

VI-1 端面掘削シールド掘進機用刃先の掘削特性

愛媛大学工学部 フェロー 室 達朗
愛媛大学大学院 学生会員 ○石城 龍彦
愛媛大学大学院 学生会員 弓立 真人

1. はじめに 現在、トンネル施工における掘削メカニズムは平面掘削である。平面掘削は大きな接線方向力と推進力を必要とし、また掘削刃の摩耗の問題などがある。本研究の目的は、掘削時の比エネルギーを減少させ、掘削力の低下と掘削刃の摩耗を少なくさせるための方策として、岩盤の端面を定常掘削するときの掘削特性を実験的に明らかにすることである。

2. 実験装置および供試体 掘削実験に使用した実験装置概略図を図-1に示す。実験装置はウォームギアジャッキ、掘削刃、ターンテーブル、減速機、モータによって構成されている。上部に設置した最大推力 50 kN、ストローク 35 cm のウォームギアジャッキに、出力 0.2 kw、回転数 0~28.5 r.p.m. の無段変速機付きモータの動力を伝えることで、掘削刃を一定の貫入速度 0~0.57 cm/round の範囲で貫入させることができる。そして、出力 1.5 kw のモータの動力を減速機を通して供試岩石を載せたターンテーブルに伝え、回転させることで掘削を行う仕組みである。掘削刃の形状は、図-2に示す。新品時のものを4種類、摩耗長が 1.0 cm である完摩時のものを4種類とする。また、供試体として一軸圧縮強度 $S_c=0.25 \text{ kN/cm}^2$ のセメントモルタル供試体を製作し擬似岩盤として使用した。

3. 実験方法 図-3に掘削部の概略図、作用力とその方向を示す。切込み幅 S は円柱供試体の側面から中心方向への距離を示しており、掘削刃の掘削軌跡円半径を 6.75 cm とし、供試体の直径を変化させることで調節している。掘削刃に作用する掘削力は、接線方向力 F_X 、横方向力 F_Y 、推進力 F_Z に分けてダイナモメータで測定した。実験は、セメントモルタル供試体の切込み幅 $S=6.0, 7.0, 8.0 \text{ cm}$ の3通り、単位貫入量 $D=0.1, 0.2, 0.3 \text{ cm/round}$ の3通り、新品時のものを4種類、完摩時のものを4種類、計8種類の掘削刃で、計72通りで行った。また、実験で発生した掘削土量を電子天秤で測定した。

4. 実験結果 図-4に、掘削実験結果の一例として定常掘削力 F_X, F_Y, F_Z と貫入量 Z の関係を示す。この波形の各頂点でモルタルの破壊が生じており、これらの極大値の平均を掘削力 F_{XP}, F_{YP}, F_{ZP} とした。

掘削動力は、回転動力 P_R (kNcm/s) と推進動力 P_T (kNcm/s) に分けることができる。回転動力 P_R は、掘削刃の転動距離 L ($=\pi RN/30$) (cm) と接線方向力 F_X (kN) の積を単位時間当たりで示したものであり次式に示す。 t は掘削終了時間とする。 L と Z の関係は $L=2\pi RZ/d$ である。 d は一秒間における貫入量である。

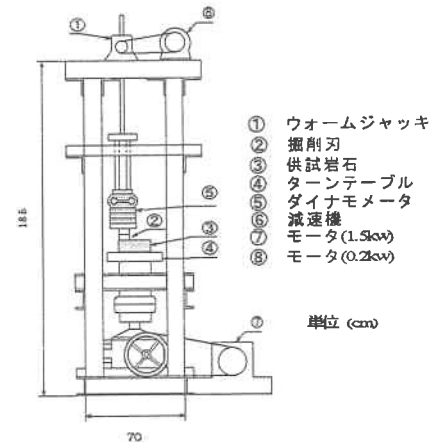


図-1 掘削試験機

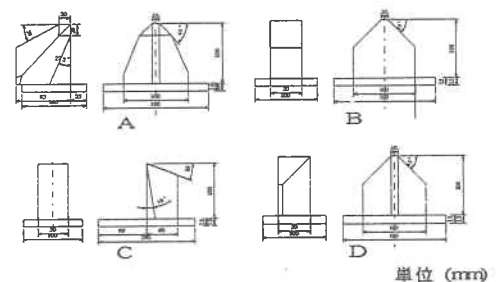
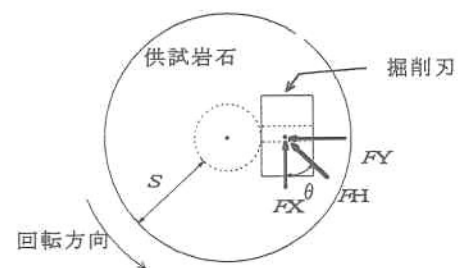
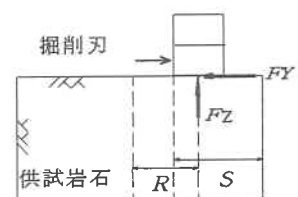


図-2 掘削刃形状



平面図



側面図

図-3 掘削試験機掘削部

$$P_R = \frac{1}{t} \int_0^L F_X dL \quad (\text{kNcm/s}) \quad (1)$$

推進動力 P_T は、掘削終了までの貫入量 $Z (=dN/60)(\text{cm})$ と推進力 F_Z (kN) との積を単位時間当たりで示したものであり次式に示す。

$$P_T = \frac{1}{t} \int_0^Z F_Z dz \quad (\text{kNcm/s}) \quad (2)$$

また、回転動力と推進動力の和を全動力 P (kNcm/s) として算定した。図-5 は、掘削時の全動力 P に対する回転動力 P_R と推進動力 P_T の割合を示したものである。 P_R と P_T について直線回帰し、次式に示す回帰式と相関係数を得た。 $P_R=0.995P$ ($r=1.000$)、 $P_T=0.005P$ ($r=0.813$) となり主に、回転動力により掘削が行われていることがわかった。

