

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 18 日現在

機関番号：13904

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560097

研究課題名(和文) 高速き裂分岐過程における枝き裂間のエネルギー分配に関する実験的研究

研究課題名(英文) Experimental studies on distribution of energy release rate among branch cracks in rapid crack bifurcation

研究代表者

鈴木 新一 (Suzuki, Shinichi)

豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：60135415

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：秒速400m以上の高速で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、二つの枝き裂の開口変位を測定した。試験片材料はPMMA等である。測定された開口変位から二つの枝き裂のエネルギー解放率を求めた。その結果、二つの枝き裂間のエネルギー解放率の分配は、平均で55%と45%であった。

同じ高速分岐き裂に対して光干渉法を適用し、き裂先端応力場を測定して枝き裂のエネルギー解放率を求めた。その結果、二つの枝き裂間のエネルギー解放率の分配は平均で55%と45%であった。

この結果は、高速分岐き裂の枝き裂ではエネルギー解放率の分配に僅かな非対称性が存在することを示しているのかもしれない。

研究成果の概要(英文)：High speed holographic microscopy was applied to take microscopic photographs of rapidly bifurcating cracks in PMMA or Homalite 100. The crack speed was more than 400m/s. On the photographs, crack opening displacement (COD) of two branch cracks was measured and energy release rates of the branch cracks were obtained from the CODs. The measurement results said that the distribution of energy release rate between the two branch cracks was 55% and 45% on the average.

Optical interferometry was also applied to the same bifurcating cracks to measure the singular stress field in the vicinity of the tips of branch cracks. The measurement of the singular stress field was also able to give the energy release rates of the two branch cracks. Each of them were 55% and 45% of the total energy release rate on the average.

The above results might say that there exists small asymmetry on the distribution of energy release rate between two branch cracks after the rapid crack bifurcation.

研究分野：高速力学・光計測

キーワード：破壊 き裂 エネルギー解放率 応力拡大係数 開口変異 衝撃工学 分岐 光計測

1. 研究開始当初の背景

1.1 学術的背景

高速き裂分岐 脆性材料が破壊する際には、秒速数百 m/s 以上の高速で進展するき裂が発生する。これまでの研究から、き裂速度が十分速いときには、き裂が突然二つに分岐することが知られている。分岐は高速進展き裂の特徴的な現象であり、これまでも多くの研究者により研究されてきた。しかし、その力学的機構は未だ十分には解明されていない。

Γ 曲線 高速進展き裂のき裂速度は、き裂の応力拡大係数が増加するにつれて急激に増加する。しかし、応力拡大係数がある一定値を超えると、応力拡大係数が増加してもき裂速度が変化しない領域が現れる。横軸に応力拡大係数、縦軸にき裂速度を取って上記の関係をグラフ化したとき、ギリシャ文字の Γ に似た曲線が現れる。このことから、このグラフは Γ 曲線と呼ばれている。そして、高速き裂分岐はき裂速度が一定となる領域で発生していることが、A. Kobayashi 等の研究によって指摘されている。

き裂速度，エネルギー解放率，3次元性 S.Suzuki 等は分岐前後におけるき裂速度を高速撮影により測定し、分岐前後においてき裂速度に変化がないことを明らかにした。これは、「 Γ 曲線のき裂速度が一定の領域で分岐が発生する」という A.Kobayashi 等の研究結果を支持している。

他方、S.Suzuki 等は、高速き裂分岐の直前直後におけるき裂の全エネルギー解放率を測定した。その結果、全エネルギー解放率はき裂の分岐点を挟んで連続的に増加しており、き裂分岐点におけるエネルギー解放率の不連続的な増加が存在しないことを示した。

上述のき裂速度の連続性とエネルギー解放率の連続性は、分岐の2次元理論からは説明できず、き裂分岐が3次元現象であることを示した。

き裂開口変位の非対称性 高速度ホログラフィ顕微鏡法は高い空間分解能と広い観測領域を両立できる方法であり、高速進展き裂のき裂開口変位を測定することが出来る。高速度ホログラフィ顕微鏡法を用いて高速分岐直後のき裂を撮影すると、二つの枝き裂の開口変位を知ることが出来る。過去の研究において、二つの枝き裂の開口変位分布が同じにはならないことが知られており、これは分岐の3次元性によるものと考えられていた。

