

ホプキンソン棒を利用した衝撃せん断試験装置の開発

岡山理科大学

横山 隆

(平成4年度研究開発助成 AF-92003)

1. 研究の背景

高ひずみ速度下における材料の応力-ひずみ特性は、衝撃荷重を受ける機械や構造物の設計や解析に必要な不可欠なデータである。また高速せん断や高速鍛造等の高速塑性加工においても、加工材料の高ひずみ速度下の流動応力特性(塑性曲線)が、加工性能に大きな影響を与えることが知られている。衝撃荷重下における材料の応力-ひずみ関係の直接的な測定は、慣性力とそれに伴う材料内の応力波の存在によって一般的には困難である。従来から最もよく使用されている衝撃材料試験法の一つに、スプリット・ホプキンソン棒法¹⁾(以下ホプキンソン棒法)がある。この方法は2本のホプキンソン棒と呼ばれる細長い弾性棒の間に円板状の試験片を挟み込み、その弾性棒の一端から衝撃圧縮荷重を与え、試験片を間接的に圧縮する。このとき試験片の動的応力-ひずみ関係は、2本の弾性棒上に貼ったひずみゲージにより測定した応力パルスより一次元の波動伝播理論²⁾に基づいて決定される。このホプキンソン棒法は、最初Kolskyにより衝撃圧縮試験に使用されて以後、衝撃ねじり、衝撃引張りの試験に応用された。圧縮、引張り試験では、半径方向慣性による試験片のタル型変形やくびれの影響により信頼性のある応力-ひずみ関係の得られるひずみ速度は $10^2/s \leq \dot{\epsilon} \leq 2 \sim 3 \times 10^3/s$ の範囲に限られる。一方、衝撃ねじり試験では薄肉円管試験片に作用する半径方向慣性は無視できるが、機械的に衝撃ねじりパルスを発生させる機構と試験片の機械加工精度の制約から、得られるせん断すびみ速度は同様に $10^2/s \leq \dot{\gamma} \leq 2 \sim 3 \times 10^3/s$ の範囲に制限される。

本研究では、従来のねじりホプキンソン棒法の適用により得られる最大のひずみ速度より一桁大きい $\dot{\gamma} = 10^4/s$ オーダーでのせん断応力-ひずみ関係を得ることのできる衝撃せん断試験装置の開発を行なった。この試験では、高せん断ひずみ速度を得るために2重切り欠きを持つ特別の試験片形状を採用した³⁾。開発した試験装置を使用して球状黒鉛鋳鉄FCD370、純チタン(焼鈍材)及び2種類のチタン合金(Ti-6Al-4V:焼鈍材、Ti-8Al-1Mo-1V:溶体化処理材)の衝撃せん断試験を行ない、その結果を静的ねじり試験結果と比較した。さらに従来のねじりホプキンソン棒法による衝撃ねじり試験の試験結果とも比較した。

2. 衝撃せん断試験装置の説明

Fig. 1に、開発したホプキンソン棒法による衝撃せん断試験装置⁴⁾の全体図を示す。衝撃せん断試験装置は、打出し棒発射装置、パンチ棒、せん断試験片、ダイス管、測定系より構成される。試験は、パンチ棒及びダイス管の間に試験片を挟み、打出し棒の衝突によってパンチ棒へ衝撃圧縮を加え、生じた圧縮パルスにより試験片の一部を打ち抜く方法で行なう。打出し棒発射装置は空気銃と同様の原理で、小型空気圧縮機(HITACHI: BEBICON Model 0.75P-9.5VS)のタンク内の高圧空気を電磁バルブで急速に開放して長さ35cm、直径16mmの打出し棒を10m/s前後まで加速し、銃身より打ち出す。打出し棒及びパンチ棒は、応力波を弾性域内で伝播させるために高強度の高炭素クロム軸受け鋼(JIS-SUJ2)を使用し、パンチ棒の両端面には塑性変形防止のため焼き入れ処理を施した。ダイス管もパンチ棒と同じく高強度である必要性から、継目無し機械構造用炭素鋼磨管(JIS-STKM13C)を使用し、試験片を保持する端面に焼き入れを施した。この装置の銃身、パンチ棒及びダイス管は、軸性を保持するためにVブロックによって支持されている。測定系は、ひずみゲージブリッジ回路、デジタル・ストレージ・オシロスコープ(IWATSU: DS-9121)、パーソナルコンピュータ(NEC: PC-9801RX)、プロッタ(GRAPHTEC: MP4300)、プリンタ(EPSON: VP850)から構成される。パンチ棒及びダイス管上にそれぞれ貼付した半導体ひずみゲージ(KYOWA: KSP-2-120-E4)の出力信号をブリッジ回路を通してオシロスコープに記録し、取り込んだデータをパーソナルコンピュータに転送して解析する。

