

9. 端面掘削方式を用いた岩盤深礎掘進機の性能実験

愛媛大学大学院：○岩田 智明
愛媛大学工学部：室 達朗、河野 幸一

1. 緒言

起伏が多く周りを海で囲まれた決して広くはない国土の我が国において、より豊かな経済活動を進めようとするとき、交通、輸送、発電などに多くのトンネル、橋梁、道路の建設が必要となる。また地方の人口分散から都市部への人口集中といった社会の流れに伴って、今後さらに深い地下の利用、開発が進むことが予想される。このことから、掘削方法の開発による合理化、コストダウンを要求する掘削効率の発展が求められる。

2. 端面掘削

従来の掘削工法の多くが1自由面を掘削する平面掘削を採用している。自由面とは、破碎の際に破壊を拘束しない面のことをいうが、掘削効率を向上させるための方策として、2自由面をもつ岩石の端面を剥離破碎刃で掘削する端面掘削は、平面掘削との比較実験では比エネルギーが約1/9～1/41に減少し、端面掘削方式は極めて効率的な掘削が可能なことが過去の研究¹⁾から明らかにされている。

3. 実験装置および実験方法

(1) 実験装置²⁾

実験装置概略図を図-1に示す。岩石供試体は、回転速度3r.p.m.のターンテーブルに設置しており、深礎掘進機モデルの1回転当たりの貫入深さを制御するためのウォームギアジャッキを用意し、同図に示す内径15cm、外径30cm、高さ27cmの中空の円筒岩石供試体において、各4個の剥離破碎刃をもつ計3段で構成されている深礎掘削機モデルで供

試体を鉛直方向に掘削する。深礎掘削機モデルを写真-1に示す。刃には、直径5(cm)、刃物角 $55\pi/180(\text{rad})$ の円盤型剥離破碎刃を使用する。段の高さである切込み深さ H を2.0(cm)、端面から剥離破碎刃までの距離である切込み幅 S を2(cm)のピッチで回転させながら岩石端部に押しつけることにより岩石を破碎していくことで掘削が行なわれる。供試体はモルタル供試体を擬似岩石とし、モルタルA(一軸圧縮強度 $S_c=0.382\text{kN/cm}^2$)、モルタルB($S_c=0.962\text{kN/cm}^2$)、モルタルC($S_c=1.756\text{kN/cm}^2$)において、それぞれ1回転当たりの貫入深さ p を0.05、0.10、0.15(cm/round)の3通りに設定し端面掘削実験を行った。

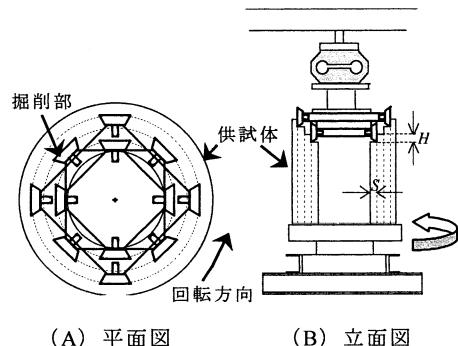


図-1 実験装置概略図



写真-1 深礎掘削機モデル

(2) 実験方法

掘削中に1回転当たりの貫入深さが一定となる変位制御の実験を行い、推進力 F_z (kN)、作用トルク T (Nm)、貫入量 d (cm)を測定する。1枚の刃に作用する推進力 f_z (kN)、転がり抵抗力 f_x (kN)、全動力 P (kNcm/s)および効率的な掘削を示す指標として全動力 P (kNcm/s)を発生した掘削土量 V_E (cm³/s)で除して得られる比エネルギー E_S (kNcm/cm³)についてそれぞれ計算した。

4. 実験結果

(1) 推進力 F_z と作用トルク T

図-2に一例としてモルタルBの推進力 F_z と掘削時間 t の結果を示す。図中のI (E)、I (S)、II (E)、II (S)、III (E)、III (S)はI (E)：1段目の刃が掘削し始め端面が破壊する（初期端面掘削）までの区間、I (S)：破壊後、定常に掘削（定常端面掘削）し、2段目の刃が接地するまでの区間、II (E)：2段目の刃が初期端面掘削するまでの区間、II (S)：破壊後、3段目の刃が接地するまでの区間を示している（III (E)以下同様）。図から分かるように初期端面掘削時と定常端面掘削時とでは、明らかに異なる変化を示す。

刃が初めて供試体に接地して端面が破壊するまで(I (E))推進力 F_z は急激に増加し、端面破壊後(I (S))は推進力 F_z は穏やかに増加し、ある一定値を示すことが明らかとされた。2段目、3段目も同様な傾向を示す。

また、一例としてモルタルBの1回転当たりの貫入深さ p が0.05cm/round時の作用トルク T と掘削時間 t の結果を図-3に示す。推進力 F_z の変化と同様、初期端面掘削時と定常端面掘削時での変化は相違する。

