

# 機械推進工法における $N$ 値に基づく推力の 算定に関する研究

## TO ESTIMATE THE REQUIRED THRUSTS BASED ON $N$ -VALUES IN PIPE-JACKING GUIDED BY MECHANICAL SHIELDS

南野輝久\*・畠昭治郎\*\*

By Teruhisa NANNO and Shojiro HATA

Establishing a practical, correct and simple method of calculation of the thrust, which is among the fundamental problems in pipe-jacking, remained to be solved.

The recent advance in the technology as guided by mechanical shields of this branch of civil engineering, has rendered it possible (1) to stabilize the faces without dewatering or chemical grouting and (2) to dig tunnels more efficiently than before.

The authors have worked out a formula by which to calculate the thrust required in pipe-jacking based on  $N$ -values, after having analysed a posteriori at several hundreds works, the relations of the actual thrusts and  $N$ -values of the grounds.

Keywords :

### 1. 概 説

公共事業による社会資本の整備のうちで、国民のニーズが高く、また、その投資効果の大きいものの1つとして下水道事業がある。日本の下水道の普及率は、イギリスの96% (1980年)、アメリカの71% (1980年) に対して、39% (1987年) にすぎない<sup>1), 2)</sup>

また、下水道事業の80%は管渠の築造であり、下水道管渠は公共路線の地下に埋設されるため、土地買収など無用な出費が少ないので、公共投資の対象事業として非常に有効である。また、内需喚起の一連の事業として、市街地の美観を目的とする電話、電力の地中線化も着々

と進められてきている。

このような都市でのトンネル工法には、①開削工法、②推進工法、③シールド工法がある。そのうち、推進工法は、他の2つの工法に比べて無公害で経済的であるから、その採用が急速に伸びてきている。

推進工法は地下水位低下工法、薬液注入工法などの補助工法を併用した人力掘削による刃口推進が主流を占めていたが、最近では地下水位低下工法による地表面の沈下、薬液による地下水の汚染などの公害を防ぐ立場から、泥水加圧式または泥土加圧式など機械推進が加速度的に採用されるようになってきた。

表一に示すように、昭和61年にはその施工延長は

表一 推進工法別発注延長の推移<sup>3)</sup>

工 法	年 度	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61
		刃口推進	元押 (km)	253	269	240	229	213	215	204	147
	中押 (km)	45	48	67	63	62	81	81	56	71	72
	合計 (km)	298	317	307	292	275	296	285	203	242	248
機械推進	(km)	38	54	56	56	73	107	101	135	180	224

\* 正会員 工博 南野建設(株)専務取締役  
(〒530 大阪市北区芝田2-2-1)

\*\* 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学科  
(〒606 京都市左京区吉田本町)

224 km におよび、管列の先頭に鋼製刃口を取り付け、切羽を人力で掘削する刃口推進の 248 km に匹敵するようになった。今後も切羽安定のための地盤改良を必要としない機械推進はますます増加していくものと考えられる。

機械推進の場合は、地盤の改良を必要としないので、推進時の地山は土質柱状図どおりの性状であり、切羽の掘削は機械掘りのため、人力掘削の場合のような余掘りがなく、画一的な掘進ができる。著者らはこの点に着目し、366 件の機械推進の工事例から埋設管周辺土の標準貫入試験  $N$  値と実推力との相関について解析した。その結果、非常に実効性の高い推力算定式を導きだすことができた。

## 2. 従来の推力算定式とその問題点

推進工法における所要推力の算定式として代表的なものは、次に示す日本下水道協会の算定式<sup>4)~6)</sup>である。

$$F = F_0 + F_1 + F_2 + F_3 \dots \dots \dots (1)$$

上式を説明すると、

### ① 初期抵抗 ( $F_0$ )

初期抵抗  $F_0$  は管の先端における貫入抵抗を表わし、次の経験式を用いている。

$$F_0 = 4.14 B_c N$$

ただし、 $B_c$ ：管外径 (m)、 $N$ ：埋設管周辺土の標準貫入試験  $N$  値

### ② 推進管外周面における荷重 (活荷重, 死荷重) による摩擦抵抗 ( $F_1$ )

$$F_1 = \pi B_c q \mu' L$$

ただし、 $q$ ：管にかかる等分布荷重 ( $\text{tf/m}^2$ )、 $\mu'$ ：管と土との摩擦係数  $= \tan(\phi/2)$ 、 $\phi$ ：土の内部摩擦角、 $L$ ：推進延長 (m)

