超音波振動砥石の衝撃特性*

坂 口 克 己** 隈 部 淳 一 郎***

Impact Properties of the Ultrasonic Vibrating Grinding Wheel

Katsumi SAKAGUCHI, Junichiro KUMABE

This paper describes some special impact properties of the grinding wheel which vibrates longitudinally in the frequency $f=28$ kHz and the amplitude $a=0-6 \mu\text{m}$. The vibration tensile stress σ_v is added to the nodal point of the vibrating wheel as the initial stress. The impact property of this vibrating wheel is examined by the Izod impact method. From the experiments the following conclusions are obtained.

(1) $\sqrt{E\rho}/\sigma_B$ (E : modulus of longitudinal elasticity, ρ : density, σ_B : tensile strength) of the wheel is larger than $\sqrt{E\rho}/\sigma_B$ of the metal so that the tensile stress ratio $\zeta=\sigma_v/\sigma_B=2\pi af\sqrt{E\rho}/\sigma_B$ (a : amplitude, f : frequency) becomes very small and varies the property of the wheel.

(2) The impact resistance force-time curve of the high grade wheel varies with the tensile stress ratio ζ , and corresponds to that of the lower grade wheel for $a=0$.

(3) The variation of the impact property caused by ζ is the common phenomena to all kinds of the wheel.

1. ま え が き

先に、砥石を 20 kHz 以上の高周波振動数で振動させ、その砥石表面をダイヤモンドドレッサでドレッシングして、そのときのドレッシング抵抗が振幅の増加とともに減少する事象を明らかにした¹⁾。

抵抗の減少は主として砥石内部に誘起される振動応力によるものと考察したが、振動に伴う摩擦の減少や砥粒衝撃方向の変化などの他の要因も考えられるので、本研究では、振動応力による砥石の機械的性質の変化の傾向を解明するために材料試験の考え方によって衝撃試験を行ってみた。その結果、砥石は、振動応力の増加とともにその衝撃抵抗、衝撃抵抗作用時間および衝撃エネルギーを減じて、より低い結合度の砥石のそれに相当して変化していくことを明らかにすることができた。

2. 振動砥石に生ずる振動応力と応力比

図 1(a) のように固有振動数 f (実験で

は $f=28$ kHz) をもつ磁わい振動子および振幅拡大用ホーン先端片振幅 a の端面に取付けた角形スティック砥石の先端から x の点 P での砥石長手方向変位 y は、両端自由状態の 1 次の 1/2 波長振動状態で振動子と同じ固有振動数で共振する形状砥石としたときには、

$$y = a \cos \frac{\omega}{c} x \sin \omega t \quad (\omega = 2\pi f, c: \text{音速})$$

ひずみ ϵ は

$$\epsilon = \left| \frac{dy}{dx} \right| = a \frac{\omega}{c} \sin \frac{\omega}{c} x \sin \omega t$$

図 1 砥石振動系および切欠き部断面の応力分布

* 原稿受付 昭和 49 年 6 月 5 日。昭和 46 年度 精機学会 秋季大会 学術講演会 (昭和 46 年 11 月 7 日) にて発表。

** 正 会 員 名古屋市工業研究所 (名古屋市熱田区六番町 3)

*** 正 会 員 宇都宮大学工学部 (宇都宮市石井町 2753)

したがって、振動応力 σ は砥石縦弾性係数を E とすると、

$$\sigma = E \cdot \varepsilon = E a \frac{\omega}{c} \sin \frac{\omega}{c} x \sin \omega t$$

最大振動応力 $\sigma_{\max}$ は中央の振動節 ($x=l/2$, $l=c/2f$) に生じ、

$$\sigma_{\max} = E a \frac{\omega}{c} \sin \omega t$$

しかるに、 $c = \sqrt{E/\rho}$ (ρ : 密度) であるから、

$$\begin{aligned} \sigma_{\max} &= E a \frac{2\pi f}{\sqrt{E/\rho}} \sin \omega t \\ &= \sqrt{E\rho} 2\pi a f \sin 2\pi f t \end{aligned}$$

