

Fig. 1 Schematic illustration of experimental apparatus

2 方法

2.1 実験装置

Fig. 1 に実験装置を示す。図に示すように穴を設けたダイス上に、試料である銅板を乗せ、銅板の板面から所要の距離を隔てて爆薬をセットする。ダイスの材質はJIS SKD11のダイス鋼である。爆薬は密度 1200kg/m^3 、爆速 7000m/s の可塑性爆薬(SEP)で、全実験を通して薬量は 3g と一定にした。起爆には旭化成工業(株)製の6号電気雷管を使用した。穴の縁はエッジに仕上げられており、毎回の実験においてダイス上面を研削しなおしている。全体の装置を水槽の中に沈め、雷管で起爆すると水中衝撃波が発生し、試料の板面に作用し始める。この衝撃圧の作用によって穴部の板は下方に押し出され、穴の縁に沿ってせん断加工がなされる。水槽は縦 1.5m 、横 0.7m 、高さ 0.6m の内容積を持っており、実験においては 0.5m の深さとなるように水を入れている。

2.2 試料

試料の1つは 0.5mm の銅板2枚で 0.3mm の銅板を挟んだ状態に重ねてそれをアンビルと駆動板(飛翔板)の間に置き、その上に板状に成形した爆薬を置いて一端から爆発させることによって爆着したものである。使用した爆薬は密度 530kg/m^3 、爆轟速度約 2300m/s のPAVEX(旭化成工業(株)製)でこれを 260g を使用した。アンビルおよび駆動板の材質は軟鋼であり、それらの寸法(幅×奥行き×厚さ)はそれぞれ $100\times 320\times 20$ 、 $80\times 230\times 3\text{mm}$ である。素材の銅板はJIS規格C1100P材である。この多層爆着したものと、さらにその板を焼鈍(400°C に10分間塩浴した後水中急冷)し

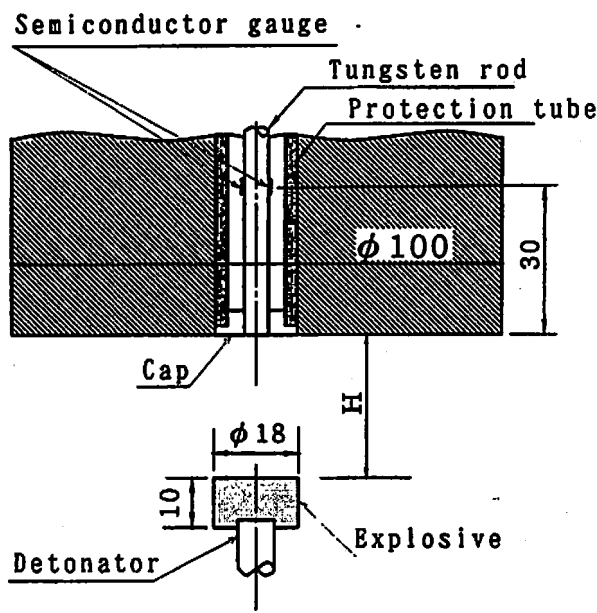


Fig. 2 Assembly for measurements of underwater shock-pressure

たものを試料として用いている。板の上下面は研削して 1mm の板厚に仕上げている。以下においては前者を爆着材(B材)、後者を焼鈍材(S材)と呼ぶことにする。2つの材料の応力ひずみ特性を引張試験によって実測したところ、爆着材は典型的な弾完全塑性材料であり、焼鈍材は典型的な加工硬化材であった。使用した引張試験機は島津製作所(株)製オートグラフ(容量 10t)である。計算に用いるための爆着材および焼鈍材の構成式としては、引張試験の実測値を元にして崎野ら⁶⁾や谷村⁷⁾の鈍銅についての構成式を参照し、次のように与えた。

$$\sigma_p = 330.275 - .753/(\epsilon_p + 0.03) + 2.9 \times 10^{-3} \dot{\epsilon}_p + 3.29 \log(\dot{\epsilon}_p / 5.0 \times 10^{-4}) \quad (\text{MPa}) \quad (1)$$

$$\sigma_p = 430 \epsilon_p^{0.445} + 20 + 2.9 \times 10^{-3} \dot{\epsilon}_p + 3.29 \log(\dot{\epsilon}_p / 5.0 \times 10^{-4}) \quad (\text{MPa}) \quad (2)$$

ここで、 σ_p は相当応力、 ϵ_p は塑性ひずみ、 $\dot{\epsilon}_p$ は相当ひずみ速度である。

2.3 衝撃圧波形

Fig. 2に示すようにダイスと爆薬の上下の位置関係が穴あけ実験の場合とは逆になった装置を製作し、ダイス面における衝撃圧波形を測定した。圧力ピックアップは直径 5mm 、長さ 300mm のタングステン棒((株)ニラコ社製商品番号W-462594)の側面に半導体ひずみゲージ(共和電業(株)製KSP-1-350-E4)を貼ったもので、これを端面にキャップの付いた外径 17.3mm の軟鋼製保護管に入れ、キャップの端面とタングステン棒の受圧面が同じ高さになるようにしてシール

