

## 中掘り式推進工法におけるカッタートルクの推定法

ESTIMATION OF THE CUTTER TORQUE IN PIPE JACKING WITH  
INNER EXCAVATION SYSTEM

竹下 貞雄\*

By Sadao TAKESHITA

Japanese National Railways developed a new pipe jacking method for constructing an underpass across the railway embankment in 1976. But in earlier stage of its application, the excavation system could not penetrate the gravelly ground and in the worst case, even the cutter arm was broken. This compelled us to estimate the necessary cutter torque from the characteristics of the ground for a rational redesigning of the excavation system.

## 1. ま え が き

昭和51年に国鉄は石川島播磨重工業KKと共同で推進工法による線路下横断構造物施工法(以下URT工法という)を開発した。しかし、本工法の掘削機の掘削試験を鉄道技術研究所の構内の自然地盤を用いて実施したところ、ローム層では問題がなかったが、砂礫層では掘削機のアームが折損するという事故があったので改良を行った。

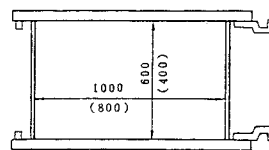
本報告の目的は掘削機の合理的な設計のために必要な切削トルクを推定する方法を提案するものである。

## 2. 掘削機の構造

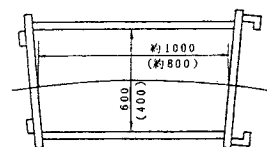
URT工法は図-1に示すような鋼製の箱を地中に順々に推進して、図-2に示すような地下構造物を建設する工法である<sup>1)</sup>。したがって、エレメントの両側面の上下には継手がある。また、矩形断面は図-2の下路桁タイプと箱形タイプに、台形断面は図-2のトンネルタイプに用いられる。エレメントの寸法は400mm×800mmと600mm×1000mmの2種類あり、一般的には前者を使用するが、地盤内に玉石などがあって人力掘削が

予想されるところでは後者を使用するようにしている。

このエレメントを推進するのに用いる掘削機が図-3に示してある。エレメントの断面が普通の円形パイプと異なっており、矩形、または、台形であるために掘削機は左

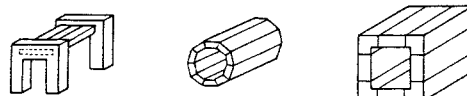


矩形断面



台形断面

図-1 エレメント断面図



(a) 下路桁タイプ (b) トンネルタイプ (c) 箱形タイプ

図-2 URT工法の構造形式

\* 正会員 工博 鉄道技術研究所主幹研究員  
(〒185 国分寺市光町 2-8-38)

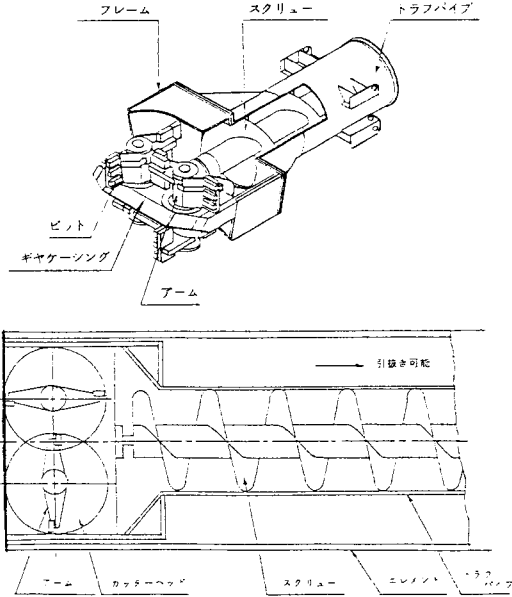


図-3 掘削機

右の2つの回転軸に2基のアームをもち、その先端に2〜3個のビットがついている。さらに、このアームはギヤケーシングをはさんで上段と下段との2か所にある。ギヤケーシングの中にはウォームホイールが内蔵され、これは後方の推進機の油圧モーターによりスクリー軸内の駆動軸を介して回転する。

