

11. 室内実験における TBM センターカッタビットの配置間隔に関する基礎的研究

呉工業高等専門学校
呉工業高等専門学校
(株)スターロイ

○ 河相 拓真
重松 尚久
小田 登

1. はじめに

トンネル技術の1つである TBM 工法は、岩盤などの固い地盤で用いられ側面の坑壁にグリッパを押し当て反力を得ることによって、先端部のカッタを回転させながら地山を切削する方法である。現在、TBM 工法の問題点として、センターカッタの摩耗が激しいことが挙げられる。原因の1つにディスクカッタの配置間隔が現場の経験則に基づいて決定され、数値や式などで数値的に確立されていないことがある。また、一般にセンターカッタの回転半径が小さいとねじりの力が大きくなりカッタの摩耗や破損が起こる。逆に回転半径が大きいと刃より内側の供試体が破壊されず残る現象(芯残り)が発生し、掘削効率が著しく低下する。そのため、センターカッタに作用する力を測定し、最適な配置間隔を求める必要がある。

本研究では、モデル掘削機を用い、掘削の中心からディスクカッタの刃までの距離(最小半径 r)を変化させ掘削実験を行う。実験中は、一定の垂直力 F_z をかけ、掘削時間 t に対する、垂直力 F_z 、ディスクカッタにかかる水平方向の力 F_x 、掘削深さ z 、トルク T を測定する。これらの値と実験中の映像とともに検証することによって芯取れの発生するディスクカッタの配置間隔を求めることを目的とする。

2. 実験概要

2.1 モデル掘削機

本実験では、鋼製の台座に2枚のディスクカッタを取り付け、それらで供試体を掘削し TBM センターカッタビット掘削のモデルとする。図-1 にモデル掘削機の概略図を示す。ディスクカッタの取り付けは、実際の TBM と同様にサドルと呼ばれるソケットにそれぞれ固定し、これを台座に取り付けている。サドル部分にひずみゲージを付け、ひずみを測定し水平力を算出する¹⁾²⁾。カッタ1が描く円の軌跡の半径を最小半径 r とし、45,55,65,75 mm の4パターンに分け、各条件で2回ずつ測定を行

う。実際の TBM を再現するため、カッタ1(直径125mm 先端角 $\pi/2\text{rad}$)よりも25mm 外側にカッタ2(直径100mm 先端角 $\pi/2\text{rad}$)を配置している。カッタ2は、カッタ1が TBM と同様の掘削状況を再現するために TBM のエッジカッタを模して配置している。

2.2 実験装置および実験方法

実験装置は高さ1,750mm、幅700mm、奥行き700mmで、ターンテーブル、供試体、下部に設置したターンテーブルを回転させるためのモータと駆動伝達装置、荷重を制御する荷重制御用油圧シリンダ、水平力を測定するひずみゲージ、掘削深さを測定する変位計、実験装置を横転させるための油圧シリンダ、以上の装置で構成されている。図-2 に実験装置の概略図を示す。ターンテーブルは、直径400.0mm、厚さ10.0mmの鋼製円盤であり、下部に3相200V、1.5kWの電動モータ、チェーン、減速機を設置している。なお、実験装置は幅1,370mm、奥行き1,100mmの鋼板の上に乗っており、横に設置されている油圧シリンダを伸縮させることで実験装置を90°横転させることが可能で、効率的に掘削土の排出が行える。

実験では、ターンテーブルに据え付けられた供試体にモデル掘削機を $F_z=40\text{kN}$ の力で押し当て、破碎する。ターンテーブルは2r.p.mで回転し、掘

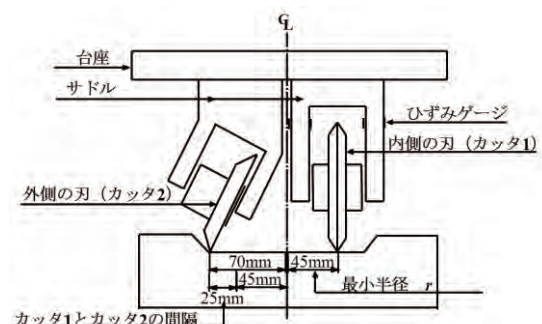


図-1 モデル掘削機 概略図

削深さ $z=20\text{mm}$ になるまで掘削した。供試体の固定については供試体を鋼製の外枠にはめ、側面をボルトで固定し、外枠とターンテーブルとをボルトで固定した。掘削時間 t に対する、垂直力 F_z 、水平力 F_x 、掘削深さ z 、トルク T を 0.02 秒で 1 点を記録するデータ収集装置によって測定した。

