

掘進時における泥水式シールド機の 推力・トルクに関する一考察

西林聖武¹・徳江俊秀²・小泉 淳³

¹フェロー 会員 メトロ開発株式会社取締役部長 (〒117-0052 港区赤坂五丁目 4-5)

²正会員 工博 日本大学理工学部土木工学科教授 (〒101-0062 千代田区神田駿河台 1-8)

³正会員 工博 早稲田大学理工学部土木工学科教授 (〒169-0072 新宿区新大久保 3-4-1)

大口径泥水式シールドの技術は、1982年練馬区氷川台において外径10mの複線シールド工事が基礎となっており、装備力についてもこの氷川台シールドの規模に横並びする傾向がある。また一方で、最近の大口径泥水式シールドの施工結果を見ると推力およびトルクの実績値は、シールド機に装備された装備値と比べると低く、相当の開きがある¹⁾。

本稿は、営団地下鉄が施工した南北線駒込～目黒間の大口径泥水式シールドの実績データと、同緑谷町工区におけるシールド掘進時の計測データとを分析し、シールド機の推力およびトルクの設計に必要な基礎データを示し、大口径泥水式シールドの装備推力および装備トルクの推定方法について提案するものである。

Key Words : slurry shield, thrust, cutter torque, friction coefficient

1. 背景および構成

泥水式シールドは、1964年頃下水道工事において直径3mの管路布設に採用されて以来急速な技術開発が行われ、今日では直径14m以上の超大型トンネルを高地下水圧下で長距離掘進するまでに至っている。90年代における外径8m以上の大口径泥水式シールド工法の採用状況は、鉄道(地下鉄)、下水(河川)、道路、共同溝などあらゆる用途のトンネルに用いられているが、なかでも地下鉄工事での施工例は圧倒的に多く、1998年現在で総延長約112.5kmに及んでいる。このようなシールド技術の発展は、安全性や施工技術の向上によって成し遂げられてきたが、シールド機の推力およびトルクについては未解明な部分が多く、経験や仮定で補完しているのが現状である。これを解明するために、次の構成により検討を行った。

まずシールド機の装備推力・装備トルクを地下鉄南北線における施工実績データ(以下、実績データと略す)と比較して、どの程度の安全率が含まれているのかを把握した。

次に、現在用いられている設計方法にもとづいて、

推力・トルクの規模を決定する主要因子を抽出し、これらに検討を加えた。

さらに、実績データと現象解明のため実施した現場計測により得られたデータ(以下、計測データと略す)とを分析して、推力およびトルクの平均的な規模を推定する方法について提案した。

最後に、実績データを統計的に処理して通常の掘進で発生するであろう最大推力および最大トルクを推定し、これに施工中のトラブルを加味して装備能力を決定するための安全率について提案を行っている。

なお本検討に用いている用語は次のとおりである。

- 装備推力(トルク)：シールド機に装備されている
推力(トルク)の総称
- 設計推力(トルク)：当初設計上の推力(トルク)
- 平均(最大)実績推力：実際の掘進で必要とした推力
の平均値(最大値)
- 有効(平均)実績推力：(平均)実績推力から実績泥水
圧を排除した値
- 平均(最大)実績トルク：実際の掘進で必要としたト
ルクの平均値(最大値)
- 平均(最大)提案推力：著者が提案する推定式で算出
した平均(最大)推力

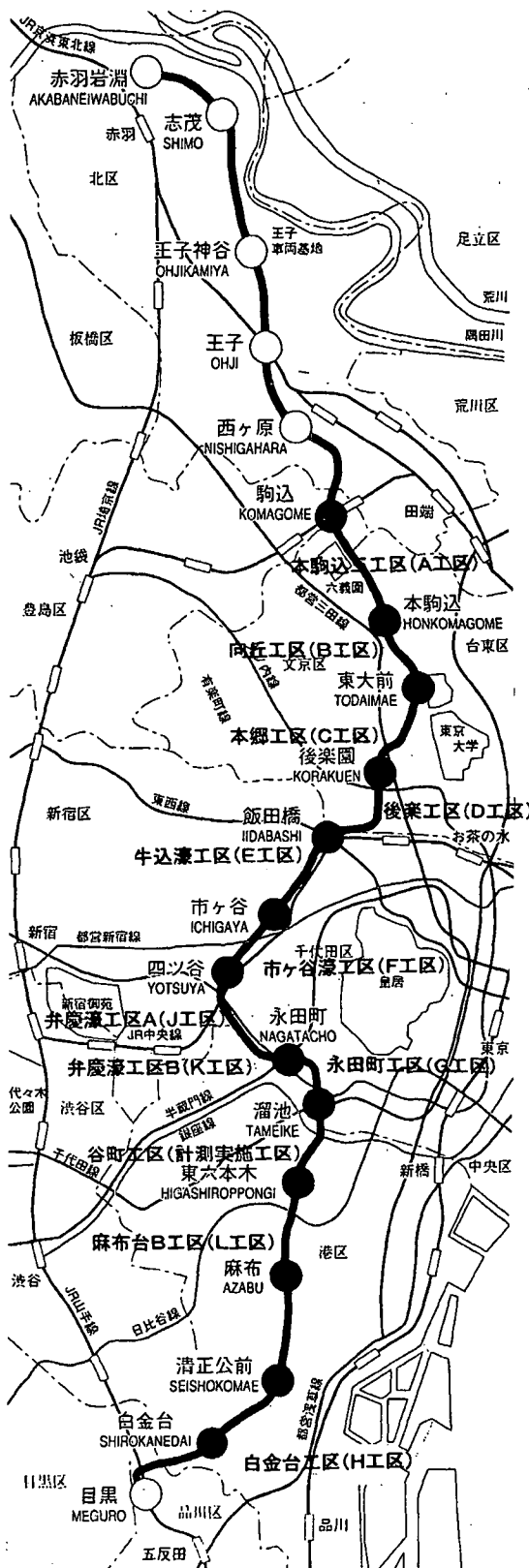


図-1 地下鉄南北線概略路線図

- 平均(最大)提案トルク：著者が提案する推定式で算出した平均(最大)トルク
- 提案装備推力(トルク)：著者が提案する推定式で算出した装備推力(トルク)
- 推進摩擦抵抗：シールド掘進時のシールド外周と土との摩擦抵抗
- 回転摩擦抵抗：シールド機面板回転時における面板前面・側部と土との摩擦抵抗と地山の切削抵抗との合計

2. 実績データの分析と研究の目的

(1) 実績データを入力した現場の施工条件

本検討に用いた実績データは、表-1 に示す地下鉄南北線シールド工事で、複線トンネル9工区、単線トンネル3工区の合計12工区である。

これらの工事はすべて泥水式シールド機が用いられており、トンネル外径は複線トンネルで約10m、単線トンネルで約7mとなっている。また、掘進速度は、15~30mm/minである。

図-1 および図-2 に地下鉄南北線の概略路線図と地質縦断面図を示す。本路線は、北区赤羽から王子を通過して南下し、駒込・本郷・後楽園と進み皇居の西側を半周して溜池・麻布・白金を通り目黒へ至る大都市東京を縦断する延長21.4kmの路線である。

実績データを収集した区間の地形は、本郷台、旧外濠・東縁の位置する低地部、淀橋台に大別される。

本郷台では、上部と下部の砂層中に被圧水頭を有する地下水がある。泥水式シールド機は東京層の砂質土および粘性土、本郷層の砂礫中を掘進する。

低地部の地層は、上部には沖積層が分布しその下位には、砂層、シルト層の互層からなる上部東京層および江戸川層が分布している。低地部の地下水は江戸川層および東京層に分布しているが随所に分布する粘性土に被まれてほぼ同一の被圧水頭を形成している。この区間における泥水式シールド機は主として江戸川層中を掘進する。

淀橋台付近は各層における被圧地下水が異なった複雑な被圧水頭を形成しているが、いずれも地形なりに下っている。このうち泥水式シールド機は、東京層の砂質土および粘性土中を掘進する。

このように本シールド区間の主な地層は洪積層の砂層・礫層・粘性土層である。

表-1 実績データとして用いた現場の施工条件

	工区	工区延長 (m)	リングNOと当該線形および土質			土被り (m)	最大地下 水圧(N/mm ²)	シールド 機長(m)	シールド 外径(m)
			リング数	線形	土質				
複線トンネル	本駒込三 工区 (A)	949.3	1~114	R=254m	To-s	10.2~10.4	0.12	8.5	9.7
			114~219	R=303m					
			219~299	直線					
			299~486	R=703m					
			486~578	直線					
			578~629	R=1003m					
	629~783	直線							
	向丘工区 (B)	613	113~214	直線	To-s	13.1~12.5	0.11	8.5	9.7
	本郷工区 (C)	1064.5	1~158	R=186m	To-s	17.0~32.0	0.26	8.67 中折れ式	10.02
			158~283	R=270m	To-s				
			283~364	R=225m	To-c				
			364~506	直線	To-s, To-c To-g				
			506~637	R=205m	To-s, To-g Ed-s				
			637~687	直線	To-g, Ed-s				
687~952	R=175m	Ed-s							
後楽工区 (D)	1060	456~564	R=203m	Ed-s	16.9~34.1	0.28	8.79	10.02	
		725~833	直線						
牛込濠 工区 (E)	858	1~51	直線	Ed-s	14.2~18.8	0.16	8.805	9.7	
		314~555	直線						
		638~712	R=503m						
市ヶ谷濠 工区 (F)	711	1~74	直線	Ed-s	11.2~18	0.18	8.7	9.7	
		74~147	R=453m						
		147~241	直線						
		241~509	R=403m						Ed-s, To-g
		509~590	直線						To-p, To-s
永田町 工区 (G)	275.8	72~172	R=335m	To-s	8.2~13.1	0.12	7.32	9.7	
白金台 工区 (H)	650	250~350	R=304m	To-c, To-g	16.4~27.0	0.14	8.99	10.0	
人形町 工区 (I)	417.8	1~104	R=230m	To-s, To-g	15.3~21.9	0.22	10.185	10.04	
		104~193	直線	To-c					
		193~342	R=1000m						
単線トンネル	弁慶濠A 工区 (J)	1228.0	829~935	R=207m	Ed-s	6.4~31.2	0.12	6.96	6.75
	弁慶濠B 工区 (K)	1228.0	655~754	直線	Ed-s	6.4~31.2	0.13	7.06	6.75
	麻布台B 工区 (L)	1008.0	1~160	R=201m	Ka-c, Ka-s	19.3~33.9	0.24	6.49	6.75
			160~179	直線					
			179~281	R=201m					
			281~353	直線					
			353~440	R=201m					
			440~484	直線					
	484~601	R=321m							
	601~836	直線	To-s						

