

T. B. M. 用ローラカッタの掘削と摩耗特性に 及ぼすビット斜角の影響

室達朗¹・河野幸一²・山村繁雄³

¹フェロー 工博 愛媛大学教授 工学部環境建設工学科 (〒790-8577 松山市文京町3)

²愛媛大学技官 工学部環境建設工学科 (〒790-8577 松山市文京町3)

³愛媛大学学生 工学部環境建設工学科 (〒790-8577 松山市文京町3)

本研究の目的は、花崗岩と両輝石斑輝岩を対象として、T. B. M. のセンターに位置するローラカッタの掘削土量を向上させるためその円周部の断面を三角形としたローラカッタの掘削土量と摩耗量に及ぼすビット斜角の影響を実験的に究明することである。その結果、単位仕事量当たりの掘削土量はビット斜角 $\pm \pi/36$ rad において極大値をとりその後漸増すること、ビットの摩耗量は、ビット斜角と転動距離の指数関数で表現され、斜角 0 rad において極大値をとり、 $\pm \pi/36$ rad で最小値を示し、その後斜角の増大とともに単調増加することが明らかとなった。従って、単位仕事量当たりの掘削土量を最大ならしめ、かつビットの摩耗量を最小ならしめる最適ビット斜角は $\pm \pi/36$ rad であることが判明した。

Key Words : T.B.M. roller cutter, excavation, wear, skew angle, granite, two-pyroxene gabbro

1. はじめに

硬岩盤の掘削に使用されているトンネル掘進機、T. B. M. (Tunnel Boring Machine) においては、節理面の少ない岩盤における強大な掘削力¹⁾に伴って発生するローラカッタの摩耗劣化によって、また、掘削面盤へのカッタビットの取り付け角度が掘削円周の接線方向に設定されているために、掘削能力は低下する。すでに、実際の砂岩、頁岩、粘板岩、石英斑岩等の互層をなす岩盤掘削現場において計測したローラカッタの単位距離当たりの摩耗長は「摩耗に対する岩盤強度指数」²⁾ によつて的確に推定できることを報告した³⁾。また、写真-1に示すように、掘削面盤中央部分に位置するビットは他のビットと比較して偏摩耗することが知られている。さらに、中央部に位置するローラカッタに作用する大きなねじれモーメントがビットの摩耗寿命を大幅に低下させている要因であると考えられている⁴⁾。そのために、パラレルリンクによるT. B. M. 推進システムが開発され、カッタヘッド支持ベアリングに作用するスラストとモーメントをリアルタイムで計測しローラカッタの摩耗寿命を管理する方法が提案されている⁵⁾。ビットに作用する力は、一般に、ビットの圧入深さ、および切削軌道間隔の指数関数に比例し、その比例定数はローラカッタの直径、ビット

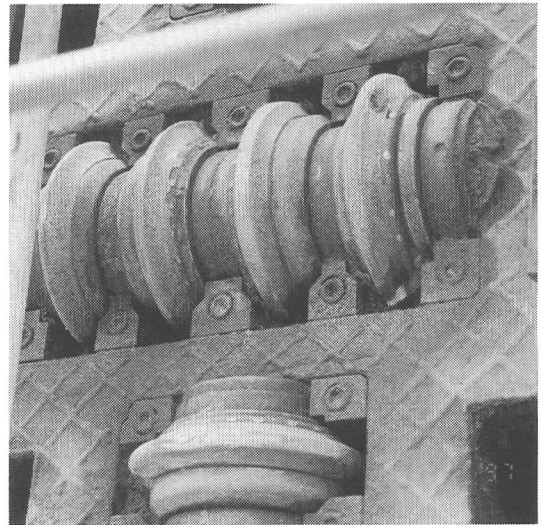


写真-1 センターに位置するローラカッタ

の刃先角度等の幾何学的寸法、および岩石の破壊靱性、剛性によって変化する。その内、垂直方向力は直径、圧入深さおよび軌道間隔の相乗積の平方根に比例しその比例定数は岩石材料のヤング率と一軸圧縮強度に支配されること、接線方向力は圧入深さと軌道間隔の平方根の積に比例しその比例定数は岩石のヤング率と一軸圧縮強度に支配されること、さら

に向心方向力は圧入深さの3/2乗に比例しその比例定数は岩石の破壊靱性のみに左右されることが明らかにされている⁹⁾。また、岩石の切削において最適切削条件となる比エネルギーを最小とする切削軌道間隔/圧入深さは岩石の破壊靱性と一軸圧縮強度の指数関数で表されている⁷⁾。

本研究の目的は、掘削面盤中央部分に位置するビットを対象とし、ローラカッタの取付け角度であるビット斜角がビットの掘削土量及び摩耗特性に及ぼす影響について実験的考察を行うことである。従来、ビットの円周部の断面はある曲率を有しているため岩石の破壊メカニズムは亀裂型^{8),9)}であるのに対し、ここでは、掘削面盤の掘削性能をより向上させるためビットの円周部の断面を三角形とし岩石のせん断破壊を目指したものである。

まず、硬岩供試体として無亀裂の花崗岩および両輝石斑縞岩を加工し、その上を一定の軸荷重の下でローラカッタが転動できるように考案した回転式摩耗試験機を試作した。ここでは、花崗岩に対して0.98 kN、両輝石斑縞岩に対して0.20~1.18 kNの軸荷重を与え、直径100 mmのビットの摩耗量と転動距離の関係について、ビット斜角 $0 \sim \pm 5\pi/36$ radと変化させて実験を行った。その後、単位仕事量当たりの掘削土量を最大ならしめ、かつビットの摩耗量の減少を考慮した最適ビット斜角について検討する。

2. 供試体

(1) 硬岩供試体

一般に、T. B. M. 掘進機が掘削可能な岩石の一軸圧縮強度は、2~147 MPaとされている¹⁰⁾。ここでは、硬岩供試体として、愛媛県越智郡大島から採取した広島型花崗岩とアフリカ産の両輝石斑縞岩を選定した。各岩石の物理的性質は、表-1に示すように、比重および一軸圧縮強度は、それぞれ花崗岩で平均2.74、163.4 MPa、両輝石斑縞岩で平均2.96、212.8 MPaであり、次式で与えられる摩耗に対する岩盤強度指数は、花崗岩で平均60.3 MPa、両輝石斑縞岩で320.5 MPaと算定された。

$$\sigma_c = K \sigma_{c0} (1 - C_r) \quad (1)$$

$$K = K_0^2 \frac{K_1 + K_2 + K_3 + K_4}{4}$$

$$C_r = 1 - \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^2$$

ここに、 σ_c は摩耗に対する岩盤強度指数、 σ_{c0} は無亀裂岩石の一軸圧縮強度、 V_1 は無亀裂岩石に対

表-1 岩石供試体の物理的特性

岩石名	広島型花崗岩	両輝石斑縞岩
見掛け比重	2.65±0.01	2.93±0.05
比重	2.74±0.05	2.96±0.03
自然含水比 (%)	0.39±0.03	0.01±0.01
吸水率 (%)	0.49±0.04	0.03±0.01
一軸圧縮強度 (MPa)	163.4±4.4	212.8±23.0
ショア硬さ	69.5±3.3	75.8±10.2
無亀裂岩石の超音波伝播速度 (m/s)	3755±17	4549±158
鉱物組成		
石英 (%)	34	9
斜長石 (%)	33	42
カリ長石 (%)	22	0
黒雲母 (%)	10	1
角閃石 (%)	1	0
輝石 (%)	0	48
摩耗に対する岩盤強度指数 (MPa)	60.3±1.6	320.5±34.6

