

岩盤における端面掘削方式を用いた立坑掘進機の開発

DEVELOPMENT OF SHAFT EXCAVATOR DUE TO EDGE EXCAVATION SYSTEM FOR A ROCK MASS

室 達朗*・岩田智明**・河野幸一***

Tatsuro MURO, Tomoaki IWATA and Kouichi KOHNO

The aim of this paper is to obtain a fundamental knowledge developing a new trench excavator for several kinds of rock mass of sandy stone, tuffaceous rock and cement mortar by means of an edge excavation system. The trench excavator having 3 levels consisted of each 4 edge disc cutter bits was penetrated at a given penetration depth per round into a hollow cylindrical rock specimen. As the results, it was observed that the specific cutting energy decreases with the increment of penetration depth per round for a given unconfined compressive strength of rock material.

Key Words: trench excavator, edge excavation system, disc cutter bit, rock mass

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

従来のトンネル掘削工法などにおいて、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、端面掘削方式が極めて効率的な掘削を行い得ることが過去の研究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⁾

* フェロー会員 工学博士 愛媛大学 工学部 環境建設工学科

**学生会員 愛媛大学大学院 理工学研究科

***正会員 愛媛大学 工学部 環境建設工学科

実験装置を図-1 に示す。その大きさは高さ 155cm、幅 70cm、奥行 70cm である。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、立坑掘進機モデル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 個の掘削刃をもつ計 3 段で構成されている立坑掘削機モデルで供試体を鉛直方向に掘削する。刃には、硬岩盤の掘削に適している円盤型剥離破碎刃で、直径 5 (cm)、刃物角 $55\pi/180(\text{rad})$ のものを使用する。掘削部の詳細については図-2 および写真-1 に示す。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 2.0(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。供試岩石は流紋岩質軽石凝灰岩（大谷石）（栃木県宇都宮市大谷町産：一軸圧縮強度 $S_c=1.035\text{kN/cm}^2$ ）と砂岩（島根県八束郡宍道町産： $S_c=2.903\text{kN/cm}^2$ ）、擬似岩石としてセメントモルタル供試体（ $S_c=1.982\text{kN/cm}^2$ ）において、それぞれ 1 回転当たりの貫入深さ $p=0.05\sim0.20(\text{cm/round})$ で設定し端面掘削実験を行った。岩石の物理特性を表-1 に示す。

(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 $F_z(\text{kN})$ 、作用トルク $T(\text{Nm})$ 、貫入量 $d(\text{cm})$ を測定する。1 枚の刃に作用する推進力 $f_z(\text{kN})$ 、転がり抵抗力 $f_x(\text{kN})$ 、全動力 $P(\text{kNcm/s})$ および効率的な掘削を示す指数として全動力 P (kNcm/s) を発生した掘削土量 $V_E(\text{cm}^3/\text{s})$ で除して得られる比エネルギー $E_s(\text{kNcm/cm}^3)$ についてそれぞれ計算した。

