

# 産業安全研究所技術資料

TECHNICAL NOTE OF  
THE RESEARCH INSTITUTE OF INDUSTRIAL SAFETY

1979

レジノイド砥石の疲れ強さに関する一実験

桑川 壮一

# レジノイド砥石の疲れ強さに関する一実験\*

桑川 壯一\*\*

## One Experiment on Fatigue of Resinoid Grinding Wheel

by Soichi KUMAGAWA

In grinding that a rotating grinding wheel of high speed is used as a tool, the heaviest hazard results from a bursting accident of the rotating grinding wheel.

Kinetic energy of a rotating grinding wheel is proportion to the mass and a square of rotating speed of the wheel.

And most of grinding wheels in practice are used in very high kinetic energy state, since the operating speed and size of the grinding wheels are increasing recently. Therefore when the above grinding wheel bursts away in use, it is assumed that damage of the hazard from that will expand greater for men and facilities. In order to prevent like that hazard, one of the most important and fundamental subjects is to investigate on strength of grinding wheels scientifically.

Recently in Japan, an output of resinoid wheel is almost twice of it of vitrified wheel. However, it is regretful that, in spite of the large number of reports on strength of vitrified wheel, only a few studies have been done on strength of resinoid wheel. Especially, research reports on strength behavior of the resinoid wheel under repeating load have apparently not been published to date.

And then we investigated about one case of the strength behavior of resinoid wheel under repeating load.

In this study, diametral compression loading method as shown in Fig. 4 is used in order to apply repeating load on specimens. Specimens used in this experiment are resinoid grinding wheels of grain A, grain-size 20, grade P and some vitrified wheels of grain WA, grain-size 60, grade K as shown in Fig. 5.

Experimental result of static loading test of the diametral compression method is shown in Fig. 8, and it of repeating loading test of the same method is shown in Fig. 9 and Fig. 10.

It is confirmed experimentally that the result of repeating test of the resinoid wheel does not depend only on effect of time-dependance (delayed fracture) based on our experimental result of static fatigue test that dead load applies on the resinoid specimen for 48 hours.

We conclude from the experiment described above that the strength of resinoid wheel under repeating load depends upon the cycle numbers of repeating load up to fracture and the resinoid wheel has sharper fatigue behavior than it of vitrified wheel within the limits of this experiment.

---

\* 1979年6月第9回安全工学シンポジウムにて一部発表

\*\* 機械研究部 Mechanical Engineering Research Division

### 1. 緒 言

研削作業においては、工具としての研削砥石が高速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、研削作業災害のうち最も重篤な災害となる危険を有している。

回転中の研削砥石を高速回転体として考察すれば、その運動エネルギー  $E$  は周知のように次式で与えられる。

$$E = \frac{1}{2} I_0 \omega^2 = \frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{2} M (a^2 + b^2) \right\} \omega^2$$

$$= \frac{1}{4} M (1 + Q^2) V^2 \dots\dots\dots (1)$$

- ここに  $a, b$  : 回転体の内、外半径  
 $I_0$  : 回転体の慣性モーメント (Fig. 1)  
 $\omega$  : 回転体の回転角速度  
 $M$  : 回転体の質量  
 $Q$  : 回転体の内外径比  
 $V$  : 回転体の周速度

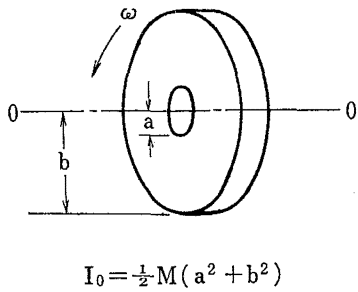


Fig. 1 平形砥石状回転体の慣性モーメント

すなわち運動エネルギー  $E$  は、質量  $M$  に比例した回転速度  $V$  の 2 乗に比例して増大するため、最近の研削作業の高速化および大形化に伴い従来に比べ一段と高エネルギー状態で研削砥石を使用していることになり、砥石破裂を起した場合の損害は、人的にも物的にも非常に重篤になる危険性を孕んでいる。このような危険性を孕む研削作業を安全に行うために従来から技術的対策および管理的対策が行われているが、未だに数多くの安全上重要な問題が解決されないままにある。その本質的な理由の一つに研削加工は、研削砥石の局部的破壊である砥石の自生作用（発刃）の上になり立つものである事があげられる。すなわち研削加工性を全く無視して砥石強度のみを増大させることは、

