AE 原波形解析によるへき開割れの定量的評価*

高坪 純治^{*1}, 山本 茂之^{*2}Quantitative Evaluation of Cleavage Fracture
by an Acoustic Emission Source Wave Analysis

Junji TAKATSUBO and Shigeyuki YAMAMOTO

Acoustic emission (AE) source wave analysis is a new nondestructive technique for the investigation of the dynamic fracture process. We applied this technique to the quantitative characterization of crack sources in brittle fracture. Fracture toughness testings of S80C steel were carried out, using six transducers to detect, locate and analyze AE signals. The dynamic process of cleavage fracture was revealed through the AE activity and the source location. The fracture sources were quantitatively characterized in terms of crack sizes and crack formation speeds.

Key Words: Acoustic Emission, Inverse Problem, Material Testing, Brittle Fracture, Cleavage Fracture, Nondestructive Inspection

1. 緒 言

き裂の発生から破断に至るまでの破壊の過程は、微視的機構の点でも、また巨視的現象としても、極めて多様であり、確率的で、しかも局所的な性格をもっている⁽¹⁾。このような多様性と不均質性をもった破壊過程を理解するためには、現象を的確に観察し、材料内の個々の微視的破壊を定量的に把握することが重要となる。

現在のところ、破壊現象の観察とその定量的評価は破面解析に頼ることが多いが、これは破壊過程における観察ではなく、破壊後に残された痕跡の観察であり⁽²⁾、割れの発生時刻や生成速度等の動的な破壊情報を得ることは難しい。

これに対して AE(Acoustic Emission)法、特に近年開発された AE 原波形解析法^{(3)~(5)}は、微視破壊過程の動的観察法として有望視され、破壊源の動的挙動を定量的に評価しうる手法^{(6)~(11)}となりつつある。

著者らは、すでに原波形解析法を用いて延性破壊に

おける空洞の発生、合体の過程を定量的に評価できることを示した⁽¹²⁾が、本研究ではこの手法をさらに脆性破壊に適用し、へき開割れの動的破壊挙動を定量的に明らかにしようと試みたものである。

2. 実験方法

2.1 供試材および破壊試験 供試材として、典型的なへき開割れを示す S 80 C 鋼を選んだ。本材料は非常に大規模なへき開割れを生じるので、AE センサ出力信号を増幅することなく直接検出・解析できるという利点を有している。1 TCT 試験片に加工後、最終荷重 1 t で約 1 mm の疲労予き裂を導入し、容量 7.5 t の油圧サーボ試験機を用いてクロスヘッド速度 0.1 mm/min で破壊靱性試験を行った。

2.2 AE 計測・解析系 本実験では、図 1 に示すような 6 チャンネル AE 計測システムを用いた。AE センサで検出された AE 信号は 2 チャンネルずつ 3 台のデジタルオシロ (Lecroy 社, 9400 形) に送られる。第 1 チャンネルの AE 信号は、ローカルプロセッサ AE 9600 (NF 社) に入力され、あらかじめ設定されたしきい値を超すと 6 チャンネル同時にトリガがかかり、信号波形はコンピュータに転送される。コンピュータへの転送速度は 2 イベント/s である。また、波形

* 原稿受付 平成 2 年 1 月 22 日。

^{*1} 正員、工業技術院中国工業技術試験所(●737-01 呉市広末 2-2-2)。^{*2} 工業技術院中国工業技術試験所。

のサンプリング間隔は 50 ns, サンプル数 2 048 点, 分解能 8 ビットである。波形の収録と同時に引張試験機の荷重, クロスヘッド変位等のアナログデータもデータローガーを介してコンピュータに転送される。

AE センサの配置を図 2 に示す。第 1～5 チャンネルの AE センサは外径 3 mm の M 31 センサ(富士セラミックス社)を用い, チャンネル 1-3, 2-4, 2-5 の 3 組のセンサ間の到達時間差から, 非線形最小二乗法⁽¹³⁾を用いて AE 発生源の位置を求めた。また, 第 6 チャンネルの AE センサには, 2 MHz まで平坦な周波数特性を有する FC 500 センサ(AET 社)を用い, 本検出信号を用いて AE 原波形を求めた。

AE 原波形を精度よく導出するためには, できるだけ平坦で広帯域な周波数特性を有する計測装置を用いたほうがよい。そこで, 本実験では, まず原波形の導出を目的として, 増幅器を使用しないで AE の計測を行った(実験 A)。しかし, これでは小振幅の AE を取り

