

臨界衝撃速度打抜き加工法

海津浩一*

1. はじめに

近年、新しい材料が次々と生み出されているが、実用段階では、効率の良い製造技術に加え、製品として世に送り出すための加工技術も必要不可欠なものとなる。しかしながら、一般的に新材料は加工しにくい難加工材料であり、いかに良好に加工できるかが問題となることが多いと思われる。

細い棒の一端をある速度以上で急激に引っ張ると、棒の着力端近傍で瞬時に破断が生じてしまう。この現象は棒の変形が着力端近傍に局所的に集中し、それ以外の部分には変形が伝わらないために起こるものである。このような現象の生じる速度を臨界衝撃速度¹⁾といい、材料固有の速度である。この臨界衝撃速度の現象を高速打抜き加工にうまく応用することができれば、打ち抜いたことによる加工の影響を穴周辺に限定でき、それ以外の部分には加工の影響を及ぼさないことが可能になる。臨界衝撃速度の現象が高速引張り以外でも現れるかどうかの検証を行うために、谷村らは、周辺固定した正方形の薄いアクリル板に円柱状のプロジェクトイル（飛翔体）を垂直衝突させる実験を行った。その結果として、衝突速度がある速度に到達すると、ひびも入らず穴の形状が急激にプロジェクトイルの断面形状に近づくこと、またその速度以上の衝突速度では、穴の直径はプロジェクトイルの直径とほぼ一致するようになることを示している²⁾。

本研究では、難加工材料に対しては大きなエネルギーを用いて瞬時に加工してしまう手段が有効であろうという考え方に基づいて、高エネルギー加工法である高速打抜き加工法を難加工材料に適用できるかどうかの基礎的検討を行うことを目的としている。第一段階として、高速打抜き加工法の基礎理論の確立を目指し、基礎理論を衝撃特有の破壊現象である臨界衝撃速度から検討し、実験を通してその基礎理論の検証を試みることにした。なお、現状では打抜かれた製品を無傷で回収することが難しいため、打抜かれて残った部分を対象にして調べた。したがって、現状では高速穴あけ加工と見なすことができる。

2. 臨界衝撃速度の考え方

Karman³⁾らは細い棒を高速で引っ張るとき、材料が定構成式で仮定され、さらに単純波が棒を伝ばす場合には、ある特定の速度以上で引っ張ると棒の着力端近傍で瞬時に破断が生じるという臨界衝撃速度が存在することを示

した¹⁾。上に凸の応力—ひずみ曲線をもつ材料を引張強さに対応するひずみまで高速で一気に引っ張る場合には、引張強さでの応力—ひずみ曲線の傾きが0であることからひずみの伝ば速度も0になる。したがって、引張強さに対応する大きなひずみが棒をもはや伝ばできなくなることから、着力端近傍に引張強さに対応する大きなひずみが集中して瞬時に破断が起きてしまうわけである。著者らは、以下に示すような薄板を剛体円柱で打抜く場合の臨界衝撃速度の式を理論的に導出している²⁾。

$$V_{cr} = - \int_0^{\gamma_m} \left(\frac{d\tau}{d\gamma} / \rho \right)^{\frac{1}{2}} d\gamma \quad (1)$$

ここで、 τ はせん断応力、 γ はせん断ひずみ、 ρ は密度、 γ_m はせん断応力—せん断ひずみ曲線におけるその傾きが0になる応力に対応したひずみである。

一方、高速変形下の現象として断熱せん断帯の発生はよく知られている。そのような断熱せん断帯の生ずる不安定ひずみは熱軟化を考慮した応力—ひずみ曲線の傾斜が0になる条件^{3) 4)}から導かれており、ひずみ速度一定の断熱せん断変形過程において、せん断変形の局所化が始まる条件は次式のように表される。

$$\frac{d\tau}{d\gamma} = \left(\frac{\partial \tau}{\partial \gamma} \right)_T + \left(\frac{\partial \tau}{\partial T} \right)_\gamma \frac{dT}{d\gamma} = 0 \quad (2)$$

