内径切削工具の高性能化に関する研究*

(CFRP 製ボーリングバーの開発)

長野 修三^{*1}, 藤井 透^{*2}, 小泉 孝之^{*2}
辻内 伸好^{*2}, 井上 喜雄^{*3}, 上田 宏樹^{*3}

Study for Improvement of Inner Cutting Tool

(Development of a CFRP Boring Bar)

Shuzo NAGANO, Toru FUJII, Takayuki KOIZUMI,
Nobutaka TSUJIUCHI, Yoshio INOUE and Hiroki UEDA

A new boring bar whose stability against chatter is superior to not only conventional steel bars but also cemented carbide bars, has been successfully developed. A high-modulus carbon-fiber-reinforced plastic was used as the material of the bar. Four types of bar having different shapes of steel core were tested while carbon fibers were aligned unidirectionally in the longitudinal direction to give high bending stiffness for all cases. The bar with a cross-shaped steel core shows the best cutting capability and stability among all CFRP boring bars. It can be used when the ratio between length (L) and diameter (D) is 7 even under severe conditions, whereas a cemented carbide bar sometimes chatters even at $L/D=6$. The cross-shaped steel core can increase the bending stiffness of the bar in both tangential and radial directions by constraining the shear deformation of fiber layers without sacrificing resonant frequencies significantly.

Key Words: Chatter Vibration, Cutting Tool, Reinforced Plastics, CFRP, Boring Bar

1. 緒言

中ぐり加工においては、切削工具の剛性の低さ、減衰能の不足によるびびり振動の発生が大きな問題となっている。一般的には鋼製ボーリングバーの場合、バー直径に対する突き出し長さの比 (L/D) が4程度で切削不能となる⁽¹⁾。従来、びびり振動に対しては、超硬合金製シャンクを用いて曲げ剛性を高めたボーリングバー、内部にマスダンパーを組み込み減衰性能を高めたボーリングバー等を用いて対処されてきたが、いずれも高価であることから一般化していない。本研究では高弾性炭素繊維による高い曲げ剛性、樹脂層による高い減衰性能が期待されるCFRPを用いてボーリングバーの試作を行った。その結果、超硬合金製ボーリングバーを超える高い耐びびり性能を有するボーリングバーの開発に成功した。本論文はCFRP製ボーリングバーの開発過程ならびに切削性能評価試験結果について述べたものである。

2. ボーリングバーの設計

2.1. びびり振動 切削加工中に発生する振動は、その発生機構によって強制振動と自励振動に分類される。Merrett⁽²⁾は外径切削におけるびびり振動をフ

ィードバック理論を用いて説明している。再生効果⁽³⁾のフィードバックに起因する自励振動は再生びびりと呼ばれている。切削中の工具の動的挙動は図1に示す背分力方向に関する1自由度のバネ-ダッシュポット-マスでモデル化されている。切削工具のびびり振動を説明するため、最近では多重再生効果⁽⁴⁾も考えられている。

図1の1自由度振動系により再生びびりを考えたとき、再生びびりに対して安定であるために、以下のことが要求される。

- (1) ボーリングバーの静的曲げ剛性を大きくする。
- (2) ボーリングバーの減衰能を向上させる。

従来より、シャンクに対する超硬合金の適用、減衰機構の組み込み、高減衰樹脂の適用等が行われてきたが、いずれも上記の一方のみを解決したものであり、両者を同時に満足するものは存在していない。本研究では、高い引張り剛性を有するピッチ系炭素繊維と高減衰性能を有する高分子材料を組み合わせることにより、鋼以上の曲げ剛性と鋼以上の減衰性能を同時に獲得することのできるCFRPに着目した。これをボーリングバーの主材料とすることで高い耐びびり性能を有するボーリングバーが開発できると考えた。