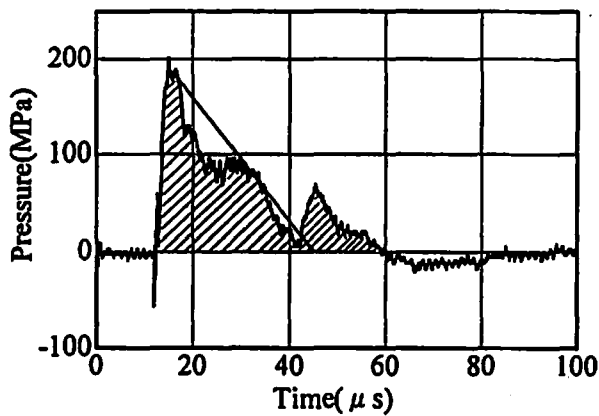


Fig. 3 Shock-pressure history measured using strain gauge attached with tungsten rod (Charge weight; 3g, Distance between explosive and end-surface of tungsten rod; $H=60$ mm)

し、この保護管を穴あけ実験と同形のダイスに挿入した状態で所要の位置に固定した。この場合ピックアップの受圧面とダイス面が同じ高さになるようにセットする。棒端面が下方からの爆薬による衝撃圧を受けると棒内にひずみ波が伝播するので、そのひずみ波を測定して圧力波形と見なした。なお、伊東らの研究においてもこれと同様な圧力ピックアップを用いて水中衝撃波の圧力を計測している³⁾。Fig. 3は薬量3g、爆薬から受圧面までの距離 H が60mmの場合の圧力波形である。これより圧力波形を概略的に三角パルスと見なし、この波形の力積(斜線部の面積)と三角パルスの面積が等しくなるようにパルスの継続時間(作用時間)を求めると約35 μ sになる。しかし、この波形は静止した棒が受ける圧力である。板は圧力を受け始めると変位し始める⁸⁾。したがって、板の受ける圧力は初期においては同じピーク圧であるが、その後はFig. 3の波形より下回ると予想される。ちなみに、変形抵抗の全く無い1mm板厚の銅板の場合について、文献⁸⁾によって計算すると、継続時間は約12 μ s(概略三角パルスと見なせる)となる。板は変形抵抗を有しているので、この値よりは長く、前述の35 μ sよりは短い継続時間になると考えられる。ところで、周辺を固定された円板が一様な衝撃圧を受けて変形する時、板の変形傾斜角は板の変位速度 V_p と塑性曲げ波の伝ば速度 $\sqrt{\sigma_y/\rho}$ (σ_y : 板の降伏応力、 ρ : 板の密度)の比によって決まることが求められており⁹⁾、筆者らは板厚効果つまり材料の曲げ剛性を考慮した場合にも変形傾斜角が V_p と $\sqrt{\sigma_y/\rho}$ の比で決まると明らかにしている¹⁰⁾(ただし、曲げ剛性によって中央部は丸みを帯びている)。板の変位速度は板が受ける衝撃圧の力積によって与えられる運動量によって決まるものである。

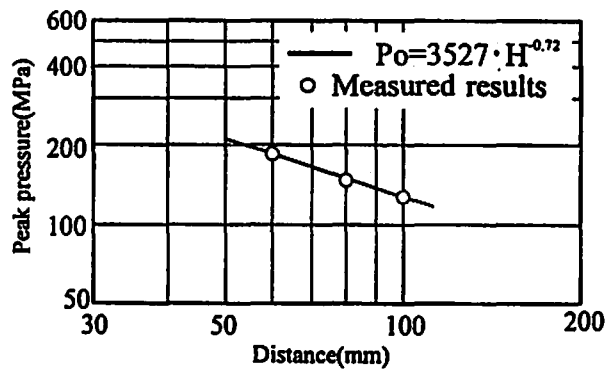


Fig. 4 Change in peak pressure P_o with distance H from lower surface of explosive

つまり、衝撃圧によって変形する場合の板の変形形状は概略的に板が受ける圧力の力積によって決まると考えて良い。一方、板がせん断されていく過程では圧力の値が問題になると推察される。そこでピーク圧としては実験値を用い、板の受ける圧力は三角パルスとして板の変形形状から作用時間を与えることにした。測定した圧力波形の高周波ノイズと考えられる部分についてはその付近の平均値を実験値とし、この実験値の最大値をピーク値とした。爆着材の場合、弾完全塑性体で降伏応力はほぼ一定であり、条件が単純化されるので、この場合を対象にして実験結果との対比から三角パルスを仮定した衝撃圧の継続時間(作用時間) T を求める。そこで、爆薬高さ $H=75$ mmの場合の爆着材の最終変形形状について2.4に述べる方法によって求めた計算結果と実験結果が一致するようにして求めたところ、衝撃圧の継続時間 T は18.4 μ sとなった。使用爆薬の形状と薬量を全実験を通して一定にしているので、圧力の継続時間は H が変化しても変わらないと考えた。実際 H が異なる場合について継続時間を18.4 μ sと固定して行った変形形状の計算結果と実験結果を爆着材、焼鈍材共に比較してみたが、良好な一致が見られたので、継続時間は全ての場合について18.4 μ sと固定した。したがって薬量3gの爆薬(SEP)を用いて1mm厚の銅板に穴をあける場合の三角パルスの継続時間 T は常にこの18.4 μ sの値を採用し、ピーク圧の大きさ P_o は試料から爆薬表面までの距離 H の関数として表した実験式から求めた。Fig. 4の○印は実験によって得られた距離 H とピーク圧 P_o の関係である。この実験結果からピーク圧力値 P_o (MPa)を H (mm)の指数関数と仮定し、最小自乗法によって両者の関係を求めたところ、式(3)のような実験式が得られた。

