

長田・高取山トンネル（北行）須磨断層付近の施工法

阪神高速道路管理技術センター 技術情報部 中尾次生
神戸第一建設部 山手工事事務所 明神正章
京都建設事務所 伏見工事事務所 井手口 昭

要 旨

長田・高取山トンネル（北行）は、高速2号線（神戸山手線）の一部をなす、延長約2 kmのトンネルである。地質概要としては、トンネル中間付近にある須磨断層を境に、六甲花崗岩類と第四紀の大阪層群に大きく二分される。断層付近の地山は著しく風化が進んだ断層破碎帯になっていると共に、全般に土被りが薄く民家が密集する住宅地直下を掘削することになるため、補助工法を併用することにより、地表面沈下抑止対策を講じることにしている。

本論文は、高取山工区（北行）トンネルにおいて断層破碎帯の中に存在する旧沼部の湖沼堆積物直下をトンネル天端離隔約4 mで通過するにあたり採用したパイプルーフ工法について述べると共に、大阪層群の滯水砂層部の施工概要を報告するものである。

キーワード：都市 NATM、補助工法、須磨断層、湖沼堆積物、低土被り、パイプルーフ、大阪層群

はじめに

長田・高取山トンネルは阪神高速3号神戸線と7号北神戸線を南北に結ぶ高速2号線（神戸山手線）の一部をなし、このうち高取山工区（北行）は、神戸市須磨区妙法寺から同市長田区長尾町2丁目に至る市街地に位置する延長1,243 mの2車線道路トンネルである（図1）。地質は当工区の南端付近に存在する須磨断層を境に、六甲花崗岩類（断層北側）と第四紀の大阪層群（断層南側）に大きく二分され、特に断層北側の地山は著しく風化が進んだ断層破碎帯となっている。また、この断層破碎帯部は、土被りが薄く、トンネル掘削の影響範囲に1000戸以上の民家が密集する住宅地の直下に存在しているので、本トンネルの施工は補助工法を併用することにより周辺環境、特に地表面への影響を最小限に抑えることが極めて重要となる典型的な都市 NATM である。

本文では高取山工区（北行）トンネルにおける須磨断層部並びにその近傍の施工状況を報告する。

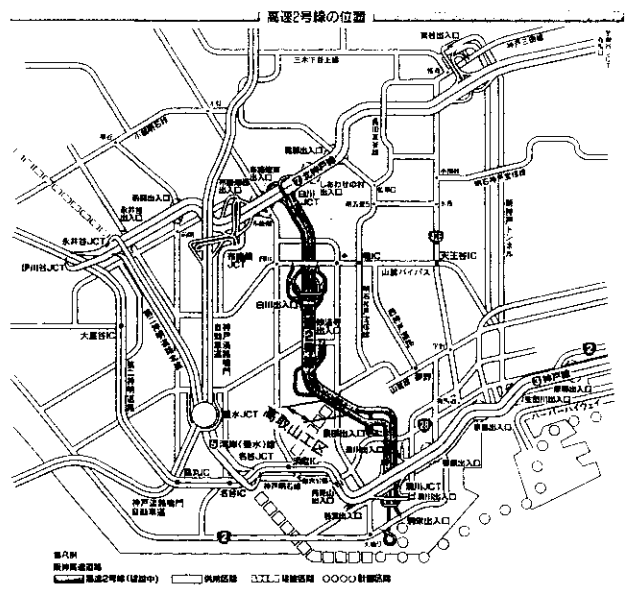


図-1 位置図

1. 地形・地質概要

当該工区は、中生代白亜紀の地殻変動によって形成された六甲山地の西南縁に位置しており、基盤岩は「本みかげ」とよばれる六甲花崗岩（淡紅色）にて構成されている。トンネルは堅固な花崗岩の「山岳部」と住宅密集地の直下でかつ須磨断層の影響を強く受けて大部分が破碎帯となっている「都市部」に大別される。

トンネルは、坑口（標高 60 m）から 3% の下り勾配にて隣接する長田工区との境界（標高 25 m）に向かって高取山（標高 320 m）の南東部の山と谷が複雑に入り組んだ山腹を通過している。「都市部」は、みかげの土被りが約 20~40 m とトンネル標準径（D=12 m）のおよそ 2~3 倍を有している。しかし、地表部は谷部を埋め立て造成された平坦な住宅地であり、この部分の元の地山としての土被り（以下「実土被り」と称す）は極めて浅く、実土被り 1 D 以下となる箇所がいくつか出現している（図-2）。

須磨断層は北東から南西に走っており、トンネル線形とはほぼ直角に交差している。地質は断層に近づくほど断層の影響を強く受けて著しく風化が進んでおり、断層北側の約 50 m 区間では変形係数は未固結砂層程度のかかなり低い値を示している。断層南側の大阪層群は砂・礫層と粘土層の互

