研削砥石の破壊強さ、特に静疲労強さ について(第1報)*

——回転・曲げ・引張強さの比較——

山 本 明** 佐 野 高 男***

On the Strength, especially Static Fatigue Strength of
Vitrified Grinding Wheels (1st Report)

Akira YAMAMOTO, Takao SANO

In the high speed grinding with the object of high production in grinding works, the security from bursting of rotating wheels is strongly claimed. This paper deals statistically with the fracture, especially the delayed fracture that is remarkable in brittle materials such as the vitrified wheels, and experimental data are settled by the Weibull plot. The strength at ordinary test which breaks during load increasing and that at static fatigue test which looks for the time before fracture under a constant load are compared among tensile, bending and rotating test. At the ordinary test, the location parameter $\gamma \approx 0$ and the shape parameter $m > 1$. The value of m and the mean strength μ are both largest in bending test, and rotating and tensile test follow in its train. At the fatigue test, the constant load is defined with the loading factor S that is the reciprocal of the safety factor and $S = 0.88 \sim 1.08$. Results of these tests point out that $\gamma \approx 0$, $m < 0.8$ and the descending order of its magnitude is rotating, bending and tensile test and that m decreases to approach a finite value as S decreases. The static fatigue phenomenon is conspicuous in the same order as m and the delayed fracture one in the reverse order. By assuming that $m = \text{constant}$ and S —characteristic life relationship the assured safety life from bursting is estimated for $S = 1/4$ provided by the “Safety Code.” This time is sufficiently safe compared with the engaged time of the wheel.

1. ビトリファイド研削砥石の破壊と研究の目的

最近、生産能率の向上を目的とした高速研削盤が普及しつつあり、新しく作られる研削盤の仕様もこの思想をとり入れたものになってきた。高能率研削の実現には、高速研削の実情をふまえた研削盤と高速研削用砥石の開発が必要なことはいうまでもない。後者は作業の安全性の見地から砥石周速の高速化に制約を加える立場にある。現在のビトリファイド砥石製造技術では、十分な切削性能をそなえた砥石の破壊周速は1万 m/min 程度が限度であり、使用周速は安全規則によってこの1/2以下におさえられる。

筆者は前に¹⁾ 安全性の立場から回転破壊周速について考察し、破壊現象を確率現象として取扱うべきこと、またおくれ破壊現象と静疲労現象が破壊周速付近で著しい

ことを指摘した。すなわち、後者は破壊周速以下の周速下でも時間がたてば破壊するのである。

本報も高速で使用する研削砥石の安全性に関する検討資料を提供する目的で、短時間破壊で求まる破壊強さの近くでのおくれ破壊、静疲労破壊の様子をもう少し詳しく調べることにした。すなわち、結合剤の種類と砥粒粒度を変えて、また回転・曲げ・引張りの三つの荷重の下でこの現象を考察する。ここで、回転試験の簡易試験法としての曲げ試験、あるいは引張試験の有用性も検討する。さらに、長時間にわたる試験は厄介なので、上で得られたデータからのこの試験結果の見通しを考える。

以下では、荷重の上昇過程で破壊する普通に行われる破壊試験で求まる強さを破壊強さとよび、一定荷重の下で破壊するまでの時間を求める静疲労試験（または時間試験）における時間を寿命、強さを疲れ強さとよぶことにする。ここでは、実験結果をワイブルプロットによって整理する。

* 原稿受付 昭和48年7月16日。昭和48年度精機学会関西地方定期学術講演会(昭和48年7月6日)にて発表。

** 正 会 員 大阪大学基礎工学部(豊中市待兼山町1番1号)

*** 大阪大学大学院(現在、東レ(株))

図1 ワイブル分布の確率密度曲線

2. ワイブル分布とその利用

一般に寿命はその時間に対する分布の様子から、指数分布、正規分布、対数正規分布、ガンマ分布、極値分布などによって整理される。ワイブル分布はこれらのいろいろな分布形に対して融通性のある分布である。特に、寿命に関係する因子が非常に多くあって、それぞれの影響のため分布形がわからないとき、データからこれに近似の分布を求め寿命推定を行うことができる有用性をもつ。

