

1. 山岳地における鉄塔基礎建設用小型掘削機の開発

立命館大学 ○橋本 真典
 立命館大学 建山 和由
 エイト工業 辻 八郎

1. はじめに

大型の送電鉄塔建設における基礎工事では、直径2～3m、深さ15～20mの縦坑を地盤中に掘削する必要がある。山岳地でこの鉄塔を建設する場合、機械搬入の困難さから人力施工が中心となるが、作業中の事故や作業員の健康への影響、工期の不確定などの問題から作業の機械化が求められている。本研究では、ヘリコプターでの搬入が可能な程度の小型掘削機で岩盤を掘削することのできる機械の開発を試みた。この機械は、油圧ショベルをベースにアームの先端に回転式掘削バケットを取り付けたもので、掘削ビットと削岩機で岩盤を掘削し、バキュームを用いて掘削ズリを排土する機構を有している。ベースマシンは縦坑の外に置き、アームを操作して掘削バケットで縦坑を掘削する機構としたため、作業員が縦坑の中に入る必要がなくなり安全性が大幅に改善される。本稿ではこの掘削機を用いた場合の掘削効率と岩盤強度との関係について報告する。

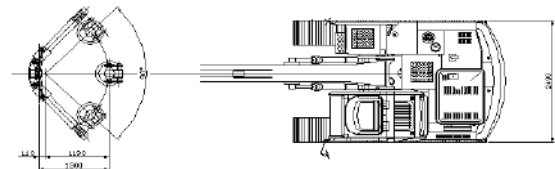


図 2.2 掘削機械平面図

2. 掘削機の掘削能力に関する検討

2.1 掘削機械の概要

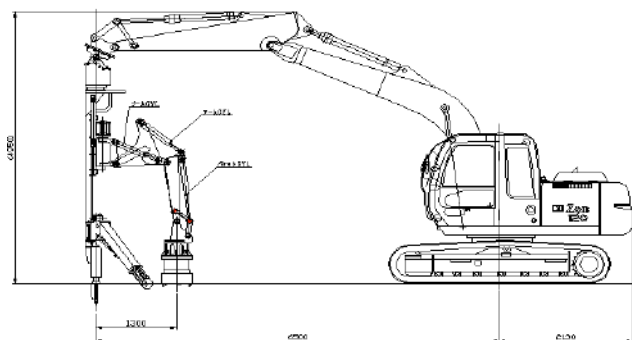


図 2.1 掘削機械立面図

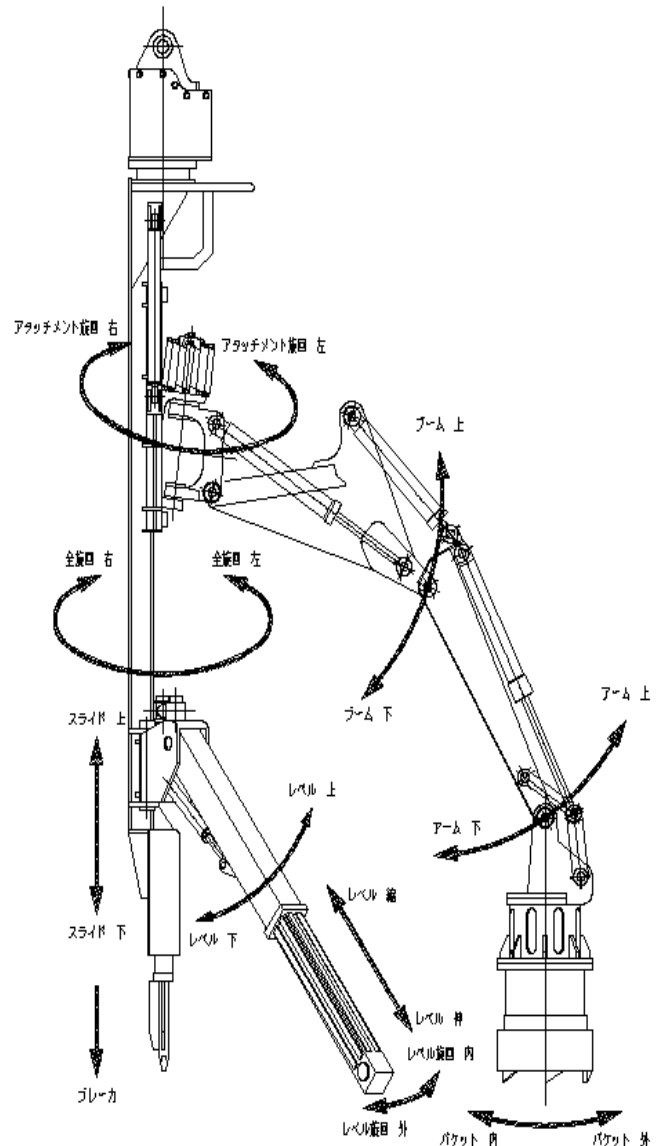


図 2.3 縦坑掘削機構全体図

今回開発する岩盤掘削機は、作業現場の制限を受
けず、機械搬入のための工事用道路を新たに設ける
ことが不要となる程度の小型機であり、かつ岩盤を
