

# 高強度モルタル供試体における多段型モデル掘削機の掘削性能についての実験的考察

呉工業高等専門学校  
呉工業高等専門学校  
呉工業高等専門学校

○ 宮永 渚生  
重松 尚久  
杉原 綾乃

## 1. はじめに

岩盤を掘削する手段として最も効率的で安価な方法である発破工法は、騒音や振動問題によって採用できない事例が多くなってきている。機械化工法のなかで油圧を用いた機械では岩盤に設けたボーリング孔に差し矢を油圧で貫入する割岩機があるが、自由面がない岩盤では効率が著しく低下する。打撃により圧壊する機械として油圧ハンマーやブレーカなどが挙げられるが能力が低いうえ騒音が大きいのなどの課題がある。また、推進工事の需要が山間部などの未整備部分に移行するにつれ、岩盤対応のセミシールドマシンの開発依頼も増加してきている。現在多くの機械に採用されている岩盤を破碎する方式としては、カッタを押し付けて強引に破碎する掘削方式があげられる。そこで、騒音や振動問題を軽減することが可能とされている端面掘削方式<sup>1)</sup>に着目した。図-1 に平面掘削方式と端面掘削方式の概略図を示す。平面掘削方式は、1自由面を有する部分を掘削する方式である。一方で端面掘削方式は、平面掘削方式が行われた後に行われ、自由面を増やしながら岩石の端部を削孔する工法である。また平面掘削方式との比較実験では、比エネルギーが約 1/10 に減少する<sup>2)</sup>ことが明らかになっている。また、モルタル供試体とコンクリート供試体においての多段型モデル掘削機を作成し荷重により、掘削速度とトルクを制御できる<sup>3)</sup>ことが分かっている。

本研究の目的は、騒音や振動などの厳しい環境問題を十分に満足し効率的に掘削を行うことができる多段型モデル掘削機を考察し、実用化するための設計指針を提供することである。そこで、高強度モルタル供試体を用い、ディスクカッタを用いた新たな多段型モデル掘削機を作り連続的に掘削実験を行った。そして、実験により、掘削時間  $t$  に対する垂直力  $F_z$ 、トルク  $T$ 、掘削深さ  $z$ 、掘削土量  $m$  を測定した。また、今回の実験では、多段型モデル掘削機の掘削に必要な荷重を把握する為に一定

の変位を与えて掘削する変位制御として、5つの設定速度  $V_{set}$  を設けそこから得られる実験データから考察を行った。

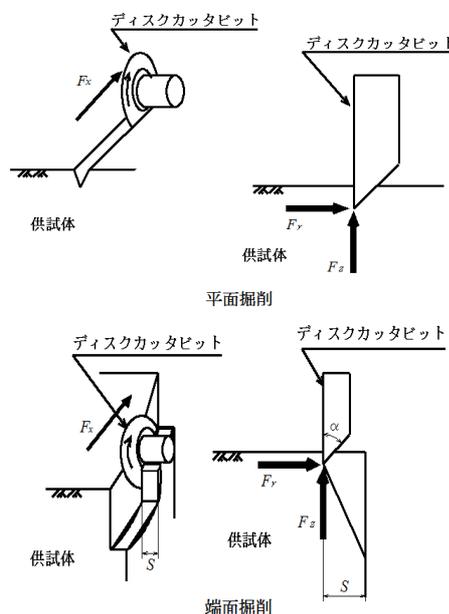


図-1 平面掘削方式と端面掘削方式の概略図

## 2. 実験概要

### 2.1 モデル掘削機

図-2 にモデル掘削機の断面図、写真-1 にモデル掘削機の概略図を示す。モデル掘削機の構成は4枚のカッタで構成されている。カッタ 1, 3, 4 は直径 100mm でカッタ 2 は 90mm である。まずカッタ 1, 2 が同時に当たり (第1段階)、その後カッタ 3 が当たり (第2段階)、最後にカッタ 4 が当たる (第3段階) 仕組みになっている。カッタ 3 が当たると芯取れという現象が起こる。また、カッタ 2 と 4 は周面摩擦が大きくなるように斜めに配置している。

