高減衰 CFRP 製ボーリングバーの研究*

上田 宏樹^{*1}, 井上 喜雄^{*2}, 長野 修三^{*3}
辻内 伸好^{*4}, 藤井 透^{*4}, 小泉 孝之^{*4}

Study of A High Damping CFRP Boring Bar

Hiroki UEDA^{*5}, Yoshio INOUE, Syuzou NAGANO,
Nobutaka TSUJIUCHI, Toru FUJII and Takayuki KOIZUMI^{*5} KOBE STEEL, LTD., Mechanical Engineering Research Lab.,
5-5 Takatsukadai 1-chome, Nishi-ku, Kobe, Hyogo, 651-2271 Japan

CFRP is utilized as a material for the shank of boring bars, to achieve higher cutting performance than that of conventional steel shank bars or carbide shank bars. Natural frequencies of CFRP considered its anisotropy by the rule of mixture is calculated by FEM. The equivalent mass-spring method is proposed to estimate the loss factor of CFRP. Combination of ultra-high modulus carbon fiber and matrix resin formulated to have specific damping characteristics consistently gives both of high natural frequencies and high loss factors. The loss factors of CFRP boring bar are calculated based on the mode strain energy method. High damping CFRP boring bars can be stably used at higher surface speed with longer critical overhang without chatter vibration.

Key Words: Damping, Loss factor, CFRP, Boring Bar

1. 緒 言

中ぐり加工に用いられるボーリングバーは、その構造上工具系の剛性を十分に高くできないため、自励びり振動が発生しやすい問題がある。このような自励振動を抑制するためには一般に、高剛性、高減衰性が必要とされ、これに対し、ボーリングバーの剛性を高めるためにボーリングバーの素材に超硬合金を用いたもの、また、減衰性を高めるために、ダイナミックダンパを内蔵したものなどがある。

加工時の自励振動の研究は過去多数行われてきており^{(1)~(3)}、その分類は以下のようにされている。

(1) 切削時の切屑厚さの変動に対する切削力の変動に遅れが発生し、系の減衰が負になることによって発生する。

(2) 1周期前の切削によって発生した切削面の起

伏を切削するときに振動系にエネルギーが流入し、振動が助長されることによって発生する(再生びり振動)。

(3) 工具がボーリングバーのように2自由度をもつ場合特有の現象で、2方向の振動に剛性差があり、それらの振動モードが連成することによって発生する。

これらの自励びり振動に対して安定なボーリングバーについての研究は多数行われてきている^{(4)~(8)}。その中で、ボーリングバー本体の減衰を高めるために防振合金を用いたもの⁽⁵⁾があるが、自励びり振動が発生しにくい点での性能は一般の鋼製バーには勝るものの、超硬合金製バーとはほぼ同等にとどまっている。また、2方向の振動モードの連成により発生する自励振動に対し、切削力の方向と連成する振動モードの方向および剛性差を最適化することにより抑制する方法の研究も行われている^{(6)~(8)}。しかし、この研究では、振動モードの連成により発生する自励振動の安定限界よりも再生びり振動の安定限界のほうが低いため、この方法は、実際にはあまり有効ではないとされている。

そこで、著者らは、一般に高性能とされている超硬合金製ボーリングバーを越える性能を実現することを

* 原稿受付 1998年11月4日。

^{*1} 正員、(株)神戸製鋼所機械研究所 (〒651-2271 神戸市西区高塚台1-5-5)。

^{*2} 正員、高知工科大学工学部 (〒782-0003 高知県香美郡土佐山田町宮ノ口185)。

^{*3} 正員、(株)トヨタシステムリサーチ (〒461-0005 名古屋市東区東桜1-3-10)。

^{*4} 正員、同志社大学工学部 (〒610-0321 京田辺市多々羅)。

E-mail: ueda@merl.kobelco.co.jp

目的として、剛性と減衰性をともに高くとることが可能となる素材の一つである CFRP を適用することに着目した⁹⁾。本研究では特に、CFRP の減衰性を効果的に高めるためにマトリックス樹脂に従来の CFRP には用いられていない制振材を用いることを提案している。その動的設計方法として複合則により連続体での剛性の予測と、連続体に対する感度解析から繊維と樹脂の剛性の分担率を求め、それに対するエネルギー消散モデルより減衰を予測する方法¹⁰⁾⁽¹¹⁾を開発し、CFRP の繊維と樹脂の最適化を行っている。