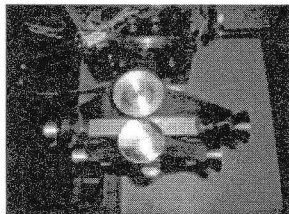


写真-1 立坑掘削機モデル

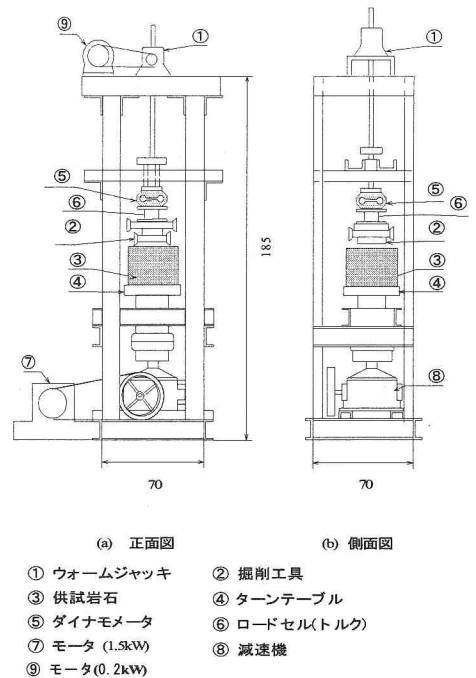


図-1 実験装置

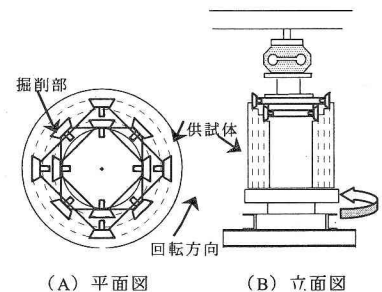


図-2 立坑掘削機モデル

表-1 供試体の物理特性

岩石名		砂岩	大谷石	セメントモルタル
見かけ比重	G_n	2.09±0.010	1.65±0.02	2.07±0.03
真比重	G_s	—	1.71±0.04	2.47±0.04
自然含水比	W (%)	5.02±0.229	3.70±0.15	13.4±0.7
吸水率	W' (%)	10.9±0.144	17.5±0.3	12.7±0.3
一軸圧縮強度	S_c kN/cm^2	2.90±0.17	1.04±0.17	1.98±0.10
圧裂引張強度	S_t kN/cm^2	0.624±0.076	0.146±0.022	0.142±0.024
ショア硬さ	H_s	32.7±6.8	14.2±7.8	10.1±2.4
超音波電波速度	V_p m/s	—	1916±50	2590±39

4. 実験結果

(1) 推進力 F_z

図-3 に砂岩における推進力と掘削時間の結果、図-4 に大谷石における推進力と掘削時間の結果、図-5 にセメントモルタルにおける推進力と掘削時間の結果を示す。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）。

砂岩及びセメントモルタル供試体を基本的な推進力の変化とした場合、大谷石は二段目、三段目の初期端面破壊時の値が小さいことがわかる。

(2) 作用トルク T

図-6 に砂岩における作用トルクと掘削時間の結果、図-7 に大谷石における作用トルクと掘削時間の結果、図-8 にセメントモルタルにおける作用トルクと掘削時間の結果を示す。セメントモルタル供試体を基本的な推進力の変化とした場合、砂岩は定常端面掘削時において激しく変動することが見てわかり、大谷石は二段目、三段目の初期端面破壊時の最大となる値が小さいことがわかる。

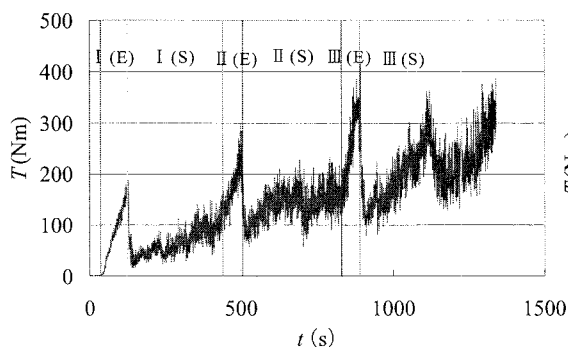


図-6 作用トルク T と掘削時間 t の関係
(砂岩 $p=0.1\text{cm/round}$)

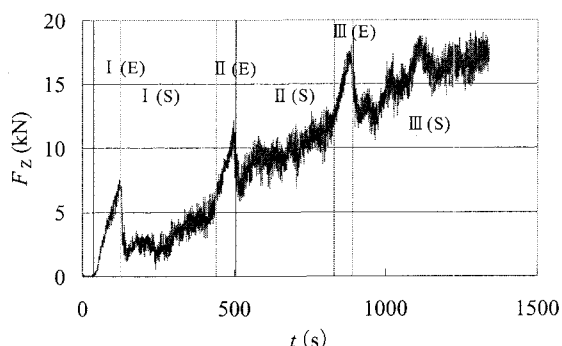


図-3 推進力 F_z と掘削時間 t の関係
(砂岩 $p=0.1\text{cm/round}$)

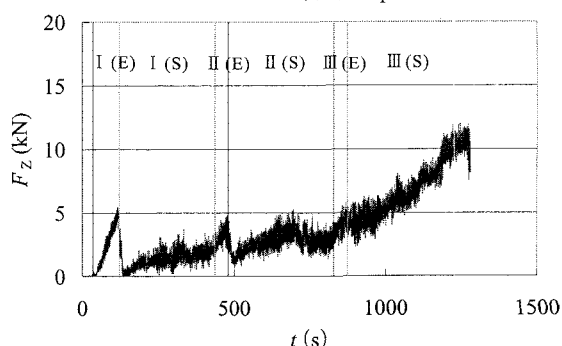


図-4 推進力 F_z と掘削時間 t の関係
(大谷石 $p=0.1\text{cm/round}$)

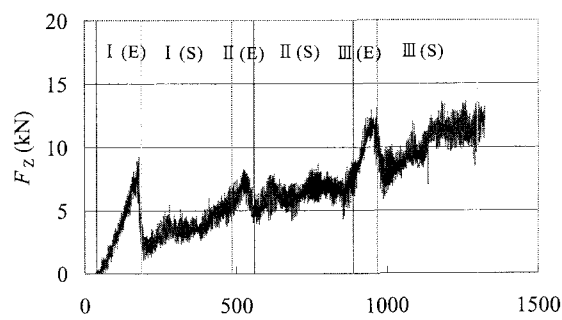


図-5 推進力 F_z と掘削時間 t の関係
(セメントモルタル $p=0.1\text{cm/round}$)

