

超微粒子超硬合金の坑折力に及ぼす試験片寸法
ならびに形状効果に関する一考察*石原 外美^{*1}, 宮尾 嘉寿^{*1}
吉本 隆志^{*2}, 越 正夫^{*2}Effects of Specimen Size and Shape on the Transverse-Rupture
Strength of a Cemented CarbideSotomi ISHIHARA, Kazuyuki MIYAO,
Takashi Yoshimoto, and Masao Koshi

In order to investigate the effects of the specimen size and the shape on the transverse-rupture strength of a cemented carbide, bending tests were carried out using two kinds of specimens (a square specimen and a round specimen). In the square specimen, the transverse-rupture strength was nearly constant regardless of the specimen width. On the other hand, in the round specimen, the transverse-rupture strength increased with increasing specimen diameter. And the transverse-rupture strength of the round specimen was larger than that of the square specimen. It was clarified that the above-mentioned effects of the specimen size and shape on the transverse-rupture strength of a cemented carbide were caused by the following three factors: 1) the distribution of the defects in the specimen, 2) the 3-dimensional stress distribution in the specimen, and 3) the critical condition of the specimen rupture.

Key Words: Strength, Material Testing, Size Effect, Shape Effect, Transverse-Rupture Strength, Cemented Carbide.

1. 緒 言

超硬合金の坑折力に及ぼす試験片寸法の影響に関する研究はこれまで数多く行われている。例えば、Gurland⁽¹⁾は試験片厚さが大となるほど坑折力が低下する現象を、さらには坑折力が引張強度よりも大となる現象を Weibull の破壊の確率論⁽²⁾に基づき説明している。また、鈴木らは、Weibull 理論における欠陥が抽象的なものであることを指摘し、破壊の起源となった欠陥の寸法と位置とにより合金強度が定まるという事実を明らかにしている⁽³⁾。さらに坑折力の試験片体積依存性⁽⁴⁾を検討し、それらの影響は主として欠陥の寸法依存性より生じることを報告している。

しかしながら、坑折力に及ぼす試験片寸法および形状効果の影響を明確にするには、欠陥寸法に対する試験片寸法の効果の定量的な評価方法が必要となるばかりではなく、寸法ならびに形状の変化に伴う力学的環境の変化を三次元的に厳密に評価する必要がある。また、破壊の臨界条件の変化も吟味する必要がある。超硬合金の坑折力に及ぼす試験片寸法効果ならびに形状

効果を以上の観点より検討した研究は、これまでなされていないと思われる。

本論文は、種々の寸法を有する角材と丸材の2種類の試験片形状を用いて、超微粒子超硬合金の坑折試験を行い、坑折力に及ぼす試験片寸法と形状の効果、欠陥分布、三次元的応力分布および破壊の臨界条件の三つの要因に分離して定量的検討を行ったものである。すなわち、試験片寸法が異なる場合の欠陥分布の予測に対しては、極値統計の手法が有効であることを示した。また、通常簡便に用いるはりの曲げ応力の計算式では一軸方向の応力しか考慮していないが、本報では三次元有限要素法により厳密に力学的環境を評価することにより、坑折力に及ぼす試験片寸法ならびに形状効果の影響の定量的評価を試みた。また、一部、本供試材とは異なる超硬合金を用いて行われた鈴木らの坑折試験結果⁽⁴⁾についても考察・検討を加えた。

2. 試験片および実験方法

市販の WC 粉末(平均粒度約 0.6 μm)、Co 粉末(同約 1.5 μm)、TaC 粉末(同約 1.0 μm)を原料として、WC-0.5 wt % TaC-15 wt % Co の組成に配合し、アトライターにより湿式混合した。混合粉末を乾燥後、通常のプレス成形、予備焼欠、中間加工を行った。その後

