FRP 材の変形・破壊に及ぼすくさび押込み速度の影響*

井 上 久 弘** 井 戸 守***

Effect of Indenting Speed on Deformation and Fracture Mechanism of Glass Fiber Reinforced Plastic Materials by Wedge Indenters

by

Hisahiro INOUE and Mamoru IDO

(Department of Mechanical Engineering, University of Osaka Prefecture, Osaka)

For the unidirectional glass fiber reinforced plastic materials, the wedge indentation experiments were accomplished to clarify the relation between tool and work-piece during cutting. The indenting speed was changed from 0.01 to 10.0 cm/min..

The main results obtained are as follows :

- (1) The indenting load increased with increasing indenting speed.
- (2) At the high indenting speed range, the specimen broke when the wedge angle was small, while cracks appeared near the contact part between wedge face and specimen when the wedge angle became large.
- (3) The inclination angle of yarn to the side of rectangular specimen strongly affected the fracture of specimen.
- (4) The indenting speed scarcely affected both deformation of matrix and the fracture of glass fiber under the wedge face.

(Received July 4, 1980)

キー・ワード：一方向ガラス繊維強化プラスチック，ガラス繊維の傾斜角，くさび，押込み速度，破壊

1 結 言

複合材料を機械加工する際の切りくず生成機構に関する研究はこれまでほとんど報告されていない。そこで FRP 材の切削加工における工具-被削材の関係をくさびの押込みにモデル化して切りくず生成初期の状態を推測する目的で，一方向ガラス繊維強化プラスチック材へ種々の形状をもつくさびを押込み，くさび面下の試料内のガラス繊維がいかなるはく離，破壊を起すかについて従来から追求してきた^{1,2)}。この結果くさび形状およびくさび頂角の変化と試料内のガラス繊維束の試料側面となす傾斜角の変化とにより，くさび面下のガラス繊維が種々のはく離，破壊形態を示すことを明らかにし，その形態を整理した。ここでは 25~27℃の室温中でくさびの押込み速度が試料の破壊およびくさび面下のガラス繊維のはく離，破壊の広がりについて，光学的観察および格子線法による観察からガラス繊維および母材のプラスチックの挙動を実験的に明らかにした。

2 試験片の作製

ガラス繊維は表面処理を行った無アルカリのヤーン（日東紡績製 ECG-75-1/2-3.3S-NA）で，樹脂は不飽和ポリエステル樹脂のポリマール 6304 と 6320 F（武田薬品工業製）とを体積比で 4 : 1 に混合し，触媒，促進剤としてルパゾール DDM と 6 % コバルトを体積含有率で 0.5 % 加えたものを使用した。試料の作製は 120×120 mm の 2 枚のガラス板の間隔が 11 mm の型を用い，その間隔のほぼ中央 5.5 mm の位置にガラス板の面に平行になるようにヤーンを 1 mm 間隔に固定し，これに上記の樹脂を流し込んで成形した。その後 100℃で 2 時間の熱処理を行い，40×45 mm，厚さ 10 mm の寸法に加工して一方向ガラス繊維強化プラスチックの試験片とした。格子線法の実験に使用した試験片は上記の試験片をさらに試料全面にガラス繊維束（ヤーン）の一部がわずかに露出するようにマイクロカッターによって薄く切断し，研磨およびパフ仕上げ加工をほどこした後，その面にふるい目の開き 74μm の網（JIS Z-8801）を置き，その上からアルミニウムの真空蒸着を行って格子線を描いた。この格子線を蒸着した側に 40×45 mm，厚さ 1 mm の同質の樹脂板

* 原稿受理 昭和55年7月4日

** 正 会 員 大阪府立大学工学部 堺市百舌鳥梅町

*** 大阪府立大学工学部 堺市百舌鳥梅町

を当てて試験片とした。

3 実験方法

くさびの押込み装置の概略図を Fig. 1 に示す。Fig. 1 の装置をインストロン万能試験機 (1116型) に設置し、くさびを試験片の側面に押込んだ。くさびは幅 6 mm の高速度鋼 SKH-2 種を用いた。くさび形状、くさびの押込み速度および試料中のガラス繊維束の試料側面となす角度の変化については Table I に示す。くさび頂角は切削型押込みと圧縮型押込みに相当する角度を選び、くさびの押込み速度はインストロン万能試験機のクロスヘッドの許容速度の関係から $v=0.01 \sim 10.0$ cm/min の速度域で変化させた。くさびの押込み量はすべての実験条件に対して $h=1$ mm とし、押込み途中の現象はマクロ顕微鏡を使用し、押込み量 $h=0, 0.5, 0.75, 1.0$ mm および除荷後の写真撮影により観察した。光源は蛍光灯を使用し、室温 ($25 \sim 27^\circ\text{C}$) で実験を行った。

(a) Schematic diagram of wedge indenting apparatus.
(b) Side-view of specimen supporter.

