

TBM の掘削抵抗に関する研究

Study on Cutting Force of TBM

東京大学 福井 勝則* ・大久保 誠介** ・小田 謙一***

Katsunori FUKUI, Seisuke OKUBO and Kenichi ODA

In previous paper, equations (1) and (2) for estimating rock strength with TBM cutting force are proposed based on experimental findings. Constants c_1 and c_2 in equations (1) and (2) should be the function of the design parameters of TBM (tunnel diameter, cutter diameter, cutter distance etc.).

In this study, the relationship between constants (c_1 and c_2) and design parameters of TBM was examined for ten tunnels. It was found that c_1 had strong influence on a cutter diameter and c_2 had influence on tunnel diameter and cutter diameter.

1. はじめに

我が国において、全断面トンネル掘進機 (TBM) によるトンネル掘削の件数が飛躍的に増加している。その最大の理由は、月進 400m 以上の高速掘進が期待できることであろう。しかしながら、切羽を目視できないことが原因で TBM が軟弱層に遭遇してしまい、掘削が数カ月も停止することがままある。これを防ぐために、著者らは TBM の掘削抵抗から切羽の岩盤強度を推定する手法を既報¹⁾で報告した。ディスクカッタによる過去の室内切削試験から、TBM での推力 F_N 、トルク T_R は岩盤強度 σ_c 、貫入量 (カッタの押し込み量) p によって次式で表される¹⁾。

$$F_N = c_1 \cdot \sigma_c \cdot p \quad (1)$$

$$T_R = c_2 \cdot \sigma_c \cdot p^{1.5} \quad (2)$$

ただし、 c_1 および c_2 は TBM の諸元 (掘削径、カッタ径、カッタ間隔など) による定数である。手法的には、TBM の掘削抵抗 (推力およびトルク) から貫入量の影響を除去して、切羽での岩盤強度を求めようとするものである。いくつかのトンネルで、掘削抵抗から推定した岩盤強度をシュミットハンマー打撃試験結果や岩盤観察結果などと比較したところ、よく一致した。また、得られた岩盤強度をいくつかの段階に分けることによって、岩盤分類が可能であることも既報^{2, 3)}で示した。

今まで著者らは、(1)、(2)式から推定した岩盤強度が一軸圧縮試験やシュミットハンマー打撃試験結果と合うように c_1 、 c_2 を決定した。この定数は TBM の諸元によるものであるため、その諸元から算定できるはずである。そこで本研究では、 c_1 、 c_2 と TBM の諸元の関係について検討した結果を述べることにする。本研究

* 正会員 工博 東京大学助教授 工学部地球システム工学科

** 正会員 工博 東京大学教授 工学部地球システム工学科

*** 東京大学大学院修士課程 工学系研究科地球システム工学専攻

の第一の目的は、岩盤調査結果より c_1 、 c_2 を求める代わりに、TBM の諸元から c_1 、 c_2 を決定することにより、掘削当初から岩盤強度の推定が可能となることである。第二の目的は、TBM の設計段階では室内切削試験結果に基づいて推力やトルクが決定されているが、実際の施工データからフィードバックすることによって、より精度の高い設計手法の確立をめざすことである。

2. TBM の諸元と操作方法

著者らが整理した 10 本のトンネルに関する TBM の諸元を表 1 に示す。カッタ径は、355.6 mm (14 inch) から 482.6 mm (19 inch) までで、掘削径が大きいほどカッタ径は大きくなる傾向は見られるが、明瞭ではない。これは、最近なるべく大きな径のカッタを用いることによって、摩耗によるカッタの交換回数を減らそうとする傾向があるためである。掘削径をカッタ数で割った平均カッタ間隔は、カッタ径によって大きくしている傾向も見られる。インバータ制御などによってカッタヘッド回転速度が可変のものが最近多くなっていることもわかる。また、外周部での最大カッタ速度がほぼ 2 m/s となるように最大回転速度は定められており、掘削径が多くなるに従い最大回転速度は減少している。設計推力 F (MN) はほぼ掘削径 D (m) に比例している ($F=1.87 D$)。カッタ数は掘削径にほぼ比例するように定められており、設計推力は各カッタの合力となるため、設計推力は掘削径に比例することとなる。また、各カッタの回転力とそのカッタの回転半径をかけたものがトルクとなるため、最大トルクは掘削径の 2 乗に近い関係となっている。

表 1 には各トンネルの岩盤強度、貫入量、推力、トルクの平均値も示した¹⁻⁵⁾。表中の岩盤強度は掘削抵抗から推定した岩盤強度の平均値であり、花崗岩を主体とする A、D、G、H では比較的大きな値となっている。また、岩盤強度が比較的大きい D、E、G、H では貫入量が小さい傾向も見られる。