* 昭和 63 年 11 月 11 日 北陸信越支部北陸地方講演会において講演、原稿受付 昭和 63 年 4 月 25 日。

^{*1} 正員、富山大学工学部 (〒930 富山市五福 3190)。

^{*2} (株)不二越 (〒930 富山市石金 20)。

1653 Kで1hの真空焼結を経て焼結体とした。ついで図1に示すように、ダイヤモンド砥石を用いて最終的に4×4×25, 4×6×25, 4×8×25, φ1.3×25, φ3×25, φ6×25の6種類の試験片を作成した。破壊強度試験として、スパン距離20mmの三点曲げ坑折試験を行った。また、坑折試験片の破面には、破壊の基点となった一つの欠陥(粗粒炭化物相, 空孔)が観察されるので、その大きさと位置を金属顕微鏡(倍率×400)により測定した。

3. 実験結果

3.1 坑折実験 図2は横軸に曲げ応力 σ_b , 縦軸にはその累積確率 $F(\sigma_b)$ をとり, 各試験片の坑折試験結果をワイブル確率紙上にプロットしたものである。ただし, 曲げ応力 σ_b として次式を用いている。

$$\sigma_b = Pl/4Z \dots\dots\dots (1)$$

ここに, P は試験片の破断時の荷重, l は試験片のスパン長さ, Z は試験片の断面係数である。

図2より丸材の実験データは角材のそれらよりも明らかに右方にあることから, 丸材の坑折力は角材の坑折力よりも大きく, 坑折試験には試験片形状効果が存在することがわかる。また, 角材, 丸材の両者とも坑折力のばらつきは大きい, ばらつきの程度には両者間の差異は認められない。

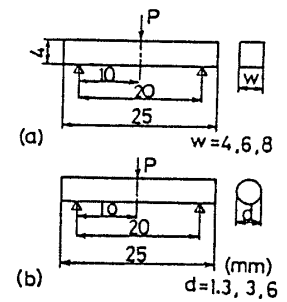


図1 試験片形状および寸法

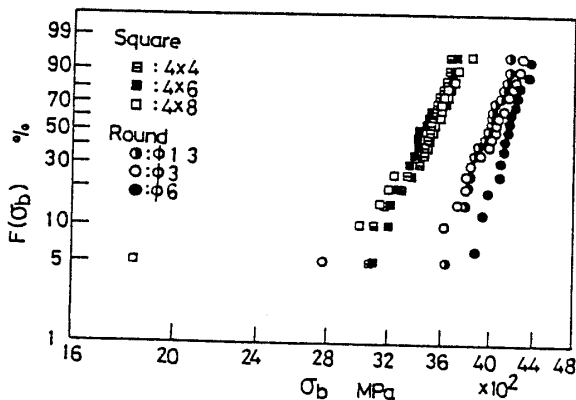


図2 坑折力の確率分布(ワイブル確率紙)

図3は, 平均曲げ応力 $\bar{\sigma}_b$ の試験片寸法依存性について示したものである。図3よりわかるように, 円形断面では試験片直径の増加とともに平均曲げ応力の増加がみられ, また, 角材では試験片の幅の増加によって平均曲げ応力はほとんど変化しないことがわかる。以上の実験結果は, 超硬合金の試験片寸法依存性を調べた Gurland⁽¹⁾ や鈴木ら⁽⁴⁾ の研究結果の傾向, すなわち試験片寸法の増加とともに坑折力が低下するという傾向とは一致しない。また, ワイブル理論の予測する傾向とも一致しない。

野口は⁽⁵⁾, φ2とφ8の丸棒試験片を用いて鋳鉄の引張試験を行い, φ2の引張強さはφ8のそれよりも8%小さいことを報告している。本坑折試験における丸材の試験片寸法依存性は野口の結果と同様の傾向を示している。

3.2 破断面における欠陥寸法 図4は角材の破壊起点部に観察される欠陥(25μm程度の空孔)の写真を示した一例である。本実験の超微粒子超硬合金では, 欠陥は粗粒炭化物相 TaCが主体であるが空孔も観察された。