Fig. 1. Wedge indenting apparatus.

Table I. Experimental procedure.

Inclination angle of yarn	$\alpha=0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$
Wedge angle	Symmetric wedge indenter $2\theta=30^\circ, 120^\circ, 160^\circ$ Half wedge indenter $\theta=30^\circ, 60^\circ, 80^\circ$
Indenting speed (cm/min.)	$V=0.01, 0.1, 1.0, 10$
Indenting depth	$h=1$ mm

4 押込み荷重と試料の破壊について

FRP の母材であるプラスチック材はその粘弾性的性質からひずみ速度の変化によってその機械的性質が変化するといわれている。ここではひずみ速度の変化に相当するくさびの押込み速度を変化させた場合に試料の FRP 材がマクロ的にいかなる挙動を示すか、すなわち、押込み速度の変化が押込み荷重と試料の破壊

Fig. 2. Influence of indenting speed for symmetric wedge indenters.

Dotted line shows the indenting depth $t=0.5$ mm and full line shows the indenting depth $t=1$ mm.

にいかなる変化を与えるかについて調べた。

対称型くさびの押込みにおける押込み荷重と押込み速度との関係を示したのが Fig. 2 である。図の縦軸は同じくさび頂角におけるガラス繊維束の傾斜角の変化に対するそれぞれの押込み荷重を平均して求めた押込み荷重を示す。ガラス繊維束の傾斜角の変化による押込み荷重の変化はばらつきとして図中に示してある。それぞれのくさび頂角においてくさび押込み量 $h=0.5$ および 1.0 mm のときの押込み荷重は、押込み速度の増加とともに増加しており、FRP 材へのくさびの押込みについてもひずみ速度の影響は認められる。今回使用した一方向ガラス繊維強化プラスチック中のガラス繊維の体積含有量はくさび面下で約 0.74% しか含まれておらず、一般に使用されている FRP 材とは比較にならないほど少いが、試料中のガラス繊維束の試料側面となす傾斜角 (α) の変化に対しては図中のばらつき内で $\alpha=0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ および 90° の順で押込み荷重は増加しており、頂角 $2\theta=160^\circ$ の場合 $\alpha=90^\circ$ の試料は $\alpha=0^\circ$ の試料の約 1.1 倍の押込み荷重になり、ガラス繊維束の混込方法の相違による試料強度の差が現れている。半角くさびの押込みにおいても対称型くさびの場合と同じ傾向を示すが、ガラス繊維束の傾斜角の変化においては対称型くさびの押込みの場合ほど明確な差を示さなかった。

つぎにくさびを 1 mm 押込んだ場合の試料の破壊において、くさび形状とガラス繊維束の傾斜角の変化に対して押込み速度がいかに影響するかについて示したのが Fig. 3 である。Fig. 3 における○、▲および●の記号はそれぞれくさびを 1 mm 押込んだときに破壊しなかった試料、破壊を起した試料および破断してしまった試料をそれぞれ表す。Fig. 3 (a)は対称型くさび

2θ	2θ=160°				2θ=120°				2θ=30°			
V	0.0	0.1	1.0	10	0.0	0.1	1.0	10	0.0	0.1	1.0	10
α=0°	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
α=30°	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	●
α=60°	○	○	▲	▲	○	○	○	○	○	○	○	●
α=90°	○	○	▲	▲	○	○	○	○	○	○	○	●

(a)

θ	θ=80°				θ=60°				θ=30°			
V	0.0	0.1	1.0	10	0.0	0.1	1.0	10	0.0	0.1	1.0	10
α=0°	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
α=30°A	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
α=30°B	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
α=60°A	○	○	▲	▲	○	○	○	○	○	○	○	○
α=60°B	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
α=90°	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

(b)

(a) Symmetric wedge indentation.

