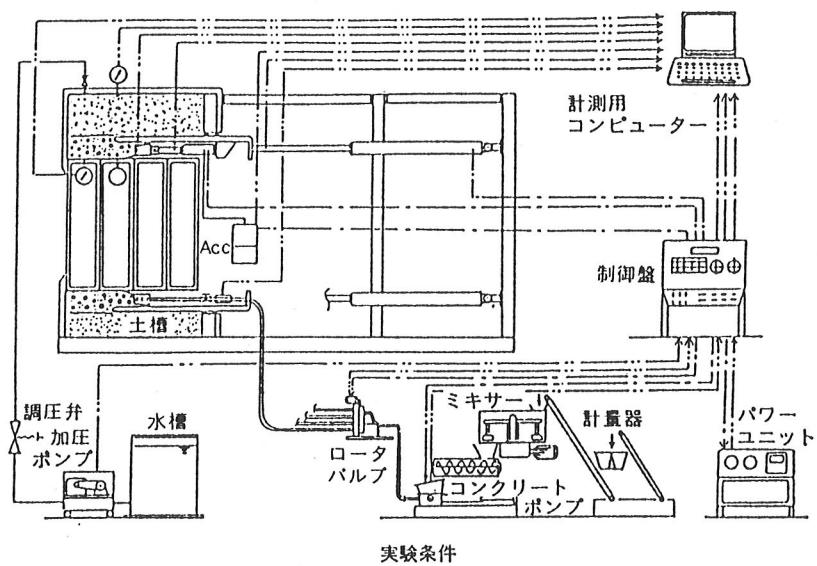


図3.2 実験設備の概要

山岳トンネル機械掘削工法

填され地山に密着した良好なコンクリート覆工を形成していた(写真-2)。そこで、日韓トンネルの高水圧 2 MPa に対応するため、セグメントの裏込については直打ちライニング用の粘性コンクリートを用い、地山とセグメントの間隙を密実に高性能コンクリートで充填し、その安全性と耐久性を高める方式として図3.3の直打ちライニング・セグメント併用の覆工工法とした。これはセグメントをスキンプレート内で組立て、掘削と並行して高品質の粘性コンクリートを 3 m 以内に設けられた打設孔を通じ連続加圧打設し、また、セグメントを組立て、同様の打設を行うもので施工速度も早い。この直打ちライニング工法については、欧洲ではリヨン、エッセンの地下鉄、我が国では国鉄・信濃川発電所、北陸