表1は, 一例として角材4×6×25の破壊の起点点になった欠陥の寸法およびその位置を示したものである。表1中の2a, 2b, Δl, Δtは, 図5に模式図を示すようにそれぞれ破壊をもたらした欠陥の寸法および位

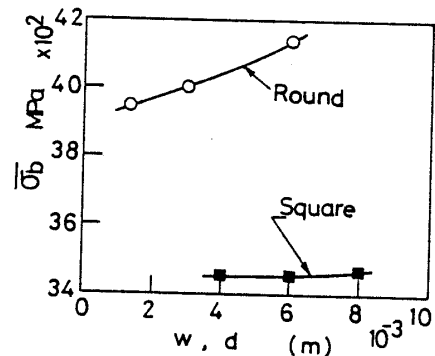


図3 平均坑折力の試験片寸法依存性

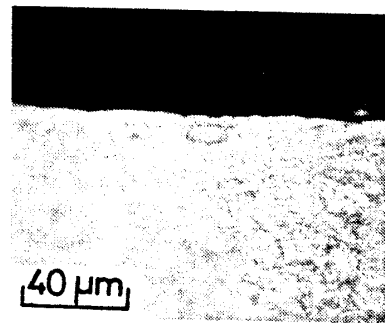


図4 破壊の起点部に観察される欠陥

置を示している。なお、丸材の破壊起点となった欠陥の種類は角材と同様であるが、欠陥の位置、大きさは測定していない。

鈴木ら⁽³⁾は、破壊強度は欠陥の種類を問わず欠陥の寸法とその位置により規定されることを明らかにしている。そこで、欠陥による応力集中係数を、欠陥形状を長軸 $2a$ 、短軸 $2b$ のだ円形状と仮定し、次式⁽³⁾⁽¹¹⁾で計算し、表 1 中に示した。

$$k = 1 + 2\sqrt{a/\rho} \dots\dots\dots(2)$$

ただし、 ρ はだ円の先端の曲率半径を表しており、次式で与えられる⁽⁶⁾。

$$\rho = b^2/a \dots\dots\dots(3)$$

他の角材の実験結果に対しても同様の整理を行ったが、試験片寸法の増加とともに平均欠陥寸法 $2a$ 、 $2b$ および k は増加しており、これまで報告されている結果⁽⁴⁾と同様の傾向が認められた。

4. 考 察

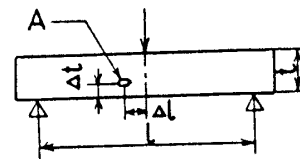
3章で述べた坑折試験結果は、欠陥分布に関してはこれまでの傾向⁽⁴⁾とは一致するものの、坑折力に関してはこれまでの超硬合金に関する実験結果⁽¹⁾⁽⁴⁾とはやや異なる結果を得た。したがって、以上の実験事実は、

坑折力に及ぼす試験片寸法効果、形状効果を議論する場合、(1)欠陥の分布に注目するだけでは十分でなく、他の因子も考慮しなければならないことを示唆している。このような因子の主たるものとして、(2)試験片寸法の増加および試験片形状の変化に伴う三次元的応力分布状態 (3)破壊の臨界条件の試験片寸法・形状依存性が考えられる。以下では坑折力に及ぼす寸法、形状依存性を、上記(1)~(3)の各因子に分離し、定量的検討を行う。

4.1 三次元有限要素法による応力の多軸性の評価
三次元的多軸応力分布の大きさを評価する一つの尺度として式(4)で表される相当応力 σ_{eq} を考えることができる⁽⁷⁾。そこで三次元有限要素法により各種形状・寸法の物体内部の相当応力を求めた。有限要素法による三次元物体の応力、ひずみ分布の計算には二十節点アイソパラメトリック要素を用いた。図 6 に、要素分割の一例を示す。負荷およびはりの対称性を考慮してはりの 1/4 の領域を 20 個の要素に分割している。式(1)の σ_b を 3434 MPa 一定として、有限要素解析を行い、各試験片の最大応力発生箇所の σ_{eq} を求めた。解析にあたって、ヤング率=600 GPa、ポアソン比=0.22 と

