

# PLAD 工法における新しい掘削技術

## Recent Technical Developments in PLAD Method

島 宏<sup>\*1)</sup> 長谷川 久<sup>\*2)</sup> 野崎 啓太<sup>\*3)</sup> 小野 敏孝<sup>\*4)</sup>  
*Hiroshi SHIMA Hisashi HASEGAWA Keita NOZAKI Toshitaka ONO*

### 抄 録

パイプラインの河川や港湾等の横断部の敷設工法として開発された PLAD 工法(パイプライン弧状錐進工法)の技術内容とその特長及び適用範囲について述べた後、最近の開発成果であるウォータージェット掘削技術と岩盤掘削技術の現状を紹介した。ウォータージェット掘削については、従来の水圧モーター掘削機構に代わる耐久性と軌道制御効率に優れた機構を考案し、掘削実験を経て名古屋港天白川河口部横断工事に適用し、良好な結果を得た。岩盤掘削については、治具構成と掘削方法の検討を行い、砂と岩盤からなる複層地盤の福岡県芦屋町遠賀川横断工事の岩盤部斜孔軌道掘削に適用し、良好な結果を得ると共に今後の検討データを収集した。

### Abstract

The present paper describes the outline, features and application range of the Horizontal Directional Drilling Method for Pipeline Crossings (PLAD), a method for installing the pipeline across rivers, harbors, etc. Moreover, the recently developed water jet drilling and rock formation drilling techniques are described. For water jet drilling, a drilling machine with excellent durability and high pilot route control efficiency has been developed to replace the conventional drilling machine employing the hydraulic downhole motor. After test, this machine was applied to the pipeline crossings at the mouth of Tenpaku River in Nagoya Port, achieving good results. The rock formation drilling technique developed through extensive study of drilling tools and drilling methods was applied to the drilling of slant boreholes in the rock formation, consisting of sand and rock, at the pipeline crossings at Onga River, Ashiya-Cho, Fukuoka Prefecture. Good results were achieved and the data necessary for future study were collected.

## 1. 緒 言

PLAD 工法 (Pipe Line Arch Drill Method: パイプライン弧状錐進<sup>\*1)</sup> 工法) とは、地上から斜めに孔を掘り進み、弧状の軌道を描いて障害物の下を横断し、その中にパイプラインを敷設する工法である。

本工法は、“たて坑のいらない推進工法”を目標とし、石油掘削などにおける方位掘削技術を核に1977年末より開発に着手し、1979年の関東ローム層での確性実験を皮切りに、1981年までに数次の施工性実験を繰り返した。又、1982年には同様の工法を持つ米国 Reading & Bates 社と技術提携を実施している。

技術的には、石油掘削がたて掘りで深層地盤が対象であるのに対し、PLAD 工法は水平掘りで表層地盤を対象とすること、及び配管工法であるため到達地点での高い位置精度が要求される点に特異性があった。

\*1 通常の推進工法のようにジャッキで推すのではなく、ビットを錐のように回転させて掘り進むため、“錐進”の字を当てている。

この間、1979年より実施工を開始し、実績を積みながらノウハウの蓄積と技術改良を行うことにより工法の適用範囲を拡げ、現在までに24件、総錐進延長で15,449mの施工実績をあげている。

本報告は、PLAD 工法の概要を述べた後、新たに開発したウォータージェット掘削技術及び岩盤掘削技術について述べる。

## 2. 工法の概要

### 2.1 施工手順

本工法は、地上に設置した錐進設備によって作業が進められる機械化された3工程のマイクロトンネリング工法であり、その施工手順を図1に示す。

#### (1) パイロット孔掘削工

発進側に設置した錐進機と呼ばれる専用掘削機を用い、小径(2-7/8インチ)のパイロットパイプを推進し、その先端に取り付けた軌道制御機能を持つ掘削装置によってパイロット孔を掘削する。軌道は先端掘削装置の直後に位置する孔芯測定器により地上でモニターされる。