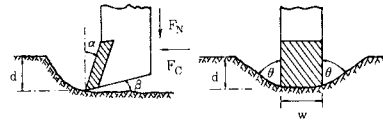
アームは左右のものが互いに抱き込むように回転しながら、切羽を削り、後続のスクリーによりずりを後方へ搬出する。ビットの断面は4 cm×3.5 cm、長さが8 cmの直方体でアームの先端に2本のボルトで固定されている。アームの回転数は20 rev/min、推進速度は一般に40 mm/minであるから、ビットが1回転して切削する深さは2 mmに過ぎない。これは余掘りによる路盤陥没を防ぎ、列車走行の安全を考えたためであり、むしろ、ビットの前面で切羽を摩擦しながら切削するような構造になっている。

### 3. 切削トルクの推定法

#### (1) 在来の方と問題点

切削トルクというのは掘削機が切羽を切削するのに要するトルクであり、これは切削力から決まる。畠<sup>2)</sup>やドムブローフスキー<sup>3)</sup>らは切削力がビットの幅や切削深さ、ビットと土との摩擦角などに関係すると述べている。しかし、畠の式は深い掘削の場合であり、ドムブローフスキーの式はビットの先端がナイフのように鋭くとなっている場合を考えている。

ロックスポロー<sup>4)</sup>はURT工法と同じような直方体の



$\alpha$  : すくい角  $\theta$  : 破砕角  
 $\beta$  : 逃げ角  $w$  : ビットの幅  
 $d$  : 切削深さ

図-4 切削図

ビットを用いて(図-4)チャートの掘削試験を実施し、押し圧  $F_N$  に対する切削力  $F_C$  の比率、これを切削力比とすれば、この値が1.0より大きいことを明らかにし、普通の摩擦現象とは異なることを示した。しかし、この試験も切削深さがURTの場合の2 mmに比べて20 mm以上と大きく、したがって、URT工法の切削力を求めるのにこの考えをそのまま用いることは問題があると思われる。

#### (2) 新しい提案式

URT工法の掘削機の切削トルクを求めるのにあたって、上記の研究成果をもとに、次の仮説を設けた。

a) 推力  $F$  (kN) は次式で示される<sup>5)</sup> :

$$F = 1400 \cdot A \cdot \zeta \cdot q_{bc}^{0.352} + 24.8 \cdot \lambda \cdot L \cdot s \cdot q_{bc}^{0.473} + \gamma \dots (1)$$

ただし、 $A$  は掘削機先端の断面積 ( $m^2$ )、 $\zeta$  は閉塞率といい、掘削機先端の断面積に対する非掘削部分の面積の比率で、カッターの回転部分は掘削面積とし、また、非掘削部分のうち、ギヤケーシングの面積は先端がとがっているので1/2.6倍する<sup>5)</sup>、 $q_{bc}$  はオランダ式二重管コーンによる地盤の強度 (MPa)、 $\lambda$  は最大推力点比といい、全推進長に対する発進立坑から最大推力発生点までの距離の比率、 $L$  は全推進長 (m)、 $s$  はエレメントの周長 (m)、 $\gamma$  は推進機の固有抵抗 (kN) である。

なお、この式の右辺の第1項は先端抵抗、第2項は周辺抵抗を示している。

b) 先端抵抗はエレメントやフレームの先端、ギヤケーシング先端および掘削機のビットの接地部分とで分担される。また、その分担比率はそれぞれの面積比率で表わされる。

c) 掘削機のビットにかかる推力はビットの接地面積に比例する。したがって、切削力も面積に比例する。

d) 掘削機の切削トルクは機械自身の固有抵抗によるトルクと切削力によるトルクとの和で示される。

このうち、a) についてはすでに報告済みであり<sup>5)</sup>、b)、c) についてはこのように考えても一般性を失わないと考えたものであり、d) はこの種の機械では固有抵抗が無視できないことによるものである。

