

討26 延性破壊特性に及ぼすき裂先端応力集中の影響

新日本製鐵(株)製品技術研究所 鈴木健夫
柳本左門

1. 緒言

構造物を製作する際に、その構造物の安全性を考える場合、従来は主として脆性破壊に視点が置かれて研究が進められてきた。しかし最近になり、原子炉圧力容器、大地震の際の高層ビル、円筒タンク等において延性破壊が問題になることが判明した。しかるに、延性破壊については脆性破壊の場合と異なり、材料力学的な知見及び冶金学的な知見は、はるかに乏しいのが現状である。材料の耐延性破壊性能を判定する場合、一般には一軸引張り試験での伸び ($E\ell$) 又は絞り値 (ϕ)等が代用的な特性として使用されているが、しかし実際の構造物での破壊は多軸応力下の破壊であり、さらに一般的にはき裂存在下における破壊であり、一軸引張り応力下での延性特性値 ($E\ell, \phi$) で材質判定を行なうと不合理な面が生じるものと考えられる。即ち、応力状態と微視組織の条件によっては、単軸下での破壊特性とは著るしい差が生じることが見出されている。そこでここでは、材料の延性破壊特性に及ぼす応力状態の影響を調査するために、種々の形状の小型試験片、あるいはき裂先端の曲率半径を種々変えた小型試験片を用いて、内部の応力状態を変化させることにより、応力状態と延性破壊特性の関係を求めた。

2. 実験方法

(1) 供試材

実験に用いた材料は、表1に化学成分を示すようなSM50Aに、同表中に示したような熱処理を施したものである。JIS4号引張試験片を用いて機械的性質を調べた結果が表2である。表1に示すように本供試材は徐冷をしているためSM50の強度である50kg/mm²の引張強さを若干下回っていると共に、微視組織も、図1に示すように、強い縞状組織が発達している。

(2) 試験片形状

材料内の応力状態を出来るだけ広範囲に変えて延性破壊特性を調べるため、以下に述べる種々の形状の試験片を用いて実験した。一軸応力状態での延性破壊特性は図2に示す形状の試験片を用い平面歪状態でのそれは図3に示す平面歪引張試験片を用いて調査した。以下同様に、剪断状態での破壊特性は図4のねじり試験片、平面応力状態下での破壊特性は図5の内圧付加引張試験片を用いた。さらに、延性破壊特性に及ぼす応力三軸度の影響を明らかにするため、図6に示すような切欠を付した試験片を用い、その切欠底の曲率半径を種々変えることにより歪集中を変化させて、延性

表1 供試材の化学成分及び熱処理

規格	C	Si	Mn	P	S	V	Alsol	N	熱処理
SM50A	0.16	0.50	1.40	0.018	0.009	0.034	0.036	0.0043	950℃×2 ^h 炉冷

表2 供試材の機械的性質

採取方向	降伏応力 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸び (%)	絞り (%)
L	32.5	49.7	36.5	68.1
C	32.4	49.4	35.2	58.6
Z	31.3	49.2	33.8	56.7

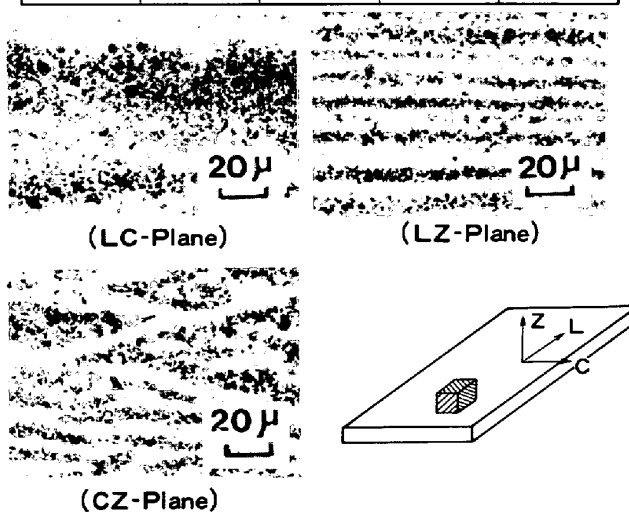


図1 供試材の顕微鏡組織

破壊特性を調査した。

(3) 供試材の塑性変形挙動

変形中又は破断時の試験片内部の応力状態を推定するためには、材料の変形抵抗曲線が必要であるため、圧縮試験により求めた。その結果が図6である。変形抵抗曲線は材料内の方向で差がなく

$$\sigma = 80.5 (\epsilon + 0.002)^{0.167} \dots (1)$$

のべき乗則で表示しうる。

3. 破断時の応力推定

実験結果を解析する際には、試験片内部の応力状態を推定しなければならない。今回実験した試験片については、次の様にして内部の応力状態を推定した。

(a) 一軸引張試験片

一軸引張試験で破断実験を行なった場合最高荷重点以後では試験片内にくびれが生じ、応力状態が一軸ではなく多軸となる。破断時におけるくびれ部の応力の推定は Bridgman が導出した次の式を用いた。

