

砥石内研削液供給による CFRP の高能率研削加工時の加工面特性

東京農工大学 ○河端征大, ◎笹原弘之

要旨

砥石内研削液供給機構を用いた CFRP の研削加工において、粒度の粗い砥石と砥石の送り方向に対して砥石回転軸を傾斜させて加工を行う傾斜送り研削を適用し、その際の加工特性および加工面性状を調査した。その結果、傾斜送り研削による研削抵抗の減少と表面粗さの向上が確認された。また被削材と砥石の干渉領域を加工痕として算出する解析モデルを作成し、傾斜送り研削の表面粗さに対する効果を検証した。

1. 緒言

炭素繊維強化プラスチック(CFRP)は高比強度・高比弾性率であり、特に構造の軽量化が必要となる航空・宇宙分野で適用が拡大している。CFRP の端面仕上げ加工にはエンドミルによる切削加工が一般的であるが、バリ、デラミネーション、激しい工具摩耗⁽¹⁾などの問題がある。他方、新しい CFRP の加工方法として研削加工の適用も検討されているが、過大な研削熱の発生や砥石の目づまりが問題となっている。

そこでこの問題の対策として砥石内部から研削液を供給し研削加工を行う砥石内研削液供給機構⁽²⁾の研究・開発が進められている。先行研究では CFRP の研削加工に対して砥石内研削液供給を用いることで、その高い洗浄効果から目づまりが抑制され、良好な加工面を得られることが報告された。ただし、調査された加工条件は限定的であり、砥石の粒度等の加工条件が、加工面性状に与える影響は明らかにされていない。

一般に研削加工において、粗い砥石を用いることで切りくず排出性の向上や研削抵抗の低減、加工能率の向上が期待される。一方、加工面品位の低下が懸念される。また、砥石の送り方向に対して砥石回転軸を傾斜させて加工する傾斜送り研削では、転写される砥石表面の凹凸の間隔が狭くなり表面粗さの向上が期待される。そこで本研究では、砥石内研削液供給機構を用いた CFRP の高能率研削加工において、砥石の粒度変化に加えて傾斜送り研削を適用し、その際の加工特性および加工面性状を調査した。

2. 実験方法

図 1 に砥石内研削液供給の仕組みを示す。砥石を上下からフランジで挟み、ツールホルダに固定した。マシニングセンタのスピンドルスルーを用いて砥石の内側から砥石の気孔を通して加工点へ直接研削液を供給する。図 2 には傾斜送り研削の概略図を示す。図 2 (a) には砥石軸を傾斜させた場合の、図 2 (b) には傾斜テーブルやジグを用いてワークを傾斜させ NC により砥石を傾斜方向に送った場合の傾斜送り研削を示している。本研究では、傾斜回転テーブルを用いて試験片を傾斜させ図 2 (b) に示すような傾斜送り研削を行った。使用した CFRP は一方向プリプレグ(東邦テナックス QUI135-197A)を、配向方向を変えて積層し、板厚 7.8 mm に硬化した擬似等方材である。

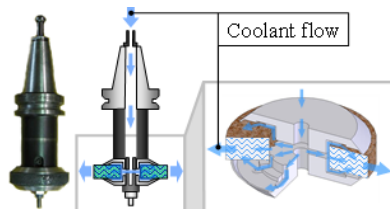


Fig. 1 Structure of tool holder

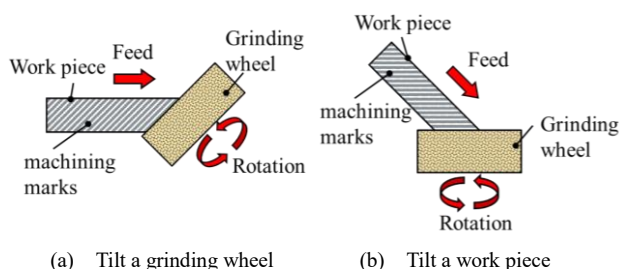


Fig. 2 Slant feed grinding

表 1 に加工条件を示す。実験に用いた砥石は粒度 F80 (平均砥粒径約 200 μm) のものと粒度 F46 (平均砥粒径約 370 μm) のものである。研削抵抗の測定には、多成分動力計 (KISTLER 9257b) を、表面粗さの測定および加工面の観察には、形状測定レーザマイクロスコープ (KEYENCE VK-X100) を用いた。

