

円錐体による薄鋼板の貫通破壊

河野 俊一*・藤田 慎一**・清水 茂俊*

Penetration of Mild steel sheets by Conical punch

Shun-ichi KAWANO, Shin-ichi FUJITA and Shigetoshi SHIMIZU

Abstract

This investigation presented an approach for estimating the energy was during the penetration of a circular thin metal sheet by a conical punch, based on the J-integral R-curve approach to characterizing a material's resistance to fracture. The formula for the estimation of the total work done during the penetration was proposed by using the tear modulus, T. The penetration tests on the circular thin sheets of mild steel, whose thickness were 1.0, 2.1 and 3.1 mm, and whose diameters were 450 mm, were carried out at a quasi-static speed using conical punches with punch angles of 30 and 45 degree. The effects of plate thickness and punch angle on the plate failure mode, the number of petals, the thickness directional strain ϵ_z , and the total work done were investigated. The estimated values of the total work done by the proposed formula was found to be in fairly agreement with experimental results.

1. 緒 言

薄板の貫通破壊現象を解明することは、薄板構造物の衝突事故に対する安全性を予測する上で非常に重要であり、従来より多くの研究が報告されている^{1)~7)}。しかし、これらの研究は、主として破壊モードの実験的解明あるいはき裂が発生するまでの板の吸収エネルギーの推定を対象にしており、き裂発生以後の吸収エネルギーに対しては未だ十分な解明は行われていない。

一方、破壊力学は近年著しく発展し、その適用範囲が延性き裂進展の分野まで拡張されてきた。すなわち、延性材料のき裂進展抵抗として、Tearing Modulus, T および Crack Tip Opening Angle, CTOA が、Paris⁸⁾および Sih⁹⁾によってそれぞれ提唱され、それらの破壊パラメータとしての有効性が多くの研究者によって検討されつつある^{10)~14)}。しかし、これらのパラメータに対する検討は面内変形に限定されており、貫通破壊に代表されるような面外変形に対して研究された例は少ない。

本研究は、まず Tearing Modulus の概念を薄板の貫通破壊における延性き裂進展に適用し、貫通破壊時における薄板の吸収エネルギーの推定式を提案した。次に、周辺を固定した円板の中心に、2種類の項角をも

つ円錐ポンチをそれぞれ準静的に突入させ、板の貫通破壊に要する吸収エネルギーおよびそれに及ぼす項角の影響を実験的に調べた。さらに、著者らの提案した推定式を用いて吸収エネルギーを求め、これと実験結果を比較することにより、本推定式の妥当性を検証した。

2. 板の貫通破壊エネルギーの推定式の導入

円錐ポンチの押し付け荷重 P とポンチ突入量 λ の関係は、模式的に Fig. 1 のように表される。図中 OA (領域 I) は薄板の局所的な塑性曲げ変形領域であり、BC (領域 II) は安定き裂進展領域である。

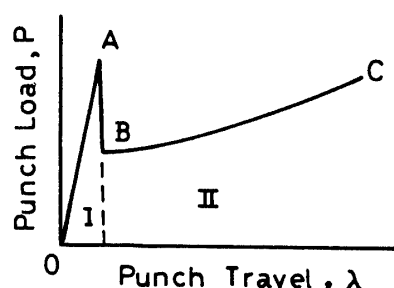


Fig. 1 Model of load-displacement curve in penetration test

ここで、安定き裂進展領域 (領域 II) の変形を Fig. 2 に示すように仮定する。すなわち、Fig. 2(a) に示すように、き裂先端を直線で結ぶ多角形状に板が曲げ変形

*機械工学科

**大学院機械工学専攻

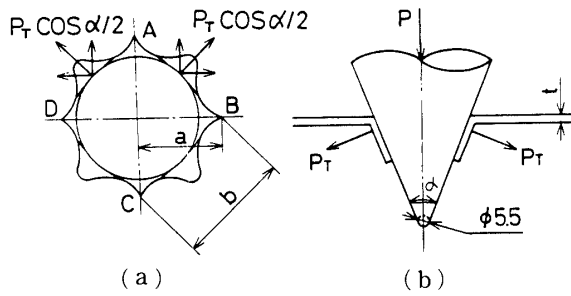


Fig. 2 Deformation of specimen for penetration test

を起こすと仮定すると、摩擦が無い場合、ポンチ荷重 P は Fig. 2 (b) に示すように、板に垂直に作用する荷重成分 P_T に分解できる。この P_T は、板の曲げ変形とき裂進展に費やされる。