いま、信頼性関数を $R(t)$ 、ワイブル分布の累積分布関数を $F(t)$ 、確率密度関数を $f(t)$ とすると、 $t > \gamma$ に対して

$$R(t) = 1 - F(t) = \frac{(t - \gamma)^m}{t_0^m} \quad (1)$$

$$f(t) = \frac{m(t - \gamma)^{m-1}}{t_0^m} \exp \left[-\frac{(t - \gamma)^m}{t_0^m} \right] \quad (2)$$

である。ここで、 m は形の、 t_0 は尺度の、 γ は位置のパラメータとよばれ、この三つで分布形が定まる。図1(a)にみるように、 m の大きさによっていろいろな $f(t)$ の分布をもつ寿命パターンに適合する。 $m=1$ は指数分布、 $m=3.2$ は正規分布であり、故障の立場からは $m \cong 1$ に従って摩耗故障型、偶発故障型、初期故障型に対応する。

γ は固有値をもつ強度分布においてみられるしきい値に当たる (図1(b))。 $\gamma \neq 0$ ではデータをワイブル確率紙にプロットしたとき曲線となり、データを t に対して γ だけずらせ直線に回帰させることによって、 γ を見つけることができる。ここでは、ワイブル確率紙を使用²⁾ し

てデータを整理する。 $\gamma=0$ の場合、分布における平均値 μ と分散 σ^2 (σ は標準偏差で強さと同記号) は

$$\mu = t_0^{1/m} \Gamma \left(1 + \frac{1}{m} \right), \quad \eta = t_0^{1/m} \quad (3)$$

$$\sigma^2 = t_0^{2/m} \left\{ \Gamma \left(1 + \frac{2}{m} \right) - \Gamma^2 \left(1 + \frac{1}{m} \right) \right\} \quad (4)$$

であり、変動係数は σ/μ で定義する。この値は m が小さいほど大きく、 $m < 1$ では1を超える。 σ も m が小さいほど大きい。 η は $F(t) = 0.632$ における t の値で、寿命を扱うときには特性寿命または寿命指数とよばれる。

$\gamma \neq 0$ では、上式の η と μ は γ を t 軸の原点として扱って求まる。また、ワイブル分布の直線へのあてはめは、相対誤差の最も大きい $F(t) = 0.5$ 付近でデータの分布とよく合うようにする必要がある。

破壊強さに対してもいろいろな影響度をもたらし因子が考えられるので、ワイブル分布で整理する。このときは上の各式における時間 t を強さ σ によりかえる。

3. 供試砥石と実験方法

3.1 供試砥石

表1(a)~(c)に併記するように、本研究では、結合剤種類、成形法、粒度の異なった6種類の砥石を使用した。これで回転・曲げ・引張りの各試験片が作られたが、配合と製造条件が同じであっても形状・寸法の影響をうけて、全く同じ状態の砥石が作られたとはいいがたい。

供試材料の項で、64AはWA6とA4の重量比混合物である。結合剤は一般に使用されるタイプであるが、これを焼成状態にしたがって砥石性状を支配する媒溶剤で区別した。(Pb)は酸化鉛、(B)はほう砂、(Li)は炭酸リチウムを使用している。このうち、(Pb)は流込み成形、他はプレス成形 (成形圧 100 kg/cm^2) である。

No. 1~3では、引張試験では切欠試験片を用い、曲げ試験では三点荷重を行った。回転試験では1号平型砥石を用いたが、No. 4の内外径比 k は他に比べ小さい。No. 3と4は同種の近い組成であるが、結合度がやや異なる。