### ③ 推進管の自重による摩擦抵抗 ( $F_2$ )

$$F_2 = W \mu' L$$

ただし、 $W$ ：管の自重 ( $\text{tf/m}$ )

### ④ 推進管外周面に働く管と土との付着抵抗 ( $F_3$ )

$$F_3 = \pi B_c c' L$$

ただし、 $c'$ ：管と土との付着力 ( $\text{tf/m}^2$ ) の 4 つの要因からなっている。この算定式に対する修正式もその後提案されているが、所要推力の構成要因に対する考え方は全く同じである。また、機械推進の普及によって、初期抵抗 ( $F_0$ ) に対する修正提案も出ているが長距離推進の場合  $F_0$  の全推力に対する影響は小さいので、本稿では考察の対象としていない。

上記算定式に示された 4 つの推力構成要因のうち、最も大きな要因であり、かつ、問題のあるのは、②の推進管外周面にかかる荷重による摩擦抵抗  $F_1 = \pi B_c q \mu' L$  である。 $q$  は管にかかる等分布荷重であり、活荷重  $p$  と

鉛直土圧 (死荷重)  $\sigma_v$  とからなっている。活荷重  $p$  は自動車荷重または列車荷重で一過性のものであり、かつ、相当の土被りがあれば土中に拡散して、管の上載荷重としての影響は非常に小さい。問題は鉛直土圧  $\sigma_v$  の算出法にある。この算定式では鉛直土圧  $\sigma_v$  はテルツァギーの土圧公式より求めるとしている。テルツァギーの土圧公式は次のとおりである<sup>7)</sup>。

$$\sigma_v = \frac{B(\gamma_s - 2c/B)}{2K_a \tan \phi} (1 - e^{-2K_a \tan \phi \cdot Z/B})$$

ただし、 $\gamma_s$ ：土の単位体積重量 ( $\text{tf/m}^3$ )、 $B$ ：管上部の土のゆるみ幅 (m)

$$B = B_c \frac{1 + \sin(45^\circ - \phi/2)}{\cos(45^\circ - \phi/2)}$$

$$B_s = B_c + 0.1$$

$B_c$ ：管外径 (m)、 $\phi$ ：土の内部摩擦角 ( $^\circ$ )、 $K_a$ ：主働土圧係数  $K_a = \tan^2(45^\circ - \phi/2)$ 、 $\tan \phi$ ：土の内部摩擦係数、 $c$ ：土の粘着力 ( $\text{tf/m}^2$ )、 $Z$ ：土被り (m)

ここで、鉛直土圧  $\sigma_v$  の算出にあたっての問題点を挙げると、

1) この式は単一地層の土圧公式である。推進管上部の土被りは多段地層よりなる場合が多い。その場合は、多段地層の土圧公式<sup>8)</sup>で鉛直土圧  $\sigma_v$  は求められなければならない。

2) この公式にインプットされる  $\gamma_s$ 、 $c$ 、 $\phi$  などの数値は、土質柱状図などの性状から推測された推定値である。

3) 補助工法により地山の改良が行われた場合、地山の性状が全く変わる。すなわち、地下水位の低下によって、地山が締まり、内部摩擦角が大きくなって地山を支持する摩擦抵抗が増加し、さらに、土粒子間の表面張力による見掛けの粘着力が発生する。また、薬液注入による地山の改良によって地山自体の強度の増加など、土質柱状図で与えられた、元の地山と性状が全く変わっている現状をつかまえないままで、適切でない数値をこの土圧公式にインプットしている。

以上、土圧公式による鉛直土圧  $\sigma_v$  の算出に対する問題を挙げたが、いま 1 つの問題は、管と土との摩擦係数  $\mu'$  の取り扱いである。

