

鋼材の小型曲げ試験による脆性亀裂伝播停止特性簡易評価法の開発

Development of Simplified Evaluation Method of Brittle Crack Fracture Toughness on Small-scale Bending Test in Steels

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 37-165029 西菌 祐希
指導教員 川畑友弥 准教授

Keywords: Dynamic SIF, Arrest toughness, Press-notched bend test, Dynamic 3D FEA

1. 序論

脆性亀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および合理的な材料の選定において極めて重要な問題である。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、使用鋼板の極厚化が懸念されている。現在、脆性亀裂伝播停止特性(アレスト特性)評価には標準温度勾配型 ESSO 試験が広く用いられているが、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、これまで継続的に検討されてきた小型試験によるアレスト特性評価法は、広幅試験によるものと整合性が低い点や高いアレスト特性を評価できない点が指摘されてきた。他方、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ることで出荷試験としての評価を行うという破壊力学に基づかない方法が提案されているが[1]、推定精度は高くない。簡便かつ破壊力学に基づいた評価が望まれている。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、曲げ負荷中に高速亀裂が伝播する問題は極めて複雑化し、未だに十分な知見が得られていない。そこで本研究では、動的弾塑性有限要素解析を用いた脆性亀裂伝播モデルにおいて、このような曲げ荷重が付与された部材に脆性亀裂が発生・伝播した場合の亀裂駆動力の変化について分析し、より簡便にアレスト特性を評価可能な小型曲げ試験の開発・提案を行う。

2. 供試鋼

予備試験に用いた供試材は、溶接用鋼材として広く用いられているノルマ型 490MPa 鋼(板厚 30mm)である。動的弾塑性有限要素解析の入力データである材料構成式には、東京大学大学院応用力学研究室において実施された低温引張試

験、高速引張試験(常温)などの実験結果を用いた[2]。いずれの温度においても相当塑性歪に対して Swift 型((1)式参照)、ひずみ速度に対しては Cowper-Symonds 型((2)式参照)のフィッティングを行った。

本試験に用いた供試材は、船体用圧延鋼板 EH47 鋼と同程度の強度を有する熱処理鋼材である。材料構成式のフィッティング結果は Table 3 および Table 4 に示す通りである。

$$\bar{\sigma}(\varepsilon^p) = \sigma_Y \left(1 + \frac{\varepsilon^p - \beta}{\alpha}\right)^n \quad (1)$$

$$\bar{\sigma}(\varepsilon^p, \dot{\varepsilon}^p) = \bar{\sigma}^{\text{static}}(\varepsilon^p) \cdot \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}^p}{C}\right)^{\frac{1}{P}}\right] \quad (2)$$

Table 1 Coefficients of Swift equation.

Temperature [°C]	σ_Y [MPa]	α	β	n
-140	649	0.02	0.024	0.172
-100	501	0.02	0.019	0.236
-60	433	0.02	0.013	0.263
-20	394	0.02	0.015	0.279

Table 2 Coefficients of Cowper-Symonds equation.

C	P
5.04×10^4	5.14

Table 3 Coefficients of Swift equation.

Temperature [°C]	σ_Y [MPa]	α	β	n
-100	595	0.023	0.0217	0.178
-50	535	0.019	0.0126	0.182
20	476	0.013	0.0156	0.146

Table 4 Coefficients of Cowper-Symonds equation.

C	P
5.5×10^4	0.16

3. 動的弾塑性有限要素解析手法の確立

本研究で用いる動的弾塑性有限要素解析手法の確立を目的として、無限板を想定したモデルで動的亀裂伝播解析を行い、得られた亀裂先端近傍応力分布及びそこから算出される K_d が無限板を定常伝播する亀裂の解析解と整合しているか検証した。

