

シールド掘進機用刃先の耐衝撃性に関する実験的考察

室 達朗¹・土屋 清²・石山 徹³・服巻好美⁴

¹正会員 工博 愛媛大学教授 工学部土木海洋工学科 (〒790 松山市文京町 3)

²日立建機(株) トンネル工場部設計部 主任技師

愛媛大学大学院工学研究科 土木海洋工学専攻 学生

⁴アロイ工業(株) 工場長

シールド掘進機用刃先であるカッタービットの差し刃となる超硬合金、および母材金属となる炭素鋼や中空鋼の材質がそれぞれの耐衝撃性に及ぼす影響について、実験的考察を行っている。刃先と玉石等の衝突による衝撃力は、金属内部に衝撃曲げ引張り応力や衝撃せん断応力を発生させ、それぞれ所定の衝撃値に達すると金属を破壊するのである。その結果、超硬合金に対するせん断衝撃値は材質によって殆ど変化しないが、曲げ引張り衝撃値は、抗折力の増加、硬さの減少とともに増加すること、せん断衝撃値は曲げ引張り衝撃値の約1/6であること、また、炭素鋼と中空鋼に対する曲げ引張り衝撃値は超硬合金よりはるかに大きい、そのたわみ変形量は衝撃値の増加とともに増加することが明らかとなった。

Key Words: impact resistance, hard metal, shield tunnel, cutter bit, excavation

1. まえがき

近年、四方を海に囲まれたわが国では、東京湾横断トンネルなどの長距離海底トンネルの建設工事が鋭意進められている。今日のシールド掘削工法は、玉石やれき混じり地盤、および軟質岩盤での施工にも適用することのできる、汎用性の高いシールド掘進機が使用されている。しかし、シールド掘進機用刃先であるカッタービットの摩耗や折損の問題は、長距離掘進を非常に困難なものとしている。また、長距離海底トンネルや大深度地下空洞の建設工事期間中にカッタービットを交換する作業は、高圧下での苦労作業をとめない非常に危険であるばかりでなく、切羽面の安定問題や長時間の工事停止によって工費・工期に重大な影響を及ぼすのである。従って、カッタービットの摩耗と折損対策は、早急に解決すべき重要な問題であり、すでに軟岩に対するカッタービットの材質である超硬ビットの摩耗寿命予測式が提案されている¹⁾。

一般に、超硬ビットの耐摩耗性は他の耐摩耗鋼やハードフェーシング材と比較して数倍の効果を発揮している。しかし、玉石や転石との衝突によって超硬ビットは簡単に破砕され、超硬ビットの耐衝撃性が問題となっている。本研究の目的は、シールド掘進機カッタービットの最適な材質について、とくに超硬ビットの耐衝撃性について実験的考察を行うことである。従来の試験法である鉱山工具用超硬チップに対する抗折力試験法 (JISM

3916) は、静的荷重に対するものであり、衝撃荷重に対する曲げ引張り衝撃値を与えていない。また、シャルピー衝撃値試験法 (JISZ2242) の載荷方法では、せん断衝撃値を決定する際、Weibull 確率紙上で 99% の破壊確率を精度良く特定することが困難であり、さらに、曲げ引張り衝撃値を直接測定することができない。なお、両試験法ともその載荷方法は線載荷であり、一点載荷とはなっていない。

超硬合金に対する耐衝撃性について、稲見・北住^{2,3)}は金属切削工具として広く用いられている切削工具用超硬合金のチップングに関する研究を行っている。チップングの機構を明らかにする上で、工具すくい面に発生する最大引張り応力が最も重要な因子となっている。彼等は、種々の超硬合金に対して 3 点曲げ試験、衝撃試験を行い、定常掘削時にはほとんどチップングを引き起こさないが、断続切削時における食いつき、びびりや振動が発生する切削においては、工具の引張り強さはひずみ速度の影響を受けて低下し、チップング現象が生じることを示した。また、M. G. GEE, J. M. COX⁴⁾ は、単純な電磁気システムにより、超硬合金のボールをセラミック材料に、繰り返し衝撃荷重を載荷してセラミック供試体の挙動を研究している。その結果、210N/mm² までの衝撃荷重の下では、繰り返し衝撃のダメージは供試体の強度の影響を与えないことを明らかにしている。

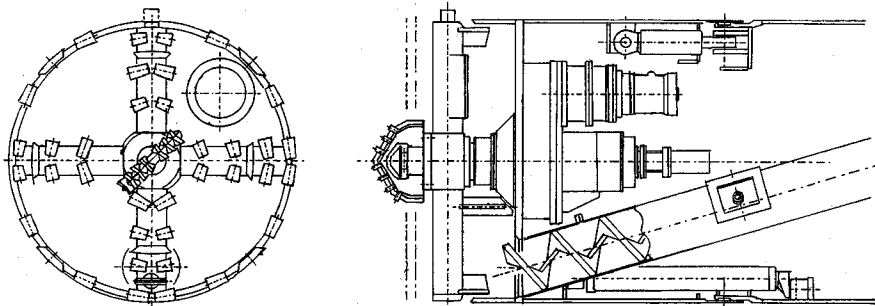
ここでは、カッタービットの差し刃となる超硬合金、および母材金属となる炭素鋼や中空鋼の材質がそれぞれ

表—1 超硬合金の諸特性 (JIS M3916)

JIS 使用分類記号	材質	化学成分 (%)			硬さ HRA	抗折力 N/mm ²	WC 粒径 (μ m)
		W	Co	C			
E1	G1	87~90	4~8	5~6	>90	>1177	1~2
E3	G3	83~87	7~12	5~6	>88	>1569	2~3
E5	G5	78~85	9~17	5~6	>86	>1961	5~6