$$P_o = 3527 \cdot H^{-0.72} \quad (\text{MPa}) \quad (3)$$

2.4 解析方法

打ち抜き加工における変形過程を求めるために数値解析を行った。板の半径方向、板厚方向および円周方向を、それぞれ r, z および θ とするような円筒座標系 (r, z, θ) を考える。 r, z 方向の速度を u, v とすると軸対称状態における rz 面内の運動方程式は次のように表される。

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} \quad (4)$$

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}}{r} \quad (5)$$

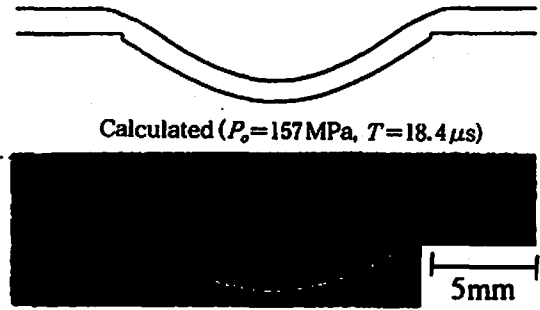
ここで、 σ は垂直応力、 τ はせん断応力、 ρ は密度である。

材料は弾完全塑性体とし、構成式は2.2で述べた式を用いた。塑性領域の条件はミーゼスの降伏条件を、塑性流動はプラントル・ロイスの式を適用した。材料はある程度変形が進行した後破壊するが、破壊条件として宅田らが¹¹⁾大矢根の条件式¹²⁾から導いた式(6)¹²⁾を用いた。

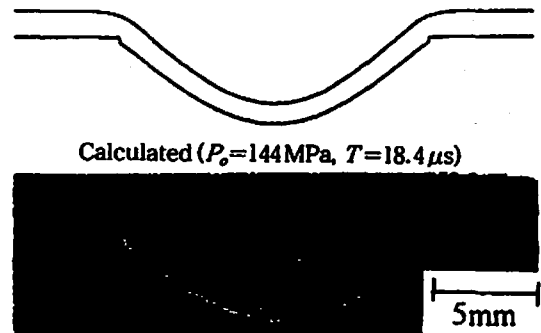
$$I = \frac{1}{b} \int_0^{\bar{\epsilon}} \left(\frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} + a \right) d\bar{\epsilon} \quad (6)$$

ここで、 σ_m は平均応力、 $\bar{\sigma}$ は相当応力、 $\bar{\epsilon}$ は相当ひずみ、 a および b は材料定数である。

この式において、 I が1以下では破壊しないが、 I が1に達すると破壊する。この式における a と b の値は材料の定数値であるが、筆者らが行った動的な平面ひずみ引張試験と等2軸引張試験の結果から爆着材の場合 $a=0.46$, $b=0.48$ 、焼鈍材の場合 $a=0.55$, $b=0.57$ と決定した。初期条件としては衝撃波が試料の表面に到達した時点を時間 t (μs) の原点とし、式(7)で表される三角パルス状の衝撃圧 P が一様に作用すると仮定した。試料の受ける衝撃圧到達時刻は実際には爆薬直下から離れるに従って差が大きくなると思われるが、爆薬の形状がFig. 1で示したように直径18mmの円板状であり、ダイスの穴径は15mmであることから、穴あけ作用に影響を及ぼすと思われる穴周辺の範囲内は殆ど同時刻に到達すると仮定しても良いと考えた。この範囲より遠ざかるころでは多少は異なっても穴あけ作用には殆ど影響が無いと考えられるので結局、衝撃圧 P は試料全体に一様に作用しながら三角パルス状に時間的な変化をすると仮定した。 T は衝撃圧継続時間(18.4 μs)、 T_1 はFig. 3を参考にして T の25分の1とした。



Experimental ($H=75\text{mm}$ [157 MPa])
(a) Explosively welded material ($H=75\text{mm}$)



Experimental ($H=85\text{mm}$ [144 MPa])
(b) Annealed material ($H=85\text{mm}$)

Fig. 5 Comparison of calculated and experimental results under weak pressure

$$\left. \begin{aligned} P &= P_0 \cdot t / T_1 & (t \leq T_1) \\ P &= P_0 \cdot (1 - (T_1 - t) / (T_1 - T)) & (T_1 < t \leq T) \\ P &= 0 & (t > T) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

運動方程式(4)、(5)をラグランジュ座標系で表して差分近似式を求め、それを計算機で計算して新しい座標を求めた。この数値計算は文献13)~14)を参考にして新たに作成したFORTRANプログラムで行った。要素の寸法は r 方向には半径15mmまでは等間隔で0.05mm(300刻み)、そこから端(半径30mm)までは不等間隔で漸次拡げて行くようにして刻み数100とした。 z 方向には0.05mmの等間隔で20刻みとし、解の安定性の条件(CFL条件)を満足するように時間刻み Δt を2nsとした。計算にはトランスペイクタを搭載したパーソナルコンピュータ(NEC製PC9801-BX)を用いた。1回の計算に必要な時間は約4時間であった。