試験に使用した特殊な二重切り欠きせん断試験片をFig. 2(a)に示す。試験片の外部ブロックと内部ブロックの間の部分が、せん断変形を生じる領域である。試験片のせん断変形領域の隅部での応力集中を軽減するため、隅部に0.3mmの曲率をつけている。試験片の外部ブロックと内部ブロックとの間隔(ゲージ長さ)を変えることによって、せん断ひずみ速度を変化させることができるが、本試験では最終的にはその間隔を1mmとした。試験片は、Fig. 2(b)に示す様にパンチ棒とダイス管との間に取付けられる。試験片とパンチ棒及びダイス管との接触面での伝播する圧縮

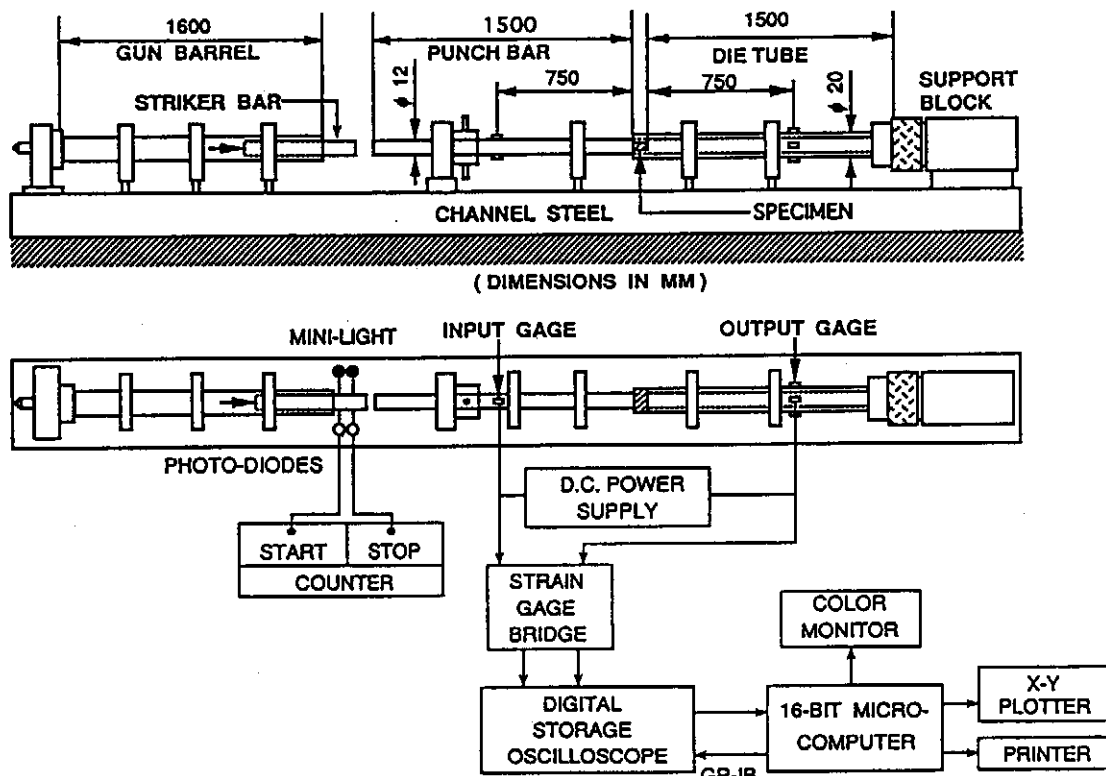


Fig. 1 Impact shear test apparatus

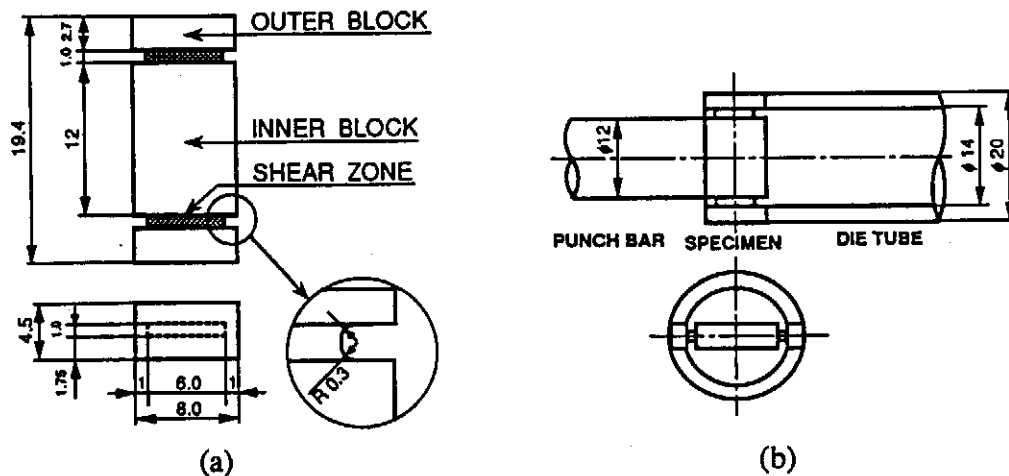


Fig. 2 (a) Impact shear test specimen and (b) attachment to Hopkinson bars

応力波の反射透過による乱れを低減させるために、Fig. 1の右端に示す支持ブロックより微小な圧縮荷重を予負荷している。

3. ホプキンソン棒法の測定原理

Fig. 3は本衝撃せん断試験におけるパンチ棒とダイス管内のひずみパルスの伝播を表わすラグランジュ座標である。横軸xはホプキンソン棒の軸方向の長さ、縦軸tは時間を表している。この図における二本の平行な傾斜線が、ひずみ(応力)波頭の伝播の様子を表している。この二本の傾斜線の間隔がひずみパルスの持続時間を、傾き(x/t)がひずみ(応力)パルスの伝播速度 C_0 ($=\sqrt{E/\rho}$)を表している。発

射された打出し棒は、パンチ棒の左端面に衝突し、圧縮ひずみパルスをパンチ棒内に発生させる。この圧縮ひずみパルスはパンチ棒内を左から右へ伝播し、パンチ棒-試験片境界上において一部は試験片に透過し、残りはパンチ棒内へ反射する。試験片内を伝播する応力パルスは、内部ブロックと外部ブロック間をせん断変形させ、外部ブロックを通過してダイス管に透過していく。これらの入射ひずみパルス ϵ_i 、反射ひずみパルス ϵ_r および透過ひずみパルス ϵ_t は、パンチ棒とダイス管上に貼付した半導体ひずみゲージより測定される。

