反射形コースティックス法による高張力鋼の 弾塑性挙動に関する実験的検討*

江 角 務^{*1}, 高 橋 賞^{*2}

An Experimental Examination of the Elastic-Plastic Behavior for High Tension Steel by the Method of Reflective Caustics

Tsutomu EZUMI and Susumu TAKAHASHI

Recently, applications of the optical shadow method of caustics is a very powerful technique for measuring the value of the stress-intensity factor in a small scale yielding of the crack tip. However, the value of the elastic-plastic fracture parameter in a big scale yielding of the crack tip is J -Integral. In this study, the J -Integral value was determined by using the reflective caustics method and J -Integral method of an ASTM standard. The diameter of the caustics is measured experimentally by using the CT specimens. The specimen used here is a high tension steel of WEL-TEN 590 RE with different thicknesses and different initial crack lengths. J -Integral value of elastic-plastic fracture parameter is dependent to singular zone of a crack tip, characteristic of materials and optical parameters. It is concluded that hybrid method with J -Integral method of an ASTM standard is necessary to measure accurately the elastic-plastic fracture parameter J .

Key Words: Experimental Stress Analysis, Fracture Mechanics, Reflective Caustics Method, J -Integral, Elastic-Plastic, CT Specimen

1. 緒 言

近年、構造物や機械類の大形化、あるいは過酷な使用条件下での構造部材のき裂発生による破壊の危険性はますます増加している。したがって、稼働中の構造部材の安全性評価やき裂欠陥を有する鉄鋼材料の破壊挙動に関するデータが必要とされており重要である。コースティックス法の反射形を用いてき裂を有する工業材料の破壊挙動に関する研究は、主に小規模降伏条件下での応力拡大係数の算出に多く利用されている^{(1)~(3)}。しかし、工業材料としてよく使われている高靱性材料や弾塑性鉄鋼材料においては、荷重の増加につれて小規模降伏の範囲を超えるほど大きな塑性変形を伴う。この場合、き裂先端特異場での評価としての応力拡大係数がその意味を失う。変わって、き裂先端での破壊力学パラメータは J 積分となる^{(4)~(6)}。コースティックス法の非接触測定の特長を生かして、この単一パラメータを精度よく測定することができれば、材料の静的、動的弾塑性破壊靱性の問題などに有力な

測定法となることが期待される。これまで、Lee ら⁽⁷⁾は、アルミニウムとポリカーボネート材を用いて応力拡大係数と J 積分のコースティックス法による決定法について詳細な検討を行った。Rosakis ら⁽⁸⁾は、コースティックス法の弾塑性域における応用を目指し、弾塑性域における破壊パラメータとしての J 積分解析理論を提案した。また、菊池ら⁽⁹⁾は、CT 試験片を用いて三次元 FEM 解析とコースティックス法の測定を行い、コースティックス法による J 値の評価について比較検討した。本研究では、Rosakis ら⁽⁸⁾の理論に基づいたコースティックス法と ASTM 規格⁽¹⁰⁾の J 積分法により J 値を求め、高張力鋼 WEL-TEN 590 RE の弾塑性破壊挙動について比較検討した。この結果、反射形コースティックス法により J 値を求めることができた。また、高張力鋼の弾塑性破壊挙動を精度よく評価するためには、ASTM 規格の J 積分法を併用することが有効であることがわかった。

2. J 積分の決定

本研究では、近年さかんに研究がなされている反射形コースティックス法を弾塑性材料に適用して、Rosakis らの提案式により J 値を求めた。さらに、ASTM 規格に準拠した実験を併用して J 値を求め、