3.2 試験方法

強度試験では負荷上昇率を一定に定め、10分内外で破壊が起こるように、それぞれ引張りと曲げ試験では約 0.4 kg/s 、回転では約 10 rev/s とした。

静疲労試験では、破壊強さの平均値 μ に対して一定荷重 (回転試験では周速 v) σ_s を定め、負荷率 S (安全率の逆数) を次のように定義した。

$$\sigma_s = S\mu \quad (5)$$

表 1

(a) 引張強さ σ_p

No.	供 試 材 料	m	kg/cm ²						備 考	
			γ	$\eta_{0.5}$	η	μ	$\bar{\sigma}_p$	σ	ビット食込み深さ	試験片形状
1	64 A 46 L 7 V (Pb)	3.0	50	95	102	96.5	96.6	10.7	O/B: 0.66 mm	切欠型: のど寸法 14.7w×9.7t
2	64 A 46 N 6 V (B)	3.0	70	114	120	115.7	115	10.3	O/B: 0.58 mm	
3	64 A 46 M 7 V (Li)	3.0	70	111	120	115.0	115	10.3	O/B: 0.63 mm	
5	64 A 46 N 7 V (Li)	1.8	100	137	145	141	140	23.2	O/B: 0.54 mm	平行型: 平行部寸法 30×20w×16t
6	64 A 120 O 7 V (Pb)	1.6	115	175	190	182	182	42.8	O/C: 0.27 mm	

(b) 曲げ強さ σ_b

1	64 A 46 L 7 V (Pb)	2.7	185	232	236	235	230	18	同 上	三点荷重 ¹⁾ : 80×23w×9t
2	64 A 46 N 6 V (B)	2.7	230	282	292	287	287	22		
3	64 A 46 M 7 V (Li)	2.7	210	259	268	264	263	21		
5	64 A 46 N 7 V (Li)	2.7	170	190	193	193	191	8	同 上	四点荷重 ²⁾ : 120×40w×16t
6	64 A 120 O 7 V (Pb)	2.0	200	251	260	255	253	28		

(c) 回転強さ σ_{tmax} (砥石寸法: 300φ×19 t)

No.	供 試 材 料	m	kg/cm ²					rpm		強 さ の 比 較		内外径比 k
			γ	$\eta_{0.5}$	η	μ	σ	μ	σ	σ_p/σ_{tmax}	σ_b/σ_{tmax}	
1	64 A 46 L 7 V (Pb)	1.8	110	148	157	152	27	5 580	490	0.64	1.51	0.42
2	64 A 46 N 6 V (B)	1.8	135	177	189	183	31	6 000	480	0.63	1.57	0.42
3	64 A 46 M 7 V (Li)	1.8	130	169	181	175	30	5 940	490	0.66	1.50	0.42
4	64 A 46 N 7 V (Li)	1.8	170	212	220	214	29	6 730	440	0.65*	0.89* ³⁾	0.25

供試材料欄中の ( ) は媒溶剤タイプの記号。(Pb) は流込み成形, 他はプレス成形。 $\bar{\sigma}_p$ とビット食込み深さは算術平均値。 $\eta_{0.5}$ は分布の中央値。1) 支点距離 $L=50$ mm, 2) 支点距離 $L=100$ mm, 荷重点距離 $l=60$ mm, * 3) 比較対象なきため No. 5 との比較

回転試験の場合, 穴周縁に生じる最大引張応力 σ_{tmax} は連続体の弾性理論によると

$$\sigma_{tmax} = \frac{3+\nu}{4} \frac{\gamma_s v^2}{g} \left(1 + \frac{1-\nu}{3+\nu} k^2 \right) \quad (6)$$

で与えられる。ここで, ν はポアソン比 (0.2), γ_s は密度 (No. 1 で 2.20, No. 2 で 2.29, No. 3 と 4 で 2.20 g/cm³), k は内外径比である。計算にはかっこ内の値を使用した。 σ_{tmax} は v^2 に比例するので S は v でいうと $\sqrt{S}$ に当たる。

静疲労試験では, 強度試験と同じ負荷上昇率で負荷し, 一定負荷 σ_s になったときを時間 t の原点にとった。 S は試験機と試験片寸法の都合で丸められた値にとることは困難であった。

これらの試験結果には, すでに述べたように, 同一ロット内, また同一試験片内での品質むら, 破壊の確率性, 寸法精度, ふん囲気の影響, 試験機精度, 試験全般で生じる確率誤差など多くのものが関係する。

