

脆性亀裂分岐および破面粗さに対する多軸応力場影響の調査

Effect of triaxial stress distribution upon brittle crack branching and fracture surface roughness

学籍番号 03-170913

中村 徳孝

指導教員

川畑 友弥

(平成 31 年 1 月 31 日提出)

Keywords: 脆性破壊、樹脂材料、粗さ、分岐、応力多軸度

1. 背景と目的

鉄鋼材料の構造物を瞬時全崩壊に陥れ得る脆性破壊は、巨大構造物にとって大きな脅威である。近年はコンテナ船の大型化や低温海域の活用等により、船舶分野で脆性破壊の危険性が増している。それに伴い、船用鋼材で脆性亀裂伝播を停止させる性能の指標であるアレスト靱性値の要求は極度に上昇し、既存の技術で経済的に実現可能な性能の上限に近づいている。従って、この状況を打開するアレスト靱性改善の新技术の需要が高まっている。ここで、本研究の目的は、破面遷移や亀裂分岐の現象を利用したアレスト性能改善の新技术の開発である。脆性破面が粗くなるほど亀裂進展力が低下し亀裂が停止しやすくなるとがエネルギー収支の考えに基づき提唱されており、意図的に破面遷移や亀裂分岐を発生させる材料および構造により材料の靱性改善を見込むことができる。過去の研究でこれらの現象の発生は亀裂伝播速度のみにより決まると広く考えられている一方で、現象の全てをうまく説明するには至っていない。亀裂伝播速度以外にこれらの限界条件に影響する要因の存在も提案されており、頓所[1]は亀裂分岐の限界条件に応力多軸度が影響し、応力多軸度が大きいほど亀裂が分岐しやすいという仮説を初めて提案した。本研究ではこの仮説を実証するため、破面遷移と亀裂分岐の限界条件に対する応力場の影響を確認するため樹脂材料による系統的な実験を行った。

2. 実験

2.1 異なる負荷形態による同一材料破壊試験

供試材として 3 種類の樹脂(PCET1600, Comoglas, Delaglas)を使用し、曲げ試験と引張試験

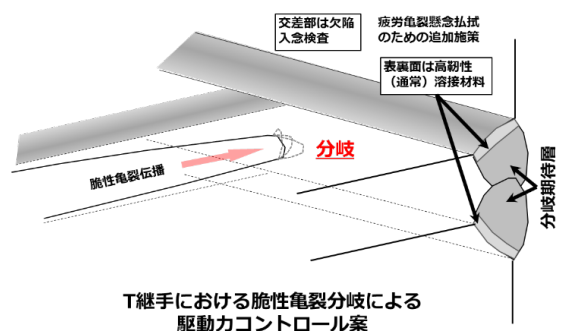


Fig.1 Arresting promotion using branching

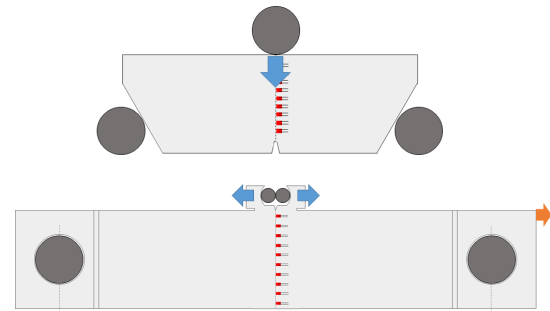


Fig. 2 Bending and tensile specimen

験の 2 種類の実験を行った。負荷形態の違いにより亀裂先端近傍の応力多軸度が変化する[2]ため、これらの試験片における破面遷移と亀裂分岐の限界条件を比較することで応力多軸度の影響を評価できる。試験片にひずみゲージを張り付け亀裂先端特異応力場による局所的引張ひずみの観測により亀裂伝播速度を取得した。

実験により、Comoglas の試験片について 2 種類の負荷形態双方で巨視的な分岐を観測した。分岐発生時の亀裂伝播速度を調べると、曲げ試験では引張試験よりも亀裂分岐に高い亀裂伝播速度が必要であった。引張試験では亀裂伝播速度が 650 m/s(0.59c_r)程度のときに巨視的な亀裂分岐が発生したことに対して、曲げ試験では 950 m/s(0.86c_r)以上の亀裂伝播速度が必要であり、曲げ試験では亀裂分岐が発生しにくいという結果を得た。曲げ試験で亀裂分岐が確認されたノッチ付近は応力多軸度が小さいことが言われており[2]、応力多軸度が大きいときに亀裂分岐が発生しやすいという頓所の仮説を支持する結果を得た。

一方で、PCET1600 及び Comoglas の試験片について 2 種類の負荷形態双方で破面遷移を観測し、破面遷移時の亀裂伝播速度を比較するとほとんど差はないという結果が得られ、破面遷移の現象はエネルギー収支に支配され応力場の影響を受けない可能性が高いことが分かった。

2.2 破面観察

実験で得られた破面を詳細に観察し、破面で発生しているマイクロ機構の解明を試みた。結果として、低速域から順に pre-parabola, parabola, periodic, rough surface といった一連の破面パターンを確認した。また、PCET1600 の試験片で hackle の破面を広い速度帯で確認し、破面状態が亀裂伝播速度

