

## TBM センターカッタビットの掘削性能に関する検討

## Examination on Excavation Efficiency of TBM Center Cutter Bit

宮永渚生	Sho MIYANAGA	(呉工業高等専門学校専攻科)
重松尚久	Takahisa SHIGEMATSU	(呉工業高等専門学校環境都市工学分野)
河相拓真	Takuma KAWAI	(川田建設株式会社)
河村進一	Shinichi KAWAMURA	(呉工業高等専門学校環境都市工学分野)
大西義浩	Yoshihiro ONISHI	(愛媛大学教育学部)

現在ディスクカッタの配置間隔は、現場での経験則に基づいて決められている。一般的にカッタの配置間隔が小さいと、トルクが大きくなりカッタが損傷しやすくなる。逆にカッタの配置間隔が大きいと、掘削効率が悪くなる芯残りという現象が起こる。そこで本研究では岩石での掘削効率を向上させるため、掘削中心から最も内側のセンターカッタビットの刃までの距離(以降 最小半径  $r$  と呼ぶ)の最適化に関する研究を行った。その結果、センターカッタでの芯取れが発生する掘削効率の良い半径として、最小半径  $r=55\text{mm}$  付近に存在することが明らかになった。

キーワード : TBM, センターカッタビット, 最適化 (IGC : H-5, K-4)

## 1. はじめに

現在、地下施設を建設する際に用いる掘削方法には、発破掘削方式や機械掘削方式などが挙げられる。Tunnel Boring Machine(以下 TBM)工法は地山岩盤を側面とし、坑壁から反力を得ることで、先端部のカッタを回転させ地山を切削する方法である。TBM 工法の利点<sup>1)</sup>は、発破などに比べ高速掘削が可能となり、連続的に掘削が行えるため工期を短縮することができる。また、人間が直接切羽に近づくことがないことや、円形断面であるため力学的に安定していることもあり、安全に工事を行うことができる。しかし、この工法にはいくつか短所がある。坑壁から反力を得るという特性上、断層破砕帯や軟弱層では盛土破壊などのトラブルが発生しやすいこと、TBM 本体の組み立て、運搬などの初期コストが高いため、短いトンネルでは経済的ではないこと、また、断面形状が円形に制約されることなどが挙げられる。そのため、国内での TBM 工法の利用は、上下水道や発電用水路が全体の 3/4 を占めている<sup>2)</sup>。

現在、TBM を含む機械掘削方式の問題点として、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、数値や式などで定量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ため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<sup>3)4)</sup>。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。単一のディスクカッタを用いた直線軌道切削実験や円周軌道切削実験において、ディ

スクカッタビットに作用する力を測定し、ディスクカッタ自体の性能に関する切削条件は明らかになっている<sup>5)6)7)</sup>。また、TBM においてディスクカッタの摩耗特性が岩石とディスクカッタの間の相対的な滑りに基づいたモデルにより説明できること<sup>8)</sup>を示している。しかし、単一のカッタでは TBM センターカッタビットの掘削形態を表現できないため、我々の研究室では、2 枚のディスクカッタを用いた TBM センターカッタビットの配置間隔に関する研究を行っている。武本ら<sup>3)</sup>は、ディスクカッタの固定をサドル(実際の TBM と同様の固定治具)で行い、直径の異なるディスクカッタを使用し、配置間隔の検討を行った。河相ら<sup>9)</sup>は、モデル掘削機に配置された外側のディスクカッタを TBM のエッジカッタを模して、斜めに配置することで周面摩擦の影響を低減させた。

本研究では、硬い構造物の解体工事を想定し一軸圧縮強度  $135\text{N/mm}^2$  の花崗岩と一軸圧縮強度  $134.7\text{N/mm}^2$  の高強度モルタルの 2 種類の供試体で、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ディスクカッタから生じる亀裂が供試体中に生じ、その亀裂が繋がることによって岩片が剥離する現象(芯取れ)が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。また、ディスクカッタの直径の大きさを 3 種類設けた。実験で得られたデータから最小半径  $r$  に対する最大トルク  $T_{\text{max}}$ 、最大水平力  $F_{x\text{max}}$ 、平均掘削速度  $v$ 、1 回転当たりの掘削量  $V_{\text{round}}$  を導出し、3 種類のディスクカッタの直径の大きさと最小半径  $r$  の視点から比較を行う。

## 2. 実験概要

### 2.1 モデル掘削機について

本実験では、ニッケルクロムモリブデン鋼製(SMCM439)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、サドルにそれぞれ固定し、これを台座に取り付けている。実際のTBMを再現するため、カッタ1(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。また、各測定はカッタ1のみで行い、カッタ2では測定を行っていない。ディスクカッタはサドルから着脱可能で、ディスクカッタの大きさは、直径小100mm、中125mm、大150mmの3種を用意した。図-2にディスクカッタの概略図を示す。サドル部分にひずみゲージを貼り、ひずみを測定し水平力を算出する<sup>3),10)</sup>。ひずみゲージは一般測定軟鋼用で、ゲージ長1mm、抵抗値120 $\Omega$ のものを4枚使用した。ひずみゲージの貼り付け位置はモーメント量が最大になるサドルの根本部分に貼り付けた。