3.1 無限板貫通欠陥モデル

無限板を想定した貫通欠陥モデルの概要を Fig. 1 に示す。形状の対称性から 1/4 をモデル化し、荷重は端部に X 方向の強制変位を生じさせることによって制御した。亀裂の伝播は節点力解放法によって表現され、亀裂半長は最小 0.2mm、最大 100mm とした。モデルの寸法は、応力波の影響を回避するために十分な大きさと考えられる 1000mm×1000mm×5mm とした。亀裂伝播部の要素サイズは、解析精度の観点では可能な限り短い要素辺にすることが望ましいが、計算コストなどの観点から 0.2mm×0.2mm×1mm とした。要素は、6 面体三次元平面歪要素を用いた。節点間力解放規則には、各時刻ステップにおいて節点間力を瞬時に 0 にする“STEP”と節点間力を線形的に減少させる“RAMP”を用いた。材料特性は弾性及び弾塑性とし、金属塑性には-100℃の材料構成式を適用した。解析ステップは静的な荷重荷重ステップと動的な亀裂伝播ステップから構成され、全ステップにおいて大変形の非線形効果を考慮に含めた。亀裂伝播速度は、亀裂伝播面上の節点間力を解放していく時間幅を変えることで、任意の速度に設定することが可能である。

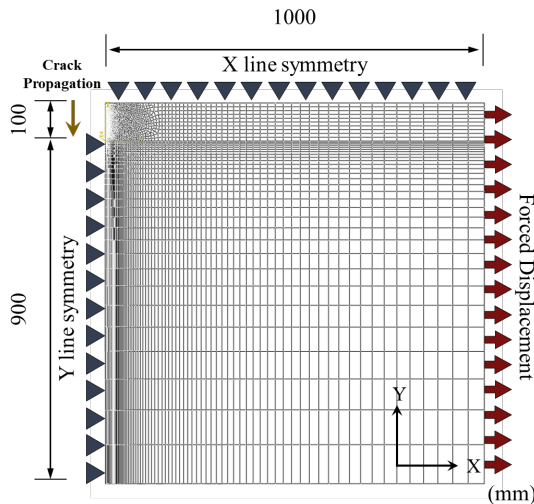


Fig. 1 Generals of FEM model for simulation of through crack.

3.2 解析条件

解析条件は、材料特性、グロス応力 σ_{gross} 、HHT 法におけるパラメータ、節点間力解放規則、亀裂伝播

速度ごとに条件を設定した。ここで、グロス応力 σ_{gross} とは、供試材の-100℃における降伏応力 σ_y を基準として、亀裂先端に小規模な降伏が生じる低応力条件とモデル全体で降伏が生じる高応力条件を設定した。出力データは、亀裂先端から伝播方向に 32 要素の積分点の開口方向応力 σ_{yy} 及び相当塑性ひずみ ϵ^p 、ステップ毎の系全体の諸エネルギーとした。積分点から抽出した値は各節点位置において平均化処理を行った。

3.3 シミュレーション手法の検証

無限板中貫通亀裂先端開口方向応力分布は特異応力場において、グロス応力 σ_{yy} を用いて、 $\sigma_{yy} = \frac{\sigma_{yy}^{\infty} \sqrt{\pi a}}{\sqrt{2\pi r}}$ で近似的に表すことができる。一方、無限板中貫通亀裂先端応力分布を任意の位置での応力成分を導出する式として、Westergaard 関数が知られている。Westergaard 関数を用いた場合、X 軸上の開口方向応力成分は $\sigma_{yy} = \frac{(r+a)\sigma_{yy}^{\infty}}{\sqrt{r^2+2ar}}$ で表される。FEM 解析結果である亀裂先端応力分布を Westergaard 関数と比較することで、解析精度の検証を行った。その結果、弾性解析では、HHT 法におけるパラメータを Transient Fidelity、節点間力解放規則を RAMP とした場合に Westergaard 関数との良好な一致が見られ、その他の条件では亀裂先端の応力は過大な値となることが明らかになった。弾塑性解析では、亀裂先端の小規模降伏によって亀裂先端のごく近傍では Westergaard 関数と大きく乖離するものの、HHT 法におけるパラメータを Transient Fidelity、節点間力解放規則を RAMP とした場合におよそ良好な対応が見られた。