すなわち、振動部においては、 $\sigma_s = \sqrt{E\rho} 2\pi a f$ の応力振幅をもつ引張応力と圧縮応力とが例えば $1/28\,000$ s というようなきわめて短い周期で砥石長手方向に繰返して発生している。この振動節に小さな切欠きを設けて、切欠き側砥石側面上端を図 1(b) のように衝撃力 F でもって衝撃すると、その F に応じて切欠き側表面では引張応力 σ_t 、裏面では圧縮応力 σ_c となるような応力分布が砥石内部に発生する。したがって、図 1(b) に示すように中心線 O-O' に対して左側半分に σ_t と振動応力 σ_s とが同じ方向に作用しているときには、 $\sigma_t + \sigma_s$ の重畳応力が作用するために $\sigma_s = 0$ で σ_t のみで破断させる衝撃力に比べてよりわずかな衝撃力で砥石は破断するものと考えられる。

$1/2$ 周期後には図 1(c) に示すように σ_s が逆方向に圧縮応力として作用するために、切欠きに作用する応力は $\sigma_t - \sigma_s$ となり、その本来の砥石の抵抗よりも強くなるものと考えられる。すなわち、振動応力の付加によって砥石の切欠き部付近の破断に対する抵抗はきわめて早い周期で強くなったり弱くなったりしている。

この σ_s と砥石の引張強さ σ_B の比を応力比 ζ と名付けると、

$$\zeta = \frac{\sigma_s}{\sigma_B} = \frac{\sqrt{E\rho} 2\pi a f}{\sigma_B}$$

上式で、 $2\pi a f$ は振動速度であり、 E , ρ , σ_B は砥石本来の機械的性質を示すものである。各砥石の共振長さを実測し、 $l = \sqrt{E\rho}/2\pi$ の関係式から E の値を逆算して、 $\sqrt{E\rho}/\sigma_B$ の値を各砥石について計算してみると表 1 に示すようになる。炭素鋼の値を参考値として示す。

砥石の振動半周期ごとに破断応力の 20~50% にも及ぶ内部応力が潜在することは、衝撃実験するときの振子

表 1 各砥石の $\sqrt{E\rho}/\sigma_B$ および ζ

砥石	比重 γ (g/cm ³)	E (kg/mm ²)	引張強さ σ_B (kg/mm ²)	$\sqrt{E\rho}/\sigma_B$ (10 ⁻⁴ s/mm)	ζ ($f=28$ kHz $a=4$ μ m)
ビトリファイド	2.1	4 600	2.2	4.5	0.32
レジノイド	2.4	1 970	0.9	7.7	0.54
ゴム	2.9	1 700	2.0	3.6	0.24
PVA	1.1	20	0.17	2.7	0.19
(参考)					
炭素鋼 (S 50 C)	7.9	21 000	72	0.6	0.04

図 2 実験方法

に作用する衝撃抵抗、衝撃抵抗作用時間および衝撃エネルギーに当然なんらかの変化が現れるものと考えられる。

3. 実験装置および実験方法

スティック砥石をホーン先端に固定するにあたってはいろいろの方法が考えられるが、本研究ではエポキシ樹脂系接着剤を接着面に塗布し、両者を加圧、加熱硬化させて接着する方法をとった。この方法によって最大振幅 $6\,\mu\text{m}$ に耐える図 1 のような縦振動砥石振動系を構成することができた。この砥石振動系を図 2(a) に示すようにホーンの振動節を利用して片持ちばりの状態で小形のシャルピ衝撃試験機 (振子重量 $1\,\text{kg}$) に取付け、アイゾット衝撃試験法に準じて振動砥石先端から約 $5\,\text{mm}$ の箇所を図 2(c) に示す振子で衝撃した。

衝撃抵抗波形は振子背面に取付けた固有振動数 $2\,\text{kHz}$ の半導体ひずみゲージによるピックアップで検出することにした。

衝撃直後の瞬間の振子およびピックアップの振動姿態を直線運動と見なして図 3(a) のような減衰のない最も単純な振動系でモデル化し、この振動系に図 3(b) の細線に示すような衝撃力 F 、衝撃時間 Δt のパルス状衝撃波形 $F(t)$ が作用するものとして考える。振子の等価質量

図3 振子の振動モデルおよび衝撃の波形

を M 、ピックアップの等価質量を m 、等価ばね定数を k とし、衝撃方向変位を X および x で表すと、振動方程式は次のように表される。

$$\left. \begin{aligned} M\ddot{X} + k(X-x) &= F(t) \\ m\ddot{x} + k(x-X) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここに、 $0 \leq t \leq \Delta t$ では $F(t) = F$ 、 $t > \Delta t$ では $F = 0$ 。式(1)を相対変位 $X-x$ に関する二つの方程式にまとめて、初期条件を $(X-x)_{t=0} = (\dot{X}-\dot{x})_{t=0} = 0$ とし解くと、

$$X-x = \frac{F}{k} \frac{m}{M+m} \omega_n \Delta t \sin \omega_n \left(t - \frac{1}{2} \Delta t \right)$$

$$\omega_n = \sqrt{\left(1 + \frac{m}{M} \right) \frac{k}{m}}$$

ここで、 $M \gg m$ であるので近似的に、

$$X-x = \frac{F}{k} \frac{m}{M} \omega_n \Delta t \sin \omega_n \left(t - \frac{1}{2} \Delta t \right)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