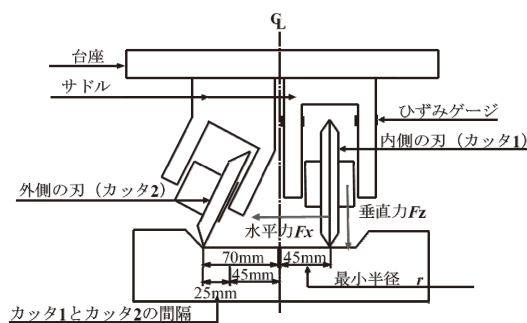


図-1 モデル掘削機 概略図

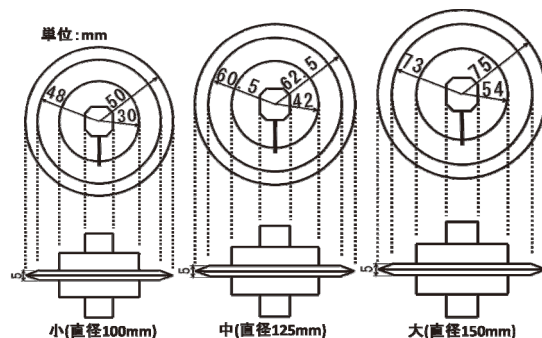


図-2 ディスクカッタ 概略図

### 2.2 実験装置について

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、上部フレームに設置した油圧モータで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(許容変位量2,000mm)、排出土改良のために実験装置を倒す油圧シリンダ、以上の装置で構成されている。図-3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、減速機を設置しており、減速機により回転速度を調節できるようになっている。なお、実験装置は幅1,370mm、奥行き1,100mmの鋼板の上に載っており、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を行える。

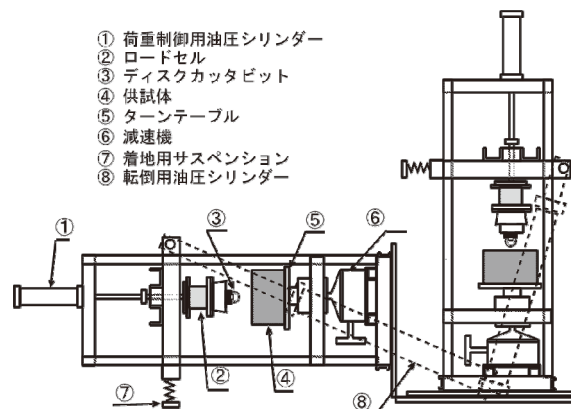


図-3 実験装置 概略図

表-1 高強度モルタル供試体配合表

配合設計( $W/B=17\%$ )					
材料	水 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	セメント ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	シリカフェーム ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	細骨材 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	混和剤 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
単位量	222	1187	118.7	872	19.586

### 2.3 供試体について

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134.7N/mm<sup>2</sup>)及び、中国産花崗岩供試体(一軸圧縮強度135.0N/mm<sup>2</sup>)を使用した。供試体寸法は高さ100mm、直径365mmの円柱状供試体とした。高強度モルタル供試体は、一軸圧縮強度135N/mm<sup>2</sup>を目標に配合設計を行った。表-1に配合設計、表-2に高強度モルタルの一軸圧縮強度を示す。

表-2 高強度モルタル供試体 一軸圧縮強度

供試体番号	一軸圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> ) (3ヶ月後強度)	一軸圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> ) (平均)
①	164.6	134.7
②	106.7	
③	133.0	

### 2.4 実験方法

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 $F_{zset}=40\text{kN}$ の力で押し当て破砕する。ターン

テーブルは 2r.p.m で回転し、掘削深さ  $z=20\text{mm}$  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 M8 六角ボルトで固定し、外枠とターンテーブルとを M10 六角ボルトで固定した。掘削時間を  $t$  とし、掘削している時に作用している垂直力  $F_z$ 、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。カッター 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、小・中・大のディスクカッター別に、各条件で 2 回ずつ測定を行う。また、データ収集装置にアースをとり、ノイズが入らないようにした。 $F_{zset}$  を 40kN と設定したのは、実用化されているディスクカッターの垂直力はカッターの直径で決まっており、目安として直径 12inti で最大 120~150kN の垂直力がかかる。今回用いたディスクカッターの直径は 4~6inti(1inch=25.4mm)であり最大 40~90kN の垂直力がかかることになり、実験装置の安全性を考え 40kN を採用した。