引張りとは曲げでは試験機精度をあげるため, ストレンゲージを利用した荷重計を装置した。静疲労試験では, 引張りでは試験片と並行においた Al 箔の切断, 曲げで

は破壊時にマイクロスイッチを操作させてトリガとし, 時間 t を指示する電気時計および試験機モータを停止させた。長時間たっても破壊しないとき, 一般に 3~4 時間で打切った。

次報で述べるように, 空気中での破壊強さは湿度の影響をうけると考えられる。試験は空調された部屋で行われ, 温度は 20° 前後, 湿度 50% 前後で大きな変化はなかった。

4. 破壊強さ

4.1 引張強さ σ_p および曲げ強さ σ_b

結果は表 1(a) および (b), 図 2 および図 3 のようである。図にみるようにデータを曲線に回帰させることができ, しきい値 γ をもつ。破壊場所を指定した試験片を用いた No. 1~3 では, 形のパラメータ m は 3 に近く, 図 1(a) を参照して破壊の確率密度関数 $f(\sigma)$ はややひずんだ正規分布であることがわかる。曲げの場合, データを近似して直線回帰すると m は 13~15 程度の値となる。この直線近似の影響は次報で触れるが, m が異なっても分散 σ^2 は近い値となる。

図2 引張りおよび曲げにおける破壊強さの分布 (1)

図3 引張りおよび曲げにおける破壊強さの分布 (2)

図4 回転破壊における破壊強さの分布

破壊場所を指定した以上の試験に対し、No. 5と6で採用した平行部をもつ引張試験片および曲げモーメント一定部分をもつ四点荷重の場合では、 m が小さく、したがって分散はやや大きく、 $f(\sigma)$ の分布はいびつになり対数正規分布に近いものになった。また、このような応力状態の下では、引張りの方が曲げよりも分散が大きくなる。

データ数 i の多いNo. 1~3 ($i=30$) では、データの算術平均値 $\bar{\sigma}_p$ または $\bar{\sigma}_b$ 、ワイブル平均値 μ 、中央値 $\eta_{0.5}$ の三つは非常に近い。これは $f(\sigma)$ が正規分布に近い分布をもつためである。

No. 6はNo. 5に比べ分散が大(m が小)きくなった。

この二つは粒度、結合度、結合剤種類、成形法が異なっているが、No. 1と3の分散の様子を参照して、前2者の影響によるものと考えられる。

同一ロットでも各試料の強度はいろいろな原因で変動している。破壊現象は確率的傾向が強いので、ここで用いた試料のばらつき程度では、例えば各試料のビット食込み深さと曲げ強さの間には全く相関は認められなかった。

4.2 回転強さ σ_{tmax}

結果は表1(c)と図4に示してある。試験では破壊回転数を求め、式(6)によって σ_{tmax} を求めた。No. 3を引張りおよび曲げのNo. 5と比較して、 m は曲げより小さく引張りに近い値をもつことがわかる。 $\gamma=0$ として直線に回帰させると m は4.8程度になる。No. 4と3は同じ材料であるが、結合度のちがいを考慮してもなお μ が大きいのは内外径比 k が小さいためである。

4.3 三つの強さの比較

No. 1~3についての比較は表1(c)の終わりにある。強さは曲げ>回転>引張り、 m の値は引張り>曲げ>回転で、分散はこの逆の順に大きい。強さの比は試験方法・試験片形状と大きさ・試験材料で当然異なり、破壊場所を指定しない引張りと曲げとの比較では強さの比も m も異なる。

クラックのような微視的欠陥が強さに影響する場合、最大応力の働く体積部分の大きさが大きく関係する。体積部分が三つの破壊試験においてともに大きかったNo. 5についてみると、 m の値は上とは異なって、曲げ>回転>引張りで、分散はこの逆の順序となる。引張試験(均一応力分布)よりも曲げ試験(不均一応力分布)のほうが破壊強さが大きくなることはWeibullによって確率論的に説明されており⁸⁾、金属の場合 $m=24$ とするとこの比は1.41となり、実験結果とも一致したという。この説明では二つの試験で m が同じ値をもつことを仮定しているので、本研究の場合にはあてはまらない。また上の確率論的説明で寸法効果も説明される。

