

脆性亀裂停止に向けた破面粗さ上昇要因の解明

Main factors for fracture surface roughness development improving brittle crack arrest toughness

学籍番号 37196404

中村 徳孝

指導教員

川畑 友弥

(令和3年1月20日提出)

Keywords: 脆性破壊、破面粗さ、亀裂分岐、局所応力、ひずみ速度依存性

1. 背景と目的

近年は、鋼材の極厚化や、低温環境における構造物需要の傾向を受けて、鉄鋼構造物はこれまで以上に激しい脆性破壊の危険性にさらされるようになった。これに対処するため、鉄鋼材料の脆性破壊に対する抵抗性能である靱性を改善する取り組みが行われ、TMCP法や非鉄金属の微量配合による成分調整などが現在主要な技術として利用されている。しかし、これらの既存の技術だけでは現在の構造物利用の傾向に対処できない、もしくはコストが膨大となるという問題に直面するようになり、鉄鋼構造物の革新的な進歩は見込めない状況になりつつある。この状況を打開するためにも、新しいコンセプトの靱性改善技術の開発が求められるようになってきた。

本研究では、靱性改善新技術開発の一環として、破面粗さや亀裂分岐の促進による靱性改善に関する根本的な検討を行う。動的伝播亀裂のエネルギー収支の理論[1]に基づけば、破面粗さが大きくなると破面の形成のために多くのエネルギーが散逸され、亀裂の運動エネルギーが減少することで亀裂の進展に対する抵抗として働く。したがって、意図的に破面粗さを上昇させることが脆性亀裂伝播の抑制に有効である。しかし現状、破面粗さの上昇条件は明確になっていない。破面粗さの上昇は亀裂の直進不安定性によって引き起こされると考えられているが、詳細な機構については1951年にYoffe[2]が問題提起をして以来の未解決問題である。本研究では、試験片形状が破面粗さに影響を及ぼすという知見[3]に基づき、破面粗さの上昇要因の明確化、ならびに破面粗さ増大の機構解明を目指すとともに、破面粗さによる靱性改善の構造物への適用可能性を検討する。

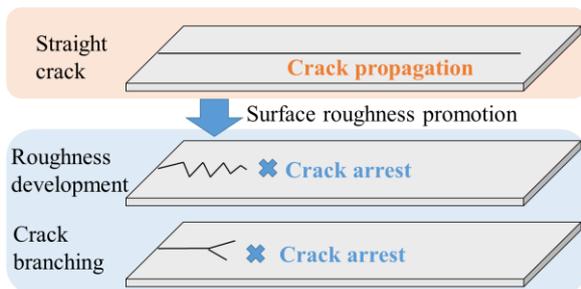


Fig. 1 Concept of our research

2. 実験

2.1 試験片形状を変化させた同一材料破壊試験

形状の異なる3種類の試験片(引張試験、曲げ試験、逆進曲げ試験)による破壊試験を行った。試験片形状の違いにより破面粗さの上昇傾向が異なり、破面粗さ上昇の要因を切り分けることに利用できる結果を得ることを期待した。本研究では、供試材としてアクリル樹脂を使用した。樹脂材料を供試材とした試験は、鉄鋼材料による試験と比較して成功率が高く、簡便かつ安価に実施可能であることから、今回のように多くのサンプル数を必要とする比較試験に適している。また、樹脂の中でもアクリルは塑性変形の程度が小さく、理想的な弾性材料に近い変形挙動を示すことが期待できる。これにより、線形弾性体を仮定した数多くの理論的なアプローチを高い精度で適用可能であり、実験結果を扱いやすいという利点がある。試験片の亀裂伝播部に貼り付けたひずみゲージによって、亀裂先端の特異応力場による局所的引張ひずみの観測を行うことにより亀裂伝播速度を計測した。各試験片形状について、ノッチ先端の鋭さや負荷応力の調節を行うことで、幅広