$$(\sigma_{rr})_{r=0} = (\sigma_{\theta\theta})_{r=0} = \bar{\sigma} \ln(1 + a/2R) \dots (2)$$

$$(\sigma_{zz})_{r=0} = \bar{\sigma} [1 + \ln(1 + a/2R)] \dots (3)$$

ここで $\bar{\sigma}$: 相当応力 R : くびれ部肩半径
 a : 最小断面半径

(b) 平面歪引張試験片

平面歪試験片においても破断時にはくびれを生じており、このくびれによる応力上昇を求めることが必要である。Bridgman の考え方を平面歪状態下に適用した次の式を用いて応力を推定した。

$$(\sigma_t)_{x=0} = \frac{2}{\sqrt{3}} \bar{\sigma} \ln(1 + a/2R) \dots (4)$$

$$(\sigma_e)_{x=0} = \frac{2}{\sqrt{3}} \bar{\sigma} [1 + \ln(1 + a/2R)] \dots (5)$$

$$(\sigma_w)_{x=0} = \frac{2}{\sqrt{3}} \bar{\sigma} [1 + 2 \ln(1 + a/2R)] \dots (6)$$

(c) ねじり試験片

ねじり試験片においては次の Nadai の式を用いた。

$$\tau = \frac{1}{2\pi r^3} (3T + \theta \frac{dT}{d\theta}) \dots (7)$$

ここで T : トルク θ : 単位長さ当りのねじり角 r : 試験片半径

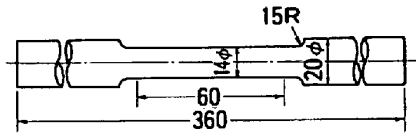


図2 一軸引張試験片

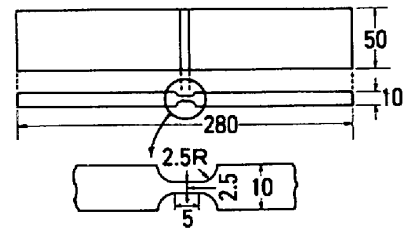


図3 平面歪引張試験片

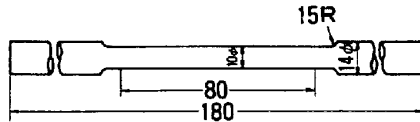


図4 ねじり試験片

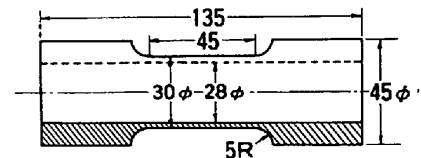


図5 内圧付加引張試験片

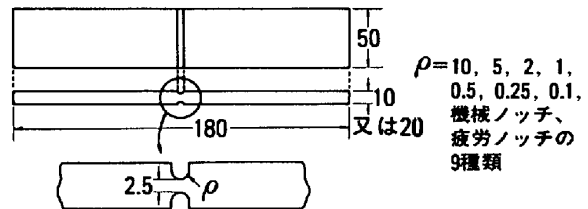


図6 切欠引張試験片

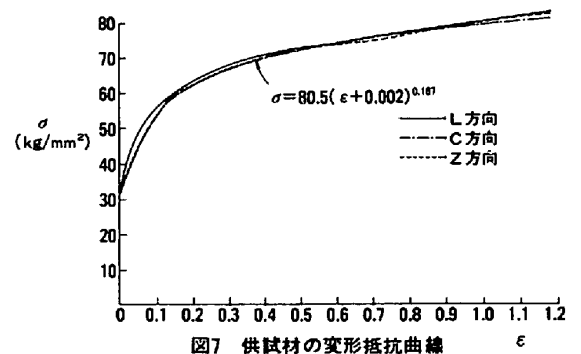


図7 供試材の変形抵抗曲線

(d) 切欠引張試験片

図6に示すような種々の曲率半径の切欠きを有する試験片に引張荷重が負荷された場合、試験片内部に発生する応力を推定する解析解は現在存在しない。そこで有限要素法を用いて種々の曲率半径の試験片につき、その内部の応力状態を計算した。その結果を図8、図9に示す。これらの図から明らかなように、最小断面部の板厚 ($t = 2.5 \text{ mm}$) としき裂先端曲率半径(ρ)との比の大小により断面内の応力分布は大きく変化する。即ち $2\rho/t > 1$ ($\rho = 10, 5, 2 \text{ mm}$) の場合には、最大の静水圧成分は板厚中央に現れ、図より明らかなように分布の形状及び絶対値共 Bridgman の式で推定しうる。しかし、 $2\rho/t < 1$ ($\rho = 0.1, 0.25, 0.5, 1 \text{ mm}$) の場合には最大静水圧成分は板厚中央でなく、き裂先端曲率半径が小さくなるにつれて、き裂底近傍へ移行していく。この結果より $2\rho/t > 1$ の場合には、Bridgmanの式を用いて内部の応力状態を推定した。一方、 $2\rho/t < 1$ の鋭い切欠きの場合には、次の様に考えて導いたパラメーターを用いて結果を整理した。試験片が引張り荷重を受ける場合には、内部の応力状態を推定する解析解は存在しないが、Anti-plane shearの応力場においては、Neuber¹⁾により次式が与えられている。