一次元弾性波動伝播理論に基づいて、試験で測定された各ひずみパルスのデータ解析を行なう。入射、反射および

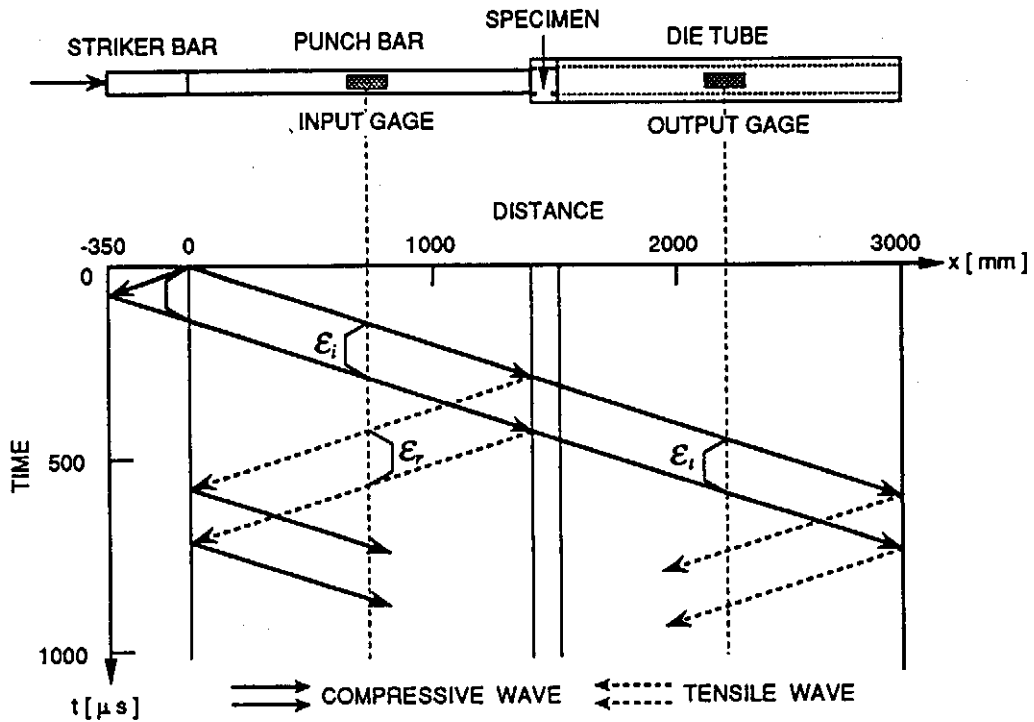


Fig. 3 Lagrangian diagram for impact shear test

透過パルスから、試験片の衝撃される面とダイス管の支持面に作用する荷重と変位が同時に求められる。試験片内のせん断変形領域において一様なせん断変形を仮定すると、この荷重と変位から試験片のせん断応力 τ 、せん断ひずみ γ およびせん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ は次式で与えられる。

$$\tau_m(t) = \frac{P_1 + P_2}{4A_s} = \frac{E}{2A_s} \{A_i(\varepsilon_i + \varepsilon_r) + A_t \varepsilon_t\} \quad (1)$$

$$\gamma(t) = \frac{u_1 - u_2}{a} = \frac{C_0}{a} \int_0^t (\varepsilon_i - \varepsilon_r - \varepsilon_t) dt' \quad (2)$$

$$\dot{\gamma}(t) = \frac{C_0}{a} (\varepsilon_i - \varepsilon_r - \varepsilon_t) \quad (3)$$

P_1 、 P_2 はそれぞれパンチ棒側及びダイス管側より測定された試験片に作用する荷重である。 τ_m は平均せん断応力である。 u_1 、 u_2 はそれぞれ試験片のパンチ棒側、ダイス管側で測定される変位である。 a は試験片の外部ブロックと内部ブロックとの間の長さである。また、 A_s は試験片せん断変形部A-A'間の断面積、 A_i 、 A_t はそれぞれパンチ棒、ダイス管の断面積である。本試験では反射ひずみパルス ε_r に分散効果が含まれて P_1 が必ずしも精密に決定できないため、ダイス管側の力 P_2 のみを使用して次のように試験片のせん断応力を評価した。

$$\tau(t) = \frac{P_2}{2A_s} = \frac{E}{2A_s} A_t \varepsilon_t \quad (4)$$

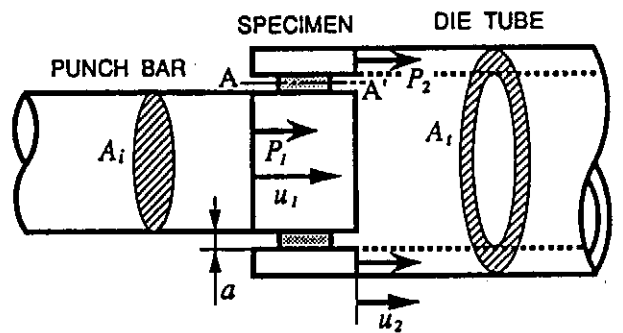


Fig. 4 Hopkinson bar analysis

式(2)、(4)より算出されるせん断ひずみ γ 及びせん断応力 τ は、どちらも時間 t の関数であり、この時間 t を消去することによって、試験片の動的せん断応力-ひずみ関係を決定することができる。