掘削することのできる能力を有することが求めら
れる。これらの要件を満たす掘削機としては、日立
建機のZAXIS120をベースマシンとし、アーム
先端部に岩盤掘削機構を取り付けた機構とした。

図 2.1、図 2.2 に掘削機の概観を、図 2.3 に掘削
部を示す。図 2.3 には本稿で使用する機械用語と機
械の可動方向を示している。さらに図 2.3 にあるバ
ケット部の写真を写真 2.1 に示す。このバケットを
岩盤面に押しつけながら回転させることにより岩
盤掘削を行なうことができる。

岩盤を掘削するためのビットとしては、写真に示
すように、8 個のコンカルビットをバケット内部に
配置した。また、バケットの中心にコンカルビッ
ドで掘削できない硬岩に亀裂を入れるための油圧ブ
レーカを配置した。さらにバケットには掘削した際
に生じる掘削ズリをバキュームにより吸引して排
出する機構も持たせている。

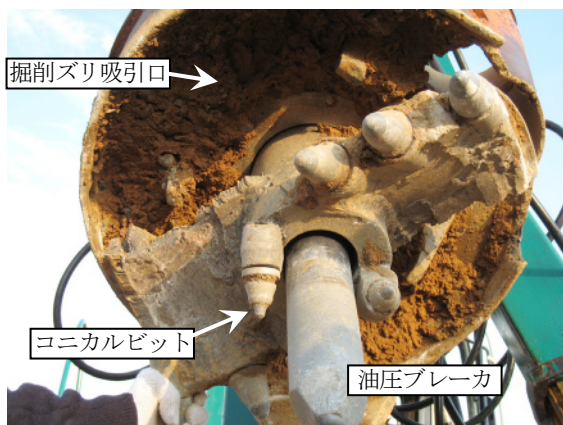


写真 2.1 バケット部

2.2 ビットに作用する力

図 2.4 は、ビットで物質を掘削している状況の模
式図である。図中刃先と記載されている箇所がビッ
トの先端部分であり、被掘削物と記載されていると
ころが、掘削されている物質を表す。ビットは鉛直
方向の押付力で物質に押し付けられ、水平掘削力
で掘削を行っていく。このときの押付力と水平掘削力
の合力が掘削力となる。

これに対し、ビットには被掘削物から掘削抵抗が
作用する。掘削抵抗は、作用・反作用の関係から、
掘削力と方向が逆で大きさが同じ力として作用す
る。掘削抵抗の鉛直成分を背分力、水平成分を主分
力という。