図-3 に芯取れの概略図<sup>4)</sup>を示す。芯取れとは掘削を進めていくとディスクカッタビット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



直力  $F_z$ , トルク  $T$ , 掘削深さ  $z$ , 掘削土量  $m$  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。

### 3. 実験結果と考察

ここでは、変化が顕著にみられた設定速度  $V_{set}=0.0223\text{mm/sec}$  の 1 回目の実験結果を例に考察を行う。

#### 3.1 掘削時間 $t$ と垂直力 $F_z$

図-6 に掘削時間  $t$  と垂直力  $F_z$  の関係を示す。この図を見ると、垂直力  $F_z$  の値が徐々に上昇し急激に下降する場面が 3 回あるように見える。これはビデオ映像を見た結果、1 回目の垂直力  $F_z$  の値の急激な下降が終わったタイミングでカッタ 3 が接触し、その後 2 回目の垂直力  $F_z$  の値の徐々な上昇が始まった。同じように、2 回目の垂直力  $F_z$  の値の急激な下降が終わったタイミングでカッタ 4 が接触し、その後 3 回目の垂直力  $F_z$  の値の徐々な上昇が始まった。

また、1 回目の垂直力  $F_z$  の上昇は平面掘削方式であることが分かった。そして平面掘削方式の後から起こる端面掘削方式は、2 段階に分けることができる。まずは大きな剥離を生じさせて掘削していく初期端面掘削が起こる。これは垂直力  $F_z$  が急激に下降している時間帯に見えた。その後小さな剥離を生じさせ掘削していく定常端面掘削が起こる。これは垂直力  $F_z$  が上昇している時間帯に見えた。

このような結果が見られた原因として実験開始直後では、カッタが供試体に切り込んでいき 2 自由面を形成していく上で掘削面が不安定になりやすいことが考えられる。これらの傾向はほかの実験条件においても同様にみられた。

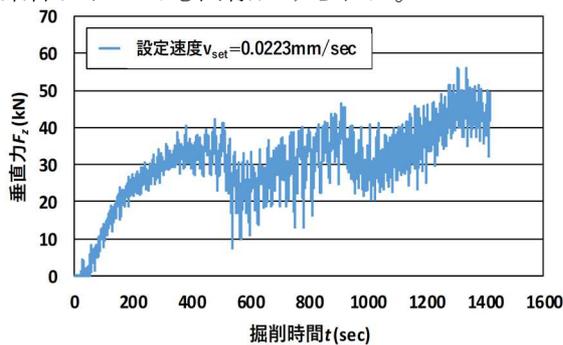


図-6 掘削時間  $t$  と垂直力  $F_z$

#### 3.2 掘削時間 $t$ とトルク $T$

図-7 に掘削時間  $t$  とトルク  $T$  の関係を示す。この図を見ると、3.1 で示したのと同様にトルク  $T$  に関しても、トルク  $T$  の値が徐々に上昇し急激に下降する場面が 3 回あるように見える。また、トルク  $T$  の値の変化の仕方と掘削方式の移り方も同様な傾向が見られた。そしてビデオ映像を見ると芯取れが起

こった直後に、トルク  $T$  の値が減少することが分かった。

実験開始直後は、トルク  $T$  の値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。また、トルク  $T$  の値の増減と垂直力  $F_z$  の増減は同様な傾向がみられる。一例として図-6 の掘削時間  $t$  と垂直力  $F_z$  の掘削時間  $t=430(\text{sec})$  付近で垂直力  $F_z$  が減少する区間に伴い、トルク  $T$  の値も同様に減少している。考えられる要因として掘削の進行とともにカッタが十分に切り込み、掘削面が安定したことが考えられる。また、グラフの傾向についてはどの条件にも同様な傾向がみられた。

