

脆性き裂伝播停止挙動に関する実験及び数値解析

Experimental and Numerical Analyses on Brittle Crack Propagation and Arrest Behaviors

東京大学大学院 工学系研究科 システム創成学専攻

学籍番号 116331 滑川 哲也

指導教員 粟飯原 周二 教授

1. 序論

近年、アジア諸国を中心とした世界経済の発展により、国際的な海上物流量が増加している。それに伴い、輸送コスト低減を目的としたコンテナ船の大型化が進んでおり、中には 10,000TEU を超える超大型コンテナ船も現れた。使用鋼板は現行船級規則の規定範囲を超える板厚のものも存在し、従来の使用実績のない極厚鋼板の実用に際して、脆性破壊の危険性が示唆されている。船体構造設計においては、万が一脆性き裂が発生しても、それが船体折損のような致命的な事故に繋がらないよう、伝播するき裂をアレスト(停止)させることを重要視する“Fail Safe Design”の思想が取り入れられている。しかし、極厚鋼板の脆性き裂伝播停止挙動が従来鋼板と異なる可能性があることが報告されている[1]。

このような報告を受けて、2007 年、日本海事協会は大型コンテナ船設計技術基準の策定を目的とする脆性き裂アレスト設計委員会を設置して、脆性き裂伝播停止に関する従来知見の見直し、及び、大型コンテナ船強力甲板部に必要な材料靱性値、継手部構造を模索する各種試験を実施してきた。また、日本溶接協会も 2009 年より FTE 委員会 WG-A を発足させ、汎用的なアレスト特性評価試験方法規格の作成を目的として各種活動を行ってきた。

以上のように、技術基準や試験法規格の作成にあたり、様々な問題を明確にする必要があるが、その一つにアレスト靱性 K_{ca} が試験片寸法によって異なる長大き裂問題が挙げられる。この問題の本質は塑性拘束緩和が原因とされるが、その定量的な説明は未だなされていない。また、大型試験法だけでなくアレスト靱性値を簡易的に求めることができる小型アレスト試験に対するニーズも高まっている。

2. 小型アレスト試験

2.1. アレスト靱性値

線形破壊力学では、式(1)で表される脆性き裂伝播の駆動力である応力拡大係数 K と、温度依存性を持つ材料アレスト靱性 K_{ca} を比較して、 $K > K_{ca}$ の場合にはき裂が伝播し、 $K = K_{ca}$ の時点でき裂がアレストす

ると考える。材料アレスト特性である K_{ca} は Fig. 1 に示す標準脆性き裂アレスト試験で求められる。試験片に温度勾配を付けて脆性き裂を発生させ、き裂進展に伴い増大する K を、温度上昇による K_{ca} の増大が上回った時にき裂はアレストし、停止き裂長さと初期負荷応力から算出される K が停止温度における K_{ca} となる。

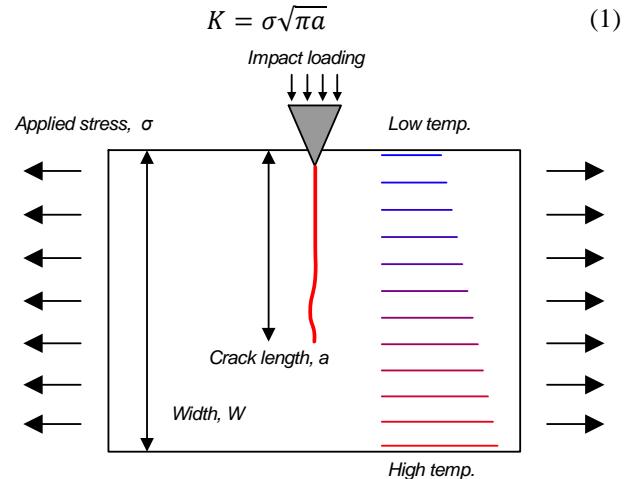


Fig. 1 Standard crack arrest test

2.2. プレスノッチ 3 点曲げ試験

脆性き裂アレスト試験は一般に、莫大な時間及びコストがかかる試験であるため、 K_{ca} を評価する小型アレスト試験の必要性が高まっている。本研究では、FTE 委員会で実施されている脆性き裂アレスト試験代替法の一環として Fig. 2 に示すプレスノッチ 3 点曲げ試験を実施し、 K_{ca} の評価方法を提案した。