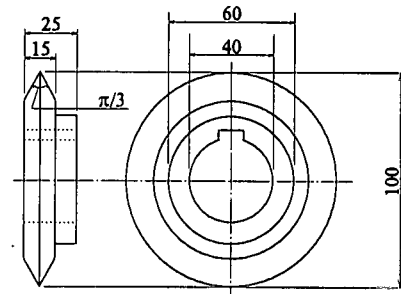


図-1 ローラカッタ

する超音波伝播速度、 V_2 は現場で求めた弾性波縦波伝播速度、 C_r は岩盤の亀裂係数、 K_0 は石英等のモース硬さ6以上の造岩鉱物の含有量、 K_1 は岩石の見かけ比重/2.60、 K_2 は30.0/ロサンゼルスすり減り減量、 K_3 は2.00/吸水量、 K_4 はショア硬さ/60.0である。

ローラカッタの摩耗に重要な影響を及ぼすと考えられるモース硬さ6以上の造岩鉱物は、花崗岩で石英34%、斜長石33%、両輝石斑縞岩で石英9%、斜長石42%であった。なお、岩石供試体の大きさは、一辺325 mm、高さ120 mmの直方体に成型し、掘削面盤の表面粗さを±0.05 mmに仕上げた。

(2) ローラカッタ

図-1は、使用したローラカッタの形状寸法を示したものである。材質は、軟鋼SS400と耐摩耗鋼SKD-11を使用し、直径 $2r=100$ mm、厚さ15 mmの円盤の円周部を加工し、刃物角 $\pi/3$ radに成型した。それぞれのピッカース硬さ H_v (N/mm²)は、軟鋼1205

± 39, 耐摩耗鋼で 6693 ± 206 であった。ローラカッタは軸径 40 mm のスラストベアリングによって取り外し可能としたビットホルダーによって保持することとした。摩耗試験では、摩耗量および摩耗長を計測するため各試験項目毎に新品を提供する必要があり、それぞれ計 50 個製作した。なお、摩耗実験に際しては、花崗岩に対して軟鋼を、両輝石斑縞岩に対して耐摩耗鋼を使用した。

3. 実験装置と方法

(1) 摩耗試験機

図-2 は、回転式摩耗試験の実験装置概略図を示したものである。摩耗試験機の大きさは、高さ 1550 mm, 幅 700 mm, 奥行 700 mm である。中央部分に位置するターンテーブルは、直径 400 mm, 厚さ 65 mm の鋼製円盤である。試験機下部に設置した 3 相 200 V, 1.5 kW の電動モータ付き減速機は、減速比 1/200 であり、出力軸回転数 9 r.p.m., 出力軸許容トルク 1.46 kNm である。動力伝達機構は、チェーン駆動されるギヤ比 16 : 35 のスプロケットを介し、回転方向を水平より鉛直方向に転換する 1/10 の減速機によって、ターンテーブルを回転速度 0.427 r.p.m. において最大トルク 31.9 kNm を出力させることができる。このターンテーブル上にトンネル切羽面を想定して平坦に切断した硬岩供試体を設置し、所定の周速度でローラカッタを回転させることができる。なお、本実験装置の上部には、最大容量 19.6 kN の空気圧シリンダーが設置されており、所定の垂直方向力 F_z をビットホルダーに与えることができる。このビットホルダーは、接線方向力 F_x と向心方向力 F_y を計測するための連結棒によって固定されており、ローラカッタの非定常掘削¹¹⁾に伴う鉛直方向の移動のみ許されている。各ビット斜角 β に対する摩耗試験中に発生するこれらの掘削抵抗^{12),13)} F_x , F_y , および F_z は、それぞれ試験機に設置した最大容量 19.6 kN のロードセルによって計測することができる。

(2) 実験方法

従来、T. B. M. 用ローラカッタの円周部分はある曲率を有しており、その取付け角度であるビット斜角 β は、硬岩盤に対してすべて 0 rad に設定されている。ここでは、円周部分の断面を三角形としているため、掘削土量はその掘削角度であるビット斜角 β に大きく左右される。すなわち、ローラカッタの掘削能力として単位時間当たりの掘削土量である掘削速度の向上を目指すとともに、単位仕事量当た

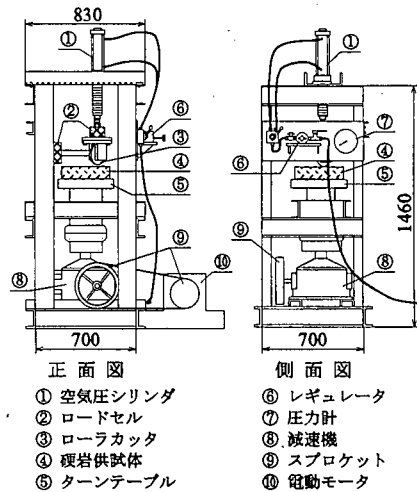


図-2 回転式摩耗実験装置

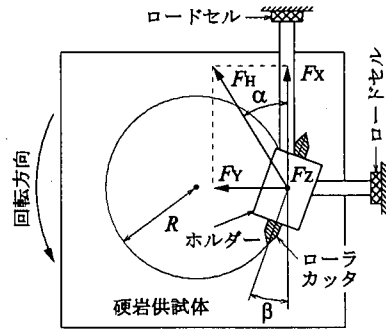


図-3 ターンテーブルと作用力

りの掘削土量である掘削効率を最大ならしめ、かつビットの摩耗量を最小とするための最適なビット斜角について究明する。回転式摩耗試験においては、図-3 に示したように、ターンテーブル上に設置した硬岩供試体に対し $\beta = 0, \pm\pi/36, \pm\pi/18, \pm\pi/12, \pm\pi/9$, および $\pm 5\pi/36$ rad の 11 通りに対して、花崗岩に対するローラカッタに一定の垂直方向力 $F_z = 0.98$ kN, 両輝石斑縞岩に対しては、 $F_z = 1.96, 3.92, 5.88, 7.84$, および 9.80 kN を与え、掘削および摩耗試験中に発生する接線方向力 F_x と向心方向力 F_y を計測した。ビットの掘削半径 R は、花崗岩に対して 5 cm, 両輝石斑縞岩に対して 2, 5, 8, 10 および 12 cm とした。この場合におけるローラカッタの回転速度 V は、花崗岩に対して 0.223 cm/s, 両輝石斑縞岩に対して 0.089, 0.223, 0.357, 0.446 および 0.536 cm/s であった。ローラカッタによる岩石の単位時間当たりの掘削土量 V_e (cm³/s) の測定方法は、まず、ターンテーブルを一回転させたときに発生する岩片等の掘削ずりを刷毛で回収し、その重量を最大容量 200 g,

