研 究

Griffith 理論に基づく研削砥石の破壊強度の解析*

海 野 邦 昭** 篠 崎 襄**

An Analysis of the Fracture Strength of Grinding Wheels Based on the Griffith Theory

Kuniaki UMINO, Noboru SHINOZAKI

In many cases, grinding abilities of grinding wheels depend upon their mechanical properties. Therefore, it is necessary to analyse fracture strength in order to evaluate grinding abilities of grinding wheels, and so in this paper, the relationship between the composition and the fracture strength of grinding wheels is discussed. The results obtained are as follows:

(1) The fracture strength of grinding wheels is influenced with the effective area rate in wheel section area and the equivalent strength of bond in intercrystalline fracture, and is influenced with the effective area rate and the equivalent strength of grain in transcrystalline fracture.

(2) Under the same composition of grinding wheels, the fracture strength varies inversely as the root of the side length of grain (average grain diameter).

(3) In the case that the volume percentage of grain is v_g , the volume percentage of bond is v_b , the side length of grain is d_0 and the constants depending on the kinds of grain and bond are K_g and K_b , the relationship between the composition of grinding wheel and the fracture strength is expressed as

$$\sigma = K_g v_g^{2/3} d_0^{-0.5} \left[1 - \exp \left\{ -\frac{1}{v_g^{2/3}} \cdot \frac{K_b}{K_g} \cdot \frac{v_b}{3(1 - \sqrt[3]{v_g})} \right\} \right]$$

or

$$\frac{1}{\sigma} = \frac{3(1 - \sqrt[3]{v_g})}{v_b} \cdot \frac{\sqrt{d_0}}{K_b} + \frac{1}{v_g^{2/3}} \cdot \frac{\sqrt{d_0}}{K_g}$$

1. 緒 言

合理的な研削作業を行うには、研削砥石の研削性能の定量化が重要な決め手となる。しかしながら現状において砥石の選択と目立て間寿命の管理が作業者の経験に基づいて行われていることから判断されるように、研削砥石の研削性能の定量化は他の切削工具に比較して非常に遅れている。これは研削砥石の構造上の複雑性に起因するものであり、とりわけ砥石の破壊強度に関する情報の不足に起因すると考えられる。

従来、砥石の破壊強度は砥石の高速化に伴う遠心破壊の問題¹⁾や結合度に関連する問題²⁾として検討されているが、砥石の組成と巨視的な破壊強度といった最も基本的な問題に関してさえも、理論的な解析結果はほとんど認められない。これは砥石の組成によって砥石の破壊形態に粒内破壊と粒界破壊の異なる二つの破壊形態が存在しうることやその巨視的な破壊強度が破壊クラックの発生条件に支配されるかあるいはその伝ば条件に支配されるかに関して知見が得られていないことに起因する。

そこで本文では破壊強度のこのような複雑性を考慮して、砥石の組成と破壊強度との関係を検討した。以下その結果について述べる。

2. 解 析

一般に破壊強度の原子論的な考察は、破壊クラックの発生条件とその伝ば条件に基づいて行われている。破壊クラックの発生条件に基づく考え方には、弾性クラックの応力集中を考慮した Griffith の理論³⁾と転位の塑性すべりを考慮した Zener⁴⁾に代表される理論とがある。

Griffith は巨視的な破壊強度 σ を近似的に

$$\sigma = \sqrt{\gamma E / c} \quad (1)$$

で与えている。ただし、 γ : 表面自由エネルギー、 E : 縦弾性係数、 $2c$: 先在クラックの長さ。

ところで久保ら⁵⁾によれば、集積転位模型による塑性変形を伴う破壊条件も、集積転位の数を n 、Burgers ベクトルの大きさを b として、多くの場合に近似的に

$$\sigma = \gamma / nb \quad (2)$$

の関係で表され、クラック面間の最大変位 ca/E を集積転位の Burgers ベクトルの総和 nb と解釈すれば、式(2)は式(1)と等価となることが指摘されている。そして破壊強度を集積転位群の形成するすべり線の長さ L との関

* 原稿受付 昭和50年12月8日。昭和50年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和50年11月23日)にて発表。

