薄板の貫通破壊に関する研究*

(第2報, 薄板の吸収エネルギーに及ぼす材質の影響)

上 西 研^{*1}, 河 野 俊 一^{*1}
難 波 俊 博^{*2}, 種 田 元 治^{*1}

Study on Penetration of Thin Metal Sheet (2nd Report, Dependence of Energy-Absorbing Capacity on the Mechanical Properties)

Ken KAMINISHI, Shunichi KAWANO,
Toshihiro NANBA, and Motoharu TANEDA

Fracture phenomena and energy-absorbing capacity of a thin metal sheet under penetration by a 20.5 mm-diameter cylindro-conical projectile are studied experimentally. The top angle of the projectile is 45 degrees, and the diameter of the top spherical surface is 5.5 mm. The materials of the sheet used in this study are Extra Super Duralumin (7075-T6), Corrosion-resisting Aluminium Alloy (A 5083 P) and Cold Rolled Carbon Steel (SPCC), whose thickness and diameter are 1.0 mm and 200 mm, respectively. On SPCC and A 5083 P, the Energy-absorbing Capacity U_T is almost equal to the energy of crack extension and dynamic U_T is about twice that of the static one. However, on 7075-T6, the energy of petal bending is half as much as U_T and dynamic U_T is equal to the static one.

Key Words: Fracture Toughness, Impact Strength, Material Testing, Penetration, Energy-absorbing Capacity

1. 結 言

種々の速度や形状を持った飛来片が、薄板構造物に衝突する際の破壊現象を解明しておくことは、自動車、鉄道車両、航空機あるいはスペース用構造物等の安全性を評価する上で重要である。

そこで著者らは、薄板の吸収エネルギーと飛来片諸量との関係を明らかにするための基礎的研究として、第1報⁽¹⁾で軟鋼板(SS材)を用いた準静的貫通実験を行い、初期円周方向き裂が生じるまでは膜理論で、また、その後の半径方向き裂および花びら状曲げを J 積分と塑性曲げで、薄板の吸収エネルギーがある程度評価できることを示した。

また、貫通エネルギーの材質依存性については、吉沢ら⁽²⁾、田中ら⁽³⁾をはじめ、いくつかの代表的な研究⁽³⁾⁻⁽⁸⁾があり、貫通エネルギーは流動応力あるいは引張強さと比較的良好な相関があることが報告されている。しかし、必ずしも高強度材が貫通しにくいというわけではなく、き裂を伴う薄板の貫通破壊に対しては、

破壊靱性も重要な力学的性質であると考えられる。

そこで本報では、まず高強度低靱性材の航空機用超々ジュラルミンと低強度高靱性材の新幹線用耐食アルミニウム合金および自動車用鋼板を用い、準静的貫通試験(突入速度 $V_i=0.04$ mm/s および 1.8 mm/s)と飛しょう体による貫通試験($V_i=80$ m/s)までを行い、貫通エネルギーの材質依存性について調べた。

次に、貫通破壊時に生じるき裂数およびその長さに着目し、貫通破壊における薄板の吸収エネルギーに影響を及ぼす力学的因子について考察を行った。

2. 供試材および実験方法

2.1 供試材 本実験に使用した試験片材料は、超々ジュラルミン 7075-T6、耐食アルミニウム合金 A 5083 P および冷間圧延鋼板 SPCC の 3 種類で、板厚はいずれも 1.0 mm とした。

表 1 に静的引張試験および破壊靱性試験結果を示す。ここで J_i は安定き裂進展発生時の J 積分値である。また、引裂き係数(Tearing Modulus) T は R 曲線を直線近似し、その時のこう配 dJ/da を E/σ_f^2 で無次元化した値とした⁽⁹⁾。なお、 a はき裂長さ、 E は縦弾性係数であり σ_f は流動応力で降伏点(耐力)と引張強さの平均とした。

* 平成元年 4 月 5 日 第 66 期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和 63 年 8 月 3 日。

^{*1} 正員、山口大学工学部 (〒755 宇部市常盤台)。

^{*2} 准員、日立金属(株)桑名工場 (〒511 桑名市大福 2 番地)。

7075-T6 は, SPCC と比較して引張強さは約2倍となっているが, J_1 値で1けた, T 値で3けたほど小さい値を示した。

2・2 貫通試験 準静的貫通試験は, 第1報⁽¹⁾と同様に, 試験片を固定した支持台を万能試験機上に設置し, 後述の飛しょう体と同形状のポンチを押し込むことにより行った。ポンチ荷重および突入量は, ロードセルおよびストロークセンサにより求めた。

飛しょう体による貫通試験は, 図1に示す実験装置を用い, 圧縮空気(最高ゲージ圧7気圧)により加速された飛しょう体(質量80.7g)を試験片に垂直に衝突させることにより行った。試験片および飛しょう体の形状・寸法を図2に示す。

