

高速せん断のパンチプレスへの応用

柳原直人*

キーワード：パンチプレス、バリ、高速せん断、騒音

1. 研究の目的と背景

タレットパンチプレスは板材を極めて短時間に所要の形状とする加工法として幅広く使われ、すでに30年の歴史を持っている。しかし、分離機構は単純なせん断加工であり、切口面の品質においてはあまり改善されていないのが現状である。加工製品の切口面に対する要求としてはバリの問題があり、パンチプレス加工後にバリ取り作業を必要とする場合が少なくない。このことから、パンチプレス製品からバ리를なくすこと、あるいはバ리를減少させる技術の開発が大きく期待されている

バリなしせん断としては、上下抜き法、平押し法、対向ダイス法などがあるが、パンチプレスにバリなしせん断を適用することを考えた場合、上記加工法の適用には抜きかすの処理が大きな課題となる。一方、パンチ速度を毎秒数メートルとする高速せん断を鋼材に適用した場合、切口面近傍の材料の脆化現象により、クラックの早期発生と破断面の平滑化が確認されている。バリについても通常のせん断と比較して小さくなる傾向がある。しかし、高速せん断のバリに関する情報は少なく、各種被加工材における高速せん断製品のバリについては調べられていない。そこで、高速せん断を適用した場合の打抜き品および打抜き穴のバリの大きさについて調べることにした。実験の結果、高速せん断は材料によってバリの発生を大幅に減少させることが示された。

また、高速せん断をパンチプレスへ応用することを目的とし、高速せん断装置を試作し装置の性能と発生騒音について調べ、実用化の可能性と問題点を示した。

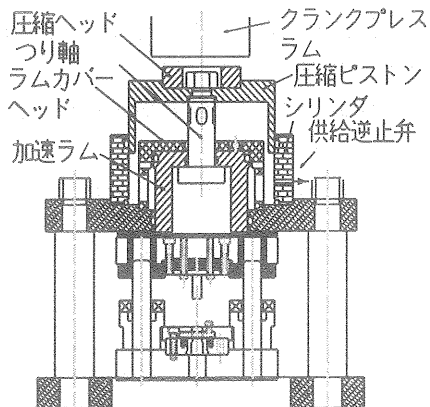


図1 高速せん断装置

2. かえりの測定実験

2. 1 実験方法および条件

高速せん断の実験は図1に示すように、クランクプレスによって駆動する空圧式ラム加速装置を用い、加速装置のラムに打抜き用のダイセットを取り付けて行った。また、比較のためにクランクプレスを用いたせん断を行った。

被加工材の材質と板厚は、ボンデ鋼板 (SECC)、0.8、1.2、1.6mm アルミニウム合金板 (A5052P)、0.8、1.2、1.6mm ステンレス鋼板 (SUS304) は0.8、1.2、1.5mmを用いた。打抜き工具はパンチ直径12.00mmでありこのときのダイスの穴径を12.08mmから12.30mmまで変えてクリアランスを変化させた。各被加工材におけるクリアランスの実験条件を表1に示す。打抜きブランクの形状は図2のように、長さ100mm、幅25mmであり、約10mm間隔で4箇所打抜いた。また、ブランクの拘束条件によってかえりの発生条件が異なることから、板押さえなしの場合と板押さえを付加した場合とについて実験を行った。板押さえは、被加工材の上に板押さえ板を置き、これをねじで上方から押さえ付ける方法で与えた。また、打抜き時におけるパンチの平均速度は、高速打抜きが約2.9m/s、プレス打抜きが0.21m/sである。

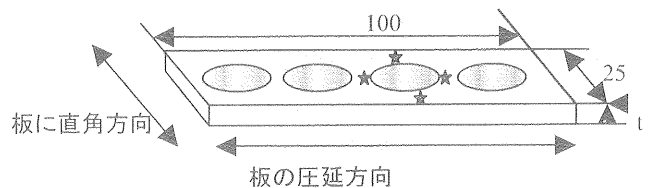


図2 供試材

表1 実験条件表

	板厚0.8mm	板厚1.2mm	板厚1.5mm	板厚1.6mm
ダイス内径12.08mm	5.00%	3.33%	2.70%	2.50%
ダイス内径12.12mm	7.50%	5.00%		
ダイス内径12.18mm	11.25%		6.00%	5.63%
ダイス内径12.20mm		8.33%		
ダイス内径12.30mm			10.00%	9.38%
	ボンデ鋼板	ボンデ鋼板	ステンレス	ボンデ鋼板
	ステンレス	ステンレス		アルミ合金
	アルミ合金	アルミ合金		

2. 2 かえりの測定方法

打抜き品および穴のかえりは、図2に示すように、板に圧延方向とそれに直角方向の星印2ヶ所づつ測定し、かえりの平均値と最大値とを記録した。かえりの計測は CCDカメラで50倍に拡大し、移動載物台の変位で計測した。

