

論 文

UDC 669.14.019.132 : 539.375 : 539.56 : 620.746.22 : 620.746.4

改良ノッチ計装化シャルピーによる脆性破壊停止特性の評価*

松田 昭一**・関口 昭一***

Estimation of K_{ca} Value of Brittle Crack Arrest from Instrumented Charpy Test by a Modified Notch Specimen

Shoichi MATSUDA and Shoichi SEKIGUCHI

Synopsis:

To utilize the advantage of Charpy impact test, a study was made of the empirical correlation between crack arrest test, such as DWTT and temperature gradient ESSO test, and instrumented Charpy test by a modified notch specimen. Main results were as follows.

1) Fracture initiation resistance was reduced in the order of the V-notch, the fatigue-notch, the fatigue-notch after embrittlement by an electron beam welding and the V-notch after embrittlement by the welding (EBV-notch).

2) The lowest temperature where 100% shear fracture occurred in the EBV-notch Charpy test ($EBVTrs=100$) coincided with DWTT 85% SATT.

3) K_{ca} value deduced from instrumented Charpy test by EBV-notch specimen almost coincided with K_{ca} value obtained from temperature gradient ESSO test.

1. 緒 言

小型試験による脆性破壊停止特性の判定基準として、従来、 $vTrs$ 、 $vTr15$ などが採用されている。 $vTrs$ による評価は、日本溶接協会低温用鋼板判定基準に基づくものであり¹⁾、軟鋼、低温用鋼、高張力鋼、9% Ni 鋼などの材質判定に適用されている。 $vTr15$ ²⁾による評価は、特に高張力鋼においては、 $vTrs$ による判定が、大型試験との相関が悪いことを理由に、最近、当社において確立された判定法である。

$vTrs$ 、 $vTr15$ が、脆性破壊停止を代表する特性値として採用されているのは、これらの遷移温度において、シャルピー試験片の破壊過程で吸収されるエネルギーが、脆性破壊の伝播停止に関連があるという理由に基づいている。しかしながら、本論文において詳述されるように、いずれの基準を採用しても、大型試験との相関はあまりよくない。この原因は、 $vTrs$ 、 $vTr15$ におけるシャルピー吸収エネルギーの大部分は、脆性破壊の発生と関連しているためであり、したがって、伝播停止の特性値として使用するには、あまりにも問題が多いと思われる。

以上のような観点から、本論文においては、小型試験

による脆性破壊停止特性の新しい評価法の確立を意図し改良ノッチ計装化シャルピー試験により、大型試験に対応する特性値の抽出について検討した結果を報告する。

2. 実験方法と解析方法

2.1 計装化シャルピー試験

計装化シャルピー試験には、Effect Technology 社製“Dynatup Model 371A システム”を使用した。主要シ

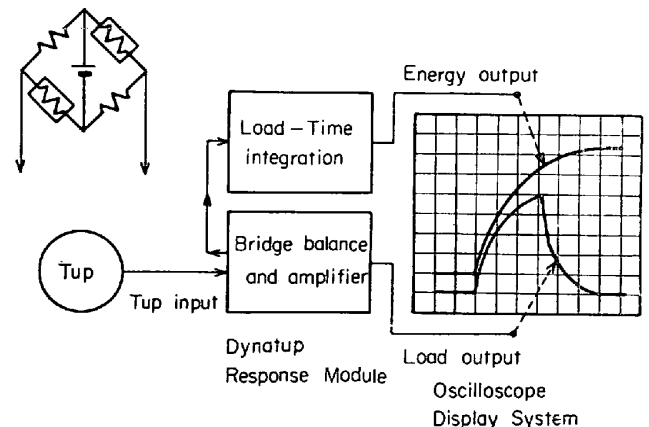


Fig. 1. Block diagram of Dynatup Model 317 System.

