研削切断用薄手砥石の結合度試験*

八 高 隆 雄** 吉 川 祐 一*** 杉 内 肇†

Bonding Test of Thin Grinding Wheels

Takao YAKOU, Yuichi YOSHIKAWA and Hajime SUGIUCHI

Bonding test of thin grinding wheels has been performed, using bit type testing machine. Bit displacement and torque were inversely proportional to the bonding grade of wheels, and were more closely connected with the bond contents. The torque needed to pulling out a grain was obtained as a function of the amount of bond contents per one grain. It was found that, the higher the bonding grade wheel, grains were more breakable than the lower one.

Key words: bonding test, thin grinding wheel, bit type testing machine, bit displacement, bonding grade, pulling out torque

1. 緒 言

研削砥石の砥粒を保持する強さの尺度として結合度があり、研削抵抗に対する砥石の対破碎性の程度を表している¹⁾。JISでは結合度の試験方法として大越式試験方法、ロックウェル式試験方法などを定めている²⁾。しかし、特に厚さ1mm以下の精密切断用の砥石で、これらの試験を行った場合に砥石が破壊してしまう恐れがある。これまで切断砥石の結合度は、砥石メーカーが結合剤の量や種類および曲げ試験の値などから独自に決めているが、明確な基準は定まっておらず、切断砥石の結合度の表記にもかなり曖昧な部分がある。同じ結合度の市販の砥石でも、メーカーや砥粒の粒度や種類が違った場合に、一定の基準で比較した時の結合度は異なる。砥石の性能や品質を評価する際に、結合度は重要な要因であるため、結合度を決定するための一定の基準が必要である。

そこで本研究では、研削切断用の薄手砥石の結合度を測定するための試験機を製作し、市販の切断砥石の結合度について検討した。

2. 実 験 方 法

2.1 実験装置および方法

本実験において使用した試験機を図1に示す。試験装置はモータ（マブチモーター、RE-260、負荷時の回転数4480rpm、1.5V）を動力として、ギヤボックス（減速比336:1）を経由し、トルクデューサ（クボタ製、KB22-002）に伝わり、歯車（減速比20:9）によってビットを回転させる方式で、ビットの上部に荷重を加えることができ、かつ上下の移動量をダイヤルゲージで測定できるようにした。実験時のビットの回転速度は 0.1 s^{-1} であった。ビットは炭素鋼S45Cを焼入れしたものをを用い、その形状は図1に示すように先端角 90° のくさび型である。実験に当たってはビットの変位とトルクデューサの出力を測定した。

2.2 試 料

実験には結合度、砥粒の種類および粒度の異なる市販の6種

類の研削切断用砥石を用いた。それらはGC150HB、GC400LB、A100NB、GC100NB、GC150NB、A100PBであり、結合剤はいずれもフェノール樹脂である。これらの砥石から幅20.0mmで長さ30.0mmの結合度試験用の試料を得た。また、これらの砥石の気孔率 $(V_i)_A$ 、砥粒率 $(V_i)_G$ 及び結合剤率 $(V_i)_B$ を表1³⁾に示す。

Fig. 1 Schematic illustration of experimental equipment

Table 1 Compositions of wheels

	$(V_i)_A$	$(V_i)_G$	$(V_i)_B$
GC 150 HB	0.195	0.587	0.218
GC 400 LB	0.086	0.445	0.469
A 100 NB	0.180	0.482	0.338
GC 100 NB	0.265	0.465	0.270
GC 150 NB	0.031	0.520	0.449
A 100 PB	0.155	0.493	0.352

$(V_i)_A$: void content

$(V_i)_G$: grain content

$(V_i)_B$: bond content

* 原稿受付 平成6年3月7日

** 正 会 員 横浜国立大学教育学部（横浜市保土ヶ谷区常盤台156）

*** 学生会員 横浜国立大学

† 正 会 員 横浜国立大学工学部

Fig. 2 Relation between displacement δ and number of revolution N at 33.0 N

Fig. 3 Relation between $d\delta/dN$ and compressive force F

3. 結果および考察

3.1 ビットの変位およびトルク

実験の結果得られた押付け力 $F=33.0$ N におけるビットの変位 δ と回転数 N との関係を図 2 に示す。いずれの結果も δ と N とはほぼ直線関係にあり δ - N 直線の傾きは GC 150 NB < A 100 PB = GC 400 LB < A 100 NB < GC 100 NB < GC 150 HB の順に大きくなっている。またこの傾き $d\delta/dN$ と押付け力 F との関係を求めると図 3 のようになり、いずれの押付け力においても $d\delta/dN$ の大小関係は変わらない。