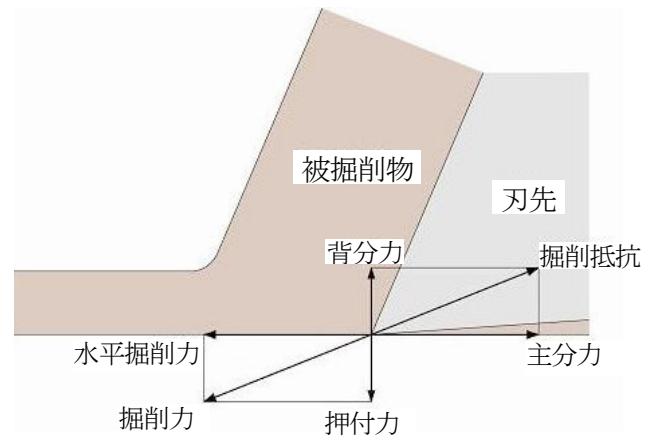


図 2.4 掘削中の刃先に作用する力の呼称

2.3 掘削機の最大押付力と掘削力

掘削機の掘削能力を算定するためには、掘削のた
めに発揮することのできる最大反力とバケットが
発揮することのできる最大回転力を把握する必要
がある。

掘削機が発揮することのできる最大押付力は、油
圧ショベルによる押付力 5 t にバケットの自重 1.5
t を加えた 6.5 t と考えた。ただし、掘削機にはそ
の中心に油圧ブレーカが取り付けられており、岩盤
からの鉛直反力の一部は油圧ブレーカにより受け
持たれると考えられる。油圧ブレーカと掘削ビット
による鉛直反力の負担割合は、岩盤硬さや作業状況
により異なるため、一概に決めることができない。
ここでは、平均的に油圧ブレーカが鉛直反力の 50%
を受け持つと設定して、以下の議論を進める。この
設定に従うと、掘削機のバケットに取り付けられた
8 個のコンカルビットが受け持つ鉛直反力は、3.25 t
となり、1 個あたりの最大押付力は、406kg となる。

バケットが発揮することのできる最大掘削力は、
モータの装備トルクから計算することができる。本
掘削機に装備されたバケット回転用のモータの最
大トルクは、1.592 tm であり、バケットの直径は、
521.43mm ある。コンカルビットは、取り付け位置に

より回転半径が異なるため、各ビットの掘削力も同一でないが、本研究では、コニカルビットの水平掘削力の平均値を使うことにする。この考えに従い、ビットの平均回転直径をバケット直径の半分の260.7 mm と考えると、バケット全体の水平掘削力は6.11 t となり、コニカルビット1個あたりの水平掘削力は764 kg となる。

2.4 掘削抵抗の算出

2.4.1 掘削抵抗算定式の導出（主分力）

コニカルビットによる岩盤掘削に関する理論的な考察は、ほとんど行われていないが、西澤らは、次元解析を使った考察を行っている¹⁾。

西澤らによって導き出された主分力を算出する式を以下に示す。

$$P = p \frac{K_c^2}{E} t \quad (2.1)$$

F : 主分力 (N)

K_c : 破壊靱性 ($\text{N}/\text{m}^{1.5}$)

E : 弾性係数 (N/m^2)

p : $f_2\left(\frac{t}{B}\right)$ で表せる関数

t : 掘削深さ (m)

B : 刃幅 (m)

2.4.2 掘削抵抗算定式の導出（背分力）

コニカルビットで岩盤を掘削するときの掘削抵抗の背分力の算出式は、さまざまな研究が進められているが、実用性のある定式化は未だ確立されていない。主分力と背分力は掘削抵抗の分力であるので、今回の研究では、主分力の式を変形し、背分力の式とみなすことにする。この変形した式を以下に示す。

$$Q = p \frac{K_c^2}{E} \tan(\phi - \gamma) \cdot t \quad (2.2)$$

Q : 背分力 (kg)

ϕ : 刃物すくい角と岩石の内部摩擦角 ($^\circ$)

γ : 刃物すくい角 ($^\circ$)

