繰返し応力下における砥石の減耗特性 (第1報)*

— 応力振幅係数と臨界圧力 —

東 江 真 一** 海 野 邦 昭** 篠 崎 襄**

Wear Characteristics of Grinding Stone under Alternating Stress (1st Report)
—Coefficient of Stress Amplitude and Critical Pressure—Shinichi TOOE, Kuniaki UMINO
and Noboru SHINOZAKI

The critical pressure which corresponds to the breaking stress of the grinding stone has been suggested to have a specific value for the composition of grinding stone (kinds of abrasive grain and bond, percentage of grain, bond and pore, and grain size). However the critical pressure on a superfinishing stone may be decreased for the grinding conditions, because the alternating stress would generate in the cutting edges which is vibrated.

1. 緒 言

研削過程において、砥石に作用している圧力を大きくしていくと、ある圧力で砥石の減耗量が急激に増大し、砥粒を保持している結合橋で破壊が進行するか、あるいは砥粒に大破砕が生じたりするようになる。その時の圧力は、通常、臨界圧力と呼ばれている。本来、砥石の破壊応力に対応する臨界圧力は、砥石の組成によって定まる固有値であり、砥石を構成している砥粒の種類、粒度、砥粒率、結合剤の種類および結合度からなる5因子によって一義的に定まると考えられる。しかしながら、超仕上やホーニング等のように、砥石が往復運動しているような場合には、砥粒は繰返し応力下であり、その繰返し応力の大きさによって砥石の臨界圧力が変化するということが予測される。そこで本報では、繰返し応力下にある砥石の減耗特性を超仕上を例にとって吟味した。以下その結果について述べることにする。

2. 超仕上砥石の臨界圧力の意義とその問題点

超仕上は、比較的低い圧力で砥石を加工物表面に押し付け、また加工物に回転運動等をさせるとともに、砥石を振動させることによって加工物の鏡面仕上を行うもの

である。砥石の振動は、図1に示すように、超仕上装置の偏心ピンの回転によって得られ、そして加工物の回転運動とによって加工物表面における砥粒の描く切削軌跡は正弦曲線となる。この時、図に示すように加工物の運動方向と砥粒の運動方向とのなす角は傾斜角 θ と呼ばれ、その最大値は最大傾斜角 Θ と呼ばれている。

Key words: critical pressure, alternating stress, grinding stone wear, superfinishing stone, maximum inclination angle.

である。砥石の振動は、図1に示すように、超仕上装置の偏心ピンの回転によって得られ、そして加工物の回転運動とによって加工物表面における砥粒の描く切削軌跡は正弦曲線となる。この時、図に示すように加工物の運動方向と砥粒の運動方向とのなす角は傾斜角 θ と呼ばれ、その最大値は最大傾斜角 Θ と呼ばれている。

特に超仕上の場合には、砥石の作動面が目つぶれと目づまり状態にあるのか、あるいは目こぼれ状態にあるのかといった作動面性状の推定を行うことが、加工条件を

Fig.1 Eccentric motion on superfinishing equipment, cutting locus of abrasive grain and tangential stress σ_t ; σ_{tx} ; σ_{ty} ; y component of σ_t , θ ; Inclination angle, Θ ; Maximum inclination angle

* 原稿受付 昭和56年12月28日。昭和56年度精機学会秋季大会学術講演会（昭和56年11月3日）にて発表。

** 正会員 職業訓練大学校（相模原市相原1960）

Fig. 2 Stone wear and surface roughness of workpiece on superfinishing

決定する上で重要となる。そのためには、加工物速度、砥石振動数および振幅、あるいは最大傾斜角といった加工条件と関連させて、臨界圧力を定量的に表現することが必要となる。

例えば、図2に示すように、臨界圧力(0.05 MPa)以下の砥石押付圧力では、砥石の減耗量から判断して砥石の作動面は目つぶれ、あるいは目づまり状態にあるといえ、また押付圧力が臨界圧力を超える場合には、平均砥粒径に比較して砥石の減耗量が非常に増大していることから判断して、砥石の作動面は目こぼれ状態にあるといえる。そして臨界圧力以下の押付圧力では、加工物表面は切れ刃の上すべり現象によって鏡面状態になり、また臨界圧力を超えた押付圧力では、目こぼれに伴って新しい切れ刃が絶えず発生し、切削作用もわずかに行われるため、加工物表面は白い粗面となる。すなわち粗加工の場合には、臨界圧力を超えた砥石圧力を選択し、また仕上げ加工の場合には、臨界圧力以下の砥石圧力を用いるといった具合に、加工条件を決定するうえで、砥石の臨界圧力をあらかじめ予測しておくことが必要となる。