* 昭和 51 年 2 月 19 日受付 (Received Feb. 19, 1976)

** 新日本製鉄(株)基礎研究所 工博 (Fundamental Research Laboratories, Nippon Steel Corp., 1618 Ida Nakahara-ku Kawasaki 211)

*** 新日本製鉄(株)基礎研究所 (Fundamental Research Laboratories, Nippon Steel Corp.)

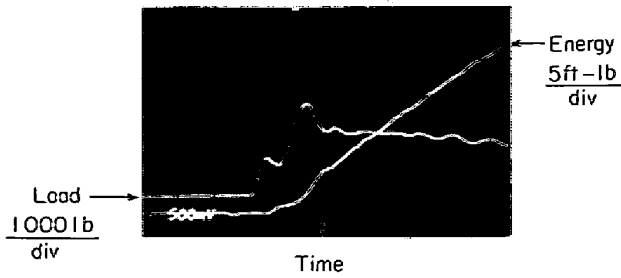


Photo. 1. An example of load-time and energy-time curve for instrumented Charpy test.

システムは、Instrumental Tup, Dynatup Response Module, Oscilloscope Display の 3 システムであり、Fig. 1 にその概略を示す。すなわち、Tup に埋設された半導帯歪ゲージの出力変化が、Response Module で増幅された後、オシロスコープ上に記録され、シャルピー試験の荷重・時間、エネルギー・時間曲線が同時に

得られる。Photo. 1 に典型例を示す。

2.2 改良ノッチ

シャルピー試験において、脆性破壊の発生を容易にし伝播・停止に関連ある特性値をできるだけ抽出しやすくする目的で、標準 2 mm V ノッチ以外に、疲労ノッチ、電子ビーム加熱疲労ノッチ、電子ビーム加熱・V ノッチ (以下、F ノッチ、EBF ノッチ、EBV ノッチとそれぞれ略記する) を使用した³⁾。詳細を Table 1 に示す。

供試材は、大型試験結果の既知材料(温度勾配型 ESSO 試験、あるいは、DWTT) であり、化学組成を、Table 2 に示す。

2.3 シャルピー試験延性破面率と DWTT 延性破面率との相関

DWTT (Drop Weight Tear Test) は、米国バッチル研究所で開発された試験法で、その破面遷移挙動が、実物ラインパイプの脆性破壊伝播挙動とよく一致するこ

Table 1. Shapes of modified notches.

Types of notches	Symbol	Views of modified notches
Ordinary V notch	V	2.0 mm V
Fatigue notch	F	0.5 mm V + 1.5 mm F
Fatigue notch after embrittlement by EBW	EBF	0.5 mm V + 1.5 mm F Hatched area : EBW
V notch after embrittlement by EBW	EBV	2.0 mm V Hatched area : EBW

Table 2. Chemical compositions of specimens.

Steel	Plate thickness (mm)	Chemical compositions (wt%)									
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Nb	V	Mo	Al
AD	20	0.09	0.27	1.41	0.014	0.003	0.29	0.04	0.10		
AE	20	0.12	0.25	1.25	0.013	0.006					
AC	20	0.10	0.27	1.35	0.009	0.003	0.44	0.03		0.10	
AH	14	0.10	0.28	1.36	0.008	0.003	0.44	0.03			
AG	18	0.078	0.16	0.85	0.004	0.006	2.51	0.02			
AA	25	0.05	0.26	1.43	0.016	0.018					
K	25	0.14	0.32	1.24	0.017	0.008			0.04		
A	25	0.15	0.33	1.35	0.015	0.006				0.053	
C	25	0.15	0.29	1.56	0.027	0.005			0.045	0.022	
F 288	20	0.13	0.30	1.29	<0.001	0.003			0.041	0.024	
F 309	20	0.14	0.31	1.30	<0.001	0.003			0.040	0.020	
F 299	20	0.13	0.31	1.33	<0.001	0.003			0.14	0.022	

とから、ラインパイプ用鋼材の伝播・停止特性簡易判定法として広く用いられている³⁾。判定にあたっては、85%延性遷移温度（以下、DWTT 85% SATT と略記する）における K_C 値（平面歪での臨界値に近いが厳密な意味において、混合応力状態での臨界値）が、ほぼ一定値を示すことから、85% 延性破面を示す温度を求めることによつて行なわれている。