2.5 掘削抵抗の試算

(2.1)、(2.2)式を用いて掘削抵抗の試算を行う。

ここで、破壊靱性 K_c の値の設定が問題となる。

現在、岩石の破壊靱性については、算出方法が確立されていないため、個々の掘削対象である岩盤の破壊靱性を定量的に表すことができないが、河野は、配合を変えたモルタル2種類、安山岩、大谷石について破壊靱性と一軸圧縮強度、圧裂引張強度との関係について調査を行った²⁾。図2.5、2.6はその結果をグラフに表したものである。これらの結果より明らかのように、岩石の破壊靱性は、バラツキはあるものの一軸圧縮強度や圧裂引張強度と相関性が高いことがわかる。ここでは、一軸圧縮強度との関係を利用して下式により破壊靱性を推定することにする。

$$K_c = 0.08 \sigma_c \quad (2.3)$$

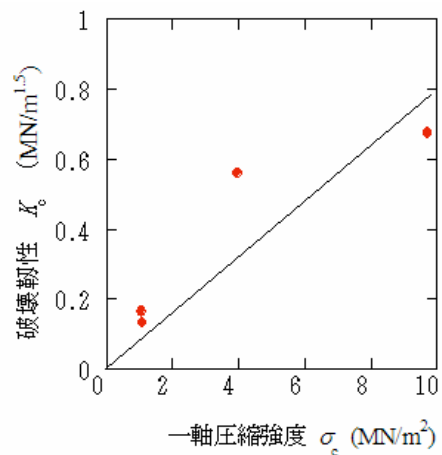


図 2.5 破壊靱性と一軸圧縮強度の関係

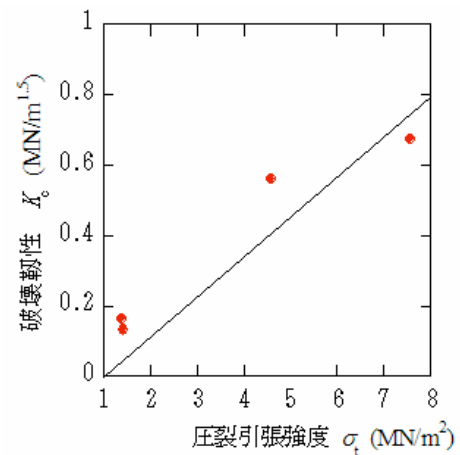


図 2.6 圧裂引張強度

計算に用いるパラメータのうち、岩盤に関わるもの（一軸圧縮強度、弾性係数）は、後述の実機による掘削実験を行った現場内の6箇所において採取した岩石試料に対して行った試験の結果を用いた（表 2.1）。

破壊靱性 K_c の値は、(2.3)式を用いて圧縮強度から推定する。岩石の内部摩擦角 ϕ については、一般的な値として $\phi = 30^\circ$ とする。刃物すくい角 γ については、 $\gamma = 5^\circ$ とする。

図 2.7 に掘削抵抗の主分力、図 2.8 に背分力の計算結果を示す。いずれの図も、掘削深さを 0~5cm の間で 0.5cm ピッチで変化させた場合の掘削抵抗の算定結果が示されている。

2.3 節で述べたように、1 個のコニカルビットが発揮することのできる水平掘削力は 764 kg、また、最大押付力は 406 kg である。図には、掘削機の掘削能力のこれらの限界値を一点鎖線で記入している。掘削機では、この点線の境界線以上の力が必要となる掘削を行うことができない。