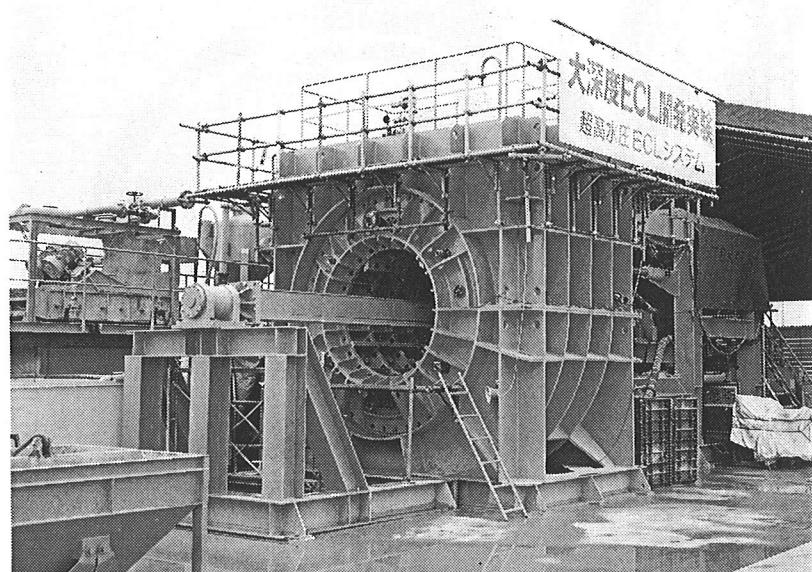


写真-1 超高水圧実験装置

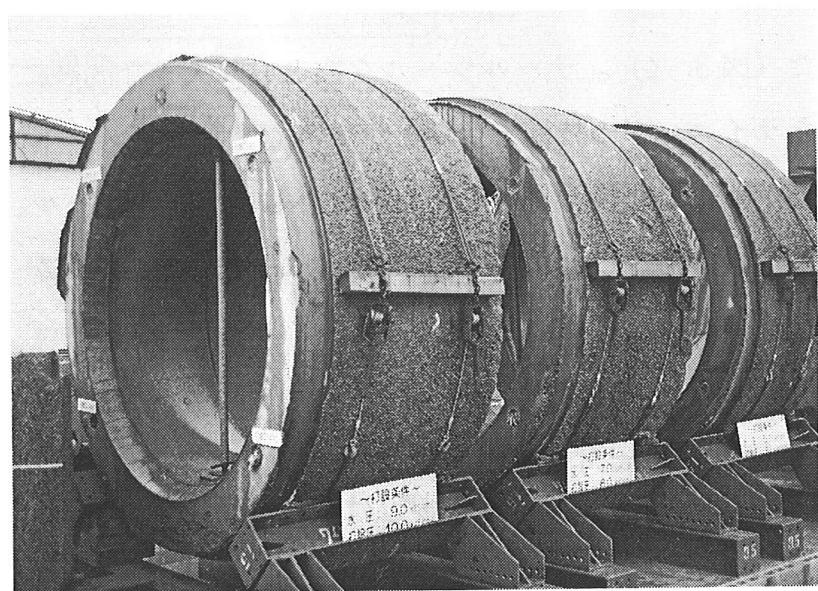


写真-2 超高水圧打設後の覆工体

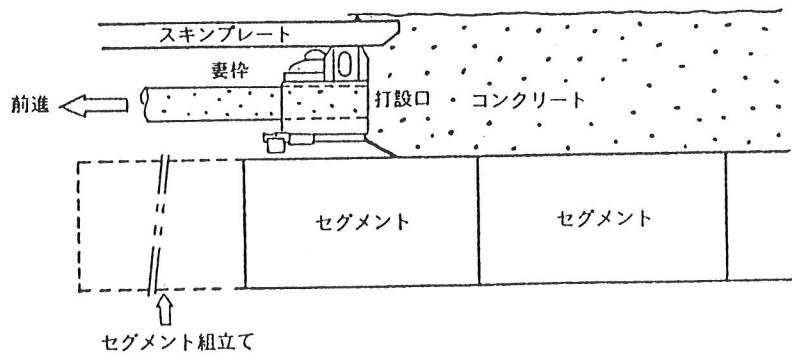


図3.3 コンクリートの打設方法

参考資料-4

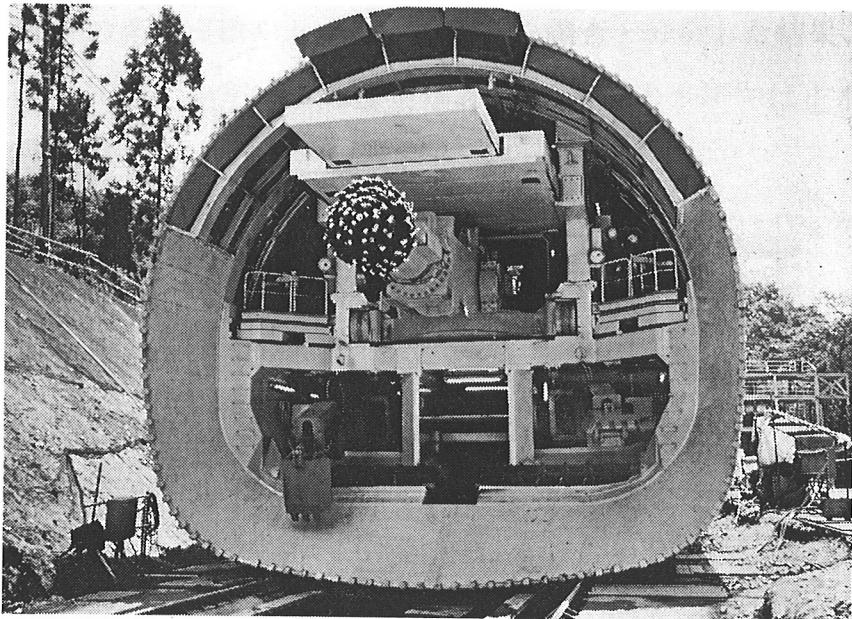


写真-3 秋間トンネルで使用したオープン型直打ちコンクリートシールド機

新幹線・秋間トンネル等に用いられており、システムとしての信頼性も高い（写真-3）。さらに、高水圧であることから直打ちライニング工法の打設管の上・下に緊急用の補助パッキンを装備するとともに、これまで用いられている4段程度のテールシール装置を併用し、止水性を高めることとした（図3.4）。

