

## Development of Long Span Pipe Jacking Method for Laying Underground Pipe



赤秀 公造  
Kohzo Akahide

エンジニアリング事業  
部 研究開発センター  
施工研究室 室長(部  
長)・工博



藤本 智也  
Tomoya Fujimoto

エンジニアリング事業  
部 研究開発センター  
施工研究室 主任研究  
員(課長)



永野 栄二  
Eiji Nagano

エンジニアリング事業  
部 パイプライン海洋  
技術部パイプライン水  
道技術室 主査(課長)



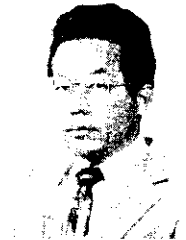
佐々木 寛  
Hiroshi Sasaki

川鉄工事(株) 技術部  
主任



竹内 卓  
Takashi Takeuchi

(株)小松製作所 地下  
建機製造部 第二設計  
室 室長



土井 初治  
Hatsuji Doi

小松ゼノア(株) 建機  
技術部 副部長

### 1 まえがき

開削が困難な市街地および近郊部の配管工事では、小、中径管を対象に立坑間距離が50~70 m以下の推進工法が普及している。しかし、経済性、安全性、地域住民の工事公害に対する厳しさなどの点から前記の立坑間距離をできるだけ長大化して立坑数を少なくし、交通流の乱れを最小限にとどめる長距離推進工法の開発が強く要望されてきた<sup>1)</sup>。

このたび、筆者らはアイアンモール工法を基本に1スパン長さが200 m以上とれる埋設鋼管用長距離推進工法の研究開発に取組み、現地施工実験を行った。その結果、実用化への見通しが得られたのでここにその概要を報告する。

### 2 推進工法

本実験に使用した推進工法は 株式会社小松製作所のアイアンモ

### 要旨

(株)小松製作所が保有するアイアンモール工法を基本に、推進力の増強、排土機能の強化、方向計測システムの改良などを加え、外径500 mmの鋼管を供試して直進200 mの長距離推進施工実験を行い、敷設に成功した。得られた主な結果は以下のとおりである。

- (1) 直進200 mの長距離推進施工を完遂した。
- (2) 3種類の供試鋼管の座屈耐力を検証、推進に供したが、いずれの鋼管も円滑に施工できた。
- (3) 本管の推進力算定手法を明らかにするとともに、最大推進力とその発生位置を求める簡易式を提案した。
- (4) 推進精度は上下左右方向ともに $\pm 40$  mmの範囲を確保した。

### Synopsis:

When it is difficult to use the conventional open-cut method for laying pipe underground, a pipe jacking method is often utilized. In such a case, a longer span is more desirable for actual construction because of the potential cost saving, construction efficiency, minimization of traffic interruption, and other resultant advantages. This paper discusses an improved technique which was implemented by using Komatsu Iron Mole as a basis and by adding thereto several features such as the pipe laying technique utilizing incremental jacking force, reinforced slurry discharge function, improved direction control devices, etc., in a full-scale field test for a distance of a 200-m span employing 500-mm-diameter pipe. The principal results obtained were the following:

- (1) Long span pipe jacking method was successfully used for a distance of a 200-m straight line.
- (2) Three types of pipe, namely, double walled pipe, expanded pipe and bare pipe which previously sustained buckling forces were all advanced smoothly through the soil.
- (3) A procedure for evaluating the main pipe jacking force was confirmed, and brief equations to estimate the maximum jacking force and its probable location were proposed.
- (4) High precision jacking at an accuracy of  $\pm 40$  mm deviation in horizontal as well as vertical directions was achieved.

ール工法を基本に、これに長距離化を意図し、種々のソフトおよびハード技術を付加したものである。

#### 2.1 アイアンモール工法

##### 2.1.1 基本装置

Photo 1に示すように油圧ユニット、コントロールユニットおよび、後部推進台より成る。Table 1にこれらの仕様を示す。適用管径は250~900 mm $\phi$ である。

