(昭和 50 年 5 月日本造船学会春季講演会において講演)

厚鋼板の塑性曲げ (第3報)

正員 八 木 順 吉* 正員 船 木 俊 彦*
正員 賀 田 和 夫**

Bending of Wide Thick Mild Steel Plate (the 3rd report)

by Junkichi Yagi, *Member* Toshihiko Funaki, *Member*
Kazuo Kada, *Member*

Summary

In our previous papers, plastic behaviour of a thick steel plate under uniform bending in two cases of plain strain and plain stress state was analysed. And relations between bending moment and bending strain obtained by our theoretical analysis were compared with experimental ones.

In this paper, in order to study the condition of bending crack initiation, tensile tests were carried out on specimens with various transverse constrains. Comparing results of these tests with bending tests, it was found that the maximum elastic strain energy per unit volume stored in specimen at fracture might be considered as one of the criterion of crack initiation and relation between bending strain and tensile strain at the crack initiation could be explained by using the above criterion.

1 緒 言

本研究は厚鋼板の曲げ加工性,あるいは靱性を評価するための曲げ試験法の検討,ならびに曲げ亀裂発生機構を調査するために実施したものである。

第1報¹⁾では広幅の試験片を使用して純曲げ試験を行ない,曲げ亀裂は板幅の中央部の幅方向の伸び歪が零である平面歪場の領域では比較的小さい曲げ変形の段階で発生することを確認した。第2報²⁾では狭幅の試験片を使用した純曲げ試験を行ない,平面応力場の領域での曲げ亀裂は平面歪場の曲げ亀裂の発生より遅れて,かなり大きい曲げ変形の段階で認められることを明らかにした。また,純曲げ荷重下における平面歪場および平面応力場に関して任意の曲げモーメントに対する曲げ歪分布と応力分布を求める理論を導いた。大歪領域の応力-歪線図を求めるために薄平鋼板の引張試験結果を解析し,上述の曲げ理論を使用して曲げ変形機構の数値解析を行ない,曲げ試験結果と比較して十分の精度を有することを確認した。

本論文では,第1報,第2報で述べた実験から求められた曲げ亀裂と曲げ歪との関係および理論から求められた板厚内部の曲げ歪分布と応力分布を使用して平面歪場での曲げ亀裂と平面応力場での曲げ亀裂との大きさおよび発生時期等に関する差異を明らかにすると共に,板幅方向に各種の拘束を与えた引張試験より得られる引張亀裂を解析して,曲げ亀裂の発生と引張亀裂の発生との相関を検討した。

2 曲 げ 亀 裂

2.1 曲げ亀裂発生に関する実験

2.1.1 材 料

実験に使用した材料は公称板厚 19 mm の軟鋼 SM 41 B 材である。化学成分および JIS 4 号試験片を使用した引張試験から得られた機械的性質を Table 1, 2 に示す。

* 大阪大学工学部

** 大阪大学大学院

Table 1 Chemical Compositions (%)

C	Si	Mn	P	S
0.17	0.02	1.09	0.012	0.017

Table 2 Mechanical Properties

$\sigma_{1.y.2}$ kg/mm ²	$\sigma_{u.y.2}$ kg/mm ²	σ_B kg/mm ²	E kg/mm ²	δ %	ϕ %
24.2	25.5	43.9	21000	35.5	60.1

Fig. 1 Bending Test Method

Fig. 2 Shape of Test-piece

2.1.2 試験装置および試験片

第1報で著者が提案した“鋼板の曲げ試験方法に対する一試案”に示した中央集中荷重方式 (Fig. 1), および試験片 (Fig. 2) を採用した。第1報で明らかにしたように, 板幅・板厚比 B/T が5以上の試験片 (但し, 板厚 $T=18$ mm) を使用した場合, 板幅方向の歪が零である平面歪場の領域が板幅 B の70% 以上となり, 平面歪場領域に曲げ亀裂を発生させるに必要な曲げ歪の量は B/T に無関係ではほぼ一定となる。また平面応力場に曲げ亀裂を発生させる試験片の B/T は小なる程, 理想的な平面応力場が得られるので望ましいが, B/T が小さくなると横倒れ座屈が生じ易く, また集中荷重治具の半径を小にすると試験片の集中荷重治具との接触部近傍に極端に大きい局部圧縮変形が生じ平面応力場で曲げ亀裂を発生させるに必要な曲げ変形, 曲げ歪を与えることが困難になる。以上の事柄を考案して試験片および試験装置の諸寸法を Table 3 に示すよう定めた。

