

鐵道關門隧道工事に就いて

正員 釘 宮 磐^{*1}
 正員 星 野 茂 樹^{*2}
 正員 加 納 儉 二^{*3}

本文は鐵道關門隧道工事の着手迄の経緯、施工計畫、施工狀況並に批判等を記したものである。

1. 工事着手迄の経緯

鐵道の關門連絡として、隧道設置の要望は遠く明治 29 年博多に於ける第 5 回全國商業會議所聯合會から時の政府に建議したが時期尚早として却下された。明治 44 年鐵道院總裁後藤新平伯爵は關門連絡改善策の研究を命じた。そこで従來の渡船の改良のほか早瀬瀬戸に橋梁架設の設計を廣井勇博士に依頼し、隧道設置の可能か否かは當時歐米に留學中の田邊朔郎博士に研究を依頼した。橋梁設計は大正 5 年に出来上り、田邊博士も歸朝后隧道可能を報告された。種々研究の結果隧道設置に確定し第 41 回帝國議會にて豫算 1,816 萬圓を以て大正 8 年より 10 ケ年計畫にて鐵道關門隧道設置の協賛を得た。早速路線の選定、地質調査に着手したが第一次歐洲大戰の影響を受けて物價勞銀の暴騰のためこの豫算にては遂行不可能となつた。その矢先關東大震災にて鐵道の復舊工事に多額の豫算を必要としたので一時關門隧道は見送ることとして豫算削除の止むなきに至つた。其の後昭和 2 年から 4 年にかけて比較線の選定、地質調査、施工に必要な調査研究をしたが經濟界恐慌のため豫算の捻出出来ず着手に至らなかつた。昭和 6 年滿洲事變勃發以來貨客は急激に増加し關門隧道設置の要望高まり昭和 10 年鐵道大臣内田信也氏は關門隧道技術委員會に設計施工の方針を諮問しその答申を待つて第 69 回帝國議會の協賛

を得て昭和 11 年 9 月試掘坑道門司方豎坑工事に着手した。

下關方取付隧道及び門司方取付隧道の内開鑿工法區間のみを請負としその他は凡て省の直轄施工とした。

2. 線路選定

大瀬戸の何處を通るかは時代とともに變化してゐる(第 1 圖参照)現在路線は瀨下關驛附近に高架で新下關驛を造り、埋立を通過して彦島に差しかかるや取付隧道となり、弟子待より大瀬戸を潜り門司市小森江の下を抜けて舊大里驛附近にて地上に出て新門司驛に連絡するのである。隧道斷面は單線型とし、2 本並列し中心間隔は 20 m とした。隧道區間は電氣運轉とし、勾配は $\frac{20}{1,000}$ と決めて下り線は施工したが海底部第三紀層地帯が豫想外に困難だつたので、上り線では下關方を $\frac{22}{1,000}$ とし、門司方は壓縮空氣使用の關係上變更せずその間に短區間の $\frac{25}{1,000}$ 勾配を挿入した。(第 2 圖参照)このために上り線では下り線より第三紀層地帯で約 3 m 土被りが厚くなつた。隧道延長は下り線 3,614 m、上り線 3,605 m で海底部分は何れも 1,140 m である。土被りは平均 10 m、最少 7.0 m で隧道通過地點の水深は最大 20 m である。

