講義

金属の摩耗と硬化肉盛溶接(その1)*

大 蝶 堅**

Wear of Metals and Hard-Facing (Part-1)*

by Ken Ocho**

1. 緒 論

摩耗とは通常摩擦による物体の好ましからざる離脱を云う。その現象は非常に複雑で、土や岩に対する鉱山機械や建設機械の切刃、電車のブレーキシューのような急激な摩耗もあれば、潤滑された精密機械の摺動部分のような穏やかな摩耗もある。

一般に金属の摩耗の形式は、(1)金属と金属の摩擦によって生ずる金属間摩耗(Metallic Wear)と凝着摩耗(Adhesive Wear)、(2)金属粒子あるいは非金属研摩剤との接触によって生ずる研摩耗(Abrasive Wear)あるいは切削摩耗(Cutting Wear)、(3)腐蝕、潰蝕による摩耗(Corrosive Wear and Erosion)、(4)表面疲労(Surface Fatigue, Pitting or flaking)、および(5)その他の摩耗に分けることができる。

普通の金属相互の摩耗や接触圧が比較的低い場合の摩耗などに関しては、わずかな条件の相異による変動が大きく、摩耗現象も複雑となって解明が困難な問題が多いが、機械のあるところには常に発生し、非常に重要な命題なので古くから広く研究されている¹⁾。

しかし鉱山機械、建設機械などの切刃、トラクターの無限軌道の履帯やローラーのように土砂や岩石を掘削し、あるいは大きな荷重の下で研磨、研削をうけながら土岩の中で作業とするものの摩耗に関しては、研究や文献も比較的乏しく、定量的な方向づけはなされていない。

しかるにこれらの機械の土岩に対する摩耗部位の磨滅は非常に大きく、ことに鉱山機械や建設機械などにおいては地球と云う大きなグラインダーを相手に大馬力で擦り減らしの競走をしているようなものであり、更に近時これらの機械が大型化高性能され、使用条件もますます

苛酷となって来て、この種の摩耗にいかに対処して行くかが重要な問題となって来ている。

実際の対策として普通行なわれている方法はいわゆる金属表面処理法で、高周波誘導加熱あるいは焼入れ、浸炭焼入れ、窒化、シアン硬化、硬質メッキ、メタリコン、ショットピーニングあるいは硬化肉盛溶接がある。これらの方法の中で各種の機械などの摩擦部位の摩耗防止、修復、再生に最も広く用いられる方法は肉盛溶接による方法である。

土岩に対する金属のこの種の摩耗、とくに硬化肉盛金属の摩耗について、その摩耗の機構を解析し、多くの実験結果と資料から耐摩性の評価式を導き、また実験的にその評価式の適用性と妥当性を検討した。以下にその概要を述べる。

1. 1 摩耗の種類

(1) 凝着摩耗

二物体間に摩擦が起こる場合、他の研摩耗あるいは切削摩耗、腐蝕、表面疲労などによる摩耗を起こす原因を除いても避けることはできないもので、摩耗のなかで最も本質的なものである。

一般に金属の表面はどのような加工法を採用しても完全な平面ではなく、凹凸や突起が常に存在する。したがって二つの表面が接触する場合は図-1に示すようにい

図-1 2つの表面の接触

くつかの突起で接触することになる。このように見掛けは広い面積で接触しているように見えるが、実際には二つの表面はこの突起で接触していることになる。凝着摩耗はこの点の接触部において金属同志の凝着が起こり、

* 原稿受付 昭和41年6月9日

** 正 員 ブルドーザ工事KK, Member, Bulldozer Koji Co., Ltd.

軟かい方の金属が引きさかれて硬い方に移行することによって起こる摩耗である。

凝着摩耗の機構についてはラジオアクティブトレーサー法による解明や、摩耗の塑性説や摩耗におよぼす法効果の影響などの摩耗に関する新しい事実が次々に発見されている。

（2）研摩耗，切削摩耗

二つの金属表面が摩擦する場合，研磨剤となる粒子が先ず金属面にめり込んで一時的の砥石となって相手の金属を研削し，また研磨剤粒子が金属表面に集中応力を与えるため，加工効果，疲労破壊の道程を経て金属を磨滅する。この種の磨耗を一般に研摩耗と云う。

また二つの面が摩擦するとき，一方の面に他方より硬い突起があり，この硬い突起が他の面を切削することにより摩耗が進行する現象を切削摩耗と云う。その摩耗の機構は研摩耗によく似ている。

実際の金属間の摩耗において，二つの面が或る荷重のもとで摩擦して凝着摩耗の現象を生ずる場合にも，表面の突起は加工効果をうけていづれの面よりも硬くなり，これが脱落して摩耗粉となって研摩耗の原因となることがある。しかしこのような現象は凝着摩耗の際に度々起こるもので，凝着摩耗と関連させて考慮した方がよいが，硬化肉盛の対象として研摩耗を考える場合，ことに土岩に対する摩耗の場合には一応除外して考える方が妥当である。

（3）腐蝕，潰蝕による摩耗

外周の影響により摩擦面の一方もしくは両方が化学変化を起こして生じた生成物が，面の摩擦により除外されて摩耗が進行する場合を腐蝕摩耗と云う。この種の摩耗の一種にフレッシングの現象がある。これは凝着摩耗と腐蝕摩耗と研摩耗の組合わされたものである。

早い速度で運動する液体中の硬い微粒子による摩耗をエロージョンと云う。この場合普通流体による腐蝕をともしない，また腐蝕の激しい場合には流体中の微粒子が腐蝕による生成物に衝突し除去して摩耗を進行させる。

図-2 球と平面との接触による内部剪断応力

（4）表面疲労

いわゆる転がり摩耗と云われるもので，潤滑剤が存在するところで転がりを生じている表面に，永い転がりの後に疲労現象によって孔や鱗片状の欠損が発生するもので，ピッチングとも云われる。

一般に球と平面の接触を考えると，図-2に示すように接触円の半径を a として表面から $0.6a$ の点に最大剪断力が存在することが認められている。繰返し接触が行なわれると，この点に疲労による割れが発生し，それが発達してピッチングとなるのである。

1. 2 研摩耗および切削摩耗

土岩に対する金属の摩耗は研摩耗が大部分であって，土砂や岩石などの研磨剤の研磨，切削あるいは引き掻きによる摩耗と見られる。硬化肉盛ではこの種の摩耗を対象とする場合が最も多いから今少し詳細に検討する。

研摩耗は機械的な切削作用による摩耗で，金属間摩耗の場合は主として酸化粉末などのラッピング作用によるものである。その他に粗い研削軸と軟かい軸受メタルの組合せのように，相接する二面の片方が硬くて粗い場合に直接切削作用を行なうこともある。研磨剤としては摩耗にともなって生ずる酸化粉末のほかに，加工硬化した摩耗粉末や外部より混入して来る砂や塵埃などがある。

鉱山機械や建設機械で岩石や土砂をさく孔，掘削する場合の錐先や切刃，トラクターのキャピラー機構の摩耗や砂塵の多い所で生ずるエンジンのシリンダー・ライナーの異常な摩耗，露出した伝導装置などに生ずる大きな摩耗など，この種の研摩耗に起因することが多い。

この種の摩耗を減少させるには，常識的に考えられることはまず第一に材料の硬さを上げることである。多くの摩耗現象において硬さが耐摩性の一つの尺度となっている。しかし実際には材料の組織によって摩耗が変わり，また摩耗の進行中に研磨剤は軟かい材料の方により埋没し易いので象眼されたような恰好になって，軟かい材料の方がより耐摩性を有することもありうる。また材料の熱伝導度が小であれば摩耗面の温度が容易に上昇し，したがって摩耗量が大きくなる場合もありうる。

次に弾性変形に耐えうる能力の大小が耐摩特性に大きな影響がある。硬い研磨剤が存在しても弾性変形に対する能力が大であれば，その研磨剤があたっている間は変形を起すが，他へ移ればもとの状態に復帰して永久的な摩耗をうけない。この弾性限界 δ_0 は， H を押込硬度， E を弾性係数とすれば経験的に H/E に比例する。すなわち

$$\delta_0 \propto H/E \quad \dots\dots\dots (1.1)$$

機械的な切削作用による摩耗は，歪の弾性限度 E_r の大きい程少いと考えられる。したがって

$$H_r \propto H/E \dots\dots\dots(1.2)$$

また単位容積当りの弾性エネルギー E_{en} の大きい程この種の摩耗は少いと考えられる。これは応力の弾性限の二乗を弾性係数で割ったもので表わされ、

$$E_{en} \propto H^2/2E \dots\dots\dots(1.3)$$

これらの式が正しく耐摩性の尺度になりうるか否かは多くの検討を必要とするが、一応耐摩性は硬さを大にすれば大になり、弾性係数をにすれば大なることを示している。

材料の組成と組織、強度特に靱性が摩耗に大きな影響を与えていることが経験的に云いうる。

研摩耗においてこれらの材料の諸性質がいかに耐摩性に影響を与えているかを検討する。

2. 土岩に対する金属の磨耗に 影響を与える諸要素

2.1 相手土岩の硬さの影響

相手土岩の硬さの影響を系統的に検討したものに Stauffer²⁾ の実験がある。

$$\text{ビッカース硬さ} = (\text{モース硬度}/0.7)^3$$

として、鋸屑、ロームの軟かいものから、石英、シリコンカーバイトまでのビッカース硬さ10から約2,400の範囲の研磨剤を使って、その硬さの変化が種々の金属の磨耗に与える影響の実験結果を定量的に示している。(図一3)