本報では、剛性を確保しつつ減衰性を高めた CFRP をボーリングバー本体に適用するために、ボーリングバーの切削性能に対するボーリングバーの動的設計指針の検討を行っている。そして、剛性を確保しつつ減衰を高めた高減衰 CFRP を設計し、その結果を反映した高減衰 CFRP 製ボーリングバーの動的設計方法として、CFRP の異方性を考慮したモードひずみエネルギー法により CFRP 製ボーリングバーの損失係数の予測を行い、最適な構造を検討する。最後に、設計された高減衰 CFRP 製ボーリングバーの動特性評価と切削性能を評価する。

2. ボーリングバーの切削性能と動特性の関係

ボーリングバーの再生びり振動に対する動特性(固有振動数, 損失係数)を既存のボーリングバーに対して調査することにより, CFRP 製ボーリングバーの動特性の目標値を設定する。また, CFRP 製ボーリングバーの構造を示す。

2・1 ボーリングバーの動特性の目標値設定 図 1 にボーリングバーの中ぐり加工状態を示す。このようにボーリングバーは片持ち状態であるため, 再生びり振動が発生しやすい。ボーリングバーによる中ぐり加工時に発生する再生びり振動は, 1 周期前の切削によって発生した切削面の起伏を切削するときに振動系にエネルギーが流入することによって振動が助長されることによって発生する自励振動の一種であり, それを抑制するためには一般に以下の方法が考えられる。

- ・系の減衰を増加させて安定化する方法
- ・系の剛性を高めて一次モードの固有振動数を高くし自励振動を発生しにくくする方法

既存のボーリングバーにおいては, ボーリングバーのシャンク部が鋼製のものが汎用品とされており, 鋼製よりも再生びり振動の発生しにくい高切削性能なものとして, ダイナミックダンパを内蔵することによって減衰を増加させるタイプやシャンク部の素材に超硬合金を使用することにより固有振動数を高めるタイプがある。ダイナミックダンパを内蔵したタイプはダンパの振動数をボーリングバー突き出し量により決まる固有振動数に一致させるように調整することが必要であり, また, 非常に高価である。そこで, 本研究で開発されるボーリングバーは耐再生びり振動に対し, 既存の超硬合金製ボーリングバーを越える性能を有することを目標とする。

ここで, 過去の研究では, ボーリングバーの耐再生びり振動に対する性能は, そのボーリングバーが図 1 で示す片持ちで固定された状態での一次モードの等価剛性とそのモード減衰比で評価されている¹⁾。そこで, 本研究では, 等価剛性に関係する固有振動数とモード減衰比に相当する損失係数で評価することにする。つまり, 既存の鋼製, 超硬合金製およびダイナミックダンパ内蔵タイプのボーリングバーの一次モードの固有振動数と損失係数に対する再生びり振動の発生限界を調べることにより, 目標とする一次モードの固有振動数と損失係数の設定を行う。各ボーリングバーの固有振動数はシャンク部先端に小型加速度計を取付け打撃試験により得られた振動の周波数応答から求めた。また, 損失係数は加振力とその伝達関数の周波数応答から半値幅法により求めた。そして, 打撃試験を行った各突き出し長さに対し, その状態での切削を行い, 再生びり振動発生の有無を調べた。なお, ボーリングバーのサイズは直径 0.016 m である。切削条件は切り込み深さ 0.1×10^{-3} m, 送り量 0.1×10^{-3} m/rev, 切削速度 150 m/min で被削材は S 45 C である。表 1 に各ボーリングバーの突き出し量(直径 D に対する突き出し長さ L の比率, 以降 L/D とする。)に

Fig. 1 Boring bar

Table 1 Limit of chatter vibration

L/D	Steel	Carbide	With Damper
4.5	○	○	○
5.0	×	○	○
6.0	×	×	○
6.5	—	×	—
7.0	—	×	○

Fig. 2 Natural frequency and loss factor, Range of chatter vibration

対する再生びり振動発生の有無を示す。表1中の○は再生びり振動なし、×はありを示している。

図2に各ボーリングバーの L/D に対する固有振動数と損失係数の関係を示す。図2中の各測定値に添付されている数字は L/D を示している。ここで、切削試験から得られた表1の結果より、図2中の斜線部で再生びり振動が発生することがわかる。

