

現実性と再現性に優れた脆性き裂伝播シミュレーションの実現に向けた研究 Proposal for Advanced Brittle Crack Propagation Simulation Incorporating Fracture Energy Consumption

学籍番号 37-216456 八木 透
指導教員 川畑 友弥

(2023 年 1 月 25 日提出)

Keywords: 脆性破壊, エネルギー散逸, 破面粗さ, 機械剛性

1. 序論

1.1 背景

溶接構造物の構造健全性を確保する上で最も重要な課題は、脆性破壊の防止である。脆性き裂は 1000m/s~2000m/s で伝播することが実験的経験則から判明しており、き裂伝播現象が非常に短い時間で行われる。この高速き裂伝播現象の研究は過去多くの研究者によりなされてきたが、実構造物への適用を考えたときに理論解や実験データの延長のみではその適用範囲に限界があり、とくにコンテナ船の大型化をはじめとした構造物の巨大化と複雑化に伴い、脆性き裂伝播の解析的研究の必要性が高まっている。本研究では脆性き裂伝播のクライテリオンを検討する上で重要な因子になると考えられているき裂伝播中のエネルギー散逸則を考慮した鋼材脆性き裂伝播シミュレーションの提案を最終目標としている。また実験と実構造物間での条件の差異をなくす、という観点において、ばねを用いた低剛性試験機の提案を行う。

1.2 先行研究

き裂伝播現象をエネルギー収支のアプローチから最初に理論を提示した Griffith[1]は物体が破壊し新しい表面が形成される際に外部からのエネルギーを必要とするという考え方を示し、これを表面エネルギーと定義した。き裂は外力仕事やひずみの解法によって供給されるエネルギーが表面エネルギーを上回る場合にのみき裂が発生・伝播する。Anderson[2]はこの表面エネルギーは形成された破面の実弾面積に比例するという理論を提唱した。つまりき裂伝播と形成される破面の面積=破面粗さが密接な関係にあるということである。

Mott[3]は Griffith によって提唱された理論を動的なき裂伝播現象に対して拡張した。動的なき裂伝播に対しては、供給エネルギーのうち、散逸エネルギーとして消費されなかった余剰分がき裂の運動エネルギーに変化するという関係性にある。この散逸エネルギーは高速き裂伝播現象を扱う上で重要な役割を持っている。エネルギー収支の式から散逸エネルギー量が伝播き裂の運動に密接にかかわっていることは明確であり、エネ

ギー散逸則が把握できれば、脆性き裂伝播停止性能に直結することになる。しかしながら散逸エネルギーは様々な要因によって変化するため、現状としては散逸エネルギーに対して影響を及ぼしている主要な要因が不明瞭な状態が続いている。

本研究にて、散逸エネルギーの主要因の一つである破面粗さの測定値そのものが、散逸エネルギーを知るための有効な手段であることを提示する。散逸エネルギーの内訳を調査した過去の多くの文献は、塑性変形を伴わない高度な脆性材料では散逸の主要因が表面エネルギーであることを報告しており、表面エネルギーと破面粗さが比例関係にあることは先に示した。Sharon[4]は破面粗さとエネルギー解放率の関係を調査しい精度で比例関係にあることを示した。また Sharon はき裂伝播速度と破面粗さの関係も調査し、こちらもいい精度での比例関係にあることを示している。Nakamura[5]はアクリル樹脂を用いて破面粗さが試験片形態や負荷状態によりき裂速度に対する上昇傾向が異なることを示した。

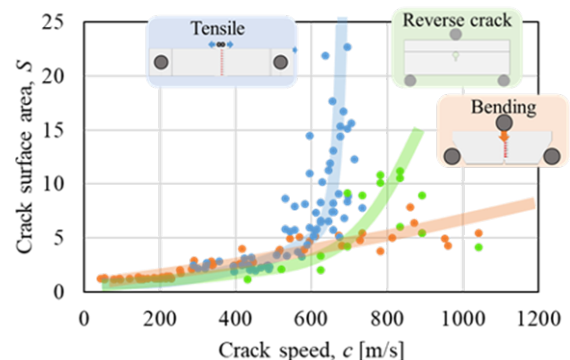


Fig. 1 Relationship between crack speed and fracture surface roughness compared over several types of specimen [5].