さて、一般の研削砥石と同様に超仕上げ砥石の品質は、これを構成する5因子により決定されているが、前者と異なり、超仕上げ砥石の臨界圧力は単に5因子に依存するのみならず、図1で示した最大傾斜角や加工物硬度などの加工条件によって変化することが知られている¹⁾²⁾。ここでとりわけ問題となるのは、最大傾斜角などの力学的に意味を持たないと考えられる因子がなぜ臨界圧力に影響するのかという点であり、加工条件と関連させてこれを解明することが超仕上げ砥石の臨界圧力を定量的に表現する決め手になると考えられる。この点に関しては、松井や浅枝などにより砥粒の脱落条件、すなわち砥粒に作用する研削抵抗と砥粒を保持する結合橋の強さに関連させて臨界圧力を表現しようとする試み¹⁾³⁾⁴⁾が行われ

Fig. 3 Effects of machining conditions on critical pressure

ているが、いまだ明確な説明がなされるには至っていない。したがって超仕上げを合理的に行うには、まず加工条件の変化に伴う臨界圧力の変化を力学的見地から考察し、定量的に示すことが重要であるといえる。

3. 繰返し応力下でない場合の砥粒の脱落条件

ここで砥粒が脱落するときに砥石に作用する臨界外力を f_c とする。また臨界外力の法線成分を f_{nc} 、その接線成分を f_{tc} 、そしてそれらの分力比を $k (=f_{tc}/f_{nc})$ とすれば

$$f_c = \sqrt{f_{nc}^2 + f_{tc}^2} = f_{nc} / \sqrt{1 + k^2} \quad (1)$$

となる。同様に臨界外力 f_c を砥石の単位断面積当たりの破壊応力 σ_c で示せば

$$\sigma_c = \sqrt{\sigma_{nc}^2 + \sigma_{tc}^2} = \sigma_{nc} / \sqrt{1 + k^2} \quad (2)$$

となる。ただし、 σ_{nc} は臨界圧力の法線成分、 σ_{tc} は臨界圧力の接線成分。砥石の臨界圧力は第一近似として結合橋の破壊応力に対応すると考えられるので、いま仮に式(2)の分力比 k が一定であると仮定すれば、結合橋に生じる応力がある一定値、すなわち砥石の押付圧力が臨界圧力を超えると加工条件によらず砥粒は脱落することになる。いいかえれば、臨界圧力は砥石の種類のみ依存することになる。

ところが図3に示すように、超仕上げにおける砥石の臨界圧力の値は最大傾斜角 θ によって変化し、例えばこの図の場合には、最大傾斜角が 40° のときに臨界圧力は約 0.03 MPa であり、その4倍すなわち約 0.12 MPa が 10° のときに対応していることが認められる。したがって、加工条件の変化に伴う臨界圧力の違いを式(2)のみで説明することは困難である。

4. 研削抵抗と応力振幅

図1で示したように、超仕上げ中の砥粒の運動方向は絶えず変化するので、研削抵抗の接線成分 σ_{tc} は、図の x 方向と y 方向の成分に更に分解することができる。そこでこの x 方向と y 方向の成分をそれぞれ σ_{tx} および σ_{ty} と

Fig. 4 Variations of tangential stresses σ_{tx} and σ_{ty} on abrasive grain

すれば

$$\sigma_t = \sqrt{\sigma_{tx}^2 + \sigma_{ty}^2} \quad (3)$$

となる。また図における σ_t と y 軸とのなす角度, すなわち傾斜角 θ を使って表現すれば, x 方向の成分 σ_{tx} と y 方向の成分 σ_{ty} はそれぞれ

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{tx} &= \sigma_t \sin \theta \\ \sigma_{ty} &= \sigma_t \cos \theta \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