(b) Half wedge indentation. (A,B: see Fig.5)

○: Unbroken specimen, ▲: Unbroken specimen with small crack ●: Broken specimen. (see Fig.4)

Indenting depth: $t=1\text{mm}$. θ : Wedge angle, α : Inclination angle of yarn, V: indenting speed.

Fig. 3. Fracture of specimens.

(a) A broken specimen by transmitted white light.

(b) A crack occurred near the contact part between wedge face and specimen by reflected white light. The black line shows the scale (1mm).

Fig. 4. Fracture pattern by wedge indentation.

の場合で、試料の破壊はくさび頂角の相違すなわち押込み形態の相違によって異なることがわかる。 $2\theta=30^\circ$ の切削型押込みにおいて、押込み速度 $v=10.0\text{ cm/min}$ ではガラス繊維束の傾斜角 (α) の相違に関係なく Fig. 4 (a) に示すようにくさび先端より二つに破断してしまう (●印)。これに対して $2\theta=160^\circ$ の圧縮型の押込みにおいては Fig. 4 (b) に示すように、くさび面と試料側面との接触境界部のガラス繊維束の部分から繊維束を縫うようにして試料の自由表面へ抜けるクラックが発生する (▲印)。このクラックはガラス

繊維束の傾斜角 $\alpha=90^\circ$ および $\alpha=60^\circ$ の場合のみ発生し、他の傾斜角の小さい場合には発生しない。一方、モアレ法による金属材料へのくさびの押込み解析によると、くさび面と試料表面との接触境界付近のひずみは大きく、この部分の変形は表面の沈降に影響する押込みせん断変形領域に相当すると報告されている。この領域に相当する所で Fig. 4 (b) のクラックが発生しているから、せん断変形によってガラス繊維束の自由表面部分からせん断破壊が発生、進展してできたクラックと考えられる。ガラス繊維束の傾斜角 (α) の小さい試料において発生しないのはガラス繊維束方向の圧縮成分が減少し、曲げの成分が生じてガラス繊維束間へせん断破壊が生じにくく、クラックが発生しないものと考えられる。

Fig. 3 (b) は半角くさびの押込みの場合で、ガラス繊維束の傾斜角 $\alpha=30^\circ$ および 60° の場合くさび面とガラス繊維束の方向との相対的な関係から Fig. 5 に示すように A 型と B 型との二つに分けられる。くさび頂角と押込み速度の変化による破壊状態は対称型くさびの場合と同じで、押込み速度が大きいほど、またくさび頂角が小さいほど試料の破断が生じやすくなる。

Fig. 5. Relation between direction of wedge face and yarn orientation.

 θ : Wedge angle, α : Inclination angle of yarn.

この破断は対称型くさびの場合よりもガラス繊維束の傾斜角の影響を受けており、傾斜角 $\alpha=90^\circ$ および B 型の $\alpha=60^\circ$ の試料においては押込み速度の遅い領域でも生じている。一方、くさび頂角が大きく、押込み速度が速い場合に生じるクラックは対称型くさびと同様に、ガラス繊維束の傾斜角 $\alpha=90^\circ$ および A 型の $\alpha=60^\circ$ の試料に生じる。特に半角くさびにおいてはガラス繊維束の方向が試料の破断に強く影響し、くさび頂角 $\theta=80^\circ$ 、押込み速度 $v=10\text{ cm/min}$ の場合、 $\alpha=60^\circ$ の A 型ではクラックが発生するのに対して B 型では二つに破断する。このように試料中のガラス繊維の含有量が少くても (約 0.74%)、ガラス繊維束の方向が試料の破断、破損に大きな影響を与える。

5 くさび面下のガラス繊維束のはく離、破壊の広がりについて

4 節では押込み速度の変化が試料の破損、破壊に及ぼす影響についてマクロ的にとらえた。ここではこれらの押込み速度の変化がくさび面下の試料内のガラス

繊維束のはく離、破壊に及ぼす影響を及ぼすかについて調べた。一定押込み速度 ($v=0.01$ cm/min) 下のくさびの押込みにおけるくさび面下の試料内のガラス繊維束のはく離、破壊域の広がりおよびガラス繊維の破壊形態等についてはすでに報告したように、くさび形状とガラス繊維束が試料側面となす傾斜角の変化との関係から、ガラス繊維束のはく離域の広がり、くさび先端からガラス繊維束に下した垂線の方に広がり、ガラス繊維束の破壊はガラス繊維方向に進展する。一方、ガラス繊維束内においては、繊維の座屈破壊、引張曲げ破壊、らせん状座屈破壊等とガラス繊維のまわりの樹脂の微小破壊とが発生する。