## 2.5 TBM の岩盤掘削メカニズム

TBM による岩盤破碎のメカニズムは、原理的にはディスクカッターが回転しながら推力(スラスト)と旋回力(トルク)により溝掘りされることで、カッター間に亀裂が進展し剥離破碎が行われる。ディスクカッターの種類別<sup>1)</sup>でみると、フェースカッターとゲージカッターによる溝掘りによるものと、中心部のセンターカッターにおいてカッターの内外周軌跡の差によるスクレーパ的な幅掘り状態による掘削に分かれる。この幅掘りによる掘削抵抗は、岩盤強度の強弱によって掘削速度に影響を与えるものと考えられている。

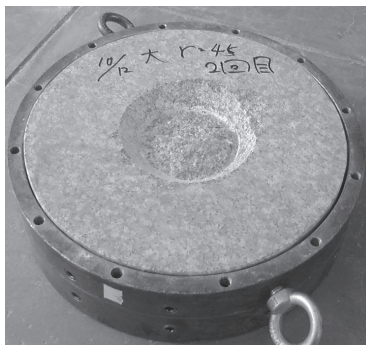


写真-1 芯取れ



写真-2 芯残り

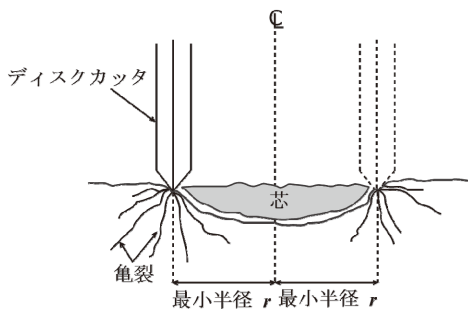


図-4 芯取れの概略図

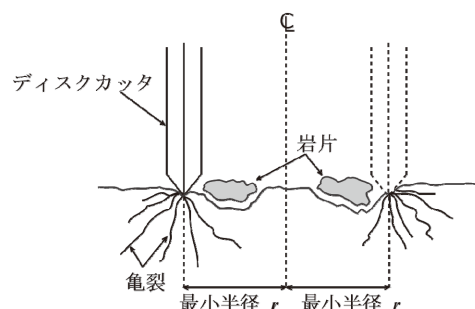


図-5 芯残りの概略図

## 2.6 芯取れ・芯残りについて

図-4 に芯取れの概略図、写真-1 に芯取れの写真を示す。掘削を進めていくと、ディスクカッターから生じる亀裂が供試体中に生じ、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-5 に芯残りの概略図、写真-2 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 掘削時間 $t$ との関係

本章では、花崗岩供試体、カッター中、最小半径  $r=55\text{mm}$  の結果を例とし、考察を行う。

#### 3.1.1 垂直力 $F_z$

本研究では、すべての実験において設定垂直力  $F_{zset}=40\text{kN}$  とし、実験を行った。図-6 に垂直力  $F_z$  と掘削時間  $t$  の関係を示す。実験開始直後のカッターと供試体が接触する瞬間は設定垂直力  $F_{zset}$  より大きい力がかかり、その後は垂直力  $F_z=37\text{kN}$  付近の値を中心に増減を繰り返しながら実験終了まで作用し続ける傾向がみられた。また、この傾向は他の実験条件においても同様の傾向がみられた。本実験では油圧を用いた荷重制御を行っているため、掘削面の

変化や油圧制御の特性上から、設定垂直力  $F_{zset}$  を中心に増減を繰り返すという傾向がみられたと考えられる。現在、この傾向を低減させるための研究<sup>1)</sup>が進行中である。

### 3.1.2 トルク $T$

図-7 にトルク  $T$  と掘削時間  $t$  の関係を示す。実験開始直後は、トルク  $T$  が急激に増加している。これは、カッタが供試体に切り込んでいくため、掘削面が安定しないことが考えられる。その後、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。210 秒あたりでトルク  $T$  が急激に増加し、その後、230 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。

### 3.1.3 水平力 $F_x$

水平力  $F_x$  は、ディスクカッタを外側に広げようとする方向の力を正とする。図-8 に水平力  $F_x$  と掘削時間  $t$  の関係を示す。水平力  $F_x$  もトルク  $T$  と同様に掘削開始直後から 30 秒間程度は、水平力  $F_x$  が急激に増加し、その後、同程度の振れ幅で水平力  $F_x$  が作用している。230 秒あたりで水平力  $F_x$  は急激に減少している。実験開始直後は、カッタが供試体に切り込んでいくなど、掘削面が安定していないことが水平力  $F_x$  の増加の原因だと考えられる。その後は、掘削面が安定し、カッタが切り込んだ溝に沿って掘削が進行するため一定の振れ幅になると考えられる。水平力  $F_x$  が急激に低下している時間を、実験中の映像で確認したところ、芯取れの発生が確認できた。また、他の実験条件においても芯取れ時は、同様の傾向がみられた。芯が取れることで、カッタにかかっていた水平力  $F_x$  が解放されたことが、水平力  $F_x$  の急激な低下の原因だと考えられる。過去の研究<sup>4)</sup>と同様に、設定垂直力  $F_{zset}$  の約 1/4 程度の水平力  $F_x$  が作用している。

