

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

A STUDY ON JACK THRUST AND CUTTER TORQUE FOR EXCAVATION WITH SLURRY SHIELD

西林 聖武[※]・藤木 育雄^{※※}・高橋 聡^{※※※}

Noritake NISHIBAYASHI, Ikuo FUJIKI, Satoshi TAKAHASHI

Generally, the large-section slurry shield is equipped with the jack thrust of 1,100-1,400 kN/m² and the cutter torque coefficient of $\alpha=10-14$ according to the past record of delivery. Since this equipment capacity is far above the actual achievement during excavation, it is considered reasonable, as a result of analysis of subway construction of Teito Rapid Transit Authority, to set the practical thrust at 900-950 kN/m² and the cutter torque coefficient at $\alpha=9-9.5$

Keywords : slurry shield, excavation, equipment capacity, jack thrust, cutter torque

1. はじめに

鉄道トンネルのような大口径(単線約 $\phi 6.7\text{m}$, 複線約 $\phi 10.0\text{m}$)シールドには、泥水式シールドが多用されている。一般に、大口径の泥水式シールドに装備するジャッキ推力は、 $1,100\sim 1,400\text{kN/m}^2$ ¹⁾、カッタートルクのトルク係数 $\alpha=10\sim 14$ ¹⁾とする場合が多い。しかし、装備推力およびカッタートルクは、計算結果から得られる値や施工実態に比べ、不測の事態に対する対応および実績等から相当余裕を見込んでいるのが実情である。

そこで、帝都高速度交通営団(以下、営団地下鉄)が半蔵門線・南北線で施工した8区間(総施工延長約6,200m)の複線シールドの洪積地盤における泥水式シールドの施工実績から、装備すべき合理的なジャッキ推力およびカッタートルクの大きさについて考察を行ったので報告する。

2. 施工条件およびシールドの諸元

半蔵門線・南北線で施工した、シールド掘進の施工条件およびシールドの主要諸元を表-1に示した。これから以下のような特徴が上げられる。

(a) シールドの掘進土質は、洪積層である東京層の砂質土・砂礫・粘性土、本郷層の砂質土・砂礫および江戸川層の砂質土・砂礫等の硬質地盤であり、いずれも地下水が豊富で被圧されている。

(b) トンネルの平面・縦断線形は、民地部通過を最小限とするため、小さい曲線(最小半径 $R=165\text{m}$)や反

※ フェロー 帝都高速度交通営団 建設本部計画部
※※ フェロー 帝都高速度交通営団 建設本部
※※※ 正会員 帝都高速度交通営団 建設本部計画部 積算課

表-1 施工条件およびシールド仕様

	A	B	C	D	E	F	G	H
延長 (m)	949	613	1,064	1,060	858	711	276	643
セグメント	RC: 1.2m	RC: 1.2m	RC: 1.2m, D: 1m	RC: 1.2m, D: 1.1m	RC: 1.2m	RC: 1.2m	RC: 1.2m	RC: 1.2m
地質概要	Tos, Toc, Hos, Hog	Tos, Toc, Hos, Hog	Tos, toc, Tog, Eds	Eds, Edc	Tog, Eds	Tos, Tog, Eds	Tos, Toc, Tog	Tos, Toc, Tog
土 被 (m)	10~14	13~15	17~32	15~35	10~19	10~18	8~13	20~31
最大間隙水圧	120 kN/m ²	75 kN/m ²	260 kN/m ²	280 kN/m ²	180 kN/m ²	180 kN/m ²	70 kN/m ²	190 kN/m ²
最小曲線半径	R=254M	R=402M	R=165M	R=203M	R=500M	R=403M	R=335M	R=304M
最大勾配 (%)	2.9%	0.9%	3.5%	3.5%	3.4%	3.5%	3.3%	3.5%
通過地	道路100%	道路100%	道路64%	道路57%	道路・採99%	道路・採100%	道路等79%	道路58%
近接・交差構造物	少ない	少ない	非常に多い	非常に多い	少ない	少ない	少ない	非常に多い
シールド外径 (mm)	9,700	9,700	10,000	10,020	9,700	9,700	9,700	10,000
機 長 (mm)	8,500	8,500	8,670	8,790	8,805	8,700	7,320	8,990
機長/外径	0.82	0.82	0.83	0.84	0.86	0.85	0.71	0.86
重 量 (kN)	8,500	7,700	10,000	8,630	7,780	8,240	7,400	7,600
その他	追廻シールド使用	自動粗立装置	中折れ後戻押し	中折れ前戻押し 同時注入装置	追廻シールド使用 同時注入装置		同時注入装置	
ジャッキ (kN)	3,000×29本	3,000×29本	3,000×29本	3,000×29本	3,000×29本	3,000×29本	3,000×29本	3,000×29本
装備推力 (kN)	87,000	87,000	87,000	87,000	87,000	87,000	87,000	87,000
(kN/m ²)	1,180	1,180	1,110	1,100	1,180	1,180	1,180	1,110
最大トルク (kN・m)	15,600	15,470	17,110	17,480	15,580	14,770	11,990	15,588
常用トルク (kN・m)	10,400	10,310	14,260	11,650	10,390	9,850	7,990	10,392
α (トルク係数)	11.4	11.3	14.3	11.7	11.4	10.8	8.8	10.4
駆動機	45KW×12台	45KW×13台	45KW×15台	45KW×13台	45KW×13台	55KW×9台	45KW×10台	45KW×13台
カットピッチ数 (個)	286	385	530	423	373	466	204	468
面取開口率 (%)	22	25	28.2	28.2	30	30	28	28