\*1) 鉄構海洋事業部 水道・水処理施設部 部長代理

\*2) 鉄構海洋事業部 技術開発部 部長代理

\*3) 鉄構海洋事業部 水道・水処理施設部 掛長

\*4) 鉄構海洋事業部 技術開発部

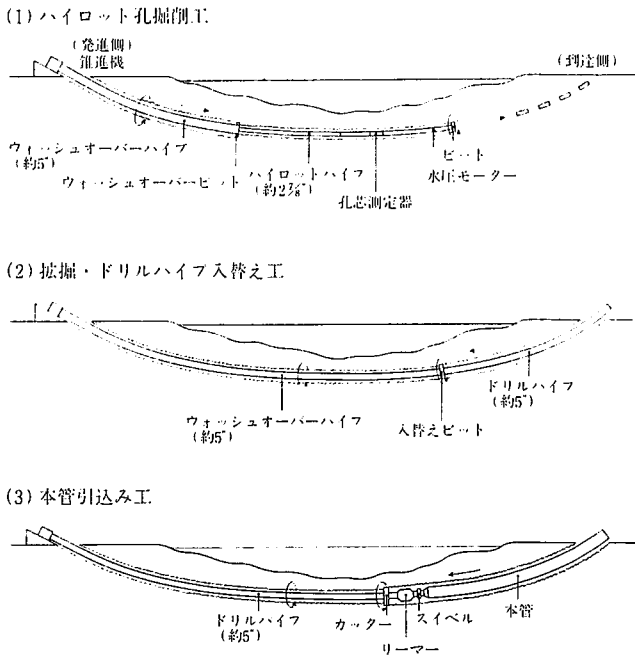


図1 標準施工手順

掘進距離が長くなるとパイプ周辺の抵抗が増大するため、ある距離を掘り進むたびに、パイロットパイプの外側に径の大きなウォッシュオーバーパイプ（5インチ）をかぶせて回転させながら掘進し、パイロットパイプの抵抗を低減させると共に軌道を確保する。

パイロットパイプ到達後はウォッシュオーバーパイプも到達させ、パイロットパイプは撤去する。

(2) 拡張・ドリルパイプ入替え工

到達したウォッシュオーバーパイプに、拡張・入替え用ビットを介して本管を引込むための十分な強度を持つ同径（5インチ）のドリルパイプを接続して進機側へ回転させながら引込み、拡張をしながらウォッシュオーバーパイプと入替える。なお、このステップは延長、管径、土質によっては省略することがある。

(3) 本管引込み工

到達側のドリルパイプ先端にカッター及びリーマーを取付け、これらと本管先頭のプリングヘッドとをスィベルを介して接続する（図2参照）。この編成でドリルパイプを回転させることにより、本管は先行するカッターで掘られ、リーマーで整形された孔内をスィベルにより回転せずに進機側へ引込まれ、所定の位置に敷設される。

本管の引込みに際しては、周囲地盤による拘束力の増大を避けるため、溶接作業などによる中断を最小限にする必要がある。そのため、場所的な条件が許せば事前に本管を全長にわたって溶接接合しておくことが望ましい。

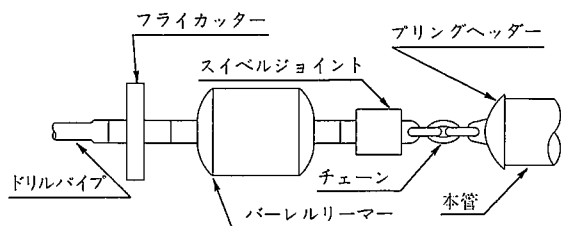


図2 本管引込み工用治具構成

2.2 工法の特長

工法の特長として、以下の点があげられる。

- (1) 中間たて坑や中押し機構なしで、一挙に800mから1,500mに及ぶ長距離の進進が可能。
- (2) 従来工法で不可欠であったたて坑を構築せずに任意の深さでの進進が可能であり、坑内作業もないため、安全で作業性も良好。
- (3) ウェルポイントや薬液注入などの補助工法が不要であり、地盤沈下や地下水の枯渇、汚染の恐れがなく、環境保全にも有利。
- (4) 独自の掘削制御・修正機構及び軌道計測・管理システムにより、高精度の軌道確保が可能。
- (5) たて坑の構築及び補助工法が不要であるため、工事期間の大幅な短縮が可能。
- (6) 工期が短く、たて坑や土留めのためのセグメントが不要であること及び補助工法が必要なく環境公害による補償問題も少なく、工事費の低減が可能。