** 正 会 員 職業訓練大学校(相模原市相原1960)

係で示せば, 近似的に

$$\sigma = \sqrt{\gamma G/L} \quad (3)$$

で与えられるという。ただし G : 剛性率。

また破壊強度の解析には, クラックの発生条件とともに, 伝ばの条件が重要であり, 伝ば条件を考慮した考え方には, Orowan⁶⁾の理論がある。Orowan は Griffith のクラックのメカニズムに塑性的表面仕事 W を考慮に入れ, 破壊強度を

$$\sigma = \sqrt{(\gamma + W)E/c} \quad (4)$$

として与えた。したがって Griffith の理論は, 先在クラックの有無に関係なく, クラックの生長過程の微視的モデルとしてきわめて有効であり, すべての形式の破壊現象を通じての基礎理論となっているといえる。

さて砥石と同様の窯業製品である粉体固結物の破壊強度は, 粒内破壊および粒界破壊の破壊機構にかかわらず, 粒径 d_0 と気孔率 v_p の関数として

$$\sigma = \alpha_0 d_0^{-\beta_0} \exp(-\gamma_0 v_p) \quad (5)$$

なる実験式で与えられている⁷⁾。ただし $\alpha_0, \beta_0, \gamma_0$: 定数。

式(5)中の $\alpha_0 d_0^{-\beta_0}$ は粒体粒子と結合剤を一つのマトリクスとみなした場合のマトリクスの破壊強度であり, $\exp(-\gamma_0 v_p)$ は気孔の形成に伴うマトリクスの有効断面積の変化を示すと考えられる。このような粉体固結物が粒内破壊を生じる場合には, 粒内で発生した微小なクラックの生長が, いったん粒界によって阻止され, その結果, 粒径程度の大きさのクラックが形成されることになる。また粒界破壊の場合でも, 結合剤は粒子を覆った状態で結合しているので, 粒界に発生するクラックの大きさもやはり粒径の程度であると考えられる。そこで Orowan の手法⁸⁾に従って式(1)ならびに式(4)中の Griffith クラックの長さ $2c$ を粒径 d_0 で置き換えれば, ともに

$$\sigma = K d_0^{-0.5} \quad (6)$$

として表現できる。ただし K : 定数。

また塑性すべりを伴う場合には, 結晶粒界を障壁とした転位による応力集中を考慮する必要があるが, この場合には Petch⁹⁾の考え方に基づいて, すべり線の長さを粒径の $1/2$ と考えれば, 式(3)は同様に式(6)の形で表現できることになる。したがって考え方の異なる理論式(1), (3)および(4)は, すべて Knudsen の実験式である式(5)に含まれ, 気孔によるマトリクスの有効断面積の変化を伴わない場合には, 式(6)で表現できることになる。そのため研削砥石の場合も, クラックの長さあるいはすべり線の長さを砥粒径で表現することによって, 粉体固結物と同様の扱いが可能であると考えられる。

そこで砥石の破壊形態が粒界破壊の領域では, マトリ

図1 砥石のモデルと破壊機構

クスの破壊強度は結合剤に支配され, 気孔率の寄与は結合剤の断面積の変化に対応し, また逆に粒内破壊の場合には, マトリクスの破壊強度は砥粒に依存し, 気孔率の寄与は砥粒の断面積の変化に対応するとの仮定を設定し, この仮定に基づいて解析を行うことにする。

まず解析にあたって砥石の構造モデルを考えることにする。砥粒を球とし, その砥粒が砥石中で立方体配列で分布すると考える場合には, その最密充填時の砥石中に占める砥粒の体積分率は約 52% となり, 砥石の組織が最も密である場合の砥粒率, 約 54% とよく一致する。そのため砥石の構造モデルは, 球である砥粒が砥石中で立方体配列で分布し, 各々の砥粒が 6 本の結合橋によって結合されるモデルで考えられるが, 結合橋の断面積の変化を求める場合に計算が複雑となるので, 球である砥粒を正六面体で置き換えても問題はないと考えられる。またこの場合には, 単一砥粒が 6 本の結合橋で結合されることを考慮すれば, 計算が単純化され好都合である。そこで砥粒の一辺の長さを平均砥粒径 d_0 で置き換えた正六面体の砥粒が, 砥石中で立方体配列で分布すると考えれば, 砥石の構造モデルは図1のようなになる。ここで砥粒率を v_g , 結合剤率を v_b とすれば, 砥石の断面における砥粒および結合剤の断面積率 A_g および A_b はそれぞれ