まず、推力  $F$  (kN) は次式で示される :

$$F = \chi \cdot (p_1 - a) \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 $\chi$  は推力の油圧の値 (MPa) を推力の値 (kN)

に換算する係数、 $p_1$  は掘削機の先端が切羽に触れたときの推力を示す油圧 (MPa)、 $a$  は推進機自身の推力に関する固有抵抗を示す油圧 (MPa) である。

したがって、仮説の b) からビットが切羽を押す力  $P$  は、 $\xi$  をビットに作用する推力の分担率とすれば、

$$P = F \cdot \xi = \xi \cdot \chi \cdot (p_1 - a) \dots\dots\dots (3)$$

で示される。

一方、掘削機の切削トルク  $T$  (kN・m) と掘削機の油圧  $p_2$  (MPa) の間には次の関係がある：

$$T = \nu \cdot (p_2 - b) \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $\nu$  は掘削機の油圧の値 (MPa) を切削トルク (kN・m) に換算する係数、 $p_2$  は掘削機の先端が切羽に触れたときの切削トルクの油圧 (MPa)、 $b$  は切削トルクに関する掘削機自身の固有抵抗を示す油圧 (MPa) である。

したがって、アームの回転軸中心からビットの先端までの長さを  $r$  (m) とすれば、ビット先端に作用する切削力  $f$  (kN) は図-5 から：

$$f = T / r = \nu \cdot (p_2 - b) / r \dots\dots\dots (5)$$

また、切羽とビットの間に作用する推力  $P$  と切削力  $f$  との比率を  $\mu$  とすれば、

$$\mu \cdot P = f \dots\dots\dots (6)$$

なる関係があるので、この式に上の式 (3)、(5) を代入すると、

$$\mu = \nu \cdot (p_2 - b) / \xi \cdot \chi \cdot (p_1 - a) \cdot r \dots\dots\dots (7)$$

したがって、いろいろな地盤における実測から、切削力比  $\mu$  の値を求めれば、次の式から切削に必要なトルク  $T$  を推定することができる：

$$T = F \cdot \xi \cdot \mu \cdot r + \nu \cdot b \dots\dots\dots (8)$$

この式の右辺の第 1 項の  $F$  は推力の式 (1) の右辺第 1 項の先端抵抗を示す式でも表わされるから、これを代入すると次のように示すこともできる：

$$T = 1400 \cdot A \cdot \zeta \cdot q_{bc}^{0.352} \cdot \xi \cdot \mu \cdot r + \nu \cdot b \dots\dots\dots (9)$$

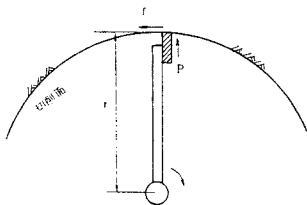


図-5 切削面に働く力

表-1 係数表

機種	係数		r の値		機種	係数	
	単位	単位	単位	単位		単位	単位
I	0.5	2.5	6.67	0.648	400×800	0.215	
II	0.5	3.0	6.67	0.648	600×1000	0.290	
III	1.5	5.0	15.20	0.745			

これらの式の中で、 $a$ 、 $b$ 、 $\chi$ 、 $\nu$  の値については、工場での試験運転から URT 用推進機の 3 つの種類について表-1 のような値が得られており、 $r$  についてもエレメントの寸法に応じて若干変化するが、表-1 にその一例を示した。

次に、推力のうちビットが負担する割合を示す分担率  $\xi$  については、仮説の b) から切羽に接する各部の断面積から求めるが、図-3 に示したようにギヤケーシングは先端がくさび状にとがっているのに対し、他は全部平面になっている。したがって掘削中の単位面積当たりの面圧が異なるはずである。これについて実際にこれらの模型を作り、地盤内に推進して推力を測定したところ、くさび型の方が単位面積当たりの面圧が平板型のそれに比べて約 1/2.6 に相当することが判明した<sup>5)</sup>。