### 3.1.4 掘削深さ $z$ 及び平均掘削速度 $v$

本実験では、掘削深さ  $z$  が 20mm に達するまで実験を行い、掘削時間  $t$  はカッタが供試体に当たってから、掘削深さ  $z$  が 20mm に達するまでの時間とした。また、平均掘削速度  $v$  の算出も行った。平均掘削速度  $v$  は、カッタが供試体に接触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 次関数で近似することで、傾きを求め、それを平均掘削速度  $v$  とした。図-9 に掘削深さ  $z$  と掘削時間  $t$  の関係を示す。すべての実験において、掘削深さ  $z$  は一定の振れ幅を繰り返しながら、掘削が進行していく傾向がみられる。

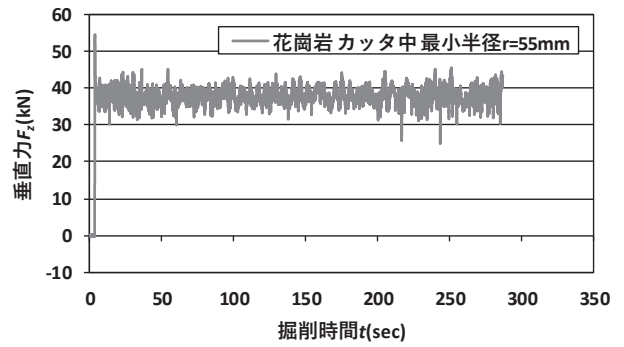


図-6 垂直力  $F_z$  と掘削時間  $t$

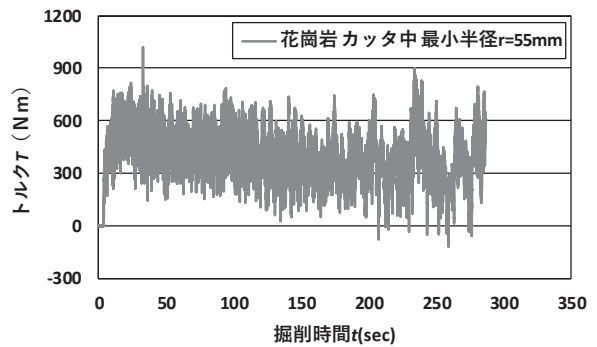


図-7 トルク  $T$  と掘削時間  $t$

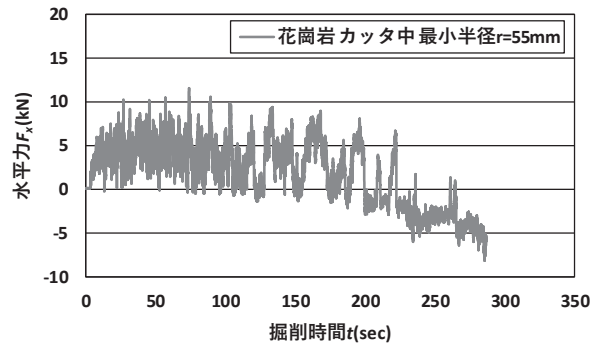


図-8 水平力  $F_x$  と掘削時間  $t$

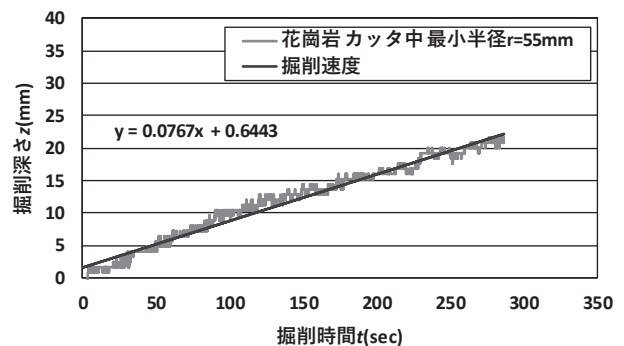


図-9 掘削深さ  $z$  と掘削時間  $t$



### 3.2 最小半径 $r$ との関係

本章では、カット中の結果を例とし、考察を行う。

#### 3.2.1 芯取れおよび芯残り

表-3 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。破壊状態 2 になると掘削が進まず掘削効率が悪くなる。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、最小半径  $r=65,75\text{mm}$  では芯残りが発生している。花崗岩供試体で芯取れが発生しなかった原因としては花崗岩供試体の方が垂直力  $F_z$  の値大きく剝離する岩片が小さくなったことと考える。また、芯取れ時は、全て破壊形態 1 であった。

#### 3.2.2 最大トルク $T_{\max}$

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-10 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、芯取れが起こることでトルク  $T$  が増加しないことが考えられる。花崗岩供試体では、芯取れが起こっている最小半径  $r=45,55\text{mm}$  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、芯取れが起こりにくくなり、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原因だと考えられる。