図一3 攪拌試験における研磨剤の硬さと抵抗数の関係

図に見るように磨耗抵抗値は研磨剤の硬さに大きく影響されている。研磨剤が軟かい場合は金属材料の硬さの低いものも高いものも皆高い抵抗値を示しているが、研磨剤の硬さの増加と共に抵抗値は急激に小さくなって、ほぼ一定の値を示すようになる。アルミとか真鍮のような軟かい材料は石灰砂以上の硬い研磨剤の中では急激に磨耗するが、硬化高クロム、高炭素鋼のような硬い材料はロームから白鉄粉の間の硬さの研磨剤の中ではかなり高い磨耗抵抗を示すが、研磨剤がより硬くなって石英砂、コランダムになると耐摩性が徐々に低下して、金属材料による抵抗数の差が少くなっている。

2.2 土砂の含水率、雰囲気の影響

切刃で土砂を掘削する場合の室内実験で、ロームあるいは砂質の含水率を変化させて金属磨耗に対する影響を調べた報告がかなりなされてお³⁾、含水率によって磨耗量が相当大きく影響され、また、ある含水率で磨耗が最大値を示すことが知られている。これは含水の程度によって土砂の他の物理的性質が変化することによる影響が出て来ているものと考えられる。

水による腐蝕、酸化などの化学的要因による腐蝕磨耗、酸素、窒素、アンモニア、炭酸ガスなどの雰囲気あるいは他の有機物質などの影響についても以前から種々の実験が報告⁴⁾されている。

しかし土岩に対して大きな荷重を受けながらかなり急激な機械的磨耗を生じている場合には、経験的にこれらのものの影響はそれ程大きくないと考えてよい。

2.3 摩擦速度の影響

速度の影響についても多くの報告^{3,4)}がなされている。磨耗と速度がある関係を持っていることは試験個々については認められるが、条件によって傾向が相異している。時によっては速度の増加と共に磨耗が減じ⁵⁾、あるいはある速度で最大値を示し⁶⁾、あるいは高速度で磨耗が増大し⁷⁾、あるいは速度と一定の比例関係を示している⁸⁾などの実験結果が出ている。これは試験条件によって磨耗の機構が変わって来るのが大きな原因と考えられる。

2.4 圧力の影響

土岩に対する金属の磨耗は大部分が研摩耗で、金属間の磨耗と同じように考えるのは危険であるが、Holm⁹⁾、Archard⁹⁾、Burwell¹⁰⁾、吉本¹¹⁾らによれば、金属間の凝着磨耗においては磨耗量は荷重に比例して大きくなることを定量的に表現している。

この関係は Burwell および Strang¹²⁾ が指摘しているように、負荷の圧力が材料のブリネル硬度の $\frac{1}{3}$ 以下の間は成立するが、 $\frac{1}{3}$ 以上の高応力範囲になると磨耗痕が異常に増加して急激に磨耗を増大することが実際にしばしば生じている。

2.5 仕上げ面のあらさの影響

通常金属磨耗、油入磨耗あるいは接触圧の低い間の研摩耗の場合には、仕上げ面のあらさの影響が大きな因子となって、変質層の生成と関連して比較的磨耗量の多い初期磨耗の現象を生ずる。この現象と表面あらさの影響については従来から多くの実験や解析がなされている^{4,9,11,13)}。

土岩に対する磨耗のように比較的高応力の研摩耗と考えられる場合には、初期磨耗と定常磨耗の差異も顕著には存在せず、仕上げ面のあらさの影響もごく初期に表われるだけで大きな影響は与えないと考えられる。

2. 6 相手土岩の性状の影響

この種の摩耗に関係する土岩の性状として、土砂の粒度、形状、靱性がある。

(1) 粒度の影響

材料力学の球と平面の接触の計算¹⁴⁾においても、前述の Holm, Archard の考え方からも、二つの物体が接触する場合の接触圧縮圧力に粒度が一定の比率で関連していることが示されている。一般的に云って粒度が小さければ巨視的に見て接触面における圧縮圧力は大となり、また摩耗面の単位面積上で接触する粒子の数が多くなって単位時間中における接触回数が増加するから摩耗は大きくなる。同様なことを Stauffer²⁾ も実験結果から指摘している。

(2) 形状の影響

相手土岩の粒子の形状が、丸味を持ったものか鋭い尖端を持っているかによっても摩耗に差異を生ずる。これは前項の粒子の大きさに関係する接触圧縮圧力と引掻き切削能の相異によるものと考えられる。

(3) 靱性の影響

相手土岩が衝撃あるいは荷重によって容易に変形、破壊されれば金属の受ける接触圧力は低く、したがって摩耗量も少い。土岩の靱性、強度が大きい程金属の摩耗は大きいと考えられる。

2. 7 材料の硬さ、強度、組織などの影響

(1) 硬さの影響

硬さが摩耗におよぼす影響を論じた研究、文献は非常に多い。また本研究の土岩に対する金属の摩耗の場合には、硬さが最大の因子になっているように思われる。

従来の資料を見ると、硬いもの程摩耗が少ないという常識はかなりの普遍性はあるが、反対の結果を示す場合もしばしばある。硬さが摩耗と比例関係を示している例は飯高^{7), 15)}、大越¹⁶⁾、M.M. Khrushov¹⁷⁾らの論文があり、またなんらかの関連を有しない例として Sporkert の実験¹⁸⁾や前述の Stauffer の報告がある。

要するに摩耗現象は非常に複雑であり、種々の原因によって起こるもので、その原因の中で一番大きい役割

をなすものによって摩耗が起こるような観を呈するものであって、土岩に対する摩耗の場合には硬さが主要な役割りをなすと見なされる場合が多い。

(2) 強度の影響

材料の強度、靱性、弾性係数が硬さと共に研摩耗に大きな影響を与えるであろうことは充分考えられ、横田¹⁹⁾、Oberle²⁰⁾らの論文がこの点を強調して報告されている。また抗張仕事量と劈断仕事量および冷間加工を施した材料のアイゾット衝撃値が摩耗量に密接な関係のあることが報告されている¹⁹⁾。摩耗接触面は高度に加工硬化されているから冷間加工された材料のアイゾット衝撃値が小さい程摩耗の多いことは充分考えられる。

(3) 組織、熱処理の影響

一般的に云って炭素鋼の耐摩性は焼鈍、焼戻、焼入れの熱処理順に、フェライト、パーライト、ソルバイト、トルースタイト、マルテンサイトの組織の順に良くな

表一 種々の組織の炭素鋼の相対摩耗（鈴木）⁵⁾

組 織	比摩耗 (mg)
As rolled	13.4×10^{-3}
Annealed	12.6×10^{-3}
Sorbite	10.5×10^{-3}
Troostite	6.3×10^{-3}
Martensite	1.9×10^{-3}

図一 硬化肉盛溶着金属の硬さと組織の影響

表一 2 代表的な Wet Sand Abrasion Factor (Metals Handbook)²¹⁾

Material	H _B	Abrasion factor
Ferrite (irgot iron)	90	1.40
Cray cast irons	200±	1.00 to 1.50
SAE 1020 annealed	107	1.00 (Standard)
White cast irons	400±	0.90 to 1.00
Pearlite	220 to 350	0.75 to 0.85
Austenite (12%Mn)	200	0.75 to 0.85
Bainte	512	0.75±
Martensite	715	0.60±
Martensitic cast irons (Ni-Hard)	550 to 750	0.25 to 0.60

図-5 各種溶着金属の研摩耗比 (Avery)²²⁾

図-6 C%と摩耗摩耗量との関係

図-7 C%と溶融摩耗量との関係 (v=1.0 m/s)

る。また結晶粒が大きく、かつ粗大な組織より緻密な組織の方が良好となり、さらに地質に不溶解のまゝ残留している炭化物含有量の増大およびその組織の微細化と共に良好になると考えられる。(表-1, 表-2, 図-4, 図-5)