2.3 軌道掘削技術

(1) 掘削機構

パイロット孔掘削に用いられる掘削機構は、図3に示す掘削用ビット、ベントハウジング及び水圧モーターから構成される。

水圧モーターの駆動部は、ステーターとよばれる円筒管の中に螺旋状のローターが入った構造になっており、泥水がこの間隙を流れることにより回転力を発生する。地上からパイロットパイプの中を通して送られた泥水は、水圧モーターを駆動させてビットを高速回転させると共に先端から噴出され、掘削された土砂と混じった状態でパイプと孔の間隙を通して地上に戻ってくる。

(2) 軌道制御

パイロット孔の軌道制御は、水圧モーターにより先端のビットのみを回転させ、パイロットパイプは回転させないでベントハウジングと呼ばれる曲がり部分の向きをコントロールすることにより行う。

その原理は図4に示すように、進機よりパイロットパイプに推力を加えると、ベントハウジング前方の部分は土からの反力を受けて曲げモーメントを生じ、パイロットパイプ先端はベントハウジングの曲がりの方向に向かう軌道をとることにある。これにより軌道は上下左右いずれの方向にも制御可能となる。制御は掘進の速さや泥水の量などを調節し、この曲げモーメントの大きさを変化させる

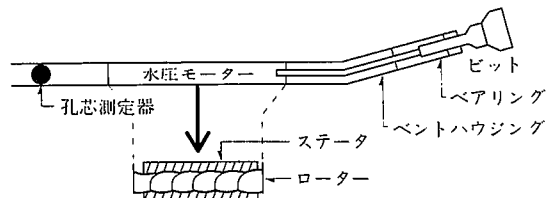


図3 パイロット先端部掘削機構

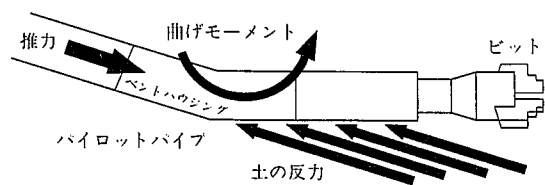


図4 軌道制御の原理

ことにより行う。

### (3) 泥水の機能

本工法に用いる泥水の配合は掘削する土質や使用する水質により異なるが、基本的にはベントナイトを主材としてこれに水及び増粘剤や界面活性剤などを加え、攪拌して作成する。

本工法で果たす泥水の役割は、1) 水圧モーターの動力源、2) ビットの冷却、3) 掘削土の搬出、4) 孔壁の崩壊防止、5) パイプと地山の潤滑剤、などであり、極めて重要である。

使用后、地上に回収された泥水は、土砂分を除去して比重や粘性などの性状を調整した後、再使用される。

## 2.4 主要機器設備

### (1) 専用掘削機

専用掘削機は、斜めの反力架台と油圧を動力源とする推進・回転及び牽引装置からなり、発進地点に設置されたアンカーに固定される。

この錐進機により、パイロットパイプ掘進時には推進力のみを、ウォッシュオーバーパイプ掘進時には回転力と推進力を、そして掘削・ドリルパイプ入替え及び本管引込み時には回転力と牽引力を供給する。このように微速、小推力での微妙なパイロットパイプ掘進から、高速、大牽引力での本管引込みまでを1台の機械で制御可能とした点に技術的特色がある。

現在、PLAD-250、PLAD-300(写真1参照)の2台の錐進機がある。

### (2) 泥水プラント

泥水プラントは、ホッパー、ミキサーなどの作泥設備、タンク、送泥用ポンプ及び戻り泥水の再調泥設備から構成される。

各施工ステップにより使用泥水量が異なるため、送泥用ポンプは複数台設置して運転台数により調整している。又、再調泥設備には戻り泥水中の固形分を除去するために除砂装置も設置される。