$$K_T \cdot K_T = K_H^2 \dots\dots\dots (8)$$

K_T :	き裂底から距離 x での塑性応力集中係数
K_T :	塑性歪集中係数
K_H :	弾性応力集中係数

ここで変形抵抗曲線が $\sigma = C\epsilon^n$ で表わされると考えると、

K_T, K_T, K_H はそれぞれ次の様に表わされる。

$$K_T = \frac{\tau(x)}{\tau_\infty}, K_T = \frac{\gamma(x)}{\gamma_\infty} = \left(\frac{\tau_Y}{\tau_\infty}\right) \left(\frac{\tau(x)}{\tau_Y}\right)^{\frac{1}{n}} \dots\dots\dots (9)$$

$$K_H \cong \left\{ \frac{a}{\rho + 4x} \right\}^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 $\tau(x), \gamma(x)$: 距離 x での剪断応力, 剪断歪

$\tau_\infty, \gamma_\infty$: Nominal shear stress, strain

τ_Y : 降伏剪断応力

a : 切欠深さ

式(9), (10) を式(8)に代入して、 $\tau(x)$ は次の様に表わされる。

$$\tau(x) \cong \tau_Y \left[\frac{\tau_\infty a}{\{\rho + 4x\} \tau_Y^2} \right]^{\frac{n}{1+n}} \dots\dots\dots (11)$$

ここで今回の試験における In-plane tensile への analogy として次の変換をする。

$$\tau(x) \rightarrow \sigma(x), \tau_Y \rightarrow \sigma_Y, \tau_\infty \rightarrow \sigma_\infty$$

この時、 $\sigma(x)$ は次式のようなになる。

$$\sigma(x) \cong \frac{\sigma_Y^{\frac{1-n}{1+n}} \cdot \sigma_\infty^{\frac{2n}{1+n}} \cdot a^{\frac{n}{1+n}}}{\{\rho + 4x\}^{\frac{n}{1+n}}} \dots\dots\dots (12)$$

尚、解析の際は、次式で示される $x = 0$ における応力推定値をパラメーターとして使用した。

$$\sigma(0) \cong \frac{\sigma_Y^{\frac{1-n}{1+n}} \cdot \sigma_\infty^{\frac{2n}{1+n}} \cdot a^{\frac{n}{1+n}}}{\rho^{\frac{n}{1+n}}} \dots\dots\dots (13)$$

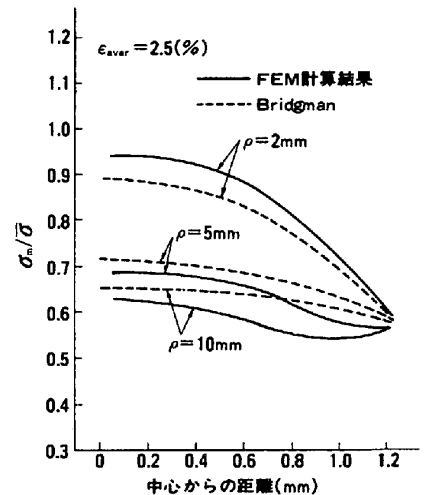


図8 切欠試験片応力分布(1)

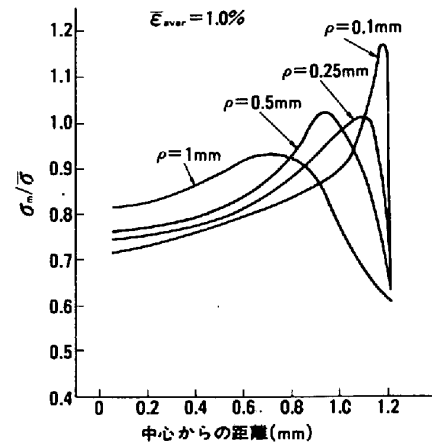


図9 切欠試験片応力分布(2)

4. 実験結果

(1) 一様な歪場での延性破壊特性と応力状態

破壊時の試験片内部の歪分布が比較的一様になっている一軸引張試験片, 平面歪引張試験片, ねじり試験片, 内圧付加引張試験片及び切欠引張試験片の中で $\rho = 10, 5, 2 \text{ mm}$ の3種類について, その破断時の内部の応力状態と延性破壊歪との関係を求めた。その結果が図10のグラフである。