可能であっても實際上意味のないことになり、現状では研削砥石は、自生作用を有するものであるという条件のもとに、その安全について考えなければならないのである。

従って、使用条件によって砥石に発生する種々の状態を知り、それらに対応する砥石の強度特性を科学的に解明把握していくことが、砥石破裂事故を予防するための大きな要件である。そして、砥石の使用に関して加えられる主な条件をあげてみると

- ① メーカーにおける強度保証のための回転試験（最高使用速度の 1.5 倍）時の遠心力および起動・停止の際の変化
- ② 砥石取付けの際の締付力
- ③ 試運転時の遠心力および起動・停止の際の変化
- ④ 研削加工のための定常な遠心力および起動・停止の際の変化
- ⑤ ツルージングまたはドレッシング作業による外力
- ⑥ 研削加工中に受ける外力（研削抵抗、押付圧、振動、衝撃、熱など）
- ⑦ 研削油剤による劣化
- ⑧ 長期間使用の場合の劣化
- ⑨ 砥石を装着した研削盤全体の回転系としての振動

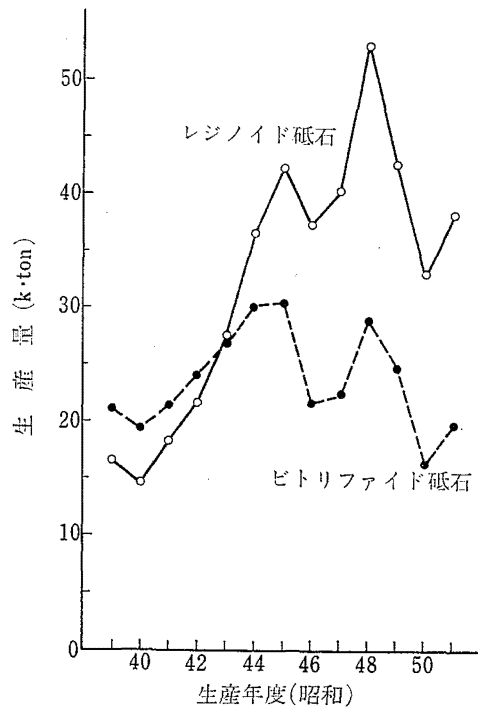


Fig. 2 レジノイド砥石の生産状況

などが考えられ、それらの中で起動および停止の繰返し、研削加工中における研削抵抗や押付圧の変化および自由研削において特に著しい砥石と加工物との振動や衝撃などによるものが、使用中の砥石に大きな繰返し応力を発生させているものと考えられる。そこで、このような変動荷重のもとにおける研削砥石の強度特性を早急に究明することが必要とされるわけである。

しかし、従来から数多くなされている研削砥石の強度に関する研究<sup>1)</sup>の殆んどが、ビットフェイス砥石に関するものであり、レジノイド砥石については最近の生産量でみると Fig. 2 に示すようにビットフェイス砥石の2倍近い量が生産されている<sup>2)</sup>にもかかわらず、その強度に関する研究は非常に少ない。

特に変動荷重の下におけるレジノイド砥石の強度特性に関する研究報告はみあたらないようであり、本報では変動荷重の下におけるレジノイド砥石の破壊強度の挙動を究明するための基礎的段階として、直径方向圧縮試験により実験研究を行ったものである。

## 2. 実 験

### 2.1 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、このうち周方応力  $\sigma_\theta$  の分布は、弾性論で平面応力状態として解くと、Fig. 3 に示すごとく