3. 結果と考察

3.1 破断を生じない程度の衝撃圧を受けた場合の変形形状

Fig. 5は、爆着材と焼鈍材についてそれぞれ破断を生じない程度の衝撃圧157 MPa ($H=75\text{mm}$)、144 MPa ($H=85\text{mm}$)を作用させた場合の数値解析による最終変形形状を実験結果と比較している。2.3で述べ

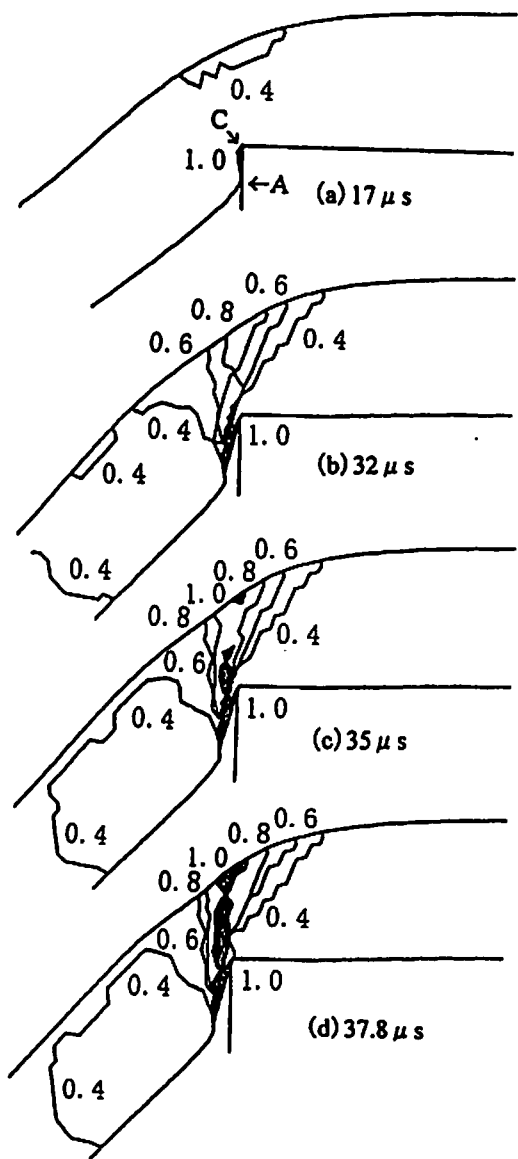


Fig. 6 Shearing deformation process and distribution of I -value with time. Black area denotes fractured region where I -value = 1 in equation (6) ($d=15$ mm, $h=1$ mm, $P_0=197$ MPa and $T=18.4$ μ s)

たように爆着材のある1つについて、変形状の実験結果と一致するように圧力作用時間を決めた後は、どの実験においてもこの作用時間を使用している。しかし、せん断長さ (Fig. 6 (a) の AC) など全体としての変形状も概ね一致しており、このことから衝撃圧の見積りの妥当性、そして解析結果の妥当性を確認することができる。

3.2 破断を含むせん断過程の説明

Fig. 6 は破断を含むせん断過程を解析した結果を示している。過程の初期においては、板がダイスの穴部に押し出されるが、破壊は生じない。 $t=17$ μ s においてダイスエッジ近傍に $I=1$ の領域が生じる。しか

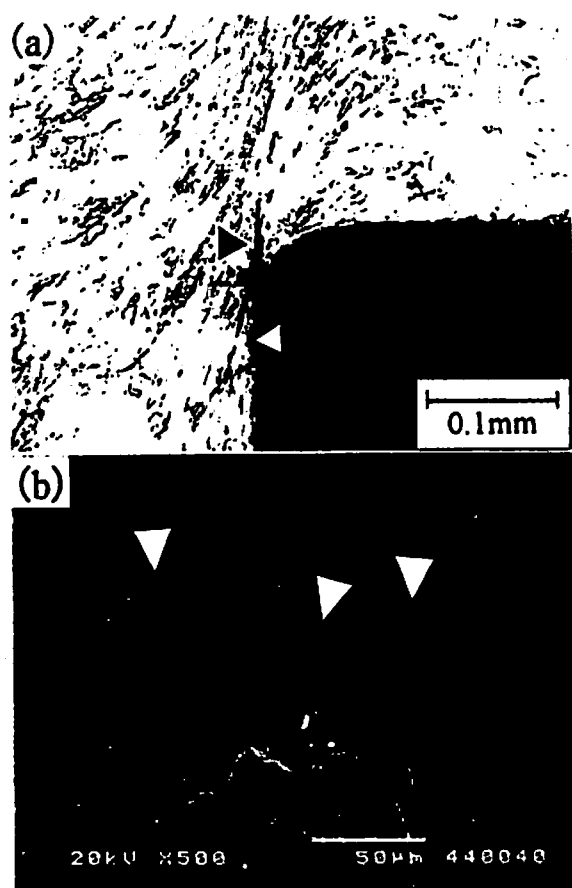


Fig. 7 Microstructure of sheared material around die-edge (a) (\blacktriangle shows crack generated and \triangle shows cut-off of fibrous structure) and SEM of cut-off surface (b) (\triangle shows coalescence of microscopic voids) under shock-pressure ($H=80$ mm) where die-diameter; $d=15$ mm, plate-thickness; $h=1$ mm and duration of pressure; $T=18.4$ μ s