しかしながら、試験片サイズがかなり大きく（例えば 330 mm×75 mm×原厚）、シャルピー試験で同様な特性値の抽出が可能であれば、簡易判定法の観点から、はるかに有利である。問題は、標準 2mmV ノッチシャルピーにおいては、切欠底部の 3 軸度が低く、脆性破壊の発生がむずかしいため、DWTT の破面遷移曲線に比較して V ノッチシャルピーのそれは、かなり低温側に移動することである。そこで、2.2 節で記述した改良ノッチを使用して、脆性破壊の発生を容易にし、DWTT の破面遷移曲線にどの程度近づけることが可能であるかを検討した。

2.4 脆性破壊伝播・停止の K_C

K_C 値の推定には、EBV ノッチ計装化シャルピーの荷重・時間曲線を使用した。従来採用されている V ノッチ、P ノッチシャルピーと異なり、EBV ノッチシャルピーでは切欠底部から直ちに結晶状外観の脆性破壊が生じ、ある長さに達すると停止する。荷重・時間曲線の形状は Fig. 2 のようになり、脆性亀裂の長さによつて PiPa の部分が変化し、全面脆性破壊を呈する温度では、PiPaC

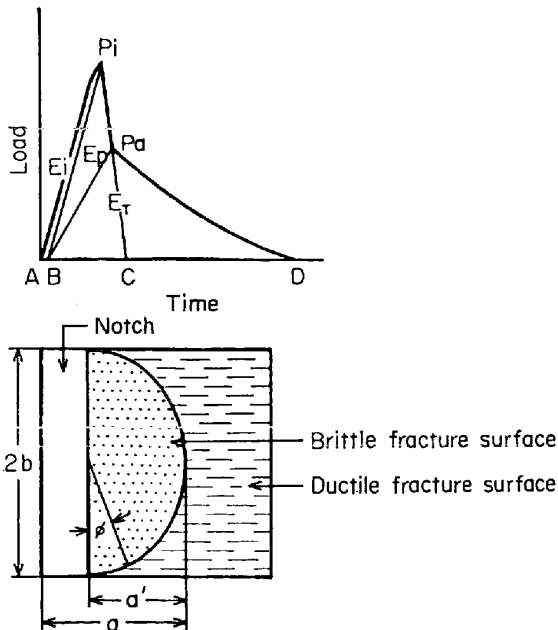


Fig. 2. Schematic diagram of load-time and fracture appearance for EBV-notch Charpy specimen.

の経路をたどる。

Fig. 2 の型の荷重時間曲線を 示す場合には、脆性破壊伝播・停止の K_C は、停止荷重 P_a を用いて求められるとする報告がいくつかあり、例えば、小林ら⁴⁻⁵⁾は、V 切欠計装シャルピーの停止荷重から、 K_C 値を計算している。停止荷重 P_a を用いると、 K_C は、

$$K_C = \frac{3P_a L f(a/w)}{2BW^2} \cdot a^{1/2} \dots \dots \dots (1)$$

で表わされる⁶⁾。ここで、 a : 亀裂長さ、 $f(a/W)$: 形状補正係数、 B : 板幅、 L : 支点間距離である。

(1) 式は、亀裂の先端が平面であると仮定した場合であるが、実際のシャルピー脆性破面の先端は有限の曲率を持つた楕円形状に近い場合が多い (Fig. 2 参照)。有限曲率の亀裂先端における K_C 値は、(1) 式よりも小さくなる⁷⁾、理論的に明らかにされているので⁷⁾、楕円亀裂を示す試料については、以下の補正を行なつた補正 K_C を、correct K_C と記述すると、

$$\text{correct } K_C = K_C \cdot \frac{(K_I^\dagger)_{\phi=0}}{K_I^\dagger} \dots \dots \dots (2)$$

で表わすことが可能と考えられる⁸⁾。ここで、

$$K_I^\dagger = \frac{\sigma \pi^{1/2}}{E \left(\frac{\pi}{2}, k \right)} \cdot \left(\frac{b}{a'} \right)^{1/2} \cdot (a'^2 \sin^2 \phi + b^2 \cos^2 \phi)^{1/4} \dots \dots \dots (3)$$

であり、楕円長軸先端 (Fig. 2 · $\phi=0$) においては、

$$(K_I^\dagger)_{\phi=0} = \frac{\sigma \pi^{1/2}}{E \left(\frac{\pi}{2}, k \right)} \cdot \left(\frac{b}{a'^{1/2}} \right) \dots \dots \dots (4)$$