* 原稿受付 1996年5月23日。

^{*1} 正員, 同志社大学大学院 (〒610-03 京都府綴喜郡田辺町)。

^{*2} 正員, 同志社大学工学部。

^{*3} 正員, (株)神戸製鋼所 (〒651-22 神戸市西区高塚台1-5-5)。

Fig. 1 Merritt's chatter model of 1 D.O.F. vibration system

2.2. 炭素繊維のヤング率 CFRP製ボーリングバーの設計にあたって、減衰能については母材としてエポキシ樹脂を使用するため、鋼に比べて有利であると考え、静的曲げ剛性を大きくすることに重点を置いた。ボーリングバーの曲げ剛性を高めるためには軸方向の引張り剛性を高めればよい。引張り剛性を最大にするため炭素繊維をボーリングバーの軸方向に対してすべて0°に配したとすると、複合材料としてのヤング率 E_l は複合則を用いて次式で求められる。

$$E_l = E_f V_f + E_m V_m \equiv E_f V_f \quad (V_f + V_m = 1) \quad (1)$$

ここで、 E_f は炭素繊維のヤング率、 E_m は母材のヤング率、 V_f は炭素繊維の体積含有率、 V_m は母材の体積含有率である。

鋼のヤング率を200 GPa、炭素繊維の体積含有率を50%とすれば、式(1)よりCFRPの引張り剛性を鋼より高くするためには、少なくとも400 GPa以上の弾性率を有する繊維が必要であることがわかる。カタログではヤング率1200 GPa相当の炭素繊維もあるが、入手が困難であり成形も難しいことから、700 GPa相当の高弾性炭素繊維と粘性の高い樹脂から成るCFRPプリプレグを用いることとした。

2.3 断面構造 通常の鋼製ボーリングバーを用いた予備試験を行い、切削中の刃先の鉛直（主分力）方向—水平（背分力）方向の加速度データよりリサージュを求めたところ、得られた波形は楕円形状を示した。主分力方向加速度に対して背分力方向加速度の大きさは約1/3程度であった。この結果より、切削中の刃先の挙動は主分力方向、背分力方向どちらか一方のみの1自由度で説明することはできないことが明らかになった。ボーリングバーの設計にあたっては、主分力、背分力両方向共に高い曲げ剛性を得ることのできる構造が要求される。しかし、本研究で用いたCFRPは異方性材料であり、繊維と直交する方向の曲げに対しては面内せん断による変形を無視することはで

きず、高弾性炭素繊維を用いて高い引張り剛性を実現しても、等価曲げ剛性は期待したほど高いものとはならない。よって、せん断変形を拘束できる断面構造が、ボーリングバーに要求される。そこで図2-aに示す、十字断面の鋼製芯材を有する構造(Type C)を考案した。さらに、図2-b～図2-dに示すように鋼製芯材の形状を変更することにより、主分力(Type V)、あるいは背分力方向(Type H)のどちらか一方のみを強化したもの、両方向ともわずかだけ強化したもの(Type P)についても検討した。

Fig. 2 Cross sections of CFRP boring bars

2.4 CFRPボーリングバーの構成 CFRP製ボーリングバーの構成を図3に示す。常に一定の刃先形状およびノーズRを確保するためには、市販のスローアウェイチップを用いるのが適当であると考えられる。しかし、CFRP層にこれを直接取り付けることは不可能であるため、本研究では市販の鋼製のカッティングヘッドを用いることとした。ただし、カッティングヘッドをCFRP層に直接ボルト留めすることは難しい。そこで、鋼製のアダプターをCFRPロッドにエポキシ系接着剤を用いて取り付け、これにカッティングヘッドをボルト留めすることにより取り付けることとした。

Fig. 3 Schematic view of CFRP boring bar

3. 有限要素法解析

試作に先立ち各ボーリングバーの特性を有限要素法解析により評価した。Type C、Type V、Type H、Type Pの有限要素モデルを図4に、境界条件を図5に示す。