エネルギー解放率は非対称か？ 分岐直後の二つの枝き裂が異なる開口変位分布を持つことは、二つの枝き裂が異なるエネルギー解放率を持つ可能性を示している。これは高速き裂の分岐現象に非対称性が存在する可能性を示唆している。この問題は破壊力学の基礎と関係し、学術上重要な問題である。

1.2 社会的背景

社会基盤の安全確保 橋梁、堤防、航空機、船舶などの巨大構造物に衝撃的な力が作用

するとき、構造物が一瞬のうちに破壊されることがある。このような破壊現象においてはき裂の発生と進展が本質的な問題であり、その特性を解明することは、社会基盤の安全を保障するうえで重要な課題である。特に、(1) き裂の発生を防止すること、(2) 発生したき裂の進展経路を事前に予測できるようになること、(3) 発生したき裂を進展の途中で停止させることは、重要な技術課題となっている。

高速進展き裂はその進展の途中で突然二つに分岐するが、その力学的機構を解明することは、高速破壊現象におけるき裂進展経路の予測(上記(2))に繋がる。また、分岐時におけるエネルギー解放率の研究は、発生したき裂を進展の途中で停止させる技術(上記(3))の実現に繋がるものである。

医療分野における破壊現象 腎臓結石の治療には、体外衝撃波による破砕治療が用いられている。この治療法では、人体の外から衝撃波を入射し、腎臓結石に集束させることによって結石を破砕して治療する。手術が不要なことから、腎臓結石患者の約60%に適用されている。

しかし実際には、結石が効果的に破砕されないことがある。その場合、衝撃波を多数回照射するため、周辺の臓器に損傷が発生する。結石が衝撃波によって破砕されるときには、高速進展き裂が発生していると考えられる。したがって、き裂を結石内で分岐させることが出来れば、1回の衝撃波でより細かい破片に破砕することが可能となる。これにより、衝撃波の照射回数を減らすことができ、より効果的な破砕治療に繋がっていく。

2. 研究の目的

固体材料が衝撃的に破壊する際には秒速数百 m/s 以上の高速で進展するき裂が発生する。き裂速度が十分速いとき、き裂は突然分岐し、二つの枝き裂が発生する。本研究は、高速き裂の分岐過程において、エネルギー解放率(材料の破壊に費やされるエネルギー)が、二つの枝き裂に等しく分配されているか否かを実験的に明らかにする。具体的には、以下の4項目を実施する。

- (1) 分岐直後のき裂の全エネルギー解放率を測定する。
- (2) 2つの枝き裂のエネルギー解放率を測定する。
- (3) それぞれの枝き裂が、全エネルギー解放率の50%ずつを担っているか、を明らかにする。
- (4) 枝き裂のエネルギー解放率の配分比率と、き裂の3次元構造及びエネルギー解放率の連続性との関連を明らかにする。

3. 研究の方法

3.1 試験片

本研究では、長さ50mm、幅300mm、厚さ3mmの試験片を用いる。試験片材料は、

PMMA (Polymethyl methacrylate)と Homalite 100 である。

試験片に十分な引張応力を負荷し、その状態で試験片上端中央の点 S に微小欠陥を発生させる(図 1)。微小欠陥の発生にはナイフエッジを用いる。その微小欠陥から高速進展き裂が発生し、試験片中央付近の観測領域内で二つに分岐する。き裂の分岐過程を高速度ホログラフィ顕微鏡法で撮影する。

