論文

炭素繊維強化熱可塑性プラスチック板の精密穴あけ加工

古閑 伸裕* 霍 舒揚**

Fine Punching of Carbon-Fiber-Reinforced Thermoplastic Sheets

Nobuhiro KOGA* and Shuyang HUO**

(Received on December 4, 2015)

Press forming for the mass production of carbon-fiber-reinforced thermoplastic (CFRTP) sheets has recently been studied intensively in order to reduce the weight of transport machinery and to improve collision safety. The authors examined the possibility and practicality of the fine punching of CFRTP sheets using a press machine employed for press forming. The following results were obtained. (1) In the shave punching of CFRTP sheets, materials were separated by cutting them regardless of the relatively large shaving allowance, resulting in a smooth cut surface. Moreover, shave punching was also successfully applied to very thick sheets, with the increase in shaving load being extremely small even when the sheet thickness was increased. (2) In vibro-punching, a conventional punching die was attached to a numerical control (NC) servo press, and a vibrating punch was induced to cut into the materials during the process. With this vibration motion, fine punching became easier to perform than conventional vibro-punching.

Key words: shearing, punching, shaving, vibro-punching, CFRTP, servo press.

1. 緒言

輸送機械の軽量化や衝突安全性向上の観点から、炭素繊維強化熱可塑性プラスチック (CFRTP) が注目を集めており、量産化に向けたプレス成形に関する取り組みが活発化している¹⁾。この CFRTP の成形加工においても、生産量が増加すれば、鋼板などの成形と同様に、加工工程内におけるトリミングや穴あけ加工などはプレスせん断により行われるようになることが予想される。

しかし、このような複合材の場合、マトリックス樹脂や充填材 (強化材) の種類や形状、充填量などの違いによりせん断特性が大きく異なるため、これら複合材へのプレスせん断の適用は極めて難しい。このような複合材の切口面を改善するための方法として、これまで幾つかの精密せん断法が提案または開発されているが、樹脂を主成分とする CFRTP への適用が可能な精密せん断法としては、シェービングと振動せん断が挙げられる。すなわち、ガラス繊維を充填した樹脂複合材 (スタンパブルシート) のシェービングによる精密穴あけ加工²⁾と、振動せん断の 1 つである振

動仕上げ抜き³⁾による炭素繊維強化熱硬化性プラスチック板の精密穴あけ加工⁴⁾がこれまでに実施されており、いずれにおいても平滑な仕上げ面が得られることが実証されており、これら加工法の適用が考えられる。

本研究では、まず CFRTP のシェービングによる精密穴あけの可能性や適正加工条件を調査検討する。つぎに、特殊な振動発生装置などを用いず、逆押え機構を備えた慣用穴抜き金型を用いた、サーボプレスによる CFRTP の簡易振動穴抜き加工による切口面向上の可能性を検討する。

2. シェービング

2.1 実験条件および方法

慣用シェービングでは、穴抜き加工により下穴を得た後、下穴内面を取り代 δ にて削り取る 2 工程の加工が行われる。この場合、 δ の大きさが切口面の性状に大きく影響する。本実験では、Fig. 1 に示す穴抜きとシェービングが同一型内で行える順送金型を用いる。穴抜きに用いる工具には、SKD11 (HRC60) 製の外径が $\phi 10.16\text{mm}$, $\phi 9.80\text{mm}$, $\phi 9.60\text{mm}$, $\phi 9.40\text{mm}$ の 4 種類の円形パンチと穴径が $\phi 10.20\text{mm}$ と $\phi 10.00\text{mm}$ の SKD11 製ダイ (HRC61) を用いる。この場合、それぞれを組み合わせた工具のクリアランス C_b は、板厚 2mm の被加工材に対しては $C_b=1\%t$, $5\%t$, $10\%t$, $15\%t$ の設定となり、 $t=4\text{mm}$ の場合は $C_b=0.5\%t$, $2.5\%t$, $5\%t$, $7.5\%t$ となる。シェービングでは、穴抜きされた切口

* 日本工業大学工学部

〒345-8501 埼玉県南埼玉郡宮代町学園台 4-1

Department of Mechanical Engineering, Nippon Institute of Technology,
4-1 Gakudai, Miyashiro, Minamisaitama-gun, Saitama, 345-8501, Japan.