* 原稿受付 1997 年 8 月 26 日。

^{*1} 正員、芝浦工業大学工学部(〒108-0023 東京都港区芝浦 3-9-14)。

^{*2} 正員、関東学院大学工学部(〒236-8501 横浜市金沢区六浦 4834)。

これら両者の結果について比較検討を行うとともに、光学パラメータ Z_0 の影響について調べた。

2・1 反射形コースティックス法による J 値 図1にコースティックス法の基本原理を示す。モードI形の負荷状態にあるき裂を有する試験片に光を入射させると、き裂先端近傍では応力集中により板厚方向と屈折率の変化が生じる。入射光の光路長が変化して光は偏光し、その結果試験片と一定距離はなれたスクリーン上に光の来ない暗い領域(Shadow spot)と、それを取り囲む明るい包絡線(Caustic)が観察される。試験片表面から反射光の来る点の最小半径は初期曲線 r_0 と定義される。この初期曲線 r_0 は、試験片と参考平面との距離 Z_0 を重要なパラメータとして含み、 Z_0 が増加すると r_0 の大きさも増加する。このようにコースティックス像の形成は、試験片のき裂先端近傍の板厚方向変位場によってのみ決定される。したがって、弾塑性域における破壊パラメータ J 積分とコースティックス像の最大直径 D との関係式がわかれば、得られたコースティックス像から弾塑性域における破壊パラメータの J 積分値が求められる。本研究では、Rosakisらにより提案され、菊池らによって評価、検討されている J と D との関係式(1)から J 値を算定した。

$$J = S_n \cdot \varepsilon_0 \cdot \sigma_0 \cdot \alpha \left[\frac{1}{\alpha \cdot \varepsilon_0 \cdot z_0 \cdot d} \right]^{(n+1)/n} D^{(3n+2)/n} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに

$$S_n = -0.0712 + 0.54e^{-1/n} - 1.1375e^{-2/n} + 1.2936e^{-3/n} - 0.556e^{-4/n}$$

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma}{\sigma_0} + \alpha \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 d は試験片の板厚、 α は材料定数、 n は材

料の硬化係数、 σ_0 は材料の降伏応力、 ε_0 は σ_0 に対応するひずみ、 S_n は n の関数、 Z_0 は試験片と参考平面との距離、 D はコースティックス像の最大直径である。これらの式は、平面応力条件下でき裂先端近傍の塑性特異場の強度と観察された光の来ない暗い領域の大きさの関係式である。求める試験片の $(\sigma-\varepsilon)$ 線図を用いて、式(2)の Ramberg-Osgood 形近似に代入することにより定数 α , n の値を求めた。

2・2 ASTM 規格による J 値 この方法は、安定き裂の進展に注目し、成長したき裂の増加 Δa および荷重-荷重線変位曲線より J 積分値を求めようとするものである。すなわち、き裂が発生した後のき裂成長に対する抵抗値を J 積分で評価する。これを成長したき裂長さに対してプロットして求められる R 曲線を外挿し、き裂の発生源における J 値を決定する。本研究では、8種類の CT 試験片を用意し、各試験片の J 値を式(3)により求めた。

$$J = f(a/w) \frac{A}{Bb} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし

$$f(a/w) = \frac{2(1+\alpha)}{(1+\alpha^2)}$$

ここに

$$\alpha = \sqrt{(2a/b)^2 + 2(2a/b) + 2} - (2a/b + 1)$$

ここで B は試験片の板厚、 A は荷重-荷重線変位曲線下の面積、 a はき裂長さ ($a = a_0 + \Delta a$)、 a_0 は予き裂長さ、 Δa は微少き裂進展量、 b はリガメント幅 ($b = w - a$)、 w は試験片の幅である。この ASTM 規格による方法では、鈍化直線の精度や Δa の評価法などいくつかの問題点が指摘⁽¹¹⁾されている。しかしながら、試験片そのものが簡単であり、しかも大掛かりな試験装置は特に必要とせず、比較的測定精度が高いことから標準的な試験法とされている。

3. 試験片および実験方法

3・1 試験片 本実験では供試材として、板厚 3.2 mm, 4.5 mm の 2 種類の WEL-TEN 590 RE 高張力鋼(焼入れ、焼戻し処理された状態の鋼板)を使用した。使用した WEL-TEN 590 RE 高張力鋼の用途は広い。特に溶接性、強度、耐摩耗性に優れ、大幅に鋼材を節約できる経済性があり、工業、建築領域において不可欠な材料となっている。使用した材料の機械的性質と化学成分を表1に示す。また、CT 試験片の形状を図2(a), (b)に示す。図2(a)は、コースティックス法による CT 試験片である。JSME 基準に従って⁽¹⁰⁾ 板厚 3.2 mm と 4.5 mm の 2 種類に対して、それ

Fig. 1 Schematic of formation of the caustic surface in the method of reflective caustics