4. 脆性亀裂伝播停止特性簡易評価法の開発

実際の脆性亀裂伝播現象は局所応力を限界条件とし、裂前縁形状を時々刻々変化させながら、伝播速度が限界応力を保持できる下限値を下回ったところで停止するものと考えられる。一方で、従来の ESSO 試験での解釈モデルに基づけば、広幅引張試験や小型曲げ試験では亀裂伝播駆動力が亀裂進展に伴い変化すると仮定し、アレスト亀裂長さから材料の亀裂伝播抵抗を評価している。本研究では、亀裂のトンネル化や伝播速度履歴など実験結果からは単純に得られない量が一定で、局所的な駆動力が亀裂伝播に伴い変化するという仮定のもと動的三次元 FEM 解析を行い、亀裂伝播駆動力に相当する値を求めることとした。亀裂伝播駆動力を記述するパラメータは、先行研究[3]においても多く用いられてきた伝播中の亀裂先端近傍応力分布から算出される動的応力拡大係数 K_d とした。

4.1 試験片形状の検討

2015 年に小型アレスト特性評価試験として

ATE2 委員会によって開発・規格化されたプレスノッチ曲げ試験の課題を整理し、FEM 解析を用いて適切な試験片形状の決定を行った。プレスノッチ曲げ試験では、長方形板の試験片において、鋭利な押し治具を用いてあらかじめプレスノッチ加工を施しておき、低温の試験環境において荷重を負荷することで脆性亀裂を発生させる。発生した亀裂が中心面から大きく逸れることなく試験片中で停止した場合、アレスト靱性値を評価することができるのだが、貫通に近い試験結果となるケースが多く報告されている[7]。このことは、単に試験片が小型なため亀裂が伝播可能な距離が短いからではなく、局所的な亀裂伝播駆動力の推移に原因があると考えられる。FEM 解析により得られたプレスノッチ曲げ試験の局所的な亀裂伝播駆動力 K_d の推移を、Fig. 2 に示す。局所的な亀裂伝播駆動力 K_d は、曲げの中立面に達するまでは漸増し、中立面を通過後急激に低下する傾向が見られる。このように K_d が推移する場合、材料の亀裂伝播停止特性 K_{ca} は一定であるため、両者の大小関係が入れ替わる点は亀裂長さが60~70mmの限定された狭い範囲に集中しやすい。実際にプレスノッチ曲げ試験のアレスト位置を整理すると、この限定された範囲に多くのデータが偏在することが明らかになっている[4]。したがって、 K_d が亀裂進展に伴って単調に減少するような試験片形状であれば、材料に温度勾配を設けることなく、アレスト特性を簡易的に評価することが可能になると考えられる。同様の課題として、プレスノッチ曲げ試験では、 K_d のピークが $4000\text{N}/\text{mm}^{3/2}$ にも満たず、大型の広幅引張試験に比べて高いアレスト靱性値を評価することができない。本研究では、超大型コンテナ船に使用される極厚鋼板の要求性能である $6000\sim 8000\text{N}/\text{mm}^{3/2}$ の高いアレスト靱性値を評価することを念頭に置き、 K_d のピーク値がより高い試験片形状を開発することを目標とした。

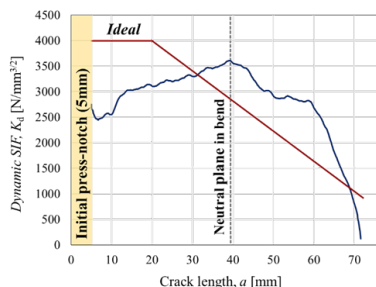


Fig. 2 K_d transition in press-notched bend test calculated by FEA (Crosshead displacement = 3mm, Test temperature = -60deg.C , Crack velocity = $500\text{m}/\text{sec}$ const.)