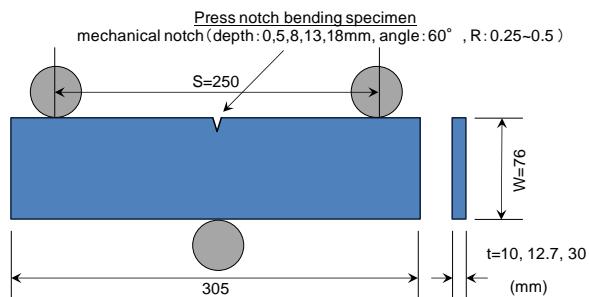


Fig. 2 Press notch 3 points bending specimen

試験片はノルマ鋼及び TMCP 鋼を用意した。本試験では、試験片温度は一定であり、発生した脆性き

裂は荷重低下によりアレストする。 K_{ca} は変位固定条件で算定したFig. 3に示す静的式を用いた。

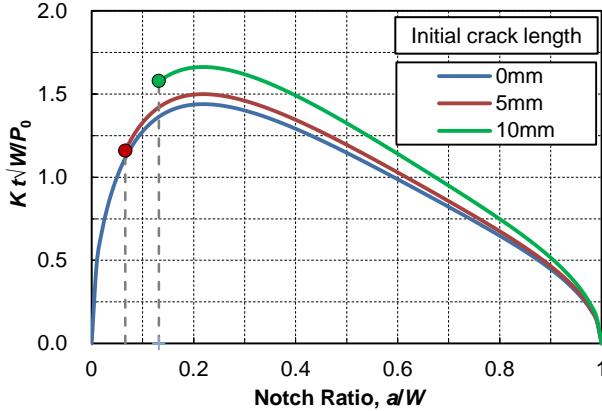


Fig. 3 K change by load drop calculation

K_{ca} の板厚補正を施し、さらに有効な試験結果をアレニウスプロットすると脆性き裂アレスト試験の結果とよく対応する。ここで、 K_{ca} を正しく評価できる条件を考慮して、試験結果の有効判定基準を 1)脆性き裂アレスト位置が切欠き底から 10mm 以上かつ打撃部から 5mm 以上、2)切欠き底から進展した延性き裂の長さが 10mm 以内、とした。

本試験の課題は、試験片寸法の制限により高温域における K_{ca} の評価が困難となることである。そこで、鋼材によらずアレニウスプロットは特定点を通るという知見を基に、本研究で得られた 30mm 材での K_{ca} のデータと特定点から、高温域における K_{ca} の推定を行った。その結果、Fig. 4 に示すように、精度のよい推定ができる。また、アレストき裂長さを平均値で算定し、脆性き裂アレスト試験の K_{ca} を無限板式で評価すると、より精度が高まるこことを示した。

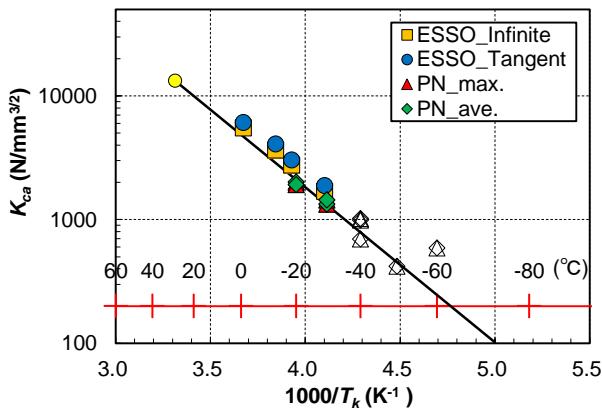


Fig. 4 Estimation of K_{ca} with pivot plot (Norm)

2.3. 動的 FEM 解析

K_{ca} の評価方法の妥当性を検証するため、Fig. 6 に示すモデルを用いて動的 FEM 解析を行う。まず、Fig. 5 に示すように試験片に歪ゲージを貼付し、動的計測によってひずみのピーク値からき裂速度を算定した。Fig. 7 でひずみの時間変化を実験値と弾塑性解析で