$$A_g = v_g^{2/3} \quad (7)$$

$$A_b = v_b/3(1 - \sqrt[3]{v_g}) \quad (8)$$

となる。

次にこのような構造をもつ砥石が破壊する場合を考える。砥石の破壊機構が粒界破壊の領域では, 結合剤は砥粒を覆った状態で結合していると考えられるので, 破壊クラックは砥粒と結合剤の界面に発生し, かつその大きさは砥粒の一辺の長さと考えることができるであろう。この場合には結合剤の見掛け上の破壊強度 σ_b は, 破壊形式にかかわらず式(6)より

$$\sigma_b = K_b d_0^{-0.5} \quad (9)$$

で表現できる。ただし K_b : 定数。

そのため粒界破壊領域における砥石の破壊強度は, こ

図2 結合剤の有効面積率と砥石の破壊強度との関係

の結合剤の見掛け上の破壊強度と結合剤の占める断面積率とに比例するであろうから

$$\sigma = K_b d_0^{-0.5} A_b = K_b v_b d_0^{-0.5} / 3(1 - \frac{2}{3}v_g) \quad (10)$$

となる。また粒内破壊の場合には、砥粒内部で発生したクラックの生長が粒界で阻止されることによって形成されるクラックの大きさは砥粒の一辺の長さで近似でき、また集積転位群のすべり線の長さで考える場合にも、すべり線の長さ L は $L = d_0/2$ で近似できるので、砥粒の見掛け上の破壊強度 σ_g は、破壊の形式にかかわらず

$$\sigma_g = K_g d_0^{-0.5} \quad (11)$$

で表現できる。ただし K_g : 定数。

したがって粒内破壊領域における砥石の破壊強度は、粒界破壊の場合と同様に

$$\sigma = K_g d_0^{-0.5} A_g = K_g v_g^{2/3} d_0^{-0.5} \quad (12)$$

となる。そこで以上の関係を結合剤の断面積率と砥石の破壊強度との関係で示したのが図2である。図において、粒界破壊の領域では、結合剤の断面積率の増加にともなって破壊強度は大きくなるが、その断面積率が十分に大きくなると、破壊強度は結合剤の断面積率に無関係に一定となる。すなわち砥石の破壊機構が粒界破壊から粒内破壊へと移行する。そのため砥石の破壊強度は破壊機構が粒界破壊から粒内破壊へと変化する過渡的な過程として

$$\sigma = \sigma_1 \{ 1 - \exp(-b_0 A_b) \} \quad (13)$$

として表現できよう。ただし σ_1 は式(12)と等価で、 b_0 は定数である。さてここで式(13)の原点における接線を取れば、この接線は式(10)と等価の関係にあると考えられるので

$$b_0 = \frac{K_b}{K_g} \cdot \frac{1}{v_g^{2/3}} \quad (14)$$

となる。したがって砥石の組成と破壊強度との関係は

$$\sigma = K_g v_g^{2/3} d_0^{-0.5} \left[1 - \exp \left\{ -\frac{1}{v_g^{2/3}} \cdot \frac{K_b}{K_g} \cdot \frac{v_b}{3(1-\frac{2}{3}v_g)} \right\} \right] \quad (15)$$

で与えられる。

次にこの問題を別の手法で求めた結果について述べ

図3 砥石破壊の確率モデル

る。図3のような構造をもつ砥石に P なる荷荷が作用した場合、砥石中では粒界破壊と粒内破壊とが一定の確率にしたがって生じると考えられる。そこで結合橋の破壊を事象 A とし、砥粒の破壊を事象 B とすれば、 P なる荷荷が砥石に作用した場合、結合橋または砥粒の少なくとも一方の破壊する確率 $\Pr(A+B)$ は

$$\begin{aligned} \Pr(A+B) &= \Pr(A) + \Pr(\bar{A}B) \\ &= \Pr(A) + \Pr(\bar{A})\Pr(B/A) \\ &= \Pr(A) + \Pr(B/\bar{A})\{1 - \Pr(A)\} \\ &= \Pr(A) + \Pr(B/\bar{A}) - \Pr(A)\Pr(B/\bar{A}) \quad (16) \end{aligned}$$