となる。ここで, 傾斜角 θ は $-\theta \leq \theta \leq \theta$ の範囲で, $0 \rightarrow \theta \rightarrow 0 \rightarrow -\theta \rightarrow 0$ のように周期的に変化し, その最大値 θ は加工物速度 v , 砥石の振動数 n および振幅 a によって定まる。また, これらの加工条件によって理論的には, $0 \leq \theta \leq 90^\circ$ の値を取りうる。

ここで図1に示した砥粒の x 方向と y 方向との位置を時間 t で表すと

$$\left. \begin{aligned} y &= vt \\ x &= a \sin 2\pi nt \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

となるので, 傾斜角 θ は次のように表現できる。

$$\tan \theta = \frac{dx}{dy} = \frac{2\pi an}{v} \cos 2\pi nt \quad (6)$$

そこで式(4)の σ_{tx} と σ_{ty} を θ の1サイクルの変動に対応させて示すと図4のようになる。図4および式(6)より σ_{tx} と σ_{ty} は傾斜角 θ に依存して絶えず変化し, 繰返し応力として作用することがわかる。また式(4)より, σ_{tx} は $\theta = \theta$ の時に最大値 $\sigma_t \sin \theta$ となり, 最小値は $\theta = -\theta$ の時で $-\sigma_t \sin \theta$ となる。一方, σ_{ty} は $\theta = 0$ の時に最大値 σ_t となり, 最小値は $\theta = \theta, -\theta$ の時で, $\sigma_t \cos \theta$ となる。そこで σ_{tx} と σ_{ty} のそれぞれの最大値と最小値との差の1/2を応力振幅とし, それぞれを A_x および A_y として示せば

$$\left. \begin{aligned} A_x &= \sigma_t \sin \theta \\ A_y &= \frac{\sigma_t}{2}(1 - \cos \theta) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

となる。式(7)を最大傾斜角との関連で示すと図5のようになり, 応力振幅 A_x および A_y の大きさは最大傾斜角に依存することがわかる。

Fig. 5 Amplitudes of stresses A_x and A_y

5. 砥石の破壊強度と応力振幅係数

ここで微小繰返し数 dN における砥石の破壊強度の変化 $d\sigma_{nc}$ が応力振幅 A に比例して減少すると仮定し, 更に第一近似として, それらの関係が次式のように表されるものとする。

$$\frac{d\sigma_{nc}}{dN} = -KA \quad (8)$$

ただし, K は砥石の種類によって定まる定数。

ここで式(7)における応力振幅 A_x および A_y のうちで大なる A_x が砥石の破壊応力に最も強く影響すると考え, 式(8)の応力振幅 A に A_x を代入し, 更に分力比 k を使って法線方向の成分で整理すれば, 式(8)は

$$\frac{d\sigma_{nc}}{dN} = -KA_x = -Kk\sigma_{nc} \sin \theta \quad (9)$$

として表現することができる。そして式(9)を積分すれば

$$\ln \sigma_{nc} = -KkN \sin \theta + c \quad (10)$$

となる。ただし, c は積分定数。いま仮に砥石が振動せず, 加工物のみが一方方向に運動しているとすれば, このとき繰返し数 N および $\sin \theta$ はゼロとなり, 臨界圧力 σ_{nc} は静的な破壊応力 σ_{no} に等しく, $c = \ln \sigma_{no}$ となる。したがって, 式(10)は

$$\ln \frac{\sigma_{nc}}{\sigma_{no}} = -KkN \sin \theta \quad (11)$$

となり, 最大傾斜角に依存する臨界圧力の変化を無次元化して表現することができる。また, 式(11)は

$$\sigma_{nc} = \sigma_{no} \exp(-KkN \sin \theta) \quad (12)$$

となり, 臨界圧力の変化で表現することができる。

さて, 式(11)および式(12)の定数 K , 分力比 k および繰返し数 N の値が一定の場合を考えれば, KkN は一つの定数とみなすことができるので, 図6に示すように, 臨界圧力は $\sin \theta$ と指数関数的な関係を持つことになる。

したがって, 最大傾斜角 θ の力学的な意味は, 式(7)における応力振幅の大きさを決める係数 $\sin \theta$ にかかわるものであるといえ, 換言すれば最大傾斜角が変化する