なお, 使用した試験機は 100t アムスラー型万能試験機である。

2.1.3 曲げ歪の測定

曲げ亀裂の発生時の曲げ歪を求めるために, 先ず第1報に示したように, 最小目盛 1/1000 mm のダイヤルゲージを用いた曲率計を使用して試験片引張側の曲げ亀裂発生箇所の曲率半径 r_b を求めた。次に, Fig. 2 に示す

Table 3 Size of Test-piece

Type	L (mm)	B (mm)	T (mm)	B/T	R (mm)	R/T	D (mm)	$\epsilon_{\theta max}$	$2\theta_{min}$
CB5A	104	90	18	5.0	5.0	0.278	30	0.65	105
					2.5	0.139	30	0.78	135
CB5B	104	90	12	7.5	5.0	0.417	30	0.55	95
					2.5	0.208	30	0.71	115
CB5C	104	90	6	15.0	5.0	0.833	30	0.38	70
					2.5	0.417	30	0.55	95
CB1	104	18	18	1.0	5.0	0.278	30	0.65	105
					2.5	0.139	30	0.78	135
CB2	104	18	36	0.5	5.0	0.139	30	0.78	135

* CB5 A, B, C……平面歪場での曲げ亀裂を測定

CB 1, CB 2……平面応力場での曲げ亀裂を測定

** $\epsilon_{\theta max}$ は試験片, 集中荷重治具の組合せによって得られる試験片

引張側表面の最大曲げ歪, $2\theta_{min}$ は $\epsilon_{\theta max}$ を生じるに必要な最小曲げ角度

Fig. 3 Relation between nominal Bending Strain at Fracture $\epsilon_{\theta f}$ and Plate Thickness T

50 倍拡大鏡を用いて測定した。これらの r_b および s の値を用い次式を使用して曲げ歪を算定した。

曲げ亀裂発生箇所の平均公称曲げ歪

$$\epsilon_{\theta f} = r_b \cdot \sin\left(\frac{s/2}{r_b}\right) - 1$$

2.1.4 曲げ亀裂の発生と曲げ歪との関係

Fig. 3 は平面歪場純曲げ, 平面応力場純曲げモーメントを负荷させたとき, 曲げ試験片板厚と曲げ亀裂の発生する曲げ歪 (公称歪) との関係を, 曲げ亀裂長さをパラメータとして表わしたものである。なお, 図中に半径 $R=2.5$ mm, 5 mm の集中荷重治具を使用したときの曲げ試験片板厚と, この板厚の試験片に生じる最大曲げ歪 (公称歪) との関係をも示す。図より, 平面歪場純曲げ, 平面応力場純曲げのいずれの場合に対しても, 曲げ試験片の板厚が大きくなると曲げ亀裂を発生させるに必要な曲げ歪 (公称歪) は漸減し, 平面歪場では板厚 18 mm 以上, 平面応力場では板厚 36 mm 以上である値に収斂する傾向がある。また同一曲げ亀裂長に対する平面歪場での曲げ亀裂発生歪 (公称歪) は平面応力場での曲げ亀裂発生歪に対して約 40% 程度小さい。Fig. 4 は曲げ試験片の板厚をパラメータとして, 曲げ亀裂長さと, その大きさの曲げ亀裂を発生させるに必要な曲げ歪 (公称歪) との関係を表わしたものである。曲げ亀裂長さが 0.2~0.8 mm 程度の大きさの範囲では曲げ亀裂長さと, その大きさの曲げ亀裂を発生させる曲げ歪 (公称歪) との間には近似的に線性の関係がある。

