

山陽新幹線新関門トンネル海底部破碎帯の掘削

おお 大 わき 脇 やす 康 たか 孝*

1. はしがき

山陽新幹線新関門トンネルは、18k713m の長さを有しスイス・イタリー国境のシンプロントンネル(延長19k820m) に次ぎ、現在施工中の青函トンネル(53k850m) および上越新幹線の大清水トンネル(22k280m) を含めると世界第4位にランクされる長大トンネルである。関門海峡を横断して本州と九州を結ぶトンネルとしては山陽本線関門トンネル、関門国道トンネルに続く3番目のものである。トンネルのルートとしては、海底部および陸上部の地質、現在線との連絡の便、市勢、通過地域の状況、新幹線の線路規格、運転、保守上の優劣、工事費などあらゆる角度から比較検討して決定したものである(図-1, 図-2)。

新関門トンネルの掘削はその延長もさることながら880mに及ぶ海底部、ここに存在する幅40mの断層とこれに伴う破碎帯、わずか24mのうすい土カブリ、海水の湧出などの諸条件を限られた工期の中でいかに克服するかにあった。この稿では新関門トンネル成否の鍵ともいえた海底部断層破碎帯の施工について述べることにする。

2. 工事の概要

トンネル主体工事の完成は、路盤コンクリートを含めて昭和49年3月を目標に下関方坑口と中間に6箇所の斜坑、1箇所の立坑を設けて工事を進めたが、協議などによる工程の遅れをカバーするために斜坑を2箇所追加し最盛期には小倉方坑口付近のオープンカット工法区間を含めて合計11箇所の切羽をたてて工事の進捗を図った。

トンネルの断面は図-3に示したように標準断面を設け地質不良区間および海底部では巻厚を増しインバートストラットを施工し、特に海底部の断層破碎帯区間では巻厚を増すとともに形状を真円の閉合断面とした。また小倉方坑口付近の土カブリのうすい市街地地区はオープンカット工法によりカルバートボックスとした。