一般にボーリングバーは直接刃物台の固定ボルトで締め付けることはしない。専用のボーリングバーホルダで、バーの全周を締め付けて固定することが多い。刃物台へはホルダが固定される。そこで図5に示すようにボーリングバー表面でボーリングバーホルダの内径と接する全節点の全並進自由度を拘束することとした。比較のため、図4-aと同様の有限要素モデルを用いて全体を鋼、超硬合金としたものについてもそれぞれ解析を行った。解析に用いたCFRPの物性値を表1に示す。これらの値は材料試験（静的）により求められたものである。

Fig. 4 FE divisions of CFRP boring bars

Fig. 5 Boundary condition of boring bars

Table 1 Material properties of CFRP

Young's modulus	E_x	E_y	E_z
(GPa)	6.85	6.85	320
Shearing modulus	G_{xy}	G_{yz}	G_{zx}
(GPa)	0.533	2.54	2.54
Poisson ratio	ν_{xy}	ν_{yz}	ν_{zx}
	0.23	0.004	0.004

3.1 セン断変形の影響 まず、CFRPの低いせん断剛性が等価曲げ剛性に与える影響を明らかにするため、Type Pバーを $L/D=7$ の片持ち梁の状態に固定し、バー先端に集中荷重を与えた場合について検討した。本研究で用いたCFRPは直交異方性であることからせん

断弾性係数 G_{yz} , G_{zx} を2.54 GPa から鋼のせん断弾性係数である 80 GPa まで順次変化させて変形解析を行った。ヤング率 E_z は 320 GPa とし、鋼製ボーリングバーの曲げ剛性で無次元化した計算結果を図6に示す。図6より、CFRPのせん断弾性係数が実際のCFRPの値である 2.54 GPa でも、鋼製ボーリングバーの曲げ剛性よりも11 % 程度高いことが明らかになった。しかし、CFRPのせん断弾性係数は鋼の 3 % 程度であるため集中荷重が作用した際に、樹脂層のせん断変形を拘束することができず、CFRP製ボーリングバーは期待されたほど高い等価曲げ剛性を有していないことも明らかになった。しかし、せん断弾性係数を 5 GPa にするだけで、等価曲げ剛性が 10 % 程度向上することから、せん断変形を拘束することにより、CFRP製ボーリングバーの曲げ剛性を高めることができるものと期待される。

Fig. 6 Relation between shear modulus of CFRP and bending stiffness of Type P CFRP boring bar ($L/D=7$)

3.2 等価曲げ剛性の評価 各ボーリングバーについて、 $L/D=7$ の片持ち状態にボーリングバー先端に集中荷重を与えたときの変形解析を行った。Type Cボーリングバーについては、芯金の厚さを0~8 mm まで変化させてその影響を調べた。解析結果を図7に示す。縦軸は鋼製ボーリングバーの曲げ剛性で無次元化してある。

Fig. 7 Relation between thickness of steel core of CFRP boring bars and equivalent bending stiffness ($L/D=7$)

図7より、CFRPのヤング率は鋼の約1.6倍であるにもかかわらず、ボーリングバー全体がCFRPで全くせん断変形に対する補強を施さないとき(Type Cの芯金厚さを0 mmにしたとき)、等価曲げ剛性は鋼製バーの88 % 程度になる。しかし、芯金を用いた場合には、その厚さがわずか1 mm 程度でも、等価曲げ剛性は鋼製バーに対して約5 % 程度高くなる。このことから十字断面形状の鋼製芯金がせん断変形の拘束に対して大きな効果を発揮していることがわかる。また、芯材の厚さを6 mm にすれば最も高い曲げ剛性を得ることができる。この場合、鋼製バーに対して約20 % 高い曲げ剛性となる。さらに、芯金の厚さを厚くするとせん断による曲げ変形は減少する。しかし、同時にCFRPの体積も減少するため、全体として等価曲げ剛性も低下する。Type Hではせん断応力が最も高くなるバー中央部におけるせん断変形の拘束ができないため、鋼製バーよりも曲げ剛性が低い。わずかでもせん断変形を拘束するType Pの等価曲げ剛性は鋼製バーよりも高いことから、十字断面の芯金がせん断変形の拘束に対して非常に有効であることがわかった。一方、超硬合金製バーの曲げ剛性は鋼製バーの約2.3倍以上と高い値となっており、現在のCFRPを用いる限り、CFRP製バーの曲げ剛性が超硬合金製バーに匹敵することは難しい。