著者らが調べた限りにおいて、掘進速度がなるべく一定になるように TBM は操作される。これは工期短縮のため掘進速度を高くしたいが、あまり掘進速度を上げては排出口や支保の建て込みが間に合わなくためである。そのため、既報²⁾で示したように、ある岩盤強度以下であれば掘進速度はほぼ一定となる。(1)、(2)式からわかるように同じ貫入量で掘削した場合、推力やトルクは岩盤強度に比例する。岩盤が比較的軟弱な場合には TBM の推力やトルクに余裕があるため、掘進速度が一定になるように推力を減少させたり、カッタヘッ

表 1 TBM の諸元および施工結果

	トンネル名		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
			平谷発電所 導水路	二軒小屋発 電所導水路	道志 導水路	TEE	小河内ダ ム導水路	新潟山発電 所導水路	香港柴湾 送電線	舞子	津久井 導水路	滝里発電所 導水路
	岩種		花崗岩	砂岩 粘板岩	安山岩 凝灰岩	花崗岩	砂岩 粘板岩	安山岩 凝灰岩	花崗岩	花崗岩	凝灰岩	砂岩 泥岩 頁岩
諸元	掘削径	m	2.60	2.75	3.00	3.56	3.60	3.80	4.80	5.00	5.40	8.30
	カッタ径	mm	394.0	394.0	355.6	432.0	355.6	432.0	482.6	394.0	432.0	432.0
	カッタ数 n	個	19	20	27	25	34	27	32	37	37	52
	カッタ間隔 s	mm	68.4	68.8	55.6	71.2	52.9	70.4	75.0	67.6	73.0	79.8
	回転速度	rpm	4 ~ 12	9.5	~ 7.6	11.3	~ 10	4 ~ 10	11.5	7.5	6.3	2.6 or 5.3
	設計推力 F	MN	4.12	4.40	8.00	7.15	4.30	8.00	10.0	8.31	9.12	12.4
	F/n	kN/個	217	220	296	286	126	296	313	225	246	238
設計トルク T	kNm	289	300	637	540	430	725	1982	1058	1363	3920	
施工結果	岩盤強度	MPa	76.8	53.4	67.0	120	76.6	27.4	92.7	140	54.7	30.0
	貫入量 p	mm/rev	6.8	7.7	8.2	4.4	3.1	6.9	4.3	3.2	5.9	10.7
	平均推力 F_N	MN	2.22	1.45	1.67	4.25	1.14	2.04	8.07	4.55	5.26	6.17
	平均トルク T_R	kNm	210	210	310	-	120	250	900	470	590	770
	F_N/F	-	0.54	0.33	0.21	0.59	0.27	0.26	0.81	0.55	0.58	0.50
	T_R/T	-	0.73	0.70	0.49	-	0.28	0.34	0.45	0.44	0.43	0.20
	s/p	-	10	8.9	6.8	16	17	10	17	21	12.4	7.5
	c_1	m	4.85	5.52	3.23	12.5	5.11	13.5	21.7	11.0	17.7	21.8
	c_2	m ^{0.5}	9.03	9.84	6.87	-	9.95	21.8	37.8	21.0	26.7	25.9
	c_1/n	m	0.26	0.28	0.12	0.50	0.15	0.50	0.68	0.30	0.48	0.42
	c_2/n	m ^{0.5}	0.48	0.49	0.25	-	0.29	0.81	1.18	0.57	0.72	0.50
	$a_3/n/r$	m ^{0.5}	0.61	0.60	0.28	-	0.27	0.71	0.82	0.38	0.45	0.20
	a_3	m ^{0.5}	2.39	2.16	2.36	-	1.80	1.42	1.21	1.27	0.93	0.48

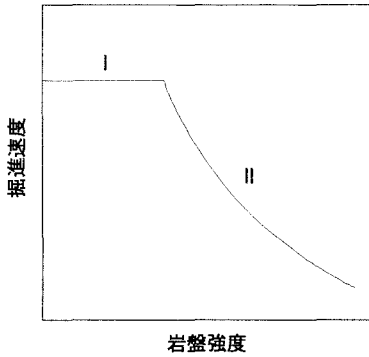


図1 掘進速度と岩盤強度の模式図

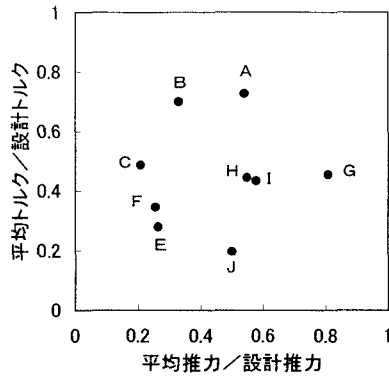


図2 設計値で正規化した平均推力および平均トルクの関係

ド回転速度を下げたりして調整する。他方、ある岩盤強度以上では推力あるいはトルクが設計値に近づくため、TBM が故障しないように推力あるいはトルクをある値で制限することとなる。そのため、貫入量が小さくなり掘進速度が低下してしまう。これを模式的に示