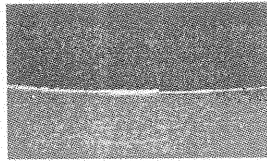
2. 3 かえりの測定結果

図3、図4は、板押さえあり、板押さえなしで、高速せん断におけるボンデ鋼板、板厚0.8mm、クリアランス7.5%、打抜き穴かえり高さ最高値でのかえりの写真で板押さえなしは、大きなかえりが見られ、板押さえありでは、大きなかえりは見られなかった。



(板押さえあり)

図3 かえりの写真



(板押さえなし)

図4 かえりの写真

表2 グラフの表示方法

高速せん断	黒	プレスせん断	白
板押さえあり	実線	板押さえなし	破線
板厚(mm)	0.8◇	1.2□	1.5と1.6△

2. 3. 1 ボンデ鋼板のかえりの高さ

ボンデ鋼板の打抜き穴のかえり高さの平均値と最大値とを図5、図6に示す。プレスせん断では平均値で0.04mmから0.07mm程度、最大値で0.06mmから0.12mmのかえりが発生している。高速せん断では板押さえを加えることにより、クリアランスに関係なく、平均値で0.02mm以下、最高値でも0.03mm程度のかえり高さになっており、板押さえが有効であることが示されている。しかし、板押さえがない場合には、平均値ではかえりが小さくなるが、最大値では0.1mmものかえりが発生している。

打抜き品のかえり高さは、図7、図8に示されているように、プレスでは最大値で0.2mm近いかえりが発生するのに対し、高速せん断では板厚および板押さえの有無に関係なく最大でも0.02mm程度のかえりしか発生していない。このように、ボンデ鋼板に対しては板押さえを付加した高速せん断がクリアランスに関係なくかえりの減少に対して極めて有効であることが示されている。

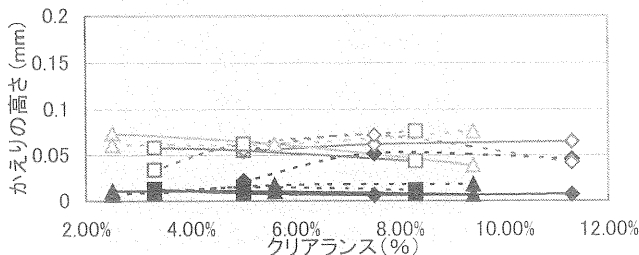


図5: ボンデ鋼板、打抜き穴かえり高さの平均値

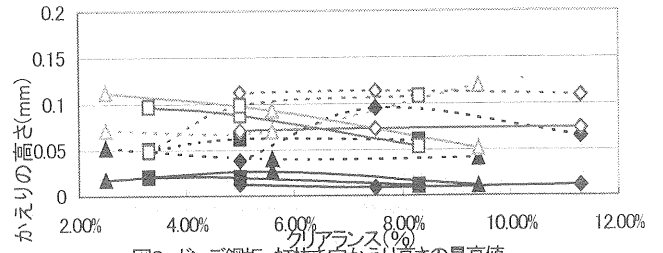


図6: ボンデ鋼板、打抜き穴かえり高さの最高値

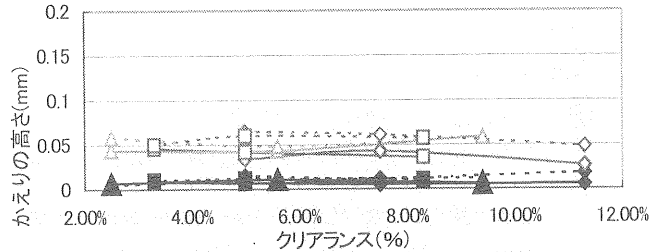


図7: ボンデ鋼板、打抜き品かえり高さの平均値

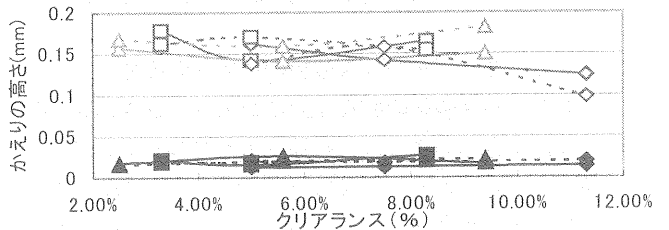


図8: ボンデ鋼板、打抜き品かえり高さの最高値

2. 3. 2 アルミニウム合金板のかえりの高さ

アルミニウム合金板の打抜き穴のかえり高さは、図9、図10に示すように、板押さえを用いた高速せん断の場合、クリアランスに関係なく平均値で0.01mm、最高値でも0.03mm程度であり、極めて小さくなっている。しかし、板押さえなしの場合には高速せん断の効果は少なく、プレスせん断とほぼ同様なかえりが発生しており、最大値では0.2mm近いかえりが測定されている。打抜き品のかえり高さも打抜き穴と同様な結果を示しており、板押さえを加えない場合には高速せん断の効果は少ないが、板押さえを付加した高速せん断ではクリアランスに関係なく、プレスせん断に比べて大幅にかえり高さが減少し、板押さえを付加した高速せん断がアルミニウム合金板においても有効なことが示された。

