The Japanese Geotechnical Society

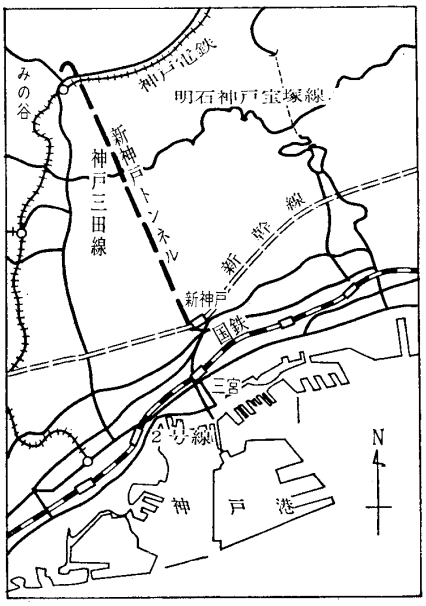
新神戸トンネルの断層破砕帯における施工法

新谷瑞穂*

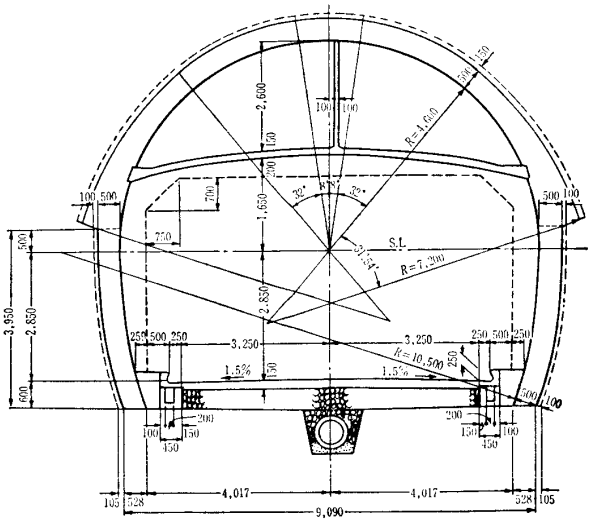
1. はじめに

昭和46年10月に着工し，昭和51年５月に完成した新神戸トンネルは，新幹線新神戸駅の西端を起点とし，神戸市北区山田町の箕谷（みのたに）を終点とする延長 6.91 km・幅員 8.0m(3.25×2+0.75×2)・平均コウ配2.6%の第３種第２級の有料道路トンネルである。トンネル・ルート周辺の地形的な特徴は，"南側は急しゅん・中央部は標高400m程度の山地・北部はなだらかな丘陵" である。また，地質の概略は，北坑口付近を除いてほとんど布引花コウセン緑岩（南坑口より 0km～2.7 km；以下ことわりのない限り南坑口を起点とした距離で表現する）もしくは六甲花コウ岩（ 2.7 km～北坑口付近）である。布引花コウセン緑岩は中生代前期の花コウ岩であり，六甲花コウ岩は白亜紀～古第３紀に迸入した岩体である。北坑口付近には，六甲花コウ岩と断層で接した新第３紀の神戸層群の泥岩・砂岩・レキ岩が分布している。六甲山塊は，地質的に非常に新しい構造運動（六甲変動とよばれる新３第紀から現在まで続いている地殻変動）によって形成されたものであり，多くの断層破砕帯を伴う特徴がある。