比較しているが、ひずみのピークをとるタイミングはほぼ一致しており、速度の算定方法は妥当であるとした。

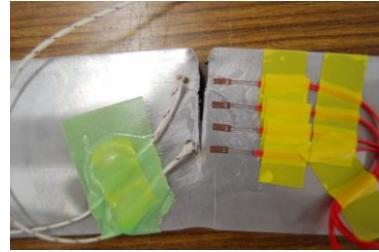


Fig. 5 Position of strain gages

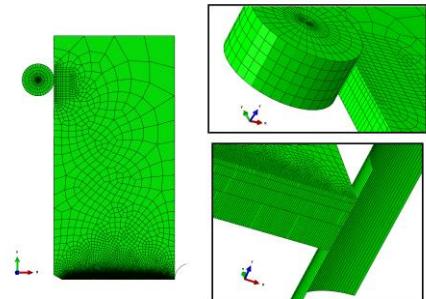


Fig. 6 Model geometry and partition of mesh

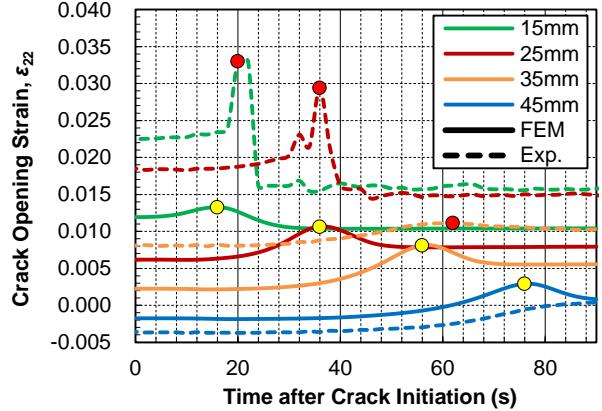


Fig. 7 Strain change of FEM and experiment

得られた速度データを基に、速度履歴を Fig. 8 のように仮定し解析を行った。 K_{ca} を評価するため弾性解析を行い、き裂先端応力場から K_d を算定した。 K_d は変位固定条件で算定した静的解と概ね対応したが、アレスト直前に K_d が急激に上昇する現象がみられた。その原因が試験片の振動によるものであるのか、あるいはき裂伝播速度の減速によるものであるのか検証した。き裂伝播時の荷重変化を確認したところ、試験片の振動では説明がつかないことが分かった。そこで、有限幅及び応力波の影響がでないように試験片寸法をき裂長さ $a=350$ mm、試験片幅 $W=2400$ mm、ピン間距離 16m とし、振動を伴わない引張型の解析を行ったところ、Fig. 10 に示すようにき裂伝播速度の減速によってアレスト直前に K_d が急激に上昇する現象が確認できた。

