金属板のせん断加工におけるき裂の発生と成長のシミュレーション*

畑中 伸夫^{*1}, 関根 文太郎^{*2}, 山口 克彦^{*3}

Simulation of Crack Initiation and Propagation in Blanking of Sheet Metal

Nobuo HATANAKA^{*4}, Fumitarou SEKINE and Katsuhiko YAMAGUCHI^{**} Department of Mechanical and System Engineering, Kyoto Institute of Technology,
Matsugasaki, Sakyo-ku, Kyoto-shi, Kyoto, 606-8585 Japan

Numerical simulation of crack initiation and propagation in a blanking process of a steel sheet is done using rigid plastic finite element code developed by the authors. The modified Cockcroft and Latham expression is used as a ductile fracture criterion and is linked with the simulation. It is assumed that when the fracture threshold is satisfied at an element, a crack occurs and propagates through the element. The node separate method is proposed as a method for simulating the crack propagation. To confirm the results of finite element simulation, blanking experiments are also carried out under various conditions, and the crack propagation with punch penetration and the shape of cut edge are observed. The experimental results show good agreement with those of the simulation.

Key Words: Finite Element Method, Fracture Criterion, Plastic Forming, Blanking, Ductile Fracture, Crack Propagation

1. 緒 言

せん断加工過程におけるマクロ的な変形挙動は定性的にはほぼ説明されている^{(1)~(5)}。しかし、き裂の発生や成長などのせん断現象を定量的に解析するには、ミクロ的な変形挙動や数値的取扱いを必要とするため十分説明されていない。この理由は、せん断加工においてはきわめて狭いクリアランス領域にひずみが集中すること、また加工の後半に破断過程が含まれており破壊機構や破壊規準が十分明確にされていないことによる。

最近、有限要素法によるせん断加工の解析^{(6)~(13)}が報告され始めているが、定量的な解析を行って実用的に活用するには問題点が残されている。従来、有限要素法によるせん断加工過程の解析は二つの方向から行われてきた。一つは、き裂が発生するまでの初期せん断加工過程におけるクリアランス領域を中心とした応

力やひずみの分布を求め、これらの結果からき裂の発生時期や発生場所を推定^{(6)~(9)}しようとするものである。しかし、せん断加工の解析においてき裂の発生・進展は本質的であり、破断面形成過程の解析を含まない議論はせん断加工の解析として不十分である。

もう一つの方向は、刃先部分に特異点をもつ特殊な要素を配置すること^{(11)~(13)}により、き裂の発生と進展などを解析しようとするものである。しかしこの場合には、比較的粗い要素分割が使用されてきたため工具の刃先形状の差による変形挙動の違いは考慮されず、また特異点の種類によってはその周辺のひずみ速度が無限大になるなどの問題がある。

せん断加工におけるポンチとダイスのクリアランス領域(せん断領域)には、極めて大きな塑性ひずみが生じる。本研究では、このような大きな塑性ひずみ下におけるき裂の発生や成長を取り扱ったので材料を剛塑性体で近似し、また計算時間の短縮を図るために剛塑性有限要素法を使用した。そして、せん断加工過程の初期変形からき裂の発生と成長を経て破断に至るまでの一連の解析を行った。使用したコードは著者らが開発したものであり、各種のベンチマークテスト結果^{(14)~(16)}と比較することによりその信頼性を確認した。さらに、修正 Cockcroft と Latham の破壊条件

* 原稿受付 2000年6月15日。

^{*1} 正員, 京都工芸繊維大学大学院(☎606-8585 京都市左京区松ヶ崎)。^{*2} 正員, 京都教育大学教育学部(☎612-8522 京都市伏見区深草藤森)。^{*3} 正員, 京都工芸繊維大学工学部。
E-mail: a9840004@ipc.kit.ac.jp

式(17)~(19)を用い、ポンチの押し込み深さの増加に伴うせん断領域の応力やひずみ状態を追跡し、これらの分布がクリアランスによってどのように変化するかを詳細に観察した。そして、破壊条件式が満たされた要素は破壊したとして節点を分離することにより、き裂の導入・進展をシミュレーションした。このような方法によって、板材のせん断加工における切口面の形成機構、特にき裂の発生・進展挙動を明らかにした。また、せん断加工実験の結果と比較することにより、き裂の進展挙動、せん断切口面およびせん断力線図についてシミュレーション結果を評価した。

