摩耗解析と摩耗試験*

吉 田

亨**

Wear Analysis and Wear Test*

by Tohru Yoshida**

はじめに

毎年摩耗によって消耗する構造部材の総量は莫大なもので、あらゆる工業分野で摩耗対策が重大な課題となってきた。しかし摩耗現象はきわめて複雑で、かつ多くの要因によって左右されるから、従来これについての研究はとかく敬遠されがちであったことはいない。

近年欧米および我が国の学者の努力によって、ようやく物理現象としての摩擦、摩耗の本質が解明されはしたものの、これを工学的または技術的な立場から実際問題へ適用していく方法については未だ充分に理解されているとは言えない状態である。

今日溶接肉盛による表面硬化は主として寸法精度をそれほど重視しない土木機械などに用いられているので、金属と金属の間の摩耗よりは金属と土砂との間で起る摩耗に適用されることが多い。しかし肉盛溶接の将来の可能性を考えれば、その適用範囲はかならずしも土木機械だけに限られるものではないから、本講では摩耗全般について解析の方法と摩耗試験のやり方について説明する。

1. 摩擦、摩耗の一般的特性

物体の表面はどのように精密に加工しても完全な、理想的平面にはならない。表面には通常多数の小さな突起(Asperities)が存在する。たとえば雲母の劈開面は $20 \text{ \AA}$ 、平滑な石英の結晶面は $100 \text{ \AA}$ 程度の不規則性を有するし、金属の精密な加工面は $0.05 \sim 0.10 \mu$ 、通常の仕上面は $100 \sim 200 \mu$ の粗度を有する。

したがってこのような突起を有する2つの金属面、あるいは一つの金属の面に対して土砂あるいは砥粒のようなものが一定の力で押圧されると、その突起部において図1のような接触状態を生ずる。

図1-aでは見掛けの接触面積 A_a は物体の幾何学的形状によって規定される面であり、加わる荷重との間に

図-1 接触の機構

は何らの関係もない。

接触面積 A_c は突起部が荷重によって変形したため生じたものであり、その接触部分には噛合によって力が働き、相互の物体に影響を与える。

物理的な意味での真の接触面 A_r は A_c の面内において、突起に加わる荷重によって生じ、その個々の大きさは異なるが、面積の総和はほぼ荷重に正比例して大となる。

また、もし2面の一方の物体がたとえば、砥粒のようなものであるとすれば、 A_r はこの場合存在しない(b図)*

このような接触状態において押圧力を上げていくと、最初は弾性的に接触していた A_r の部分に塑性変形を生じ、さらに荷重を増すことによって突起全体が塑性的に変形し、塑性部分が增大し、真実接触面積 A_r が大となる。荷重を除去すると、弾性的に変形していた部分が回復し、先に形成された接触部は破壊される。摩擦の不連続の特徴は両面が滑ることによって、このような接触部が次々と形成され、破壊されていくことによるものである。またこのような接触点で高温が発生し、酸化その他の化学的材質変化が起り、さらに母体の表面および表面下の機械的性質が変化する。このような摩耗のプロセスにおける材質変化が摩耗のメカニズムを一層複雑にしている。

* これら2つの接触面のうち A_c 内の A_r の密度が摩擦や摩耗にもつとも大きな影響を与えているのが英国系の学者であり、Holm, Bowden, Taborらである。このような考え方を摩耗における凝着説という。一方ソビエト系の学者はむしろ A_c の接触を重視し、これが摩耗にもつとも大きな影響を与えている、これが噛合説である。

* 原稿受付 昭和46年7月26日

** 正 員 名古屋工業研究所 Member, Nagoya Municipal Industrial Research Institute

2. 各種の表面損傷とその分類

a) 微視的な切削

表面の突起や硬い異物（土砂、摩耗粉）の粒子が滑り面に十分な深さで侵入したときに起る。

b) 繰返し負荷による局部離脱

相手金属表面に押込まれた突起の運動によって図2のように前方に盛りを生ずる。このため金属表面は弾性的に変形するが、突起が移動すると元へ復元する。すなわちこのような負荷と除荷とが表面において繰返される。この負荷によって表面層は硬化し、歪の蓄積のために疲労を生じて表面が剝離する。このような機械的な仕事と表面における欠陥、ピンホールやスラグインクルージョン、結晶粒の不整などもこの疲労剝離に寄与する。