ここで、 T は温度、 $(\partial \tau / \partial \gamma)_T$ は等温接線係数、 $(\partial \tau / \partial T)_\gamma$ は応力の温度依存性を表す係数を表している。したがって、臨界衝撃速度の概念と断熱せん断帯の発生の考え方は同じものであり、断熱せん断帯の発生はせん断変形過程での臨界衝撃速度の現象と見なすことができるのではないかと考えられる。本研究では、高速打抜き加工の実験を行い、ある速度以上で臨界衝撃速度の現象が発生したときに、断熱せん断帯も発生しているのかを調べ、この考え方を検証することにした。実際に工具を用いた高速加工では臨界衝撃速度の現象が発生したかどうかの判断がむずかしく、断熱せん断帯の発生により臨界衝撃速度の現象の発生が確認できれば、どれぐらいの速度で材料を加工すれば良いかの指針を得ることができる。

3. 実験方法

3.1 実験装置及び計測システム

図1に実験装置、図2に計測システムの概略を示す。装

置は縦型で、コンプレッサーにより蓄圧タンクに圧縮空気のため、空気弁の開放とポンチのストッパー解除により、

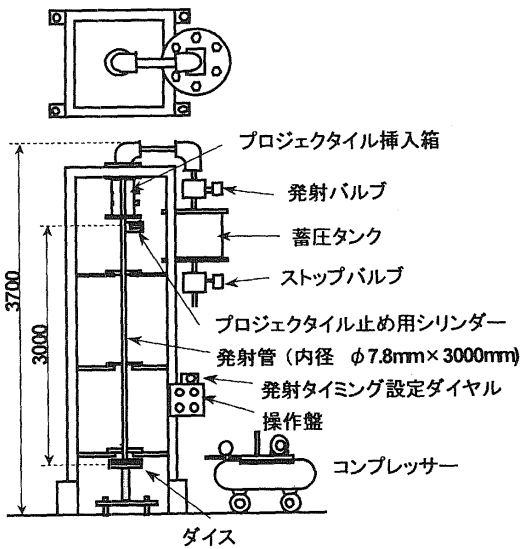


図1 衝撃試験機

ポンチを発射し、ダイスに固定された試験片に高速で衝突させて打抜き加工を行う。ポンチは図3に示すように $\phi 7.6\text{mm} \times 10\text{mm}$ の円柱状でSKD11を用いた。またポンチの衝突速度を測定するために、ポンチが試験片に衝突する直前の位置に一对の光源とフォトトランジスタを2組配置した。2組の光源とフォトトランジスタはわずかに間隔をあけて配置されており、それらの光路をポンチが横切る時の信号をデジタルオシロスコープで読み取り、ポンチが2組の光源とフォトトランジスタの間隔を通過するのにかかった時間から衝突速度を求めた。ポンチの衝突速度は蓄圧タンクの圧縮空気を開放するタイミングとストッパーがポンチを離すタイミングを調整することにより、現状では $25.3\text{m/s} \sim 152.7\text{m/s}$ まで変えることができる。図4に試験片を固定するダイスを示す。ポンチは試験片を打抜いた後、ダイスの円管内を抜けて、ダイスの下に置かれたポンチ回収用の紙束に衝突して止まるようになっている。ダイスはポンチが試験片の中心を試験片に対して直角に打抜くようにするため、ポンチが発射管を出た直後に試験片に衝突するように発射管の出口とダイスの隙間を1mm程度に設定した。さらにクリアランスが0.1mmとなるように穴をあけたS45C炭素鋼の円板2枚 ($\phi 50\text{mm} \times 1\text{mm}$) を試験片

