

Research Report of the Research Institute
of Industrial Safety, RIIS-RR-89, 1989
UDC 620.173.24:620.178.3:621.922.3:678.063

有機質結合剤を用いた微細砥粒砥石の疲れ強さに関する研究*

桑川 壮 —**

Fatigue of Fine Grain Grinding Wheels binded with Organic Bond

by Soichi KUMEKAWA**

Abstract; Recently, grinding processes are more widely applied for machining parts of computers, video equipment, cameras, etc. than even before. In the process of grinding these parts of newly developed equipment, the grinding wheels are binded with organic bonds.

In order to reduce ill effects of heat produced in the works by grinding, hardness grade and strength of the grinding wheels are required to be much lower than those of general-type grinding wheels.

With more application of such fine grain grinding wheels binded with organic bond, their fracture incidents are also being increased in manufacturing workplaces.

In general, a high-speed rotating grinding wheel as a tool tends to give rise to serious hazards, resulting in a wheel fracture incident. In order to prevent such hazards, investigation of the strength of grinding wheels is necessary as a basis of scientific discussion. However, studies on strength of fine grain grinding wheels binded with organic bond have not been reported so much. Particularly, research reports on strength behavior of fine grain grinding wheels, binded with organic bond, under repeating load have not been published to date.

This study features the method that diametral compression loading, as shown in Fig. 2, is applied to repeating load on the specimens. Two types of specimens used in this study. The one is the grinding wheel which is binded with resinoid bond (grain "GC", grain-size 800, hardness grade F) and the other binded with PVA-phenol mixed bond (grain "GC", grain-size 3000, hardness grade H).

Figure.6 shows the experimental results of statical loading test in the diametral compression method, and experimental results of repeating loading test in the same method are shown in Figs. 7 and 8.

It is confirmed experimentally that the results of repeating loading test of the fine grain grinding wheels binded with organic bond do not always depend on the effect of time-dependance (delayed fracture) based on experimental results of the dead load type compression test in which a dead load is applied on specimens for 100 hours.

The author concludes from the experiment conducted that the strength of fine grain grinding wheels binded with organic bond, under repeating load, depend upon the cycle number of repeating load that leads to fracture.

Keywords; Fatigue, Fracture, Grinding Wheel, Fine Grain, Organic Bond, Repeating Load, Diametral Compression Test

*1989年7月 砥粒加工学会ABTEC'89にて一部発表

**機械研究部 Mechanical Safety Research Division

1. 緒 言

近年、コンピュータ機器および情報通信機械をはじめオーディオ機器・ビデオ機器などの磁気ヘッド等の精密研削加工や、シリンダー・圧延ロール・ピストンピン等のロッド類の仕上げ研磨あるいは、ノズル（Al, SUS）、カメラ圧板（Al）等の研磨仕上げに研削加工が適用されている。これらの新しい材料部品の研削加工には、有機質原料の特殊結合剤を使用した研削砥石が多く使用されるようになってきている。

これらの加工分野で使用される研削砥石は、粒度が600番から3000番、5000番という非常に細かい砥石が用いられており、かつ被研削材の加工面は、その用途上極めて研削熱による加工変質層を少なくすることが要求されることから、研削砥石の結合度も低く軟質であり、従来から多く使用されている一般の研削砥石とは異なった機械的特性を有するものである。

このような有機質結合剤を用いた微細砥粒研削砥石の使用が多くなってきている傾向の中で、その回転中における破壊事故の発生も増加しつつあるのが現状である。研削作業においては、工具としての研削砥石が高速回転状態で加工を行うため、回転中の研削砥石が何らかの原因によって破裂する砥石破裂事故は、研削作業における災害のうち最も重篤な災害となる危険を有している。

ところで、研削砥石に関しては昭和46年に研削盤等構造規格^{*1)}が施行され、研削砥石の安全性に関する構造的要件が規定された。例えば、研削砥石の最高使用周速度の決定法およびそれを基準とした1.5倍の速度における回転試験（製品の強度保証のための非破壊試験）等が規定されているが、当時は上述したような微

細砥粒を用いた有機質結合剤の特殊な研削砥石は使用されていず、一般の研削砥石を対象とした規定である。従って、近年多用されるようになってきた微細砥粒砥石の繰り返し荷重下における破壊強度の挙動を把握することは、今後における研削盤等構造規格の見直しなど研削砥石の安全に関する基準の適性化のため必須であり、また、その安全な使用方法を国が指導するためにも必要なデータとなる。

