

鋼材の温度勾配型アレスト試験における局所破壊条件の考察

A Study on local fracture criterion for temperature-gradient crack arrest tests in steels

学籍番号 03-130905

頓所 史章

指導教員

川畑 友弥

(平成 27 年 2 月 5 日提出) Keywords: 鋼材, 脆性破壊, き裂伝播, 破壊条件

1. 背景と目的

大型構造物に用いられる溶接用鋼材は重要構造物(Fig.1)に用いられる場合, 特に瞬時全崩壊につながる脆性破壊事故を起こさないことが要求される. 本研究で対象としているのは万が一脆性破壊が起こってもき裂伝播を停止させる脆性き裂伝播停止(アレスト)特性である. 近年のコンテナ船の大型化などを背景に材料のき裂伝播停止性能が重視され, 2009 年には日本海事協会による設計指針が示される[1], 2014 年には特性評価方法を標準化した世界初の規格が日本で制定される[2]など動きが活発化している. しかしながら, 脆性き裂伝播の現象そのものは不明な部分が多く, 実構造物において期待できるアレスト特性の精度の良い推定が期待されている. 本研究では, 鋼材の脆性き裂伝播に関するクライテリオンを把握, 理解深化することを目的として, 工夫した大型試験と有限要素法による解析を行い考察した.



Fig.1 アレスト設計が求められる鋼構造分野

2. 実験

2.1 温度勾配型 ESSO 試験

一般的な溶接構造用焼ならし鋼(板厚 30mm)を用いてアレスト靱性 K_{ca} の評価規格に採用された温度勾配型 ESSO 試験を実施した. 試験の概略図を Fig. 2 に示す. 幅方向に温度分布を設けた試験片に所定の応力を負荷した状態で低温側から脆性き裂を発生させ, 試験片の途中で材料靱性により停止させる試験である. アレスト靱性 K_{ca} は停止き裂長さ a と負荷応力から破壊力学の式(1)に基づいて算定する. き裂が進展するにつれき裂伝播の駆動力は応力拡大係数の考え方に従い増加するが, き裂先端が材料高温部に突入することによる靱性上昇が大きくなり, $K = K_{ca}$ となった時点でき裂は停止すると考える. 本研究ではき裂の停止予想位置にクラックゲージとひずみゲージを多数計装し, き裂伝播停止部付近の動的なデータを得た. また, 熱電対を計装することにより, き裂伝播に伴う動的な温度変化の計測を試みた.

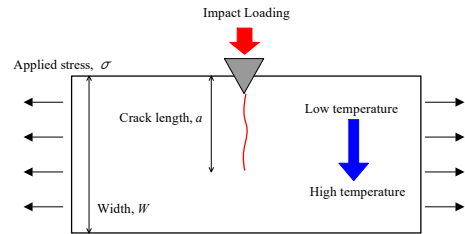


Fig. 2 Standard ESSO test specimen

$$K_{ca} = \sigma \sqrt{\pi a} \left[\frac{2W}{\pi a} \tan\left(\frac{\pi a}{2W}\right) \right]^{1/2} \quad (1)$$

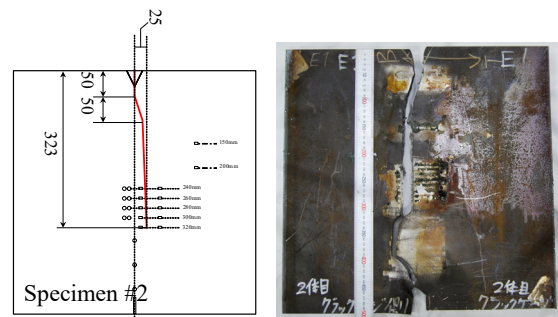


Fig.3 Example of temperature gradient test result

2.2 動的データ整理・破面計測

実験は局所限界条件把握のために多くの動的な計装化を施した上で実施した. 脆性き裂伝播現象は 1000m/s のオーダーの現象であり, 1MHz レベルの高速ロガーで動的な応答履歴を取り込み解析する必要がある. Fig.4 には表面部に貼り付けたクラックゲージ (表面部の伝播状況を計測) 及びひずみゲージ (内部の伝播状況を計測) の応答履歴を整理してき裂伝播速度を整理した.

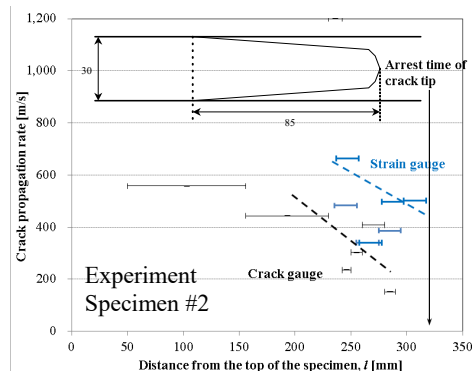


Fig. 4 Brittle crack propagation rate
表面部でのき裂伝播履歴と内部での伝播履歴と

で大きなタイムラグが生じており、伝播中のき裂前縁距離を推定でき、図中に模式図として示している。前縁形状についてはさらに多くの試験片の停止位置での脆性き裂前縁形状を指数関数化し次章の FEM 解析に供した。また、脆性き裂伝播速度はこれまで 200m/s 程度まで減少して停止するとされてきた。これはクラックゲージの計測に依るものである。しかしながらより停止に対して支配的な意味を持つ内部のき裂停止直前の速度は 450m/s 程度であり、これまでの認識を大きく変えるものである。

