

(昭和 54 年 11 月 日本造船学会秋季講演会において講演)

高速クラックの動的様相に関する研究 (第 4 報)

——応力波の影響について——

正員 寺 本 徳 郎* 正員 町 田 進*
正員 金 沢 武*

Study on Fast Fracture and Crack Arrest

——The 4th Report——

by Tokuo Teramoto, *Member* Susumu Machida, *Member*
Takeshi Kanazawa, *Member*

Summary

Most naval architects are now very interested in the mechanism of fast fracture (brittle crack propagation) and crack arrest from the viewpoint of dynamic fracture mechanics. The concept of crack arrester design for steel structure has been based on static approximation. Recently the behavior of fast crack is being more and more clarified by numerical approach using big computer.

In the previous paper, three types of brittle fracture propagation-arrest test were conducted and it was revealed that dynamic fracture toughness in ship steel is dependent on temperature and crack velocity, and the behavior of brittle crack propagation and arrest in double tension test are quite different from those in DCB test.

This paper gives the results of an experimental investigation of two different size double tension tests which were conducted to see how the reflected stress waves from boundary affects the behavior of running crack. Further a crack arrester design procedure is discussed with a focus on energetics aspect of the crack propagation process.

1 緒 言

鋼構造物にみられる脆性破壊伝播, 停止現象に対して最近動力学的な立場からその機構が次第に解明されようとしている。従来, 脆性破壊伝播停止現象に対する解析は静的近似法にもとづいた不十分なものであったが, 高速クラックの伝播停止挙動を数値計算により再現しその特性を抽出しようとする立場が一般にとられている。

前報¹⁾においては造船用軟鋼を供試した 3 種類 (DCB 試験, 標準サイズおよび大形二重引張試験) の脆性破壊伝播停止試験を行ない, 差分法による動的解析の結果として鋼材の動的な材料特性の存在を示すことができた。すなわち, 材料特性値としての動的破壊靱性値が温度とクラック速度に依存する固有の関数とみなすことができた。

次に荷重様式や試験片寸法の異なる二重引張試験と DCB 試験における高速クラック伝播停止挙動はかなり様相が異なることが判明した。つまり, 後者では運動エ

ネルギーの回復がクラックの進展に寄与しているのに比べて前者ではほとんどそれがみられない。この理由はクラック先端から発散した応力波が境界で反射したのち再びクラック線に戻る現象のクラックの挙動に与える影響の差によるものと思われる。そこで, 本報では造船用軟鋼 KAS 鋼を供試し, 試験片長さ (ピン間距離) を 2 種類変化させた二重引張試験を行ない応力波の伝播と境界条件が高速クラックに及ぼす影響を調べた。さらに前報同様, 脆性破壊伝播停止特性としての動的破壊靱性値と温度, クラック速度との関連性を考察しアレスター設計思想の基本的概念にも言及した。ただし, 解析に当っては実測したクラック速度および歪分布の時間変化を境界条件として差分法を適用し, もっぱらエネルギー論的立場から高速クラックの挙動の把握を目指した。

2 実 験

2.1 供 試 材

供試材は 20mm 板厚の KAS 鋼でその機械的性質および化学成分を Table 1 に示す。

* 東京大学工学部

Table 1 Mechanical properties and chemical compositions

Young's Modulus E (kg/mm ²)	Density ρ (g/cm ³)	Poisson's Ratio ν	Yield Strength σ_y (kg/mm ²)	Tensile Strength σ_u (kg/mm ²)	Elongation (%)
20157	8.0	0.283	28	45	34

Mechanical Properties of KAS(KOBE STEEL)

C	Si	Mn	P	S
0.12	0.23	1.0	0.014	0.009

Chemical Composition (%)

2.2 実験方法

二重引張試験として温度平坦型（伝播試験）と温度勾配型（停止試験）の実験を行なった。Fig. 1 にピン間距離を変えた試験片形状を示す。これらをロングサイズおよびショートサイズ試験と呼ぶことにする。それぞれ約30mm 板厚のタブ板の長さを含めピン間距離は、3,500mm, 1,500mm とした。試験片端部に生ずる溶接残留応力を除くため予荷重による機械的応力除去を行なった。油圧式400トン構造物試験機によりクラック伝播線上に所定の一様引張応力を生ぜしめ、発生部を冷却して副荷重により脆性クラックを発生させた。

クラック伝播速度は、図中に記したように伝播部に30mm 間隔に貼付したCD ゲージの切断による電圧変化をシンクロスコープを通じて撮影した。また G1~G4 に

示す位置に歪ゲージを縦方向に貼付しクラック進展に伴う歪の変化を計測した。さらに本実験の場合、境界条件（荷重条件）の影響が大きいと思われるのでピン穴まわりの位置（G5）にゲージを貼付し歪の変化による荷重落下の様相を記録した。なお、各種の条件に対する試験片の記号の意味は下記のとおりである。

KLP 温度平坦型ロングサイズ二重引張試験
KLA 温度勾配型ロングサイズ二重引張試験
KSP 温度平坦型ショートサイズ二重引張試験
KSA 温度勾配型ショートサイズ二重引張試験