一方、ビットが 10 回転したときの変位を最大変位 $\delta_{N=10}$ とし、 $\delta_{N=10}$ と市販の砥石に表記されている結合度で整理した結果が図 4 である。全体的に結合度が高いほど $\delta_{N=10}$ は小さくなる傾向が確認できるが、 F が高いほどこの傾向は大きく現れ、値もばらついている。さらに図 5 は試験時のトルク T と結合度との関係である。この場合にも図 4 の $\delta_{N=10}$ とほぼ同様の傾向にあることがわかる。すなわち、市販の研削切断砥石の結合度と $\delta_{N=10}$ あるいは T とは逆比例の関係で互に対応しており、 F が大きいほどその傾向がより大きく現れる反面、ばらつきも大きく現れている。このことは装置の感度を上げるために F を大きくすれば、ばらつきも大きくなることを意味しており、市販の砥石に記載されている結合度で整理する限りは、 F を変えてもこの装置の S/N 比は変わらないものと思われる。

3.2 ビットからの出力と結合剤率との関係

ここでは市販の切断砥石に表記されている結合度の意味を考

Fig. 4 Relation between displacement at $N=10$ $\delta_{N=10}$ and bonding grade

Fig. 5 Relation between torque T and bonding grade

Fig. 6 Relation between displacement at $N=10$ $\delta_{N=10}$ and bond content $(V_l)_B$

えてみることにする。研削切断砥石の曲げ強度は結合度よりも結合剤率で一義的に決定される³⁾。そこで、結合度試験機で切断砥石を試験した時のビットからの出力を支配している因子として、この場合も、結合剤率を用いることにする。試験機の出力 $\delta_{N=10}$ を各砥石の結合剤率 $(V_l)_B$ で整理した結果を図 6 に示す。その結果、ほとんどばらつきなく結合剤率が高いほど $\delta_{N=10}$ が低くなる傾向が認められる。同様に T と $(V_l)_B$ の関係を図 7 に示す。図 6 と同様にいずれの荷重においても結合剤率が高いほど T が低くなる傾向が表れている。このことは、 δ や T は結合剤率によって決定されることを示唆している。

Fig. 7 Relation between torque T and bond content $(V_t)_B$ Fig. 8 Relation between torque T and displacement at $N=10$
 $\delta_{N=10}$

3.3 結合度試験結果の意味

図4および図5, ならびに図6および図7からも明らかなように, $\delta_{N=10}$ と T は結合度に対しても結合剤率に対してもほぼ同様の变化を示していた. すなわち $\delta_{N=10}$ と T はほぼ同様の情報を含んでいる可能性がある. そこで T と $\delta_{N=10}$ の関係をグラフにしたのが図8である. T と $\delta_{N=10}$ は互いにはほぼ直線関係にあるものの, 押付け力によってかなり異なる. また, いずれの押付け力の結果も $\delta_{N=10}=0$ の場合に原点を通らない. このことは $\delta_{N=10}=0$ でもトルクが必要なことを示している. すなわち, 砥石の上をビットが回転する場合に, ビットの底面が押付け力に打ち勝って砥石面上を滑るための摩擦力と砥石を掘り起こすための力とが必要であることを意味しており, 前者が $\delta_{N=10}=0$ の T の値であり, 後者が $\delta_{N=10}$ と共に増加していく T の値であろう. そこで, $\delta_{N=10}$ とともに増加していくトルク成分を ΔT と表し, 掘り起こし成分と呼ぶことにする.

一方, ビットが砥石を削るということを微視的に考えてみると, ビットが砥粒上を通過する際に砥粒を保持している結合橋が破壊し脱落を起こすか, 砥粒が破壊し摩滅するかのどちらかである. そこで, 砥粒1個当たりの結合剤量 Q と砥粒1個を掘り起こすためのトルクを求めてみよう. まず, 砥粒1個当たりの結合剤量 Q を求める. 1 mm^3 中の結合剤の量は $1 \times (V_t)_B$ で与えられる. また 1 mm^3 中の砥粒の量は $1 \times (V_t)_G$ で与えられる. ここで $(V_t)_B$ は結合剤率, $(V_t)_G$ は砥粒率である. いま砥粒を平均径 d の球に近似すれば, 1個の砥粒の体積は $\pi \cdot d^3/6$ である. 従って1個の砥粒当たりの結合剤量は,

Fig. 9 Schematic illustration of bit

Fig. 10 Relation between the increased torque during the experiment $\Delta T/P$ and the amount of bond per one grain Q

$$Q = \frac{\pi \cdot d^3 \cdot (V_t)_B}{6 \cdot (V_t)_G} \quad (1)$$

で与えられる.

ビットの先端には図9に示すような刃が2枚ついている. この刃が1/2回転するときに(刃が2枚あるため)掘り起こす深さを $\Delta \delta$ とすれば, 図の斜線部に顔を出している砥粒の数 P は, 斜線部の面積 $L \cdot \Delta \delta$ に $(V_t)_G$ を掛け, 1個の砥粒の面積 $\pi \cdot d^2/4$ で割った,

$$P = \frac{4 \cdot L \cdot \Delta \delta \cdot (V_t)_G}{\pi \cdot d^2} \quad (2)$$

で与えられる. 従って, 1個の砥粒を掘り起こすトルクは $\Delta T/P$ で与えられる.