Fig. 5 Circumferential Stress σ_{θ} versus Circumferential logarithmic Strain $\bar{\epsilon}_{\theta}$ and Lateral Stress σ_z versus $\bar{\epsilon}_{\theta}$ of Uniform Bending in Plane Strain field and in Plane Stress field

Fig. 4 Relation between Bending Crack Length $2C$ (mm) and nominal Bending Strain $\epsilon_{\theta f}$

ように試験片引張側中央部分に 2mm 間隔で写真触刻をした格子の曲げ亀裂発生箇所での格子間隔 s を

Fig. 6 Slope of Circumferential logarithmic Strain distribution $\left(\frac{d\bar{\epsilon}_{\theta}}{dr}\right) / \bar{\epsilon}_{\theta}$ and Slope of Circumferential Stress distribution $\left(\frac{d\sigma_{\theta}}{dr}\right) / \sigma_{\theta}$ versus $\bar{\epsilon}_{\theta}$ of Uniform Bending in Plane Strain field and in Plane Stress field

2.2 考 察

曲げ試験片の板厚増加に伴って、平面歪場、平面応力場のいずれの場合にも曲げ亀裂の発生歪が漸減しある値に収束する傾向がある要因、また同一の長さの曲げ亀裂長を発生させるに必要な曲げ歪（公称歪）が平面歪では平面応力場に比べて約 40% 程度小さく目である要因等を検討するため、第1報、第2報に示した平面歪場および平面応力場での純曲げ変形理論を使用して曲げ亀裂が発生する断面での歪分布および応力分布を求めた。第1報、第2報で明らかにしたように、引張側表面では板厚方向の応力 σ_r は零であり、表面近傍では σ_r の板厚方向の勾配は極めて小さく零に近い。従って曲げ亀裂が発生する引張側の表面層では σ_r は近似的に零とみなすことができる。Fig. 5 は板厚 18 mm の曲げ試験片の曲げ亀裂が発生する断面の表面層における、平面歪場では曲げ応力 σ_θ および板幅方向の応力 σ_z と曲げ歪（対数歪） $\bar{\epsilon}_\theta$ との関係を示す。平面応力場では近似的に単軸応力状態とみなされるので σ_θ と $\bar{\epsilon}_\theta$ との関係を示す。Fig. 6 は Fig. 5 に対応する図で、曲げ亀裂の発生する断面の表面層における曲げ歪勾配を示すパラメーター $(d\bar{\epsilon}_\theta/dr)/\bar{\epsilon}_\theta$ 、曲げ応力勾配を示すパラメーター $(d\sigma_\theta/dr)/\sigma_\theta$ と曲げ歪（対数歪） $\bar{\epsilon}_\theta$ との関係を示す。Fig. 7 は平面歪場において試験片の板厚 T をパラメーターとして $(d\bar{\epsilon}_\theta/dr)/\bar{\epsilon}_\theta$ および $(d\sigma_\theta/dr)/\sigma_\theta$ と $\bar{\epsilon}_\theta$ との関係を示したものである。

さて、平面歪場では板厚が異なる曲げ試験片に対して引張側表面の曲げ歪が等しい場合、曲げ亀裂に関する力学的条件として考えられる要素は表面層の板厚方向の曲げ歪分布および応力分布の板厚の変化による相異である。Fig. 7 から判るように曲げ試験片の板厚増加に伴って曲げ歪勾配は減小し、板厚が無限大で曲げ歪の勾配は零となり幅方向の歪を拘束した場合の引張亀裂の発生条件に漸近するものと考えられる。次に、平面歪場での曲げ亀裂と平面応力場での曲げ亀裂の相関を考える。平面歪場および平面応力場で曲げ亀裂が発生する表面層での力学的条件の相異は次のようなものである。すなわち、平面歪場での曲げ亀裂が発生する表面層は二軸応力状態、曲げ応力 σ_θ と、曲げ応力の 1/2 の大きさの板幅方向の応力 σ_z の引張応力が働いており、平面応力場での曲げ亀裂が発生する表面層は一軸応力状態、曲げ応力 σ_θ のみが働き、しかもその大きさは Fig. 5 から判るように同じ大きさの曲げ歪に対して平面歪場の σ_θ の 0.85 倍である。また Fig. 6 から判るように、同じ大きさの曲げ歪に対しては表面層での曲げ歪勾配は平面歪場、平面応力場ともほぼ等しい。曲げ応力勾配は平面応力場

