

# 鋼材の脆性亀裂伝播における局所限界応力の評価とそれに基づく 脆性亀裂伝播停止挙動再現モデルの開発

37-146351 柳本史教  
指導教員 柴沼一樹 講師

## 1. 研究背景

中国をはじめとする新興国の台頭や経済のグローバル化に伴い海上物流量は増加の一途をたどっている。

こうした中、コンテナ船は海上物流の主力の一端を担っており、コスト削減のために大型化が進んでいる。その結果、1990年頃は4,000TEU級コンテナ船が主力であったのが2010年以降は10,000TEU級コンテナ船が多数建造されるようになり、2015年に20,000TEU超級コンテナ船が計画されるようになっている。

コンテナ船はコンテナの積み下ろしのために上面が大きく開口しているため、コンテナ船のハッチサイドコーミングには極厚かつ高強度の鋼板を使用することで曲げ応力への対策が図られている。しかし、一般に極厚・高強度鋼板は脆性破壊が生じやすいことが指摘されており、一度脆性破壊が発生しても脆性亀裂の伝播が致命的な損傷を引き起こす前に停止(アレスト)させることができる”Fail Safe Design”が必要とされている。国際船級協会連合(IACS)では従来アレスト靱性に関する規定が存在せず、発生靱性の規定を満たせばアレスト靱性も十分確保できていると考えられていた。しかし、近年の研究ではこうした従来の知見を否定する研究成果も報告されている。こうした中で、IACSは2014年になってはじめて80mm厚までのアレスト性能に関する規定を施行した<sup>2)</sup>が、実験的事実のみに依拠するに留まっている。そのため、コンテナ船の安全性確保のためには脆性亀裂伝播・停止挙動に理論的な説明を行い、脆性亀裂の安全な制御技術を確立することが急務であるといえよう。

## 2. 先行研究

脆性亀裂伝播・停止挙動に関する研究は1970年代以降、盛んに行われており、一定の成果があげられてきた。中でも、局所限界応力モデル<sup>3)</sup>は脆性亀裂伝播・停止挙動を記述する有力なモデルであると考えられている。このモデルは局所限界応力説に基づき、亀裂先端の塑性応力場と降伏応力の歪速度依存性を考慮したうえで、亀裂先端近傍の局所応力がその材料の局所限界応力を満たしているかどうかを亀裂伝播条件とし、また脆性亀裂伝播時に鋼板表面付近に形成される未破断部(サイドリガメント)や延性破断部(シアリップ)に着目することで脆性亀裂伝播・停止挙動の説明を試みている (Fig.1)。本モデルを元にして栗飯原ら<sup>4)</sup>によって塑性拘束の緩和を考慮することで長大亀裂問題の傾向をある程度再現したモデルが考案されており、脆性亀裂伝播・停止挙動の研究が進められている。しかしながら、これまでのモデルで用いられてきた局所応力評価手法はモデルの根幹を成す手法にもかかわらず、その妥当性が疑わしいことか

ら、モデル計算結果の信頼性が問題となっている。また、従来のモデル中における局所限界応力は4000~6000MPa程度と非常に大きく、その再評価が必要とされてきた。

そこで、物理的基盤を有する局所応力評価手法をモデルに導入する必要があるほか、実験的に局所限界応力を評価することが求められている。

## 3. 本研究の課題と目的

以上の課題を踏まえ、本研究ではこれまで十分に評価得られてこなかった局所限界応力を取得するとともに、モデル中の局所応力評価手法を物理的根拠に立脚したものに修正し、局所限界応力モデルの計算の妥当性を向上することを目指し、以下の研究を実施する。

1. 高速亀裂伝播再現解析を有限要素法(FEM)で実施するに当たっての基礎的検討
2. 脆性亀裂伝播中の局所限界応力の評価
3. 脆性亀裂伝播・停止挙動再現モデルの開発

以上の実験及び数値計算について、以下で詳述する。

## 4. FEMによる高速亀裂伝播再現解析の基礎的検討

本研究ではFEMによる脆性亀裂伝播解析を多数実施する。しかし、高速伝播亀裂先端近傍の局所応力に着目した研究は少なく、系統的なFEM解析は行われてこなかった。そこで、本研究では最初に高速亀裂伝播模擬FEM解析により高速伝播亀裂先端近傍場の性質について検討する。計算には汎用FEMソフトウェアAbaqus 6.14を使用した。