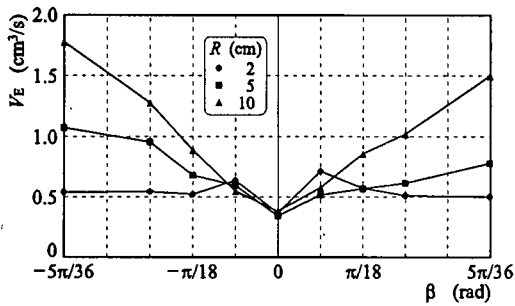


図-4 掘削土量 V_E と斜角 β の関係

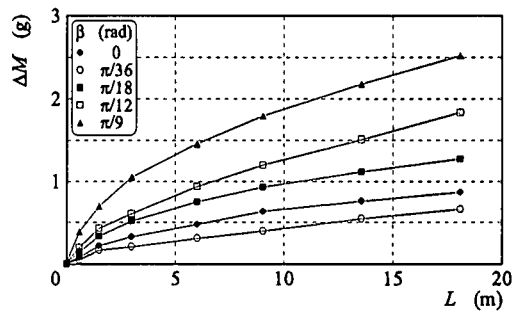
感量 0.1 mg の電子天秤で計測した。それぞれの岩石の単位体積重量でその重量を除して体積を算定し、その後単位時間当たりの体積として算定した。その後、ローラカッタの質量変化量である摩耗重量 ΔM (g) およびローラ直径の変化量である摩耗長 ΔD (mm) と転動距離 L (m) の関係を、各ビット斜角 β について明らかにした。 ΔM は、実験前に計測した新品のローラカッタの質量と各摩耗試験終了時に計測した質量との差で表すことができる。また、 ΔD は、同様に、実験前に計測した新品のビットの直径と試験終了時に計測した直径との差として算定した。摩耗量 ΔM の計測に当たっては最大容量 200 g、感量 0.1 mg の電子天秤を使用し、摩耗長 ΔD の計測に当たってはノギスを使用し 0.01 mm まで測定した。また、計測に際しては、初期摩耗状態を正確に測定するために転動距離間隔を小さくとり、定常摩耗状態では大きく設定しており、それぞれ各摩耗実験終了後カッタホルダーからビットを取り外し、アルコールで洗浄乾燥させた後、 ΔM と ΔD を計測した。

なお、軟鋼で製作したローラカッタの円周先端部分のすくい面で摩耗した金属粉は母材のげ面に付着するために、この部分をヤスリによって削り落とした後、 ΔM と ΔD をより正確に計測した。

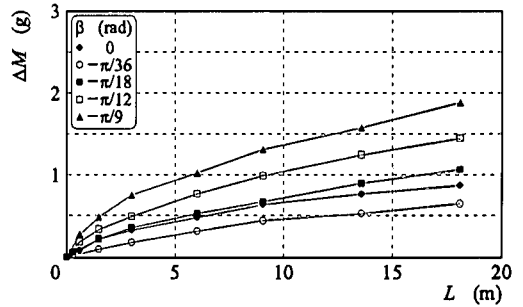
4. 実験結果と考察

(1) 掘削土量とビット斜角

ここでは、一例として、両輝石斑礫岩に対する掘削土量とビット斜角の関係について掘削実験を行った結果について述べる。図-4 は、垂直方向力 $F_z = 9.8$ kN を与えた場合について、掘削半径 $R=2, 5, 10$ cm に対する単位時間当たりの掘削土量 V_E (cm³/s) と各ビット斜角 β (rad) の関係を示したものである。図より明らかに、 $R=2$ cm のとき、 $\beta=0$ rad で極小値をとり $\beta=\pm\pi/36$ rad で極大値を示している。一方、 $R=5, 10$ cm のときは、 $\beta=0$ rad で最小値をとり $|\beta|$ の増加とともに著しく増加している。



(a) 斜角 $\beta \geq 0$



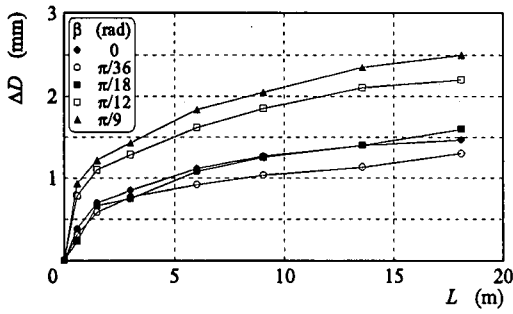
(b) 斜角 $\beta \leq 0$

図-5 摩耗量 ΔM と転動距離 L の関係 (軟鋼)

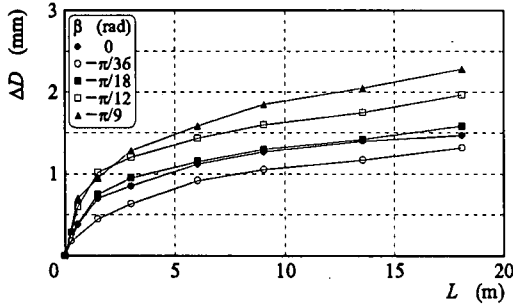
(2) 摩耗量、摩耗長と転動距離

ローラカッタのビット摩耗のメカニズムは、ビットを構成する金属材料と造岩鉱物とのひっかけ摩耗によるものであり、ビットの摩耗量と摩耗長を支配する要因は、ビット本体の金属材質、ローラカッタの直径や先端部位の形状特性、また、ビットに作用する接線方向力 F_x 、向心方向力 F_y 、および垂直方向力 F_z 、転動距離 L 、転動時のスリップ率とスリップ量から算定される摩擦仕事量、さらに、岩石材料の一軸圧縮強度などの岩石特性、石英などの硬い造岩鉱物の含有量、岩盤の亀裂係数から算定される摩耗に対する岩盤強度指数である。ここでは、それぞれ同一の金属材料と形状を有するローラカッタに対して、それぞれ同一の岩石供試体を対象としているため、ビットの摩耗量 ΔM と摩耗長 ΔD に及ぼす変動要因として転動距離 L 、垂直方向力 F_z およびビット斜角 β によるすりへり摩耗現象を定量化するために以下に示す重回帰分析を行った。

図-5 (a) (b) は、垂直方向力 $F_z=0.98$ kN を与えた場合について、広島型花崗岩に対する軟鋼で製作したローラカッタのビット摩耗量 ΔM と転動距離 L の関係を各ビット斜角 β の正負に分けて示したものである。両図とも、いずれのビット斜角 β に対しても、 ΔM は転動距離 L の初期段階で顕著に急増する初期摩耗状態を呈しており、その後、 L が増加するに伴ってその増加率 $\Delta M/L$ は一定値に漸近する傾向



(a) 斜角 $\beta \geq 0$



(b) 斜角 $\beta \leq 0$

図-6 摩耗長 ΔD と転動距離 L の関係 (軟鋼)

を示し、定常摩耗状態に達している。重回帰分析を行った結果、 ΔM (g) と L (m)、 β (rad) との間に次式で示す関係式が成立することが判明した。

$$\beta \geq 0 \text{ rad} \quad \Delta M = 1.23 \times 10^{-1} L^{0.651} (\cos\beta)^{-22.4} \quad (R=0.962) \quad (2)$$

$$\beta \leq 0 \text{ rad} \quad \Delta M = 8.82 \times 10^{-2} L^{0.782} (\cos\beta)^{-18.9} \quad (R=0.931) \quad (3)$$

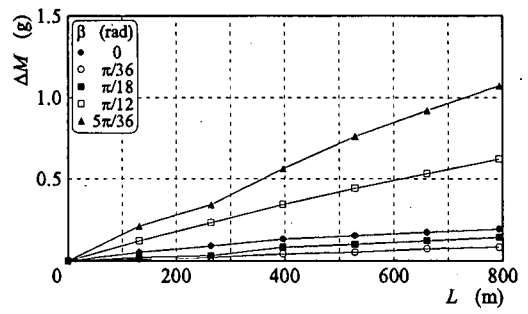
ここに、 R は重相関係数である。

図-6 (a) (b) は、この場合の摩耗長 ΔD と転動距離 L の関係を各ビット斜角 β の正負に分けて示したものである。両図とも、いずれのビット斜角 β に対しても、 ΔD は転動距離の初期段階で急増し、その後、転動距離が増加するに従って増加率 $\Delta D/L$ は一定値に漸近する傾向を示している。重回帰分析を行った結果、 ΔD (mm) と L (m)、 β (rad) との間に次式で示す関係式が成立することが判明した。