2.3 実験結果

伝播試験の結果を Table 2 に示す。表中の σ_0 , T , $\dot{a}_m$ は各々初期作用応力、設定温度および得られた平坦部のクラック速度である。（Fig. 2 参照）初期作用応力 σ_0 はすべて一定の 16 kg/mm² とし設定温度は実構造物の使用温度に近いと思われる -20°C および -10°C とした。KSP と KLP にはあまり差がみられないがロングサイズ試験片の方が若干クラック速度が大きいうである。この原因は Fig. 3 によりおおよそ見当がつくであろう。この図は荷重点の歪変化をトリガー切断後の経過時間に対してプロットしたものである。当然のことながら KLP では荷重落下の影響は小さいのに対し荷重点までの距離が短い KSP では早くその影響が現われるといえよう。しかし、荷重点の効果は試験片と試験機全体を含

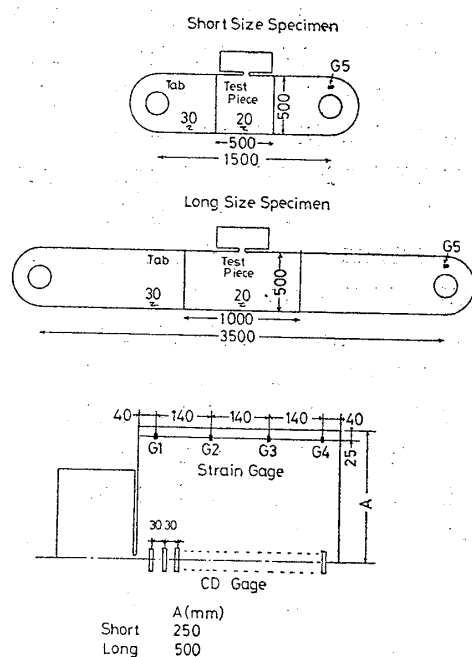


Fig. 1 Specimen configuration and arrangement of crack detector gages and strain gages

Table 2 Experimental results of propagation test
Results of Propagation Series

	σ_0 (kg/mm ²)	T ($^\circ\text{C}$)	$\dot{a}_m$ (m/sec)
KLP-1	16	-20	697
KLP-2	16	-10	611
KSP-1	16	-20	632
KSP-2	16	-10	602

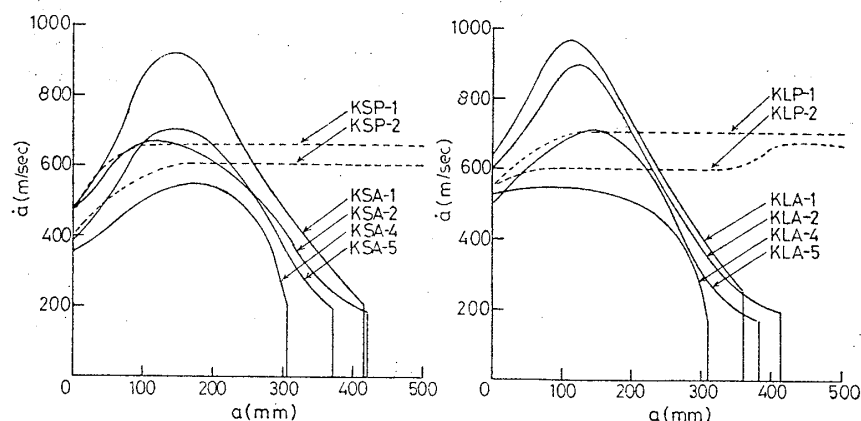


Fig. 2 Variation of crack velocity

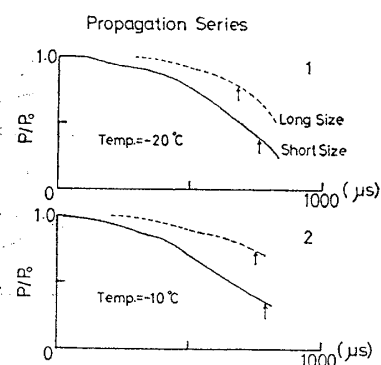


Fig. 3 Load vs. time

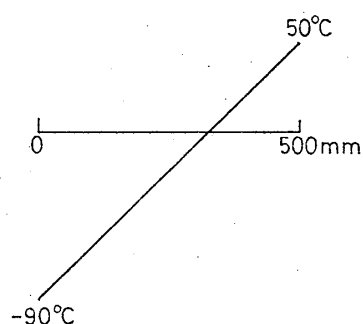


Fig. 4 Temperature distribution for arrest series test

めた系の剛性に依存しており一概に論ずることは困難である。また温度が高いほどクラック速度は小さい。破面には -10°C では -20°C より大きいシャリップが生じ、かつ破面が荒れている点などから破壊エネルギーは大きいと考えられ、従って reasonable なものであろう。図中の記号 $\uparrow$ はクラックが試験片を破断した時刻をゲージ位置と切断時間の関係から推定したものである。

次に停止試験の結果を示す。伝播部の温度勾配は Fig.

4 に示すごとく比較的なだらかなものとした。これはクラックを長く走行させ反射波の影響をできるだけ受けやすいように考慮したものである。初期作用応力 σ_0 は 16, 12, 10, 8 kg/mm^2 の 4 種類としクラック伝播速度、停止長さとの関連性を調べた。Table 3 に試験条件ならびに主要な結果を示す。表中の記号 σ_0 , a_A , T_A , K_I^A はそれぞれ初期作用応力、停止長さ、停止点の温度、従来の整理によるみかけの停止靱性値つまり

