

討 14 片側切欠付引張試験片による破壊靱性の計測について

富士電機 中央研究所

高井耕一, 小林俊郎
間庭秀世

I. 緒言

金属材料の不安定破壊(鉄鋼材料にあつては、とくに低応力脆性破壊)に關する破壊力学的な検討が最近、米国を中心として、高張力材料を主たる対象として、盛んに行なわれるようになり、その成果もほぼ要約されてきている¹⁾²⁾。わが国においても、造船関係の研究者らによつて、早くからこの問題に対するアプローチが行なわれており、二重引張試験などを中心として、比較的、低・中強度鋼についての伝播停止時における破壊靱性を求めるべく、精力的な研究がなされている³⁾。しかしながら、二重引張試験もかなりの大型試験片によつて実施されており、必ずしも一般的とはいひ難い。

最近、小型試験によつて、有効な破壊靱性を求める関心が高まりつつあり⁴⁾、本報告においても、片側切欠クラック付引張試験片による破壊靱性の計測について論じることとした。

II. 実験方法

2.1 試料

供試鋼は、原子炉圧力容器用鋼板 ASTM A302B 改良鋼(板厚 150mm 焼準一焼戻材、日本製鋼所製)および HY80 鋼板(板厚 45mm 焼入一焼戻材、富士製鉄製)であり、それぞれ受入のまま、機械加工を行なつて試験片を採取した。それぞれの鋼の化学成分、機械的性質を表 1 に示す。

2.2 試験片および引張試験

破壊靱性計測試験片は、図 1 に示すような片側切欠クラック付試験片であつて、Sullivan が報告しているものに類似である⁵⁾。巾 30mm と 25mm の 2 種を用いた。荷重はピン穴によつて負荷する。

鋭い機械加工切欠の終端より、電磁共振型疲労試験機を用い、低応力下で疲労クラックを発生させ、全切欠クラック長さを、巾の $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{2}$ に選定した。試験片の一部について、自由表面の窒化処理を行なった。窒化条件は、材質変化をさけるため、できるだけ短時間とした(500°C × 8hr)。

引張試験は +100 ~ -196°C の温度範囲で行ない、切欠部から、クラックが進展する様相を荷重と同時に記録した。その測定系のダイヤグラムを図 2 に示す。

III. 片側切欠試験片における応力拡大係数 (Stress Intensity Factor)

本試験片の特徴は、片側クラックのために、クラック部断面に対して、偏心荷重が加わることである。図 3 に示した次元をもつ試験片のクラック先端における公称応力値 σ_{nom} は、

$$\sigma_{nom} = \frac{P}{B(W-a)} + \frac{3P(W+a-2D)}{B(W-a)^2} \quad \dots (1),$$

と表わすことができ、第 1 項は、断面における Net Stress、第 2 項は、荷重点の偏心によつて生ずる曲げ応力である。D = $W/2$ のとき、 $P/B \cdot W = \sigma$ として、 σ_{net} , σ_{nom} を図示したものが図 3 である。Gross⁶⁾らは、Williams の応力関数を適当な境界条件で解くことによつて、片側クラック試験片の応力拡大係数を理論的に求めており、精密なコンプライアンス測定による実験から求めたものと非常によく一致することを報告している⁷⁾。本実験においては、Gross⁶⁾らの結果に対して、最小二乗法によつて係数を決定した次式を試験片の応力拡大係数の表式として使用した⁸⁾。

$$K_I = \sigma \sqrt{a} \cdot Y \quad \dots (2),$$

$$\text{ただし、} \quad Y = 1.99 - 0.41(\%W) + 18.70(\%W)^2 - 38.48(\%W)^3 + 53.85(\%W)^4 \quad \dots (3),$$

(2)式を図 4 に示す。

IV. 実験結果および考察

4.1 引張試験結果

ASTM A302B 鋼について引張試験結果を解析し、破断時における σ_{net} , σ_{nom} , 破面遷移などを温度とともに表示したのが図5である。低応力破壊は、一応 σ_{nom} が単軸引張降伏強度 σ_{ys} 以下になる場合に生ずるとすると、通常の試験片では、破面がほぼ完全な脆性破面となつても、低応力破壊に遷移しないが、窒化処理試験片では、双方の遷移温度の差はずっと小さくなることが認められ、また遷移領域もやはり高温側に上昇してくる。このように、自由表面に窒化を行なうことは、比較的簡単に低応力破壊を実現するのに有効であると考えられる。

4.2 破壊靱性の計測

試験片の切欠部断面において、全面降伏しない範囲において、破壊靱性を求めなければならないが、ここでは便宜上破面がほぼ100%脆性を示すものも含めて(2)式によつて計算を行なつた。ほとんどの試験片で脆性クラックは、クラックリッチ部からただちに高速伝播したものであり、従つて伝播開始時(Onset)における破壊靱性である。一部停止クラックについては、停止時(Arrest)の値も求めた。

ASTM A302B 鋼の結果のみを図6に示す。比較検討のため同種材の、他の研究者による大型引張試験結果¹⁰⁾、切欠静曲げ試験結果¹¹⁾なども表示してある。

普通試験片と窒化処理試験片とは、伝播開始時において求めた破壊靱性でもかなりの開きがあり、後者はむしろ停止時の値に近づいていることが注目される。窒化処理試験片では、平面ひずみ破壊靱性へ移行するために値が低下するものと考えられる。鋼の降伏強度が上昇するに従い、伝播開始時と伝播停止時の破壊靱性の差は小さくなるという報告もあるが、ある温度における破壊靱性値の最低限は、平面ひずみ破壊靱性と考えられるが、伝播停止時において計測した破壊靱性と、平面ひずみ破壊靱性との比較検討が重要になると思われる。

