616 パルス反射法を用いたき裂先端近傍の板厚変化測定による J 値算定の試みTry of J -Value Calculation by Board Thickness Change Measuring
of Crack Tip Neighborhood on Pulse Echo Method

○学 佐藤 英明 (芝浦工大)

正 江角 務 (芝浦工大)

Hideaki SATO, Shibaura Institute of Technology, 3-9-14, Shibaura, Minato-ku, Tokyo
Tsutomu EZUMI, Shibaura Institute of Technology**Key Words** : Experimental Stress Analysis, Fracture Mechanics, Caustics Method, J -Integral, Pulse Reflective Technique, Ultrasonic Inspection

1. 緒 言

機械や各種構造物の強度評価を行うことは、安全設計上重要なことであり、各種構造物の大型化、あるいは過酷な使用条件下での機械構造物のき裂発生による破壊の危険性が増加している。き裂が発生した場合、き裂先端周辺部には特異な応力場が形成され、急激な材料強度低下を引き起こすことになる。このような場合、破壊力学に基づいた応力拡大係数や J 積分などの解析により材料強度評価を行ななければならない⁽¹⁾。また、今日、超音波は材料工学、物質工学のすべての分野で役立っており、基礎物性研究から産業界、工学界、あるいは医療における応用計測にいたるまで、超音波は広く利用されている。

本研究では、き裂を有した鉄鋼材を用い、反射形コースティックス法⁽²⁾を用い、き裂を有する鉄鋼材のき裂先端近傍における変形を、反射形コースティックス法により J 値の算定し、併用としてパルス反射法を用い、き裂先端近傍における真の板厚変化測定を試みた。また、クリップゲージによりき裂開口変位からも J 値を算出し、両者の結果について比較検討をした。

2. 試 験 片

2.1 供試材 S45C (機械構造用圧延鋼材)、WEL-TEN590RE (高張力鋼) の二種類を用いた。板厚は 2.3mm 一定である。

2.2 試験片形状 試験片形状は、Fig.1 に示すような JIS2201 13 号 B 型試験片を機械加工によって製作し、平行部中央に厚さ 0.15 mm のフライスカッターを用いて $a/w=0.5$ となる 6.25 mm の深さにき裂を挿入した。素材表面には黒皮層があるため 100[°]、320[°]、800[°]、1200[°] の順にサンドペーパーで表面を研磨しその後、研磨剤によって鏡面状に仕上げたものを使用した。

Fig.1 Details of test specimen

3. 実験方法

実験は 3 ピン式の専用治具により、引張試験機に試験片を固定し、引張速度を 0.5mm/min と設定し、準静的な状態で引張試験を行った。負荷状態にある試験片き裂先端近傍に、コリメータを通し平行光となったレーザ光を照射した。所定の荷重下でスクリーン上に投影される、コースティックス像を写真撮影し、そのネガフィルムより最大直径の測定を行う⁽³⁾⁽⁴⁾。比較検討のため、反射形コースティックス法と並行し、クリップゲージによりき裂開口変位を測定した。また、一探子法によるパルス反射式直接接触垂直法の縦波を用いて、き裂先端部のオシロスコープモニターに映し出される、超音波の波形より板厚を算出し、コースティックス法から求めた J 値及びき裂開口変位より求めた J 値の結果との比較検討を試みた。

4. 算 定 方 法

4.1 コースティックス法による J 値算定 金属材料のような不透明な材料の場合、試験片表面からの反射光により、形成されるコースティックス像の最大直径 D を測定し式(1)に代入することにより、 J 値を求めることが出来る⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

$$J = S_n \varepsilon_0 \sigma_0 \alpha \left(\frac{\lambda}{\alpha \varepsilon_0 Z_0 d} \right)^{n+1} \left(\frac{D}{\lambda} \right)^{\frac{3n+2}{n}} \quad \dots\dots (1)$$

ここで、 α , n は材料試験を行い得られた材料定数、加工硬化指数、 S_n が n によって定まる関数。 σ_0 , ε_0 が材料の降伏応力とそのときのひずみ、 λ , t , z_0 はそれぞれ光学系の倍率、試験片の板厚、試験片とスクリーンとの距離である。また、モード I の負荷状態におけるコースティックス像は、き裂に対して対称であり、弾性変形域内においては、ほぼ真円状を示す。最大直径 D は、き裂に対して垂直の荷重方向の値を使用する。

4.2 き裂開口変位による J 値算定 コースティックス法による実験と並行して、き裂開口変位をクリップゲージにより測定し、式(2)より J 値⁽⁶⁾を求めた。

$$J = \frac{2n+1}{2n+2} \left(\frac{p}{bd} \right) \delta \quad \dots\dots (2)$$

ここで、 n , P , b , t , δ はそれぞれ、加工硬化指数、荷重、リガメント幅、試験片の板厚、き裂開口変位である。この実験方法の利点は、解析が非常に簡単であり、コースティックス法の実験に影響を与えない。