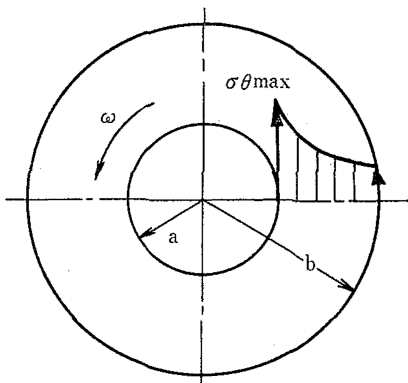


Fig. 3 回転中の平形砥石に発生する周方向応力の分布状態

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 (2) 式によって求められる。

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

ここに  $a, b, \omega$ : (1) 式に同じ

$\gamma$ : 回転体 (砥石) の単位体積重量

$\nu$ : 回転体 (砥石) のポアソン比

$g$ : 重力の加速度

そして最大応力説<sup>3)</sup>では、この  $\sigma_{\theta \max}$  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. 4 の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<sup>\*1)</sup>次の近似式によって与えられている<sup>4)</sup>。

$$\sigma_{x \max} = K \frac{P}{2(b-a)t} \dots\dots\dots (3)$$

ここに  $K$ :  $a/b$  の函数である応力集中係数

$t$ : 円板の厚さ

すなわち、Fig. 3 の場合の  $\sigma_{\theta \max}$  と Fig. 4 の場合の  $\sigma_{x \max}$  は、共に最大の周方向の一軸引張応力であり破

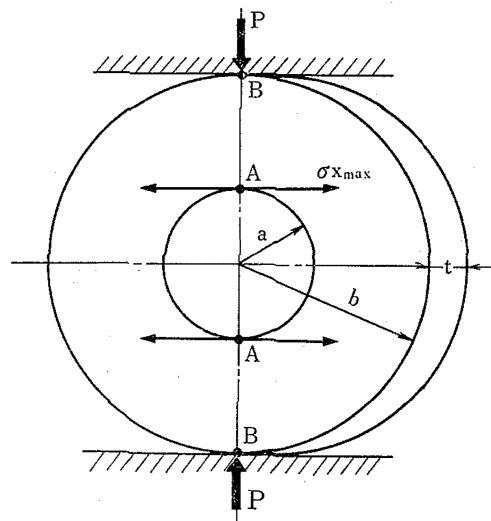


Fig. 4 圧縮荷重を受ける中心孔を有する円板に発生する最大引張応力

\*1) 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。

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、破壊に関する一軸引張応力を考えることが出来る。また、以前筆者が行ったビトファイド砥石の疲れ強さについての研究<sup>5)</sup>に於いては、幅方向に両側に 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適正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、Fig. 4 に示す荷重方式は、比較的实验条件を整えやすいこと、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. 4 の場合の直径方向圧縮試験（以下本報では、単に“圧縮試験”と称する）を採用した。

## 2.2 試験片

本研究で用いた試料は、砥粒 A，粒度 20，結合度 P のレジノイド砥石および砥粒 WA，粒度 60，結合度 K のビトリファイド砥石である。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. 5 に示すよう

Specimen

Kind of Bond	Grain	Grain Size	Grade
Resinoid Bond	A	20	P
Vitrified Bond	WA	60	K

Figure

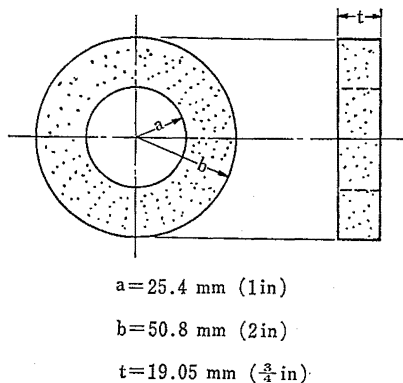


Fig. 5 試験片の種類と形状

に、内半径  $a=25.4\text{mm}$  (1in)，外半径  $b=50.8\text{mm}$  (2in)，厚さ  $t=19.05\text{mm}$  (3/4in) の内外径比 0.5 の平形砥石であり、試料寸法の実測偏差は  $\pm 0.1\text{mm}$  以内であった。