2. 実験および解析方法

2.1 実験方法 せん断加工実験に使用した供試材料は軟鋼板(SPCC)である。機械的性質を表1に示す。せん断加工実験に使用した試験片寸法は、板厚 3 mm、板幅 14 mm、長さ 120 mm である。試験片は材料の圧延方向が試験片の長手方向と一致するようにした。

実験に使用した打抜き工具は直線平行刃である。ダイスは実験時の弾性変形を避け剛性を高めるために単体構造とした。クリアランスの調整は、ダイス間距離を一定とし、幅の異なるポンチを交換して使用することで実現した。板押え力はダイセットに油圧シリンダを組込むことにより発生させた。ポンチ、ダイスおよび油圧シリンダ等を組込んだダイセットを万能試験機に取付けてせん断実験を実施した。せん断実験中の荷重およびポンチストロークは、万能試験機に付属のロードセルおよび変位計の出力を A/D 変換器を介してコンピュータに接続し自動計測を行った。せん断速度は速度効果を除外するため 1 mm/min と十分低速にした。板押え力は最大せん断荷重の約 20% (4 kN) とした。また、クリアランスは $c/t_0=0.02\sim0.10$ に変化させた。ここで、 t_0 は初期板厚である。

2.2 解析方法および解析条件 解析の手順を図1に示す。き裂発生までの押し込み増分は1ステップあたり 0.005 mm とし、30 ステップごとに計算を停止して破壊基準を満たした要素を検出した。破壊要素が発見されないときにはリメッシュを実施し、さらに

ポンチの押し込みを続けた。破壊要素が発見されたときには、き裂を導入してさらにポンチの押し込みを続けた。き裂発生後についても同様の方法で12ステップごとに新たな破壊要素の検出を行った。このようにして、き裂が会合し板材が分離されるまで、ポンチの押し込み、破壊要素の検出、き裂の進展、そしてリメッシュを繰り返した。

解析に使用した材料は等方均質な剛塑性体を仮定して以下の相当応力-相当ひずみ関係を使用した。

$$\bar{\sigma}=831(0.002+\bar{\epsilon}_p)^{0.215}$$

解析における板材の形状は板厚 3 mm、板幅については平面ひずみ変形を仮定したことから単位長さである。シミュレーション条件は、クリアランス $c/t_0=0.02, 0.05, 0.10$ 、板押え力はポンチに加わるせん断荷重の 20% とし、板押えに接している節点に等分布荷重として加えた。ポンチおよびダイスは剛体を仮定し、それらの刃先円弧半径は 64 μm とした。また、工具材料間は無潤滑摩擦とし、摩擦係数は無潤滑の場合を想定して 0.2 と仮定した。要素については、ポンチおよびダイス刃先部分に最小要素を配置した。最小要素の大きさは、刃先円弧を正確に計算に反映させるために約 10 μm とした。初期要素分割は 1 479 節点、1 407 要素である(図2)。

2.3 破壊規準 せん断変形の進行に伴い刃先近

Table 1 Mechanical properties of material

Material		SPCC
Yield strength	MPa	218
Ultimate tensile strength	MPa	495
Strength coefficient F	MPa	831
Work hardening exponent n		0.215

Fig. 1 Flow chart of Simulation

傍からき裂が発生・成長する。これをシミュレーションするには、き裂の発生規準を決定する必要がある。本研究においては、破壊規準としてボイド理論にもとづく延性破壊条件式の一つであり、実験結果とよく一致することが報告されている Cockcroft と Latham により提案⁽¹⁸⁾され、Jeong らによって修正⁽¹⁹⁾された破壊条件式を用いた。

$$C_1 = \int_0^{\bar{\epsilon}_f} \frac{\sigma_{\max}}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon}$$

$$F_v = \int_0^{\bar{\epsilon}} \frac{\sigma_{\max}}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon}$$