2. 実験

2.1 目的

本研究では産業上極めて重要な鋼材におけるき裂伝播停止技術を進歩させるため、同現象の数値解析技術を進化させる。全章のアクリル材料で実施した実験と同様、試験片形状や負荷モードを変化させて実験を行い、破面粗さ測定を通じて鋼

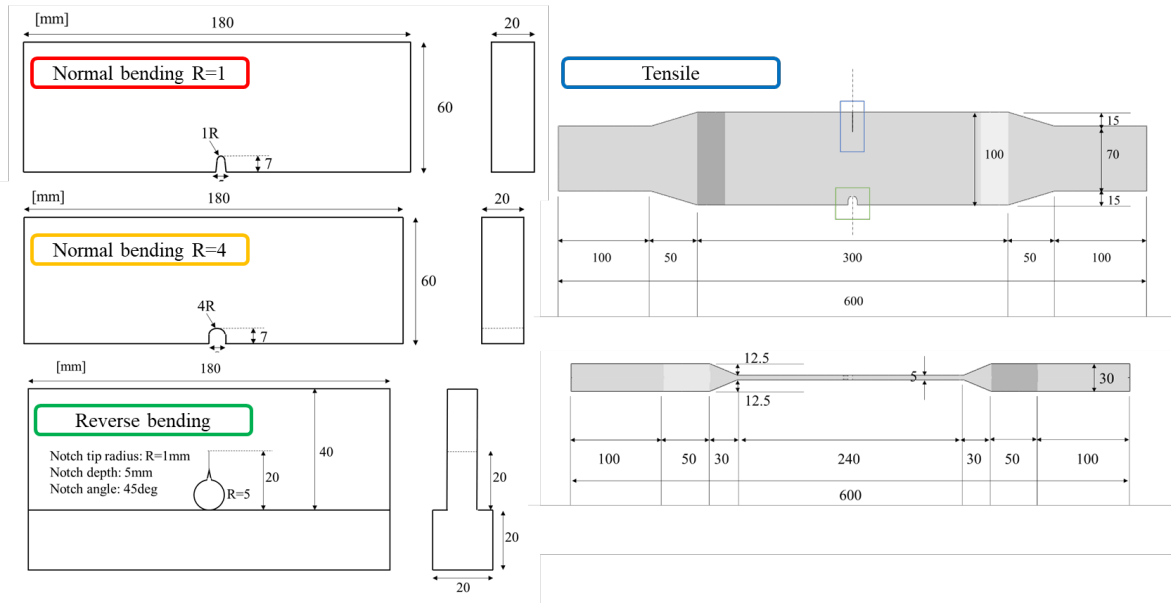


Fig. 2 Configuration of the specimens used in this study.

材とアクリル樹脂間における差異の有無、ひいては散逸エネルギー決定則について検討を進めていく。

2.2 試験概要

SM490A を供試材に -196°C で Fig. 2 に示す試験片を用いて曲げ試験、逆進曲げ試験、および引張試験を実施した。また各試験片のき裂進展経路に沿って等間隔でひずみゲージを貼付し、き裂伝播速度の測定を試みた。

2.3 実験結果

ひずみゲージから得られたデータを基にき裂伝播距離とき裂速度の関係を示したものが Fig. 3 である。き裂伝播に従い、曲げ負荷においてき裂伝播速度は減少、引張試験においては上昇、逆進曲げについては一定となる傾向が確認された。

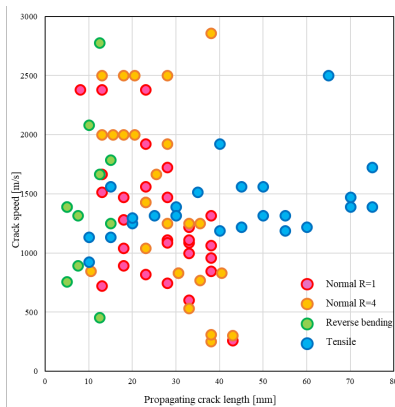


Fig. 3 Experimental result of crack speed based on propagating crack length

実験で得られた破面をレーザー顕微鏡で観察および解析を行い、き裂伝播距離ごとに破面粗さを計測した。本研究では算術平均高さ Ra を破面

粗さの指標として用いた。なお平均高さの基準線はき裂伝播方向で平行である。得られた結果から破面粗さとき裂伝播速度の関係性を示した図が Fig. 4 である。同様のき裂速度においても試験片形状および負荷状態により破面粗さが異なることが鉄鋼材料においても確認された。