- 注) 1. RC:鉄筋コンクリート系セグメント, D:ダクタイルセグメント
2. Tog:東京府砂礫, Tos:東京府砂質土, Toc:東京府粘性土, Hos:本郷砂質土, Hog:本郷砂礫, Eds:江戸川府砂質土, Eds:江戸川府砂礫
3. 最大間隙水圧は、シールド中心からの値を示す
4. C、D工区以外のシールドは一体形
5. T (常用トルク) = α・D³とした時、D:シールド外径 (mm), T:kN・m

向曲線等を多く用いている、また縦断線形は建物等の基礎杭の下を通過するため、鉄道では最急勾配の3.5%が多く用いられている。3区間では民地部分が約40%を占め、近接・交差構造物も多く都市鉄道トンネルの施工環境の困難さを示している。

(c) シールド外径10,000mm, 9,700mmとも3,000 kNジャッキ29本を装備しており、装備推力は87,000 kN (1,100kN/m²)、カッタートルクのトルク係数はα 11~14(9,850~10,400 kN・m;中折れ形11,650~14,260 kN・m)である。鉄道トンネルとしては急曲線区間(R=165m,203m)のシールドは、中折れ装置を採用している。なお、G工区は施工延長が短く、また掘進速度が通常の1/2程度と遅いことから、経済性等を考慮して他工区と比べ機長を短くし、さらにカッタートルク、カッタービット等を通常より約30%以上低減している。

3. シールド掘進時の推力、カッタートルク

各工区の施工実績を表-2に示す。

施工実績は、トラブル等により掘進停止期間がなかった初期掘進、本掘進、曲線区間および到達部付近について調べた。各区間の数値は、初期掘進および到達部付近は50R間、中間部および曲線部は100R間の平均値である。

表-2 施工実績

工区	線形	総推力 kN	ジャッキ 本数	速度 m/min	中折れ 角度 °	配水圧 kN/m ²	初期掘進	中間部	到達部付近
A	R=254	14,780	20	3,330	1.9	-	94	70	9,610
B	直線	26,590	18	3,360	2.4	-	-	190	12,550
C	R=180	22,830	21	3,300	2.6	0.9	15	130	12,620
D	R=417	33,700	21	3,032	2.9	0.7	11	220	16,320
E	直線	24,420	17	2,188	2.8	-	0	100	17,030
F	直線	21,740	26	3,263	2.9	-	0	124	12,580
G	R=335	16,920	24	1,458	1.2	-	42	80	11,010
H	直線	27,760	26	1,520	1.5	-	0	226	16,010

注) ※推力は、泥水圧を除いた推力を示す

3.1 発進部、中間部、到達部における差違

発進部(初期掘進)の泥水圧を除く推力(以下、総推力は泥水圧を含めたものとし、推力は泥水圧を除いたもの

とする)は、掘進速度が遅いことから中間部の約65%程度と低く、到達部付近は中間部と掘進速度にあまり差がないことから、中間部の推力と同等であった。なお、カッタートルクは各区間での差が見られなかった。