したがって、図2より、目標とする一次モードの固有振動数と損失係数を斜線で示す不安定範囲外にするように設定すればよいことがわかる。そこで、目標値としては超合金製が $L/D=6$ で再生びり振動が発生していることから、これを越えるために $L/D=6$ で、一次モードの固有振動数は1200 Hz以上、損失係数は0.1以上(図2中*)を目指したCFRP製ボーリングバーを設計する。

2.2 CFRP製ボーリングバーの構造 ボーリングバーはホルダを介して旋盤に取付けられる。ここで、CFRP製ボーリングバーの場合、ホルダの材質が鋼であり、ボーリングバーとホルダとの接触部分がCFRPと鋼との接触状態となるため剛性が下がり、固有振動数が低下する問題がある。この現象について示すと、ボーリングバー取付状態での打撃試験から得られる一次モードの固有振動数は $L/D=6$ で850 Hzになるのに対し、第3章で示す有限要素法で解析した結果は917 Hzとなる。したがって、ボーリングバーとホルダの接触部の剛性をできるだけ高くするために、ボーリングバーとホルダとの接触面を鋼同士の接触にするようジャンク部の断面に十字状の鋼製の芯を設ける構造をとる。よって、CFRP製ボーリングバーは図3に示すような十字芯金にCFRPが取付けられた構

Fig. 3 CFRP boring bar

Fig. 4 Deformation mode of FRP

造になる。

3. 高減衰CFRPおよび高減衰CFRP製ボーリングバーの動的解析方法

2章で設定された超合金製ボーリングバーの性能を越えるために必要な固有振動数と損失係数を実現するために、ボーリングバーの素材をCFRP製とした。これにより、固有振動数と損失係数をともに高めることを目指す。そこで、ボーリングバーの曲げ変形の固有振動数を効果的に高め、また、減衰を高くとることのできる構造として繊維を一方に並べた状態で樹脂に含浸させた一方繊維強化複合構造を考える。この構造は制振鋼板のような拘束型制振材の一種で、図4に示すように繊維が拘束層として作用し、曲げ変形に

対して樹脂がせん断変形することによりエネルギーを消散させることになる。

ここで、このような繊維に樹脂が含浸されたほぼ連続的な構造に対し、有限要素法を用いて固有振動数と損失係数を計算するためには、制振鋼板の解析で行われているような方法では解析自由度が非常に大きくなり、現実的には計算不可能である。そこで、著者らは一方向繊維強化複合材の固有振動数と損失係数を効率的に精度よく計算する方法(等価直列ばね法)を既報で提案している⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。この方法を用いて、高減衰CFRPの固有振動数と損失係数を予測することにより、固有振動数をできるだけ高くし、なおかつ損失係数を大きくするための繊維と樹脂ヤング率および樹脂の損失係数と繊維体積含有率を決定する。

一方、CFRP製ボーリングバーは図3で示す十字状の鋼製の芯金を有しており、CFRPの諸元を決定するために用いた等価直列ばね法を用いることができないので、この構造全体の損失係数については若干精度は落ちるが、モードひずみエネルギー法を適用する。CFRPの異方性を考慮したモードひずみエネルギー法を3・3節に示す。ここでは、この方法を適用し、十字芯金の厚さの決定を行う。