比較結果をまとめると、

1) 強度分布はしきい値 γ をもつ。データ数が少ないと分布形の推定は当然悪く、また $\gamma=0$ として近似すると m は大きな値となる。しかし分散はあまりちがわない。

2) 最大応力の働く体積部分が大きいほど m の値は

表2 静疲労試験

(a) 回 転								
No.	破壊強さ (rpm) (μ : kg/cm ²)	一定荷重 (rpm) (σ_{imax} : kg/cm ²)	S	m	時 間 (s)			σ/μ
					$\eta_{0.5}$	η	μ	
1	5 580 (152)	5 800(164)	1.08	0.64	2.7	5	7.1	2.2
		5 500(148)	0.97	0.58	250	470	743	2.8
		5 300(137)	0.90	0.50	1 800	3 800	7 220	1.9
2	6 000 (183)	6 200(195)	1.07	{1.0 0.15	60	85		
		6 000(184)	1.0	{0.8 0.15	88	170	(306)	
		5 800(171)	0.93	{0.80 0.30	550	1 700	(4 080)	(5.6)
3	5 940 (175)	6 000(178)	1.02	0.57	32	55	88	3.0
		5 800(167)	0.95	0.44	370	850	2210	5.8
		5 600(156)	0.89	0.38	13×10^3	35×10^3	133×10^3	7.8
4	6 730 (214)	7 000(232)	1.08	0.77	4	7	8	2.0
		6 800(219)	1.02	0.48	22	54	108	4.8
		6 600(206)	0.96	0.41	200	550	1 705	6.7
		6 300(187)	0.88	0.39	13×10^3	30×10^3	108×10^3	7.2

(b) 引張り						
No.	破壊強さ μ (kg/cm ²)	一定荷重 (kg/cm ²)	S	m	時 間 (s)	
					$\eta_{0.5}$	η
5	140	135	0.96	0.13	—	12
		130	0.93	0.12	1 000	27×10^3
		126	0.90	0.12	7 000	180×10^3
6	182	192	1.06	0.14	—	0.1
		175	0.96	0.10	—	0.5
		165	0.91	0.10	400	13×10^3

(c) 曲 げ						
5	191	190	1.00	0.26	7	15
		183	0.96	0.25	36	130
		171	0.90	0.23	17×10^3	70×10^3
6	253	258	1.02	0.30	5	15
		246	0.97	0.27	1800	7×10^3
		236	0.93	0.26	6×10^3	28×10^3
		225	0.89	0.26	50×10^3	200×10^3

小さくなって対数正規分布に近くなり、分散も大きくなる。破壊場所を指定しない試験片では、 m の値は曲げ>回転>引張りの順にある。

3) 破壊強さは一般に、曲げ>回転>引張りであるが、試験片の形状・寸法によってこの比は変化する。応力勾配も関係しており、曲げの引張りに対する比は金属の場合よりはるかに大きい場合も生じる。

5. 静疲労強さとおくれ破壊の著しさ

上で求めた強さのワイブル平均値 μ に対するいろいろ

るな応力レベル σ_s の下で、同じロットの試験片を用い、時間試験を行った結果は表2(a)~(c)のようである。本報で扱った σ_s は破壊強さに近い。これは使用負荷の下での実際試験に対し加速試験ともいえる。

5.1 回転試験および使用周速における安全性の確認

荷重の尺度として回転数 N を用いた。試験結果の一例は図5のようである。測定値は曲線に回帰させることができ、 $m < 1$ である。 γ は η に比べて小さいので、 $F(t) > 0.4$ の部分で直線回帰しても大差はない。 S が減少するに伴い、 m の値は減少する。

S が1付近以上では、荷重上昇過程で破壊するものを生じた。 m が大きくなるのは、破壊強さの分布から考えても、また破壊までの時間 t が荷重上昇時間と同じオーダーであることから当然であろう。また、 $S \geq 1$ では測定点が図6のように折線上にのり、複合ワイブル分布とみなせる場合も生じた。 $S = 0.93$ の場合は曲線に回帰させることもできる。表2(a)のNo.2のところには折線となる二つの直線の m が書いてあるが、かっこで示した μ と σ/μ の値は曲線回帰したときの値である。また表で、 $m < 1$ であるので、 σ/μ は1より大きくなる。つまり標準偏差が平均値を超えるのである。