** 日本工業大学大学院生 同上

Graduate student, Nippon Institute of Technology, Ibid.

面に対し、 δ が 0.18mm~0.90mm の範囲で 8 種類の値に設定可能な外径のパンチを用いる。これらパンチに対し、いずれもクリアランスが $C_b=0.02\text{mm}$ となる内径の 8 種類のダイを用いる。

これら穴抜きとシェービングにはいずれも 600kN サーボプレスを使用し、クランクモーション (70spm) により、無潤滑にて加工を行う。

被加工材には、Table 1 に特性を示す、板厚 $t=2\text{mm}$ と 4mm の CFRTP 板 (協立工業製) を用いる。この CFRTP は熱可塑性樹脂 (PC: ポリカーボネート) を平織りした炭素繊維に含浸させたものである。

Fig. 1 Schematic of progressive die used in experiment

Table 1 Specifications of CFRTP sheet used in experiment

Matrix resin	Polycarbonate(PC)
Carbon fiber	PAN, Dia.: $\phi 7\mu\text{m}$
Cloth style	Plain
Fabric vol. / %	50
Tensile strength / MPa	420

2.2 実験結果および考察

まず、CFRTP の穴抜き (せん断) とシェービング特性を把握するため、両加工における荷重-ストローク線図を測定した。Fig. 2 に $t=2\text{mm}$ と 4mm の CFRTP の穴抜き時 ($t=2\text{mm}$: $C_b=5\%t$, $t=4\text{mm}$: $2.5\%t$) およびシェービング時 ($\delta=0.60\text{mm}$) の荷重-ストローク線図を示す。穴抜きにおいては、板厚 (せん断面積 S) が倍増すると、最大せん断荷重 P_m もほぼ倍増した。この傾向は鋼材など同様の傾

Fig. 2 Load-stroke diagram during punching and shaving of CFRTP sheet

向である。しかし、 P_m を S で除したせん断抵抗 τ ($t=2\text{mm}$ の場合) を算出すると、 $\tau=P_m/S=199\text{MPa}$ となる。この CFRTP の繊維方向の引張強さは σ_y は 420MPa であるため、 τ と σ_y の関係 (係数) は $\tau=0.47 \cdot \sigma_y$ となり、鋼材などの一般的な構造材料の同値 (0.8 程度) に比べ、かなり小さな値になった。ただし、この値が CFRTP 全体に適用できるか否かについては今後の検討課題とする。

シェービングにおいては、加工開始直後に現れる最大シェービング荷重は、被加工材板厚が $t=2\text{mm}$ から 4mm へと倍増しても、その増加率は 20% 程度と小さなものであった。また、その後のシェービング加工中の荷重は、板厚の違いによる大きな差は認められなかった。このことから、CFRTP のシェービングにおいては、適正な取り代を設定すれば、板厚の大小にかかわらず切削的機構により材料分離が行われることが予想できる。

つぎに、各種クリアランス (C_b) 条件による穴抜きと、各種取り代 (δ) によるシェービングを行った。Fig. 3 に各種 C_b にて穴抜きした切口面 (A 方向) の性状を、Fig. 4 に切口面近傍の横断面を示す。いずれの C_b においても、切口

Fig. 3 Cut surfaces of CFRTP sheet punched at various clearances

Fig. 4 Cross-sectional images of vicinity of cut surfaces obtained by punching

面には大きな繊維のはみ出しなどが認められ、クリアランスが大きくなるほど、また板厚が厚くなるほど切口面の凹凸や繊維のはみ出し量が大きくなる傾向が認められた。また、B 方向においても、ほぼ同様の傾向が認められた。すなわち、改めて複合材である CFRTP は慣用穴抜き加工では高精度の穴を得ることが難しいことが確認できた。なお、シェービングに供する穴抜き品の切口面の凹部深さが大きくなると、シェービングによりこの凹部を除去して平滑な切口面を得るには、より大きな取り代の設定が必要になることから、 C_b は小さいほうが好ましい。しかし、工具寿命などの観点からは、 C_b はある程度大きいほうが有利である。これらを総合的に判断し、以後のシェービング実験には、 $t=2\text{mm}$ の穴抜き加工は $C_b=5\%$ の条件で、 $t=4\text{mm}$ の場合は $C_b=2.5\%$ にて穴抜きしたブランクを供することとした。