分岐は確率過程であるため、いつも試験片中央で分岐するわけではない。したがって多数の実験と撮影を繰り返し、その中から試験片中央で分岐したき裂を選択する。

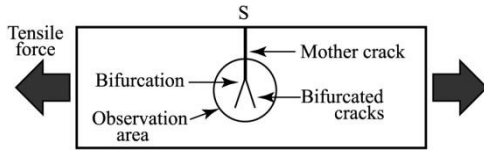


図 1 試験片

3.2 測定法

高速分岐直後における二つの枝き裂のエネルギー解放率は、以下の手順で測定される。

- (1) 高速分岐き裂を高速度ホログラフィ顕微鏡法を用いて撮影する。
- (2) 撮影された顕微鏡写真から、二つの枝き裂のき裂開口変位(COD)を測定する。
- (3) 測定されたき裂開口変位から、動的破壊力学の理論式を用いて枝き裂のエネルギー解放率を求める。

具体的な方法を以下に示す。

高速度ホログラフィ顕微鏡法(記録) 高速度ホログラフィ顕微鏡法の記録用光学系を図 2 に示す。き裂が試験片 SP 中において分岐しているとき、パルスレーザー PL1, 2, 3 が順次発振する。パルスレーザー PL1 から出た光は、ビームスプリッタ BS1 で二つに分けられる。BS1 で反射した光は、レンズ L1 と凹面鏡 CM で平行光線となり、鏡 M1, M2 で反射してホログラフィ乾板 HP に入射角 30 度で入射する。これが一コマ目の参照光である。ビームスプリッタ BS1 を透過した光は、レンズ L4, L7, L8 を通って平行光線になり、試験片 SP の表面に垂直に入射する。試験片表面で反射された光はビームスプリッタ BS6 で反射

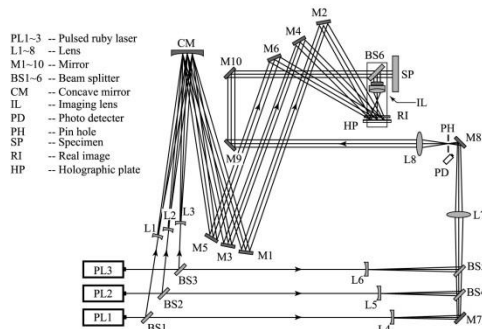


図 2 高速度ホログラフィ顕微鏡法

し、結像レンズ IL を通過してホログラフィ乾板に垂直に入射する。これが物体光である。物体光は、ホログラフィ乾板の直前にき裂と試験片の実像を形成する。このようにして、1 コマ目のき裂像がホログラフィ記録される。

一コマ目の記録から数マイクロ秒後に、パルスレーザー PL2 が発振し、2 コマ目のき裂像がホログラフィ乾板 HP 上に重ねて記録される。この時の参照光入射角は 45 度である。3 コマ目のホログラフィ記録も同様に行われる。

き裂像の再生と顕微鏡撮影 記録されたき裂像の再生と顕微鏡撮影の方法を図 3 に示す。現像処理の後、ホログラフィ乾板を再生光で照明し、物体光の共役光を再生する。物体光の共役光は結像レンズを通過し、ビームスプリッタ BS6 で反射して、試験片のあった位置に試験片とき裂の実像を形成する。この実像を顕微鏡で拡大し、分岐き裂先端を撮影する。

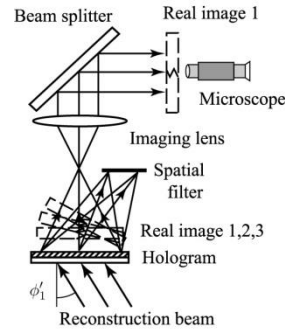


図 3 き裂像の再生と顕微鏡撮影

き裂開口変位とエネルギー解放率測定 撮影された分岐き裂の顕微鏡写真から、枝き裂のき裂開口変位と母き裂のき裂開口変位を測定する。測定された開口変位(COD)から、以下の式を用いてエネルギー解放率 $G(v)$ を求める。

$$G(v) = \frac{1}{\mu} A_I(v) K_I^2$$

$$K_I(v) = \sqrt{\frac{\pi}{8}} \frac{\mu}{1 - \eta_1} \frac{1}{L(v)} a \quad (1)$$

$$COD = a\sqrt{r}$$

ここで、 v はき裂速度、 $K_I(v)$ はき裂の動的応力拡大係数、 r はき裂先端からの距離、 μ はポアソン比、 η_1 はポアソン比の関数、 $A_I(v)$ と $L(v)$ はき裂速度の関数である。