### 4-1. 解析モデル

開発したプリプロセッサにより作成されたFEMモデルをFig.2に示す。二次元平面ひずみを仮定しており、モデルは応力波の反射の影響がないサイズとした。弾性計算により変位拘束解放手法の精度について検討を行った上で、弾塑性解析を行うこととした。

### 4-2. 弾塑性有限要素解析

一般に、脆性亀裂伝播時には亀裂伝播速度は一定ではないことが知られている。しかし、亀裂伝播速度の変化

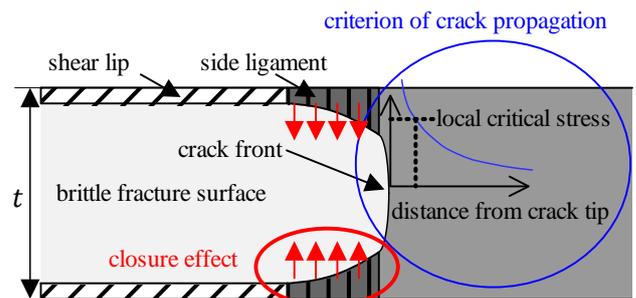


Fig.1 Concept of local critical stress model

が亀裂先端近傍の応力場などにどのような影響を与えるかは十分には整理されていない。そのため、4-1 で開発したプリプロセッサを用い、亀裂伝播速度が加速度を有するように設定して解析を実施した。鋼材を模擬するために Swift 型の構成則を用いて塑性変形を表現している。亀裂長さ 0.1m で亀裂伝播速度が  $1000 \text{ m/s}$  になるときの亀裂前方応力分布の解析結果を Fig. 3 に示すが、加速度によらず亀裂先端近傍応力は概ね等しいことがわかる。ただし、 $-5.0 \times 10^7 \text{ m/s}^2$  の加速度の場合、初速が著しく速いことから速度履歴が部分的にレイリー波速度を超えるため、応力が他の条件に比べ小さくなると思われる。

また、同様の FEM モデルを用いて、亀裂伝播方向に温度勾配が存在するよう設定し解析を実施した。亀裂長さ 0.1m、亀裂長さ 0.1m における亀裂先端温度  $-10^\circ\text{C}$  のときの亀裂先端前方応力分布を Fig. 4 に示すが、いずれの温度勾配においても亀裂前方の応力分布は概ね一致することが示された。

上述の結果より平面ひずみ条件においては、高速伝播亀裂先端近傍の応力場やひずみ場は速度履歴や温度勾配の影響を受けないことが示された。

### 5. 小型供試体による脆性亀裂伝播試験

従来、脆性亀裂伝播時の局所限界応力は材料固有値であると考えられてきたが、近年の研究により局所限界応力は温度や負荷応力により変化する可能性が示唆されており、局所限界応力が必要とされている。

本実験は局所限界応力を評価することを目的とするが、脆性亀裂伝播中の応力を直接取得することは困難である。そのため、クラックゲージとひずみゲージを用いて脆性亀裂伝播速度を取得し、FEM に入力することで破壊応力を得ることとした。しかし、通常の鋼板では脆性亀裂伝播時にはサイドリガメントやシアリップが亀裂伝播挙動の把握の障害になるほか、板表面付近で応力三軸度が低下するため、

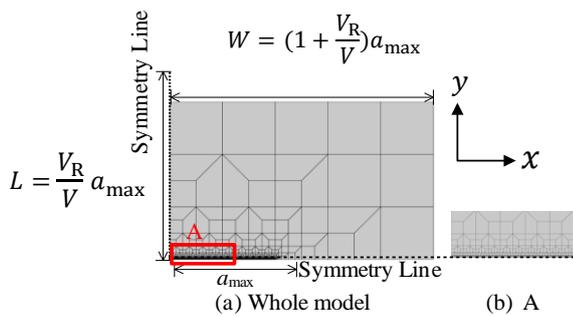


Fig.2 FEM model

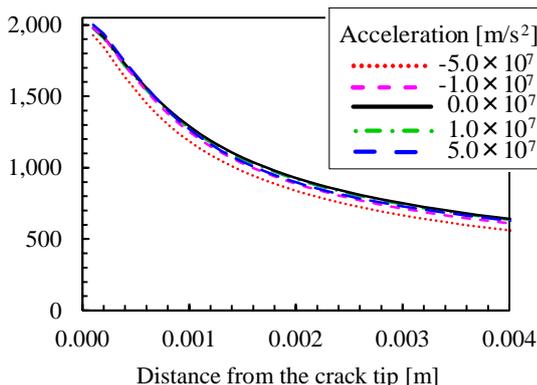


Fig.3 Stress near the crack tip for each acceleration

板厚中心付近で亀裂が先行し、伝播中の亀裂先端形状の確定が困難であることから、FEM による再現解析が難しい。そのため、本研究では亀裂伝播部にサイドグルーブを加工することで応力を集中させることで板厚方向の局所応力を概ね一定にすることで亀裂前縁の湾曲を防ぎ、FEM による再現解析を実施できるようにした。