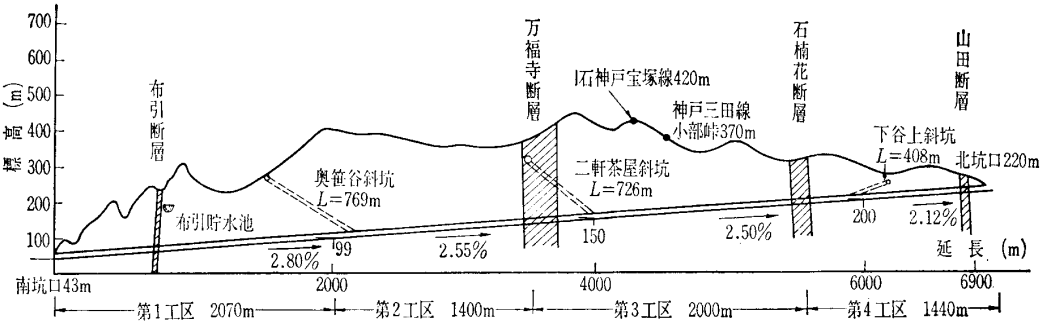
新神戸トンネルのルート上にある代表的な断層は，布引断層（760～790m，第１工区）・万福寺断層(3,440～3,640m，第２・３工区)・石楠花断層(5,385～5,495m，第３・４工区)・山田断層（北坑口付近，第４工区）の４つであり，



図―1 位置図



図―2 標準断面図



図―3 縦断図

* 神戸市道路公社 建設部計画課

NII-Electronic Library Service

The Japanese Geotechnical Society

以下にこれらの断層の突破工法について述べる。なお，本トンネル工事は南側から 2,070m・1,400m・2,000m・1,440mの4つの工区に分割し，それぞれ第1・第2・第3・第4工区と名付けた。第1・第3工区は底設導坑先進上部半断面掘削工法，第2・第4工区は上部半断面掘削工法で施工した。また，第2～第4工区は 21m² の斜坑をそれぞれ2本ずつ中心間隔15mで平行に施工し，それらはトンネル完成後には送・排気坑として利用された。

2. 布引断層の施工

施工前調査によって，布引断層は施工基面では 0.76km 付近にあり，そのほとんどは粘土化帯で，延長は約10m，背面には水圧 16 kg·cm⁻² の著しい湧水帯があるものと予測されていた。また，断層の真上，トンネル・ルートの西30mには40万tの容量を持つ布引貯水池（日本最古のコンクリート重力式ダム）があり，トンネルがこの水を引いた場合の社会的問題ならびにトンネルの水没が懸念されたので，断層の性状・断層背後の地下水状況を調査するため断層予想地点より10m手前で導坑切羽をとめて先進ボーリング（ϕ65 mm）を行なった。その結果，断層の位置は施工前調査で予測されたとおりであったが，破砕帯の延長は予測より長く27mであり，断層の背後は堅岩であることが確認された。断層背後からは数10ℓ/分の湧水があったが，当初予測されていた被圧水は確認されなかった。ボーリング孔からのコアの採取率が非常に悪く，断層破砕帯の状況をは握するには不十分であったので，断層の手前1mの地点から 2m×2m の木製門型調査坑をピックのみで掘削し地質を確認することにした。その結果，断層の両端には厚さ 20～50 cm の青緑色の断層粘土があり，それらにはさまれた区間は割れ目の発達した破砕岩であること，破砕帯は湧水を伴わないこと，さらに破砕帯の粘土は吸湿膨張性のモンモリロナイトを32～46%含有することなどがわかった。これらのことを考慮しつぎのような施工法の採用を決定した。

○掘削工法としては支持力不足を補うためサイロット工法も考えられるが，調査坑との関係・段取り替えによる工程の損失・湧水がないこと・延長が短いことなどを考慮してそのまま底設導坑先進工法を行なう。

○断層破砕帯に吸湿膨張性のモンモリロナイトを含有するため上半掘削後できるだけ応力の解放を待って覆工を行なう。そのため，本覆工までの間は仮覆工（t=25 cm）を行なう。