表—2 炭素鋼 S45C と中空鋼 SKC24 の化学成分 (JIS G4051, G4410)

供試体	化学成分 (%)							
	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	P	S
炭素鋼 S45C	0.42~0.48	0.15~0.35	0.60~0.90	—	—	—	<0.030	<0.035
中空鋼 SKC24	0.33~0.43	0.15~0.35	0.30~1.00	2.50~3.50	0.30~0.70	0.15~0.40	<0.030	<0.030

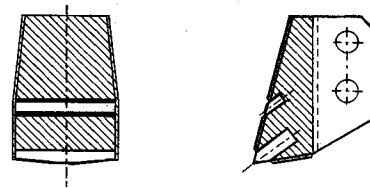


図—1 泥土圧式シールド掘進機

の耐衝撃性に及ぼす影響について、衝撃荷重による折損実験を行っている。刃先と玉石等との衝突による衝撃力は、一般に、刃先の金属内部に衝撃曲げ引張り応力や衝撃せん断応力を発生させ、それぞれ所定の衝撃値に達すると金属を破壊するのである。刃先と玉石等との間の衝突条件を一定とするため、丸棒の各金属供試体と同一の材質で製作した刃物角 60度のエッジ部分とを点接触させ、重さ約 200N の重錘を落下させることによって相互に衝突するように設定している。9種類の超硬合金、2種類の炭素鋼、および1種類の中空鋼について、それぞれの曲げ引張り衝撃値とせん断衝撃値を折損実験によって求め、各材質の抗折力や硬さとの関係を明らかにしている。

この新しい試験法は、玉石等によるシールド掘進機カッタービットの衝撃特性を一点載荷によって標準化しており、この衝突によって刃先内部に発生する衝撃応力に対して、その耐衝撃性をせん断衝撃値と曲げ引張り衝撃値として特定することができる。

そのため、刃先の材質選定に当たっては、これらの衝撃値の高い材料を選定すべきであり、また、刃先の形状と断面の設計に当たっては、刃先内部に発生する応力の解析によっていかなる方向からの衝撃荷重によっても、発生するせん断応力と曲げ引張り応力が、各衝撃値から



図—2 れきビットの一例

算定される衝突エネルギーと衝撃荷重の許容値以内におさまるように配慮する必要がある。

以上の諸実験より、シールド掘進機用刃先の耐衝撃性を向上させるための最適なカッタービットの材質について考察し、新しい刃先設計法を提言することを本研究の目的としている。

2. カッタービットの材質

図—1 は、土圧式シールド掘進機全体の組み立ての一例を示したものである。シールド掘進機のカッターヘッドには、外周リング上にシュルビット 4個とれきビット 12個が配置され、スポーク上にティースビット 16個、れきビット 8個、およびシュルビット 4個が配置されている。また、カッターヘッド中央突起部には角ビット付きフィッシュテールビットが設置されている。図—2に、

カッタービットの一例として、スポーク上に設置されているれきビットの平面図と立面図を示す。超硬合金は差し刃として、他の炭素鋼や中空鋼で構成されるカッタービットの母材金属内にロー付けされている。ここでは、超硬合金、炭素鋼、および中空鋼の金属供試体として、すべて直径7mm、長さ50mmの丸棒に成形加工したものを用意した。

超硬合金チップは、JISM3916に「鉬山、土木および建設の事業場において使用する鉬山工具用超硬チップ」として規定されており、材質G1、G3、G5を真空焼結した供試体G1、G3およびG5と、SINTER-HIP法(SHIP法)によって焼結した供試体G1SH、G3SHおよびG5SH、および材質G3を別のSHIP法によって焼結した供試体SG3A、SG3BおよびSG3Cの計9通りについて試験を行った。表-1に、材質G1、G3、G5の化学成分と粒径を示す。炭素鋼チップは、JIS G4051に「熱間圧延、熱間鍛造など熱間加工によって作られたもので、通常さらに鍛造、切削などの加工と熱処理を施して使用される機械構造用炭素鋼鋼材」として規定されており、材質S45Cとその熱処理を施したS45CHの2種類について試験を行った。さらに、中空鋼チップは、JIS G4410に「さく岩機用ロッド、継ロッドまたはインサートビットなどに使用する中空鋼鋼材」として規定されており、材質SKC24について試験を行った。表-2に、炭素鋼S45Cと中空鋼SKC24の化学成分を示す。

(1) 超硬合金の焼結方法

超硬合金の製造方法は、JIS H2116に規定される粒径1~6 μ m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、プレス成形した後、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。今日では、JISの規格性能を上回る数々の製品が開発され、生産されている。その一つに、熱間等方圧処理法(HIP法)がある。従来の方法では、製品中の空孔の発生はある程度止むを得ないとされてきたが、HIP法では材料の空孔の大きさおよびその数を減らすことができ、そのため超硬合金の強度と耐疲労性は向上するのである。

しかし、HIP法による製造においても、その過程で残留コバルトレークが発生してしまい、材料内部のこの弾性的な不連続点が応用集中の起点となり、均一な組織をもつ材料に比べてその力学的性質は劣っている。また、再加熱による製品の軟化や回収アルゴンガス中の蓄積ガス成分におけるカーボンバランスの問題も発生している。このため、HIP法よりも優れた焼結方法であるSINTER-HIP法(SHIP法)が開発された。SHIP法は、同一の真空焼結炉内で脱ろうと焼結を完了した後、製品