表 1 角材の破面に観察される欠陥の種類、大きさおよびその位置(4×6×25)

No.	σ_b (MPa)	$2a$ (μm)	$2b$ (μm)	Δl (mm)	Δt (mm)	k
1	3355	28	16	0.43	0.07	4.5
2	3414		unknown			
3	3473	21	16	0.45	0.16	3.6
4	3512	18	12	0.05	0.0	4.0
5	3090	77	37	1.07	0.0	5.2
6	3679	17	9	1.25	0.0	4.8
7	3208	24	5	1.18	0.13	10.6
8	3689		unknown			
9	3512	30	9	0.39	0.11	7.7
10	3394	24	12	0.48	0.0	5.0
11	3198	48	13	0.44	0.14	8.4
12	3630	22	13	0.89	0.05	4.4
13	3659	16	9	1.31	0.16	4.6
14	3267	26	12	0.99	0.17	5.3
15	3630	14	7	1.11	0.31	5.0
16	3424	33	30	0.82	0.10	3.2
17	3375	16	8	1.86	0.04	5.0
18	3747		unknown			
19	3669	11	8	0.85	0.01	3.8
20	3355	20	13	0.69	0.0	4.1



Detail of A

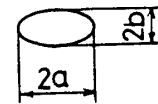


図 5 欠陥の発生位置の決定

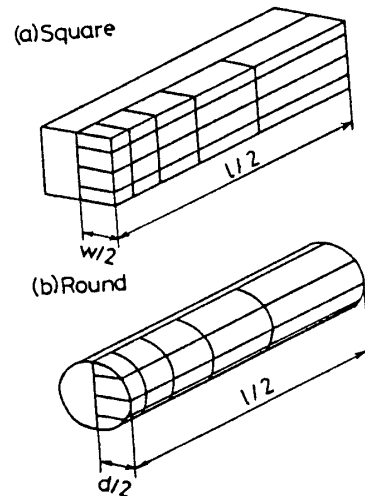


図 6 有限要素解析のための要素分割の一例

している。

$$\sigma_{eq} = (1/\sqrt{2})[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)]^{1/2} \dots\dots(4)$$

図7は σ_{eq} と σ_b の比 σ_{eq}/σ_b の試験片寸法依存性を示したものである。図7(a)は角材の結果を図7(b)は丸材の結果を示している。図7よりわかるように、いずれの試験片も三次元的な変形抑制効果により σ_{eq} は σ_b よりも低下し、試験片寸法の増加するほどその程度は大きくなる。また、角材に比較して丸材での σ_{eq} の低下は大きいことがわかる。

4.2 極値統計学に基づく欠陥分布の評価 図8は角材の破面に観察される欠陥の影響度を式(2)の応力集中係数 k で表し、各試験片ごとに確率紙上にプロットしたものである。ただし、縦軸は $\ln \ln[1/(1-\hat{F}(k))]$ をとり、横軸は k の等分目盛を用いている。ここで $\hat{F}(k)$ は $\hat{F}(k)=1-F(k)$ で示され、 $F(k)$ は k の累積確率を表している。図8よりわかるように、試験片幅の増加とともに $\hat{F}(k)$ は右方に移動しており、既述したごとく、試験片寸法の増加とともに大きな欠陥が含まれることがわかる。また、 $\ln \ln[1/(1-\hat{F}(k))]-k$ 関係は確率紙上で右下りの直線になっており、これより $F(k)$ は最大値の第2漸近分布になることがわかる⁽⁸⁾。坑折試験では試験片各部の応力が異なるため、常に最大の欠陥が発生している箇所が破壊の起点になるとは限らない。しかし、上述の実験結果は、第1近似として破面の起点部に観察される欠陥を最大のもつとみなしてもよいことを示唆しているものと考えられる。