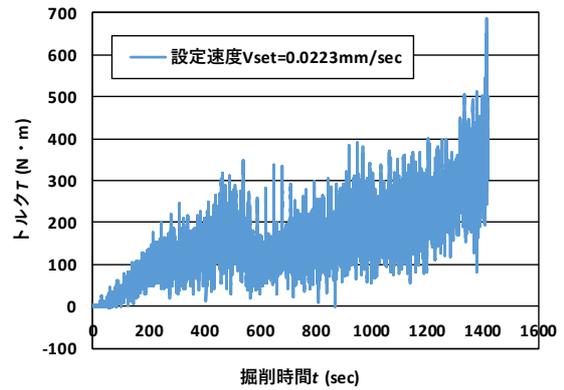


図-7 掘削時間  $t$  とトルク  $T$

#### 3.3 設定速度 $V_{set}$ と実測速度 $V$

実験条件の掘削深さ  $z=35\text{mm}$  で実験終了すると、掘削時間  $t$  と掘削深さ  $z$  の関係から近似線の傾きで実測速度  $V$  を求めることができる。図-8 に設定速度  $V_{set}$  と実測速度  $V$  の関係を示す。設定速度  $V_{set}$  が大きくなるにつれて、分かりやすく比較するために引いた  $45^\circ$  線から遠ざかっていく傾向がみられた。  $45^\circ$  線は設定速度  $V_{set}$  と実測速度  $V$  を 1 対 1 で表すために引いている。つまりこれは設定速度  $V_{set}$  が大きくなるにつれ垂直力  $F_z$  が大きくなることにより反力も大きくなり、  $45^\circ$  線から離れていった。また、設定速度  $V_{set}$  ごとでのずれは少なかったためある程度の掘削速度  $V$  の予想も可能である。

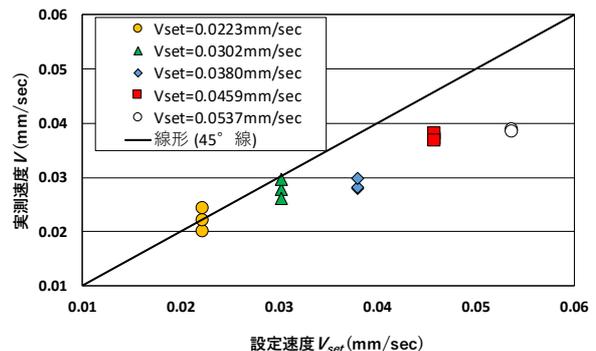


図-8 設定速度  $V_{set}$  と実測速度  $V$

### 3.4 掘削時間 $t$ と掘削土量 $m$

掘削時間  $t$  と掘削土量  $m$  の関係から、1回転あたりの掘削量  $V_{round}$  を求めることができる。図-9に設定速度  $V_{set}$  と1回転あたりの掘削量  $V_{round}$  の関係を示す。設定速度  $V_{set}$  が大きくなるにつれ、1回転あたりの掘削量  $V_{round}$  の数値のばらつきが小さくなる傾向が見られた。