表-3 超硬合金供試体の物性値

供試体	焼結条件	抗折力 N/mm ²	硬さ H_{RA}	比重 ρ
G1	NS	2773	91.3	14.91
G1SH	SHIP	3332	91.4	14.93
G3	NS	2999	89.8	14.63
G3SH	SHIP	3440	89.8	14.65
G5	NS	2999	87.0	14.13
G5SH	SHIP	3195	87.1	14.15
SG3A	SHIP	3165	89.5	14.57
SG3B	SHIP	3283	88.8	14.49
SG3C	SHIP	3352	88.5	14.45

NS: 真空焼結 SHIP: シンターヒップ法

を酸素に曝すことなく、アルゴンガスを10MPa以下の低圧力で等方加圧し、均一なマイクロ組織を得ることにより、一段と優れた耐摩耗性と靱性を有する超硬合金の製造に成功したのである。

本実験においては、超硬合金供試体として、従来の真空焼結(NS)と新しいSHIP法で焼結された2種類のものを選定した。

(2) 硬さおよび抗折力

超硬合金の耐摩耗性・耐衝撃性を表現する物理量として、硬さと抗折力がある。超硬合金は他の合金鋼と比較して硬いので、硬さの測定には、一般に、ロックウエル硬さ試験法(Aスケール)を用いている。ロックウエル硬さ(Aスケール) H_{RA}^{A} とは、頂角120度、先端半径0.2mmのダイヤモンド円錐圧子を用い、まず98N(10kgf)の基準荷重を加えて押圧し、次に588N(60kgf)の試験荷重を載荷し、再び基準荷重に戻したときの圧子のくぼみの深さの差から算定するものである。一方、抗折力 σ^{B} とは、寸法24mm \times 8mm \times 4mmの金属供試体を支点間距離20mmの支点上に設置し、支点中央に集中荷重をかけて試料が破壊するときの最大曲げ応力である。破断荷重の求め方は、抗折力試験装置の支点上に試料を載せ、荷重を厚さの方向に加えて徐々に増し、破断したときの荷重値を求めるのである。

一般に、超硬合金の硬さと抗折力は、コバルト(Co)含有量とタングステンカーバイド(WC)粒子の粒度に大きく左右されるのである。すなわち、Co含有量が増加すると抗折力は増加する傾向にあるが、硬さは減少する傾向にある。F. OSTERSTOCK⁷⁾は、シャルピー衝撃試験において、超硬合金の衝撃破壊エネルギーはCo含有量の増加とともに増加し、Co含有量が30%付近においてピーク値をとる傾向にあること、および、重量90gfの鋼球落下試験において、超硬合金の衝撃破壊エネルギーはCo含有量の増加とともに増加することなどを明らかにしている。また、WCの粒径が大きくなれば、抗折力

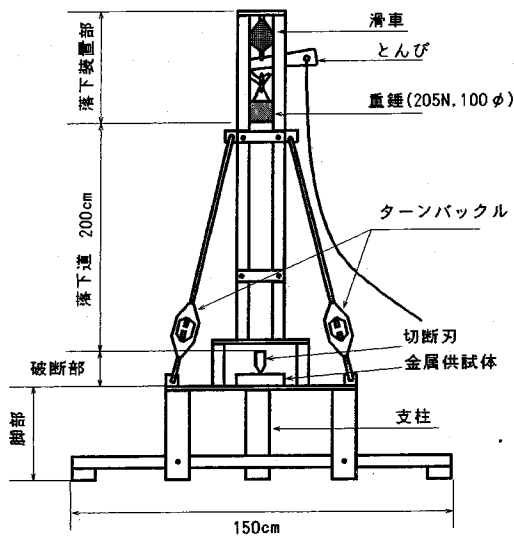


図-3 重錘落下式衝撃試験機

は増加するが硬さは減少する、逆に粒径が小さくなれば、硬さは増加するが抗折力は減少するのである。このように、超硬合金の硬さと抗折力は相反する物理量であり、そのため、硬さに依存する耐摩耗性と抗折力に依存する耐衝撃性もまた相反する特性である。

超硬合金の耐摩耗性を向上させるには素材の硬さを増加させる必要があり、一方耐衝撃性を向上させるには素材の抗折力を増加させる必要がある。逆に、素材の硬さを増加させると耐衝撃性は減少し、一方素材の抗折力を増加させると耐摩耗性は減少してしまう。従って、単に素材の硬さまたは抗折力だけを増加させても超硬チップの性能を向上させることは不可能であり、硬さと抗折力の最適な組合せによって、超硬チップの耐摩耗・耐衝撃性能を最大限に上げるための研究開発が重要である。

9種類の超硬合金供試体の硬さと抗折力、および比重については、表-3にまとめて示した。また、炭素鋼 S45C 供試体の物理的性質として、降伏点は 490N/mm^2 以上、引張り強さは 686N/mm^2 以上、伸びは 17% 以上、絞り率は 45% 以上、シャルピー衝撃値は 88Nm/cm^2 以上であり、硬さ HB は 201~269 である。さらに、中空鋼 SKC24 供試体の硬さ HB は 269~352 である。

3. 衝撃荷重による折損実験

玉石、砂利および岩石等との衝突時に発生する衝撃荷重によってカッタービットの折損実験を行うには、ビットの材質、刃先形状である刃物角、すくい角、にげ角と、玉石等の造岩鉱物の種類、形状、硬さ、および衝突角度、衝突速度、衝突エネルギー等の種々の要因について考察する必要がある。従来の衝撃試験機には、試験片に衝撃