4. 試験結果及び考察

铸铁FCD370の衝撃せん断試験で得られたひずみゲージのオシロスコープ記録の一例をFig. 5に示す。このひずみゲージで記録された各ひずみパルスを式(2)～(4)に代入して、時間 t を消去して得られた铸铁FCD370のせん断応力-ひずみ関係、せん断ひずみ速度-ひずみ関係をFig. 6に示す。衝撃せん断試験において得られるひずみ速度は変形の初期時においては必ずしも一定でないが、塑性変形が増大する($\gamma > 5\%$)につれて、ほぼ一定のひずみ速度 $\dot{\gamma} = 8800/s$ で変形している。以下に示す衝撃せん断試験結果では、ひずみ速度は塑性変形時のこの一定値によって示し

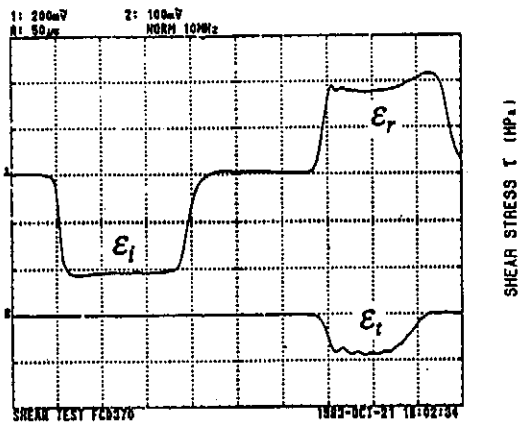


Fig. 5 Oscilloscope records from impact shear test for FCD370

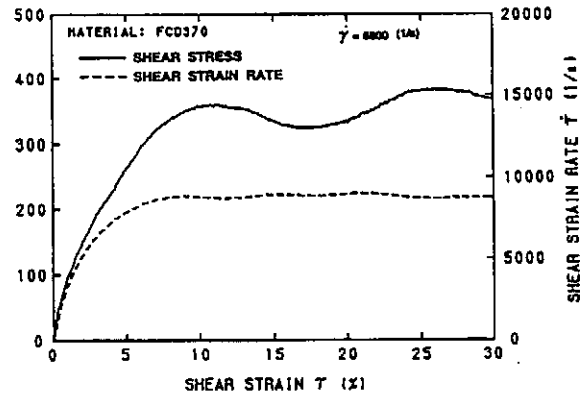


Fig. 6 Dynamic shear stress-strain and shear strain rate-strain relations

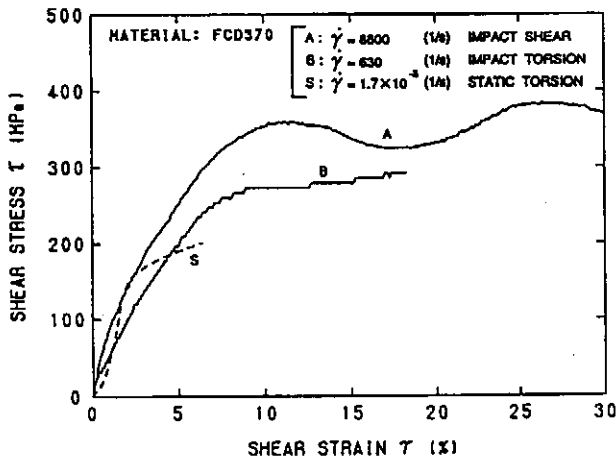


Fig. 7 Shear stress-strain relations for FCD370 at various strain rates

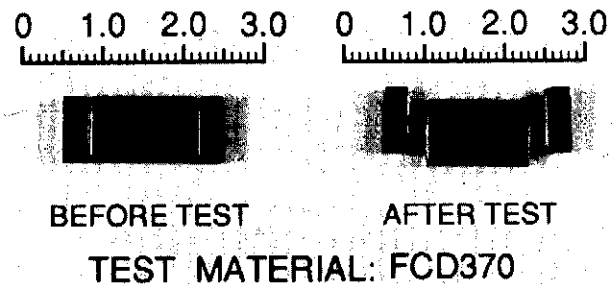


Fig. 8 Photograph of shear specimen of FCD370

ている。FCD370のこの衝撃せん断試験結果と、薄肉円管試験片を用いて得た衝撃ねじり試験⁵⁾及び静的ねじり試験による結果をFig. 7に示す。この図より、ひずみ速度が $\dot{\gamma} = 1.7 \times 10^{-3}/s$ から $8800/s$ に上昇するに伴って降伏応力は2倍以上に上昇していることがわかる。