$\gamma \neq 0$, $m < 1$ に対する $f(t)$ の分布は図1(b)にみるような分布で、部品

寿命でいう初期故障型に当たる。寿命分布形態と応力レベル S の低下に伴う m の減少に関して、金属疲労の場合と比較してみよう。軟鋼圧延棒の回転曲げ疲労では⁴⁾、耐久限度に対し比較的高い応力レベルでは寿命は正規分布するが、応力が低くなると対数正規分布 ($3 > m > 1$) がよくあい、さらに低くなると極値分布が適当になるという。 S の低下に伴って m が減少する傾向は一致するが、砥石では m の値は全般的に小さく、 $S = 1$ でも $m < 1$ であって、金属よりもおくれ破壊現象がはるかに著しいことを示す。破壊強さについてみても m は小さく (分散が

図5 回転破壊における寿命分布 (1)

図6 回転破壊における寿命分布 (2)

図7 一定のSまたは時刻tにおける破壊の累積分布

う。図8(b)から、 S の小さなところではこれは無理な仮定ではない。ここで、 S と η または μ との関係がわかっていると、任意の S 、特に回転破壊に対して安全規則で定められた最大使用周速、すなわち $S=1/4$ における平均寿命と寿命分布が推定できる。また最小寿命 γ も推定できる。

No. 4についてみると、 $S=1.08\sim 0.88$ の間の η がわかっているだけであるから、 $S=0.25$ における η を推定するにはいろいろなやり方がある。図9の曲線Cは $S\text{-}\log_{10}\eta$ 曲線(あとの図11(b)参照)に $S=0.96$ と 0.88 の間で接線を引いて得られたものである。 $\log_{10}\eta$ は S の減少に対して大きくなる方向に流れるから、 $S=0.25$ における実際の値はこの関係より求まる値よりはるかに大きい。曲線Bはこのことを考慮して $1/S$ と $\log_{10}\eta$ の間で上の四つの実験点がのるように直線近似したものである。曲線Aは $\log_{10} 1/S$ と $\log_{10}\log_{10}\eta$ の間で同様に曲線近似をした一例である。 $S=0.25$ では、曲線A, B, Cに対して η はそれぞれ $3\times 10^{189}\text{ s}\doteq 10^{186}\text{ h}$, $3\times 10^{90}\text{ h}$, $4\times 10^{17}\text{ h}$ となる。 m 一定の仮定であるから、図(5)の $S=0.88$ の曲

大きく), $\gamma=0$ とすると金属では25程度の値が多いが、砥石では13~15程度以下であった。

また、金属疲労で扱われる $S\text{-}N\text{-}P$ 線図に相当するものをNo. 4を例として作ってみると図7のようになった。

次に、四つの回転試験について、負荷と平均寿命 μ および m との関係を調べると図8のようになる。図(a)では回転数の減少に伴って平均寿命が大きくなるのびることがわかる。ここで、普通に行われる破壊試験(speed test)で求まる破壊周速は $\mu=120\text{ s}$ 付近のものに対応する。

図(b)は S を小さくしていくと m が小さな値に収束する傾向をもつことを示している。図(c)は(a)の N を S に直したもので、各曲線はほぼ重なり、 S の低下に伴って μ は右のほうに流れる。

ここでの実験は S が大きいのので加速寿命試験といえる。そこで、加速寿命試験とものと S の小さい値の下で行われる実物試験との間にアナロジーを成立させるために、 S が変化しても m は一定であると仮定しよ

(b) S-m

(c) S-μ

(a) N-μ

図8 回転破壊の寿命試験における負荷と m , μ の関係

図9 η - S 関係の推定

図10 曲げ破壊における寿命分布

線が上の η まで平行移動するわけで、ある意味で η の下限値を与える C の場合ですら $\tau = 2.7 \times 10^{16}$ h となる。この τ は砥石を廃棄するまでの使用時間に比べて、はるかに長いといえるから、使用中に静疲労による破壊は生じないと推定できる。ついでに、使用周速を安全率 1.5 以上とするとところもあるので、C からこの場合の τ を推定すると 4.6×10^{11} h となる。これも安全である。