2.3 供試体

供試体は水結合材比 $W/B=17\%$ の高強度モルタル供試体(一軸圧縮強度 133.6N/mm^2)及び、中国産花崗岩供試体(一軸圧縮強度 139.0N/mm^2)を使用する。また、供試体寸法は高さ 100mm 、直径 365mm の円柱状供試体とする。

2.6 芯取れ・芯残りについて

図-3 に芯取れの概略図を示す。掘削を進めていくと、ディスクカッタから生じる亀裂が生じ、その亀裂が繋がることによって岩片が剥離する。この現象を芯取れと呼ぶ。次に、図-4 に芯残りの概略図、写真-1 に芯残りの写真を示す。最小半径 r が大きくなると、供試体内側で亀裂が繋がりにくくなり、芯取れが起こらず刃より内側の供試体が残る現象を芯残りと呼ぶ。本研究では、芯取れの発生が考察を行う上での必須条件となっている。

3. 実験結果と考察

3.1 トルク T と掘削時間 t

一例として、図-5 に花崗岩供試体における最小半径 $r=55\text{mm}$ のトルク T と掘削時間 t の関係を示す。実験開始直後は、カッタが供試体に切り込んでいくためトルク T が増加している。掘削の進行とともに、トルク T の振れ幅が小さくなっている。これはカッタが供試体に十分切り込み、掘削面が安定したことが考えられる。230 秒あたりでトルク T が急激に増加し、その後、250 秒あたりでトルク T が急激に減少している。この時間を実験中の映像で確認したところ芯取れが確認できた。また、全ての芯取れ時で同様の傾向がみられた。

3.2 水平力 F_x と掘削時間 t

一例として、図-6 に花崗岩供試体における最小半径 $r=55\text{mm}$ の水平力 F_x と掘削時間 t の関係を示す。水平力 F_x は実験中、同程度の振れ幅で作用している。その後、230 秒あたりで水平力 F_x は急激に減少している。実験中の映像から芯取れが確認できた。また、全ての芯取れ時で同様の傾向がみられた。

3.3 芯取れ・芯残りと最小半径 r

TBM におけるディスクカッタでの掘削を進める上で芯取れの発生は必須条件である。表-1 に供試体別の芯取れと最小半径 r の関係を示す。本実験では、芯取れが発生し、芯取れより外側の破壊がない