(4) 化学成分の影響

一般的に金属間摩耗の場合には、酸化摩耗領域では図

図-8 C量と摩耗量の関係 (Haworth)

一8のように 0.9%C の共析点になだらかな極小点があり、機械的破壊の領域では図-7のように比例関係を示している。

土岩に対する摩耗の場合には、従来の実車試験や室内実験では摩耗は C % の増加と共に減少し、0.8~1.0 % でほぼ一定になることを示している³⁾。

溶着金属の化学成分の影響を調べたものに R.D. Haworth²³⁾ の報告がある。図-8 にその実験結果の代表的なものを示す。図において AA は 1~2%Cr, CC は 14~15%Cr で、共に C 量を 1 % から 4 % に変化させた場合の摩耗減量を表している。これから耐摩性に C 量が大きな影響を与えていることが解る。

P, Si, Ni, Cr, Mn, Mo, W などその他の合金元素も金属の耐摩性に影響を与えている³⁾⁴⁾¹⁶⁾。

3. 硬化肉盛について

金属材料の表面を磨滅から防ぐために表面に各種の合金層を作ること普通サーフェシングと云い、特に機械的磨滅を防ぐために行なう方法をハードフェーシングと云う。広義には滲炭硬化、フレームハードからメッキ、メタルスプレーなど一切の表面処理を含んでいるが、多くは狭義の溶接による硬化肉盛をいう場合が多い。

ハードフェーシングの方法は 19 世紀末特許が提出され、1920 年頃石油さく井用のドリルの刃先の耐摩用材料として使い始められた。1930 年頃からは広くあらゆる工業に用いられるようになり、自動溶接あるいは不活性ガス溶接の発達と共に広範な均一の肉盛りも容易に出来るようになって、高価な合金の節約や磨滅部分の補修に広く用いられ、鉱山機械、建設機械の耐摩耗部位やその補修あるいは重工業や二次製造部門に広く活用されるようになった。

3.1 硬化肉盛溶接材料の選択

硬化肉盛の材料は主として溶接棒、インサートおよび粉末の形で作られるのが普通であり、その合金層の組成は非常に広範である。これらのなかからそれぞれの摩耗条件に適した材料を選択するには、その摩耗の原因を知ることが必要である。

摩耗の原因、機構は複雑で、摩耗の原因と現象を究明することはなかなか困難である。しかし土岩に対する金属の摩耗の場合は研摩耗が大部分であり、土砂や岩石による摩擦と引き掻きによる磨滅が占める比率が非常に大きいと考えられるから、一般には引き掻きに耐える表面の硬さの大なることが必要条件となって来る。

また力のエネルギーを吸収し、あるいは大きな圧縮圧力を分散するような靱性の高い合金が優れた耐摩性を示すものと考えられるから、硬化肉盛材料の耐摩性は主と

表-3 硬 化 肉 盛 合 金 の 比 較

ハードフェーシング合金	硬 度 (Hv)	組 織	特 性
タ ン グ ス テ ン 炭 化 物 系	1800	W-Carbid マルテンサイト (オーステナイト)	耐摩耗性最大 エロージョン抵抗大
マ ル テ ン サ イ ト 系	800	Cr-Carbid マルテンサイト (オーステナイト)	耐摩耗性大 耐酸化性大 圧縮抵抗大
Co base 合 金 Ni base 合 金	700		酸化抵抗大耐食 高温強度 クリープ 抵抗大
マ ル テ ン サ イ ト 系	600	マルテンサイト	衝撃抵抗 中 耐摩耗性 中
パ ー ラ イ ト 系	300	ソ ル バ イ ト パ ー ラ イ ト	機械加工可能 耐摩耗性小耐衝撃性やや大
セ ミ ・ オ ー ス テ ナ イ ト 系	350	マルテンサイト オーステナイト	耐疲労性大高温強度やや大 耐摩耗性中耐衝撃性中
オ ー ス テ ナ イ ト 系	200	オーステナイト	靱性大 加工硬化して 耐衝撃性最大

してこの2つの性質の相乗関係によってある程度規定できる。表-3に実用的な硬化肉盛合金の選択基準を示す。

3. 2 硬化肉盛合金の分類と性質

肉盛溶接に使用される溶接棒には下盛用と上盛用とがある。下盛用には溶着金属を多量に肉盛りする必要のある時に下地として使われる低水素系の軟鋼棒とかパーライト系棒と、割れ防止あるいは稀釈防止のため母材と溶着金属との間の緩衝帯として使用されるステンレス鋼の棒がある。普通の硬化肉盛棒といえば上盛用の棒で、耐摩、耐熱、耐食などの性質を与えるために、C, Mn, Ni, Cr, W, Moなどの合金元素を含んだ合金が使用される。表-4、表-5にそれぞれJIS規格、A.W.S規格の溶接棒の化学成分を示す。

(1) パーライト鋼系

溶着金属はパーライト組織よりなり、硬さはHv 200～350の範囲である。この系の特徴は溶接のまゝで機械加工ができることで、フレームハードあるいは高周波焼入れによって局部的に硬化させることも可能である。

この組織は鋼の最も安定な組織であり、強靱であるが

硬度低く耐摩耗性も少ない。組成は軟鋼にC, Cr, Moなどの少量が添加されたもので、これらの元素によってフェライトの析出を防ぎパーライトの微粒組織を示すようにしたもので、表-4のDFe 2Aがこれに当る。

(2) マルテンサイト鋼系およびセミオーステナイト鋼系

C量とCr, Mnなどの合金量および溶接後の冷却速度により、マルテンサイトあるいは残留オーステナイトにマルテンサイトあるいはソルバイトの混じた組織を示す。DFe-2B, -2C, -3A, -3B, -3C, -4A, -4Bなどがこれに相当する。硬さはHv 450～900の間に広く分散している。

マルテンサイトの組織は鋼の組織の中では最も脆弱であるが、硬度が高く耐摩耗性にも優れている。この硬さは本質的に含有炭素量により決定され、合金元素は溶接後放冷によってもこの組織が得られるように添加される。

セミオーステナイトは高温状態におけるオーステナイト組織がマルテンサイトに変態を開始する温度Ms点を50～80°C附近に下げ、マルテンサイト完了の温度Mf点を常温以下に降下させるように、C, Cr, Vなどの合

表-4 JIS 規格 硬化用被覆アーク溶接棒

溶 接 棒	溶 着 金 属 の 化 学 成 分 %							
	C	Cr	Ni	Mn	Si	P	Mo	C以外の他 元素の合計
DFe 2 A	<0.19							0.4～6.0
DFe 2 B	0.20～0.60							0.4～6.0
DFe 2 C	0.60～1.50							0.4～6.0
DFe 3 A	<0.20	4.0～10.0						6.0～12.0
DFe 3 B	0.21～0.60	4.0～10.0						6.0～12.0
DFe 3 C	0.61～1.70	4.0～10.0						6.0～12.0
DFe 4 A	<0.20	10.0～14.0						12.0～30.0
DFe 4 B	0.21～0.50	10.0～14.0						12.0～30.0
DFe 4 C	0.51～2.50	10.0～14.0						12.0～30.0
DFe Mn	<1.10	<0.5		11～16	<1.3	<0.07		
DFe Mn Ni	<1.10	<0.5	>2.75	11～16	<1.3	<0.07		
DFe Mn Mo	<1.10	<0.5		11～16	<1.3	<0.07	0.6～1.4	
DFe Mn Cr	<0.10	14.0～18.0	<4.00	8～14	<1.3	<0.07		

