高速クラックの動的様相に関する研究 (第 5 報)

——混成型クラックアレスターの動的解析——

正員 金 沢 武* 正員 町 田 進**
 正員 寺 本 徳 郎*** 正員 吉 成 仁 志****
 正員 宮 原 鉄 弥****

Study on Fast Fracture and Crack Arrest (The 5th Report)

by Takeshi Kanazawa, *Member* Susumu Machida, *Member*
 Tokuro Teramoto, *Member* Hitoshi Yoshinari, *Member*
 Tetsuya Miyahara, *Member*

Summary

Brittle fracture often leads to total failure of structures. Partial use of tougher material as crack arresters in a structure will be effective to avoid extensive failures. But the theoretical analysis of arresting mechanism and evaluation of crack arrestability of material are insufficient at present particularly for lack of consideration of dynamic effect.

In this paper the brittle crack propagation and arrest in the duplex type crack arrester tests are experimentally and analytically discussed on the basis of dynamic fracture mechanics consideration using the techniques as was used in the author's previous papers. It is concluded that for a crack to be arrested in the arrester material the minimum dynamic fracture toughness of the arrester material at the temperature should be larger than the dynamic stress intensity factor of the propagating crack.

1 緒 言

近年, LNG・LPG タンカー, パイプライン, 圧力容器など低温の環境下で酷使される構造物が増えつつある。このような条件下では通常の使用状態においても脆性破壊の危険性を有しており, 脆性破壊による構造物の損傷は一般に重大な事故につながる場合が多い。大型構造物の万一の事故の大きさに鑑みその安全性要求の声に呼応して, fail safe design の一つとしてのクラックアレスターの適用性が改めて注目されてきたことを契機に, 脆性クラックの挙動を動力学的立場から解明しようとする試みが精力的になされつつある。既報^{1)~5)}においては, 高速クラックの動的取扱い手法を示すとともに, 一般造船用軟鋼を供試した二重引張試験, DCB 試験の解析結果より, 材料の伝播停止特性が動的破壊靱性値により一義的に表わせることを結論した。

本研究では以上の結果をふまえ, さらに実在の混成型

クラックアレスターのアレスト性能を動力学的に再評価する事を目的に混成型二重引張試験を実施した。

2 実 験

2.1 供 試 材

供試材は, 板厚 20mm の KAS 鋼および KEN 鋼であり, それらの化学的組織および機械的性質を Table 1 に示す。

2.2 基礎二重引張試験 (単一材の二重引張試験)

2.2.1 実験方法

試験片は, KAS 鋼 (A シリーズ), KEN 鋼 (E シリーズ) 双方共, $500 B \times 500 L \times 20 t$ (mm) の伝播部と $200 B \times 440 L \times 20 t$ (mm) の発生部から成る標準型二重引張試験

Table 1 Mechanical properties and chemical compositions

Class	Chemical composition (%)					Mechanical properties		
	C	Si	Mn	P	S	yield strength σ _y (kg/mm ²)	tensile strength σ _t (kg/mm ²)	elongation (%)
KAS	0.16	0.23	0.73	0.022	0.004	30	47	29
KEN	0.11	0.23	1.11	0.02	0.003	32	46	33

* 長崎総合科学大学

** 東京大学工学部

*** 筑波大学構造工学系

**** 東京大学大学院

Fig. 1 Specimen configuration and gage positions A and E series

Fig. 2 Temperature gradients

Fig. 3 Variation of strain due to crack extension (A series)

験片である。試験片形状および歪測定位置を Fig. 1 に示す。クラック伝播速度は、伝播部に 30 mm 等間隔に貼付した CD ゲージの切断による電圧変化から計測した。また、Fig. 1 に示す位置に歪ゲージを荷重方向に貼付し、

Table 2 Experimental results of A and E series tests

Test Piece	Temp. Distribution	Initial Stress σ_0 (kg/mm ²)	Arrest Length a_A (mm)	Arrest Temp. T_A (°C)	K_C^A * (kg/mm ^{3/2})	K_D^A (kg/mm ^{3/2})
A - 1	I	12	446	29	917	700
A - 2	I	10	366	15	473	530
A - 3	I	8	367	12	380	304
A - 4	II	8	292	6	289	318
E - 1	I	12	319	1	475	470
E - 2	I	16	371	16	772	862
E - 3	I	14	360	13	645	640
E - 4	I	10	298	-6	369	348

* $\sigma_0 \sqrt{2B \tan(\pi a_A / 2B)}$

B = 500 mm

Fig. 4 Variation of crack velocity (A and E series)