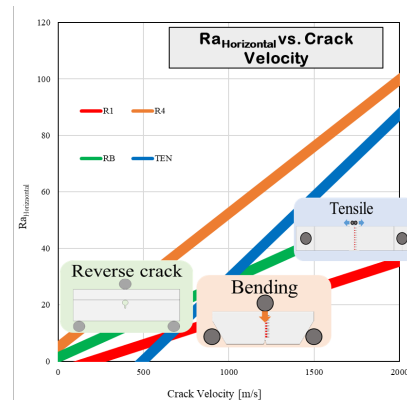


Fig. 4 Relationship between crack velocity and fracture surface roughness

次に実験結果を、応力拡大係数を用いて整理することを試みた。伝播き裂先端の静的応力拡大係数をそれぞれの試験片形状において取得。その後 Rose の式[6]を用いて、実験で得られたき裂伝播速度を利用して動的応力拡大係数を算出した。動的応力拡大係数と破面粗さの関係を示した図が Fig. 5 である。特に通常曲げ R=4 の試験結果においてバンドから上振れしているデータが散見されるものの、有限要素法解析による伝播解析で、き裂先端の動的応力拡大係数さえ評価すれば、与えるべき散逸エネルギーが位置的に決定できることを示しており、長年の課題でもあった散逸エネルギーの決定方法に一石を投じるものである。

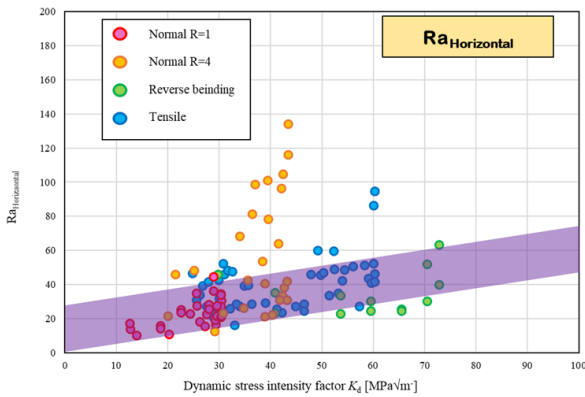


Fig. 5 Relationship between dynamic stress intensity factor and fracture surface roughness

3. 散逸エネルギー自己決定型脆性き裂伝播解析

3.1 目的

これまで限界破壊応力を中心に構築された脆性き裂伝播解析技術は散逸エネルギーを与えることで再現性の高い結果を得られることは報告されているものの、この散逸エネルギー量は実験結果によるものであり、実構造物への反映や解析の自由度という観点で考えると対応力は弱かった。本研究では解析中の諸量に基づき散逸エネルギーを予測するアルゴリズムについて検討する。

3.2 解析手法

本研究においてはエネルギー散逸則を研究する上で Cohesive Zone Model を利用した動的 FEM 陽解法解析を実施する。き裂伝播面に粘着表面を設定し、この粘着表面の剥離の限界条件、すなわち脆性き裂発生および進展のクライテリオンとして局所限界破壊応力を用いた。また節点組が結合力を失う際に系から奪い去る破面形成エネルギー、言い換えるとき裂進展に伴い系から吸収する表面エネルギーを Fig. 6 に示すように定義した [5]。き裂進展の評価については各節点における損傷変数が非 0 値となった時点でその節点をき裂が伝播したとしている。

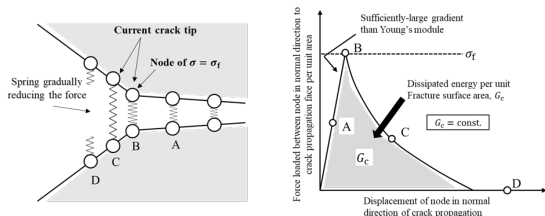


Fig. 6 Dissipation method of fracture surface energy on crack propagation analysis