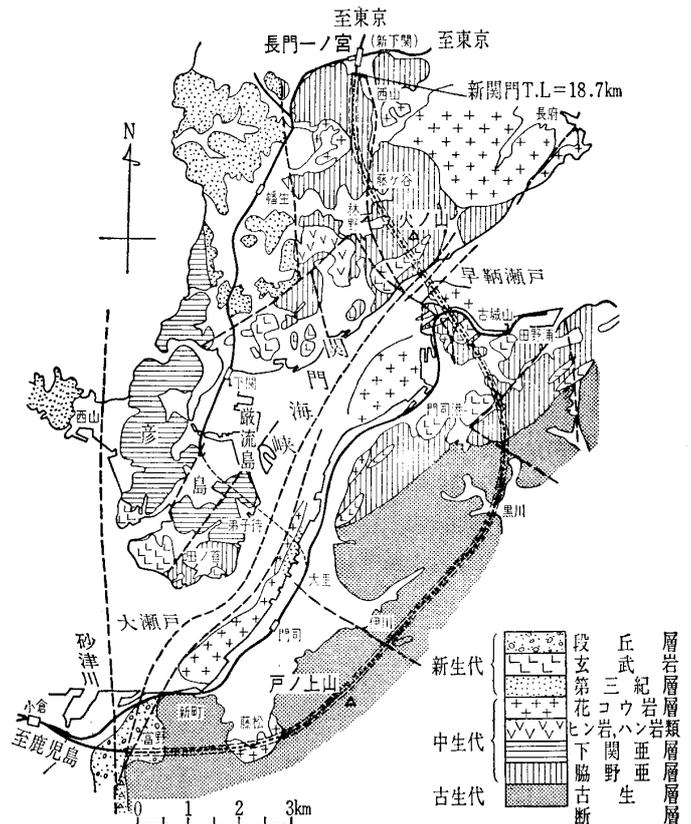


図-1 新関門トンネル平面図

支保工は上部半断面鋼アーチ支保工 150H, 175H, 200H の3種類を使用し、海底部破碎帯では特に 250H を使

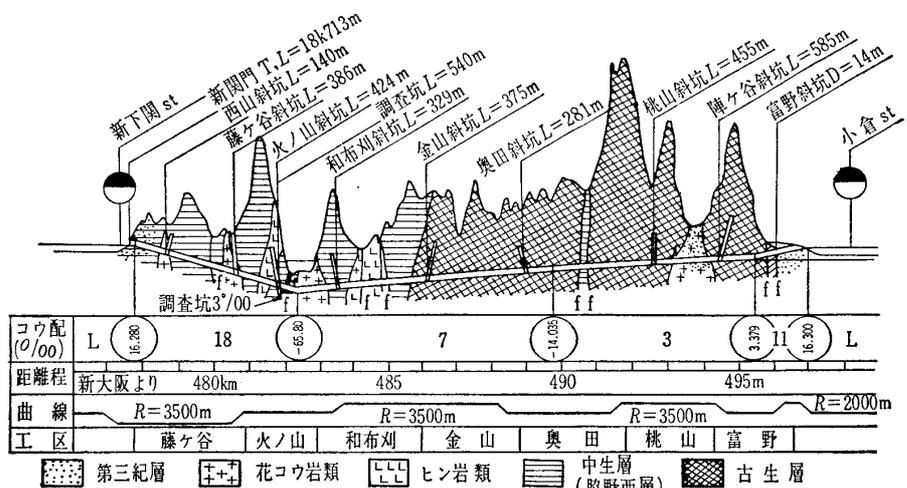


図-2 新関門トンネル縦断図

* 国鉄 鉄道技術研究所 主任研究員

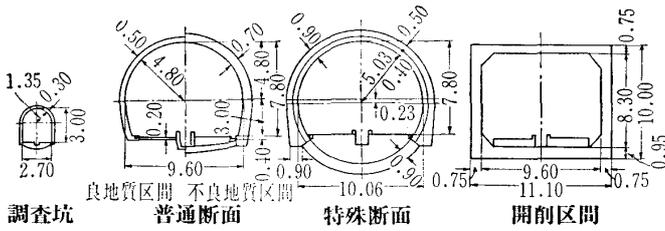


図-3 トンネル設計図

用した。内バリは枠組を強化させる目的で鋼管を採用した。掘削工法は底設導坑先進上部半断面工法を標準としたが地質不良区間では側壁導坑先進上部半断面工法、リングカット工法あるいは上部半断面先進工法を採用した。海底部の破碎帯区間では先行して地質、湧水の状況を察知し本坑の掘削に資し、将来は排水坑として使用するため調査坑を掘削した。本坑では普通の側壁導坑の断面では掘削が困難であると考え、小断面側壁導坑を多段に重ねて施工した。市街地直下のカブリの浅い区間では PIP 工法などで建物の変状、沈下を最小におさえ、またオープンカット工法も採用した。

覆工はコンクリート巻厚 50 cm, 70 cm を基本とし 4 週強度 160 kg/cm² のコンクリートを打設した。海底部破碎帯区間では最小巻厚 90 cm の円形断面としてコンクリート強度を 320 kg/cm² と規定した。

3. 海底区間の地質

3.1 調査

海底区間の地質調査は路線計画の段階で重点的に行ない、本坑の掘削にあたっては長孔水平ボーリングと調査坑の掘削により直接目視で地質を確認した。事前の調査では、音波探査、弾性波探査、ボーリングなど

を行なったが弾性波探査は航路、漁撈などに対する影響があるため海中発破が行なえず浅層弾性波探査を併用して解析を行なった。実施した各種調査を表-1 に示した。

3.2 地質

図-4 に調査坑および長孔水平ボーリング（後述）の掘削実績から作成した海底区間の地質を示す。海底部の地質は本州海岸線から約 130m 付近までは中生代白亜紀の関門層群に属する砂岩、ケツ岩、凝灰岩などからなり、砂岩、ケツ岩の一部は花コウセン緑岩の貫入による熱変質を受けホルンフェルスとなっている。これより九州方はヒン岩、花コウセン緑岩が分布し、特に後者は海底部の約80%を占めている。これらの花コウ岩類中には若干の断層が存在した湧水もあったが一般に堅硬であり掘削は順調に進捗した。一方、本州方海岸線から 80~150m の間には幅約20mの粘土帯をはさんで40mの断層破碎帯が存在し、この断層運動のために関門層群は一般に軟弱化し、き裂が多く各所で海水の湧出がみられた。本州方よりこの断層破碎帯へ向かっての区間は湧水が多く平均 4.0~6.5 t/min に及び、特に断層の手前80m 間では最高 8 t/min にも達した。この断層（以下主断層という）を越えて九州方約 100m 間でも地質