Fig. 7 Slope of Circumferential logarithmic Strain distribution $\left(\frac{d\bar{\epsilon}}{dr} \theta\right)/\bar{\epsilon}_\theta$ and Slope of Circumferential Stress distribution $\left(\frac{d\sigma}{dr} \theta\right)/\sigma_\theta$ versus $\bar{\epsilon}_\theta$ of uniform Bending in Plane Strain field

Fig. 8 Shapes of Tensile Test-pieces with Lateral Constraint

では若干大きく、平面歪場での値の約 1.15 倍であることが判る。従って、曲げ亀裂の発生に関する力学的条件としては表面層での応力状態を第一義的に考える 必要があり、第二義的には曲げ試験片の板厚の影響、すなわち、表面層での曲げ歪勾配の影響を考慮する必要があると思われる。

3 引 張 亀 裂

平面応力場純曲げでは単軸引張応力 σ_θ のみが働き、平面歪場純曲げでは二軸引張応力 ($\sigma_\theta, \sigma_z = 1/2 \sigma_\theta$) が働いており、この相異が亀裂発生に影響を与えると考えられる。この応力状態の相異が延性亀裂発生に対する影響の程度を詳細に検討するために、曲げ試験に使用した板厚 19 mm の SM 41 B 材から板厚 3 mm の薄平板を切り出し、これに引張試験時に生じるくびれ現象を拘束することにより種々の二軸引張応力状態を作りだし、引張亀裂発生時の伸び歪を実験的に求めた。

3.1 試 験 片

試験片の形状および寸法を Fig. 8 と Table 4 に示す。実験に使用した引張試験片は大別して4種類である。これらの内の3種類は基準となる JIS 1 号引張試験片 TO-type、くびれ現象を段階的に拘束する段付引張試験片 TL-type およびくびれ現象をほぼ完全に拘束する平面歪場引張試験片 TS-type である。これらの引張試験片はいずれも試験片の最小断面、中心線上で単純引張試験から平面歪場へと二軸応力状態を変化させた場合の引張亀裂の発生状態を調査するためのものである。残りの1種類は切欠きを有する引張試験片 TN-type であり、切欠き底の弾性応力集中係数 K_t を2から8へと変化させたものである。これらの試験片は K_t の相違による切欠き底の伸び歪の勾配の影響を検討すると共に切欠き底近傍の伸び歪勾配が零であるときの単軸引張応力状態での引張亀裂の発生を類推することを目的としている。歪分布の計測には歪が小さい間は歪ゲージ YF-2b を用い、歪が大きくなった場合は 1 cm 本 100 のグリッドを有するモアレ・シートを使用した。また使用した試験機は容量 50 t の定変位型引張試験機である。

3.2 実験結果および考察

Fig. 9 は伸び歪 (対数歪) $\bar{\epsilon}_y$ と、幅方向の歪 (対数歪) $\bar{\epsilon}_x$ の $\bar{\epsilon}_y$ に対する比の絶対値 $|\bar{\epsilon}_x|/\bar{\epsilon}_y$ との関係を破断に至るまで求めたものである。曲線 ABC は破断伸び歪 $\bar{\epsilon}_{yf}$ と破断時の $|\bar{\epsilon}_x|/\bar{\epsilon}_y$ との関係を示す。Fig. 10 は単

