

高速シェアリングによる材料特性獲得方法の開発

東京農工大学 ○平塚 裕太, Norfariza Binti Ab·Wahab, 中村 崇 ©笹原 弘之

要 旨

本研究では高温・高ひずみ速度域における応力-ひずみ関係を同定する新しい手法の確立を目的とする。円板の高速シェアリングを可能とする試験装置を開発し、高ひずみ速度が実現できる高速せん断実験を行った。高速せん断実験結果とFEMによる2次元のせん断シミュレーションによって計算されたせん断力の比較を行い、応力-ひずみ関係の材料特性を同定する手法を確立した。

1. 緒 言

近年、切削による加工コストが増加傾向にある。CFRP、チタン合金などの高い加工コストを要する材料の需要増加に伴い、最適な加工条件の選定には多くの費用を要する。切削加工による最適条件の選定方法は未だ確立されておらず、現在は実切削による検証によって最適条件を求めている。そこで、最適条件選定のコストを小さくするため切削加工のシミュレーションによる選定法が注目されている。切削において、温度は室温から数百℃まで急激な変化をする。また、切削速度100m/min程度で最大のひずみ速度は 10^4s^{-1} 程度に達する。切削における材料の変形と温度を正確に解析するには実際に対応する温度変化域と高ひずみ速度域に対応した材料特性が必要となるが、対応する高温・高ひずみ速度での測定試験は容易ではない。例えば高速圧縮試験として知られるホプキンソン棒法で得られるひずみ速度は $1.0 \times 10^4\text{s}^{-1}$ であるのに対し、実切削時のひずみ速度は約 $1.0 \times 10^5\text{s}^{-1}$ と大きい¹⁾²⁾。

そこで、本研究では高速シェアリングにより高ひずみ速度における応力-ひずみ関係を求めることを目的とする。高速シェアリングの加工力と有限要素法による加工力が一致するようなJohnson-Cook構成式の材料定数を同定する手法を提案する。また、その過程においては、2次元のせん断シミュレーションと高速シェアリングとの比較手法を確立する。

2. スリッティングによる高速せん断試験

図1に試験装置の概略図を示す。NC旋盤のチャックに円盤状に加工したA5052試験片を取り付け、2つのローラのエッジ交点でせん断を行う。2つのローラはベアリングで支持され自由に回転でき、せん断時に試験片とローラ間の回転方向の摩擦は無視できる。

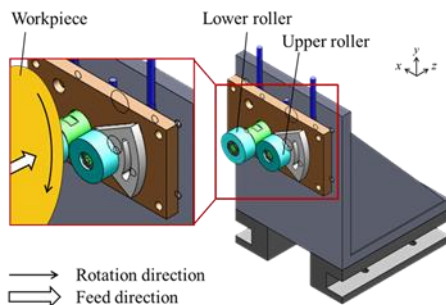


Fig.1 Entry of workpiece to slitting point

本実験では主軸回転速度、クリアランスの変化がスリッティングへ与える影響を調べる。実験条件を表1に示す。

Table.1 Slitting conditions of experiments

No.		1	2	3	4	5
Spindle speed	$n \text{ min}^{-1}$	120	30	240	120	
Clearance	$c \text{ mm}$	0.05		0.04	0.15	
Workpiece radius	$R \text{ mm}$	220				
Workpiece thickness	$d \text{ mm}$	0.5				
Roller radius	$r \text{ mm}$	22.5				

条件1を本実験の基準条件とし、条件2,3は主軸回転速度を、条件4,5はクリアランスを変化させて加工力の測定を行った。アッパーローラにかかる加工力を測定するためイケールと下板の間に3つの動力計を挟み固定している。実験で得られた測定値は加工終了に近づくにつれて定常化すると仮定し、加工終了前1秒間での平均値を評価する。測定したx軸方向の加工力を圧下力と定義する。条件1~5の測定された圧下力を図2に示す。

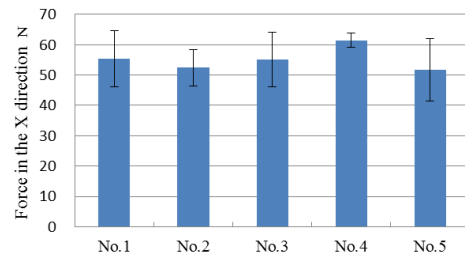


Fig.2 Measured slitting force in the X direction

実験条件1,2,3を比較すると、主軸回転速度の大きさによる圧下力の変化はみられなかった。実験条件1,4,5を比較すると、クリアランスが小さいほど圧下力は大きく、測定値のばらつきが小さいことがわかる。今後行う2次元せん断のシミュレーションにおいてクリアランスのパラメータを変化させてモデルの構成を行い比較することで、解析の妥当性の検討が可能となる。