曲げ変形に対して材料を剛完全塑性体（降伏応力 σ_0 ）で仮定すると、板の単位幅当たりの全塑性曲げモーメント M_0 は $t_2 \sigma_0 / 4$ となる。したがって曲げによるひずみエネルギー U_B は、板厚を t 、き裂数（花びらの数）を n とすると、

$$U_B = \int_0^{\pi/2 - a/2} M_0 b \cdot d\phi \quad \dots\dots(1)$$

$$= \frac{nt^2 \sigma_0}{4} \left(\frac{\pi}{2} - \frac{a}{2} \right) b$$

ここで、Fig. 2 に示す a を円板の中心からき裂先端までの距離とすると、 b は次式で表される。

$$b = \begin{cases} \sqrt{2} \cdot a & n = 3 \\ \sqrt{2} \cdot a & n = 4 \end{cases} \quad \dots\dots(2)$$

一方、き裂の進展に費やされるエネルギーは以下のようにして求めることができる。既報¹⁵⁾で著者らは、薄鋼板の $J-R$ 曲線が Fig. 3 に示すようになることを報告した。すなわち、領域 I が鈍化領域、領域 II が dJ/da が減少する領域、さらに領域 III は dJ/da が一定となる領域である。

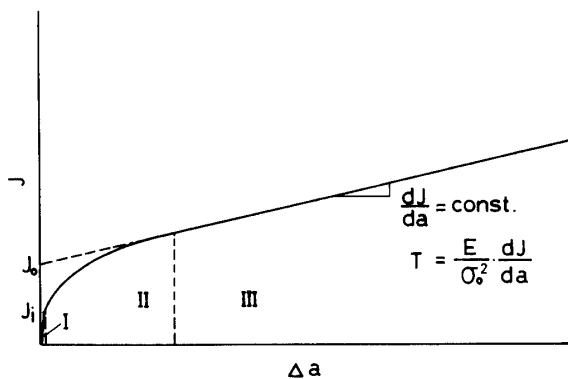


Fig. 3 J-R curve

本解析では、貫通試験においてはき裂進展量が非常に大きいことを考慮して、 J と a の関係を同図の点線で示すように仮定する。すなわち、Tearing Modulus $T = (E/\sigma_0^2) \cdot (dJ/da)$ を用いて、

$$J = \frac{1}{t} \cdot \frac{dU}{da} \cdot T \cdot a + J_0 \quad \dots\dots(3)$$

なお、 E は縦弾性係数である。上式が Fig. 2 (a) に示す貫通破壊時においても成り立つとすると、き裂を進展させるエネルギー U_c はき裂数が n の場合、次式のように表される。

$$U_c = n \int_0^a J \cdot da \quad \dots\dots(4)$$

$$= \left(\frac{\sigma_0^2 T}{2E} a^2 + J_0 a \right) nt$$

したがって、薄板の貫通破壊に要するエネルギー U_T は、式(1)と式(4)より、

$$U_T = U_c + U_B + U_0 \quad \dots\dots(5)$$

となる。式(5)が著者等の提案した貫通破壊に要する薄板の吸収エネルギーの推定式である。なお、 U_0 はき裂を生じる以前の板の局所的な塑性変形に費やされるエネルギーであり、Fig. 1 に示す領域 I の面積に相等する。この限界エネルギー U_0 は、すでに千葉、大手ら^{5),6)}によって次式に示す実験式で与えられている。

$$U_0 = 2.94 \cdot 10^9 \cdot t^{1.5} \cdot D^{1.5} [J] \quad \dots\dots(6)$$

ここで、 D はポンチ先端の R 部の直径である。

3. 実験方法

実験には、板厚 1.0mm, 2.1mm および 3.1mm の SS41 軟鋼を納入のまま用いた。Table 1 に各板厚に対するロール方向の機械的性質を示す。