今回の実験で行った ESSO 試験の他に、多くの条件で低温引張試験・高速引張試験を実施した。得られた応力-ひずみ曲線を Swift の式でフィッティングし次章の FEM 解析の入力データとした。

3. 動的 FEM 解析

解析の際には、温度勾配型 ESSO 試験により得られたき裂伝播速度を入力データとし節点解放法を用いた解析を実施した。逐次解放するき裂先端の形状は実験によって推定された曲線状のものとして仮定することの多かった平坦形状を用いた (Fig.5)。局所応力としては使用した鉄鋼材料の結晶粒径が 40 μm 程度であったことからき裂先端から、その中心位置に相当する 20 μm 位置離れた位置における開口方向応力成分を取り出して整理することとした。

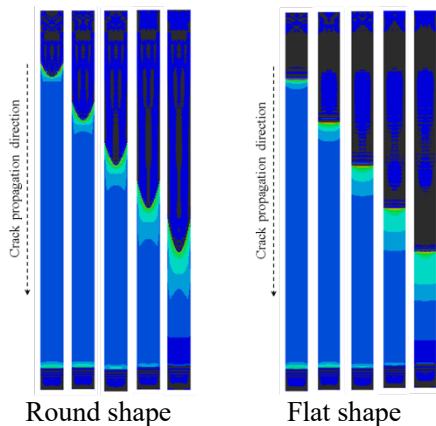


Fig.5 Crack front shape used in FEM analysis

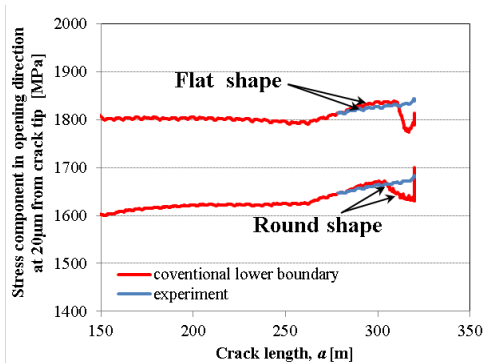


Fig. 6 Stress history at near the crack tip

Fig.6 には 2 種類の伝播速度、2 種類のき裂前縁

形状における局所応力履歴を示す。局所応力が温度やひずみ速度、亀裂長さなどによらずほぼ一定になるという結果を得た。あるいは温度に応じて局所応力はやや上昇傾向にあるとも見ることができる。き裂伝播速度履歴の影響を調査したところ、これまで大方の見方であった 200m/s 程度まで減速する履歴の下では、停止部近傍での局所応力が大きく変化し、明らかに不自然な結果を得た。前章で得た停止直前の伝播速度履歴の妥当性を支持する結果となった。亀裂前縁の影響を調査するため曲線モデルと平坦モデルで解析を行ったところ、曲線モデルは亀裂先端の応力が顕著に小さくなったため、亀裂がより合理的に亀裂が進展するとの解釈が可能である。

また、破壊に寄与する領域をコア領域と名付け仮に 1500MPa 以上の領域の距離を整理したところ、Fig.7 に示すように広いき裂長さ範囲で一定した値になることが判った。今後の限界条件の記述方法として検討してみる価値がある。

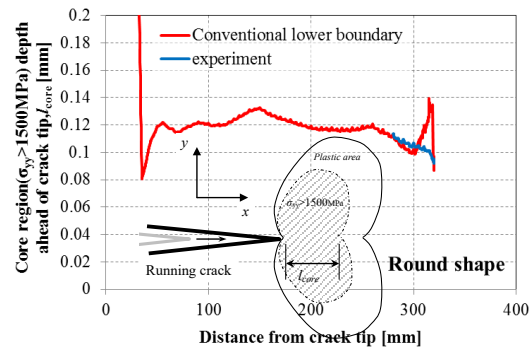


Fig.7 Comparison of history of core region depth

4. 結論

本研究では以下の成果を得ることができた。

- (1) 温度勾配型 ESSO 試験を行いひずみゲージの反応時刻を読み取ることで、き裂停止部近傍における伝播速度がおよそ 450m/s であるという従来知見を刷新する実験事実。
- (2) 伝播中き裂の前縁形状推定
- (3) FEM 解析により停止直前伝播速度実測値の妥当性検証。局所応力一定の示唆。曲線状前縁形状は同一伝播速度において応力を高めることなく伝播可能な合理的形状であること

謝辞

各種試験にご尽力いただいた日鉄住金テクノロジー(株)鹿島事業所の篠原孝志課長、高清水勝係長、細田晃史氏に謝意を表す。

参考文献

- [1] 財団法人日本海事協会：脆性き裂アレスト設計指針 (2009)
- [2] 日本溶接協会：ぜい性き裂アレストじん性試験方法(2014)