クラック先端における塑性領域の大きさ γ_Y (平面応力状態) は、

$$\gamma_Y = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_c}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad \dots (4),$$

と表わすことができ、これから板厚に対する相対的な塑性領域大きさ β_c ¹²⁾ を本計測値について求めると窒化処理試験片における破壊靱性は、なお平面ひずみ破壊靱性のレベルに至っていないことが判明した。

クラック先端における公称応力値 σ_{nom} が σ_{ys} に等しいときの応力拡大係数は、(1)を Gross Stress σ で表わし、(2)に代入することによつて、

$$\frac{K_I^2}{\sigma_{ys}^2 \cdot W} = \frac{(1 - a/W)^2}{(1 + 2a/W)^2} \cdot \frac{a}{W} \cdot Y^2 \quad \dots (5),$$

と表わすことができる。(5)式は、クラック長さが決定されれば、試験片によつて、 $\sigma_{nom} = \sigma_{ys}$ に対応する応力拡大係数がきまることを意味し、破壊靱性計測能力を示していると考えられる²⁾。(5)を図示したものが図7であり、一部のデータをとのぞき、図7に適合するものは少なく、破壊靱性の計測がこの程度の鋼種では、なお検討の余地があることを示している。

V. 結言

片側切欠クラック付小型引張試験片を、中強度鋼より採取し、広範囲温度にわたる引張試験を実施、Griffith-Irwin理論から導かれる破壊靱性を求め検討を行なつた。主要な結論は次の通りである。

1. 脆性クラックの伝播開始時において、低応力破壊は、試験片自由表面を窒化処理することにより比較的容易に実現することができる。
2. 得られた破壊靱性は、その多くが伝播開始時における値であるが、窒化処理試験片の値とかなりの

相違が認められ、後者はむしろ、伝播停止時の値に近づく傾向がある。

3. クラック先端における塑性領域の大きさの解析から、窒化処理試片においても、なお平面ひずみ破壊靱性のレベルに達していないと考えられた。

4. 使用した試験片の破壊靱性計測能力について検討を加えた。

参考文献

- 1) たとえば, 1st Report of ASTM E24 Committee ; ASTM Bulletin No. 243 (1960), 29
- 2) ASTM ; Fracture Toughness Testing and Its Application, ASTM STP 381 (1965)
- 3) たとえば, 吉識, 金沢 ; 造船協会論文集 102 (1958), 39
- 4) たとえば, 小林, 高井, 向庭 ; 日本金属学会誌 30 (1966), 700
- 5) A.M. Sullivan ; Mat. Res. & Stands, 4 (1964), 20
- 6) B. Gross, J.E. Srawley and W.F. Brown ; NASA TN D-2395 (1964)
- 7) M.L. Williams ; Trans. Amer. Soc. Mech. Eng., J. Appl. Mech. 24 (1957), 109
- 8) J. E. Srawley, M.H. Jones and B. Gross ; NASA TN D-2396 (1964)
- 9) ASTM ; Plane Strain Crack Toughness Testing of High Strength Metallic Materials. ASTM STP 410 (1967)
- 10) 神戸製鋼所中研報告, No. 1691 (1964)
- 11) 木原, 金沢, 町田, 安藤, 飯田, 岡村 ; 日本鉄鋼協会, 照射試験研究合同委員会報告, 20-3 (1966)
- 12) G.R. Irwin, J.A. Kies and H.L. Smith ; Proc. ASTM 58 (1958), 640

表1 供試鋼の化学成分(%)と機械的性質

鋼種	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Mo	Sol Al	Total Al	方向	4号引張試験			V シャルビ (-70°C) kg-m	VHN 10kg	オースマ 粒度	180° 曲げ
													YS $\frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	TS $\frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	EL %				
ASTM A302B	0.16	0.23	1.32	0.018	0.009	0.16	0.15	0.70	0.54	0.018	0.021	L	53.5	66.0	28.6		208	7.0	良
												C	53.2	65.8	28.3				
HY80	0.13	0.33	0.54	0.011	0.007	0.08	1.17	2.60	0.44	0.040		L	66.6	77.0	26.3	16.9	248	6~8	良
												C	66.4	77.2	26.1	14.5			

図1 片側切欠付引張試験片

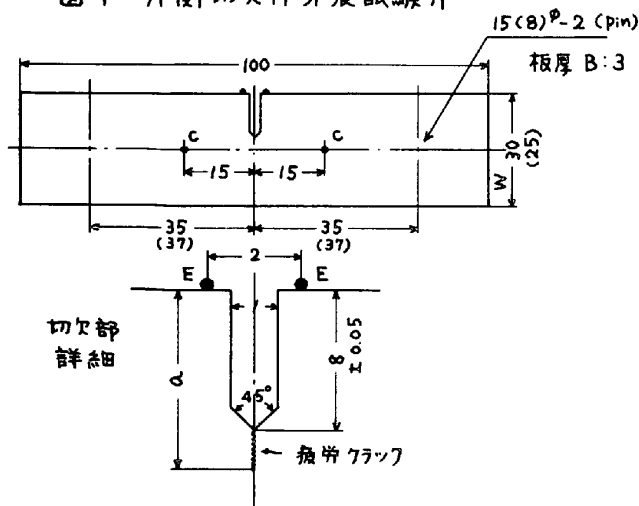


図2 測定系のブロックダイアグラム

