セラミックスの研削における材料端部の欠け*

——端部を強制的に拘束することによる欠けの抑止効果——

水谷 勝己** 山口 勝己** 田中 芳雄***

Chipping of the Work at Its Corner in Grinding of Ceramics
- Effect of Deformation Constraint at the Work End on Prevention of Chipping -

Katsumi MIZUTANI, Katsumi YAMAGUCHI and Yoshio TANAKA

Two methods are proposed to prevent chipping of the work corners in grinding of ceramics: one is to press a splint to the work end with a loading system (splint press type), the other to fix it to the work end with adhesive (splint adhesion type). The applicability of these methods are experimentally investigated in single point grinding and theoretically confirmed by estimating the deformation constraint of the work, i.e., the resistance to the penetration of the swelled work into the splint. It is found that the size of chipping becomes small under appropriate conditions: it is recommended to use soft splint such as aluminum under sufficient compression in the splint press type, and to adopt thin adhesive with high Young's modulus in the splint adhesion type.

Key words : chipping, ceramics, constraint, work corner, grinding, adhesion

1. 緒 言

セラミックスの研削においては、被削材の端部にしばしば大きな欠けが生じる。この欠けを抑止する技術を確認することを目的として、前報では、単粒研削を行い材料端部で生じる欠けの形態の特徴を明らかにするとともに、欠けの規模が研削条件（研削方向、砥粒形状、テーブル送り速度、砥石切込み深さ）や端部の形状および被削材の材質の差異によって変化する状況を調査し、欠けを小さくする条件が存在することを示した¹⁾。

材料端部の欠けを小さくするのに、上述のように適切な研削条件を選択することも必要であるが、端部の

欠けが、基本的には加工力による端部の変形によって生じるものであるから、端部を拘束してそこでの変形を抑えるほうがより積極的な意味を持つ。このように端部を拘束する方法は従来から現場でよく用いられている。しかし、実際に採用されている方法は主として経験にもとづいて定めているのが現状であり、拘束の効果をより有効に利用するためには詳細な検討が必要である。

そこで本報では、①被削材端部に添え板をある荷重で押し付けることにより端部を拘束する（以後、添え板押付拘束と記す）、②被削材端部に添え板を接着剤で張り付けることにより端部を拘束する（以後、添え板接着拘束と記す）の2種の拘束方法を用いて単粒研削を行い、端部の欠けを抑止する効果を拘束板の材質、拘束荷重の大きさ、接着剤材質、接着層厚さなどを変えて調査した。また、端部欠けの抑止効果は、被削材端部を拘束する強さに依存すると考え、2種の拘束方法による拘束強さを薄層付き添え板に球を押し込むときの反力として評価することを試み、拘束荷重などの操作因子の役割を考察した。

* 原稿受付 昭和63年 7月11日。昭和61年度精密工学会秋季大会学術講演会(昭和61年10月10日)にて発表

** 正 会 員 大阪府立産業技術総合研究所(大阪市西区江之子島2 1 53)

*** 正 会 員 大阪府立大学工学部(堺市百舌鳥梅町4丁804)

(a) Splint press type

(b) Splint adhesion type

Fig.1 Illustration of two methods to constrain work end

2. 実験方法

2.1 被削材端部の拘束方法

ここで用いた2種類の拘束方法を図1に模式的に示す。図1(a)は添え板押付拘束の場合であり、被削材、添え板、八角リングをバイスで挟むことにより、研削中に被削材が拘束のない方向に張出す変形を添え板によって抑えるようになっている。その押付荷重は、バイスの締付力によって与えており、中に挟んだ八角リングのひずみを検出することにより所定の大きさを得ている。この方法による拘束の場合には押付荷重Fと添え板の材質を変えて拘束の効果を調べた。なお、添え板として変形能が大きく異なる純アルミニウムと普通板ガラスの2種を選んだ。

一方、添え板接着拘束は、図1(b)に示すように、被削材端面に純アルミニウムの添え板を接着剤を用いて接着することによるもので、このとき外部より押付荷重は与えていない。そして、縦弾性係数 E_1 の異なる2種の接着剤を選び、それぞれ接着層の厚み t を変えて拘束の効果を調べた。その一つは硬化剤に変形ポリチオールを用いたエポキシ樹脂系接着剤 (CIBA-GEIGY 社製、アラルダイト・ラピッド、以後接着剤Aと記す) で、他はより E_1 の高い変形ポリアミド硬化剤のエポキシ樹脂系接着剤 (コニシ社製、ホーロー補修用ボンド、