表-5 AWS 規格 硬化用被覆アーク溶接棒

溶接棒の種類	C	Mn	Co	W	Ni	Cr	Mo	Fe	V	Cu	Al	Zn	Si	Pb	Sn	P	その他元素の合計
EFe 5 A	0.7~1.0	<0.50	—	5.0~7.0	—	3.0~5.0	4.0~6.0	残	1.0~2.5	—	—	—	<0.70	—	—	—	<1.0
EFe 5 B	0.5~0.9	<0.50	—	1.0~2.5	—	3.0~5.0	5.0~9.5	—	0.8~1.3	—	—	—	<0.70	—	—	—	<1.0
EFe 5 C	0.3~0.5	<0.50	—	1.0~2.5	—	3.0~5.0	5.0~9.0	—	0.3~1.2	—	—	—	<0.70	—	—	<0.07	<1.0
EFe Mn A	0.5~0.9	11.0~16.0	—	—	>2.75	<0.50	—	—	—	—	—	—	0.3~1.3	—	—	<0.07	<1.0
EFe Mn B	0.5~0.9	11.0~16.0	—	—	—	<0.50	6.6~1.4	—	—	—	—	—	0.3~1.3	—	—	—	<1.0
EFe Cr A ₁	3.0~5.0	4.0~8.0	—	—	—	26.0~32.0	—	—	—	—	—	—	1.0~2.5	—	—	—	<1.0
EFe Cr A ₂	3.0~5.0	<1.0	—	—	2.5~4.5	26.0~32.0	—	—	—	—	—	—	0.5~2.0	—	—	—	<1.0
ECo Cr-A	0.7~1.4	<2.0	残	3.0~6.0	<3.0	25.0~32.0	<1.0	<5.0	—	—	—	—	0.4~2.0	—	—	—	<0.5
ECo Cr-B	1.5~1.7	<2.0	—	7.0~9.5	<3.0	25.0~32.0	<1.0	<5.0	—	—	—	—	0.4~2.0	—	—	—	<0.5
ECo Cr-C	1.75~3.0	<2.0	—	11.0~14.0	<3.0	25.0~33.0	<1.0	<5.0	—	—	—	—	4.0~2.0	—	—	—	<0.5
ECu Zn-E	—	<0.30	—	—	—	—	—	<1.50	—	>56.0	<0.01	残	0.04~0.25	<0.05	2.0~3.0	—	<0.5
ECu Si	—	<1.5	—	—	—	—	—	<0.5	—	残	<0.01	<0.5	2.8~4.0	<0.02	<1.5	—	<0.5
ECu Al-A ₂	—	—	—	—	—	—	—	<1.5	—	—	9.0~11.0	<0.02	<0.10	<0.02	—	—	<0.5
ECu Al-B	—	—	—	—	—	—	—	3.0~4.25	—	—	11.0~12.0	<0.02	<0.10	<0.02	—	—	<0.5
ECu Al-C	—	—	—	—	—	—	—	3.0~5.0	—	—	12.0~13.0	<0.02	<0.04	<0.02	—	—	<0.5
ECu Al-D	—	—	—	—	—	—	—	3.0~5.0	—	—	13.0~14.0	<0.02	<0.04	<0.02	—	—	<0.5
ECu Al-E	—	—	—	—	—	—	—	3.0~5.0	—	—	14.0~15.0	<0.02	<0.04	<0.02	—	—	<0.5
ECu Sn-A	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	<0.01	—	—	<0.02	4.8~5.8	0.15~0.35	<0.5
ECu Sn-C	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	<0.01	—	—	<0.02	7.0~9.0	<0.35	<0.5
ECu Sn-E	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	<0.01	—	—	<0.02	5.0~7.0	0.30~0.50	<0.5
ENi Cr-A	0.30~0.60	—	<1.50	—	75.0~85.0	8.0~14.0	—	1.25~3.25	—	2.00~3.00B	—	—	1.25~3.25	—	—	—	<0.5
ENi Cr-B	0.40~0.80	—	<1.25	—	71.0~81.0	10.0~16.0	—	3.00~5.00	—	2.00~4.00B	—	—	3.00~5.00	—	—	—	<0.5
ENi Cr-C	0.50~1.00	—	<1.00	—	65.0~75.0	12.0~18.0	—	3.50~5.50	—	2.50~4.50B	—	—	3.50~5.50	—	—	—	<0.5

金元素を添加すれば、常温における未変態オーステナイトとマルテンサイトの混合組織であるセミオーステナイトを形成する。土砂に対する摩耗に対してはパーライト鋼系よりすぐれており、クロムカーバイト系あるいはタングステンカーバイト系に比べて安価なので、研摩耗あるいはエロージョンを受ける部位の肉盛りに広く用いられている。

(3) クロムカーバイト系

DFe 4C, EFeCr-A₁, EFeCr-A₂ が相当し溶着金属中にクロムカーバイトが針状あるいは微細な炭化物として析出したものである。5% C, 25% Cr その他の合金元素からなり、Fe-Cr 固溶体の地に六方柱状のクロムカーバイトを有する組織で、地は比較的靱性に富み、硬度は Rc 57~63 でタングステンカーバイト溶着金属よりも研摩耗および衝撃摩耗がすぐれている。高温硬度および耐酸化性が大で耐食性はステンレス鋼に匹敵する。

(4) タングステンカーバイド系

JIS および A.W.S. の規格表にはないが、タングステンカーバイド粒を軟鋼チューブにつめた形式のものと、心線は軟鋼を使用して被覆剤に添加したものとがある。いずれの方式のものでもタングステンカーバイド粒はアーク熱によっても完全に溶解されず、一部は溶着金属にそのまま移行する。一部のカーバイド粒は溶解してチューブあるいは心線の鉄と混合して、タングステン-鉄カーバイドとして地を形成する。

溶着金属はタングステン-鉄カーバイド地にカーバイド粒が象眼された状態となっているので、高応力研摩耗をうけると選択摩耗を許し、硬いタングステン粒が露出されて摩耗に抵抗し、高い耐摩性を与える。低い応力の場合あるいはエロージョンの場合などで硬い研摩剤が溶着金属の地を掘って、埋め込まれたタングステンカーバイド粒を掘り起こすような作用する時は、案外摩耗の早い場合もある。

(5) 高マンガン鋼系

DFeMn, -MnNi, -MnMo, あるいは EFe-Mn-A, -B などの高マンガン鋼系溶着金属は溶接のままで硬度は Hv 200~220 程度であるが、衝撃をうけると加工硬化して Hv

400~450に硬度が上昇する。表層はかなり硬度が高く内部は靱性を保持して破壊に強いので、衝撃をとまなう耐摩耗部位に使用される。

加工硬化層は破れ易くまた炭化物析出速度が速いので、肉盛の時には事前にこの硬化層を除去しておくことが必要である。溶接に当っては母材による稀釈によって成分の変化を防ぐために、低電流による断続溶接を行うか、18-8 Ni-Cr 鋼などの下盛りが有効である。

（6） マルテンサイト鉄系

Mn, Si などの脱炭素剤以外に、冷却中に生ずる組織成分を調整するために Cr, Ni, W, Mo, V などの元素を多量に含有する鉄および炭素から成る合金である。高合金であるから溶接棒の心線は一般に特殊鋳物として作られるが、心線に合金元素を添加せず被覆剤から入れる型式のものもある。

炭化物はマトリックスを形成し、未変態オーステナイトを含むマルテンサイト組織が点在し、高い硬度と大きな耐摩性を有している。炭化物の硬度は 1,200~1,400 Hv 程度で鉄と合金元素の複合炭化物の形で存在する。

組織と特性は溶接法と冷却速度によって変ってくる。普通用いられる還元焰を使用してガス溶接する場合は、溶着金属中にCを加える傾向があり、脆性を増し硬度は上昇する。アーク溶接では炭素を燃燃し靱性は増すが耐摩性は劣る溶着金属を作る。

この種の合金の特徴はマルテンサイト地に硬い炭化物を有することで、耐摩性が優れていて圧縮強度大で軽荷重のものゝ耐摩耗用として優れた性質を有し、摩耗量は軟鋼の1/10~1/30を示すに過ぎない。

（7） Co 合金

Co 40%前後、Cr 35%、W 25% 以下の Co-Cr-W 系合金が普通で、Cは0.55~2.6%で W, Cr と炭化物を作る。合金組織は共晶炭化物とコバルトの固溶体から成り、炭化物の量によって硬度は Hv 370~550 前後に変化する。この合金の特徴は高温硬度および耐蝕性に優れていて、赤熱硬さを有し耐摩性も損じないので高温工具の肉盛によく用いられる。表-6, 7にこの系の代表的な合

表-6 ステライトの溶着金属硬度

	ガス 溶 接	アーク 溶 接
ECoCr-A	420~450	420~450
-B	500~530	460~500
-C	620~650	520~560

表-7 ステライトの高温硬度

	70° F	800° F	1000° F	1800° F
ECoCr-A	350	330	290	240
-C	430	380	360	255

金であるステライトの溶着金属硬度と高温硬度を示す。

（8） Ni 合金

Ni 65~80%、Cr 20%以内のものが普通で、Ni-Cr の固溶体の地にクロム炭化物が入り、Co 合金よりも一般に硬度高く耐蝕性も大きい。この合金の特徴は溶解点が高く 1,040~1,110°C で、広く凝固域を有するので、熱影響による亀裂の発生が予想される鋳鉄などに適する。

高応力摩耗には適当でないが、エロージョンに対してはステライトより優っており、金属間摩耗に対してもステライトと同様良好な性能を有している。

3. 3 溶接施工法

普通の溶接で行なわれる準備と施工法は肉盛溶接においても同様に必要であるが、さらに留意しなければならないことがある。

（1） 母材の清掃と棒の乾燥

肉盛りする部材表面の異物や油脂は気孔の原因となるので除去するよう留意すること。肉盛溶接の場合は補修に用いられる場合が多いから、部材表面の清掃は特に注意が必要である。母材に欠陥のある場合にもじゅう分補修しておく必要がある。