## 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料が局部的に chipping を起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  $17\mu$ ）を 8 枚重ねに折ったものを試料と加圧板との間に挟んで負荷を行った。静的圧縮試験は、荷重容量 2ton の手動式万能型引張試験機に圧縮試験用治具を取付けて、ハンドル操作によって徐々に荷重を増加させ試料の破壊荷重を測定し、破壊応力の算出は (3) 式において  $a=25.4\text{mm}$ ， $b=50.8\text{mm}$ ， $t=19.05\text{mm}$ ， $K=6.5^4)$  として導いた次式により行った。

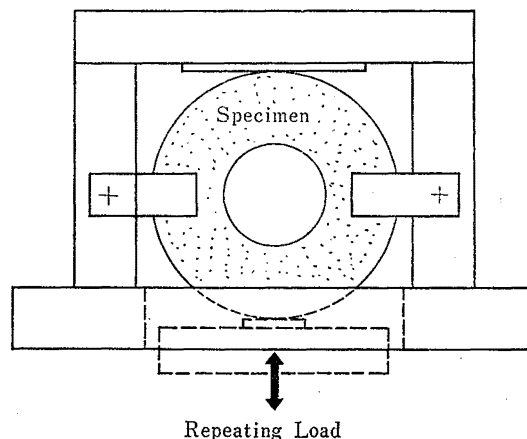


Fig. 6 繰返し圧縮試験用試験片保持具

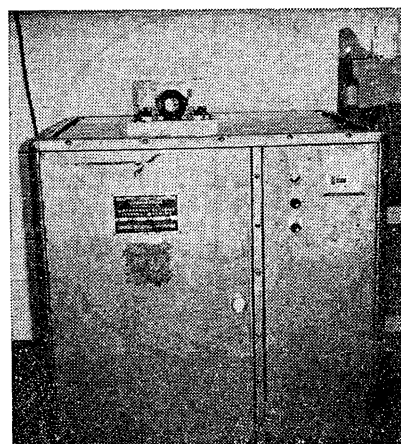


Photo 1 繰返圧縮試験状況

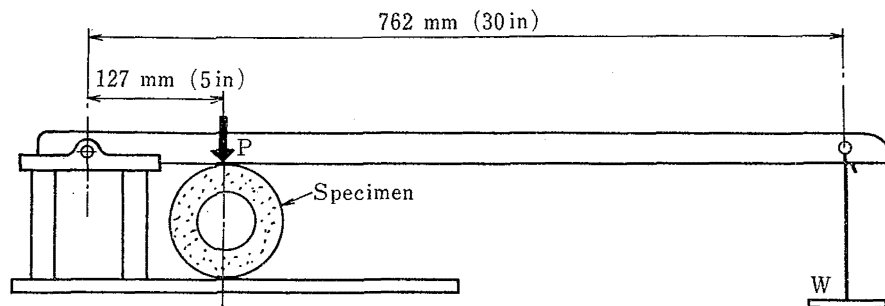


Fig. 7 レバー式死荷重圧縮試験装置

$$\sigma_{x\max} = 6.717 \times 10^{-3} P \text{ (kg}\cdot\text{f/mm}^2\text{)} \dots (4)$$

また、繰返し圧縮試験は Fig. 6 に示す試験片保持具を Photo. 1 に示すようにボールドウィン型万能疲労試験機に装着し、30Hz のサイクルで片張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。設定繰返し荷重において試験片が圧壊しない場合の最大繰返し数は、 $3 \times 10^6$  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、30Hz のサイクルで  $3 \times 10^6$  回の所要時間では、約 27.8 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. 7 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た。

### 3. 実験結果

#### 3.1 静的圧縮試験

繰返し圧縮試験を行うにあたり、各試料の静的破壊応力を知るために、レジノイド砥石とビトリファイド砥石とを、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断荷重  $P$  を測定し、(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、

$$\text{レジノイド: } \sigma_R = 4.07 \text{ kg}\cdot\text{f/mm}^2 \text{ (C.V.} = 0.053)$$