Table 1 Measured elastic moduli of the adhesives

Elastic moduli	Adhesive A	Adhesive B
Young's modulus GPa	3.0	4.6
Poisson's ratio	0.38	0.40

Table 2 Mechanical properties of the ceramics used for single point grinding

Mechanical properties	Soda-lime glass	Alumina ceramics
Fracture toughness $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$	0.7	3.8
Vickers hardness GPa	5.6	18.6
Young's modulus GPa	74	392
Bending strength MPa	83	294
Poisson's ratio	0.26	0.21

Fig.2 Micrographs of the diamond point used in grinding experiments
The arrows show the cutting direction

以後接着剤Bと記す)である。作製した試験片から調べた両接着剤の機械的性質を表1に示す。なお、いずれの拘束方法の場合も添え板の厚さは3mmとした。

2.2 被削材および研削条件

被削材の材質は、表2に示す機械的性質を持つ普通板ガラスと常圧焼結のアルミナセラミックスである。これらの材料を端面角が90°の平板状に研削し、さらに単粒研削を施す面および端面を平均粒径 $1 \mu\text{m}$ のダイヤモンド粉末でラッピングし、端部に欠けのないものを被削材とした。

単粒研削実験の概略は図1のごとくであり、アルミニウム円板 ($R=100 \text{ mm}$) の周上に取り付けたダイヤモンド砥粒によって6mmの距離を設定した切込み深さでワンパスだけ上向きに削っている。その砥粒の切れ刃部形状を図2に示す。他の研削条件は以下に示すとおりである。

砥石周速度: $V_s = 1570 \text{ m/min}$

テーブル送り速度: $V_w = 0.24 \text{ m/min}$

砥石切込み深さ: $A = 5 \sim 150 \mu\text{m}$

研削液: 水溶性研削液 (ネオクールG2)

Soda-lime glass $\Delta=58\mu\text{m}$ 100 μm Soda-lime glass $\Delta=56\mu\text{m}$ 100 μm Alumina ceramics $\Delta=51\mu\text{m}$ 100 μm Alumina ceramics $\Delta=50\mu\text{m}$ 100 μm

(a) Non-constraint

(b) Constraint

Fig.3 Micrographs of the chippings at work corners under non-constraint and constraint (splint press type)
Grinding conditions: $V_s=1570\text{m/min}$, $V_w=0.24\text{m/min}$

Fig.4 Illustration for the chipping size, L

3. 実験結果

3.1 拘束された端部での欠けの形態

図3に普通板ガラスとアルミナセラミックスを上向き研削したときに出口側端部で生じた代表的な欠けを示す。同図左側は端部の拘束がない場合のもので、右側は添え板押付拘束（添え板：純アルミニウム、押付荷重 $F=500\text{N}$ ）の場合のものである。拘束がない場合には、既報¹⁾で明らかにしたように研削面上ではラッパ状の欠けが、端面上では扇形状の欠けが大きく形成されている。これに対し、添え板押付拘束を行った場合のものは両材料とも研削面上にラッパ状の欠けは見られず、研削条痕が端面近くまで認められる。また、端面にも扇形状の欠けは見られず、条痕底に沿って小さな破碎により生じた広がり狭い欠けが見られるにすぎない。

以上の観察より、適切な条件で端部を添え板押付拘束した場合には欠け抑止効果が明らかに存在している。添え板接着拘束の場合も適切な条件のもとでは図3(b)と同様な形態の欠けとなり、やはりその効果が認められた。

3.2 拘束された端部での欠けの規模

2種類の端部拘束の方法による端部欠けの抑止効果を拘束の条件を変えて調べた。その際、最も大きい欠けを示す上向き研削の出口側端部に着目し、さらに、端部を拘束した場合の研削面上の欠けは測定が困難なほど小さくなることがあるので比較的大きな研削端面側での欠けだけを観測する。図4は研削端面の欠けの規模を代表的な量で評価するため、その部分に生じた欠けを模式的に示したものである。同図には時々観察されるき裂（条痕底から放射状に進展することが多い）をも含めて表