このような必要性から、本報では、有機質結合剤を用いた微細砥粒研削砥石の静的破壊強度と繰り返し荷重下における破壊強度の挙動について実験的に究明し、検討を行った。

2. 実 験

2.1 理論と荷重方式

一般に平形砥石の回転強度を検討する場合に無負荷で回転させた時に生ずる遠心力による破壊回転周速度をもって評価しているが、この場合には遠心力により回転中の平形砥石に周方向応力と半径方向応力が主応力として発生し、このうち周方向応力 σ_θ の分布は、弾性論で平面応力状態として解くと、Fig. 1に示すごとく中心孔の縁で最大値をとり、その値 $\sigma_\theta \max$ は一軸引張応力として(1)式によって求められる。

$$\sigma_\theta \max = \frac{3 + \nu}{4} \frac{\gamma}{g} \omega^2 (b^2 + \frac{1 - \nu}{3 + \nu} a^2) \dots \dots (1)$$

ここに a, b : 回転体（砥石）の内、外半径
そして、破壊に関する最大応力説¹⁾では、この最大

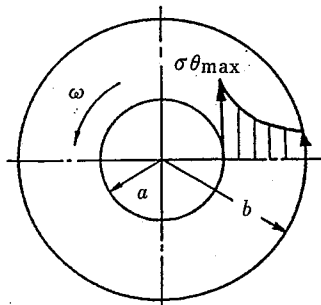


Fig. 1 Tangential stress in a rotating grinding wheel.
回転中の砥石に発生する周方向応力

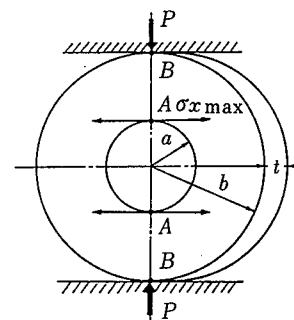


Fig. 2 Maximum tensile stress in a grinding wheel under compression load
圧縮荷重により発生する最大引張り応力

*1) 昭和46年3月18日労働省告示第8号

*2) Timoshenko & Goodier, "Theory of Elasticity" においても、円板の内外径比が0.5の場合のみ理論解が示されているにすぎない。

の周方向応力 $\sigma_{\theta \max}$ の値が平形砥石の回転破壊に最も大きく関与するとされている。

一方、Fig. 2に示すような直径方向に圧縮荷重を受ける中心孔を有する円板においては、中心孔の縁の荷重方向の点Aで圧縮荷重Pに垂直な一軸引張応力 $\sigma_x \max$ が発生し、Pの増加に伴ってその引張応力 $\sigma_x \max$ は増大してゆき、ついにはABに沿って破壊するものと考えられる。そして、点Aに発生する一軸引張応力は、弾性論による解析は、一般には容易でないが*2)次の近似式によって与えられている²⁾。

$$\sigma_x \max = K \frac{P}{2(b-a)t} \dots\dots\dots(2)$$

- ここに K : a/bの函数である応力分布係数
- t : 円板の厚さ
- g : 重力の加速度
- γ : 回転体(砥石)の単位体積重量
- ν : 回転体(砥石)のポアソン比
- ω : 回転体(砥石)の回転角速度

すなわち、Fig. 1の場合の $\sigma_{\theta \max}$ とFig. 2の場合の $\sigma_{\theta \max}$ は、共に最大の周方向の一軸引張応力であり、破壊の形態も両者の場合ともに、これらの一軸引張応力に垂直な方向に亀裂が進行し破壊に到るので、アナロジーとして、破壊に関する中心孔の縁に発生する一軸引張応力を考えることができる。また、以前筆者が行ったビトリファイド砥石の疲れ強さについての研究³⁾においては、幅方向の両側に50Rの円弧切欠をもった厚さ一様な矩形試験片を一軸引張の荷重方式により繰返し試験を行ったが、引張荷重方向に対する試験片セットの際の芯出し精度の問題やチャック部における応力集中を避ける注意などの点で、適性な荷重条件が整っていると思われるデータの採取条件を整えることが容易でなかった。その点において、Fig. 2に示す荷重方式は、比較的实验条件を整え易いこと、また試験片の形状が実際に使用される平形砥石に準じているなどの点も有利であり、本研究における荷重方式としては、Fig. 2に示した直径方向圧縮試験(以下本報では、単に“圧縮試験”と称する)を採用することとした。