ビトリファイド:

$$\sigma_V = 3.83 \text{ kg}\cdot\text{f/mm}^2 \text{ (C.V.} = 0.029)$$

であり、各試験結果を横軸に破壊応力を取り、縦軸に累積破壊率を採ってプロットすると Fig. 8 のようになり、この Fig. 8 による破壊率 50% の破壊応力は、

$$\text{レジノイド: } \sigma_{R50} = 3.98 \text{ kg}\cdot\text{f/mm}^2$$

$$\text{ビトリファイド: } \sigma_{V50} = 3.82 \text{ kg}\cdot\text{f/mm}^2$$

となる。すなわち、どちらの場合にしてもレジノイド

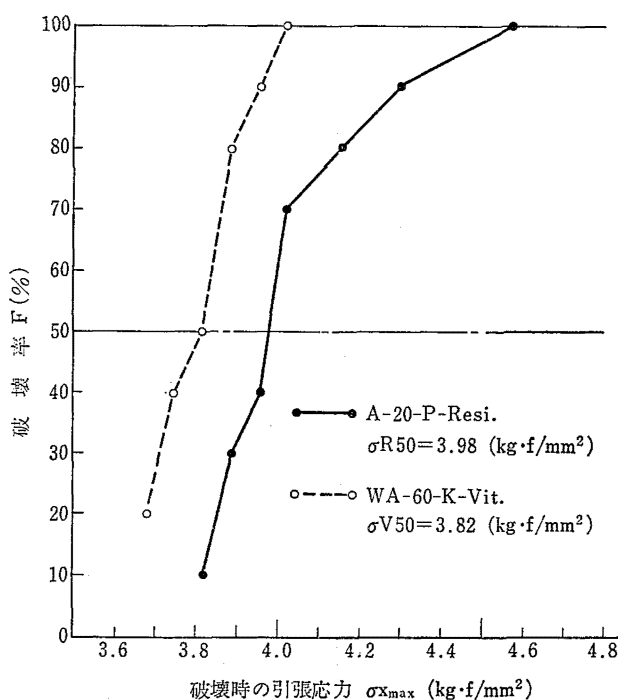


Fig. 8 静的圧縮試験結果

砥石の方がビトリファイド砥石に比べ静的破壊応力は、4.2~6.3%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  $\sigma_{R50}$  および  $\sigma_{V50}$  を以下において静的強度と称する。

#### 3.2 繰返し圧縮試験

繰返し圧縮試験の結果は、Fig. 9 に示すとおりである。横軸に荷重繰返し数を対数で採り、縦軸に片張りの応力全振幅を採ってある。●印はプロットした繰返し数で破壊したレジノイド砥石の場合を示し、○印は  $3 \times 10^6$  回で破壊しなかったレジノイド砥石、また△印は、同じく  $3 \times 10^6$  回で破壊しなかったビトリファイド