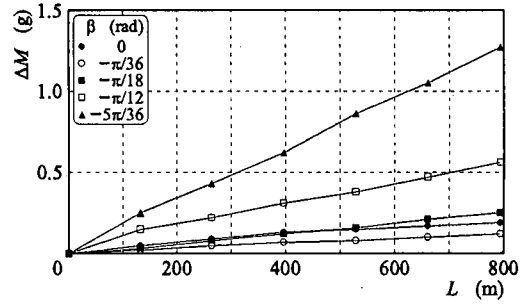
$$\beta \geq 0 \text{ rad} \quad \Delta D = 4.70 \times 10^{-1} L^{0.372} (\cos\beta)^{-12.1} \quad (R=0.937) \quad (4)$$

$$\beta \leq 0 \text{ rad} \quad \Delta D = 3.30 \times 10^{-1} L^{0.458} (\cos\beta)^{-11.2} \quad (R=0.969) \quad (5)$$

一定の垂直荷重下において、摩耗量、摩耗長が、その転動距離の初期段階で急増するのは、ローラカ



(a) 斜角 $\beta \geq 0$



(b) 斜角 $\beta \leq 0$

図-7 摩耗量 ΔM と転動距離 L の関係 (耐摩耗鋼)

ッタの円周部の刃先が鋭く尖っているために高い接触圧力による初期摩耗が卓越するためである。一方、転動距離が増加するに伴ってその増加勾配が一定値に漸近し定常摩耗に達するのは、刃先が丸みを帯びるために接触圧力が次第に減少していくためである。また、初期摩耗段階においては、摩耗量 ΔM が摩耗長 ΔD と比較して、指数関数で表される転動距離 L において急激に立ち上がっているのは、摩耗長ではローラカッタの直径の減少量を計測しているのに対し、摩耗量は断面積に比例する量を計測しているためである。

図-7 (a) (b) は、一例として、垂直方向力 $F_z = 9.80$ kN を与えた場合について、両輝石斑礫岩に対する耐摩耗鋼で製作したローラカッタの摩耗量 ΔM と転動距離 L の関係を各ビット斜角 β の正負に分けて示したものである。両図とも、いずれのビット斜角 β に対しても、 ΔM は転動距離 L にほぼ比例して増加している。これらの関係について重回帰分析を行った結果、 ΔM (g) と L (m)、 β (rad) との間に次式で示す関係式が成立することが判明した。

$$\beta \geq 0 \text{ rad} \quad \Delta M = 1.76 \times 10^{-4} L^{0.998} (\cos\beta)^{-23.1} \quad (R=0.878) \quad (6)$$

$$\beta \leq 0 \text{ rad} \quad \Delta M = 5.69 \times 10^{-4} L^{0.901} (\cos\beta)^{-2.04} \quad (R=0.869) \quad (7)$$

図-8 (a) (b) は、この場合の摩耗長 ΔD と転動距離 L の関係を各ビット斜角 β の正負に分けて示したものである。両図とも、いずれのビット斜角 β に対しても、 ΔD は転動距離 L にほぼ比例して増加している。これらの関係について重回帰分析を行った結果、 ΔD (mm) と L (m)、 β (rad) との間に次式で示す関係式が成立することが判明した。

$$\beta \geq 0 \text{ rad} \quad \Delta D = 4.52 \times 10^{-5} L^{1.143} (\cos\beta)^{-15.7} \quad (R=0.979) \quad (8)$$

$$\beta \leq 0 \text{ rad} \quad \Delta D = 3.70 \times 10^{-4} L^{0.824} (\cos\beta)^{-18.9} \quad (R=0.909) \quad (9)$$

次に、垂直方向力として、 $F_z = 1.96, 3.92, 5.88, 7.84$ および 9.80 kN を与えた場合について、両輝石斑礫岩に対する耐摩耗鋼で製作したローラカッタのビットの摩耗量 ΔM 、摩耗長 ΔD と転動距離 L の関係について実験を行った。

各ビット斜角 β の正負に分けて、 ΔM (g) と L (m)、 β (rad) および F_z (kN) の関係について重回帰分析を行った結果、次に示す実験式が成立することが判明した。

$$\beta \geq 0 \text{ rad} \quad \Delta M = 2.21 \times 10^{-6} L^{0.961} (\cos\beta)^{-16.5} F_z^{2.22} \quad (R=0.959) \quad (10)$$

$$\beta \leq 0 \text{ rad} \quad \Delta M = 1.00 \times 10^{-6} L^{0.956} (\cos\beta)^{-17.2} F_z^{2.61} \quad (R=0.979) \quad (11)$$

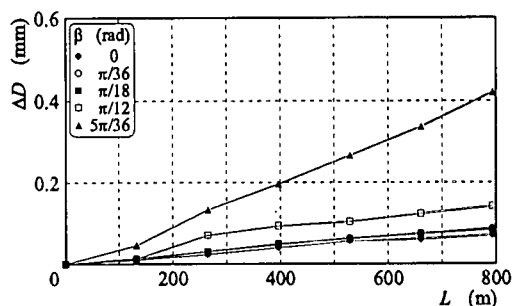
その結果、ローラカッタのビット摩耗量 ΔM は、斜角 $\beta \geq 0$ rad に対して、転動距離 L の 0.961 乗、 $\cos\beta$ の -16.5 乗、垂直方向力 F_z の 2.22 乗に比例して増加し、斜角 $\beta \leq 0$ rad に対しては、 L の 0.956 乗、 $\cos\beta$ の -17.2 乗、垂直方向力 F_z の 2.61 乗に比例して増加することが明らかとなった。

同様に、各ビット斜角 β の正負に分けて、 ΔD (mm) と L (m)、 β (rad) および F_z (kN) の関係について重回帰分析を行った結果、次に示す実験式が成立することが判明した。

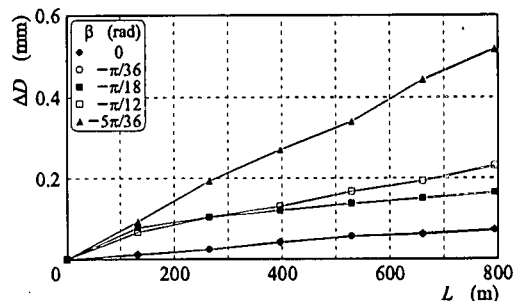
$$\beta \geq 0 \text{ rad} \quad \Delta D = 2.67 \times 10^{-7} L^{1.128} (\cos\beta)^{-16.6} F_z^{2.26} \quad (R=0.984) \quad (12)$$

$$\beta \leq 0 \text{ rad} \quad \Delta D = 4.56 \times 10^{-7} L^{0.879} (\cos\beta)^{-14.9} F_z^{2.89} \quad (R=0.977) \quad (13)$$

その結果、ローラカッタのビット摩耗長 ΔD は、斜角 $\beta \geq 0$ rad に対して、転動距離 L の 1.128 乗、 $\cos\beta$ の -16.6 乗、垂直方向力 F_z の 2.26 乗に比例して増加し、斜角 $\beta \leq 0$ rad に対しては、 L の 0.879 乗、 $\cos\beta$



(a) 斜角 $\beta \geq 0$



(b) 斜角 $\beta \leq 0$

図-8 摩耗長 ΔD と転動距離 L の関係 (耐摩耗鋼)

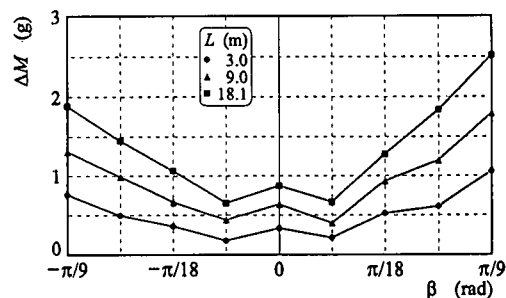


図-9 3種類の転動距離 L に対する摩耗量 ΔM と斜角 β の関係 (軟鋼)