2.2 試験片

本研究で用いた供試体は、砥粒GC、粒度800、結合度Fのレジノイド結合剤の砥石および砥粒GC、粒度

Specification of specimens

Kind of bond	Grain	Grain size	Grade
Resinoid bond	GC	800	F
PVA-phenol mixed bond	GC	3000	H

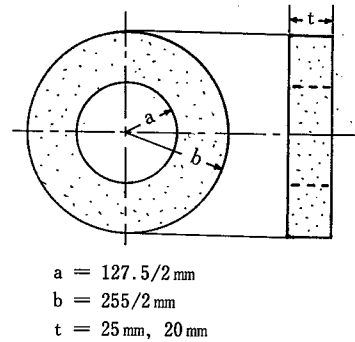


Fig. 3 Specification and figure of specimens. 試験片の仕様と形状

3000、結合度HのPVAフェノール樹脂混合体結合剤の砥石の2種類である。繰返し圧縮試験片および静的圧縮試験片の形状寸法はFig. 3に示すように、内半径 $a = 127.5/2\text{mm}$ 、外半径 $b = 255/2\text{mm}$ 、厚さ $t = 25\text{mm}$ (レジノイド結合剤の試験片については、試験機の荷重容量の都合で20mmとした)の内外径比0.5の平形砥石である。

2.3 実験装置および実験方法

圧縮試験においては、荷重点における集中荷重により試験片が局部的にchippingを起こすことを防止するために、市販されているアルミフォイル(厚さ15 μ)を8枚重ねに折ったものを試験片と加圧板との間に挟

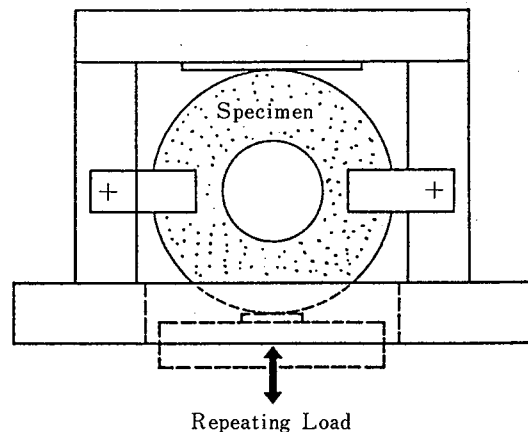


Fig. 4 Specimen holder for repeating compression test. 繰返し圧縮試験用試験片保持具

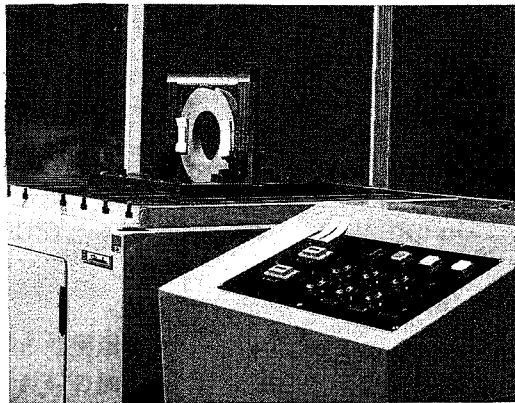


Photo. 1 Repeating compression test.

繰り返し圧縮試験の状況

んで負荷を行った。

静的圧縮試験は、荷重容量10tonの万能試験機テンシロン（東洋ボールウィン社製）を用いて、負荷速度0.2mm/minにて徐々に荷重を増加させ試験片の破壊荷重を測定し、破壊応力の算出は(2)式において、 $a = 127.5/2\text{mm}$, $b = 255/2\text{mm}$, $t = 25$ (20) mm, $K = 6.5^2$ として導いた次式により行った。

$t = 25\text{mm}$ の場合

$$\sigma_{x\max} = 2.039 \times 10^{-3} P \quad (\text{kgf/mm}^2) \quad \dots(3)$$

$t = 20\text{mm}$ の場合

$$\sigma_{x\max} = 2.594 \times 10^{-3} P \quad (\text{kgf/mm}^2) \quad \dots(4)$$