層であり、断層に近傍する砂層は、被圧された豊富な地下水を有している。

巨視的にはこの地下水は、高取山が水源と想定され、トンネル切羽に向かい左後方から右前方へとトンネルを横断する方向に流水していると考えられる。なお、断層を挟んだ花崗岩破碎帯部と大阪層群は断層により遮水されており、地下水は不連続であることが事前調査により確認されている。また、高校グラウンド付近の旧谷部に沿った沢筋についても、その下層となる破碎帯とは、お互いに地下水の相互干渉のないことが観測されている。

風化花崗岩の破碎帯の透水係数は、 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ cm/s と小さく、同区間掘削時の切羽の安定性については、沢部直下の土被りが小さくなる区間においては、坑内湧水量が増える傾向にあったものの、全般的に先進導坑あるいはボーリングによる水抜き効果の結果、大きな問題となる湧水は認められなかった。

一方、大阪層群の透水係数は、 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ cm/s であり、かつ互層となっている各層には互いに独立した被圧滞水層を有している。さらに風化花崗岩に比べ、大阪層の砂層は均等係数が小さくバインダー分が少ない上、地下水の供給量も多く、切羽の自立性が問題となることが想定されていた。

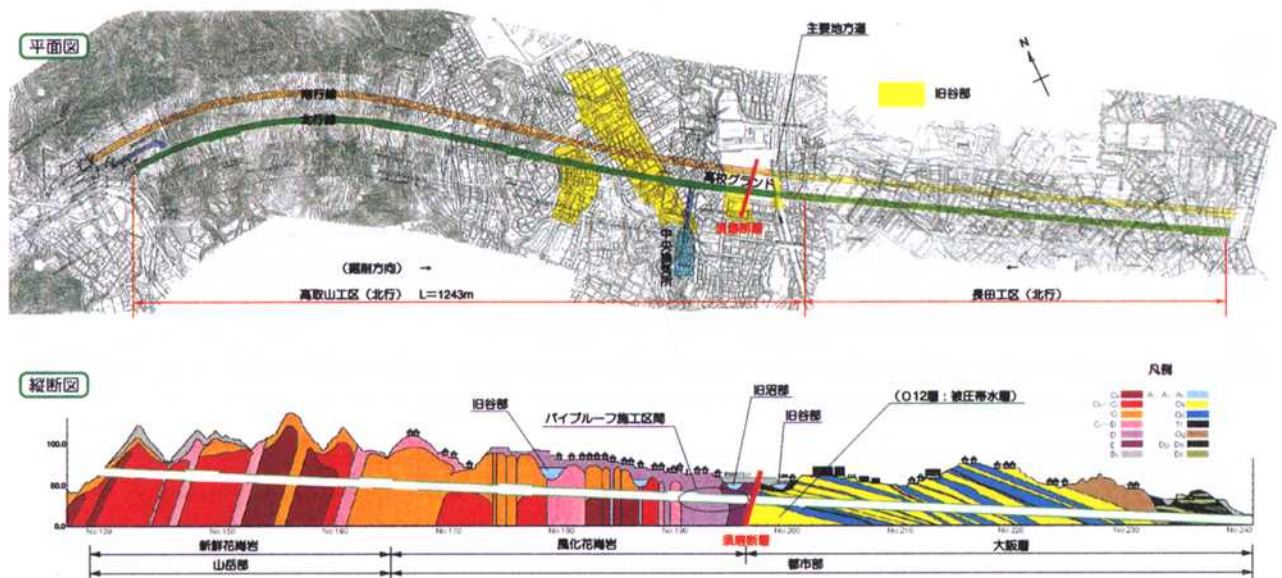


図-2 全体平面図及び地質縦断図

2. 須磨断層付近の設計・施工上の問題点

前述したような軟弱な地質条件下において、地上部に布設された埋設管や民家、グラウンド、道路等に対する影響を最小限にすることが施工法の選定にあたっての必要条件となっている。特に、民家密集区間もあり、薬液注入時の噴発や地表面の陥没等第三者を巻き込んだ災害に至れば全事業そのものに大きな影響を与えることになる。そこで、以下に示されるような特殊な条件下においての問題点を抽出した。(図-3)。

2-1 旧沼部埋立区間

須磨断層北側に位置する高校グラウンドは、旧沼が埋め戻されて造成された区域となっており、埋め戻し範囲はグラウンド西側の住宅地を含み広範囲に分布しているため、トンネル掘削の影響が広範囲に及ぶ可能性の高い区間となっている。当該区間の施工法検討に際しては、下記の点に着目した。

