再結晶法による延性不安定破壊の評価*
(破壊じん性試験片と表面き裂試験片の対比)鬼 沢 邦 雄**, 庄 子 哲 雄***
高 橋 秀 明***, 安 藤 柱****Evaluation of Tearing Instability by Means
of Recrystallization-Etch Technique
(Comparison of Fracture Toughness Between Through Crack Specimens
and Part-Through Crack Specimens)by Kunio ONISAWA, Tetsuo SHOJI,
Hideaki TAKAHASHI, and Kotoji ANDO

Tearing instability crack growth in low alloy steels was evaluated in a regime of elastic plastic fracture mechanics by use of recrystallization-etch technique. Specimen geometries used here were standard compact and 3pt bend specimen, and 4pt bend type specimen having a part-through surface crack. In order to produce high compliance for a testing machine, disc springs were used where the compliance changes from 1kN/mm to 5kN/mm. After the fracture experiments the crack tip strain energy dissipation rate dW_p/da (W_p : crack tip strain energy absorbed within the intense strain region, a : tearing crack extension) was determined by the recrystallization-etch technique. It is shown that the value of T_w (tearing modulus based on W_p) is constant before and after an onset of tearing instability. In the surface crack specimen, three dimensional profile of the intense strain region along the crack front was observed. This experimental results indicate that the T_w criterion is applicable to the crack extension from the surface flaw, although a singular extension behavior of the intense strain region was observed only near the specimen surface.

Key Words: Fracture, Tearing Instability, Recrystallization-Etch Technique, Surface Crack, Intense Strain Region, Resistance Curve

1. 緒 言

原子炉圧力容器や配管など高じん性材料で構成される大形構造物においては、き裂伝ば過程は安定であることが期待されているが、系のコンプライアンスによっては延性不安定き裂伝ばへの遷移が起こり得る。このような構造物に対して、破断前漏えい(LBB)設計基準を適用するためには、現実的な表面き裂の伝ば解析がきわめて重要であり、構造健全性評価にあたっては今後ますますその必要性が高まることが予想される。安定き裂伝ばに関しては J 積分に基づくテアリングモジュラス $T_J^{(1)}$ 、き裂開口角 COA に基づくテアリングモジュラス $T_\theta^{(2)}$ 、およびき裂端近傍の強変形域に吸収される塑性仕事 W_p の安定き裂伝ばに伴う変化率に基づくテアリングモジュラス $T_w^{(3)}$ などが提案されている。坂ら⁽⁴⁾は上記パラメータ中 T_w がき裂伝ば抵

抗として特に有効であることを実験的に検証し、さらに延性不安定破壊解析へも適用可能であることを理論的に明らかにしている⁽⁵⁾。

本論文では CT 試験片および表面き裂試験片について高コンプライアンス発生装置を用いて延性不安定破壊実験を行い、再結晶法により表面き裂からのき裂伝ばに伴う強変形域の挙動、すなわち T_w クライテリオンの適用性を二次元き裂との対比を行いながら明らかにした結果について述べる。

2. 実験方法

2・1 試験片形状および寸法 供試材は板厚 250 mm および 200 mm の原子炉圧力容器用 A508cl. 3 鋼 2 種類(それぞれ A 材, B 材とする)と、市販の板厚 25 mm の 60 kg 級高張力鋼 HT 60 である。本材料の化学成分と機械的性質を表 1, 2 に示す。A 材より 1TCT, B 材より 1TCT および 2TCT (B=25), そして HT 60 からは図 1 に示す表面き裂 4 点曲げ試験片および 3 点曲げ試験片を採取した。試験片採取方向は CT 試験片については T - L 方向, 曲げ試験片については T 方向とした。予き裂はすべての試験片について

* 昭和 59 年 11 月 29 日 第 929 回講演会において講演, 原稿受付 昭和 59 年 5 月 31 日。

** 学生員, 東北大学大学院 (〒980 仙台市荒巻字青葉)。

*** 正員, 東北大学工学部。

**** 正員, 横浜国立大学工学部 (〒240 横浜市保土ヶ谷区常盤台 156)。

表 1 化学成分 (wt%)

Material	C	Si	Mn	P	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Al	S
A508cl.3 A	0.18	0.26	1.32	0.003	0.002	0.76	0.04	0.48	<0.01	0.018	0.001
A508cl.3 B	0.18	0.26	1.33	0.004	0.03	0.74	0.18	0.48	<0.01	0.019	0.007
HT 60	0.13	0.29	1.15	0.010	0.008	0.016	0.19	0.001	0.032	—	—