3. 地質調査

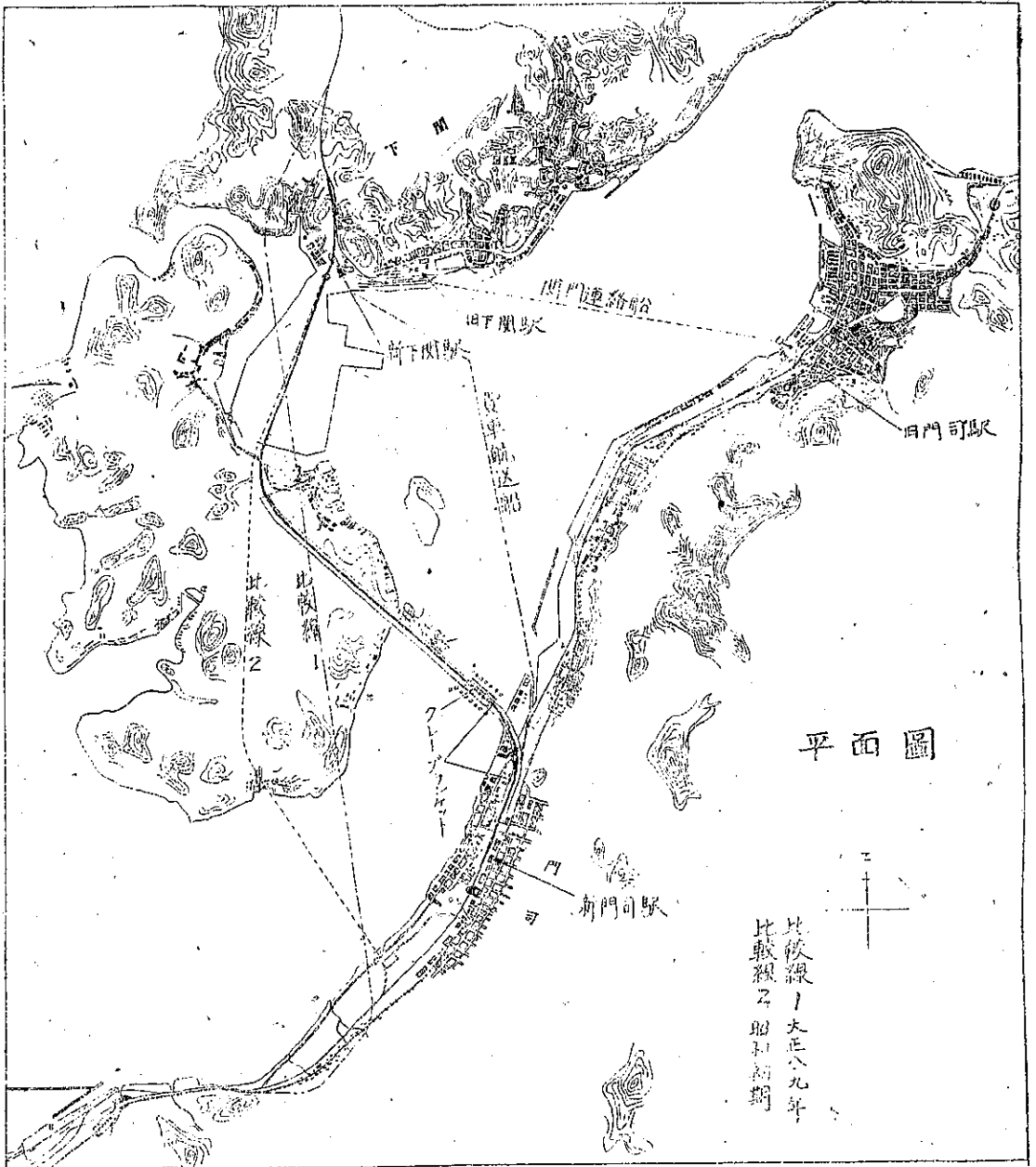
海底部のボーリングは大正 8、9 年及び昭和の初期に現在路線に對する調査の 3 回施行してゐる。このほか現在路線に對しては彈性波式地質調査も行った。大瀬戸の流速は最大毎秒 2.7 m であるから海底に砂礫の如き移動し易き物が堆積してゐるとは考へられないが果して如何なる状態かを確認するため漁業用の豆潜航艇を借用して海底の調査もした。以上の調査で極め

*1 東京帝大第二工學部教授 (初代下關工事事務所長)

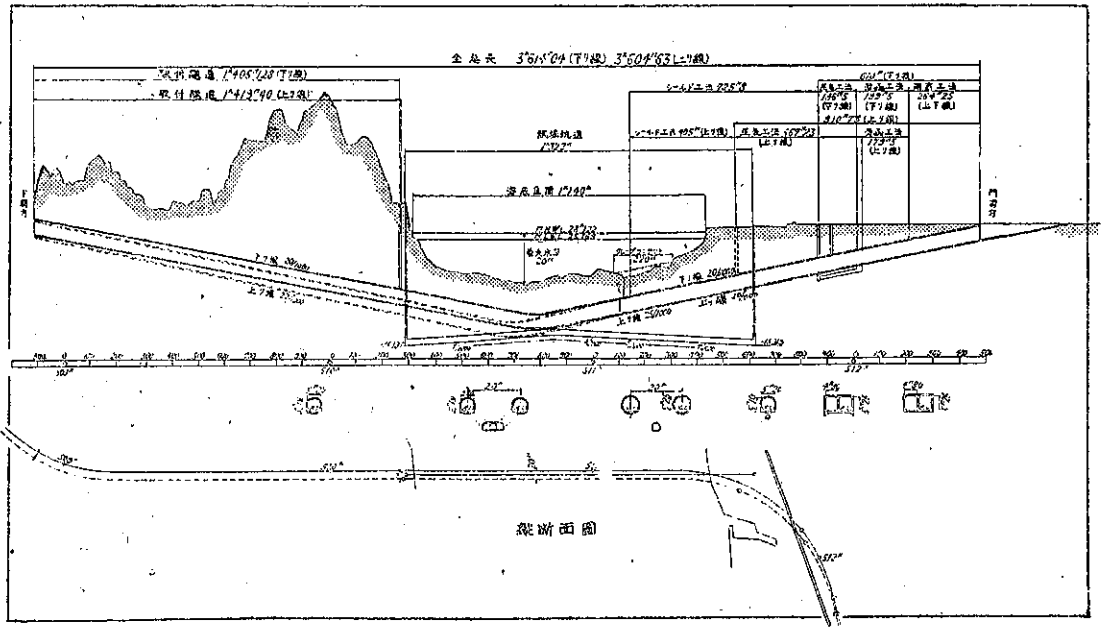
*2 運輸省鐵道總局囑託 (二代目下關地方施設部長)