ここで、 C_1 :破壊基準、 $\bar{\epsilon}_f$:破壊時の相当ひずみ、 $d\bar{\epsilon}$:相当ひずみ増分、 $\sigma_{\max}$:最大主応力、 $\bar{\sigma}$:相当応力である。また、 F_v は任意のひずみ $\bar{\epsilon}$ までの積分値であり、これを破壊係数と定義した。この破壊係数 F_v が破壊基準 C_1 に達すると要素が破壊するものとした。破壊基準 C_1 の値は、せん断実験においてき裂発生が観察された押し込み深さ、およびその押し込み深さにおける FEM シミュレーションの結果をもとに決定した。き裂発生時の押し込み深さは、クリアランスが大きくなるほど大きくなる。そのため破壊規準 C_1 の値はクリアランスによって変化することになるが、クリアランスによる C_1 の変化は小さいので、本研究ではクリアランス 5% 時の押し込み深さをもとに算出した値 $C_1=2.77$ を使用した。

2.4 き裂進展挙動のシミュレーション 破壊係数 F_v が基準値 C_1 を越えた要素は破壊したとして節点を分割し、き裂の進展をシミュレーションした。新たな破壊要素の検出は 12 ステップ(押し込み率増分 $s/to=0.02$)ごとに実施、き裂の進展は手作業で行った。き裂の成長・進展は、破壊条件を満たす要素がき裂先端に連続的に発生することにより進めた。き裂の進展方向と進展後のき裂先端は、現在のき裂先端の位置と新たに破壊した要素の位置および主せん断応力方向から図 3 のように決定した。き裂の進展は「隣接す

る要素が破壊したとき、その要素間の結合が解かれき裂が進展する」と仮定した。

図 3 において、上側はポンチ、下側はダイスである。主せん断方向はいずれの場合も上下方向である。図 3(a)において、要素 I および II はすでに破壊されており、き裂先端が節点 a まで進展していると仮定する。次に、図 3(b)に示すようにポンチの押し込み深さがさらに増加したことによって、要素 III が破壊したとする。このとき、き裂を進める手法として、節点 a を節点 a' , a'' に分離し、節点 a' は要素 I にのみ、節点 a'' は要素 II, III および IV に属させる。この結果、き裂先端は節点 a から節点 b まで進展する。同様に、図 3(c)に示すように要素 IV が新たに破壊したとすると、節点 a を分離させるが、この場合には節点 a' は要素 I, III および IV に属し、節点 a'' は要素 II にのみ属する。このようにして、節点 a にあったき裂先端は節点 c まで進展する。また、図 3(d)に示すように要素 III と IV が同時に破壊した場合には、節点 a を二つの節点 a' , a'' に分離させる。このとき、節点 a' は要素 I および III に、 a'' は要素 II および IV に属する。その結果、き裂先端は節点 a から節点 d へ進展する。

3. 結果と考察

3.1 破壊係数の分布 せん断加工においてクリアランス領域の材料は極めて大きな変形を受ける。この領域における材料の挙動をできるだけ詳細に表示するため、以下においては図 4 の破線で示す領域のみを

Fig. 2 Initial meshes and boundary condition

Fig. 3 Typical crack propagation patterns

拡大して示す。図5は、クリアランス $c/to=0.05$ 一定で、押し込み率 $s/to=0.35, 0.50, 0.65$ における工具刃先近傍の破壊係数の分布状態を示す。押し込み率を増加していくと、 $s/to=0.25$ においてダイス刃先側面近傍の材料表面から内部に少し入った位置に、破壊係数 $F_v>0.5$ の領域が発生した。押し込み率をさらに増加させるとこの部分の破壊係数値が増加するとともに、 $F_v>0.5$ 領域は、板材中心部および材料表面に向かって緩やかに広がりを見せた。 $s/to=0.32$ においてポンチ刃先側面近傍の材料表面から内部に少し入った位置にこの領域が発生した。そして、 $s/to=0.42$ においてポンチ側およびダイス側から拡大してきた領域は中央部で連結した。 $F_v>1.0$ の領域は、ダイス側およびポンチ側において $s/to=0.34, 0.39$ でそれぞれ発生し、 $s/to=0.54$ において中央部で連結した。 $F_v>1.5$ の領域は、ダイス側およびポンチ側において $s/to=0.39, 0.54$ でそれぞれ発生し、 $s/to=0.62$ において中央部で連結した。 $F_v>2.0$ の領域は、それぞれ $s/to=0.54, 0.57$ で発生した。しかし、 $F_v>2.0$ の領域は大きく広がることはなく、き裂発生後は、その先端の狭い領域を占めるにすぎない。