Fig. 6 はくさび面下のはく離部(白化している部分)の広がり、押込み速度との関係を示したもので、はく離部の広がり方向はくさび先端からガラス繊維束に下した垂線の方で、この方向は押込み速度が変化しても変っていない。図の縦軸は、はく離部の広がり方向がそれぞれのガラス繊維束の傾斜角において同じであるから、図中の写真に示すように白化部の水平方向の広がり (a) と押込み深さ方向の広がり (b) との積 ($A=a \times b$) で示し、押込み速度 $v=0.01$ cm/min のときの広がり面積で除して無次元化してある。押込み速度の変化に対してはく離部の面積は 1 の値の前後にばら

Fig. 6. Relation between failure range and indenting speed. Photograph shows the failure pattern by reflected white light.

θ : Wedge angle, α : Inclination angle of yarn.

ついており、押込み速度の変化による顕著な影響は認められない。

Fig. 7 は対称型くさびを 1 mm 押込み除荷した後の試料中のガラス繊維の破壊状態と押込み速度との関係

Fig. 7. Fracture mode of unidirectional glass fiber reinforced plastic materials after indentation by symmetric wedge indenter.

Indenting depth $t=1$ mm. 2θ : Wedge angle, α : Inclination angle of yarn.

Fig. 8. Fracture mode of unidirectional glass fiber reinforced plastic materials after indentation by half wedge indenter.

Indenting depth $t=1$ mm. θ : Wedge angle, α : Inclination angle of yarn.

Fig. 9. Fracture phenomenon of unidirectional glass fiber reinforced plastic materials by 160-deg symmetric wedge indenter.

Inclination angle of yarn $\alpha=60^\circ$. UL: Unloading.

Fig. 10. Phenomenon of cross grid on specimen by 160-deg symmetric wedge indenter. Inclination angle of yarn $\alpha=60^\circ$. Indenting speed $V=0.01\text{cm/min}$. h : Indenting depth, UL: Unloading.

を示す。図から明白のように、ガラス繊維束の方向とくさび頂角との相対的な関係から発生するらせん状座屈破壊 (Fig. 7 (a)) や引張曲げ破壊 (Fig. 7 (b), (c)) は、その破壊域の広がりや破壊形態において押込み速度の変化の影響をほとんど受けていない。Fig. 8 は半角くさびの場合で押込み速度の変化に対して対称型くさびの場合と同様で、Fig. 5 に示したくさび面とガラス繊維束の方向との関係においてもその影響は見られない。

Fig. 7, 8 における押込み速度の影響をさらに詳しくみるため、くさびの押込み量が 1 mm に達するまでの時々刻々のガラス繊維束の破壊と押込み速度の変化との関係を示したのが Fig. 9 である。これはくさび頂角 $2\theta=160^\circ$ 、ガラス繊維束の傾斜角 $\alpha=60^\circ$ の場合で、ガラス繊維束中に発生する破壊はらせん状座屈破壊が主である。このらせん状座屈破壊の発生はいずれの押込み速度においても押込み量が $h=0.5\text{mm}$ 付近で発生し、押込み量が増加するにつれて進展している。最終的な除荷後におけるガラス繊維束の破壊状態も Fig. 7, 8 と同様に今回の押込み速度の変化内において相違は見られない。他の実験条件におけるガラス繊維の破壊も押込み量の増加に伴い発生、進展するが、押込み速度の変化の影響は見られない。すなわち、ガラス繊維の破壊はくさびの押込み量に依存し、かつ押込み荷重も押込み速度とガラス繊維方向との影響を受けることより、押込み速度が速くなるとガラス繊維のはく離、破壊強度が大きくなる。

6 格子線法による観察

くさびの押込みにおけるガラス繊維束まわりの母材である樹脂の挙動をとらえるため、ガラス繊維束のすぐ近傍の樹脂面に格子線を描き、格子点の移動によって樹脂の挙動を調べた。Fig. 10 にその一例を示す。