一方、校正実験では $\omega \ll \omega_n$ なる低い振動数の外力 $F(t) = F \sin \omega t$ を作用させ、そのときの相対変位 $X-x \approx \frac{F}{k} \frac{m}{M} \sin \omega t$ を検出して電氣的に増幅し、ブラウン管オシロスコープ上に描かせ、縦軸 $P(t) = \eta \cdot (X-x)$ の目盛が本来の外力 $F(t) = F \sin \omega t$ と一致するように増幅率 η を調節する。したがって、 $\eta = M \cdot k / m$ である。

このような増幅率をもつ測定回路で測定すると $P(t)$ は

$$P(t) = F \omega_n \Delta t \sin \omega_n \left(t - \frac{1}{2} \Delta t \right) \quad (2)$$

を示すことになる。したがって、本来のパルス状の衝撃波形を実際に測定すると、図3(b)の太線のような波形となる。すなわち、 $t = \Delta t$ で衝撃が終了しても $P(t)$ は引続き上昇して $\omega_n \cdot \left(t - \frac{1}{2} \Delta t \right) = \frac{\pi}{2}$ のときに最大の点A点に達し、A点以降は系の固有振動数 ω_n で自由振動す

る波形となる。

切削の実験において、パルス列状に変化する外力をその測定系の動特性でもって押しならし、その平均値をもって切削抵抗と称した³⁾ことに準じて、本研究のような1回限りの衝撃の測定においても、便宜的ではあるが、この $P(t)$ 波形を衝撃抵抗波形と呼ぶことにする。波形の最大値を衝撃抵抗 P 、衝撃した瞬間から最大値に達するまでの時間を衝撃抵抗作用時間 t_m と名付けることにする。 P および t_m は式(2)より

$$P = F \omega_n \Delta t \quad (3)$$

$$t_m = \frac{\pi}{2\omega_n} + \frac{1}{2} \Delta t \quad (4)$$

式(3)、(4)において ω_n が大きければ波形から式(4)に従って Δt を算出し、式(3)から F を求めて実際の衝撃力を知ることができるが、 ω_n が小さければ P も小さくなるし、式(4)に示すように $\pi/2\omega_n$ が Δt に比べて大きくなり Δt の変化が顕著に影響せず波形の上での差異がつけ難いことになる。

そこで、振子側波形の P および t_m によって結合度の変化が判別できるかどうかを確かめるために、図2(a)の実験に先立って図2(b)に示すように砥石単体を両端支持し、砥石支持台側に P および t_m の微細変化をとらえると考えられる固有振動数の高い $f_n = 10 \text{ kHz}$ のピックアップを設け、 $\sigma_e = 0$ の状態で衝撃実験して、各砥石結合度の両測定系の波形を比較して上記の点を明確にしたのちに、振動砥石に対する実験をアイゾット試験法で行うようにした。

衝撃波形の変化現象を衝撃値で確認する意味で、衝撃エネルギーも同時に測定しておくことにした。 E は慣例に従って振子の回転角から $(h_0 - h)$ を算出して求めた。

実験に使用した砥石は次の各種である。

シャルピ式実験

WA-1000 (RH 85, 65, 40) $\cdot \text{m} \cdot \text{V}$, 外形 $10 \times 10 \times 100$ (厚さ $\times$ 幅 $\times$ 長さ, mm), 切欠き 10×8 (幅 $\times$ 深さ, mm)

アイゾット式実験

WA-1000 (RH 85, 65, 40) $\cdot \text{m} \cdot \text{V}$, 外形 $10 \times 10 \times 84$, 切欠き 10×2