図一2 突起の運動による盛り

c) 凝着による損傷

摩擦は滑り合う部分に発生する凝着による結合力で打勝ためと、それにともなう材料の内部的变化のため生ずる。したがって結合力の強さと母体金属の強さによって摩擦抵抗は左右される。もし結合力が両方の母体金属より弱いとすれば、摩擦によって生ずる母体の内部の変形は表面ほど大であって、そのため摩耗面は平滑となる。そして破壊された接合部の金属は相手側へ転移する。これを外部的摩擦と言う。

しかし逆の場合、すなわち結合力が母体金属のいずれか一方の強さより大となると、応力勾配は逆になり、母体金属の内部（Subsurface）で破壊を生じ、そのため母体金属の内部の変形は前者にくらべて著しく大となり、表面は粗くなる。これを内部的摩擦と言う。

図3はアルミニウムの滑り摩擦において、面圧が高く

図一3 面圧と断面硬さの変化（アルミニウム）

なるほど加工硬化による硬さのピークが表面から内部に移ることを示す。

これらの表面損傷がどのような条件で起るかを突起を球状と見なして、模型実験で調べる²⁾。その結果は表1に示すように損傷の型は5つに分類され、凝着の強さ、母体金属の強さ、相対的侵入深さ h/R (R : 突起の半径, h : 侵入深さ) によって変る。

図4はこの5つの摩擦抵抗の型を図示したものである。

図一4 摩擦抵抗のいろいろ

3. 摩 耗 の 分 類

摩耗は摩擦による物体の好ましくない離脱と定義されるが、その離脱を生ずる原因は個々の突起の凝着力や相対的侵入によって異なり、また条件によってはプロセスの途中で損傷型式の変化が起る。全体の摩耗はこれらの個々の突起における損傷の総和であるから、そのプロセスを完全に把握することは事実上不可能である。

しかし我々は技術的な問題においては表1の5つの摩耗型式のうちの一つのみが支配的である典型的な摩耗型式の存在していることを知っている。

表一1 摩擦抵抗の分類と摩耗との関係

特 性	I	II	III	IV	V
変 形 の 特 徴	弾 性 変 形	塑 性 変 形	切 削	被 膜 の 破 壊	下 地 金 属 の 破 壊
摩 耗 に 至 る ま で の 回 数	$n=\infty$	$1 < n < \infty$	$n \rightarrow 1$	$n=\infty$	$n=1$
条 件	鋼 へ は $h/R < 0.01$ 非 鉄 へ は $h/R < 0.001$	潤 滑 状 態 $h/R < 0.3$ 無 潤 滑 状 態 $h/R < 0.1$		変 形 の 深 さ へ の 勾 配 $\frac{d\tau}{dh} > 0$	$\frac{dh}{d\tau} < 0$
相 当 す る 摩 耗 型 式	疲 勞 摩 耗	疲 勞 摩 耗	研 磨 摩 耗	凝 着 摩 耗 (外 部 的)	凝 着 摩 耗 (内 部 的)

このような考にもとづいて摩耗を分類すると次のようになる。

i) 疲労摩耗, ii) 研摩耗, iii) 凝着摩耗

さらに腐食をともなう摩耗, たとえば **Fretting Corrosion** や **Cavitation** のような特殊な摩耗型式がある。

4. 摩耗解析

摩耗に関する技術的な問題を解決するには、問題としている品物の実際の使用条件と、その条件において生ずる摩耗形態が上記のどの型式に属するものであるかを明にする必要がある。

機械構造物の破損原因を破損物や破損状況の調査によって明かにするのを破損解析といっている。これにならって実際の部品の摩耗型式を究明するのを摩耗解析と名付けることにする。

摩耗対策のため摩耗試験を行なう場合、実際の摩耗の状況を充分把握、理解せず、実際に起っている摩耗型式と違った摩耗形態を生ずるような試験機によって実験を行ない、材料の選択を行なっても、その結果は何の価値もない。

したがって摩耗問題を解決するには先ず現実の品物の摩耗解析から初めねばならぬ。その第一着手は摩耗面の観察である。

实例1 歯車の摩耗

歯車の歯のあたり面における摩耗が図5に示される。図(a)は8倍の倍率で摩耗面を観察したもので、歯の損傷範囲は元の研摩仕上と比較すれば容易に確認される。図(b)は200倍で観察したもので、これから凝着によって相手側の金属が転移していることが判る。さらに摩耗面に直角な断面を調べると、表面下がいちじるしく塑性変形を受けていることが判った。すなわちこの摩耗は表1のVの型式に相当するものである。