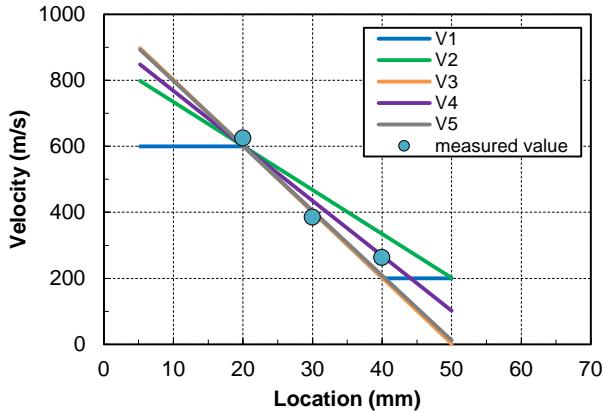


Fig. 8 Assumed and measured history of velocity

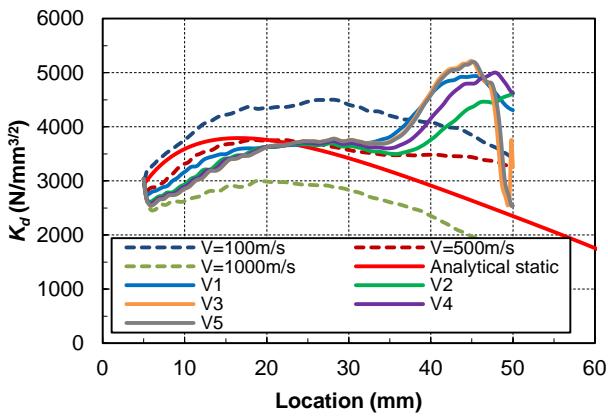


Fig. 9 K change at bending specimen

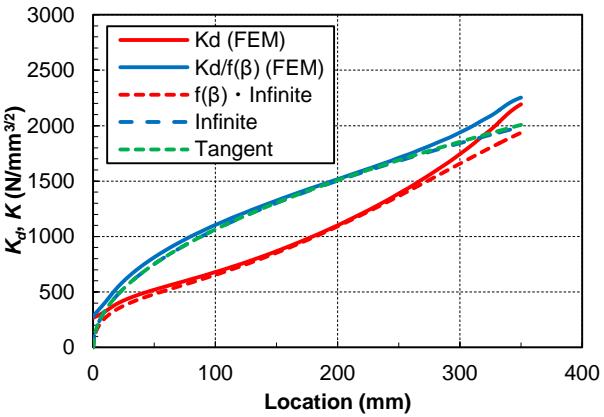


Fig. 10 K change at tensile specimen

3. 脆性き裂伝播停止モデル

3.1. 局所破壊応力モデル

局所破壊応力仮説に立脚し、伝播き裂先端の塑性応力場と降伏応力の歪速度依存性を考慮することにより、基本的材料特性から動的破壊靱性値を算出し、さらに、鋼板表面に生成する未破断リガメントによるき裂閉口効果と鋼板内部のき裂が先行する形状を考慮することにより、脆性き裂伝播停止挙動を再現した脆性き裂伝播停止モデル(基礎モデル)が存在する。そのモデルに塑性拘束緩和の効果を取り入れ、長大き裂問題の原因を追究したモデル(渡部モデル)

が作成されたが、物理的に決定できないパラメータがある等、モデルには任意性が残っており課題となっていた。本研究では、塑性拘束緩和効果に多大な影響を及ぼすと考えられる未破断リガメントによるき裂閉口効果を3次元的に計算し、正確な K の算定を行う。また、未破断リガメントを決定する塑性域寸法についても検討する。

3.2. 未破断リガメントによるき裂閉口効果

本研究では、き裂面に作用する任意荷重による K を表す式(2)を用いて、Fig. 11に示すように、未破断リガメントによるき裂閉口効果を3次元的に評価した。

$$K_I(z, b, P) = \frac{\sqrt{2} P}{(\pi b)^{3/2}} \cdot \frac{1}{1 + (z/b)^2} \quad (2)$$

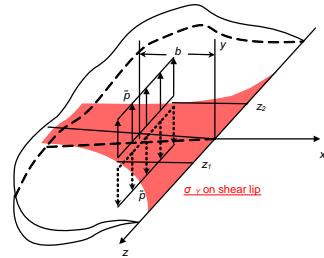


Fig. 11 K field obtained by stress distribution

3.3. 動的FEM解析による塑性域寸法の算定

基礎モデル及び渡部モデルは小規模降伏条件で成立する式(3)を塑性域が板厚に比べて十分大きい範囲にまで適用している。さらに、渡部モデルでは物理的に決定できないパラメータを用いた速度因子が作用しているとしている[2]。

$$t_{sl} = \frac{1}{3\pi} \left(\frac{K_d}{\sigma_y} \right)^2 \quad (3)$$

本研究では、塑性拘束緩和効果に及ぼす影響が大きい未破断リガメント厚さを決定する塑性域寸法を、FEM解析によって定量的に評価する。速度及び負荷応力を系統的に変化させた解析により、Fig. 12に示すように、式(3)は $K_{ca} = 6000 \text{ N/mm}^{3/2}$ 程度まで適用可能であることを示し、塑性域寸法の速度依存性は K_d のみに集約できることが分かった。

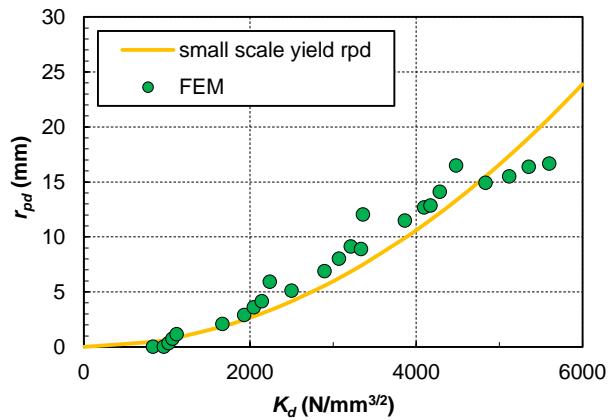


Fig. 12 K_d dependency of plastic zone size

3.4. 脆性き裂アレスト試験の再現解析

本研究で構築した数値モデルを、FTE 委員会の一環で新日本製鐵(株)及び渡部らによって行われた温度勾配型試験に適用し解析を行った[2]。本モデルでは渡部モデルで用いられていた任意パラメータを解消し、数値モデルの任意性をなしに Fig. 13 に示すように、負荷応力が温度が高い場合には K_{ca} がアレニウスプロットの直線から外れることが再現でき、渡部モデルよりも実験値との良い一致を示した。また、Fig. 14 に示す停止温度が近い実破面と、Fig. 15 に示すき裂前縁形状はよく対応しており、負荷応力の差によって未破断リガメント厚さが変わることをはじめて示した。