- ①グラウンド上では生徒が課外活動をしており、低上被り(実上被り4 m)の条件下で兵庫県南部地震の影響を強く受けて液状化現象を起こした旧沼(沖積世の湖沼堆積物)の直下を掘削するために、地表面の陥没、削孔水や注入液の地表面への噴発等の発生が懸念される。
- ②当該区間の地質は、断層の影響を強く受けており、トンネル周辺地山の変形係数は20,000～

40,000 kN/m² (200～400 kgf/cm²)程度と小さいため、トンネル通過による天端沈下や脚部沈下の増大に伴って旧沼部の堆積物及び埋め立て土が死荷重として作用し、トンネル構造に後荷(あとに：トンネル掘削進行後の作用荷重の増加)がかかることが懸念される。

- ③グラウンド西側の住宅密集地には、さらに広範囲にわたって沖積層が厚く堆積した旧沼部が存在している。このため、トンネル直上の旧沼部の滞水層にトンネル掘削の影響を与えれば、下流側の住宅地においても広域にわたり圧密沈下の発生が懸念される。

2-2 大阪層群滞水層区間

断層南側の大阪層群は、風化花崗岩区間に比べ、未固結で被圧滞水した地質であるという特徴を有している。高速2号線長田工区では、既に大阪層群区間の施工を行っており、地表面への影響抑制対策についても報告されているが、当該工区は、長田工区と比較して下記の特徴を有している。

- ①断層近傍で、地質がより不連続である状態が形成されている可能性が高い。
- ②層の傾斜とトンネル掘削方向の関係から常に新しい層がトンネル天端から出現するため、本坑切羽からの水抜きボーリングは現実性の乏しい長尺ボーリングとなり、地下水を完全に下げきるのが難しく、トンネル天端から水を被る可能

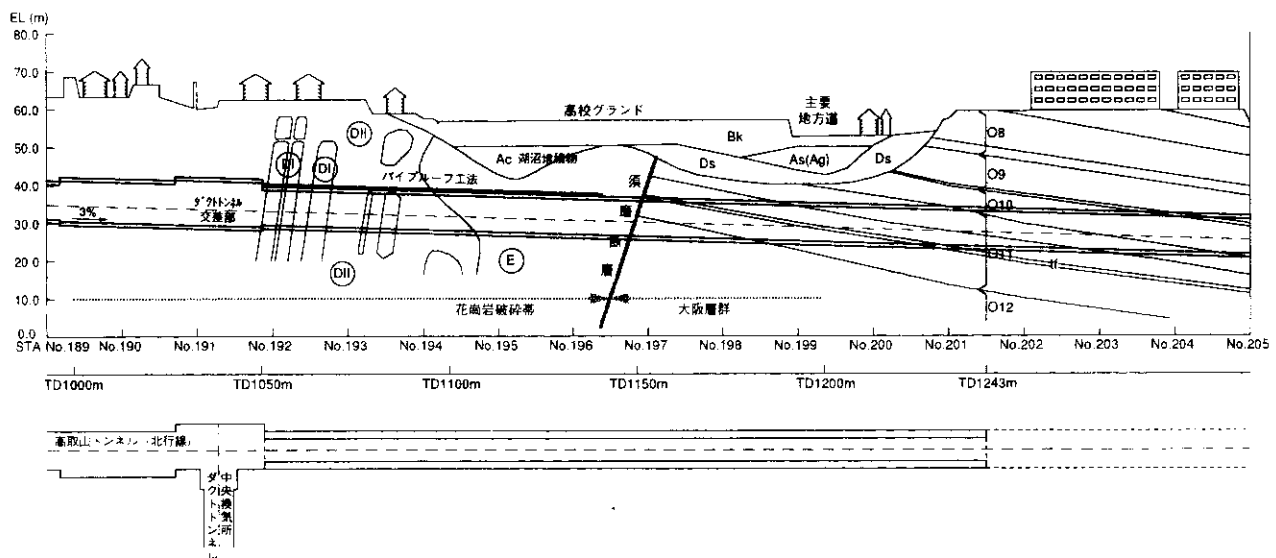


図-3 須磨断層付近地質縦断図

性がある。

- ③均等係数が2.3程度と、極めて粒径の揃った流動化しやすく被圧滞水化した層（O12層）が部分的に存在しており、地下水位を下げなければ、切羽や天端の崩落につながる可能性がある。
- ④主要地方道下を直交して通過する区間では、見かけの土被りは18~25m程度あるものの、当該区間も旧沼部に位置しているため、トンネル天端から沖積層までの実土被りは最小で5m程度と小さく、地表面への影響に対して厳しい施工条件となっている