極値統計学によれば、一定寸法の試験片中に見られる欠陥の最大値の分布を $F(k)$ とすれば、 $F(k)$ とその n 倍の寸法の試験片中に見られる最大値分布 $F_n(k)$ とは次式の関係にあることが示されている。

$$F_n(k) = \{F(k)\}^n \dots\dots\dots(5)$$

式(5)を変形すると次式を得る。

$$\ln \ln[1/(1-\hat{F}_n(k))] = \ln \ln[1/(1-\hat{F}(k))] + \ln n \dots\dots\dots(6)$$

上式によれば最大値の $F_n(k)$ は $\hat{F}(k)$ を上方に $\ln n$ だけ平行移動したものであり、図式的に求められる⁽⁸⁾。

図8中の実線は4×4の寸法の角材試験片を基準試験片として他の寸法の角材試験片の $F_n(k)$ を推定したものである。図8よりわかるように推定結果は実験結果とほぼ対応することがわかる。

次に、鈴木らによって行われたWC-10%Co合金の破壊起点の欠陥の長軸長さに関する実験結果⁽⁴⁾を用いて(同論文の図より読取った)、同様の試みを行った。結果を図9に示す。図9よりわかるように極値統計学による推定は実験結果と対応しており良好な結果を与えることがわかる。

以上のことから、超硬合金の坑折試験において、基準となる寸法の試験片の破面に観察される欠陥分布が既知であれば、極値統計の方法により他の寸法の試験片の欠陥分布を推定できることが明らかとなった。

4.3 破壊の臨界条件に及ぼす試験片寸法の影響

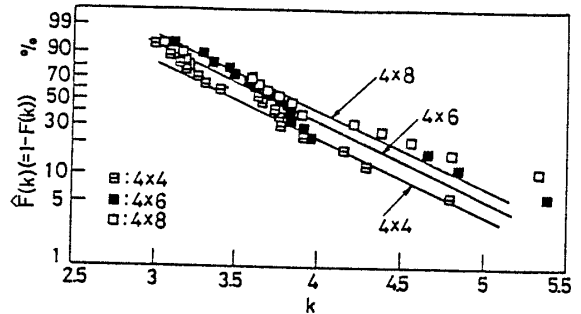


図8 欠陥分布の極値解析(本実験データ)

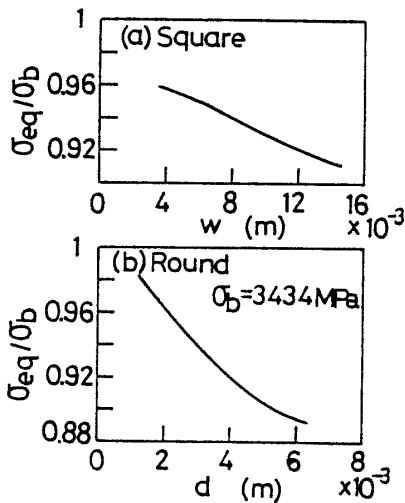


図7 σ_{eq}/σ_b の試験片寸法および形状依存性

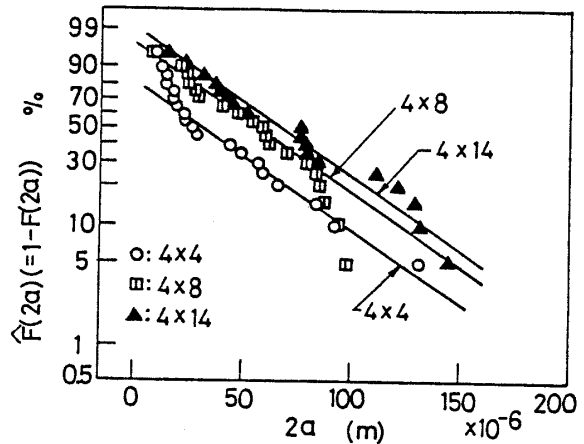


図9 欠陥分布の極値解析(鈴木ら⁽⁴⁾のデータ)