5.2 引張りおよび曲げ試験

この二つの試験でも回転試験と同様な結果が得られた。結果の一例は図 10 に、そのまとめは表 2(b),(c) に示してある。 m の値は回転試験よりさらに小さく、したがって破壊時間のばらつきが大きく、おくれ破壊現象が著しくなる。 m が小さいので、 μ/η と σ/η は大きくなり ($m < 0.3$ では σ/μ は 10 を超える)、その推定誤差も増すので、表には $\eta_{0.5}$ と η を示すとどめた。

5.3 回転・曲げ・引張りの比較

三つの場合における S に対する m と η の変化を比較してみると、図 11 のようになる。図 (a) において、 m はいずれも小さな一定値に収束する傾向にあり、この値は、回転 > 曲げ > 引張りである。分散はこの逆である。図 (b) では、 S の低下に伴って m の大きさと同じ順に疲

(a) S - m (b) S - η 図11 三つの寿命試験における m , η の比較

勞現象が著しくなる傾向がみられる。強さの場合に比べ、回転のほうが曲げより分散が小さく、 m と疲労現象が大きくなるのは回転で起こる振動の影響であろうと考えられる。引張りでは μ が大きい分散も大きいことに安全上注意を要する。No. 5 と 6 を比較してみると、細粒である後者のほうが疲労現象が著しくない。粗粒の方がひびわれや亜結晶粒界のような欠陥が多いとみるべきであろう。

砥石材料の静疲労現象を検討する場合、回転試験は資材と装置の上で面倒である。この代用として回転試験と同様不均一応力分布であり、静疲労の様子も類似し、また引張りほど分散の大きくない四点荷重の曲げ試験がすすめられる。しかし、そのデータの考察には図 11 の傾向を考慮すべきことはいうまでもない。

以上の静疲労試験について得られた結果をまとめると、

1) いずれの荷重方式でも一定荷重下の寿命分布は $\tau \neq 0$, $m < 0.8$ で、金属の場合より m が小さく分布形も異なる。また、 m は S の低下に伴って小さな一定値に収束する傾向をもつ。

2) m の値は、回転 > 曲げ > 引張りの順で、この逆の順に分散とおくれ破壊現象が著しい。

3) 静疲労現象は、回転 > 曲げ > 引張りの順に著しい。破壊強さの場合と比べて、回転と曲げの順序が逆転するのは振動の影響と考えられる。

4) 細粒のほうが静疲労現象が小さい。

5) $m < 1$ なので、砥石の寿命はワイブル分布で整理すると都合がよい。

6) ここで行った実験を加速寿命試験と考え、 S が変

化しても m は一定であると仮定し、推定した $S-\eta$ 関係を用いて、最高使用周速を規定する安全規則における $S=1/4$ の場合における最小寿命を検討した結果、砥石の全使用時間に対し静疲労に関して十分安全なことがわかった。

7) 回転静疲労試験の代用として、四点荷重による曲げ静疲労試験がすすめられる。

6. 結 論

高エネルギー研削を目的とした高速研削における作業の安全性の立場から、最大使用周速選定のための資料を提供する目的で、回転する砥石車におけるおくれ破壊現象と静疲労現象を調べた。また、この、簡易試験法を見いだすために、曲げと引張りの場合とも比較した。データはワイブルプロットによって整理された。

まず、三つの破壊法における荷重上昇過程で破壊するときの強さを求めた。この結論は 4.3 項にあるように、 $r \neq 0$ で $m > 1$ であって、 m の値は曲げ > 回転 > 引張りの順で、金属の場合より小さい。平均強さもこの順であるが、試験片形状・寸法のほか、当然結合剤種類・粒度・成形法の影響も受ける。