Fig. 5 に各種 δ にてシェービングした切口面の性状を、Fig. 6 にシェービングにより得られた切口面近傍の横断面を示す。

Fig. 5 Cut surfaces of CFRTP sheet shaved at various shaving allowances

Fig. 6 Cross-sectional images of vicinity of cut surfaces obtained by shaving

いずれの板厚においても $\delta \leq 0.48\text{mm}$ の条件では切口面の一部に穴抜き時に発生したと思われる凹部の一部 (Fig. 5 中④) が残存した。これに対し、 $0.60\text{mm} \leq \delta \leq 0.80\text{mm}$ では切口面全域にわたり平滑な切削面が得られた。ただし、 δ が 0.90mm と大きくなると、シェービング加工末期に相当する切口面のほぼ全周に凹部 (同図中⑥) や僅かな繊維のはみ出しの発生が認められた。

板厚が $2\text{mm} \sim 4\text{mm}$ の鋼板などのシェービングでは、平滑な切口面が得られる許容取り代の値は $0.2\text{mm} \sim 0.4\text{mm}$ 程度⁹⁾ であることから、全面平滑な切口面を得るには複数回のシェービングを行わなければならない。これに対し、CFRTP では $\delta=0.80\text{mm}$ という大きな取り代設定でも 1 回のシェービングにより全面平滑な切口面が得られたことから、CFRTP はシェービングに適した材料と判断できる。すなわち、Fig. 2(b) に示すシェービング時の荷重—ストローク線図において、板厚が増してもシェービング時の荷重がほとんど変化しないこと、更には Fig. 7(a) に示すように、加工末期まで流れ形のくずが生成されることから、CFRTP のシェービングでは加工末期まで理想的な切削の機構による材料分離が継続して行われることがわかった。ただし、同図(b) に示すように、 δ が 0.90mm と大きくなると、加工末期で $\Leftarrow$ 印で示す箇所にクラックが製品切口面側へ進展する現象が認められた。これにより加工末期で切口面が悪化したと考えられる。

(a) $\delta=0.60\text{mm}$ (b) $\delta=0.90\text{mm}$

Fig. 7 Swarf and cracks generated at final stage of shaving

Fig. 8 Enlarged picture of cut surface obtained by shaving

Fig. 8に $\delta=0.60\text{mm}$ でシェーピングした切口面(A方向)の拡大写真観察結果を示す。繊維が切口面から突出する現象は認められず、樹脂と繊維が混在し、ほぼ同一面内で切断されていた。また、繊維と樹脂との界面がせん断やシェーピング時の衝撃により剥離するといった現象も認められなかった。

3. 振動穴抜き加工

3.1 実験条件および方法

1章で述べたように、振動仕上げ抜きによる熱硬化性炭素繊維強化プラスチックの精密穴抜き加工では、振動発生装置を備えた専用の複動プレスを用いて加工が行われている。本研究では、Fig. 9に示すような逆押え(逆押え力 $P_c=5\text{kN}\sim 25\text{kN}$)機構を備えた慣用穴抜き金型(単型)を用い、NC サーボプレスによる簡易振動穴抜き加工⁶⁾を行う。本実験では、外径が $\phi 9.93\text{mm}$ のパンチと逆押え、穴径が $\phi 9.97\text{mm}$ のダイと板押え(いずれの工具もシャープエッジ、 $C_b=0.02\text{mm}$)を用い、これらを組み込んだ金型を 600kN サーボプレスに取付け、Fig. 10に示すような2種類の振動モーションにて加工を行う。なお、本実験で使用するプレスにて設定可能な最大振動回数は $N=200$ 回である。

