

鋼材の小型曲げ試験による脆性き裂伝播停止特性簡易評価法の提案

～曲げ負荷中の高速き裂伝播挙動の解明～

A Suggestion for the Simplified Evaluation Method of Brittle Crack Fracture Toughness on Small-Scale Bending Test in Steels

～Investigation on rapid crack propagation behavior under bending load～

学籍番号 03-140907 西菌 祐希  
指導教員 川畑 友弥

Keywords: 鋼, 脆性き裂, プレスノッチ曲げ試験, FEM, 応力拡大係数

1. 序論

脆性き裂伝播現象の解明は、多くの社会インフラ鋼構造物の安全性向上及び合理的な材料の選定において極めて重要な問題となっている。特に船舶・タンク分野ではスケールメリットを活かすべく大型化が進んでおり、使用される極厚鋼板のアレスト特性評価の重要性が高まっている(Fig. 1)。現在、アレスト靱性評価試験には ESSO 試験が用いられているが、大型で高コストなため材料出荷試験には適さない面がある。また、NRL 試験やシャルピー試験といった感応的な試験結果を統計的に結び付けて出荷試験とする方法が提案されているが、簡便かつ破壊力学に基づいた評価が望まれている。これまでに提案された小型のアレスト靱性評価試験は ESSO 試験との整合性が低いという問題がある(Fig. 2)。一般に、曲げ試験は引張試験よりも高い試験荷重を必要とせず高応力を確保できるメリットがある。その反面、応力分布が引張場と圧縮場によって形成されるため、曲げ負荷中に高速き裂が伝播する問題は極めて複雑化する。本研究では、プレスノッチ曲げ試験において試験設計の最適化を図り、アレスト靱性の簡易評価法を提案する。さらには、多くの構造物に存在する曲げ負荷状態における高速き裂伝播挙動の解明を目指す。



Fig. 1 Arrest design required from Steel structures

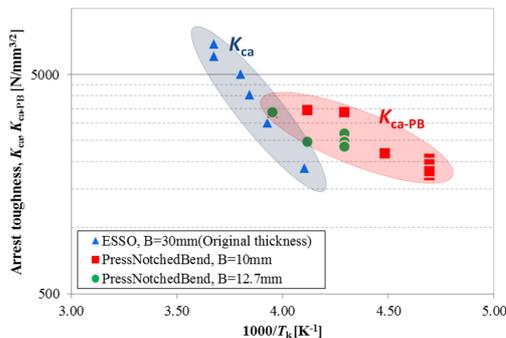


Fig. 2 Arrest toughness evaluated by ESSO test and Press-notch bend test [1]

2. プレスノッチ曲げ試験の問題点

プレスノッチ曲げ試験は、あらかじめ鋭利な押しジグでノッチ加工を施した小型試験片に脆性き裂を発生・アレストさせる三点曲げ試験である。アレスト靱性評価は、脆性き裂停止時の応力と平均き裂長さから算出される(Fig. 3)。Fig. 2 は Arrhenius プロットと呼ばれ、アレスト靱性値(以下  $K_{ca}$ )が Arrhenius 型の温度依存性を示すものである。ESSO 試験とプレスノッチ曲げ試験のプロットには大きな乖離が生じていることが見て取れる。ESSO 試験が  $5000\text{N/mm}^2$  以上の高い  $K_{ca}$  を評価できるのに対し、プレスノッチ曲げ試験はせいぜい  $4000\text{N/mm}^2$  程度である。この原因は、動的応力拡大係数(以下  $K_d$ )が高い推移を持つ試験条件を設計できない点が考えられる。また、 $K_d$  が曲げの中立面付近で急激に低下する傾向があることから、 $K_{ca}$  の算出に誤差が生じやすい試験設計であると考えられる。以上のような問題点を踏まえて、 $K_d$  が高い値を推移し、かつピーク後緩やかに低下するような試験設計を目指した。

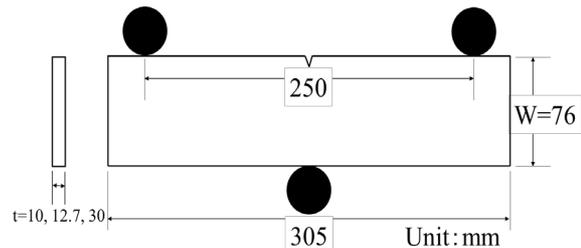


Fig. 3 Schematic diagram of Press-notch bend test

3. アレスト靱性簡易評価法の提案

汎用有限要素法解析プログラムである Abaqus を用いてき裂先端の節点を逐次解放することにより、脆性き裂伝播現象のシミュレーションを行った。シミュレーションの妥当性については、モデル実験を行い、歪ゲージによって実測される歪と動的解析によって求められる歪が概ね一致することが確認された。この FEM 解析結果を用いて、試験設計の最適化を図った。なお、本研究で用いた供試材は N30 である。