\* 昭和62年11月4日原稿受付

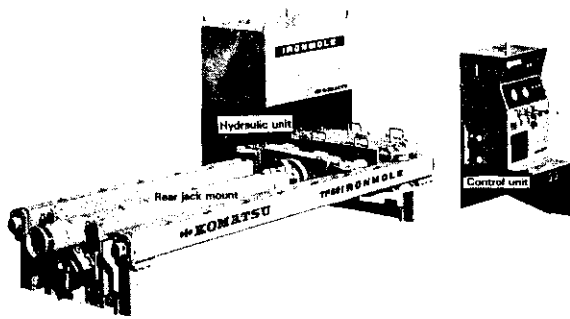


Photo 1 Basic units

Table 1 Specifications of basic units

Hydraulic unit	1 366 mmL × 929 mmW × 1 553 mmH
Frequency	50/60 Hz
Power required	33 kW
Voltage required	200 V (3-phase AC)
Weight	970 kgf
Control unit	727 mmL × 689 mmW × 1 564 mmH
Power required	150 W
Voltage required	100 V (AC)
Weight	250 kgf
Rear jack mount	3 686 mmL × 1 300 mmW × 745 mmH
Max. pushing force	200 tf
Stroke	450 mm
Weight	2 230 kgf

### 2.1.2 施工手順

Fig. 1 に示すとおりであり、初めにパイロット管を貫通させ、その後本管を通す2工程方式を採用。すなわち

- (1) まず最初に発進坑、到達坑を構築、発進坑内には推進架台を据付ける。そして、その上にパイロットヘッドをのせる。
- (2) 後部推進ジャッキを作動、パイロットヘッドを土中に推進する。
- (3) パイロット管を順次継足しつつ、推進を続ける。
- (4) パイロットヘッドが到達坑に達し、パイロット管が貫通する。パイロットヘッドは直ちに回収する。
- (5) 到達坑より貫通したパイロット管内にスラリー管を挿入、スラリー管は発進坑まで達する。
- (6) 発進坑に達したスラリー管端に本管径とほぼ等しい外径のカッターヘッドを取付ける。
- (7) カッターを回転しながら推進し、本管径に等しい穴を連続的に土中にあける。この際、掘削した土砂はスラリー化させ、スラリー管を通して到達坑へ排出、回収処分する。
- (8) カッターを回転させ本管径に等しい穴をあけつつ、後部推進ジャッキで本管を順次土中に推進する。この際、つぎつぎと到達坑に押し出されてくるパイロット管は地上より回収する。こうしてカッターヘッドが到達坑に達すると本管の推進が完了する。

### 2.1.3 特長

高精度推進ができること、2工程方式のため万一の場合でもパイロット管推進段階で工事の成否が判断できること、アタッチメントを交換するだけで広範な土質に対応できること、分割型を使えば立