次に、この平均強さに対して負荷率を定め、一定荷重

下で静疲労試験を行った。結論は 5.3 項にまとめてある。 $r \neq 0$ 、 $m < 0.8$ で、金属の場合より m が小さく、寿命分布形が異なる。 m の値は、回転 > 曲げ > 引張りの順で、寿命の分散、したがっておくれ破壊現象はこの逆の順に大きい。静疲労現象は m と同じ順に著しい。ここで行った実験を加速寿命試験と考え、安全規則で定める破壊周速の $1/2$ 周速における最小寿命を推定したところ、砥石の全使用時間において静疲労による破壊は起こらないことがわかった。また、回転疲労試験の代用としては曲げ試験がすすめられる。

終わりに、試料についてお世話になった瑞穂研磨砥石(株)松森部長にお礼を申し上げる。またこの研究の一部は文部省科学研究費の補助によった。

参 考 文 献

- 1) 山本 明, 堀 素夫, 上田忠男: 研削砥石の回転破壊強さ, 日本機械学会論文集, **36**, 284 (1970) 655.
- 2) 例えば, 真壁 肇: ワイブル確率紙の使い方, 日本規格協会 (1966).
- 3) W. Weibull: A Statistical Distribution Function of Wide Applicability, J. Appl. Mech. (1951) 293 ほか. W.D. Kingery: Introduction to Ceramics, Wiley, New York (1960) 607. 横堀武夫: 材料強度学, 技報堂 (1955) 87.
- 4) 河本 実, 中川隆夫ほか: 疲労寿命の統計的分布とこれに及ぼす熱処理の影響, 材料試験, **9**, 87 (1960) 24.

情 報

グループテクノロジー導入機運高まる

多機種中・少量生産の機械工業部門で、省力化と合理化をめざすグループテクノロジー (GT) 導入の動きが急ピッチになってきた。GT は機械部品を形状、寸法、材質、加工工程などの類似性でグループ化し、設計、作業準備、加工、組立などでこれを共用するもので、NC 工作機械、無人化工場になるとさらに導入の必要性が高まる。業界では工作機械メーカーなどが強い関心を示し、なかでも豊田工機は受注から出荷まで一貫したトータルシステムへの GT 導入研究に乗り出したが、業界の GT 導入熱に対応して機械振興協会 (会長・土光敏夫氏) も新たにトータルシステムや鍛造品への適用について研究に着手する方針を打ち出した。

産業界では現在でも経済性を貫くため、部品などの標準化やモジュール化が進められているが、これに適合しないものについて、約 10 年前欧州で考え出されたのがこの GT である。最初は主として汎用工作機械による多機種・少量生産を大量生産方式に近づけるため部品の加工技術面の類似性をもとにグループ化を進めた。わが国ではさる 42 年機械振興協会が研究会を設けて GT の導入と取組んだのがそのはしりである。

同協会の調べによると、現在 GT を導入している機械工場は大手を中心に 170 にのぼるといわれる。これは過去 4 年間でざっと 3 倍になったわけで、大手に限ってい

えば約 1 割が導入していると推定されている。業種別では産業機械で採用している工場が 55、電気機械が 48、工作機械が 37、輸送機械が 17 などとなっている。また将来導入する計画のある工場は電気機械 32、産業機械 26、輸送機械 13、金属部品 11 など約 100 工場にのぼり、GT への関心が急速に高まっている。

GT 導入のメリットは、①コード化で部品照合が容易となり「職場の生き字引」が不要になる、②電算機導入がしやすく、NC 工作機械の利用効率が高まる、③共通の治工具類を使うので、準備時間や手扱い時間がはぶける、④工場内運搬経路が短くなり労働生産性が向上する、などである。このため多様化生産方式を採用する工作機械各社の導入機運が特に高いといわれている。

一方、NC 工作機械の場合、NC プログラミングを GT 化すると巨大な電算機などは不要になる。このことはマシニングセンタ、群管理システム、工業用ロボットなどでも GT が効力を発揮することを意味しているという。

さらに最近では受注から出荷に至るトータルシステムに GT 導入が考えられ、豊田工機で設計が進められている。同社の場合すでに設計、機械加工で GT を完全活用しているが、運搬や資材管理などにもこれを拡大しようというわけである。東欧では最近、鋳造品や塑性加工品などについても GT が開発されており、機械振興協会でも研究を急ぐことにしている。(服部 敏夫)