（図3.4）テールシール交換という大きな問題に対しては図3.5のように直打ちライニングの特性を生かし、組み立てたセグメント内に打設した密着性コンクリートが硬化した後セグメントを取り外し、テールシール、妻枠パッキン等を交換することで解決することができた。

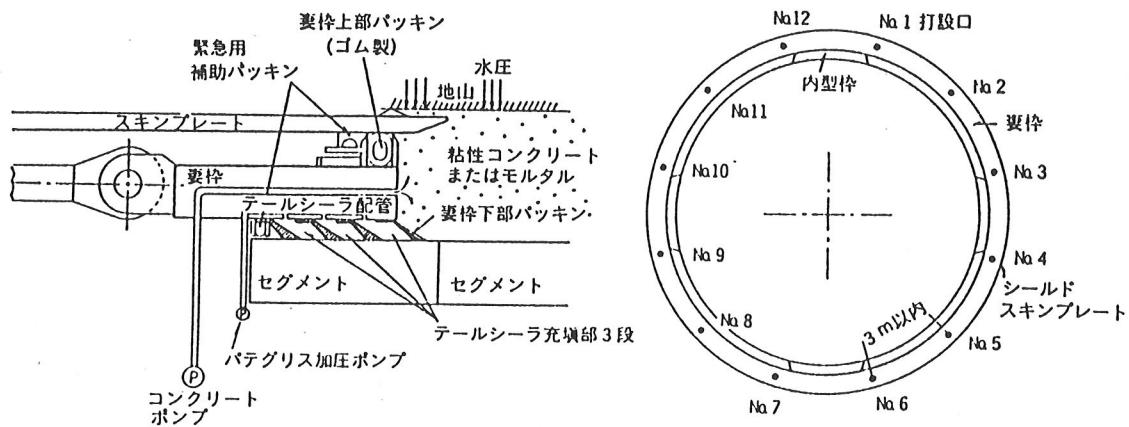


図3.4 高水圧対策コンクリート打設機構

山岳トンネル機械掘削工法

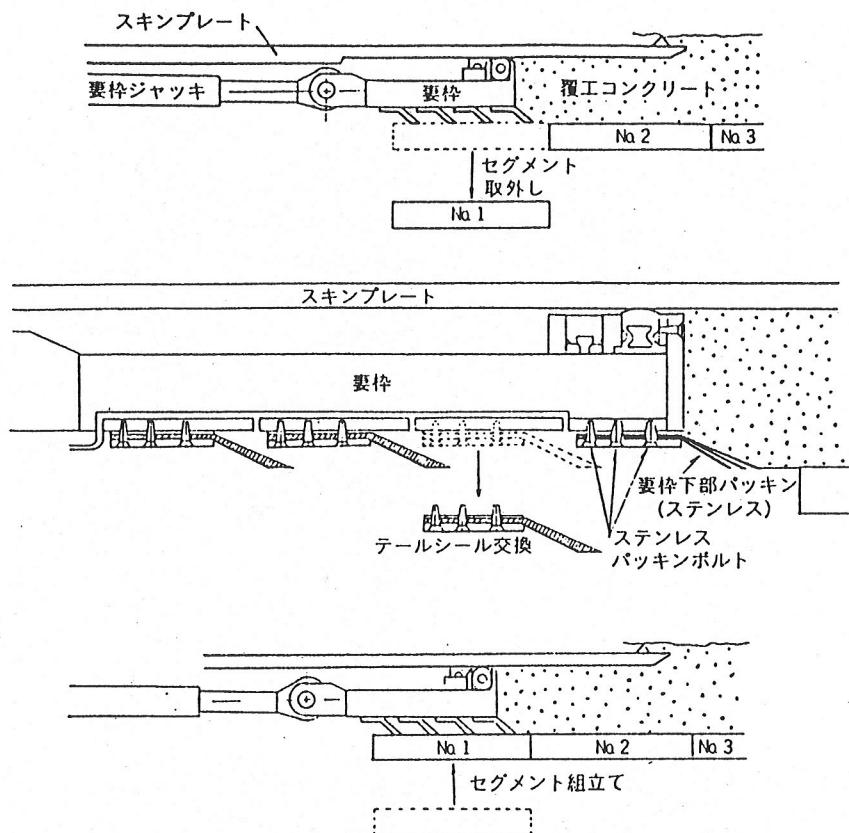


図 3.5 テールシール変換図

4. 工期・その他

高速掘削を実現するため、直打ちライニングとセグメントについては、一リング長を1.5m程度にすると共に、セグメントの継手については、地質の状況から判断して圧縮力が主体となることからなるべく簡易で組立てが簡単なホゾ継手を主にボルトはセグメント組立て程度とした。また、ドーバーで実施したようなダブルエレクションセグメント自動搬送設備を用い、地質が良い所では掘削・エレクション同時作業ができるよう配慮すると共に、ズリ出し材料搬入には大規模な複線列車輸送方式を採用するよう計画した。

こうした条件を具備した場合の施工速度は、表4.1に示したように岩石強度40 MPaで、200m³時掘削として、25日稼動で500m/月程度となり、ドーバー海峡の実績とも良く符合する。

したがって、本坑掘削工期はおおよそ6～7年程度となる。

工費としては極めて概算であるが、掘削機製作・保守で4500億円、覆工が2兆

参考資料-4

6000 億円、軌道・

電気 1900 億円、
排水・換気設備・

コンクリート工、
その他等 3600 億
円で総計 3 兆 6 千
億円程度と試算さ
れる。

以上、大規模高
速機械化海底トン
ネル工法について
これまでの検討の
結果を基に概述し

た。

まだまだ課題もあるが、このようなシステムを用いれば表 3. 1 に示したように有
効な海底トンネル技術として実用に供することができるものと推察している。