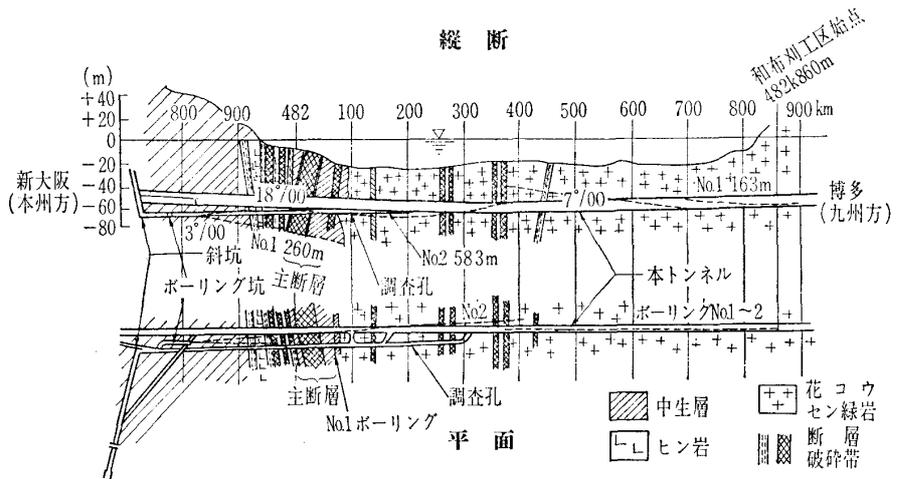
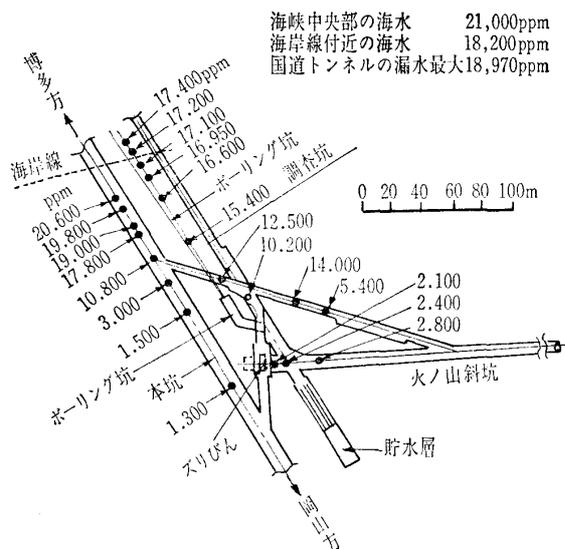


図-4 海底区間地質縦断図

表-1 海底区間地質調査一覧

調査法	単位	数量	用途			記事
			(1)	(2)	(3)	
資料調査	—	—	○	○	○	学術報告, 在来トンネルの調査工事記録
音波探査	km	96	○			音響測深とともに実施
弾性波探査	km	8.1	○	○	○	概略設計・施工法の策定にも使用
浅層弾性波探査	km	1.0	○	○	○	表層の地盤状態のは握のため, 再解析の資料
弾性波探査に伴うボーリング	m	546	○	○		発破孔として使用
海上ボーリング	m	307	○			電気検層実施
斜めボーリング	m	190	○		○	電気検層, 弾性波検層実施
磁気探査	式	1	○			不発爆弾, 機雷の探査海上ボーリングのため
海底部水平ボーリング	m	1,487		○	○	海底区間の実施設計, 施工法の策定のため

目的: (1) 路線選定のため, (2) 設計・積算・工事計画の立案のため, (3) 実施設計・施工法の策定のため



図一五 Clイオン測定値

は軟弱で湧水も多かった。

この区間で湧水はいずれも塩分を含み、これら塩水の湧出は工事中、完成後を通じて機器を腐食し、電気絶縁度を不良にするためその湧出範囲を明らかにする必要があり、各地点の湧水について化学分析を行なった。その結果、Clイオンについてみると海岸線から内陸部へ150mの地点までClイオンが検出され、すなわち海水が浸入しており、約100mの地点では海水濃度の1/2程度の濃さまで高まり時間の経過とともに濃度が増加した。

また海底主断層区間で実施した長孔水平ボーリングは無水掘りで行ない、乱さない試料の採取は困難であったが、均質な粘土層の部分が採取できたためこの試料によって土質試験を行なった(表一2)。

一軸圧縮強度は小さいが、これは粘土層の部分のみの値であり地山を代表するものではないと考えた。粘土鉱物はX線分析試験によりクロライト、モンモリロナイトが若干検出されたが膨張性クロライトは少なく、またその後調査坑で採取した破碎帯の粘土についてもスレーキングテストを行なったが、著しい崩壊はなく、当初の予測よりも地山