し、 $t=32$ μ s までは内部へはまだ $I=1$ の領域は生じない。この段階ではエッジにより、表面で繊維が断ち切られるようにしてせん断過程が進行すると判断される。 $t=32$ μ s では $I=1$ の領域が、エッジ近傍から上方へ向かって進行し始める。Fig. 7 (a) は、破断を生じるに至らなかったエッジ近傍の断面拡大写真である。繊維が断ち切られたような表面の破壊 (\triangle 印の部分) とエッジ近傍の僅かなクラックが見られる (\blacktriangle 印の部分)。ここでは示していないが、この写真の試料の上表面を顕微鏡で観察したところ、まだクラックの発生は見られなかった。これらの事実は計算過程を実験的に立証している。 $t=35$ μ s になると上表面からも $I=1$ の領域が発生する。そして、殆ど時間を置かないで断面を横切って $I=1$ の領域が広がり、 $t=37.8$ μ s で全体が破断する。Fig. 7 (b) は破断部の SEM 写真である。引張作用で発生したポイドが連結して破断した状

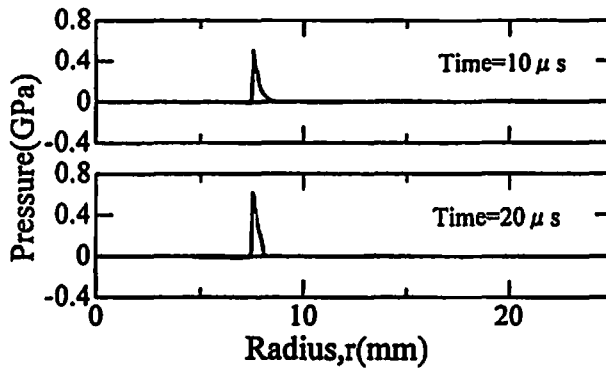


Fig. 8 Pressure distribution with radius from center position of die-hole, r ($d=15$ mm, $h=1$ mm, $P_0=197$ MPa and $T=18.4$ μ s)

況が観察される。大矢根の破壊条件式はボイドの成長を塑性力学的に扱うことにより導かれたものである¹¹⁾。したがって、この写真は本研究の解析に対して破壊条件式(6)を適用することの妥当性を示唆している。

3.3 セン断力およびせん断長さの時間的变化

Fig. 8は計算で得られたせん断過程中のダイス面の受ける圧力分布である。図から判るようにダイスエッジのごく近傍に圧力は集中している。その集中によってせん断作用がなされ、この圧力の積分値をせん断力と考えた。Fig. 9(a)はそのようにして求めたせん断力が時間経過と共にどのように変化するかを示している。また、同図(b)はせん断長さの時間的变化を示している。せん断長さとはFig. 6中のACの長さである。C点はダイスエッジによって変位を阻止されており、これと隣接するA点は衝撃圧によって穴部内に押し込まれるために、せん断作用を生じ、Fig. 6のように板の下面部は段がついたような変形をする。この段の高さは時間と共に増大するが、これはせん断作用によってもたらされるものであるのでせん断長さとして定義した。Fig. 9によって現象を考察すると次の通りである。せん断力は初期から4 μ sの範囲では次第に増加し、それ以降17 μ sまでは僅かの増減はあるものの殆ど一定に保たれる。一方せん断長さの増大はせん断力の増大より僅かに時間が遅れて開始し、当初からほぼ一定速度で増大する。10 μ sを過ぎる頃から若干減速するが17 μ s近傍から急に速度が増加している。衝撃圧は当初のピーク圧の後急速に小さくなっているにも拘らず、せん断力は殆ど一定に保たれており、このせん断力が材料の変形抵抗にのみ大きく依存していることを示唆している。17 μ sの近傍でせん断長さの増加速度が急に上昇するのと呼応してせん断力も急に増加する。Fig. 6を見ると、この頃 $l=1$ の領域がエッジのごく近傍に発生し、繊維破断が開始したことを示し