1) この算定式では  $\mu' = \tan \delta = \tan(\phi/2)$  としている。J. G. Potyondy<sup>9)</sup> の滑らかなコンクリート表面と土との一面せん断試験によれば、砂の  $\delta$  と  $\phi$  の比は、 $\phi$  と無関係でほぼ 0.9 前後となったと報告されている。また、佐藤らの実験結果<sup>10)</sup>によれば、 $\delta/\phi$  は 0.5~0.9 となっている。これらのデータから判断すると、 $\delta = \phi/2$  とするのは  $\delta$  を過小評価をしていることになる。

2) また、最近、潤滑材の活用によって、管と土との摩擦係数が著しく軽減することが報告されている。た

たとえば、ベントナイトを潤滑材として使用した場合、H. Lorenz が 32%<sup>11)</sup>、L. Ebner が 44%<sup>12)</sup>、W. Lächer が 30%<sup>13)</sup>、M. Scherle が 50%<sup>14)</sup>、竹下が 20%<sup>15)</sup>、それぞれ減らすことができると述べている。

さらに、切羽の地山が自立開放されている場合は、切羽の外周よりもやや大きめに掘削される傾向があり、そのため、推進管の全周面で管と土との摩擦抵抗が発生しているとは考えられない場合もある。特に硬粘土の場合にこの現象が起こる。以上、述べたように、実推力と算定推力との大きな差異の生じる主な原因は

- ① 地下水位低下による摩擦抵抗および見掛けの粘着力の増加
- ② 薬液注入による地山の強度の増加
- ③ 摩擦係数の採り方
- ④ 切羽の掘削加減による推進管と土との周面摩擦範囲の増減

などにあると思われる。

しかし、これらの原因は個々に発生するものではなく、推進時、同時に発生するものであるから、推力の増減の原因を個々に分析することは非常に困難である。したがって、これら複数の原因が推力に与える影響を的確に解析できず今日に至っている。

### 3. 協会算定式による算定値と実推力との比較

2. で述べたように、従来の所要推力の算定式のうち代表的なものは日本下水道協会の算定式である。表—2 は 366 件の機械推進の工事例のうち数例を取り上げて、

この算定式で算定した所要推力と実推力とを比較したものである。ちなみに、表—2 の算定式で求められた所要推力およびその算定要因  $\gamma$ 、 $\phi$ 、 $c$  はそれぞれ、担当現場技術者が作成した施工計画書から引用したものである。この数例の所要推力算定例をみても、各現場の担当技術者が、土質柱状図などで与えられた土の性状から、 $\gamma$ 、 $\phi$ 、 $c$  をどのように推定しているか、また、その結果、設計段階で算定された所要推力が実推力と甚だしく乖離していることがよくわかる。

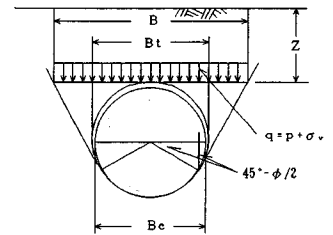
このような設計所要推力と実推力との著しい乖離は、潤滑剤の使用などによる管と土との減摩効果によるものとして一般に説明されている。すなわち、協会算定式による所要推力の算定は、その実用性からみて全く形骸化されたものとなっている。

### 4. 著者らによる N 値に基づく推力算定式

2. で考察したように、推進工法の所要推力を理論式で求めることはいろいろの問題がある。そこで、これまでの工事例から帰納的に推力算定式が求められないか、というのが永年の課題であった。そのためには、現地盤の N 値と推力との相関性を求めるのが最も現実的で説得力がある。しかし、帰納的な結論は 10 や 20 の工事例では導きだせない。少なくとも数百の工事例を必要とする。また、補助工法による地山の改良、切羽の拡幅掘削によって、標準貫入試験で N 値を求めたときの地山と著しく性状が変わっていたり、管と土との接触範囲に差異があったりすると、N 値と推力の的確な相関性は求

表—2 日本下水道協会の算定式による算定推力と実推力の比較表 (工事例は機械推進)