荷重を与えて材料の衝撃に対する抵抗の大きさを測定するために、落槌式 (falling weight or drop hammer) 衝撃試験機と振り子槌式 (pendulum hammer) 衝撃試験機がある。落槌式は精密ではないが機構が簡単であるため比較試験等にはしばしば使用されている。JIS 規格にあるシャルピー衝撃試験機⁸⁾やアイゾット衝撃試験機⁹⁾は、振り子槌式の代表的なものであり、吸収される衝撃エネルギーの測定が比較的实施しやすいという利点がある。

ここでは、一定の衝突角度で点接触する落槌式の衝撃試験機を製作し、それぞれの金属供試体について衝撃曲げ試験および衝撃せん断試験を行っている。

(1) 実験装置

図-3は、この研究のために新しく試作した重錘落下式衝撃試験機の全体図である。図に示すように、試験装置は、落下装置部、落下道、破断部、および脚部からなり、落下道の最大高さは 200cm、脚部の大きさは 150cm 角である。重錘の形状は、直径 10cm、高さ 34cm の円柱形であり、自重は 205N (20.9kgf) である。重錘はとんびに吊り下げられており、とんびとともに上下方向に自由に移動させることができ、また、一定の落下高さに調整して固定することが可能である。落下開始に際しては、とんびに取り付けられたロープを牽引することにより、重錘をある固定された位置から落下させることができる。

試験装置の破断部は、衝撃曲げ引張り試験装置と衝撃せん断試験装置の 2 種類から構成されている。重錘が各試験装置の載荷板上に落下すると、金属供試体は超硬合金の切断刃を介して衝撃破断されるのである。図-4は、衝撃曲げ引張り試験装置の詳細図を示したものであり、供試体ホルダーの支点間距離は 4cm である。供試体が破断したとき、切断刃が基盤に衝突するのを防止するため、載荷板のガイドが供試体ホルダー上部に設置した上ぶたで停止する仕組みになっている。図-5は、衝撃せん断試験装置の詳細図を示したものである。超硬合金の切断刃は、 $70\text{mm} \times 50\text{mm} \times 10\text{mm}$ の大きさで、その刃物角は 60 度の直線エッジ部であり、直径 7mm の金属供試体と点接触して、衝撃荷重を載荷するのである。超硬合金の切断刃の材質は、金属供試体が超硬合金の場合は、玉石を想定し硬さの最も高い G1 の材質のものとし、金属供試体が炭素鋼や中空鋼の場合は、抗折力の最も高い G5 を使用している。

(2) 実験方法

超硬合金供試体を使用して重錘落下試験を実施した場合、衝撃曲げ引張り試験、衝撃せん断試験のいずれの場合においても、供試体はある落下高さにおいて破断す

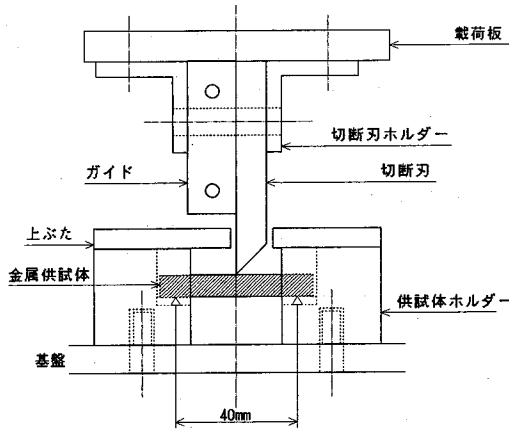


図-4 衝撃曲げ引張り試験装置

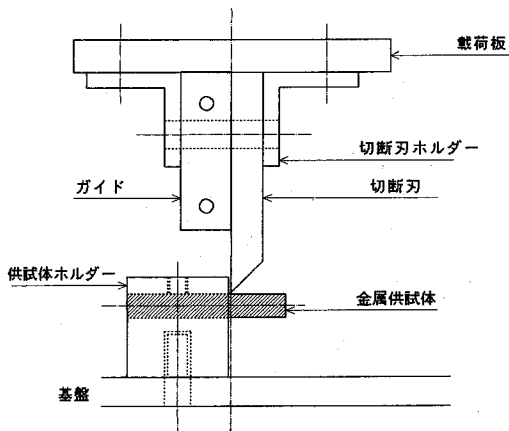


図-5 衝撃せん断試験装置

る。

衝撃曲げ引張り試験の場合は、前図-4に示したように、まず、超硬合金供試体を供試体ホルダー内の支点によって保持し、支点間中央に同一材質の超硬合金の切断刃を設置し、その後、切断刃ホルダー上の載荷板に向かって重錘をある高さより落下させ、供試体の破断の有無を確認する。各落下高さに対して供試体の破壊確率を求め、供試体がWeibull確率紙上で99%の破壊確率¹⁰⁾で破断するときの限界落下高さを測定する。なお、1回の重錘の落下に対して、常に新しい超硬合金供試体を使用する必要がある。