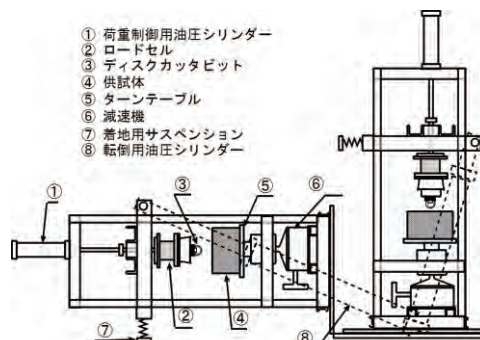


図-2 実験装置 概略図

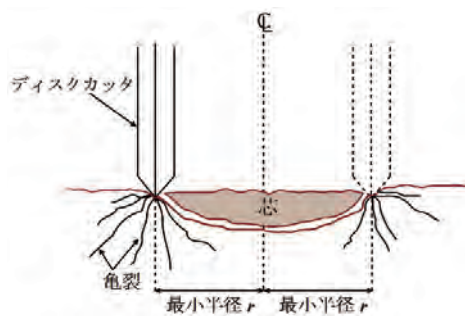


図-3 芯取れ 概略図

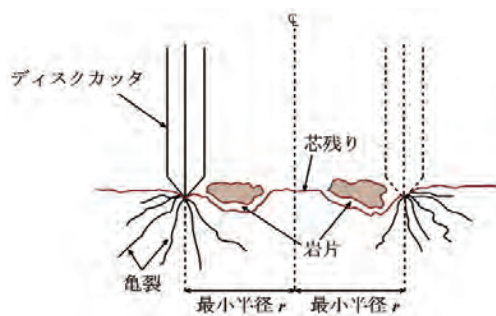


図-4 芯残り 概略図



写真-1 芯残り

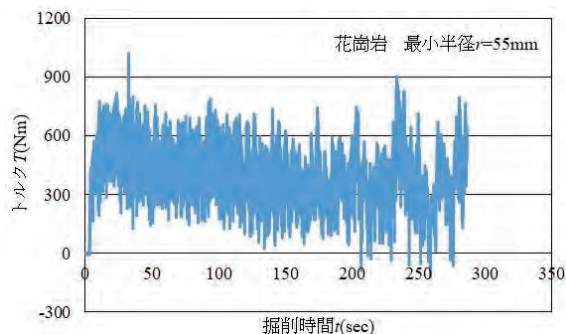


図-5 トルク T と掘削時間 t の関係

状態を破壊形態 1 とし、芯取れより外側の破壊がある状態を破壊形態 2 とする。まず、高強度モルタル供試体では最小半径 r の違いによらず、芯取れが発生している。しかし、最小半径 $r=75\text{mm}$ ではカッタ 1 より外側の破壊が先行し、破壊形態 2 となった。次に、花崗岩供試体においては、最小半径 $r=45,55\text{mm}$ で芯取れが発生している。また、芯取れ発生時は、全て破壊形態 1 であった。

3.4 最大トルク T_{max} と最小半径 r

最大トルク T_{max} の判定は、芯取れ時と芯残り時で異なる。芯取れ時は、芯取れ直前の最大値を最大トルク T_{max} としており、芯残り時は、全グラフ範囲のうち掘削面が不安定だと考えられる実験開始直後を除いた範囲での最大値を最大トルク T_{max} としている。図-7に最大トルク T_{max} と最小半径 r の関係を示す。高強度モルタル供試体では、最小半径 r の違いによらず、ほぼ同じ値となっている。これは、芯取れが起ることによってトルク T が増加しないことが考えられる。花崗岩供試体では、芯取れが起っている最小半径 $r=45,55\text{mm}$ ではほぼ同じ値となっており、芯残りの発生している最小半径 $r=65,75\text{mm}$ では増加傾向がみられる。これは、最小半径 $r=65,75\text{mm}$ では、芯取れが起りにくくなり、カッタが供試体に深く入っていくため、カッタと供試体の接地面が増加することが考えられる。

3.5 最大水平力 F_{xmax} と最小半径 r

最大水平力 F_{xmax} の判定は、芯取れ時と芯残り時で異なる。芯取れ時は、芯取れ直前の最大値を最大水平力 F_{xmax} としており、芯残り時は、全グラフ範囲のうち掘削面が不安定だと考えられる実験開始直後を除いた範囲での最大値を最大水平力 F_{xmax} としている。また、ディスクカッタを外側に広げようとする力を正としている。図-8に最大水平力 F_{xmax} と最小半径 r の関係を示す。高強度モルタル供試体では、最小半径 $r=45,55\text{mm}$ でほぼ同じ値となっており、最小半径 $r=65,75\text{mm}$ は増加傾向がみられる。これは、最小半径 r が大きくなるにつれて芯の大きさも大きくなるため、芯を取るために必要な力が大きくなることが考えられる。また、供試体外側の破壊などにより、掘削面が不安定となり、過剰な力が作用したと考えられる。花崗岩供試体では、比例的な増加傾向がみられる。しかし、最小半径 $r=65,75\text{mm}$ では芯取れが発生していない。これはカッタ 1 より外側のひび割れや破壊によって力が分散したことや芯取れより先に実験条件である掘削深さ $z=20\text{mm}$ に達したことが考えられる。

3.6 平均掘削速度 v と最小半径 r

平均掘削速度 v の算出は、カッタが供試体に接触

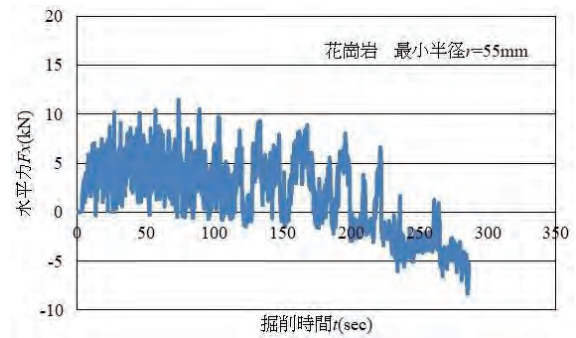


図-6 水平力 F_x と掘削時間 t の関係

表-1 芯取れと最小半径 r の関係

最小半径 (mm)	実験回数	高強度モルタル		花崗岩	
		芯取れの有無	破壊形態	芯取れの有無	破壊形態
45	1	有	1	有	1
	2	有	1	有	1
55	1	有	1	有	1
	2	有	1	有	1
65	1	有	1	無	1
	2	有	1	無	1
75	1	有	2	無	1
	2	有	2	無	1