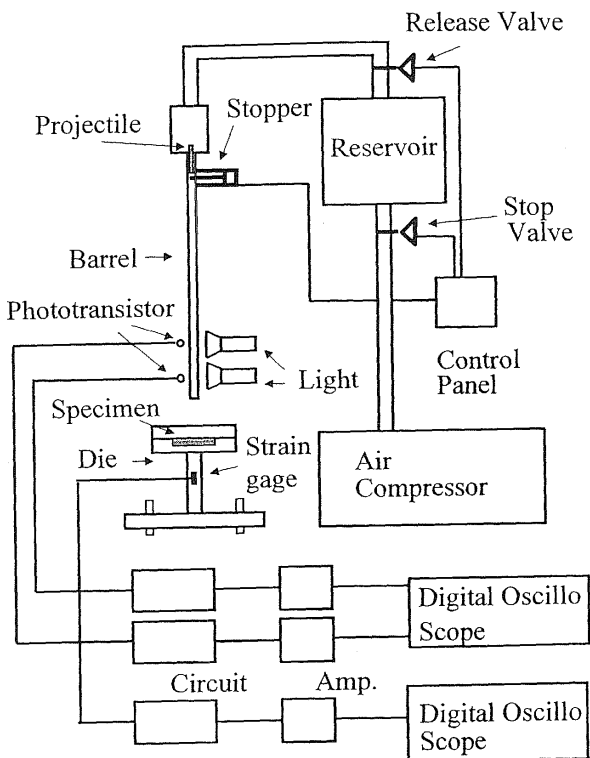


図2 計測システム

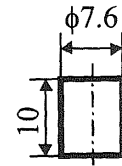


図3 プロジェクタイトル(ポンチ)

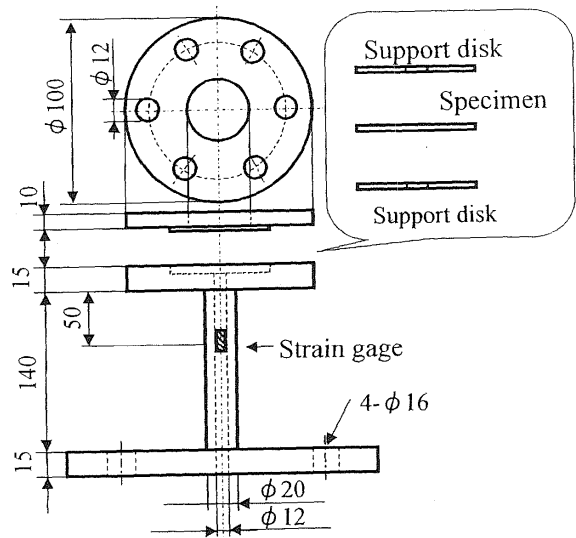


図4 ダイス

の上下に重ねてダイスにはさみ、ボルトとナットで締め付けることで試験片を固定した。また図2のようにダイスにひずみゲージを取り付け、試験片を打抜くときに発生した力を出力電圧としてデジタルオシロスコープで読み取り、その電圧を検定試験により得られた実験式に代入することでポンチが試験片を貫通する際の最大せん断力を求めた。

3.2 最大せん断力の検定実験

最大せん断力の検定実験の様子を図5に示す。穴のあいていないS45C炭素鋼の円板(φ50mm×1mm)を前述の穴のあいたS45C炭素鋼の円板2枚の間に挟み、それをダイスに挟んでボルトとナットで締め付けて固定し、その円板に対して垂直に直径φ7.6mm×1000mmのS45C炭素鋼棒を立て入力棒とし、その上から打撃棒として直径φ7.6mm×1000mmのS45C炭素鋼棒を入力棒に衝突させた。すなわち、打撃棒が入力棒に衝突することで発生する力が入力棒中を伝ばするので、その力をダイスへ入力する力として入力棒のひずみゲージで測定した。またその入力棒から試験片を通してダイスへ伝わる力もダイスのひずみゲージから測定した。測定した電圧のデータから得られる最大電圧の値を用いて入力棒へ加えられた力の最大値とダイスからの最大出力電圧の関係を求めたものが図6である。図より、最小二乗法を用いて次式のような近似式を求めた。