重錘の重量 M (N)、限界落下高さ H_c (m)、支点間距離 L (cm)、供試体の断面係数 Z (cm³) に対して、曲げ引張り衝撃値 E_b (Nm/cm²) は次式で定義することができる。

$$E_b = \frac{MH_c L}{2Z} \quad (1)$$

衝撃せん断試験の場合は、前図-5に示したように、まず、超硬合金供試体を水平方向にスライドできる供試

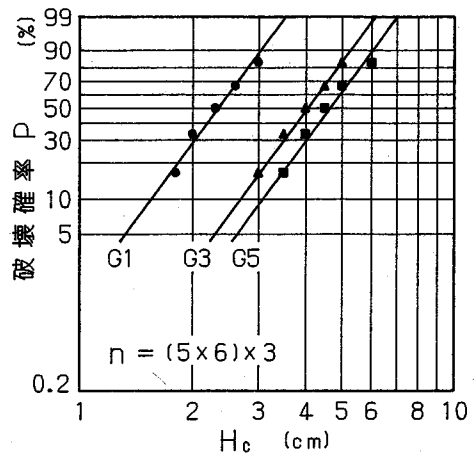


図-6 衝撃曲げ引張り試験における限界落下高さ H_c の Weibull 分布図
(超硬合金 G1, G3, G5, n はデータ数)

体ホルダー内にネジによって固定し、超硬合金の切断刃を供試体ホルダーの側壁面に接するように設置し、その後、切断刃ホルダー上の載荷板に向かって重錘をある高さより落下させ、供試体の破断の有無を確認する。なお、限界落下高さの測定方法は、衝撃曲げ引張り試験方法と同じである。

重錘の重量 M (N)、限界落下高さ H_c (m)、供試体の断面積 A (cm²) に対して、せん断衝撃値 E_s (Nm/cm²) は次式で定義することができる。

$$E_s = \frac{MH_c}{A} \quad (2)$$

次に、炭素鋼供試体および中空剛供試体を用いて重錘落下試験を行う場合、これらの供試体は、超硬合金供試体のように、ある一定の落下高さにおいて破断するという現象は見られない。衝撃曲げ引張り試験の場合、供試体の中央から「く」の字型に折れ曲がるため、その供試体に対する限界落下高さを求めることができない。そのため、ある落下高さにおける供試体の塑性変形量を計測し、落下高さ H (m) を塑性変形量 y (mm) の関数として、次式で表現することとする。

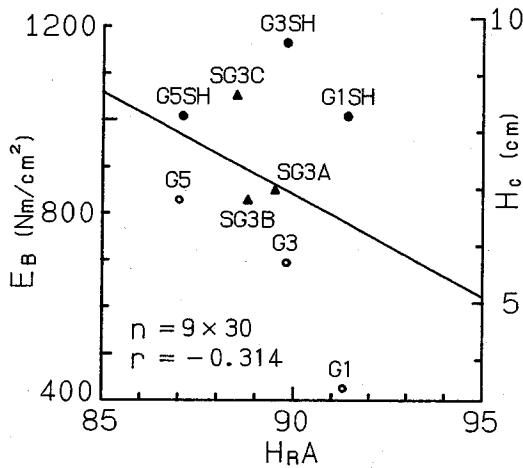
$$H = ay^b \quad (3)$$

4. 実験結果と考察

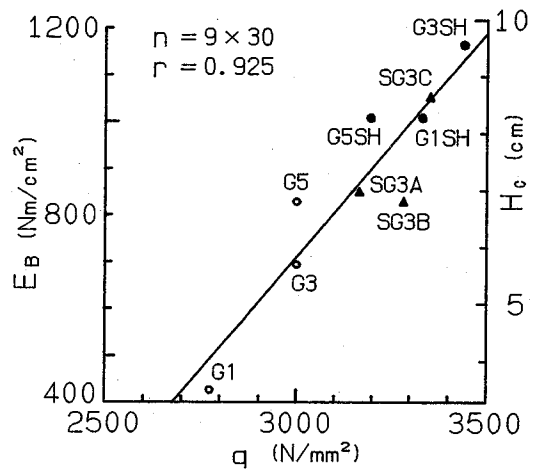
(1) 超硬合金に対する衝撃曲げ引張り試験

超硬合金供試体に対する衝撃曲げ引張り試験の結果、限界落下高さを支配する要因分析を行うため、超硬合金の物理特性である硬さと抗折力との関係を求めることとする。

図-6は、一例として、超硬合金 G1, G3, G5 に対す



(a) 限界落下高さ H_c 、曲げ引張り衝撃値 E_B と硬さ H_{RA} との関係



(b) 限界落下高さ H_c 、曲げ引張り衝撃値 E_B と抗折力 q との関係

図-7 超硬合金に対する曲げ引張り衝撃試験結果

る衝撃曲げ引張り試験における限界落下高さ H_c を Weibull 確率紙上に示したものである。なお、各破壊確率はそれぞれ6個の供試体について算定している。図-7は、9種類の超硬合金に対する限界落下高さ H_c および式(1)によって算定した曲げ引張り衝撃値 H_b とロックウェル硬さ H_{RA} 、抗折力 q の関係として図示したものである。同図(a)は、限界落下高さ H_c (cm)、曲げ引張り衝撃値 E_B (Nm/cm²) とロックウェル硬さ H_{RA} の関係を示したものである。かなりのばらつきが見られるが、硬さの増加にともない限界落下高さは低くなる傾向にある。材質 G1, G3, G5 をそれぞれ SHIP 法で焼結した超硬合金 G1SH, G3SH, G5SH は、いずれも硬さの変化はあまりないが、限界落下高さはかなり増大している。このことは、すでに SHIP 製法と NS 製法による焼結材の緻密なマイクロ組織の差によるものであることがすでに金属顕微鏡写真によって確認されている。