Fig. 4 に実験装置を示す。薄鋼板貫通試験片は直径

Table 1 Mechanical properties of SS41

Thickness (mm)	Yield Stress (MPa)	Ultimate Strength (MPa)	Elongation (%)
1.0	185	292	45
2.1	247	339	38
3.1	252	390	41

450mm の孔をもつ支持台に、厚さ 20mm の軟鋼板とともにボルトで固定した。使用した円錐ポンチは、Fig. 5 に示すように、頂角 30 度および 45 度の角度をもち、先端にはいずれも直径 5.5mm の鋼球を埋め込んだ。また、貫通時のき裂進展長さは接写写真から読取った。

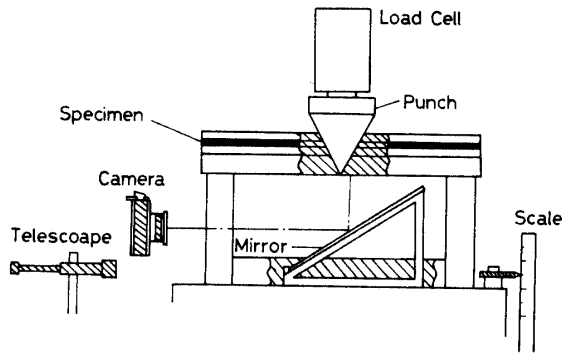
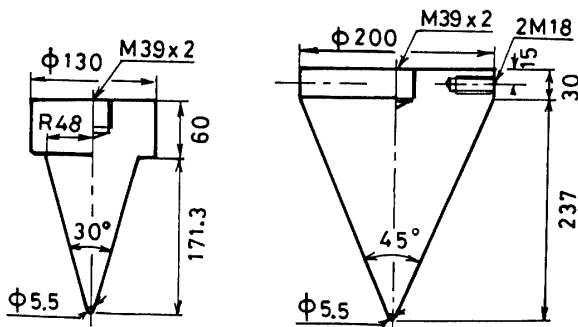


Fig. 4 Test apparatus



- (a) Punch angle 30 degree
- (b) Punch angle 45 degree

Fig. 5 Configuration of punch

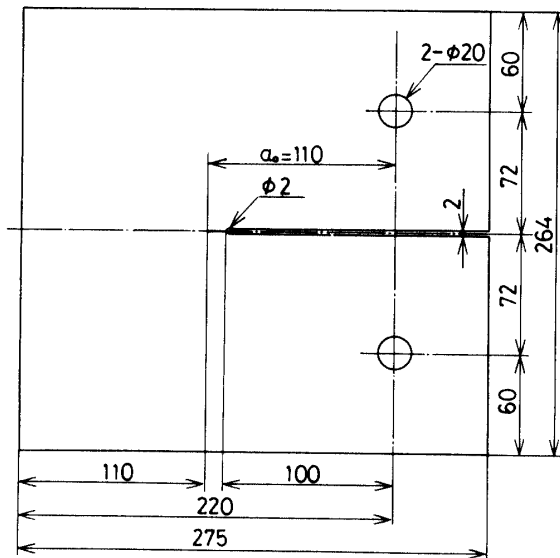


Fig. 6 Compact tension specimen

Fig. 6 に、J-R 曲線の測定に用いたコンパクト引張試験片の形状、寸法を示す。なお、J の算出に当たっては Ernst¹⁶⁾ の簡便式を用いた。

4. 実験結果および考察

各板厚試験片に対する荷重 P とポンチ突入量 λ の

関係を Fig. 7 に示す。いずれの板厚についても P はき裂発生までは λ の増加とともに増加するが、いったんき裂が発生するとその値は急激に低下し、その後の荷重の増加の程度は緩慢であった。また、ポンチ頂角45度の実験値が30度のものより大きくなる傾向がみられた。