3.3 1次固有振動数の評価 各ボーリングバーについて $L/D=7$ の片持ち状態での、1次固有振動数について評価を行った。Type Cバーについては、芯金の厚さを0~8 mm まで変化させてその影響を調べた。結果を図8に示す。縦軸は鋼製バーの1次固有振動数の値で無次元化した値で示す。

Fig. 8 Relation between thickness of steel core of CFRP boring bars and first resonant frequency ($L/D=7$)

図8の解析結果より、すべてのCFRP製ボーリングバ

ーの1次固有振動数は鋼製バーのそれより高いことがわかった。また、芯金の厚さが0 mmのType Cでは、その等価曲げ剛性は鋼製バーより低いにもかかわらず、1次固有振動数は約20 % 程度高い。これは、CFRPの密度が鋼の1/4 程度であることによる。芯金の厚さが2 mm のときType Cバーの固有振動数は最も高くなる。2 mm を超えても6 mm までは等価曲げ剛性はさらに高くなる。しかし固有振動数は徐々に低下する。これは芯金の厚さが厚くなるとバー全体の等価密度が大きくなるためである。芯金厚さ2 ~ 3 mm のときに剛性と等価密度のバランスが良い。

Type VバーはType Cバーと同等の等価曲げ剛性を有するが、芯金の体積がType Cバーよりも少ないため固有振動数は最も高い。ところで、切削中のボーリングバーに作用する力としては主分力のみならず背分力も考慮される必要がある。Type Vバーは背分力方向においてはType Hバーと等価であることから、性能の低い背分力方向においてびびり振動が発生する可能性がある。そのため、Type Vバーに対して高い耐びびり性能は期待できないものと考えられる。一方、超硬合金製バーでは、その固有振動数はType Vバーの方が高い。これは超硬合金ではヤング率も高いがそれ以上に密度も高いためである。

最も固有振動数を高めるために、Type Cバーでは鋼製芯材の厚さを2 mm として試作した。同様にType H、Type Pについても芯金の厚さは2 mm とし、Type Pについては直径15 mm、内径5 mm のパイプを用いて試作した。

4. 切削試験

図9に示すように、各ボーリングバーを特製ボーリングバーホルダを用いて汎用旋盤の刃物台に取付けた。 $L/D=7$ ($L=224$ mm, $D=32$ mm) とした。被削材として外径100 mm、内径60 mm の鋼製厚肉パイプ (S45C) を用いて内径切削実験を行った。

Fig. 9 System for cutting test

4.1 切削限界測定試験 切削条件を順次変化させて、その時のびびり発生の有無をびびり音で確認しながら、切削限界を調べた。

傍に加速度センサーを取付け、切削中の刃先の主分力、背分力方向の加速度を測定した。

Fig. 10 System for measurement

5. 結果と考察

被削材回転数 630 rpm (切削速度 120 mm/min) における各ボーリングバーのびびり発生時の送りと切り込みの関係を図11に示す。図中、無印はその送りにおいて、すべての切り込みで切削不可能であったことを示している。

CFRP製ボーリングバー、鋼製ボーリングバーについて、被削材回転数 630 rpm, 送り 0.3 mm/rev, 切り込み 0.4 mmにおける主分力方向加速度の時間変化、およびそのパワースペクトル、主分力-背分力方向加速度のリサージュ波形をそれぞれ図12, 13, 14に示す。