衝撃ねじり試験では、ひずみ速度が $\dot{\gamma} = 630/s$ で、ひずみが18%までの動的せん断応力-ひずみ関係しか得られていない。FCD370におけるひずみ速度の増大に伴う流動応力の大きな上昇は、ホプキンソン棒法による衝撃圧縮、引張り試験⁶⁾によって得られる単軸応力-ひずみ関係においても確認されているが、この衝撃せん断試験結果も同様の傾向を示している。ホプキンソン棒法では応力パルスの干渉によって試験片のゲージ部内が動的な応力のつり合い状態に達するまでに少し時間(数十 μs)を要するので、初期の応力-ひずみ関係の測定精度が低下する欠点があるが、十分に時間が経過した後の流動応力は精密に測定できる。参考のためFig. 8に試験前及び試験後におけるせん断試験片の写真を

示す。この写真より、試験片のせん断変形部における隅部への応力集中は極めて小さく、ほぼこのせん断変形領域の中央部から最終的には破断していることがわかる。

純チタン、チタン合金(Ti-6Al-4V, Ti-8Al-1Mo-1V)のせん断応力-ひずみ線図をFig. 9~Fig. 11に示す。初期の直線の傾きは剛性率 G を表わしている。本試験装置によって純チタン、チタン合金Ti-6Al-4Vでは最大ひずみ速度 $\dot{\gamma} \approx 10^4/s$ 、チタン合金Ti-8Al-1Mo-1Vにおいても $\dot{\gamma} \approx 9 \times 10^3/s$ でのせん断応力-ひずみ関係が得られた。純チタン、チタン合金では铸铁FCD370と異なって、衝撃ねじり試験で得られるひずみ速度 $\dot{\gamma} = 10^3/s$ でのせん断応力-ひずみ関係と衝撃せん断試験で得られるひずみ速度 $\dot{\gamma} = 10^4/s$ でのそれとはあまり変わらない結果が得られた。Fig. 10及びFig. 11より2種のチタン合金の強度を比較をすると、Ti-8Al-1Mo-1Vの静的ねじり試験結果の最大せん断応力は、Ti-6Al-4Vのそれよりも50MPa程度高い。しかし衝撃せん断試験では、ほぼ同じひずみ速度下でほぼ同じ