飛しょう体突入前後の速度計測は, それぞれ一对のフォトセンサを試験片の前後に置き, その通過時間をタイムカウンタで読み込むことにより行った。また, 貫通過程を観察するために撮影速度8000コマ/sで高速度撮影を行った。

3. 実験結果

3・1 準静的貫通試験 貫通破壊に及ぼす突入速度の影響を詳細に調べるため, 2種類の突入速度($V_i = 0.04$ mm/s および 1.8 mm/s)で準静的貫通試験を行い, ポンチ荷重 P と突入量 λ の関係を調べた。SPCC に対する P と λ の関係を図3(a)に示す。本突入速度の範囲内では, 同図に示すように, 以下の三つ

表1 機械的性質および破壊靱性値

	Yield point σ_y , MPa	Tensile strength σ_u , MPa	Elongation δ , %	J_1 MJ/m ²	Tearing modulus T
7075-T6	467*	531	16	0.044	0.799
A5083P	253*	350	16	0.10	16.6
SPCC	234	323	45	0.31	246

* 0.2 % Proof stress

図1 実験装置概略図

の領域によって, 薄板の変形挙動を特徴づけることができる。

まず, 初期円周方向き裂が生じるまでは, 試験片全体がたわみ変形する〔領域(I)〕。次に, 円周方向き裂から数個の半径方向き裂が生じ, λ の増加に伴いき裂進展とき裂間の板の花びら状曲げが同時に進行する〔領域(II)〕。最後に, ポンチと板の接触部がポンチの平行部に入るとき裂進展は停止し, 荷重は一定となる〔領域(III)〕。

ポンチ荷重に及ぼす突入速度の影響は, 領域(I)との境界を含めた領域(II)におちてみられ, 突入速度が45倍速くなるのとにより, 荷重が約2割も上昇した。しかし, この程度の速度差では, 動的流動応力はほとんど変化せず, したがって, SPCC の破壊靱性値はひずみ速度依存性が大きいものと考えられる。

これに対して, 7075-T6 の P - λ 曲線の一例を図3(b)に示す。SPCC とは異なり, 7075-T6 ではポンチ荷重が小さいこともあり, 試験のたびに荷重のばらつく割合が大きかった。このため, 図中(I), (II), (III)のどの領域においても, その大小関係が図3(b)とは異なる場合もあり, 突入速度の違いによる有意な差は見られなかった。

また, いずれの突入速度に対しても, 7075-T6 は領域(II)の中程($\lambda = 20$ mm)に荷重のピークがみられ, その時点においてき裂の分岐が観察された。このことから, 7075-T6 は流動応力は高いので, 曲げに要するエネルギーは大きい, 破壊靱性値は低いためにき裂を進展させるエネルギーは小さく, したがって, 曲げられる領域がある限界以上になると, 曲げる領域を軽減させるために, き裂が分岐するものと思われる。

3・2 飛しょう体による貫通破壊現象 図4にSPCC の飛しょう体による貫通試験時(飛しょう体突入速度 $V_i = 76.9$ m/s)の高速度撮影写真を示す。 V_i が

図2 試験片および飛しょう体形状

準静的 ($V_i=0.04$ mm/s) に比べ 2×10^6 倍になったにもかかわらず、準静的の場合⁽¹⁾と同様に飛しょう体の突入に伴い徐々にき裂が進展しているのがわかる。また、初期円周方向き裂によって生じるプラグがいずれの突入速度に対してもみられることや貫通試験後の試験片の破壊形態（き裂の数および花びら状曲げの曲率等）がほとんど等しいことから、本実験の突入速度（80 m/s 以下）の範囲内では、貫通に至るまでの破壊過程は変わらないものと考えられる。また、A 5083 P および 7075-T 6 に対しても SPCC と同様な結果が得られた。

3・3 貫通限界エネルギー 図5に各材料試験片に対する、突入速度と貫通限界エネルギーの関係を示す。なお本報では、飛しょう体が試験片につき刺さった状態で静止した場合〔図3に示す領域(III)相当〕を貫通限界 (Ballistic Limit) と定義し、突入時の飛しょう体の運動エネルギーを貫通限界エネルギー (U_T)_{limit}

(a) SPCC

(b) 7075-T 6

図3 P-λ曲線

とした。また、準静的試験では、図3に示す P - λ 曲線を飛しょう体による試験における貫通限界時の λ ままで積分することにより求めた。

いずれの突入速度においても、7075-T 6 が流動応力が最も高いにもかかわらず、貫通限界エネルギーが小さくなった。また、SPCC および A 5083 P では、突入速度が速いほど貫通限界エネルギーは大きくなっているが、7075-T 6 ではほとんど変化がみられない。これは、7075-T 6 の破壊靱性値が低いために、き裂を進展させるためのエネルギーが少なくてすみ、曲げる領域を減らすように、き裂が方向転換または分岐を起こしながら貫通して行くためであると思われる。したがって、降伏点（耐力）や引張強さと同様に、破壊靱性値も貫通限界エネルギーに対しては支配的な力学的因子であり、また、これらの力学的因子により、貫通限界エネルギーに及ぼす突入速度の影響が大きく異なることがわかる。