4.2 予備試験結果

試験片の図面を Fig. 3 に示す。従来のプレスノ

ッチ曲げ試験との比較を容易にするため、板厚は10mmとした。予備試験は合計14体実施し、いずれも脆性亀裂の発生・停止に成功した。ただし、ノッチ底からの有意な延性亀裂が確認された試験片については無効とした。測定したアレスト亀裂長さとの試験温度の関係を Fig. 4 に示す。アレスト亀裂長さとの試験温度には、試験温度が低いほどアレスト亀裂長さが長くなるトレンドが明瞭に見て取れる。この結果は、プレスノッチ加工の深さ不均一や脆性破壊発生のパラつきが試験結果に与えるいくらかの影響が実験に含まれていることを考慮しても、局所的な亀裂伝播駆動力が亀裂進展に伴い単調に減少する推移が強力に実現できていることの証左と言えるだろう。予備試験による評価結果と同供試験鋼の脆性亀裂伝播停止特性を同手法により評価した ESSO 試験結果をアレニウスプロット上で比較することで、従来法の問題点であった大型試験との相関性について分析した。その結果、Fig. 6 に示す通り、評価したアレスト靱性値には極めて高い相関性が確認された。

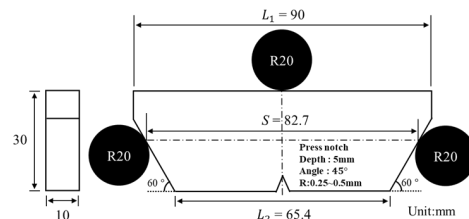


Fig. 3 Configuration of tapered press-notched bend test.

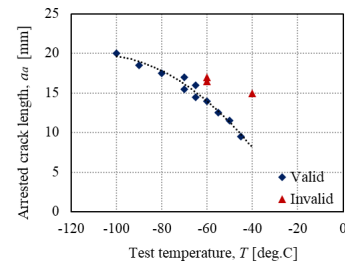


Fig. 4 Relation between test temperature and arrested crack length

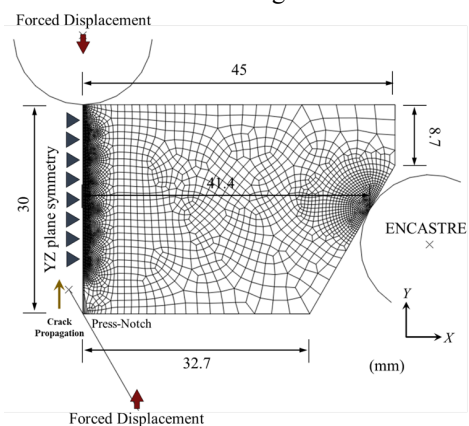


Fig. 5 Generals of FEM model for tapered press-

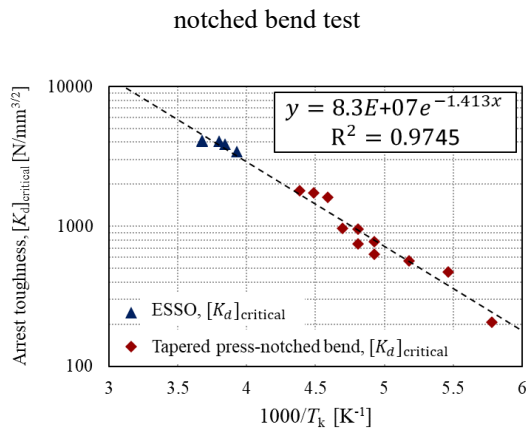


Fig. 6 Arrhenius plot of material used ($V=300\text{m/sec}$)

4.3 本試験

脆性亀裂伝播停止特性評価試験として確立している ESSO 試験との対応を評価するためには、高 K_{ca} 領域での比較が重要であり、試験片のサイズをやや大きくする必要がある。本研究では、事前試験の4倍の平面寸法を持つ試験片による評価を本試験と位置付け、本手法の評価を行う。試験片の図面を Fig. 7 に示す。ノッチ加工には低温領域で実施することを想定したノッチ加工 A と高温領域で実施することを想定したノッチ加工 B の2工程を設けた。後者は、深さ15mmの機械加工切欠きにプレスノッチ加工5mmを施した上で、395kNの逆曲げ負荷を実施する工程である(詳細は割愛するが、逆曲げ処理は亀裂の発生を容易にすること、直進性を向上させることを目的に導入)。予備試験と同様の手法で評価した評価したアレスト靱性値と同供試材の ESSO 試験によるアレスト靱性値は Fig. 8 の通りとなった。解析条件である亀裂伝播速度や亀裂前縁形状を単純化し、動的三次元FEM解析によって局所的な亀裂伝播駆動力を求める本手法は、実現象を大きく単純化しているものの、ESSO 試験による評価と非常に連結性の良いアプローチであると捉えてよいだろう。このように、従来の評価法との良好な連結性を有していることと脆性亀裂伝播の物理メカニズムの多くを記述していることの両者を併せ持つという意味ではこれまでにない画期的な手法であると考えられ、本手法は単なる基礎研究に留まらず実産業分野での適用が期待できる技術開発である。