### 3.1 試験片形状設計

曲げ中立面近傍での  $K_d$  の急激な減少が曲げ塑性変形による圧縮場の残存影響であるという推定に基づき、曲げの中立面がき裂発生部側に近い試験片形状を検討した。き裂長さ 10~50mm の範囲において、線形的に低下する形状を考案した (Fig. 4, Fig. 5, Fig. 7)。この  $K_d$  の線形減少を直線近似し脆性き裂発生時の荷重  $P$  とアレストき裂長さ  $a$  の 2 変数を用いた簡易評価式を導出した。  $K_d$  が線形的に低下する形状であれば、ある温度における  $K_{ca}$  簡易評価式の導出は容易である。また、Fig. 2 において、本実験で評価された  $K_{ca}$  は両試験のプロットが存在するバンド内に収まっていた。

$$K_{ca} = (0.34 - 0.58 \times P) \times a + (1360 + 31 \times P) \quad (1)$$

さらに、 $K_d$  の減少曲線の傾きが  $50 \text{ N/mm}^2$  未満という条件を設け、ある一定の精度で  $K_{ca}$  を評価できるレンジがどれほど改善したか比較をした (Fig. 6)。  $K_d$  の減少曲線の傾きが急すぎると、き裂停止位置のわずかな測定誤差が  $K_{ca}$  評価の大きな誤差に繋がってしまう。 Triple-tapered 型の試験片は比較的高精度で評価できる  $K_{ca}$  が  $K_{initiate}$  によらず広範であることがわかる。ただし、Fig. 6 における横軸はき裂発生時の応力拡大係数  $K_{initiate}$ 、縦軸は  $K_{ca}$  である。

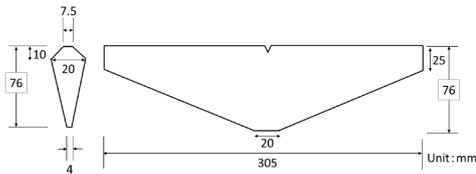


Fig. 4 Configuration of triple-tapered specimen

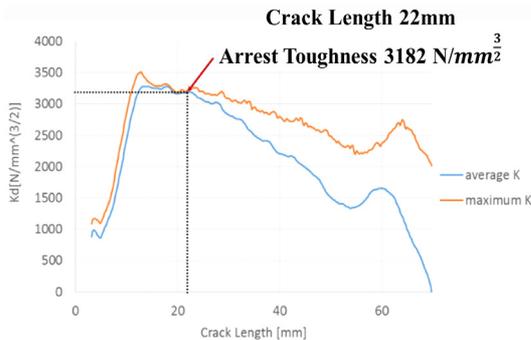


Fig.5 Arrest toughness evaluation of triple-tapered specimen ( $T=233\text{K}$ )

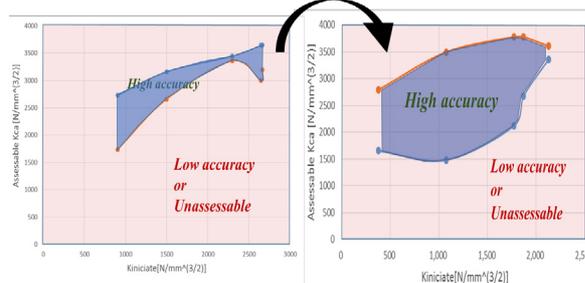


Fig.6 Comparison of accuracy in Arrest toughness evaluation (Left: Base, Right: Triple-tapered)

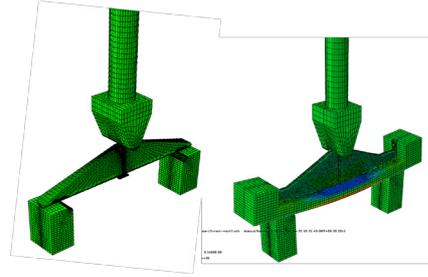


Fig.7 FEM Model analyzed in this study (Left: Triple-tapered, Right:Crown)

### 3.2 治具を含めた試験設計

全厚での  $K_{ca}$  評価を可能にするため、板厚を固定するという条件の下、3.1 で述べた推定に基づき試験設計を検討した。試験片は長手方向のテーパーが三点曲げの支点間を結ぶ直線上に位置する形状で、治具は試験片の長手方向の変位を拘束する冠型治具を用いる試験設計を考案した (Fig. 7)。き裂伝播速度と脆性き裂発生時のクロスヘッド変位 BC の変化にも鈍感であり、ある程度直線的な減少曲線を示すことが見て取れる (Fig. 8)。実験は冠型治具溶接部の破損が長手方向の拘束力の低下を招いたが、破損の影響を考慮し FEM 解析を行うことで  $K_{ca}$  評価を行った (Fig. 9)。

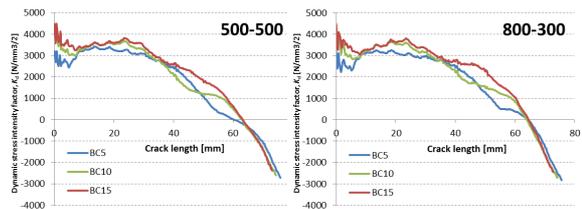


Fig. 8  $K_d$  transition of tapered specimen with crown jig

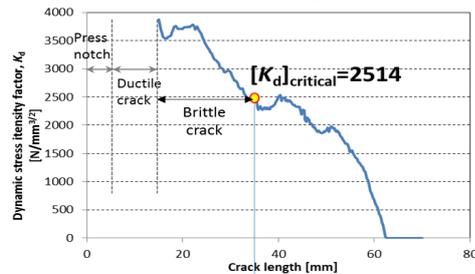


Fig. 9 Arrest toughness evaluation of tapered specimen with crown jig ( $T=233\text{K}$ )

## 5. 結論

本研究で提案した  $K_{ca}$  評価法は、解析上  $K_d$  を目標とした推移に制御することに成功している。今後、試験回数を増やし、さらなる検証が望まれる。

## 参考文献

- [1] T. Kawabata, T. Namegawa, M. Kaneko, Y. Shimada, H. Tajika, K. Shibamura and S. Aihara, "Numerical Analyses of press-notched bend tests and applicability to simplified method of arrest toughness evaluation", ISOPE 2015, Vol.4, pp.169-176.
- [2] 金子雅人：日本溶接協会鉄鋼部会技術委員会 FTE 委員会 WG-A 資料, FTE-WG-A-10-08, (2013)