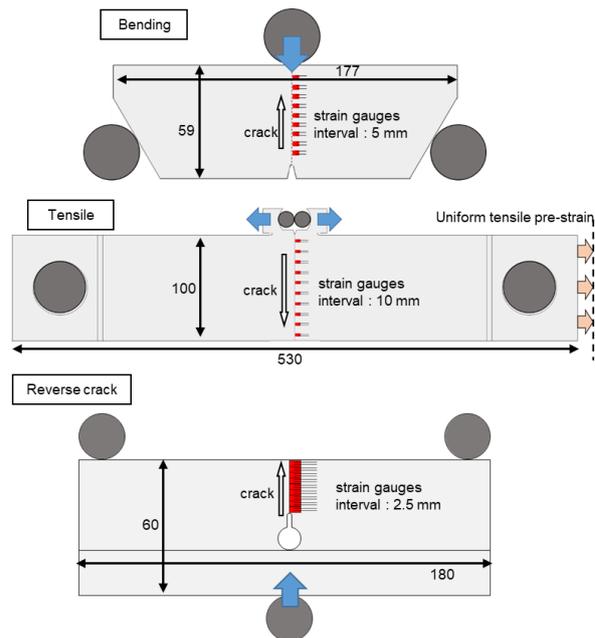


Fig. 2 Configuration of three types of specimens

い駆動力および亀裂伝播速度における破面を入手できるような工夫を施した。

## 2.2 亀裂分岐限界条件の比較

破面の粗さが極端に上昇すると、亀裂が明確な分岐を起こし、2本の亀裂として伝播する現象が見られる。3種類の試験片形状における亀裂分岐発生時の亀裂伝播速度を測定し、結果を比較した。その結果、Fig. 3に示すように、引張試験では亀裂伝播速度が650 m/s、逆進曲げ試験では830 m/s、曲げ試験では950 m/s以上の亀裂伝播速度で亀裂分岐が発生するとわかり、引張試験では、他の試験片形状と比較して低い亀裂伝播速度でも亀裂分岐が観測され、破面粗さが上昇しやすい試験片形状であることが推測される結果となった[4]。

## 2.3 破面粗さの測定

実験で得られた破面について、レーザー顕微鏡を用いた破面粗さの測定を行った。亀裂分岐域に限定されない破面全面に対する粗さの定量手法を確立することが目的である。粗さパラメータが数多く存在し、粗さの評価手法が定まっていない点、粗さの測定値が測定スケールの影響を受ける点を問題点として挙げた上で、これらの問題点を排除する測定方法として、表面積を評価パラメータとし、測定倍率を20倍で固定する方法を確立した。粗さの指標として表面積を使用したのは、亀裂伝播のエネルギー理論に基づけば、表面積の増大が靱性改善の主要因であるためである。3種類の形状の試験片それぞれの破面について、板厚中央部で亀裂伝播方向に等間隔に計測を行った。レーザー顕微鏡で測定された破面表面積の一例をFig. 3に示している。破面の表面積の測定値の分布は直感的な破面粗さと良く整合しており、表面積による破面粗さの記述は妥当であると判断できる。表面積の測定結果を、横軸を亀裂伝播速度として試験片形状ごとにプロットしたものをFig. 5に示している。破面粗さの上昇傾向は、試験片形状の影響を大きく受けて互いに異なっ