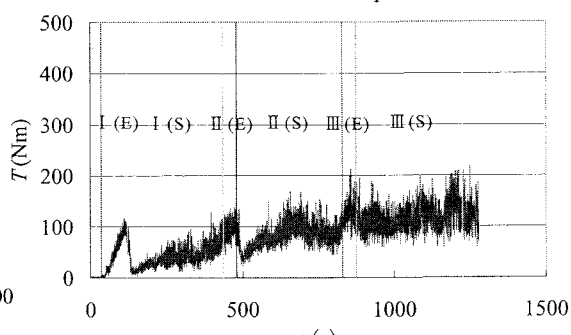


図-7 作用トルク T と掘削時間 t の関係
(大谷石 $p=0.1\text{cm/round}$)

(3) 掘削段階別の刃1枚あたりの推進力 f_z 及び
転がり抵抗力 f_x

図-9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、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。このことはI(E)、I(S)時では顕著に表れているが、II(E)、II(S)、III(E)、III(S)では必ずしも初期端面掘削時の方が大きいとは言えない。これは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し、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推進力 f_z を抽出することは困難であるためという理由と、掘削が進むにつれ掘削深度は増していき、その際に形成される壁面により接地面積が増大し、結果的に推進力 f_z が大きくなっているという理由が考えられる。なお、I(E)、I(S)に比較してII(E)、II(S)、III(E)、III(S)が減少している理由は、切り込み幅 S の減少に伴うものである。

ここで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} と定常端面掘削時の推進力 f_{zS} の比を次式に表す。

$$\xi_z = \frac{f_{zS}}{f_{zE}} \quad (1)$$

ここでの ξ_z は減少率を示す。減少率 ξ_z は一軸圧縮強度 S_c (kN/cm²)と貫入深さ p (cm/round)により、次式の関係で表される。

$$\xi_z = 0.836 S_c^{-0.140} p^{0.172} \quad (R=0.456) \quad (2)$$

図-10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_{xE} と定常端面掘削時の推進力 f_{xS} の比を次式に表す。

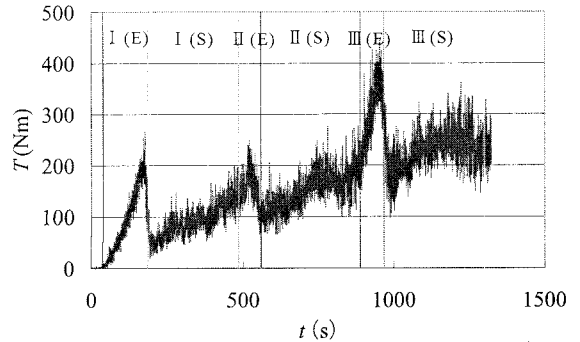


図-8 作用トルク T と掘削時間 t の関係
(セメントモルタル $p=0.1$ cm/round)

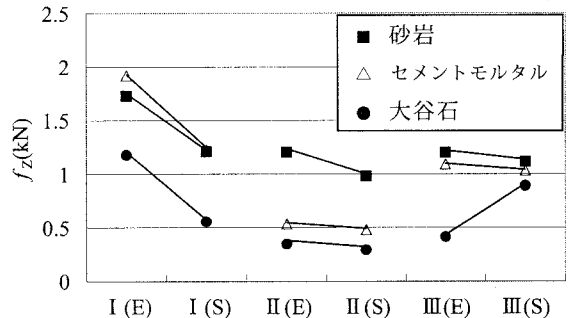


図-9 掘削段階別の刃1枚に作用する推進力 f_z の変動
($p=0.1$ cm/round)

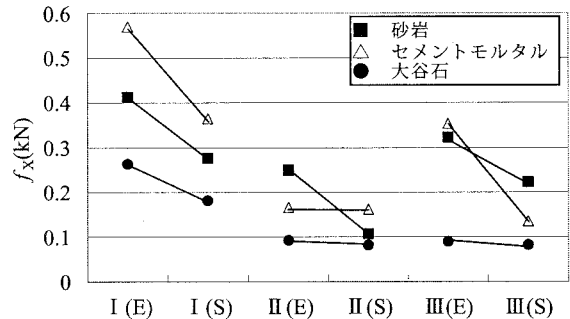


図-10 掘削段階別の刃1枚に作用する
転がり抵抗力 f_x の変動
($p=0.1$ cm/round)

$$\xi_X = \frac{f_{XS}}{f_{XE}} \quad (3)$$

ここでの ξ_X は減少率を示す。減少率 ξ_X は一軸圧縮強度 S_C (kN/cm²)と貫入深さ p (cm/round)により、次式の関係で表される。

$$\xi_X = 0.499 S_C^{-0.545} p^{0.311} \quad (R=0.561) \quad (4)$$

(3) 全動力 P

全動力 P (kNcm/s)は、剥離破碎刃を転動させるときの転動距離 L (cm)と転がり抵抗力 F_X (kN)との積を単位時間当たりで示した回転動力 P_R 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 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 、作用トルク T および回転数 N 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-11に示す。掘削する刃の枚数が増えるにしたが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わかる。