*3 運輸省鐵道總局工事課長 (下關地方施設部副長)

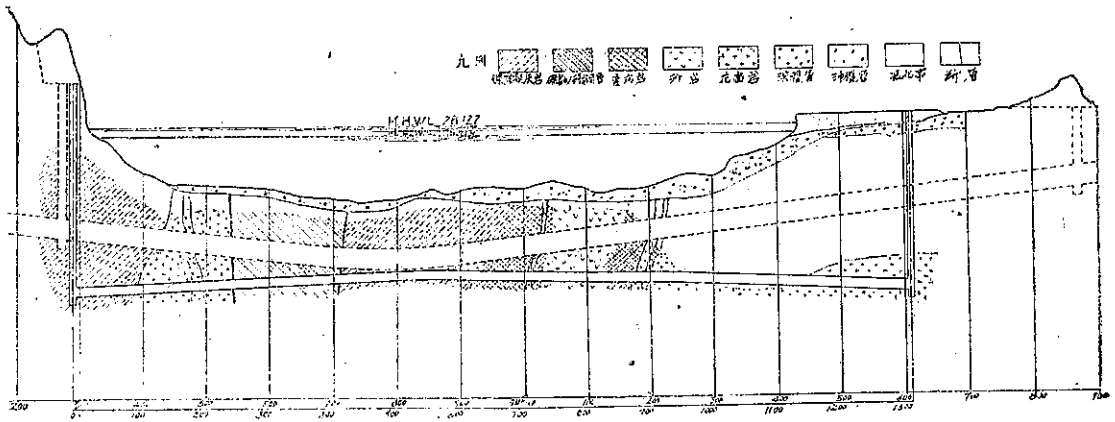
第 1 圖



第 2 圖



第 3 圖



地質圖

て複雑な地質であることが解つた。工事施工擔當者としては、我邦で最初の海底隧道なので如何なる施工法を妥當とするか幾分疑問があつたので、本線隧道の下に小断面の試掘坑道(所謂豆トンネル)なら確實に掘鑿出来るし、これによつて地質の詳細を確認し必要によつてはこれを利用して再調査も出来るので試掘坑道に先づ着手した。掘鑿によつて明かとなつた地質の概様

は第 3 圖の様である。試掘坑道はこのほか工事施工中の排水並びに本線隧道への連絡斜坑による工期短縮に役立つ。

4. 試掘坑道

下關門司兩方共に海岸近くに堅坑を降した。堅坑の断面はトロリー 1 台積みエレベーターを設置し得る様

直徑 4.2 m とし、下關方は素掘りで施工したが、門司方は花崗岩の風化地帯(所謂真砂土)なので先づ井筒を下げ下部岩盤に到達すればその中に素掘りて掘り下る心組みで着工した。下關方は順調に進行したが門司方は注水式井筒沈降法も効を奏せず却つて土壓を増大する悪結果を招来し井筒には龜裂を生じ沈下荷重の積載に依つても沈降の傾向なく深さ約 8 m にて井筒沈降は打ち切り以後素掘りを強行して所定深さに達した。

坑道の断面は選線線路の軌間 61 cm の複線を敷設し得る最小を探り幅 2.5 m 高さも 2.5 m、厚さ 25 cm コンクリート巻き立てとし勾配は $\frac{7}{1000}$ の拜み勾配を決定して掘鑿し始めたが、掘進につれて貫通の時期を脱み合せ中央に近く門司方に $\frac{5}{1000}$ 及び $\frac{3}{1000}$ の勾配を挿入した。延長は 1,322 m で掘鑿は素掘りとし、15 kg の古軌條を曲げた支保工を使用した。門司方は本線隧道の通過地帯は凡て花崗岩の風化地帯であるがこの試掘坑道通過箇所は一部に幾分風化した花崗岩もあつたが一般的に良質で順調に進行した。