鋼製バーの場合、 $L/D=7$ ではすべての条件において切削不可能であった。Type Cバーおよび超硬合金製バーはともに高い切削性能を有している。しかし、Type CのCFRP製バーでは、超硬合金製バーが切削不可能な領域でも切削可能であり、その耐びびり性能の優れていることが明らかになった。一方、Type Vは高い固有振動数を有するにも関わらず、その切削性能はType H, Type Pとほとんど変わらない。このことから主分力、背分力両方向においてType Cの十字断面の芯金がバーのせん断による曲げ変形を低減させ、耐びびり性能向上に寄与していることがわかる。

図12より、鋼製バーを用いた場合、その切削中の刃先の加速度は、Type Cバーを用いたときと比べて約20倍以上大きいことがわかった。

図13より、各バー共に切削中の刃先振動の周波数成分は主に単一の周波数から構成されている。切削中における切り込み位置からの刃先の変位 d は、次式で概算できる。

$$d = \frac{1}{\omega^2} a \sin(\omega t) \cdots \cdots (2)$$

ここで、 ω は角振動数、 a は加速度の振幅である。切削中のType Cバー、鋼製バーの加速度振幅を11G、

280 Gとすると、式(2)より各ボーリングバーの切削中の刃先の主分力方向の変位はそれぞれ 0.011 mm, 0.43mmとなる。切り込み量が 0.4mmであることを考慮すると、Type Cバーの場合、十分滑らかな面粗度が確保されていることがわかる。一方、鋼製バーの場合は、その変位が切り込み量以上であることから、びびりの発生により刃先はしばしば加工表面から離れていると考えられ、この結果滑らかな仕上げ面が得られていないことがわかる。

図14の結果から、両ボーリングバーのリサージュ波形は共に軸に対して一定の傾きを持つ明確な楕円軌道を繰り返し描いていることがわかる。これは、主分力方向、背分力方向の振動に位相差が生じていることを表わしており、両者の間に何らかの連成が存在していることを示している。よって、ボーリングバーのびびり振動を解析しようとするれば、1自由度系ではなく主分力、背分力の両方向についての2自由度連成振動を考慮する必要があると考えられる。

6. 結言

本研究は、ボーリングバーの主要材料として従来の鋼材に代わりCFRPを用いることによりバーの耐びびり性能の向上を図ったものである。結論として以下のことがあきらかとなった。

1. 一方向性のCFRPを主要材料として用いることにより、 $L/D=7$ でもびびり振動を発生せずに切削可能な、優れたボーリングバーの開発に成功した。
2. CFRP製ボーリングバーは十字断面の鋼製芯金を用いてハイブリッド構造とすることで、面内せん断による変形拘束が可能となり、高い曲げ剛性を有することが可能となった。
3. ボーリングバーのびびり振動を考える際には、主分力方向、背分力方向の両者について考慮する必要があることがわかった。

Fig. 11 Cutting limit of boring bars (630 rpm)

(a) Type C CFRP boring bar

(b) Steel boring bar

Fig. 12 Time history of acceleration

(630 rpm, feed = 0.3 mm/rev, cutting depth = 0.4 mm)

(a) Type C CFRP boring bar

(b) Steel boring bar

Fig. 13 Power spectrum of acceleration of boring bars

(630 rpm, feed = 0.3 mm/rev, cutting depth = 0.4 mm)

(a) Type C CFRP boring bar

(b) Steel boring bar

Fig. 14 Lissajous of acceleration of boring bars

(630 rpm, feed=0.3 mm/rev, cutting depth = 0.4 mm)

参考文献

- (1) 坂田, 機械加工の振動解析, 1990, 工業調査会, 70.
- (2) H. E. Merritt, Trans.ASME Ser.B, 87, 4,(1965).
- (3) R. S. Hahn, Trans.ASME, Vol.78 (1953)
- (4) 佐藤, 機講論, No.911 (平成6年), 24.