で与えられる。また、 K_I^\dagger は、亀裂長さ a' 、亀裂先端が平面である場合の K 値で、

$$K_I^\dagger = \sigma \sqrt{\pi a'} \dots \dots \dots (5)$$

で表わされる。ただし、 $E \left(\frac{\pi}{2}, k \right)$: 第 2 種完全楕円積分である。

3. 実験結果

3.1 シャルピー延性・脆性遷移温度と DWTT85% SATT との関係

供試材は、Table 2 に示したとおりであり DWTT、大型試験の双方、あるいは、いずれか一方の既知材料である。破面遷移挙動を比較するために、標準 2mmV ノッチシャルピー以外に、F ノッチ、EBF ノッチ、EBV ノッチシャルピーを実施した。

Fig. 3, 4 に、ノッチ形状による破面遷移温度の変化を示す。V→F→EBF→EBV ノッチの順に、破面遷移温度は高温側にずれる。ずれの大きさは、鋼種によつて異なり、例えば、AH 材のように非常にずれの少ない場合

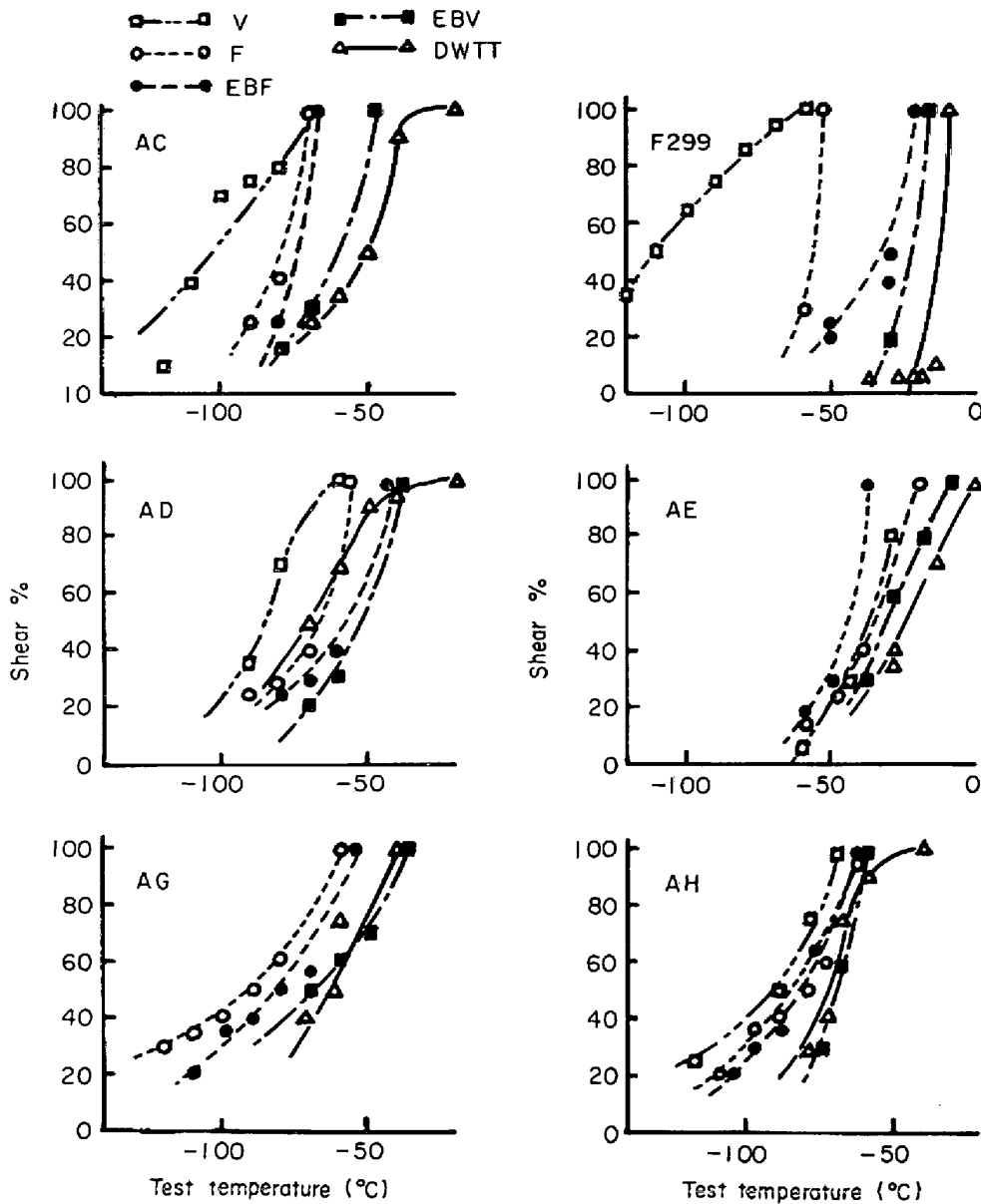


Fig. 3. Fracture appearance transition curve for modified EBV-notch Charpy test and DWTT.

もあれば、F 299 材にみられるように、かなりずれの大きい場合もある。

Fig. 3 には、シャルピーの破面遷移温度とあわせて、DWTT の破面遷移曲線も示されている(△印)。脆性破壊停止特性の判定基準として使用されている85%SATTに留意すると、シャルピーの延性・脆性遷移温度 $Trs=100$ (V, F, EBF, EBVノッチシャルピー100%は延性破面下限温度の総称)が、DWTT85% SATTにかかなり近いことが理解される。