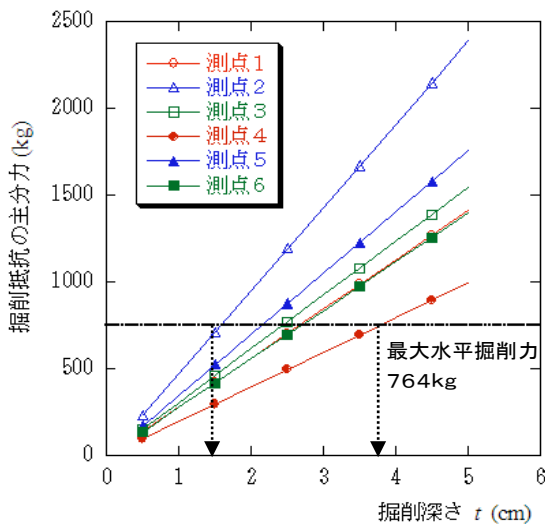


図 2.7 掘削抵抗の主分力の算定

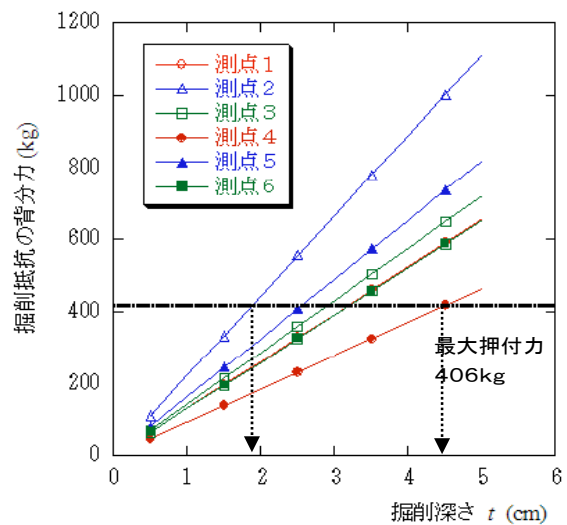


図 2.8 掘削抵抗の背分力の算出

なお、掘削可能深さは、「主分力<最大水平力」と「背分力<最大押付力」の両方の関係を満たす最大の深さで定義される。このため、図 2.7、2.8 の図で個々の測点に対して決められる限界掘削深さのうち、小さい方の値をその測点における掘削限界深さとしている。この考えに従うと、測点にもよるがこのサイトでは、1.6cm~3.8cm 程度の深さまでしか掘削を行うことができないことがわかる。

2.6 掘削機の適用範囲に関する検討

(2.1)式と(2.2)式を用いて岩盤の強度と掘削能力との関係を検討した。掘削深さは第2章と同じく、実用的な掘削を行い得る限界の深さとして 1cm を採用し、図 2.9 にこの計算の結果を示す。

この図の結果と掘削機の装備能力（水平掘削力=764 kg、最大押付力=406 kg）と比較すると、水平掘削力の制限から、一軸圧縮強度が $1,550 \text{ kg/cm}^2$ 程度の岩盤まで掘削し得ることがわかる。

表 2.1 岩石試験の結果

	測点 1	測点 2	測点 3	測点 4	測点 5	測点 6
圧縮強度 (MN/m ²)	78.7	76.8	50.4	91.6	99.6	94.5
静ポアソン比	0.278	0.385	0.380	0.201	0.228	0.199
静弾性係数 (MN/m ²)	43500	24500	16300	83500	56000	63300