Fig. 9 Relation between Tensile logarithmic Strain $\bar{\epsilon}_y$ and Ratio $|\bar{\epsilon}_x|/\bar{\epsilon}_y$, where $\bar{\epsilon}_x$ is logarithmic Lateral Strain

Fig. 10 Distribution of Tensile logarithmic Strain $\bar{\epsilon}_y$ and Ratio $|\bar{\epsilon}_x|/\bar{\epsilon}_y$ at minimum area section

純引張試験片 TO-type, および切欠きを有する TN-type の試験片の内 $K_t=2, 4$ の2種類の場合について各荷重段階での最小断面における ϵ_y , および $|\epsilon_x|/\epsilon_y$ の分布を示す。

TS-type, TL-type, TO-type では最小断面の中心線上(伸び歪分布の勾配が零の点)に引張り亀裂が発生し, 若干の伸び変形が進行した後に全断面破断が生じる。また, 切欠きを有する TN-type では伸び歪勾配が大である $K_t=4, 6, 8$ の試験片では近似的に単軸応力状態であるとみなし得る。換言すれば $|\epsilon_x|/\epsilon_y=0.5$ (圧延による異方性等により実験結果では $|\epsilon_x|/\epsilon_y=0.47$) の切欠き底に引張亀裂が発生し, 若干の変形が進行した後に破断が生じる。 $K_t=2$ の場合は Fig. 10 から判るように最小断面の伸び歪分布がほぼ一様であるので, 歪勾配のないときの単軸引張応力時の破断歪として $K_t=2$ の破断歪を採用すべきであるかと, 一応考えられるが, 荷重時の試験片の最小断面を詳細に観察すれば, 切欠き感度の鋭い $K_t=4\sim 8$ の場合のように切欠き底の引張り亀裂が認められない内に, 瞬間的に全断面破断が生じる。従って, 単軸引張り応力状態で伸び歪の勾配が零であるときの破断歪 ϵ_{yf} は伸び歪勾配が大である $K_t=4\sim 8$ の ϵ_{yf} より推定しなければならない。また, Fig. 9 の破断曲線 ABC に達するまでに確認された引張り亀裂の大きさは TS-type を除けば約 1.5 mm であるが, TS-type では約 1.2 mm である。TS-type の荷重履歴を示す $\epsilon_y \sim |\epsilon_x|/\epsilon_y$ 曲線に近い荷重履歴の平面歪場純曲げ試験で得られた Fig. 4 の曲げ亀裂長さとの関係から, TS-type で 1.5 mm の大きさの引張り亀裂を生ずるに必要な伸び歪を推定すると Fig. 9 に $\triangle$ で示す R および S 点の伸び歪が得られる。従って, 亀裂長さ $2c=1.5$ mm の大きさの引張亀裂は Fig. 9 の斜線部で示される領域に含まれる。

4 曲げ亀裂の発生と引張り亀裂の発生との相関

延性破壊の物理的機構を解明するため金属学的な立場から多くの観察がなされており, それらに基づいた理論が提唱されている。これらの延性破壊条件に関する諸理論のうち, 結晶粒内に発生した個々の空孔の挙動の解析から出発したミクロ的な理論としては, Gurland⁸⁾, Thomason⁴⁾, Maclintock⁵⁾, 南雲⁶⁾ 等のものがある。一方, ややマクロ的な立場としては, 空孔の合体機構を有限要素法を用いて解析し巨視的な工業歪でもって延性破壊条件を検討した Needleman⁷⁾ の数値解析がある。個々の空孔の合体機構を直接に対称とせず, マクロ的な量でもって条件づけようとする理論として, 大矢根⁸⁾ は三次元の多孔質体の塑性理論を適用して体積歪が一定値に達したときをもって, また Cockcroft⁹⁾ 等は塑性変形中の最大引張り応力を荷重の履歴に沿って等価歪で積分した値が, 林¹⁰⁾ 等は応力の静水圧成分に対して同様な積分値がある一定の値に達したとき, 原¹¹⁾ は Rogers¹²⁾ のくびれ中央部の破面の顕微鏡による観察結果が剪断破断形式の空孔の合体であることから Batrort と Budiansky¹³⁾ によって提唱されたすべり理論を修正し最大剪断応力の方向を向いたすべり系のみの塑性仕事がある値に達したときをもって延性破壊条件と考えた。