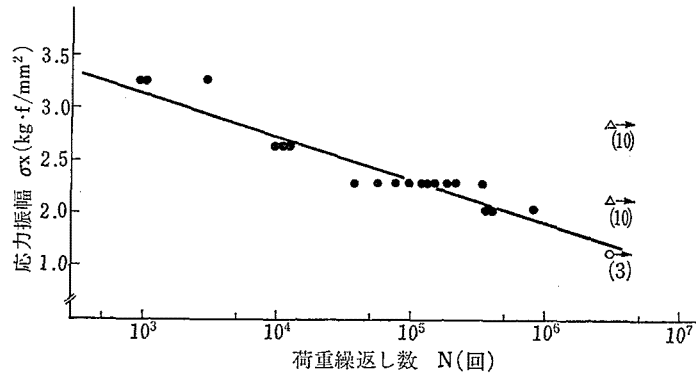


Fig. 9 繰返し圧縮試験結果

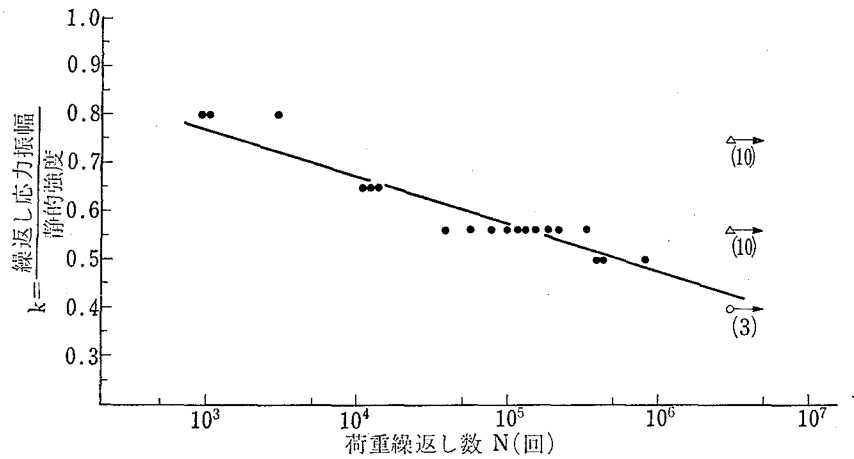


Fig. 10 繰返し圧縮試験結果

ド砥石の場合を示し、( )内の数字は、試料砥石の個数を示している。また、繰返し圧縮試験において設定した応力は、レジノイド砥石では、上記の静的強度  $\sigma_{R50}$  の 40%、50%、56.25%、65% および 80% の各応力レベルであり、またビトリファイド砥石では、静的強度  $\sigma_{V50}$  の 56.25% および 75% の各応力レベルである。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. 10 のようになる。

レジノイド砥石の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、かなりの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、右下りの直線的傾向が明らかである。一方ビトリファイド砥石では、 $3 \times 10^6$  回においても全試料が破壊していない。

### 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 48 時間の負荷時間を設定して実験を行った。

設定荷重は、レジノイド砥石では静的強度の 56.25% および 65% の応力レベルであり、ビトリファイド砥石では静的強度の 56.25% および 75% の応力レベルで、各々 3 個の試料につき実験を行ったが、その結果は 48 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、本研究で使用した試料では、

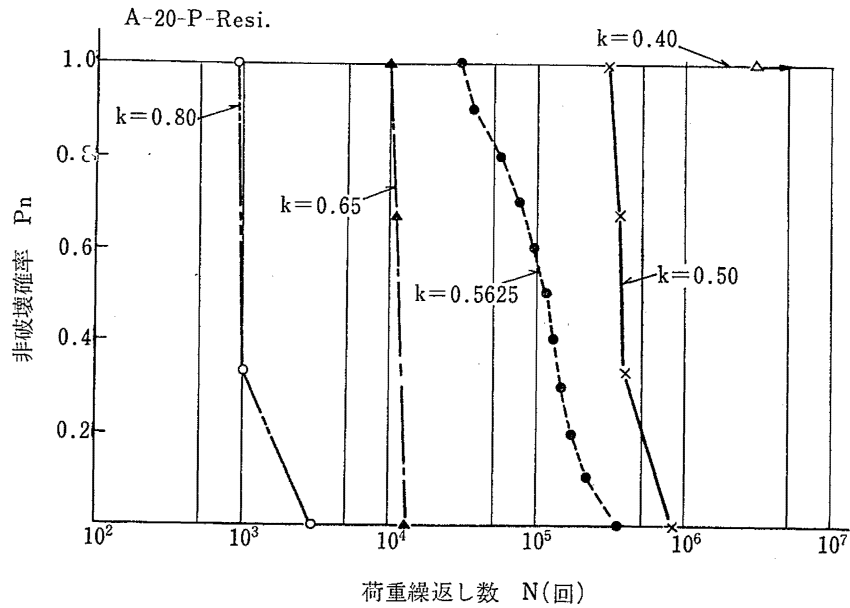


Fig. 11 荷重繰返し数と非破壊確率

静的圧縮試験においてはレジノイド砥石の方がビトリファイド砥石に比べ破壊強度が高いにもかかわらず、繰返し圧縮試験において、レジノイド砥石は、強度低下が著しいことが判った。例えば、ビトリファイド砥石は、静的強度の75%の応力振幅において荷重繰返し数  $3 \times 10^6$  回でさえ10個の試料の全てが破壊していないが、レジノイド砥石は、静的強度の50%という低い応力振幅でも荷重繰返し数  $4 \times 10^5$  回から破壊することが判った。