こぼしてしまい, 破壊過程全般にわたる AE 発生挙動を把握できないので, 次に, 増幅器(増幅率 200 倍)を用いた計測も行った(実験 B)。前者では, AE と破面との対応をみるために, 試験片が最終破断に至るまでに破壊試験を停止し, その後, 疲労荷重をかけて破断させた。後者では, 最終破断に至るまで引張試験を続けた。

3. 実験結果および考察

3・1 へき開の発生挙動 図 3 に主き裂先端部の破面の電子顕微鏡写真を示すが, 本材料の破壊形態は明らかにへき開割れである。図 4 に実験 A(増幅器なし)および実験 B(増幅器あり)におけるクロスヘッド変位-荷重, AE 累積事象数, AE 振幅の関係を示す。実験 B において振幅 0.8 V の AE が多数観察されるのは, 信号がオーバーフローしているためである。本材料は, 荷重-変位曲線からもわかるように, 巨視的にみてほとんど塑性変形を伴わずに突然脆性破壊を生じる。しかし, AE の発生開始点をみると, 脆性破壊といえども最終破断に至るかなり前の段階から微視割れが発生していることがわかる。AE の発生挙動から推定すると, へき開はある応力に達すると突然安定破壊を開始し, 応力の上昇とともにその発生頻度を上昇させながら最終的な不安定破壊に移行する。また AE 信号の大きさをみると必ずしも低振幅の AE から発生しているわけではなく, その振幅分布は AE 発生初期と破断前とでそう大きな変化はみられない(最終破断直前では, 小振幅の AE のほうが多く発生しているように見えるが, 0.8 V 以上の大振幅の AE も同程度に多く発生している)。これはへき開破断粒の大きさは負荷応力に無関係に決まることを示している。

次にへき開の発生場所を調べてみる。図 5 に示す AE の位置標定結果をみると, へき開割れは予き裂先端から発生し始め, 荷重の増加とともに主き裂面上を前方に 2～3 mm 進んだ後最終破断に至っている。図 6 は, 試験片板厚方向に対する AE 発生位置の時間的

図 1 6チャンネル AE 計測システム

図 2 試験片形状および AE センサの配置

図 3 破面の電子顕微鏡写真

変化をみたものである。本図は、板厚方向の幅1mm当たりのAE発生頻度をAEの発生順に20事象ずつで区切ってヒストグラムにしたものである。ただし、いちばん左に示したヒストグラムはAEの全事象の発生頻度を示す。発生したAE全体でみると、その発生位置は板厚方向にほぼ一様に分布しているといえるが、20事象ごとに区切ってみると発生位置にかなりの偏りがみられる。これは、へき開割れが局所的に集中して発生し、停留した後、別の位置でまた集団的に発生する傾向を示しているといえる。すなわち、最初に発生したへき開割れはこれに続くへき開割れを伝ばさせやすくする一方、へき開の伝ばはなんらかの組織的な障害や応力の再配分等が原因となって簡単に停留してしまう特性を有しているものと考えられる。

3.2 破壊源の定量的評価 ここでは、実験Aの

結果について議論する。まず、へき開の破壊モードを推定する。破壊モードはAEの放射形式からも推定でき⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾、AE信号波形の立上りの方向とは図7に示すような関係がある。本実験で検出したAEは全事象すべて6チャンネルとも試験片面外方向に立上っていたことから、モードI形に近い引張り破壊と推定された。

引張形の割れに対しては原波形導出に際して簡便な一次元逆解析⁽¹⁴⁾が適用できる。図8に検出波形および原波形の一例を示す。原波形はこのようにステップ状の波形となり、その立上りの時間と振幅とからそれぞれ微視割れの形成時間および割れ規模を推定できる⁽¹²⁾。図9に原波形の立上り時間の分布を示す。延性破壊の解析結果⁽¹²⁾では介在物の割れで0.2~0.5 μ s、ボイドの合体で2~4 μ sであったが、本へき開割れで

図4 クロスヘッド変位-荷重, AE累積事象数, AE振幅の関係

図5 AE源位置標定結果

図6 試験片板厚方向のAE発生頻度(実験B)

図7 各種破壊モードの割れが発生したときに検出される波動の立上りの方向(差分法による数値計算結果, 正符号は面外方向を示す)