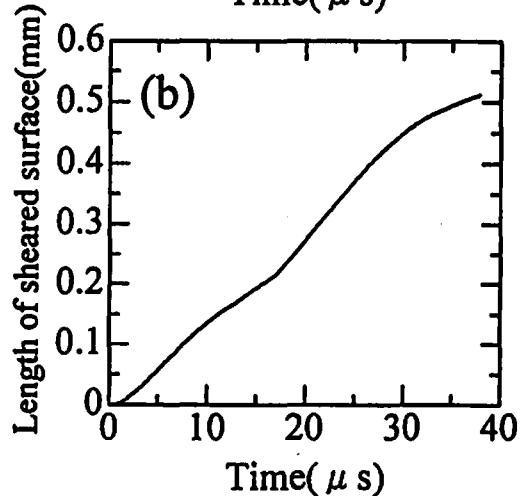
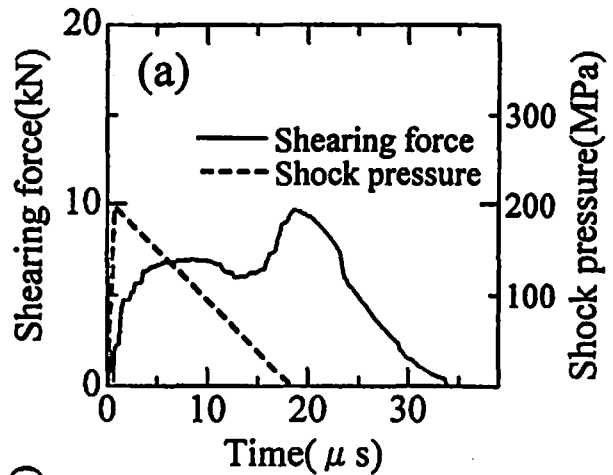


Fig. 9 Change in shearing force(a) and length of sheared surface(b) with time ($d=15$ mm, $h=1$ mm, $P_0=197$ MPa and $T=18.4$ μ s)

ている。この繊維破断によってA点の降下速度つまりせん断長さの増加速度が早くなり、それによってひずみ速度が増大するために変形抵抗が増加し、せん断力が高くなったと思われる。その後せん断力は低下しながら破断に至る。

3.4 穴あけ過程における単位面積当りの塑性仕事と運動エネルギーの変遷

ここで説明のために諸仕事を定義しておく。

$$\text{単位体積当り塑性仕事} : \int_0^{\bar{\epsilon}_p} \bar{\sigma} d\bar{\epsilon}_p \quad (8)$$

$$\text{単位面積当り塑性仕事} : U_p = \int_0^h \int_0^{\bar{\epsilon}_p} \bar{\sigma} d\bar{\epsilon}_p dz \quad (9)$$

$$\text{単位体積当り運動エネルギー} : \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (10)$$

$$\text{単位面積当り運動エネルギー} : U_k = \int_0^h \frac{1}{2} \rho v^2 dz \quad (11)$$

ここで、 $\bar{\sigma}$ は相当応力、 $\bar{\epsilon}_p$ は塑性ひずみ、 h は板厚

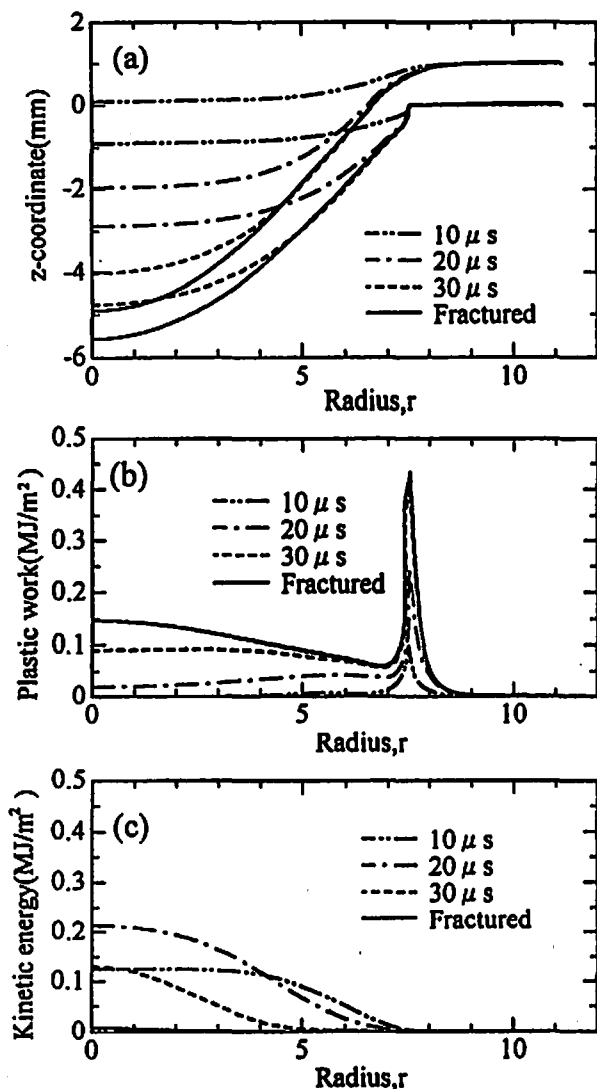


Fig. 10 Calculated deformed shape(a), distribution of plastic work(b) and kinetic energy(c), with radius, r ($d=15$ mm, $h=1$ mm, $P_0=197$ MPa and $T=18.4$ μ s)

である。板の要素の各半径位置における $\bar{\sigma}$ および $\bar{\epsilon}_p$ は数値解析の過程で求めることができる。

Fig.10(a)および(b)はそれぞれ4つの時刻における変形形状および単位面積当り塑性仕事 U_p の半径方向分布を示している。また同図(c)は対応する4つの時刻における単位面積当りの板の運動エネルギー U_k の半径方向分布を示している。簡単のため以下この節では単位面積当りの塑性仕事と運動エネルギーについては単位面積当りを省略して呼ぶことにする。同図(a)から判るようにダイス刃先の板への食い込み、つまり、ダイスエッジ近傍でのせん断作用は既に 10μ s の段階で見られ、 20μ s, 30μ s と進行するにつれて増大しているのに対してダイス穴部に生じる板のバルジ変形は塑性曲げ波がエッジ部から中央へ向かって移動すると共に進行する。したがって 20μ s までは殆ど平坦