表一2 海底部主断層粘土の性状

採取位置	火の山水水平ボーリング№2 198.5~206.0m
土質	レキ混じり粘土質ローム
液性限界	22.6~40.2%
塑性限界	9.0~12.2%
塑性指数	12.2~29.1%
流動指数	3.1~10.0%
含水比	6.0~11.9%
単位体積重量	2.12~2.24 kg/cm ³
間隔比	0.34~0.52
一軸圧縮強度	2.61~6.05 kg/cm ²
粘土鉱物	モンモリロナイト、クロライト若干含む

は安定しており、応力開放による地山の内空への押出し、湧水による地山の流出はないものと判断した。

4. 施工法の検討

一般に水底部あるいは高含水帯の掘削工法として、圧気シールド、沈埋、凍結、注入などの各工法があるが、これらについて検討した結果、トンネル位置で約60 t/m²の水圧(海水面下約60m)が予想されること、軟弱な破碎帯と堅硬な岩盤が併存していること、湧水が塩水を含むため氷点が高いこと、船舶の往来がひんぱんでかつ潮流が速く海上作業が困難であることなどから上記の工法を断念し、湧水のあるき裂、破碎帯では十分な注入を行なうことにより止水、地山を強化したのち全区間山岳工法で施工することに決定した。

掘削は導坑先進上部半断面工法を標準とし、主断層の35m間は調査坑と同様パイプルーフ工(後述)を施工することにした。パイプルーフ工施工後の本坑掘削工法については別途行なう長孔水平ボーリングおよび調査坑の掘削による詳細な地質の情報を得てから最終的に決定することにした。

調査坑の掘削については、さきに行なった弾性波探査の結果と関門国道トンネルの施工実績から九州方は地質が良好であり調査坑を省略できると判断した。そして長孔水平ボーリングはこれをカバーする意味で海底部全区間について実施した(図一4参照)。

4.1 長孔水平ボーリング

海底部の地質については事前の諸調査で概略判明していたが、いずれも直接ルートの状態を的確には握したものでなく、のちに掘削する調査坑に先行して地質資料を得ることと、調査坑を省略した区間のカバーのために海峡の両側から長孔水平ボーリングを実施した。

本州方は調査坑から分岐したボーリング室から、九州方は海底部隣接工区の底設導坑からそれぞれ500mずつを掘削する計画をたて掘進したが、いずれも途中で孔曲りを生じたため中止し再掘進を行なった。当初孔曲りは下向きに卓越すると考えていたが、堅硬部では上向き、軟岩部では想定どおり下向きであった。堅岩部で上向きの曲りを生じた原因は、岩質が割目のほとんどない花こう岩であったため微細なくり粉がロッドの先端下部にたまりビットがこれに乗り上げて強い押付圧のためスタビライザーが機能を果たさず順次上向きに偏向したと思われる。

4.2 調査坑

斜坑掘削を終了し坑底設備の完了後、調査坑の掘削に着手した。斜坑底付近の地質はあまり良好でなく、調査坑は当初から塩分を含む湧水に悩まされたが1か月後には調査坑から分岐した長孔水平ボーリング室の掘削を終了した。長孔ボーリングと平行して調査坑の掘削を続行したが海岸線付近からさらに湧水が多くなってきたため、微粉末セメ