※凡例 To-s:東京砂層 To-c:東京粘性土層 To-g:東京礫層 To-p:東京シルト層 Ed-s:江戸川砂層
Ka-s:上総砂層 Ka-c:上総粘性土層

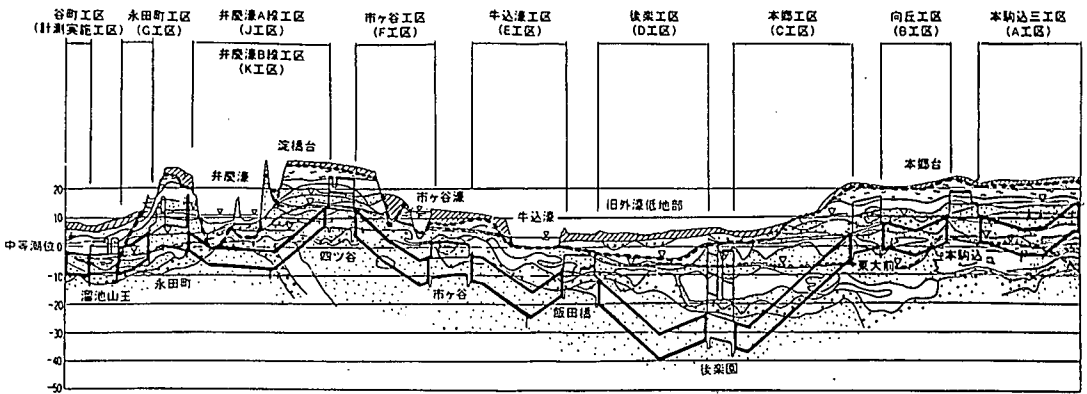
(2)実績データの分析

大口径泥水式シールド機の推力およびトルクの設計は、理論式により求めた計算値をもとに施工経験を加味して装備能力を決定している。しかし、施工結果を見ると実際の工事に用いられた推力およびトルクは、シールド機の装備能力よりも小さくて済み、シールド機は、過剰な性能を装備していることが多い¹⁾。そこで、表-1に示した各

工区におけるシールド機の推力・トルクの設計値とこれにもとづき付与された装備力および実際の掘進で発生した実績値との関係について検討した。

a)実績推力と設計推力・装備推力との比較

各工区における平均実績推力と設計推力および装備推力との関係を図-3に示す。この図より、平均実績推力に対して設計推力は0.89~3.02と



凡例			
時代	地層名	土質	記号
新	沖積世	埋立	Fs
		黄土	Is
		腐植土層	As
		粘り土層	Ac
		砂礫層	Ag
		砂質土層	As
		間重ローム層	ローム TMF
		ローム付粘土層	粘
		粘り土層	Hb-c
		本郷層	砂質土
旧	沖積世	本郷層	Hb-g
		砂質土	Hb-s
		粘り土	To-c
		粘り土	To-p
		砂礫層	Ag
		砂質土層	To-g
		重砂層	Ed-s
		粘り土層	Ed-c
		粘り土層	Ed-c
		江戸川層	砂質土

図-2 地下鉄南北線地質縦断面図

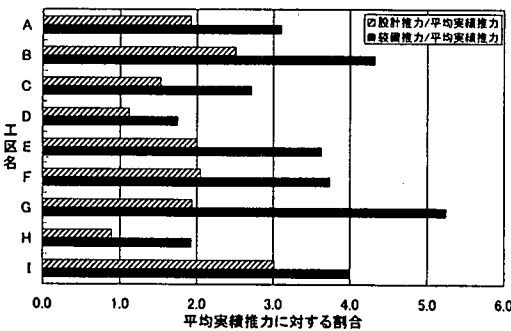


図-3 実績推力に対する設計推力と装備推力との比較

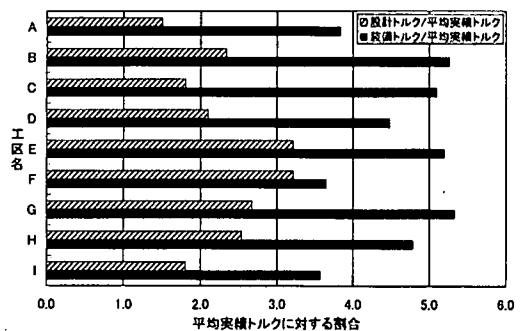


図-4 実績トルクに対する設計トルクと装備トルクとの比較

ばらつきが大きく設計条件の設定方法を含めて、その精度に課題が見られる。

また、平均実績推力に対する装備推力は 1.74 ~ 5.24 と前述の設計推力以上のばらつきが見られ、シールド機の装備推力は相当に過剰になっている。これは、設計推力から装備推力の設定にあたり、安全率に一定の基準が見られないことから、これが一つの要因となっている。

b) 実績トルクと設計トルク・装備トルクとの比較

図-4 は平均実績トルクと設計トルクおよび装備トルクとの関係を示したものである。この図より、平均実績トルクに対して設計トルクは 1.5~

3.22 と設計値は実績値に比べて大きく、両者には大きな開きが見られる。

また、装備トルクは平均実績トルクに対して 3.57~5.33 と装備推力と同様に相当に過剰な安全率を有している。これらから、設計推力の場合と同様、設計条件や安全率の設定方法に課題が見られる。

以上より、本検討はこれらの課題解消のため泥水式シールドの実績データと計測データにもとづき、装備力の設計条件となる基礎データおよび施工中の不確定要素を考慮した適切な安全率を示すことにより、シールド機の装備すべき推力・トルクの推定方法を提案することを目的とし

表-2 設計条件 (例)

項目	F工区	H工区
シールド外径 (mm)	9,700	10,040
機長 (mm)	8,700	10,185
重量 (kN)	8,240	10,000
地質概要	Tos, T og, E ds	Tos, T og, Toc
土被り (m)	10~18	22
地下水圧 (kN/m ²)	180	227
切羽泥水圧 (kN/m ²)	270	475
土とスキンプレートとの摩擦係数	0.4	0.15

ている。

3. 推力・トルクの支配因子の抽出

(1) 推力の支配因子

シールド機の装備能力の設計は、土木学会制定トンネル標準示方書 (シールド工事編) にもとづいて行われている²⁾。

現行の設計法では設計推力 F は、

$$F = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 + F_6 \quad (1)$$

として表せる。ここに、

F_1 : 切羽前面抵抗 (切羽泥水圧)

$$= \pi \cdot D_0^2 / 4 \cdot p_f$$

D_0 : シールド外径 (m)

p_f : 切羽泥水圧 (N/m²)

F_2 : 推進摩擦抵抗 (シールド外周と土との摩擦抵抗)

$$= \mu_1 \cdot (\pi \cdot D_0 \cdot L \cdot p_n + W)$$

L : シールドスキンプレート長 (m)

p_n : シールド外周の土圧

$$= (2 \cdot p_e + q_{1e} + q_{2e}) / 4$$

p_e : 鉛直土荷重 (N/m²)

q_{1e} : 頂部の水平土荷重 (N/m²)

q_{2e} : 底部の水平土荷重 (N/m²)

μ_1 : 土とスキンプレートとの摩擦係数

W : シールド機の自重 (N)

F_3 : 曲線施工・蛇行修正等による変向抵抗

$$= R \cdot S$$

R : 抵抗土圧 (N/m²)

S : 抵抗板の推進方向の投影面積 (m²)

F_4 : テール内でのセグメントとスキンプレートとの摩擦抵抗

$$= N_s \cdot W_s \cdot \mu$$

N_s : セグメントのリング数

表-3 設計推力 (例)

	F工区(kN)	率%	H工区(kN)	率%
F ₁	19,950	58	37,610	85
F ₂	12,840	37	6,070	14
F ₃	1,440	4	0	0
F ₄	150	0	240	1
F ₅	400	1	0	0
F ₆	0	0	0	0
計	34,780	100	43,920	100

表中の率は設計推力に対する割合

W_s : セグメント1リングの重量 (N)

μ_2 : スキンプレートとセグメントとの摩擦係数

F_5 : 後方台車の牽引抵抗

$$= \mu_3 \cdot G_1$$

μ_3 : 車輪とレールとの摩擦係数

G_1 : 後方設備の自重 (N)