鈴木ら⁽³⁾によれば、超硬合金の破壊応力 σ_f は、破壊の起源となった欠陥の位置における応力 σ_d と欠陥による応力集中係数 k の積として次式で表される。

$$\sigma_f = k\sigma_d \dots\dots\dots (7)$$

しかしながら、式(7)で求められる σ_f が試験片寸法の変化によってどのように変化するかは明らかではない。 σ_d として三次元的な応力集中を考慮して相当応力を用いるのが妥当であろう。

そこで、実験より得られた欠陥発生位置の局所相当応力を有限要素解析で求め、これと表1の角材の欠陥分布による応力集中係数 k の両者より各試験片の σ_f を計算した。複数の矩形試験片に対する σ_f の分布をワイブル確率紙上にプロットした結果を図10に示す。図10よりわかるように、 $F(\sigma_f)$ - σ_f 関係は、試験片寸法の増加に伴って右方に移動しており、試験片材質が一定にもかかわらず、寸法の増加とともに σ_f は増加傾向を呈する。これは試験片寸法の増加に伴って微視的な破壊パターンが変化することおよび試験片加工時の残留応力の発生することなどが要因として考えられるが、詳細は不明である。

なお、同様の結果は、局所応力 σ_d に次式の通常のはり理論の式⁽³⁾を用いても得られたことを付記する。

$$\sigma_d = \sigma_b(1-2\Delta t/t)(1-2\Delta l/l) \dots\dots\dots (8)$$

佐藤ら⁽⁹⁾は軟鋼材を用いて、正方断面を有するはりの四点曲げ試験を行っているが、その結果によればはりの高さの増加に伴い、下降伏点は増加しており、本実験の破壊応力と類似の傾向を示している。

4・4 坑折力に及ぼす試験片寸法の影響 試験片寸法・形状変化による三次元的な応力分布の差異を考慮するために、図2および図3の坑折力に関する実験結果を相当応力 σ_{eq} で再整理し、複数本の試験片に対する平均坑折力 $\overline{\sigma_{eq}}$ を求めた。これを基準寸法の平均坑折力 $\overline{\sigma_{eq0}}$ で無次元化した $\overline{\sigma_{eq}}/\overline{\sigma_{eq0}}$ を縦軸に、横軸に試験片寸法 w と基準寸法の試験片寸法 w_0 の比 w/w_0

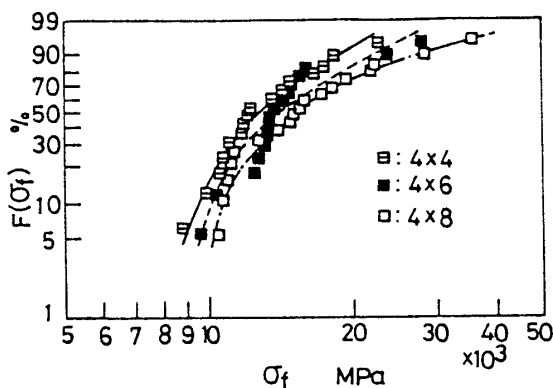


図10 破壊応力の確率分布(角材)

w_0 をとって実験結果を整理した。結果を図11(a)に示す。基準寸法の試験片は角材では $4 \times 4 \times 25$ 、丸材では $\phi 1.3 \times 25$ である。図11中に示した実線は破壊応力 σ_f を一定とし、試験片寸法の増加に伴う欠陥寸法の増加のみを考慮して極値統計学により推定した結果を示したものである。