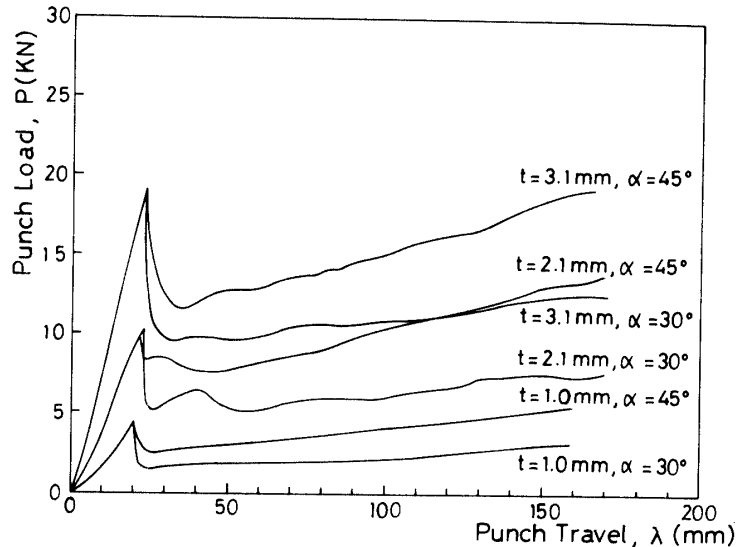


Fig. 7 Relation between load and displacement

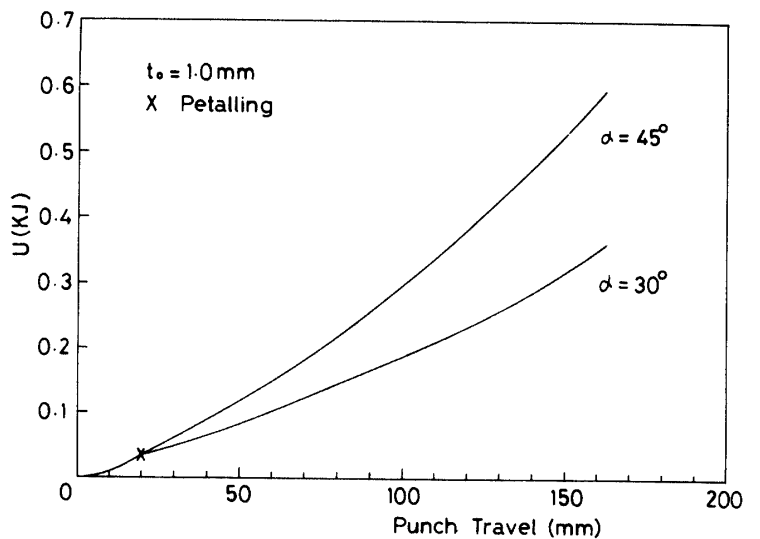


Fig. 8 Relation between total work done and displacement

Fig. 8 に貫通破壊時の吸収エネルギー U とポンチ突入量の関係を示す。いずれの板厚についても、ポンチ角45度の実験結果がポンチ角30度のそれよりも大きくなった。この実験結果を、き裂進展量 Δa で整理すると Fig. 9 に示すようになった。同図は板厚 1 mm の実験結果であり、U とき裂進展量の関係は一本の曲線で表わされることがわかる。

Fig. 10 に板厚 1 mm、ポンチ頂角45度の貫通破壊時

の写真を示す。Fig. 10 (a)に示すように、き裂進展開始においてき裂数は3となっており、(b)に見られるように、変形が進んでもき裂進展方向は変化しないことがわかる。