また、繰返し圧縮試験はFig. 4に示した試験片保持具をPhoto. 1に示すように万能疲れ試験機UF-500型（島津製作所社製）に装着し、毎分1000回のサイクルで片振り圧縮荷重を繰返し加え、破壊までの繰返し数を測定した。設定した繰返し荷重において試験片が破壊しない場合の最大繰返し数は、 5×10^6 回とした。

なお、繰返し圧縮試験結果が、単に荷重負荷時間（例えば、毎分1000回のサイクルで 5×10^6 回の所要時間としては、約83.3時間となる）に依存するものであるか否かを検討するためにFig. 5に示すようなレバー式の死荷重圧縮試験装置を用いて時間依存試験を行っ

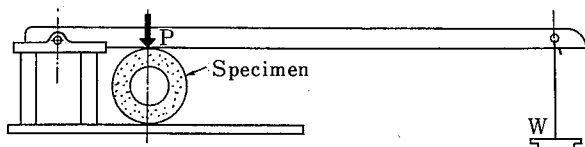


Fig. 5 Dead load type compression test equipment
レバー式死荷重圧縮試験装置

た。

3. 実験結果

3.1 静的圧縮試験結果

繰返し圧縮試験を行うにあたり、各供試体の静的破壊応力を知るために、レジノイド結合剤の砥石とPVAフェノール樹脂混合体結合剤の砥石とを、それぞれ10個の試験片について静的圧縮試験を行いその破壊荷重Pを測定し、(3)式および(4)式により破壊応力 $\sigma_{x\max}$ を算出した。静的破壊応力の平均値および変動係数C.V.は、

レジノイド： $\sigma_R = 186.0 \text{kgf/cm}^2$ (C.V.=1.25%)

PVAフェノール混合体：

$\sigma_P = 80.76 \text{kgf/cm}^2$ (C.V.=7.35%)

である。また、各試験結果を横軸に破壊応力を採り、縦軸に累積破壊率を採ってプロットするとFig. 6に示すようになり、このFig. 6による破壊率50%の破壊応力は、

レジノイド： $\sigma_{R50} = 186.0 \text{kgf/cm}^2$

PVAフェノール混合体：

$\sigma_{P50} = 80.74 \text{kgf/cm}^2$

となる。すなわち、レジノイド結合剤の砥石の方がPVAフェノール混合体結合剤の砥石に比べ静的破壊応力は、2.1~2.5倍ほど高い値を示している。なお、本報では、上記の破壊率50%の破壊応力 σ_{R50} および

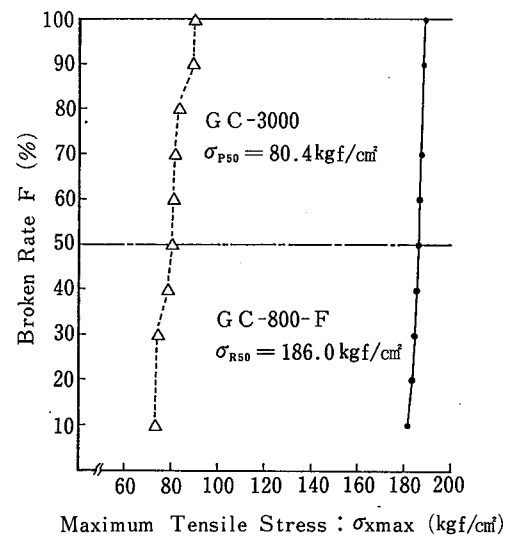


Fig. 6 Maximum tensile stress ($\sigma_{x\max}$) in statical compression test.
静的圧縮試験結果

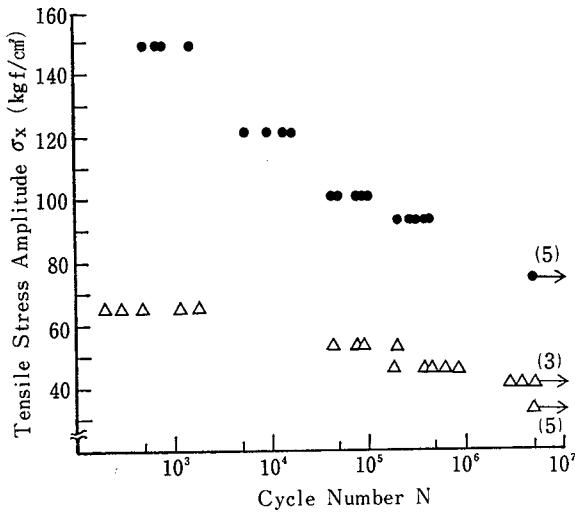


Fig. 7 Relation between tensile stress amplitude and cycle number to failure by repeated compression load.
 繰り返し圧縮試験における応力振幅と破壊までの繰り返し数の関係