歯車のあたり面における損傷としては、いわゆる **Pitting**, **Spalling** などがあるが、これは表1のIまたはIIに属するものであって、繰返し負荷による疲労にもとづく剝離である。

図-5 歯車のあたり面における摩耗状況

Pitting は図6のような紡錘形の剝離で、接触面下、おいて最大剪断応力が最大となる深さに生ずる。

Spalling は残留応力による内部切欠きによって生ずると言われているが、摩耗面に表面と平行な部分の存することが **Pitting** と違う点である。(図7)

図-6 ピッチング

図-7 スポーリング

その他に研摩耗, すなわち表1のⅢの型の摩耗も起りうる。このように歯のあたり面における摩耗は複雑であるが、図5のように凝着によるものが主体をなすことが判れば、その試験はVの型の生ずるような条件で行なわれねばならない。

实例2 水車部品の摩耗と試験方法

水力発電所の水車部品は毒水による腐食, **Cavitation** 流水中の土砂による **Erosion** などによって表面損傷を生ずるといわれている。

図8は某発電所のガイドベンであるが、図から判るように、摩耗面はあたかも鋭利な刃物によって切削したような外観を呈している。また各ガイドベンの配列は図9のようになっている、(17)~(6)の間のガイドベンにおいてこのような摩耗を生じている。

図-8 ガイドベンの摩耗状況

図-9 ガイドペンの配列

これは明かに流水中の土砂、岩石によって表面が切削されたものであり、表1のⅢの研摩耗に属するものである。今ガイドペンの材質選定を行なうため Stauffer²⁾の試験を行なったとする。この場合摩耗面は平滑となり、必ずしもガイドペンの生ずる摩耗と合致するとは言えない。

Stauffer の試験は土砂を混入した水中で試験体を高速に回転運動させる方法であり、この場合試験体の回転につれて水流も高速に動くから、水流中の土砂の速度と試験体の速度との間に大きな差がない。すなわちこれは研摩耗ではあるが、接触部の応力は低いので Erosion に属する。(実例3参照)

Stauffer の試験はガイドペンの摩耗と合致するものでないので、次に土砂を混ぜた水流を試験体に吹きつける試験について考えてみる⁴⁾。この場合試験体は固定しているからガイドペンの実際の条件に近いと言える。(図10)

図-10 噴射式摩耗試験

しかしこの方法によるときは噴射角度が問題となる。図11(a)に見られるように噴射角度が低いときは鋭利な切削による摩耗痕を生ずるが、角度が90°に近くなると、むしろ硬度計による圧痕のような状態になる。(b)図)

ガイドペンの摩耗状況は図8に見られるように、あきらかに低角度で流水とともに侵入した土砂による摩耗痕と一致する。すなわち 15~30° ぐらいの低い角度での流水の噴射による試験方法がこの場合ガイドペンの摩耗試

(a) 30° (b) 90°

図-11 摩耗痕の形態

験としてもっとも適している。

実例3 建設機械の摩耗

表1のⅢの研摩耗 (Abrasion Wear) は Avery⁵⁾ によれば次の3つの型に分けられる。

- i) 切削摩耗 (Gouging Abrasion)
- ii) 高応力摩耗 (High Stress or Grinding Abrasion)
- iii) 低応力摩耗またはエロージョン (Low Stress Scratching Abrasion or Erosion)

建設機械や鉱山機械の摩耗は i) の切削摩耗によるものが多い。これらの機械では土岩によって金属の表面が切削される。ブルドーザの排土板やリッパークなどの摩耗は典型的な切削摩耗である。

大蝶⁶⁾はこの切削摩耗をその運動にともなう衝撃や応力の大きさによって、さらに高応力摩耗、中応力摩耗、低応力摩耗の3つにわけている*。

切削摩耗は衝撃をとまなうものと、ともなわぬものがあり、その衝撃の大小によって摩耗の状況が変ってくる。したがって対象とする部品の切削にともなう衝撃の程度を評価せねばならない。

たとえばブルドーザにおいてエンドビットは烈しい衝撃を受け、切刃は切削摩耗だけでなく、表面が小さな破片となって剥脱する。しかしカッティングエッジはエンドビットほど大きな衝撃を受けないので、たんに切削されるだけである。