著者は破壊条件として塑性歪エネルギーではなく, 弾性解放歪エネルギーを用いることとし, 前者は材料に材質的な被害を与えるが亀裂の発生には後者が直接実行するものと考え, その値が一定値に達したとき破壊が生じると考えて曲げ亀裂の発生と引張り亀裂の相関性を検討した。

Fig. 11 Relation between Released Elastic Strain Energy U_e and Tensile logarithmic Strain ϵ_y

弾性解放歪エネルギー

計算に使用した応力-歪線図は第2報で明らかにした薄平板の引張試験(本論文では TO-type の引張り試験片に相当する)結果より求められたものである。TS, TL, TO-type の引張り試験片では, 前述のように引張り亀裂の発生箇所では伸び歪の勾配がないため Fig. 9 に示した亀裂発生箇所計測された伸び歪 ϵ_y および板幅方向の歪 ϵ_x とから当該箇所に働いている軸方向応力 σ_y および板幅方向の応力 σ_x を求め亀裂発生箇所の単位体積当りの弾性解放歪エネルギー U_e を次式を用いて求めた。

$$U_e = \frac{1}{2E} \{ \sigma_y (\sigma_y - \nu \sigma_x) + \sigma_x (\sigma_x - \nu \sigma_y) \}$$

但し, E はヤング率, ν はポアソン比

切欠き底を有する TN-type の引張り試験片の中で $K_t=4\sim 8$ の場合には切欠き底近傍に極端に大きい伸び歪勾配をもつため破壊条件として、切欠き底から中心線方向へ 0.2 mm の幅の平均弾性解放歪エネルギーを求めた。Fig. 11 は弾性応力集中係数 K_t をパラメータとして平均弾性解放歪エネルギー U_e と伸び歪 ϵ_y との関係を表わす。Fig. 11 から判るように $K_t=4, 6, 8$ の試験片の切欠き底に $2C=1.5$ mm の大きさの引張り亀裂

が発生するときの U_e はほぼ $0.33\sim 0.35$ kg·mm 程度で一定である。歪勾配がない理想化された単軸引張り応力が働いている場合、 $U_e=0.33\sim 0.35$ kg·mm に相当する。換言すれば、同程度の大きさの引張り亀裂が発生すると予想される伸び歪 ϵ_{yf} はほぼ $1.13\sim 1.18$ であり、Fig. 9 図の ● P 点に相当する。Fig. 12 は前述の Fig. 10 に対応して TO-type TN-type の $K_t=2, K_t=4$ の引張り試験片の最小断面における弾性解放歪エネルギーの各変形段階における幅方向の分布を示す。なお、縦軸は最小断面における弾性解放歪エネルギー U_e を破断時、破断箇所の弾性解放歪エネルギー U_{ef} で無次元化している。Fig. 12 から判るように、TO-type の引張り試験片では最小断面の中心線上に最大の弾性解放歪エネルギーが生じており、TN-type の $K_t=4$ の引張り試験片では切欠き底より若干中心線によった箇所にも最大の弾性解放歪エネルギーが認められ、最小断面上の残りの部分のそれは極めて僅かである。従って引張り亀裂は弾性解放歪エネルギーが大である箇所が発生し、残りの部分のそれは小さいため亀裂の発生時に全断面破断とならずにしばらく変形が進行した後に全断面破断が生じるものと考えられる。ところが $K_t=2$ の場合では最小断面で中心線を含む約 1/2 の断面に様な大きい弾性解放歪エネルギーが生じる。そのため亀裂の発生と同時に全断面破断が起こり、引張り試験時に最小断面において亀裂を確認することができない原因になると考えられる。このように弾性解放歪エネルギーが一定値に達したとき延性亀裂が発生すると考えると $K_t=2$ の場合には最小断面で中心線を含む 1/2 断面で、 $|\epsilon_x|/\epsilon_y$ が最小である箇所に亀裂が発生するものと考えられる。 $K_t=2$ の場合について、Fig. 10 の破断時の ϵ_y 分布と $|\epsilon_x|/\epsilon_y$ 分布および Fig. 12 の U_e/U_{ef} 分布とから亀裂長 $2C=1.5$ mm の引張り亀裂が発生すると考えられる伸び歪 ϵ_y を推定すると、