### (3) コントロールボックス

コントロールボックスには錐進機及び泥水ポンプの操作盤、推力、トルク、泥水圧、送泥量などの計器盤、軌道管理用コンピューターなどが設置されている。これによりすべての情報は一元管理され、これらに基づいて適切に能率良く施工することが可能となる。

## 2.5 軌道管理システム

### (1) 孔芯測定器

パイロット孔の掘削軌道の位置検出に用いられる孔芯測定器は、方位計と傾斜計などの計測器本体、処理回路、バッテリー、発信器によって構成される孔内部分と受信器及び信号処理演算器などの地

上部分からなり、大地とアース線によって回路を形成することにより、無線方式で作業性良く測定を行うことができる。

これらのセンサー部分は、パイプの磁気の影響を避けるため、水圧モーターのすぐ後に位置するステンレス鋼製の非磁性カラーの中に入れられている。

### (2) 軌道管理

計測された方位角と傾斜角の変化量から、パイロットパイプ先端付近の掘進方向、横方向及び深さ方向の変化量を計算し、更にこれをパイプの長さ方向に積分することにより軌道の座標を算定する。得られた軌道位置の計測結果と計画軌道とを対比し、その差が許容範囲内にあることを監視し、必要に応じて修正掘削を施すことにより、高い精度を維持できる。

又、到達地点近傍に設けたボーリング孔からの磁気探査による位置確認を行うことにより、更に到達精度を向上させることができる。

## 2.6 適用範囲

### (1) 適用箇所

工法の主要な適用場所とその利点を以下に示す。

#### (i) 河川、港湾などの水路横断

堤体や護岸への影響を最小限にとどめ、水質汚濁や地下水枯渇及び航行船舶への影響がない。

#### (ii) 道路、鉄道などの横断

車両、列車の通行止めの必要がなく、地下水位の変化もない。又、1,000mm以下の小径掘削であることにより、路面の隆起、沈下の恐れもない。

#### (iii) 海底配管の訂線部のアプローチ

非開削であるため海岸線の保全ができ、沿岸の漁業補償問題も発生しない。又、浚渫・埋戻しにより管を敷設する海底配管一般部との接続も容易である。

### (2) 工事規模

PLAD工法は小径管の長距離敷設に適している。現有設備での施工可能最大管径は1,000mmまでであり、錐進可能延長は土質条件などにより変化するが、一応の目安として、300mm径の管で1,500m、1,000mm径で800m程度としている。

### (3) 土質条件

施工に最も適した土質は均一な粘性土であり、これに次いで砂質土でも良好な施工性が得られる。又、地層の変化も粘性土と砂質土の互層であれば問題ない。ある程度の礫径や礫混入率の砂礫層、軟岩層でも可能であり、最近では一部硬質の岩盤層を含む複層地盤にも実績を持つなど、その地盤対応能力は高い。

## 3. ウォータージェット掘削技術の開発

### 3.1 開発目的

従来パイロット孔の掘削は、泥水圧により図3に示した水圧モーターを駆動させ、その発生トルクによるビットの回転により行われている。

しかし、水圧モーターは摩耗、破損を生じやすく、200~500mの掘削で寿命となるため、1,000mクラスの錐進では2~5回の交換が必要となり、施工能率の低下を招いていた。又、計測位置をできるだけ掘削地点に近づけることも掘削軌道の制御を効率良く進める上で重要となるため、孔芯測定器から掘削地点までの長さを短くすることが求められていた。更に水圧モーターは機器メーカーが国内になく、故障時の早期対応が困難なため、掘削装置の国産化が望まれ