下關方は堅坑より約 200 m 間は輝綠凝灰岩と花崗岩で湧水は多少あつたが至極順調に進行した。此處で斷層破砕帯が現はれたので延長約 100 m の水平ボーリングを施行した。その結果直に第三紀の頁岩、砂岩、礫岩の互層に變ることが解つた。ボーリングの中途にて毎秒 1 ft³ の湧水にも出會つたのでセメント注入をした。この 100 m 間はセメント注入の効もあつたが湧水も少く順調に進んだ。水平ボーリング區間を掘り終ると次のボーリングに移つた。約 100 m にて第三紀層地帯は輝綠凝灰岩に變ることが判明した。勿論ボーリング孔を利用してセメント注入も施し掘鑿再開したが良質の輝綠凝灰岩に近づくにつれて砂岩、礫岩は切端に現はれず頁岩一色となつた。幸ひ湧水なく順調に進んだ。下關門司兩方共岩盤とは云へ如何なる場合でも礫岩帯で約 5 m の先掘りをして地質並に湧水状況を必ず調査しつゝ掘進することにしてゐたからこの水平ボーリング區間と謂へどもこの先掘りは嚮行してゐた。昭和 13 年 10 月 4 日午後 11 時頃下關方より約 400 m 進んだ切端より突然海水が噴出し濁りが増すとともに一時噴出がピタリと止まり數秒にして又噴出するといつた状態が數回繰返す内に應急防禦策も効なく遂に約 60 m³ の土砂が切端の土留矢板を破つて押し出した。この土砂押し出しと同時に湧水は全く止まり命取りの事故に進展しなかつたのは奇蹟であつた。この崩壞箇所突破には約 8 萬袋 (1 袋 50 kg)

のセメント注入を施し、約 6 ケ月の平戻りとなつたのである。かくして試掘坑道は昭和 14 年 4 月 19 日目出度く貫通した。貫通時の中心線喰ひ違ひは 40 cm であつた。試掘坑道完成後下り線掘鑿中昭和 15 年 9 月 1 日下關方排水ポンプ故障にて試掘坑道下關方の浸水事故があり復舊のため下關方下り線工事は一週間中止した。復線隧道完成後の今日一部腐朽した處もあるのでコンクリート巻き直しと漏水止めを施工中にて修理完了の時は送電線通信線を通す豫定である。

5. 下關方取付隧道

上下線共に各々坑口より約 600 m 附近に斜坑を降した。湧水は弟子待堅坑より底設導坑を先進してこれに導き試掘坑道弟子待ポンプ室にて本線隧道海底部の湧水とともに排水した。地質は輝綠凝灰岩で一部には風化した處もあつたが新模式で掘鑿した。上下線共に 1 回宛崩壞事故を起したが幸ひこのための犠牲者はなかつた。ほかには特筆すべき事項はないが只附近の井戸水が數十ヶ所湧水し水道敷設の補償金を支拂つた位のものである。

6. 下關方海底區間

弟子待海岸近くに上下線別に堅坑を素掘りて降した。断面は圓型とし中途にてシールド工法に變更の止むなきに至つた場合をも考慮して直徑 7 m としエレベーターは下り線に先づ設置して用済み後上り線に轉用した。掘鑿に就いては種々研究の結果入念なセメント注入を施して素掘りて強行することにした。下り線では試掘坑道より 4ヶ所に連絡斜坑を設けたが上り線では 2ヶ所に造つた。第三紀層地帯に對しては連絡斜坑にて本線隧道の天端に先づ到達して同地帯をはさんで兩側より水平ボーリングをして全般的地質を確認し、ボーリング孔を利用してこのセメント注入も施行した。尙細密調査として試掘坑道より小刻みに本線隧道に向つて大型礫岩機でボーリングしセメント注入もした。

第三紀層地帯以外は底設導坑を先進して逆巻きに依つたがこの第三紀層地帯は純日本式掘鑿法で掘進した支保工は餘掘りの可及的減少と、コンクリート巻き立て時完全に滴水なき様防水布張り詰め等も考慮して 200×150×9 の I ビームで下り線は 5 邊形、上り線は 7 邊形のアーチ型とした。この支保工で土被り 10 m の海底で如何なる土壓にも對抗し得るとは考へられないので勿論掘鑿に際して土壓のないことを前提とした