写真—1 布引断層調査坑

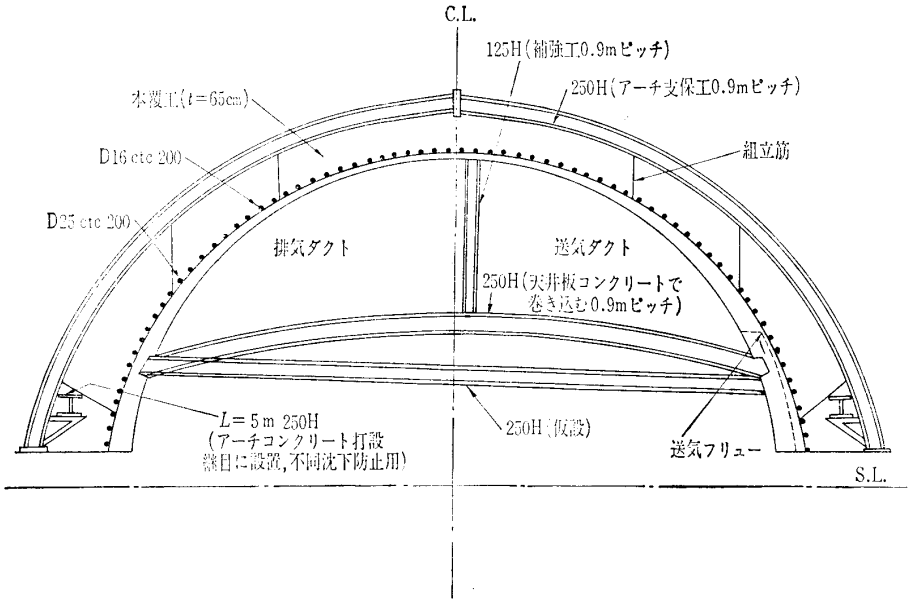
調査坑の導坑断面（14m²）への切広げは，地山をできるだけ緩めないように，発破を使用せずピック掘りとし，支保工は150H，0.9m間隔，矢板は厚さ 4.5 cm のものを使用した。特に山の悪かった断層中央部の5m間は縫地工法で施工した。なお，切広げに要した日数は10日であった。切広げ完了後約2か月，昭和48年3月22日に上半掘削が開始された。掘削断面は仮巻を想定して 48m²（掘削断面はA・B型で 39m²，C・D型で 42m² である。なお，掘削区分と弾性波速度 v km/sec との関係は，A型：4.5≦v，B型：4.0≦v，C型：3.0≦v<4.0，D型：v<3.0 である）とし，250 H（ピッチ 0.9m）支保工，4.5 cm 厚の矢板を用いてリングカット工法（平均1.2m/日）で施工し，その後仮巻を行なった。仮巻コンクリート打設後2日目に早くもクラックがはいり始め，アーチ支保工も変位し始めた。6月上旬，アーチ支保工が座屈し始めたので増支保工(200 H）で補強し，主筋 D25・配力筋 D16（ピッチは共に 20 cm)の鉄筋コンクリート構造にして巻厚 65 cm の上半本覆工を行なった。打設継目は，各スパン（アーチコンクリートの1スパンは12m）を一体化し不同沈下を防止する目的で250H で連結した。アーチコンクリート裏面の空ゲキにはモルタル注入を行ない（注入圧 7 kg·cm⁻²，注入量 1.5 m³/m)，さらに断層北側の堅岩部（湧水帯）と断層との間に延長 7m・奥行 8.5m にわたって扇状にカーテングラウト（LW，総注入量 30万ℓ，ゲルタイム1分30秒～3分30秒，配合：A液—水溶液 100ℓ 中ケイ酸ナトリウム50ℓ，B液—水溶液 100ℓ 中セメント 10～20 kg，トンネルの止水工

表—1 布引断層粘土の試験結果

粒度による分類	統一土質分類	含水比 %	単位体積重量	乾燥密度	間ゲキ比	飽和度 %	備考
粘土	CH	22.3	2.06	1.60	0.63	96.9	断層粘土
レキ混じり砂質ローム	SC	21.3	1.96	1.62	0.67	85.7	マサ状風化部