クラック進展に伴う歪変化を計測した。なお、双方共温度勾配型であり、その温度勾配は Fig. 2 に示す 2 種類を用いた。ただし、実験においては必ずしも所期の温度勾配は得られておらず、後に示すようなアレスト時の温度などは、伝播線上 6 点において測定した温度を内挿して求めた。

2.2.2 基礎二重引張試験結果

A シリーズ, E シリーズ共、初期応力および温度勾配を変え各々 4 枚ずつ行った。実験で計測したクラック伝播中の歪変化およびクラック伝播速度の例を Fig. 3, Fig. 4 に示す。各試験結果を Table 2 に示してある。ここで、 K_C^A は従来の静的取扱いによる停止靱性値すなわち

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

である。ここに、 σ_0 は初期応力、 a_A は停止クラック長さである。 K_C^A と停止温度の関係を Fig. 5 に示す。Fig. 5 で明らかなように E 級鋼の方が A 級鋼より、靱性レベルが 200 kg/mm^{3/2} ほど高い。

2.3 混成型二重引張試験

2.3.1 実験方法

混成型二重引張試験 (AE シリーズ) の

Fig. 5 K_c^A vs temperature

Fig. 6 Specimen configuration (AE series)

Fig. 7 Variation of strain due to crack extension (AE series)

試験片は、KAS鋼とKEN鋼を伝播部入口から230mmの位置で、電子ビーム溶接したものである。その試験片形状をFig. 6に示す。電子ビーム溶接は、通常のアーク溶接と異なり溶接線に沿う高い残留応力の幅は狭く、かつ溶接線幅も狭い(約5mm)ので、それらの影響はかなり小さいものと思われる。しかし、実験前に残留応力を軽減するために降伏荷重に近い予荷重を加えた。Aシリーズ、Eシリーズ同様、歪変化、クラック速度を測定した。計測した歪の時間的変化をFig. 7、クラック速度

(a)

(b)

(c)

Fig. 8(a)(b)(c) Variation of crack velocity (AE series)

の例をFig. 8(a)(b)(c)に示す。実験温度は、一様温度で -10°C と -30°C の2温度で行った。

2.3.2 混成型二重引張試験結果

AEシリーズの試験結果をTable 3に示す。 d_b はアレスター突入直前のクラック速度、 d_a はアレスター突入直後のクラック速度である。溶接線を境にして、クラック速度は不連続に200m/sec程度減少している。Table 3からも明らかなように、アレスター突入直後に停止したもの、アレスター突入後40mmほど伝播し停止したもの、アレスターを貫通したものの3種類の現象

Table 3 Experimental results of AE series tests

Test Piece	Temperature (°C)	Initial Stress σ_0 (kg/mm ²)	Arrest Length a_A (mm)	$a_A - 230$ (mm)	$\dot{a}_b$ (m/s)	$\dot{a}_a$ (m/s)	Note
AE - 1	-10	10	240	10	470		
AE - 2	-10	12	266	36	602	235	
AE - 3	-10	14	—	—	—	—	too much preload
AE - 4	-10	16	60		799	503	
AE - 5	-30	10	60				failure in measure
AE - 6	-30	8	60		670	445	
AE - 7	-30	6	80				arrest just after initiation
AE - 8	-10	14	60		763	600	

が観察された。貫通したものの破面は明らかに脆性破面であるが、アレスター内で停止した AE-2 においては、アレスター部での破面は、荒れが大きく、いわゆる脆性破面とは異なるようである。また、かなり大きいシアリップも見られた。

3 解析および考察

3.1 差分法による動的解析

試験片を二次元弾性体と見なすと、これを支配する運動方程式は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= C_1^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + (C_1^2 - C_2^2) \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} + C_2^2 \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \\ \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} &= C_2^2 \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + (C_1^2 - C_2^2) \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + C_1^2 \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここに $u, v: x, y$ 方向の変位