(2) 掘削段階別の1枚の刃に作用する

推進力 f_z 及び転がり抵抗力 f_x

図-4に掘削段階別の刃1枚に作用する推進力 f_z の変化について示す。この推進力 f_z は、

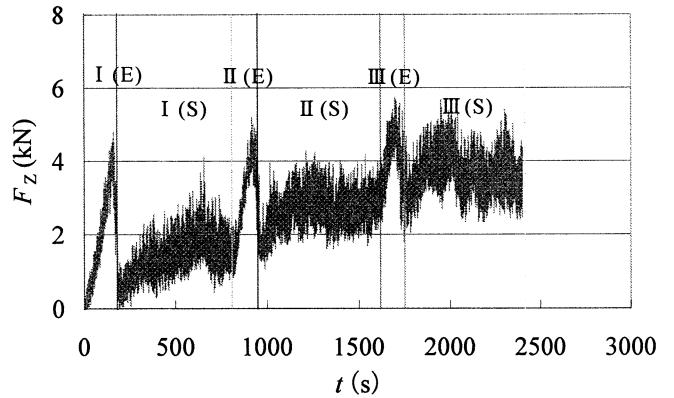


図-2 推進力 F_z と掘削時間 t の関係
(モルタルB $p=0.05\text{cm/round}$)

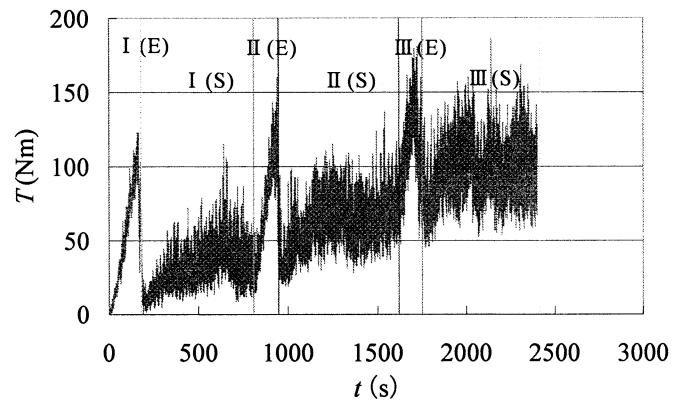


図-3 作用トルク T と掘削時間 t の関係
(モルタルB $p=0.05\text{cm/round}$)

I (E)、I (S)時では一段目の刃、II (E)、II (S)時では二段目の刃、III (E)、III (S)時では三段目の刃の推進力 f_z を示している。つまり、II (E)時では1段目は定常端面掘削をしているが、この時の推進力 f_z は2段目の初期端面掘削を行なっている刃の大きさである。同じ段での初期端面掘削時と定常端面掘削時の推進力 f_z を比較すると、初期端面掘削時の方が大きい値を示していることが分かる。I (E)の値がII (E)、III (E)の値に対して大きな値を示した理由、またI (S)の値がII (S)、III (S)の値に対して大きな値を示した原因には、切り込み幅 S の減少に伴い、推進力 f_z が低下したと考えられる。またII (E)、III (E)時では、初期端面掘削を行っている刃と定常端面掘削を行っている刃が存在するため、合成されたデータから初期端面掘削を行っている刃のみの正確な推進力 f_z の抽出が完全にできていない可能性も

含まれる。

また、一段のみで掘削している状態での初期端面掘削時の推進力 f_{ZE} に対する定常端面掘削時の推進力 f_{ZS} の比を減少率 ξ_z と表すと、平均減少率 ξ_z は実験より 0.781 の値が得られた。

図-5 に掘削段階別の刃 1 枚に作用する転がり抵抗力 f_x の変化について示す。刃 1 枚に作用する推進力 f_z の変化と同様、同じ段では初期端面掘削時の方が大きい値を示していることが確認された。なお、二、三段目において、一段目と比較して小さくなるのは切り込み幅 S のが壁面切削により見かけ上、減少したためだと考えられる。

ここで、減少率 ξ_x を一段のみで掘削している状態での初期端面掘削時の転がり抵抗力 f_{XE} に対する定常端面掘削時の転がり抵抗力 f_{XS} の比で表すと、平均減少率 ξ_x は実験より 0.701 の値が得られた。