溶接棒の乾燥についてもじゅう分留意する必要がある。殊に補修肉盛を現場で行なう場合は、棒の乾燥不じゅう分が欠陥や耐摩性の乏しい溶着金属を作ることがしばしば生じる。

（2） 溶着金属合金層におよぼす溶接条件の影響

肉盛溶接は高温による融解によって合金を作り同時に熱処理がなされる。この2つの作業が短時間に行なわれるので、溶接条件によって合金層の性質が大きな影響を受ける。その基本的な因子は母材による稀釈と溶着金属の冷却速度である。

母材による稀釈は溶接方法によって異なる。アーク溶接は入熱が集中的で急速であるから温度分布が急勾配となって亀裂を生じ易く、溶込みが大きいために稀釈され易い。

稀釈程度は一層が最も大きく層数が増加すれば小さくなって成分が安定して来る。ガス溶接の場合は温度が比較的低温で入熱速度も遅いから、温度勾配も緩やかで稀釈は少い。

冷却速度の影響は溶着金属の組成が熱処理に対して敏感であるか否かによって非常に違って来る。溶着金属が熱処理に敏感であれば、溶着金属が稀釈される程耐摩性は冷却速度を大きくすることによって増大する。一般に高合金の溶着金属は、溶接条件を厳重に規定しなくても比較的優れた耐摩性を有するが衝撃抗力は低く高価であり、低合金のものは安価であるけれども優れた耐摩性を得ようとすれば確実な溶接条件の規制が必要となって来

る。

(3) 予 熱

高炭素鋼の部品、あるいは大型のものや形状の複雑なものは予熱が必要である。予熱は普通 250°C 程度で行なうが、硬化性の大きなものや大型のものは 300°C 前後の予熱が必要である。ただし高マンガン鋼の予熱は 200°C を超えてはならない。

溶着合金によってビートにヘアクラックや横割れを生ずるものもあるが、これが大きな欠陥になることは少ない。このような場合割れ防止のための予熱は行なわない方がよい場合もある。

(4) 肉盛りの方法

全面肉盛法 ベタ盛りする方法で普通に広く行なわれる方法である。溶着金属の亀裂を防止し、または安価に肉盛り量を増すために低水素系軟鋼棒またはパーライト鋼系棒あるいはステンレス鋼棒で下盛りをする場合もある。溶着金属の亀裂の発生を緩和し剝離を少くするために、図-9 のようにしま状に 2 種類の溶着金属を交互に溶接することも有効である。

図-9 浚渫船のカッターのしま状溶接

図-10 ブルドーザーの刃先の肉盛溶接

格子およびすじ肉盛法 図-10 のように格子状、あるいはすじ状に肉盛りする方法である。この方法で肉盛りすると溶接入熱が低いので、母材の受ける熱影響も少く、溶着金属の亀裂も少い上に溶接棒の量も少くてすむ。また溶着金属でかこまれた空間に土砂が入って、土砂自体が耐摩耗の役目をなし、また切刃などでは母材のままの

ところは摩滅しても溶着金属部は残って鋭い刃となっていくまでも切味を保ってゆく。

ドット肉盛法 母材に対する熱影響をさらに少くし、稀釈を減らし、溶着金属の欠陥を少くする方法として、母材表面にイボを作って行くドット肉盛法がある。溶接棒の使用量も少く、優れた耐摩耗面が得られるが、溶接が不連続で手間がかかる。(図-10)

(5) ピーニング

普通の材料の場合は必要はないが、高マンガン鋼の場合には母材表層の加工硬化層を除去すると同時にピーニングを行なう必要がある。

(6) 徐 冷

予熱を必要とするような組成、形状のものは後熱あるいは徐冷を行なうことが望ましい。但し高マンガン鋼は溶接後の加熱をしてはならない。

3. 4 肉盛溶接の実例

(1) パーライト鋼系

溶接のままで機械加工可能なので溶接後の機械加工の必要な歯車、シャフト類に用いられ、また軟鋼よりも硬度が高く靱性もあり安価なので、クラッシャー類やトラク

図-11 歯車の肉盛り

図-12 トラクターの誘導輪の肉盛り

ターの走行装置などの低合金鋼の部品の下盛り用として使用される。(図-11, 12)

(2) マルテンサイト鋼系

パーライト鋼系よりも C および Cr 量が多く、溶接後空冷してもマルテンサイト組織を呈する。パーライト系よりも硬度が高く、研摩耗に対して優れた耐摩性を有している。靱性は大きくないから衝撃の大なる個所には適当でないが、土砂に対する摩耗には優れている。図-13

図-13 浚渫船のカッターの肉盛溶接

図-14 トラクターの上部転輪の肉盛溶接

図-18 ドラグラインバケットの肉盛溶接

図-15 クラッシャーハンマーの肉盛溶接

図-16 ショベル刃先の肉盛溶接

図-17 浚渫船のポンプケーシングの肉盛溶接

～18に見るように土砂岩石に対する摩耗部位に広く使用されている。

(3) 金属炭化物系

クロムカーバイド、タングステンカーバイドはいずれも高応力研摩耗ことに土砂岩石に対する研摩耗に非常に優れた耐摩耗性を有する。しかしかなり高価であり、炭化物を浮べているフェライトの地層が先に磨滅されて炭化物が剝離して摩耗が進行して、必ずしも優れた耐摩耗性を示さないことがある。鉱山機械や建設機械の錐や切刃、浚渫船のポンプやカッター（図-13参照）、クラッシャー、コンクリートミキサー、攪拌機など土砂との重摩耗部位に使用される。

(4) 高マンガン鋼系

衝撃に対する変形抵抗が大で靱性があるので重衝撃を受ける部位に使用されるが、研摩耗を同時にうけるもの、あるいは土岩に対する摩耗部位には、耐摩耗性は軟鋼よりやや優れている程度である。図19, 20, 21に見るように、クラッシャー類、シャベルバケットの切刃あるいは低速度のクローラー装置、浚渫船の切刃などに広く使用される。この溶着金属の表層に Hv 600～700 の硬さを持つマルテンサイト鋼系あるいはクロム鉄の薄い肉盛りをすることによって、表層の耐摩耗性を増すと同時に、下盛りのオーステナイト層が衝撃によって加工硬化するまでこの薄い表層が保護することによってさらに耐摩耗性を向上させることができる。（図-21）

図-19 ジョークラッシャの刃の高マンガン鋼肉盛溶接

図-20 ジョークラッシャの刃の肉盛溶接

図-21 ショベルの履板の肉盛溶接

(5) マルテンサイト鉄系

マルテンサイト鉄系は炭化物の析出によって高い硬さが得られるが、合金元素の含有量が比較的低いために冷却速度や稀釈の程度によって組織が変り易く、また施工が比較的困難である。Cr の含有量を30%程度とし、硬さをCr 炭化物によって得ようとしたのが前記のクロムカーバイト系である。この方は高価ではあるがマルテンサイト鉄系の長所はすべて備え、かつ施工も容易であり耐摩性も優れている。肉盛溶接にはマルテンサイト鉄系

図-22 耕耘機のスクリュウの肉盛溶接

から次第に高 Cr 系がより広範囲に使用されるようになる。(図-22)

(6) 非鉄金属系

ステライトおよびコルモロイがそれぞれ代表的なもので、前者は高温硬度と耐蝕性、後者は低溶融点の特性を生かして、たとえば図-23のような混焼炉の攪拌ブレード、バルブ、ポンプ、プラスチックナイフの肉盛りなどに用いられる。

図-23 混焼炉の攪拌ブレードの肉盛溶接

4. 土岩に対する金属の摩耗の実験

鉱山機械、建設機械などの土岩に対する摩耗は、金属表面を土砂が動いて行く程度の軽い応力の場合から、トラクターの走行部が土砂の中を走行し、また切刃が掘削して行く程度の中位の応力の場合、あるいは岩石をさく孔し掘削破砕するような衝撃をとまなう大きな応力を受けて摩耗する場合など荷重の範囲が非常に広い。また摩擦速度も広い範囲で変化し、その上2項で述べたように相手土岩の性状の変化も大きい。したがって実験もできるだけ実用範囲に近い荷重と速度の摩耗条件になるよう3つの段階に分けて行ない、実際に近い条件での実験になるように努め、また実地試験をあわせ行なって条件の相異による結果の誤解をなくするよう配慮した。

図-24 低応力摩耗の試験機

4. 1 実験要領

(1) 荷重の小さい場合（低応力摩耗）

実験装置 図-24に見るように主軸に装着した取付ブラケットの円周上にテストピースを取付けて回転し、テーブル上のポットの中に入れた相手土砂を掻き廻すようにした。このポットは中の砂が摩擦によって熱くなり土砂の含水率や性状が変化するのを防ぐために、二重壁にして冷却水を循環して温度を常に一定範囲に保つよう留意した。また摩擦によって砂砕される土砂の粉度を一定に保つために、底にスクリーンを作って二重底にして細分化した土砂をふるい、開口から常に定量の土砂を補給するようにした。