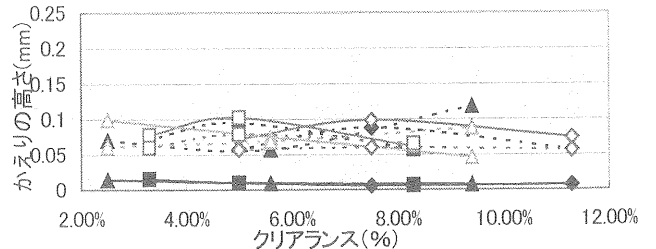


図9: アルミニウム打抜き穴かえり高さの平均値

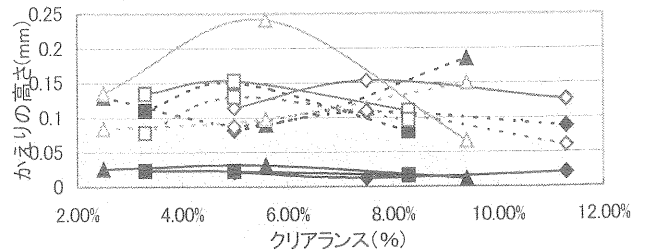


図10: アルミニウム、打抜き穴かえり高さの最高値

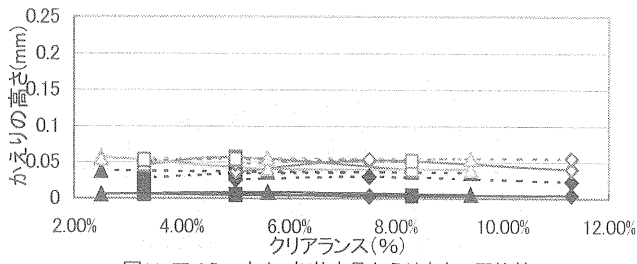


図11: アルミニウム、打抜き品かえり高さの平均値

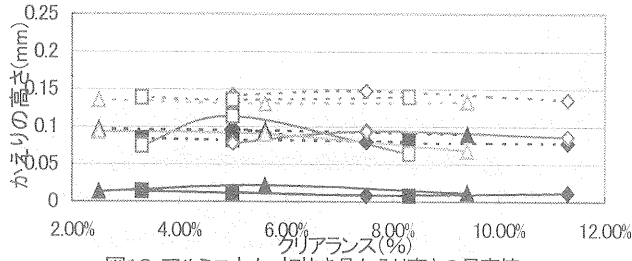


図12: アルミニウム、打抜き品かえり高さの最高値

2. 3. 3 ステンレス鋼板のかえりの高さ

ステンレス鋼板の打抜き穴のかえり高さは、図13、図14に示されるように、板押さえを付加しない場合には、高速、プレスともに平均値で0.1mm、最大値で0.2mmものかえりが発生しており、かえり高さは高速の方が大きめな結果を示している。しかし、板押さえを加えることにより、高速せん断ではクリアランスに関係なく、平均値で0.01mm、最高値で0.02mm程度と、かえりは大幅に減少した。打抜き品のかえり高さは図15、図16に示すように、板押さえがない場合にも高速せん断の効果が少し表れているが、板押さえを付加することにより最大でも0.02mm程度のかえりとなり、高速せん断の効果が大きいことが分かる。