枝き裂の開口変位を測定することにより、その枝き裂のエネルギー解放率を求めることができ、母き裂の開口変位を測定することにより全エネルギー解放率を得ることが出来る。

4. 研究成果

得られた研究成果の一例を以下に示す。この他にも多数の実験を行ったが、ほぼ同様の

結果が得られている。

4.1 高速分岐き裂の顕微鏡写真

図4はPMMA中の高速分岐き裂の写真である。き裂速度は610m/sである。枝き裂1のき裂開口変位が、枝き裂2のき裂開口変位よりも小さいことが分かる。そのため、開口変位分布から見ると、分岐は非対称であるように見える。この写真から、枝き裂1,2と母き裂に沿ってき裂開口変位(COD)を測定できる。

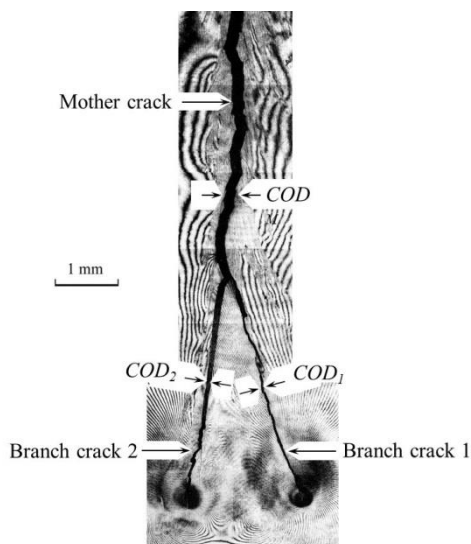


図4 高速分岐き裂 ($v=610\text{m/s}$)

4.2 き裂開口変位

図5は図4のき裂の開口変位(COD)測定の結果である。母き裂の開口変位はき裂先端からの距離 r の $1/2$ 乗に比例している。したがって、母き裂の開口変位は、分岐き裂全体の動的応力拡大係数とエネルギー解放率を与える。

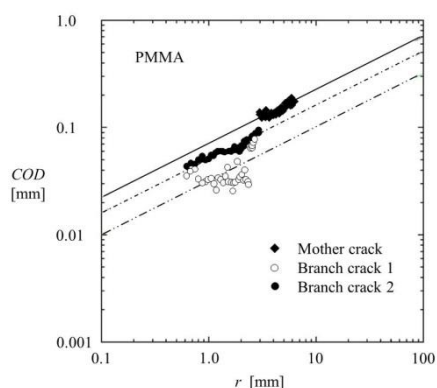


図5 高速分岐き裂のき裂開口変位

枝き裂2の開口変位も、き裂先端からの距離 r の $1/2$ 乗に比例している。したがって、枝き裂2のき裂開口変位は、枝き裂2の動的応力拡大係数とエネルギー解放率を与えることができる。

しかし、枝き裂1の開口変位はき裂先端からの距離の $1/2$ 乗に比例していない。したが

って、動的破壊力学の理論式(1)を適用することが出来ず、枝き裂1の動的応力拡大係数とエネルギー解放率を求めることは出来ない。

4.3 応力拡大係数分布

図5のき裂開口変位から求めた動的応力拡大係数の分布を図6に示す。母き裂のき裂開口変位から求めた動的応力拡大係数は、き裂先端からの距離 r に依らずほぼ一定の値を示している。したがって、母き裂の応力拡大係数は正しい値を示していると言える。

また、枝き裂2の応力拡大係数も r に依らずほぼ一定の値をしめしており、枝き裂2の応力拡大係数の正しい値を示している。

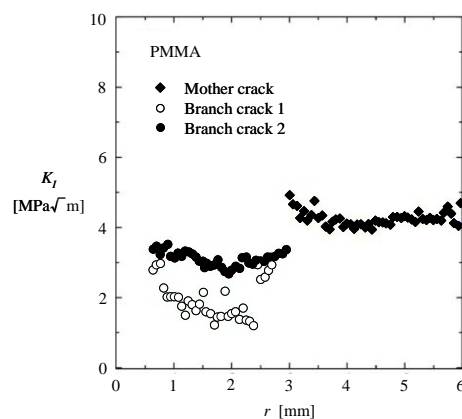


図6 分岐き裂の動的応力拡大係数

それに対して枝き裂1の応力拡大係数は、一定にはなっていない。これは、枝き裂1のき裂開口変位が、き裂先端からの距離の $1/2$ 乗に比例していないためである。したがって、枝き裂1の応力拡大係数は、正しい値を示していない。