そこで、 $Trs=100$ をDWTT85%SATTに対してプロットすると、Fig. 5 の関係が得られ、いずれの鋼種においても、EBV改良ノッチシャルピーの延性・脆性遷移温度($EBVTrs=100$)が、DWTT

85%SATT とほぼ一致することが理解される。一方、DWTT85%SATTにおける大型試験の脆性破壊停止の K_C は、ほぼ一定の値を示し*、この関係は単なる相関ではなく、適当なモデルを使用することにより、数値の妥当性を証明することが、可能だとされている⁹⁾。

Fig. 4 は、DWTT 試験は実施されていないが、大型試験による K_C の既知材料について、シャルピーの破面遷移曲線と K_C が $400\sim 900 \text{ kg}\cdot\text{mm}^{-3/2}$ を示す温度範囲を表わしたものである。改良ノッチによる実験結果は完全ではないが、 $EBVTrs=100$ における K_C 値が、900

* ラインパイプ材について、板厚 20mm, 14mm の場合の K_C 値は、900, 600 $\text{kg}\cdot\text{mm}^{-3/2}$ に近いと報告されている⁷⁾。

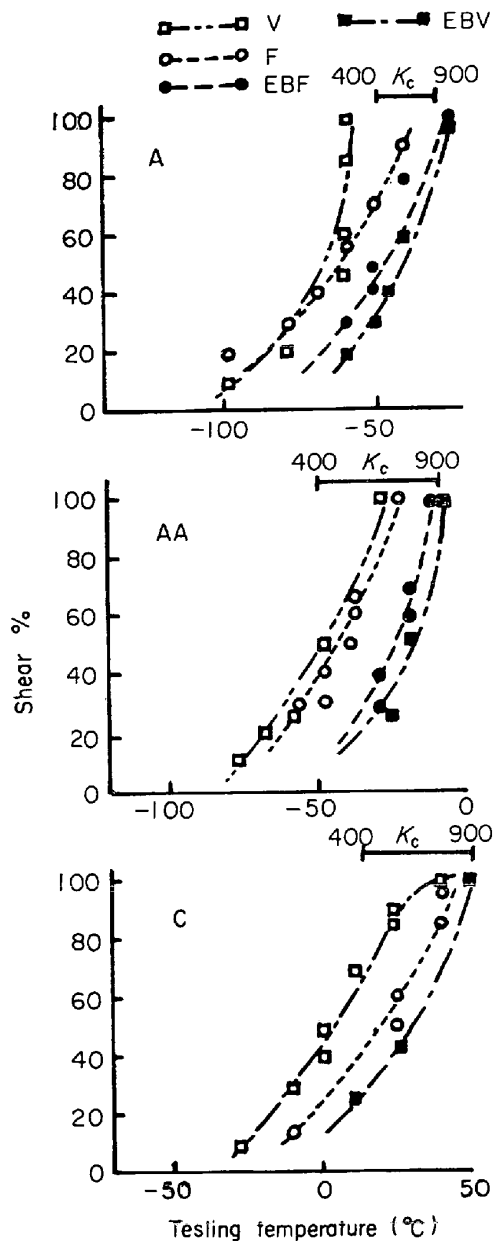


Fig. 4. Fracture appearance transition curve for modified EBV-notch Charpy test and K_C value obtained from temperature gradient type ESSO test.