3.2 直線および曲線施工

中間部と到達付近の推力とカッタートルクの関係、掘進速度と推力、掘進速度とカッタートルクをそれぞれ、図-1・図-2・図-3に示す。

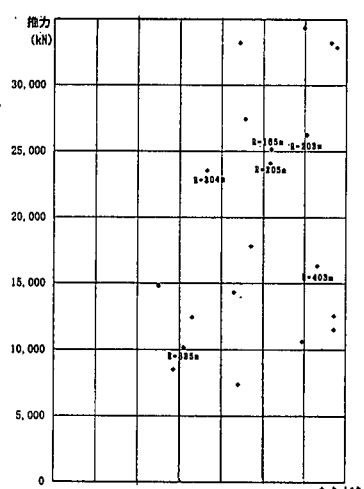


図-1 推力とカッタートルクの関係

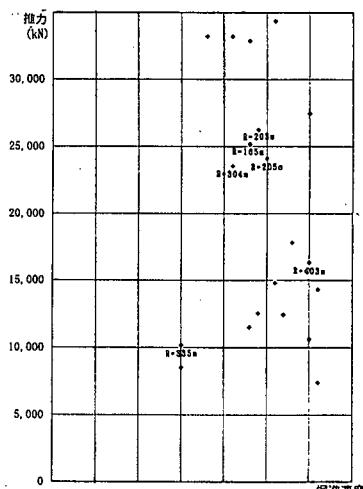


図-2 掘進速度と推力の関係

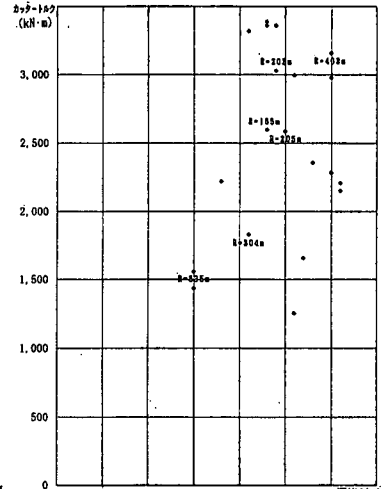


図-3 掘進速度とカッタートルクの関係

(a) 直線施工は、曲線施工に比べ推力、カッタートルクとも低い傾向にある。直線施工時の推力とカッタートルクには相関が見られず、掘進速度上昇による変化も少ない。これは地盤、掘進管理の違いに因るところが大きいと考えられる。

(b) 曲線施工時の推力とカッタートルクは、掘進速度の上昇に伴い増加する傾向にある。特に、カッタートルクは、掘進速度に比例して増加しており、一体形が中折れ形に比べ大きくなっている。一方、推力は、中折れ形が一体形に比べ30%以上大きく、カッタートルクは同程度であった。また、コビーカッターによる余堀量が大きい一体形は、中折れ形に比べ推力は小さく、カッタートルクが大きくなっている。

これらはコビーカッターによる土の外周抵抗により、カッタートルクが上昇し、逆に余堀りにより土の外周抵抗が小さくなり推力が低下したと考えられる。反対に、中折れ形は余堀量を小さくできるが、シールドが中折れ(0.9~1.3°)しているためシールド外周と土の抵抗が増加し、一体形に比べ推力が大きくなったと考えられる。

なお、G工区は、泥水処理設備の容量が小さいため、掘進速度を通常の1/2程度に低下しており、他工区と比較し推力、カッタートルクは最も小さい。

3.3 大きな推力、カッタートルクが作用した事例

1) 障害物衝突(古井戸: $\phi 100 \cdot 400\text{mm}$ の2重鋼管)

D工区において掘進中、古井戸に衝突し、カッターデスク外周に鋼管が巻き付き、カッタートルクが最大値まで上昇したため停止した。衝突した位置は土被33.5m、N値50以上の江戸川砂層であり、間隙水圧はシールド中心から280 kN/m^2 であった。衝突前後の総推力およびカッタートルクの変化を図-4に示す。

障害物衝突時の総推力は、65,000kNであった。カッタートルクは、一瞬装備能力まで達したが、撤去作業位置までの約15m間は、常用トルクの約60% (8,250~8,660 kN・m) で掘進可能であった。障害物の撤去作業は、切羽前面に止水と地盤補強のため薬液注入を行ってから実施した。障害物撤去後の最大総推力は、薬液注入区間で作用し74,560 kNであった。これは装備推力の約85%である。カッタートルクは、2,500~3,200 kN/m²と通常掘進と同程度であった。