$$K_I^A = \sigma_0 \sqrt{2B \tan(\pi a_A / 2B)} \quad (1)$$

で表わされる量である。ただし B は試験片幅であり、本実験の場合 500mm である。破面は Fig. 5 に示したよ

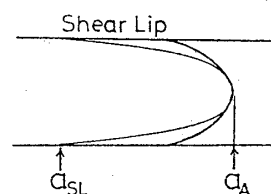


Fig. 5 Fracture surface appearance near crack tip

Table 3 Experimental results of arrest test

Results of Arrest Series

	σ_0 (kg/mm^2)	a_{SL} (mm)	$\dot{a}_{SL}$ (m/sec)	T_{SL} ($^{\circ}\text{C}$)	a_A (mm)	T_A ($^{\circ}\text{C}$)	K_I^A ($\text{kg/mm}^{3/2}$)
KLA-1	16	323	350	0	363	12	746
KLA-2	12	298	380	-7	412	25.5	712
KLA-4	8	263	390	-16	309	-3	306
KLA-5	10	280	360	-12	379	16.5	500
KSA-1	16	379	330	16	417	27	980
KSA-2	12	360	260	11	423	28.5	764
KSA-4	8	283	350	-11	306	-4	303
KSA-5	10	301	370	-6	371	14	483

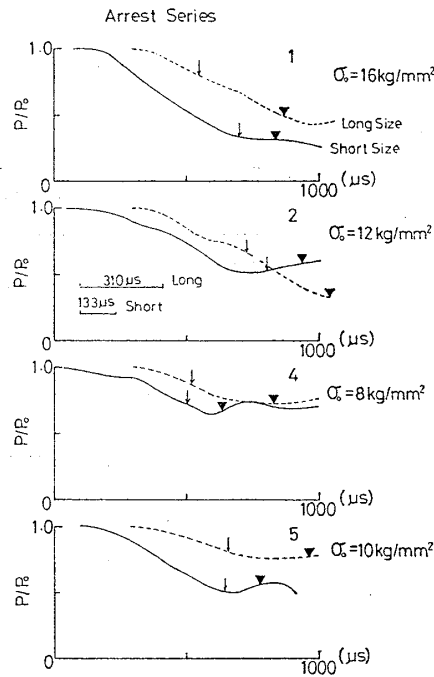


Fig. 6 Load vs. time

うにクラック中央部の先行が著しかったのでシャリップの出現点を a_{SL} , その時点におけるクラック速度, 温度を各々 $\dot{a}_{SL}$, T_{SL} とし Table 3 に併せて記す。両サイズとも停止長さ a_A は KLA-1, KSA-1 を除き荷重段階に対応している。試験サイズによる a_A の差は KLA-1 以外はあまり見られない。シャリップが出現した速度 $\dot{a}_{SL}$ は両者とも一定ではば 350 m/s であり, これは温度に依存していないようである。停止温度 T_A は初期作用応力の増加にもかかわらず, すなわち 12 kg/mm^2 以上において変化せず, 脆性破壊の限界温度があるとすれば本供試材では約 30°C であると思われる。Fig. 2 には全試験片を通じてクラック速度の変化を示してある。KLA, KSA とも高速で伝播部に突入したクラックは約 $100\sim 200\text{ mm}$ の間に最高速度を得た後減速し, ある地点で急激に停止に到る。Fig. 6 は荷重点の歪変化をトリガー切断後の時間に対して表わしたものである。図中の記号 $\downarrow$ はクラックが停止した時刻を推定したものである。伝播線上から荷重ゲージまでの応力波の到達時間はロングサイズ, ショートサイズで各々約 $310\mu\text{s}$, $133\mu\text{s}$ であり KSA-2 を除けばクラック停止後応力波が荷重点に到達した時点 (記号 $\blacktriangledown$) ではば荷重は最小値をとっている。荷重落下の程度はロングサイズよりショートサイズまた初期作用応力が大きいほど大きいといえる。

本実験の目的の一つとしてロングサイズとショートサイズに現われる相違特に停止長さの違いを期待したのであったが, Table 3 に示されるようにシャリップを考えなければ両者による実質的な差があるとみなせない。高速クラックの挙動は試験片寸法のみならず外力条件, 材

料特性などに依存すると考えられる。次の段階ではこれらの諸量を充分考慮した動的解析を行なうことによって試験片サイズの違いが主に何に影響を及ぼすのか考えてみよう。

3 解析および考察

3.1 解析方法

高速クラックの挙動を解析するに当って前報同様, 試験片を二次元弾性体とみなし以下に示す運動方程式を差分法を用いて解析した。

$$\begin{aligned}\ddot{u} &= c_1^2 u_{xx} + (c_1^2 - c_2^2) v_{xy} + c_2^2 u_{yy} \\ \ddot{v} &= c_2^2 v_{xx} + (c_1^2 - c_2^2) u_{xy} + c_1^2 v_{yy}\end{aligned}\quad (2)$$

ここに u , v は x , y 方向の変位であり, 縦波速度 c_1 , 横波速度 c_2 はそれぞれ 5639 m/s , 3102 m/s である。なおクラック進展方向は x 方向とした。

本実験では前報と異なり応力波の往復回数が殊にショートサイズ試験でははなはだしい。従って Fig. 7 に見られるように荷重落下を考慮した試験片全体の解析 (全体解析と呼ぶ) と歪ゲージによる測定線上までの部分的な解析 (部分解析と呼ぶ) の二通り行なった。前者においては荷重線上の応力を測定荷重歪の変化に合わせて一様に落下させた。他方, 後者では荷重変化は多少明確さを欠くきらいもあるのでゲージ線上の歪分布の変化を時間に対して入力した。どちらがより正確かは数値解析上の手法, 測定誤差から考えてにわかには判断できない。すなわち一様な荷重落下による方法はクラックが長大になるにつれ特にショートサイズ試験片では非現実的な大きな曲げ変形を引き起こすであろうし, 逆に部分解析では境界上の剪断力を無視しており応力波の往復回数が増えるに従いこの影響が生じる可能性はある。しかしながら, 上述した内容よりむしろ歪変化測定の精度こそ最も重要な事柄であると思われる。メッシュサイズは $h=10\text{ mm}$, 時間メッシュは $\Delta t=1\mu\text{sec}$ ($c_1 \Delta t/h=0.5639$) と