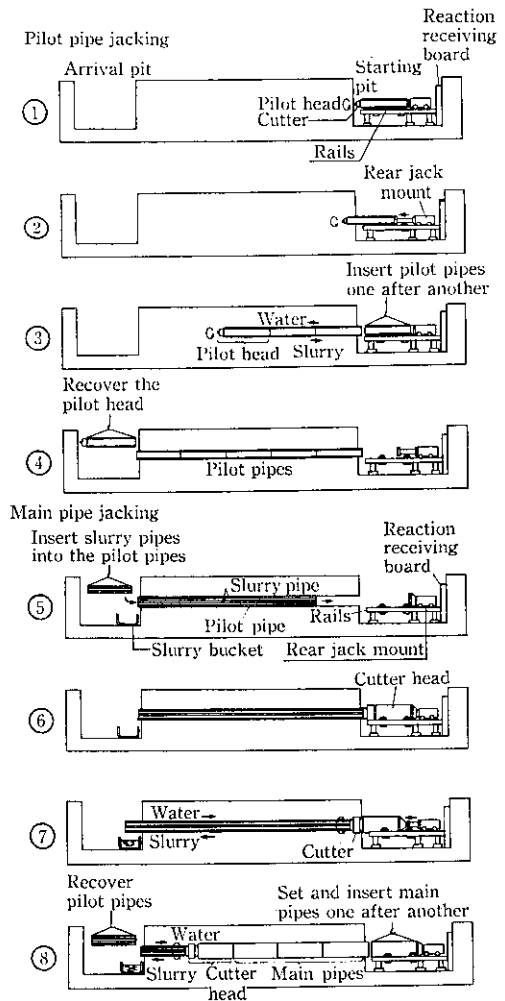


Fig. 1 Construction procedure

坑が小形化できること、適用管径範囲が広いことなどが挙げられる。

### 2.2 長距離化への対応

長距離化に対応するため、既往のアイアンモール工法に付加した主な技術改良点は以下のとおりである。

- (1) 推進力の増強  
既往のシステムでは150tを常用最大押し力としたが、これを200tまで増加させた。
- (2) 排土機能の強化  
スラリー配管の長尺化にともない管路の摩擦抵抗が増大する。これに対処するためFig. 2に示すようにスラリー出口側に真空装置を挿入して吸引力を付加できるようにした。
- (3) 方向計測システムの改良  
パイロットヘッド内に2枚の半透明アモルファスシリコン光位置検出素子を組み込み、レーザーセオドライトとマイクロコンピュータを組合わせて方位角および、傾斜角を演算した。また、レーザー光の散乱やかげろう現象に対しては、随時清浄な空気をパイロット管内に送り込むとともに、演算処理を工夫することにより解決した。
- (4) その他  
ローリング対策、切羽の安定化を意図したカッター配置と土砂取込み口の狭小化、水圧センサの設置、カッターソースの硬度アップ、カッタープレートの硬化肉盛などを行った。



Table 2 List of buckling test specimens

Type of pipe	Geometry (mm)	Number
Double walled pipe	Concrete φ508×6.4WT	2
	φ406×6.4WT	
Expanded pipe	φ508×6.4WT	3
Bare pipe	φ508 } × 6.4WT	3 (φ508)
	φ406 }	3 (φ406)

WT: Wall thickness

Table 3 Comparison of buckling prediction with test results

Type of pipe	Maximum load (tf)			Average (tf)	Pre-dicted*2 (tf)
	TP1*1	TP2*1	TP3*1		
Double walled pipe	335	335	—	335	331
Expanded pipe	260	261	262	261	267
Bare pipe	φ508	327	328	329	328
	φ406	324	326	327	326

\*1 Test piece number

\*2 These values are obtained by calculation

### 3.2 推進力

パイロット管推進時の推進力と推進距離の関係を Fig. 5 に、続く本管推進時の推進力と推進距離の関係を Fig. 6 に示す。まず、Fig. 5 により以下の知見が得られる。

- (1) パイロット管推進では、推進力は大略、推進距離に比例する。
- (2) この関係を最小 2 乗法で表わすと、滑材未使用時には  $N_p = 1.1x + 2.3$ 、滑材使用時には  $N_p = 0.5x + 5.2$  となる。ここに  $N_p$  は推進力、 $x$  は推進距離を表わす。
- (3) 上記 (2) の関係より、滑材供給効果は顕著で、推進力を半減させる。

一方、Fig. 6 の本管推進では Fig. 5 のパイロット管推進と比べ、様相が一変する。すなわち、推進力は推進距離が 60~70 m 付近でピーク値に達し、以降は推進距離が増加しても増えず、推進力は定常状態を保持する。