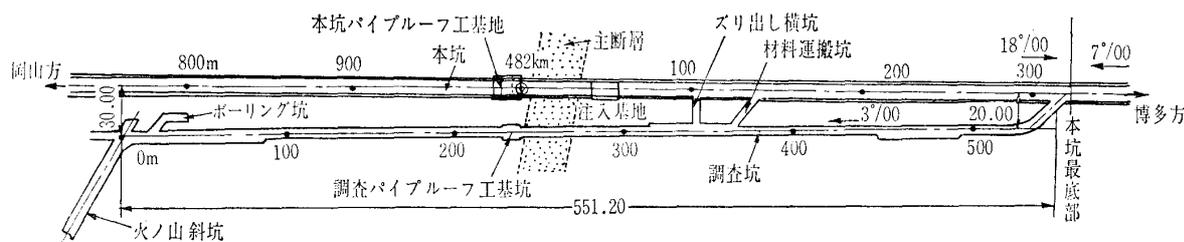


図-6 調査坑略図

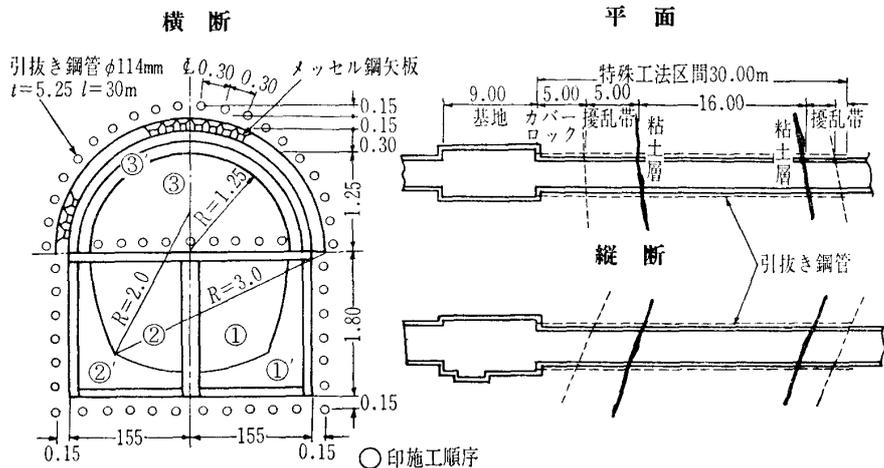


図-7 調査坑パイプルーフ工略図

ントを主としたセメントミルク注入を行ない地山の強化を図ったのち着手後約7か月後に海岸線から約80mの位置にある主断層の手前に到達した。これまでき裂の多い破碎帯区間では注入により止水，地盤強化を行なったのち掘削を行ってきたが，主断層の粘土区間では空ゲキがほとんどなく注入による地盤強化が期待できないので施工法を検討した結果，掘削の前にあらかじめ引抜き鋼管を掘削断面の周囲に打ち込んで周辺地山のゆるみ，ヒービングを防止し閉合断面を形成する，いわゆるパイプルーフ工法を採用した。図-6に調査坑の略図を，図-7に調査坑パイプルーフ工略図を示す。

引抜き鋼管は外径114mm，厚5.25mm，長さは3.0mのものを順次つないで30mとし，これを調査坑の外周および中段に約30cm間隔で53本を打ち込み断面を図のように3区画に分けて掘削した。パイプの打込みは断層の手前に5mのカバーロックを残して調査坑断面より半径65cm拡大した基地から施工した。パイプ打込み後，主断層両側の岩盤のき裂とパイプ周辺の間ゲキは水がまわって粘土が流出するのとゆるみを防ぐため1本ごとにLWで口元をパックしたのち35kg/cm²の高圧でセメントミルクを注入した。

掘削は図-7のように①を掘削，①'のコンクリート打設という順番でピック掘りによった。各段は少しずつずらせて併行作業で行ない，S.Lより下部は150H鋼アーチ支保工を90cm間隔で建込み，側壁コンクリートは切羽の1間を残して3.0mずつ打設した。上部半断面は長さ4.5mのメッセル鋼矢板を使用し，リングカット工法で掘削した。

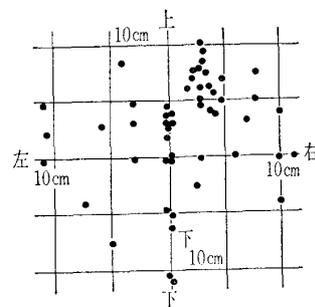


図-8 パイプの偏心量

掘削時の湧水は本州方破碎帯で0.2t/min程度（調査ボーリング時，2t/min）であり粘土帯ではほとんどなく，パイプ打込みから約3か月を要してこの主断層を突破することができた。なお打ち込んだパイプの偏心量は図-8に示すように最大誤差は約11cmで，掘削時に切断を要したものはわずかに4本であった。

5. 本坑の施工

5.1 設計

海底区間のトンネル内空断面は主断層区間を除いて陸上部と同じく標準断面としたが地質の良否にかかわらずインバートストラットを設けることとした。トンネルにかかる水圧については，良好な岩盤の場合覆工背面の空ゲキを高強度のモルタルで十分にてん充して地盤反力を期待することにより巻厚は標準のままでよいと判断した。

主断層のように不良な岩盤，粘土帯では地盤反力を十分期待できず，周辺地山のゆるみを考慮に入ればかなりの外圧がかかることになる。トンネルの深さ位置から静水圧60t/m²，ゆるみ高さ3m，岩比重2.3程度を想定し種々の断面形状について応力計算を行なったが，その結果，外圧に耐えうるのは円形断面のみで，他は側壁とインバートの隅角部に許容応力以上の引張り力が作用することがわかった。このため主断層の区間については，図-3のように巻厚90cmの円形断面とすることに決定した。