はその中間の $0.2 \sim 1.2 \mu\text{s}$ となっている。また、原波形の振幅から逆算して求めた微視割れ径の分布を図10に示す。へき開破断粒の大きさは $30 \sim 130 \mu\text{m}$ と推定され、これは図3にも示すように破面観察の結果とよい対応を示した。へき開のき裂形成速度は、割れ経と割れ時間とから計算することができる。図11に微視割れ形成速度の分布を示すように、本材料のへき開割れ速度は $70 \sim 170 \text{ ms}^{-1}$ と推定された。ただし、以上の結果は、AEとして検出された信号についての解析結果であり、さらに小さな割れも発生していると推定され

図9 AE原波形の立上り時間の分布

図8 AE検出波形および原波形の例

図10 原波形解析で求めたへき開破断粒径の分布

図11 原波形解析で求めたへき開割れ形成速度の分布

図 12 AE 原波形の立上り時間と検出波形の立上り時間の関係(広帯域形センサ使用の場合)

図 13 AE 原波形の振幅と検出波形の振幅の関係(広帯域形センサ使用の場合)

る。

以上、原波形解析によって割れの動的挙動を定量的に評価できることを示したが、できればより簡便な計測・解析、すなわち検出波形の観察だけで破壊源を評価できることが望ましい。そこで、原波形の立上りの時間と振幅をそれぞれ検出波形の最初のピークに達するまでの時間および最大振幅と比較してみた。それらの関係をそれぞれ図 12 および図 13 に示す。これらの結果から、割れの形成時間については検出波形の最初のピークに達するまでの時間からほぼ定量的に評価できること、また割れの規模については、定量的には無理としても、検出波形の振幅から個々の微視割れの相対的な大きさを比較できることがわかる。ただし、これらの結果は広帯域形の AE センサを用いたときの結果であり、共振形のセンサを使用したときは両者の関係にかなりばらつきがみられたことを付記しておく。

4. 結 言

高炭素鋼を用いて破壊試験を行い、AE 原波形解析によるへき開割れの定量的評価を試みた。得られた結果は以下のとおりである。

(1) へき開は、ある応力に達すると主き裂先端で連続的に発生し始め、その発生頻度を増加させながら主き裂を 2～3 mm 進展させた後不安定破壊に移行する。

(2) へき開破断粒の大きさは負荷応力に無関係に決まる。

(3) へき開割れは、いくつかの場所で時間的にずれながら局所的に集団発生し、また、停留する傾向を

有する。

(4) 本へき開の破壊様式はモード I 型に近い引張破壊であり、AE として検出されたへき開割れの破断粒の直径は 30～130 μm 、へき開形成速度は 70～170 ms^{-1} と見積もられた。

(5) 広帯域形の AE センサを使用すれば、検出波形の最初のピークに達するまでの時間から割れの形成時間を推定できる。また、その振幅から個々の微視割れ規模を定性的に評価できる。

終わりに、破面観察にあたり適切な助言をいただいた中国工業技術試験所・横川清志、福山誠司の両氏、また、実験に協力をいただいた近畿大学工学部学生・山岡公郎、松原政博の両君に感謝の意を表する。

文 献

- (1) 大路、破壊強度学、(1985)、3、オーム社。
- (2) 北川・小寺、フラクトグラフィ、(1977)、2、倍風館。
- (3) Hsu, N. N., ほか 2 名, *Mater. Eval.*, **35**-11(1977), 100.
- (4) Pao, Y. H., ほか 2 名, *J. Acoust. Soc. Am.*, **65**-1(1979), 96.
- (5) Wadley, H. N. G., ほか 2 名, *Acta. Met.* **29**-2(1981), 399.
- (6) 岸・ほか 2 名, 非破壊検査, **30**-11(1981), 911.
- (7) 高坪・吉田, 機論, **51**-468, C(1985), 1982.
- (8) Ohira, T. and Pao, Y. H., *Met. Trans.*, **A**, **17**(1986), 843.
- (9) 榎・ほか 3 名, 機論, **54**-508, A(1988), 2149.
- (10) 高坪・横川, 機論, **55**-509, A(1989), 118.
- (11) Sachse, W., *Solid Mechanics Research for Non Destructive Evaluation*, (1987), 41, Martinus Nijhoff Publishers
- (12) 高坪・岸, 機論 **54**-507, A(1988), 2047.
- (13) 刀根, プレイマイコンシリーズ I, (1985), 137, 倍風館。
- (14) 高坪・山本, 機論, **56**-527, A(1990), 1662.
- (15) 岸・大平, 日本金属学会誌, **48**-9(1984), 911.