NII-Electronic Library Service

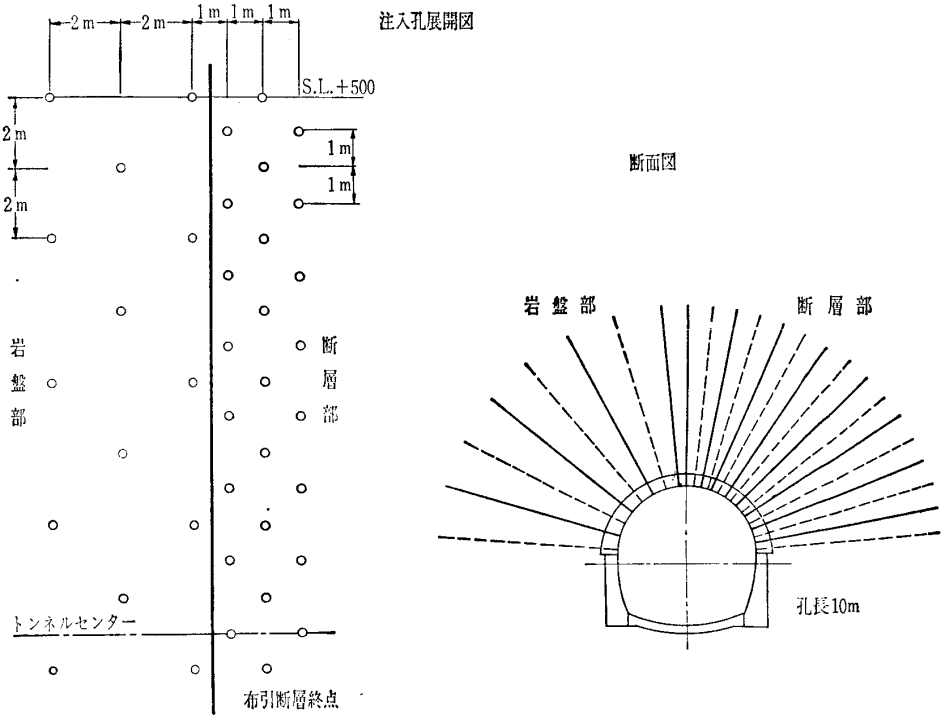
The Japanese Geotechnical Society



図—4　布引断層部上半標準断面図



写真—2　布引断層部アーチコンクリートの破壊



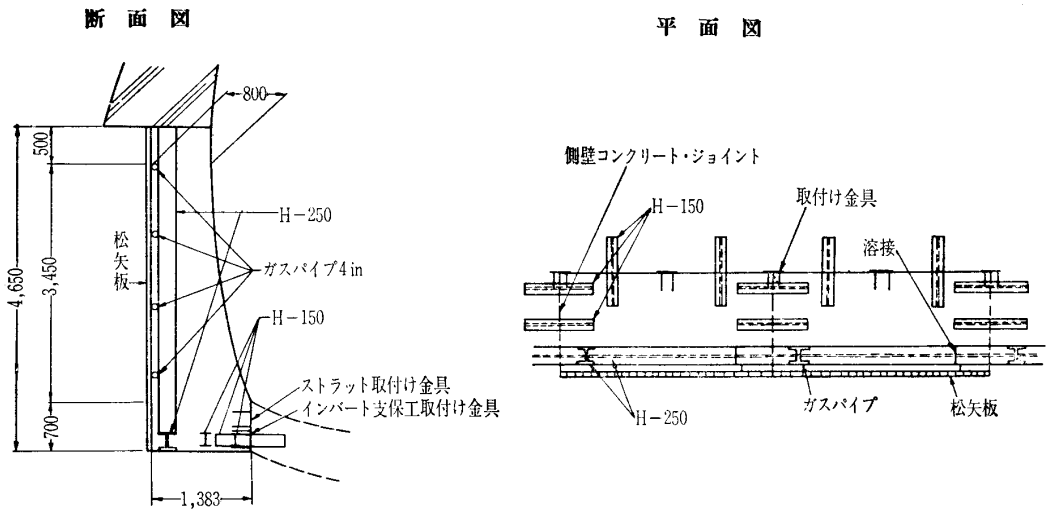
図—5　布引断層部薬液注入施工図

法としてLWI法は一般的である。この工法は，ケイ酸ナトリウム溶液とセメント溶液とを混合すると短時間にゲル化する性質を利用したものであり，溶液の濃度を変化させることによりゲルタイムが自由に調節できる）を施工するとともに湧水帯に水抜きボーリングを行ない断層部への水の浸透を防止した。なお，施工後の透水テストにより目的の達成が確認された。