図11中の実験結果よりわかるように、 $\overline{\sigma_{eq}}/\overline{\sigma_{eq0}}$ は w/w_0 の増加とともに低下しており、この低下傾向には角材と丸材との差は認められない。次に、実験結果と実線で示した欠陥分布のみを考慮した推定結果を比較すると、推定結果は実験結果より下方に存在し、大きな寸法効果を予想することになる。これは図10に示した破壊応力 σ_f の試験片寸法依存性を考慮していないためと考えられる。そこで、図10より平均破壊応力 σ_f と w/w_0 の関係を求め、 σ_f の試験片寸法依存性を考慮した推定結果を図11(a)中に破線で示す。なお、 $w/w_0 > 2$ では σ_f の寸法依存性に関する実験を行っていないので、 $w/w_0 > 2$ 領域では σ_f と w/w_0 の関係を片対数グラフ上で外挿することにより求めている。図11(a)よりわかるように破線で示した推定結果は実験結果とほぼ合致している。

図11(b)は鈴木らの実験結果⁽⁴⁾に対して同様の整理を行ったものである。ただし、基準試験片寸法は $4 \times 4 \times 25$ である。図11(a)と同様に、図11(b)中の実線で示される推定は欠陥分布のみを考慮したものである。応力集中係数 k の計算に当たって、欠陥先端の曲率半径 ρ が不明であったので、同合金のWC粉末粒度 $1.4 \mu\text{m}$ に対する値を文献⁽¹⁰⁾から読取り、 ρ を $19 \mu\text{m}$ と決定した。また、破線で示される推定は、欠陥と破壊応力両方の寸法依存性を考慮した結果であるが、 σ_f の寸法依存性が不明であるので、図11(a)で

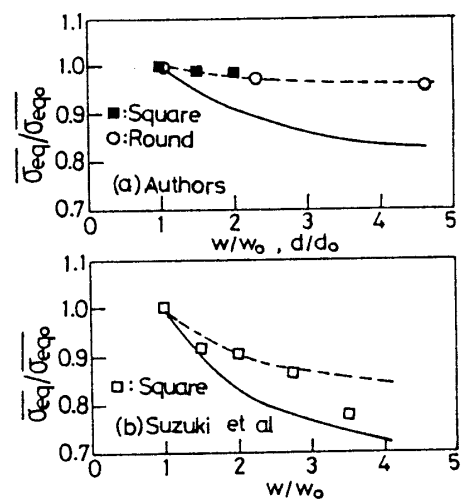


図11 $\overline{\sigma_{eq}}/\overline{\sigma_{eq0}}$ の w/w_0 依存性

用いたと同様の関係を仮定して用いた。図 11(b)よりわかるように欠陥分布のみを考慮した実線で示す推定結果は実験結果よりも大きな寸法依存性を示し、両者は一致しないが、欠陥分布と破壊応力の寸法依存性を考慮した破線で示される推定結果は実験結果とほぼ一致する。

鈴木ら⁽⁴⁾の実験では試験片寸法の増加に伴う坑折力の低下は本実験結果のそれよりも顕著であるが、これは両供試材に含まれる欠陥分布の差異に起因するのであろう。すなわち、図 9 よりわかるように鈴木らの WC-10%Co 合金での破壊過程が、平均長軸長さが 50~70 μm の大きな欠陥に支配されるのに対し、本実験のそれが、表 1 よりわかるように 20 μm 程度の小さな欠陥に支配されることに起因するものと考えられる。

また、丸材における試験片寸法効果は、図 11(a)で丸材と角材の実験点が一つの曲線上にあり同一の傾向を示すことから、角材の寸法依存性と同様の要因で生じると考えられる。