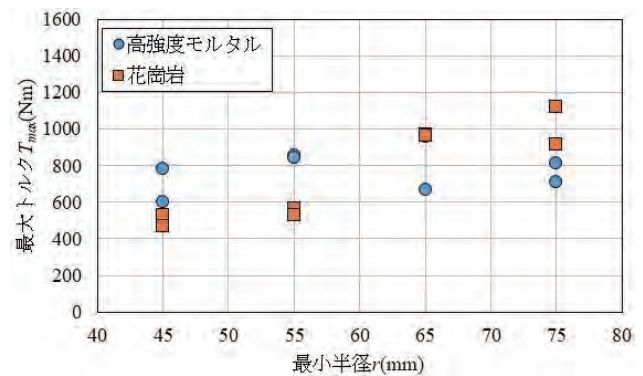


図-7 最大トルク T_{max} と最小半径 r の関係

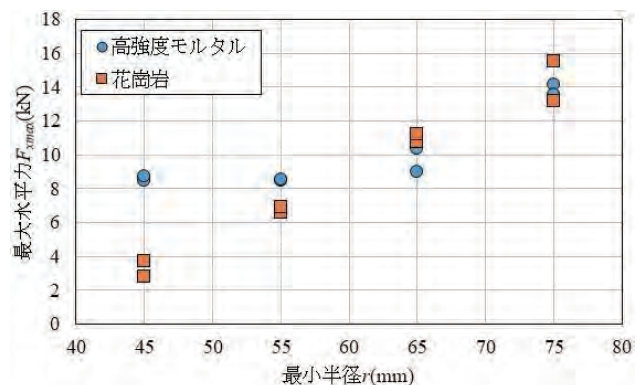


図-8 最大水平力 F_{xmax} と最小半径 r の関係

する時から掘削深さ z が 20mm に到達するまでのグラフ範囲を1次関数で近似し、傾きを求めることで平均掘削速度 v とした。図-9に平均掘削速度 v と最小半径 r の関係を示す。高強度モルタル供試体では、

最小半径 r が大きくなるにつれて平均掘削速度 v が遅くなる傾向がみられる。これは、最小半径 r が小さいほど芯取れまでの時間が短く、最小半径 r が大きくなるほど芯取れまでの時間が長くなることが考えられる。花崗岩供試体では、最小半径 r の違いや芯取れの有無によらず、ほぼ同じ値となっている。これは、花崗岩の破壊形態によるものだと考える。芯残りは発生しても、芯が完全に残っているわけではなく、芯の外側から少しずつ壊れ、カッタが供試体を掘削する際にできる溝が深くなりやすいため、掘削深さ $z=20\text{mm}$ に達するまでの時間に芯取れ時との差が出にくいことが考える。

3.7 1回転当たりの掘削量 V_{round} と最小半径 r

1回転当たりの掘削量 V_{round} の算出方法は、芯を円柱状に見立て、芯の半径を最小半径 r とし、芯取れが発生した時間の掘削深さ z を芯の高さとして体積の算出を行っている。また、掘削時間 t_s は実験開始から芯取れが発生するまでの時間とした。その時間を回転速度 2r.p.m で除すことで実験中の供試体回転数とした。芯の体積を供試体回転数で除すことで1回転当たりの掘削量 V_{round} としている。つまり、掘削量を芯の体積としているため、芯取れの発生が算出を行う上での必須条件となっている。図-10に1回転当たりの掘削量 V_{round} と最小半径 r の関係を示す。どちらの供試体においても、最小半径 r の増加に伴い、1回転当たりの掘削量 V_{round} も増加している。また、同じ最小半径 r における、供試体別の1回転当たりの掘削量 V_{round} の差は掘削速度 v や芯取れ時の深さが原因だと考えられる。