Table 1 Machining conditions

Grain size	F80		F46	
Inclination angle deg	0	45	0	45
Grinding speed V m/min	1200			
Feed rate v mm/min	1000			
Depth of cut t mm	0.2, 2.0			
Grinding direction	Down cut			
Type of coolant	Emulsion			
Amount of coolant supply L/min	10			

3. 結果と考察

図 3 に研削抵抗の方向と図 4 に切込み深さ 2.0 mm の場合の研削抵抗の測定結果を示す。傾斜角 45 度の傾斜送り研削時には傾斜角 0 度の通常研削時に比べ、接線研削抵抗 F_x と軸方向研削抵抗 F_z が増加した一方、垂直研削抵抗 F_y が大きく低下した。また、各研削抵抗のうち垂直研削抵抗 F_y の成分が大きく、合力 F_{xyz} についても傾斜送り研削時の方が小さい結果となった。粒度変化については、粒度 F46 の粗い砥石を用いた方が粒度 F80 の砥石を用いた場合に比べ各研削抵抗の低下が見られた。

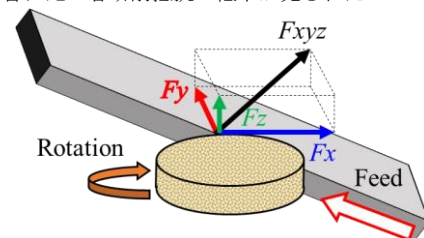


Fig. 3 Grinding force direction

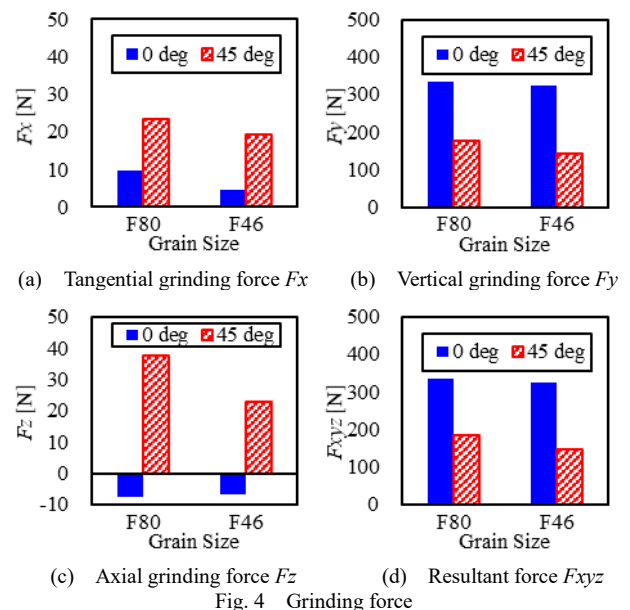
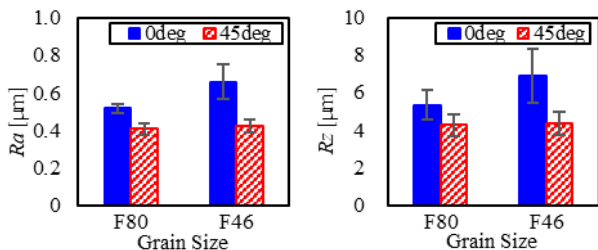


