速報論文

NC サーボプレスを用いた CFRTP 板 の振動穴あけ加工における加工時間の短縮

古閑 伸裕* 岡田 奨平** 野口 裕之*

Reduction in Vibro-Punching Time of Carbon-Fiber-Reinforced Thermoplastic Sheets Using Numerical Control Servo Press Machine

Nobuhiro KOGA*, Shohei OKADA** and Hiroyuki NOGUCHI*

(Received on November 22, 2017)

Obtaining cut surfaces with high precision by shearing, including press cutting and punching, of composite materials such as carbon-fiber-reinforced thermoplastic (CFRTP) is difficult because shear characteristics vary among materials. To address this problem, vibratory finish shearing and shaving have been examined. However, conventional vibratory finish shearing requires a dedicated press machine and conventional shaving requires two processes. The authors have proposed a simple punching method for CFRTP sheets involving the low-frequency vibrational motion of a punch using a numerical control (NC) servo press machine that has recently become widespread. The method realizes high-precision punching in a single process using conventional dies. However, it takes a long time to achieve the desired cut surface. Therefore, the time required for punching should be reduced before this method is practically applied. In this study, experiments were carried out to determine the optimal vibrational conditions of the punch for achieving high-precision cut surfaces of holes within a short period of time. The conditions required for vibro-punching to be completed within ~16 s, which is the allowable time for deep drawing of CFRTP sheets using a hot press, were determined.

Key words: shearing, vibro-punching, fine punching, CFRTP, NC servo press machine, vibration motion, slide motion.

1. 緒 言

著者らは、炭素繊維強化熱可塑性プラスチック (CFRTP) の精密穴あけ法として、サーボプレスを利用した振動穴抜き法¹⁾を提案している。この加工法を用いれば、従来の振動仕上げ抜き²⁾と同様に、切口面全域にわたり、平滑な仕上げ面が得られることを実験的に明らかにしている¹⁾。しかし、この振動穴抜き加工においては、従来の専用プレスを用いた振動仕上げ抜き²⁾に比べ、加工に要する時間が長いという問題があり、この加工時間の短縮が本加工法を実用化の際の大きな課題になっている。

この提案したサーボプレスを用いる穴あけにおいては、特殊な加振装置を用いず、プログラミングによりプレスのスライドを上下動させるモーションを設定して加工を行うため、高い周波数の条件設定が困難である。このため、周波数以外の加工因子を最適化することにより、加工時間の短縮を図る必要がある。

本研究では、加工時間に影響を及ぼすと考えられる各種

因子の加工時間と切口面性状に及ぼす影響について調査し、実用的な適正加工条件を見出すことを目的とする。

2. 影響因子と実験条件

CFRTP の慣用穴あけにより得られた切口面は、これまでの実験研究から、**Fig. 1** 中 S 部に示すように、工具 (パンチ) 食込み初期の段階では、パンチ切刃により炭素繊維と樹脂が切断され、繊維のはみ出しなどが無い比較的平滑な切口面が得られることがわかっている。そこで、**Fig. 2** に示すように、工具の被加工材への食込み初期では振動を付与せず初期食込み K を与え、その後に振動を付与して材

Fig. 1 Cut surface and cross section of CFRTP sheet obtained by conventional punching

* 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 Gakuendai, Miyashiro, Minamisaitama, 345-8501, Japan.

** 日本工業大学大学院生 同上

Graduate student, Nippon Institute of Technology, Ibid.

料分離を行えば、全面良好な切口面が生成され、加工時間 T の短縮も図れると思われる。

また、設定する振幅（パンチ上昇量） U も加工時間に影響を及ぼす。すなわち、サーボプレス（振動モーション）設定により加工を行う場合、振幅を小さく設定すると振動数を増やせるため、加工時間が短縮できる。ただし、振幅が過小な場合は振動による切口面の改善効果が薄れることが予想される。

さらに、材料分離までに付与する振動回数 N を減少すれば、加工時間の短縮が図れる。すなわち、パンチの下降量 D から上昇量 U を引いた値（ $D-U$ ）を大きく設定することで振動回数 N を減少させることができる。ただし、この場合も N が過小になると振動の効果が得られず、切口面改善効果が薄れることが懸念される。

上記、 K 、 U および N （ $D-U$ ）の切口面性状に及ぼす影響を実験的に調査し、より効率良く（短時間に）良好な切口面が得られる適正加工条件を見出す。

Table 1 に被加工材として用いる CFRTP（板厚 $t = 4$ mm）の特性を示す。この CFRTP を、直径 $\phi 9.93$ mm の円形パンチと穴径 $\phi 9.97$ mm のダイ（いずれの工具も SKD11 製、HRC58）を組み込んだ、**Fig. 3** に示す構造の金型を用い、クリアランス $C = 0.02$ mm/side、逆押え力 $P_c = 25$ kN にて振動

Fig. 2 Slide motion of punch during vibro-punching

Table 1 Characteristics of workpiece (CFRTP, $t = 4$ mm)

Carbon fiber	PAN, Dia.: 7 μ m
Fabric vol. / %	50
Matrix resin	Polycarbonate (PC)
Tensile strength / MPa	420 MPa
Cloth style	Plain
Number of layers	20