5.2 主断層の施工

(1) 掘削工法の決定

主断層の掘削に先立って調査坑で成功したパイプルーフ工によって地山周辺を固めてから掘削を行なうこととした。掘削工法としては軟弱地質に対してつぎのような工法が

適している。

- 1) 多段式側壁導坑先進上部半断面リングカット工法
- 2) 鋼枠坑道式多段ブロック工法
- 3) 上部半断面リングカット工法

これらについて長孔ボーリング、調査坑掘削時の結果を参考にして検討した結果、薬液注入による止水、地盤強化法を併用した4段式側壁導坑先進上部半断面リングカット工法（1次、2次覆工ドンツキ施工、ドンツキ施工：掘削と覆工を交互に行ない両者の間隔をできるだけせばめて地山のゆるみに対処する工法）に決定した。なお4段式は掘削過程で決定したもので当初は3段で計画した（図-9）。3段から4段に変更したのはつぎの理由による。

- イ. 上半リング部分の鋼アーチ支保工(250H)の重量が大きく3段では運搬、建込みが困難である。
- ロ. 3段ではリング掘削両側とリング中央部との高低差が大きいため中央部のズリが落下して危険であるため同時掘削ができない。したがって中央部切羽の放

置時間が長くなる。

また5段にした場合はパイプ打込みのスペース、サイロット（側壁導坑）の形状に問題があるので採用しなかった。

(2)パイプルーフ工基地

主断層区間のパイプルーフ工施工のため断層の手前に図-9に破線で示すような大断面区間を設けた。またその平面および各室の断面を図-10に示す。

この基地は図に示すように掘削断面が大きいこと、破碎帯であり海底部であることなどを考慮して外周4.0mの範囲にLWを注入し2段サイロットリングカット工法で施工した。

(3)地盤注入

調査坑の場合は周辺地山に対して広範囲の注入は行なわなかったのであるが本坑は調査坑よりも面積で13倍、土カブリでは約13mうすくなることからパイプルーフ工と併せて掘削断面内およびS.Lより下部の断面外3mの範囲に対してはLW1号を、S.Lより上部の断面外約8.0mの範囲に対してはLWおよび尿素系樹脂（エスロックVB）を注入した。LW1号を使用したのはゲルタイムを長くしてかつ強度を大きく保つためである。図-11は本坑主断層注入のパターンを示したものである。

(4)掘削と覆工

掘削は図-9に示したように4段式側壁導坑先進上部半断面リングカット工法で行なった。

掘削順序として、まず左右の第1段サイロット②の部分に150H鋼アーチ支保工、90cm間隔で建て込みつつ、35m全区間を一気に掘削したのち③の中埋めコンクリートを全面でん充する。ついで第2段サイロット④⑤についても同様、以下図に示す番号順に施工を行なった。