表 2 機械的性質

Material	σ_y (MPa)	σ_T (MPa)	El. (%)	R.A. (%)
A508cl.3 A	483	628	27.5	73.7
A508cl.3 B	433	564	22.4	73.2
HT 60	524	593	18.0	76.5

図 1 試験片形状および寸法

疲労により導入した。なお予き裂導入時の表面き裂の K 値は Scott ら⁽⁶⁾の式に基づいた。実験は CT 試験片については 100°C、表面き裂材ならびに 3 点曲げ試験片については室温で実施した。

2.2 実験装置 実験は系のコンプライアンスを変化させるために図 2 に示す高コンプライアンス発生装置を用いて行った。本装置は図 2 に示すように固定クロスヘッド上部で CT 試験片に対する引張負荷を、下部で曲げ試験片に対する負荷を行うことができる。本装置のばね定数 K_M は 1 kN/mm から 5 kN/mm まで可変である。

2.3 き裂端強変形域内塑性仕事の評価 き裂伝ば中にき裂端に吸収される塑性仕事を測定するため、再結晶法⁽⁷⁾⁽⁸⁾を適用した。再結晶熱処理条件は、A、B 材については 700°C3 h、HT 60 については 650°C3 h 真空中で焼なまし、その後炉冷とした。その後き裂端を含む試験片断面を研磨、腐食し、再結晶領域を観察した。再結晶領域の観察より、塑性仕事 W_p は次式で計算される。

$$W_p = \frac{4S}{4+\pi} \left\{ \frac{\pi}{2} \left[\frac{\sigma_y^* \bar{\epsilon}_0}{2-m} + \frac{H' \bar{\epsilon}_0^2}{4(1-m)} \right] + \left[\frac{\sigma_y^* \bar{\epsilon}_0}{1-m} + \frac{H' \bar{\epsilon}_0^2}{2(1-2m)} \right] \right\} \dots \dots \dots (1)$$

ここで S は再結晶領域の面積であり、 $\bar{\epsilon}_0$ は限界塑性ひずみ、 σ_y^* 、 H' 、 m は直線硬化材と仮定して定義される擬似降伏応力、ひずみ硬化率、硬化特性に関する

図 2 高コンプライアンス発生装置

材料定数である。観察する断面としては、CT 試験片および 3 点曲げ試験片については試験片板厚中央断面を、表面き裂材については図 9 に示す数断面を選んだ。

3. 実験結果

3.1 荷重変位曲線 CT 試験片 (B 材) において 100°C で延性不安定破壊した際の代表的な荷重変位曲線を図 3 に示す。図 3 中、矢印で示した点で安定き裂が不安定化し、最終破断に至った。その点での曲線の傾きは系のばね定数 K_M にほぼ等しく、延性不安定化条件 $(dP/dV_L \leq -K_M)^{(9)}$ を満足していると考えられる。

3.2 W_p 抵抗曲線 CT 試験片 (B 材) による W_p 抵抗曲線を図 4 に示す。図 4 に示されているとおり、試験片寸法によらず曲線は 1 本で表される。坂ら⁽⁴⁾は A533B 鋼においてき裂の安定伝ば過程で dW_p/da は試験片寸法によらず一定になることを報告しているが、本結果も同様の結果を示している。

また、今回の実験データ中、高コンプライアンス発生装置を用いた室温での A 材の実験結果は、延性安定き裂からへき開不安定破壊を示していた。図 5 にその再結晶領域を示す。図 5 に示すとおり、この試験片の再結晶領域は、安定き裂部分では一様に現れたが、へき開部分では全く現れなかった。一方、100°C の実験で安定き裂より延性不安定に遷移して破壊した試験片

の再結晶領域は、図6に示すように不安定遷移の前後によらず一様に現れていた。したがって延性き裂伝ば中の塑性仕事吸収率は伝ばき裂の速度には依存しないことがわかる。

3・3 表面き裂材のき裂伝ば挙動 高コンプライアンス発生装置を用いた表面き裂材の4点曲げ試験は、コンプライアンスとき裂寸法を変化させて2種類行ったが、どちらも不安定破壊には至らなかった。そ

図3 荷重変位曲線 (B材, 1TCT, 100°C)

図4 W_P 抵抗曲線 (B材, 100°C)

図5 再結晶写真 (A材, 室温)

図6 再結晶写真 (A材, 100°C)