すと図1のようになる。図1において領域Iでは後方設備の制約から掘進速度はほぼ一定であり、領域IIでは推力あるいはトルクの制約により掘進速度は低くなる。施工においてどちらかの制約が支配的であったかは、平均推力を設計推力で、平均トルクを設計トルクで正規化してみればわかる。すなわち、正規化した推力あるいはトルクが1に近ければ領域IIに近い状態で掘削したこととなる。表1にその値を、図2に両者の関係を示す。図でA、Bのトルクは設計トルクに近く、Gでは設計推力に近い値で掘削していることがわかる。逆に、C、E、Fでは推力が設計値の20～30%、E、Jではトルクが設計値の20～30%と比較的小さくなっている。領域Iの状態では施工された場合には推力やトルクの諸元が余裕を見て設計・施工が行われたことを表しており、領域IIの場合には推力あるいはトルクに余裕がなかったことを表している。理想的には、施工中には余裕がほしいし、過大な推力やトルクの諸元も無駄であるため、図2において適度な位置に現れることが望まれる。

3. 掘削抵抗

表1に各TBMで求めた(1)、(2)式の定数 c_1 および c_2 を示す。2章で述べたように設計推力はほぼ掘削径に比例しているため、 c_1 と掘削径の関係を図3(a)に示す。ばらつきは大きいですが、掘削径の増加に従い c_1 も増加する傾向がある。図3(b)には c_2 と掘削径の関係を示したが、 c_1 同様掘削径の増加に従い c_2 も増加する傾向は見られるもののばらつきは大きい。

次に、TBMの掘削抵抗と既報⁶⁾でまとめた従来の室内切削試験の関係を検討してみることにする。 c_1/n と相関性のよいものを探した結果、カッタ径との相関が最もよかった。図4(a)に c_1/n とカッタ径の関係を示す。図には、西松およびMovinkelの式⁶⁾における関係も示した。既報⁶⁾で(1)式と同じ形式をしているものは、この両式の間に入る。図ではカッタ径の増加に従い c_1/n は線形的に増加しているが、西松の式はカッタ径356mm、Movinkelの式はカッタ径394mmの時の値に近く、西松、Movinkelの式ともカッタ径によってほとんど変化していない。既報⁶⁾の中でGraham、Movinkel、Snowdon、Nelsonの式ではカッタ径の影響を考慮していない。他方、西松、Sanio、Roxboroughの式ではカッタ径の影響を考慮しており、カッタ径の平方根に比例するとしている。Sanio⁷⁾、Roxborough⁸⁾では切削抵抗に関する理論的な検討も行っており、岩盤とカッタの接触面積がカッタ径の平方根に比例するため、このような式を提案している。カッタ径の平方根に c_1/n が比例するとした場合、カッタ径が300mmから500mmに増加しても c_1/n は20%程度大きくなるだけで、実際のTBMで求めた c_1/n とはその傾向が異なる。この理由としては、いくつか考えられるが、カッタ先端形状の影響の可能性が高いと考えている。従来の切削試験では、カッタ先端の刃先角は90°程度のものを用いていたが、最近のTBMでは先端が180°に近い扁平状のものが用いられている⁴⁾。これは摩耗によるカッタ寿命を延ばすためであり、カッタの刃先長はカッタ径にだいたい比例している。そのため、カッタ