A-180 (N, K) $\cdot \text{m} \cdot \text{V}$,

外形 $10 \times 10 \times 95$, 切欠き 10×2

A-24 (P, L) $\cdot \text{m} \cdot \text{B}$,

外形 $10 \times 10 \times 102$, 切欠き 10×2

A-36 R $\cdot \text{m} \cdot \text{R}$,

外形 $2 \times 10 \times 86$, 切欠き 10×1

4. 実験結果および考察

4.1 各結合度砥石の衝撃抵抗, 衝撃抵抗作用時間および衝撃エネルギーの差異

結合度 RH 85, 65, 40 のビトリファイド砥石について図 2(b) のようにしてシャルピ式実験を行って得られた支持台側および振子側に作用する衝撃波形は図 4(a), (b) のようになった。両図は各結合度の波形を重ね合わせて図示したものである。

支持台側に作用する衝撃力波形を示す図 (a) の波形から明らかに t_m は各結合度で変化していることがわかる。この図 (a) の波形を比較して結合度によってその衝撃抵抗, 衝撃抵抗作用時間が変化することが明確である。

図 (b) の振子側の波形の場合には, 図 (a) のような顕著な差異で区別するまでにならないが, 同一条件のもとに行った多くの波形をならべて比較することによって測定値に多少のばらつきはあるが, この P および t_m によって結合度の区別をすることができる。

図 5 にこのシャルピ式実験を行ったときの衝撃抵抗, 衝撃抵抗作用時間および衝撃エネルギーと結合度との関係をまとめて示す。この図から各値とも砥石結合度が高くなるに従って高くなっていく傾向にあることがわかる。

4.2 振動砥石の衝撃抵抗, 衝撃抵抗作用時間および衝撃エネルギー

図 2(a) のようにして結合度 RH 85 のビトリファイド砥石を振幅 $a=0$ と $6\mu\text{m}$ でアイゾット式の衝撃試験をした波形と RH 40 の砥石を振幅 $a=0$ で衝撃試験した波形とを図 6 に示す。

細線は RH 85 の $a=0$ のときの波形で, 太線は $a=6\mu\text{m}$ で振動させたときの衝撃波形である。点線は RH 40 の振幅 $a=0$, $\sigma_v=0$ のときの波形である。点線波形と太

図 4 各結合度の砥石の衝撃抵抗波形

図 5 各衝撃抵抗, 各衝撃抵抗作用時間および衝撃エネルギーと砥石結合度との関係

図 6 アイゾット式実験による振動砥石の衝撃抵抗波形の変化

線波形とが一致していることから, RH 85 の砥石が振動応力の付加によって RH 40 と同じ機械的性質になったものと考えられる。

この RH 85 の砥石振幅 a を変化させて求めた衝撃抵抗 P , 衝撃抵抗作用時間 t_m , 衝撃エネルギー E を図 7 に示す。図の各点は数回の実験の平均値である。振幅の増加とともに P , t_m , E ともに直線的に減少する傾向を示し, RH 85 の砥石に付加する振動応力の加減によって RH

図7 振動ホーニング砥石の衝撃特性

図8 振動ビトリファイド砥石の衝撃特性

図9 振動レジノイド砥石の衝撃特性

65, RH 40 に相当する砥石となっていくことがわかる。

この図7はホーニング砥石についての結果であるが、研削用ビトリファイド砥石も図8のように図7と同じ傾向を示す。N結合度砥石の振幅を増加すると、 P , t_m , E はともに直線的関係をもって減少する傾向を示す。そして、 $a=5\mu\text{m}$ でK結合度の $a=0$ の場合と一致するようになる。

図7, 8は振幅を増加すると応力比 ζ は図のような値になり、このようなオーダをもつ ζ のときに結合度が変化していくことをも示している。

振幅の変化による ζ によって表される結合度のこの変質現象をレジノイド砥石で確かめてみる。P結合度のレジノイド砥石を振幅をかえて $\zeta=0\sim0.5$ まで変化させて実験した結果、図9に示すように衝撃抵抗作用時間および衝撃エネルギーともに直線的比例関係をもって変化し、 $\zeta=0.5$ のときに $\zeta=0$ のときのL結合度砥石に一致してくる。

ゴム砥石についても実験しようとしたが、比較するための高低2種類の結合度のゴム砥石が入手できず、実験結果に基づく結論をいえないが、R結合度ゴム砥石を $\zeta=0\sim0.15$ まで変化させたときの衝撃抵抗、衝撃抵抗作用時間および衝撃エネルギーが今までに行った上記の砥石と同じように ζ と直線的比例関係をもって減少する事象を確認したことから類推して、このゴム砥石の場合もある ζ のところで他の結合度の砥石に相当しているもの