#### 3.2.3 最大水平力 $F_{x\max}$

最大水平力  $F_{x\max}$  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水平力  $F_{x\max}$  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水平力  $F_{x\max}$  としている。図-11 に最大水平力  $F_{x\max}$  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  $r=45,55\text{mm}$  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り過剰な力が作用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。

表-3 芯取れと最小半径  $r$

最小半径 $r$ (mm)	No.	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	—
	2	有	1	無	—
75	1	有	2	無	—
	2	有	2	無	—

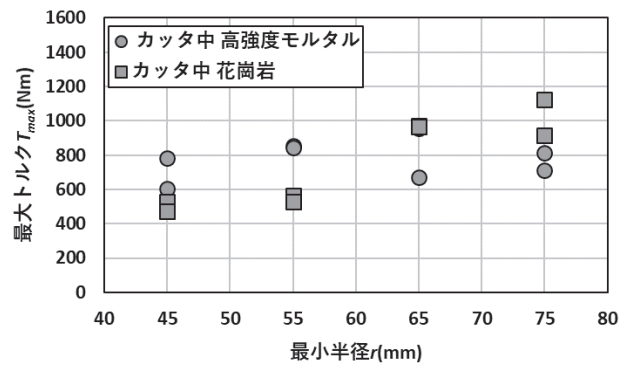


図-10 最大トルク  $T_{\max}$  と最小半径  $r$

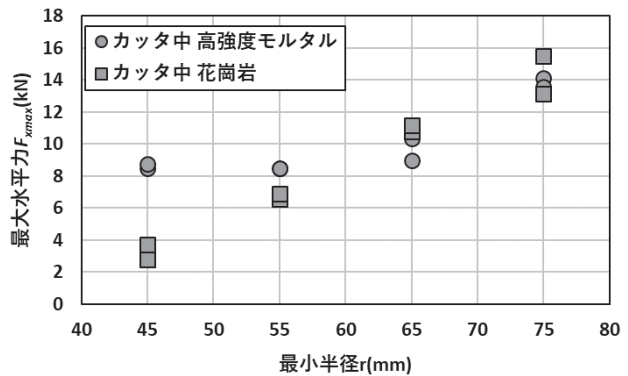


図-11 最大水平力  $F_{x\max}$  と最小半径  $r$

#### 3.2.4 平均掘削速度 $v$

図-12 に平均掘削速度  $v$  と最小半径  $r$  の関係を示す。なお、平均掘削速度  $v$  の算出は、3.1.4 掘削深さ  $z$  及び平均掘削速度  $v$  で述べている。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

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られる。

### 3.2.5 1回転当たりの掘削量 $V_{\text{round}}$ と最小半径 $r$

1回転当たりの掘削量  $V_{\text{round}}$  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  $z$  を芯の高さとすることで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  $V_{\text{round}}$  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-13に1回転当たりの掘削量  $V_{\text{round}}$  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  $V_{\text{round}}$  も増加している。これは、最小半径  $r$  が大きくなることにより芯の体積の増加したことが考えられる。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  $V_{\text{round}}$  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。

### 3.2.6 最適なカッタ間隔の検討

本項では、カッタ中における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。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。3.2.1 芯取れおよび芯残りより、破壊形態1となる条件で考察を行う。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。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  $T_{\text{max}}$  は、小さいほど掘削効率は良い。1回転当たりの掘削量  $V_{\text{round}}$  は大きいほど掘削効率は良い。