C_1, C_2 : 縦波, 横波速度

(2) 式を解くには、差分法を用いる。本研究で用いたメッシュ分割を Fig. 9 に示す。空間メッシュ $h=10$ mm,

Fig. 9 Network used in calculation

時間メッシュ $\Delta t=1 \mu \text{sec}$ とし、解析は陽解法を用いた。

さて、エネルギー保存則より次式が成り立つ。

$$U + K + D = W \quad (3)$$

ここに W : 外力仕事

U : 歪エネルギー

K : 運動エネルギー

D : 散逸エネルギー

D は破壊に費されるエネルギーとみなせるので、材料の破壊エネルギーと考えられる。静的な場合の類推か

ら、動的破壊靱性値 K_D を次式で定義する。

$$K_D = \sqrt{\frac{E}{1-\nu^2} \frac{dD}{da}} \quad (4)$$

(3), (4) 式を用いれば K_D を算定できるが、実際には次式で与えられる Crack Closure Energy ΔE_C を用いて

$$\Delta E_C = h \times \int \sigma_y(t) \{dv(t)\} \quad (5)$$

ここに、 $\sigma_y(t)$: クラック近傍の y 方向の応力

$v(t)$: クラック近傍の y 方向の変位

次式により K_D を算定する²⁾³⁾。

Fig. 10(a)(b) Variation of K_D (A and E series)

Fig. 11(a)(b)(c) Variation of K_D (AE series)

$$K_D = \sqrt{\frac{E}{1-\nu^2} \frac{\Delta E_C}{h}} = \sqrt{\frac{E}{1-\nu^2} \int \sigma_y(t) \{dv(t)\}} \quad (6)$$

3.2 動的破壊靱性値 K_D

3.1 で述べた方法により、Aシリーズ、EシリーズおよびAEシリーズについて、 K_D を求めた。クラック長さ a に対して K_D とクラック速度 $\dot{a}$ をプロットしたものの例を、Aシリーズ、Eシリーズについては、Fig. 10(a)(b)に、またAEシリーズについては、Fig. 11(a)(b)(c)に示す。参考のために、静的応力拡大係数

$$\sigma_0 \sqrt{2B \tan \pi a / 2B}$$

Fig. 12(a) K_D of KAS as a function of crack velocity Fig. 12(b) K_D of KEN as a function of crack velocity

と温度分布も付記した。Aシリーズ、Eシリーズについては、いずれの場合も停止直前には K_D は K_S に漸近する傾向がある。AEシリーズについては、アスレター内で停止したものは、AE-1、AE-2であり、いずれも一様温度下 (-10°C) での結果である。AE-2は、アスレター突入後40mmほど進展したが、突入後 K_D が増加している。AE-2の破面にはかなり大きなシアリップがあり、この延性的破壊に大きなエネルギーを要していると考えられる。貫通したものについては、後に述べるようにE級鋼において、 K_D と $\dot{a}$ に固有の関連性が見い出される。

3.3 動的破壊靱性値曲線

基礎二重引張試験から得られた K_D と温度、クラック速度の関係を KAS 鋼、KEN 鋼について Fig. 12(a)(b)に示す。第3報でも述べた通り双方共、 K_D が温度、クラック速度と一義的な関係があると見られる。しかしながら、各温度の低速度域および高速度域での様相は、実験的困難さもあり、現在のところ推測の域を出ない。本研究では、この曲線の存在をより確固としたものにするためAEシリーズの結果を引用することにする。Fig. 13は、 -10°C で実施したAEシリーズの動的解析結果を、Aシリーズ、Eシリーズの結果と合わせて示したも

Fig. 13 K_D as a function of crack velocity at the temperature of -10°C

のであるが、材料ごとに同一の曲線が存在するようであり、材料特性としての動的破壊靱性値曲線がさらに明確に示された。ところで Fig. 13 において KEN 鋼の曲線は $\dot{a} \approx 200 \text{ m/sec}$ 付近で K_D が最小値をとる結果になっている。この速度以下の領域のデータは全て AE シリーズにおいてアレスター内で停止したものの結果である。単一材の二重引張試験においては、低速域の結果を得ることは困難であり、このような速度の低下に伴って常に靱性値が上昇するかどうかの点については今後さらに検討が必要であると思われる。AE シリーズにおいて、アレスター内で停止したものの破面は、先に述べたようにいわゆる脆性破面とは異なる様相を示しており、この点は定性的に Fig. 13 の結果と矛盾しない。つまり曲線が最小値をとる近傍で破壊モードに遷移が起り、さらに低速域では変形の大きい（吸収エネルギーが大きい）様相を示すようである。しかし、いかなる条件でこのような遷移が起こるのかといった点については明確な説明は現在のところ困難である。