示している。ここでは、条痕底から欠けの最下端までの距離、またはき裂の最下端までの距離のうち大きなものを欠けの規模 L として評価する。

3.2.1 添え板押付拘束の場合

まず、添え板の材質による欠け抑止効果の差異を調べる。図5は、普通板ガラスを被削材とした欠けの規模 L と砥石切込み深さ Δ の関係を示したもので、被削材端面を全く拘束しない場合と、普通板ガラスまたは純アルミニウムの添え板を用いて押付荷重 $F=500\text{N}$ （被削材端面の平均面圧 $p=0.90\text{MPa}$ ）で拘束した場合の結果が示されている。

押付拘束をしたときの L の大きさは、いずれの添え

Fig.5 Effect of the splint materials on the chipping size on the end side, L
Grinding conditions: $V_s=1570\text{m/min}$, $V_w=0.24\text{m/min}$
Work: soda-lime glass
Constraint: Splint press type, $F=500\text{N}$

Fig.6 Configuration of contact face of splints after single point grinding
 Constraint: Splint press type

板の場合も拘束しない場合に比べて小さくなり、欠けの抑止効果が認められる。特に添え板に純アルミニウムを用いた場合 Δ が増加しても L は小さな値にとどまっており顕著な欠け抑止効果を示している。

添え板の材質による抑止効果のこのような差異が生じる理由を明らかにするため、単粒研削終了後に添え板表面の被削材端面と接触する部分の性状を三次元表面粗さ測定器²⁾で調査した。その代表例を図6に示す。同図の写真では接触面に垂直な方向へのふくらみを表すためふくらみ量一定の面で切断した切り口の輪郭を白線で示している。また、折れ線グラフはA-A線における断面曲線である。

板ガラスと純アルミニウムの添え板接触面を比較すれば、砥粒による切削条痕と条痕底付近の材料のふくらみに特徴的な差が観察される。すなわち、端部欠け抑止効果の少ない板ガラスでは破壊のため砥粒先端形状を転写した条痕(転写条痕)が形成されず、またふくらみが認められないのに対し、抑止効果の大きい純アルミニウムではこの転写条痕が形成されるとともに、条痕底付近に明確なふくらみの変形が認められる。図6は研削終了後の添え板の状態を示しているので、端部欠けが生じる時点のものと若干の違いがあるものと思われるが、研削における砥粒—工作物間の接触弧は研削面上の端部欠けの長さには比べるかに長いため、端部欠けの発生時には添え板はかなり切削されており、すでに図6のような特徴を呈していると考えられる。これらのことから効果的な端部拘束の添え板材として破壊が生じにくく、また被削材端面との密着を確実にするふくらみが生じやすいものが好ましいことになる。

Fig.7 Comparison of the chipping sizes on the end side, L under two compressive loads, F
 Constraint: Splint press type with aluminum splint
 Grinding conditions: $V_s=1570\text{m/min}$, $V_w=0.24\text{m/min}$

次に、押付荷重の大小による欠けの抑止効果の差異を調べる。図7(a)は被削材をアルミナセラミックスとし、添え板に純アルミニウムを用いて端面を拘束し研削したときの L と Δ の関係を押付力 F が 100 N ($p=0.18\text{MPa}$) と 500 N ($p=0.90\text{MPa}$) の場合について示したものである。あわせて拘束しない場合の結果も記した。 $F=100\text{ N}$ で拘束した場合の L の大きさは拘束しない場合に比べ幾分小さくなる程度であるが、 $F=500\text{ N}$ で拘束した場合には大幅に減少しており明確に欠け抑止効果が発揮されている。また、図7(b)には、被削材を普通板ガラスとして図7(a)の場合と同様な実験を行った結果を示す。同図で $F=100\text{ N}$ と $F=500\text{ N}$ の L はともに拘束しないときのものに比べ著しく減少しており、

Fig.8 Comparison of the chipping sizes on the end side, L for various thicknesses of the adhesive layer, t . Constraint: Splint adhesion type with adhesive A. Grinding conditions: $V_s=1570\text{m/min}$, $V_w=0.24\text{m/min}$

この被削材に対しては F が 100 N でも十分な拘束効果のあることがわかる。以上の結果は、端部欠けを有効に抑止するためにはある強さ以上の押付力が必要であり、その強さは被削材の材質によって異なることを示している。

3.2.2 添え板接着拘束の場合

まず、接着層厚さを変えた場合の欠け抑止効果の差異を調べる。図8に被削材を普通板ガラスとし、その端面に純アルミニウムの添え板を接着剤Aを用いて種々の厚さ t で接着した場合の L と Δ の関係を示す。ただし、 $t=3000\text{ }\mu\text{m}$ については添え板を用いずにこの厚さの接着層のみを端面に設けた結果である。また、拘束しない場合を実験結果の平均的曲線で併記した。