3. 旧沼部直下の施工法

3-1 施工法の選定

旧沼部直下の施工法の選定にあたっては、坑内からの補助工法と地上部からの開削工法や抑止杭、地山改良等の補助工法の比較検討を行ったが、地上部の長期占用が困難なこと、地元との協定上大型車輛の通行制限があること等から、坑内からの工法に絞られた。

坑内からの補助工法には、比較検討の段階で当該工区にて実績のある長尺鋼管先受け工法、パイプルーフ工法、薬液注入工法、多段サイロット工法、凍結工法等が候補にあがったが、下記の理由から、上半部についてはパイプルーフ工法を、下半部についてはサイロット工法を採用することと

した（図-4）。

- ①長尺鋼管先受け工法では鋼管を斜め上方に打設することになり、旧沼底に抵触することによる地表面への噴発及び坑内への湖沼堆積物の流入等の危険性があるため、平行削孔により先受けする工法とする必要がある。
- ②上載荷重（全土被りを考慮）に対し、十分な剛性を有する先受け工および支保工脚部の支持力により確実に沈下を抑止する。
- ③パイプルーフの施工基地となる拡大断面（ダクトトンネル交差部）が施工位置近傍に存在する。

3-2 パイプルーフ工

パイプルーフは、その削孔方式（オーガー方式、ダウンザホール方式、カッターヘッド方式他）や排土方式（流体輸送方式、オーガー方式）、鋼管径（200~1000mm）、鋼管タイプ（セクション有無）等に応じて、いくつかの工法（THパイプルーフ、アイアンモール、アングルモール）がある。ここでは、施工延長が約90mと長いため、施工精度が高く、土砂から軟岩までの幅広い地山に対応可能でかつ地盤の抜け落ちや沈下を抑止するために、切羽圧の制御が確実にできる実績を持つ泥水式推進工法（アングルモール）を採用した（写真-1、図-5）。

また、当該工区の特徴及びパイプルーフの目的を考慮して、下記のような工夫を行った。

- ①鋼管間からの地山の抜け落ちを防止するため、隣接鋼管間に継手（ジャンクション）を設けた。

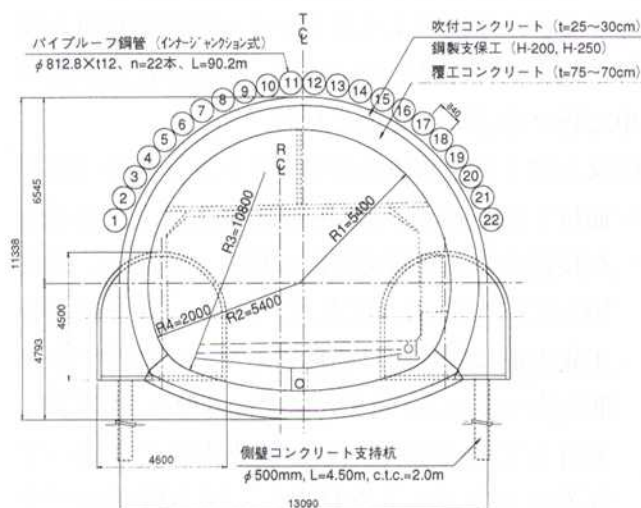


図-4 支保パターン図（パイプルーフ区間）



写真-1 泥水式推進工法掘進機

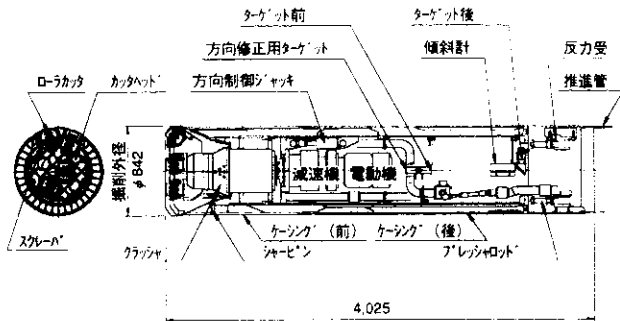


図-5 泥水式推進工法掘進機構造図

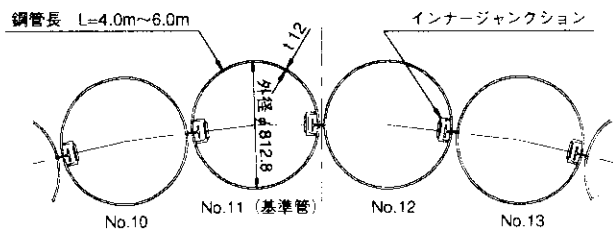


図-6 パイプルーフ用鋼管断面図

継手は軟岩部の掘進抵抗を考慮して、鋼管内部に継手を設けるインナージャンクションタイプとした(図-6)。

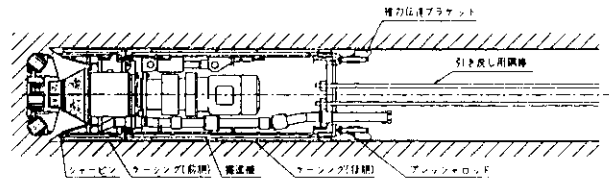
- ②到達立坑がないため、掘進機は約90m掘進した後インナージャンクション付き鋼管内を引き戻しできるような構造とした(図-7)。
- ③ダクト交差部の構造を利用した反力盤を設け、坑内の狭隘な場所で、側壁導坑の掘進とパイプルーフの施工を同時並進できるように架台の計画、揚重設備を工夫した(図-8)。