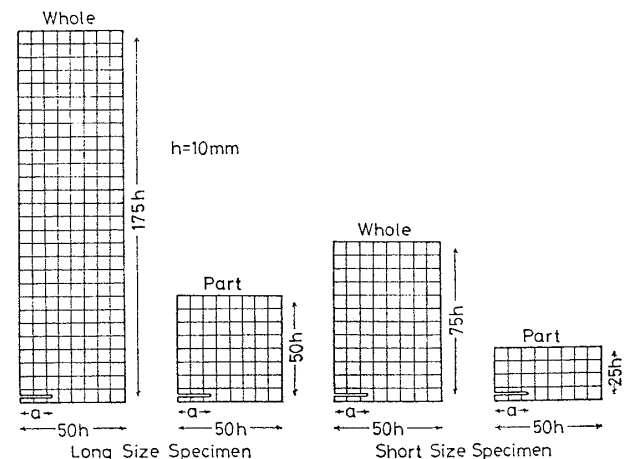
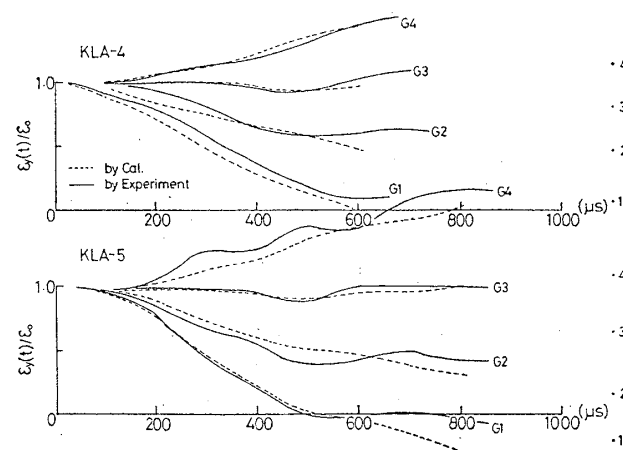
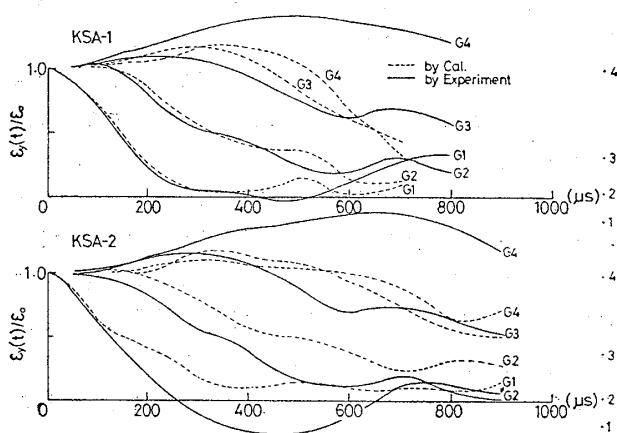


Fig. 7 Mesh division used in finite difference calculation



(a)



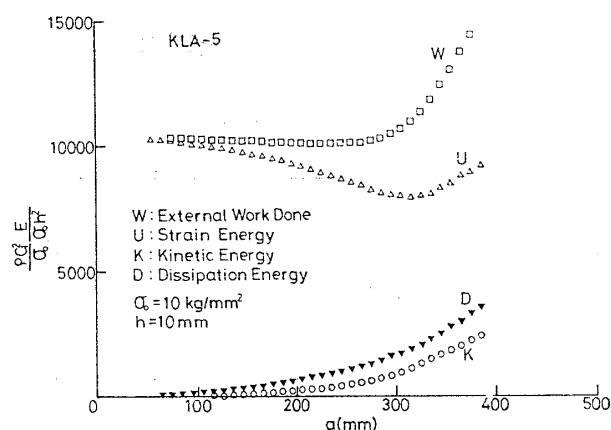
(b)

Fig. 8 (a), (b) Comparison between measured and computed variation of strain

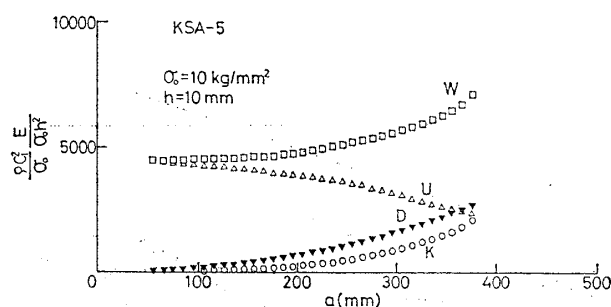
して解法は陽解法を用いた。初期荷重を加え試験片の釣合状態を実現させた後クラックを実測速度に合わせて進展させた。