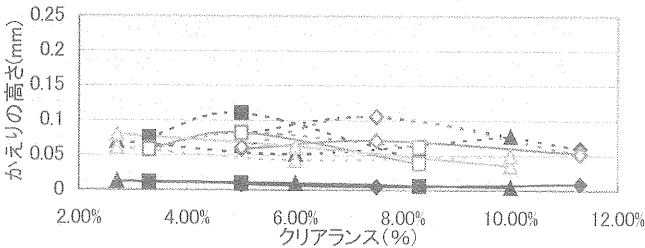


図13: ステンレス、打抜き穴かえり高さの平均値

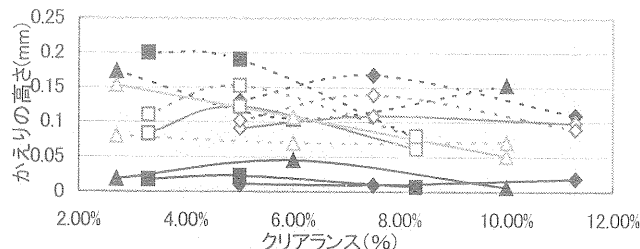


図14: ステンレス、打抜き穴かえり高さの最高値

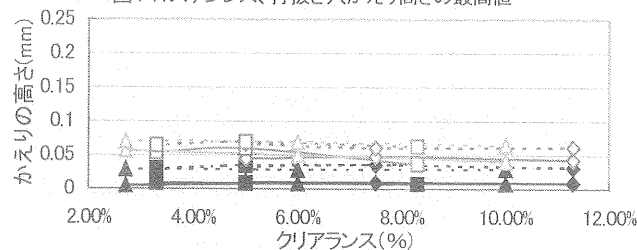


図15: ステンレス、打抜き品かえり高さの平均値

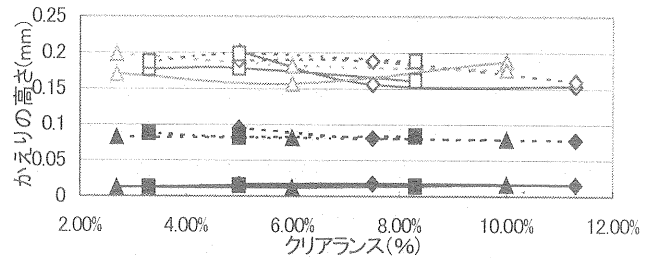


図16: ステンレス、打抜き品かえり高さの最高値

2. 4 実験結果のまとめ

実験の結果、ボンデ鋼板、アルミニウム合金板、ステンレス鋼板では、板押さえを付加した高速せん断において、測定されたかえりの最大値が0.05mm程度であり、かえりの減少効果が極めて大きいことが示された。また、かえりの高さがクリアランスにあまり影響されないことから、パンチおよびダイスの摩耗の影響を受けずらいことも予想される。今回の実験は、汎用のクランクプレスにラム加速装置と打抜き用ダイセットを取り付け、板押さえは手作業によって付加したが、パンチプレスで同一条件の作業を行うためには、ラム加速装置の組み込みのほか、板押さえ力の付加と解除を短時間で繰り返す板押さえ機構の開発が必要となる。

3. 高速せん断のためのパンチプレス

3. 1 高速せん断装置の基本構造

試作した高速せん断装置の外観写真を図17に、構造を図18に示す。この装置は、油圧ポンプによって加圧された油を電磁弁で制御し、油圧ピストンによって空圧式加速装置内の空気を圧縮し、その圧縮空気のエネルギーによって加速したハンマーでパンチを打撃し、被加工材を打抜くものである。空圧式加速装置は、ウレタンリングを介してフレーム上に置かれている。パンチは図19のように、フレーム上に置かれたダイセットの上型に取付けたパンチガイドによってガイドされる。ダイスは、ダイセットの下型によってガイドされた状態で、ダイス下の慣性質量の上端に直接置かれている。慣性質量は図18のように、

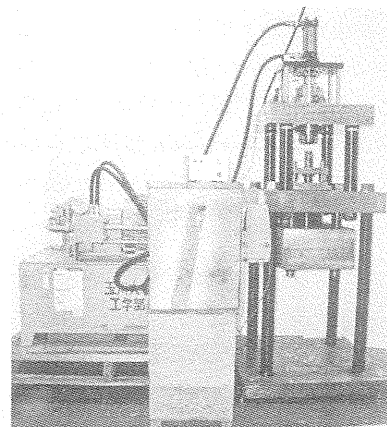


図17 高速せん断装置の外観写真

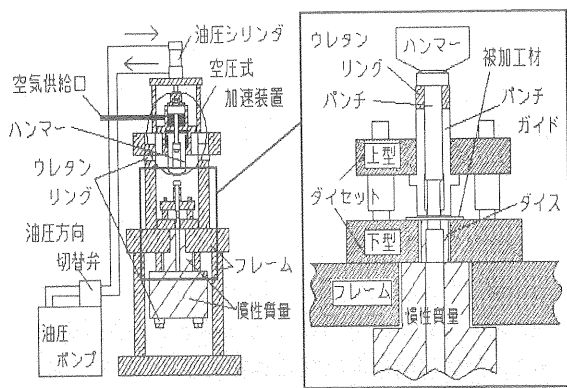


図 18 高速せん断装置の構造

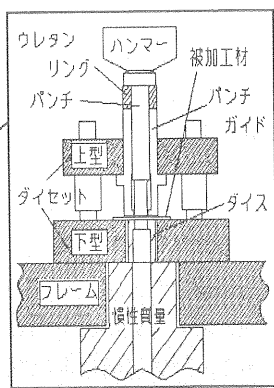
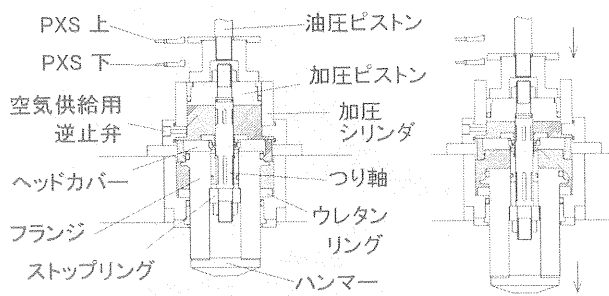