$\text{kg} \cdot \text{mm}^{-3/2}$ に近い値を示すことがわかる。

以上の結果より、電子ビーム加熱Vノッチシャルピーの100%延性破面を示す下限温度 $\text{EBVTrs}=100$ で代表される特性値の使用が、従来用いられていた $v\text{Trs}$, $v\text{Tr}_{15}$ に代る新しい小型試験による脆性破壊停止特性の判定法として、非常に意味あるものと考えられる。

3.2 荷重・時間曲線の脆性破壊停止荷重から K_C 値の推定

前節で述べたように、 DWTT85\%SATT において K_C が一定値を示すことから、 $\text{EBVTrs}=100$ における K_C 値

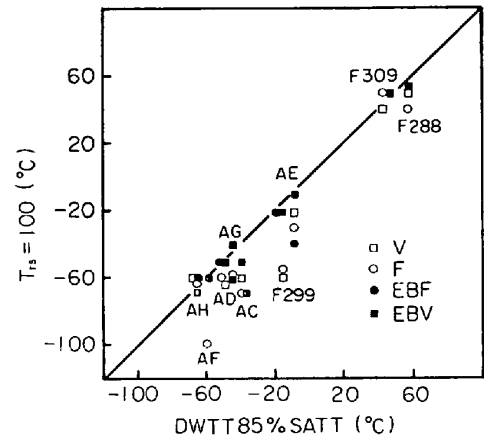


Fig. 5. Relationship between $\text{Trs}=100$ and DWTT85\%SATT .

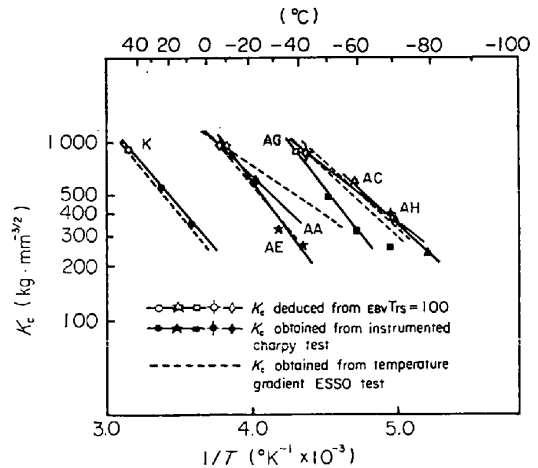


Fig. 6. Relationship between K_C value and $1/T$, solid line: K_C value obtained from instrumented Charpy test, dotted line: K_C value obtained from ESSO test.

の推定は可能である。しかしながら、 $\text{EBVTrs}=100$ 以下の遷移温度域における K_C 値の予想、すなわち、 K_C の温度依存性の推定には計装化シャルピーが有力な武器となる。

形式的には、Vノッチ、Fノッチ、EBFノッチ、EBVノッチシャルピーいずれの荷重・時間曲線を用いても、各々の停止荷重から、 K_C 値を求めることが可能であるが、実際の計算には、EBVノッチシャルピーの荷重・時間曲線を使用した。その理由は、EBVノッチの場合、最も脆性破壊の発生が容易であり、大型試験の K_C 値がわかっている比較的高い温度範囲において、Fig. 2型の荷重時間曲線が得られるからである。

Fig. 6は、鋼種 K, AE, AG, AH, AA について、(1)~(5)式を用いて K_C 値を計算し、 K_C を $1/T$ に対してプロットしたもので、その結果が実線で示されている(黒印)。ただし、 $\text{EBVTrs}=100$ における K_C は、推

定値である (中空印). また, 同図中の点線は, 比較のために, 大型試験より求められた K_C と $1/T$ との関係を示したものである. さらに, Fig. 7 は, 小型試験と大型試験との関係をより明瞭にするために, 小型試験の K_C を横軸に, 大型試験の K_C を縦軸にして整理したものである. Fig. 6, Fig. 7 より明らかなように, 大型試験の場合と同様に, 小型試験においても K_C と $1/T$ との間には直線関係が存在し, 少々バラツキは存在するが, 両試験における K_C 値は, ほぼ一致するといえる.