σ_{p50} を以下において静的強度と称する。

3.2 繰返し圧縮試験結果

繰返し圧縮試験において設定した応力は、上記のそれぞれの供試体の静的強度 σ_{R50} および σ_{p50} の40%、50%、56.25%、65% および80%の各応力レベルである。これらの各応力レベルにおける繰返し圧縮試験の結果は、Fig. 7に示すとおりである。横軸に荷重繰返し数を対数で採り、縦軸に片振りの応力全振幅を採っている。●印はプロットした繰返し数で破壊したレジノイド結合剤の砥石の場合を示し、●→印は 5×10^6 回で破壊しなかったレジノイド結合剤砥石の場合を示している。また、△印はプロットした繰返し数で破壊したPVAフェノール混合体結合剤砥石の場合を示し、△→印は 5×10^6 回で破壊しなかったPVAフェノール混合体結合剤砥石の場合を示し、()内の数字は、破壊しなかった試験片の個数を示している。なお、繰返し圧縮試験の結果を、縦軸に静的強度に対する繰返し応力振幅の比 K を採って表示するとFig. 8のようになる。

レジノイド砥石の繰返し圧縮試験結果について注目してみると各応力振幅における破壊までの荷重繰返し数には、バラツキがみとめられるが、全体の試験結果のプロットからは、右下がりの直線傾向が顕著にみら

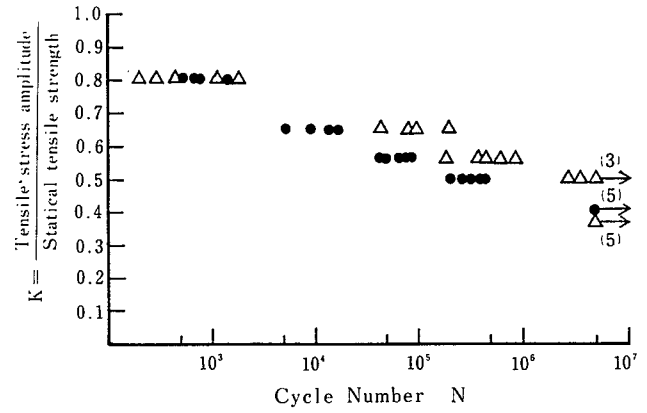


Fig. 8 Relation between ratio of tensile stress amplitude to static tensile strength and cycle number to failure by repeated compression load.
 繰り返し圧縮試験における静的強度に対する応力振幅の比と破壊までの繰り返し数の関係

れる。

しかし、静的強度 σ_{R50} の40%の応力レベルでは、5個の試験片の全てが 5×10^6 回の繰返し数で破壊しなかった。また、PVAフェノール樹脂混合体結合剤の砥石の場合は、バラツキがレジノイド結合剤の砥石に比べてかなり大きい。Fig. 8で認められるように右下がりの傾きは、レジノイド結合剤の砥石のそれに比べてPVAフェノール結合剤砥石の方が小さい。そして、静的強度 σ_{p50} の50%の応力レベルでは、5個の試験片のうち3個が 5×10^6 回で破壊せず、静的強度 σ_{p50} の40%の応力レベルでは、5個の試験片の全てが 5×10^6 回の繰返し数で破壊しなかった。

Fig. 9は、筆者が以前行った一般の粗研削に使われているレジノイド砥石(砥粒:A, 粒度:20, 結合度:P)の繰返し圧縮試験の実験結果⁴⁾を本研究のレジノイド砥石の試験結果に重ねてプロットしたものである。●印および●→は、Fig. 8の場合と同じであり、本研究において実験を行ったレジノイド砥石(砥粒:GC, 粒度:800, 結合度:F)の繰返し圧縮試験結果であり、×印および×→は、粗研削に使われるレジノイド砥石(砥粒:A, 粒度:20, 結合度:P)の繰返し圧縮試験結果である。このFig. 9を見ると、砥粒、粒度、結合度に大きな差異があるにもかかわらず、非常によく似た挙動をしめしている。