Fig. 4 Grinding force

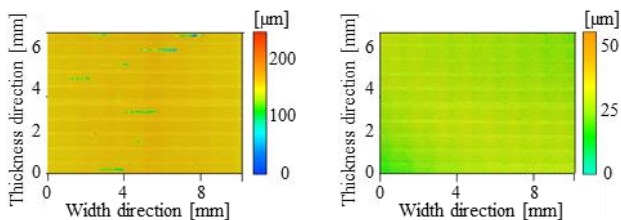
ここで、砥石と被削材の接触領域について考える。通常研削時には砥石はその側面でのみ被削材と接触し、その面積は接触弧面積として表される。一方、本加工条件における傾斜送り研削では、砥石は側面と底面で被削材と接触し研削が行われる。砥石底面で発生する研削抵抗は主に砥石送り方向と砥石回転方向に伴い作用する。従ってこの砥石底面で発生する研削抵抗のために傾斜送り研削時には接線研削抵抗 F_x と軸方向研削抵抗 F_z が増加したものと考えられる。また、傾斜角 0 度の通常研削時と傾斜角 45 度の傾斜送り研削時の接触弧面積は幾何的に導出でき、本加工条件ではそれぞれ約 134 mm² と約 71 mm² となった。垂直研削抵抗は砥石側面と被削材との間で発生するものであり、傾斜送り研削では接触弧面積が通常研削に比べ半減したために垂直研削抵抗が大きく低下したものと考えられる。

図 5 には切込み深さを 2.0 mm に設定した際の表面粗さの測定結果を示す。傾斜送り研削の適用により算術平均粗さ R_a と最大高さ粗さ R_z の向上が確認された。また、傾斜角 0 度の通常研削では粒度 F80 の砥石を使用した場合に比べ粒度 F46 の粗い砥石を使用した際に表面粗さが悪化した。これは粗い砥石の方が砥石表面の凹凸が大きく、それが加工面に転写されたためであると考えられる。一方、傾斜送り研削では粗い砥石を用いた場合にも粒度変化による表面粗さの悪化は見られなかった。傾斜送り研削では砥石回転方向と送り方向が異なるために、転写される砥石表面の凹凸の間隔が狭くなり表面粗さが向上するものと考えられる。この効果は、砥石表面の凹凸の大きな粗い砥石の場合に特に有効であることが分かる。

図 6 には切込み深さ 2.0 mm、粒度 F80 の場合の加工面の状態を示す。同図(a)の傾斜角 0 度の通常研削の場合には、緑で示されているような幅 2 mm、高さ 0.2 mm 程度のクレータ状の損傷が見られた。この損傷は主に研削方向に対して逆目となる -45 度の層で発生しており、これは -45 度の層では炭素繊維が引き起こされる方向に研削力が働き、炭素繊維が加工面よりも深い位置でせん断され引き抜かれたためだと考えられる⁹⁾。一方、同図(b)の傾斜送り研削の適用時にはこのような損傷は見られなかった。これは通常研削時に炭素繊維が引き起こされる方向に働いていた研削力が傾斜により炭素繊維のせん断方向(板厚方向)に分散したためであると考えられる。



(a) Arithmetic mean height R_a (b) Maximum height of profile R_z
Fig. 5 Surface roughness



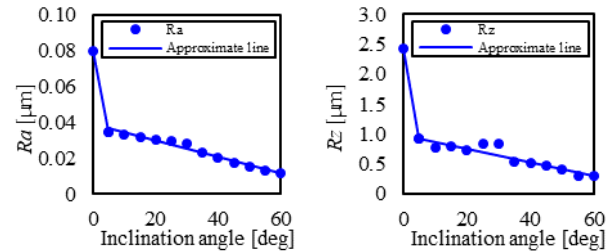
(a) Inclination angle = 0 deg (b) Inclination angle = 45 deg
Fig. 6 Machined surface condition