4.4 枝き裂のエネルギー解放率

分岐き裂全体の応力拡大係数と枝き裂2の応力拡大係数が正しく測定されていることから、それらのエネルギー解放率を求めることができる。また、分岐き裂全体のエネルギー解放率から枝き裂2のエネルギー解放率を差し引くことにより、枝き裂1のエネルギー解放率も求めることができる。

その結果、分岐き裂全体のエネルギー解放率に占める枝き裂1のエネルギー解放率の割合は、約46%、枝き裂2のそれは約54%であった。他の実験においても同様のけっかが得られており、僅かな非対称性が認められた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者には下線)

【雑誌論文】(計 1件)

(1) 鈴木新一, 西川昌志, 田村慶太, 光線追跡法によるPMMA平板中の残留応力測定実験力学, (掲載予定)

【学会発表】(計 23件)

(1) 鈴木新一, 征矢祐彦, 中出貴裕, 沼田義弥, 光干渉法による高速分岐き裂の動的

- 応力拡大係数測定, *日本機械学会東海支部第 64 期総会・講演会講演論文集*, No.153-1, (2015), 122, 日本機械学会.
- (2) 坂真一, 小林岳史, 山本大喜, 鈴木新一, PMMA の破壊靱性値の分子量依存性に関する実験的研究, *日本機械学会東海支部第 64 期総会・講演会講演論文集*, No.153-1, (2015), 123, 日本機械学会.
- (3) 前田生進, 宮川穰, 鈴木新一, 高速多重分岐き裂へのコースティック法の適用, *第 11 回材料の衝撃問題シンポジウム講演論文集*, (2014), 89-90, 日本材料学会.
- (4) 宮川穰, 前田生進, 鈴木新一, 高速多重分岐き裂の実験に使用する試験片と破壊実験, *第 11 回材料の衝撃問題シンポジウム講演論文集*, (2014), 91-93, 日本材料学会.
- (5) 岩崎裕介, 鈴木新一, 分岐切欠先端から発生するき裂の進展角の測定, *第 11 回材料の衝撃問題シンポジウム講演論文集*, (2014), 104-106, 日本材料学会.
- (6) 征矢祐彦, 中出貴裕, 鈴木新一, 高速多重分岐き裂の撮影を目的としたパルスホログラフィ光学系の構築, *第 11 回材料の衝撃問題シンポジウム講演論文集*, (2014), 108-109, 日本材料学会.
- (7) 鈴木新一, 石田鉄平, 坂真一, 坂上賢一, 高速分岐き裂の応力拡大係数測定への外挿法の適用, *日本実験力学会 2014 年度年次講演会講演論文集*, (2014), 118-119, 日本実験力学会.
- (8) 藤島達也, 清水康伸, 鈴木新一, コースティック法を用いた混合モード応力拡大係数測定における測定精度について, *日本実験力学会 2014 年度年次講演会講演論文集*, (2014), 120-121, 日本実験力学会.
- (9) 西川昌志, 田村慶太, 鈴木新一, レーザーを用いた非破壊法によるアクリル板内の残留応力推定, *日本実験力学会 2014 年度年次講演会講演論文集*, (2014), 122-123, 日本実験力学会.
- (10) Shinichi Suzuki, Kenichi Sakaue, Teppei Ishida and Shinichi Saka, Measurement of Crack Opening Displacement of Through Branch Cracks of a Rapidly Bifurcating Crack, *The 16th International Conference on Experimental Mechanics*, Cambridge, UK, (2014).
- (11) Shinichi Suzuki, M. Haniff Hadi B. M. S., Shin Tanaka and Tomotaka Miyashita, Effect of virtual crack tip position on measurement of stress intensity factor of a notch by Moire interferometry, *International Conference on Computational & Experimental Engineering and Sciences*, Changwon, Korea, (2014).
- (12) 藤島達也, 岩崎裕介, 征矢祐彦, 鈴木新一, コースティック法を用いた混合モード応力拡大係数測定に及ぼす 3 次元応力場の影響, *日本機械学会 M&M2013 材料力学カンファレンス講演論文集*, No.13-8, (2013), CD-ROM.