テストピースの形状 取付位置による影響あるいは砂の運動状態の変化による影響を少なくするため、テストピースは図-25の形状のものをを用いた。表面仕上げは JIS 規格によるグラインダー仕上げとした。

図-25 テストピースの形状

相手土砂 試験の条件を簡素にするために川砂を用いた。木津川砂を場所を限定して採集し、粒度 2.5~5.0 mm のもの（JIS 規格）を気乾状態にして用いた。テスト中に土砂が飛散することとテストピースの取付ブラケットとの干渉を避けるため、土砂はポットの上面から 20 mm のところまで入れて上蓋をし、またポットに振動を与えて砂の圧密を常に一定にするようにした。

実験方法 定量の砂を秤量してポットに入れ、アルコールで清掃したテストピースを取付け、実験時間は1時間→3時間→6時間→15時間と区切って行なった。各区切ごとにテストピースを取外してアルコールで清掃して化学天秤で秤り、ポットの砂はその都度交換した。

(2) 中程度の荷重の場合（中応力摩耗）

実験装置 図-26に示すようなハンマーミル型の試験機を使用した。投入口2吋×6吋、回転数 4,500 r.p.m、モーター馬力 3 PS で、ハンマーミルとしての破碎能力は約 3.7トン/時である。被碎物は投入口に取付けたホッパーに秤量コンペアーによって常に一定量が投入されるようにし、主軸の回転数はモーターに取付けたガバナによって一定回転となるよう留意した。

テストピースの形状 図-27の形状のものをを用い、表

図-26 ハンマーミル試験機

図-27 テストピースの形状と取付状態

面はグラインダー仕上げとした。形状の変化による条件の相異を避けるため、大きな摩耗変形をうける前に交換した。

被碎物 均一性と適当な接触応力の配慮から被碎物として潜弧自動溶接の溶接後のスラグを用いた。このスラグは溶接熱で溶かされて硬くて脆い 20 mm 内外の不規則な断片となっている。混入している細粉や不純物や鉄分はふるいを通して水流し、あるいはマグネットで除去して使用した。

予備実験—テストピースの取付位置の影響

まずテストピースの取付位置による影響を調べた。当然考えられることであるが、このハンマーミル型の試験機では中央附近のテストピースは両壁の影響を受けることが少く、両側は壁からのハネ返って来る被碎物に接触する機会が多く摩耗が大きいはずである。

同じ材質のテストピースを取付けて試験した結果の一例を図-28に示す。両側部に取付けたテストピースは大きな摩耗を受け、また取付位置のわずかな変化で摩耗量が相当違って来ているが、中央部のテストピースは位置

図-28 テストピースの取付位置による影響

の影響による摩耗量の変化は少く比較的安定した状態を示している。テストピースを中央部に取付ければ、位置による摩耗量の変動は非常に少いと見てよい。

実験方法 位置の影響の少ない中央部にアルコールで清掃したテストピースを取付け、ガバナで制御されたモーターで常に定回転になるようにして回転した。秤量コンベアーによって被砕物を一定の高さから一定時間に定量投入し、被砕量を 10 kg→20 kg→40 kg→80 kg と区分けてテストした。各区分ごとにテストピースを取外してアルコールで清掃して摩耗量を化学天秤で秤り、摩耗の状態は写真で記録した。

(3) 大きい荷重を受ける場合 (高応力摩耗)

実体装置 図-29に見るような重力による自由落下式の試験機によって実験した。1/4馬力モーターでカムを動かし、カムは110 mmの偏心によって主軸を持ち上げ重力により落下させて往復運動を与えた。主軸の先に取付ブラケットを介してテストピースを円周上に固定した。主軸の上下運動は21回/分とし、カムと主軸のカム受台

図-29 高応力摩耗試験機

の摩擦により1回の上下運動に対して約1/4回転する。ポットの中に相手土砂の被砕物を規定量入れ、主軸の中程にウェイトをおいて荷重を変えられるようにし、重力による自由落下の荷重をポットの土砂で摩擦吸収して摩耗が進行するようにした。相手土砂が破砕されて粒度が変わってくるので、スクリーンを張った二重底にして破砕されたものはふるい落とし新鮮な試料を供給するようにした。

テストピースの形状 (1)項の低応力摩耗の場合と同じものを使用した。

相手土砂 阪神地方の六甲山の風化花崗岩および発破により破砕された花崗岩を土岩質の均質のところで採集し、JIS 規格 10~15 mm にふるい分けして気乾状態にして用いた。実験の途中で破砕され細粉化されて粒度、性状が変わってくるのが当然考えられるので、スクリーンでふるい、まだ常に新鮮な試料を供給し、できるだけ条件を同じにするよう努めた。

実験方法 定量の土砂を秤量してポットに入れ、テストピースはアルコールで清掃して取付けた。長く実験を続けるとテストピースが摩耗して形状の変化から来る影響も入ってくるので、実験は短時間に区切って行ない。その都度摩耗量を化学天秤で秤量し、相手土砂を新しいものと交換した。前述したようにカムが主軸を持ち上げる時に、主軸の受金と摩擦して約1/4回転してテストピースが相手土砂に貫入する位置が常に変わるようにし、また相手土砂も振動によって圧密を常に一定にするようにした。

4. 2 荷重が小さい場合の摩耗 (低応力摩耗)

(1) 実験結果

図-30に実験結果の一例を示す。初期摩耗の間を除けば摩耗量は摩耗時間にほぼ比例しており、初期摩耗と定常摩耗はかなり明瞭に区別される。

図-30 摩耗時間と摩耗量

(2) 硬さと摩耗抵抗値

任意のテストピースの摩耗勾配 (摩耗量/摩耗時間) が標準のテストピースの摩耗勾配に対する比の逆数を取

図-31 硬度と摩耗抵抗値

て摩耗抵抗値として表わすと、試験条件の相異による結果のバラツキが非常に少なくなる。図-31に実験結果の代表的なものを示す。金属の硬さを表わすのに、反撓、押込、斑痕のうちいずれがこの種の摩耗に対する場合に適当かは問題であるが、図にはブリネル硬さを取って示した。

(3) 鋼の炭素含有量と摩耗

図-32に示すように炭素鋼においては、炭素量と焼入硬さとの間には密接な関連を示している。硬さと耐摩性

図-32 炭素含有量と硬度、摩耗抵抗値

は前項に示したようにこの種の摩耗においては明らかな関係を有しており、したがって炭素含有量と摩耗の間に関連を示して当然であろうし、実験結果はこのことを裏書きしている。

4. 3 中程度の荷重の場合の摩耗（中応力摩耗）

(1) 摩耗時間と摩耗量

図-33に代表的な実験結果の一例を示す。摩耗量は摩耗時間にほぼ比例しており、初期摩耗と定常摩耗の差異はわずかに認められる程度である。材料の硬さの高いもの程摩耗が少なく、また材料の組成が C, Ni, Cr などを添加して強度を上げると耐摩性が大きくなっている。

(2) 硬さと摩耗抵抗値

前項と同じように任意のテストピースの摩耗勾配が、標準のテストピースの摩耗勾配に対する逆比を取って摩耗抵抗値として示すと図-34のようになる。

図-33 摩耗時間（破砕量）と摩耗量

図-34 硬さと摩耗抵抗値

図-35 炭素含有量と硬度、摩耗抵抗値

(3) 鋼の炭素含有量と摩耗

鋼の炭素量と硬さの間には、図-35に見るような直線に近い関係を示し、摩耗との間にも明瞭な関連を示している。

4. 3 高応力摩耗の場合

(1) 摩耗時間と摩耗量

多くの実験結果の一例を図-36に示す。摩耗量は摩耗時間にほぼ正比例しており初期摩耗と定常摩耗の差異はほとんど認められない。材料の硬さが高い程摩耗は少な

図-36 摩耗時間と摩耗量

くなっているが、同じ硬さではC量を多くし、あるいはNiやCrを添加して材料の組成と強度を上げたものの方が摩耗が少なくなっているのは注目すべきである。高マンガン鋼は荷重が大きくなれば相対的に他の材料に比しかなり大きな摩耗抵抗を示し、荷重による加工硬化によって耐摩性を増していることがうかがえる。

(2) 硬さと摩耗抵抗値

図-37に結果の一例を示す。各材質別に個々の実験結果を取って見ると、僅かな条件の差異によって摩耗量に変動はあるが、標準のテストピースを取って相対的な数値を摩耗抵抗値として示せば、高応力摩耗の時もこの値は非常に狭い実験誤差の範囲内におさまって来る。