工事番号	日本下水道協会提案式								実推力		
	$F_r = F_a + \{(\pi \cdot B_e \cdot q + W) \mu' + \pi \cdot B_e \cdot c'\} L$								$F_a$	$F_r / F_a$	
	土質	$\gamma$	$\phi$	$c$	N	管外径 $B_e$	土被り Z	推進延長 L			算定推力 $F_r$
	$tf/m^2$		$tf/m^2$		m	m	m	tf			
1	細砂	1.80	30	0.0	4	1.60	4.70	170.28	1738	660	2.63
14	細砂	1.80	30	0.3	8	1.43	3.80	140.30	1036	550	1.88
202	シルト 混砂	1.70	30	0.3	10	3.50	8.50	244.00	9359	2560	3.66
211	細砂	1.80	30	0.3	10	1.60	6.50	138.50	1540	645	2.34
329	硬混砂	1.80	30	0.5	15	1.60	8.70	182.95	2635	570	4.62



【備考】  $\gamma$  : 土の単位体積重量 ( $tf/m^2$ )、 $\phi$  : 土の内部摩擦角、 $c$  : 土の粘着力 ( $tf/m^2$ )、N : 埋設管周辺土の標準貫入試験 N 値  
 $\mu' = \tan(\phi/2)$  : 管と土の摩擦係数、 $q = p + \sigma_v$  : 管にかかる等分布荷重 ( $tf/m^2$ )、 $p = 3.78 / (0.1 \cdot Z)$  : 活荷重 ( $tf/m^2$ )  
 $\sigma_v = \frac{B(\gamma - 2c/B)}{2K_a \cdot \tan \phi} (1 - e^{-2K_a \cdot \gamma \cdot Z / B})$  : テルツァギーの土圧公式による鉛直土圧 ( $tf/m^2$ )  
 $B = B_e \cdot \frac{1 + \sin(45^\circ - \phi/2)}{\cos(45^\circ - \phi/2)}$  : 管天端の土のゆるみ巾 (m)  
 $t_e = B_e + 0.1$  (m)  
 $F_a = 1.32 \cdot \pi \cdot B_e \cdot N$  : 初期抵抗 (tf)  
 $c'$  : 管と土の付着力 ( $tf/m^2$ )  
 Z : 土被り  
 $K_a = \tan^2(45^\circ - \phi/2)$  : 主動土圧係数  
 W : 管の自重 (tf)

められない。

しかし、機械推進の普及が推進工法の施工状態を大きく変えた。機械推進工法は、泥水圧、泥土圧などによって、切羽の崩壊土圧とバランスさせながら、切羽の土砂をカッターで切削して推進するため、補助工法による地山の改良を必要とせず、地山は現状のままであり、かつ、管と土の接触度合いも人力掘削の場合と異なり均一である。すなわち、土質柱状図に与えられた  $N$  値と推力との相関度が、きわめて高い状態となっている。著者らはこの点に着目し、6年間にわたる366件の機械推進の工事例から埋設管周辺土の平均  $N$  値と推進管列の到達坑へ到着時の推力との相関性を調べ、 $N$  値よりただちに推力を求める推力算定式を帰納的に導きだした。したがって、この算定式は理論式ではなく、次の2つの施工条件のもとで導きだされた帰納的算定式である。

1) 適切な施工管理のもとで施工された機械推進工法である。

2) 推進時十分な滑材注入が行われている。

(1) 工事例による  $N$  値と推力の相関度

昭和56年度から昭和62年度にわたって、関東、関西、中国、中部、東北、九州の諸地域で施工された366件の機械推進の施工例を取り上げて解析した。

推力と  $N$  値の相関度は、各工事の推力 ( $F$ ) を管外径 ( $B_c$ ) と推進延長 ( $L$ ) で除して、管外径と推進延長にかかわりのない単位推力を求め、単位推力を管周辺土の  $N$  値で除した数値 (以後推力換算係数  $k$  とよぶ)。

$$k = \frac{F}{B_c N L} \quad (\text{tf/m}^2) \dots \dots \dots (2)$$

を  $N$  値別に分類し、その近似性から判別することができる。ただし、 $N$  値が1より小さいときは  $N=1$  とし計算している。

(2)  $N$  値と推力換算係数 ( $k$ ) の相関表と相関曲線

366件の機械推進の工事例から解析された  $N$  値と推力換算係数 ( $k$ ) を  $N$  値ごとに分類し、階級値別に度数を求めて、度数の高いものの加重平均値を算出した(表-3参照)。その加重平均値をプロットすると、図-1のような  $N$  値と推力換算係数 ( $k$ ) の相関曲線が求まる。