3・1 一方向繊維強化複合構造の有限要素モデル

本報では、ミクロ的には図4のような繊維と樹脂の離散的な構造に対し、有限要素モデルパラメータを植村らの提案した複合則⁽¹²⁾を用いた連続体に置き換え、それを図5のように有限要素分割し、実固有値解析を行っている。図5の解析モデルにおいて、繊維方向は y 軸方向であり、断面方向については対称性を利用して2分の1のモデルとなっている。繊維方向弾性率 E_L 、繊維方向ポアソン比 ν_L 、繊維直角方向弾性率 E_T 、繊維直角方向ポアソン比 ν_T 、繊維方向せん断弾性率 G_{LT} は式(1)で示すようになる。

$$E_L = E_f V_f + E_m(1 - V_f)$$

Fig. 5 FEM model of FRP

$$\frac{1}{E_L} = \frac{1.36(K_f - K_m)}{(K_f - K_m)^2 - (v_f K_f - v_m K_m)^2} + \frac{1 - 1.05\sqrt{V_f}}{E_m}$$

$$\nu_L = \frac{1.05\sqrt{V_f}(v_f - v_m)K_f}{K_f - K_m} + v_m$$

$$\nu_T = \nu_L E_T / E_L$$

$$\frac{1}{G_{LT}} = \frac{1.36}{G_f - G_m} + \frac{1 - 1.05\sqrt{V_f}}{G_m}$$

$$K_f = E_f / (1 - \nu_f^2), \quad K_m = E_m / (1 - \nu_m^2)$$

$$G_f = E_f / 2(1 + \nu_f), \quad G_m = E_m / 2(1 + \nu_m) \quad \cdots (1)$$

ここで、サブスクリプト f は繊維、 m は樹脂を示す。 V_f は繊維体積含有率を示す。また、樹脂の弾性率は複素数で表現されているが、有限要素モデル化ではその実部である貯蔵弾性率のみを用いる。なお、繊維強化複合材の密度は次式で与えられる。

$$\rho_{FRP} = \rho_f V_f + \rho_m(1 - V_f) \quad \cdots (2)$$

3・2 等価直列ばね法による損失係数の計算

一方向繊維強化複合材の曲げ振動における損失係数を計算する方法として、既報にて提案している等価直列ばね法について概略を述べる。

一方向繊維強化複合材のはりとしての曲げ剛性を図6(a)に示すような等価な繊維と樹脂の直列ばねで表現できると仮定すると、実固有値解析から得られるひずみエネルギー分担率 μ_j とそのばね定数との関係は次式で与えられる。

$$\frac{k_{fj}}{k_{mj}} = \frac{\mu_j}{1 - \mu_j} = \alpha_j \quad \cdots (3)$$

次に、樹脂の減衰を考慮するためにせん断剛性の虚部 $i\eta_m k_{mj}$ を図6(b)のように加えると、繊維強化複合材のばね k_{totalj} は次式の関係を満たす。

$$\frac{1}{k_{totalj}} = \frac{1}{k_{fj}} + \frac{1}{k_{mj}(1 + \eta_m i)} \quad \cdots (4)$$

したがって、式(3)、(4)より一方向繊維強化材の j 次モードの損失係数 η_{FRPj} は次式から求められる。

$$\eta_{FRPj} = \frac{\text{Imag}(k_{totalj})}{\text{Real}(k_{totalj})} = \frac{\alpha_j \eta_m}{\alpha_j + \eta_m^2 + 1} \quad \cdots (5)$$

この方法は制振材の減衰による振動モードの変化を考慮しているので、損失係数の大きな場合も精度よく予

(a) Resin's spring = k_{mj} (b) Resin's spring = $k_{mj}(1 + \eta_m i)$

Fig. 6 Series mass-spring model

測できる。

3.3 モードひずみエネルギー法による高減衰CFRP製ボーリングバーの損失係数の予測

モードひずみエネルギー法での損失係数は各要素のひずみエネルギー分担率に各要素の損失係数を乗じ、その和で与えられる。

CFRPの損失係数を予測する方法として、ひずみエネルギーに対する異方性を考慮した1周期に失われる振動エネルギーの比率から損失係数を求める方法がある⁽¹³⁾。本研究では、複合則により各方向の損失係数を求め、有限要素モデルの各要素に対する各方向のひずみエネルギー分担率から求める方法を用いた。

