

24. シールド掘進用超硬ビットの耐摩耗性

愛媛大学：*室 達朗・深川 良一
日立建機(株)：土屋 清

1. まえがき

れき交じり土砂や軟岩を対象とするシールド掘進機のカッタービットの摩耗は著しく、近年、長距離海底トンネルなどの掘削において、主として超硬ビットの摩耗寿命を増大させる必要性に迫られている。超硬ビットの摩耗寿命は「摩耗に対する岩盤強度指数」に支配されるとともに、WC超硬合金の硬さに大きく左右される。ここでは、JIS M3916 に規定する E1, E3, E5 相当品とその SINTER-HIP法によって製造した超硬ビットの耐摩耗性について、風化花崗岩を使用して比較実験を行った。

2. 供試地盤と超硬合金

本研究においては、一軸圧縮強度が約 3 MPa の風化花崗岩で構成される軟質岩盤を対象としている。そのため、供試地盤としては、まさ土に普通ポルトランドセメントと水を加え、セメント水比 31.0 % として、強制攪拌ミキサー1バッチ当たりまさ土 2249 N, セメント 231 N, 水 744 N なる配合設計を行ってソイルセメントを作成し、寸法 500 cm × 75 cm × 30 cm の鋼製土槽内に打設充填し、7日間湿潤養生した後定常掘削摩耗試験に供した。なお、供試地盤は材質の異なる超硬合金供試体毎に新しく作成することとした。それぞれの軟岩供試体の石英含有量は 31~45 %, 見掛け比重は 1.96, 吸水率は 1.64 % 及び一軸圧縮強度は 2.34~3.90 MPa であり、「摩耗に対する岩盤強度指数」 σ_c は 131~444 kPa の範囲で実験を行った。

超硬合金は、一般に、鉱山工具用超硬チップとして JIS M3916 にその分類と性能が規定されており、従来の超硬合金の製造行程は、JIS H2116 で規定される粒径 1~6 μm のタングステンカーバイド粉(WC)に結合材であるコバルト粉(Co)を配合して均等になるまで混合し、プレス成型した後、真空焼結炉内で粉体の融点以下あるいは一部液相を発生させる高温で焼結する「粉末冶金法」である。本研究で使用した超硬合金は、JISで規定する E1 相当品である従来の焼結品である材質 G1 とその SINTER-HIP法で製作した材質 G1 S.HIP, E3 相当品である材質 G3 と材質 G3 S.HIP, 及び E5 相当品である材質 G5 と材質 G5 S.HIP の6種類であ

表-1 $\sigma_c=200$ kPa の軟質岩盤に対する各超硬ビットの摩耗寿命

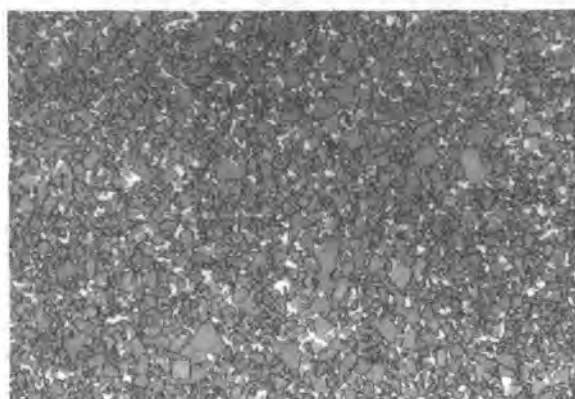
超硬ビット	H _R A (アスケール)	ρ (Mg/m ³)	M _c (g)	m (g/km)	X _c (km)
G1 S.HIP	91.4	14.92	57.71	5.05×10^{-2}	1143
G1	91.3	14.98	57.94	5.23×10^{-2}	1109
G3 S.HIP	90.1	14.66	56.70	8.13×10^{-2}	697
G3	90.0	14.68	56.78	8.46×10^{-2}	671
G5 S.HIP	86.9	14.15	54.73	3.65×10^{-1}	150
G5	86.8	14.17	54.81	3.87×10^{-1}	142

る。これらの超硬合金供試体の物性値である密度 ρ 、ロックウエル硬さ H_{RA} を試験した結果を表-1に示す。材質 G1 は粒径 $1\sim 2\ \mu\text{m}$ の細粒子で、材質 G3 は粒径 $2\sim 3\ \mu\text{m}$ の中位の粒子であり、材質 G5 は粒径 $5\sim 6\ \mu\text{m}$ の巨大な粒子の混在する粒度分布を示している。また、写真-1に各供試体 G3 S.HIP と G5 S.HIP の金属顕微鏡写真を示す。