3.2 解析結果

実験においてき裂進展に従い、破面粗さが変化していく様子が確認された。破面形成エネルギーと破面粗さが関係しているという仮定に基づく

とき裂伝播にしたがい、破面形成エネルギーは変化していくと考えられる。本解析においては有限要素法解析モデルにおいてき裂伝播方向に 5mm ずつ異なる粘着表面を定義し、それぞれの粘着表面で独立に破面形成エネルギーを定義できる解析モデルを作成した。

破面形成エネルギーの決定に関して、前章までに脆性き裂伝播時の破面粗さは負荷状態に依らず動的応力拡大係数で整理できることを示した。ここでは以下の式を用いて破面形成エネルギーを定義した。ここで a はき裂伝播長さである。き裂伝播速度はき裂中央部の損傷変数の非 0 値の値と動的ステップの時刻から計算した「。

$$G_c(a) = \frac{6 \times \log_{10} K_d(a=0)}{K_d^2} \quad (1)$$

Fig. 7 に通常曲げ R=1 モデルの結果を、Fig. 8 に引張試験モデルの結果をそれぞれ実験によって得られたき裂伝播速度と比較した形で示す。曲げモデルについては実験結果とほぼ同等の結果を得ることができた。引張試験モデルについては若干上振れているものの実験結果と近いき裂伝播速度を得ることができた。

以上より、実際の破面粗さが判らなくても自動的に破面形成エネルギーを計算中に自己決定するアルゴリズムが確立したといえるだろう。これまでの動的破壊力学研究の中で画期的な前進である可能性がある。

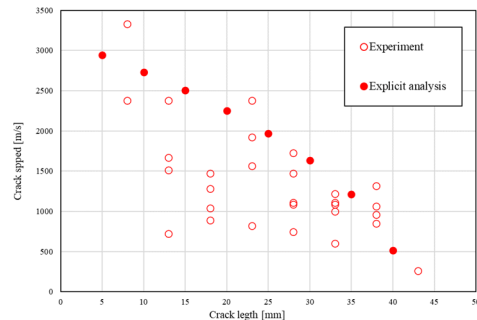


Fig. 7 Varying G_c analysis of normal bending R=1 model

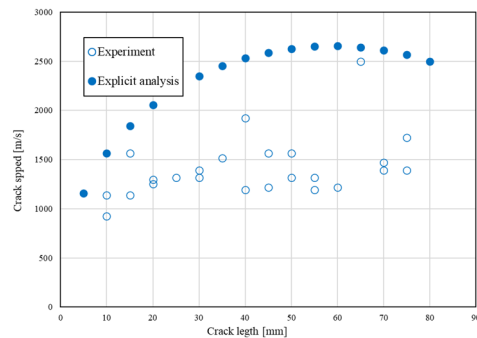


Fig. 8 Varying G_c analysis of tensile model

4. ばねを用いた低剛性試験機の提案

4.1 目的

本研究は実験室中にて行われる材料の健全性評価試験と実際の構造物中において、鉄鋼材料がおかれる環境の違いに起因する不明瞭な安全評価の是正に目的をおいている。本章においては健全性評価試験の試験方法を工夫することでこの差異を埋めることを狙いとしている。

4.2 ポップイン現象

破壊靱性試験において、靱性不均一を有する溶接部を対象とするとき、しばしばポップインと呼ばれる微小な荷重低下を伴う微小割れが生じる。このポップインを、脆性破壊の発生とみなすか、許容するかは、試験規格が規定するポップインの許容判定基準による。試験機の剛性の高さである。これは試験片の材料特性は一切関係がなく、試験機の都合によるものである。巨大な構造物では、脆性き裂が万が一発生した場合においても外力（荷重）一定状況がキープされているが、試験片のサイズが限定される実験室実験においては、基本的に破壊靱性試験は脆性き裂伝播時において変位一定条件とみなされる状態となる。き裂が進展するとともにリガメント断面が顕著に減少し公称ネット応力が上昇するが、いかに高速で作動するサーボ弁を用いても亀裂の動きに追従し荷重を増加させるほどの高速制御ができないからである。そのためき裂発生時には負荷荷重が実質的に低下し、それによってき裂が停止、結果としてポップインき裂として観察されることがある。このき裂停止は実構造物では停止しない可能性がある。そこで実験室の小型試験機にて実施する破壊靱性試験において、治具中に低剛性のばねを挿入し破壊靱性試験を行うことを考える。き裂が発生したとき、ばねの効果により、完全な荷重一定条件とはならないまでも、荷重低下の量はばねを挿入しなかった場合のそれと比較したときに、小さくなることが予想される。