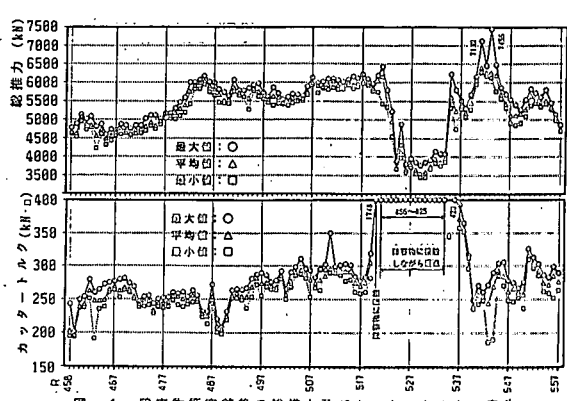


図-4 障害物衝突前後の総推力及びカッタートルクの变化

2) 長期停止(80日間)
C工区において、長期停止する必要が生じた

このため、停止位置は、N値50以上の江戸川砂層の安定した硬質地盤(土被32m)とした。間隙水圧は、シールド中心から約120 kN/m²と低かった。

切羽安定対策として、スリット遮閉装置により面版を閉鎖し、チャンバー内の泥水に増粘剤を添加した半ゲル状に改良し、切羽圧力を185 kN/m²に設定した。

再掘進時の総推力は65,000 kNで、装備推力の約75%であった。なお、再掘進後最初の1R間の平均総推力は49,010 kNであり、停止前とほぼ同程度であった。また、再掘進後のカッタートルクは、起動時5,000 kN・m、1 R間の平均は2,980 kN・mと小さかった。これは、計画的に停止したことから、再掘進に対する充分な対策を講じた結果であると考えている。

4. 総推力とカッタートルクに与える要因と装備能力

所要推力と所要トルクの計算値を表-3に示す。また、装備推力と稼働推力との関係、装備トルクと稼働トルクとの関係を、それぞれ表-4、表-5に示す。

表-3 各工区における所要推力及び所要トルクの計算一覧

	A	B	C	D	E	F	G	H		A	B	C	D	E	F	G	H		
F1	18,370	15,410	17,020	11,830	12,440	12,840	7,420	8,510	28%	T1	706	640	180	457	430	150	286	455	7%
F2	0	0	0	195	0	0	240	100	0.1%	T2	2,930	3,350	4,800	4,800	5,800	7,540	3,560	4,820	86%
F3	29,560	23,650	31,420	43,370	24,530	19,950	24,390	31,400	58%	T3	-	-	4	-	-	-	-	-	0%
F4	5,180	11,150	0	0	10,800	14,400	0	0	12%	T4	26	30	23	108	118	46	80	147	1%
F5	210	210	360	240	240	150	114	210	0.5%	T5	412	42	51	80	80	458	80	80	3%
F6	400	40	200	0	0	400	0	0	0.3%	T6	-	516	-	-	-	490	-	-	3%
Σ F	53,720	50,460	49,000	55,635	48,010	47,740	32,164	40,220	100%	Σ T	4,074	4,578	5,058	5,445	6,428	8,684	4,006	5,502	100%
kN/m²	727	683	624	706	650	646	435	512	623	α	4.5	5.0	5.1	5.4	7.0	9.5	4.4	5.5	6

F1: シールド外周面と土との摩擦抵抗、あるいは粘着抵抗。
F2: 掘進に伴う、フード部刃先端の貫入抵抗。
F3: 切羽前面抵抗(チャンバー内圧力)。
F4: 変向抵抗(曲線施工、蛇行修正、スリット抵抗等)。
F5: 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。
F6: 後方台車の牽引抵抗。
Σ F: 推進諸抵抗の総和(kN)。
T1: 土の切削抵抗によるトルク。
T2: 土との摩擦抵抗によるトルク。
T3: 土の攪拌、かき上げ抵抗によるトルク。
T4: 軸受抵抗によるトルク。
T5: 軸受シール摩擦によるトルク。
T6: 減速装置の機械損失によるトルク。
Σ T: カッター所要トルク(kN・m)。

4.1 総推力

「a」 計算上の所要総推力は、隔壁に作用する泥水圧(58%)が最も大きく、次いでシールド外周面と土との摩擦抵抗、あるいは粘着抵抗(28%)であり、これらで約90%占める。その他は、変向抵抗(曲線施工・蛇行修正等)12%、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推進に伴うフード部刃先貫入抵抗等である。