3. 2次元せん断シミュレーションとスリッティングへの置き換え

工具のx方向の移動距離をストロークsと定義する。スリッティングされている部分を微小幅dy毎に分割し、ストロークが異なる2次元の打ち抜きせん断が同時に行われているものと仮定する。スリッティング中の試験片の変形状態を図3(a)に、それを2次元の打ち抜きに置き換えたものを図3(b)に示す。

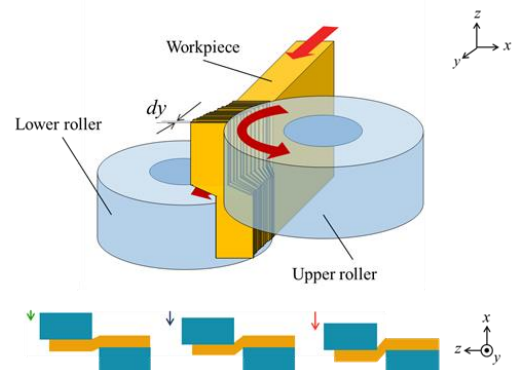


Fig.3 Schematic of slitting and substitution for 2-D shearing

分割された各ストロークでの加工力を2次元せん断シミュレーションで求め、それらを合計すれば実験と同様のローラ

スリッティングの圧下力とみなすことができる。

2次元せん断の解析結果の一例を図4に、得られた加工力を図5に示す。このときy方向の長さはすべて単位長さ(1mm)である。図5より、クリアランスが小さいほど加工力が大きくなる傾向がみられる。

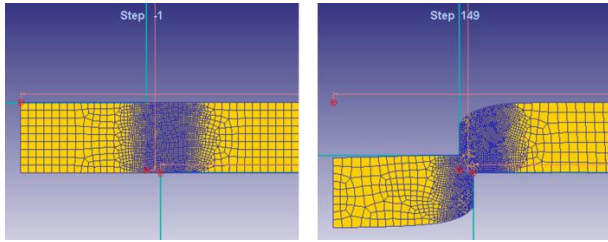


Fig.4 2-D shearing simulation

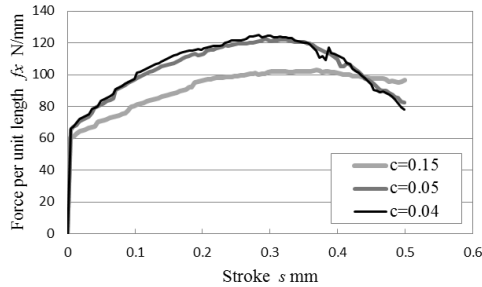


Fig.5 Simulated force per unit length

4. 実験と解析の比較結果と考察

実験条件1, 4, 5に対応するクリアランスで計算を行った2次元せん断の加工力からスリッティング時の加工力を導出する。せん断が開始するy方向の位置を y_0 、終了位置を y_1 とする。微小幅 dy 毎に分割された面の y_0 との距離をせん断長さ y_s と定義すると、せん断長さ y_s はローラ半径 r 、ローラ角度 θ 、ストローク s を用いて以下のように表される。

$$y_s = \sqrt{r^2 - (s - r \cos \theta)^2} - r \sin \theta \quad (1)$$

これよりy方向の単位長さあたりの加工力 f_s の分布がわかる。したがって分割された微小幅あたりのせん断力は $f_s dy$ と表すことができ、スリッティングに置き換えれば実験の測定値と比較できる。置き換えた圧下力は以下の式で表される。

$$F_x = \int_{y_0}^{y_1} f_x(y_s) dy \quad (2)$$

y_1 は実験後の試験片を観察し、厚み方向のせん断域から求めた。実験で測定した圧下力とスリッティングの置き換えを用いたシミュレーションによる加工力の比較を図6に示す。