5. あとがき

新しい海底トンネル工法について概述したが、本トンネルの効果についてはつぎの
ように推察されている。

現在、日本・韓国間については旅客 140 万人／年、貨物 1000 万トン／年程度となっ
ているが、本トンネルの影響は鉄道網全体として見た場合は単に両国間にとどまらず
近隣影響圏として、北朝鮮・中国・ロシアが対象になり全体としては東南アジア諸国、
中近東、欧州各国の広大な地域に及び、経済・文化交流等、各方面の効果は膨大なも
のになるものと期待されている。

たとえば、沿線各国の列車速度を 200km/h 程度に整備した場合、近隣諸国を主体
に 900 万人／年の需要が推定された。

さらに、フランスやドイツで目標とされている 400km/h の超高速列車運行を適用
した場合、パリ、ベルリンまでが 1 日半となり、朝出発して翌日の昼に到着できるよ

山岳トンネル機械掘削工法

うになり、2,300万人／年程度の需要が喚起されるものと推定されている。

貨物についてはスエズ運河経由、欧州大陸行きで一ヶ月もかかっているものが、日本～フランスで1週間程度となりこれまでの物流を大きく変えるような大きな効果が生じ、近隣諸国を含めて将来的には16,000万トン/年程度もの需要が見込まれる。

また、本トンネルに共同敷設した光ファイバー通信は増加する将来の通信需要を効果的にまかない、世界的な通信時代に対応すると共に、超電導電力輸送システムは夜間余剰電力を各国に有効分配するなど国際エネルギー効率の向上に多大な貢献をするものと注目を集めている。

こうした経済効果とは別に文化・文明面からの大規模交流による効用にも多大の関心が寄せられている。

以上のように「海底トンネル」はその建設に多くの資金と高度な技術力を要する、一方、地球規模での効用を及ぼすものであり、これらの事柄をバランスよく調整し、世紀の国際プロジェクトとして大所・高所から計画を検討・推進することが寛容であろう。

鬼頭 誠
蝦名 克彦
地田 信也