Fig. 6 Effect of coefficient of stress amplitude on critical stress σ_{nc}

Fig. 8 Method for measuring stone wear

Fig. 7 Experimental equipments

場合には $\sin \theta$ の値が変化し、その結果、応力振幅が変化するとともに臨界圧力の値が変化することになるといえる。そこで本論文では、この $\sin \theta$ を応力振幅係数と定義することにする。

6. 実験方法

6.1 実験装置

実験装置を図7に示す。超仕上げ装置（小金井製作所 S F 115）を普通旋盤のツールポストに取り付け、直径 25 mm の加工物の円筒外周を超仕上げすることによって実験を行った。また任意の加工物周速度が得られるように、旋盤についているものとは別のモータと無段変速装置が取り付けられている。旋盤主軸端にはベアリングを介してプーリが取り付けられ、更に回し金を介してプーリの回転運動が直接加工物に伝えられることにより、両固定センタ作業が可能となっている。そして、両固定センタ作業によって旋盤主軸の回転振れを防止してある。なお、この装置には加工物回転数検出器が取り付けられている。

6.2 砥石減耗量の測定

砥石作動面は円筒状の加工物に倣って曲面となるため、図8に示すように、直径 6 mm のピンを曲面になっている砥石作動面に当て、そしてこのピンを介してマイ

Table 1 Experimental conditions

Workpiece	SK 3, H _R C 62
Superfinishing stone	WA 800, Vit 30×15
Grade of stone	H _R H 0, -25, -50
Numbers of vibration n	950, 1 150, 1 350 cpm
Amplitude of vibration a	0.5-3.5 mm
Workpiece speed v	0.044-0.225 m/s
Total times of vibration	1 000 times

Fig. 9 Shape of workpiece

クロメータで砥石の中央部の厚さを実験前後に測定し、その差を砥石の減耗量とした。

6.3 実験条件

実験条件を表1に、また加工物形状を図9に示す。加工物材質はSK 3（焼入れ）で、硬度はH_RC 62である。供試砥石はプレス成形法によるWA 800 Vitで、結合度のみがH_RH 0, H_RH -25 および H_RH -50 と異なるもの3種類である。また、加工液として白灯油を使用した。

なお最大傾斜角 θ は、式(6)より、加工物速度 v 、砥石の振動数 n および振幅 a の関数として

$$\theta = \tan^{-1} \frac{2\pi a n}{v} \quad (13)$$

で示される。そのために、加工物速度を 0.044 m/s から 0.225 m/s まで、砥石の振動数を 950 cpm, 1 150 cpm および 1 350 cpm に、砥石振幅を 0.25 mm から 1.75 mm までそれぞれを変化させることにより、最大傾斜角の値を変化させた。ただし、砥石振幅 a は図1に示した超仕上げ装置の偏心ピンの偏心量とする。

また厳密には、研削抵抗の3方向の成分を検出することが望ましいが、砥石が絶えず振動しているため、研削抵抗の3分力の測定が困難である。そのために、砥石押付圧力を近似的に法線研削抵抗とみなし、法線方向のみ

Fig. 10 Stone wear, stone pressure and maximum inclination angle (H_RH -25)

Fig. 11 Stone wear, stone pressure and maximum inclination angle (H_RH -50)

の研削抵抗を求めた。ただし、砥石押付圧力は超仕上装置のばねの変位から求めた。

6.4 形直しおよび目直し

超仕上の場合、一般の研削と異なり、ダイヤモンドドレッサなどにより、砥石と加工物とを確実に密着させるために砥石を成形したり、その作動面の切れ刃を整えたりすることが困難である。そこで砥粒が十分に脱落する臨界圧力以上の押付圧力で、実験に供する加工物の超仕上を行い、加工物形状に砥石形状を倣わせることにより、加工物と砥石とを確実に密着させるようにした。その上で高い砥石押付圧力から低い押付圧力へと、順次、砥石減耗実験を行った。

7. 実験結果と考察

図 10 および図 11 は、砥石の押付圧力と砥石減耗量との関係で、それぞれ砥石結合度が H_RH-25 および H_RH-50 の場合を示す。図の縦軸は砥石断面積 (4.5 cm²) 当たりの減耗量 (mm) で、図中の各点は砥石の振動回数が

Fig. 12 Effects of coefficient of stress amplitude on critical pressure in case of changing grade of superfinishing stone