の -14.9 乗、垂直方向力 F_z の 2.89 乗に比例して増加することが明らかとなった。

(3) 摩耗量、摩耗長とビット斜角

図-9は、花崗岩に対する軟鋼製ローラカッタのビット摩耗量 ΔM と斜角 β の関係を、転動距離 $L = 3.0, 9.0$ 、および 18.1 m に対して整理したものである。図より明かに、 ΔM は、 $\beta = 0$ rad において極大値を示し、 $\beta = \pm \pi/36$ rad において極小値を示し、その後 $|\beta|$ の増加とともに増大している。

図-10は、両輝石斑礫岩に対する耐摩耗鋼製ローラカッタのビット摩耗量 ΔM と斜角 β の関係を、転動距離 $L = 265, 529$ 、および 794 m に対して整理したものである。図より明かに、 ΔM は、花崗岩の場

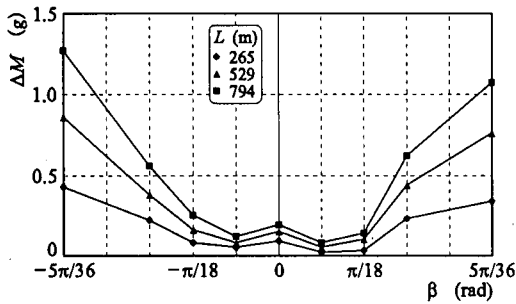


図-10 3種類の転動距離 L に対する摩耗量 ΔM と斜角 β の関係(耐摩耗鋼)

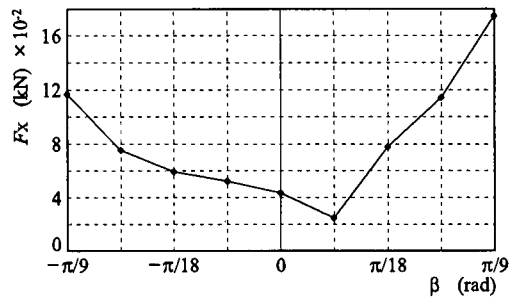


図-11 接線方向力 F_x とビット斜角 β の関係(軟鋼, $F_z = 0.98 \text{ kN}$)

合と同様に, $\beta = 0 \text{ rad}$ において極大値を示し, $\beta = \pm \pi/36 \text{ rad}$ において極小値を示し, その後 $|\beta|$ の増加とともに増大している。

これは, ローラカッタが直進運動¹⁴⁾をしているのではなく, 掘削半径の小さい円周上を回転運動しているためであり, $\beta = \pm \pi/36 \text{ rad}$ において花崗岩との摩擦仕事量が最も小さくなることを意味している。なお, $\beta = 0 \text{ rad}$ において極大値を示しているのは, Y 方向の摩擦仕事量は実際上相殺されているが, ビットの貫入に伴って発生する刃先両側面での摩擦仕事量が $\beta \neq 0 \text{ rad}$ の場合の片面でのそれより卓越しているためであると考えられる。さらに, $|\beta|$ の増加とともに摩耗量が単調増加しているが, これは, $|\beta|$ の増加とともにビットに作用する向心方向力による摩擦仕事量が增大するためであると考えられる。

(4) 考察

a) 花崗岩に対する摩耗試験

従来, $\beta = 0 \text{ rad}$ とした現場における接線方向力 F_x , 向心方向力 F_y はローラカッタの圧入深さと掘削係数の積として概算する方法が提案されている¹⁵⁾。また, $\beta = 0 \text{ rad}$ とした室内実験では, F_x はビットの圧入深さとローラカッタの直径, ビットの刃先角度, 傾斜角等の幾何学的寸法, 切削軌道間隔, および岩石の破壊靱性, ヤング率等の関数となる掘削係数との積で与えられること, F_y は圧入深さの $3/2$ 乗とビットの幾何学的寸法, および岩石の破壊靱性の関数となる掘削係数との積で与えられることが判明している¹⁶⁾。

摩耗量, 摩耗長とビット斜角との関係を力学的に明かにするために, まず花崗岩に対する軟鋼製ローラカッタに作用させた一定の垂直方向力 $F_z = 0.98 \text{ kN}$ に対して, 摩耗試験中に発生する接線方向力 F_x と向心方向力 F_y , およびスリップ率を計測した。

図-11は, 接線方向力 F_x とビット斜角 β の関係

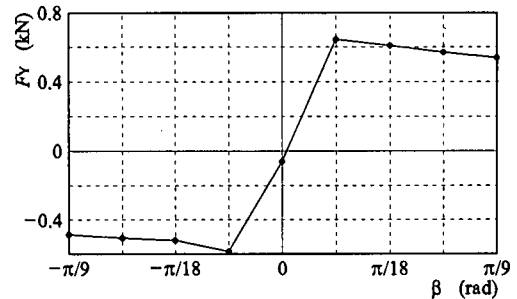


図-12 向心方向力 F_y とビット斜角 β の関係(軟鋼, $F_z = 0.98 \text{ kN}$)

を示したものである。 F_x は, $\beta \geq 0$ の領域では $\beta = \pi/36 \text{ rad}$ において極小値をもち, その後 β の増加とともに増加する傾向にある。一方, $\beta \leq 0$ の領域では $|\beta|$ の増加とともに漸増している。従って, 回転掘削動力である $2\pi R N F_x / 60$ (kNcm/s) (N ; 回転数)も各ビット斜角に対して同様な傾向を示す。また, 図-12は, 向心方向力 F_y とビット斜角 β の関係を示したものである。 F_y は, $\beta = 0 \text{ rad}$ において負値を示し, $0 \sim \pi/36 \text{ rad}$ のある β の値を中心として点対称となり, また, $|\beta| \leq \pi/36 \text{ rad}$ において急増した後, $|\beta| > \pi/36 \text{ rad}$ において漸減している。

図-13は, ローラカッタ作用する X, Y 方向のスリップ速度を示したものである。ここに, ω はローラカッタの回転角速度である。純粋転動の制動状態にあるローラカッタのスリップ率 i_x は, ビットの転動速度 V および回転速度 $r\omega$ で算定されるスリップ速度 $r\omega \cos \beta - V$ の転動速度 V に対する比率として, また, 駆動状態にある Y 方向のスリップ率 i_y は, スリップ速度 $r\omega \sin \beta$ のビットの回転速度 $r\omega \sin \beta$ に対する比率として次式のように算定することができる。

$$i_x = \frac{r\omega \cos \beta - V}{V} = \frac{r\omega \cos \beta}{V} - 1 \quad (14)$$

表-2 軟鋼製ローラカッタの摩擦仕事量の算定 ($L = 9.0\text{m}$)

β	i_x	F_x	j_x	$ F_x j_x $	F_y	j_y	$ F_y j_y $	M_T
rad		kN	m	kNm	kN	m	kNm	kNm
$-\pi/9$	-0.1158	0.1168	-1.0418	0.1217	-0.4865	-2.8966	1.4092	1.5309
$-\pi/12$	-0.0867	0.0754	-0.7798	0.0588	-0.5057	-2.2026	1.1139	1.1727
$-\pi/18$	-0.0557	0.0594	-0.5009	0.0297	-0.5198	-1.4986	0.7790	0.8087
$-\pi/36$	-0.0423	0.0524	-0.3810	0.0200	-0.5857	-0.7541	0.4417	0.4617
0	-0.0285	0.0435	-0.2569	0.0112	-0.0628	0	0	0.0112
$\pi/36$	-0.0044	0.0244	-0.0396	0.0010	0.6437	0.7839	0.5046	0.5056
$\pi/18$	-0.0174	0.0781	-0.1570	0.0123	0.6088	1.5592	0.9493	0.9616
$\pi/12$	-0.0494	0.1140	-0.4445	0.0507	0.5675	2.2924	1.3010	1.3517
$\pi/9$	-0.0807	0.1746	-0.7260	0.1268	0.5335	3.0115	1.6066	1.7334