ずれき裂長さ $a_0=30.5$ mm, 31.0 mm, 31.5 mm の 3 種類, 全部で 6 種類の CT 試験片を準備した。図 2(b) は, ASTM 規格による実験の CT 試験片である。板厚 3.2 mm と 4.5 mm の 2 種類について, ずれき裂長さ $a_0=30.5$ mm 一定とし, 8 枚を一組として各 2 組の同じ形状寸法の CT 試験片を作製した。この ASTM 規格による CT 試験では, クリップゲージを用いて荷重-荷重線変位量を測定する。このクリップゲージ取付用ナイフエッジ先端は十分に鋭くなるように機械加工した。また, クリップゲージ取付けに際し

Table 1 Mechanical properties and chemical compositions [%]

Thickness mm	Yield point N/mm ²	Tensile strength N/mm ²	Elongation %
3.2	684	671	27
4.5	689	669	27

Thickness	C	Si	Mn	P	S	Ti	Ceq
3.2mm	0.08	0.3	1.16	0.16	0.04	0.06	0.28
4.5mm	0.08	0.26	1.14	0.16	0.03	0.06	0.28

(a) CT specimen used in the caustics method

(b) CT specimen used in an ASTM standard

Fig. 2 CT specimen used

ては, 荷重線に対するずれや試験片厚さ方向での平行度の狂いが生じないように注意した。試験片は機械加工し, 表面を 800[#]~1200[#] のエメリー紙で研磨した後, 研磨液にて鏡面に仕上げた。ずれき裂は, 試験片の外形状が仕上がった後, 図 2 に示すとおり放電加工により切り込んだ。この場合のずれき裂は, 厚さ方向にき裂長さの変わらない直線き裂である。また予備実験として, 式(1)にかかわる材料定数 α と材料の硬化係数 n を求めるために, 図 3 に示すような JIS 22201 6 号引張試験片を製作した。試験片両表面の中央に二軸大ひずみ測定用ゲージ KFE-2-120-D 32 を貼り付けた。1 mm/min の速度で引張り, 得られた σ - ϵ 線図により式(2)に代入して $\alpha=2.51$, $n=13.42$ の値を得た。

3.2 反射形コースティックス法の光学系 図 4 に本実験で用いた表面反射形コースティックス法の光学系実験装置を示す。出力 5 mW の He-Ne のガスレーザを光源とし, その収束光がオートコリメータを介して平行光となって試験片へ入射する。反射光をハーフミラーによりスクリーンへ反射させる。スクリーン上に形成されたコースティックス像をスクリーン後方から撮影した。試験片と CT 試験片用ジグを引張試験機に取付け, 引張速度 0.5 mm/min にて準静的な荷重で引張試験を行った。光学系パラメータの関係式として式(4)を用いた。すなわち, 光学系のパラメータ $f \cdot p$ を一定として q を調整することにより Z_0 を変化させた。本実験では表 2 に示すように, Z_0 を 4 種類変化させそれぞれのコースティックス像を測定した。ここ

Fig. 3 Configuration of uniaxial tension specimen

Fig. 4 Experimental set-up of the reflective caustics method

で、 p は試験片表面とレンズとの距離、 Z_0 は参考平面と試験片との距離、 q はスクリーンとレンズとの距離、 f はレンズの焦点距離である。

$$\frac{1}{p+Z_0} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f} \dots\dots\dots (4)$$

コースティック像の測定においては、図5に示すように撮影したコースティック像のネガフィルムを拡大投影機にて30倍に拡大し、その最大直径をコースティック像の径とした。

3.3 ASTM規格による方法 CT試験片における J 積分の評価について、ASTM規格では、準静的な引張荷重をかけ、荷重-荷重線変位およびき裂進展量 Δa により評価する方法である。図2(b)に示したCT試験片に準静的な引張荷重(0.5 mm/min)をかけそのときの荷重-荷重線変位量を記録しながら所定の変位まで負荷する。荷重-荷重線変位量の測定には、X-Yレコーダ、クリップゲージおよび静ひずみ計を用いた。除荷後き裂面の形状や寸法を損なわないように加熱着色(300°Cで10分間保持)した。さらに、疲労強制破壊(疲労き裂長さ1.25 mm以上)によってき裂にマーキングを施した後、試験片を破断分離した。電子顕微鏡を用いてマーキングを施した破面を観察し、成長したき裂長さ Δa を試験片厚さを8等分した点の平均として測定し、式(3)により J 積分値を求めた。