これらの現象は以下のとおり解析できる。

#### 3.2.1 非一体滑動領域

推進距離が 60~70 m までの領域である。本管推進時、パイロット管が前方に長く横たわりかつ周辺土も締まっているため、本管は

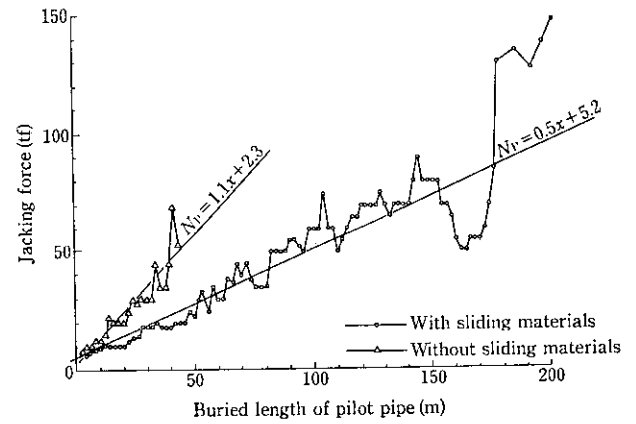


Fig. 5 Relationship between jacking force and buried length of pilot pipe

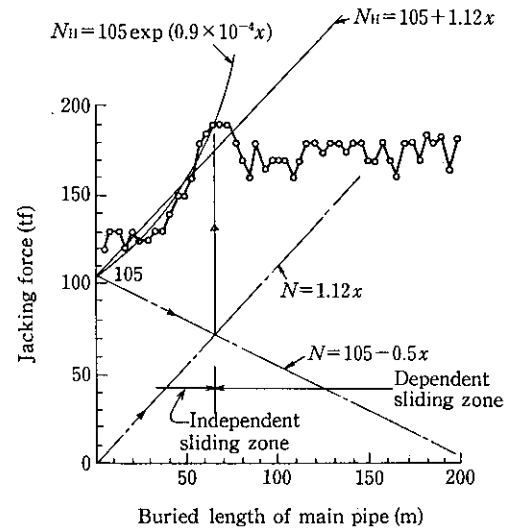


Fig. 6 Relationship between jacking force and buried length of main pipe

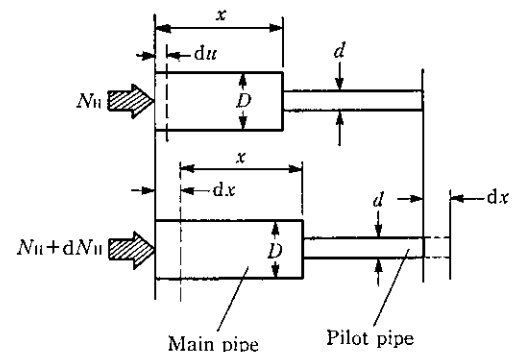


Fig. 7 Schematic model during main pipe jacking

円滑に推進せず、相応の弾性圧縮を受けつつ徐々に土中に入ります。

この場合、推進力は Fig. 7 のモデルを参照して次のとおり求められる。

力のつり合いより

$$dN_H = \pi(f_H D - f_r d) dx \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $N_H$ : 本管推進力

$f_H$ : 本管周面摩擦抵抗

- $f_P$ : パイロット管周面摩擦抵抗
- $D$ : 本管径
- $d$ : パイロット管径
- $x$ : 本管推進距離

推進にともなうパイロット管の移動量は、本管のそれに比べて一体的な滑動性状を呈して微小なため、(1)式は

$$dN_H = \pi f_H D dx \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $f_H$ は推進力に比例すると考え、

$$f_H = s N_H \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $s$ : 土の接線摩擦係数

(2), (3)より

$$dN_H = \pi s N_H D dx \quad \dots\dots\dots (4)$$

(4)より

$$\frac{dN_H}{N_H} = \pi s D dx \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 $\pi s D = K_1 \quad \dots\dots\dots (6)$

とおくと、

$$N_H = e^{K_1 x + \alpha_1} = C_1 e^{K_1 x}$$

ただし、 $C_1 = e^{\alpha_1}$

実測データより

$$\left. \begin{aligned} x=0 & : N_H=105 \\ x=6000 & : N_H=180 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (7)$$

を代入すると

$$C_1 = 105, K_1 = 0.9 \times 10^{-4}$$

となり、 $N_H$ は

$$N_H = 105 \exp(0.9 \times 10^{-4} x) \quad \dots\dots\dots (8)$$

この時、(6)式より

$$s = 5.6 \times 10^{-7} \quad \dots\dots\dots (9)$$

となる。そして、(3), (9)式より $f_H$ は

$$f_H = s N_H = 5.6 \times 10^{-7} N_H \quad \dots\dots\dots (10)$$

式(10)はFig. 8のとおりとなり、本管推進力の増加にともなう周面摩擦抵抗は直線的に増え、つり合いが成立することを示す。

また、たとえば60m推進時における管軸方向の弾性圧縮変位量を求めると

$$du = \frac{N_H}{AE} dx \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここに、 $u$ : 変位量

$A$ : 本管断面積

$E$ : 鋼管のヤング率

ゆえに

$$u = \frac{1}{AE} \int_0^{6000} 105 \exp(0.9 \times 10^{-4} x) dx \approx 39 \text{ mm}$$

この値は、施工時に観察された管体の変位量に近似する。

### 3.2.2 一体滑動領域

推進距離が60~70m以降の領域である。ここでは本管とパイロ

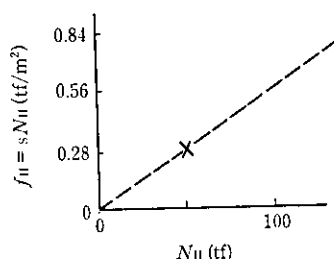


Fig. 8 Relationship between resistance at external surface and jacking force of main pipe

ット管は一体化して同時に動くと考えられる。この場合、(1)式で

$$\pi(f_H D - f_P d) = K_2 \quad \dots\dots\dots (12)$$

とおくと、

$$dN_H = K_2 dx \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$\therefore N_H = K_2 x + \alpha_2 \quad \dots\dots\dots (14)$$