以上のことから、いまエレメントとフレームの断面積を  $A_e$ 、ビットの断面積を  $A_b$ 、ギヤケーシングの断面積を  $A_g$  とすれば、分担率  $\xi$  は次の式で示されることになる：

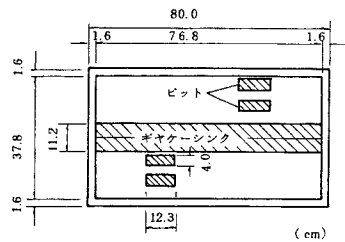
$$\xi = A_b / (A_e + A_b + A_g / 2.6) \dots\dots\dots (10)$$

この式を用いてたとえば図-6 の場合の 2 つのエレメントについて  $\xi$  の値を求めると、

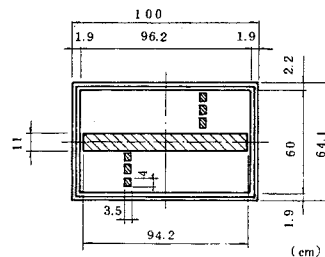
(a) について、 $\xi = 0.218$

(b) について、 $\xi = 0.075$

となる。ただし、(a) の場合は改良前の掘削機であり、掘削機はエレメントの先端に溶接されていたために、断面は掘削機のフレームのみがみえ、また、ビットの寸法も 12.3 cm×4 cm と大きくなっている。一方、(b) の場合は掘削機がエレメントの中をスライドできるように



(a) 400×800 のエレメント



(b) 600×1000 のエレメント

図-6 掘削機の先端図

表-2 実測から求めた切削力比の値

細粒土				粗粒土			
工事名	推進機	$\xi$	$\mu$	工事名	推進機	$\xi$	$\mu$
土 浦	I 型	0.218	1.105	大 宮	II 型	0.0571 0.0591	0.468
掛 川	I 型	0.0619	0.844	竜 巻 湖	I 型	0.0697	0.620
笠 田	I 型	0.0714	1.393	弘 前	II 型	0.0559 0.0738	0.406
鈴木島 (削壁)	II 型	0.0585	1.012	名取川	I 型	0.0521	0.392
鈴木島 (上床)	I 型	0.0663	0.847	平均値			0.470
香 椎	II 型	0.0704 0.0730 0.0750	0.572	注：細粒土、粗粒土の区分は、日本統一土質分類法によるものとする。			
水尾川 (上床)	II 型	0.0539	1.157				
水尾川 (削壁)	II 型	0.0671	0.695				
藤	II 型	0.0733	0.627				
刈谷田川	III 型	0.0580	1.017				
平均値			0.927				

改良されたために断面もエレメントと掘削機のフレームの2つがみえている。

次に、掘削機の切削トルクを求める式(9)の中で決めるべき値は切削力比  $\mu$  である。これについては過去の14か所の工事について各エレメントを推進したときの切削トルク用油圧と推力用油圧の実測値から式(7)を用いて求めた。それを各工事ごとの平均値を土質別に示すと表-2のようになった。

この表で1つの工事で  $\xi$  の値が2つ以上あるのはエレメントの形状が2種類以上あるためであり、また、土質分類は現場の土質調査から得た粒度分布より日本統一分類に準拠して決めたものである。

この表から切削力比  $\mu$  は細粒土で大きく、粗粒土で小さいという傾向がうかがわれる。これは細粒土の場合は粘着があるために、ビットに付着して摩擦力を生じさせるのに対し、粗粒土の場合には粘着力がないためにビットに摩擦力が生ずるのが少ないためと判断される。

以上の結果から、 $\mu$  の値は細粒土で0.572から1.393、粗粒土で0.392から0.620となり、結局平均をとって細粒土については0.9、粗粒土については0.5を用いてよいと考えられた。