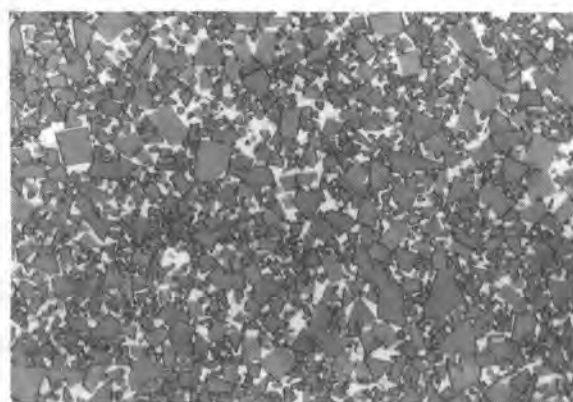
3. 定常掘削摩耗試験

定常掘削実験に使用した超硬合金のカッタービットは、長さ 70 mm、幅 50 mm、厚さ 10 mm、刃物角 $\pi/3\ \text{rad}$ の刺し刃であり、その材質は前述した6種類である。実験装置は、図-1に示すように、前述した供試地盤となる土槽、カッタービット把持装置、レール上を走行する台車、及び 3.75 kW モータ付牽引装置から成り立っている。定常掘削時におけるカッタービットのすくい角 α は $\pi/18\ \text{rad}$ とし、掘削深さは $15 \times \cos(\pi/18) \approx 14.8\ \text{mm}$ 、掘削速度は 2.73 m/min とした。また、実際のシールド掘進機の作業状態を再現するため供試地盤は水浸状態にして掘削実験を行った。1条の掘削距離は 5 m であり、2条目以降は、カッタービットの掘削幅が 40 mm となるように台車の走行するレールの位置を調整し、計 16 条を掘削する。その後、1条目に戻り、2層目を同様にして掘削していき、計 18 層に至るまで掘削摩耗試験を継続するもので、総掘削距離は 1440 m である。超硬合金のカッタービットである超硬ビットの摩耗量は、最大秤量 2100 g、感量 0.01 g の電子天秤を使用し、掘削距離 160 m 毎に計測した。

図-2は、超硬合金の各材質に対して行った定常掘削摩耗試験の結果を、超硬ビットの摩耗量 M (g) と掘削距離 X (m) の関係として示したものである。いずれも、摩耗量は掘削距離に比例してい



(a) G3 Sinter-Hip



(b) G5 Sinter-Hip

写真-1 超硬合金の金属顕微鏡写真

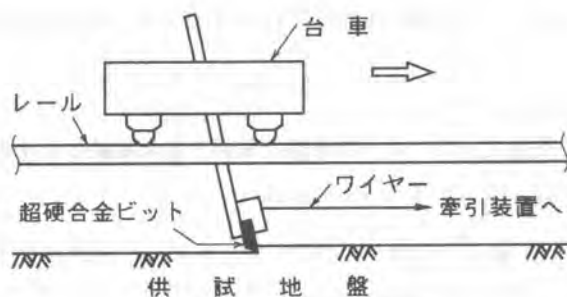


図-1 実験装置の概略

るので単回帰分析を行った結果、次式を得た。

材質 G1

$$M_{G1} = 4.76 \times 10^{-5} X \quad (r = 0.981) \quad (1)$$

材質 G1 S.HIP

$$M_{G1 \text{ S.HIP}} = 5.31 \times 10^{-5} X \quad (r = 0.954) \quad (2)$$

材質 G3

$$M_{G3} = 9.49 \times 10^{-5} X \quad (r = 0.992) \quad (3)$$

材質 G3 S.HIP

$$M_{G3 \text{ S.HIP}} = 7.13 \times 10^{-5} X \quad (r = 0.984) \quad (4)$$

材質 G5

$$M_{G5} = 4.56 \times 10^{-4} X \quad (r = 0.998) \quad (5)$$

材質 G5 S.HIP

$$M_{G5 \text{ S.HIP}} = 3.77 \times 10^{-4} X \quad (r = 0.995) \quad (6)$$

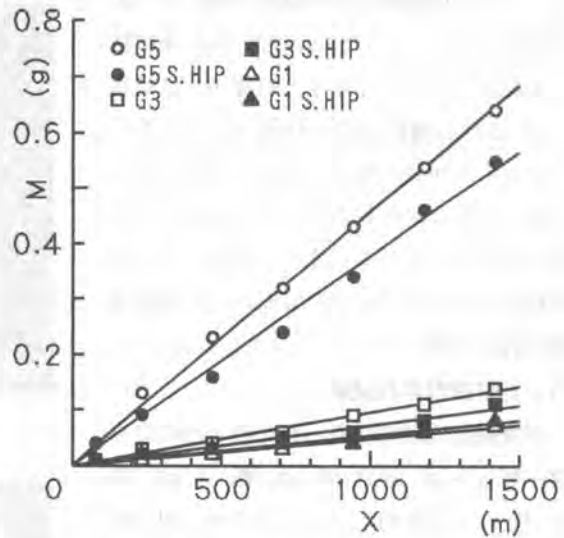


図-2 超硬ビットの摩耗量 M と掘削距離 X の関係

上式において、いずれも相関係数 r はかなり高い値を示している。

超硬ビットの摩耗量を掘削距離で除した値を摩耗係数 m とすると、 m は主として超硬合金の硬さ、供試地盤の「摩耗に対する岩盤強度指数」によって変化すると考えられる。