である。ただし $\bar{A}$: 事象 A が起きないこと、 $\Pr(\bar{A}B)$: 事象 $\bar{A}$ と B がともに起きる確率。

さてここで A と B とは排反事象と考えてよいから

$$\Pr(A+B) = \Pr(A) + \Pr(B/\bar{A}) \quad (17)$$

となる。また $\Pr(B/\bar{A})$ は結合橋の破壊が生じないという条件下における砥粒の破壊する確率であるが、これを求めることは難しいので、 $\Pr(B/\bar{A})$ を $\Pr(B)$ で近似すれば、いいかえれば事象 A と B を近似的に独立と考えれば

$$\Pr(A+B) \doteq \Pr(A) + \Pr(B) \quad (18)$$

となる。したがって結合橋の破壊または砥粒の破壊の少なくとも一方の生じる確率は、近似的に結合橋の破壊する確率と砥粒の破壊する確率の和で表現できることになる。そこで $\Pr(A)$ と $\Pr(B)$ とを吉川¹⁰⁾を用いて求めるとそれぞれ

$$\Pr(A) = Q_b t_0 \exp \left(-q_b \frac{P}{a_b n_0} \right) \quad (19)$$

$$\Pr(B) = Q_g t_0 \exp \left(-q_g \frac{P}{a_g n_0} \right) \quad (20)$$

となる。ただし Q_b, Q_g, q_b, q_g : 定数、 t_0 : 荷荷時間、 a_b : 単一結合橋の断面積、 a_g : 単一砥粒の断面積、 n_0 : 砥石単位面積中に存在する砥粒数。

ところで横堀¹¹⁾によれば、破壊応力に及ぼす荷荷時間の影響は、荷荷時間が十分に長い範囲ではほとんど現れないとのことであるので、 $Q_b t_0$ および $Q_g t_0$ をそれぞれ定数として $\bar{Q}_b'$ および $\bar{Q}_g'$ で示せば、式(18)は

$$\Pr(A+B) \doteq Q_b' \exp\left(-q_b \frac{P}{a_b n_0}\right) + Q_g' \exp\left(-q_g \frac{P}{a_g n_0}\right) \quad (21)$$

となる。さて $\Pr(A+B)$ が一定の値、すなわち K_w に達した場合に、砥石が破断すると考えれば

$$Q_b' \exp\left(-q_b \frac{P}{a_b n_0}\right) + Q_g' \exp\left(-q_g \frac{P}{a_g n_0}\right) = K_w \quad (22)$$

を満足する P が砥石の破壊に対応する最大負荷となる。そこでこの時の破壊荷重を砥石の単位面積で除せば、砥石の破壊強度が求まることになるが、このままでは P を解くのは難しいので近似式を用いれば

$$Q_b' \left(1 - q_b \frac{P}{a_b n_0}\right) + Q_g' \left(1 - q_g \frac{P}{a_g n_0}\right) \doteq K_w \quad (23)$$

となり、 P は

$$P = (Q_g' + Q_b' - K_w) / (Q_g' q_g / A_g + Q_b' q_b / A_b) \quad (24)$$

で近似できる。したがって結合剤の断面積率と砥石の破壊強度との関係は

$$\sigma = \frac{A_b}{\frac{Q_b' q_b}{Q_g' + Q_b' - K_w} + \frac{Q_g' q_g}{v_g^{2/3} (Q_g' + Q_b' - K_w)} A_b} \quad (25)$$