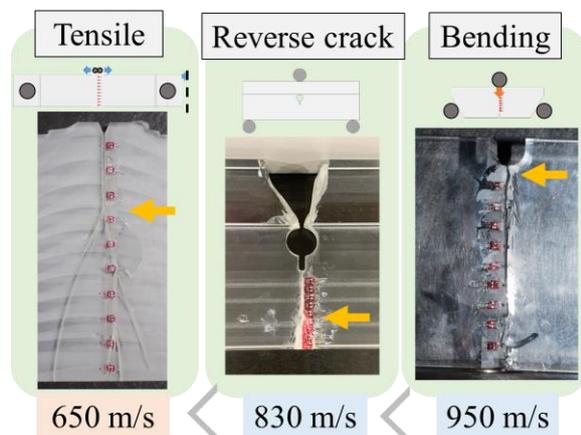


Fig. 3 Crack speed at the crack branching point

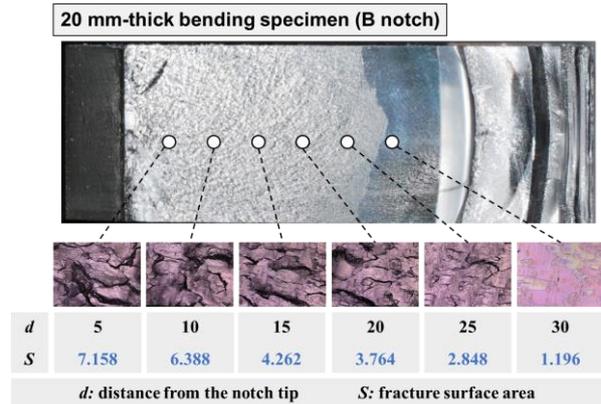


Fig. 4 Example of measured fracture surface roughness

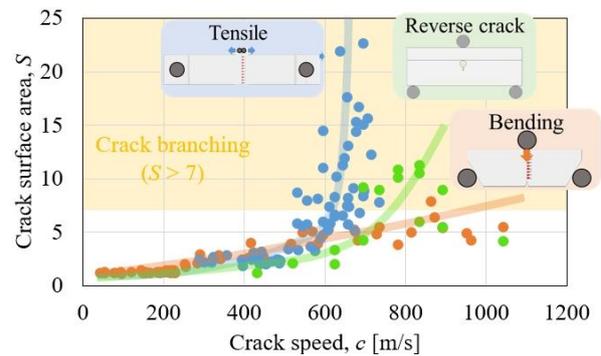


Fig. 5 Fracture surface development under various geometry

ているということが明確に示された。引張試験では他の2種類の試験片形状と比較して破面粗さが上昇しやすい傾向があり、亀裂伝播速度が700 m/s程度に達すると破面粗さは極端に上昇し、亀裂はそれ以上加速しなくなる。また、定量的な破面粗さの測定値が7付近に達すると亀裂分岐が発生するという整理が可能になった。

## 3. 亀裂伝播へのひずみ速度依存性影響

### 3.1 アクリル物性値のひずみ速度依存性

材料にはひずみ速度によってその挙動を変えるものがある[5]ことが、調査を進めるうちにわかってきた。これは、本研究の実験でレイリー波速度を超える亀裂伝播速度が観測されたこと、共振法と引張試験によって観測されたヤング率の値が異なったことにより明るみに出ることとなった。ひずみ速度依存性を受ける物性値には、ヤング率、ポアソン比、限界破壊応力、塑性変形量といったものがあり、いずれも破壊力学では重要な物性値である。亀裂伝播の現象は、亀裂先端の特異応力場が高速で移動することで、ひずみ速度の影響を大きく受けていることが推測される。

まず、本研究の実験において実際に亀裂伝播中にひずみ速度依存性が影響していたのかについて、実験再現解析に基づいて確認することとした。ひずみ速度の上昇による材料固有のレイリー波速度 $c_r$ が、亀裂伝播速度に従って上昇することを