なお、 E_B と H_{RA} の関係は、次式によって回帰することができる。

$$E_B = -43.92H_{RA} + 4793 \quad (n=9 \times 30, r=-0.314) \quad (4)$$

ここに、 n はデータ数、 r は相関係数である。両者の相関関係はほとんど存在しない。

供試体 G1, G3, および G5 に関しては、 E_B は H_{RA} の増加とともに減少している。

しかし、SHIP 法で焼結した超硬合金は、いずれも曲げ引張り衝撃値 E_B を上昇させているが、その増加量は、G1SH が最も大きく、次いで G3SH, G5SH の順位である。

同図 (b) は、限界落下高さ H_c (cm)、曲げ引張り衝撃値 E_B (Nm/cm²) と抗折力 q (N/mm²) との関係として示したものである。この場合、抗折力の増加とともに限界落下高さは増加する傾向にある。材質 G1, G3, G5 をそれぞれ SHIP 法で焼結した超硬合金 G1SH, G3SH, G5

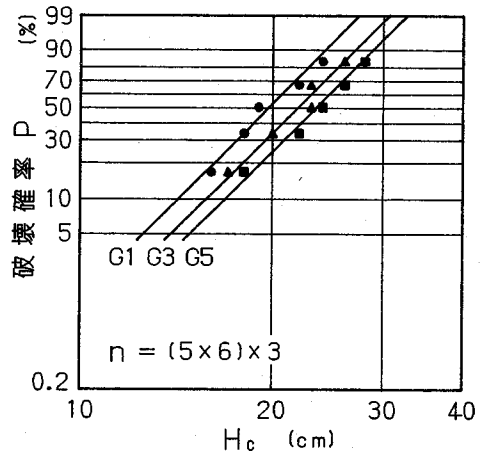


図-8 衝撃せん断試験における限界落下高さ H_c の Weibull 分布図 (超硬合金 G1, G3, G5, n はデータ数)

SH は、いずれも抗折力が増大しており、また限界落下高さもかなり上昇していることが明らかである。

E_B と q との相関関係は、次式によって回帰することができる。

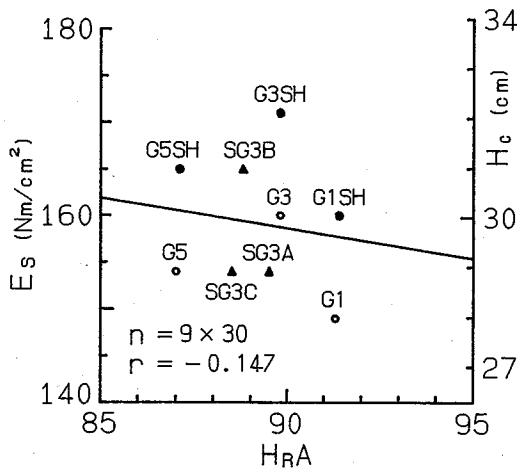
$$E_B = 0.961q - 2173 \quad (n=9 \times 30, r=0.925) \quad (5)$$

ここに、 n はデータ数、 r は相関関数であり、かなり高い相関性を示している。なお、SHIP 法で焼結した超硬合金は、いずれも抗折力 q と曲げ引張り衝撃値 E_B を上昇させているが、その増加量は、G1SH が最も大きく、次いで G3SH, G5SH の順位である。

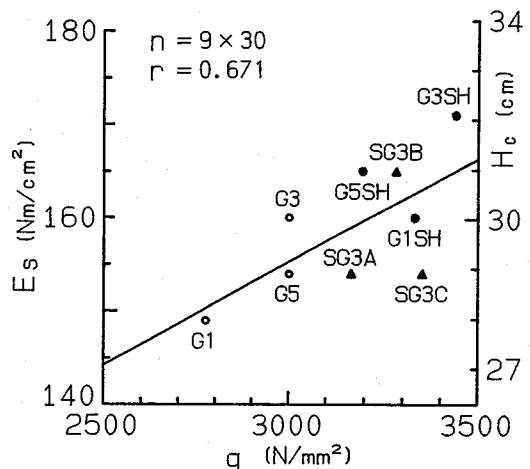
以上の実験の結果、抗折力の最も大きな材質 G3SH が、曲げ引張り衝撃値 E_B を最大とし、耐衝撃性の最も優れた超硬合金であることが判明した。

(2) 超硬合金に対する衝撃せん断試験

超硬合金供試体に対する衝撃せん断試験の結果、限界



(a) 限界落下高さ H_c , せん断衝撃値 E_s と硬さ H_{RA} との関係



(b) 限界落下高さ H_c , せん断衝撃値 E_s と抗折力 q との関係

図-9 超硬合金に対するせん断衝撃試験結果

落下高さを支配する要因分析を行うため、同様に、超硬合金の物理特性である硬さと抗折力との関係を求めることとする。図-8は、一例として、超硬合金G1, G3, G5に対する衝撃せん断試験における限界落下高さ H_c をWeibull確率紙上に示したものである。図-9は、9種類の超硬合金に対する限界落下高さ H_c および式(2)によって算定したせん断衝撃値 E_s とロックウェル硬さ H_{RA} 、抗折力 q の関係として図示したものである。同図(a)は、限界落下高さ H_c (cm)、せん断衝撃値 E_s (Nm/cm²)とロックウェル硬さ H_{RA} の関係を示したものである。限界落下高さは硬さの増加に対してあまり変化していないことが分かる。

E_s と H_{RA} の関係は、次式によって回帰することができる。

$$E_s = -0.654H_{RA} + 217.5 \quad (n=9 \times 30, r=-0.147) \quad (6)$$

ここに、 n はデータ数、 r は相関関係である。両者の相関性は全く存在しない。

同図(b)は、限界落下高さ H_c (cm)、せん断衝撃値 E_s (Nm/cm²)と抗折力 q (N/mm²)との関係として図示したものである。この場合にも限界落下高さは抗折力の増加にともなっておりあまり変動していない。