一般に衝撃の多いものほど硬さを犠牲にしても、靱性の高い材料を用いねばならないが、衝撃をとまなわぬものでは高硬度の材料が好ましい。

したがって摩耗試験機においても、実際の応力や衝撃の状況と合致したものが設計し、使用されねばならぬ。衝撃をとまなわぬ単純な引き摩耗で、しかも応力の低いときは、土砂の中で試験片をゆるやかに動かし、減量を測定するという方式が行なわれるが、衝撃の大きいときは図12のような試験機が用いられる⁷⁾。

* 摩耗の術語は現在のところ充分整理されていないので、各工業分野でそれぞれ独自の術語が使われている。大蝶氏のいう高応力摩耗は Avery によって定義されたものとは異質のもので、むしろ i) の切削摩耗のうちに属するものである。

図-12 衝撃をともなう切削摩耗用試験機の例

ii) の高応力摩耗は2つの摩耗面の間で硬い研削材の粒子が砂砕される場合で、たとえばボールミルにおけるボールや器壁の摩耗である。この摩耗の特徴としては接触部の応力がきわめて高いので、研削材がプロセスの途中で微細化し、摩耗状況が変化することである。

iii) は容器中の水に浮遊する硬い粒子が容器の回転によって金属を引引き摩耗させる場合である。前述の Stauffer の試験はこれに相当するものである。金属のシュートの上を土砂を含んだ水が静かに流れるときの摩耗は典型的なものである。

5. 摩耗問題に対する技術的アプローチ

すでは述べたように摩耗はきわめて複雑なメカニズムを有しているので、これを一つの法則によって解析することはできない。したがって技術的な問題の処理に当たっては、まず摩耗の形態とその発生条件を注意深く観察し、その摩耗がいかなる種類のものであるかを明かにし(摩耗解析)、その条件に合致した摩耗試験を行ない、試験の結果を分析し、その内容を実際の摩耗状況と比較検討して、用いた摩耗試験が妥当なものであったかどうかを調べねばならない。その際統計学的手法を用いて、データを処理すれば一層合理的であろう。

摩耗試験に用いる材料ではその表面の性質が問題となる。金属材料の表面の物理化学的性質は材料の Bulk

の性質とは可成りの違いがある。したがって実験用の試料と実際の品物の間に表面の性質、加工状態などの一致がなくては正しい結果はえられない。

大抵の金属は摩擦状態では圧縮応力をうけている。したがって圧縮強さや硬さはある条件の下では耐摩耗性の一応の目安となる。しかし硬さとはときには過大評価され易ので注意せねばならぬ。たとえば研摩耗で衝撃のないときはほぼ硬さと耐摩耗性は比例するが、その他の場合には硬さは耐摩耗性をえるための必要な条件ではあっても充分な条件ではない。

6. 摩耗試験のあり方

摩耗現象は複雑で錯綜しているので、摩耗試験の結果と実地の値とは定性的にさえ一致しないことが多い。これは試験機の選び方の悪いことによる。元来すべての場合に普遍的に有効な摩耗試験機が存在するはずがない。摩耗試験機は対象とする品物の実際の使用条件をシミュレートするものでなくてはならない。すなわち使用条件における支配的要因を正しい割合で含むのであれば、その試験機による結果は実際の摩耗を再現し、有効となる。

摩耗試験のやり方として次の3つの方法がある。

- i) 小試験片での実験室的な試験
- ii) 実際の部品での実験室的な試験
- iii) 実際の使用条件での実地試験

古くは摩耗現象の複雑さから、iii) の実地試験のみが信用できる唯一の方法であるとされていた。しかし大抵の実地試験は試験のため使用条件、摩耗状況が変わざるをえないため、かえって再現性が失われ易い。そのうえ実際的には使用しうる実物試料の数にも制限がある。

したがって i) の実験室で行なわれる試験で、しかもその品物の摩耗条件を完全にシミュレートしたものであることが望ましい。さらに摩耗試験の結果が定量的にあらわされ、再現性を有すること、試料として用いられる材料の範囲の広いことも必要である。

引用文献

- 1) Bowden and Tabor, The Friction and Lubrication of Solids, Clarendon, Oxford, 1954
- 2) Kragelskii, Friction and Wear, Butterworths, London, 1965
- 3) W.A. Stauffer, Metal Progress, 69, 1950
- 4) 伊藤, 河内, 名古屋工業研究所報告 No. 15, 1956
- 5) Avery H.S., Amer. Soc. for Metals, Cleveland, 1954
- 6) 大塚, ハードフェシング, 日刊工業新聞社, 1969
- 7) 同 上