図 19 せん断工具

フレームから吊るされた4本の支柱によってウレタンリングを介して保持されており、フレームに衝撃力が作用しないようになっている。したがってパンチが受けるハンマーの力はパンチ、被加工材、ダイス、慣性質量と伝わるため、ダイセットおよびフレームに衝撃力は加わらない。パンチガイドの上のウレタンリングは、打抜き後のハンマーとパンチの余剰エネルギーを吸収するために置かれている。パンチプレスにおいては、ダイセットの上型と下型をタレットパンチプレスのパンチガイドおよびダイスガイドに相当させ、パンチプレスへの応用が可能になる。

3. 2 空圧式加速装置の構造と作動原理

図 20 に示す空圧式加速装置は、空気の圧縮によりハンマーを加速させる装置であり、油圧ピストンによる加圧ピストンとつり軸の上下運動によって作動する。油圧ピストンを上昇させることにより、ハンマーはつり軸先端のストップリングにより押し上げられ、図 20(a)の状態になる。加圧シリンダ内に圧縮空気を封入した後、油圧ピストンを降下させると、加圧シリンダ内の空気はさらに圧縮される。この時、ハンマーを押し上げていたストップリングも降下するが、ハンマー上面の圧力は大気圧となっているため、ハンマーフランジ部に作用する下側からの圧力によって支えられるため、ハンマーは降下しない。油圧ピストンがさらに降下すると、つり軸の溝を通して圧縮空気がハンマー上面に作用し、力のバランスが崩れてハンマーは降下を始める。ハンマーが数ミリ降下すると圧縮空気がハンマー外周から上面に大量に流れ込み、ハンマーは急加速され、このハンマーでパンチの頭部を打撃してせん断加工を行う。図 20(b)に示すように、加工後にハンマーのフランジ



(a) 初期行程時

(b) 加速行程時

図 20 空圧式加速装置の各部名称

部がウレタンリングにぶつかることによってハンマーの余剰エネルギーを吸収するようにしている。加工後、油圧ピストンを上昇させることにより、初期状態に戻り、連続的な運転が可能な構造となっている。

3. 3 制御方法

ハンマーの制御では図 21 のように、上下動する加圧ピストンの位置を上部と下部の2ヶ所で光電スイッチ PXS 上、PXS 下を用いて検出する。その検出結果を図 22 に示す制御ボックス内の PLC (Programmable Logic Controller) に入力し、ソレノイドバルブ (SV) を制御する。ソレノイドバルブが ON の時には油圧シリンダで加圧ピストンを押し下げ、OFF の時には引き上げる。制御ボックスには、押しボタン式のスタートスイッチ (PB1) とストップスイッチ (PB2)、ハンマーの駆動方式 (単発・連続) を選択できる切替スイッチ (S) が付いており、その状態は2つの発光ダイオードで区別できるようになっている。使用した PLC はキーエンス (株) 製 KZ-10R で、6 入力、4 出力でタイマーを内蔵している。配線図を図 22 に示す。制御に用いたシーケンス回路を図 23 に示す。