4. 解析による傾斜送り研削の表面粗さに対する効果の検証

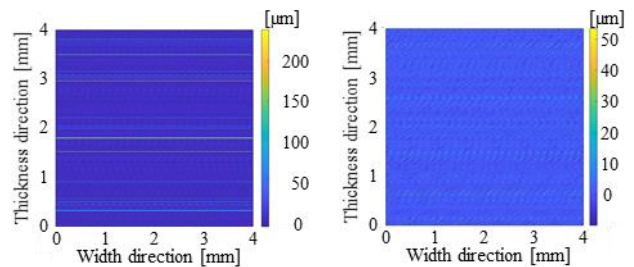
被削材と砥石表面の干渉領域を加工痕として算出する解析モデルを作成し、傾斜送り研削の表面粗さに対する効果を検証した。解析に使用した砥石表面のデータについては、ドレッシング後の粒度 F80 の砥石表面を形状測定レーザマイクロスコープ (KEYENCE VK-X100) により測定した高さデータを使用した。ただし、砥石全周を測定するのではなく軸方向に一系列を測定し、未測定部分については測定データを軸方向にランダムにシフト

させた砥石表面データにより補完した。解析上の仮定条件として、加工前の被削材表面は完全な平面であり、加工時に被削材は弾性変形せず砥石との干渉領域は必ず除去され、砥粒の脱落、破碎等は起こらないものとした。解析では測定された砥石表面データの分解能 (1 pixel \approx 1.39 μ m) を適用し、砥石が送り方向に 1 pixel 分進む毎に転写される加工痕を算出し加工面に配置する操作を繰り返し、最終的な加工面性状を得た。なお、解析で設定した加工条件は表 1 に示したものと同様であり、切込み深さは 2.0 mm に設定した。

図 7 に傾斜角に対する表面粗さの解析結果を、図 8 に傾斜角 0 度と傾斜角 45 度の場合の加工面性状を示す。表面粗さについては、傾斜角 0 度から 5 度まで増加させる間に急激に向上し、それ以上の傾斜角においても傾斜角の増加に伴い緩やかに表面粗さが向上する傾向が得られた。加工面性状については、傾斜角 0 度の通常研削時には砥石送り方向に凹凸が残った。一方、傾斜角 45 度の傾斜送り研削では傾斜方向に凹凸が見られたが、凹凸の間隔と高さが小さく、通常研削に比べ良好な表面性状が得られた。



(a) Arithmetic mean height R_a (b) Maximum height of profile R_z
Fig. 7 Relation between inclination angle and surface roughness



(a) Inclination angle = 0 deg (b) Inclination angle = 45 deg
Fig. 8 Machined surface condition

5. 結論

砥石内研削液供給機構を用いた CFRP の研削加工において、粒度の粗い砥石と傾斜送り研削を適用し、その際の加工特性および加工面性状を調査した。また、解析による傾斜送り研削の表面粗さに対する効果を検証し以下の結果を得た。

- 1) 粒度の粗い砥石の適用により研削抵抗が低下し、傾斜送り研削の適用により垂直研削抵抗が大きく低下した。
- 2) 傾斜送り研削の適用により通常研削に比べ表面粗さが向上した。傾斜送り研削時には粒度を変化させても表面粗さに変化は見られなかった。
- 3) 通常研削では加工条件により加工面に炭素繊維の抜け落ちた損傷が見られたが、傾斜送り研削では損傷が見られず良好な加工面性状が得られた。
- 4) 解析により、傾斜角 0 度から 5 度まで増加させる間に表面粗さは急激に向上し、それ以後は傾斜角の増加に伴い表面粗さが緩やかに向上する傾向が得られた。

文 献

- (1) 花崎伸作, 藤原順介, 河合徹, 野村昌考, 宮本猛, “CFRP 切削における工具摩耗機構II”, 日本機械学会論文集(C編). Vol. 71 (2005), pp.719-724.
- (2) 八尾泰弘, 不破洋平, 笹原弘之, “砥石内研削液供給機構による難削材形状研削加工に関する研究”, 日本機械学会論文集(C編). Vol. 77 (2011), pp.3522-3531.
- (3) N.S. Hu, L.C.Zhang, A study on the grindability of multidirectional carbon fiber-reinforced plastics, Journal of Materials Processing Technology, Vol.140, (2003), pp.152-156