のである。地質の良い處でも湧水が多ければセメント注入をした。工事中の湧水は凡て試掘坑道に流し同坑道兩端に設けたポンプ室(容量毎秒 1 尺³ ポンプ 2 台、2 尺³ ポンプ 2 台、3 尺³ ポンプ 2 台宛兩端に掘付けた)で排水した。第三紀層地帯は頁岩、砂岩、礫岩が全く不規則に層となり同一切端でも天端は軟い頁岩で下部は硬い砂岩と礫岩があることもあつた。この區間のセメント注入は先づアーチ部分に注入用の厚さ 1 m のコンクリート假壁を設け、深さ 15 m を礫岩帯で順次ボーリングしてセメント注入するのである。水壓は最深部で水深 20 m 土被り 10 m で約 3 氣壓で而も各地點の水壓が自然としてゐるのでこれが對策は容易であつた。注入最終壓は湧水止めと軟弱地質の壓縮固化を考慮して 20~30 氣壓とした。一切端に於けるボーリングは約 30 本で注入施工區間は 10 m 宛掘進巻き立てして次の注入に移るのである。時には注入施工済みの箇所を掘進中に湧水が増加したため折角掘進した處を土俵で埋戻し再注入したことも數回あつた。土壓を惹起するおそれのある湧水は徹底的に止めるを原則として實に丹念な注入をしたから割目と云ふ割目にはよくセメントが行き渡り中には周圍の軟弱地質を壓縮して割り込んだと推定し得る様厚さ約 30 cm のセメント層の出來たところもあつた。試掘坑道で崩壊した處に相當する箇所では上下線共規則正しく水平にセメントの敷層が出來てゐた。この第三紀層地帯突破に下り線では約 24 ヶ月上り線では約 17 ヶ月を要したその間に於ける工事施工擔當者の氣持ちは重病人の看護と同じく、病人が受け付け得るあらゆる注射を施しつつ、月日の経つとともに次第に回復するを待つ氣分であつた。

側壁はアーチの巻き立てが進むにつれて順次追つかけ施工した。ここでは多少の湧水ある箇所はあつたが崩壊をきたす懸念がなかつたのでセメント注入を施行したことはなかつた。インバートの施工は第三紀層地帯の一部で最も悪い地質の處を短區間側壁施工後直に行つたのを除いて他は凡て側壁が全部出來上つてから片押しに施工した。コンクリート施工中に於ける湧水の處置はアーチ部に於ては前述の如く防水布によつて兩側に誘導し、側壁部では防水布又は薄板(防水布の代用)でインバートに導き、インバート施工時には以上集つた湧水を丹念に小溝で中心假排水溝に導入し、小溝と假排水溝には板で蓋をしてコンクリートを打ち込んだ。コンクリート施工には漏水止めの目的で凡て

バイブレーターを使用した。バイブレーターを良心的に而も効果的に使用するため並みならぬ苦心した。斯様な施工をしたにもかかわらず中心假排水溝を封塞すると施工継手からの漏水多くこれが防止にセメント注入をした。下關方取付隧道にも同様目的で覆工完成後セメント注入を施した。勿論セメント注入前空隙には豆砂利、モルタルを注入したのである。施工中の湧水は上下線共各々最大約毎秒 4 尺³ の湧水があつたがこのセメント注入のため下り線では毎秒 0.24 尺³、上り線では 0.14 尺³ に減少した。(この湧水は門司方取付隧道の分も含む)

7. 門司方取付隧道

イ 開鑿工法

門司方坑口から 204 m 間は開鑿工法によつて複線型鐵筋コンクリート函を造つた。開鑿に當つては鐵矢板を使用したが一部份には花崗岩の風化しない處がありために鐵矢板の先端が裂けたものもあつて打ち込みが困難した。

ロ 潜函工法

開鑿工法について 200 m 間は潜函工法によつて施工した。この内 180 m 間は複線型の潜函を 6 基沈降し、残り 20 m 間に下り線では 1 基の單線型潜函を沈降し上り線は壓氣工法で施工した。各潜函は 1 m 宛離して交互に沈降し全部沈み終つてから各潜函の間を壓氣工法で掘鑿してつないだ。壓縮空氣の壓力は最大約毎 in² 20 lb で空氣消費量は最大毎分 1,500 ft³ であつた。沈降が進むにつれて掘鑿土砂は順次潜函上部の埋戻しに使用した。各潜函共目重及び函内の水加重にては沈降し得ず毎回約 30 cm の掘越をして減壓沈降を行つた。所定の深さに達すると作業室には封塞コンクリートを填充し豫め埋め込んだ鐵管からモルタル注入を施して完壁を期した。完成後潜函繼目から多少漏水があつたのでセメント注入をしたが完全に止める事は出來なかつた。

ハ 壓氣工法

潜函工法について下り線では 147 m 間、上り線では 467 m 間壓氣工法に依つた。最初下り線ではこの壓氣工法區間は隧道下部に水抜坑を掘鑿しこれに地下水を絞り取つて本線隧道は柔掘りて施工する計畫をたて先づ水抜坑を壓氣工法で掘り抜いた。地下水は全體として低下したが本線隧道附近の含水量は變化しなかつたので思ひ切つて本線隧道も壓氣工法で施工す