(3)  $N$  値に基づく推力算定式

所要推力 ( $F$ ) は、初期抵抗 ( $F_0$ ) と管と土との周面摩擦抵抗 ( $F_1$ ) とからなると考えると、

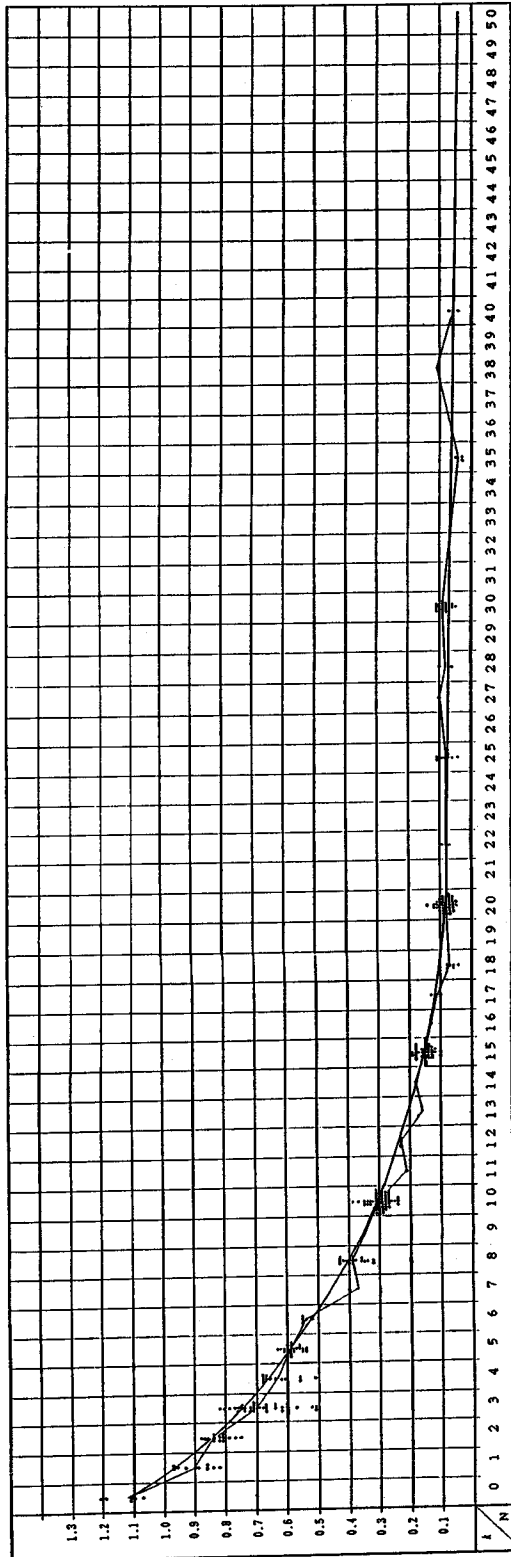
$$F = F_0 + F_1 \dots \dots \dots (3)$$

となる。

しかし、機械推進の場合は概して推進延長が長く、初期抵抗の全推力に対する影響は少ないので、今回の解析では、初期抵抗を含む全推力と  $N$  値との相関性から  $k$  値を求め、 $F_0$  については特に考察していない。したがって、初期抵抗 ( $F_0$ ) は安全側にできる加算推力として、