以上より、カッタ中での最適な最小半径  $r$  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。

## 3.3 カッタの大きさの検討

### 3.3.1 最大トルク $T_{\text{max}}$

高強度モルタル供試体および花崗岩供試体におけるカッタ別の最大トルク  $T_{\text{max}}$  と最小半径  $r$  の関係を図-14に示す。

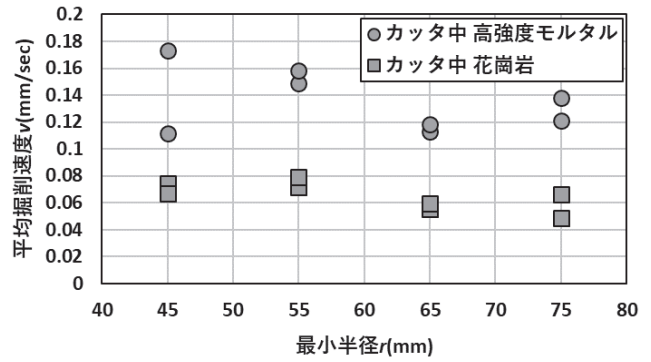


図-12 平均掘削速度  $v$  と最小半径  $r$

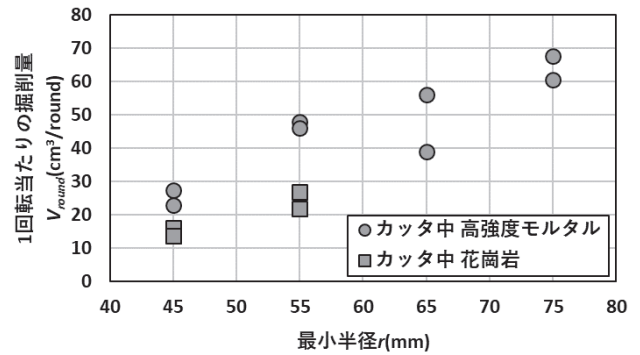


図-13 1回転当たりの掘削量  $V_{\text{round}}$  と最小半径  $r$

高強度モルタル供試体では、最小半径  $r$  の違いによらず最大トルク  $T_{\text{max}}$  の差が少ない。この傾向はカッタの大きさによらず、同様の傾向がみられる。花崗岩供試体では、最小半径  $r$  の増加に伴い、最大トルク  $T_{\text{max}}$  が増加する傾向がみられる。また、最小半径  $r$  の増加に伴い、カッタ別の最大トルク  $T_{\text{max}}$  の値にばらつきがみられている。最小半径  $r$  が大きいほど、芯取れが起こりにくくなり、カッタが供試体に切り込んでいくため、転がり抵抗が大きくなることが原因だと考えられる。

### 3.3.2 最大水平力 $F_{x\text{max}}$

高強度モルタル供試体および花崗岩供試体におけるカッタ別の最大水平力  $F_{x\text{max}}$  と最小半径  $r$  の関係を図-15に示す。高強度モルタル供試体では、最小半径  $r$  の違いによらず最大水平力  $F_{x\text{max}}$  の差が小さく、測定ごとのばらつきが大きい傾向がみられる。この傾向はカッタの大きさによらず、同様の傾向がみられる。これは、供試体ごとの強度差が大きいことや供試体外側の破壊が起こりやすい傾向が原因だと考えられる。花崗岩供試体においては、カッタの違いによらず最小半径  $r$  の増加に伴い、最大水平力  $F_{x\text{max}}$  の増加傾向がみられる。花崗岩供試体では、最小半径  $r$  が小さいほど、最大水平力  $F_{x\text{max}}$  のばらつきが小さい傾向がみられ、カッタ大が最もばらつきが小さい傾向を示している。