なまゝ変位している。そしてその時刻までは衝撃圧によって加速されるために運動エネルギーは増大する。

塑性仕事は半径位置 7.5 mm (エッジの半径の位置) のところに大きなピークを持つ領域 (半径位置 7 mm ~ 9 mm) があり、半径位置 7 mm 以内の領域のなだらかな分布と対照的である。この大きなピークをエッジ半径位置に持つ領域はせん断作用による仕事であり、以下においてはこれをせん断仕事と呼ぶ。せん断仕事は 10μ s の時刻でも生じており、 20μ s, 30μ s と時間経過と共に増大している。これに対して半径 7 mm 以内の領域 (バルジ変形による塑性仕事の領域) では、塑性仕事の増大は外周部に生じ、塑性曲げ波の進行と共に中央部の塑性仕事も増大して行く。 20μ s の時刻と 30μ s の時刻における運動エネルギーおよび塑性仕事の分布を比較すると、運動エネルギーは全体にほぼ等しく減少しており、その結果 30μ s の時刻においても半径 5 mm 以遠では運動エネルギーは殆ど消滅している。塑性仕事も全体に増大しているが、中央部で増大の割合がやや大きい。この段階は運動エネルギーが板のバルジ変形の塑性仕事に変換される過程であると見なすことができる。さらに 30μ s の時刻と破断の時刻 (37.8μ s) を比較すると 30μ s において半径 5 mm 以内で行っていた運動エネルギーが全体に殆ど零となっており、その運動エネルギーが全て塑性仕事に変換されている。 30μ s における運動エネルギーが中央部で大きいので塑性仕事 U_p の増大は中央部で大きいのは言うまでもないが、 30μ s の時刻の運動エネルギーが殆ど零に近い半径 5 mm 以遠においても塑性仕事の増大が見られる。さらにエッジ近傍におけるせん断仕事も増大している。中央部の運動エネルギーが消滅するとき、慣性力は板面内の引張作用や板断面のせん断作用を引き起こし、これは中央から外方向に伝播する。そして拘束の著しいエッジ部に塑性仕事が集中し破断に至る。

3.5 全体的なエネルギー変換過程

前節で求めた単位面積当たりの塑性仕事 U_p や運動エネルギー U_k を面積積分することによって、全せん断仕事、全塑性仕事および全運動エネルギーを次のように定義する。

$$\text{全せん断仕事} : W_s = \int_7^9 U_p 2\pi r dr \quad (12)$$

$$\text{全塑性仕事} : W_l = \int_0^9 U_p 2\pi r dr \quad (13)$$

$$\text{全運動エネルギー} : W_k = \int_0^{7.5} U_k 2\pi r dr \quad (14)$$

エネルギーの変換過程を明らかにするために、Fig.11 にこれらの時間的経過をまとめて示している。

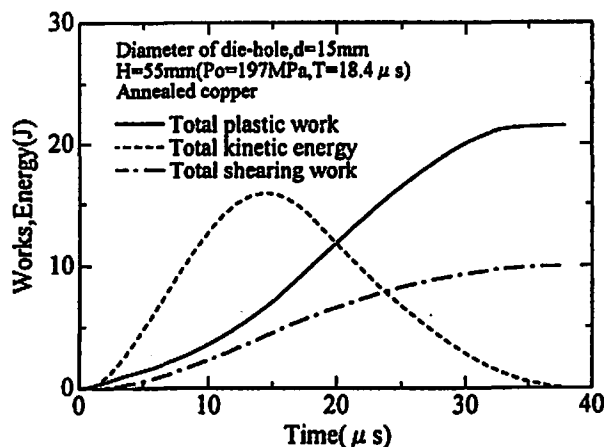


Fig. 11 Change in total plastic work, shearing plastic work and kinetic energy with time ($d=15\text{mm}$, $h=1\text{mm}$, $P_o=197\text{MPa}$ and $T=18.4\mu\text{s}$)

これによって全体的なエネルギー変換過程を知ることができる。初期においては衝撃圧は板の運動エネルギーの増大に寄与する部分が大きく、塑性仕事としては塑性曲げ波がまだダイスエッジ近傍にあるために、大部分がせん断仕事として費やされる。Fig. 9で示したようにせん断力はほぼ一定であり、せん断長さの増大はほぼ一定の速度で推移するためにせん断仕事はほぼ一定の速度で増大する。12 μs を過ぎる頃からバルジ変形のための塑性仕事が増大し始め、塑性仕事の増大が顕著になって行く。そしてその頃に板の運動エネルギーは最大となっている。衝撃圧は約18.4 μs で作用を終えるが、塑性仕事は運動エネルギーが変換されるという形で増加し続ける。この段階での塑性仕事の大部分はバルジ変形によるものである。衝撃圧の作用が消滅する18.4 μs 頃からせん断仕事の増加速度は鈍るが前に述べたように中央部で板面内に生じる引張応力やせん断応力は板面内を伝播し、拘束の強いエッジ近傍に集中してせん断仕事を促進させる。その結果せん断仕事は破断してしまうかあるいは運動エネルギーが完全に零になるまで増大する。運動エネルギーが零になったとき、丁度破断条件が達成されたとすればその時の条件が最小の衝撃圧の条件を与える。同図は正にそのような条件を与える場合のエネルギーの変換過程を説明している。