表-3 推力換算係数 ( $k$ ) の平均値および標準偏差

N値	kの階級値	度数	平均値	加重平均値	標準偏差	
0	0.7~0.8	1	0.704			
	0.8~0.9	0				
	0.9~1.0	0				
	1.0~1.1	2	1.075	*	0.046	
	1.1~1.2	3	1.114	* 1.118		
1.2~1.3	1	1.213	*			
1	0.8~0.9	5	0.854	*		0.046
	0.9~1.0	5	0.945	* 0.900		
2	0.3~0.4	1	0.354			
	0.4~0.5	0				
	0.5~0.6	0				
	0.6~0.7	0				
	0.7~0.8	3	0.767			
3	0.8~0.9	11	0.834	*	0.084	
	0.3~0.4	2	0.335			
	0.4~0.5	0				
	0.5~0.6	4	0.526			
	0.6~0.7	14	0.640	*		
4	0.7~0.8	14	0.736	*	0.050	
	0.8~0.9	3	0.836	*		
	0.5~0.6	3	0.541	*		
	0.6~0.7	9	0.656	* 0.627		
5	0.5~0.6	18	0.575	*	0.027	
	0.6~0.7	8	0.634	* 0.593		
6	0.2~0.3	2	0.274		0.073	
	0.3~0.4	0				
	0.4~0.5	1	0.465			
	0.5~0.6	5	0.541	* 0.541		
7	0.2~0.3	1	0.298		0.021	
	0.3~0.4	4	0.336	*		
	0.4~0.5	0				
	0.5~0.6	1	0.518	*		
8	0.1~0.2	2	0.188		0.041	
	0.2~0.3	2	0.228			
	0.3~0.4	11	0.362	*		
	0.4~0.5	6	0.421	* 0.390		
	0.5~0.6	1	0.518	*		
10	0.1~0.2	2	0.128		0.021	
	0.2~0.3	31	0.277	*		
	0.3~0.4	27	0.319	* 0.297		
11	0.2~0.3	1	0.212	*	0.212	
	0.1~0.2	2	0.175			
12	0.2~0.3	4	0.225	*	0.225	
	0.1~0.2	4	0.156	* 0.156		
13	0.1~0.2	1	0.180	* 0.180		
14	0.1~0.2	4	0.156	* 0.156	0.148	
	0.2~0.3	1	0.280			
15	0.0~0.1	1	0.082		0.128	
	0.1~0.2	5	0.128	* 0.128		
16	0.1~0.2	3	0.113	* 0.113	0.067	
	0.0~0.1	6	0.067	* 0.067		
17	0.0~0.1	35	0.077	* 0.083	0.014	
	0.1~0.2	6	0.117	*		
18	0.0~0.1	2	0.080	* 0.080	0.017	
	0.0~0.1	6	0.069	* 0.079		
19	0.1~0.2	2	0.109	*	0.100	
	0.1~0.2	1	0.100	* 0.100		
20	0.0~0.1	2	0.078	* 0.078	0.012	
	0.0~0.1	13	0.079	* 0.087		
21	0.1~0.2	5	0.106	*	0.038	
	0.0~0.1	3	0.038	* 0.038		
22	0.1~0.2	1	0.110	* 0.110	0.055	
	0.0~0.1	2	0.055	* 0.055		
23	0.0~0.03	7	0.016	*	0.020	
	0.03~0.05	4	0.040	* 0.035		
	0.05~0.10	4	0.065	*		
	0.10~0.20	1	0.154	*		



図一 機械推進 366 件の N 値と推力換算係数 (k) との相関分布と k 値の加重平均値曲線 (各 N 値の加重平均値は表一3の\*印のものを対象として算出されている)

表一4 N 値に基づく算定式による算定推力と実推力の比較表 (工事例は機械推進)

工事番号	土質	N 値に基づく算定式 $F = (4.14 + k \cdot L) \cdot B_c \cdot N$					実推力	
		N	推力換算係数 k	管外径 B <sub>c</sub>	推進延長 L	算定推力 F	F <sub>a</sub>	F/F <sub>a</sub>
		tf/m <sup>2</sup>		m	m	tf	tf	
1	細砂	4	0.83	1.80	170.28	713	660	1.08
14	細砂	8	0.39	1.48	140.30	673	550	1.22
202	シルト 混砂	10	0.30	3.50	244.00	2707	2560	1.06
211	細砂	10	0.30	1.80	188.50	731	645	1.13
329	粗混砂	15	0.15	1.80	182.95	758	570	1.33