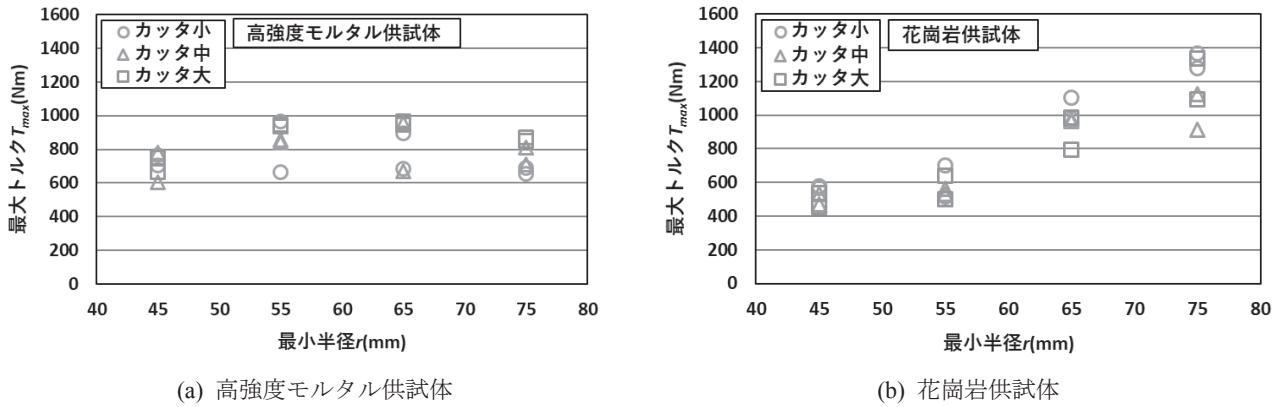


図-14 カッター別 最大トルク  $T_{max}$  と最小半径  $r$

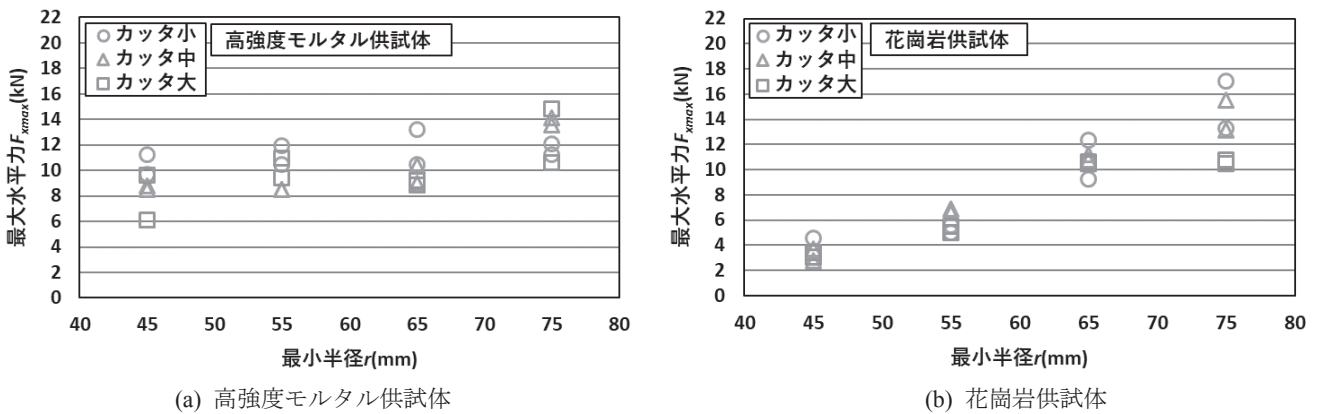


図-15 カッター別 最大水平力  $F_{xmax}$  と最小半径  $r$

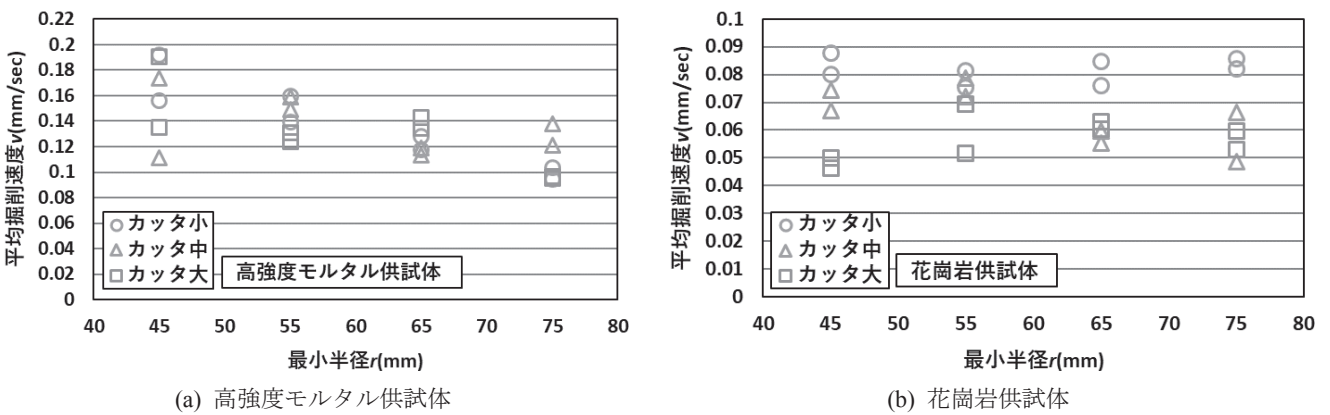
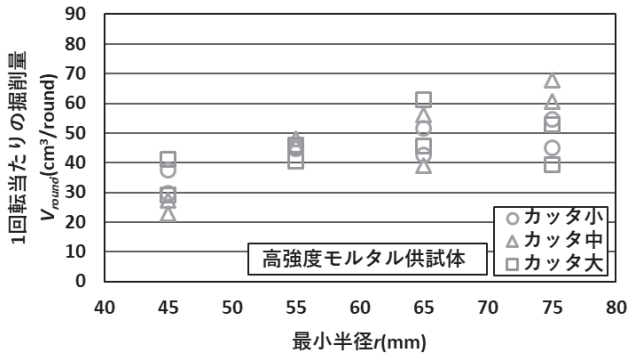


図-16 カッター別 平均掘削速度  $v$  と最小半径  $r$

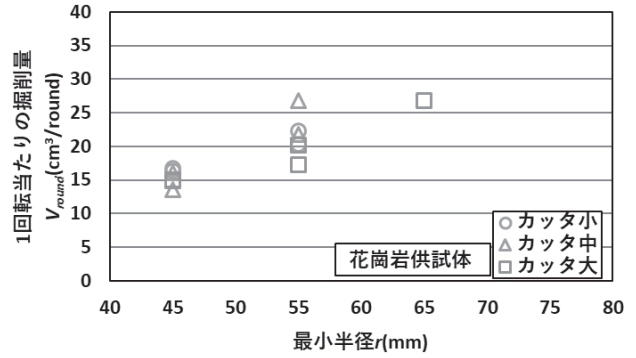
### 3.3.3 平均掘削速度 $v$

高強度モルタル供試体および花崗岩供試体におけるカッター別の平均掘削速度  $v$  と最小半径  $r$  の関係を図-16 に示す。高強度モルタル供試体においては、カッターの違いによらず、最小半径  $r$  の増加に伴い平均掘削速度  $v$  が減少する傾向がみられる。これは、最小半径  $r$  の増加に伴い、芯取れが起るまでの時間が多くかかるため掘削が進行しにくいことが原因だと考えられる。また、最小半径  $r$  の増加に伴い、カッターごとのばらつきが小さくなる傾向がみられる。これは、最小半径  $r$  が小さくなるとカッターの軌跡で内周と外周に差が生じ、この内外周軌跡の差により、掘削形態がスク