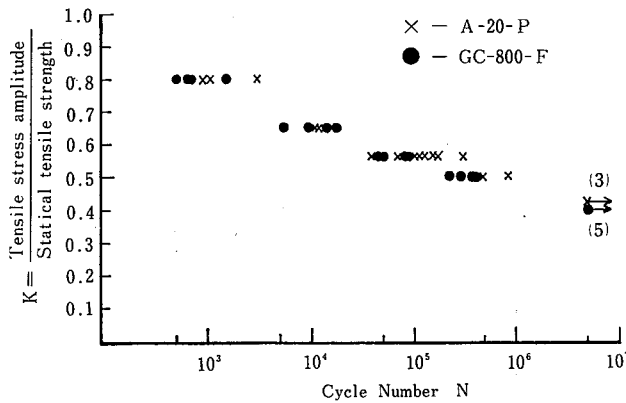


Fig. 9 Relation between ratio tensile stress amplitude to static tensile strength and cycle number to failure by repeated compressive load (resinoid bonded wheels)
 繰り返し圧縮試験における静的強度に対する応力振幅の比と破壊までの繰り返し数の関係（レジノイド結合剤砥石の場合）

3.3 時間依存試験

死荷重圧縮試験装置を用いた時間依存試験は、各試験片ごとに100時間の負荷時間を設定して実験を行った。

設定荷重は、静的強度の56.25%の応力レベルであり、レジノイド砥石およびPVAフェノール混合体砥石ともに、各々5個の試験片について実験を行った

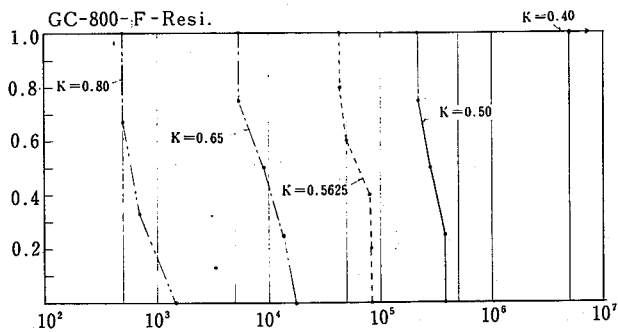


Fig. 10 Relation between cycle number and nonfailure rate (resinoid bonded wheels)
 荷重繰り返し数と非破壊率の関係（レジノイド結合剤砥石の場合）

が、その結果は、100時間の負荷に対して全ての試験片が破壊しなかった。

4. 考 察

以上の実験結果から、本研究で使用した供試体では、静的圧縮試験においてはレジノイド砥石の方がPVAフェノール混合体砥石に比べ破壊強度が2.1~2.5倍ほど高いが、繰返し圧縮試験においては、両者共にその破壊強度は、荷重繰返し数に依存して低下する傾向が著しいことが判った。しかし、レジノイド砥石は静的強度の50%の応力振幅において荷重繰返し数 4×10^5 回未満で5個の試験片の全てが破壊しているが、PVAフェノール混合体砥石では、同じ静的強度の50%の応力振幅において 3×10^6 回以下の荷重繰返し数では、試験片の破壊は発生していない。また、5個の試験片の内の3個までが、この応力レベルにおいて荷重繰返し数 5×10^6 回でも破壊を発生していない結果となっている。

また、レジノイド砥石およびPVAフェノール混合体砥石ともに、静的強度の56.25%の応力レベルにおける100時間の死荷重圧縮試験装置による時間依存試験においてそれぞれの供試体の全ての試験片が破壊しなかったにもかかわらず、同じ応力レベルの繰返し圧縮試験においては、 8.7×10^5 回（毎分1000回のサイクルで所要時間14.9時間）以下の荷重繰返し数でそれぞれの供試体の試験片の全てが破壊していることから、繰返し圧縮試験結果は、単に負荷時間に依るものでないことが確認された。

次に、繰返し圧縮試験の実験結果に関して、ある繰返し数までに試験片が破壊しない確率を非破壊率 P_n と呼ぶこととし、次式で P_n を求めた。

$$P_n = \frac{M - M_f}{M} \dots\dots\dots(5)$$

ここにM： ある応力振幅で実験した試験片の数
 M_f： Mと同条件の実験において、ある繰返し数Nまでに破壊した試験片の数
 荷重繰返し数Nと非破壊率 P_n についてプロットしたものが、Fig. 10（レジノイド砥石の場合）およびFig. 11（PVAフェノール混合体砥石の場合）である。