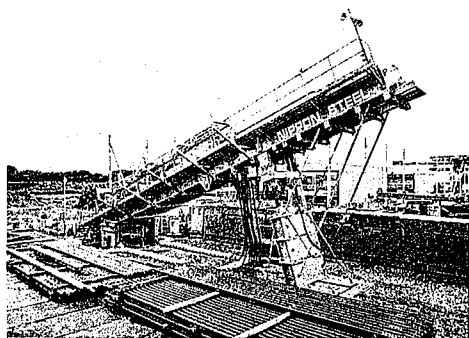


写真1 専用掘削機 PLAD-300

ていた。

これに対し、水圧モーターに代わる掘削技術として、軟弱地盤の改良などで用いられているウォータージェット適用を検討し、図5に示す掘削機構を考案した。

### 3.2 検討及び実験

#### 3.2.1 検討内容

PLAD工法へのウォータージェットの適用性を検討するため、現有のポンプ設備を用い、空中での噴射実験とN値が20~50の砂地盤での掘削実験を実施した。この実験では、掘削機構先端の治具形状として図6に示すベント部の長さ及び角度を変えた3パターンを製作して使用した。

掘削条件としては、掘削速度、泥水量を一定とし、1) 曲線軌道の掘削性、2) ノズル付近の摩耗状況、3) ジェットの圧力及び流速の3項目について検討を行った。写真2にウォータージェット掘削状況を示す。

#### 3.2.2 実験結果

実験より以下のような結果を得た。

- (1) 本掘削条件下で得られた曲率半径は、Aの治具形状で80~150m、Bの形状で150~500m、Cの形状で500~1,200mとなり、ベント長さや角度の効果を定性的に確認できた。
- (2) ノズル付近の摩耗量はごく僅かであり、掘削途中での治具交換

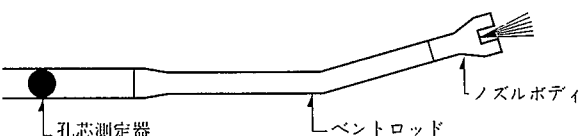


図5 ウォータージェット掘削機構

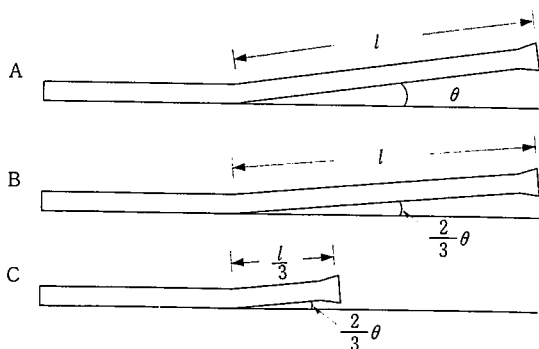


図6 ウォータージェット掘削治具形状

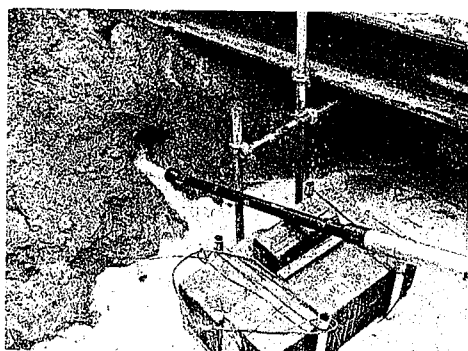


写真2 ウォータージェット掘削状況

の必要はほぼないといえる。

- (3) 空中における流速と泥水圧の関係を明確にすると共に、地盤掘削中の泥水圧は最高で空中噴射の1.3倍程度まで上昇することが確認でき、掘削条件を設定する上での留意点を明らかにできた。以上、実験を通じて、従来ポンプ設備を用いてのウォータージェット掘削が十分に可能であることを確認した。

#### 3.3 天白川河口部横断工事への適用

机上検討及び掘削実験結果を踏まえ、ウォータージェットを名古屋港天白川河口部での口径600mmの高圧ガス導管敷設工事に適用した。パイロット孔の掘削は、図7に示すように発進点から曲率半径R=600mで掘り下げ、水平掘削を行った後、到達点に向けてR=804mで掘り上げるもので、掘削長は672mであった。土質はN値が10以下のほぼ一様なシルト質の軟弱地盤であった。掘削機構の長さは水圧モーターの場合の約1/3とした。