図6は、押し込み率 $s/to=0.50$ 一定でクリアランス $c/to=0.02, 0.05, 0.10$ におけるクリアランス領域の破壊係数の分布を示す。 $F_v>0.5$ の領域は各クリアランスの場合ともポンチおよびダイス側面からせん断領域を含んで広がっている。領域中央部の幅は $c/to=0.10$ の場合が最も広く、 $c/to=0.02$ の場合が最も狭くなっている。 $F_v>1.0$ の領域はクリアランスの違いによらずほぼ同じ広さであり、ポンチおよびダイスの側面から中央部に向かって広がっている。

しかし、 $F_v>1.5$ の領域は $c/to=0.10$ の場合にはほとんど発生しておらず、 $c/to=0.05$ の場合にはダイス側で発生が認められる。これに対して $c/to=0.02$ の場合にはダイス側で大きく広がるとともにポンチ側にもわずかに発生している。これらの結果は、破壊係数の大きい領域はクリアランスが小さいほどせん断過程の比較的早い時期にポンチおよびダイス付近で大きくなることを示している。また、クリアランスが小さいほど、せん断による変形域が狭くかつ厳しい変形を受けていることを意味している。

3・2 き裂進展のシミュレーションおよび実験結果

シミュレーションでは、ポンチ押し込み深さの増加に伴い、破壊係数は刃先近傍の材料表面において急激に増加する。一方、材料内部における破壊係数の増加は刃先近傍より緩やかである。本シミュレーションにおいては、クリアランス $c/to=0.05$ の場合、押し込み

Fig. 4 Whole view of deformed specimen

Fig. 5 Distributions of fracture value ($c/to=0.05$)

Fig. 6 Distributions of fracture value ($s/to=0.50$)

率 $s/to=0.65$ でポンチ刃先における破壊係数がダイス側よりも早く破壊基準値 2.77 に達したため、ポンチ側にき裂を導入した。また、 $s/to=0.725$ においてダイス刃先側面に位置する要素が破壊基準を満たしたことからダイス側よりき裂を発生させた。押し込み率の増加に伴い、き裂の先端に次々と破壊基準を満たす要素が発生しき裂が進展した。そして、 $s/to=0.745$ においてき裂先端は会合し破断が完了した。

図7にクリアランス $c/to=0.05$ 、押し込み率 $s/to=0.675, 0.70, 0.725, 0.740$ におけるシミュレーションによるき裂のようすを示す。また、図8に実験におい

て観察されたき裂を示す。実験では $s/to=0.65$ においてき裂が発生した。 $s/to=0.70$ ではシミュレーションにおいてはダイス側にき裂は発生していないが実験ではすでに発生・進展している。その後、押し込み率の増加に伴いき裂はシミュレーション、実験ともに進展し、破断寸前の $s/to=0.74$ ではよい一致を示している。図 9, 10 に $c/to=0.10$ の場合のシミュレーション結果および実験結果を示す。シミュレーションでは $s/to=0.68$ でポンチ刃先における破壊係数が基準値 2.77 に達したため、ポンチ側からき裂を発生させた。しかし、この場合にもダイス側のき裂の発生は遅れ $s/to=0.85$ においてようやく発生し、 $s/to=0.90$ において破断が完了した。

せん断加工過程における破断過程はボイド理論にもとづく延性破壊によって支配されるが、破壊あるいはき裂の進展は急激である。従来、刃先角部から側面にわずかに入った位置における引張変形や引張応力が限界を超えることによってき裂が発生すると説明⁽²⁰⁾されてきた。この位置における引張変形がき裂発生の重要な役割を果たすが、その後の急激なき裂進展は本シミュレーション結果によれば次のように解釈することができる。せん断加工の比較的初期に、ポンチとダイス刃先近傍およびこれらを結ぶ領域では、破壊係数がかなりの大きさに成長する。これは、表面からき裂が発生する前に材料内部にはすでにボイドシートが発生・成長している⁽¹⁷⁾ことを意味する。その後、材料表面においてボイド密度は急激に増加するが、内部におけるボイド密度の増加は表面に比べ緩やかなため、き裂は表面から発生する。いったんき裂が発生すると、あらかじめ形成されたボイドシート内のうちき裂先端の破壊係数が急激に増大し、き裂先端で次々と破壊基準を満たす要素が発生し、ボイドシートに沿ってき裂が急激に進展すると考えられる。