F_6 : 掘進に伴うフード部刃先の貫入抵抗

$$= \pi \cdot D_0 \cdot t \cdot k_p \cdot p_v$$

k_p : 受動土圧係数

p_v : シールドに作用する平均土圧 (N/m²)

t : 刃先貫入厚さ (m)

次に推力の設計例として表-2 に F工区 (砂質土地盤) および H工区 (粘性土地盤) における設計条件を、また表-3 にこの条件により求めた計算結果を示した。

表-3 から、 F_1 の切羽前面抵抗と F_2 の推進摩擦抵抗との合計値は、F工区においては設計推力の 95% (F_3 の変向抵抗も含めると 99%) を、また H工区においては 99% を占めており、テール内でのセグメントとスキンプレートとの摩擦抵抗および後方台車牽引抵抗等の占める割合は極めて小さい。この傾向は全工区にもあてはまる共通の事項である。

以上から、シールド機の設計推力は、切羽前面抵抗 F_1 と推進摩擦抵抗 F_2 に支配されることが判明した。なお、本検討では計測の関係から変向抵抗 F_3 を推進摩擦抵抗 F_2 に含めて検討を行う。

(2) トルクの支配因子

現行の設計法では設計トルク T は、

$$T = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 + T_6 \quad (2)$$

として表せる。ここに、

T_1 : シールド機前面およびカッター側部と土との摩擦抵抗トルク

表-4 設計トルク (例)

	F工区 (kN・m)	率 %	H工区 (kN・m)	率 %
T ₁	7,540	87	3,550	67
T ₂	150	2	1,512	29
T ₃	0	0	0	0
T ₄	46	1	121	2
T ₅	458	5	102	2
T ₆	490	5	0	0
計	8,684	100	5,285	100

表中の率は設計トルクに対する割合

$$= (\pi/12) \times D_0^3 \times \mu_4 \times q_e \times (1 - \eta) + 2\pi \times R_c^2 \times b_1 \times \mu_5 \times p_0$$

R_c : シールド半径 (m)

b₁ : カッターヘッドの出代 (m)

μ₄ : シールド機前面と土との摩擦係数

μ₅ : カッター側部と土との摩擦係数

η : 面板の開口率

q_e : 面板に作用する土圧 (N/m²)

p₀ : カッター側部に作用する平均土圧 (N/m²)

T₂ : 土の切削抵抗によるトルク

$$= 1/8 \cdot D_0^2 \cdot q_u \cdot t \cdot 10^5$$

q_u : 地山の一軸圧縮強度 (N/mm²)

t : カッタービットの切込み深さ V/N_c (cm/rev)

V : 平均掘進速度 (cm/min)

N_c : カッター回転速度 (rpm)

T₃ : 攪拌抵抗トルク

(通常掻き上げ抵抗トルクは考慮しない)

T₄ : シール摩擦抵抗によるトルク

$$= 2 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot f_a$$

R : シール取付け半径 (m)

f_a : カッターシールの摩擦抵抗 (N/m)

泥水圧 10kN/m²の実験値により算出

T₅ : 軸受け抵抗によるトルク

$$= P_b \cdot R_t \cdot \mu_b + W_b \cdot R_r \cdot \mu_b$$

P_b = P_f · α

P_f : 切羽泥水圧による前面荷重 (N)

α : 泥水圧が作用する面積比

R_t : 旋回環軸受けのスラストコロ配置半径 (m)

μ_b : 転がり摩擦係数

W_b : 軸受けに作用するラジアル自重 (N)

R_r : 旋回環軸受けのラジアルコロ配置半径 (m)

T₆ : 減速装置の機械損出によるトルク

$$= n_1 \cdot T_0$$

n₁ : 機械駆動抵抗

T₀ : 常用装備トルク (N・m)

表-4 にトルクの設計例としてF工区とH工区の計算結果を示す。

この表から、シールド機面板と土との摩擦抵抗によるトルクT₁と、土の切削抵抗によるトルクT₂の合計(回転摩擦抵抗)がF工区においては全体の89%を、H工区においては全体の96%を占めており、シール・軸受け・減速装置などシールド機自体の摩擦抵抗は小さい。この傾向は全工区にあてはまる共通の事項である。なお、表中の値は起動時の値であり、掘進時には値が小さくなる項目もある。しかし、上述した傾向は変わらないと仮定して、以降の検討では掘進時のトルクを対象にしている。

以上より、設計トルクTはシールド機面板と土との摩擦抵抗によるトルクT₁に支配されるものと考えられる。なお、本検討では土の切削抵抗によるトルクT₂は計測の関係からT₁に含めて検討する。

4. シールド機の掘進抵抗力の計測

3. で抽出した推力の支配因子である切羽前面抵抗と推進摩擦抵抗、トルクの支配因子である回転摩擦抵抗の解明を目的に、南北線谷町工区において実際に掘進中の複線シールド機にひずみ計を取り付けて、シールド機に作用する実応力を計測した。以下では、谷町工区の施工概要と計測概要について示す。

(1) 施工概要

谷町工区は、掘削外径10.0mの中折れ式の泥水式シールド機で、東六本木駅を発進基地として溜池山王駅へつながる赤坂換気所までの約357mを土被り約8~11mで掘進する工事であり、当該地の地質は図-5に示した。なお、図中に示す計測断面は後述する計測を行った255リングから260リングの位置を示している。

表-5は、計測断面付近の地質条件である。トンネル上部の土被部分の沖積粘性土は、N値2以下、湿潤単位体積重量16kN/m³以下、トンネル断面中央部の東京砂層は、N値10~40、湿潤単位体積重量18kN/m³となっている。また、東京砂層の間隙水頭位置は約TP+7.0mであり、計測断面付近では、トンネル中心での水圧は0.11N/mm²となる。

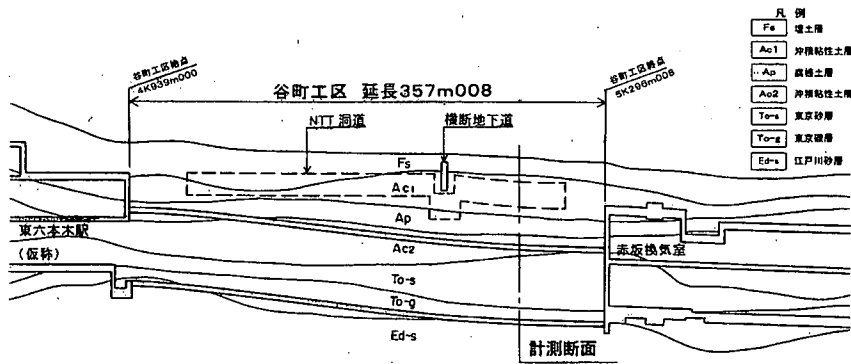


図-5 地質縦断面図

表-5 地質条件

土被り部分	土被り 11.0m				
	地質名 (記号)	層厚 (m)	単位体積重量 (kN/m ³)		
	埋土層 (Fs)	3.9	16.0		
	粘性土層 (Ac)	4.4	13.6		
	腐植土層 (Ap)	2.0	10.5		
	粘性土層 (Ac)	0.7	16.0		
掘削部分	断面上部	粘性土層 (Ac2)	3.0%		
	中央部	東京層砂質土 (To-s)	80.7%		
	断面下部	東京礫層 (To-g)	16.3%		
	土質	Ac2	To-s	To-g	
	単位体積重量 (kN/m ³)	16.0	18.0	21.0	
	粒度組成 (%)	礫	—	27.0	78.0
		砂	—	65.0	18.0
		シルト	68.0	8.0	4.0
		粘土	32.0	—	—
	一軸圧縮強度 (kN/m ²)	103.0	—	—	
透水係数 (cm/s)	—	6.9×10^{-4}	3.0×10^{-3}		

表-6 施工条件とシールド機仕様

施工条件	延長 (m)	357.008	
	セグメント外径 (m)	9.8	
	セグメント	1R~89R	RC 1.0m
		90R~308R	RC 1.2m
	地質概要	Ac2, To-s, To-g	
土被り (m)	8.2 ~ 11.0		
シールド機	地下水圧 (N/mm ²)	0.11	
	最小曲線半径 (m)	175	
	最大勾配 (%)	1.7	
	シールド機外径 (m)	9.98	
	シールド機長 (m)	7.78	
	重量 (kN)	10,000	
	シールドジャッキ (kN)	3,000 × 22 本	
	シールドジャッキ伸長速度	3.3cm/min	
	中折れジャッキ (kN)	3,000 × 16 本	
	ゴビカッタージャッキ (kN)	200 × 2 本	
装備推力 (kN)	66,000		
装備トルク (kN·m)	9,424		
面板開口率	0.20		

表-6 に本工区の施工条件とシールド機の仕様を示す。

図-6 は、谷町シールドの実績データである。なお、掘進実績データの下にトンネル線形等の諸元を示した。

平均実績推力、平均実績トルクおよび掘進速度の実績値は、0リングから120リング間でデータのばらつきが見られる。これは、50リングから55リング付近で予想外の障害物(H型鋼)に当たり、その影響により120リング付近まで掘進速度が安定せず、平均実績推力および平均実績トルクの乱れにつながったものと考えられる。