(3) 全動力 P

全動力 $P(\text{kNm/s})$ は、剥離破碎刃の転動距離 $L(\text{cm})$ と転がり抵抗力 $F_x(\text{kN})$ との積を単位時間当たりで示した回転動力 $P_R(\text{kNm/s})$ と掘削終了までの貫入量 6.0cm と推進力との積を単位時間当たりで示した推進動力 $P_T(\text{kNm/s})$ の和を全動力 P として算定した。回転動力 P_R と推進動力 P_T は推進力 $F_z(\text{kN})$ 、作用トルク $T(\text{kNm})$ よび回転数 $N(\text{r.p.m.})$ を用いて次式で表される。

$$P_R = \frac{2\pi N}{60} T \quad (5)$$

$$P_T = F_z \cdot p \quad (6)$$

掘削段階別の全動力 P の変化について図-6 に示す。掘削する刃の枚数が増えるに従って全動力は増加し、また同じ段での掘削に対しては定常端面掘削時のほうが全動力が小さい値を示すことが分かる。またこの実験における最終での全動力 $P(\text{kNm/s})$ は一軸圧縮強度 $S_c(\text{kN/cm}^2)$ と 1 回転当たりの貫入深さ

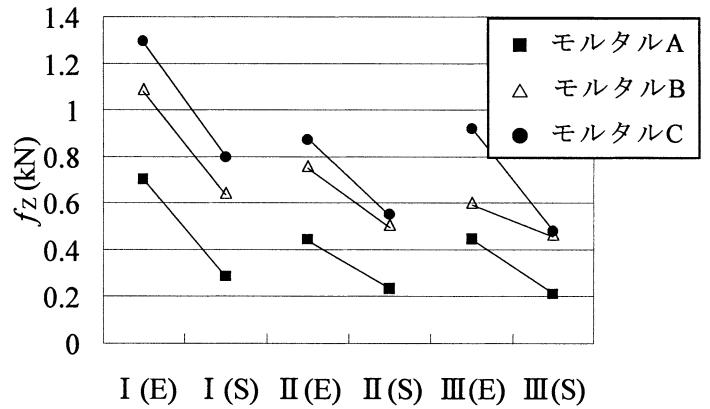


図-4 掘削段階別の刃 1 枚に作用する推進力 f_z の変動($p=0.05\text{cm/round}$)

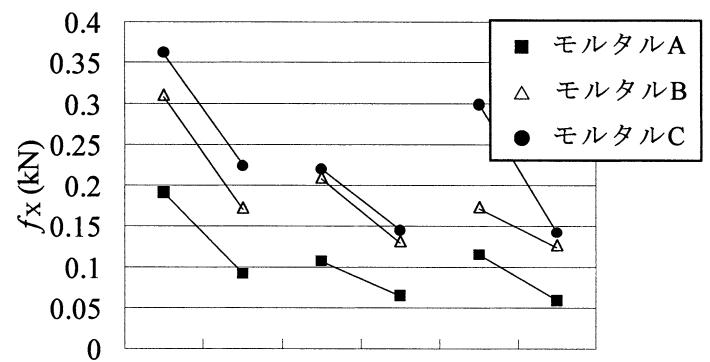


図-5 掘削段階別の刃 1 枚に作用する転がり抵抗力 f_x の変動($p=0.05\text{cm/round}$)

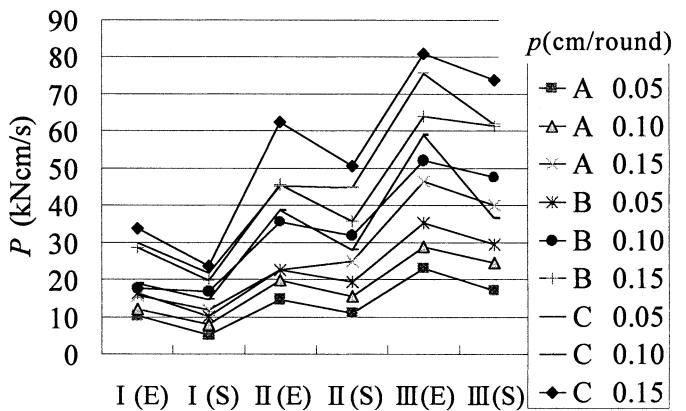


図-6 掘削段階別の全動力 P の変動

$p(\text{cm/round})$ を用いて次式の関係で表される。

$$P = 219 S_c^{0.479} p^{0.682} \quad (R^2=0.983) \quad (7)$$

(4) 掘削土量 V_E

段階毎の掘削土量を算出し、単位時間あたりの掘削土量 V_E を図-7 に示す。またこの実験における最終での単位時間当たりの掘削

土量 V_E (cm^3/s) は一軸圧縮強度 S_C (kN/cm^2) と 1 回転当たりの貫入深さ p (cm/round) を用いて次式の関係で表される。

$$V_E = 22.7 S_C^{-0.0119} p^{1.07} \quad (R^2=0.992) \quad (8)$$

(5) 比エネルギー E_S

効率的な掘削を示す指標として、掘削に要する全動力 P をその時に発生した掘削土量 V_E で除した値を比エネルギー E_S とする。掘削段階別の比エネルギー E_S の変化について図-8 に示す。定常端面掘削時の比エネルギーは初期端面掘削時に比べ大きな値を示した。