最後に、切削トルクの計算で無視できないものとしては掘削機の固有抵抗がある。しかも、これは推進長が大きくなるにつれて増加する性質をもっていることである。

これは掘削機の駆動軸が2mおきにつなぐ構造になっていることとスクリーとトラフパイプとの間に間隙があるためにたわむことから駆動軸が水平にならないことによるエネルギーの損失が生ずるためと考えられる。

この固有抵抗を調べるために、弘前駅の地下道建設に用いるURT III型の推進機を用いて、掘削機だけの場合、長さ2mの駆動軸1本と掘削機を連結した場合、駆動軸を2本連結した場合と順次軸数をふやし、最後に駆動

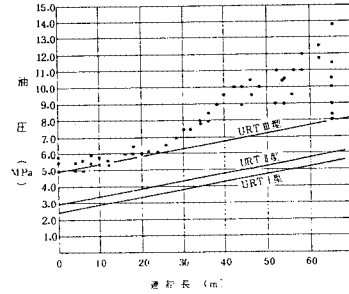


図-7 掘削機の固有抵抗と軸の連結長との関係

軸を63m(1本は長さが2m)連結してその先端に掘削機をつないだ場合のそれぞれについて切削トルクの固有抵抗の測定を実施した。

この結果を縦軸に切削トルクの油圧の読み、横軸に連結した駆動軸の長さとして示したのが図-7である。この図によると、掘削機だけのときの油圧は始めは5.8MPaを示したが、約20分回転させておくと5.0MPaにおちつくことがわかった。同様にして、24mまでの油圧は駆動軸と掘削機とを連結して30分経過したときの値である。また、26m以上についてはこの余裕をとらないで駆動軸を連結した直後に回転させて得た油圧を示している。したがって、この場合は24mまでのに比べて油圧の上昇が急である。これは機械内部のなじみによるものと思われる。

次に駆動軸を63m連結してその先端に掘削機を連結して回転したときは、当初は13.8MPaを示したが時間が経過するとともに油圧も減少し、3時間経過したときに8.0MPaにおちついた。

このことから接続する駆動軸の長さによって切削トルクの固有抵抗が変化することと正常に運転されているときの固有抵抗と駆動軸の連結長との間には直線で示すような関係があると推定された。また、URT III型より出力の小さいURT I型およびII型についても、駆動軸の直径、継手の構造などはIII型のそれとほとんど差がないので、連結長がゼロのときの掘削機の固有抵抗は表-1の  $b$  の値を用いることとし、これらの点からIII型の直線に平行にひいた2つの直線をもって、それぞれの固有抵抗と連結長との関係を示すことにした(図-7)。

#### 4. 実測との比較

式(9)に土質調査結果などの値を代入して得られた切削トルクと実測された切削トルクとを比較して、式(9)の実用性を検証する。

##### (1) 香椎駅暗梁

この工事は図-8に示すように、矩形および台形の断面の600mm×1000mmのエレメント9個を32m推進

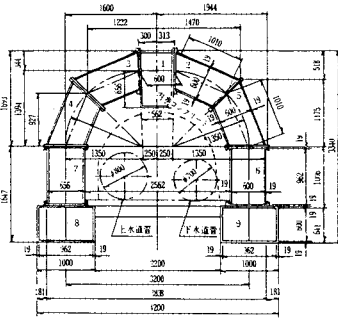


図-8 トンネル断面図 (香椎)

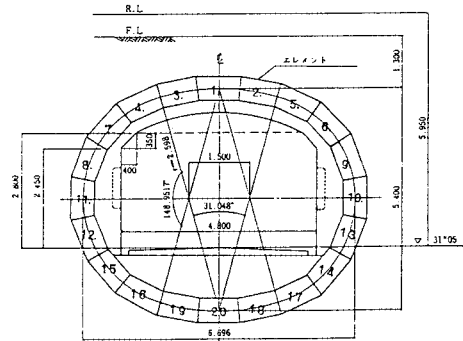


図-11 地下道断面図 (弘前)