なお、鋼管長は坑内作業ヤードの制約より最長6mとし、92m当り16本継(このうち1本は掘進機をセットした先導管)とした。施工順序は、最初にトンネル天端部の基準管(No.11)を推進し、引き続き掘削機1台で基準管に隣接する左右の管(No.12, No.10)の施工を行った後、掘進機をもう1台追加して、2セットで肩部~脚部の順に計22本(22本×92m/本=2024m)の施工を行った。

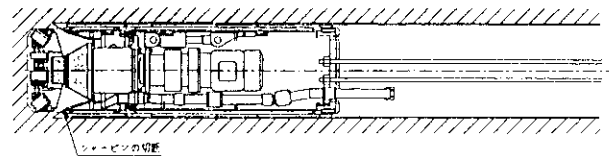
3-3 施工基地計画における課題と対策

前述したように、施工基地はダクトトンネルと交差する区間の拡幅断面部(図-9)とし、拡幅区間21mのうち約半分の11mをパイプルーフ施工ヤード、残りの10mを反力盤等の後方ヤード

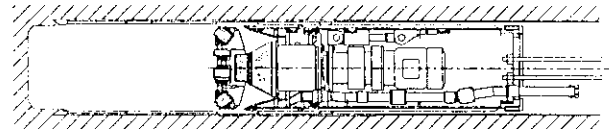
- ①掘進機、到達状態(到達立坑なし)プレッシャロッドを緩める、推力伝達ブラケットを撤去、引き戻し用鋼棒をセットする。



- ②掘進機を発進立坑側へ引き戻す(元押装置使用)、シャーピンが切断され、ケーシング鋼管(パイプルーフ部)と掘進機が分離される。



- ③さらに掘進機を引き戻し、推進用鋼管内から発進立坑まで引き戻し掘進機を回収する。



※ケーシング(前胴、後胴)は残り、パイプルーフ鋼管の一部となる。

図-7 掘進機回収施工手順

ドとした(写真-2)。

一般に、パイプルーフ工法あるいは側壁導坑は、トンネル坑口付近の上被りが1D未満の区間において、沈下を抑制し坑口周辺地山の滑りや変状を抑止する目的の補助工法として採用される。坑口部における施工の際には、坑内と異なり、オープンな空間を利用して施工基地を構築することができるが、今回のようにトンネル坑内に基地を設けて施工を行うにあたっては、制約された空間の中で様々な工夫を必要とした。

- ①反力盤：施工基地は換気ダクトトンネル(掘削面積：約100m²)と本坑(掘削面積：約170m²)が接続する大断面交差部に位置するため、仮設RCコンクリート(仮巻コンクリート)を二次覆工施工前に交差開口部補強のために打設する区間となっている。このため、後方ヤード区間に、先行してH形鋼埋込型の型枠支保工を用いて仮巻コンクリートを打設し、反力盤用のブラケットをこの埋め込まれた型枠支保工に取りつ