れぞれの荷重変位曲線を図7に、破面を図8に示す。試験片番号1のほうは予き裂寸法が小さく、表面付近はき裂の進展が見られなかった。また、荷重変位曲線は最高荷重後の荷重降下が系のコンプライアンスと比較して小さいことが不安定に至らなかった原因であろう。図8で明らかなように試験片番号2のほうは表面付近にもかなりせん断き裂が進展していた。荷重変位曲線は最高荷重後に部分的にコンプライアンスと等しい傾きの部分が現れ階段状を呈している。この荷重降下の際にき裂の開口変位も瞬間的に大きくなることが観察されており、一時的には不安定にき裂が成長したものと推定される。再結晶領域として、試験片番号1のABCの3断面より得られた例を図9に示す。また、同時に行った3点曲げ試験片の板厚中央断面の再結晶領域を図10に示す。これらの再結晶写真を比較して明らかなように、断面Aを除くBおよびCの再結晶領域の様相と図10の3点曲げ試験片のそれはきわめてよく一致している。

4. 考 察

本実験結果によると、再結晶領域は延性不安定遷移の前後で一様に現れており、再結晶領域の観察から延性不安定の遷移点を明確に測定することは困難であるが、反面延性き裂であればき裂の伝ば速度によらず dW_P/da , すなわち T_w は材料の固有値を与えるとい

図7 表面き裂試験片の荷重変位曲線

図8 表面き裂試験片破面

図 9 表面き裂試験片再結晶写真 (室温)

図 10 3点曲げ試験片再結晶写真 (室温)

うことが明らかとなった。また、表面き裂の伝ばに伴う再結晶領域は、表面付近においては平面応力状態と考えられる大きな広がりを示しており、試験片全体の吸収する塑性仕事のうち大きな割合がこの領域の塑性変形に費やされているものと考えられる。これに対してき裂最深部断面 (B, C 断面) の再結晶領域と、3点曲げ試験片板厚中央断面の再結晶領域は非常によく似ており、図 11 に示すとおり、再結晶領域幅 dS/da [式 (1) より dW_P/da , すなわち T_w と等価] は同一であると判断してよく、これより B, C 断面を含む表面き裂最深部は平面ひずみ状態とみなすことができる。この結果より、表面き裂の前縁に沿う 70~80% の部分の安定き裂伝ば挙動には二次元問題の T_w クライテリアを適用することが可能といえる。

表面き裂の初生、伝ばに関して White ら⁽¹⁰⁾は、ラインスプリング法を用いた有限要素解析を行い、 J 積分の評価を行っている。この解析によると、表面き裂最深部の J 積分抵抗曲線は二次元き裂の CT 試験片より得られるものとは大きく異なり、 dJ/da は著しく大きな値になっており、 J 積分を用いて二次元き裂の結果を三次元き裂伝ば問題に拡張する際にはまだ問題を残しているといえよう。

5. 結 言

二次元貫通き裂および表面き裂試験片について、高コンプライアンス発生装置を用いて延性不安定破壊実験を実施し、そのき裂伝ば挙動を再結晶法により明ら

図 11 W_P 抵抗曲線

かにした。二次元き裂において材料テアリングモジュラス T_w はき裂の安定・不安定によらず一定であり、また表面き裂において表面近傍は平面応力状態、き裂前縁部は平面ひずみ状態であることが示された。

本研究の一部は昭和 56, 57 年度の日本原子力研究所の委託により日本溶接協会原子力研究委員会 1 TS, 2 TS 小委員会 (主査 安藤良夫東京大学名誉教授) における共同研究の一環として実施されたものである。さらに本研究の一部は昭和 58 年度文部省科学研究費補助金一般研究 (C) (課題番号 58550057) によって行われたものである事を付記する。

文 献

- (1) Paris, P. C., ほか 3 名, *ASTM Spec. Tech. Publ.*, 668 (1979), 5.
- (2) Shih, C. F., ほか 2 名, 文献 (1) の 65 ページ.
- (3) 坂・ほか 3 名, 機論, 49-438, A (昭 58), 166.
- (4) 坂・ほか 4 名, 機論, 49-443, A (昭 58), 829.
- (5) Saka, M. and Abé, H., *Res. Mech.*, 12-2 (1984), 111.
- (6) Scott, P. M. and Thorpe, T. W., *UKAEA-Harwell, AERE-R10104* (1981).
- (7) Shoji, T., ほか 2 名, *Met. Sci.*, 12-12 (1978), 579.
- (8) Shoji, T., *J. Test. Eval.*, 9-6 (1981), 324.
- (9) Ernst, H. A., ほか 2 名, *Sci. Paper*, 80-1D3-JINTF-P3, (1980).
- (10) White, C. S., ほか 2 名, *ASTM, Spec. Tech. Publ.*, 803 (1983), I-384.