4. 結 言

爆薬の水中爆発によって生じる衝撃水圧を穴を設けたダイス上に置いた金属板に作用させて、金属板に穴あけ加工を行う場合についてせん断過程を含む板の変形過程を数値解析し、実験結果と照合しながら変形のメカニズムを考察した。その際、衝撃圧は三角パルスと見なし、最終変形形状に対する計算結果と実験結果

の良好な一致から衝撃圧の仮定を含めて本解析の妥当性を確認した。変形メカニズムについての結果をまとめると次の通りである。

- (1) せん断過程は次のように進行することを解析結果によって明らかにした。当初は破壊を生じないまま、衝撃圧によって板が穴内に押し込まれるように変形が進行する。この段階ではせん断力は殆ど一定であり、せん断長さはほぼ一定速度で増大する。やがてエッジ近傍で破壊条件に達し、繊維が断ち切られるようにしてせん断過程は進行する。その過程がしばらく進行した後、エッジ近傍から上方にクラックが進行し始め、殆ど同時に上面からもくびれ発生によってクラックが進行し、殆ど時間を置かず両クラックが連結して破断が完成する。
- (2) 衝撃圧によってもたらされるエネルギーの変換過程は次の通りである。当初、衝撃圧の作用の一部はせん断仕事の増大に変換されるが、大部分は板の運動エネルギーに変換される。やがて、塑性曲げ波がエッジ部から板の中央へ向かって移動し始め、それと共にバルジ変形のための塑性仕事の増大が顕著になる。板の運動エネルギーは周辺部から次第に消滅するので、最終段階では板の中央部が有している運動エネルギーが塑性仕事に変換されて全過程が終了するが、その段階でも塑性仕事は運動エネルギーが殆ど消滅している外周部においても増大し、せん断仕事も増加していることが認められた。

文 献

- 1) J. Harding, S. B. Kulkarni and A. A. Ezra, Proc. 2nd Int. Conf. on High Energy Forming, 8. 4. 1, Denver, Colorado (1969)
- 2) M. Fujita, M. Mochihara, S. Nagano, E. Uematsu and S. Itoh, Proceeding of 4th ICTP, 100 (1993)
- 3) 伊東繁, 蒲原清隆, 長野司郎, 藤田昌大, 火薬学会誌, 54, 3 (1993)
- 4) 前田禎三, 精密機械, 25-4, 248 (1959)
- 5) 神馬敬, 日本機械学会論文集, 28-196, 1638 (1962)
- 6) 崎野清憲, 塩入淳平, 日本機械学会論文集, 59-566, 105 (1993)
- 7) Tanimura, S., Proc. Int. Symp. Eng. 1, 17 (1992)
- 8) Rinehart, J. S. & Person, J., "EXPLOSIVE WORKING OF METALS", P. 82 (1963), Pergamon Press
- 9) G. E. Hudson, Journal of Applied Physics,

- 22, 1(1951)
- 10) 藤田昌大, 石水泰夫, 持原稔, 宇阪浩男, 伊東繁, 塑性と加工, 36-412, 541(1995)
- 11) 大矢根守哉, 日本機械学会誌, 75-639, 596 (1972)
- 12) 宅山裕彦, 森謙一郎, 広瀬智行, 八田夏夫, 塑性
と加工, 37-424, 509(1996)
- 13) G. Maenchen and S. Sack, Methods in Computational Physics, 3(1964), Academic Press
- 14) A. A. Amsden, H. M. Ruppel and C. W. Hirt, LA-8095, UC-32, (1980)

Blanking process of a metal plate sheared by underwater shock wave

by Minoru MOCHIHARA*, Masahiro FUJITA**, Kazuyuki HOKAMOTO**
Junichiroh UENO** and Shigeru ITOH**

The shearing deformation process in making a hole on a metal plate by an impulsive pressure driven by underwater explosion is experimentally and analytically analyzed. Two kinds of copper plates, work hardened plate through multi-layered explosive welding, and annealed one, are employed for the experiments. The shearing deformation process is numerically analyzed by using finite-difference scheme, and the results successfully proves the validity of numerical analysis with good agreement between analytical results and experimental ones. Fracture mechanism in the blanking operation, meanwhile, is investigated based on the numerical calculation which is analyzed by considering fracture condition of the material used. As a result, crack emerging at the die-edge and the following propagation are clearly and precisely revealed during the process. The shearing process is also discussed based on the plastic work dissipated during the deformation process.

(*Kagoshima National College of Technology, 1460-1 Shinko Hayatocho, Aira-gun, Kagoshima 899-5102, Japan

**Department of Mechanical Engineering and Materials Science, Kumamoto University, 2-39-1 Kurokami, Kumamoto 860-0862, Japan)