433 高速進展き裂の分岐時における エネルギー解放率の測定

Measurement of Energy Release Rate at Bifurcation of Fast Propagating Cracks

○ 正 鈴木 新一 (豊橋技科大) 学 坂上 賢一 (豊橋技科大院)
正 水田 貴久 (興和) 佐々木 泰利 (日比谷花壇)
Shinichi SUZUKI Toyohashi University of Technology, Tempaku-cho, Toyohashi
Kenichi SAKAUE Toyohashi University of Technology, Graduate School
Takahisa MIZUTA Kowa
Yasutoshi SASAKI Hibiakadan

Key words: Fracture Mechanics, Brittle Fracture, Crack Opening Displacement, High-Polymer Materials
Experimental Stress Analysis, Energy Release Rate

1. まえがき

脆性材料が破壊する際には、数百 m/s から数千 m/s の高速で進展するき裂が発生する。き裂速度が十分速い場合、このような高速進展き裂は進展の途中で2つに分岐する。分岐は高速進展き裂の特徴的現象であり^{(1), (2)}、これまでも多くの研究者によって理論・実験の両面から研究されてきた。しかし分岐の力学的機構は未だ十分には解明されていない。

分岐の力学的機構を解明する上で重要な点の一つは、エネルギー解放率の連続性の問題である。き裂先端が単位長さ進む時に形成されるき裂面の面積は、分岐後は分岐前の2倍になる。このことは、分岐の前後でき裂速度が変化しなければ、分岐後のエネルギー解放率が、分岐前に比べて、不連続的に2倍に増加しなければならないことを意味する。しかし、分岐直後のエネルギー解放率の測定には高い空間分解能が要求されるため、これまで測定されて来なかった。

近年、高速破壊の実験的研究に高速度ホログラフィ顕微鏡法^{(3), (4)}が用いられるようになった。この手法は、高速破壊の測定に用いられている他の手法に比べて、遥かに高い空間分解能を有している。本研究では、高速度ホログラフィ顕微鏡法の高い空間分解能を利用し、分岐の直前直後における高速進展き裂のき裂開口変位 (COD) を測定する。また、測定された COD からエネルギー解放率を求め、分岐の瞬間を挟んでエネルギー解放率が連続であることを示す。

2. 実験結果

Fig. 1 は、PMMA中を高速進展するき裂が分岐する瞬間を、高速度ホログラフィ顕微鏡法で撮影した写真である。1コマ目は分岐の $4.5\mu\text{s}$ 前、2コマ目は分岐の $1.0\mu\text{s}$ 後、3コマ目は分岐の $5.5\mu\text{s}$ 後に撮影された。き裂は点Bで2つに分岐している。2つの分岐き裂は、ほぼ等しい長さで進展している。分岐前のき裂速度は 682m/s 、分岐後は 612m/s である。写真は鮮明であり (解像力約 $7\mu\text{m}$)、き裂に沿ってき裂開口変位 (COD) を測定することが出来る。写真は全て試験片表面に焦点を合わせて撮影されている。

Fig. 1 のき裂の COD 測定の結果を Fig. 2 に示す。横軸はき裂先端からの距離 r である。Fig. 1(a) は1コマ目のき裂の COD であり、分岐前のき裂の COD が $\sqrt{r}$ に比例することが分かる。Fig. 2(b), (c) は、2, 3コマ目のき裂の COD である。これらのグラフから、分岐後のき裂においては、母き裂の COD が $\sqrt{r}$ に比例することが分かる。しかし、分岐き裂の COD は必ずしも $\sqrt{r}$ に比例していない。

分岐前のき裂の COD が $\sqrt{r}$ に比例することと、分岐後は母き裂の COD が $\sqrt{r}$ に比例することから、分岐の前後にお

けるエネルギー解放率を求めることが出来る。Fig. 3 は、COD 測定から得られたエネルギー解放率を示している。横軸はき

Fig.1 Photographs of fast propagating crack, 99BT24.
(a) The first frame at $4.5\mu\text{s}$ before bifurcation.
(b) The second frame at $1.0\mu\text{s}$ after bifurcation.
(c) The third frame at $5.5\mu\text{s}$ after bifurcation.

Fig.2 COD versus r of crack 99BT24.

Fig.3 Energy release rate across the bifurcation point.

Fig.4 Energy flux just before and after bifurcation.

Fig.5 Bifurcation process of a fast propagating crack.

裂先端位置であり、分岐位置を原点としている。負の領域は分岐前のき裂先端位置、正の領域は分岐後の母き裂先端位置である。この図から、高速進展き裂のエネルギー解放率は、分岐点を挟んで連続であることが分かる。エネルギー解放率は分岐前から分岐後にかけて、なだらかに増加しており、き裂が分岐した瞬間に、エネルギー解放率が不連続的に2倍に増加することはない。

Fig. 4 は、き裂先端に単位時間に流入するエネルギーの時間変化を示している。横軸の時間は分岐の瞬間を原点にとっている。縦軸はエネルギー解放率とき裂速度の積である。この図から、き裂先端へのエネルギー流量も分岐の瞬間を挟んで連続であることが分かる。これは、分岐の前後において、き裂速度が大きく変化しないことによる。

3. 考察

分岐位置を挟んでエネルギー解放率が連続的に変化することを、き裂が2次的に進展すると考えて説明するのは困難である。また、高速度ホログラフィ顕微鏡法を用いた分岐過程の観察から、分岐過程が3次的であること (Fig. 5) を示唆する結果が得られている⁽²⁾。分岐き裂が Fig. 5 の様に3次元き裂として発生するのであれば、き裂

先端が単位長さ進む時に形成されるき裂面の面積が、分岐直後に不連続的に大きくなることは避けられる。エネルギー解放率が分岐の瞬間を挟んで連続であることは、分岐過程の3次元性から説明されるものと考えられる。

4. 結論

COD 測定から求めたエネルギー解放率は、分岐の瞬間を挟んで連続であり、分岐の前後でなだらかに増加している。この結果は、分岐の3次元性から説明されるものと考えられる。

参考文献

- (1) 鈴木、稲山、新井、水田、機論、**65**-633, A (1999), 1116-1122.
- (2) 鈴木、稲山、新井、水田、機論、**66**-645, A (2000), 931-938.
- (3) Suzuki, S., Nozaki, Y. and Kimura, H., Appl. Opt., **36**-28, (1997), 7224-7233.
- (4) Suzuki, S., Nakagami, R., Kanahashi, Y. and Agatsuma, K., Proc. Int. Conf. Advanced Tech. in Exp. Mech., Wakayama, The Japan Soc. of Mech. Eng., (1997), 267-272.