$$F = 0.2984 \times E \times 6.0/E_1 + 0.3435 \quad (3)$$

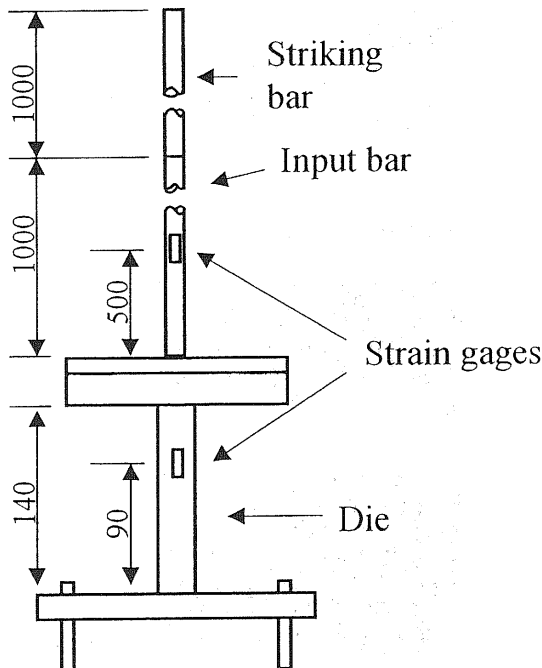


図5 検定実験

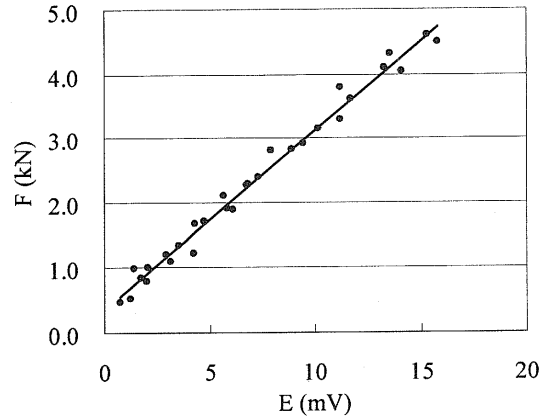


図6 入力棒からの入力最大値に対するダイスからの最大出力電圧の関係

ここで、Fは入力棒の最大荷重(kN)、Eはダイスのひずみゲージの出力電圧(mV)、 E_1 はブリッジ回路の印加電圧(V)である。式(3)にダイスのひずみゲージからの出力電圧を代入することで得られる入力の最大値が加工中に発生した最大せん断力に相当することになる。

3.3 試験片

供試材は、市販の工業用アルミニウム板であり、板厚1mm、直径50mmの円板を機械加工で仕上げた後350℃で2時間保持し、その後、炉冷したものと機械加工のみで熱処理を行わないものを用意した。表1にアルミニウムの化学組成を示す。

表1 化学組成 (wt%)

Al	Si+Fe	Cu	Mn	Zn
Bal.	0.71	0.15	0.01	0.01

4. 実験結果及び考察

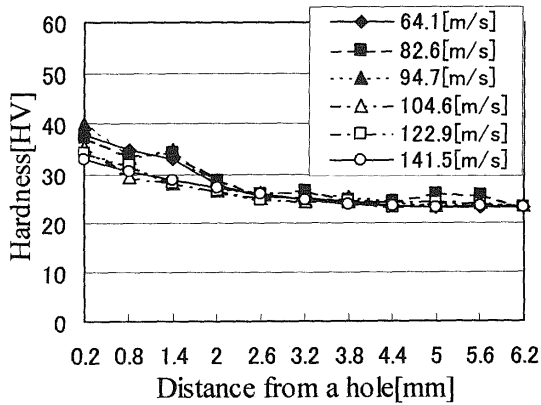
4.1 穴周辺部の硬さ分布

穴周辺の加工の影響を調べるため、試験片の下面(ポンチが抜けていく方の面)の穴周辺の硬さをビッカース硬度計で測定した。その結果を図7に示す。図より、熱処理をした場合もしていない場合も約105~110m/s以上の衝突速度以上になると穴の近傍のみに硬い領域が集中し、硬い領域が狭まってくるのがわかる。この原因としては、速度が遅い場合はポンチが試験片を打抜くまでのせん断過程に比較的時間が掛かることにより、試験片の穴周辺がダイスに強く押付けられ続けることから塑性変形を受けて硬化を起こす領域が広がるのに対して、衝突速度が増加するほどせん断過程が瞬時に終了するために穴周辺のごく限られた領域だけが加工の影響を受け、硬化を起こす領域が狭くなったものと考えられる。また穴近傍での一番大き