考慮して、亀裂伝播速度を実質的な有効量 $c_{eq}$ に補正する式(1)を構築した。レイリー波速度は亀裂伝播速度に上限を与えることが知られており[6]、破面粗さの現象もレイリー波速度により無次元化された亀裂伝播速度により整理できると考えられている。レイリー波速度は、ヤング率 $E$ 、ポアソン比 $\nu$ 、密度 $\rho$ を用いて、式(2)によって計算できる[7]。静的なアクリルの物性値を用いてこれを計算すると(4)の結果が得られる。亀裂伝播速度の補正を行うモデルと行わないモデルの間で解析結果を比較し、どちらが実験結果をより精度よく再現するかを確認した。

$$\frac{c_{eq}}{c_{r0}} = \frac{c}{c_r} = \frac{c}{c_{r0}} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{c}{c_{r0}}\right)} \quad (1)$$

$$c_r \approx \left(1 - \frac{0.135}{3 - 4k^2}\right) \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \quad (2)$$

$$k = \sqrt{\frac{1-\nu}{2}} \quad (\text{plane stress}) \quad (3)$$

$$c_{r0} = 811 \text{ m/s} \quad (4)$$

曲げ試験片の1つについて再現解析を実施した結果として、ひずみ速度依存性を考慮して亀裂伝播速度の補正を行ったモデルでは、散逸エネルギーの推移が直線的な単調減少傾向を示し、実験的な破面粗さの推移を高い精度で再現した。また、散逸エネルギーの実数値も、アクリルのシャルピ

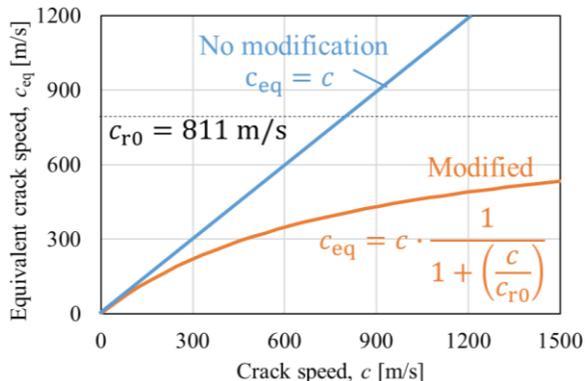


Fig. 6 Crack speed modification

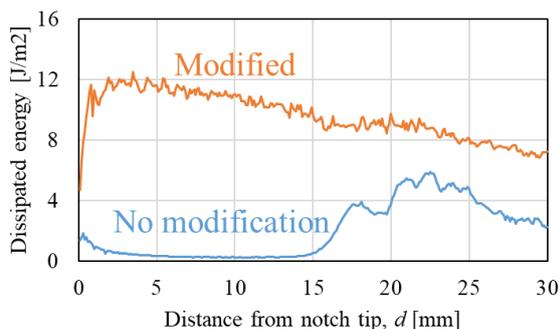


Fig. 7 History of dissipated energy by FEM

一衝撃試験の値  $17 \text{ J/m}^2$ に近い結果を与えた。これらの点は補正を行わないモデルでは全く再現できておらず、補正モデルの有効性を示した。補正を行ったモデルでは、散逸エネルギーのみならず、特異応力場の応力分布、局所応力推移の観点でも良い結果を与えた。亀裂伝播現象に対するひずみ速度依存性の影響が存在していることが確認されたことに加えて、式(1)の実質的な亀裂伝播の補正により、ヤング率をひずみ速度に非依存としながらひずみ速度依存性の影響を考慮し、既存の解析手法に実質的に移行可能とする簡易手法を確立した。

### 3.2 ひずみ速度依存性補正周方向応力理論

破面粗さの上昇や亀裂分岐の分岐角を説明する有名な理論に、Yoffe[2]の周方向応力理論がある。周方向応力理論は、亀裂先端の周方向応力が最大の方向に亀裂が進展するという考えである。Yoffe は動的な亀裂先端の応力場に解析的な解を与え、周方向応力分布と亀裂伝播速度の関係を計算した。結果として、亀裂伝播速度が  $0.7 c_r$ に達すると、周方向応力が直進方向でない角度で最大になり、その角度が  $60$ 度付近を推移することで、破面粗さ発生の限界条件を  $0.7 c_r$ の亀裂伝播速度、亀裂の分岐角を約  $60$ 度と見積もった。しかし、実験的には破面粗さ発生の限界条件は  $0.36 c_r$ 、分岐角は  $15\sim 30$ 度が過去に多く報告されている値であり、Yoffe の周方向応力理論は必ずしも破面粗さの現象を説明するものではなかった。