ることとした。このための堅坑は別に設けず単線型潜函のシャフトを利用して掘鑿覆工をすることにした。掘鑿方式はアーチ支保工による逆巻きを両端附近で行ひその他の大部分は全断面掘鑿で施工した。水抜坑のため壓縮空氣壓力は低く最大毎 in^2 13 lb で空氣消費量は非常に少く露出面 ft^2 當り最小毎分 0.5ft^3 であつた。

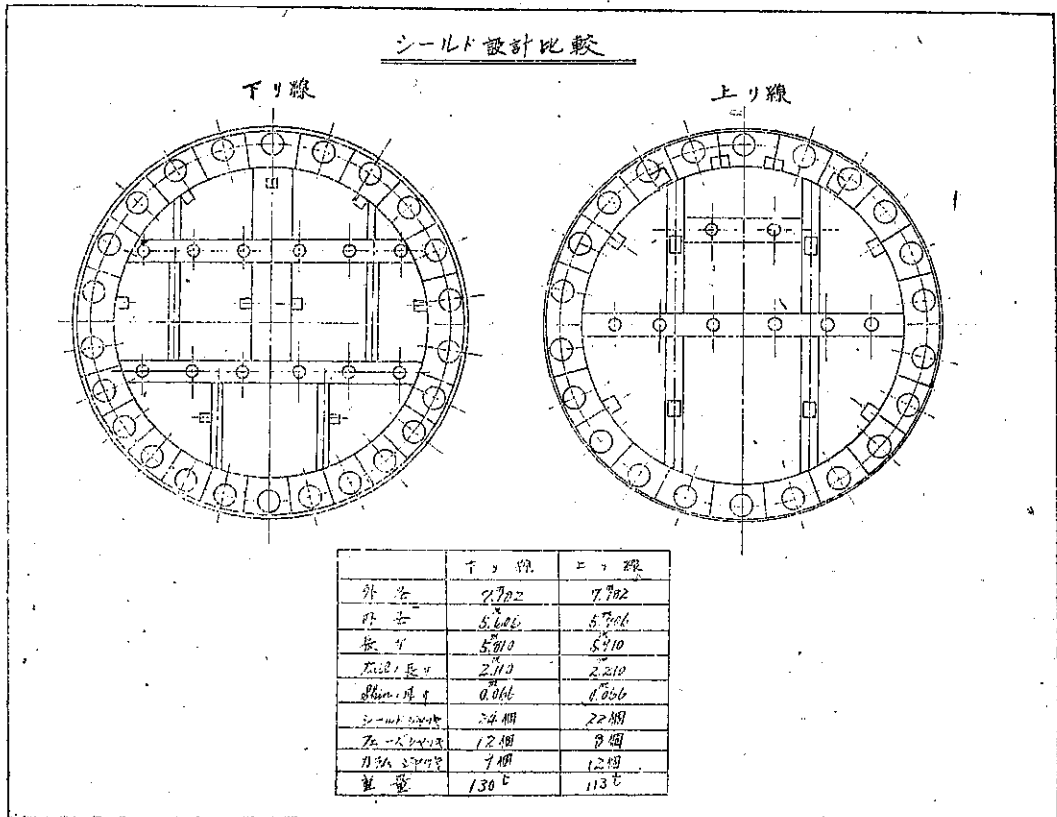
上り線では資材不足のためシールド工法區間短縮を餘儀なくさせられ海岸近く迄壓縮工法に依つたのである。先づ堅坑を壓縮工法で掘り下つた。本線隧道の掘鑿方式として最初アーチ支保工による全断面掘鑿で進んだが途中で空氣噴殺し隧道は押しつぶされる名の犠牲者を出したので以後逆巻工法に変更した。この復舊には噴殺箇所土砂を載せ地表面と切端からセメント並びに藥液(鹽化石灰と硅酸ソーダ)注入を施して空氣漏洩を減じて再掘鑿にかかり約3ヶ月を要した。壓縮空氣壓力は最大毎平方吋 25 lb であつた。コンクリート打ち込みは神戶港に行つたにも不拘完成後多少の漏

水ありこれが防止にセメント注入をした。この壓縮空氣内でのコンクリート巻き立てについては色々の問題がある。

8. シールド工法完成

壓縮工法について上下線共にシールド工法を施工した。下り線ではシールド工法のための堅坑は潜函を沈めたが、上り線では壓縮工法に依つた。シールド工法區間の延長は下り線では鹿兒島本線の下を通り抜けること、及び作業員の訓練等も考慮して 725m、上り線では前述の如く資材節約から 405m とした。然し海底部分は同じく約 300m である。シールドは何れも堅坑底部で組み立てて推進し始め、隔壁は堅坑附近と海岸近くの二箇所コンクリートで造つた。シールドの構造は開放型とし直徑(外径) 7.182m で外皮は厚 22mm 鐵板3枚重ねである。下り線は幾分頑丈過ぎた傾向があつたし尚作業能率等も考慮して上り線では多少變更した。(第 4 圖參照)