図はくさび頂角 $2\theta=160^\circ$ 、ガラス繊維束の傾斜角 $\alpha=60^\circ$ 、押込み速度 $v=0.01\text{cm/min}$ の場合であり、ガラス繊維束の破壊状態は Fig. 9 におけるガラス繊維束の破壊とほぼ同じである。これより格子線を描いたことがガラス繊維束の破壊形態に大きな影響を与えていないと考えられる。Fig. 10 における各格子点の各押込み量における水平方向 (x) と押込み方向 (y) との変位量を測定し、元の格子点の等移動量分布と押込み速度との関係を線図で示したのが Fig. 11, 12 である。両図はくさびの押込み量が 1 mm で、くさび頂角とガラス繊維束の傾斜角とがそれぞれ $2\theta=160^\circ$ 、 $\alpha=0^\circ$ の場合と $\theta=80^\circ$ 、 $\alpha=60^\circ$ の場合とである。図において実線と破線で示した 4 種類の短い線は、くさび中心を一致させた場合の各押込み速度における試料内のガラス繊維束の位置を示す。また図中の数字は等移動量 $d=[(4x)^2+(4y)^2]^{1/2}(\text{mm})$ を表し、今回の実験での格子点の移動量の読み取り誤差は $\pm 30\mu\text{m}$ であるところから等移動量が $d=0.1\text{mm}$ の値を示す線図

Fig. 11. Equal deformation map of 160-deg symmetric wedge indentation by means of cross grid.

Arabic numerals show the equal deformation of grid.

Inclination angle of yarn $\alpha=0^\circ$.

Fig. 12. Equal deformation map of 80-deg half wedge indentation by means of cross grid.

Arabic numerals show the equal deformation of grid.

Inclination angle of yarn $\alpha = 60^\circ$.

に大きなばらつきを生じる結果となった。この等移動量線図の形状はガラス繊維束の傾斜角の変化によってガラス繊維束のはく離分布と同様の形状変化を示すが、その広がりを読み取り誤差を考慮すると、押込み速度の変化に対してほとんど変化していない。その他、時々刻々の格子点の移動図などへの押込み速度の影響を追求した結果、5節のくさび面下のガラス繊維束のはく離、破壊挙動の場合と同様に、今回の押込み速度の変化 ($v = 0.01 \sim 10.0$ cm/min) 内ではくさび面下の母材の挙動に押込み速度の変化による影響はなかった。

7 結 論

室温 (25~27℃) 中で対称型および半角型形状のくさびを用い、その頂角を変化させて一方向ガラス繊維強化プラスチック材料への押込み実験を行った。今回の押込み速度の速度領域 ($v = 0.01 \sim 10.0$ cm/min) は、

実際の機械加工における加工速度領域と比較すると非常に遅い速度領域ではあるが、押込み速度の変化が試料の破壊等に影響を与えることがわかった。

以下にその主な点について述べる。

(1) 押込み速度が増加するにつれてくさびの押込み荷重が増加し、くさびの押込みにおいてもひずみ速度の影響が存在する。

(2) 対称型および半角型くさびの押込みにおいて、押込み速度の速い領域ではくさび頂角が小さい場合は試料が二つに破断し、くさび頂角が大きい場合はガラス繊維束の傾斜角 $\alpha = 90^\circ$ および 60° において試料表面付近にクラックが発生する。

(3) ガラス繊維束の体積含有量は小さい(約0.74%)が、ガラス繊維束の方向が試料の破壊に大きな影響を与える。特に半角くさびにおいてそれは顕著に現れ、くさび頂角 $\theta = 80^\circ$ 、押込み速度 $v = 10$ cm/min では、くさび面とガラス繊維束の方向との相対的な関係がA型ではクラックが発生し、B型では試料が破断する。

(4) 今回の押込み速度の範囲内では、くさび面下の母材ならびにガラス繊維のはく離、破壊挙動は押込み速度の影響を受けておらず、くさびの押込み量に左右されている。

(昭和55年3月27日 第9回 FRP シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) 井上久弘, 井戸 守, 日本複合材料学会誌, **4**, 69(1978).
- 2) 井上久弘, 井戸 守, 日本複合材料学会誌, **4**, 112 (1978).
- 3) 前田禎三, 牧野内昭武, 藤原国生, 塑性と加工, **9**, 790 (1968).
- 4) 中村雅勇, 戸澤康壽, 塑性と加工, **17**, 23 (1976).