3.2 歪の変化

全体解析による歪ゲージ位置 G1~G4 の歪変化を実測値と比較してみる。Fig. 8 (a), (b) には各々ロングサイズ、ショートサイズ試験の結果を表わす。図中縦軸は歪 ε の初期歪 ε_0 に対する割合、横軸はトリガーが切断された後の経過時間である。ロングサイズでは実験値と良好な対応を示しているのに対し、ショートサイズでは予想されたことだが歪が時間経過に従い実測値から隔たりを見せている。これは前述したように応力波の往復回数の増加に伴い境界条件の与え方が必ずしも正確でないためである。ロングサイズでは歪が互いに離反するのに比べ、ショートサイズではさらに複雑な様相を呈している。図中の記号●は定変位条件を仮定したときのそれぞれの停止長さに対する G1~G4 点での静的解析解である。両者とも一部はほぼ静的解に漸近する傾向を有している。



(a)



(b)

Fig. 9 (a), (b) Energy changes due to crack extension

3.3 エネルギー変化と K_D

差分法による解析結果からクラック進展に伴う各種エネルギー変化の様子の一例を Fig. 9 (a), (b) に示す。両者は対象とする試験片の大きさが異なるにもかかわらず運動エネルギー K は停止に到るまではほぼ同じ値をとり、Fig. 2 に見られるようにこの両者は非常に類似したクラック速度を経過しており、このような場合は試験片形状によらず、もっぱらクラック速度に依存するといえよう。また本試験においていずれの場合にも DCB 試験で見られるような運動エネルギーの回復が起こらず停止している。運動エネルギーの回復は試験片形状、荷重条件に大きく依存しているようで通常の引張型試験片では回復の生じるケースは少ないと思われる。計算するエネルギー W (外力仕事), U (歪エネルギー), K (運動エネルギー) から間接的に求まる散逸エネルギー D は約 300mm 以降においてロングサイズとショートサイズには若干の差を示しており試験片形状の差によると思われる影響が生じている。

次に動的破壊靱性値 K_D を求める方法として、クラックが Δa 進展した場合のクラック先端部の応力 σ_y と変位 v に着目して

$$K_D = \sqrt{\frac{E}{1-\nu^2} \int \sigma_y dv} \quad (3)$$

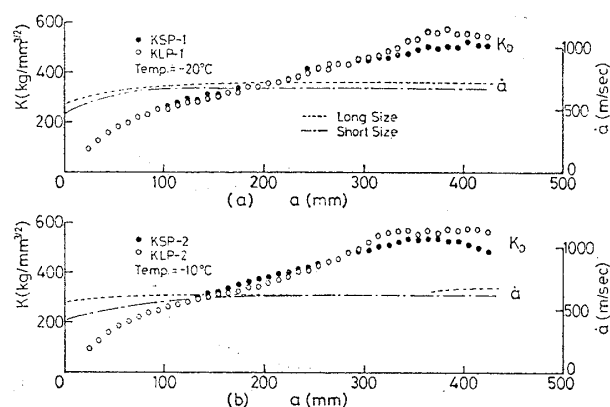


Fig. 10 (a), (b) Variation of dynamic fracture toughness K_D with crack extension

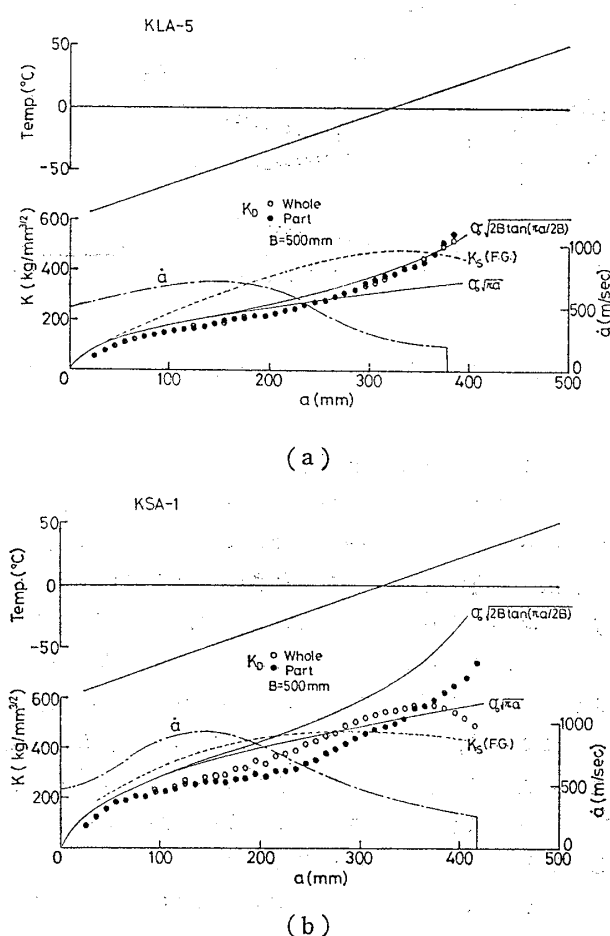


Fig. 11 (a), (b) Variation of dynamic fracture toughness K_D with crack extension

により算定した。クラック進展に伴う K_D の変化を温度平担型について Fig. 10 (a), (b) に示す。各々同一温度に対して示しており図中にはクラック速度を併記してある。クラック速度の変化は少なく後半部を除けば両者の差は存在しない。Fig. 11 (a), (b) には温度勾配型につきその代表例を示す。図中には設定温度分布、クラック速度、定変位条件を仮定した K_S 、無限板での定荷重条件を仮定した K_S および定荷重条件で有限幅補正に