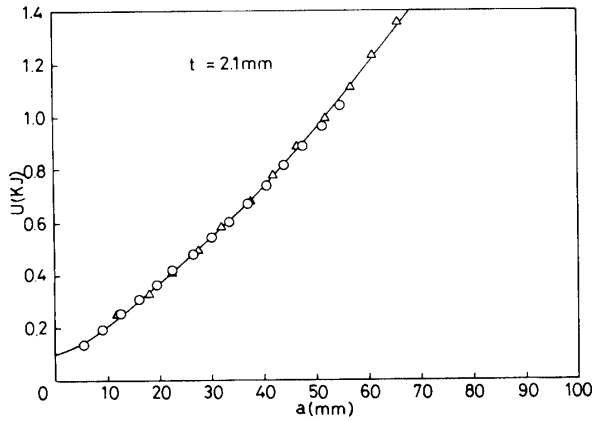
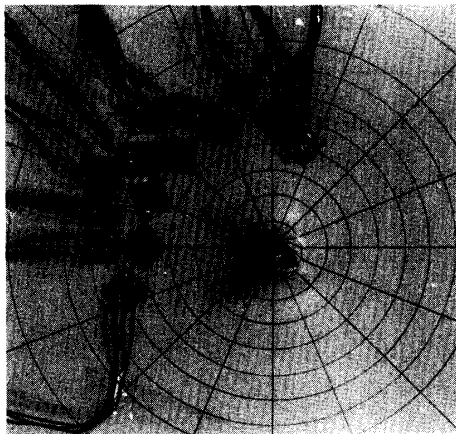
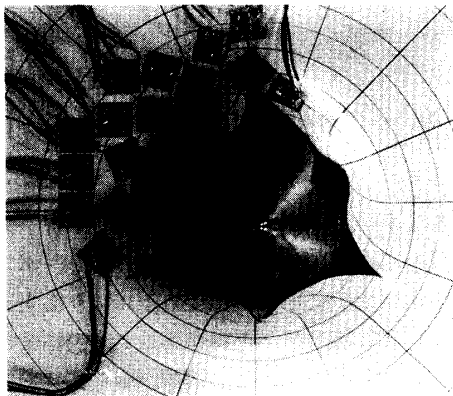


Fig. 9 Comparison of total work done between experimental results by using punch angle 30 and 45 degree



(a)



(b)

Fig. 10 Fracture mode of penetration for 1.0mm thick specimen

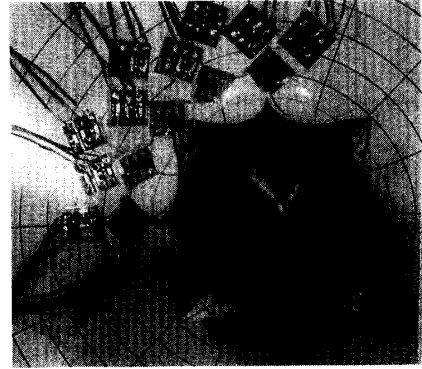


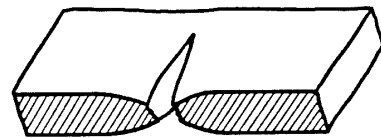
Fig. 11 Fracture mode of penetration for 2.1mm thick specimen

Fig. 11 に板厚2.1mm, ポンチ頂角45度の貫通破壊時の写真を示す。き裂数は4であり、き裂先端を結ぶ線上で著しい曲げ変形、いわゆる塑性関節に類似した現象を生じた。

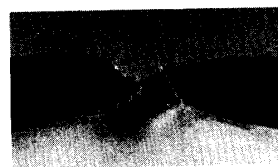
Table 2 Number of petals

Punch Angle	Thickness (mm)		
	1.0	2.1	3.1
30	3	4	4
45	3	4	4

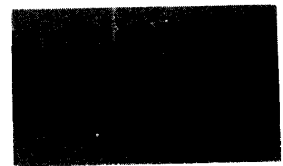
Table 2 に各板厚およびポンチ頂角に対するき裂数 n を示す。 n は板厚のみに依存しており、本実験で用いたポンチ頂角の範囲では、 n に及ぼす頂角の影響はみられなかった。



(a)