以上の方法によって得られた $\Delta T/P$ と Q との関係が図10である. 結果は押付け力によって差がなく, ほぼ1本の直線で表せる. すなわち1個の砥粒を掘り起こすのに必要なトルクと1個の砥粒の結合剤の量とは1対1に対応している.

3.4 試験前後における砥粒の損耗形態

結合度試験を行う前後で脱落した砥粒がどのような変化をしているか調べるために, 以下の方法で砥粒を分離した. ビットによって削られた砥粒と結合剤の削りくずを, 600°C で30 min 加熱して結合剤を完全に燃焼させ, その後燃焼灰と砥粒を分離した³⁾. これらの砥粒をポータブルマイクロスコブ(キーエンス製)で観察した. なお, 試験後の砥粒は押付け力33.0N時のものを用いた. GC150HBの結果を図11に, GC150NBの結果を図12に示す. GC150HBは試験前と試験後では粒径がほとんど変化していないのに対して, GC150NBでは試験後の方が粒径が小さくなっている. このように砥

Fig. 11 Micrographs of the debris of wheel GC 150 HB (a) before and (b) after experiment

Fig. 12 Micrographs of the debris of wheel GC 150 NB (a) before and (b) after experiment

石の種類によって試験前後の粒径に差があることがわかる。そこで、これらの写真から各砥石についての粒径の分布を調べた結果を図13に示す。なお、一般的に砥粒の長径と短径の比は、ばらつきが多く、大きい値では2~3倍位になってしまう。そこで長径と短径による相乗平均をもって粒径とした。その結果、GC 150 HBやGC 400 LBの砥石は粒径が試験前後で変化しないが、A 100 NBやGC 100 NBの砥石は粒径が減少している。これらの結果を図10の結果と対応させて考えると、粒径分布が変化しなかった場合の方が Q 値が小さく、粒径分布が変化した場合の方が Q 値が大きくなっている。このことから、砥粒1個当たりの結合剤量が多い場合、砥粒を保持する力が強いのでビットが砥石を削る際に、砥粒が結合剤から脱落する前に割れてしまうものと思われる。

そこでこのことを確認するためビットの削りくずを顕微鏡で

Fig. 13 Change in the histograms of grain diameter during the experiment (a) GC 150 HB, (b) GC 400 LB, (c) A 100 NB, (d) GC 100 NB, (e) GC 150 NB and (f) A 100 PB

調べた。図14は砥粒1個当たりの結合剤量 Q が少ないGC 150 HBとGC 400 LBの結果である。結合剤で完全に包まれたA（この場合のAの内部には複数の砥粒が含まれている）や結合剤が一部分割れたBが認められる。一方、図15に示した Q が多いGC 100 NBやA 100 NBではAやBに混ざって全く結合剤が付着していないCが認められる。BやCは結合剤が界面で剥離したか、あるいは砥粒自身が割れたかのいずれかであろう。ここで切断砥石の曲げ強度は結合剤率によって支配されている³⁾こと、および図13の粒度分布が結合度試験後に小さい方へずれていたことから判断して、BやCは砥粒の割れた跡と見なすことが妥当であろう。これらの結果は砥粒1個当たりの結合剤量 Q が多いほど砥粒が割れやすくなるという考えとも一致する。

4. 結 言

研削切断砥石用の結合度試験機を試作し、市販の6種類の砥石について実験を行い以下の結論を得た。

Fig. 14 Micrographs of the debris of wheels
(a) GC 150 HB, (b) GC 400 LB

Fig. 15 Micrographs of the debris of wheels
(a) GC 100 NB, (b) A 100 NB

- (1) 本試験装置で得られたビットの食込み量およびトルクは、研削切断砥石に記載されている結合度とほぼ逆比例の関係にある。また、これらの値は結合剤率とよりよく対応した。従って、これらの因子によって砥石の結合度が計測可能なことがわかった。
- (2) 計測されたトルクから求めた、砥粒1個を掘り起こすのに必要なトルクは砥粒1個あたりの結合剤の量で決定される。
- (3) 結合剤率が高い砥石はビットが砥石を削る際に砥粒が摩滅や欠損しやすく、結合剤率が低い砥石は砥粒がそのままの形で脱落しやすい。このことが後者の方が砥粒1個を

掘り起こすのに必要なトルクが低くなる原因であろう。

最後に本研究は平成5年度文部省教育研究特別経費（超高速研削切断機の試作：代表八高隆雄）の一部として行われたものである。記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 河村末久, 矢野章成, 樋口誠宏, 杉田忠彰：研削加工と砥粒加工, 共立出版, (1984) 12.
- 2) 日本工業規格：JIS R 6240, 研削といしの試験方法, (1986).
- 3) 八高隆雄：研削切断用レジノイド砥石の曲げ強さの温度依存性, 日本機械学会論文集C編, 59, 564 (1993) 2558.