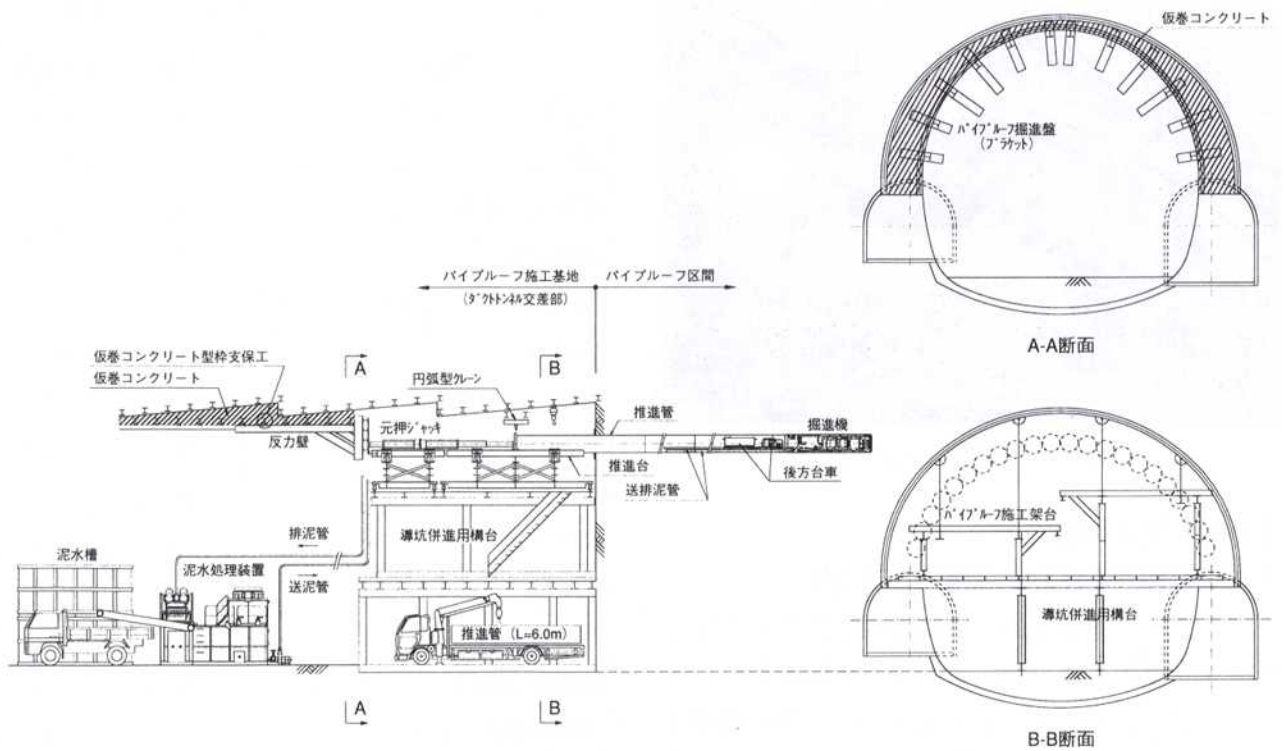


図-8 パイプルーフ施工要領図

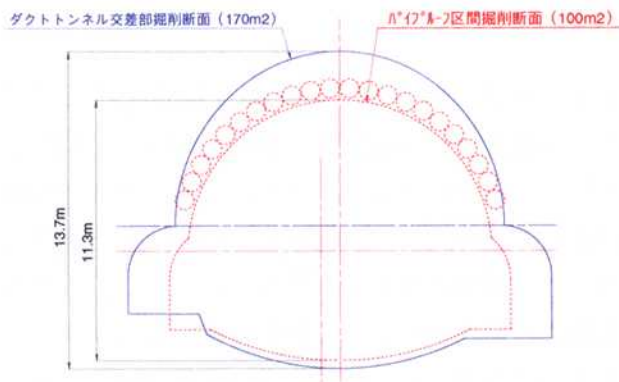


図-9 掘削断面比較図

けることとした。

- ②導坑併進用構台：パイプルーフの施工と側壁導坑掘削については、工程上の問題により併進が必要とされた。このため、側壁導坑掘削のための作業ヤードと鋼管や掘削機等パイプルーフ工の材料搬出入口を分け、互いの作業に支障をきたさないような作業構台を計画した。また、パイプルーフの施工架台についても、狭隘な坑内における設置・撤去をよりスムーズに行えるように、架台の柱を折り込み式とし、天端に備えつけたチェンブロック（10t×12台）にて、

導坑掘削に影響なく架台の上下移動等の段取り換えを行えるようにした。

- ③円弧型クレーン：立坑内あるいはオープンな坑口部での工事と異なり、鋼管（約2t）や掘進機（約6t）をクレーンにより自由に振り回すことができないため、架台に設けられた資材搬出入口から吊り込み、所定の位置まで左右に振り回せる揚重設備として坑内の限られたスペースを利用できる円弧型の天井クレーンを製作し導入した（写真-3）。



写真-2 パイプルーフ施工基地

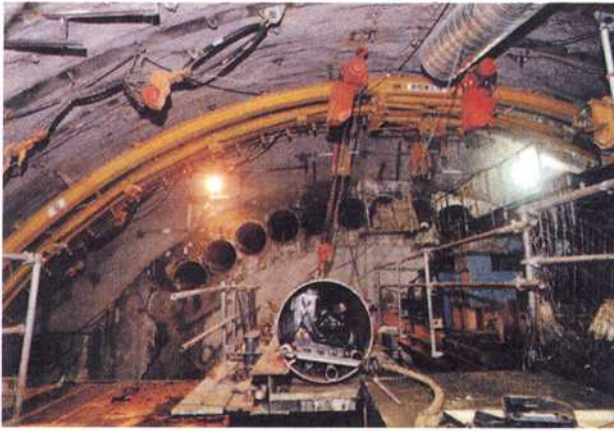


写真-3 円弧型クレーン

3-4 施工実績

(1) 平均掘進速度および施工サイクル

パイプルーフ施工は、当初計画された6ヶ月より2.5ヶ月多く要した。これは、今回採用したインナージャンクション付き鋼管でかつ掘削機引き戻しタイプが初めてのケースであったことが大きく起因した。掘削機の初期トラブルに加え、カタ回転時の揺動、鋼管継手部の抵抗増大等の問題により、設計推力130tに対して実推力が最大約300tまで上昇し、反力盤の補強や早急な機械の改造等を余儀なくされた。