実施工では、泥水圧が占める割合は40~53%となっている(表-2)。これは、設計泥水圧のうち、土圧は一

一般的に「静止土圧相当」²⁾を考慮しているが、硬質地盤での施工泥水圧は「主働土圧相当+20 kN/m²」で施工していることが多いためと考えられる。

最大総推力が作用したのは、表－4に示すように停止期間が長い、障害物に衝突、特殊セメント注入または薬液注入による地盤改良区間である。最大総推力は装備総推力の26～86%(311～946 kN/m²)であり、平均総推力は19～53%(225～563 kN/m²)となっている。

(b) 総推力に与える要因は、泥水圧による切羽前面抵抗が支配的であるが、施工実績からも長期停止によるシールド外周面と土との摩擦抵抗および薬液注入等の地盤改良による粘着抵抗が大きいと考えられる。

表－4 装備推力と稼働推力(最大・平均)との関係

工 区	装 備 推 力		最大総推力		装 備 / 最大		平 均 総 推 力		備 考
	kN	kN/m ²	kN	kN/m ²	総推力	kN	平均/装 備 総推力		
A	1,180	35,880	486	41%	28,000	379	32%	セメントのせり及び真注圧倍(60kN/m ²)に増加	
B	1,180	37,750	511	43%	20,140	273	23%	ビザンツ 修正及び2日休止後掘進開始時	
C	1,110	65,000	828	75%	34,300	437	39%	長期停止後(80日)の再掘進時	
D	1,100	74,560	946	86%	46,500	590	53%	障害物除去のため薬液注入区間	
E	1,180	47,000	636	54%	24,000	325	28%	正月休み(10日間)後の再掘進時	
F	1,180	40,380	546	46%	23,300	315	27%	正月休み(16日間)後の再掘進時	
G	1,180	23,000	311	26%	16,600	225	19%	到達部の杭材(H-300)衝突時	
H	1,110	62,430	795	72%	44,250	563	51%	ビザンツ 室部地盤改良区間(約10m)掘進時	

注) 最大稼働推力は1 Rの最大値、平均稼働推力は工区全体の単純平均

表－5 装備トルクと稼働(最大・平均)トルクとの関係

工区	装備トルク		最大稼働トルク	α	最大/常用比率	平均稼働トルク	α	平均/常用比率	備 考
	最大kN・m	常用kN・m							
A	15,600	10,400	4,000	4.4	0.38	2,710	3.0	0.26	固結土の溶解による粘性増大及び休止
B	15,470	10,310	3,260	3.6	0.32	1,960	2.1	0.19	によるチャンパー内の掘削土砂増加
C	17,110	14,260	5,630	5.6	0.39	2,880	2.9	0.20	長期停止(80日)後の再掘進時
D	17,480	11,650	8,660	8.6	0.74	2,760	2.7	0.24	障害物部分の薬液注入区間掘進時
E	15,580	10,390	5,500	6.0	0.53	2,000	2.2	0.19	発進部(CJG)区間掘進時
F	14,770	9,850	4,080	4.5	0.41	2,700	3.0	0.27	同 上
G	11,990	7,990	1,890	2.1	0.24	1,500	1.6	0.19	到達部の鋼材(H-300)衝突時
H	15,590	10,390	6,180	6.2	0.59	2,120	2.1	0.20	チャンパー内に異物(セメント)が増大し負荷大

注) 最大稼働トルクは1 R間の最大値、平均稼働トルクは工区全体の単純平均

4.1.2 装備総推力

装備総推力は、施工実績および計算値等から概略以下のように考えることができる。

装備総推力≡ {[設計泥水圧]+[シールド外周面と土との摩擦抵抗及び粘着力]} × [Fa] ----- (1)

[設計泥水圧]は、事前の入念な地質調査等から適正な値を設定できる。[シールド外周面と土との摩擦抵抗及び粘着力]は、通常掘進時において[設計泥水圧]と同様、適正な値を設定できる。また、計画的な長期停止は対策が可能である。[Fa]は障害物との衝突、施工ミス等による不慮の停止等に対する安全率である。この安全率は一概に論じられないが、D工区の最大総推力から想定すると1.5～1.6が妥当と考えられる。

したがって、装備総推力は以下のとおりとなる。

{[計算値]～[施工時最大総推力]} × (1.5～1.6) ≒ 950 kN/m² ----- (2)