となり

$$A_b = -v_g^{2/3} Q_b' q_b / Q_g' q_g \quad (26)$$

$$\sigma = v_g^{2/3} (Q_g' + Q_b' - K_w) / Q_g' q_g \quad (27)$$

を漸近線とする双曲線となる。また $A_b = 0$ のとき $\sigma = 0$ だから、原点を通るので、式 (25) の原点における接線を求めれば

$$\sigma = \frac{Q_g' + Q_b' - K_w}{Q_b' q_b} A_b \quad (28)$$

となる。そこで近似的に式 (28) が式 (10) と等価で、式 (27) が式 (12) と等価であると考えれば

$$(Q_g' + Q_b' - K_w) / Q_b' q_b = K_b d_0^{-0.5} \quad (29)$$

$$(Q_g' + Q_b' - K_w) / Q_g' q_g = K_g d_0^{-0.5} \quad (30)$$

なる関係が成立つ。したがって式 (25) は

$$\sigma = \frac{A_b}{\frac{\sqrt{d_0}}{K_b} + \frac{1}{v_g^{2/3}} \cdot \frac{\sqrt{d_0}}{K_g} A_b} \quad (31)$$

となる。この曲線は原点を通り

$$A_b = -v_g^{2/3} \frac{K_g}{K_b} \quad (32)$$

$$\sigma = v_g^{2/3} K_g d_0^{-0.5} \quad (33)$$

を漸近線とする双曲線で、 $1/A_b$ と $1/\sigma$ とは直線関係を示す。そこでこの関係を図示すれば図 4 のようになり、砥石の組成と破壊強度との関係は

図4 砥石破壊の確率モデルより得られる結合剤の有効面積率と破壊強度との関係

$$\frac{1}{\sigma} = \frac{3(1 - \frac{2}{3} v_g)}{v_b} \cdot \frac{\sqrt{d_0}}{K_b} + \frac{1}{v_g^{2/3}} \cdot \frac{\sqrt{d_0}}{K_g} \quad (34)$$

で与えられる。

3. 実験方法

供試砥石は WA 60 V および WA 80 V で、砥粒率を 44% から 52% の範囲で 2% とびに、そして結合剤率を 8% から 20% の範囲で 4% とびに変化したもの、合計 40 種類である。また破壊強度のばらつきを最小限にとどめるために、これらの砥石には同一成分のピトリファイド結合剤が用いられており、焼成条件も一定である。そして曲げ試験用の試験片を別個に作成すると組成の変化やむらを生じるので、試験片はこれらの砥石からダイヤモンドソーで切断した。試験片の寸法は 10 mm × 19 mm × 120 mm である。曲げ試験はスパン長さ 100 mm で、中央負荷方式で行い、砥石の曲げ強さは 3 回の実験値の平均値で示した。

4. 結果と考察

図 5 に式 (8) で計算した結合剤の断面積率と曲げ強さとの関係を示す。図において砥石の曲げ強さは砥石断面の結合剤の断面積率の増加とともに、急激に大きくなっていることがわかる。そのため砥石の破壊機構は粒界破壊の支配的な領域にあると考えられる。また砥石の組成が一定、いいかえれば結合剤の断面積率の一定の場合でも、#60 の砥石と #80 の砥石とを比較すれば、#80 の砥石のほうが曲げ強さが大きいことがわかる。したがって粒界破壊の領域でも、砥粒の影響は無視できず、砥石の破壊強度を単純な結合剤の断面積率の変化で説明することはできないといえる。そこでこの砥粒径の影響を詳しく調べるために、砥石の組成を一定 ($v_g = 46.5\%$, $v_b = 8.5\%$) とし、粒度だけを変化した WA ピトリファイド砥石と GC ピトリファイド砥石を用いて曲げ試験を行った。その結果を図 6 に示す。図において砥石の組成が一