Fig. 13 Relation between Released Elastic Strain Energy U_e and Tensile logarithmic Strain ϵ_y

Fig. 12 Distribution of Ratio U_e/U_{ef} at minimum area section, where U_e is Released Elastic Strain Energy and U_{ef} is one at fracture

Fig. 9 の ● Q 点が得られる。Fig. 9 から判るように理想化された伸び歪勾配が零の単軸応力が働く場合および $K_t=2$ の場合について亀裂長さ $2C=1.5$ mm の引張亀裂が発生すると考えられる伸び歪 P 点、Q 点はいずれも他の引張り試験片について得られた斜線部で示される亀裂発生領域内に存在する。Fig. 13 は Fig. 9 の引張り試験結果を基にして求めた弾性解放歪エネルギー U_e と伸び歪 (対数歪) ϵ_y との関係を表わしたものである。Fig. 9 の斜線部で示した亀裂長 $2C=1.5$ mm

Fig. 14 Relation between Released Elastic Strain Energy U_e and Crack Length $2C$ (mm)

の発生域は Fig. 12 では U_e がほぼ $0.30 \sim 0.35 \text{ kg} \cdot \text{mm}$ の斜線部の範囲に相当する。Fig. 14 は平面歪場および平面応力場での曲げ亀裂長さ弾性解放歪エネルギーの関係を示したものである。図中に引張り試験において発生した亀裂長さとそのときの弾性解放歪エネルギーの関係をも併せて示した。平面歪場、平面応力場いずれの場合においても同一の大きさの曲げ亀裂を発生させるに必要な弾性解放歪エネルギーはほぼ等しい。次に引張り亀裂と曲げ亀裂の発生に関して考察する。曲げ試験では、引張り試験の場合のような大きい曲げ歪を試験片に与えることは実験の技術上困難である。従って、Fig. 9 に示す引張り試験の中で最小の伸び歪で亀裂が発生する TS-20 の場合と曲げ試験において最大の曲げ亀裂が発生した平面歪場の場合とを比較する。Figs. 9, 14 より明らかに、前者の引張り亀裂 (大きさ $2C=1.2 \text{ mm}$ の引張り亀裂が約 60% の伸び歪 (対数歪) で発生) を発生させるに必要な弾性解放歪エネルギーは約 $U_e \approx 0.22 \text{ kg} \cdot \text{mm}$ 程度である。この引張り亀裂の大きさと弾性解放歪エネルギーとの関係は、後者の平面歪場での曲げ亀裂の大きさと弾性解放歪エネルギーの関係より推定される亀裂長さ $2C=1.2 \text{ mm}$ の曲げ亀裂を発生させるに必要な歪エネルギーにはほぼ等しい。以上の事柄より二軸応力状態での延性亀裂の発生に関して弾性解放歪エネルギーが 1 つの目安となることが実験的に判る。

5 結 言

本論文では平面歪場純曲げ変形で生じる曲げ亀裂と平面応力場純曲げ変形で生じる曲げ亀裂との相関を明らかにするために、両者の中間応力状態である二軸引張応力場を与える引張り試験を行ない、厚鋼板の曲げ亀裂の発生と引張り亀裂の発生は弾性解放歪エネルギーを考えることによりある程度、亀裂の発生条件を論じ得ることが判明した。本論文より得られる結果を列挙すると次の通りである。