流動応力レベルまで上昇している。したがってチタン合金においては、Ti-6Al-4Vの方がTi-8Al-1Mo-1Vよりもわずかにひずみ速度依存性が高いといえる。

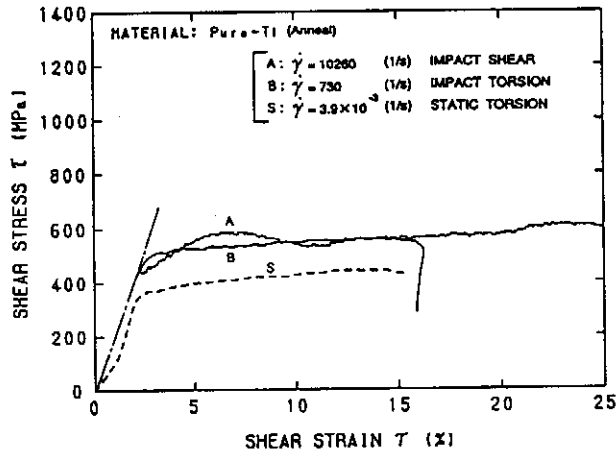


Fig. 9 Shear stress-strain relations for Pure -Ti

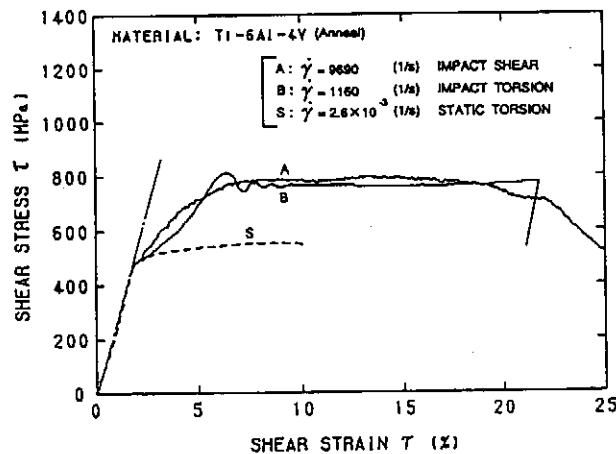


Fig. 10 Shear stress-strain relations for Ti-6 Al-4V

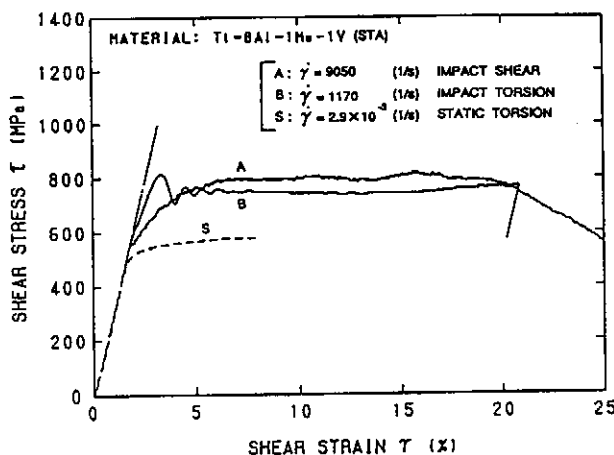


Fig. 11 Shear stress-strain relations for Ti-8 Al-1Mo-1V

5. 試験片のせん断変形に及ぼす

曲げ変形の影響について

本衝撃せん断試験においては試験片の変形が進むにつれてせん断変形部は、せん断変形だけでなく曲げ変形の影響を受ける。そこで信頼性のあるせん断応力-ひずみデータが得られる試験片のせん断ひずみ限界を検証するために、試験片の両外部ブロックの外側面にゲージ長さ0.2mmの小さいひずみゲージ (KYOWA : KFG-02-120) を貼付して試験片の変形中の曲げひずみを測定した。その結果、試験片外部ブロック側面におけるひずみは試験片のせん断変形部の破壊時まで、±0.1%以下の弾性域に収まっていた。このことから、試験中に試験片のせん断変形部に発生する曲げ変形は十分小さく、破壊時までのせん断ひずみ範囲内ではほぼ無視できることが確認できた。

6. 結 言

ホプキンソン棒法による新しい衝撃せん断試験装置を開発し、4種類の金属材料について試験を行なった結果、次のような結論を得た。

- (1) 本衝撃せん断試験によって従来のねじり衝撃試験では得ることが困難な $\dot{\gamma} = 10^4$ (1/s) オーダーのひずみ速度下におけるせん断応力-ひずみ関係を決定することができる。
- (2) 本衝撃せん断試験では試験片の塑性域においてはほぼ一定の高ひずみ速度の応力-ひずみ関係を得ることができる。
- (3) せん断変形部の幅 (せん断ゲージ長さ) の短い試験片を使用すれば、 $\dot{\gamma} \geq 2 \times 10^4$ (1/s) 以上のひずみ速度下におけるせん断応力-ひずみ関係を得ることも可能である。

参考文献

1. J. A. Zukas, T. Nicholas, H. F. Swift, L. B. Greszczuk and D. R. Curran Impact Dynamics, John Wiley & Sons, New York, (1982), Chap. 8.
2. K. F. Graff Wave Motion in Elastic Solids, Ohio State University Press, (1975).
3. D. Ruiz, J. Harding and C. Ruiz "The double-notch shear test-analysis and development for material testing at very high strain rates" Proceedings of the 1st International Conference, "Structures under Shock and Impact" Cambridge,

- Massachusetts, (1989), pp. 145-154.
4. 横山 隆、小川泰弘、高田知裕
"高速せん断試験装置の開発"、日本機械学会中国四国支部第31期講演会講演論文集No./935-1, (1993), pp. 43-45
 5. T. Yokoyama
"Torsional testing of materials at high rates of strain"
Proceedings of the 3rd International Conference, on Residual Stresses,
Tokushima, (1991), pp. 1409-1414
 6. 横山 隆、高田知裕
"球状黒鉛鑄鉄の衝撃圧縮・引張り試験"、日本非破壊検査協会第25回応力・ひずみ測定シンポジウム講演論文集, (1994), pp. 45-50.