図5 結合剤の有効面積率と曲げ強さとの関係

図6 砥石の曲げ強さに及ぼす平均砥粒径の影響

定の場合でも、砥石の曲げ強さは粒径依存性をもち、平均砥粒径の大きな砥石ほど、曲げ強さは急激に小さくなることがわかる。この実験に供した砥石組成では、前述の結果から判断する限りでは、明らかに粒界破壊の支配的な領域にあると考えられるが、この場合にも砥石の破壊強度に砥粒径が顕著に影響するので、この結果に基づけば、砥粒と結合剤の界面で発生するクラックの大きさが、砥粒径と密接な関係をもつといえよう。また実験結果より、WA ビトリファイド砥石と GC ビトリファイド砥石について、それぞれ実験式を求めると

$$\sigma = 1.02d_0^{-0.60} \quad (r = -0.985) \quad (35)$$

$$\sigma = 0.87d_0^{-0.54} \quad (r = -0.940) \quad (36)$$

となり、砥石の曲げ強さは平均砥粒径の約 -0.5 乗に比

図7 結合剤の面積率 ($1/A_b$) と破壊強度 ($1/\sigma$) との関係

例することになる。そこで式 (35) および式 (36) を式 (15) および式 (34) と比較すれば、砥石の組成が一定の場合には、砥粒の一边の長さだけが変数となるので、曲げ強さは砥粒の一边の長さの -0.5 乗に比例することになり、平均砥粒径と砥粒の一边の長さを近似的に等価とみなせば、解析結果と実験結果とは非常によく一致するといえる。

次に図5で示した実験結果を $1/A_b$ と $1/\sigma$ の関係に書き直したのが図7である。図において粒度と砥粒率が一定の場合には、 $1/A_b$ と $1/\sigma$ とは線形関係を示すことがわかる。また粒度が異なる場合には、その線形関係が変化するのが認められる。したがってこの実験結果は式 (31) から導かれる結果とよく一致するといえる。

そこで以上の実験結果を整理すると、砥石の破壊強度はその組成との関連において、次のような定性的な傾向をもつことがわかる。

- (1) 砥石の断面における結合剤の断面積率の増加にともなって、砥石の破壊強度は急激に大きくなる。
- (2) 砥石の組成、いいかえれば結合剤の断面積率が一定の場合には、砥石の破壊強度は平均砥粒径（砥粒の一边の長さ）の約 -0.5 乗に比例して増大する。
- (3) $1/A_b$ と $1/\sigma$ とは線形関係を示す。

これらの砥石の破壊強度に関する定性的傾向は、式 (15) または式 (34) から導かれる結果と非常によく一致するが、これらの式中の K_g と K_b の値が明らかでないため、定量的な関係において、また広範囲の粒度と組成の砥石について、式 (15) と式 (34) とが成立つとはいいきれない。そこで式中の K_g と K_b の考察を行うことにする。

砥粒の破壊強度が粒径によって異なることは吉川らによって指摘されている¹⁹⁾。吉川らはランダム砥粒の静的圧壊試験を行い、その圧壊力から引張強さを計算によって求めた。そしてランダム砥粒の引張強さが粒径に依存することを示した。そこでこの実験結果に基づい

図8 破壊強度の計算値の比較

て, 式(9)の形で実験式を求めると

$$\sigma_g = 23.0 d_0^{-0.5} \quad (37)$$

となる。ただし引張強さと平均砥粒径の単位はそれぞれ (kg/mm^2) および (mm) である。ここで砥石の曲げ強さと引張強さが近似的に等価と仮定すれば, アランダム砥粒の K_g は $23.0 \text{ kg/mm}^{3/2}$ で近似できる。しかしながら今回の実験には WA 砥粒を用いており, 砥粒の種類が異なるので, アランダム砥粒の K_g の値が必ずしも式(15)ならびに式(34)中の定数を決定するのに適用できるとはいえないが, WA 砥粒は粒径の大きなものを製造するのが難しく, 圧壊試験に供しにくいので, 便宜上, アランダム砥粒の K_g の値を式(15)に代入し, 実験結果に基づいて K_b の値を求めた。その結果, 40 種類の砥石から求めた K_b の値の平均値は $7.0 \text{ kg/mm}^{3/2}$ であった。そこでこのような手法により近似的に求めた定数の値, すなわち $K_g = 23.0 \text{ kg/mm}^{3/2}$ および $K_b = 7.0 \text{ kg/mm}^{3/2}$ を用いて, 砥石の曲げ強さを式(15)と式(34)で計算した。そしてこれら二つの式より導かれる砥石の曲げ強さの定性的傾向が, 広範囲の組成の砥石について一致するか否かを吟味するために, それぞれの計算値を図5中に実線と破線で示した。その結果, 計算値と実験値はその定性的傾向のみならず定量的な関係においてもよく一致することが明らかになった。