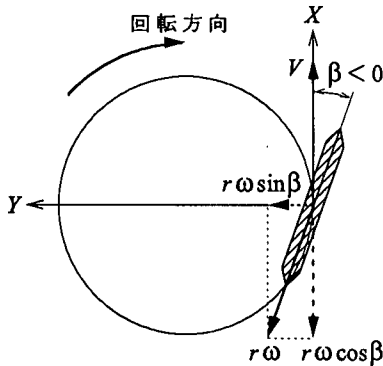


図-13 ローラカッタに作用するスリップ速度

$$i_x = \frac{r \omega \sin \beta}{r \omega \sin \beta} = 1 \quad (15)$$

図-14は、 X 方向のスリップ率 i_x を各ビット斜角 β に対して計測した結果を示したものである。図より明らかに、 $\beta = \pi/36 \text{ rad}$ において $|i_x|$ は最小値を示し最も転動しやすい状態であることを実証している。一方、 $|\beta - \pi/36| \text{ rad}$ の増加とともに $|i_x|$ は増加し、 X 方向のスリップ量は増加することが判明した。

さて、ローラカッタが転動距離 L を移動するまでの所要時間を t とすると $t = L/V$ で与えられる。従って、ビットが距離 L を転動する間の X 方向のスリップ量 j_x および Y 方向のスリップ量 j_y は、それぞれ次式で算定することができる。

$$j_x = (r \omega \cos \beta - V)t = i_x L \quad (16)$$

$$j_y = r \omega t \sin \beta = L(1 + i_x) \tan \beta \quad (17)$$

従って、ローラカッタの摩擦仕事量 M_T は、 X 、 Y 方向の摩擦仕事量 $|F_x j_x|$ と $|F_y j_y|$ の和として、次式で算定することができる。

$$M_T = |F_x j_x| + |F_y j_y| \quad (18)$$

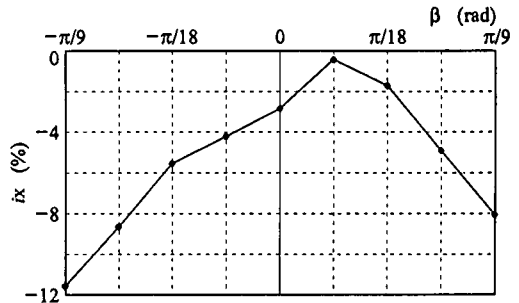


図-14 スリップ率 i_x と斜角 β の関係 (軟鋼)

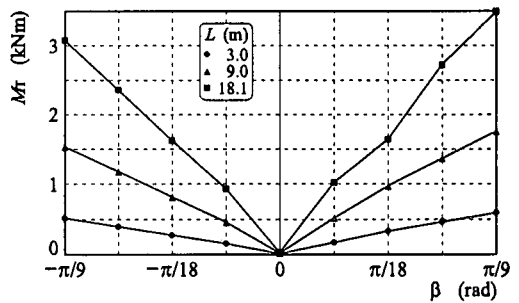


図-15 3種類の転動距離 L に対する理論摩擦仕事量 M_T と斜角 β の関係 (軟鋼)

図-15は、上式によって算定したローラカッタの摩擦仕事量 M_T とビット斜角 β との関係を転動距離 $L = 3.0, 9.0$, および 18.1 m に対して示したものである。図より明らかに、 M_T は $\beta = 0 \text{ rad}$ において最小値を示し、 $|\beta|$ の増加とともに増加する傾向を示している。なお、一例として、転動距離 $L = 9.0 \text{ m}$ について算定した結果を表-2に示すように、いずれの摩擦仕事量 M_T も $\beta = 0 \text{ rad}$ を除いて Y 方向の摩擦仕事量 $|F_y j_y|$ の方が X 方向の摩擦仕事量 $|F_x j_x|$ と比較して M_T を大きく支配していることが明らかとなった。

一般に、ローラカッタの摩耗量はビットの摩擦仕事量と比例関係にあり、同図は前述した図-9に示

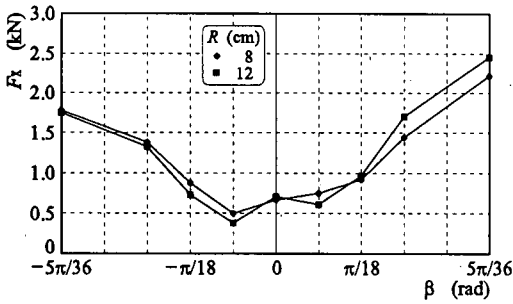


図-16 接線方向力 F_x と斜角 β の関係
(耐摩耗鋼, $F_z = 9.80$ kN)

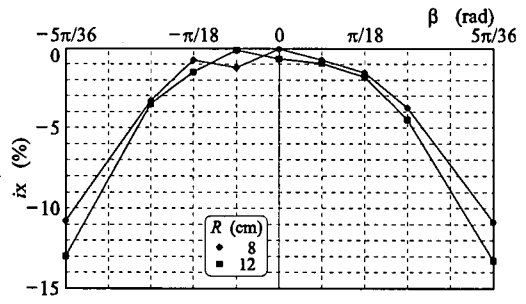


図-18 スリップ率 i_x と斜角 β の関係 (耐摩耗鋼)

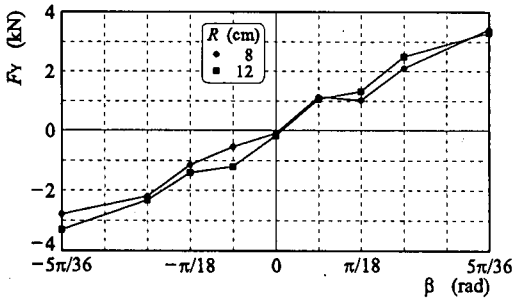


図-17 向心方向力 F_y と斜角 β の関係
(耐摩耗鋼, $F_z = 9.80$ kN)

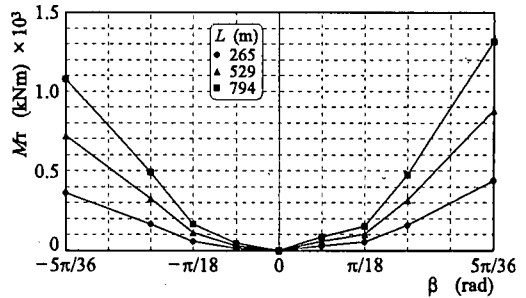


図-19 3種類の転動距離 L に対する理論摩擦仕事量 M_t と斜角 β の関係 (耐摩耗鋼, $R = 8$ cm)

した摩耗量 ΔM とビット斜角 β との関係と比較的良好に対応していることが判明した。従って、ローラカッタの摩耗量と摩耗長を最小限にするためには、ビット斜角を $\beta = -\pi/36 \sim \pi/36$ rad と設定するのが最適であると言える。

b) 両輝石斑礫岩に対する摩耗試験

次に、摩耗量、摩耗長とビット斜角との関係を力学的に明らかにするために、両輝石斑礫岩に対する耐摩耗鋼製ローラカッタに作用させた垂直方向力 $F_z = 9.80$ kN に対して、摩耗試験中に発生する接線方向力 F_x と向心方向力 F_y 、および X 方向のスリップ率 i_x を、掘削半径 $R = 8, 12$ cm において計測した。