4. 摩耗寿命予測式

まず、単位掘削距離当たりの超硬ビットの摩耗量である摩耗係数 m を、超硬合金のロックウエル硬さ H_{RA} と供試地盤の「摩耗に対する岩盤強度指数」 σ_c (kPa) について重回帰分析を行うこととする。その結果、重相関係数を R として、次式に示す関係が得られた。

$$m = 0.319 \times (H_{RA} - 80)^{-3.94} \times \sigma_c^{0.158} \quad (R = 0.996) \quad (7)$$

従って、シールド掘進機に装備された超硬ビットの周動距離 X (m) に対する超硬ビットの摩耗量 M (g) は、次式で与えられる。

$$M = 0.319 \times (H_{RA} - 80)^{-3.94} \times \sigma_c^{0.158} X \quad (8)$$

上式より、超硬ビットの摩耗量は、超硬合金の硬さ H_{RA} が大きい程減少し、また、軟質岩盤の「摩耗に対する岩盤強度指数」 σ_c が小さい程減少することが明らかである。

通常、実際のシールドトンネル掘進機の超硬ビットは、刃先から 10 mm 摩耗すると交換する必要がある。すなわち、各超硬合金の限界摩耗量 M_c は、限界摩耗体積 V_c にそれぞれの密度 ρ を乗じたものであり、前表に示した通りである。なお、 V_c は摩耗によるカッタービットの形状変化より算

定すると $V_c=3.87 \text{ cm}^3$ である。

従って、摩耗寿命 X_c (km) の予測式は、次式で与えられる、

$$X_c = \frac{3135 M_c}{(H_{RA}-80)^{-3.94} \times \sigma_c^{0.158}} \quad (9)$$

また、同表に各超硬ビットの密度 ρ 、摩耗係数 m 、及び「摩耗に対する岩盤強度指数」 $\sigma_c=200$ kPa の軟質岩盤に対して、上式より誘導した摩耗寿命 X_c (km) を示した。

その結果、軟質岩盤に対する当該超硬ビットの耐摩耗性は超硬合金のロックウエル硬さの順番に優れており、その摩耗寿命は、(1) G1 S. HIP, (2) G1, (3) G3 S. HIP, (4) G3, (5) G5 S. HIP, (6) G5 の順番に短くなることが明らかとなった。

5. 摩耗による形状変化特性

すくい角 α 、刃物角 β を種々に変化させた場合のカッタービットの摩耗による形状変化を調査するため、 $\alpha=0, \pi/18, \pi/9, \pi/6$ rad の4通り、 $\beta=\pi/6, 2\pi/9, 5\pi/18, \pi/3, 7\pi/18, 4\pi/9$ 、及び $\pi/2$ rad の7通りについて計13枚のカッタービットを SS41 材で製作し、前述した供試地盤を充填した大型土槽を使用して長距離定常掘削・摩耗試験を実施した。

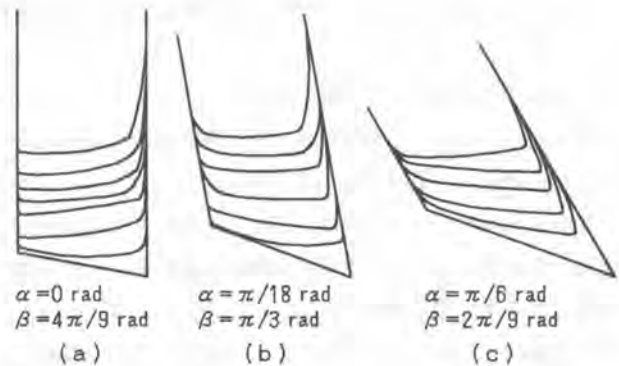


図-3 カッタービット側面の経時形状変化

摩耗によるカッタービットの経時形状

変化は、その一例として図-3 (a) (b) (c) に等掘削距離毎に計測した等時曲線を示すように、すくい面よりにげ面のすりへり摩耗が早く進行しており、刃物角 β の小さいカッタービットはエッジ摩耗のために摩耗長は比較的早く増大していることが分かる。

6. 結論

軟質岩盤に対する超硬合金ビットの耐摩耗性について、6種類のタングステン—コバルト系超硬合金を使用して定常掘削・摩耗試験を実施し、摩耗量と掘削距離の関係を求めている。その結果、一軸圧縮強度約 3 MPa の風化花崗岩に対して、すくい角 $\pi/18$ rad、刃物角 $\pi/3$ rad の超硬合金ビットを掘削深さ 14.8 mm で定常長距離掘削試験を実施したところ、最大掘進長である摩耗寿命 X_c (km) は、超硬合金ビットのロックウエル硬さを H_{RA} 、軟質岩盤の「摩耗に対する岩盤強度指数」を σ_c (kPa)、ビットの限界摩耗量を M_c (g) とすると、式 (9) で与えられること。また、軟質岩盤に対する超硬合金ビットの材質は H_{RA} の高い順番に優れており、JIS規格 EI 材を SINTER-HIP 法で製造したものが最も耐摩耗性があることが判明した。

なお、本研究を実施するに当たり御協力をいただいた愛媛大学元学生山本成宏氏、アロイ工業(株) 巻好美氏に対し感謝の意を表します。