#### 5-1. サイドグルーブ形状の検討

サイドグルーブ形状を決定するために 4-1 で開発したプリプロセッサを三次元モデルに拡張し、Fig. 5 に示したサイドグルーブパラメータを入力として、サイドグルーブ付供試体を模した FEM モデルを作成するプリプロセッサを開発した。このプリプロセッサにより作成した FEM モデルを Fig. 6 に示す。本モデルは亀裂伝播面を対称面とした板厚方向の対称性を利用した 1/4 モデルであり、節点力解放法により計算を実施した。また、あわせて比較のためにサイドグルーブを持たないモデルについても FEM 計算を実施した。 $-10^\circ\text{C}$  で計算した結果について板厚中心部の応力で正規化したものを Fig. 7 に示す。なお、この時のサイドグルーブパラメータは  $\theta = 20^\circ$ ,  $r = 1\text{mm}$ ,  $t_1 = 10\text{mm}$  である。サイドグルーブを設けることでサイドグルーブを有さない場合に比べて応力低下が抑制され、板表面近傍のみ応力が急激に低下するのみとなり、板厚全体の 90% 以上にわたって応力が一定になっていることが観察される。そのため、板厚中心近傍以外では応力が低下するサイドグルーブを持たない鋼板に比べ、亀裂前縁形状の殆どが伝播方向に対して垂直になるものと期待される。同様の傾向は  $-60^\circ\text{C}$  以上で確認されたものの、 $-80^\circ\text{C}$ ,  $-100^\circ\text{C}$  のような低温でかつ負荷応力が小さい場合、 $\theta = 20^\circ$  では応力集中が過剰であったため、低負荷応力においては  $-80^\circ\text{C}$ ,  $-100^\circ\text{C}$  それぞれで  $\theta = 40^\circ$ ,  $\theta = 70^\circ$  とすることとした。

#### 5-2. 小型脆性亀裂伝播試験

5-1 で決定したサイドグルーブ形状に従って供試体の試験は(株)日鉄住金テクノロジーの有する 1,000tf 試験機を用いて実施した。供試体図を Fig. 8 に示す。試験は No.1~No.18 の全 18 回実施し、当初は機械ノッチ及びブ

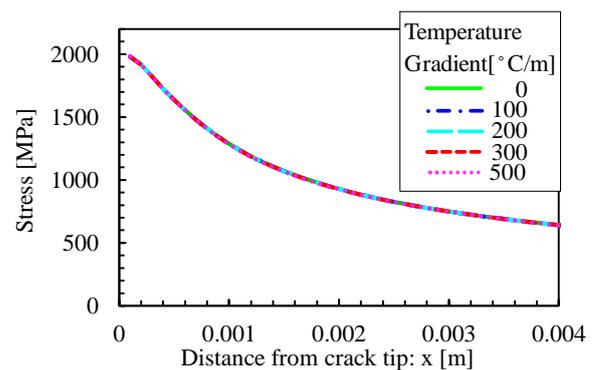


Fig.4 Stress in the vicinity of the crack tip against each temperature gradient

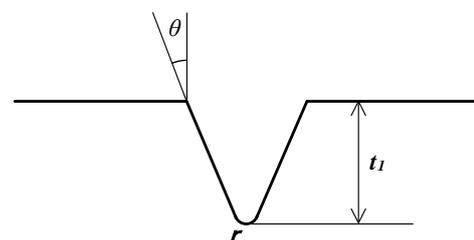


Fig.5 Parameters of the side-groove

レスノッチによる脆性破壊の発生を試みていたものの、非常に高い負荷応力が必要であり、供試体の振動が大きく、伝播速度計測が困難であった。そこで、Fig.8に示すように脆性破壊発生部近傍に脆化ビードを設けることで低加重での亀裂発生を実現し、No.11,13,14,15,17,18で亀裂伝播速度の計測に成功した。以下で詳細を述べる。