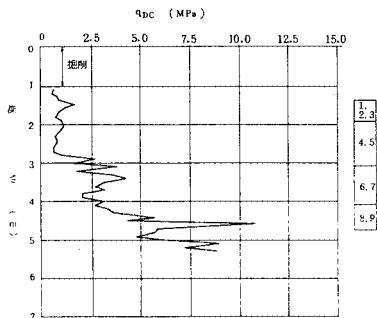


図-9 土質調査結果 (香椎)

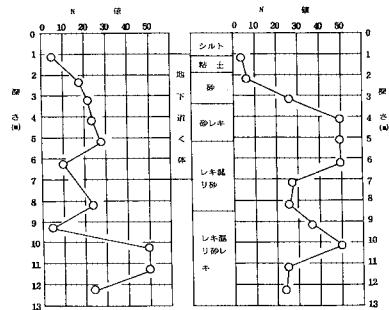


図-12 土質調査結果 (弘前)

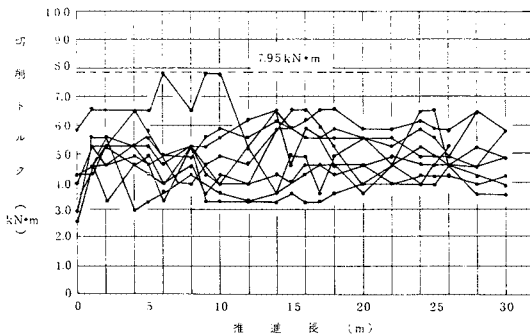


図-10 切削トルクと推進長との関係 (香椎)

して上下水道用の暗梁を線路の下に構築するものである。

オランダ式2重管コーンによる3本の土質調査結果の一例を図-9に示した。地盤の強度は深さ3mまでは1MPa前後であったが、深さが3mを超えると徐々にこの値が増加し、地盤強度の平均値の最大はエレメント8,9のところ5.83MPaであった。土質は表層がシルト、深部は腐った泥岩であった。

この推進工事において1mおきに9個のエレメントを推進したときの切削トルクの変化を縦軸に切削トルク、横軸に推進長をとって示したのが図-10である。これによると、大部分の値が3.0kN・mから7.0kN・m

の間に含まれ、かつ、推進長がふえるにつれて、わずかながら切削トルクも増加することがうかがえた。なお、最大切削トルクは7.78kN・mであった。

一方、式(9)によって切削トルクを求めてみると、 $q_{dc}$ の値をエレメントが推進される部分の平均最大値5.83MPa、断面積についてはここでは3種類のエレメントを用いているが、矩形断面で代表させることにすれば、 $A=0.641\text{ m}^2$ 、閉塞率 $\xi$ は0.162、アームの回転軸中心からビットの先端までの長さは表-1の値よりやや小さくて、 $r=0.276\text{ m}$ 、切削力比は土質が細粒土であるから $\mu=0.9$ 、ビットの推力分担率は表-2から $\xi=0.075$ 、 $\nu$ はURT II型を用いたので表-1から0.648、 $b$ は推進長が32mであるから図-7から約45MPaとすれば、これらの値を代入すると切削トルクは7.95kN・mとなった。

図-10にはこの値も点線で示してあり、この値は実測の値を十分にカバーしているため、この式により実測の切削トルクを安全に推定できることがわかる。

(2) 弘前駅地下道

この工事は図-11に示すように、20個のエレメントのうち19個の600mm×1000mmの台形エレメントを64.5m推進して地下道を駅構内に建設するものである。

土質調査結果の一例を図-12に示した。エレメント

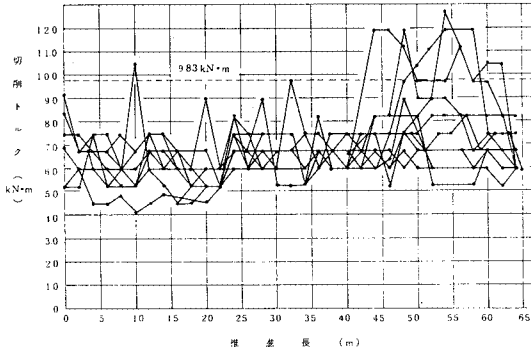


図-13 切削トルクと推進長との関係(弘前)