ここで、実測データを適用すると

$$K_2 = 0, \alpha_2 = 175$$

この時、(12), (14)より

$$f_H D - f_P d = 0$$

$$\therefore \frac{f_H}{f_P} = \frac{d}{D} \approx \frac{1}{2} \quad \dots\dots\dots (15)$$

上式は本管推進時、本管側のみ滑材を供給し、パイロット管側には供給しないことから、先のFig. 5の結果と合致することとなり成立する。

ここで周面摩擦抵抗を求めると滑材供給がある場合には0.7 t/m<sup>2</sup>、ない場合には倍値の1.4 t/m<sup>2</sup>となる。

つぎに、最大推進力は本管の全周面摩擦抵抗とパイロット管のそれとが等しい地点で生じると考えるとFig. 6のとおり、

$$1.12x = 105 - 0.5x \quad \dots\dots\dots (16)$$

$$\therefore x = 65 \text{ m}$$

となり、実測値と一致する。また、この値を使って(8)式より推進力を求めると $N_H \approx 188 \text{ t}$ となる。一方、簡易式として次式を使うと

$$N_H = 1.12 \times 65 + 105 \approx 178 \text{ t}$$

となり、両者とも実測値を十分近似する。

ここで最大推進力の発生位置とその値を簡易式を使い一般化すると

$$N_P = \pi f_P d L - \pi f_P dx \quad \dots\dots\dots (17)$$

$$N_H = k \pi f_P dx \quad \dots\dots\dots (18)$$

ここに、

$L$ : 推進区間長

$k$ : 本管径とパイロット管径の比

式(17)と(18)が等しい地点で最大推進力が発生することから

$$\pi f_P d L - \pi f_P dx = k \pi f_P dx$$

$$\pi f_P dx (k+1) = \pi f_P d L$$

$$\therefore x = \frac{1}{k+1} \times L \quad \dots\dots\dots (19)$$

この地点での推進力はつぎの(20)式で得られる。

$$N_{H \max} = \frac{2k+1}{k+1} \times N_{P \max} \quad \dots\dots\dots (20)$$

式(19), (20)の右辺の係数 $1/(k+1)$ ,  $(2k+1)/(k+1)$ を本管径に対してプロットするとFig. 9および10のとおりとなり、これらの図から以下のことがわかる。

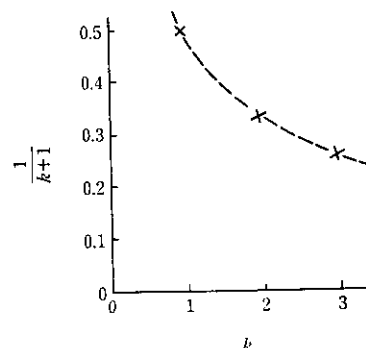


Fig. 9 Relationship between  $1/(k+1)$  and main pipe diameter

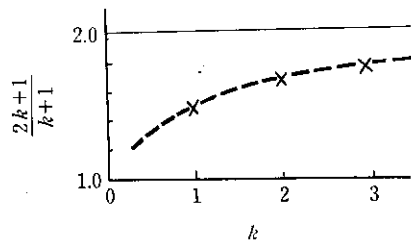


Fig. 10 Relationship between  $(2k+1)/(k+1)$  and main pipe diameter

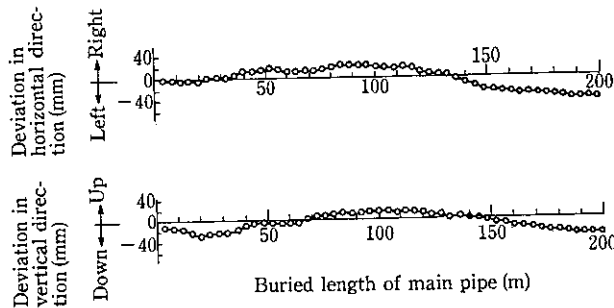


Fig. 11 Jacking accuracy for main pipe

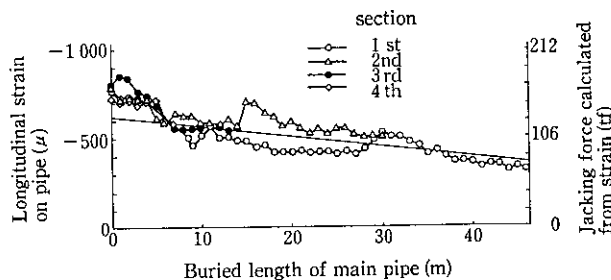


Fig. 12 Relationship between jacking force imposed and buried length of pipe

- (1) 最大推進力の発生位置は本管径が大きくなるほど Fig. 9 の曲線に沿って発進坑側に近づくこと。
- (2) 最大推進力は本管径が大きくなるほど漸増し、パイロット管推進時に発生する最大推進力の 2 倍近くになること。