試験条件を Table 1 に示す。ひずみゲージが検知したひずみ波形のピークを亀裂伝播時間とし、亀裂伝播速度を求めた。亀裂伝播速度を試験ごとにまとめた結果を Fig.9 に示すが、試験により大きく異なることが確認できる。次に、ここで得られた亀裂伝播速度を入力として有限要素法による再現解析を行う。

### 5-3. 有限要素法による再現解析

FEM モデルは Fig.6 に示したものと同一のものを用いた。最初に、特性距離を 0.1mm として局所応力を評価したが、亀裂伝播速度が大きく増加する条件では応力が減少していった。これは、亀裂伝播速度が速いほど局所応力の特異性が強くなるため、特性距離 0.1mm は局所応力を適切に評価

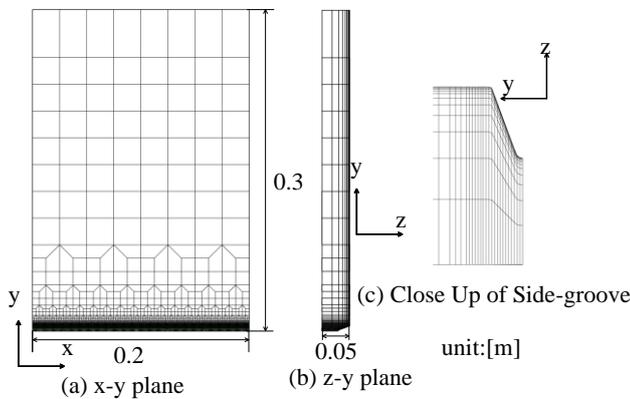


Fig.6 FEM model

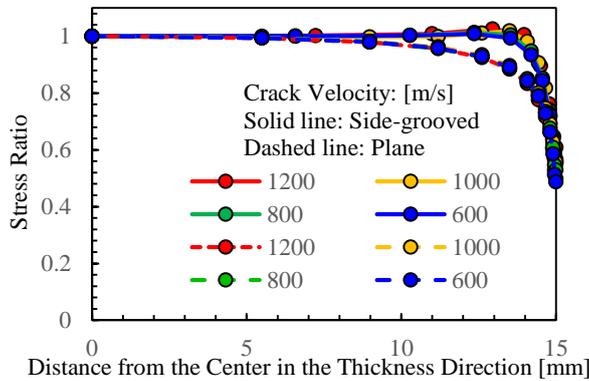


Fig.7 FEM result of side grooved-specimen

するためには大きすぎると考え、更に亀裂先端に近い点にて局所応力を評価することとした。ただし、これ以上要素分割を細分化すると計算コスト上三次元解析が困難であるため、サイドグルーブにより板厚方向全てにわたり平面ひずみ状態になっていることから、二次元平面ひずみモデルにて FEM 解析を実施することとした。

その結果、特性距離を 0.0125mm とした時、局所応力の分散が最も小さくなることがわかった。そのため、本試験では特性距離が 0.0125mm であると考え、局所限界応力を整理することとした。各試験ごとに局所限界応力を平均化し、温度、負荷応力で整理した結果を Fig.10, Fig.11 にそれぞれ示す。

Fig.10, Fig.11 からわかるとおり、負荷応力依存性、即ち駆動力依存性は殆ど見られないのに対し、強い温度依存性が見られた。これは、鋼材における亀裂伝播ではへき開面同士の段差が延性破断してテアリッジ (Fig.12) を形成することが主なエネルギー吸収機構であり、限界ひずみが一定であるとすればテアリッジ形成までの塑性変形エネルギーは降伏応力が高いほうが大きくなるため、低温のほうが亀裂伝播にあたりより大きなエネルギー吸収を伴うためであると考えられる。これまでの研究でも、テアリッジの形成を考慮することで亀裂伝播において低温のほうが有効表面エネルギーが

Table 1 Detail experimental conditions of Successful experiments

No.	Initiation Temperature [°C]	Average Propagation Temperature [°C]	Initiation Load [tf]
11	-72	-82.15	102.6
13	-63.4	-61.071	64.1
14	-81.3	-81.1286	47.7
15	-55.7	-44.4	81.8
17	-121.6	-61.575	117.9
18	-102.3	-102.243	72.6