効果的な掘削を示す指数として、掘削に要する全動力(kNcm/s)をそのとき発生した掘削土量 $V_E(\text{cm}^3/\text{s})$ で除した値を比エネルギー $E_S(\text{kNcm}/\text{cm}^3)$ とし次式に示す。

$$E_S = \frac{P}{V_E} \quad (\text{kNcm}/\text{cm}^3) \quad (3)$$

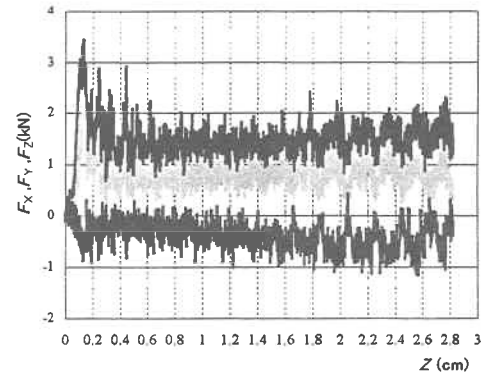
比エネルギーは、ある一定体積に対する必要仕事量であり、小さい値を示すほど効果的である。端面掘削の有効性を示すため破壊靱性($\text{MN}/\text{m}^{1.5}$)と一軸圧縮強度(MPa)からなる比エネルギーを最小にするための掘削軌道間隔 $H(\text{cm})$ 、貫入量 $Z(\text{cm})$ において $(H/Z)_{OP}$ という最適掘削条件¹⁾により平面掘削実験を行った。それより、端面掘削時と平面掘削時において、端面掘削時の平面掘削時の比エネルギーに対する比率は刃 A では約 5.30%、刃 B では約 8.40%、刃 C では約 10.61%、刃 D では約 6.36%、であった。全体的には端面掘削時の平面掘削時の比エネルギーに対する比率は約 7.67% であり、端面掘削のほうが非常に効率のよいものだと言えた。図-6 に最適な掘削条件を求めるため、切り込み幅 $S(\text{cm})$ を単位貫入量 $D(\text{cm}/\text{round})$ で除した $S/D(\text{round})$ に対する比エネルギー $E_S(\text{kNcm}/\text{cm}^3)$ の関係を示す。図より、 S/D の増加に対して放物線的に増加する傾向が見られる。比エネルギー E_S を S/D に対して二次曲線に回帰し、以下に示す。 r は相関係数である。

$$(a) \quad A-1 \quad E_S = 0.020 \times 10^{-2} (S/D - 18)^2 + 0.262 \quad (r=0.910)$$

上式より、比エネルギーは A-1 に対して最適な $S/D=18(\text{round})$ で最小の値をとっている。

5.まとめ 以上の結果により、4 種類の刃においては刃 A が最も小さな比エネルギーを示したので、刃 A が最適な掘削刃であると言える。セメントモルタルにおける最適な掘削条件は、掘削刃 A-1、切り込み幅 $S(\text{cm})$ を単位貫入量 $D(\text{cm}/\text{round})$ で除した $S/D=18(\text{round})$ であることがわかった。

6.参考文献 1) F.Gong, 佐藤一彦、浅井秀明：円周軌道切削における最適切削条件及び最大切削抵抗—ディスクカッタによる岩石の切削に関する研究(第 2 報)—, 資源・素材学会誌、第 108 巻、第 12 号、pp.849~854, 1992.



C-1, $D=0.2\text{cm}/\text{round}$, $S=8\text{cm}$

図-4 定常掘削力 F_X, F_Y, F_Z と貫入量 Z の関係

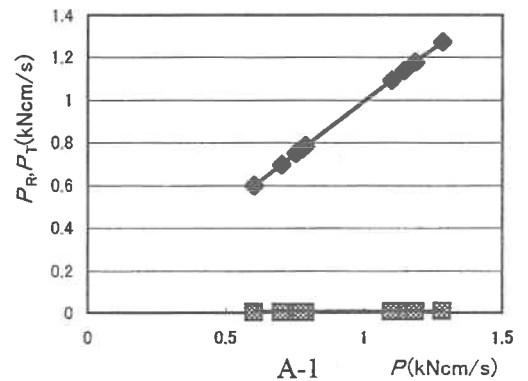


図-5 端面定常動力の割合

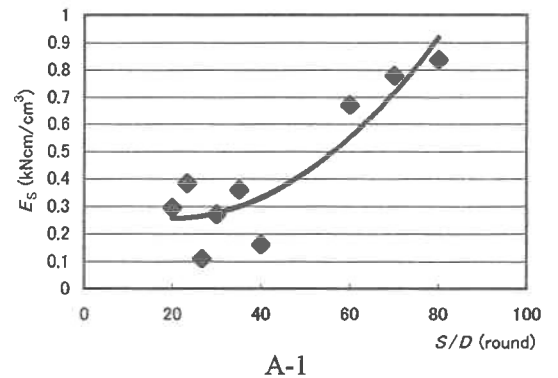


図-6 比エネルギー E_S と S/D の関係