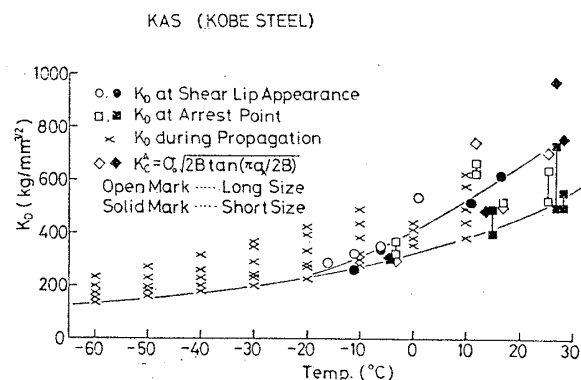


Fig. 12 Dynamic fracture toughness vs. temperature

よる K_S つまり $\sigma_0\sqrt{2B\tan(\pi a/2B)}$ を併記する。全体解析（記号○）と部分解析（記号●）との差は KLA-5 では当然少ないが KSA-1 では前述した理由により差が生じている。殊にクラック停止直前には大きな差となって現われており、いずれが正解に近いかわかるのは難しいが、温度の上昇に伴ない動的破壊靱性値 K_D は物理的直感に従えば増加するであろうから、部分解析の方がより正しい解を与えていると判断してもよさそうである。速度インプットデータにもよるが本実験の場合特にロングサイズでは停止に到る過程で $\sigma_0\sqrt{2B\tan(\pi a/2B)}$ に漸近する傾向を有している。実際の条件は片側クラック体であり定変位の静的解析解とは異なるにもかかわらず中央クラックによる荷重一定の条件の K 値に近づく傾向を有している。しかし、この傾向はショートサイズでは小さく試験片形状を極端に短くした場合には境界条件の著しい変化によりかなり異なってくるものと思われる。

以上、述べてきたロングサイズおよびショートサイズの結果にもとづき K_D がクラック速度、温度に依存するかどうか検討してみる。 K_D が次式で与えられるものとする。

$$K_D = f(\dot{a}, T) \quad (4)$$

まず K_D と温度の関係を表わしたのが Fig. 12 である。これはすべての試験片を通じ K_D と温度の関係をプロットしたものである。図中丸印はシャリップの出始めた点の K_D 、角印は停止時の K_D すなわち K_D^0 である。 K_D^0 に関しては全体解析と部分解析の結果を両方とも記してある。open mark, solid mark は各々ロングサイズ、ショートサイズ試験を意味する。従来の停止概念による静的 K_D^0 値を記号◇で記す。 K_D^0 には多少のばらつきが存在するもののほぼ1本の曲線上にあるようである。またシャリップが出始めた点の K_D も同様な結論が得られるが約 -15°C 以下において K_D^0 と合致し、低温ではシャリップが生じない様子が分る。 K_D^0 は 20°C 以下では K_D^0 に近い値をもつがそれ以上では若干大きくなり、静

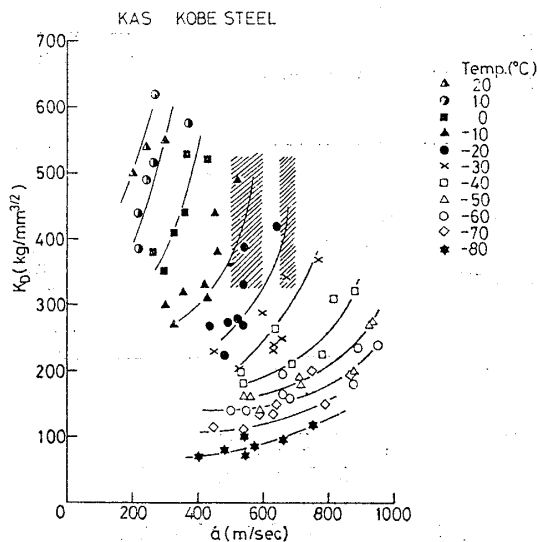


Fig. 13 Dynamic fracture toughness K_D as a function of crack velocity for various temperature

的概念による解釈では説明できないようである。

Fig. 13はすべての試験片を通じ -80°C から 20°C に到る範囲の温度に関して K_D とクラック速度の関係を示したものである。斜線部は温度平坦型の試験片による K_D の存在領域である。これによるとすべての温度について K_D とクラック速度に一義的な関係が存在することを支持している。従ってこの曲線群は試験片形状によらない材料固有の特性曲線であるといえよう。さらに低温部と高温部の曲線形状にはっきりとその差が生じている。すなわち低温部では K_D のクラック速度依存性が少ないのにひきかえ、高温部では K_D はクラック速度に強い依存性を示している。低温部では少ないエネルギーで高速クラックが得られ、逆に高温部ではシャリップ、塑性域を形成するに要するエネルギーが増加することを考えれば自ずとこの現象は明白である。それぞれの温度について上限速度が存在することも前報の結果と類似している。また高温部と低温部の動的破壊靱性値の形状はHahnら²⁾の得た結論とも一致している。

4 高速クラック伝播停止予測

本実験で供試したKAS鋼について動的破壊靱性値曲線の存在が確認されたことにもとづき、本章では実験で得られた脆性破壊伝播、停止現象を次に示す2種類の方法で予測してみる。

4.1 数値シミュレーション法

この方法は対象とする試験片に対し運動方程式を用いて数値的にクラックの伝播、停止をシミュレートするものである。境界条件と動的破壊靱性値曲線さえ与えられれば原理的にはいかなる形状、荷重様式を有する構造物に対してもクラック伝播停止予測は可能であると思われる