被加工材には2章の実験で用いた $t=4\text{mm}$ のCFRTPを用いる。

Fig. 9 Schematic of vibro-punching die

Fig. 10 Two types of vibration motion used in experiment

3.2 実験結果および考察

まず、振動仕上げ抜き⁴⁾と同様に、工具が材料へ食い込む前に板押え力と逆押え力を作用させた状態で被加工材を 1mm の振幅で200回上下動させ、被加工材全体に振動を与える。その後、パンチを降下させ材料分離を行う方法(Fig. 10(a)のType 1)で穴抜き加工を行った。この場合

の振動周波数は約 9Hz である。

実験の結果、 P が 5kN 、 25kN いずれにおいてもType 1の方法による穴抜きでは、振動による顕著な切口面の改善効果は認められなかった。これは、振動仕上げ抜きにおける振動周波数(50Hz)に比べ、本実験で設定可能な周波数が 9Hz と低いため、振動付加時の放熱量が大きくなり自己発熱の効果は得られなかったためと考えられる。

つぎに、Type 2による方法($P_c=5\text{kN}$)、すなわち、パンチを振動させながら被加工材に食い込ませる方法により振動穴抜きを行った。まず、振動数を $N=200$ 回一定とし、工具のCFRTPへの食い込み時の下降量 D と上昇量 U (振幅)を変化させた条件で穴抜きを行った。この場合、 D と U の差はいずれの条件でも 0.03mm 一定とした。

Fig. 11に各種振幅にて穴抜きした切口面を、Fig. 12に切口面近傍の横断面を示す。 D や U の振幅が 0.70mm 程度まで大きくなると細かな凹部の発生が消滅し光沢をもつ切口面が生成できるようになった。これは穴抜き時の材料の弾性変形によって分離面とパンチ側面間に接触圧が作用した状態でパニシされ、この摩擦熱により樹脂が軟化し、光沢面が生成されるとともに凹部が樹脂により埋められることで消滅したと考えられる。また、振幅が大きくなるほど切口面近傍の繊維の曲がり小さくなる傾向も認められた。しかし、 D や U が 2mm の条件では、切口面の一部に凹部の発生や加工末期に光沢のない切口面の発生が認められる

(a) $D=0.20\text{mm}$, $U=0.17\text{mm}$ (b) $D=0.70\text{mm}$, $U=0.67\text{mm}$

(c) $D=1.00\text{mm}$, $U=0.97\text{mm}$ (d) $D=2.00\text{mm}$, $U=1.97\text{mm}$

Fig. 11 Effect of amplitude of vibro-punching with Type 2 motion on cut surface profile

(a) $D=0.20\text{mm}$, $U=0.17\text{mm}$ (b) $D=0.70\text{mm}$, $U=0.67\text{mm}$ (c) $D=1.0\text{mm}$, $U=0.97\text{mm}$ (d) $D=2.0\text{mm}$, $U=1.97\text{mm}$

Fig. 12 Cross-sectional images of vicinity of cut surfaces obtained by vibro-punching

ようになった。この原因については、過大発熱の影響によるためとも考えられるが、現在のところ明確な原因は特定できていない。これらの結果から、 $t=4\text{mm}$ のサーボプレスを利用した CF RTP の簡易振動穴抜きにおける適正振幅は 1mm 程度と判断できた。

以上の結果から、サーボプレスを利用すれば、慣用穴抜き金型を用いた簡易的な振動穴抜きによっても、CF RTP の精密穴あけが行えることがわかった。しかし、生産性向上の観点からは、より振動回数を減らし、より高い周波数による加工が望まれる。しかし、サーボプレスを用いる場合は周波数に制限がある。このため、 $D=1.00\text{mm}$ 一定とし、 U を変化させる方法で振動回数 N を変化させ、 N の切口面性状に及ぼす影響を調査した。