3・3 せん断力線図 実験および解析によって得られた荷重-ポンチストローク線図の比較を図 11 に示す。両者ともポンチ押し込み開始直後に荷重が急激に増加するが、押し込み率 $s/to=0.10$ 以後は比較的ゆるやかな増加となっている。最大荷重は、実験の場合 $s/to=0.50$ 付近、シミュレーションの場合には $s/to=0.45$ 付近で現れた。また、最大荷重の大きさを比較するとシミュレーション結果は実験結果に比べると約 15% 小さくなっているが、最大荷重はクリアランスが小さいほど大きくなること、最大荷重の生じる押し込み率はクリアランスの小さい方が小さいなどの傾向は正しくシミュレーションされている。

クリアランス $c/to=0.02$ の場合、実験では $s/to=$

0.62 においてき裂が発生するため荷重はそれ以降急激に減少した。シミュレーションにおいては $s/to=0.60$ でき裂を導入したが、荷重は急激に減少し、 $s/to=0.70$ においてせん断が終了した。 $c/to=0.05$ の場合、実験では $s/to=0.65$ においてき裂が発生するため荷重はそれ以降急激に減少した。シミュレーションにおいてもき裂導入後、荷重は急激に減少し、 $s/to=0.745$ においてせん断が終了した。 $c/to=0.10$ の場合、実験において $s/to=0.70$ でき裂が発生した。シミュレーションにおいては $s/to=0.68$ でき裂を導入したが、き裂の進展が実験に比べて遅く、荷重の減少も遅れ、 $s/to=0.90$ においてせん断が終了した。この原因は、クリアランスが大きい場合には、使用した破壊条件式がき裂の発生基準としては有効であっても、き裂の進展基準としては不十分であるためと考えられる。

また、き裂導入後、押し込み率の増加に伴い荷重が階段状に減少することが報告⁽¹¹⁾されているが、本シミュレーションにおいては滑らかに減少した。この原因は、き裂の発生・進展時の押し込み率の違いによると考えられる。すなわち、前者のごとく最大荷重点以前の比較的初期にき裂が導入されると、それ以降の押し込みに対して材料の加工硬化の影響が大きく、そのき裂長さにおける荷重は押し込みの増加に伴い増加する。一方、本シミュレーションのようにき裂の発生が最大荷重点を過ぎて加工硬化の影響よりも板厚減少の効果が支配的な状況では、き裂を導入しても押し込みの増加に対して荷重の増加は生じ得ないと考えられる。図 11 において、最大せん断荷重のシミュレーション結果が実験結果よりも約 15% 小さくなった原因として、シミュレーションに使用した F 値および加工硬化指数 n の値が適切でなかったと考えられる。一般に、 F 値が大きくなると荷重も比例的に大きくなる。一方、 n 値は変形に伴う荷重の増加率と最大荷重を生じる押し込み率に影響を与える。本シミュレーションにおいて、最大せん断荷重の生じる押し込み率は、実験結果とほぼ一致していることから、 n の値は適切であったと考えられる。そこで F 値のみを約 15% 大きく ($F=831 \rightarrow 955$ MPa) して計算を行ってみた。得られた結果を図 12 に示す。変形初期においてシミュレーションによるせん断力が実験結果よりいくぶん大きくなっているが、全体的にはよい一致を示している。

3・4 せん断切口面形状 図 13 および 14 は、シミュレーションと実験によって得られたせん断切口面の形状を比較して示す。クリアランス $c/to=0.05$ の場合、図 13(a) に示すようにシミュレーションにおけ

Fig. 7 Simulated crack propagation with punch stroke ($c/to=0.05$)

Fig. 9 Simulated crack propagation with punch stroke ($c/to=0.10$)

Fig. 8 Observed crack propagation with punch stroke ($c/to=0.05$)

Fig. 10 Observed crack propagation with punch stroke ($c/to=0.10$)