E_s と q の関係は、次式によって回帰することができる。

$$E_s = 2.21 \times 10^{-2} q + 89.0 \quad (n=9 \times 30, r=0.671) \quad (7)$$

ここに、 n はデータ数、 r は相関係数である。

以上、せん断衝撃値は、抗折力の大きさとともに増大するが硬さの影響をあまり受けないことが明らかとなった。また、せん断衝撃値の平均値は、平均曲げ引張り衝撃値の約1/6であり、衝撃時においては、曲げ引張り抵抗力と比較してせん断抵抗力がかなり小さいことが判明した。

なお、超硬合金供試体に対する折損実験において、重

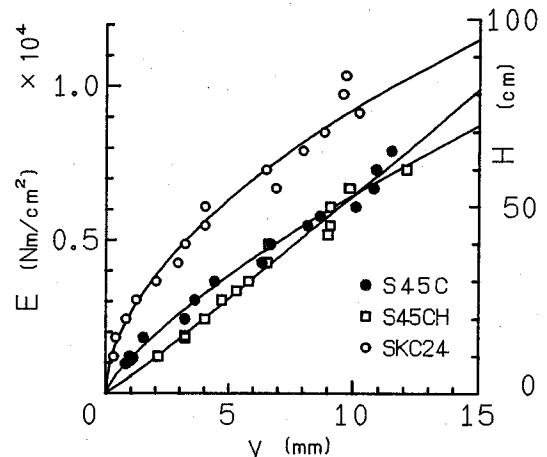


図-10 炭素鋼、中空鋼に対する衝撃曲げ引張り試験における落下高さ H 、曲げ引張り衝撃値 E と塑性変形量 y との関係

錘を落下させる毎に供試体との衝突により超硬合金の切断刃が欠損してしまうので、毎回新しい切断刃と交換する必要があった。切断刃の欠損断面積は、硬さの最も高いG1材が最も大きく、次いでG3材、G5材、G5SHIP材の順位で減少している。また、G1材の抗折力は他の材質と比較して低い値を示すため耐衝撃性も小さく、欠損断面積が他の材質と比べて大きくなったと考えられる。

(3) 炭素鋼、中空鋼に対する折損実験

炭素鋼S45Cと熱処理したS45CH、および中空鋼SKC24の折損実験においては、前述したように、供試体は衝撃荷重によって塑性変形を引き起こすため、供試体を完全に破断させるに必要な限界落下高さは、超硬合金に比べてかなり大きいことが明らかとなった。そのため、衝撃曲げ引張り試験においては、ある落下高さにおける供試体中央部のたわみ量である塑性変形量を計測す

ることとした。図-10は、炭素鋼 S45C および S45CH、中空鋼 SKC24 に対する衝撃曲げ引張り試験において、落下高さ H と塑性変形量 y の関係を示したものである。図より明らかに、いずれの供試体においても落下高さは塑性変形量の増加とともに増加している。また、同じ落下高さに対する塑性変形量は、中空鋼 SKC24 の場合、他の炭素鋼 S45C、S45CH と比較して小さくなっている。従って、中空鋼 SKC24 材の耐衝撃性が最も優れていることが判明した。

さらに、同図は、落下高さ H を式(1)の H_c に代入して算定した曲げ引張り衝撃値 E (Nm/cm²) と塑性変形量 y (mm) との関係を示したものである。両者の回帰式は次式で与えられる。

$$\text{炭素鋼 S45C 材} \quad E=1.15 \times 10^3 y^{0.748} \quad (n=15, r=0.996) \quad (8)$$

$$\text{炭素鋼 S45CH 材} \quad E=5.66 \times 10^2 y^{1.056} \quad (n=15, r=0.992) \quad (9)$$

$$\text{中空鋼 SKC24 材} \quad E=2.63 \times 10^3 y^{0.547} \quad (n=15, r=0.992) \quad (10)$$

上式において、 n はデータ数、 r は相関係数であり、いずれも高い相関性を示している。

5. 結論

シールド掘進機用刃先であるカッタービットを構成する超硬合金、炭素鋼、および中空鋼の耐衝撃性に及ぼす要因として、金属供試体の硬さと抗折力の影響について実験的考察を行った。衝撃試験としては、材質、製造方法および焼結条件の異なる9種類の超硬合金、炭素鋼、および中空鋼供試体を使用して、衝撃曲げ引張り試験と衝撃せん断試験を実施し、以下のような新しい知見を得た。

(1) 超硬合金に対する衝撃曲げ引張り試験の結果、曲げ引張り衝撃値 E_B (Nm/cm²) は、次式で示すように、硬さ H_{RA} とともに減少し、抗折力 q (N/mm²) とともに増加する。

$$E_B = -43.92H_{RA} + 4793 \quad (n=9 \times 30, r=-0.314)$$

$$E_B = 0.961q - 2173 \quad (n=9 \times 30, r=0.925)$$

供試体 G1、G3 および G5 に関しては、 E_B は H_{RA} の増加とともに減少する。しかし、SHIP 法によって焼結するといずれも E_B が増加してこの反比例の関係が見られなくなっている。

その結果、抗折力の最も大きな超硬合金 G3SH が、最も優れた耐衝撃性を示す超硬合金であることが判明した。

(2) 超硬合金に対する衝撃せん断試験の結果、せん断衝撃値 E_s (Nm/cm²) は、次式で示すように、抗折力 q (N/mm²) の増加とともに増加するが、硬さ H_{RA} に対