図-37 硬さと摩耗抵抗値

(3) 鋼の炭素含有量と摩耗

炭素含有量と硬さの間にはほぼ直線的な関連を示し、

耐摩性との間にも比例関係を示している。

(4) 焼戻し温度と摩耗抵抗値

S 20 C, S 45 C, SNC 21 の焼戻し温度を変えて硬さと摩耗抵抗値の変化を取って見ると表-8, 図-38のようになる。材質が同じであれば、ある温度範囲では焼戻し温度と硬さはほぼ直線的に変化し、摩耗抵抗値もほぼ比例して変化している。すなわち材質が同じであれば摩耗抵抗値は明らかに硬さに比例している。

図-38 焼戻し温度と硬さ、摩耗抵抗値

(5) 材料の熱処理、組織と摩耗

前項の表-8, 図-38に見るようにこの種の摩耗においては耐摩性は材質が同じであれば硬さに規制されて、熱処理の相異による材料組織の変化には余り影響されないと見られる。また高周波焼入れした鋼の金属接触時に見られるような焼入れの残留応力が耐摩性を大きく損ずるような現象はあまり顕著には表われて来ない。このことは従来の他の実験研究にも表われており、ざらつき摩耗あるいは土岩に対するこの種の摩耗の場合には、熱処理の相異による金属組織の変化、あるいは焼入れの残留応力が直接耐摩性に影響する程度は少なく、最も大きく影響するのは硬さであってこれに関連して材料強度も大きな影響を示している。

5. 実地試験

代表的な花崗岩質の阪神地方の六甲山麓の広大な敷地造成工事現場で、比較的長期に一樣な土岩質をパワーショベル、ブルドーザー、スクレーパーで掘削整地作業を行ない、それぞれの切刃部に各種の素材および肉盛溶着金属を使用して摩耗の実績を取った。

表-8 焼戻し温度と硬さ、摩耗抵抗値

材 質	焼 戻 し 温 度									
	0 °C		200 °C		300 °C		400 °C		500 °C	
	Hv	RA	Hv	RA	Hv	RA	Hv	RA	Hv	RA
S 20 C	655	6.51	556	4.58	512	3.68	406	3.22	258	2.03
S 45 C	582	4.91	508	3.67	444	3.02	352	2.38	228	1.68
SNC 22	670	7.76	604	5.84	551	4.82	401	3.40	292	2.34

5. 1 試験条件

(1) 土岩質

神戸市の裏山にあたる天神山の中腹でパワーショベルとブルドーザーのテストを行なった。土岩質は風化花崗石および発破による破碎花崗岩と石英粗面岩で、粒度分布は図-39の通りである。

図-39 神戸裏山の土岩の粒度分布図

スクレーパー切刃のテストは須磨の裏山の住宅敷地工事の現場で行なった。ここはかなり風化の進んだ花崗岩質で粒度分布は図-40である。

図-40 須磨裏山の土岩の粒度分布図

(2) 使用機械

パワーショベルは図-41の寸法のバケット容量 1½ cu. yd. 150馬力クラスの中型ショベル、ブルドーザーは20トンクラスのもの、スクレーパーは 12 cu. yd クラスのものを使用した。

(3) 作業内容

ショベルは風化花崗岩および発破による破碎花崗岩と石英粗面岩の堀削積込作業、ブルドーザーはその集土仕

図-41 P & H 655 A パワーショベル主要寸法

上げ作業に使用した。スクレーパーは敷地整地工事における粘土混り花崗岩砂質土の堀削、積込、運搬、捨土工事に使用した。

5. 2 供試刃先

(1) ショベルバケットの爪

図-42に供試爪の取付状況を示す。供試爪のバケットへの取付けは5本の爪のうち位置の影響を受けることの最も少ない二番目と四番目に取付けた。

図-42 供試爪の取付状況

(2) ブルドーザーおよびスクレーパーの刃先

ブルドーザーの排土板の刃先にさらに図-27のテストピースを取付けたものと、図-43の実際のエンドビットに溶接肉盛を施したものでテストした。位置による影響を避けるために両端部および中央部を除いて取付けた。

スクレーパーの場合もブルドーザーと同様にして取付け、位置による影響を出来るだけ少なくするよう留意した。

(3) 供試刃先の材質

表-9に示すように素材としては鍛造鋼 SF 50、低マンガン鉄鋼、高マンガン鉄鋼と鍛造鋼 SF 50 の上に種々の溶接肉盛を施したものをを用いた。

表-9 供 試 刃 先 の 材 質

	名 称	成 分 ・ 性 質	硬 度
1	高 マン ガン 鉄 鋼 SCMnH	Mn (11.6%) C (1.1%)	供試前 Hv 160~210
2	低 マン ガン 鉄 鋼 SCA2	Mn (1.27%) C (0.26%)	170
3	鍛 造 鋼 SF 34	引張強さ 34~42 kg/mm ²	Hv 150
4	ハードフェーシング HF 11	Mn (12.4%) 高マンガン C (0.98%) オーステナイト	Hv 192
5	ハードフェーシング HF 80	Cr (5.2%) マルテンサイト C (0.80%)	Hv 770

図-43 テストに用いたエンドビット

5.3 試験方法

摩耗に影響を与える諸要素の中で、相手土岩質の性状の相異は大きな影響を与える。また含水の影響も相当あるものと考えられる。テストに当っては土岩質の比較的变化の少ないところで、粘土混り砂質土のところと、風化されて掘削し易い土岩質のところと、発破によって破砕された比較的硬い岩のところに分けて成績を取り、含水率もできるだけ一定になるように努めた。

運転状況によって掘削の速度、接触圧力が変わって来て摩耗に変化を与えるので、施工の条件をできるだけ一定にし、運転状況も変えないように作業条件をできるだけ一定にするよう努めた。

摩耗量はあらかじめ定めた標線を基準にして、図-44に示す透明なセルロイド板に原型を書き込み、摩耗量はこのセルロイド板を当てて減量を三次元的に求めて計算で出した。計測はパワーショベルの場合は概ね稼動時間で10時間ごと、ブルドーザーとスクレーパーの場合はテストピースを取付けたものは10分ごとに、実際のエンドビットの場合は10時間ごとに計測した。

図-44 測定に用いたセルロイドスケール

5.4 試験結果

(1) ショベルの刃先の摩耗

試験結果の一例を図-45、図-46に示す。

図-45 実地試験結果 (その一)

図-46 実地試験結果 (その二)

この種の実際作業における摩耗では相手が風化花崗岩で軽掘削の場合にも、衝撃をとまなう重掘削の場合にも、摩耗勾配はそれぞれほぼ一定で初期摩耗と定常摩耗の差異は少ない。ことに重掘削の場合には初期摩耗の状態はほとんど認められない。重掘削の場合、稼動時間が長くなると摩耗が少なくなる傾向を示すのは、刃先断面の形状変化から接触面圧が少なくなるために起こるものと考えられる。

図-47 ブルドーザーの刃先の取付テストピースの摩耗 (軽作業)

図-48 ブルドーザーの刃先の取付けテストピースの摩耗（重作業）

図-49 スクレーパー刃先の取付けテストピースの摩耗

(2) ブルドーザーおよびスクレーパーの刃先の摩耗試験結果の一例を図-47, 48, 49に示す。

(3) 摩耗抵抗値

室内実験の場合、わずかな条件の相異によって個々のテストにおける摩耗量の変化はかなり大きい、標準のテストピースに対する摩耗勾配の逆比を取って摩耗抵抗値として表わせば変動が狭い範囲内に入ってくることを述べたが、実地試験の場合はことに条件の変化が大きく

表-10 実地試験における摩耗抵抗値

材 質	ショベル切刃の実験		ブルドーザー切刃の実験		スクレーパー切刃の実験
	軽 掘 削	重 掘 削	軽 作 業	重 作 業	
SCMnH	1.60	3.42	1.54	3.15	3.02
SCA 2	1.28	1.33	1.25	1.32	1.18
SF 34	1	1	1	1	1
HF 11	1.65	3.51	1.61	3.44	3.05
HF 80	5.35	4.55	5.20	4.40	4.24

結果の変動も相当大きい。しかし実地試験の場合も土岩質と作業条件を揃えて相対的摩耗抵抗値を取ればほぼ一定の値となる。この摩耗抵抗値の一例を各作業別に示せば表-10のようになる。

5.5 初期摩耗と定常摩耗

比較的荷重の小さい場合の摩耗においても、この種の摩耗の場合には初期摩耗の現象はほとんど表われて来ない。これは初期摩耗の原因と考えられる金属の表面仕上げの影響や変質層の生成の影響する時間は非常に短くて土岩の硬い粒子によるざらつきや引掻きによって機械的に大きく表面が削り取られて行くためと考えられる。