120リング以降は、掘進速度が20~23mm/minとほぼ安定し、平均実績推力および平均実績トルクのばらつきも小さく、良好な施工が行えている。

計測が行われた255リングから260リングの6リング間の掘進についてもデータが安定していること

注1) RC : 鉄筋コンクリート系セグメント
注2) 地下水圧は計測断面におけるシールド機中心の値

から、計測の条件は良好であり、したがって、計測データも十分信頼がおけると判断した。

(2) 計測概要

本シールド掘進では、実績データに加え、掘進中のシールド機に作用している外力を計測し、平均実績推力と平均実績トルクを分析するための基礎データを収集した。

計測概要は、表-7 に、また、ひずみ計設置位置を図-7 に示す。

ここで、面板に作用する軸方向の力は軸方向ゲージのひずみ量を軸荷重に換算して求める。また面板の回転トルクは、面板が回転する時に生ずる円周方向のひずみ量を曲げモーメント荷重に換

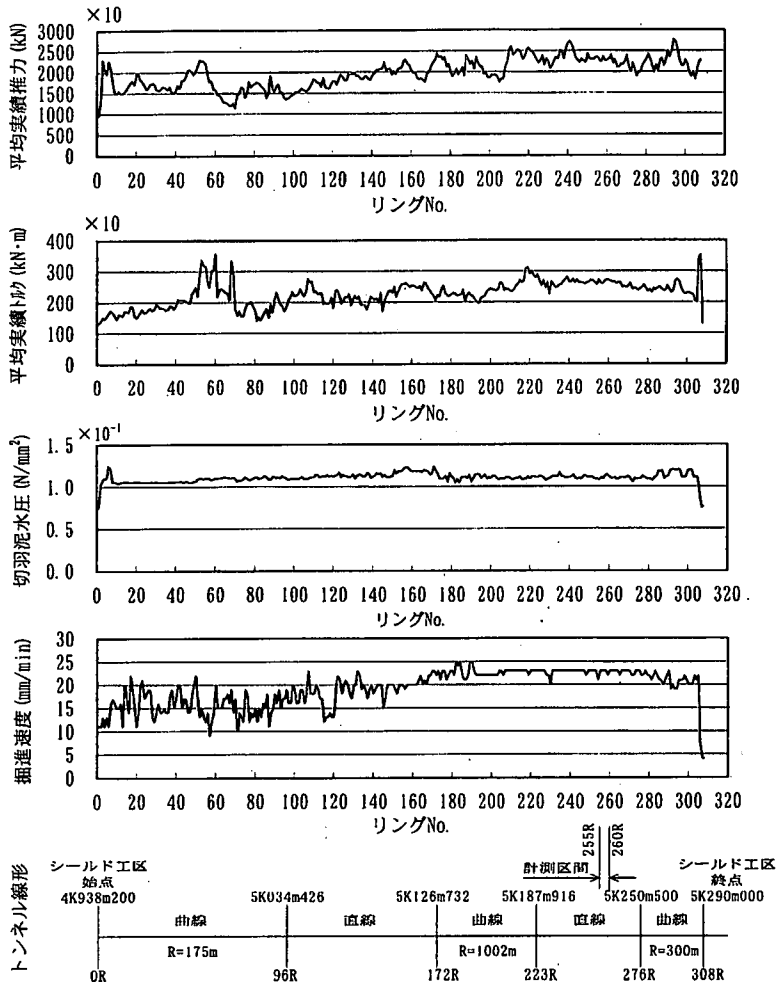


図-6 谷町シールドの実績データ

表-7 計測概要

目的	測定項目	測定位置	測定方法	測定範囲
推力	面板に作用する力	軸方向中間レール 2本	歪みゲージ	255~260R
	レール外周の摩擦力	中折れレール 16本	ジャック油圧	255~260R
	後方設備台車牽引力	後方台車牽引部 2ヶ所	ロードセル (牽引力を直接計測)	45~308R
トルク	面板の回転力	周方向中間レール 2本	歪みゲージ	255~260R

算して求める。なおその際、カッタービットによる土の切削抵抗も合わせて計測される。

5. 平均提案推力および平均提案トルクの推定

(1) 切羽前面抵抗の解明

a) 現行設計における切羽泥水圧の考え方

泥水式シールドにおける切羽の安定は、切羽土圧および水圧に対して泥水圧で対抗することによって図るのを基本として、次式(3)のように考えられている。

$$\text{設計泥水圧} = \text{切羽土圧} + \text{地下水圧} + \text{変動圧} \quad (3)$$

ここに、

切羽土圧：全土被りまたは緩み高さから求めた鉛直土圧に係数を乗じて求める。

地下水圧：水位測定結果による。

変動圧：0.02N/mm²を標準とする。

すなわち、現行設計法においては切羽前面抵抗は

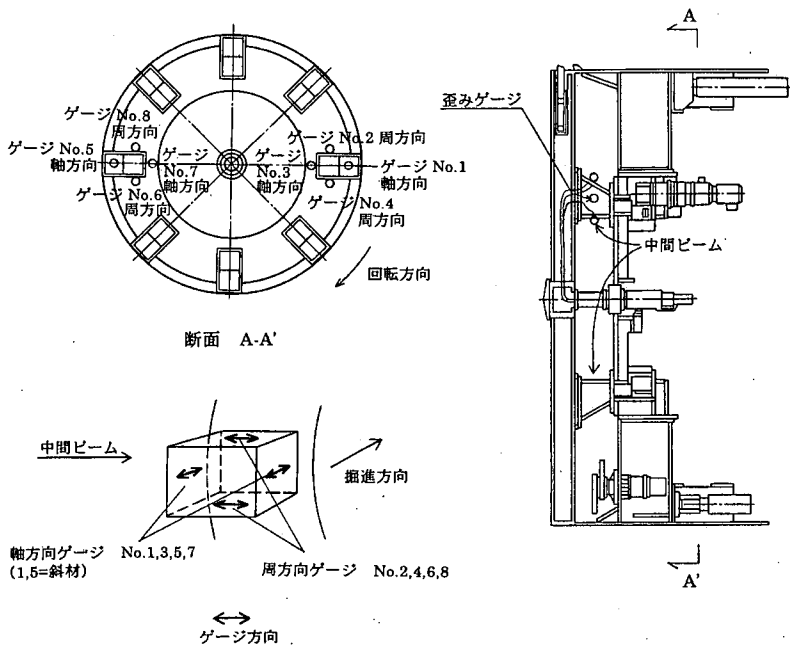


図-7 ひずみ計設置位置図

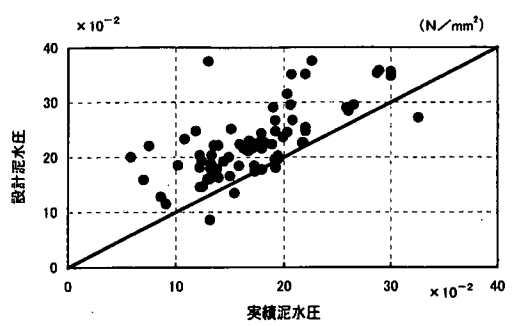


図-8 実績泥水圧と設計泥水圧の関係

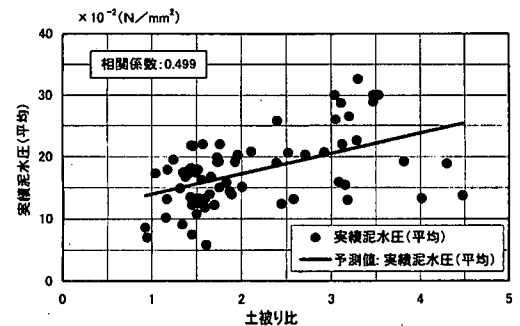


図-10 実績泥水圧と土被りの関係

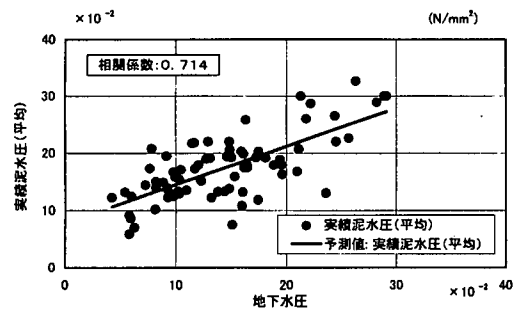


図-9 実績泥水圧と地下水圧の関係

b) 実績に基づく切羽泥水圧の分析

図-8は、表-1に示した各工区における設計泥水圧と実績泥水圧の関係を表わしたものである。この図から、ほとんどの現場では実績泥水圧は設計泥水圧以下で施工されていることが確認される。

図-9は、実績泥水圧と地下水圧の関係を示したものであり、これから実績泥水圧は地下水圧と密接な関係(相関係数0.714)にあることがわかる。

図-10に実績泥水圧と土被りの関係を示したが、両者の相関係数は低く相関はないと考えられる。このことから実績泥水圧に切羽土圧はほとんど無関係である。

また、図-11から実績泥水圧から地下水圧を排

式(3)の設計泥水圧と同じであると考えることができる。

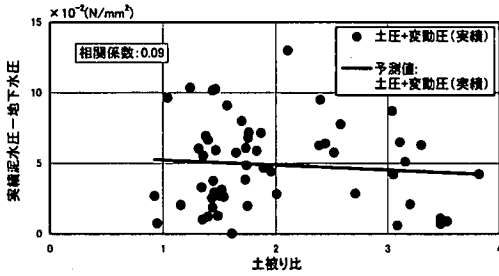


図-11 実績泥水圧と土被りの関係

除した値は土被りにはほぼ無関係に 0.05N/mm^2 を中心に分布しているのが認められる。

以上から、泥水圧の中心は地下水圧で切羽土圧とは無関係であり、これより、

$$\text{実績泥水圧} = \text{地下水圧} + \alpha \quad (4)$$

と表せる。なお、 α は 0.05N/mm^2 を中心に $0 \sim 0.1\text{N/mm}^2$ の範囲で分布する泥膜を保持する圧力で、ここでは、これを地山崩落防止圧と呼ぶ。