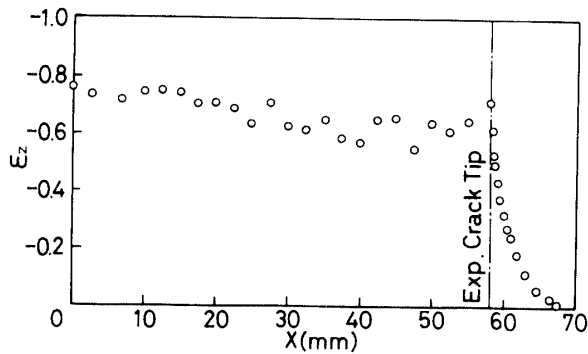
(b) penetration specimen



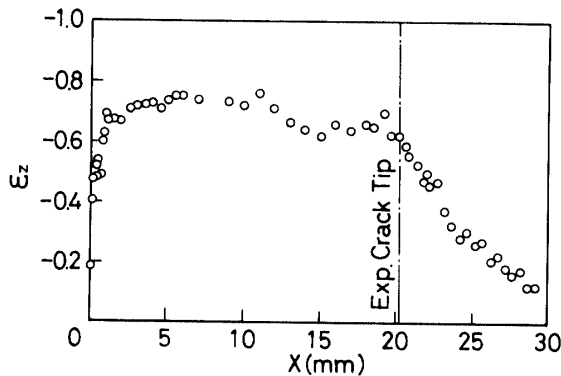
(c) compact tension specimen

Fig. 12 Photographs of specimen cross section

破断後の板厚2.1mmの貫通破壊試験片とコンパクト引張試験片の断面写真を Fig. 12 に示す。同図より貫通試験片の破壊は曲げ変形を伴っているが、き裂先端のみに注目すると、コンパクト引張試験片のそれと全く類似した、すなわち引裂きによって破壊していると考えられることができる。この考えを裏付けるために、



(a) Penetration specimen



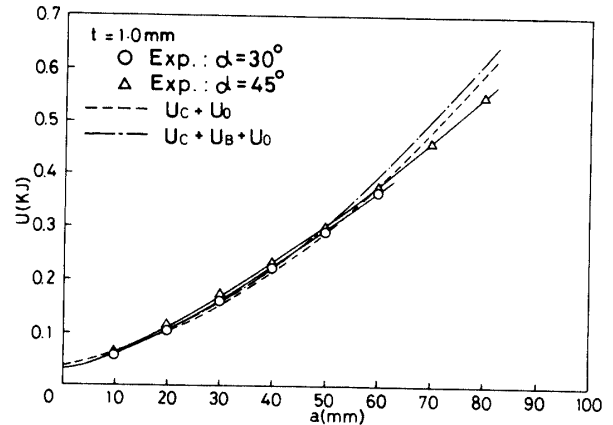
(b) Compact tension specimen

Fig. 13 Variation from through thickness strain in the direction of crack growth

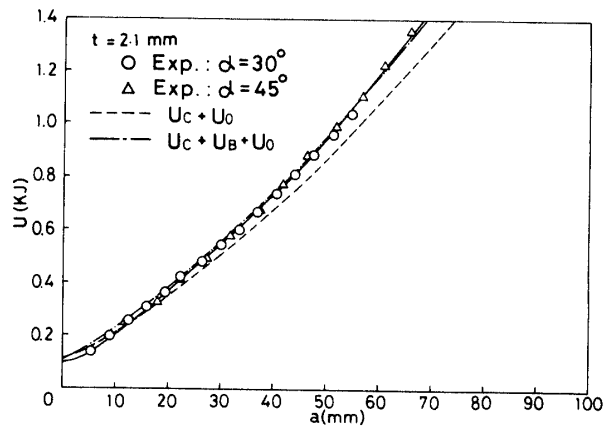
貫通破壊試験片およびコンパクト引張試験片の破断後の板厚方向のひずみ分布を調べると、Fig. 13 に示すようになった。ここで、 x はそれぞれ貫通破壊試験片の中心および初期き裂先端からの距離である。同図にみられるようにき裂が十分進んだ段階では、両試験片とも板厚方向のひずみ ϵ_z は約 -70% 一定になった。他の板厚についても同様な結果が得られており、このことより貫通破壊のき裂進展現象が2章で仮定したように、面内変形破壊(Mode I)として取扱えると判断できる。

Fig. 14 は、各板厚試験片の貫通破壊に要したエネルギー U_T とき裂進展量 Δa の関係を示している。各板厚試験片のいずれも頂角 α が45度と30度の実験結果はほぼ一致しており、 U_T と Δa の関係に及ぼすポンチ頂角の影響は少なかった。