まず、有限要素ごとのひずみエネルギーは次式で定義される。

$$U_e = \frac{1}{2} \sigma_{xx} \varepsilon_{xx} + \frac{1}{2} \sigma_{yy} \varepsilon_{yy} + \frac{1}{2} \sigma_{zz} \varepsilon_{zz} + \frac{1}{2} \tau_{xy} \gamma_{xy} + \frac{1}{2} \tau_{zx} \gamma_{zx} + \frac{1}{2} \tau_{yz} \gamma_{yz} \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 σ , τ は各方向の応力、 ε , γ は各方向のひずみを、 e は要素番号を示している。要素全体のひずみエネルギーを次式で表すと、

$$U_e = U_e^T + U_e^L + U_e^T + U_e^{LT} + U_e^M + U_e^{LT} \dots\dots (7)$$

式(7)の各項は各方向ごとのひずみエネルギーに相当する。CFRPは複合則でモデル化されているので、損失係数は各方向のひずみエネルギー分担率とそれらの損失係数を掛け合せたものの総和となることから、CFRPの j 次モードの損失係数は次式で与えられる。

$$\eta_{CFRPj} = \sum_e \left(\frac{U_e^T}{U_{CFRP}^{total}} \eta^T + \frac{U_e^L}{U_{CFRP}^{total}} \eta^L + \frac{U_e^T}{U_{CFRP}^{total}} \eta^T + \frac{U_e^{LT}}{U_{CFRP}^{total}} \eta^{LT} + \frac{U_e^M}{U_{CFRP}^{total}} \eta^M + \frac{U_e^{LT}}{U_{CFRP}^{total}} \eta^{LT} \right) \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 U_{CFRP}^{total} はCFRP全体の総ひずみエネルギーである。また、 η^L , η^T , η^{LT} , η^M はCFRP各方向の損失係数を示しており、式(1)において樹脂のヤング率を複素剛性 $E_m(1+i\eta_m)$ としたときの各方向の複素剛性から、それぞれは次式で与えられる。

$$\eta^L = \frac{\text{Imag}(E_L)}{\text{Real}(E_L)}, \quad \eta^T = \frac{\text{Imag}(E_T)}{\text{Real}(E_T)}, \quad \eta^{LT} = \frac{\text{Imag}(G_{LT})}{\text{Real}(G_{LT})}, \quad \eta^M = \frac{\text{Imag}(G_m)}{\text{Real}(G_m)} \dots\dots\dots (9)$$

次に、十字芯金の部分はその要素のひずみエネルギー分担率に芯金の損失係数を掛け合せたものの総和となることから、CFRPと十字芯金を合せた全体での j 次モードの損失係数 η_{totalj} は次式で与えられる。

$$\eta_{totalj} = \sum_e \left(\frac{U_e^T}{U_{total}} \eta^T + \frac{U_e^L}{U_{total}} \eta^L + \frac{U_e^T}{U_{total}} \eta^T \right)$$

$$+ \frac{U_e^{LT}}{U_{total}} \eta^{LT} + \frac{U_e^M}{U_{total}} \eta^M + \frac{U_e^{LT}}{U_{total}} \eta^{LT} + \sum_e \frac{U_e}{U_{total}} \eta_{Steel} \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 U_{total} はCFRP部と十字芯金を合せた総ひずみエネルギー、 η_{Steel} は十字芯金の損失係数を示している。

4. 高減衰CFRPおよび高減衰CFRP製ボーリングバーの設計とその動特性と切削性能

高減衰CFRPに対し、高い固有振動数を確保しつつ損失係数を高めるための繊維、樹脂の諸元を等価直列ばね法を用いて選択した結果を示す。次に、ボーリングバーのシャンク部に高減衰CFRPを適用し、第2章にて決定した超硬合金製ボーリングバーの性能を越えるための目標値($L/D=6$ で一次モードの固有振動数1200 Hz、損失係数0.1以上)を達成するための十字芯金厚さの検討をモードひずみエネルギー法を用いて行った結果を示す。そして、最後に、高減衰CFRP製ボーリングバーの動特性の測定結果および切削性能を示す。

4.1 高減衰CFRPの設計 等価直列ばね法を用いて固有振動数をできるだけ高くし、なおかつ損失係数を大きくするために繊維と樹脂の構成の比較を行った。表2に示す諸元の繊維強化複合材に対し、一次モードの固有振動数と損失係数の計算を行った。なお、CASE1はガラス繊維、CASE2とCASE3はヤング率の異なる炭素繊維である。なお、これらに用いている制振樹脂の貯蔵弾性率と損失係数の周波数依存性を図7に示す。それぞれのケースについての解析結果を表3に示す。なお、計算に用いたモデルのサイズは直径 $D=0.016$ m、長さ $L=0.2$ mである。表3より、最も繊維のヤング率が高いCASE3が $k_m/k_f=0.722$ と小さくすることが可能であり、FRPの損失係数を計算上0.222と最も大きくすることができる。このこと