3.8 最適なカッタ間隔の検討

各結果項目や供試体の破壊形態などを考慮し、掘削効率の検討を行う。高強度モルタル供試体では最小半径 $r=45,55,65\text{mm}$ から、花崗岩供試体では、最小半径 $r=45,55\text{mm}$ から最適な最小半径 r の考察を行う。ここでの最適な最小半径 r とは、掘削効率が良く、破壊形態1となり、カッタ1から供試体中心までの間隔が最も大きいことを指す。掘削速度 v は速いほど掘削効率は良い。最大水平力 $F_{x\text{max}}$ は芯取れが起こるために必要な力であるため、小さい方がより小さい力で芯取れが起こると考えられる。そのため、最大水平力 $F_{x\text{max}}$ は小さいほど掘削効率は良い。最大トルク T_{max} は、小さいほど掘削効率は良い。1回転当たりの掘削量 V_{round} は大きいほど掘削効率は良い。

これらを踏まえた最適な最小半径 r は、高強度モルタル供試体では、最小半径 $r=55\sim 65\text{mm}$ 付近に存在し、花崗岩供試体では、最小半径 $r=55\text{mm}$ 付近に存在すると考えられる。

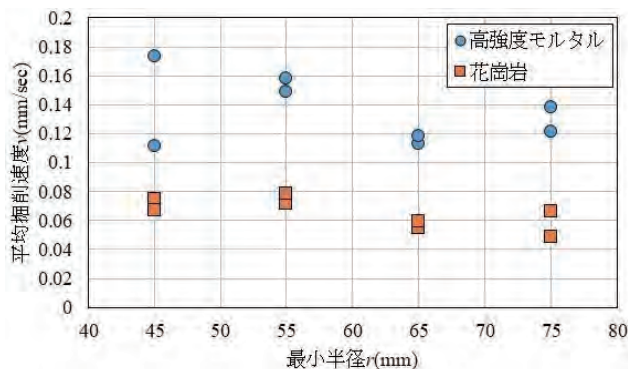


図-9 平均掘削速度 v と最小半径 r の関係

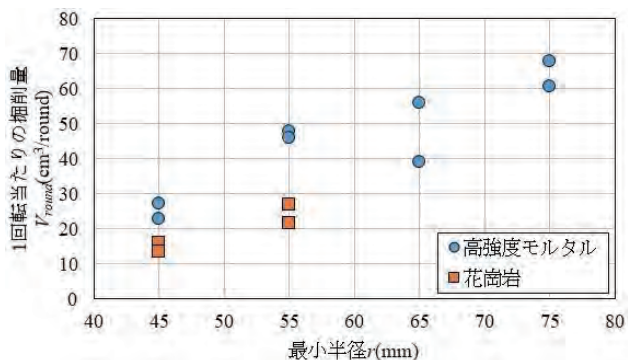


図-10 1回転当たりの掘削量 V_{round} と最小半径 r の関係

4. 結論

1. どちらの供試体においても、芯取れ時、最大トルク T_{max} はほぼ同じ値を示し、芯残り時は増加傾向がみられた。
2. 最大水平力 $F_{x\text{max}}$ は、高強度モルタル供試体では、最小半径 $r=45,55\text{mm}$ までほぼ同じ値となり、最小半径 $r=65\text{mm}$ 以上は増加傾向がみられた。花崗岩供試体では、比例的な増加傾向がみられた。
3. 平均掘削速度 v は、高強度モルタル供試体では、最小半径 r が大きくなるにつれて遅くなる傾向がみられ、花崗岩供試体では、最小半径 r の違いや芯取れの有無によらず、ほぼ同じ値となった。
4. センターカッタの芯取れが発生する掘削効率の良い半径として、高強度モルタル供試体では最小半径 $r=55\sim 65\text{mm}$ 付近に存在し、花崗岩供試体では、最小半径 $r=55\text{mm}$ 付近に存在すると考えられる。

謝辞 本研究の一部は、科学研究費補助金基盤研究(C)17K06525の補助を受けて行われた。

参考文献

- 1) 重松尚久・武本崇裕・小田 登：TBMセンターカッタビットの最適化に関する基礎的研究，テラメカニクス，第37号，テラメカニクス研究会，pp.85～88，2017.