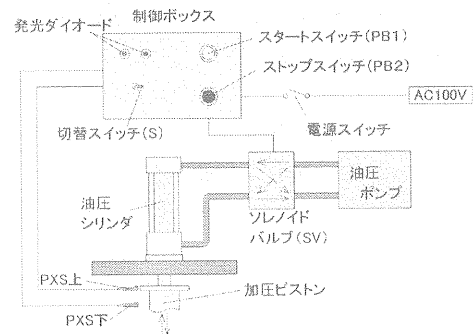


図 21 制御装置の構成

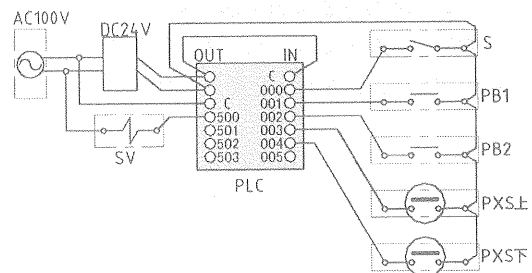


図 22 PLC の配線図

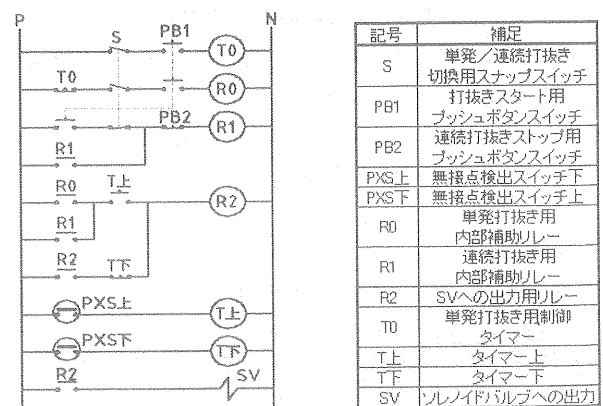


図 23 シーケンス回路

3. 3. 1 連続運転

連続打抜き運転時には高速で上下往復運動をするため、加圧シリンダ内に高圧空気が十分に満たされない場合がある。そのために PLC 内のオンディレイタイマー機能を用い、高圧空気が満たされるまで加圧ピストンを最上点で静止させている。

切替スイッチ S を ON にすると連続運転モードとなる。スタートスイッチ PB1 が ON になるとリレー R1、R2、ソレノイドバルブ SV が ON になり R1、R2 は自己保持し、加圧ピストンが降下を始める。加圧ピストンが最下点に達した時 PXS 下が ON になりオンディレイタイマー T 下が作動し、設定時間後 T 下が ON になり R2、SV が OFF になる。加圧ピストンが上昇して最上点に達すると PXS 上が ON になり T 上のタイマーが作動する。設定時間後 T 上、R2、SV が ON になると加圧ピストンが再び降下する。この動作を繰り返す。ストップスイッチ PB2 が ON になるとリレー R1 が OFF になり自己保持が切れ、再び加圧ピストンが最上点に達した時点で停止する。

3. 3. 2 単発運転

切替スイッチ S を OFF にすると単発運転モードとなる。PB1 が ON になると R0、R2、SV が ON になり加圧ピストンが降下し始め、オンディレイタイマー T0 が作動する。T0 のタイマー設定時間後 ON になるとリレー R0 が OFF になる。加圧ピストンが最下点に達した時 PXS 下が ON になり、オンディレイタイマー T 下が作動する。設定時間後 T 下、R2、SV が OFF になり加圧ピストンが上昇する。最上点に達した時 PXS が ON になるが R0、R2 が OFF になっているため SV は ON にならずに停止する。

3. 4 高速せん断装置の性能

3. 4. 1 空圧式加速装置の理論性能

試作した空圧式加速装置は、ハンマーの質量 m_R 5.8 kg、加速ストローク 25 mm であり、加圧シリンダ容積は、

初期状態の容積 $V_1 = 0.522 \times 10^{-3} \text{ (m}^3\text{)}$

圧縮終了時の容積 $V_2 = 0.361 \times 10^{-3} \text{ (m}^3\text{)}$

膨張終了時の容積 $V_3 = 0.499 \times 10^{-3} \text{ (m}^3\text{)}$

となっている。この装置では空気の圧縮比が小さいので、空気は圧縮と膨張時には断熱変化すると仮定し、断熱指数を $k = 1.4$ とする。装置の初期状態の圧力（絶対圧）を $P_1 = 0.3 \sim 0.6 \text{ (MPa)}$ とした時の、圧縮および膨張終了時の加圧シリンダ内圧力 P_2 、 P_3 、ハンマーに与えるエネルギー L_R と、加工時ハンマー初速度 v_0 を (1) ~ (4) 式より求めた計算結果を表 3 に示している。

$$P_2 = P_1 (V_1 / V_2)^k \quad (\text{MPa}) \quad \dots (1)$$

$$P_3 = P_2 (V_2 / V_3)^k \quad (\text{MPa}) \quad \dots (2)$$

$$L_R = \frac{(P_2 V_2)}{k-1} \left\{ 1 - \left[\frac{V_2}{V_3} \right]^{k-1} \right\} - P_0 (V_2 - V_3) \text{ (J)} \quad \dots (3)$$