備考：1MN/m² =10.2kgf/cm²

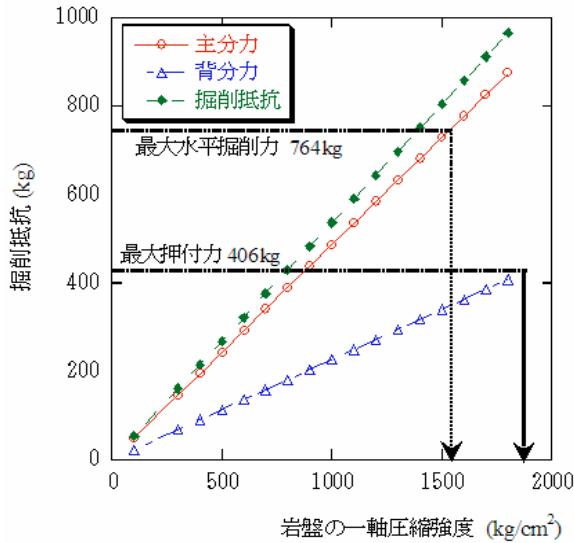


図 2.9 岩盤の圧縮強度と掘削抵抗との関係

3. 掘削機の作業効率に関する検討

3.1 岩盤強度により決まる掘削深さ

本章では、掘削抵抗の算定式を用い、掘削機の掘削効率を算出する。

まず、掘削機械のバケットを1回転させることにより、岩盤を掘削することができる体積を算出する。掘削される岩盤の体積は、掘削深さと掘削ビットの表面積を乗じることにより算出する。このために、掘削機械のバケットを1回転させた時の掘削深さを算出する。(2.1)式と(2.2)式を変形すると、掘削深さ t を主体とした(3.1)式、(3.2)式を得る。

(3.1)

$$t_p = \frac{1}{p} \times \frac{E}{K_c^2} \times F$$

$$t_Q = \frac{1}{p} \times \frac{E}{K_c^2} \times \frac{Q}{\tan(\phi - \gamma)} \quad (3.2)$$

t_p : 主分力による掘削深さ (cm)

t_Q : 背分力による掘削深さ (cm)

(3.1)式、(3.2)式を使用し、第2章で述べた現場の測点1～6における最大掘削深さを計算で求めてみる。岩盤を掘削する際、主分力 F と水平掘削力、背分力 Q と押付力は作用反作用の関係から等しくなる。このことから掘削機械の掘削ビット1個が発揮することができる水平掘削力と押付力をそれぞれ主分力 F 、背分力 Q に代入する。計算により求められた t_p と t_Q の値は表 3.1 のようになった。また、この現場の場合には、いずれの測点も水平掘削力の制限から決まる掘削限界深さ t_p の方が押付力から決まる掘削深さ制限 t_Q より小さいため、 t_p が限界掘削深さになると考えられる。

3.2 時間当たりの掘削体積の算定

前節の議論から、今回想定している現場においては、バケットを1回転させたときの掘削深さは、表 3.1 の t_p で表される。また、岩盤内にこの掘削深さだけ貫入させた状態で、水平に移動させたときの掘削面積 $A(\text{cm}^2)$ は、コニカルビットの幾何学的形状から掘削深さ t_p の2乗に比例して下式で表される。

$$A = \frac{t_p^2}{\sqrt{3}} \quad (3.3)$$

バケットを1回転させたときに掘削できる岩盤の体積 ΔV は、以下の式で表される。

$$\Delta V = A \times \pi \times 26.07 \text{cm} \quad (3.4)$$

また、このバケットは、回転数 16rpm で回転するため、このバケットが8個のビットで1時間あたりに掘削することのできる岩盤の体積 V は、以下のようになる。

$$V = \Delta V \times 16 \text{rpm} \times 60 \text{min} \times 8 \text{個} \quad (3.5)$$

表 3.1 測点別掘削可能深さ (単位 cm)

	測点 1	測点 2	測点 3	測点 4	測点 5	測点 6
水平掘削力の制限から t_p	2.70	1.60	2.47	3.83	2.17	2.73
押付力の制限から t_Q	3.08	1.82	2.81	4.36	2.48	3.11