Table 2 Material description

CASE1	$E_f=7.252 \times 10^{10} \text{N/m}^2$, $\nu_f=0.2$, $E_m=5.5 \times 10^8 \text{N/m}^2$, $\nu_m=0.5$, $\eta_m=0.45$, $\rho_{FRP}=1.874$
CASE2	$E_f=2.058 \times 10^{11} \text{N/m}^2$, $\nu_f=0.2$, $E_m=6.0 \times 10^8 \text{N/m}^2$, $\nu_m=0.5$, $\eta_m=0.43$, $\rho_{FRP}=1.401$
CASE3	$E_f=5.155 \times 10^{11} \text{N/m}^2$, $\nu_f=0.2$, $E_m=6.3 \times 10^8 \text{N/m}^2$, $\nu_m=0.5$, $\eta_m=0.41$, $\rho_{FRP}=1.720$

Table 3 Natural frequency, k_m/k_f and loss factor of 1st mode

	Natural frequency	k_m/k_f	Loss factor
CASE1	1433 Hz	3.587	0.085
CASE2	2219	1.410	0.161
CASE3	2949	0.722	0.222

Fig. 7 E' and loss factor of matrix resin

は樹脂の損失係数としてはどのケースもほぼ同じ値であるが、繊維のヤング率をもっとも大きなCASE3において、樹脂の変形が大きく樹脂のひずみエネルギー分担率が大きくなっているからである。また、固有振動数もCASE3が最も高い値になっている。したがって、これらの結果から一方向繊維強化構造においては、繊維ヤング率を高め、かつ、繊維と樹脂の弾性率の比率をできるだけ大きくすることによって樹脂のせん断変形を大きくする。これにより、複合構造としての等価剛性を保ちつつ損失係数を大きくすることができる。計算精度を検証するために表2の諸元のFRPを製作し、一次モードの固有振動数と損失係数の測定を実施した。なお、動特性の測定は恒温槽内で実施し、25℃に保たれた状態で正弦波掃引加振することによって行った。得られた伝達関数より共振点に対して半値幅法を適用し、固有振動数と損失係数を求めた。実験結果を表4に示す。計算結果と実験結果を比較すると、各ケースとも精度よく予測できていることがわかる。その中で、CASE3が最も固有振動数、損失係数ともに高い値になっていることが確認できた。したがって、ボーリングバーに使用する材料としてはCASE3のCFRPを選択した。

4.2 高減衰CFRP製ボーリングバーの設計 モードひずみエネルギー法を用いてボーリングバーの十字芯金厚さを変えた場合の一次モードの固有振動数および損失係数の予測を行った。図8にFEMモデルを示す。ボーリングバー固定部はモデル表面上の節点の

Table 4 Experimental result

	Natural frequency	Loss factor
CASE1	1448 Hz	0.084
CASE2	2247	0.166
CASE3	3023	0.220

Fig. 8 FEM model of CFRP boring bar

Fig. 9 Natural frequency and loss factor of CFRP boring bar (Calculated)

み完全固定とし、カッティングヘッド部はその重心位置に集中質量を定義し、シャンク部端面の節点とマージしている。なお、評価する突き出し量は $L/D=6$ とした。

十字芯金厚さを0.001 m, 0.002 m, 0.003 mと変化させた場合の一次モードの固有振動数と損失係数を計算し、第2章で得られた安定限界図にプロットした結果を図9に示す。図9中記号●横にそれぞれの芯金厚さを示す。また、直線より左下の部分が不安定領域(自励びり振動発生領域)を示している。

図9より、十字芯金厚さは厚くするとシャンク部とホルダ部の接触面における鋼の面積が増えるので、固定が強固になることが期待できる。また、厚くすると固有振動数も若干の上昇は見られるが、損失係数が大きく低下し、板厚0.002 m以上では目標値である0.1を上回ることができないことがわかる。そこで、十字