$$v_0 = \sqrt{2 L_R / m_R} \quad (\text{m/s}) \quad \dots (4)$$

3. 4. 2 空圧式加速装置の性能試験

ハンマーの下にレーザー変位計を置き、出力された電圧をオシロスコープに入力し横軸に時間、縦軸に電圧の波形を描き出す。このデータから時間と変位のグラフに変換した。加圧シリンダへの封入圧力 0.5 (MPa) の時の結果例を図 24 に示す。オンディレイタイマーの設定時間 T 上 = 0.27 (sec)、T 下 = 0.00 (sec)、ピストンによりシリンダ内の空気を圧縮する時間が約 0.11 (sec)、ハンマーが降下し始めてから最下点に達する時間が約 0.01 (sec)、再び初期状態に戻る時間が約 0.06 (sec) であり、1 回の往復に要する時間は約 0.45 (sec) であった。この装置ではハンマーが上昇した後、ハンマー上面の空気を放出し圧力を減少させる必要がある。そのためハンマー上昇後 0.27 秒後に加圧シリンダを降下させているが、空気の流路を拡大する等の改良によりこの時間を 0.2 秒短縮すれば、1 サイクル 0.25 秒の駆動も可能と思われる。

加圧シリンダへの各封入圧力 (0.2 ~ 0.5 MPa) において記録された変位-時間線図を図 25 に示す。この線図の傾きより加工時ハンマー初速度 v_0 、および速度から計算されたハンマーの速度エネルギー L_s 、またエネルギー損失を求めた。結果を表 3 に示す。エネルギー損失としては約 2 割から 3 割となった。損失原因としては、ハンマーが加速される際、ハンマー上部がラムヘッドカバーから完全に離れるまでは、ハンマー上面に圧縮空気が十分に流れ込まないためと、加速装置内可動部における摩擦による影響がある。

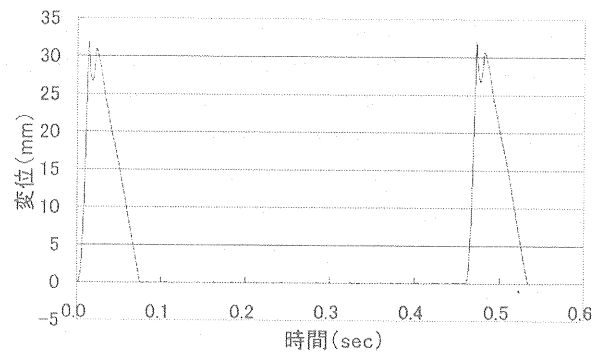


図 24 変位-時間線図 封入圧力：0.5 (MPa)

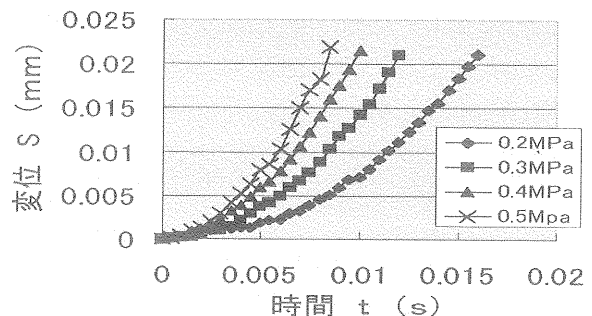


図 25 変位-時間線図

表3 加圧シリンダ封入圧力とハンマー速度およびエネルギーの関係

P ₁ (MPa)	P ₂ (MPa)	P ₃ (MPa)	L _R (J)		v ₀ (m/s)		エネルギー効率 (%)
理論値 (絶対圧)			理論値	実験値	理論値	実験値	
0.30	0.50	0.32	41.3	21.5	3.77	2.72	51.9
0.40	0.67	0.43	59.7	38.4	4.54	3.64	64.4
0.50	0.84	0.53	78.0	53.1	5.19	4.28	68.1
0.60	1.01	0.64	96.4	74.0	5.77	5.05	76.7

3. 4. 3 高速せん断装置の加工能力

この装置では、ハンマーの速度エネルギーにより被加工材を打抜くため、あらかじめ打抜きに要するせん断エネルギーおよび慣性質量の変位を概算する必要がある。

(1) 打抜きに要するせん断エネルギーの概算方法

せん断エネルギーは縦軸をせん断荷重、横軸をパンチストロークとするせん断線図の面積から求めることができる。今回実験で使用するパンチは直径 $D=15\text{mm}$ (輪郭長 $l = \pi \cdot D$)、また被加工材は板厚 $T=2\text{mm}$ のSPCC材 (せん断抵抗 $\tau=370\text{MPa}$) とする。この条件より最大せん断荷重は $P_{\max} = T \cdot l \cdot \tau = 3.49 \times 10^4$ (N) となる。また高速せん断ではクラックの発生が早まるため、最大荷重が板厚の半分まで作用することにより打抜けると仮定するとパンチストローク量 $s=0.5T=0.5 \times 2$ (mm) となる。これにより打抜きに要するせん断エネルギーは $L_s = P_{\max} \cdot s = 34.9$ (J) となり、表1より初期圧力 0.3MPa でせん断可能となることが分かる。