図-16 は、接線方向力 F_x とビット斜角 β の関係を示したものである。 F_x は、 $\beta \geq 0$ の領域では、 $R = 8$ cm のとき β の増加とともに増加する傾向にあるが、 $R = 12$ cm のとき $\beta = \pi/36$ rad において極小値をもち、その後 β の増加とともに増加する傾向にある。一方、 $\beta \leq 0$ の領域では、 $\beta = -\pi/36$ rad において極小値をもち、その後 $|\beta|$ の増加とともに漸増している。従って、回転掘削動力である $2\pi R N F_x / 60$ (kNcm/s) も各ビット斜角に対して同様な傾向を示す。また、同様に、図-17 は、向心方向力 F_y とビット斜角 β の関係を示したものである。 F_y は、 $\beta = 0$

rad において負値を示し、 $0 \sim \pi/36$ rad のある β の値を中心として点対称となり、また、 $|\beta|$ の増加とともにほぼ直線的に増加している。

図-18 は、 X 方向のスリップ率 i_x を各ビット斜角 β に対して計測した結果を示したものである。図より明らかに、 $R = 8$ cm のとき $\beta = 0$ rad において $|i_x|$ は最小値を示し、 $R = 12$ cm のとき $\beta = -\pi/36$ rad において $|i_x|$ は最小値を示しており最も転動しやすい状態であることを実証している。一方、 $R = 8$ cm のとき $|\beta|$ rad の増加とともに、また $R = 12$ cm のとき $|\beta + \pi/36|$ rad の増加とともに $|i_x|$ は増加し、 X 方向のスリップ量は増加することが判明した。

図-19 は、上式 (18) によって算定したローラカッタの摩擦仕事量 M_t とビット斜角 β との関係を示し、一例として $R = 8$ cm のときの転動距離 $L = 265, 529, 794$ m に対して示したものである。

図より明らかに、 M_t は $\beta = 0$ rad において最小値を示し、 $|\beta|$ の増加とともに急激に増加する傾向を示している。なお、一例として、転動距離 $L = 529$ m について算定した結果を表-3 に示すように、いずれの摩擦仕事量 M_t も $\beta = 0$ rad を除いて Y 方向の摩擦仕事量 $|F_y j_y|$ の方が X 方向の摩擦仕事量 $|F_x j_x|$ と比較して M_t を大きく支配していることが明らかとなった。

表-3 耐摩耗鋼製ローラカッタの摩擦仕事量の算定 ($L = 529\text{m}$, $R = 8\text{cm}$)

β	i_x	F_x	j_x	$ F_x j_x $	F_y	j_y	$ F_y j_y $	M_T
rad		kN	m	kNm	kN	m	kNm	kNm
$-5\pi/36$	-0.1080	1.7722	-57.16	101.30	-2.8015	-220.16	616.78	718.07
$-\pi/12$	-0.0333	1.3734	-17.62	24.19	-2.1989	-137.10	301.48	325.68
$-\pi/18$	-0.0074	0.8713	-3.92	3.42	-1.1462	-92.64	106.18	109.60
$-\pi/36$	-0.0123	0.4978	-6.53	3.25	-0.5526	-45.74	25.27	28.52
0	-0.0004	0.6647	-0.21	0.14	-0.1100	0	0	0.14
$\pi/36$	-0.0074	0.7456	-3.89	2.90	1.1329	45.97	52.08	54.98
$\pi/18$	-0.0154	0.9117	-8.15	7.43	1.0136	91.89	93.14	100.57
$\pi/12$	-0.0377	1.4370	-19.95	28.67	2.0889	136.48	285.09	313.76
$5\pi/36$	-0.1086	2.2122	-57.51	127.21	3.4067	220.00	749.48	876.69

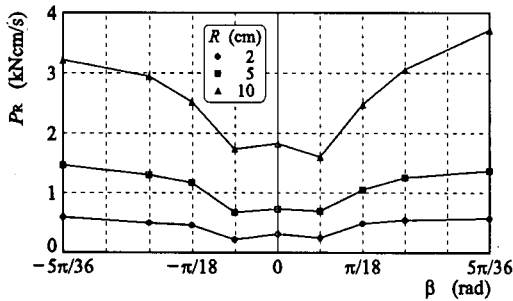


図-20(a) 回転掘削動力 P_R と斜角 β の関係

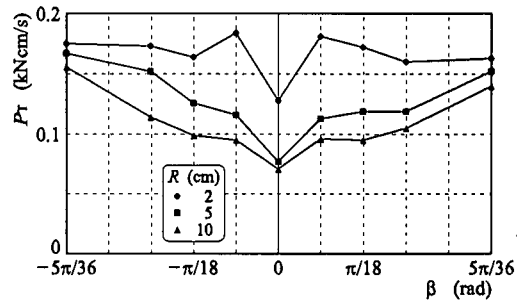


図-20(b) 推進動力 P_T と斜角 β の関係

同図は前述した図-10に示した摩耗量 ΔM とビット斜角 β との関係と比較的よく対応していることが判明した。従って、ローラカッタのビット摩耗量と摩耗長を最小限にするためには、ビット斜角を $\beta = -\pi/36 \sim \pi/36$ rad と設定するのが最適であると言える。

c) 掘削試験

一般に、ローラカッタによる岩盤の全掘削動力 P は、T. B. M. の面盤を回転させるための回転掘削動力 P_R と面盤の推進方向に作用する推進動力 P_T の和として与えられる。

回転掘削動力 P_R は掘削半径 R 、回転数 N および接線方向力 F_x の積として次式で算定することができる。

$$P_R = \frac{2\pi R N F_x}{60} \quad (19)$$

一方、推進動力 P_T は掘削深さ d 、回転数 N および垂直方向力 F_z の積として次式で算定することができる。

$$P_T = \frac{d N F_z}{60} \quad (20)$$

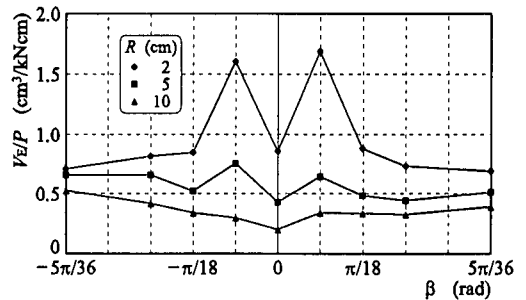


図-21 全掘削動力における掘削土量 V_E/P と斜角 β の関係

図-20(a)(b)は、一例として、両輝石斑糲岩に対する掘削試験において垂直方向力 $F_z = 9.8\text{kN}$ を与えた場合について、掘削半径 $R = 2, 5, 10\text{cm}$ に対して算定した回転掘削動力 P_R (kNcm/s)、推進動力 P_T (kNcm/s) とビット斜角 β との関係を示したものである。図より明らかに、回転動力 P_R は $\beta = \pm\pi/36$ rad において最小値を示し、 $|\beta|$ の増加とともに著しく増加しており、また、掘削半径 R が大きい程増加している。一方、推進動力 P_T は回転動力 P_R の $1/20 \sim 1/4$ 程度であり、また、掘削半径 R が大きくなる程減少している。

図-21は、この場合の単位時間当たりの掘削土量 V_E を全掘削動力 P で除した値 V_E/P (cm^3/kNcm) とビット斜角 β との関係を示したものである。図より明

らかに、 $R=2\text{ cm}$ のとき、 V_E/P は最も大きく、 $R=5, 10\text{ cm}$ の順に減少している。 $R=2, 5\text{ cm}$ のとき、 $\beta=0\text{ rad}$ で極小値をとり $\beta=\pm\pi/36\text{ rad}$ で極大値を示している。一方、 $R=10\text{ cm}$ のときは、 $\beta=0\text{ rad}$ で極小値をとり $|\beta|$ の増加とともに漸増している。従って、単位仕事量当たりの掘削土量を最大ならしめる最適斜角 β は、 $R=2, 5\text{ cm}$ のとき $\pm\pi/36\text{ rad}$ であること、一方、 $R=10\text{ cm}$ のとき $|\beta|$ の増加とともに漸増していることが判明した。