以下に、工事適用で確認されたウォータージェットの効果を示す。

- (1) 軟弱地盤において水圧モーターと同等な精度での軌道が得られる。
- (2) ノズル付近の摩耗はほとんどなく、延長700mを越す工事に治具を交換することなく掘削できる。
- (3) 圧力、流速が一定なことから、計測器の破損やバッテリーの消耗の恐れがない。
- (4) 土質によっては水圧モーターより安定した掘削が可能である。

#### 3.4 ウォータージェット掘削の今後の課題

今後、適用範囲を拡げ、更に安定した掘削技術として確立するために、工事を通じて以下の項目のデータを収集し、検討して行きたい。

- (1) 種々の地盤への適用性の検証
- (2) 掘削制御方法の確立
- (3) 最適治具形状の選定
- (4) 高水圧化による高強度地盤掘削の可能性検討

## 4. 岩盤掘削技術の開発

### 4.1 技術的課題

PLAD工法の岩盤への適用には次の課題があった。

課題-1：岩盤掘削では、1) 岩盤内で掘削治具先端の曲がり部が受ける抵抗力と曲線軌道の制御可能範囲が不明確、2) 削孔した軌道を修正する確実な方法がない、などの理由から掘削軌道の設定に十分な配慮が必要となる。

課題-2：ビットの回転力や泥水圧で乱しながら掘削できる砂や粘土層と異なり、岩盤を掘削するにはビットを岩盤に押し付けて圧力を加えながら十分なトルクで削孔する必要がある。そのため治具構成や掘削ステップを見直す必要がある。

課題-3：掘削ずりの排出は泥水により孔壁とドリルストリングス

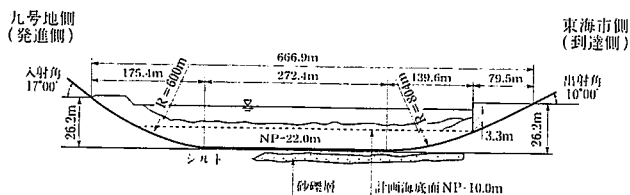


図7 名古屋港天白川河口部横断工事断面図

の間隙を通して行すが、排出が不十分な場合、孔壁が安定しているために孔内のずりの堆積による抵抗の発生が懸念される。従って、ずりの十分な排出のための適切な泥水の性状と流量の設定が必要となる。

ここでは、これらの課題を踏まえ、砂層の一部に岩盤が露頭する複層地盤での実工事において採用した掘削方法について報告する。

4.2 掘削方法及び治具構成

4.2.1 軌道の設定

岩盤掘削を実施した福岡県遠賀郡芦屋町の遠賀川横断工事における土質及び軌道の断面図を図8に示す。本管径300mm(鞘管径350mm)の下水管敷設工事であり、全長310mのうち右岸の約77mに一軸圧縮強度1,000kgf/cm<sup>2</sup>の岩盤層が存在していた。岩盤の曲線軌道掘削には予測不能な要素が多いため、岩盤内は直線軌道の斜孔掘削とし、砂層側を従来法である曲線軌道での方向制御掘削により地表に到達させることとした。

4.2.2 掘削ステップの決定

(1) パイロット掘削

パイロット掘削は、岩盤側あるいは砂層側からの2方法が考えられたが、1) ビットへの十分な給圧、2) 砂層内での軌道変化による掘削の座屈防止、3) ビット交換の時間短縮と軌道の確保などを考慮して岩盤側から行うものとした。

(2) 拡張スケジュール

拡張方法としては、岩盤部分のパイロット掘削完了後、砂層のパイロット掘削を実施し、到達側からの引込みによって行う方法と、事前に岩盤部分を押しによって所定の径まで拡張し、その後、砂層のパイロット掘削を行う2方法が考えられた。しかし、引込みによる方法には、1) 岩盤拡張中の砂層掘削孔の崩壊、2) 岩盤拡張用治具が砂層の拡張には不適、との問題があることから、拡張は発進側から押しにより実施するものとした。