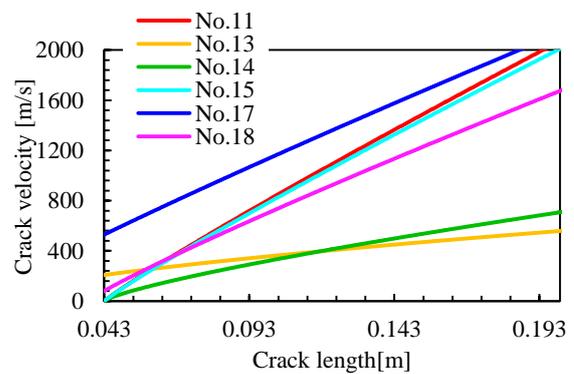


Fig.9 Crack velocity

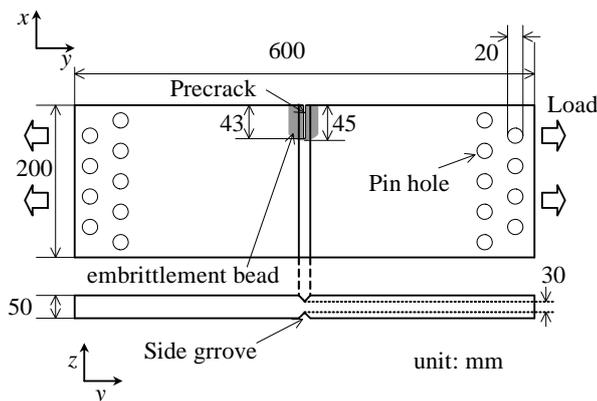


Fig.8 Overview of specimen

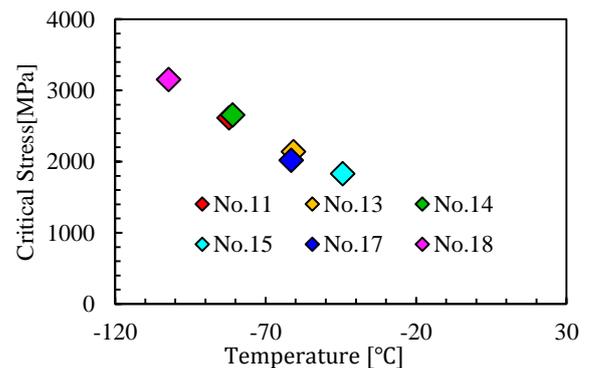


Fig.10 Local critical stress against temperature condition

増大することが指摘されており<sup>5)</sup>、本実験の結果と整合する。

## 6. 脆性亀裂伝播・停止挙動再現モデルの開発

4, 5 の結果を踏まえ、局所限界応力仮説に依拠した脆性亀裂伝播・停止挙動再現モデルを開発する。本モデルは滑川の研究を踏襲<sup>6)</sup>し、平面ひずみ状態となっている板厚中心部でのみ亀裂伝播・停止の評価を行う。

従来の局所限界応力モデルでは亀裂の伝播・停止判定を行うための局所応力評価手法は漸近解を複合させることで定式化していたが、FEM 解析の結果と比較すると著しく乖離している。そのため、系統的な二次元平面ひずみ FEM 解析を実施し、応力拡大係数、亀裂伝播速度、温度、常温降伏応力をパラメーターとする局所応力評価内挿関数を構築した。

サイドリガメントは延性的に破断するまで亀裂駆動力を低下させる閉口効果を有するとされているが、その形成条件や定量的な閉口効果は明らかではない。そこで、滑川の研究<sup>7)</sup>を参考に、速度項を考慮した亀裂先端塑性域サイズを用いてサイドリガメント厚さを記述することとした。

以上より、未知変数をサイドリガメント厚さ $t_{sl}$ 、亀裂伝播速度 $V$ として、式(1)、(2)よりなる連立方程式を解くことで本モデルでは亀裂の伝播・停止を評価する。解が存在しなくなった場合、亀裂は停止したとみなされる。

$$\sigma_F = f(K_{local-ns}(0)/\sigma_{YSO}, \sigma_{YSO}, T, V) \quad (1)$$

$$t_{sl} = k_{sl} f_r [V] r_p \quad (2)$$

$K_{local-ns}(0)$ は閉口効果の板厚方向に対する分布を考慮した板厚中心における局所応力拡大係数である。

また、第 5 章の結果を踏まえ、局所限界応力に温度依存性を付与した。温度依存性は静的な降伏応力の温度依存性と同一であると仮定して計算を実行した。

構築したモデルの妥当性を検証するために、過去の温度勾配型 ESSO 試験のデータを再現したモデル計算を行い、その結果を試験結果と比較した(Fig.13)が、実験点とモデ