Fig. 11 Blanking force diagram ($F=831$ MPa) Fig. 12 Blanking force diagram for a different F -value ($F=955$ MPa)

る切口面構成比率は、だれ 18%，せん断面 45%，破断面 37%，かえり 5%であった。一方、実験によれば、だれ 15%，せん断面 42%，破断面 44%，かえり 3%となった。同様に、クリアランス $c/to=0.10$ の場合、シミュレーションの結果では、図 14(a)に示すようにだれ 24%，せん断面 44%，破断面 32%，かえり 4%であった。これに対して、実験では、だれ 19%，せん断面 40%，破断面 41%，かえり 5%であった。クリアランス $c/to=0.05, 0.10$ の場合ともにシミュレーション結果は、だれが 3~5%長く、せん断面が 3%長く、破断面が 7~9%短くなっているものの、全体としてよい一致を示している。また、破断面の傾き角は $c/to=0.05$ の場合には両結果ともに直角に近いのに対して、 $c/to=0.10$ の実験においては断面が大きくえぐれており、シミュレーションでも同様な傾向を示している。この結果からシミュレーションによって得られた切口面は実験結果とよい一致を示しているといえる。

4. 結 言

剛塑性有限要素法によって板材のせん断加工過程のシミュレーションを初期変形からき裂の発生と成長を

Fig. 13 Shape of edge cut ($c/to=0.05$) Fig. 14 Shape of edge cut ($c/to=0.10$)

経て最終破断まで連続して実施することにより以下の知見を得た。

(1) き裂発生前の破壊係数の増加および分布のようすを観察することにより、き裂発生メカニズムを説明した。

(2) き裂進展モデルを提案した。このモデルを使用したき裂進展シミュレーションは、実験結果とよく一致した。

(3) シミュレーションにより得られたせん断力線図は、実験の結果とよく一致した。また、き裂発生後のせん断力の変化については従来公表されている結果に比べ実験事実に近い結果を得た。

(4) 本シミュレーションにより得られたせん断切口面の形状寸法は、実験結果を精度よく近似している。

文 献

- (1) 前田禎三, 塑性と加工, 2-10 (1961), 571.
- (2) 春日保男・近藤一義, 塑性と加工, 3-14 (1962), 201.

- (3) 神馬敬, 塑性と加工, **6**-52 (1965), 243.
- (4) 岩間一明・上田完司・山田保之, 塑性と加工, **20**-220 (1975), 437.
- (5) 村川正夫, 塑性と加工, **38**-440 (1997), 794.
- (6) 湯川伸樹・犬飼佳彦・吉田佳典・石川孝司・神馬敬, 塑性と加工, **39**-454 (1998), 1129.
- (7) 村川正夫・ボンバン ギャオタテップ・古閑伸裕・神佳彦, 49 回塑加連講論, (1998), 383.
- (8) Stegeman, Y. W., Goijaerts, A. M., Brokken, D., Brekelmans, W. A. M., Govaert, L. E. and Baaijens, F. P. T., *J. Mater. Process. Tech.*, **87** (1999), 266.
- (9) Faura, F., Garcia, A. and Estrems, M., *J. Mater. Process. Tech.*, **80** (1998), 121.
- (10) 湯川伸樹, 塑性と加工, **36**-410 (1995), 248.
- (11) 小森和武, 塑性と加工, **38**-433 (1997), 129.
- (12) 森謙一郎・島進・小坂田宏造, 塑性と加工, **21**-234 (1980), 593.
- (13) Brokken, D., Brekelmans, W. A. M. and Baaijens, F. P., *J. Mater. Process. Tech.*, **83** (1998), 192.
- (14) 川井謙一, 塑性と加工, **32**-364 (1991), 553.
- (15) 川井謙一, 塑性と加工, **32**-367 (1991), 956.
- (16) 川井謙一, 塑性と加工, **32**-369 (1991), 1212.
- (17) 後藤学, 塑性と加工, **38**-434 (1997), 200.
- (18) Cockcroft, M. G. and Latham, D. J., *J. Instit. Metal*, **96** (1968), 2444.
- (19) Jeong, S. H., Kang, J. J. and Oh, S. I., *Proc. 5th ICTP*, (1997), 631.
- (20) 日本塑性加工学会編, せん断加工, (1992), 13, コロナ社.