第 4 圖



第一次覆工には鑄鐵セグメントを使用し、セグメントの幅は下り線では 75 cm, 上り線では 80 cm とした。1 リングは 9 枚の A セグメント, 2 枚の B セグメント及び楔形セグメントから成り、半径 600m の曲線を推進せねばならぬこと及びシールド蛇行に備へてテーバーリングを用意した。テーバーリングの使用量は全使用セグメントの下り線で $\frac{20}{100}$, 上り線で $\frac{16}{100}$ であつた。セグメントの重量は隧道延長 1m 當り下り線では約 12t, 上り線では約 10t であつた。下り線陸上部分でライトタイプのセグメントを上り線で同じく陸上部分で鐵筋コンクリートセグメントを試用したが尙研究の餘地がある。セグメントのコーキングには鉛紐を使用した。海底で土被りの薄い處には複線を抱き込んで幅 100m 延長 220m 間に土被りが平均 10m となる様にクレーブランケットを行つた。エアロックは材料, 作業員, 及び非常用の 3 個を各隔室に設備し, 定石通りセーフティスクリーンも取り付けけた。

低壓の空氣壓縮機(容量毎分 3500 ft³, 400 H.P. 同期電動機運轉)を 8 臺, 水壓ポンプ(壓力毎 cm² 500kg 100 H.P. 運轉 3 臺, 壓力毎 cm² 150 kg, 15 H.P. 運轉 2 臺) 5 臺, 及び隧道諸機械運轉用の高壓の空氣壓縮機等を坑外に据附けた。

シールドジャッキの水壓は毎 in² 7,000 lb, エレクターは毎 in² 2,000 lb, フェースジャッキ及びカラムジャッキは毎 in² 2,000 lb とした。シールドジャッ

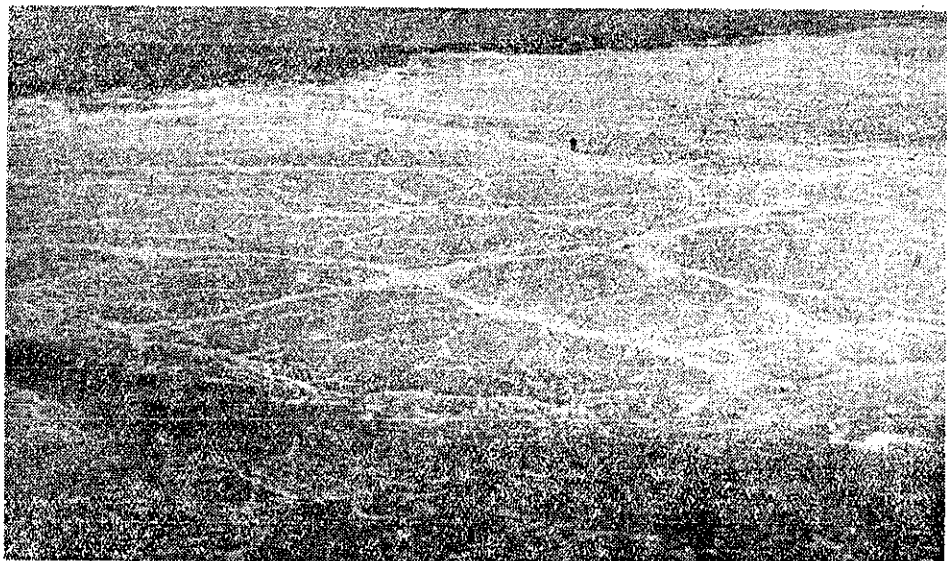
キ 1 箇の出力は最大約 200 t である。シールド推進に當つてシールドジャッキは全數の $\frac{1}{2}$ 程度を使用する場合が多かつた。1 日の進行は最大下り線で 3 m, 上り線で 4.8 m であつた。坑内の壓縮空氣の壓力は最大毎 in² 38 lb で壓縮空氣内の勤務時間は次表の様に定めた。

壓縮空氣内勤務時間

氣 壓	一日實労働時間
0~20 #/コ ¹¹	7 時間
20~26 "	6 "
26~30 "	5 "
30~33 "	4 "
33~36 "	3 "
36~39 "	2 "
39~42 "	1.5 "
42~45 "	1 "

掘鑿は天端より順次下方に掘り下り, 如何なる場合も天端には矢板を張り詰め前面には土留めを施した。シールド推進毎にその直後セグメントと地山の隙間には豆砂利とモルタル注入をした。その量は計算による間隙量の約 $\frac{70}{100}$ であつた。シールドの回轉は最大左回轉 56 mm, 右回轉 246 mm で下り線最終時の落ちつきは右回轉 36 mm であつた。蛇行は水平變位最大