図より明らかなように, 静水圧成分を flow stress で除して無次元化したパラメーター ($\sigma_m / \bar{\sigma}$) と $\bar{\epsilon}_f$ の間には, ばらつきはあるがほぼ直線関係のあることがわかる。従って, 比較的一様な歪場において延性破壊が発生する場合, その破壊特性に及ぼす応力状態の影響は, 一次近似的には $\sigma_m / \bar{\sigma}$ のパラメーターを考えればよいことがわかる。材料定数の影響は, この直線の勾配, 横軸との交点の相違となって出てくるものと考えられる。

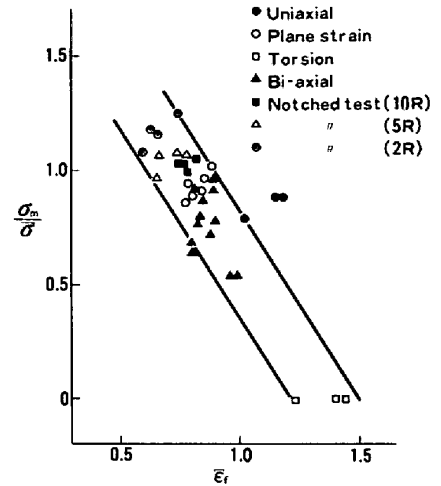


図10 $\sigma_m / \bar{\sigma}$ と $\bar{\epsilon}_f$

(2) 切欠底での延性破壊特性と応力状態

歪集中が大きい切欠底での延性破壊特性は, 式(13)を用いて整理した。その結果を図11, 図12に示す。尚, ここで ρ の値は初期の切欠底の曲率半径でなく, 破断時点での曲率半径を用いている。これらの図から明らかなように, 切欠深さの変化, 切欠底の曲率半径の大きな変化に対してパラメーター

$$a^{\frac{n}{1+n}} \cdot \sigma_{\infty}^{\frac{2n}{1+n}} / \rho^{\frac{n}{1+n}}$$

と延性破壊歪 $\bar{\epsilon}_f$ の間には, きわめてよい直線関係が認められ, 上記のパラメーターは切欠が鋭い場合における延性破壊に対して, 応力状態を表わす良好なパラメーターであることがわかる。さらに材料内で試験片の採取方向をLC(引張り方向L, ノッチ方向C)からCL方向に変えた場合このパラメーターに対する $\bar{\epsilon}_f$ のきき方(即ち勾配)は, ほぼ同一であり, このことより $\bar{\epsilon}_f$ とパラメーターの関係に入ってくる材料定数の影響は, この直線の高さのみ入ってくる事が予想される。

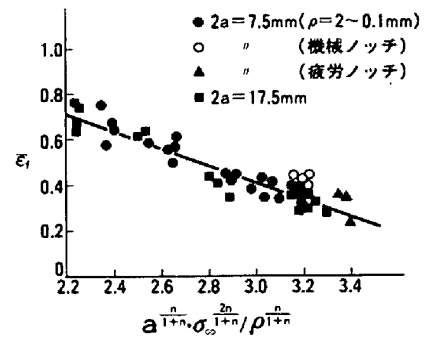


図11 $a^{\frac{n}{1+n}} \cdot \sigma_{\infty}^{\frac{2n}{1+n}} / \rho^{\frac{n}{1+n}}$ と $\bar{\epsilon}_f$ (LC方向)

5. 結論

(1) 試験片内部の歪分布が比較的一様な場合には, 延性破壊特性を特徴づける応力場のパラメーターとして, $\sigma_m / \bar{\sigma}$ が一次近似的には妥当であると考えられる。

(2) 実際の構造物の破壊の際に問題になるような, 鋭い切欠が存在する場合には, 式(13)で示されるパラメーターが良好な応力状態のパラメーターになる。

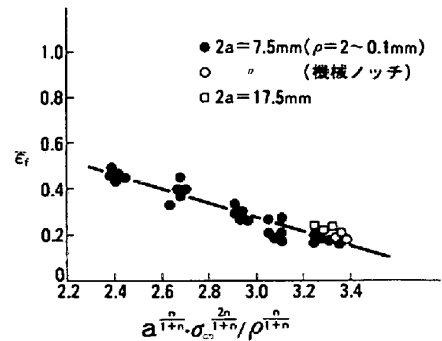


図12 $a^{\frac{n}{1+n}} \cdot \sigma_{\infty}^{\frac{2n}{1+n}} / \rho^{\frac{n}{1+n}}$ と $\bar{\epsilon}_f$ (CL方向)

1) Neuber: J. of Applied Mechanics 1961 p544/550