(2) 切羽土圧の検討

前述の解析より、著者が提案する切羽前面抵抗は以下のように表せ、

$$\text{切羽前面抵抗} = \text{切羽泥水圧} + \text{切羽土圧}$$

$$\text{切羽泥水圧} = \text{地下水圧} + \text{地山崩落防止圧}$$

すなわち、切羽泥水圧からは切羽土圧は除かれていると考える。

谷町工区における設計泥水圧は、トンネル中心位置で 0.236N/mm^2 であった。しかし、実施工では、地下水圧 0.11N/mm^2 に対し、実績泥水圧は 0.12N/mm^2 と両者はほぼ一致している。当該工区においても切羽泥水圧は地下水圧に相当し切羽土圧には無関係であることがわかる。一方、切羽前面の抵抗として関与する因子が泥水圧とシールド機の面板のみであることを考慮すると、切羽土圧に関しては、シールド機面板が抵抗しているものと推測される。

以下では、面板に作用している土圧を、谷町工区における実測データおよび計測データから解析した。なお、本検討では掘進に伴うフード部・切削ビットの貫入抵抗は切羽圧力の一部であるため切羽土圧に含めて検討する。

a) 実績データに基づく切羽土圧の解析

谷町工区の 255 リング～260 リングの実績データにもとづきシールド機面板に作用する切羽土圧を次式により算出した。

$$F_{1-2} = F - (F_{1-1} + F_2 + F_4 + F_5) \quad (5)$$

ここに、

F_{1-2} : 切羽土圧

表-8 推力計算式からの解析結果

リング No.	切羽土圧 (kN)
255R	4418.4
256R	3323.7
257R	3130.1
258R	4177.2
259R	2969.0
260R	3405.5
平均	3570.7

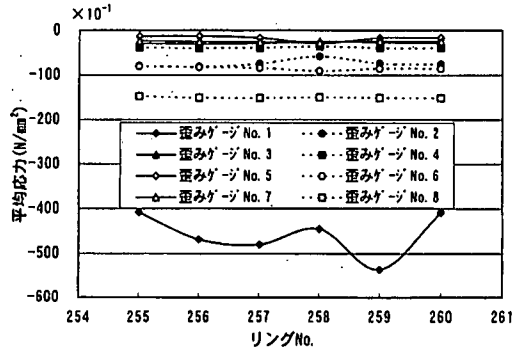


図-12 中間ビームひずみ計測結果

F : 平均実績推力(実績データより)

F_{1-1} : 実績泥水圧(実績データより)

F_2 : 推進摩擦抵抗

(後述の解析結果より $9,768.1\text{kN}$)

F_4 : テール内でのセグメントとスキンプレートとの摩擦抵抗(設計値の 370kN)

F_5 : 後方設備台車の牽引抵抗

(計測結果の 93kN)

である。

表-8は、式(5)により算出した切羽土圧である。

これより、シールド機面板には平均 3570.7kN の土圧が作用していることがわかる。

b) 計測データに基づく切羽土圧の算定

図-12は、中間ビームで計測されたひずみデータを次式にもとづき応力度換算した結果である。

$$\sigma = E \cdot \varepsilon_1 \quad (6a)$$

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_d - \varepsilon_0 \quad (6b)$$

ここに、

σ : 応力度

E : ヤング係数 ($2.1 \times 10^5\text{N/mm}^2$)

ε_1 : 真ひずみ

ε_d : 測定ひずみ

ε_0 : 初期ひずみ(カッターを無負荷の状態です 5 回転させ、回転角度 10° 毎に収録したデータの平均値)である。

表-9 ゲージの平均応力度(N/mm²)

	No.3 ゲージ	No.5 ゲージ	No.7 ゲージ
255R	-2.830	-1.292	-2.303
256R	-3.033	-1.253	-2.471
257R	-2.819	-1.644	-2.564
258R	-2.408	-2.854	-2.655
259R	-2.665	-1.678	-2.339
260R	-2.706	-1.661	-2.467
平均値	-2.744	-1.730	-2.467

中間ビームひずみ計測は、カッター面板が45°回転する毎に1度、1回転(360°回転)で8回計測される。1リング掘進するのに面板は31から32回転する。したがって、各リングの計測値は、約250個のデータを平均したものである。これより、同一部位に設置されたひずみ計(No.1とNo.5, No.3とNo.7, No.2とNo.6, No.4とNo.8)の値は一致するはずである。しかし、No.1ひずみ計は、他のひずみ計の値に比較して極端に大きな値となっており、また、No.4とNo.8ひずみ計の値も一致していない。以上より、No.1およびNo.8の計測値は除外して検討することにした。また、その他の計測値については、平均応力度に極端な変化が見られないことから、信頼できるものと判断した。

表-9はトンネル軸方向ひずみ計の応力度換算値を示す。

これより、直材(No.3, No.7)の軸方向平均応力度は、

$$\sigma_1 = \{(-2.744) + (-2.467)\} / 2 = -2.606 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

となり、斜材(No.5)の軸方向平均応力度は、

$$\sigma_2 = -1.730 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

となる。

この軸方向平均応力度からシールド機面板に作用している切羽土圧を次の手順で解析した。

①図-13に示す中間ビームの3次元FEMモデルのカッターヘッド側の面に0.1N/mm²の単位荷重(総荷重75kN)をX方向から作用させたときの、No.3, No.7およびNo.5ゲージ位置での応力度を解析した。

②表-10に各ゲージ位置での解析結果を示す。

③3次元FEM結果と中間ビームひずみ計測の軸方向平均応力度から、シールド機面板に作用している土圧を次式で算出した。

$$F_{1-2} = (N_1 + N_2) / 2 \quad (7a)$$

$$N_1 = \sigma_1 \times 75 / (-0.292) \times 8 \quad (7b)$$

$$N_2 = \sigma_2 \times 75 / (-0.573) \times 8 \quad (7c)$$

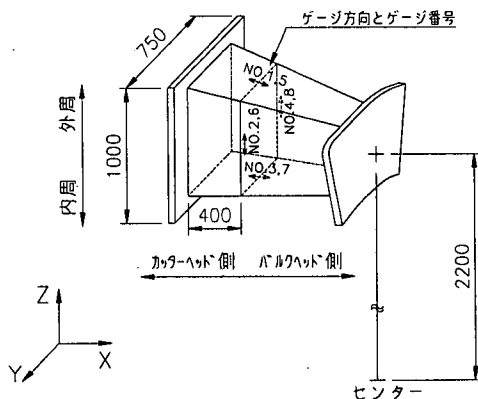


図-13 解析モデル図

表-10 3次元解析結果

ゲージ No.	No.3, No.7	No.5
応力度(N/mm ²)	-0.292	-0.573

ここに、

F_{1-2} : 切羽土圧

N_1 : 直材から求めた切羽土圧

N_2 : 斜材から求めた切羽土圧

である

上式(7a)よりシールド機面板に作用している切羽土圧は3,583.2kNとなった。

c)切羽土圧に関する考察

表-8の実績データより求めた切羽土圧の平均値3570.7kNと計測データより求めた切羽土圧3583.2kNとの差は、12.5kNである。この両値の差は、切羽土圧に対して約0.3%と極めて小さく、両者は一致していると考えることができる。これより、切羽土圧は面板で支持していることが明らかである。

以上より、シールド機面板に作用している切羽土圧約3600kNは、面板の有効単位面積当たり57.3kN/m²と、これは土圧係数0.40に相当する。そして、トンネル通過位置の東京砂層の内部摩擦角は $\phi 27^\circ \sim 39^\circ$ とばらついているが、これらの値より、面板には主働土圧以上の切羽土圧が作用していることが推測できる。

(3)シールド外周の推進摩擦抵抗の解明

ここでは、掘進時のシールド外周の摩擦抵抗を中折れジャッキの油圧計測結果と後方台車の牽引力計測結果を用いて解析する。

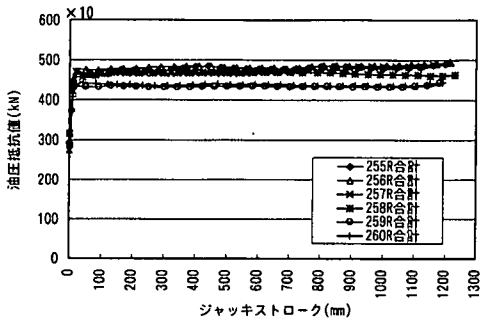


図-14 中折れジャッキ油圧計測結果

表-11 油圧計測値

	油圧平均値 (kN)	油圧最大値 (kN)
255R	4,750	4,950
256R	4,810	4,960
257R	4,720	4,930
258R	4,660	4,720
259R	4,330	4,450
260R	4,370	4,460
平均	4,607	4,745

a) 中折れジャッキによる計測

図-14は、255リングから260リングについて、中折れジャッキ16本の合計の油圧抵抗値を図示したものである。なお、この油圧抵抗値にはシールド機後胴部外周の土との摩擦抵抗の他、テール内でのセグメントとスキンプレートとの摩擦抵抗および後方台車の牽引抵抗が含まれる。