るが、通常このようなシミュレーションには煩雑な計算が伴う場合が多い。この手順を以下に示す。

- (1) Fig. 14に模式的に示した動的破壊靱性値曲線上においてクラック長さ a で K_D に対応するクラック速度 $\dot{a}_1$ で次の節点 $a+\Delta a$ までクラックを進展させる。
- (2) クラック長さ $a+\Delta a$ で得られた K_D に対して $\dot{a}_2$ でさらに $a+2\Delta a$ までクラックを進展させる。
- (3) (1), (2)を繰り返し次式を満たしたときクラックを停止させる。

$$K_D \leq K_D^A \quad (5)$$

あるいは

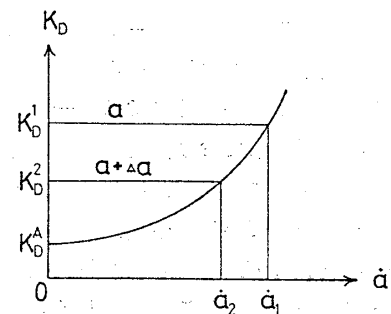


Fig. 14 Dynamic fracture toughness curve

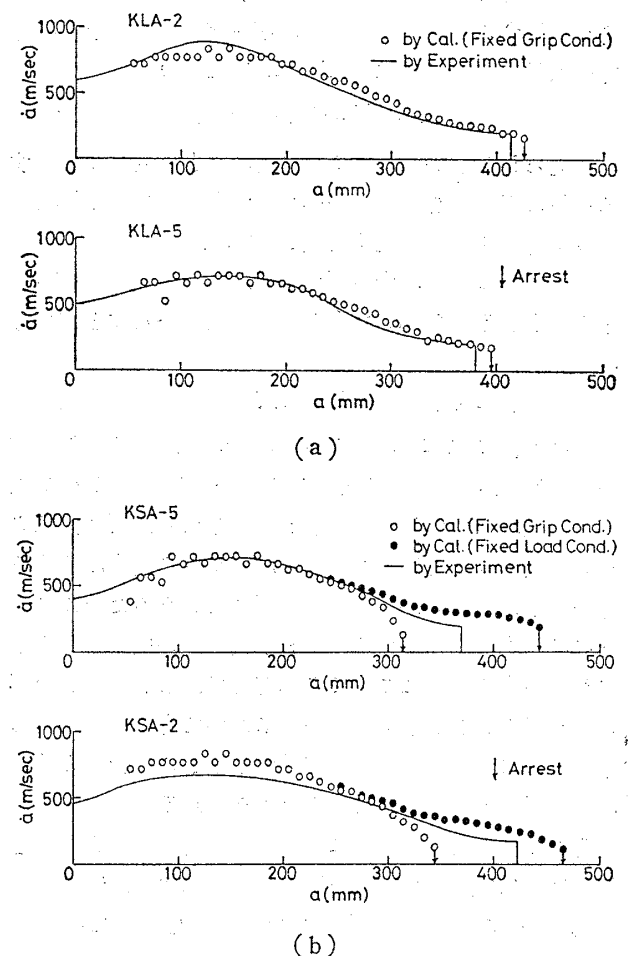


Fig. 15 (a), (b) Comparison between measured and calculated crack velocity

$$\dot{a} \leq 0.02 c_1 \approx 110 \text{ m/s} \quad (6)$$

式(5)の条件は力学的に系からクラック先端に伝播するに足るエネルギーを供給できなくなった状態であり、式(6)の条件は脆性破壊伝播における下限速度を設定したものである。

ロングサイズおよびショートサイズ試験に関してシミュレートした結果をそれぞれ2例ずつ Fig. 15 (a), (b) に示す。境界条件をロングサイズでは定変位、ショートサイズでは定荷重および定変位として実測速度と比較した。前者は応力波の影響が少ないが後者はその影響が大きいと考えられるので両条件によるシミュレーションを行なった。ロングサイズでは伝播速度、停止長さとも非常に良く一致している反面、ショートサイズでは予想されたとおり停止長さに差が生じている。計算される伝播速度は応力波の影響が現われるまではほぼ一致しているがその後両条件に差が生じており、実測速度、停止位置が白丸印と黒丸印の中間に存在し、境界条件が両極端の中間にあることを意味している。結局、荷重境界がクラック伝播線上から近いほど、クラックが長くなるほど荷重条件の正確な把握が必要になると思われる。

4.2 簡便法

無限遠方で引張応力 σ_0 の作用する無限板中をクラックが進展する場合、動的エネルギー解放率 G_d と静的応力拡大係数 K_s の間には Freund²⁾ により

$$G_d(a, \dot{a}) = \frac{1-\nu^2}{E} k^2(a) A(\dot{a}) K_s^2 \quad (7)$$

と与えられる。いま、クラック速度 $\dot{a}$ と温度 T に依存する材料の抵抗値を $R(=(1-\nu^2)K_B^2/E)$ とすれば R はクラック進展中は G_d と等しく、従って

$$k^2(a) A(\dot{a}) K_s^2 = K_B^2(\dot{a}, T) \quad (8)$$

と表わされる。さらに $k^2 A$ を簡便な式で表わすと式(8)は

$$\sqrt{1-\dot{a}/C_R} K_s = K_D(\dot{a}, T) \quad (9)$$

と書ける。ここに C_R は Rayleigh 波速度である。式(9)の左辺はクラック進展力、右辺は材料の抵抗値(動的破壊靱性値)に対応する。すなわち式(9)はクラック長さ a と温度 T が定まればクラック速度に関する方程式となる。しかし式(9)が適用しうするためには厳密には応力波が発散する、つまり充分広い板中をクラックが進展する場合についてのみ有効である。しかしながら、有限の大きさをもつ試験片においても応力波が戻らないうちに伝播停止現象が完了するときには上述の手法の適用がある程度可能であると考えられる。