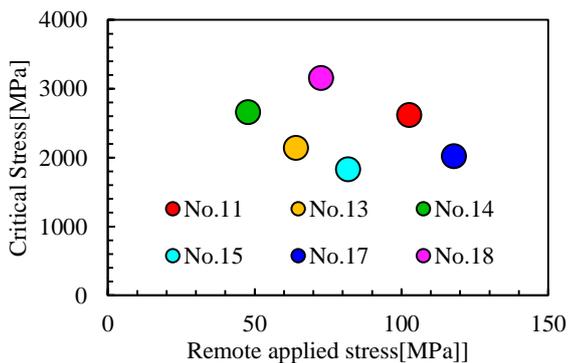


Fig.11 Local critical stress against applied stress condition



Fig.12 Tear ridge<sup>5)</sup>

ル計算点は非常に良い一致を示している。常温局所限界応力は合わせこみにより 1589MPa としたが、脆性破壊発生の局所限界応力を考えると妥当な値であると考えられる。また、高負荷応力で試験を行っているため、塑性拘束の緩和によって直線から逸れる#5 の挙動をモデルで再現しており、これまでの局所限界応力モデルで提唱された塑性拘束の緩和により高駆動力下で亀裂が早期に停止するという仮説を裏付ける計算結果を得ることができた。また、高駆動力下で母材に亀裂が突入する中幅混成試験の再現解析を行い、母材突入直後にサイドリガメントが急激に発達し亀裂が停止するという現象を再現し、亀裂停止長さについて実験とモデル計算結果でよい一致を示した。

## 7. 結言

以上の検討により、以下の結論を得た。

(1) 平面ひずみ状態において、降伏応力のひずみ速度依存性を考慮すると亀裂先端近傍の応力やひずみは温度履歴や速度履歴の影響を受けない。

(2) サイドグルーブ付脆性亀裂伝播試験とその再現解析により、局所限界応力を取得した。その結果、局所限界応力は降伏応力に類似した温度依存性を有していることがわかった。

(3) モデル計算の物理的根拠を確立するために、系統的な平面ひずみ有限要素解析による局所応力内挿関数を構築した。構築した内挿関数を滑川の手法を踏襲し、サイドリガメントの形成を考慮した局所限界応力モデルを導入し、温度勾配型 ESSO 試験をよく再現する計算結果を得ることができ、塑性拘束の緩和による亀裂停止を裏付けることができた。

今回開発したモデルはサイドリガメントが過剰評価されている結果となり、サイドリガメントの形成条件やその閉口効果を実験とその再現解析に基づき検討することが今後の課題である。

### 引用文献

- (社)日本船舶海洋工学会：極厚板大入熱溶接部強度検討 FS 委員会活動報告書，2008
- IACS: UR S33, Jan. 2014
- 町田進，吉成仁志，安田真，栗飯原周二，間瀬秀里：日本造船学会論文集，第 177 号(1995)，
- 栗飯原周二，柴沼一樹，渡部良行：日本船舶海洋工学会論文集，第 16 号(2012)
- K. Shibamura, Y. Yamamoto, F. Yanagimoto, K. Suzuki, S. Aihara, H. Shirahata: ISIJ International, Vol.56, No.2, in press, 2016
- 滑川哲也：平成 24 年度修士論文，2013

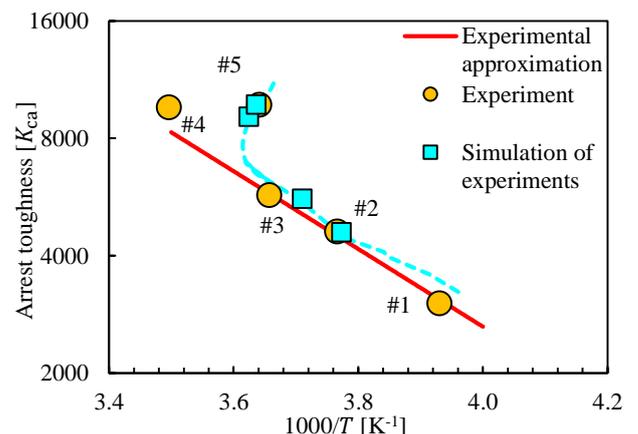


Fig.13 Experiments and model calculation