4. 実験結果と考察

図2(a)に示した試験片厚さが3.2 mm、4.5 mmの2種類と予き裂長さが $a_0=30.5, 31.0, 31.5$ mmの3種類のCT試験片により引張試験を行った。試験片表面は、研磨液にてほぼ鏡面まで仕上げ、引張速度は0.5

mm/minの準静的な引張荷重である。図4の光学系によりスクリーンに形成される($Z_0=24, 105, 156, 286$ mmの4種類)コースティック像をそれぞれ撮影した。得られたコースティック像の一例を図6に示す。図6(a)は、CT試験片厚さ3.2 mm、 $a_0=30.5$ mm、 $Z_0=24$ mmにおけるコースティック像、(b)は、CT試験片厚さ3.2 mm、 $a_0=31.5$ mm、 $Z_0=105$ mm、(c)は、CT試験片厚さ3.2 mm、 $a_0=31.0$ mm、 $Z_0=156$ mmにおける各荷重時のコースティック像である。これらのネガフィルムを拡大投影機にて約30倍に拡大し、コースティック像の大きさを測定した。引張荷重が増大し塑性変形が生ずるとコースティック像がゆがみ、像も大きくなる。特に金属材料においては、コースティック像の塑性変形に与える影響が大きいので、逆にこの影響を利用する方法も可能である。つまり、コースティック像のゆがんだ形状を測定することによって、弾塑性破壊靱性 J_{IC} を評価する方法である⁽¹²⁾。

図7にCT試験片厚さ4.5 mmの各 Z_0 における荷重 P と J 積分との関係を示す。 $Z_0=24$ mmにおける J 値は比較的大きな値をとるので、それ以外の結果におけるコースティックス法とASTM法について図8に示した。ASTM規格による方法では、まず、それぞれ所定の変位まで負荷する。引張速度は、0.5 mm/minで、荷重-荷重線変位量は、X-Yレコーダ・クリップゲージおよび静ひずみ計により測定した。CT試験片のクリップゲージ取付用ナイフエッジ先端は、十分に鋭くなるように加工した。JSME規格にそって、負荷後の試験片を300°Cまで加熱し、10分間保持して加熱着色した。さらに、試験片に繰返し荷重をかけて疲労による強制破壊をさせ、き裂にマーキングを施した後試験片を破断分離させた。電子顕微鏡によりマーキングを施した破面を観察し、試験片厚さを8等分した点の平均としてき裂進展量 Δa を測定した。コースティックス法では、 Z_0 の値が小さくなるほど J 値は大きく、ASTM法の結果に比べると小さい荷重で増大する傾向にある。つまり、ある領域を越えるとコースティックス法による結果がASTM法による場合より過大評価する傾向にある。これはコースティックス法の J 積分解析の平面応力という仮定条件が原因であるといえる。荷重が増えると板厚方向の応力は大きくなり、き裂先端応力特異場に与える影響が大きいものと考えられる。図6(a)~(c)に示したコースティック像の形状は、静的荷重を受けている高張力鋼CT試験片のき裂先端における弾塑性変形挙動と関連している。荷重が増大すると、塑性鈍化およびその深

Table 2 Z_0 parameters

No	p (mm)	f (mm)	a (mm)	z_0 (mm)
1	1,470	935	2,000	286
2	1,470	935	2,000	156
3	1,470	935	2,000	105
4	1,470	935	2,000	24

Fig. 5 Examples of measurement of the caustic patterns

Fig. 6 Examples of the caustic pattern of high tension steel

 Fig. 7 Relation between J -Integral value and tension load P

化に伴いコースティック像は次第に幾何学的な円状となる。安定破壊から不安定破壊になるとコースティック像はさらにき裂進展方向に広がり、像の横には延性引裂きの様子を示すノッチ模様がでてくる。板厚について、同じ Z_0 値では、試験片の板厚が厚いほど荷

 Fig. 8 Relation between J -Integral value and tension load P by caustics and ASTM method