本研究では、材料のひずみ速度依存性により、周方向の限界破壊応力の分布が変化することを考慮して、周方向応力理論の修正を行った。ひずみ速度によるヤング率、ポアソン比、限界破壊応力、塑性域寸法への影響を考慮した限界破壊応力のモデルを作成した。計算結果を Fig. 8 に示す。破面粗さの発生条件として  $0.35 c_r$ 、亀裂の分岐角として  $30$ 度付近を示す結果を得た。これは実験結果を精度良く再現するものであり、破面粗さの発生機構を限界破壊応力のひずみ速度依存性により説明できる可能性を示した。

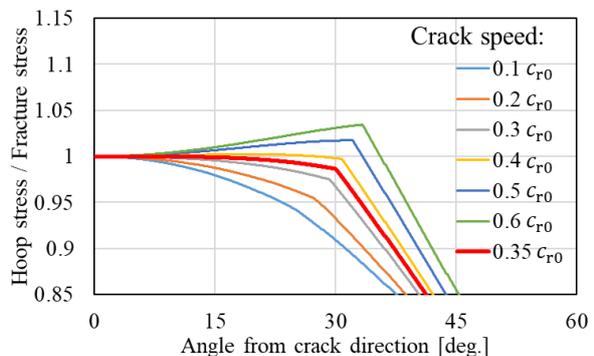


Fig. 8 Hoop stress / Fracture stress distribution

## 4. 破面粗さ上昇要因の解明

### 4.1 実験再現解析による影響因子決定

破面粗さに対する影響因子として過去に提案されたパラメータには、応力拡大係数、エネルギー解放率、単位時間当たりエネルギー流入束、亀裂の加速度、応力多軸度、応力の亀裂進展方向成分といったものが存在する。本研究では、実験を再現する有限要素法解析を実施し、これらのパラメータの実験中の値を取得し、破面粗さとの関係を調査することで、最も破面粗さの上昇を説明するパラメータを決定することとした。結果として、動的応力拡大係数が破面粗さに対する影響因子であることがわかった。Fig. 10 に示しているように、破面粗さによる破面状態の分類である **Mirror**, **Mist**, **Branch** の破面は、亀裂伝播速度と動的応力拡大係数の 2 パラメータにより明確に区分され、この区分は試験片形状によらずに一律に与えられた。亀裂伝播速度が低くても、動的応力拡大係数が大きい場合に破面粗さが大きくなることがわかった。動的応力拡大係数と亀裂伝播速度の関係である  $K_d$ - $v$  関係の試験片形状依存性が、破面粗さ上昇傾向を変化させていることが導かれた。一方で、亀裂の加速度、応力多軸度、応力の亀裂進展方向成分は破面粗さを説明しないパラメータであることが示された。

### 4.2 破面粗さ上昇要因の考察

局所応力理論に基づいて、破面粗さ上昇要因に関する考察を行った。 $K_d$ - $v$  関係が、亀裂先端における局所応力と限界破壊応力の釣り合いにより決定され、局所応力と亀裂伝播速度の関係が試験片形状の影響を受けることが  $K_d$ - $v$  関係の試験片形状依存性の要因であると結論付けられる。局所応力と動的応力拡大係数は必ずしも対応せず、破