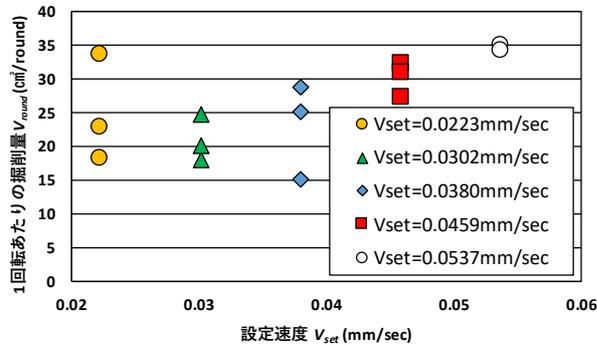


図-9 設定速度  $V_{set}$  と1回転あたりの掘削量  $V_{round}$

### 3.5 掘削段階ごとの最大垂直力 $F_{zmax}$

図-10に設定速度  $V_{set}$  に対する掘削段階ごとの最大垂直力  $F_{zmax}$  を示す。ただし、最大垂直力  $F_{zmax}$  は掘削段階ごとに複数ある数値のうち平均値をとっている。すべての段階で、設定速度  $V_{set}$  が大きくなるにつれて最大垂直力  $F_{zmax}$  が大きくなるわけではなかったが、3段階目の際には設定速度  $V_{set}$  が大きくなるにつれて最大垂直力  $F_{zmax}$  も大きくなっていった。全体的な傾向をみると設定速度  $V_{set}$  の小さい順から3つと、大きい順2つでまとまっているようにみえた。また、掘削段階が増えるごとに最大垂直力  $F_{zmax}$  の差が顕著にみられるようになった。

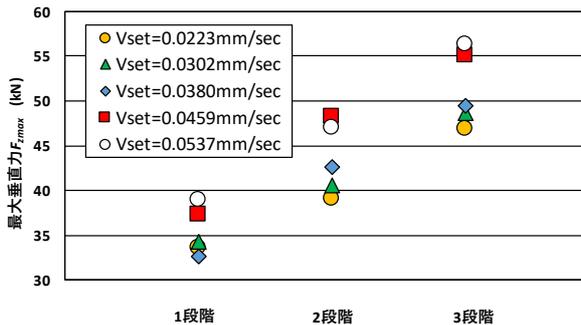


図-10 掘削段階ごとの最大垂直力  $F_{zmax}$

### 3.6 掘削段階ごとの最大トルク $T_{max}$

図-11に設定速度  $V_{set}$  に対する掘削段階ごとの最大トルク  $T_{max}$  を示す。ただし、最大トルク  $T_{max}$  は掘削段階ごとに複数ある数値のうち平均値をとっている。実験回数の少なさが影響したのか3.5の掘削段階ごとの最大垂直力  $F_{zmax}$  のようにはっきりとした傾向を把握することはできなかった。

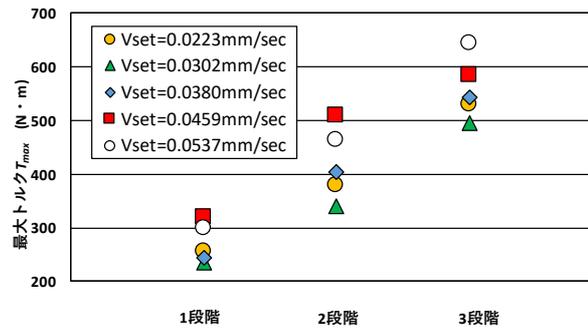


図-11 掘削段階ごとの最大トルク  $T_{max}$

## 4. 結論

- 掘削時間  $t$  との関係について、垂直力  $F_z$  は平面掘削では急激に増加し、その後垂直力  $F_z$  が増加することで初期端面掘削に移り、垂直力  $F_z$  が低下することで定常端面掘削になることが確認された。また、トルク  $T$  についても同様の傾向がみられ、ディスクカッタからの水平力により亀裂が生じて、その亀裂が供試体の中心部でつながり岩片が剥離する芯取れが発生した際にトルク  $T$  は急激に減少した。
- 変位制御について、どの設定速度  $V_{set}$  についてもグラフの形状は同じ傾向がみられ予想が可能である。また、モルタル供試体についてもモデル掘削機による変位制御での実験は力の把握ができたため、荷重制御実験も可能である。

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

- 花岡尚, 重松尚久, 室達朗:道路建設における環境に優しい硬質岩盤剥離掘削技術の開発, 平成20年度建設施工と建設シンポジウム論文集, pp.107-110, 2008.
- Snowdon, R.A.Ryley, M.D.and Temporal, J:A study of disc cutting in selected British rock. Int. J. of Rock Mech. Min. Sci.& Geomech. Abstrs.19, 107-121, 1982.
- 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, pp121-128, 2013.
- 河相拓真, 重松尚久, 小田登:室内試験における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, 令和元年度 建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集, pp.43-46, 2019.