3・4 全き裂長さと吸収エネルギーの関係 図6に準静的貫通試験 ($V_i=0.04$ mm/s) および飛しょう体による貫通試験における、初期き裂発生から貫通限界に達するまでの全き裂長さ a_T と試験片の吸収エネルギー U_T の関係を示す。なお、 a_T は長さ 1 mm 以上のき裂をすべて読取り、それを加え合わせたものであ

図4 高速度撮影写真 (SPCC, $V_i=76.9$ m/s)

図5 貫通限界エネルギー

る。また、 U_T は飛しょう体による試験の場合、突入速度より算出した運動エネルギー、準静的の場合は図3の P - λ 曲線の積分より求めた値である。

同図より飛しょう体による試験および準静的試験ともに U_T と a_T はほぼ直線関係にあり、飛しょう体による試験におけるき裂、特に 7075-T6 のように無秩序に思われるき裂でさえも、全き裂長さで整理すると飛しょう体の運動エネルギーと良い相関があることがわかる。

また、図中の矢印で示す貫通限界における a_T は各試験片材料とも突入速度に関係なく、その時の全き裂長さは、SPCC では飛しょう体直径の約 2.5 倍であるのに対し、7075-T6 はその 2 倍以上であった。

さらに、SPCC および A5083P においては、同一の a_T に対し飛しょう体による試験の U_T は準静的試験のものの約 2 倍となった。しかし、降伏点が高く破壊靱性値の低い 7075-T6 では、両試験でほぼ同じ値を示し、突入速度の影響は小さかった。

4. 考 察

き裂発生後の主なエネルギーは、き裂進展に要するエネルギー U_c と花びら状の曲げに費やされるエネルギー U_b の二つであり、全き裂長さを a_T 、全曲げ幅を B_T とすると、近似的にはそれぞれ次式で表されると考えられる。

$$U_c = f_c(J(V_i), t_0) a_T$$

$$U_b = f_b(\sigma_f(V_i), \alpha, t_0) B_T$$

図6 貫通エネルギー U_T と全き裂長さ a_T の関係

ただし、 f_c はき裂を単位長さ進ませるために必要なエネルギーで、破壊靱性 J (突入速度 V_i に依存) と板厚 t_0 の関数と考えられる。また f_b は飛しょう体先端形状に沿うまで板を単位幅当たり曲げるエネルギーで、流動応力 σ_f (V_i に依存)、飛しょう体先端頂角 α 、および t_0 の関数と考えられる。

本報では、 α および t_0 は一定であるので、 f_c および f_b は突入速度のみに依存する関数とみなすことができる。

ここで、貫通破壊時の試験片の変形をモデル化すると、図7に示すようにき裂先端を直線で結ぶ多角形状に曲げ変形を起こすAタイプとポンチ形状に沿って同心円状に曲げ変形を起こすBタイプの2種類が考えられ⁽⁸⁾、 a_T および B_T は次式で表される。

Aタイプに対しては

$$a_T = nr / \cos(\pi/n)$$

$$B_T = 2nr \times \tan(\pi/n)$$

Bタイプに対しては

$$a_T = nr$$

$$B_T = 2\pi r$$

なお、 r は飛しょう体接触部半径、 a_T は全き裂長

(a) Aタイプ (b) Bタイプ

図7 破壊形態 ($n=4$ の場合)

図8 全き裂長さ a_T 、全曲げ幅 B_T とき裂数 n の関係

さ、 B_T は全曲げ幅および n はき裂数である。

n を横軸に、 a_T および B_T を r で無次元化したものを縦軸にとると、図8のようになる。実際の変形はAタイプとBタイプの中間にあり、全き裂長さ a_T は $n=3$ としくは4で最小となり n の増加に伴い長くなるが、逆に全曲げ幅 B_T は n の増加とともに減少する。したがって、曲げに要するエネルギーに比べ、き裂を進めるエネルギーが極めて大きいような材料に対しては、 a_T が最小になる $n=3$ もしくは4となる。これに対して、き裂を進めるエネルギーが小さい場合、曲げ幅が小さくなるように n は増加すると考えられる。

図9に飛しょう体による貫通試験におけるき裂数の頻度を示す。SPCCは4または5、A 5083 Pはほとんど5であるのに対し、7075-T 6は6~8とその数が多く、それぞれ準静的試験のき裂数と同じであった。このことより、突入速度にかかわらず、SPCCおよびA 5083 Pはき裂進展に要するエネルギーが支配的であるのに対し、7075-T 6では曲げに要するエネルギーをも考慮すべきであることがわかる。