してはあまり変動しないこと。

$$E_s = 2.21 \times 10^{-2} q + 89.0 \quad (n=9 \times 30, r=0.671)$$

その結果、 E_s の平均値は、曲げ引張り衝撃値 E_B の約 1/6 倍であることが明らかとなった。

(3) 炭素鋼および中空鋼に対する衝撃曲げ引張り試験の結果、曲げ引張り衝撃値 E (Nm/cm²) は、供試体中央部のたわみ量である塑性変形量 y (mm) の関数として、次式で与えられる。

$$\text{炭素鋼 S45C 材} \quad E=1.15 \times 10^3 y^{0.748} \quad (n=15, r=0.996)$$

$$\text{炭素鋼 S45CH 材} \quad E=5.66 \times 10^2 y^{1.056} \quad (n=15, r=0.992)$$

$$\text{中空鋼 SKC24 材} \quad E=2.63 \times 10^3 y^{0.547} \quad (n=16, r=0.992)$$

その結果、中空鋼 SKC24 材が、炭素鋼、Co を充填材として焼結した超硬合金と比較して耐衝撃性に最も優れた材料であることが判明した。

(4) カッタービットの材質としては、耐摩耗性¹¹⁾と耐衝撃性が同時に要求されるので、耐摩耗性の優れた超硬合金を差し刃とし、耐衝撃性の優れた炭素鋼や中空鋼を母材金属としてカッタービットを設計する必要がある。例えば、風化した軟質な花崗岩を掘削する場合、耐衝撃性よりも耐摩耗性が要求されるので、刺し刃としては、超硬合金 G1 材または G1SH 材を使用し、母材金属としては炭素鋼、中空鋼を使用することができると可能性がある。一方、大きな玉石や転石が存在する場合には、耐摩耗性よりは耐衝撃性が要求されるので、刺し刃として抗折力の高い超硬合金 G3SH 材を使用し、母材金属としては中空鋼 SKC24 を採用する方が好ましい。さらに、シールド掘進機の最外周カッタービットの速度は 20m/min 前後であり、玉石や転石の質量から両者の衝突エネルギーを予測し、超硬合金に作用する衝撃荷重が許容せん断衝撃値以内に納まるよう、十分な刃先断面積を有する超硬合金刃を設計するなど、新しい刃先設計法を考察する必要がある。

参考文献

- 1) 室 達朗, 土屋 清, 服巻 好美, 山本 成宏: 軟岩に対する超硬合金ビットの定常掘削抵抗とその摩耗寿命向上策, 土木学会論文集, No. 474/VI-20, pp. 75-83, 1993年9月.
- 2) 稲見 靖, 北住 順一: 金属掘削工具のチップングに関する研究 (第1報), 新居浜工業高等専門学校紀要 (理工学編), 第18巻, pp. 12-17, 1982.
- 3) 北住 順一, 稲見 靖: 金属切削工具のチップングに関する研究 (第2報), 新居浜工業高等専門学校紀要 (理工学編), 第21巻, 第1号, pp. 23-28, 1985.
- 4) M. G. GEE and J. M. COX: The Response of Ceramics to Repeated Impact Loads, *Br. Ceram. Proc.*, No. 37, pp. 207-216, 1986
- 5) 吉沢武男: 硬さ試験法とその応用, 裳華房, pp. 62-109, 1977.

- 6) JIS M3916 : 鉋山工具用超硬チップ—抗折力試験方法—, pp. 1-3, 1983.
- 7) F. OSTERSTOCK: Impact Behaviour of Tungsten Carbide-Cobalt Alloys, *Int. J. Refract. Hard Metals*, Vol. 2, No. 3, pp. 116-120, Sep., 1983
- 8) 横山 武人: 機械工学一般, 共立出版, pp. 80-107, 1961.
- 9) 葉山房夫: 金属材料および試験法, コロナ社, pp. 160-166, 1968.
- 10) 白樫 高洋, 井原 透, 金沢 憲一, 白井 英治: 切削温度上昇を伴う断続切削時の切れ刃欠損発生の解析的予測(第1報)—超硬合金の衝撃劣化過程と破壊応力に及ぼす温度の影響—, 精密工学会誌, 第53巻, 第10号, pp. 87-93, 1987.
- 11) 室 達朗, 深川 良一, 村上 法義: 岩石に対する超硬合金, 耐摩耗鋼及び溶着金属の摩耗特性, 愛媛大学工学部紀要, 第13巻, pp. 119-134, 1994.

(1994.4.27 受付)

EXPERIMENTAL STUDY ON THE IMPACT RESISTANCE OF A CUTTER BIT OF A SHIELD TUNNELING MACHINE

Tatsuro MURO, Kiyoshi TSUTIYA, Toru ISHIYAMA
and Yoshimi HARAMAKI

This paper aims to investigate experimentally the impact resistance of a cutter bit of the shield tunneling excavation machine. As a metal specimen and a falling weight impact blade, different kinds of hard metal of sintered alloy, two kinds of carbon steel and a cored steel were prepared. Thereafter, several impact tests were executed by use of a new falling weight test method. The critical impact values when the metal specimens are broken at fracture probability 99% in Weibull's distribution of impact fracture stress have been measured. As a result, it is clarified that, for hard metal, the critical impact bending resistance is increased with the increment of the flexural strength and with the decrement of the hardness, the critical impact shear resistance is almost constant for all hard metals, and the critical impact bending resistance becomes almost six times of the critical impact shear resistance.