以上の実験結果から, 改良 EBV ノッチ計装化シャルピー試験により, EBVTrs=100 における K_C の推定値と破面遷移温度域における荷重・時間からの K_C の計算値を用いることにより, 大型試験の K_C をほぼ予想することが可能であると, 結論される.

4. 考 察

4.1 従来の小型試験による脆性破壊伝播・停止特性の判定法と問題点

従来, よく使用されている脆性破壊伝播停止特性の判定法としては,

- (1) vTrs (日本溶接協会低温用鋼板判定基準, WES-136)
- (2) vTrs (当社八幡製鉄所技術研究室において推奨された判定法)

などがあげられる.

Table 3 は, 日本溶接協会の低温構造用鋼板判定基準 (WES-136) で, 長さ 20 mm (G 種) および 200 mm (A 種) の走行亀裂を停止し得ることを鋼材に要求したもので, 最低使用温度 T_0 , 使用応力 ($1/2 \sigma_y$) に応じてシャルピー衝撃試験温度が規定されている. この試験温度が, 対象鋼種の vTrs より高ければ, 最低使用温度に

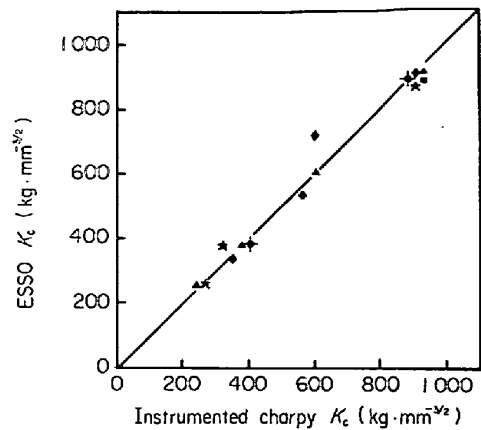


Fig. 7. Correlation between K_C values obtained from instrumented Charpy test and ESSO test.

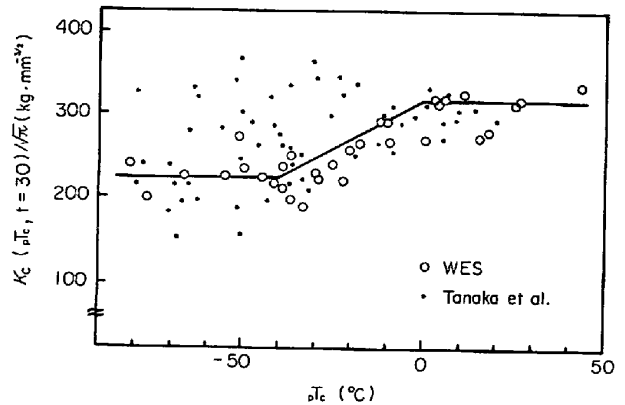


Fig. 8. Relationship between K_C and pT_C .

における停止性能が保証されるわけである.

田中らは²⁾, 上記脆性破壊の停止特性を vTrs あるいは pT_C から求めようとする旧 WES 方式を採用すると Fig. 8 に示されるように, 特に高張力鋼においては, pT_C と大型試験から求めた K_C との相関が悪く, 適切な

Table 3. Example of application of V-notch Charpy test (WES-136).

Steel	σ_y	σ_T	σ_a	Plate thickness (mm)	Testing temperature					
					$T=0^\circ\text{C}$		$T_0=-30^\circ\text{C}$		$T_0=-45^\circ\text{C}$	
					G	A	G	A	G	A
SM 41	24	41~52	12	13	40	25	20	-15		
				26	20	15	5	-25		
				38	20	0	-5	-40		
N-TUF 33	33	245	16	13	40	15	5	-25	-25	-50
				26	20	0	-5	-35	-35	-60
HT 60	50	62~74	22	13	40	5	0	-35	-30	-55
				26	20	-5	-15	-45	-40	-65
				38	15	-20	-25	-60	-50	-80