(2) 打抜き時における慣性質量の変位量

この高速せん断装置は、ダイスを支持している慣性質量がフレームに固定されていないため、打抜き中にダイスが変位する。そこで前述した条件におけるハンマーと慣性質量の変位量を計算によって求めた。打抜き開始後のハンマー、および慣性質量の変位量をそれぞれ S_R 、 S_K とする。まず最大せん断荷重 P_{\max} 、がせん断に必要なストローク S の範囲で一定であると仮定し、ハンマー質量 $m_R=5.8$ (kg)、慣性質量 $m_K=170$ (kg) より、ハンマーおよび慣性質量の加速度 a_R 、 a_K および、せん断の所要時間 t とした時の両者の変位量の式は(5)~(8)となる。

$$a_R = P_{\max} / m_R = 6020 \text{ (m/s}^2\text{)} \quad \dots (5)$$

$$a_K = P_{\max} / m_K = 205 \text{ (m/s}^2\text{)} \quad \dots (6)$$

$$S_R = v_0 t - (a_R \cdot t^2) / 2 \quad \dots (7)$$

$$S_K = (a_K \cdot t^2) / 2 \quad \dots (8)$$

せん断に必要なストロークは、 $S_R - S_K = 0.001\text{m}$ となり、式(5)~(8)を解くと次式が得られる。

$$(a_R + a_K) \cdot t^2 / 2 - v_0 \cdot t + 0.001 = 0 \quad \dots (9)$$

この式に数値を代入し、この式を満たす t の値を求めると $t = 0.23$ (ms)

となり予想される慣性質量 m_K のせん断による変位量 S_K は式(8)より

$$S_K = 0.011 \text{ (mm)}$$

となり慣性質量はほとんど動かず、打抜き可能なことが分かる。

3. 5 高速せん断装置によるせん断製品

パンチ直径 15mm 、(クリアランス 5%) の円形打抜き工具で、板厚 2mm のSPCC材を用い打抜き試験を行った時の打抜き品におけるかえりの高さ (各4ヶ所)

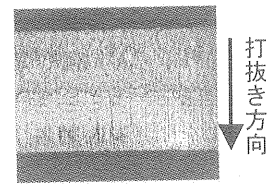


図26 切り口面の写真

を、図26のようにCCDカメラで拡大し測定した。その結果、平均値は 0.018mm で最高値は 0.027mm となった。これを昨年度の '高速せん断によるかえりの減少効果' の研究に示されたかえりの高さの値と比較してみると、ほぼ同値、あるいはそれ以下の結果が得られた。

3. 6 騒音の測定結果

今回試作した装置と従来のクランクプレスで 1m と 3m 離れて打抜き試験を行い、積分形騒音計を用い出力された音圧レベルをデータ収集システムに入力すると横軸に時間、縦軸に電圧の波形を描き出し、このデータからパンチプレスから外部に放出される総合的な音圧レベルを測定する。図27に音圧レベルの比較を示す。この結果、 1m 、 3m でも打抜き時 (ピーク時) の音圧はほぼ同値であったが、平常時の音圧に戻るまでの時間は試作した装置の方が約 0.3 秒早かった。これは試作した装置のせん断工具がフレームではなく慣性質量に置かれているため、フレームに響く音が少なくなった分だと思われる。

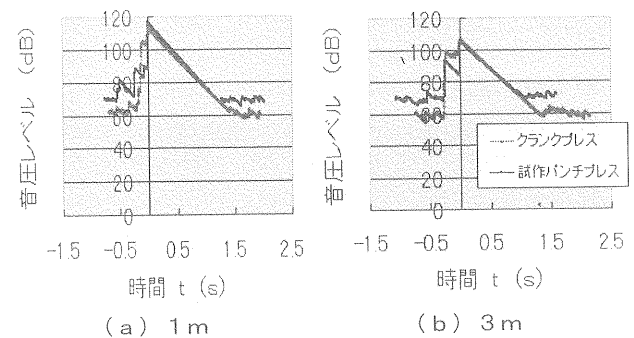


図27 音圧レベル-時間線図

3. 7 試作した高速せん断装置のまとめ

性能試験の結果、ほぼ期待どおりのパンチプレス用高速せん断装置が試作できた。発生騒音を減少させることは出来なかったが、せん断工具周辺をフレームで覆うことにより、さらに騒音減少効果が期待できる。

参考文献

- 1) 柳原、斉藤、中川：汎用プレス用空圧式加速装置と棒材高速せん断への応用、塑性と加工、22/242,1981-3、p.245-249
- 2) 柳原：高速ラムプレスの開発、平成2年度塑性加工春季講演会、1990-5、p.605-608
- 3) 柳原：油圧駆動ニューマチック高速棒材せん断装置の開発、平成6年度塑性加工春季講演会、1994-5、p.71-74