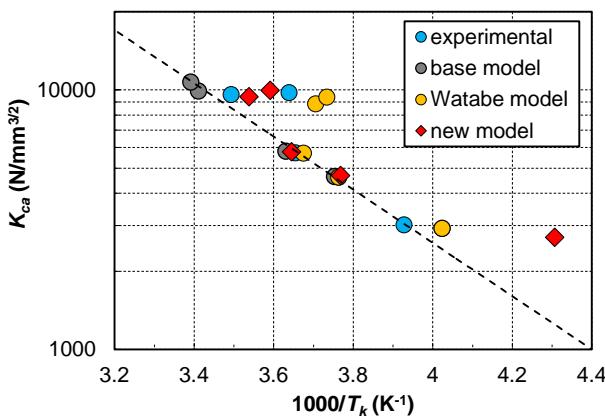
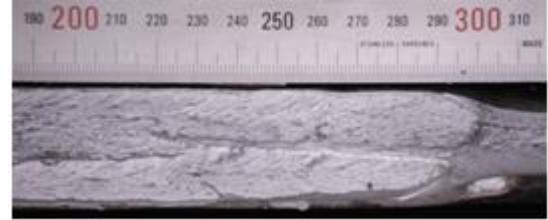


Fig. 13 Arrhenius plot of experiment and calculation

4. 結論

- (1) プレスノッチ3点曲げ試験は小型アレスト試験として有効であり、本試験で得られたアレスト靭性値の標準ESSO試験との対応が確認できた。
- (2) 高温域の K_{ca} 推定にはピボット説を適用することが有効であることを示した。
- (3) 動的計測によって得られたき裂伝播速度履歴に基づく動的FEM解析の結果、提案したアレスト靭性値の算定方法の有効性を示した。
- (4) ESSO試験を模擬した動的FEM解析によって、脆性き裂アレスト時にみられる K_d の上昇はき裂速度の減速効果によるものであることを示した。
- (5) 未破断リガメントによるき裂閉口効果を正確に評価した脆性き裂伝播停止モデルを構築した。
- (6) 負荷応力及びき裂伝播速度を系統的に変化させた動的FEM解析によって、小規模降伏条件で成り立つ塑性域寸法の式は $K_{ca} = 6000 \text{ N/mm}^{3/2}$ 程度までの範囲で適用可能であり、塑性域寸法のき裂伝播速度依存性は K_d のみに集約できることを示した。

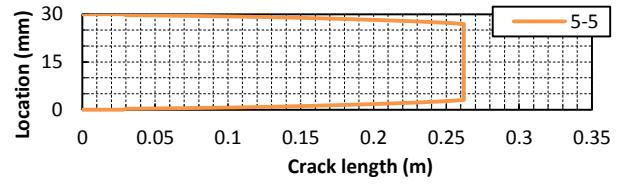


(a) 187MPa

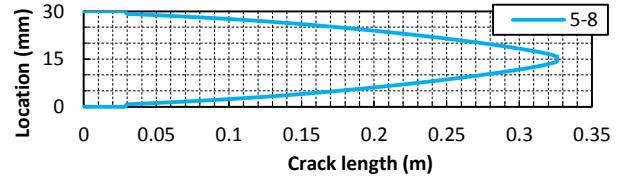


(b) 310MPa

Fig. 14 Fracture surface



(a) 187MPa



(b) 310MPa

Fig. 15 Calculated crack shape

(7) 渡部モデルにおける物理的に決定することのできないパラメータを解消し、数値モデルに任意性をもたせることなく過去に実施された脆性き裂アレスト試験の結果を渡部モデルよりも精度よく再現した。

(8) 温度勾配型脆性き裂アレスト試験を本研究で構築したモデルを用いて解析し、停止温度が同一の場合においても負荷応力によって未破断リガメントの厚さが変化することをはじめて示し、実破面のき裂前縁形状を再現した。

参考文献

- [1]石川忠, 厚鋼板を使用した溶接継手における脆性き裂伝播挙動, 造船三学連合大会ポスターセッション, 2004
- [2] 渡部良行, 修士論文, 2010
- [3] 新日本製鐵株式会社, 幅狭温度勾配 ESSO 試験(速報), 日本溶接協会 FTE 委員会 WG-A-9-9, 2010