表-11に、各リングの油圧平均値と油圧最大値を示す。これより、油圧最大値と油圧平均値の差圧の最大値は257リングの210kNであり、油圧平均値4720kNに対して4.4%の値である。また各リング間の油圧平均値の差圧は、256リングの4810kNと260リングの4370kNとの差440kNが最も大きく、4810kNに対しては9.1%の値である。以上より、摩擦抵抗の解析では1割程度のばらつきを有するものとして捉える必要があると思われる。

b) 後方台車の牽引力計測

図-15は、シールド掘進中の右側ロードセルによる後方台車の牽引力を示す。なお、後方台車の牽引部にはロードセルを左右の2箇所に設置して計測を行ったが、左側のロードセルが計測不能であったため、ここでは、右側ロードセルの計測値のみを整理した

これより、右側ロードセルの平均牽引力は、

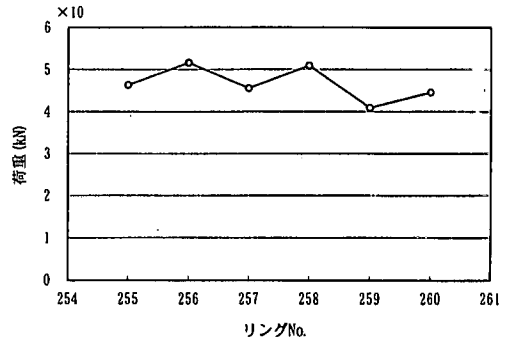


図-15 後方台車牽引力計測

表-12 各リングの摩擦抵抗値

	摩擦抵抗値 (kN)	平均値 (kN)
255R	10,115.6	9,768.1
256R	10,239.4	
257R	10,025.1	
258R	9,889.9	
259R	9,119.9	
260R	9,218.9	

46.65kNである。検討対象区間が直線区間であるため、後方台車の牽引力は左右均等に負荷されると推測できることからこのデータを2倍した93kNが後方台車の牽引力と推定できる。

c) 推進摩擦抵抗

ここでは、中折れジャッキの油圧計測結果および後方台車の牽引力計測結果にもとづき下式により推進摩擦抵抗を算出する。

$$F_2 = (F_2' - F_4 - F_5) \cdot \alpha \quad (8)$$

ここで、

F_2 : 推進摩擦抵抗

F_2' : 中折れジャッキの油圧計測値

F_4 : テール内でのセグメントとスキンプレートとの摩擦抵抗(未計測であるため設計値の370kNを用いる)

F_5 : 後方台車の牽引抵抗(後方台車の牽引力計測結果から93kNとする)

α : シールド機長に対する補正
(全機長/後胴長で2.36とする)

表-12は、式(8)から算出したシールド外周の摩擦抵抗である。

259リングと260リングは256リングと比較して摩擦抵抗が約10%低下しているが、これらのばらつきを含めて全6リングの平均摩擦抵抗を求めると9,768.1kNとなる。

表-13 現設計に用いられている摩擦係数

工区	A	B	C	D	E	F	G	H	I
係数	0.30	0.30	0.15	0.15	0.15	0.40	0.15	0.15	0.15
地質	東京砂層	東京砂層	東京砂層	江戸川砂層	江戸川砂層	江戸川砂層	東京砂層	東京砂層	東京粘性土層

表-14 南北線での平均実績推力と平均提案推力

工区	リング No.	切羽泥水圧 ① kN	切羽土圧 ② kN	摩擦抵抗 ③ kN	平均提案推力 ①+②+③ kN	平均実績推力 kN	平均提案推力 /平均実績推力
A工区	299~486	12,270	3,410	8,190 ~16380	23,870 ~32,060	26,180	0.91 ~1.22
	486~578	12,340		7,700 ~12,320	23,450 ~28,070		26,610
B工区	113~214	12,120	3,560	7,990 ~12,784	23,670 ~28,464	26,620	0.89 ~1.07
C工区	158~283	12,460	3,820	9,440 ~15,104	25,720 ~31,384	25,630	1.00 ~1.22
	283~505	15,770		8,390 ~13,424	28,000 ~33,014		26,950
E工区	355~555	15,000	3,580	10,010 ~16,016	28,590 ~34,596	26,040	1.10 ~1.33
	638~707	11,830		9,520 ~15,232	24,930 ~30,642		22,270
F工区	147~241	12,340	3,580	9,570 ~15,312	25,500 ~31,232	21,480	1.19 ~1.45
	241~420	9,760		9,570 ~15,312	22,910 ~28,652		27,920
平均				$\mu=0.5\tan\phi : 0.97$ $\mu=0.6\tan\phi : 1.06$ $\mu=0.7\tan\phi : 1.14$ $\mu=0.8\tan\phi : 1.22$			0.97~1.22

摩擦係数は $\mu=0.5\tan\phi \sim \mu=0.8\tan\phi$ とした。

d) 計測データに基づく摩擦係数

本トンネルの土被りは、約 11m であることからシールド機には全土被り荷重が作用しているものと想定し、前述の推進摩擦抵抗からシールドと土との摩擦係数を以下のように逆算した。なお、計算式は式(1)の F_2 を用い、シールド機の重量は浮力を考慮した。

表-5の地質条件より、鉛直土圧は、

$$p_e = 16.0 \times 3.9 + 13.6 \times 4.4 + 10.5 \times 2 + 16.0 \times 0.7 - 60.1 + 10.0 = 104.34 (\text{kN/m}^2)$$

であり、トンネル側面の水平土圧は、中間ビームひずみ計測より得られた切羽土圧を代用して、

$$q_e = 57.3 (\text{kN/m}^2)$$

とした。さらに、 $D_0 = 9.98\text{m}$ 、 $L = 7.78\text{m}$ 、 $W = 3,480\text{kN}$ であるから、

$$9768.1 = \mu \{ \pi \cdot 9.98 \cdot 7.78 \cdot (104.34 + 57.3) / 2 + 3480 \}$$
 から、 $\mu = 0.42$ となる。

トンネル通過位置の東京砂層の内部摩擦角は $\Phi = 27^\circ \sim 39^\circ$ であり、これから砂の摩擦係数を $\mu = \tan\Phi$ で推定すると $\mu = 0.5 \sim 0.8$ となる。計測データにもとづいて算出された摩擦係数はこれらの約 80~50% に相当する。

e) 推進摩擦係数の土質力学的検討

過去に行われた設計において、推進摩擦抵抗を求める時に用いられた土とスキンプレートとの摩擦係数は表-13のとおりである。これからわかるように同様な地質条件においても異なった係数が用いられるなど、土質条件にもとづく一定の基準が定められていない。

これは泥水式シールドとしての独自の基準がないため、各々の工区毎に施工経験や類似工法の係数を参考にするなど、臨時的な対応をしてきたことによると思われる。

表-14に、各工区の実績データにもとづく平均実績推力と平均提案推力とを示す。ここで、平均提案推力は切羽泥水圧、切羽土圧、摩擦抵抗の合計値である。なお、切羽土圧には主働土圧を、切羽泥水圧には、式(4)から求めた値を用いている(ここでは $\alpha = 0.05\text{N/mm}^2$ とした)。また推進摩擦抵抗は、同一地盤条件においてもばらつきを有するものであるため、前述 d) から求めた摩擦係数を参考に $\mu = (0.5 \sim 0.8) \tan\Phi$ と、値に幅をもたせて用いた。

表-15 ゲージの平均応力度(N/mm²)

	No.2 ゲージ	No.4 ゲージ
255R	-8.001	-3.826
256R	-8.156	-3.992
257R	-7.500	-3.889
258R	-5.827	-3.584
259R	-7.431	-3.895
260R	-7.630	-3.925
平均値	-7.424	-3.852

表-16 3次元解析結果

ゲージ No.	No.2	No.4
応力度(N/mm ²)	0.104	-0.104

それぞれの条件で試算した結果、 $\mu=0.5\tan\Phi$ において平均実績推力と平均提案推力は概ね一致することがわかった。

これより、砂地盤におけるシールド外周の摩擦係数は砂の内部摩擦角に依存し、 $\mu=(\tan\Phi)/2$ を用いられる。

(4) 面板の回転摩擦抵抗の解明

ここでは、谷町工区の間中ビームひずみ計測による計測データと南北線の他工区の掘進データをもとにトルクについて解析した。

a) 計測データにもとづく回転摩擦抵抗の算出

中間ビームひずみ計測のうち、No.2,4 ゲージで計測されたトンネル周方向ひずみをもとにシールド機面板の回転摩擦抵抗を解析した。なお、当ゲージで計測された値は、面板の回転に伴う前面および側部と地盤との摩擦(地盤の切削抵抗も含む)に起因するひずみを計測している。解析方法は、以下に示すように切羽土圧の解析と同様に中間ビームの3次元FEMによる。