図 3.1 は、上記の考え方に従い、作業時間と掘削量との関係を測点別に示した結果である。

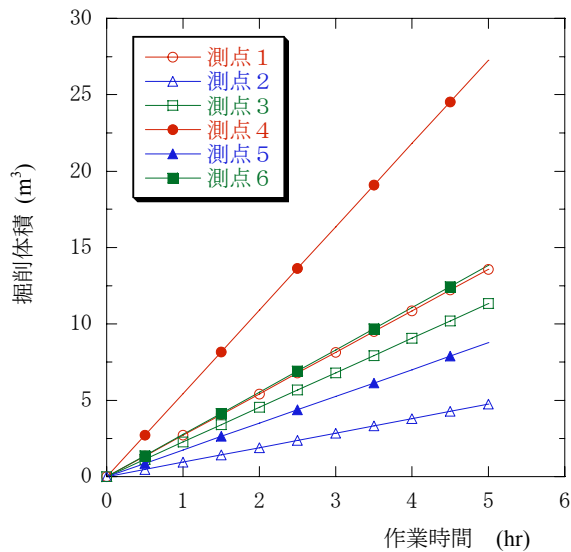


図 3.1 掘削体積の推定結果

同様の計算手法で、掘削機の単位時間あたりに掘削することのできる岩盤の体積を岩盤の一軸圧縮強度別に対して計算した。図 3.2 はその計算結果を示す。

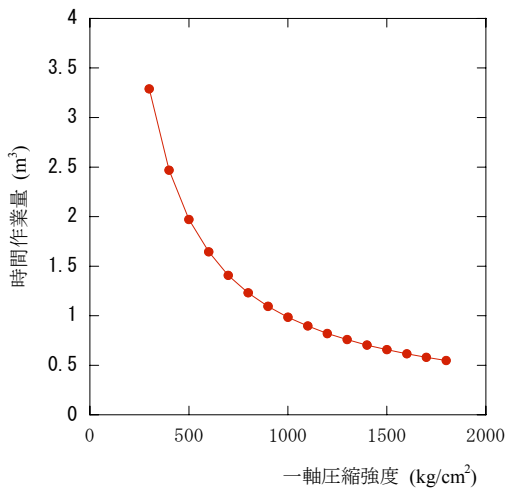


図 3.2 岩盤の強度別時間作業量

3.3 現場での掘削効率の計測

3.2 節で算定した時間作業量の適用性を調べるため、実際の現場において、掘削実験を行った。これまでの計算等で使用してきた 6 測点の岩盤の強度は、この現場において採取された試料に対して求められたものである。

実際の現場で掘削できた体積 (排土量の体積) は、

1 時間あたり 2.0 m^3 、地山の体積にすると $1.4 \sim 1.6 \text{ m}^3$ であった。図 3.1 から、1 時間当たりの掘削体積を 6 測点の平均値として求めると、 2.65 m^3 という値が得られ、実測値の 1.8 倍程度の値になっていることがわかる。この差の原因は、実際の作業では、油圧ブレーカの打ち込み、バケットの移動や姿勢の修正で作業時間のロスが生じること等が考えられるが、詳細なところは不明であり、さらなる研究が必要である。

4. 今後の課題

- 1) 作業効率を高めるために、現場での時間作業量を上げることが一番の課題と考えられる。時間作業量を増やすためには、理論計算により掘削効率に影響を与える要因を分析し、効果的な改善策を見つけ出す必要があるが、現場での時間作業量と理論値には、大きな差が存在する。この差の原因を分析して、理論的な考察により作業効率の改善を行うことのできる手法を確立する必要がある。
- 2) 掘削能力の理論的な考察では、問題を簡略化するために、様々な仮定や設定を行った。その妥当性についても現場実験等を通じて調査を行う必要がある。

5. まとめ

鉄塔基礎用の立坑を掘削する際に使用する小型立坑掘削機の開発を目的として、試作した掘削機の掘削能力と掘削効率について机上の検討を行った。さらに、現場実験により掘削効率について計算値と実測値を比較した。この結果、計算値は、実測値の約 1.8 倍となり、さらなる検討が必要であることが明らかになった。

参考文献

- 1) 西沢泉, 大久保誠介, 西松裕一, 秋山政雄:『ポイントアタックビットの掘削抵抗』, 資源・素材学会誌, No.107, pp.19-24, 1991 年 12 月
- 2) 河野幸一: ダイナモメータによる掘削力の測定と重回帰分析, 愛媛大学紀要