4.3 有限要素法解析によるばね定数の提案

本章では実験室での実験の際に複数のポップインが確認されたテーパ曲げ実験を取り上げ、Fig. 9 に示す FEM モデルを構築した。図は有限要素法解析の 1/4 モデルであり、特徴として変位を与える治具と試験片中央部の間に 10mm のばね要素を結合していることである。このばね要素はばね定数を定義することができ、実際のば

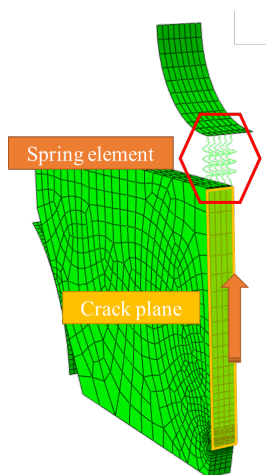


Fig. 9 1/4 model of tapered specimen with a spring element

ねを再現することができる。なおき裂進展は節点解放法を用いて再現し、様々な条件下における荷重低下率を取得した。

き裂発生時のき裂口開口変位、微小き裂進展長さの条件を変化させ、それぞれの条件でばね定数を変えて解析を行い、荷重変化率をプロットしたグラフが Fig. 10 である。実験室の鋼材治具の想定ばね定数と比較したとき、適切なばね定数をもつばねを使用すれば荷重低下率を 70~80%まで抑えることが可能であることが示唆される結果となった。

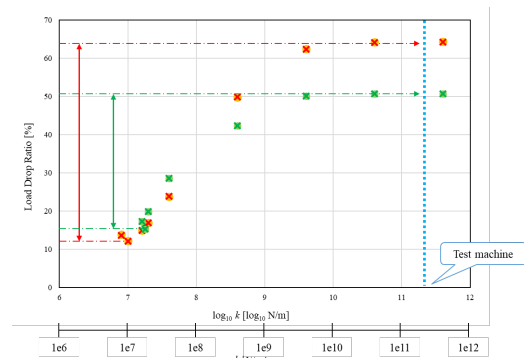


Fig. 10 Load drop ratio vs. spring constant

5. 結言

本研究の結果から以下の内容を結言とする。

- ・ 試験片形状や負荷状態は破面粗さに影響を及ぼし、これは材料に依らないことが判明した。
- ・ 破面粗さを支配するパラメータとしてき裂先端の動的応力拡大係数が有効であることが示唆された。
- ・ 動的応力拡大係数を用いることで散逸エネルギー自己決定型脆性き裂伝播シミュレーションを行うことが可能になることが示唆された。
- ・ 適切なばね定数を持つばねを挿入した治具を用いることで微小き裂発生時の荷重低下率を大幅に抑えることが可能になり、実構造物中と同様な荷重一定条件で試験を行うことが可能であることが示唆された。

参考文献

- [1] A. A. Griffith, The phenomena of rupture and flow in solids, Mechanical Engineering A221, 163-198 (1920)
- [2] T. L. Anderson, Fracture Mechanics, CRC Press (2005)
- [3] N.F. Mott, Brittle fracture in mild steel plates, Engineering 165, 16-18 (1947).
- [4] 中村徳孝、修士学位論文、東京大学 (2021年)
- [5] 川畑、稲見、栗飯原：破面形成エネルギーを考慮した高張力鋼の脆性き裂伝播数値モデルの構築 第1報-, 日本船舶海洋工学論文集, Vol.16, p.77-87 (2012)