1 000 回に達した時の砥石の減耗量である。また図 2 に示したように、砥石の押付圧力が臨界圧力以下では、砥石はほとんど減耗せず、臨界圧力を超えると減耗量が急激に増大することから、ここでは図 10 および図 11 の砥石減耗曲線と横軸との交点を臨界圧力とした。

さて前述のように超仕上の場合には、同一の砥石であっても、加工条件が変化すると臨界圧力も変化することが知られているが、今回の実験においても加工条件の変化に伴い、臨界圧力の値が変化することが認められる。すなわち図において、加工条件の変化に対応する最大傾斜角をパラメータとして示してあるが、最大傾斜角が大きくなるにつれて臨界圧力の値が低下している。もし砥石の破壊強度が砥石を構成する 5 因子により一義的に決定され则认为するならば、加工条件が変化した場合に同一の砥石であっても臨界圧力が変化するのは、非常に矛盾する現象であるといえる。そこで、繰返し応力による結合橋の強度の低下を考慮して、応力振幅係数 $\sin \theta$ と臨界圧力との関係でこれらのデータを整理すると図 12 のようになる。図において、加工物速度、砥石の振動数および振幅を変化させることにより、最大傾斜角を変化させており、臨界圧力は応力振幅係数と密接な関係を持つことがわかる。いいかえれば、前述の式 (12) の関係が成り立つといえる。そこで結合度が H_RH-0、H_RH-25 および H_RH-50 の砥石について、臨界圧力の対数 $\ln \sigma_{nc}$ と応力振幅係数 $\sin \theta$ との関係を最小自乗法で求め、臨界圧力の単位を MPa にして整理するとそれぞれ

$$\text{H}_{\text{R}}\text{H}-0 \text{ の場合} \quad \ln \sigma_{nc} = -3.03 \sin \theta + \ln 0.955 \quad (14)$$

$$\text{H}_{\text{R}}\text{H}-25 \text{ の場合} \quad \ln \sigma_{nc} = -2.74 \sin \theta + \ln 0.315 \quad (15)$$

$$\text{H}_{\text{R}}\text{H}-50 \text{ の場合} \quad \ln \sigma_{nc} = -2.47 \sin \theta + \ln 0.157 \quad (16)$$

となる。この場合、それぞれの相関係数は $r = -0.97$,

$r = -0.97$ および $r = -0.93$ であった。図中の直線の傾きは式(12)の定数 KkN によって定まるが、それぞれの値はかなり近いことがわかる。これは、定数 K が主として砥石の種類に依存し、分力比 k が砥石の粒度や加工物硬度等に依存するためであると考えられる。なお、これらの定数の意味ならびに定量的な考察は今後行う予定である。また図12の縦軸と直線との交点は、式(12)の静的な破壊応力 σ_{no} を意味しており、その値はそれぞれの結合度に対応していることが認められる。

以上の点より、最大傾斜角の力学的な意味は、応力振幅係数といった考え方を基礎とするものであり、また加工条件によらず応力振幅係数 $\sin \theta$ との関連において、臨界圧力を定量的に表現することが可能といえる。

8. 結 論

本文において、繰返し応力下における砥石の減耗特性を超仕上を例にとって考察した。その結果、次のような結論を得た。

- (1) 繰返し応力下における砥石の臨界圧力は応力振幅

に依存する。

- (2) 超仕上の場合には、最大傾斜角は応力振幅の大きさを規定する。
- (3) 加工条件が変化した場合の臨界圧力は、応力振幅係数との関連において、定量的に表現することができる。

おわりに、本研究を遂行するにあたり、砥石を提供して下さった瑞穂研磨砥石(株)の松森昇氏および土谷文彦氏に厚く御礼申し上げる。

参 考 文 献

- 1) 浅枝敏夫：特別号，東京工業大学学報，2 (1952)。
- 2) 松森 昇，山本 明：超仕上性能の特性値としての臨界圧力について——超仕上砥石の仕上性能向上に関する研究 (第1報)，精密機械，40，10 (1974) 852。
- 3) 松井正己：平面の超仕上に関する研究 (第3報)——平面超仕上抵抗について (その1)，精密機械，22，11 (1956) 477。
- 4) 松井正己，中里昭三：超仕上作業とその原理，養賢堂 (1900)。