次に異なる手法で求めた式(15)と式(34)の定量的な関係を求めるために, 広範囲の粒度と組成の砥石について計算した値を比較した。その結果を図8に示す。図より式(15)で求めた計算値の方が式(34)の値よりも多少大きな値を示すが, 両者の間には線形関係が成り立つことがわかる。そのため式(15)と式(34)とは解析手法は異なるが, それらの意味する内容はほとんど変わらないといえよう。

したがって以上の結果より明らかなように, 砥粒の種類によって決定される K_g の値と結合剤の種類によって決定される K_b の値が既知であれば, 砥石の破壊強度は

平均砥粒径やその組成といった比較的マクロの量によって計算できることになる。

5. 結 論

研削砥石の研削性能を予測するには, その破壊強度に関する情報は最も基本的であると同時に最も重要である。そこで本文では砥石の破壊強度をその組成との関連において解析した。得られた結果を要約すると次のようになる。

- (1) 粒界破壊の領域では, 砥石の破壊強度は砥石の断面における結合剤の断面積率とその見掛け上の破壊強度に比例し, 粒内破壊領域では, 砥粒の断面積率とその見掛け上の破壊強度に比例する。
- (2) 組成が一定の場合には, 砥石の破壊強度は砥粒の一辺の長さ (平均砥粒径) の約 -0.5 乗に比例する。
- (3) 砥石の組成とその破壊強度との関係は

$$\sigma = K_g v_g^{2/3} d_0^{-0.5} \left[1 - \exp \left\{ -\frac{1}{v_g^{2/3}} \cdot \frac{K_b}{K_g} \cdot \frac{v_b}{3(1 - \sqrt[3]{v_g})} \right\} \right]$$

または

$$\frac{1}{\sigma} = \frac{3(1 - \sqrt[3]{v_g})}{v_b} \cdot \frac{\sqrt{d_0}}{K_b} + \frac{1}{v_g^{2/3}} \cdot \frac{\sqrt{d_0}}{K_g}$$

で表現できる。そのため砥粒と結合剤の種類, 粒度および組成が既知であれば, 砥石の破壊強度は計算によって求められる。

おわりに本研究を遂行するにあたり御指導をいただいた東京大学・吉川弘之先生ならびに砥石を御提供いただいた三井研削砥石(株)・岡田昭次郎, 豊島五十二および山岸茂の各氏に厚く御礼申し上げる。

文 献

- 1) 例えば, 井上英夫: ビトリファイド研削砥石の遠心破壊強度の推定について, 精密機械, **37**, 2 (1971) 21.
- 2) 例えば, 渡辺半十: 結合度試験, 精密機械, **27**, 6 (1961) 539.
- 3) 例えば, A. A. Griffith: Phil. Trans. Roy., **221**, (1920) 163.
- 4) C. Zener: Fracturing of Metals, Amer. Soc. Metals, Cleveland, (1948) 3, Advances in Physics, **6**, 418, (1957).
- 5) 久保輝一郎, 水渡英二, 中川有三, 早川宗八郎: 粉体, 丸善 (1962) 235.
- 6) E. Orowan: Rep. Progr. Phys., **12**, (1949) 185.
- 7) F. P. Knudsen: J. Amer. Ceram. Soc., **42**, 376, (1959).
- 8) E. Orowan: Z. Physik, **86**, 195, (1933).
- 9) N. J. Petch: J. Iron and Steel Inst., **174**, (1953) 25; Progress in Metal Physics, **5**, Chapt. 1, (1954) 1.
- 10) 吉川弘之: 砥粒の破壊をともしう研削砥石の摩耗過程, 精密機械, **26**, 11 (1960) 691.
- 11) 横堀武夫: 材料強度学, 技報堂 (1955).
- 12) 吉川弘之, 佐田登志夫: 砥粒の破壊強度, 精密機械, **26**, 8 (1960) 476.