したがって、図6においてSPCCおよびA 5083 Pの dU_T/da_T の値が、飛しょう体による試験において準静的の約2倍になったのは、貫通破壊時に支配的であるき裂進展に必要なエネルギーが増加したためであり、動的流動応力の効果は少ないものと考えられる。

上述のことを確かめるために、図10にSPCCおよび7075-T 6における準静的と飛しょう体による貫通試験後の試験片から採取した断面の接写写真を示す。SPCCは準静的でもき裂近傍ではかなりの量のくびれが見られるが、飛しょう体による試験のほうが塑性変形量がさらに大きくなっているのがわかる。これに対して、7075-T 6は突入速度に関係なく、き裂縁近傍での板厚方向のくびれはみられない。これはSPCCが、き裂縁近傍での塑性変形量が大きいために熱を発生しやすく、Eftis-Krafftの研究⁽¹⁰⁾に見られるように、き裂進展速度が上昇すると、熱の散逸する割合が減少し、

図9 き裂数の頻度

その影響でき裂先端近傍で軟化が起こり、破壊発生ひずみが増加するためだと考えられる。したがって、破壊発生ひずみと破壊靱性値はほぼ比例関係にあるというHoodらの研究⁽¹¹⁾から考えても、SPCCはき裂進展速度の上昇に伴い破壊靱性値が上がったものと考えられる。一方、7075-T 6はき裂先端での塑性変形がほとんどないために、突入速度の影響が見られなかったものと考えられる。

5. 結 論

(1) 貫通限界エネルギーに対しては、降伏点(耐力)や引張強さと同様に、破壊靱性値も支配的な力学的因子である。

(2) 本実験の範囲では、突入速度に関しては破壊現象に差異は見られなかった。すなわち、軟鋼板およびアルミ合金板では、半径方向(放射状)のき裂数としては、突入速度に無関係に4または5が最も多かった。検討の結果、これは両材料とも、突入速度に関係なくき裂を進めるエネルギーがき裂間の板曲げに要するエネルギーに比べ、かなり大であるためと考えられた。一方、ジュラルミン板では、き裂数は多く(6~8)、き裂間の板曲げに要するエネルギーもある程度大であることがわかった。また、ジュラルミン板では、半径方

(a) 準静的試験 (b) 飛しょう体による試験

図10 断面の接写写真

向き裂が、方向転換あるいは分岐することによって、曲げる領域を少なくする傾向が見られた。

(3) 突入に伴い、供試材に加えられた全エネルギー U_T と全き裂長さ a_T とは、ほぼ比例した。また、軟鋼板およびアルミ合金板においては、同一の a_T に対し飛しょう体による試験の U_T は準静的試験のものの約2倍になった。しかし、降伏点が高く破壊靱性値の低いジェラルミン板では、両試験でほぼ同じ値を示し、突入速度の影響は小さかった。

(4) 軟鋼板およびアルミ合金板の高速貫通エネルギーが静的貫通エネルギーに比べ大きくなった理由は、ひずみ速度の増加による動的流動応力の効果よりもむしろ、き裂進展速度の上昇に伴い弾塑性破壊靱性値が増加したためであると考えられる。

本研究について、日本材料学会材料強度・信頼性研究談話会にてご討論をいただいた。また、本実験に用いた材料の一部は三菱重工業(株)名古屋航空機製作所

よりご提供いただいたものである。ここに深く感謝する。

文 献

- (1) 河野・ほか, 名, 機論, 53-491, A (1987), 1307.
- (2) 吉沢・ほか4名, 機論, 49-444, A (1983), 993.
- (3) 田中・ほか3名, 日本航空宇宙学会誌, 33-379, (1985), 476.
- (4) Ghosh, S. K. and Travis, F. W., *Int. J. Mech. Sci.*, 21 (1979), 1.
- (5) Jonson, W., ほか2名, *Trans. ASME, Ser. B*, 99 (1977), 738.
- (6) Johnson, W. and Mamalis, A. G., *Int. J. Mech. Sci.*, 20 (1978), 849.
- (7) Goldsmith, W. and Finnegan, S. A., *Int. J. Mech. Sci.*, 13 (1971), 843.
- (8) Calder, C. A., and Goldsmith, W., *Int. J. Solids Struct.*, 7 (1971), 863.
- (9) Paris, P. C., ほか3名, *ASTM Spec. Tech. Publ.*, 668 (1978), 5.
- (10) Eftis, J. and Krafft, J. M., *Trans. ASME, Ser. D*, 87 (1965), 257.
- (11) Hood, J. E., and Jamieson, R. M., *JISI*, (1973), 369.