下半施工は，①導坑支保工とりはずし　②東側土平掘削　③東側側壁コンクリート打設　④西側土平掘削　⑤西側側壁コンクリート打設のサイクルで，3m ピッチの施工を標準としたが，山の状態を適宜判断し，片側1.5m ピッチの施工または両側同時施工なども行なった。掘削はピックのみで行ない，切羽崩壊防止のために送り矢板工法を採用した。側壁コンクリートの不同沈下を防ぐため打設継目は150H で連結し，さらにアーチコンクリートの沈下防止のために250H の柱でこれを支持した。側壁コンクリートを両側6m 打設するごとに，側壁コンクリートが押し出されないように，ストラット(250H，ctc 1.5m)で仮受けを行なった。その後（実際には工程の都合上6か月後）底盤掘削・インバート支保工(175H，ctc 1.5m)設置・インバートコンクリート打設を行ない，コンクリート強度が十分出た後ストラットをとりはずした。なお，下半掘削からスト

NII-Electronic Library Service

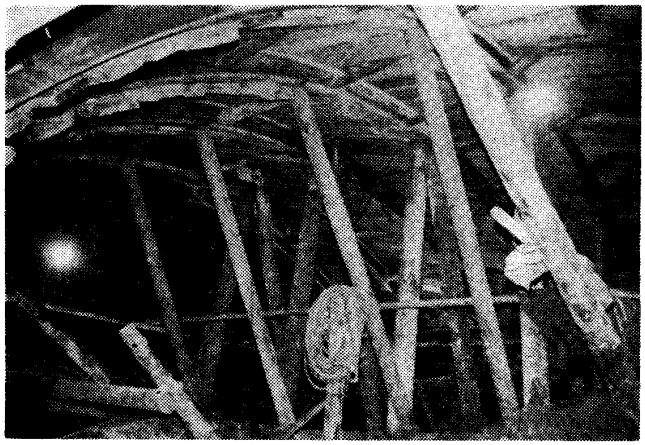
The Japanese Geotechnical Society



図—6 布引断層下半施工図

ラットによる仮受けまでは2か月を要した。底盤掘削からインバートコンクリート打設までは6mサイクルで行ない15日要した。

順序は相前後するが，断層部側壁コンクリートの残りが6mになったとき（アーチ本覆工後4か月半ほど経過したとき；昭和48年11月上旬）突然断層部北端のアーチコンクリートの西側のアゴの付近が1mくらいにわたり破壊し鉄筋が露出した。すぐさま250Hのストラットで仮補強を行なった。それから1年後の天井板工事の際，この仮設構造物を本設の250H（ピッチ 0.9m）に交換し，さらに送気と排気の隔壁に125Hを0.9mピッチに建て込んだ。



写真—3 悪地質の万福寺断層

3. 万福寺断層の施工

万福寺断層は，破砕帯の幅が300m（本坑で200m，斜坑で300m）もある本トンネル・ルート上最大の断層である。地質は六甲花コウ岩が強風化したものであり，モンモリロナイトの含有率は14%程度であった。本トンネル工事においては，第2工区本坑と第3工区斜坑ならびに本坑がこの断層に遭遇した。以下に，施工時期の順序に従って工法の概略を述べる。

第3工区の斜坑口はこの断層上に位置し，着工前から難工事が予想されていたが，施工前の調査結果によると断層区間内には湧水はほとんどないだろうと予測されていた。また，斜坑断面が21m²と小さいので全断面掘削を行なうことにした。予測どおり湧水はほとんどなかったので，部分的には鏡を張って掘削せざるをえない箇所もあったが，大部分は縫地工法で施工できた。なお，斜坑は¼の下りコウ配であるのでどうしても切羽付近に水がたまり，重機などによって底盤が乱され支持力が低下したので良質ズリを敷きならしてこれに対処した。また，掘削後，斜坑口より90m付近の側壁部が1か月間に8mm内側に押し出されたが，足元に150Hのストラットを施工し即刻全断面にわたり覆工を行なうことにより事なきを得た。