Fig. 10 Natural frequency and loss factor of CFRP boring bar (Experiment)

芯金厚さは0.001 mを選択した。

4・3 高減衰CFRP製ボーリングバーの性能 4・2節で決定した十字芯金厚さ0.001 mの高減衰CFRP製ボーリングバーを製作し、その一次モードの固有振動数と損失係数を測定した。図10に L/D を変えた場合の一次モードの固有振動数と損失係数を示す。図10中の記号●横に L/D を示す。また、直線より左下の部分が不安定領域(自励びり振動発生領域)を示している。図10より、 $L/D=6$ で固有振動数、損失係数ともに4・2節で設計した値とほぼ同じ値になっており、また、目標値を上まわっていることが確認できる。また、 L/D を変えても損失係数はほぼ0.1を実現できていることがわかる。

次に、高減衰CFRP製ボーリングバーの切削試験を行い、切削速度に対する限界突き出し量を示す(図11)。なお、切り込み量は 0.1×10^{-3} m, 送り量は 0.1×10^{-3} m/revである。比較のため、鋼製、超硬合金製について同一条件で切削した場合の結果を示している。各切削速度に対し高減衰CFRP製ボーリングバーは超硬合金製の限界突き出し量を上まわっており、切削性能の高いことが確認できる。

5. 結 言

既存のボーリングバー、特に超硬合金製よりも高性能なものを目指して、高減衰CFRPをその素材に適用することに着目した。まず、ボーリングバーが取り付けられた状態での動特性(固有振動数、損失係数)と切削性能の関係から必要な動特性の目標値を設定した。そして、高減衰CFRPの設計と、それを用いた高減衰CFRP製ボーリングバーの動的設計を検討した結果以下の結論を得た。

(1) 一方向繊維強化複合構造において、高い固有

Fig. 11 Cutting performance

振動数を確保しつつ減衰性を高めるためには、繊維ヤング率を高め、かつ、繊維と樹脂の弾性率の比率をできるだけ大きくすることによって樹脂のせん断変形を大きくする。これにより、複合構造としての等価剛性を保ちつつ損失係数を大きくすることができる。

(2) 高減衰CFRPを用いることにより、既存の鋼製、超硬合金製ボーリングバーと比較して固有振動数をできるだけ高く確保しつつ、高い損失係数をもったボーリングバーを実現した。また、複合則によるCFRPの異方性を考慮したモードひずみエネルギー法により、高減衰CFRP製ボーリングバーの損失係数を実性能上は問題ない精度で予測できる。

(3) 高減衰CFRP製ボーリングバーは既存の鋼製、超硬合金製ボーリングバーに比べ、高速、高突き出し量で安定した切削が可能である。

文 献

- (1) 松原十三生・ほか2名, 精密機械学会論文集, 50-7 (1984), 11-15.
- (2) 近藤英二・ほか2名, 機論, 58-533, C (1992), 235-241.
- (3) Jonathan, A. E., Suzanne, W. S. and Bruce, L. W., *Vib. Control Mech. Systems*, DE-Vol. 61, (1993), 199-207.
- (4) 吉村允孝・ほか2名, 精密機械学会論文集, 51-2 (1985), 164-169.
- (5) 北嶋弘一・ほか1名, 精密機械学会論文集, 50-5 (1984), 90-95.
- (6) 稲村豊四郎・ほか1名, 精密機械学会論文集, 46-4 (1980), 54-59.
- (7) 松原十三生・ほか2名, 精密工学会誌, 52-7 (1986), 122-127.
- (8) 松原十三生・ほか2名, 精密工学会誌, 52-11 (1986), 30-34.
- (9) 長野修三・ほか5名, 機論, 63-609, C (1997), 64-69.
- (10) 上田宏樹・ほか1名, 機論, 64-619, C (1998), 831-837.
- (11) 上田宏樹・ほか2名, 機講論, No. 96-5, B (1996), 596-599.
- (12) 植村益次・ほか2名, 東大宇宙航空研報告, 12-4, A (1976), 815-826.
- (13) Ni, R. G. and Adams, R. D., *J. Compos. Mater.*, 18 (1984), 104-121.