すなわち、非破壊率 $P_n = 1.0$ の場合の各応力振幅レベルにおける荷重繰返し数Nのおよその最大値は、Table 1 に示す通りである。これらの P_n 値については、実験結果によって算出したものであるが、実験的

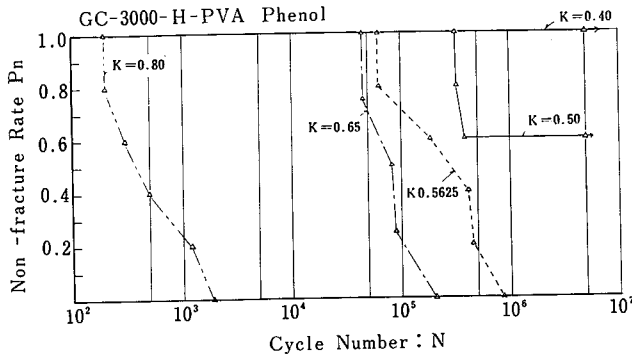


Fig. 11 Relation between non-fracture rate and cycle number to failure (PVA-phenol bonded wheels) 非破壊率と繰返し数の関係 (PVA フェノール混合体砥石の場合)

参考値として利用できるものとする。

ところで本報では、レジノイド結合剤およびPVAフェノール混合体結合剤を用いた微細砥粒砥石の疲労試験結果に関して、主として応力振幅に対する破壊繰返し数を取上げ比較検討を行ったが、破壊力学的観点から疲労現象を考えると、繰返し荷重による。

I. 亀裂の発生するまでの段階

II. 亀裂が伝ば成長する段階

III. 疲労亀裂がある限界に到り最終破壊を起こす段階があることが知られている⁵⁾。本研究に用いた供試体の疲労現象につき、結合剤単体としての疲労強度に関して、上記の各段階における解明も、今後の研究の課題として残される問題と考える。

5. 結 言

本報では、変動荷重の下における有機質結合剤を用いた微細砥粒砥石の破壊強度特性を明らかにするため、直径方向圧縮荷重方式により砥粒がGCで、粒度800番のレジノイド結合剤砥石および粒度3000番のPVAフェノール混合体結合剤砥石について、繰返し荷重を加えた場合の破壊強度の挙動について実験的に検討を行ったものであるが、ともにその破壊強度には荷重繰返し数依存性があり、Fig. 8に示すように疲労挙動が著しいことが判明した。そして、静的強度では、レジノイド結合剤砥石の方がPVAフェノール混合体結合剤砥石に比べて2.1~2.5倍ほど高いが、PVAフェノール混合体結合剤砥石の方がレジノイド結合剤砥石に比べ疲労による強度低下の傾向がやや緩やかであることが認められた。

また、静的強度に対する各応力レベルにおける非破

Table 1 Maximum value of cycle number at nonfailure rate Pn=1.0 in each stress amplitude. 非破壊率Pn=1.0の場合の各応力振幅レベルにおける荷重繰返し数の最大値

K = 応力振幅 / 静的強度	0.4	0.50	0.5625	0.65	0.80
レジノイド	>5×10 ⁶	2×10 ⁵	4×10 ⁴	5×10 ³	4×10 ²
PVAフェノール	>5×10 ⁶	3×10 ⁶	6×10 ⁴	4×10 ⁴	10 ²

壊率Pnと荷重繰返し数の関係が実験的に得られたことなどから、有機質結合剤を用いた研削砥石の強度評価を行う場合に従来のように単に静的強度だけで評価することは充分とは云えなく、本報のデータをも加味した評価が必要と考える。

(平成2年4月20日 受理)

参 考 文 献

- 1) 例えば、井上英夫, 37-2 (1971-2), 109
- 2) Max M. Frocht, "Strength of Materials", N. Y. Ronald Press, 1951
- 3) 桑川, 産業安全研究所研究報告, RIIS-RR-23-4, 1974
- 4) 桑川, 産業安全研究所技術資料, RIIS-TN-79-1, 1979
- 5) 小林英男, 中沢一, 固体の強度, 共立出版, 1976