つぎに第3工区の本坑の施工について述べる。この工区の本坑は，当初の予測によれば万福寺断層にはかからないとされていた。ところが底設導坑を南へ向けて掘削していると3,600m地点くらいから地質が悪化し始め，ついには導坑切羽に鏡止めを施しながら掘削しなければならなくなった。また，斜坑のときと同じように，導坑掘削に使用していたロッカーショベルが地盤の中へめり込むようになったので，良質ズリを軟弱地盤上に敷きならして掘削を続行した。第2工区との工区境まであと80mの地点（3,550m地点）へ導坑が到達したとき，突然導坑天端が崩落し施工機械が土砂中に埋没した。崩落箇所には木材によって後光バリを施工し，支保工の縫返しを行なって復旧した。そして40日後には工区境に到達した。上半は200H（0.9mピッチ）を用いての縫地工法を採用した。特に山の悪い所には増支保工（200H，合計施工基数48基）を施工し，バラセントルを用いて即座に65cmの本覆工を行なった。覆工後は異常現象の発生はなかった。また，アーチコンクリート裏面の地山の安定を図るために，3,470～3,590mの区間にはモルタル 730m³・セメントペースト 260m³ を注入した。その後，布引断層の標準サイクルに準じて下半施工

NII-Electronic Library Service

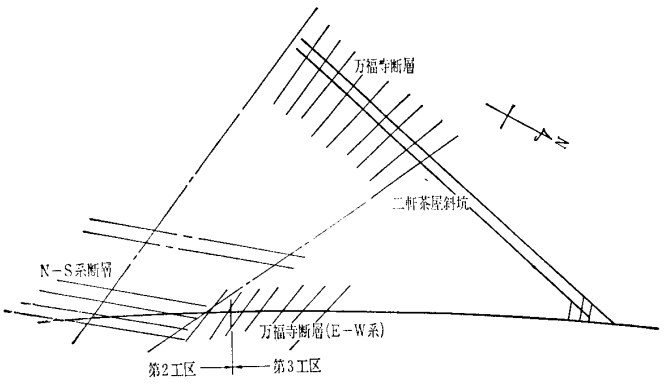
The Japanese Geotechnical Society

を実施した。なお，工区境付近の100m間にはインバートコンクリートを打設した。

最後に第2工区本坑の施工法について述べる。断層は3,100m地点から始まるものと予測されていたが，その性状は十分には握されているとは言い難かった。そのため，切羽からのファン・シューティングや長大ボーリングによる断層調査計画も立てられたが，工期や信頼度を考慮して，結局20m程度の先進ボーリングを行ないながらリングカット工法にて掘削し，特に山の悪い所は頂設導坑を施工することとした。また，布引断層で250Hが座屈したことを考慮し，パイプ支保工を用意した（パイプ支保工は重量の割には強度は大きいが，タイロッドの締付けなどの施工性はあまり良くなかったようである)。万福寺断層の存在が予測されていた位置での地質は比較的悪かったが，湧水がなかったためたいした問題も起こらず，上記工法で施工することができた。なお，第2工区での断層破砕帯の方向は第3工区との工区境付近を除いてN－S系であり，第3工区斜坑ならびに本坑に現われた万福寺断層（E－W系）とは別の断層であると考えられる。当初，万福寺断層は第3工区斜坑を横断してE－W方向に直線的に延びていると考えられていたので，第3工区本坑には分布せずむしろ第2工区本坑にぶつかるものと予測されていた。しかし，実際には万福寺断層は上記N－S系断層によって切断されていたので，予測と300mもずれ，第3工区本坑に現われた。このため，第2工区は少し慎重になりすぎ，また，第3工区は断層への対応の機敏性に欠けたように思う。