5. 結論

花崗岩および両輝石斑礫岩に対するT. B. M.の掘削面盤中央部分に位置するローラカッタの掘削および摩耗特性に及ぼすビット斜角の影響について実験的考察を行った。その結果、得られた新しい知見を以下にまとめて示す。

(1) 単位時間当たりの掘削土量は、掘削半径が小さいときビット斜角 0 rad で最小値をとり、ビット斜角 $\pm\pi/36\text{ rad}$ において極大値を示す。一方、掘削半径が大きくなるとビット斜角 0 rad で最小値をとり $|\beta|$ の増加とともに著しく増加している。

(2) 花崗岩に対する軟鋼製ローラカッタの摩耗量とビットの摩耗長は、式(2)~(5)に示すように、転動距離の $0.37\sim 0.78$ 乗、およびビット斜角余弦の $-11.2\sim -22.4$ 乗に比例する指数関数で表現することができる。

(3) 両輝石斑礫岩に対する耐摩耗鋼製ローラカッタのビットの摩耗量と摩耗長は、式(10)~(13)に示すように、転動距離の $0.879\sim 1.128$ 乗、ビット斜角余弦の $-17.2\sim -14.9$ 、および垂直方向力の $2.22\sim 2.89$ 乗に比例する指数関数で表現することができる。

(4) 花崗岩および両輝石斑礫岩に対する摩耗試験において、摩耗量の実測値は、ビット斜角 0 rad に対して極大値をとり、 $\pm\pi/36\text{ rad}$ ではすべてのビット斜角に対して最小値を示している。その後、摩耗量はビット斜角の絶対値の増加とともに単調増加する。

(5) 花崗岩および両輝石斑礫岩において、ローラカッタの転動円に対する接線方向のスリップ率の絶対値は、ビット斜角 $-\pi/36\sim \pi/36\text{ rad}$ において最小値を示し最も転動しやすい状態である。また、そのビット斜角前後において単調に増加する傾向にある。

(6) 花崗岩および両輝石斑礫岩に対するローラカッタの摩擦仕事量を理論的に算定した結果、ビット斜角 0 rad において最小値を示し、ビット斜角の絶

対値の増加とともに増大することが確認された。

(7) 回転方向の接線方向力より算定される回転掘削動力は、花崗岩および両輝石斑礫岩に対してそれぞれ $\pi/36\text{ rad}$ および $-\pi/36\text{ rad}$ において最小値となる。

(8) 単位時間当たりの掘削土量を全掘削動力で除した値は、掘削半径が $2, 5\text{ cm}$ のとき、ビット斜角 0 rad で極小値をとり、 $\pm\pi/36\text{ rad}$ で極大値を示している。一方、掘削半径が 10 cm のときは、ビット斜角 0 rad で極小値をとり、ビット斜角の絶対値の増加とともに漸増している。

(9) ローラカッタの単位時間当たりの掘削土量を全掘削動力で除した値を最大ならしめ、かつビットの摩耗量と摩耗長を最小ならしめる最適なビット斜角は、花崗岩および両輝石斑礫岩において $\pm\pi/36\text{ rad}$ である。

謝辞：本研究において摩耗実験を実施するに当たり、愛媛大学大学院元学生上松正史氏、学部元学生宮脇猛弘氏、若林優輔氏に多大なる援助を受けたことに対し心より謝意を表す。

参考文献

- 1) Howarth, D.F. and Roxborough, F.F. : Some fundamental aspects of the use of disc cutters in hard-rock excavation, *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, pp.309-315, Nov., 1982.
- 2) 室達朗, 深川良一: 岩盤掘削刃の摩耗とハードフェーシング対策, 土木学会論文集, No.364/III-4, pp.87-95, 1985年12月.
- 3) 深川良一, 室達朗: TBMローラカッタービットの摩耗特性, 愛媛大学工学部紀要, 12巻4号, pp.127-135, 1993年2月.
- 4) 西岳茂: 岩盤掘削中におけるディスクカッタへの作用負荷の研究 — ディスクカッタと岩盤との力の相互作用, 土木学会論文集, No.554/III-37, pp.211-220, 1996年12月.
- 5) 西岳茂, 石瀬文彦, 本村士郎, 田中昭夫, 松浦武: パラレルリンクによるTBM推進システムの開発, 土木学会論文集, No.540/III-31, pp.135-143, 1996年6月.
- 6) Fangming Gong, 佐藤一彦, 浅井秀明: 円周軌道切削における岩石の切削抵抗 — ディスクカッタによる岩石の切削に関する研究(第1報) —, 資源・素材学会誌, 第108巻, 第7号, pp.557-562, 1992.
- 7) Fangming 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および最大切削抵抗 — 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.
- 8) 鈴木光, 西松裕一: 石炭・岩石類の切削機構について(第1報) — 解析的考察 —, 日本鉱業会誌, Vol.81, No.932, pp.1039-1044, 1965年12月.
- 9) 鈴木光, 西松裕一, 小泉昇三: 石炭・岩石類の切削

- 機構について (第2報) — 二次元切削実験 — ,
日本鉱業会誌, Vol.82, No.939, pp.502-508, 1966年6月.
- 10) 天野礼二, 長友成樹: 新体系土木工学, トンネル (I) — 山岳トンネル — , 技報堂出版, pp.114-118, 1989年.
- 11) 島昭治郎: 建設機械学, 鹿島出版会, pp.151-168, 1987年1月.
- 12) 山下秀, 木下重教: 刃物すくい面および逃げ面に作用する切削抵抗, 日本鉱業会誌, Vol.86, No.992, pp.835-840, 1970年11月.
- 13) 中島巖, 木下重教: 切削厚さが小さい場合の岩石の切削抵抗, 日本鉱業会誌, Vol.88, No.1015, pp.521-526, 1972年9月.
- 14) Peterson, C.R.: Roller cutter forces, *Journal of the Society of Petroleum Engineers*, Transactions, Vol.249, pp.57-65, 1970.
- 15) 秩父顕美, 吉野広司, 佐藤一彦: シールド掘進機におけるカッタ摩耗量の推定方法, 摩耗対策委員会研究成果報告書 (V), 日本建設機械化協会関西支部技術部会摩耗対策委員会, pp.59-68, 平成9年12月.
- 16) Fangming Gong, 佐藤一彦, 内海千尋: TBMゲージカッタに作用する切削抵抗—ディスクカッタによる岩石切削に関する研究 (第3報) —, 資源・素材学会誌, 第110巻, 第47号, pp.277-282, 1994.

(1998. 3.19 受付)

EFFECTS OF A SKEW ANGLE OF A ROLLER CUTTER BIT OF TUNNEL BORING MACHINE ON THE EXCAVATION AND WEAR CHARACTERISTICS

Tatsuro MURO, Koichi KOHNO and Shigeo YAMAMURA

The purpose of the paper is to investigate experimentally the effect of skew angle of a roller cutter positioned in the center part of a tunnel boring machine on the amount of excavation and wear against granite and two-pyroxene gabbro. The radial cross section of the tip of roller cutter was designed to be triangular shape for increasing the amount of excavated debris. The experiment was executed for a skew angle from 0 to $\pm \pi/9$ rad and a normal load of 0.98 to 11.8 kN. As the results, it was observed that, the amount of excavation of two-pyroxene gabbro increases with skew angle and the amount of excavation per unit work has peak values at skew angle of $\pm \pi/36$ rad, after that it increases with skew angle, the amount of wear can be expressed as the exponential function of skew angle, normal load and rolling distance, and that the optimum skew angle to maximize the amount of excavation per unit work and minimize the amount of wear is $\pm \pi/36$ rad.