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	○ 宮永	渚生
呉工業高等専門学校	重松	尚久
呉工業高等専門学校	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 岩盤を破砕する方式としては、カッタを押し付け て強引に破砕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 1)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²⁾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³⁾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。





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らないように斜めに配置して いる。

図-3 に芯取れの概略図⁴⁾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 片が剥離する現象である。本実験ではカッタ3が 当たると芯取れが起こるようになっている。また, 図-4 に芯残りの概略図⁴⁾を示す。芯残りとは最小 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 試体が残る現象である。



図-2 モデル掘削機の断面図



写真-1 モデル掘削機の概略図



2.2 実験装置

図-5 に実験装置の概略図を示す。実験装置は高 さ 1750mm, 幅 700mm, 奥行き 700mm である。直 径 400mm, 厚さ 10mm の鋼製円盤のターンテーブ ル, ターンテーブルを 2r.p.m で回転させるための モーター, 上部フレームに設置した最大推進力 50kN を有するウォームジャッキ, 垂直力 F_z と転が り抵抗 Fxを測定するロードセル(許容垂直力 50kN, 許容トルク2kN・m),および横方向Fyを測定する ロードセル(許容横方向力 10kN),下部には電動 モーター, チェーン, 減速機があり, この減速機に よって回転速度を調整できるようになっている。 なお、実験装置は幅 1370mm、奥行き 1100mm の鋼 板の上に乗っており横に設置されている油圧シリ ンダーを伸縮させることで実験装置を横転するこ とができる。横転させた供試体の真下に広範囲に わたって掘削土を回収するための受け皿を設置し, その下に荷重計を設置することで掘削土量 mの測 定を行う。



2.3 供試体

供試体は水結合材比 W/B=17%の円柱状の高強 度モルタル供試体(一軸圧縮強度 153.5N/mm²)を 使用した。寸法は掘削径の外側が割れる現象を抑 制するため高さ 172mm, 直径 370mm として作成 した。また,硬化後水温約 20℃で 90 日間の水中養 生を行った。

2.4 実験方法

時間あたりの掘削深さ zを一定にして掘削する 変位制御で実験を行った。実験では実験装置を横 転させた状態で行い,ターンテーブルに据え付け られた供試体を 2r.p.m で回転し,モデル掘削機を 一定の速さで押し当て掘削深さ z=35mm に到達す るまで掘削した。供試体の固定については鋼製の 外枠をはめて六角ボルトで固定した。また,一定の 貫入量を設定するウォームジャッキで,設定速度 V_{set} を 0.0223, 0.0302, 0.0380, 0.0459, 0.0537mm/sec の 5 パターンを設定した。実験回数は各 3 回ずつ ($V_{set}=0.0537mm/sec$ のみ 2 回)行った。そして,掘削 時間を t とし掘削しているときに作用している垂 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} =0.0223mm/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 F₂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 F₂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 F₂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。



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Fz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Fzの掘削時間t=430(sec)付近で垂直力Fz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/

3.3 設定速度 Vset と実測速度 V

実験条件の掘削深さz=35mm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°線から遠ざかっていく傾向がみられた。 45°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°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。



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 Vset と1回転あたりの掘削量 Vround

3.5 掘削段階ごとの最大垂直力Fzmax

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カFzmax

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にうち平均値をとっ 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_{cmax} 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Tmax

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。
- 2. 変位制御について、どの設定速度 Vset 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、モルタル供試体に関してもモ 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.
- 3) 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.
- 4)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.