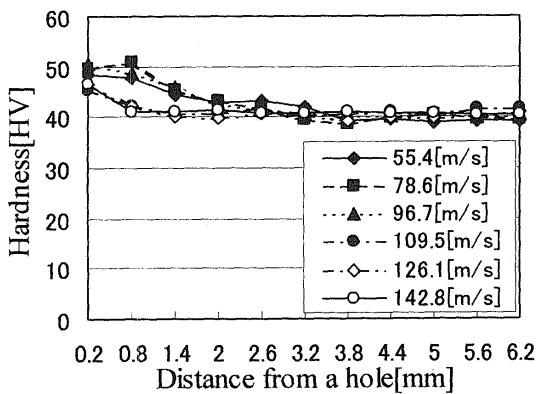
な硬さの値も若干低下していることもわかる。

4.2 最大せん断力

ポンチが試験片に衝突して打抜き過程が終了するまでに発生した最大せん断力と衝突速度の関係を図8に示す。



(a) 熱処理あり



(b) 熱処理なし

図7 試験片のビッカース硬度分布

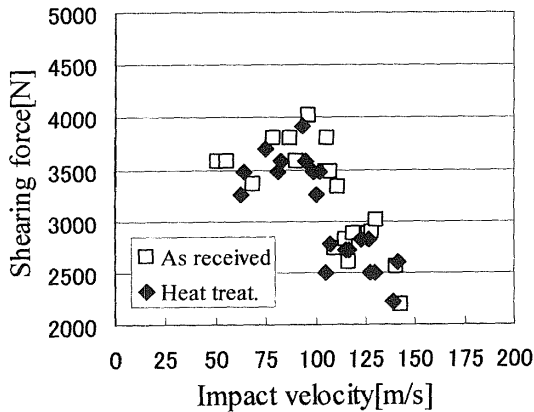
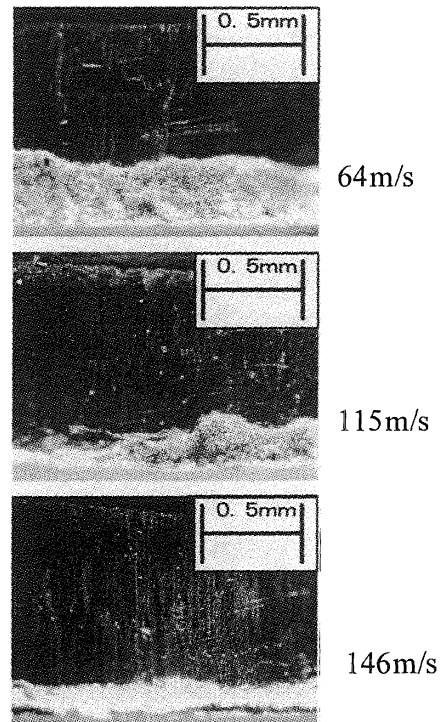


図8 衝突速度と最大せん断力の関係

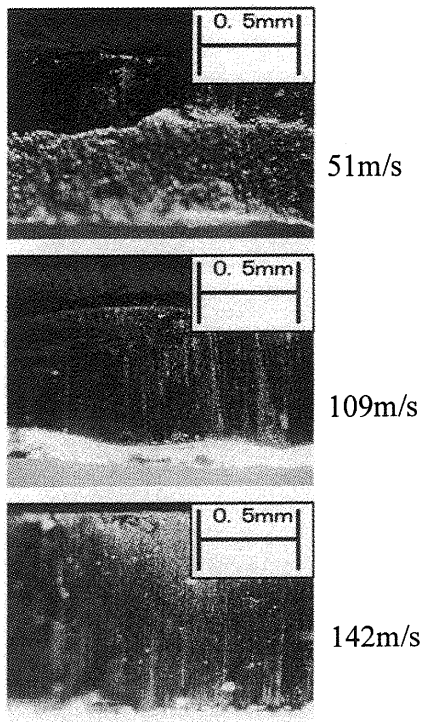
この場合も熱処理の有無に関わらず、衝突速度が約110m/sを越えると最大せん断力の低下がみられる。これはせん断面で断熱的な熱の影響によりせん断力が低下したために起こったものと考えられる。すなわち、高速打抜き加工ではせん断過程が瞬時に終了するため、加工による発熱が穴近傍より遠方に伝わる時間がなく、穴近傍の部分のみが断熱的に高温になることで、穴近傍の材料だけが軟化し、さらに変形が進むことでひずみが集中したものと考えられる。図7に示したビッカース硬さ分布の変化と図8で示したせん断力の低下はどちらもほぼ同じ衝突速度で起こっており、ともに断熱的な熱の影響と考えられる。