実際の作業には水や塩分あるいは泥水の中でその影響や腐蝕を受けながら摩耗される場合が多い。含水率によって土砂の性状が変わって来て個々の場合における摩耗量は変化するが、摩耗抵抗値として示すと長時間水中で作業するか特殊な溶液中で作業する場合の外は、含水率や雰囲気は通常の作業条件では摩耗にそれ程影響しないと考えられる。これらのものが摩耗に影響する以前に、はげしいざらつきと引掻きによって削り取られて行くものと考えられる。

5.6 硬さと摩耗

図-50に見るように実地試験においても硬さと摩耗は密接な関連を示している。すなわち硬さを上げればかなり急激に耐摩性の改善に貢献することが示されており、その傾向は室内実験の結果とよく一致している。実地試験結果は室内実験の場合の中程度の荷重の場合と大きな

図-50 硬さと摩耗

荷重の場合の中間の摩耗と同じような傾向を示している。すなわち実際の建設機械などの使用時には、室内実験における荷重の大きな場合の摩耗か、それより少し荷重の小さい場合の摩耗が起こっていると同じような現象を示している。これは実際の摩耗においては応力の低い場合の摩耗も高い応力の摩耗も同時に起きているはずであるが、応力の低い場合の摩耗は進行が緩慢で摩耗量も少なく、高い応力の擦り減らしによって急激に大きく摩耗させられるために、荷重の大きな場合の摩耗だけが生じているような現象を呈するものと考えられる。

図-50の硬さと摩耗の関係においても実地試験における耐摩性は硬さにほぼ比例し、この比例関係から外れるものは材質的な因子、すなわち材料の強度、靱性、組成

あるいは溶着金属の特性などによって修正すればほとんどこの比例関係に入ってくるであろうが、い得る。

5. 7 高 Mn 鋼溶着金属の実地試験

高 Mn 鋼は従来から大きな荷重や衝撃を受ける部位の摩耗には非常に効果があると考えられ実用されて来た。実際にも潤滑された部位の摩耗とか、研磨剤が存在せず衝撃をとまなう部位の摩耗に対しては大きな耐摩性を示している。しかし鉱山機械や建設機械のような土岩に対する摩耗の部位に使用される場合には摩耗はかなり大きく、摩耗の機構も変わって来ると考えられる。実際作業における高 Mn 鋼の耐摩性を検討するために、ショベルの爪とブルドーザーの切刃に 13%Mn を基準にして、Ni, Cr, Mo などを添加した溶着金属を肉盛溶接してテストした。

(1) 試験条件

場所は他の実地試験と同じく阪神地方六甲山系で、岩質は風化花崗岩および石英粗面岩の発破により破碎されたもの、使用機械はショベルは 0.6 M³ 容量 90 PS の小型ショベル、ブルドーザーは 25 トンクラスのものを使用

表-11 母 材 の 組 成

	材 質	C	Si	Mn	P	S
エンドビット	SCAZ	0.26	0.42	1.27	0.003	0.013
ディッパー	SCAZ	0.28	0.36	1.16	0.015	0.021

図-51 溶着金属の組織

表-12 溶着金属の硬さと組成

符号	ショア ー硬さ	化 学 成 分 (%)					
		C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
A	22	1.14	0.43	11.29	—	4.25	—
B	25	0.81	0.12	13.39	2.29	—	—
C	24	0.77	0.27	13.59	—	—	—
D	26	0.85	—	13.4	—	—	1.47
E	27	0.62	0.29	10.12	—	2.98	1.23

した。

供試切刃は表-11の組成の母材に JIS D 316 のステンレス棒で下盛りした上に、3 層以上肉盛りし as weld の状態で使用した。溶着金属の硬さと化学成分は表-12の通りである。(組織の一例を図-51に示す) 供試切刃は位置の影響の最も少ないところを選定して取付けた。

(2) 試験方法

相手土岩質の性状の相異、含水率、粒度などが切刃や爪の摩耗に影響し、また作業内容と運転状況によって摩耗面の受ける面圧、速度も変わって来て、摩耗に変化を与えることは当然考えられる。そこで試験はできるだけ土岩の性状の一定のところ、施工の条件を一様にし運転状況も変えないように留意して行なった。

稼動10時間ごとに、作業量と摩耗変形状態を前出の方法と同様に爪と切刃の形状に合わせて作ったセルロイド

表-13 ブルドーザーの刃先の摩耗量

棒 種	装着前重量(kg)	装着後重量(kg)	摩耗重量(kg)
A	18.55	16.87	1.68 (50 h)
B	18.85	17.35	1.50 (51.5 h)
C	18.70	16.42	2.28 (55 h)
D	18.55	16.41	2.14 (50 h)
E	18.80	17.420	1.38 (52 h)
母 材	18.45	16.30	2.15 (43 h)

図-52 刃 先 の 摩 耗 状 況

スケールにより計測した。また約50時間テスト後試片を取外して重量測定を行なった。

（3）試験結果

図-52にセルロイドスケールで計測した摩耗の過程の記録の一例を示す。また50時間稼働時の摩耗重量は表-13、図-53に示す通りである。

図-53 ショベルの爪の摩耗

（4）考 察

高 Mn 鋼がこの種の摩耗に対しては従来一般に考えられていた程有効ではないことが試験結果からうかがうことができる。表-13に示すように低 Mn 鋼に比較して摩耗量の減少は30%程度で、この試験のように比較的衝撃の大きな摩耗においても耐摩性はそれ程大きくない。

加工硬化による影響もこの種の摩耗にはほとんど表われて来ていない。これは土岩に対する研摩耗のような場合は土砂による引掻き力が大きいために薄い硬化層ができてすぐ取り去られて行くためと考えられる。このことは熱処理した高 Mn 鋼をそのまま使用した場合と、空気炉で冷間鍛造加工して硬度を Hv 450~480 に上げたものを使用して比較したが、結果が殆んど変らなかったことから推察できる。

オーステナイト組織の結晶粉の大きさ、したがって熱処理が耐摩性に与える影響については、微細な程摩耗に対して有効であることは考えられることである。鑄造のままの粗大組織のものは摩耗が大きく、熱処理あるいは

適当な表面硬化肉盛による溶着金属の組織の微細化したものはよりよい耐摩性を示している。

いずれの試験でも Ni, Mo を添加した溶着金属が最も耐摩性が良く、次いで Ca を添加したものがれた耐摩性を示している。

高 Mn 鋼溶着金属の実地試験についても、総合的に云うことは、耐摩性にはまず硬さが最も影響し、次いで Ni, Cr などの添加元素、材料の靱性などが影響していると考えられる。

参 考 文 献

- 既に1870~1880年代に二三の文献があり、以後多くの研究がなされている。最近でも金属凝着部の解明、接触機構の理論解析、表面粗さ、硬度あるいは弾性係数と摩耗の関係の究明などの新しい研究がなされている。日本では戦前の研究総まとめ的なものとして、朝倉、金属の摩耗丸善（1948）など多くの研究、実験の報告がある。
- W.A. Stuffer, Metal Progress, (1956-1), 106
" , Schweizfr Archir, (1958-8), 260
- たとえば、
谷藤、土木研究所報告、第87号の1、(昭29-1)
三橋、機械試験所々報 4-3 (昭24-12), 13
" , " 4-8 (昭25-3), 1
" , " 7-7 (昭26-7), 17
" , " 8-3 (昭28-7), 1
磯部、農機学会誌 13-3~4,
- たとえば、前出、朝倉、金属の摩耗
- 鈴木、金属材料（金属特論）、岩波、昭15
- 飯高、合金学新論、岩波、昭28, 223
- 西村、建設の機械化誌、34 (1952-12), 25
- R. Helm, Electric Contacts, (1946), 214
- J.F. Archard, J. Appl., Phys, 24 (1953), 981
- J.T. Butwell Jr., Wear, 1-2 (2957/58), 119
- 吉本、築添、機械学金論文集、23-135 (昭32-11), 880
- J.T. Burwell & C.P. Strang J., Apply. Phys., 231 (1952), 18
- 小坂、摩耗変質層の研究、万里閣、昭20
- S. Timoshenko, Theor of Elasticity, 339
- 飯高、学振小委員会報告
- 大越、機械学会論文集、9-35, 1
- M.M. Khrushchov, Proc. Conf. Lub. & Wear, (1957), 655
- K. Sporkert, Reibung & Verschleiss, (1939)
- 横田、機械材料（金属篇）、下巻、(昭30), 481
- T.L. Oberle, Jour. of Metals, (1951-6), 438
" , SAE. Trans., 6-3 (1952-7), 511
- A.S.M., Metals Hand book, (1948), 221
- H.S. Avery, Welding J., (1951), 144
- R.D. Haworth, Trans. A.S.M., 41 (1947), 819