これは、従来の装備推力の80～86%である。

4.2 カッタートルク

(a) 計算上の所要トルク(常用)は、土との摩擦抵抗によるカッタートルクが支配的で86%を占めており、土の切削抵抗7%、機械的抵抗3%となっている。一方、カッター所要トルクは、次式が一般的に用いられており、過去の実績からシールド外径約10,000mmで $\alpha=10\sim14$ となっている¹⁾。

$T = \alpha \cdot D^3$ ----- (3)

T: 所要カッタートルク(kN・m), D: シールド外径(m), α : トルク係数

実施工における通常掘進時のカッタートルクは、計算上の所要トルクの31%～67%となっている。これを α 値で表すと2～6である。

最大トルクが作用したのは、表－5に示す様に、チャンパー内の粘性増大および土砂・異物の増大、長期

停止，障害物に衝突，発進部の地盤改良区間である．最大トルクは常用トルクの24%～59% ($\alpha=2\sim6$)である．
 なお，古井戸に衝突した際，作用した最大稼働トルクを除いている．また，平均稼働トルクは，装備常用トルクの19%～27% ($\alpha=1.6\sim3$)となっている．

(b) カッタートルクに与える要因は，土との摩擦抵抗が支配的であるが，施工実績からもチャンパー内の粘性増加(固結シルトの溶解等)および土砂・異物の堆積等も大きいと考えられる．

4.2.1 装備カッタートルク

装備カッタートルクは，施工実績および計算値等から概略以下のように考えることができる．

$$\text{装備カッタートルク} = \{[\text{土の切削抵抗}] + [\text{土との摩擦抵抗}]\} \times [Ta] \quad \text{----- (4)}$$

[土の切削抵抗]および[土との摩擦抵抗]は，詳細な地質調査等から適正な値を設定できる．[Ta]は，障害物との衝突，施工ミス等による安全率である．この安全率は，一概に論じられないが，D工区の最大稼働トルクから想定すると，1.7～2.0が妥当と考えられる．

したがって，装備カッタートルクは以下のとおりとなる．

$$\{[\text{計算値}] \sim [\text{施工時最大稼働トルク}]\} \times (1.7 \sim 2.0) \approx 900 \sim 950 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad \text{----- (5)}$$

これは，従来の装備カッタートルクの90%であり， $\alpha=9\sim9.5$ となる．

5. まとめ

営団地下鉄が施工した複線シールドの実績を基に装備推力，装備カッタートルクの検討を行ってきた．その結果，N値50以上の洪積地盤で土被35m，間隙水圧約300 kN/m²程度を想定すると，地下鉄複線シールドに装備する総推力，装備カッタートルクは，次に示す値が妥当と判断される．これらの値は，都市トンネルにおける困難な施工環境から，特に慎重な施工をしなければならない場合に提案するものである．

・装備総推力 $\approx 950 \text{ kN/m}^2$

・装備カッタートルク900～950 kN・m $\alpha=9\sim9.5$

今回，施工実績をもとに装備総推力・装備カッタートルクの合理的な値について検討してきたが，今後さらにその妥当性をより詳細に検討する必要があると考えている．

なお，これまでに営団地下鉄が施工した硬質地盤における，泥水式シールドの施工実績(複線12，単線6本)施工実績は，以下のとおりとなっていることを付記する．

	総 推 力		カッタートルク	
	最 大	平 均	最 大	平 均
複 線	53%	36%	4.7	2.9
単 線	58%	47%	6.7	4.8

注) 総推力の最大，平均は装備総推力に対する比率を示す．また，カッタートルクの数値はトルク係数 α を示す．

また，神田川・環状7号線地下調節池工事(シールド外径13,940mm)における施工実績の最大総推力は，装備総推力の52% (66kN/m²)，平均総推力は25～45%であり，カッタートルクの最大値は $\alpha=5$ と報告されている³⁾．

【参考文献】

- 1) 土木学会：トンネル標準示方書(シールド工法編)・同解説，1996.7
- 2) 中山隆・中村信義・中島信：泥水式シールド掘進に伴う硬質地盤の変形解析について，土木学会論文報告集，第397号/VI-9，pp.133～141，1988.9
- 3) 村木英樹：『世界都市東京』今，利川は地下へ，第39回「シールド工法講習会テキスト」きびさを記述，日本プロジェクト・リサーチ，pp.46～66，1995.，
- 4) 渡多慶明：超大断面トンネル施工用シールドの設計における考え方，第27回「シールド工法講習会テキスト」最近の新技术と超大断面への展開，日本プロジェクト・リサーチ，pp.96～109.1987.3