Fig. 3 Schematic of vibro-punching die

穴あけを行う。プレス機械には、600 kN の NC サーボプレスを用いる。

3. 実験結果および考察

振動を付与せず初期食込み K を与え、その後振動（ $U = 0.5t$, $D-U = 0.03$ mm）を付与して穴あけした切口面とその横断面を **Fig. 4** に示す。 K が $0.50t$ より大きくなると、初期食込み時に切口面下方部に凹部（図中○で囲んだ部分）の発生が認められるようになった。これは横断面の観察結果からもわかるように、 K が大きくなると工具初期食込み中に材料の板面方向に作用する引張力によって下方（未分離部）の繊維が引っ張られ、最終的に引きちぎられるような形態で分離され、これによって生成された凹状の切口面がその後の振動付与によっても改善されず残存したものと推察される。これに対し、 $K = 0.25t$ ではほぼ全面にわたり平滑な切口面を得られ、切口面近傍の繊維の変形も小さいことがわかった。すなわち、 K が大きいほど加工時間の短縮は可能であるが、平滑な切口面を得るには、 K は $0.25t$ 以下の初期食込み値に設定すべきであることがわかった。

Fig. 4 Effect of initial intrusion K on cut surface (CFRTP with $t = 4$ mm, $U = 0.5t$, $D-U = 0.03$ mm)

一般に振幅 U やパンチの下降量 D から上昇量 U を引いた値（ $D-U$ ）を大きくすると工具と被加工材との摺動距離が増加することで、摩擦による発熱量が増し、これにより樹脂の軟化が促進し、より平滑な切口面が得られると推察される。そこでつぎに、これらの最適値を見出すため、 $K = 0.25t$ （1 mm）一定とし、 U と $D-U$ を種々変化させた振動穴あけ加工を行った。**Fig. 5** にそれぞれの条件で穴あけした切口面とその加工に要した時間を示す。

全体的傾向として、 U を大きく、 $D-U$ （振動回数： N ）を小さくすることで切口面性状の向上が認められたが、いずれも加工時間が 30 秒程度と長くなった。また、 U が大きくなると、だれ発生部に相当する切口面角部にかえり状の突起物（図中○で囲んだ部分）が発生するようになることがわかった。これは振動付与時のパンチ上昇により、表層部の炭素繊維がめくれあがったものと推察される。

以上の切口面性状の観察結果と、加工時間から判断し、本加工において高精度な切口面を効率よく得るための加工条件は、 $K = 0.25t$, $U = 0.5t$, $D-U = 0.04$ mm（ $N = 75$ ）であ

Fig. 5 Effects of amplitude U and “amount of descent – amount of increase ($D-U$)” on cut surface (CFRTP with $t = 4 \text{ mm}$, $K = 0.25t$)

ることが判明し、この条件における加工時間は $T = 16$ 秒であった。この加工に要した時間は、これまでの加工時間¹⁾を 50%短縮できるものであった。

さて、CFRTP などの複合材料のせん断加工においては層間剥離の発生が懸念される。そこで、慣用穴あけ ($C = 5\%$) と上記最適と判断した加工条件 ($K = 0.25t$, $U = 0.5t$, $D-U = 0.04 \text{ mm}$) にて振動穴あけしたそれぞれの切口面について、切口面近傍の横断面の比較観察を行った。Fig. 6 に観察結果を示す。

同図(a)に示す慣用穴あけにより得られた切口面には、穴側、抜き落とし側いずれも切口面近傍の繊維が変形し、切口面表面に繊維が存在しない凹部の発生が認められた。この凹部は、上記 K が大きな条件で穴あけされた場合と同様に、加工中に作用する板面方向の引張力により、繊維が引きちぎられるような形態で分離したために発生したと推測される。なお、この慣用穴あけにより得られた切口面の近

傍には、横断面観察結果からは明確な層間剥離は認められなかったが、上記繊維の変形や凹部の発生は、層間剥離の発生を誘発する原因になると考えられる。

これに対し、同図(b)に示す簡易振動穴あけにより得られた切口面は、穴側、抜き落とし側いずれも切口面近傍の繊維の変形が少なく、凹部の発生も認められなかった。すなわち、サーボプレスを用いた振動穴あけ加工により得られた切口面の周囲には層間剥離などの切口面不良が発生せず、平滑な切口面が得られることが実証できた。

4. 結 言

NC サーボプレスを用いた炭素繊維強化熱可塑性プラスチック ($t = 4 \text{ mm}$) の振動穴あけ加工における加工時間の短縮を目的に適正加工条件の検討を行った。その結果、深絞りなどの前工程の成形加工に追従可能な 16 秒程度の短時間で効率良く全面平滑な切口面を得ることができた適正加工条件を見出すことができた。さらに、この適正加工条件で穴あけした切口面は、切口面近傍の変形が小さく、凹状の切口面不良の発生もないことを確認した。これら結果から、振動穴あけにより得られた切口面は、慣用穴あけ品に比べ、層間剥離などが生じ難い切口面であると判断した。

最後に本実験に協力いただいた、日本工大卒研生の高田凌、斉藤一輝の両君に感謝申し上げる。

参 考 文 献

- 1) Koga, N. & Huo, S.: J. Jpn. Soc. Technol. Plast., **57**-666 (2016), 655-659.
- 2) Yokoi, H. & Nakagawa, T.: Institute of Industrial Science, the University of Tokyo, **36**-2 (1984), 32-40.

Fig. 6 Cross sections of cut surface obtained by conventional punching and simple vibro-punching (CFRTP with $t = 4 \text{ mm}$)