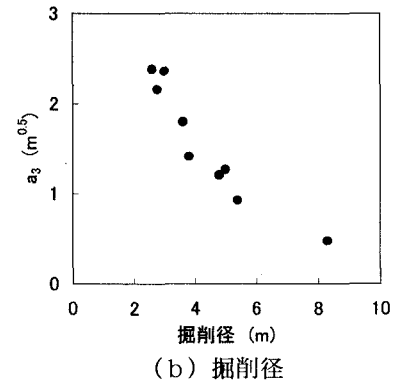
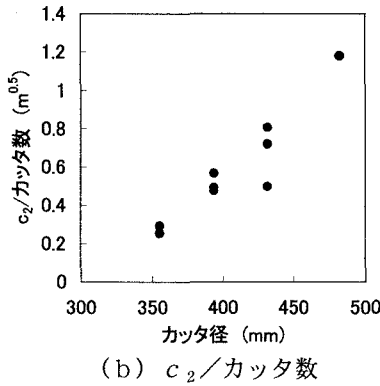
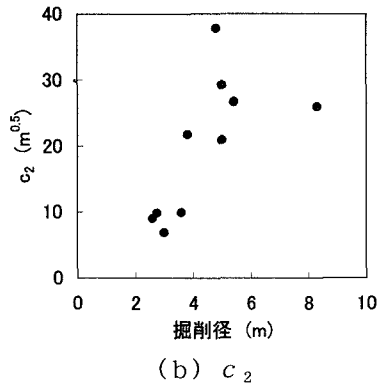
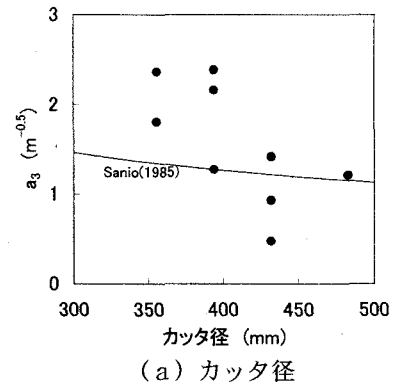
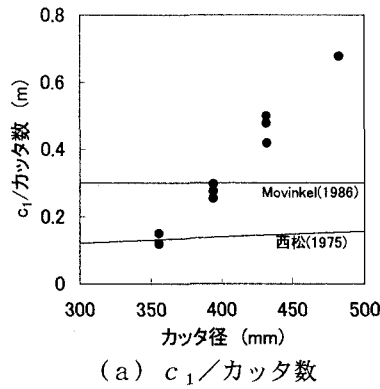
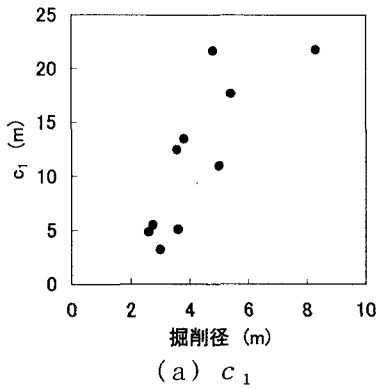


図3 掘削径による影響

図4 カッタ径による影響

図5 (a) a_3 の変化

径が大きくなると受圧面積が大きくなる効果と応力集中が低下する効果が合わさって、 c_1 が大きくなったのではないかと考えている。この点は、実際に切削試験を行えば、確認することができるので今後の課題としたい。

図4(b)に c_2/n とカッタ径の関係を示す。図4(b)では(a)と同じようにカッタ径の増加に従い、 c_2/n は増加する傾向が見られる。従来の切削試験結果では主分力と背分力の比で表現することが多いので、本研究でもこれにならい、 c_2/n を平均カッタ回転半径 r （ここでは仮に掘削半径の0.6倍とした）で割った値を、 c_1/n で割った値が、主分力 F_2 と背分力 F_1 の比を決定する定数 $a_3 [= c_2 / (c_1 r)]$ となる。

$$F_2 / F_1 = a_3 \cdot p^{0.5}$$

a_3 とカッタ径の関係を図5(a)に示す。図にはSanioの式も示した。図ではカッタ径が大きいほど a_3 が小さくなる傾向が見られ、カッタ径が356 mmおよび394 mmではSanioの式より大きくなり、432 mmでは小さくなっている。 a_3 はカッタ径の影響を受けていることがわかったが、ばらつきが大きい。そこで、 a_3 と相関性のよいものを探した結果、掘削径との相関が強いことがわかった。図5(b)に a_3 と掘削径の関係を示す。図ではあまりばらつきがなく、掘削径が大きくなるほど、 a_3 の値は小さくなっていることがわかる。すなわち、掘削径が大きくなるほど、 T_R / F_N が小さくなる傾向が見られる。この理由は判然としないが、ゲージカッタの影響が考えられる。カッタヘッドの外周部付近ではカッタが斜めに配置されており、そのため、切羽に鉛直に配置されているものより、推力に比べトルクが大きくなりやすい。掘削径が小さくなると、斜めに配置されたゲージカッタ数と全カッタ数の比が大きくなる。そのため、掘削径が小さくなると a_3 が大きくなることが考えられる。