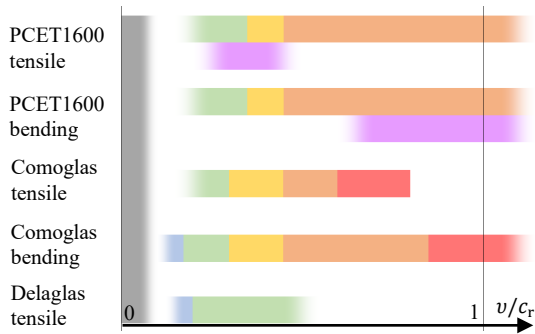


Fig.3 Relation between crack velocity and fracture surface patterns

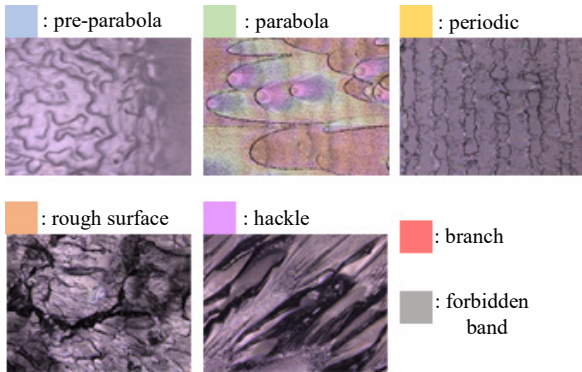


Fig.4 Legend for fracture surface mapping

によって一意に定まらないことがわかった。一連パターンの様態は供試材によって大きく異なり、同じアクリル材料である Comoglas, Delaglas 間でも大きく異なっていた。また、parabola パターンは亀裂伝播速度の影響を受け、その成因である microcrack の発生も亀裂伝播速度の影響を受けることが分かった。対照的に periodic パターンは亀裂伝播速度の影響を受けずに間隔がほとんど一定になることが分かった。rough surface の観察では、Comoglas で微小な分岐 microbranch を確認し、PCET1600 でもそれに準ずるパターンが確認できた。

3. microbranch 再現静的 FEM 解析

破面観察により、巨視的な亀裂分岐が発生していない領域においても微小な分岐 microbranch の存在を確認したことを受け、巨視的な亀裂分岐の発生が microbranch の成長の可否によって決まるという仮説を立て、それを確認する静的平面 FEM 解析を行った。microbranch を想定した微小分岐した亀裂をあらかじめ導入したモデルを 2 種類

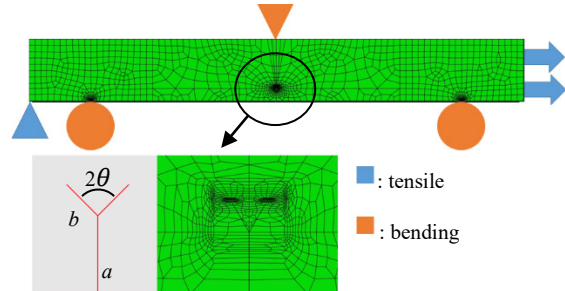


Fig.5 Schematic drawing of FEM model

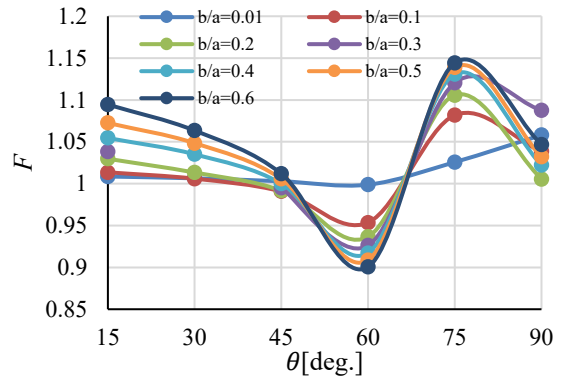


Fig.6 Change of the rate of normalized stress intensity factors of branched crack between tensile and bending conditions, F by θ ($b/a=\text{const.}$)

の負荷形態で負荷し、同じ長さを持つ単一亀裂の応力拡大係数で無次元化した応力拡大係数の負荷形態による比を評価した。結果として、亀裂の片側開口角 θ が 60 deg 程度の際に曲げ負荷条件の無次元化応力拡大係数が引張負荷に対して小さいことが分かった。片側開口角 $\theta=60$ deg. という角度は、実験で引張試験のみで亀裂分岐が観測された速度帯において、Freund の理論解[3]に基づく亀裂分岐角と一致するものであり、この速度帯で曲げ試験のほうが亀裂分岐に不利であるという結果が得られ、実験結果は支持された。

4. 結論

本研究では以下の成果を得ることができた。

- 巨視的な亀裂分岐が応力多軸度の影響を受け、応力多軸度が大きいほど亀裂分岐が発生しやすいという事実が実験的に確認された。
- 粗い破面の詳細な観察により、巨視的な分岐が発生しない領域でも微小な分岐 microbranch が発生していることを確認した。
- 亀裂分岐の発生の限界条件が microbranch の成長の可否によって決まるというモデル化により亀裂分岐現象をうまく説明できる可能性を示した。
- 詳細な破面観察を行い、pre-parabola や periodic の破面に新しい知見を見出した。

参考文献

- [1] 頓所, 鋼材の脆性き裂伝播におけるき裂分岐に関する局所破壊条件と散逸エネルギーの考察, 東京大学修士論文 (2017).
- [2] 豊田ら, 溶接継手の破壊性能評価のための靱性評価手法に関する考察, 溶接学会論文集 11 巻 3 号, pp.454-460 (1993).
- [3] Freund, L. B., and Clifton, R. J. On the uniqueness of elastodynamic solutions for running cracks, Journal of Elasticity 4, pp.293-299 (1974).