- (13) Muhd Haniff Hadi, 宮下友貴, 鈴木新一, き裂先端に発生する三次元応力場が開口変位に及ぼす影響, *日本機械学会 M&M2013 材料力学カンファレンス講演論文集*, No.13-8, (2013), CD-ROM.
- (14) 田中信, 感本広文, 鈴木新一, 平板中の切欠における開口変位の数値解析, *日本機械学会 M&M2013 材料力学カンファレンス講演論文集*, No.13-8, (2013), CD-ROM.
- (15) 石田鉄平, 坂上賢一, 鈴木新一, 平板試験片の両面同時撮影による高速分岐き裂の応力拡大係数測定, *日本機械学会 M&M2013 材料力学カンファレンス講演論文集*, No.13-8, (2013), CD-ROM.
- (16) Shinichi Suzuki, Takahiro Yabo, Tatsuya Fujishima and Yusuke Iwasaki. Measurement of Crack Direction and Stress Field at Bifurcated Notch Tip, *Proceedings of the 30th Danubia-Adria Symposium on Advances in Experimental Mechanics*, (2013), 17-18, (CD-ROM).
- (17) Shinichi Suzuki, Kenichi Sakaue and Masahiro Koujiba, Measurement of Energy Release Rate of a Branch Crack in PMMA Immediately after Rapid Crack Bifurcation - In the Case that COD of the Branch Crack is Proportional to \sqrt{r} -, *The 9th International Conference on Advances in Experimental Mechanics*, (2013), Cardiff, UK, CD-ROM.
- (18) 佐藤岳博, 征矢祐彦, 坂上賢一, 鈴木新一, 十分発達した高速分岐き裂における枝き裂のエネルギー解放率測定, *日本実験力学会 2013 年度年次講演会講演論文集*, (2013), 31-32, 日本実験力学会.
- (19) 屋保孝洋, 岩崎裕介, 藤島達也, 鈴木新一, 分岐切欠先端から発生するき裂の進展方向とき裂先端応力場の測定, *日本実験力学会 2013 年度年次講演会講演論文集*, (2013), 33-34, 日本実験力学会.
- (20) 鈴木新一, 高速度ホログラフィ顕微鏡法による対称な分岐き裂の開口変位測定, *高速度イメージングとフォトニクスに関する総合シンポジウム 2013 講演論文集*, (2013), CD-ROM.
- (21) Shinichi Suzuki, Taiga Murai, Shouhei Nishikita and Youta Katayama, Photoelastic Measurement of Residual Stress of Light Bulbs for Automobiles with Lighting, *Proceedings of 15th International Conference on Experimental Mechanics*, (2013), 147-158, CD-ROM.
- (22) 鈴木新一, Muhamad Faiz Bin Jaafar Zahri, Muhd Haniff Hadi Bin Mohd Salamun, 平板試験片中における分岐切欠の開口変位と応力拡大係数測定: 枝切欠長さが 6mm の場合, *日本実験力学会 2012 年次講演会講演論文集*, (2012), 45-47, 日本実験力学会.

- (23) 鈴木新一, 糀場正洋, 坂上賢一, ホマライト 100 中の高速分岐き裂における枝き裂間のエネルギー解放率配分; ひとつの枝き裂の COD が \sqrt{r} に比例する場合, 日本実験力学会 2012 年次講演会講演論文集, (2012), 119-120, 日本実験力学会.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木 新一 (Shinichi Suzuki)
豊橋技術科学大学 総合教育院/大学院機械工学系 教授
研究者番号: 60135415