中埋めコンクリートを全面でん充したのは長期間の放置

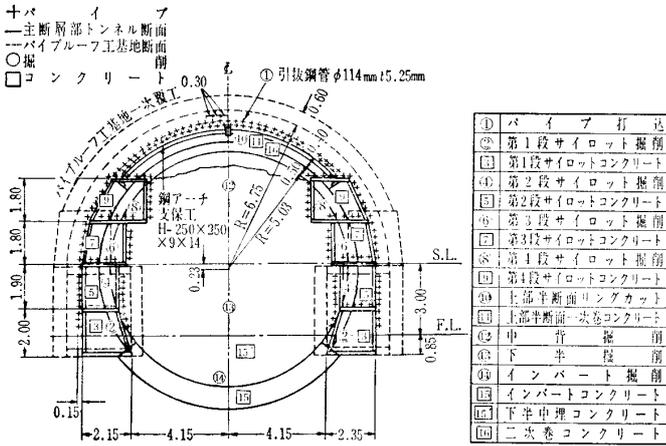


図-9 主断層区間特殊工法

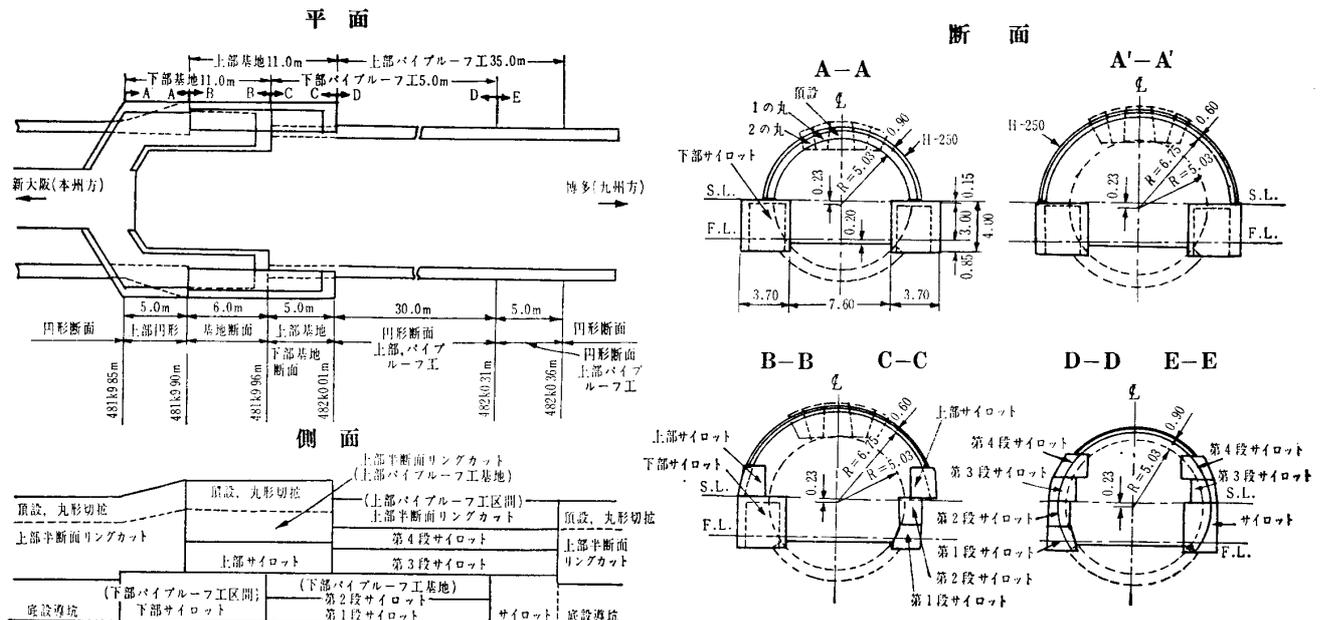


図-10 パイプルーフ工基地

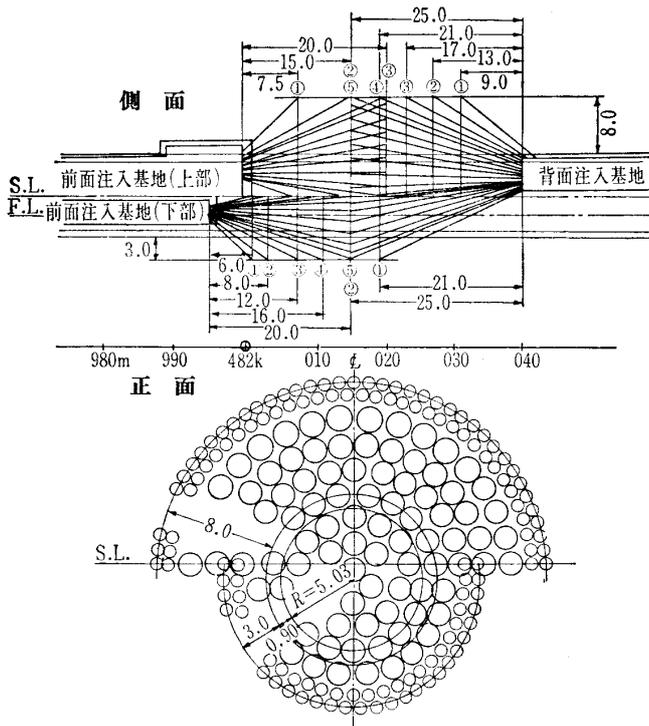


図-11 本坑主断面層注入パターン

による地山のゆるみを防止することと、各段サイロット掘削による地山のゆるみに対し補助注入を行なって、地山の再強化をはかる場合に薬液が空間部に漏出するのを防止して注入効果をあげるためである。また、コンクリートを全面でん充したのは、これの取りこわしを入れても高価な薬液の漏えいよりも経済的であるとの判断によるものである。このようにして第4段サイロットの終了後、地山のゆるみに対して補助注入を行ない上部半断面リング部⑩の掘削に着手した。この部分の施工は、図-12に示すように 250H