同図によれば、 $t=30\text{ }\mu\text{m}$ のように接着層の薄い場合には L はいずれの Δ においても拘束のない場合に比べて非常に小さくなっており、端部欠けの抑止効果が顕著である。 t が大きくなると、 $L-\Delta$ 曲線が漸次拘束のない場合の曲線に近づき、欠け抑止効果が減少していく。接着による欠けの抑止効果は Δ の小さい場合より Δ の大きい場合の方がより顕著である。

以上のような端部欠けに対する接着拘束の特徴は被削材をアルミナセラミックスとした場合でも同様に認められており、接着層の厚さを砥石切込み深さに応じて十分薄いものとするのが欠けの抑止効果を高めるために必要である。

つぎに接着剤の縦弾性係数に着目して端部欠け抑止効果の差異を調査する。図9は接着剤Bを用いた場合の L と Δ の関係を接着剤Aの場合と比較して示したものである。図より明らかなように、 t の減少に伴って L が減少する傾向は両接着剤の場合とも見られるが、

Fig.9 Comparison of the chipping sizes on the end side, L in two types of adhesive. Constraint: Splint adhesion type with adhesive A or B. Grinding conditions: $V_s=1570\text{m/min}$, $V_w=0.24\text{m/min}$

Fig.10 Illustration of (a) the deformation of the constrained end surface in grinding and (b) the indentation of a sphere into an elastic layer supported by a half-space foundation

同じ Δ での L の大きさには差があり、接着剤Bの方が小さい。しかし、この差は $t=30\text{ }\mu\text{m}$ のように t が小さくなる場合には明確でなくなる。

4. 端部拘束の強さについての考察

前章の結果から、研削時の被削材端部の破壊現象は被削材端部の拘束方法によって大きく変化することが明らかになった。端部拘束方法の違いによる欠けの抑止効果の大小は端部拘束の強さの大小にもとづくものと考えられる。そこで、その強さを比較的簡単なモデルを用いて表現することを試みるとともに、拘束荷重や接着層厚さなど実験で設定した因子の役割を考えてみる。

まず、添え板接着拘束の場合について考える。図10(a)は接着拘束された被削材の端部近傍が研削される際の欠けが生じる前の端面部の変形を模式的に示したものである。拘束側の部材は被削材端面部の張出し

(a) $R/d=50$ (b) $R/d=200$ Fig. 11 Effect of the thicknesses of adhesive layer, t on the mean contact pressure, q_m

により変形を受け、その反力として端面部に拘束を与える。接着層と添え板の2層から成る拘束側部材のこのような変形を単純化して取り扱うために図10(b)に示すような薄層付き半無限弾性体への球押し込みモデルを採用する。ただし、被削材端面部の張出し部の形状を球面状と想定してこのモデルを採用した。また、接着層は他に比べ変形が容易であるため球を剛体とするともに拘束側部材の曲げ変形はないものとした。そこで拘束の強さを剛体球によって d だけ押し込まれたときの反力 Q を投影接触面積で除した平均圧力 q_m で評価することとし、 q_m と d の関係を接着層厚さ t 、接着剤の縦弾性係数 E_1 などを変えて求める。このような剛体球と多層物体の接触問題は、表面力による多層物体の変形理論を適用し、表面力に対する反力を Conryらが提唱するシンプレックス法を用いて接触の適合条

Fig. 12 Effect of the elastic moduli of adhesives on the mean contact pressure, q_m

件や荷重条件を満足するように設定することによって解ける³⁾。その具体的計算例は川口らによって示されており⁴⁾、ここではこれらを援用した。

図11(a), (b)に計算された平均圧力 q_m と押し込み量 d の関係を種々の接着層厚さ t について示す。同図は接着層を接着剤A ($E_1=3.0\text{GPa}$, $\nu_1=0.38$)、添え板を純アルミニウム ($E_2=71\text{GPa}$, $\nu_2=0.34$) とし球の半径を $R/d=50$ および 200 とした場合のものである。明らかに平均圧力 q_m は接着層厚さ t によって変わり、 t が小さくなるほど q_m は高くなる。そしてその傾向は d が大きいところでより顕著である。このような t をパラメータとする q_m と d の関係は前掲の図8で見られた拘束の有無による L の差と d の関係に似かよっている。 d の増加は d の増加に起因するものであり、拘束のある場合と無い場合の L の差は欠けの抑止の程度を示すものと解されるので、このモデルにおける平均圧力 q_m で端部拘束の強さを表現しても実際の結果とのずれは大きくないと考えられる。また、接着剤の縦弾性係数 E_1 の差に注目し q_m と d の関係を調べた。接着剤Aと接着剤B ($E_1=4.6\text{GPa}$, $\nu_1=0.40$) に対する計算結果を図12に示す。 E_1 の高い接着剤Bの方が q_m は大きく、図9に示されている欠けの抑止の程度で見た場合と同傾向となっている。