4. 設計に関する提言とまとめ

本研究では、TBMの諸元と施工結果に基づいて、掘削抵抗に関して述べてきた。TBMの設計では室内切削

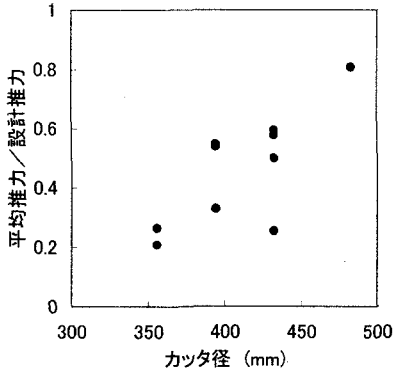


図6 平均推力／設計推力とカッタ径の関係

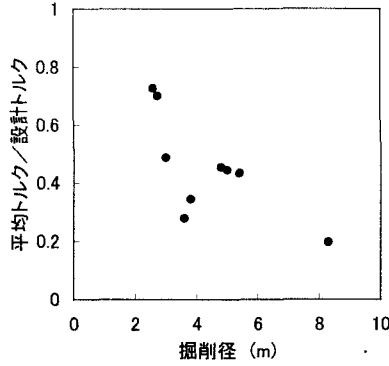


図7 平均トルク／設計トルクと掘削径の関係

試験結果に基づいて、推力およびトルクの設計値が決定されてきた。本研究で得られた、図4, 5は従来の室内切削試験の結果とかなり異なる。すなわち、カッタ径によって c_1 , c_2 が大きく変化する点と、 a_3 が掘削径に大きく影響される点である。図6に推力の余

裕度合を表す平均推力／設計推力とカッタ径の関係を示す。ばらつきはあるもののカッタ径が大きくなることによって、平均推力／設計推力は大きくなっており、最もカッタ径の大きいGでは0.8とほぼ限度に近い値で掘削している。図7に平均トルク／設計トルクと掘削径の関係を示す。掘削径が最も小さいA, Bでは平均トルク／設計トルクが0.7と他に比べてかなり大きく、施工段階でトルクが不足気味であることがわかる。逆に掘削径が8mと最も大きいJでは平均トルク／設計トルクが0.2とかなりの余裕が見られる。

本研究の結果に基づいた場合、TBMの推力およびトルクの設計値は次のように決めることができる。掘削径およびトンネルに現れる岩盤強度（一軸圧縮強度）は与えられたものとする、カッタ径およびカッタ数は掘削径に応じて決定される。図4(a)により定数 c_1 、図5(b)より定数 c_2 が求まる。(1), (2)式に c_1 , c_2 , 岩盤強度, 掘進速度を入れることによって、推力およびトルクの設計値が決定できる。

本研究では、元となったデータは10個でありまだデータ不足の感がある。今後の課題としては、いくつもあげられるがまずはデータの量を増やすことを考えている。最後に本研究を行うにあたりご協力いただいた、(株)奥村組, 九州電力(株), 建設省, (株)熊谷組, コマツ, 佐藤工業(株), 大成建設(株), 中部電力(株), 東京都水道局, 西松建設(株), 本州四国連絡橋公団, 北海道電力(株), 香港電力, 前田建設工業(株)に感謝の意を表す。

5. 参考文献

- 1) 福井勝則・大久保誠介：TBMの掘削抵抗を利用した岩盤物性の把握，トンネルと地下，28[No.2]，pp.123～131，1997.2
- 2) 松本一騎・福井勝則・大久保誠介・水上雅裕・今井裕二・酒井照夫・浅井秀明・西澤泉：TBMの掘削抵抗による岩盤特性の評価，資源・素材学会春季大会講演会，Vol. I，pp.14～17，1998
- 3) 福井勝則・大久保誠介・井上和敏・廣滝勝彦・伊藤憲彦・中村創：TBMの掘削抵抗を用いた岩盤分類，第19回西日本岩盤工学シンポジウム講演論文集，pp.55～60，1998
- 4) 福井勝則・大久保誠介・本間直樹：TBMの掘削抵抗を利用した岩盤強度の推定—二軒小屋トンネルの事例—，資源・素材学会誌，112[No.5]，pp.303～308，1996
- 5) 河野英雄・藤原洋一・三島功裕：トンネルと地下，Vol.25[No.2]，pp.123～130，1994
- 6) 大久保誠介：トンネル掘進機の適用性とエキスパートシステム，資源・素材学会誌，Vol.106，pp.341～346，1990
- 7) Sanio, H. P. : Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol.22[No.3]，pp.153～161，1985
- 8) Roxborough, F. F. and Phillips, H. R. : Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol.12，pp.361～366，1975