その結果、Fig. 13 に示すように、 N が減少するに従い、切口面の性状が悪化する傾向が認められた。従って、製品の要求精度や生産性を考慮し、適切な振動回数を選択する必要がある。

最後に、シェービングと振動穴抜きにより得られたそれぞれの穴の切口面の比較を行った。Fig. 14(a) に示すシェービングにより得られた切口面は、炭素繊維と樹脂が混在する平滑な切削面である。これに対し、同図(b) に示す振動穴抜きにより得られた切口面は、板厚の $80\% \sim 90\%$ が樹脂層からなる光沢面が得られ、残りの面も光沢はないが平滑な切口面となっている。穴内径（平均値）は、シェービング

により得られたものはパンチ外径に対し約 $130\mu\text{m}$ 、振動穴抜きにより得られたものは約 $70\mu\text{m}$ それぞれ小さくなった。また、シェービングにより得られた穴は、繊維の配列方向に対し、並行/直角方向と 45° 方向との径差が約 $60\mu\text{m}$ であったのに対し、振動穴抜きにより得られた穴の同値は、 $10\mu\text{m}$ と良好であった。

4. 結 言

炭素繊維強化熱可塑性プラスチック (CF RTP) の精密せん断の可能性や適正加工条件を明らかにするため、シェービングと NC サーボプレスを用いた簡易振動穴抜き加工による穴あけ実験を行った。以下に得られた成果のまとめと本加工を実用化する際の留意点をまとめる。

- (1) CF RTP をシェービングすると、鋼板などに比べ大きな取り代設定でも平滑な切削面が得られることが明らかになり、板厚 4mm の CF RTP についても 1 回のシェービングで全面平滑な切口面を得ることができた。
- (2) シェービング荷重は CF RTP の板厚が増してもその増加傾向は極めて少ないこと、更にはシェービング層も堆積することなく切削の機構により分離および排出されることから、より厚い CF RTP でもシェービングによる切口面の改善が可能であることが予測できる。
- (3) 逆押え機構を備えた慣用穴抜き金型を用い、これを NC サーボプレスに取付け、振動モーションを利用した穴抜き加工を行えば、特殊な構造の金型や振動発生装置を用いることなく、簡便に CF RTP の精密穴あけ加工が行えることを実証した。
- (4) サーボプレスの振動モーションを利用する加工では周波数を大きくできない（上限がある）ため、自己発熱の効果が得難い。しかし、パンチを振動させながら CF RTP へ食い込ませる方法で穴抜きを行えば、切口面の改善効果が得られることを明らかにした。
- (5) サーボプレスを用いた振動穴抜きにおいて、生産性を向上するには、被加工材の板厚などを考慮した、適正な振幅や必要最小限の振動数を選定する必要がある。
- (6) CF RTP の精密穴あけ法としてシェービングや簡易振動穴抜きを実用化するためには、これら加工により得られた穴切口面近傍の層間剥離の調査やその防止策、さらに加工に用いる工具の材質や表面処理の効果などを今後調査検討する必要がある。

最後に、本実験をお手伝いいただいた、日本工業大学卒研生の阿部溪太、藤田陽亮の両君に感謝申し上げる。

参 考 文 献

- 1) 米山猛・寺岡達也・増澤健太・西原嘉隆・長島重憲・吉田春夫：塑性と加工，**53**-613 (2012)，145-149。
- 2) 村川正夫・古閑伸裕：平成 2 年度塑性加工春季講演会講演論文集，(1990)，591-594。
- 3) 横井秀俊・中川威雄：生産研究，**36**-2 (1984)，32-40。
- 4) Yokoi, H. & Nakagawa, T. : Proc. ICCM-4, (1982), 1925-1932。
- 5) 前田禎三：塑性加工，(1972)，243，誠文堂新光社。
- 6) Junlapen, K.・水落健・古閑伸裕：塑性と加工，**51**-591 (2010)，353-357。

Fig. 13 Effect of vibration number of vibro-punching with Type2 motion on cut surface profile

Fig. 14 Comparison of cut surfaces obtained by shaving and vibro-punching