日本下水道協会の算定式の初期抵抗

$$F_0 = 4.14 B_c N \dots\dots\dots (4)$$

を採用している。

次に、管と土の周面摩擦抵抗 (F<sub>1</sub>) は、次のように求められる。

$$F_1 = k B_c N L \dots\dots\dots (5)$$

したがって、N 値による推力算定式は、次のようにまとめることができる。

$$F = (4.14 + kL) B_c N \dots\dots\dots (6)$$

ただし、k: 推力換算係数 (tf/m<sup>2</sup>) (表一3 または 図一1 参照), B<sub>c</sub>: 管外径 (m), N: 管周辺土の標準貫入試験 N 値, L: 推進延長 (m)

(4) N 値に基づく算定式による算定推力と実推力との比較

表一4 では、表一2 で取り上げた工事例の所要推力を、著者らの提案している N 値に基づく帰納的算定式で求め、実推力と比較している。当然のことながら表一2 の数値と比較すれば、その精度ははるかに高い。

5. 結 論

推進工法において、推力の算定式として一般に用いられているのは、日本下水道協会から提案された算定式である。しかし、この算定式により算定された所要推力は実推力と大きくかけはなれた数値となることが多かった。

著者らはこの算定式による推力算定の問題点を指摘し、現場技術者が常に手にする土質柱状図の N 値から推力を求める方がより現実的で確実かつ簡便であるとの見地から、1) 適切な施工管理のもとで、2) 推進時十分な潤滑材の注入が行われている、366 件の機械推進の工事現場の N 値と実推力との相関性を解析した。その結果帰納的結論として、N 値と実推力との間にきわめて相関度の高い係数を導きだすことができた。著者らはこの係数を推力換算係数と名付け、N 値による確度の

高い推力算定式を提案している。

参 考 文 献

- 1) 下水道年鑑：水道産業新聞社，p. 118，昭和 62 年 7 月 20 日。
- 2) 石川和英：月刊下水道，Vol. 11，No. 9，環境公害新聞，p. 4，昭和 63 年 8 月。
- 3) 同上，p. 6。
- 4) 日本下水道協会：下水道推進工法の指針と解説，pp. 99～100，昭和 59 年 5 月。
- 5) 同上，pp. 92～94。
- 6) 南野輝久：推進工法の設計と施工，森北出版，pp. 77～85，1985 年 10 月。
- 7) 日本下水道協会：下水道推進工法の指針と解説，pp. 92～94，昭和 59 年 5 月。
- 8) 南野輝久：推進工法の設計と施工，森北出版，pp. 85～89，1985 年 10 月。
- 9) Potyondy, J. G. : Skin Friction between Various Soil and Construction Materials, Géotechnique 11, No. 4, Dec. 1961.
- 10) 佐藤孝之・渋谷昌志：砂とコンクリート面間の摩擦抵抗に関する実験的研究，第 16 回土質工学研究発表会，1981。
- 11) Lorenz, H. : Senkkastengrundung mit Reibungsverminderung durch thixotrope Flüssigkeiten, Die Bautechnik, 34 Jahrgang, Heft 7, pp. 250～253, Juli 1957.
- 12) Ebner, L. : Durchpressungenein zweckmässiges Arbeitsverfahren in Tiefbau, Tiefbau, pp. 185～200, März 1970.
- 13) Lächer, W. : Einfluß von Bentonitschmierung, Tiefbau, pp. 612～622, September 1981.
- 14) Scherle, M. : Technik und Anwendungsgrundsätze des Rohrvortriebes, Baumaschine und Bautechnik, 18 Jahrgang, Heft 4, pp. 145～157, April 1978.
- 15) 竹下貞雄：中掘式推進工法における推力と切削トルクに関する土質工学的研究，鉄道技術研究所，p. 52，1985 年 3 月。

(1988. 10. 17・受付)