4. 石楠花断層の施工

第3・第4工区境には深い谷が見られ，これを境にして南側と北側とで水系の発達状況が異なる。弾性波探査の結果などを参考にして，NE－SW方向の断層が工区境より南側200m（5,270m地点）付近の位置に存在すると推定されていた。当初無名の断層であったが，トンネル完成後工事関係者の間で〝石楠花（シャクナゲ）断層〟と呼ばれるようになったので，ここでもこの名称を用いることにする。



図－7　万福寺断層とN－S系断層の関係

石楠花断層は実際には5,385～5,495mに現われた。この断層を最初に掘削したのは第4工区の上半であったが，第3工区との工区境まであと8mの5,478m地点において，切羽が崩落し土砂が流出した。崩落後ただちに鏡止めを行ない，3本の水平ボーリング（ϕ66，ℓ=56，44，30m；第3工区の工法も同時に検討できるように長目にボーリングした）によって地質確認を行なった。その結果，岩盤は全体的にき裂が多く発達し，深層風化が激しく，至るところマサ化ないしは粘土化していることがわかった。この地質に対処できる工法を種々検討した結果，薬液注入（LW178m³，高分子系96m³）による地山改良の後掘削することにした。覆工後は発泡モルタル（160m³）によって裏込め注入を行なった。また，工区境には鏡張りを施工して貫通を待った。なお，流出土砂の粒度試験の結果は，レキ17.0%；砂58.5%；シルト18.0%；粘土6.5%のレキ混じり砂質ロームであった。

ところで，第3工区の導坑は部分貫通一番乗りを目ざして，日進6m～9mの速いペースで北へ向かって掘削を続けていたが，第4工区との工区境まで85mの地点(5,385m地点）に達したとき，切羽が崩壊し約200m³の土砂が流出した。崩落部周辺の延長10m，奥行2.5mにわたって薬液注入（LW 10m³，高分子系5m³）による地質改良を行ない，さらに水抜きボーリングを施工した後掘削を再開し



写真－4　土砂で埋まった導坑



写真－5　第2回目の崩落直後の導坑

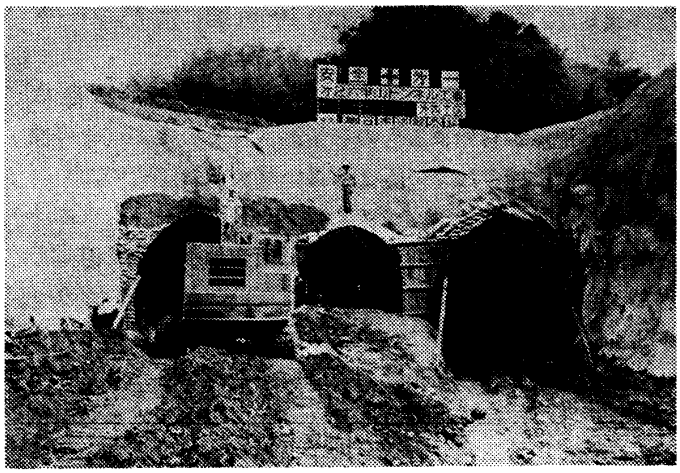
NII-Electronic Library Service

The Japanese Geotechnical Society

た。しかし，約3m 掘削したとき切羽の自立が困難になった。切羽に鏡を張って作業をするうちに湧水量が 1t/分（水圧 8 kg·cm^{-2}）に増加し，時間とともに切羽の湧水が後方へ移動する傾向を示した。導坑切羽上方で落下音が響くたびに白濁水が流出し，前回の崩落時と同様の前兆を示しはじめたので全員切羽から避難した。その直後，600m^3 のレキ混じり粘土が鏡止めを押し破って流出し，4連ジャンボ（13 t）やロッカーショベル（10 t）を30mも押し流した。この断層を突破するため種々の工法を検討した結果，水抜きと地質確認のために約 3m^2 のう回坑を導坑から 15 m離して掘削し（掘削総延長 107 m），さらに前回よりも広範囲にわたって薬液注入（奥行 7.5m；LW 310m^3，高分子系 25 m^3；最大注入圧 25 kg·cm^{-2}）を施工した。その後，導坑断面を 8m^2 に絞って掘削し，予定より5か月遅れて工区境に到達した。また，上半掘削は水抜きボーリングを施工した後リングカット工法によって行ない，覆工はできるだけ早く施工した。下半は布引断層の標準サイクルに準じた。