またこの実験における最終での比エネルギー E_S ($\text{kN}\text{cm}/\text{cm}^3$) は一軸圧縮強度 S_C (kN/cm^2) と 1 回転当たりの貫入深さ p (cm/round) を用いて次式の関係で表される。

$$E_S = 1.08 S_C^{0.503} p^{-0.335} \quad (R^2=0.980) \quad (9)$$

次に比エネルギー E_S と 1 回転当たりの貫入深さ p (cm/round) の関係を図-9 に示す。図から分かるように 1 回転当たりの貫入深さが大きくなるにつれ、比エネルギーは減少の傾向が見られる。

5.結論

(1) 定常端面掘削時の刃 1 枚に作用する推進力 f_z 、転がり抵抗力 f_x は初期端面掘削時に比べ小さな値を示す。

(2) 平均減少率は ξ_z が 0.781、 ξ_x が 0.701 である。

(3) 各々のモルタルに対して、比エネルギーは 1 回転当たりの貫入深さ p が大きければ大きいほど小さく、特に一軸圧縮強度が大きいものほど 1 回転当たりの貫入深さ p を増やせば効率的に掘削を行えることが判明した。

参考文献

- 1) Muro.T., Tsuchiya.K, Kohno. K. 2002. Experimental considerations for steady state edge excavation under a constant cutting depth for a mortar specimen using a disc cutter bit, Jounal of Terramechanics, 10, 143-159

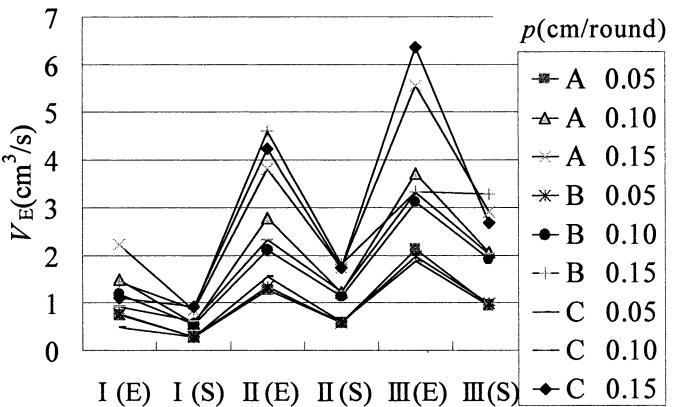


図-7 掘削段階別の掘削土量 V_E の変動

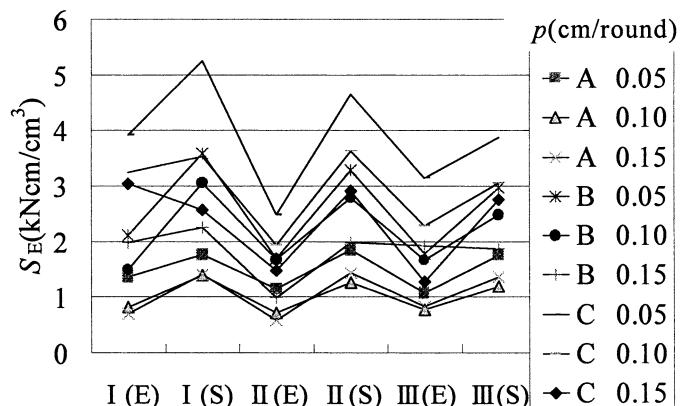


図-8 掘削段階別の比エネルギー E_S の変動

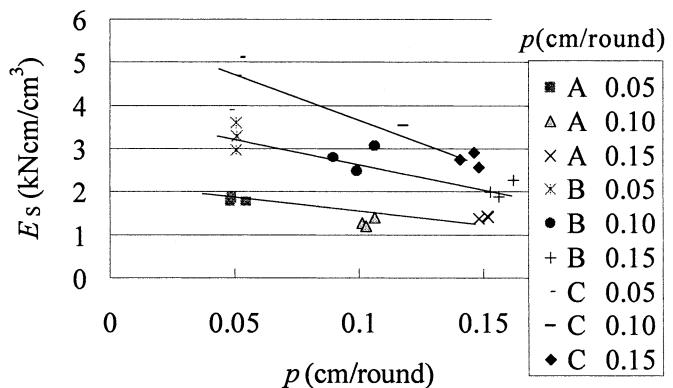


図-9 比エネルギー E_S と
1 回転当たりの貫入深さ p の関係

- 2) Muro.T., Tran .D. T. 2002. Edge Excavation Property of a Disc Cutter Bit in New Tunnel Boring Machine, Today and Tomorrow of the Science and Technology Exchange between Ehime University – Japan and Ecole Central de Nantes - France, Proceeding of the 2nd EU – ECN Joint Seminar 2001, 183-190.