4.3 超音波探傷法による板厚測定 コースティックス法の実験と並行して、超音波を使用した縦波による伝播時間の測定を行い、式(3)⁽⁷⁾に代入して板厚 X を求め、コースティックス法より算出した J 値と比較する。

$$X = \frac{C_L \cdot T_L}{2} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 C_L は縦波音速を示し、 T_L は縦波伝播時間である。この実験方法の利点は、き裂開口変位の測定同様、解析が非常に簡単であり、コースティックス法の実験と並行しても相互に影響し合う事なく実験が行え、より真の J 値算定が可能と考えられる。

4. 結果及び考察

本実験で得られたコースティック像の一例としてS45C、板厚2.3mm、引張速度0.5 mm/minの像をFig.2に示す。

Fig.2 Caustic pattern (S45C)

低荷重下においてはほぼ真円状のコースティック像が、荷重の増加とともに次第に楕円形に変形し、像の輪郭が乱れていく様子が観察できた。荷重が2.22 kNから4.43 kNにかけて、き裂先端の塑性変形の影響によるコースティック像の変化が見られる。コースティック像の形成は、静的荷重を受けている試験片き裂先端の弾塑性変形における初期段階において、き裂先端がすべり面分離により開口し、結果としてストレッチゾーンが形成される。これは、塑性鈍化によりき裂の幅が荷重方向に広がっていき、コースティック像は楕円形状となり、楕円の長軸は荷重方向と一致している。安定破壊が発生した後、コースティック像は更にき裂進展の方向に広がっていった。同一試験片における、コースティックス法より求めた J 値と荷重、またパルス反射法を用いたき裂先端近傍の板厚変化を元にして求めた J 値との関係をFig.3に示し、さらにFig.4にき裂開口変位より求めた J 値と荷重、パルス反射法を用いたき裂先端近傍の板厚変化により求めた J 値との関係を示す。コースティックス法より求めた J 値と荷重との関係から、荷重が約4 kNを超えた辺りより J 値が急激に変化している事が観察でき、コースティック像と比較すると、この付近から大きな塑性変形による像の乱れが始まっている。また、板厚変化を元にして求めた J 値は、板厚一定時の J 値より上回る結果となった。き裂開口変位より求めた J 値とコースティックス法

より求めた J 値を比較すると、全体的に同様の傾向を示し、コースティックス法による J 値算定は、この実験に十分可能である。しかし、本研究によるとコースティックス法より求めた J 値は、き裂開口変位より求めた J 値と比較すると下回る傾向を示した。この原因は、コースティック像の直径計測および、クリップゲージによるき裂開口変位の測定時の誤差、き裂先端形状による影響など、さまざまな要因が考えられる。

Fig.3 Relations between J -value and load by caustics method

Fig.4 Relations between J -value and load by clip gauge

5. まとめ

本研究では、鉄鋼材を供試体とし、き裂を有する試験片を作成して、引張試験機を用いて引張荷重をかけ実験を行った。そして、コースティックス法とき裂開口変位より J 値を算定し比較して検討した結果、コースティックス法により算出した J 値は、き裂開口変位より算出した J 値を下回る傾向がある。き裂先端近傍の板厚変化は、大荷重になるにつれ大きな変化をする。板厚変化の傾向は、 J 値と同様の傾向になった。変形の大きい金属板のき裂先端などの条件下では、コースティックス法による J 積分による弾塑性破壊挙動の評価は、有効かつ容易であると考えられる。

参考文献

- (1) 江原秀司 反折コースティックス法による J 積分評価の試み 平成11年度春季大会講演要集 社団法人日本非破壊検査協会(1999), 217-218
- (2) 菊池正一・濱井真一 コースティックス法を用いた J 積分の測定法に関する研究 日本機械学会論文集A編 56-532 (1990-12), 213-219.
- (3) 高橋貴・清水敏治 コースティックス法の理論と適用(Ⅰ)(Ⅱ), 機械の研究 37-4 (1985), 485-490.
- (4) 島田平八・佐々木梅彦 表面反折Caustics法による応力拡大係数の測定 日本機械学会論文集A編 49-441 (1983), 579-587.
- (5) 小幡・島田・古屋・広瀬・反折Caustics法によるき裂の検出 非破壊検査 34-3 (1985), 208-212.
- (6) 江角務・高橋貴 反折コースティックス法による高引張鋼の弾塑性挙動に関する実験的検討 64日本機械学会論文集A編 622 (1998), 1605-1610.
- (7) 日本非破壊検査学会 第19委員会 超音波探傷法 日刊工業新聞社 (1974), 293-294.