4.5 坑折力に及ぼす試験片形状の影響 本節では角材と丸材の坑折力を比較する。図 3 よりわかるように、丸材の坑折力の平均値は角材のそれよりも $\phi 3$ 材でほぼ 14%、 $\phi 6$ 材で 20%ほど大きい。この差異の生じる第 1 の原因として欠陥分布が考えられる。すなわち、丸材では角材よりも最大応力の生じる危険断面の体積が小さく、そこに大きな欠陥が含まれる確率が低いため、坑折力が角材よりも増加するのであろう。また第 2 に試験片形状の変化に基づく三次元的応力分布の差異に起因することが考えられる。初等曲げ応力 σ_0 が一定条件で、三次元的応力分布状態の厳しさを表す相当応力は、図 7 に示したように、 $\phi 3$ 材では角材 (4 \times 4) のそれよりも 1.9%、 $\phi 6$ 材では角材 (4 \times 4) のそれよりも 6.6%小さくなることから、丸材の坑折力は角材のそれよりも増加する。

以上述べたように、超硬合金の坑折力に及ぼす試験片寸法および形状の影響は (1) 欠陥分布、(2) 試験片内の三次元的な応力分布状況および (3) 破壊応力の試験片寸法依存性に関連し、これらの因子を考慮した推定結果は実験結果とよく一致することを示した。

5. 結 論

超微粒子超硬合金の坑折試験を行い、坑折力に及ぼす試験片寸法および形状の影響について検討し、以下の結論を得た。

(1) 角材では、試験片幅の増加によって坑折力はほとんど変化しないが、丸材では、試験片直径の増加

に伴い、坑折力は増加する傾向が認められた。つまり、試験片形状によって異なった寸法依存性が認められた。

(2) 試験片の三次元的変形拘束条件をより厳密に評価するために、はりの曲げ応力一定の条件のもとで、三次元有限要素法によって最大応力発生箇所の相当応力を求めた。その結果、相当応力ははりの曲げ応力よりも小さく、また、丸材の相当応力は角材のそれよりも小さくなる。また、丸材および角材いずれも試験片寸法の増加によって相当応力は減少するが、丸材では、その減少程度が大きい。

(3) 角材では、破壊の起点となった破面上に観察される欠陥の大きさは試験片寸法の増加とともに増加する。この破壊起点の欠陥分布の試験片寸法に伴う変化は、基準試験片の欠陥分布が既知であれば、極値統計学的手法によりほぼ推定できる。

(4) 角材では、試験片の破壊応力 σ_f が欠陥発生場所の局所応力と欠陥による応力集中係数の積で与えられると仮定すると、 σ_f は試験片寸法の増加に伴い増加する。

(5) 坑折試験における試験片寸法・形状効果は、試験片寸法の増加に伴う欠陥分布の変化、三次元的応力の分布状態および破壊応力の三つの要因を考慮して説明できることを示した。これまで、脆性材料の曲げ坑折力などの強度特性の試験片寸法ならびに形状効果は欠陥分布にのみ注目して取扱われたきらいがあるが、破壊の臨界条件の試験片寸法依存性および三次元的な応力の分布状況も考慮する必要があることを指摘した。

終わりに、本研究にご協力いただいた当時富山大学生、上田由起夫君に謝意を表する。

文 献

- (1) Gurland, J., *Powder Metallurgy*, (1961), 661, Interscience Publishers.
- (2) Weibull, W., *Ingeniörs Vetenskaps Akad. Handl.*, 151(1939), 45.
- (3) 鈴木・林, 金属学会誌, 38(昭 49), 1013.
- (4) 鈴木・ほか 3 名, 粉体および粉末冶金, 24-8(昭 52), 381.
- (5) 野口, 機論, 53-493, A(昭 62), 1749.
- (6) 機械工学便覧(第 5 版), 第 2 編数学 7-2-21(昭 43), 日本機械学会.
- (7) 後藤, 塑性学, (昭 57), 39, コロナ社.
- (8) 岡村・板垣, 強度の統計的取扱, (昭 54), 44, 培風館.
- (9) 佐藤・佐々木, 機論, No. 780-13(昭 53-10).
- (10) 鈴木, 超硬合金と焼結硬質材料, (昭 61), 151, 丸善.
- (11) 西田, 応力集中, (昭 42), 353, 森北出版.