このような計算結果から q_m を操作できる因子として E_1 と t を考えた場合、樹脂系の接着剤では E_1 を大きく変えることができないが、 t の方はかなりその大きさを自由に変えられるので、実用面から後者を操作因子とする方が有利である。

つぎに、添え板押付拘束の場合について考える。実験で与えた押付荷重を被削材端面部の平均面圧で表せ

ば $p = 0.90 \text{ MPa}$ ($F = 500 \text{ N}$ のとき)である。この程度の圧力が被削材端部を強く拘束するとは考えられない。やはり、先のモデルと同様、被削材端面部の張出しに対する添え板の反力が拘束を生じていると考えるのが妥当である。その場合、被削材端面と添え板が完全に密着しているならば、拘束の強さを表す平均圧力 q_m は、先の接着剤に比べて縦弾性係数や硬さが高い純アルミニウムの添え板の場合には、かなりの大きさになることが推測される。しかし、現実には被削材端面部と添え板が完全に密着することではなく、局所的に接触していると思われるので、局所的接触部の大小が q_m へいかなる影響を与えるかが問題である。添え板との局所的接触部がわずかであれば被削材の端面部は添え板の方へ容易に張出し、 q_m は小さな値を取る。押付荷重を増加することは結局のところこの局所的接触部面積を大きくすることである。その際、添え板の材質として図 6(b)で示されるような密着が容易であり、しかも適度な変形抵抗を示すものが好ましい。

以上のように、端部拘束の強さに着目してここで用いた2種の端部拘束をとらえた場合に共通する重要な点は、被削材の端部張出しをいかに拘束するかということで、球状圧子に見たてた張出し部が添え板部に食い込むときの接触剛性を大きくすることである。そのためには、添え板接着拘束では接着層を薄くすることが、また、添え板押付拘束では被削材と添え板との密着性を高めることが効果的である。

5. 結 言

添え板押付拘束または添え板接着拘束を行い単粒研削することにより、端部欠けの抑止効果について以下の知見を得た。

- (1) 適切な拘束条件のもとではいずれの方式の拘束でも、拘束が無い場合に見られるラップ状の欠けや扇形状の欠けは生じない。拘束時の欠けは、条痕に沿って小さな破砕により生じた広がり狭いものである。
- (2) 添え板押付拘束では普通板ガラスよりも純アルミニウム板を用いた方が欠けの抑止効果が大きい。また、その効果は押付荷重が十分大きい場合によく発揮される。
- (3) 添え板接着拘束では接着層の厚みが小さく、接着剤の縦弾性係数が大きい場合に欠けの抑止効果が大きい。
- (4) 両方法の材料端部を拘束する強さは、被削材端面の張出し部が添え板に食い込むときの接触剛性を大きくすることにより増大する。

最後に、薄層付き半無限体への球押込み問題に関する情報をご提供頂いた近畿大学工学部石垣博行博士に深く感謝の意を表します。また、実験材料をご提供頂いた大阪ダイヤモンド工業(株)、日本化学陶業(株)に深謝致します。

参 考 文 献

- 1) 水谷勝己, 山口勝己, 田中芳雄: セラミックスの研削における材料端部の欠け——単粒研削による欠けの形態と規模, 精密工学会誌, 53, 9(1987) 1459.
- 2) 宮本紘三, 川端文雄, 菅野 清: 三次元表面形状の一評価法, 昭和57年度精機学会秋季大会学術講演会講演論文集 (1982) 139.
- 3) T.F.Conry and A.Seireg: A Mathematical Programing Method for Design of Elastic Bodies in Contact, J. Appl.Mech., 38, 6, (1971) 387.
- 4) 川口 格, 石垣博行, 出水 敬: 被膜材料のころがり摩擦に関する研究——硬い球と被膜材料の接触特性, 昭和56年度精機学会秋季大会学術講演会講演論文集 (1981) 679.