また、レジノイド砥石については、例えば静的強度の56.25%の応力レベルの場合、48時間の時間依存試験において全試料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では  $3.5 \times 10^5$  回(30 Hz で所要時間3時間15分)以下の荷重繰返し数で全試料が破壊しており、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、ある繰返し数までに試料が破壊しない確率を非破壊確率  $P_n$  と呼ぶこととし、次式で  $P_n$  を求めた。

$$P_n = \frac{M - M_f}{M}$$

ここに  $M$  : ある応力振幅で実験した試料数

$M_f$  :  $M$  と同条件の実験において、ある繰返し数  $N$  までに破壊した試料数

荷重繰返し数  $N$  と非破壊確率  $P_n$  についてプロット

Table 1 非破壊確率  $P_n=1.0$  の場合の各応力振幅レベルにおける荷重繰返し数の最大値

$k = \frac{\text{応力振幅}}{\text{静的強度}}$	0.40	0.50	0.5625	0.65	0.80
荷重繰返し数 $N$	$> 3 \times 10^6$	$3 \times 10^5$	$3 \times 10^4$	$10^4$	$9 \times 10^2$

すると Fig. 11 の如くなる。すなわち、非破壊確率  $P_n=1.0$  の場合の各応力振幅レベルにおける繰返し数  $N$  のおよその最大値は、Table 1 のとおりである。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、一つの実験的参考値として利用できるものとする。

ところで本報では、レジノイド砥石とビトリファイド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だけ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す段階

があることが知られている<sup>6)</sup>。そこで、レジノイド砥石およびビトリファイド砥石の結合剤を一般的に考察すると、前者はフェノール系の熱硬化性樹脂であり後者は粘土質を磁器質化させたものであることから、そ



これらの疲労現象にも、上述の各段階に対する挙動の違いは充分考えられるであろう。例えば、レジノイド砥石は、ビトリファイド砥石に比べてⅡ. の段階は長い（疲労亀裂速度が遅い）ことが推測される訳であるが、これらの点の解明については、今後の研究において解明されなければならない問題と考える。

## 5. 結 言

本報では、変動荷重の下におけるレジノイド砥石の強度特性を究明するための基礎的段階の試みとして、直径方向圧縮荷重方式によりレジノイド砥石および参考としてビトリファイド砥石の片振り繰返し試験を行ったものであるが、レジノイド砥石はビトリファイド砥石に比べて、その破壊強度には荷重繰返し数依存性があり疲労挙動が著しいことが判明した。このことは、レジノイド砥石の強度の評価を行う場合に、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いことを示唆するものであり、今後、実用される各種の砥石について実験研究を行い研削砥石の強度特性を十分に把握することが、砥石破裂事故の予防を図るための基本と考えるものである。

## 6. 謝 辞

本報の実験に関しては、Mechanical Engineering Department, Carnegie-Mellon University, U. S. A. において、科学技術庁派遣長期在外研究員として、Milton C. Shaw 教授の指導のもとに行ったものである。ご指導いただいた Shaw 教授はじめ、Ranga Komanduri 助教授には実験上の技術や適切な助言をいただいたことに対し、深く識意を表します。

(昭 54. 9. 13 受理)

## 文 献

- 1) 例えば、山本明ほか、機械学会論文集、36-284 (昭 45-4)、655 など
- 2) 研削砥石工業会、研削砥石統計表、昭和53年 5 月 22 日
- 3) 例えば、井上英夫、精密機械、37-2 (1971-2)、109
- 4) Max M. Frocht, "Strength of Materials", N. Y. Ronald Press, 1951

- 5) 桑川、産業安全研究所研究報告、RIIS-RR-23-4
- 6) 小林英男、中沢 一、固体の強度、共立出版、1976

産業安全研究所技術資料 RIIS-TN-79-1

---

昭和 54 年 11 月 15 日 発行

発行所 労働省産業安全研究所

〒 108 東京都港区芝 5 丁目 35 番 1 号  
電 話 (03) 453-8441(代)

印刷所 新日本印刷株式会社

---