鋼アーチ支保工のフランジ間にベルノルドシートを使用して仮巻コンクリートを打設して掘進した。なおシート突起間の開口部からのコンクリートの流出は3%程度を見込んでいたが、流出量が多かったため突起内に10#鉄線をそう入して流出量の減少をはかった。この仮巻コンクリートに約6mおくれでⅡの一次巻コンクリートを打設しながら全体工程を進めた。このうち S.L より上部の中背掘削⑫、第4段、第3段サイロット内空側の支保工、パイプの撤去、ならびに2次巻コンクリートⅢに支障する中埋コンクリートの余肉部を取りこわした。続いて下半部⑬の掘削および第1段、第2段の部分も同様に施工したのちインバート部⑭を3.0~5.0mに区切って掘削し、インバートⅤとF.L付近までの中埋コンクリートⅤ'を施工したのち全断面本巻工法で厚さ50cmの2次巻コンクリートⅢを打設、設計総巻厚90cmの覆工コンクリートを完了した。これにより、昭和46年春から約3か年の年月をもって新関門トンネル海底部破碎帯の工事を無事終了した。

参考文献

- 1) 建設省：関門トンネル工事誌（1960）
- 2) 日本国有鉄道下関工務局外注調査報告書 新関門トンネル関係分
- 3) 桜井三男：山陽新幹線のトンネル，土木施工，Vol.14, Nos. 9~12 (1973)
- 4) 桜井三男：新関門トンネル海底部の施工，土木技術，Vol. 28, No.10 (1974)
- 5) 吉川恵也：新関門トンネルの計画と施工上の問題点，土木施工，Vol.12, No.11 (1971)
- 6) 吉川恵也：新関門トンネルの海底区間地質調査，応用地質，Vol.16, No.2 (1975)
- 7) 鉄道界評論社：山陽新幹線（岡山—博多間）技術のすべて，pp.144~167, pp.280~297 (1975)

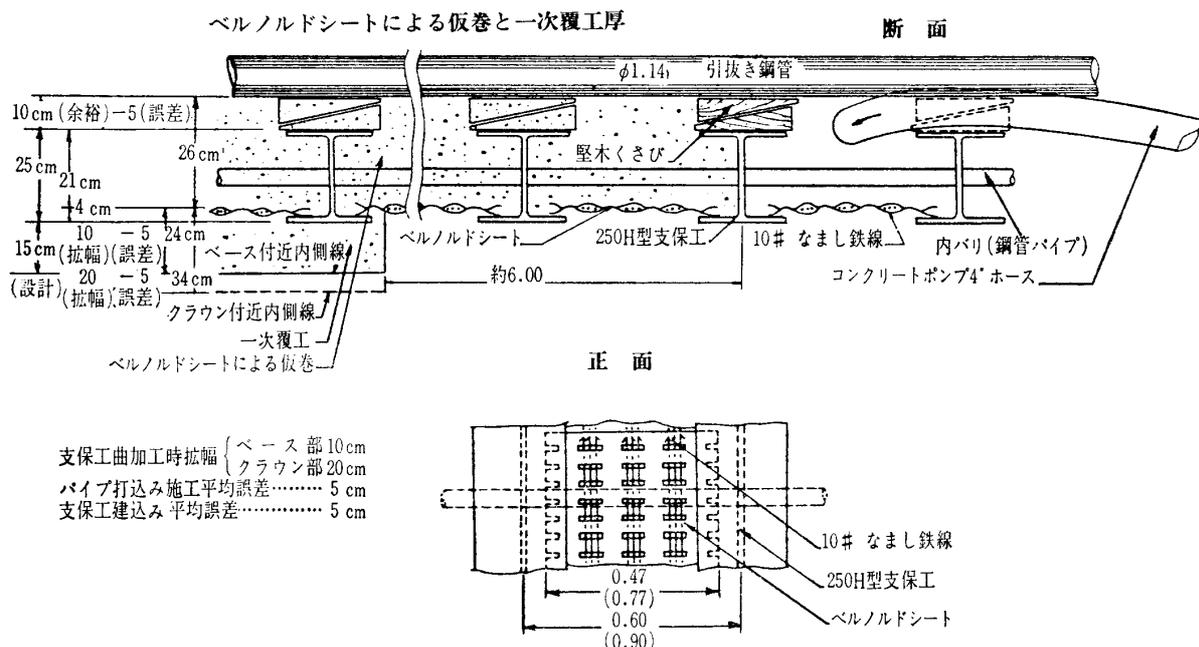


図-12 ベルノルドシートによる仮巻と一次覆工

(原稿受理 1976.11.16)