4.3 せん断加工面の状態

図9に得られたせん断面の写真を示す。写真より、ポンチの衝突速度が上がると破断面の割合が減少し、せん断面の割合が増加している。さらに、ポンチの衝突速度の増加に伴ってせん断面は平滑できれいになっていくこともわかる。このことから、せん断過程は熱発生による高温状態において行われていることが推定できる。なお、図7と図9の結果はGotohらの実験結果^{4) 5)}と同じ傾向を示している。Gotohらの実験では打抜き速度が10m/sと低速ではあるが、大きな質量を持つポンチを用いたものである。したがって、質量の小さなプロジェクトルを用いても高速で打抜けば同様の結果が得られることが明らかになった。



(a) 熱処理あり



(b) 熱処理なし
図9 セン断加工面

4.4 臨界衝撃速度

これまでに示した結果から、高速打抜き加工の加工特性を明らかにすることはできたが、その加工特性が臨界衝撃速度によるものなのかの確認は現段階ではできていない。すなわち、実験結果からは、せん断面で断熱的な発熱による熱軟化が起こったことが推定できるため、断熱せん断帯の現象が起こっており、臨界衝撃速度の現象が出ていると考えることはできる。しかしながら、断熱せん断帯を顕微鏡観察では認めることができず、現段階では高速打抜き加工の加工特性と臨界衝撃速度との関連についての明白な証拠は得られていない。

今後、実験装置の改良を進め、ポンチの高速化とクリアランスをできるだけ小さくすることでひずみの局所化をはかり、明瞭な断熱せん断帯の観察を行うことが必要であると考えている。

5. まとめ

本研究は、高エネルギー加工法である高速打抜き加工法を難加工材料に適用するための基礎的検討を行うことを目的として、衝撃特有の破壊現象である臨界衝撃速度の概念を高速打抜き加工に適用できるかどうかの検証を試みた。得られた結果を要約すると次のようになる。

1) ある衝突速度以上になると穴の近傍のみに硬い領域が集中した。高速打抜きの場合は加工の影響が穴周辺に限定されることから加工の影響を小さくしたい場合に有効である。

2) ある衝突速度以上のときに、打抜き過程に発生した最大せん断力の低下が起こった。せん断面で断熱的な熱の発生による影響が出ているものと考えられる。

3) 衝突速度が上がるにつれてせん断面全体が平滑できれいになり、せん断面の割合が増加し、破断面の割合が減少することがわかった。このことからせん断過程は高温状態で行われていることが推測される。

4) 高エネルギー加工法の実用化には工具の損傷が大きな問題になっており、そのことが高速度加工法の普及の障害になっている。本研究の結果から、せん断力が低下し、かつせん断面が良好に加工できる速度域が存在することから、このような速度域を有効に利用することで工具損傷を押さえながら、かつ良好の加工が行える可能性のあることがわかった。

5) 現段階では、高速打抜き加工の加工特性を明らかにすることはできたが、それが臨界衝撃速度に対応する現象であるのかは確認できていない。今後、打抜き製品の回収方法も含めて衝撃試験機等の改良を行い、明確な判断をしたいと考えている。

本研究の一部は(財)天田金属加工機械技術振興財団の研究助成により行われたことを記して、謝意を表します。

参考文献

- 1) von Karman T. & Duwez P.: J. Appl. Phys., 21 (1950), 987.
- 2) 谷村眞治・王 虎・森田浩章・海津浩一・山崎勝広・三村耕司: 日本機械学会論文集(A編), 61-586 (1995), 200-204.
- 3) 小林秀敏・Dodd, B.: 塑性と加工, 29-334 (1988), 1152-1158.
- 4) Gotoh, M. & Ohno, M.: Proc. Mech. Behav. Of Mat. - VI, 1, 487-492.
- 5) 後藤 学・山下 実・大野 誠: 塑性と加工, 33-383 (1992), 1374 - 1379.