またこの実験における最終での全動力 P の関係は一軸圧縮強度 S_C (kN/cm²)と貫入深さ p を用いて次式の関係で表される。

$$P = 413.5 S_C^{-0.988} p^{1.189} \quad (R=0.928) \quad (7)$$

(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-12に示す。

またこの実験における最終での単位時間あたりの掘削土量 V_E の関係は一軸圧縮強度 S_C (kN/cm²)と貫入深さ p (cm/round)を用いて次式の関係で表される。

$$V_E = 19.5 S_C^{-0.145} p^{0.966} \quad (R^2=0.985) \quad (8)$$

(5) 比エネルギー E_S

効率的な掘削を示す指数として、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 (cm³/s)で除した値を比エネルギー E_S (kNcm/cm³)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-13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。

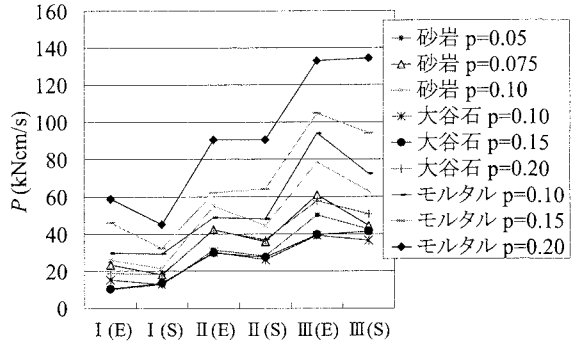


図-11 掘削段階別の全動力 P の変動

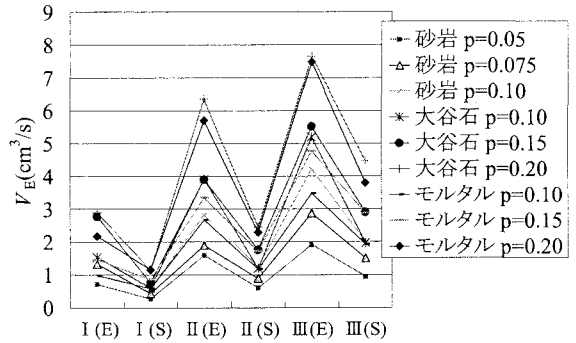


図-12 掘削段階別の掘削土量 V_E の変動

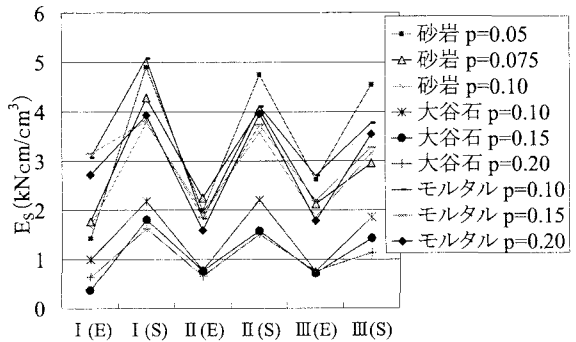


図-13 掘削段階別の比エネルギー E_S の変動

またこの実験における最終での比エネルギー E_s の関係は一軸圧縮強度 S_c (kN/cm²) と貫入深さ p (cm/round) を用いて次式の関係で表される。

$$E_s = 1.66 S_c^{0.685} p^{-0.0430} \quad (R^2=0.653) \quad (9)$$

次に比エネルギー E_s と貫入深さ p (cm/round) の関係を図-14 に示す。図からわかるように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。

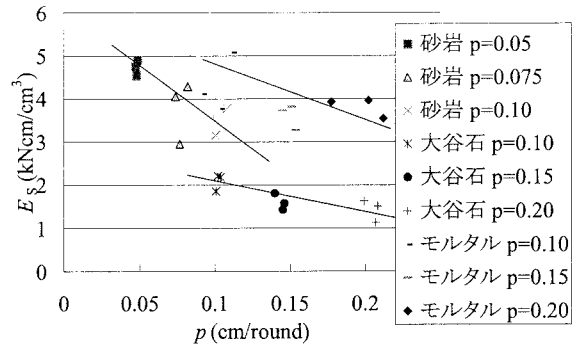


図-14 比エネルギー E_s と貫入深さ p の関係

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 f_x は初期端面掘削時に比べ小さな値を示す。

(2) 減少率は ξ_z も ξ_x も共に 0.425~0.708 程度であった。

(3) 各岩石試料に対して、比エネルギーは貫入深さ p が大きければ大きいほど小さく、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.
- 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.