- ①解析モデルは図-13と同様である。本解析では、カッターヘッド側の面に0.1N/mm²の荷重をY方向から作用させ、このときのNo.2,4ゲージ位置での応力度を解析した。
- ②表-15はトンネル周方向ひずみ計の応力度換算値を、また表-16には3次元FEMによるゲージ位置での応力度を示す。
- ③3次元FEM結果と中間ビームひずみ計測の平均応力度より、回転摩擦抵抗を次式で算出した。

$$T_2 = (\sigma_3 - \sigma_4) / 2 \times 75 / 0.104 \times 2.2 \quad (9)$$

ここに

T_2 : 回転摩擦抵抗

σ_3 : ゲージ No.2 の平均応力度

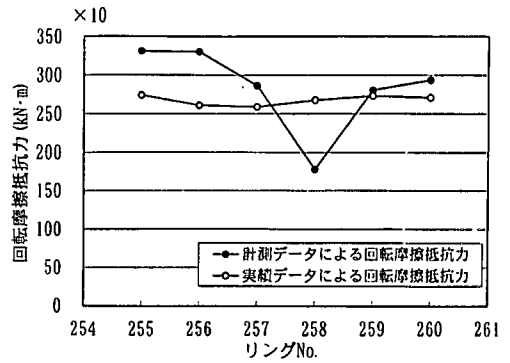


図-16 実績データと計測データによる回転摩擦抵抗

表-17 回転摩擦抵抗の比較

	実績データによる 回転摩擦抵抗 (kN·m)	計測データに基づ く回転摩擦抵抗 (kN·m)
255R	2,685	3,312.2
256R	2,560	3,303.5
257R	2,537	2,864.9
258R	2,624	1,779.4
259R	2,674	2,804.9
260R	2,660	2,935.9
平均値	2,623	2,833.5

σ_4 : ゲージ No.4 の平均応力度である。

図-16 および表-17 は、谷町工区の実績データにもとづく回転摩擦抵抗と式(9)より算出した計測データにもとづく回転摩擦抵抗である。

この結果より、計測データにもとづく平均値2,833.5kN·mは実績データにもとづく平均値2,623kN·mと211kN·m、約7%の差があった。これは、ゲージ応力度に換算して約0.13N/mm²と、表-15に示すゲージ応力度と比べて極めて小さな値であることから、計測精度の影響を含んだものと考えられ、両者は概ね一致していると判断できる。

以上より、トルクの主要因子はシールド機面板の回転摩擦抵抗であることが明らかとなった。なお、この場合、カッター側部と土との摩擦抵抗およびビットによる切削抵抗も回転摩擦抵抗に含まれる。

b) 計測データにもとづく回転摩擦係数の算出

ここでは、計測データにもとづく回転摩擦抵抗の平均値を用いて、面板と土との摩擦係数を式(2)の T_1 から逆算した。なお、シールド機前面と土との摩擦係数 μ_4 およびカッター側部と土との摩擦係数 μ_5 は計測上から同一としてこれを μ_1

表-18 工区別回転摩擦抵抗および摩擦係数

工区	回転摩擦抵抗 T (kN・m)	摩擦係数 (μ_t)
A工区	3,330	0.23
	3,360	0.23
C工区	2,810	0.19
	2,320	0.15
D工区	2,470	0.16
	2,280	0.15
E工区	1,800	0.14
	1,580	0.12
F工区	2,150	0.16
	2,850	0.21
H工区	1,870	0.12
平均値 (砂質土)	2,438	0.17

で表す。シールド機面板に作用する切羽土圧は前述の計測データにもとづく解析より、

$$(1-\eta) \cdot q_0 \cdot Rc^2 \cdot \pi = 3583.2 \text{ kN}$$

$$q_0 = 57.3 \text{ kN}$$

である。これよりカッター側部に作用する平均土圧は、 $p_0 = 104.34 \text{ kN/m}^2$, $W = 3480 \text{ kN}$, $L = 7.78 \text{ m}$, $D_0 = 9.98 \text{ m}$ より、

$$p_0 = (104.34 + 2 \times 57.3 + (104.34 + 3480 / 7.78) / 9.98) / 4 = 92.02 \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

となる。以上の値と $b_1 = 0.52 \text{ m}$ から摩擦係数を算出すると、

$$2833.5 = \mu_t \cdot (3583.2 \cdot 4.99 \cdot 2 / 3 + 92.02 \cdot 0.52 \cdot 4.99^2 \times 2\pi)$$

から、 $\mu = 0.15$ となる。

c) 掘進データにもとづく回転摩擦係数

現設計におけるシールド機前面およびカッター側部と土との摩擦係数は起動トルク用の値であるため、掘進トルクの摩擦係数よりも大きな値となっている。そして、その値は表-13に示した推進摩擦抵抗を求める時に用いる摩擦係数と同値としている。これは、過去の施工において、泥水式シールドとしてのデータが整備されていなかったことに起因している。

南北線の他工区の実績データをもとに、式(2)の T_1 から回転摩擦係数を算出した。その結果を表-18に示す。これより、砂地盤の摩擦係数は0.12~0.23の範囲に分布しており、その平均値は0.17と前述b)の谷町シールドの計測データから算出した値0.15とほぼ一致する結果であった。このことから、シールドの平均提案トルクは回転摩擦抵抗の摩擦係数を砂地盤においては0.2を用いることができる。また、回転摩擦係数0.2は、推進摩擦係数0.42より小さく、これは泥水の潤滑効果によるものと考えられる。

6. 最大提案推力および最大提案トルクの推定

推進摩擦抵抗および回転摩擦抵抗は各工区でばらつきを有するものの、前章では平均的な推力とトルクの推定方法について述べた。ここでは、これらのばらつきを含めて実績データにもとづく最大推力と最大トルクの推定方法について述べ、さらにシールド機に装備する能力について検討する。なお、本検討では、平均実績推力については切羽泥水圧の実績値を排除した有効平均実績推力として、推進摩擦抵抗のばらつきを顕在化させて扱った。

(1) 実績データの分布曲線

図-17および図-18は、C工区の直線施工区間で有効実績推力および実績トルクの分布曲線に統計上の正規分布曲線を重ね合わせたものである。これらの図から有効実績推力および実績トルクは正規分布曲線と近似できることがわかった。この傾向は、他の工事にもあてはまる共通事項である。

統計上ではデータが正規分布をする場合、平均値に標準偏差の3倍を加えた値が発生する数値の99.7%をカバーするので、標準偏差がわかれば掘進中に発生する最大値を推定することが可能となる。

(2) 最大提案推力の推定

図-19は、表-19の南北線各工区の実績データについて、横軸に有効平均実績推力を縦軸に標準偏差をとり両者の関係を示したものである。図中の実線は、有効平均実績推力と標準偏差との関係を一次式で表したもので次式のようなになる。

$$\sigma_F = 0.12 F' + 928 \text{ (kN)} \quad (10)$$

ここに、

σ_F : 標準偏差 (kN)

F' : 有効平均実績推力 (kN)

である。

この有効平均実績推力と標準偏差との関係を用いて推力の最大値を以下のように推定することができる。

まず泥水圧を排除した有効平均提案推力(切羽土圧+推進摩擦抵抗)を推定し、これを式(10)の有効平均実績推力 F' に代用すれば標準偏差 σ_F を推定することができる。シールド掘進中の有効実績推力の変動がすでに述べたように正規分布

表-19 有効平均実績推力および平均実績トルクの実績値

	直線施工区間			曲線施工区間			有効平均実績推力 (×10kN)			平均実績トルク (×10kN・m)		
	リング No	地盤	N値	リング No	地盤	N値	曲線半径	直線施工区間	曲線施工区間	直線施工区間	曲線施工区間	
複線トンネル	A工区	486~578	To-s	30	299~486	To-s	35	703m	1041	1366	336	333
	B工区	113~214	To-s	30	—	—	—	—	1476	—	125	—
	C工区	365~505	To-s To-c To-g	30	158~282	To-s	40	270m	991	1115	281	232
	D工区	725~833	Ed-s	50	456~564	Ed-s	50	203m	3107	2962	228	247
	E工区	355~555	Ed-s	50	638~707	Ed-s	45	503m	1389	1256	180	158
	F工区	147~241	Ed-s	45	242~420	Ed-s	45	403m	702	1412	215	285
	H工区	—	—	—	250~350	To-c To-g	35	304m	—	2449	—	187
	I工区	104~192	To-c	20	193~300	To-c	15	1000m	2162	2527	303	374
	J工区	—	—	—	829~935	Ed-s	—	207m	—	698	—	118
単線トンネル	K工区	655~754	Ed-s	—	—	—	—	789	—	142	—	
	L工区	282~353	Ka-c Ka-s	—	354~440	Ka-c Ka-s	—	201m	831	575	198	133
		601~781	To-s	—	—	—	—	—	559	—	100	—

※G工区は他工区と比べ、掘進速度が1/2以下であるため対象外とした。

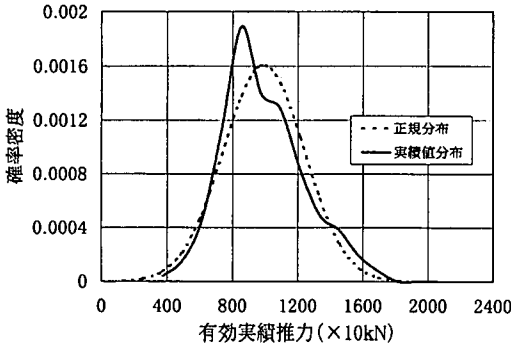


図-17 有効実績推力の分布

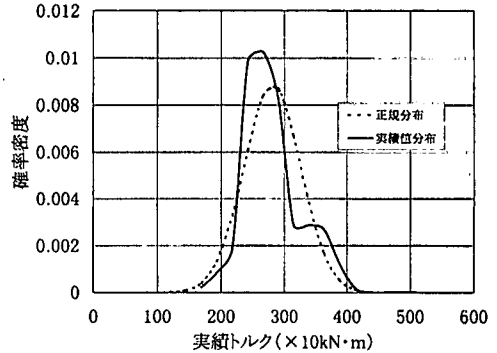


図-18 実績トルクの分布

に近似できるので、有効平均実績推力 F' と標準偏差 σ_f の3倍との和 $F' + 3\sigma_f$ は、掘進時に必要とされるであろう有効実績推力の最大値の99.7%までをカバーできる。