パイプルーフ鋼管1本当り(L=92m)の平均的な施工サイクルを表-1に示すが、その概要は次のとおりである。①架台および掘削機セット：4.7日 ②掘進：7.3日 ③鋼管溶接：3.5日 ④掘削機および後続台車引抜き：3.1日 ⑤先端及び裏込め注入：1.5日

(2) 裏込め注入

裏込め注入は、ゲージカッターによる掘削機のテールボイド(余堀りによる空隙)の充填および周辺地山への注入を目的として、各鋼管掘進終了後に実施した。今回の余堀り量は、一般的な推進工法の値(20mm)に対して地表面への影響を考慮して9mmと設定し、裏込め材には無収縮性のセメントミルクを用いた。

(3) 掘進精度

今回の施工は、継手付き鋼管を使用するため、最初に打設する基準管の精度確保を慎重に行った。掘進機(先導管)は先端部(カタヘッド)

表-1 パイプルーフ平均施工サイクル実績

作業内容	作業種別	所要日数
元押しジャッキ引き戻し	④	0.5
送排泥管、ケーブル、泥水ホース取外し	④	0.4
鋼管吊り込み、設置	①	0.4
鋼管溶接	③	3.5
送排泥管、ケーブル、泥水ホース取付け	②	0.6
測量他	②	0.6
推進	②	6.1
管内設備撤去	④	0.5
引き戻し準備	④	1.5
閉塞注入	⑤	0.3
掘進機引き戻し	④	0.2
裏込め注入	⑤	1.2
推進架台移設	①	2.8
坑口取付け、斫り	①	0.8
掘進機搬入、据付	①	0.7
その他	①	0.4
合計	-	20.5

とテール部の間で中折れ可能な構造となっており、掘進時の方向制御は内蔵された方向制御ジャッキにより行った。また、掘進機の姿勢管理は管内に設置された傾斜計によりピッチングとローリングの誤差を計測しながら行った。いずれも後方の操作パネルにて集中管理を行うシステムとなっており、高い掘進精度の確保が可能であった(写真-4)。

一般的に推進工法では管径の10%程度がその掘進精度といわれているが、当工事においては、基準管の最大誤差は35mm(管径の4%)であった(図-10)。他の鋼管についても概ね同程度の精度が確保でき、削孔中の沖積層の出現や地表面への泥水の漏出等は認められなかった。

4. 大阪層群滞水砂層部の施工法

4-1 施工法の選定

前述(2-2)の当該区間の特徴を考慮した上で、下記に示すとおり側壁導坑先進の長尺鋼管先



写真-4 掘進機運転状況

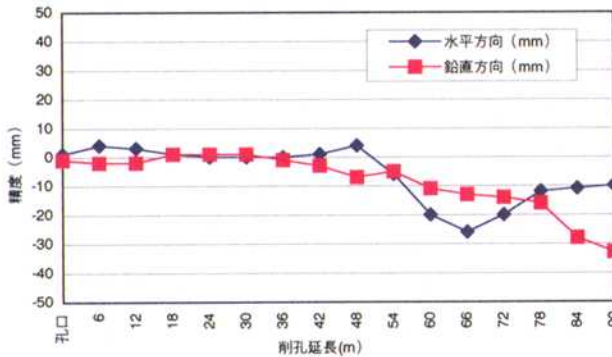


図-10 掘進精度実績 (基準管)

受け工法を採用した (図-11)。

- ①大阪層群の緩傾斜及び均等係数の低い砂層の存在、低土被り区間の存在から、側壁導坑を先進させ、その坑を利用して積極的に水抜きを行う。さらに、側壁コンクリートを打設することによって地表面への影響抑止を図る。
- ②上半の支保パターンは長田工区の施工実績に基づいて長尺鋼管先受け工法とした。
- ③低土被り区間は、側壁導坑から上方に向けて一部地山改良を施した。
- ④地上部からディープウエルを実施し、地下水位を下げた。

4-2 施工実績

断層手前より大阪層の地質-滞水状況を確認するための水平地質調査ボーリングを削孔した際に、O12層から毎分200リットル程度の湧水とそれに伴う噴砂が確認された。特に、噴砂については、ケーシング口元を止水したにもかかわらず、