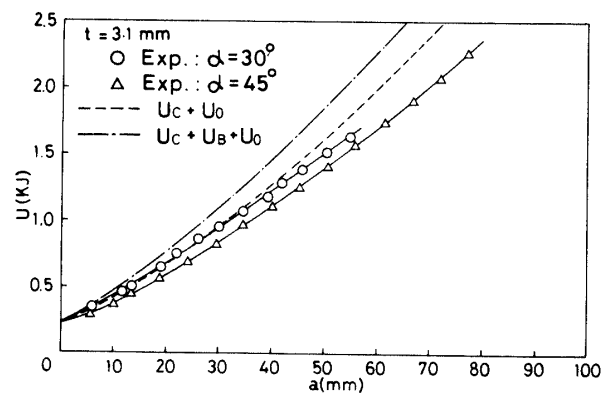
ここで、式(1)~(6)を用いて U_T と Δa の関係を求めると、それぞれ同図の破線および一点鎖線で示すようになった。破線はき裂進展に要するエネルギー、一点鎖線はそれに曲げ変形の影響を考慮したものである。両計算結果の比較から明らかなように、貫通破壊に寄与する曲げエネルギーはき裂進展に要するエネルギーと比較してかなり少ないことがわかる。また、一点鎖線で示す計算結果は、いずれの板厚に対しても実験結果とほぼ



(a) $t = 1.0\text{mm}$



(b) $t = 2.1\text{mm}$



(c) $t = 3.1\text{mm}$

Fig. 14 Comparison of total work done between calculated values and experimental results

一致した。このことから板厚が薄い場合、貫通破壊に要するエネルギーは、試験片の材料定数および J-R 曲線を求めることにより推定可能であることが明らかになった。なお、計算に用いた式(3)の Tearing Modulus T および J_0 の値を Table 3 に示す。

5. 結 言

周辺を固定した直径450mm、板厚1.0, 2.1および3.1mmの軟鋼板試験片中心に、頂角の異なる円錐ポンチを突入させて貫通破壊実験を行った。さらに、著者らが提案した推定式を用いて板の貫通破壊エネルギーを求め、これと実験結果を比較することによって本推定式の妥当性を検証した。本研究で得られた結果を要約すると次のようになる。

(1)貫通破壊後のき裂数は、板厚1.0mmで3, 2.1mmおよび3.1mmで4になり、本実験で用いたポンチ頂角の範囲では、き裂数に及ぼす頂角の影響はみられなかった。

(2)貫通破壊時における板厚方向の破断ひずみは、コンパクト引張試験片のそれとほぼ一致した。

(3)貫通破壊に要する吸収エネルギーとき裂長さの関係に及ぼすポンチ角の影響は少なかった。

(4)薄板の材料定数およびコンパクト引張試験によって得られた Tearing Modulus T を本研究で提案した推定式に代入することにより、板の貫通破壊に要する吸収エネルギーの評価が可能になった。

参 考 文 献

- 1) Johnson, W. ほか3名, J. Strain Analysis, 8 (1973), 228
- 2) Johnson, W., Mamalis, A. G., Int. J. Mech. Sci., 20 (1978), 849
- 3) Backman, M. E., Goldsmith, W., Int. J. Eng. Sci., 16 (1978), 1
- 4) Ghosh, S. K., Travis, F. W., Int. J. Mech. Sci., 21 (1979), 1
- 5) 千葉・ほか3名, 機論, 47-422, A (昭56), 1101
- 6) 大手・ほか3名, 機論, 47-424, A (昭56), 1373
- 7) 千葉・ほか3名, 機論, 48-429, A (昭57), 683
- 8) Paris, P. C. ほか3名, ASTM STP, 668 (1978), 5
- 9) Shin, C. F. ほか2名, ASTM STP, 668 (1979), 65
- 10) Willoughby, A. A. ほか2名, Int. J. Fract., 17 (1981), 449
- 11) Lautridou, J. C., Pineau, A., Eng. Frac. Mech., 15 (1981), 55
- 12) 金沢・ほか2名, 造船論, 146. (昭54), 474
- 13) 坂・ほか4名, 機論, 49-443, A (昭58), 829
- 14) 河野・ほか3名, 機講論, No. 848-3 (昭59-11), 38
- 15) Shimizu, S., Kawano, S., Advance in Fracture Research, 4 (1CF5) (1981), 1675
- 16) Ernst, H. A. ほか2名, ASTM STP, 743 (1981), 476

(昭和60年10月15日 受理)