レーパのような幅掘り状態となる。幅掘り状態での掘削抵抗は、岩盤の強度によって掘削速度  $v$  に影響を与えると考えられている<sup>12)</sup>ため、本研究においてもこれが原因だと考えられる。花崗岩供試体においては、どのカッターにおいても、最小半径  $r$  の違いによる平均掘削速度  $v$  の差はあまり見られず、ほぼ横ばいとなっている。カッター小では、平均掘削速度  $v=0.08\text{mm/sec}$  付近、カッター中では、平均掘削速度  $v=0.07\text{mm/sec}$  付近、カッター大では、平均掘削速度  $v=0.06\text{mm/sec}$  付近に分布する傾向がみられる。



(a) 高強度モルタル供試体



(b) 花崗岩供試体

図-17 カッタ別 1 回転当たりの掘削量  $V_{round}$  と最小半径  $r$

### 3.3.4 1 回転当たりの掘削量 $V_{round}$

高強度モルタル供試体および花崗岩供試体におけるカッタ別の 1 回転当たりの掘削量  $V_{round}$  と最小半径  $r$  の関係を図-17 に示す。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  $V_{round}$  は増加傾向がみられる。また、最小半径  $r$  の増加に伴い、各カッタのばらつきが大きくなる傾向がみられる。これは、芯取れの有無や芯取れまでにかかる時間に差が生じることが原因だと考えられる。

以上より、今回用いたカッタサイズにおいてはサイズによらず統一したような結論は導けなかった。

## 4. 結論

- (1) 最大トルク  $T_{max}$  は、高強度モルタル供試体では、ほぼ同値を示し、花崗岩供試体では、芯残り時に増加傾向がみられた。
- (2) 最大水平力  $F_{xmax}$  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、ほぼ同値となった。
- (4) カッタ中における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  $r=55\sim65\text{mm}$  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。
- (5) 相似則の検討を行うことで、カッタの大きさの違いによる掘削効率の影響を確認できた。

## 参考文献

- 1) 講座 全断面掘進機 (TBM), <http://kkw.geosys.t.u-tokyo.ac.jp/homepage/kenkyu/kenkyu3/top.html>, (参照 2021.6).
- 2) 萩森健治, 牧野卓三, 大塚勝司, 浜田元, 岩垣富春, 中川浩二: TBM による硬岩掘削に伴う振動、騒音特

性について, 土木学会論文集, No.623/VI-43, pp.57-67, 1999.

- 3) 武本崇裕, 重松尚久, 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 Vol.37, pp.85-88, 2017.
- 4) 重松尚久, 北岡一成, 室達朗, 小田登, 河村進一: 多段型端面掘削方式を用いた深礎掘削機の性能に関する室内実験, 土木学会論文集 F1 (トンネル工学), Vol.69 No.2, pp.121-128, 2013.
- 5) 龔放鳴, 佐藤一彦, 浅井秀明: 円周軌道切削における岩盤の切削抵抗, 資源・素材学会誌, Vol.108, No.7, pp.557-562, 1992.
- 6) 龔放鳴, 佐藤一彦, 浅井秀明: 円周軌道掘削における最適切削条件および最大切削抵抗, 資源・素材学会誌, Vol.108, No.12, pp.849-854, 1992.
- 7) 龔放鳴, 佐藤一彦, 浅井秀明: ディスクカッタが受ける 6 成分の外力と軸受荷重, 資源・素材学会誌, Vol.110, No.14, pp.1133-1138, 1994.
- 8) 西澤泉, 三谷典夫: ディスクカッタの摩耗特性と寿命向上法, 資源・素材学会誌, Vol.112, No.16, pp.505-510, 1996.
- 9) 河相拓真, 重松尚久, 河村進一: モルタル供試体の TBM センターカッタビットの最適化に関する基礎的研究, 第 70 回土木学会中国支部研究発表会発表概要集, VI-2, pp.523-524, 2018.
- 10) 高橋賞, 河井正安: 改訂新版 ひずみゲージによるひずみ測定入門 歴史から測定まで, 大成社, 2001.
- 11) 西岳茂: 岩盤掘削中におけるディスクカッタ作用負荷の研究, 土木学会論文集, No.554/III-37, pp.211-220, 1996.
- 12) 大西義浩, 重松尚久, 河相拓真, 河村進一, 小田登: オポジット型目標値フィルタを用いたトンネルボーリングマシン用油圧シリンダ制御の過渡特性改善, 電気学会論文誌 C(電子・情報・システム部門誌), Vol.140, No.3, pp.320-325, 2020.

(2021 年 6 月 14 日 受付)