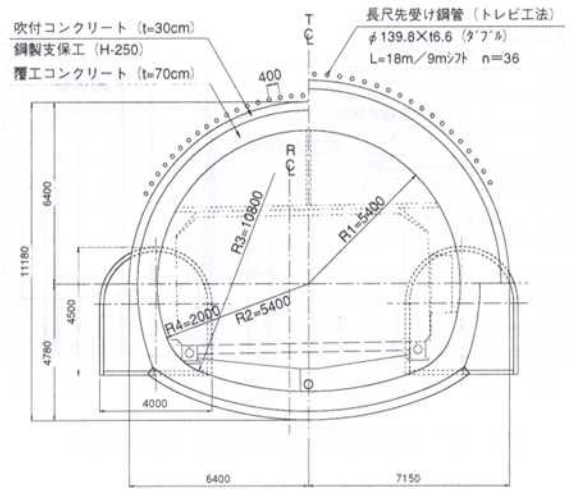


図-11 支保パターン図 (大阪層低土被り部)

ケーシングと吹付コンクリートの隙間からしばらく続いた。このため、これ以降の水抜きボーリングを行う際に、先行して口元管(φ165.2)を削孔挿入し、モルタル充填を行った後、その中を再ボーリングする方式を採用した。さらに口元管と再ボーリングのケーシング(φ118)間の止水を可能とするシステムとした。また、ケーシングとロッド間の噴砂を防ぐために逆止弁付き外管削孔を採用した (図-12)。

O12層については、導坑からの水抜きボーリングによる湧水量は当初450リットル/分程度に達した。導坑掘削は、宙水(地層内にレンズ状に閉じ込められた地下水)の有無の確認を目的とした上方ボーリングを実施した後、2ヶ月ぶりに再開した。

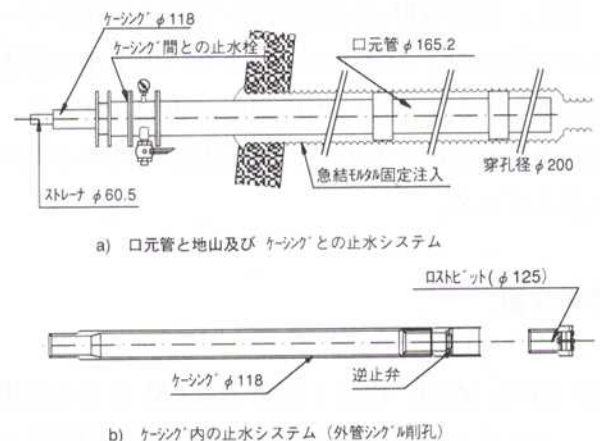


図-12 水抜きボーリングシステム概要図

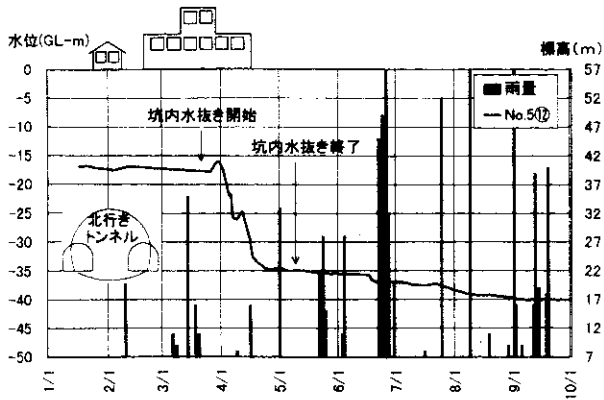


図-13 地下水位経日変化図 (O 12層)

5. あとがき

今回のようにトンネル坑内に基地を設けて施工するパイプルーフ工法は、特に都市トンネルの場合その用地境界、基地構築に伴う地表への影響評価等別途検討や工夫を要することが多い工法である。地上の占有条件が許せば、あるいは水理条件上問題なければ、地上からの地盤改良工法によって地山改良をするのが一般的と考えられるが、都市部のトンネルが今後増えれば地表の制約条件によっては、採用される工法の一つとして考えられる。

パイプルーフの施工は、平成11年10月に完了し、施工基地の解体を行い本坑掘削を平成11年12月より再開した。これに伴い、パイプルーフ工法の軟弱な地盤における山岳工法への適用性について、計測結果より重要な情報が得られると考えられる。

また、大阪層群の区間については、水抜きボーリング及びディープウエルにより、地下水の低下を図ることができた。本坑掘削の再開に伴って、細心の注意を図りながら、施工を行っていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 関本, 森岡, 佐原: 都市 NATM による長田トンネルの施工, 阪神高速道路公団技報 17号, 1999.