を推進する部分の土質は砂礫層が大部分で、この部分の5本の標準貫入試験による $N$ 値の平均最大値は32であった。

一方、図-13は本工事中において実測された切削トルクを縦軸に、推進長を横軸にとってプロットしたもので、特に、大きい値のみをプロットしたがほぼ $4\text{ kN}\cdot\text{m}$ から $9.0\text{ kN}\cdot\text{m}$ の間にはさまれていることと推進長がふえるにつれてわずかながら切削トルクも増加することがわかる。なお、最大切削トルクは $12.67\text{ kN}\cdot\text{m}$ となったが、これらは掘削機が鋼製の注入管を衝撃して生じたものである。

また、式(9)を用いて切削トルクを求めてみると、断面積は2種類のエレメントを用いているが大差はないので、図-11のNo.10エレメントで代表させると $A=0.612\text{ m}^2$ 、閉塞率 $\xi=0.232$ 、 $q_{bc}$ の値としては最大値 $19.2\text{ MPa}$ (土質調査の結果、最大平均 $N$ 値が32、また、礫層であるからSchmertmannの方法<sup>6)</sup>により $q_{bc}/N=6$ を用いた)、アームの回転軸中心からビット先端までの長さ $r=0.246\text{ m}$ 、ビットの推力分担率 $\xi=0.0559$ (表-2)、土質は粗粒土であるから切削力比 $\mu=0.5$ 、 $\nu$ はURTⅢ型を用いたので表-1から $0.745$ 、 $b$ は推進長が $64.5\text{ m}$ であるから図-7から約 $8.0\text{ MPa}$ となるの

で、これらの値を代入すれば、 $T=9.83\text{ kN}\cdot\text{m}$ が得られる。

この値も図-13に点線で示した。この点線と実測のグラフとを比較すると、 $45\text{ m}$ 以降での異常値を除き計算値が実測値を安全にカバーすることがわかる。なお、この異常値は、図-11において、No.10, 11, 12および13のエレメントを推進したときに測定された値であり、調査の結果、あらかじめ施工された止水壁に接近して推進されたために、正しく鉛直に入っていない鋼製の注入管を衝撃したためと判明した。

## 5. あとがき

URT工法での心臓ともいべき掘削機の切削トルクをいろいろな因子から推定する方法を述べた。礫層や玉石層で推進工法を用いるといろいろなトラブルが生じやすい。このような場合にいろいろな対策を講ずるにあたって著者の方法が役立てば幸甚である。諸兄姉のご批判を仰ぎたい。

## 参考文献

- 1) 竹下貞雄：URT工法の開発，土木学会論文集，Ⅵ，第349号，pp.124~125，1984。
- 2) 畠昭治郎：土の掘削機構について，土と基礎・最近の工法，土質工学会，pp.1~18，1967。
- 3) 矢野信太郎：シールド工法，鹿島出版会，pp.104~112，1969。
- 4) Roxborough, F.F. and Rispin, A. : The mechanical cutting characteristics of the Lower Chalk, Tunnel and Tunnelling, Vol.5, No.4, pp.45~67, 1973.
- 5) 竹下貞雄：中掘り式推進工法における推力の推定とその低減対策，土木学会論文集，第364号/Ⅲ-4，pp.239~248，1985。
- 6) Schmertmann, J.H. : Static cone to compute static settlement over sand, Journal of S. M. F. D., Proceedings of A. S. C. E., Vol.96, No. SM 3, pp.1011~1043, 1970.

(1985.8.26・受付)