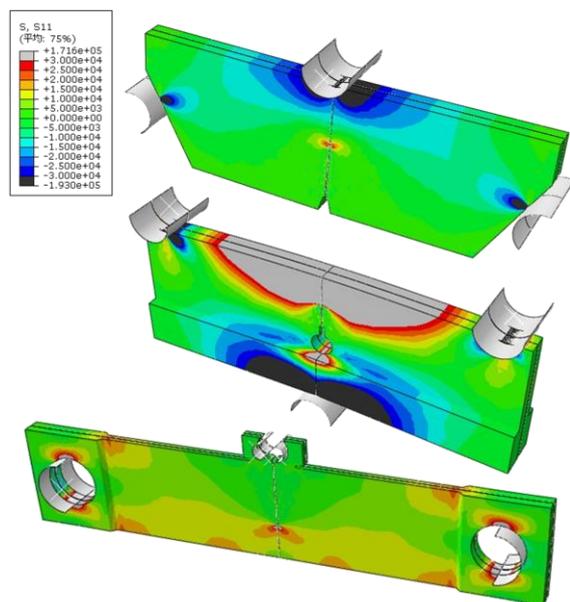


Fig. 9 Crack propagation models

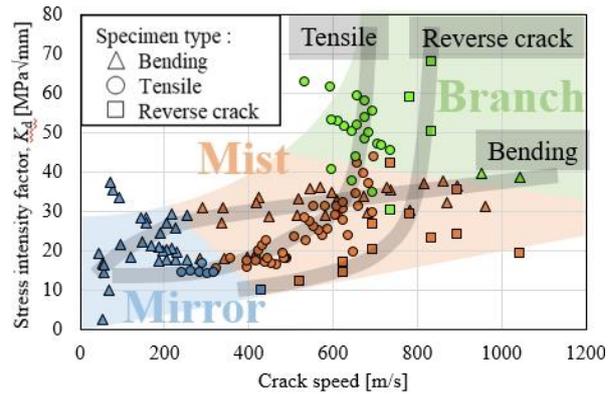


Fig. 10 Fracture surface roughness classified with  $K_d$  and  $v$

面粗さと局所応力が対応しており、局所応力が破面粗さを決定していることを提案した。

最後に、破面粗さの現象の靱性改善への適用法として、試験片形状ごとの  $K_d$ - $v$  関係の計算結果を蓄積することで、破面粗さが上昇しやすい形状を法則化することを提案した。

## 5. 結論

本研究では以下の成果を得ることができた。

- 破面粗さの試験片形状依存性を実験的に確認し、引張試験で亀裂分岐が発生しやすく、破面粗さが上昇しやすいことを示した。
- 測定スケール依存性の問題を排除した合理的な破面粗さ評価手法を確立した。
- 材料物性値のひずみ速度依存性が亀裂伝播現象に与える影響を確認し、実質的な亀裂伝播速度の考えにより影響を補正する手法を確立した。
- ひずみ速度依存性を考慮した周方向応直理論が破面粗さ上昇機構を説明する可能性を示した。
- 破面粗さ上昇要因が、動的応力拡大係数の上昇によるものであることを示した。
- 破面粗さの現象が亀裂先端の局所応力により支配されていることを提案した。

## 参考文献

- [1] T.L. Anderson, Fracture Mechanics, CRC Press (2005).
- [2] E.H. Yoffe, The moving griffith crack, Philosophical Magazine 42 (1951) 739–750.
- [3] T. Kawabata, F. Tonsho, Y. Nishizono, N. Nakamura, Y. Takashima, Controlling factors for roughness increases on cleavage fracture surfaces and crack branching in polycrystalline steel, Theoretical and Applied Fracture Mechanics 100 (2019) 171–180.
- [4] N. Nakamura, T. Kawabata, Y. Takashima, F. Yanagimoto, Effect of the stress field on crack branching in brittle material, Theoretical and Applied Fracture Mechanics 108 (2020) 102583.
- [5] H. Wu, G. Ma, Y. Xia, Experimental study of tensile properties of PMMA at intermediate strain rate, Material Letters 58 (29) (2004) 3681–3685.
- [6] A.N. Stroh, A theory of the fracture of metals, Philosophical Magazine 6 (1957) 418–465.
- [7] K.B. Broberg, Cracks and Fracture, Academic Press (1999).