又、拡張スケジュールは油井での標準スケジュールを基本に、ずりの排出不良や掘削障害の発生しにくいものとして、以下の構成を選定した。

- ・パイロット掘削：12-1/4" ビット，8" 水圧モーター，9-5/8" CSG
  - ・第1段階拡張：17-1/2" HOP，13-3/8" CSG
  - ・第2段階拡張：20" HOP，13-3/8" CSG
- (HOP：ホールオープナー，CSG：ケーシング)

以上の検討より決定した掘削ステップを図9に示す。

4.2.3 岩盤内掘削治具・掘削構成

掘削ビットは、耐摩耗・耐久性に優れ、幅広い土質に対応可能なチップインサートローラートリコンビットを採用した。

必要掘削トルクと推力の算定は、次式(米国 Hughes Tool Co. 提案式を経験的に修正した式)により行った。

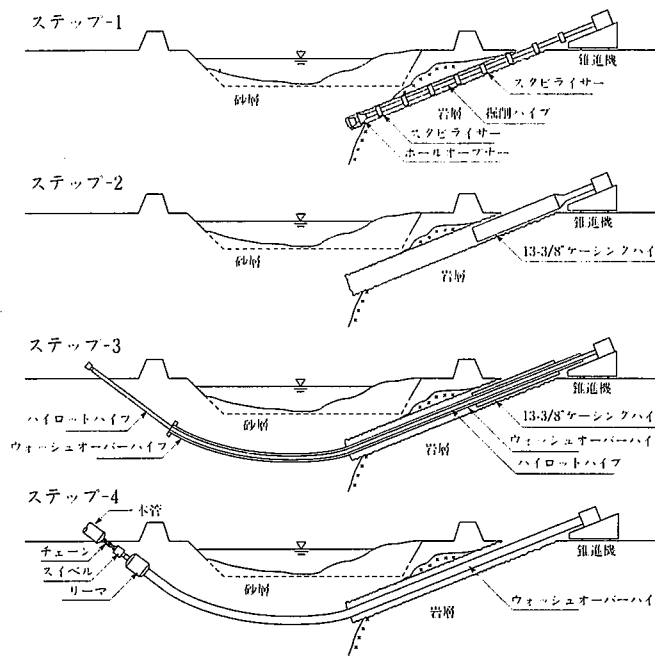


図9 掘削ステップ

$$T = 2.96 \times 10^{-2} \cdot k \cdot W_d^{1.5} \cdot D^{2.5} + 0.7D$$

ここで、T：必要掘削トルク (kg・m)，k：地質係数，W<sub>d</sub>：ビット単位径当たり荷重 (kg/cm)，D：ビット口径 (cm)

又、掘進率の算定は、次式(建設省土木研究所実験式に効率0.7を考慮した式)により行った。

$$R = 0.11568 \cdot 0.7 \cdot N \cdot W_d / q_u$$

ここで、R：掘進率 (m/h)，N：ビット回転数 (rpm)，q<sub>u</sub>：一軸圧縮強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

掘削治具及び掘削の仕様は、これらの結果にドリルストリングスが受ける抵抗を考慮して決定した。

水圧モーターは、必要トルクと推力を供給でき、方向制御可能で重力による垂れ下がりを生じにくく軽量な、角度調整機構付8"サイズとした。又、ビットに推力、トルクを伝える後続管は、1)力の伝達に十分な剛性があり、2)垂れ下がりを生じにくく、3)軽量で脱着時の作業性が良く、4)ずり排出の効率上から径が大であることなどの条件より、特殊ねじ仕様のケーシングパイプを採用した。拡張用治具は、1)掘進スピード、2)必要トルク、3)汎用性などから、油井掘削で使用されているガイド付きホールオープナーを利用することとした。

以上の検討により、図10に示す治具構成で掘削を行うこととした。写真3に岩盤掘削治具を示す。

4.2.4 掘削ずりの排出

泥水のずり搬送性を数値的に裏付けるため、以下の式を用いると共に、斜孔内のずり搬送をモデル化した室内実験を実施し、必要流速及び泥水性状を決定した。

$$V_{sl} = \sqrt{\{4 \cdot d \cdot g \cdot (\rho^1 - \rho) / 3 \cdot \rho \cdot C\}} \cdot \sin \theta \cdot C_{in}$$