5. 結論

動的弾塑性有限要素解析手法の検証では、無限板貫通欠陥モデルにおいて、HHT法におけるパラメータを Transient Fidelity, 節点間力解放規則を RAMP とする条件で、精度良く応力値を算出でき、エネルギーの釣り合いが保たれることを確認した。本評価手法で評価したアレスト靱性値が ESSO 試験による評価結果と高い相関性を

を有することを確認した。また、本試験では、小型の試験片で少なくとも $6000 \text{ N/mm}^{3/2}$ までのアレスト靱性値を高精度で評価可能であり、小型アレスト試験の産業ニーズに十分応えていることが明らかとなった。

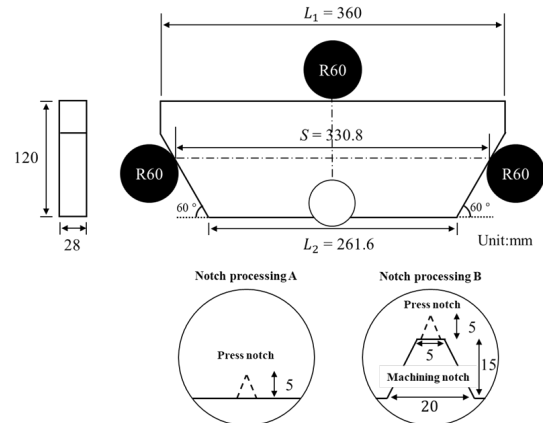


Fig. 7 Configuration of tapered press-notched bend test.

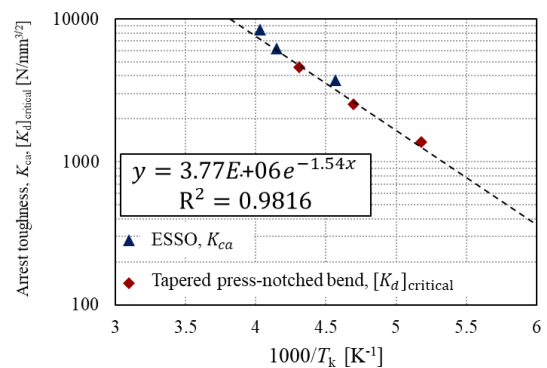


Fig. 8 Arrhenius plot of material used ($V=400\text{m/sec}$)

参考文献

- [1] Okawa, T., Shirahata, H., Nakashima, K., Yanagita, K. and Inoue, T., "Simplified Evaluation of Brittle Crack Arrest Toughness in Heavy-Thick Plate by Combined Small-scale Tests", Proceedings of the Twenty-fifth (2015) International Ocean and Polar Engineering Conference Kona, Big Island, Hawaii, USA, June 21-26, 1153-1157.
- [2] Tonsho, F., Kawabata, T. and Aihara, S., "Investigation of Driving Force for Crack Propagation around the Arrest Point On Temperature-Gradient Crack Tests in Steels", CAMP-ISIJ, Vol. 28(2015)-768.
- [3] T. Kawabata, T. Namegawa, M. Kaneko, Y. Shimada, H. Tajika, K. Shibanuma and S. Aihara, "Numerical Analyses of press-notched bend tests and applicability to simplified method of arrest toughness evaluation", ISOPE, Vol.4, pp.169-176, 2015.
- [4] T. Kawabata, Y. Nishizono, S. Aihara, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, Volume 92, December 2017, Pages 266-275.