寫 眞



156 mm、垂直變位最大 80 mm に止め得た。シールド推進区間の地質は大部分眞砂土で終りに近づくにつれて青粘土、貝殻交り青粘土、眞砂土交り貝殻層と變化し最終は稍々風化した花崗岩に押し込んでシールド外皮は第二次覆工内に埋め込んだのである。下り線で青粘土層を推進中湧水が多くシールドジャッキとセグメントの間に誤つて小石を挟みセグメントが割れたので取り換へたことがあつた。シールド推進後のセグメント取り換へはエレクターが使用出来ないので相當困難である。テールの長さを教科書通りセグメントの幅の 2.5 倍とした。効果が立證された。眞砂土内のシールド推進は順調であつたが青粘土層となつてから空氣漏洩は段々と増加し湧水も勝手な處からある様な状態となり作業員は緊張させられた。下り線で残り約 60 m の地點で貝殻層が現はれ空氣漏洩は物すごく、(寫眞参照) これ迄は 400 H.P. 空氣壓縮機を最大 2 臺運轉すればよかつたがここでは 8 臺全部を運轉せざるを得ない様になつた。幸か不幸か而も小倉と門司を結ぶ 2 本の主送電線の内 1 本が故障を起し復舊には相當の日數を要する見込みにて残り 1 本も何時故障を起さないとも限らない状態となつたのでシールド推進は中止してシールド前面に粘土で假壁を造り、貝殻層に向つては藥液を注入し、先きの貝殻層と岩盤との接觸面にはセメント注入を施した。このために約 3 ケ月を費したが空氣漏洩は非常に減じ推進を再開した。これ等の注入作業によつて推進は順調となり遂に岩盤に到達した。岩盤に入るや底設導坑を數米宛先進してクレードルを施して推進しシールドが完全に岩盤にはまつて推進は打ち切つた。シールド推進區間終點と弟子待から掘進した終點との間約 20 m 間には幾分風化した花崗岩があつたので壓氣工法によつて逆巻きで施工した。上り線では前記空氣漏洩の多かつた區間には試掘坑道より豫め藥液とセメントの注入をしたので推進の中止もなく順調に進んだ。海底部中央附近の壓氣工法が終ると壓縮空氣を抜いてセグメント内を掃除して第二次覆工を施工した。第二次覆工のコンクリートの厚さは上下線共 50 cm とした。

9. 完 成

兩坑口約 200 m 宛を除いて坑内はコンクリート道床とし、つづいて電化工事を施行し完成したのである。

完成後の排水としては兩坑口に上下線共通の排水にポンプを据付け、中央には上下線各々に排水設備をした。

10. 結 論

昭和 11 年 9 月に試掘坑道の堅坑に着手してより 6 ケ年を費して下り線(門司方坑口附近約 440m 間は複線として完成した。)は昭和 17 年 7 月貨物列車を通し同年 11 月に旅客列車を通したのである。

上り線は昭和 15 年 5 月政策的意味もあつて下關方取付隧道に着手したが當時海底部に對しては下り線に全力を注いでいたので本格的な掘進は出來ず昭和 17 年 1 月下り線工事に剩員が出来る様になつてから工事は本格的となつた。これより約 2 ケ年半を費して昭和 19 年 7 月上り線を開通し同時に下り線は運轉を中止してマンガン軌條に取換へ作業や一部漏水の増加した部分にセメント注入による修理を施し、つづいてトロリー線の張替をして同年 9 月複線の開通となつたのである。

この複線完成に要した總工費は 3,900 萬圓で延長 1 m 當り約 10,100 圓である。工事に従事した延人員は 840 萬人である。此の工事を顧みて 2,3 の感想を次に述べる。

イ 下關方海底部は實に神經質なコンクリート巻きをし、尙完成後セメント注入もしたが幾分の漏水のあるのが残念である。漏水の絶無を願ふならセグメント巻き立てより外にない。同區間の掘進に當りセメント注入で成功したのは丹那隧道での苦心が實を結んだと謂ひ得るのである。然しこの區間の乗掘には並々ならぬ困難があつたことは前述したがシールド使用が本則と思ふ。

ロ 壓氣工法は成功したと謂へるだらう。今後地下鐵工事等に壓氣工法が相當利用されることと思ふが壓氣工法に於ける壓縮空氣内のコンクリート巻き立てにはその施工について研究すべき點が多々ある。

この工事を通じて最も残念なのはシールド推進が特に軌道に乗らんとした時その指導に専念した餘り過勞に陥り堅坑より轉落して故齋藤眞平技師が急い犠牲となつた事である。此處に土木學會員一同と共に尙氏の冥福を祈る次第である。