5. 山田断層の施工

北坑口付近は土カブリが小さく（北坑口から南へ30m間の土カブリは20m以下）地表は墓地となっている。この付近の岩盤の弾性波速度は 1.8 km·sec^{-1}～3.0 km·sec^{-1} であり，地形上からも断層の存在が推定されていたが，墓地があるため事前に地表からボーリングを実施して断層の性状を確認することはできなかった。そのため，上半が断層区間内に到達する前に北坑口から 7m^2 の調査坑を70m掘削して地質確認を行なった。その結果，北坑口付近は軟弱な粘土層を含む段丘砂レキ層であり，南へ進むにつれて直径 5～10 cm の流紋岩からなる神戸層群の砂レキ層が分布していることがわかった。また，6,840m 地点（北坑口の南70mの地点）には厚さ 1m 程度の断層粘土が挟在していたが湧水はなかった。これらの地質条件ならびに工期・工費などを考慮し，北坑口より18m区間だけはサイロット工法（150H，ピッチ 1m）で掘削することにした。側壁導坑を 10 m 程度掘削したとき切羽の上部が崩壊したが，鏡止めを行ないながら予定時点まで掘削した。また，時間の経過とともに調査坑や側壁導坑にかなりの土圧が加わったが，松丸太で補強しさらに根巻きコンクリートやインバートコンクリートを打設してこれに対処した。ところで，この断層の施工で最も心配されたことは，悪地質の山の掘削もさることながら地表部の墓地への影響であった。それゆえ，上半掘削後はただちに支保工（200H，0.9mピッチ）のフランジにキーストンプレートを懸け，これを型わくとして厚さ 20 cm の仮覆工を行ない，引き続いて発泡モルタル（150 m^3）によって裏込め注入を行なった。地表部の影響調査としては，発破時の振動測定ならびに墓石の傾斜・地表部のクラックの有無などの監視が行なわれたが，特に変化は認められなかった。なお，下半施工についてはたいした困難は伴わなかった。



写真—6 調査坑と側壁導坑

6. おわりに

新神戸トンネルの代表的断層の施工法の概要について述べたが，ふりかえってみると，覆工に関しては布引断層の施工法とその他の断層のそれとは特に対照的であった。前者は掘削後長時間にわたり，地山の応力解放を待ったのに対し，後者は掘削後ただちに覆工を行なった。吸湿膨張性のモンモリロナイトを32～46%も含有しているという布引断層の地質的な特殊性のために単純に比較することはできないと思うが，覆工後の状態を見る限りにおいては，"掘削後ただちに覆工" したほうが良かったようである。

また，ここではふれなかったが，1,320m 地点や第2工区斜坑底における堅岩部からの大湧水（10 t/分，12 t/分）なども当初には予測できず，難工事を強いられたことを付け加えてこの報告を終えることにする。

参考文献

新神戸トンネル（第2六甲山トンネル）に関する報告は今までに数多く発表されているが，その一部をここで紹介しておく。

1) 橋詰義男：第2六甲山トンネル工事施工上の問題点，第27回建設省技術研究会講演概要自由課題別冊道路部門，昭和48年11月
2) 井田憲治・橋詰義男：第2六甲山トンネル工事中の環境問題とその解決策，第12回日本道路会議特定課題論文集，昭和50年
3) 新谷瑞穂・多々納芳則：第2六甲山トンネル内RC天井板（現場打）工事について，第12回日本道路会議一般論文集，昭和50年
4) 橋詰義男・玉野俊行：第2六甲山トンネル内のPC舗装について，第12回日本道路会議一般論文集，昭和50年
5) 松本安夫・新谷瑞穂：都市地域における道路トンネルの建設，建設の機械化，1976. 6，日本建設機械化協会

（原稿受理 1976.11.15）

NII-Electronic Library Service