- i) 二軸引張り応力場での亀裂が発生するときの伸び歪 (対数歪) ϵ_{yf} は幅方向の変形の拘束度を示すパラメータ板幅方向の歪 (対数歪) ϵ_x と伸び歪との比 $|\epsilon_x|/\epsilon_y$ とはほぼ線型の関係がある。 $|\epsilon_x|/\epsilon_y$ が小なる程 ϵ_{yf} は小である。
- ii) 近似的に、二軸引張応力状態では弾性解放歪エネルギーが一定値に達したとき亀裂が発生する。
- iii) 切欠き等を有して伸び歪勾配が大である場合には切欠き底で 0.2 mm 程度の領域の平均弾性解放歪エネルギーが一定の値に達した時、引張り亀裂が発生し、その部分の歪勾配の大きさには殆んど無関係である。
- iv) 板幅・板厚比が 5 以上の曲げ試験片では、曲げ歪は板幅中央部より板外縁の方が大であるにも拘わらず弾性解放歪エネルギーは板幅中央部の平面歪場の方が板外縁の平面応力場より大であるため、曲げ亀裂は板幅中央部の平面歪場に発生した。
- v) 平面歪場の曲げ試験で認められる試験片板厚の大きさによる亀裂発生歪の大きさの相異は曲げ歪の板厚方向の勾配が切欠きを有する引張試験片の板幅方向の伸び歪勾配に比べて小さいため弾性解放歪エネルギーに及ぼす伸び歪勾配の影響は小さく、任意の板厚の曲げ試験片に対して、同一曲げ亀裂長さに対する弾性解放歪エネルギーは一定とならない。この曲げ亀裂発生に関する曲げ歪の板幅方向の歪勾配の影響については今後、解明すべき課題である。

本研究の一部は日本鋼構造協会材料小委員会の研究項目の 1 つとして実施された。研究の遂行に当って奥村委員長をはじめ寺沢名誉教授ならびに各委員の方々のご指導および有益なご討論を賜った。ここに厚く感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 八木順吉, 船木俊彦 他: 厚鋼板の塑性曲げ (第 1 報), 日本造船学会論文集第 135 号, (1974).
- 2) 八木順吉, 船木俊彦 他: 厚鋼板の塑性曲げ (第 2 報), 日本造船学会論文集第 136 号, (1974).
- 3) Gurland, J. et. al: The Mechanism of Ductile Rapture of Metal Containing Inclusions, T. A. S. M., Vol. 56, (1963).
- 4) Thomason, P. F.: A Theory of Ductile Fracture by Internal Necking of Cavities, J. Inst. Metals, Vol. 32, (1944).
- 5) Maclintock, F. A.: A Criterion for Ductile Fracture by Growth of Holes, J. App. Mech, Vol. 35, (1968).
- 6) 南雲道彦: 軟鋼の延性破壊過程, 第 16 回材料強度と破壊国内総合シンポジウム論文集, (1971).
- 7) Needleman, A.: Void Growth in an Elastic-Plastic Medium T. A. S. M. E., (1972).
- 8) 大矢根守哉: 延性破壊の条件式について, 日本機械学会誌, Vol. 75, (1972).
- 9) Cockcraft, M. G. et. al: Ductility and Workability of Metals, J. Inst. Metals, Vol. 96, (1968).

- 10) 林 宏信 他：鑄鉄の鍛造と破壊，第21回塑性加工連合講演会前刷，(1970)。
 - 11) 原 洋一：軟鋼における延性破壊の力学的条件，日本造船学会論文集第134号，(1973)。
 - 12) Rogers, H. C. : The Tensile Fracture of Ductile Metals, T. AIME, Vol. 218, (1960)。
 - 13) Batrort, S. B. Budiansky, B. : A Mathematical Theory of Plasticity Based on the Concept of Slip, NACA., T. N., No. 1871, (1949)。
-