### 3.3 推進精度

本管の出来形測定結果は Fig. 11 のとおりであり、目標到達位置に対し、左方向に 37 mm、下方向に 25 mm の偏位を生じた。長距離にもかかわらず高精度推進が具現できたことがわかる。これはアモルファスシリコンを応用した新しいレーザー計測システムが有効に機能したことやレーザー光の散乱に対するスポット化処理、かげろう現象に対する静止画像化処理に負うところが大きなものと考えられる。

### 3.4 推進力の伝播

管内に貼付したひずみゲージから求めた推進力の伝播値を推進距離に対してプロットすると Fig. 12 のとおりとなる。推進力は管体と周辺土砂の摩擦抵抗により、推進方向に直線的に減衰する。

図上の減衰勾配より本管の周面摩擦抵抗を求めるとおよそ  $0.7 t/m^2$  となり、既述の値に一致する。

### 3.5 接合作業サイクルタイム

鋼管を推進する時、管と管を接合するに必要な一連の作業時間す

Table 4 Cycle time for pipe connection operation

Type of pipe	Procedure	Cycle time (min)
Double walled pipe	Pipe alignment→Tack welding→Girth welding→Coating of welded joint→Fitting up steel segment→Attaching steel piece	70-90
Expanded pipe	Pipe alignment→Inserting pipe→Tack welding→Girth welding	60-80
Bare pipe	Pipe alignment→Tack welding→Girth welding	40-60

なわち接合作業サイクルタイムは管種により異なる。Table 4 に結果を示す。2重管は内管どうしの円周溶接後、鋼製セグメントの装着作業がともなうため最も手間どる。裸管と拡管との主な時間差要因は前者が突合わせ溶接のみで事足りるのに対し、後者は所定の脚長を有するすみ肉溶接に加え、管と管との正確な挿入作業が付帯することによるものと考えられる。

## 4 まとめ

アイアンモール工法を基本に外径 500 mm の推進用鋼管を供試して直進 200 m の長距離推進施工実験を行い、当該現場条件において、つぎのことを明らかにした。

- (1) 長距離化に対処するため、推進力の増強、排土機能の強化や方向計測システムの改良などを行い、直進 200 m の長距離推進施工を完遂した。
- (2) 2重管、裸管の圧縮耐力はテトマイヤー公式より求められる座屈荷重に、一方、拡管は塑性加工に伴う耐力低減率を 0.2 とすると実測値によく近似する。
- (3) 推進力はパイロット管推進時には推進距離に比例する。その際、滑材供給効果は顕著であり、推進力を半減させる。一方、本管推進時には 2 つの領域に別れ、評価が異なる。本管とパイロット管が一体的に動かぬ非一体滑動領域では曲線式で、本管とパイロット管が一体的に動く一体滑動領域では直線式で与えられる。
- (4) 最大推進力は本管の全周面摩擦抵抗とパイロット管のそれとが等しい地点で生じる。
- (5) 最大推進力の発生位置は本管径が大なるほど漸次発進坑側に近づく。また、その値は本管径の増大とともに漸増し、パイロット管推進時に発生する最大推進力の 2 倍近くになる。
- (6) 推進精度は上下左右方向とも  $\pm 40$  mm の範囲を確保した。
- (7) 推進力は周面摩擦抵抗により管路沿いにはほぼ直線的に減衰伝播する。
- (8) 管種別に見た接合作業サイクルタイムは 2重管が 70~90 分、裸管が 40~60 分であり、拡管はこれらの中に位置する。最後に推進施工に当り種々ご指導、ご教示賜った小松建設工業株式会社 大橋副部長はじめ関係諸氏に厚くお礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 遠藤郁夫, 永田伸之: 下水道協会誌, 22 (1985) 1, 72-78
- 2) 高橋将憲他: 「水道用推進鋼管設計基準」, (1981), 10-11, [日本水道鋼管協会]
- 3) 奥村敏恵, 三宅政光: 「土木応用力学」, (1976), 206-207, [実教出版]