以上より、最大提案推力は次式により得られる。

$$F_{\max} = F' + 3\sigma_f + P_f \quad (11)$$

ここに、

F_{\max} : 最大提案推力 (kN)

P_f : 切羽泥水圧 (kN)

ここで述べた最大提案推力の推定方法を適用すれば、より合理的な装備推力の設定ができる。

(3) 最大提案トルクの推定

図-20は、有効平均実績推力と同様な考えに基づき、横軸に平均実績トルクを縦軸に標準偏差を図示したものである。図中の実線は平均実績トルクと標準偏差との関係を近似した直線であり、下式で示される。

$$\sigma_T = 0.11T' + 75 \quad (\text{kN}\cdot\text{m}) \quad (12)$$

ここに、

σ_T : 標準偏差 (kN・m)

T' : 平均実績トルク (kN・m)

である。

推力と同様に、回転摩擦抵抗を推定し、これを式(12)の平均実績トルク T' に代用すれば標準偏差 σ_T が求まる。これより、 T' と標準偏差 σ_T の3倍との和 $T' + 3\sigma_T$ が掘進時に必要とされるであろう回転摩擦抵抗の最大値、すなわち最大提案トルク T_{\max} となり次式により表される。

$$T_{\max} = T' + 3\sigma_T \quad (13)$$

以上より、回転摩擦抵抗の最大値を推定できれば、より合理的な装備トルクの設定が可能となる。

(4) 提案装備推力および提案装備トルクの推定

前述の最大提案推力および最大提案トルクは通常の掘進時のデータに基づいて統計的に求めたものであるため、通常の掘進時に発生する推力およびトルクの変動は考慮されているが、施工中のトラブル等による変動は考慮されていない。

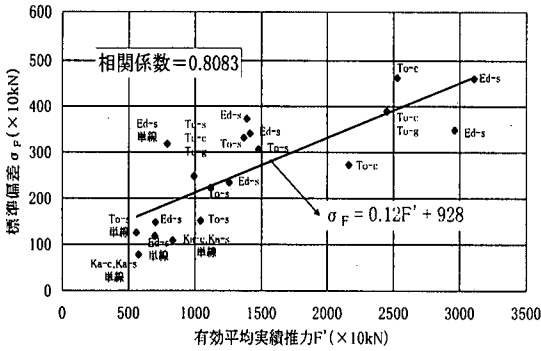


図-19 有効平均実績推力と標準偏差の関係

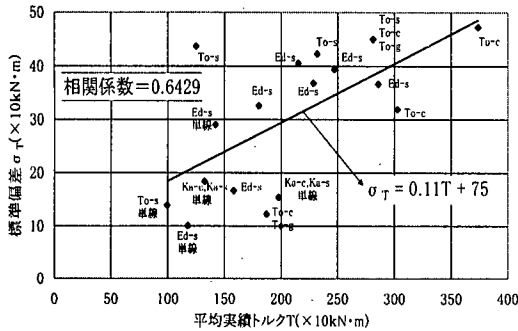


図-20 平均実績トルクと標準偏差の関係

シールド掘進中に不慮の障害物に衝突した場合や長期間停止した後に再発進する場合等は、通常の掘進に必要な能力よりも大きな能力を必要とする。シールド機に装備する推力およびトルクは、このような施工時のトラブルによる影響を考慮して決定する必要があると考えられ、次式で算出するものとする。

$$F_e = F_{\max} \times f \quad (14)$$

$$T_e = T_{\max} \times f \quad (15)$$

ここで、

F_e : 提案装備推力 (kN)

T_e : 提案装備トルク (kN・m)

f : 安全率

である。

なお安全率の設定は、過去の実施工においてトラブルが発生した時の実績データにもとづいて、推力の増加量およびトルクの増加量を参考にする。表-20 および表-21 は、掘進中のトラブルを含めた実績データの最大値と最大提案推力および最大提案トルクの関係である。安全率はその規模のトラブルにまで対処するかによって異なるが、過去のトラブル事例より、最大提案推力および最大提案トルクに安全率 $f = 2.0$ を乗じて装備

表-20 最大推力と実績推力の最大値

工区名	F_{\max} (kN)	最大実績 推力(kN)	最大実績 推力/ F_{\max}
A工区※	33,910	34,450	1.02
B工区	34,700	33,580	0.97
C工区※	32,460	58,960	1.82
D工区※	64,580	65,030	1.01
E工区※	33,810	47,000	1.39
F工区※	35,580	33,000	0.93
G工区	16,170	21,710	1.34

※印はトラブルを生じた工区を示す

表-21 最大トルクと実績トルクの最大値

工区名	T_{\max} (kN・m)	最大実績 トルク(kN・m)	最大実績 トルク/ T_{\max}
A工区※	4,690	8,000	1.71
B工区	1,890	3,260	1.72
C工区※	3,690	5,630	1.53
D工区※	3,510	7,500	2.14
E工区※	2,620	4,000	1.53
F工区※	4,010	7,000	1.75
G工区	2,020	2,900	1.44

※印はトラブルを生じた工区を示す

能力を設定すれば、過去に発生したトラブル規模には対処可能となる。

7. 結論

本論文は、外径7~10mの大口径泥水式シールドの実施工における実績データおよび現象解明のため実施した現場計測より得られた計測データにもとづき、シールド掘進に必要な推力およびトルクの推定方法を提案した。以下に本検討で得られた知見を示す。

(1) 平均提案推力および平均提案トルクの推定方法

a) 平均提案推力

平均提案推力は切羽前面抵抗と推進摩擦抵抗の2つの因子で算出する。なお、切羽前面抵抗は切羽土圧と切羽泥水圧の合計で、切羽土圧はシールド機面板で支持する。

$$F = F_1 + F_2 \quad (16)$$

ここに、

F : 平均提案推力

F_1 : 切羽前面抵抗 = $Q_e + P_f$

Q_e : 切羽土圧

P_f : 切羽泥水圧 (式(4)参照)

F_2 : 推進摩擦抵抗 (式(1)の F_2 を参照。なお、

$\mu_f = (\tan \Phi) / 2$ とする)

$$T_e = T_{max} \times f \quad (21)$$

b) 平均提案トルク

平均提案トルクは回転摩擦抵抗で算出する。

$$T = T_1 \quad (17)$$

ここに、

T : 平均提案トルク

T_1 : 回転摩擦抵抗 (式(2)の T_1 を参照。なお、砂地盤では $\mu_t = 0.2$ とする)

(2) 最大提案推力および最大提案トルクの推定方法

通常掘進時の推力およびトルクの最大値は下式で算出する。

$$F_{max} = F + 3\sigma_f \quad (18)$$

$$T_{max} = T + 3\sigma_t \quad (19)$$

ここに、

F_{max} : 最大提案推力

T_{max} : 最大提案トルク

σ_f : 推力の標準偏差 (式(10)参照)

σ_t : トルクの標準偏差 (式(12)参照)

(3) 提案装備推力と提案装備トルク決定

シールド機の提案装備能力は最大提案推力および最大提案トルクに安全率 $f = 2.0$ を乗じて求める。

$$F_e = F_{max} \times f \quad (20)$$

ここで、

F_e : 提案装備推力

T_e : 提案装備トルク

f : 安全率 (最大 2.0)

以上は、限られた実績データをもとに導いた結論であるが、ここで提案した方法でシールド機の装備能力を試算すると装備推力は約 80% に、装備トルクは約 90% に低減可能である。本論文のもとなる実績は東京都内における洪積地盤のデータであり、ほとんどが砂質系地盤に限定されている。実際の設計にあたっては、これに現場の特殊条件を考慮することは必要である。

最後に本検討に際し、データの収集分析等に尽力下さった帝都高速度交通営団藤木育雄氏、パンフィックコンサルタンツ(株)増野正男氏他多数の方々本文を借りて御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 西林聖武, 藤木育雄, 高橋聡: 泥水式シールドの掘進時におけるジャッキ推力とカッタートルクについて, トンネル工学研究論文・報告書, 第6巻/報告(56), pp.387-392, 1996.
- 2) 土木学会: トンネル標準示方書(シールド工法編)・同解説, 土木学会, pp.131-134, 1996.

(2000.5.8 受付)

CONSIDERATION REGARDING THRUST AND TORQUE OF SLURRY SHIELD MACHINE DURING DRIVE

Masatake NISHIBAYASHI, Toshihide TOKUE and Atsushi KOIZUMI

The construction result with recent large-diameter slurry shields shows that actual thrust and torque values are to a considerable extent lower than the installed capacity values.

This paper analyzes the actual performance data with large-diameter slurry shields between Komagome and Meguro of the Namboku Line constructed by the Teito Rapid Transit Authority and the measurement data during shield excavation of the Tanimachi section of the Line while providing the basic values necessary for thrust and torque of shield machines. This paper also proposes a method for estimating the installed thrust and torque of large-diameter slurry shields.