そこで、本実験の結果にこの手法を適用してみると Fig. 16 のようになる。破線は無限板における K_s 値 ($\sigma_0 \sqrt{\pi a}$) に対して動的破壊靱性値曲線を用いて推定したクラック速度である。KLA-4 ではクラック速度の変化、停止長さともほぼ一致している。他方 KLA-2 では

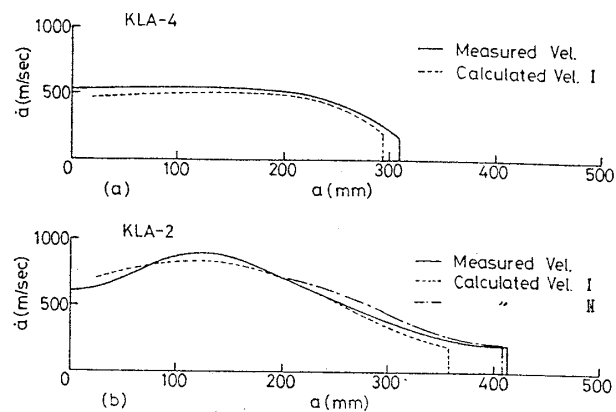


Fig. 16 (a), (b) Comparison between measured and calculated crack velocity

停止長さに少しく差が生じている。この試験条件のクラックは試験片幅に比して相対的に長い距離を走行する。3章の動的解析からも明らかのように動的破壊靱性値 K_D がクラック長さが約 300 mm 以上において無限板における応力拡大係数 $\sigma_0 \sqrt{\pi a}$ を上まわる。この様相は反射応力波のクラック先端への戻りもさることながら、比較的 low 速度で長い距離にわたってクラックが走行するため試験片幅の影響が現われやすいと考えられる。従って停止長さの短い KLA-4 では良好な結果を得ているにもかかわらず KLA-2 では少し危険側の推定になっている。そこで3章の結果を参照し K_D が有限幅修正を施した静的 K_s 値

$$K_s = \sqrt{2B \tan(\pi a/2B)} \quad (10)$$

に漸近するという事実から、式(9)の左辺の K_s を式(10)で便宜的近似的に置換してクラック速度を同様に推定した結果を図中の1点鎖線で示す。この方法を適用するとほぼ満足できる結果であるといえよう。しかしながら、この手法の適用には問題があり最善の方法であるとはいえない。すなわち片側クラックの静的 K 値は式(10)の K 値よりはるかに大きいにもかかわらず本実験において K_D が式(10)の K_s に漸近したことにより良好な対応を示しているに過ぎない。より遅い速度で伝播するクラックに対しては境界条件の差により K_D は K_s より大きくなることも、また逆に小さくなることもある。

今後、実構造物にこの種の簡便なアプローチを適用し脆性破壊の伝播停止予測を行なう場合、式(9)の右辺すなわち材料の動的破壊特性を明確にすることはもちろん、左辺の値すなわち解放エネルギーを正しく評価することが必要であろう。このためにはクラックを含む系の大きさ、境界条件の正しい把握が重要なことであると思われる。

5 結 論

本研究で得られた結論を要約すると次のようになる。

(1) 応力波の影響を調べるために試験片長さの異なる二重引張試験を行なった結果、停止長さには顕著な差が現われなかったがシャリッブ出現点には系統的な差がみられた。

(2) ロングサイズ試験では停止直前に従来の静的概念による停止靱性値に漸近する。結局、応力波が戻らないうちにクラックが停止する場合は意味合いは異なるが、従来の停止靱性値の妥当性が確かめられた。

(3) 動的破壊靱性値がクラック速度と温度に一義的に依存する材料固有の関数であることが判明した。

(4) 動的破壊靱性値曲線にもとづき脆性破壊伝播停止現象へのアプローチを行なった。まず数値計算によって実験事実を巧くシミュレートすることができた。次に充分広い板中あるいは充分長い帯板中を伝播するクラックに対して系から供給されるエネルギー率を材料の抵抗値と等置するという簡便な方法を用いて伝播停止の予測を可能にした。

謝 辞

本研究の一部は文部省科学研究費および日本造船研究協会第169研究部会の一環として実施されたものであることを記して関係者各位に感謝の意を表する。さらに造研169研究部会委員各位および日本造船学会溶接研究委員会第一分科会委員各位から有益なご討論を賜わった。

本論文の数値計算には東京大学大型計算センター HI-TAC 8800/8700 システムによった。

参 考 文 献

- 1) 金沢 武, 町田 進, 新村 豊, 寺本徳郎, 吉成 仁志: 高速クラックの動的様相に関する研究 (第3報) ——造船用鋼材の動的破壊特性——, 日本造船学会論文集, 第144号 (1978).
- 2) Hahn, G. T. et al.: Temperature Dependence of Rapid Crack Propagation and Arrest in A 517F Steel, Proc. Int. Conf. on the Prospects of Fracture Mechanics, Netherland, (1974).
- 3) Freund, L. B.: Crack Propagation in an Elastic Solid Subjected to General Loading—I Constant Rate to Extension, J. Mech. Phys. Solids, Vol. 20 (1972).