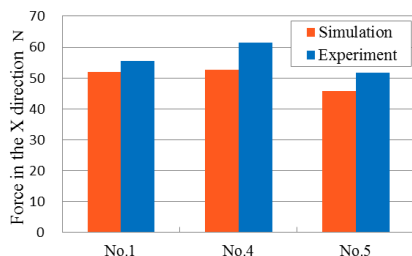


Fig.6 Force in the X direction by Simulation and Experiment

実験結果と同様に、クリアランスが小さいほどシミュレーションで求めた加工力が大きくなる傾向となっている。また、全ての条件でシミュレーション結果が実験結果に比べ小さい加工力となっている。これは実験での圧下力測定時に試験片の曲げなどせん断以外の影響を受けていることが原因と思われる。

5. 応力-ひずみ関係の同定手法

本研究では、高ひずみ速度域における応力-ひずみ関係としてJohnson-Cookの構成式³⁾を使用する。以下にJohnson-Cook

の構成式を示す。

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)(1 + C \ln \dot{\varepsilon})(1 - \left(\frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}}\right)^m) \quad (3)$$

Johnson-Cookの構成モデルはひずみに関する第1項、ひずみ速度に関する第2項、温度に関する第3項で構成される。高ひずみ速度域での材料定数 C, m の測定試験が困難である。定数 A, B 、加工硬化に関する定数 n はA5052の低ひずみ速度、常温の引張試験によって求める。引張試験によって材料定数は $A=199.1, B=102.6, n=0.23$ が得られた。

求めた材料定数 A, B, n と高速せん断試験で求めた圧下力を用いてJohnson-Cookの構成式の材料定数 C, m を同定する。材料定数 C, m の初期値をそれぞれ $C=0.01, m=1$ とし、2次元せん断モデルでの解析を行いスリッティングへの置き換えられた加工力と実験の圧下力を比較する。その後 C の値を変化させ同様の解析、比較を行い実験での圧下力に最も近い加工力が得られた C を高ひずみ速度域での値と仮定する。 m も同様の手順を行えば、最適な C, m の同定が可能である。クリアランス $c=0.04, 0.05, 0.15$ の3条件での C, m の最適値を図7に示す。高速せん断試験で求めた圧下力を $Fe(i)$ 、シミュレーションを3次元に置き換えた加工力を $Fs(i)$ とし、評価関数 R を次のように定義する。

$$R = \sum_{i=1}^3 \sqrt{(Fe(i) - Fs(i))^2} \quad (4)$$

このとき $i=1, 2, 3$ はそれぞれクリアランス $c=0.04, 0.05, 0.15$ のときを示している。

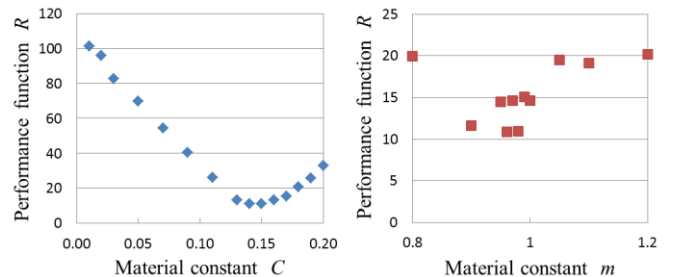


Fig.7 Identification of optimal material constant C, m

評価関数 R が最小値となる C, m が高ひずみ速度域における最適値となる。これより $C=0.15, m=0.96$ が同定された。この材料定数で解析によって求めた加工力と高速せん断試験で求めた圧下力の誤差はクリアランスを変化させた3条件において6.45%となり、十分な精度であった。

6. 結 言

本研究ではスリッティングを用いた高速せん断試験と2次元せん断シミュレーションの圧下力の差を最小とする C, m の同定を行い、切削加工の高ひずみ速度範囲に対応した応力-ひずみ関係の材料定数を同定する手法を新たに確立した。

- (1) スリッティングによる高速せん断試験装置を開発した。
- (2) 2次元せん断シミュレーションを3次元に置き換え、高速せん断試験との比較手法を確立した。
- (3) 高ひずみ速度範囲に対応した応力-ひずみ関係の材料定数 C, m を同定する手法を新たに確立した。

参考文献

- (1) 白井英治, 白樫高洋, 益子正己: 高速圧縮試験と二, 三の結果, 精密機械, 37, 4, (1971), 31
- (2) 岩本剛, 山中志郎, 横山隆, 沢俊行, : 分割ホプキンソン棒法における衝撃圧縮試験片に作用する慣性力および摩擦の影響, 日本機械学会論文集, 76, 772, (2010), 70-73
- (3) G.R.Johnson, W.H.Cook: A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures, in: Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics, (1983), 541-547