重の増加に伴い J 値の増加は緩やかとなり、荷重 P - J 値曲線は ASTM の結果に近似する。このことは、菊池ら⁽⁹⁾ によって指摘されているように、試験片板厚の増加に伴い、板厚方向で平面ひずみ状態とみなせる領域も増加し、板厚の減少量は小さくなり、 J 値の評

Fig. 9 Relation between J -Integral value and crack propagation length Δa by ASTM method

値が小さくなったものと考えられる。 Z_0 値が小さくなると J 値が大きくなる傾向にある。このことは、 J 値を求めた式(1)において、 J はコースティック像の直径 D 、光学パラメータ Z_0 の関数であり、同一の荷重に対して各 Z_0 に対する直径 D の変化が小さかったことがあげられる。図9はASTM規格の方法より求めた J - Δa 曲線と J_{IC} の決定法を示したものである。最初の屈曲点は面外変位の急増点(ここまでは鈍化曲線)で、これ以降の R 曲線との交点を弾塑性破壊靱性 J_{IC} とした。また、図10は荷重が増大するに従って変形するコースティック像の形状のゆがみを測定することにより J_{IC} を評価したものである⁽¹²⁾。この方法は、コースティック像長の D - d 曲線から J_{IC} を評価するものであり、この方法により求めた結果は、ASTM規格の方法による結果と $Z_0=105\sim 156$ mmの範囲でよく一致した。このように弾塑性材料におけるコースティック像を詳細に観察することで、 J_{IC} を評価することが可能であることがわかった。

5. 結 言

反射形コースティック法とASTM規格の J 積分法を利用して J 値を評価し、WEL-TEN 590 RE高張力鋼の弾塑性破壊挙動について実験的に調べた結果、次の知見が得られた。

(1) 標準CT試験片を用いた高張力鋼の弾塑性域におけるコースティック像の撮影は、比較的容易である。

(2) 弾塑性変形に伴うコースティック像の形状のゆがみを観測することで J_{IC} の評価が可能であり、比較確認のためにもASTM法との併用が効果的である。

(3) コースティック像の直径 D の測定精度はも

Fig. 10 Relation between D and d of transformational caustic pattern

ちろん、光学パラメータ Z_0 は、 J 値に大きな影響を与える。 Z_0 が大きくなるほど J 値が過小評価され、また、 Z_0 が小さくなると J 値が過大評価される。 J 値の精度を高めるためには、適当な Z_0 値を選定することが必要である。本実験の結果では、 Z_0 値が105~156 mmの範囲でよい結果が得られた。

(4) J 値は、き裂先端の弾塑性特異場の強度に依存するほか、材料の特性、光学パラメータに依存する。これらを調べるためにもASTM規格法による実験を同時に併用して行うのが有効であることがわかった。

文 献

- (1) 高橋賞・清水紘治, 機械の研究, 37-4(1985), 485-490, 621-626.
- (2) 島田平八・佐々木敏彦, 機論, 49-441, A(1983), 579-588.
- (3) 河栄晃・江角務・高橋賞, 機論, 63-609, A(1997), 925-930.
- (4) 早川文雄・小林英男, 機論, 53-494, A(1987), 1913-1918.
- (5) 町田賢司・菊池正紀・宮本博, 機論, 55-513, A(1989), 1195-1202.
- (6) 小林英男・中村春夫・柏木孝明, 機論, 53-494, A(1987), 1905-1911.
- (7) Lee, O. S., Hong, S. K. and Kim, Y. S., *Exp. Mech.*, (1993), 133-138.
- (8) Rosakis, A. J., Ma, C. C. and Freund, L. B., *Trans. ASME, J. Appl. Mech.*, 50(1983), 777-782.
- (9) 菊池正紀・濱中慎一, 機論, 56-532, A(1990), 2581-2587.
- (10) JSME STANDARD, *Standard Method of Test for Elastic-Plastic Fracture Toughness J_{IC}* , JSME S 001, (1992-2), 1, 52.
- (11) 国尾武・中沢一・林郁彦・岡村弘之, 破壊力学実験法, (1984-6), 85, 朝倉書店.
- (12) 小幡充男・島田平八・古屋泰文・広瀬俊幸, 日本非破壊検査, 34-3(1985), 208-212.