と考えられる。

以上の研究によって、砥石の衝撃抵抗波形の変化は応力比 ζ と比例関係にあり、 ζ が0.3~0.5程度になると衝撃の各値は他の砥石のそれらと対比できる程度にまで変化することがわかった。したがって、実験した砥石以外の砥石の振動応力の影響の有無は衝撃実験を行わなくても、この ζ の大小で判断できることになる。

例えば、PVA砥石は、表1では $a=4\mu\text{m}$ の抵抗のとき $\zeta=0.16$ となって、衝撃抵抗が変化すると考えられるが、 $a=8\sim12\mu\text{m}$ とすれば、 $\zeta\approx0.3\sim0.5$ となり、より確実に低い結合度のPVA砥石に変化するものと考えられる。

また、この応力比 ζ の考え方によって金属に振動応力を付加させたときは、例えば、表1の炭素鋼の ζ は $a=4\mu\text{m}$ のとき $\zeta=0.04$ と小さい。この ζ は衝撃波形が変化した ζ の数分の1あるいは数十分の1であるから、炭素鋼の性質はこの程度の振幅では全然変化しないことは当然のことと考察できる。炭素鋼のような金属材料に対しては振幅を大きくして $a=50\mu\text{m}$ 程度とすれば $\zeta=0.5$ 程度となるから、このような大振幅にまではじめて機械的性質に変化を及ぼすことが考えられる。

この研究によって、先にドレッシング法で振動砥石表面付近の砥粒あるいは結合剤のみを小刻みに切削して求めた抵抗の変化から明らかにした振動砥石の相当結合度特性と同じように、一般に用いられている材料試験方法

の一つである衝撃試験による1回の衝撃で砥粒あるいは結合剤群の集団を破断する際の平均的巨視的衝撃抵抗などの数値が振動応力の付加によって変化していくことを明らかにした。この衝撃試験に比べるとドレッシング実験法はきわめて微視的現象であるが、本研究の成果から考えて振動砥石の相当結合度特性も振動応力による要因がきわめて大きいと結論してよいと考える。

5. む す び

本研究で得られた結果をまとめると次のようになる。

- (1) 砥石の結合度が高くなると、衝撃抵抗、衝撃抵抗作用時間および衝撃エネルギーが増加する。砥石の結合度は衝撃抵抗をもって特に明確に識別できる。
- (2) 砥石の $\sqrt{E\rho}/\sigma_B$ は金属のそれに比べてはるかに大きい。このように大きな $\sqrt{E\rho}/\sigma_B$ をもっている

砥石が振動すると、その振動応力は引張強さと比べて無視できない値となる。そして、砥石の衝撃抵抗、衝撃抵抗作用時間および衝撃エネルギーに変化を与える。

- (3) ある結合度の砥石への振動応力 σ_a の付加によって、その衝撃抵抗波形はより低い結合度の $\sigma_a=0$ の波形と一致する。

実験に用いた砥石の一部は日本陶器株式会社に提供していただいた。感謝の意を表してむすびとする。

参 考 文 献

- 1) 隈部淳一郎, 坂口克己: 振動砥石の相当結合度特性, 精密機械, 37, 9 (1971) 629.
- 2) 隈部淳一郎, 益子正己: 超音波振動切削に関する研究 (第1報), 日本機械学会論文集, 24, 138 (1958) 109.

情 報

昭和49年の産業ロボット生産100億円突破

産業ロボットの49年の生産額は110億円に達し、初めて100億円のラインを突破したことが明らかになった。

これは日本産業用ロボット工業会の調査によるもので、前年比17%の増加率である。この生産額は同工業会加盟40社の生産実績に加えて、アウトサイダを自社設備として内装された産業ロボットを一定の算式に基づいてはじき出したものである。

同工業会加盟40社の生産実績は66億1200万円で、前年比13%増である。生産額では前年を上回るものの、台数では前年をわずかに下回っており、ロボットも販売価格の上昇があったことを示している。

最も生産の多かった機種は固定または可変シーケンスロボット(同工業会分類ではB)で1212台、次いで記憶再生式・繰返しロボット(同C)が132台となっている。分類Cのロボットは高級ロボットに属するもので、主力メーカーが普及に全力をあげているものである。しかし、49年は総需要抑制と自動車、家電の設備投資停滞でふるわず、実績では前年を50台下回った。

同工業会のロボット長期需要予測によると、52年には

1000億円産業に入るとしており、知識集約型産業の成長製品とみられている。

同工業会では100億円を越えたことで足場を築いたことになり、50年には5~6月以降に多くの需要が見込めるため、今後1000億円に向かって生産カーブが描かれていくものとみられている。

(服部 敏夫)