ここで、V<sub>sl</sub>：スリップベロシティ (cm/s)，d：ずり径 (cm)，g：重力の加速度 (980cm/s<sup>2</sup>)，ρ<sup>1</sup>：ずり比重 (g/cm<sup>3</sup>)，ρ：泥水比重 (g/cm<sup>3</sup>)，C：摩擦係数，θ：傾斜角 (°)，C<sub>in</sub>：補正係数

4.3 今後の課題

以上の検討結果に基づき工事を実施し、ほぼ計画に合致した掘進

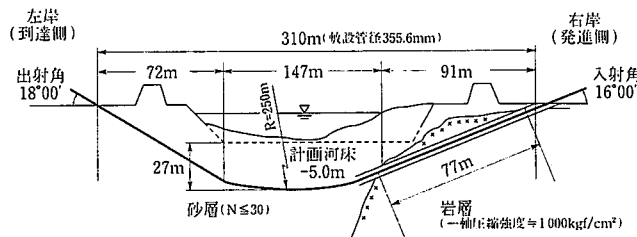


図8 福岡県遠賀郡芦屋町遠賀川横断工事断面図

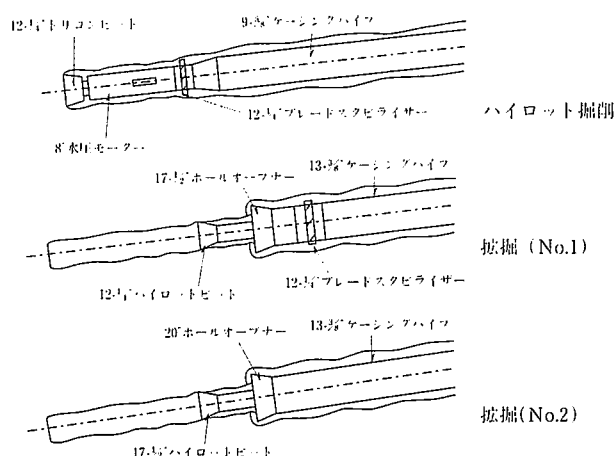


図 10 岩盤掘削治具構成

率で削孔を完了すると共に、軌道制御のための基礎的なデータを得ることができた。今後は、このデータを基に軌道の修正方法を含む岩盤内での曲線軌道掘削技術を確立して行きたい。

## 5. 結 言

PLAD工法の概要と最近の技術的進歩について述べた。

本工法は、単に独創的なだけでなく、適用方法によっては極めてメリットの大きな工法であり、パイプラインの非開削敷設工法の一つとして、ガス、石油をはじめ、水道、下水、電気、通信などの各分野で用いられている。

21世紀へ向けてのインフラストラクチャー整備が進められる中で、非開削工法のニーズは更に増大するものと予想される。今後も実績を重ねながら、工事規模や土質及び施工条件などの面で、工法の適用可能範囲をより拡大するための開発を進めて行きたい。そして、各種ライフラインの建設において、PLAD工法が広く活用されることを期待したい。

## 参 照 文 献

- 1) 白川, 長谷川: 石油技術協会誌. 49(5), 38-45 (1984)
- 2) 新日本製鐵: 鉄の話題. (51), 25-30 (1985)

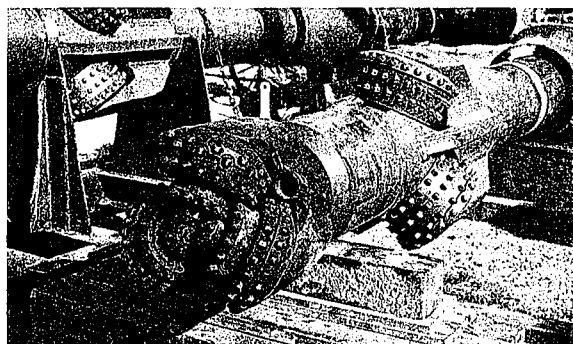


写真 3 岩盤掘削治具