さて、Fig. 13 の結果に基づき動的破壊靱性値曲線による脆性クラックの停止条件について考察する。Fig. 14 はアレスター材に突入したクラックがアレスター材を貫通するか、あるいは停止するか模式的に説明した図である。スターター材からアレスター材に突入する時のエネルギーレベルで 3 種の状態に分けることができる。ひとつは、図の G_0 で示すようにアレスター材の K_D 曲線の最小値（以後 K_m とする）よりも高いエネルギーレベルで突入する場合であり、この時クラックは突入後アレスター材の K_D 曲線の高速度域（Fig. 14 の実線）をたどってさらに加速され、ついには貫通する（本実験の AE-4, AE-8）。次に突入時のエネルギーレベルが K_m 値に近い場合（Fig. 14 の A1）、クラックは図の点線を

Fig. 14 Schematic diagram for explanation of crack arrest

たどって停止に至る（AE-2）。この時は速度の低下に伴い靱性値は上昇するので、（シアリップの出現と密接に関係があると思われる）クラックは急激に減速するであろう。最後に突入時のエネルギーレベルが K_m より小さい場合であり（Fig. 14 の A2）、これは系からクラック先端へ供給されるエネルギーが破壊エネルギーを下まわる状態であり、アレスター材を伝播することは不可能で直ちに停止に至る（AE-1）。このような考え方はあくまで仮説であるが Fig. 13 でもわかるように実験結果を矛盾なく説明することはできる。この仮説によれば、停止条件として最も重要なパラメータは K_m のレベルであり、突入時のエネルギーレベルを K_m 以下におさえることがクラックを停止させる必要条件となろう。ただし、このような考え方はまだ不明な点も多くさらに検討が必要であると思われる。

3.4 脆性亀裂伝播停止予測

本実験で行った二重引張試験へ動的破壊靱性値曲線を応用し、簡便な近似化を用い脆性破壊伝播停止挙動をシミュレートした。

無限遠で引張応力の作用する無限板中をクラックが進展する場合、静的応力拡大係数 K_S と動的破壊靱性値 K_D の間には次式で示される関係が近似的に成立する³⁾⁶⁾。

$$\sqrt{1 - \frac{\dot{a}}{C_R}} K_S = K_D(\dot{a}, T) \quad (7)$$

ここに、 C_R は Rayleigh 波の速度である。従って二重引張試験では T が $\dot{a}$ の関数として与えられているので (7) 式の左辺の値および動的破壊靱性値曲線から、クラック速度をクラック長さの関係として求めることができる。本実験の結果に適用したものが、Fig. 15 (a)(b)(c)(d) である。実測値と計算値を比較してみると良い一致を示しているといえるであろう。これは、試験片が十分長く、停止するまで端部からの反射応力波の影響があまり大きくないためと考えられる。

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

4 結 論

本研究では、動的効果を考慮した混成型クラックアレスターの性能を評価することを目的として考察を行った。以下に具体的に判明した事実を列挙する。

① KAS 鋼, KEN 鋼とも, それぞれ停止靱性と温度および動的破壊靱性値とクラック速度, 温度には固有の関係がある。

② 本実験においては, アレスターに突入するとクラック速度は, 不連続的に減少している。

③ アレスターの性能を示すひとつの指標として, アレスター材の動的破壊靱性値曲線の最小値 K_m を考えることができる。突入時のエネルギーが K_m 以下であるとクラックは停止に至る可能性が高いが, この場合停止のモードは直ちに停止に至るものと, 脆性モードとは別の破面の大きいエネルギー吸収によって減速して停止に至るものの2種類あることが判明した。

④ 簡便法によるシミュレーションの結果は, 実測値とよく一致していた。

謝 辞

本研究は, 日本造船研究協会 169 研究部会の研究の一部として実施されたものであり, 同研究部会の方々より

種々有益な討論を賜った。本論文の数値解析には, 東京大学大型計算機センター HITAC 8800/8700 システムを使用した。

参 考 文 献

- 1) 金沢 武, 町田 進, 寺本徳郎: 高速クラックの動的様相に関する研究(第1報)—差分法による動的解析—, 日本造船学会論文集, 第141号(1977).
- 2) 金沢 武, 町田 進, 新村 豊, 寺本徳郎: 高速クラックの動的様相に関する研究(第2報)—PM-MAの動的破壊特性—, 日本造船学会論文集, 第142号(1977).
- 3) 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).
- 4) 寺本徳郎, 町田 進, 金沢 武: 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—, 日本造船学会論文集, 第146号(1979).
- 5) 金沢 武, 町田 進, 吉成仁志: DCB 試験による鋼材の脆性破壊伝播停止特性の評価, 日本造船学会論文集, 第146号(1979).
- 6) 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).