σ_y : Yield strength, σ_T : Tensile strength, σ_a : Design stress, T_0 : Minimum used temperature of material
 G: Arrest of propagating crack of 20 mm length A: Arrest of propagating crack of 200 mm length

評価法とはいえないことを指摘した。数多くの鋼種について、シャルピーの特性値と大型試験の K_C との相関について検討を加えた結果、 vTr_{15} における K_C 値が、ほぼ一定であることを見出した。Fig. 9 はその 1 例で、温度勾配 ESSO 試験で得られた温度 T における K_C とシャルピー試験で得られた $(T-vTr_{15})$ との関係である。両者の間に、一応の相関は認められるが、依然としてバラツキが大きく、適切な評価法とはいえないように思われる。

WES 方式の vTr_s あるいは田中らによる vTr_{15} の概念は、それらの温度において破壊時に吸収されるエネルギーの大部分は、脆性亀裂の伝播停止に関連があるということである。しかしながら、計装化シャルピーによつて求めた vTr_{15} あるいは vTr_s における荷重・時間曲線は、Photo. 2 に示されるように、大部分のエネルギーが脆性破壊の発生に消費され、伝播・停止に関連あるエネルギーは非常に少ない。したがって、単に統計的

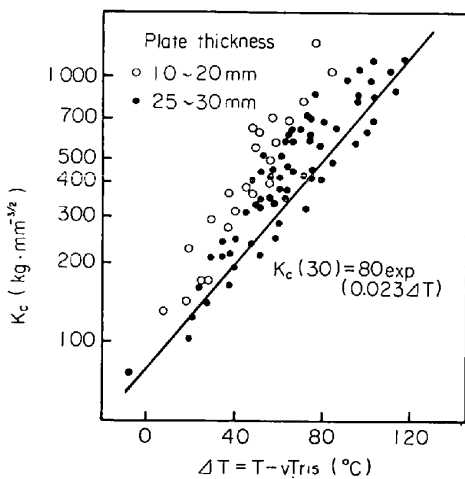


Fig. 9. Relationship between K_C and $(T-vTr_s)$

な相関だけから、 vTr_s , vTr_{15} を停止特性の判定基準として使用することは、好ましくないと考えられる。

上記の考え方から、シャルピー試験において脆性破壊の発生を容易にし、伝播停止に関連のある特性値の抽出を可能ならしめるためには、本実験で採用した改良ノッチにおけるように、

- 1) ノッチ先端を鋭くする。
 - 2) 電子ビームなどで、加熱してノッチ部を脆化させる。
- ことなどが必要となることが理解される。

4.2 改良ノッチシャルピー延性・脆性遷移温度と DWTT 85% SATT との相関

Fig. 4, 5 に示されたように、改良ノッチにより脆性破壊の発生は容易になり、 $V \rightarrow F \rightarrow EBF \rightarrow EBV$ ノッチの

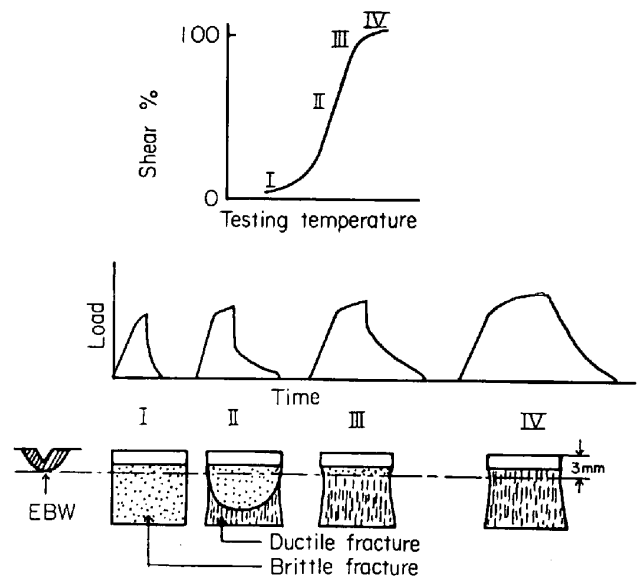


Fig. 10. Load-time trace and fracture appearance for EBV-notch Charpy specimen.

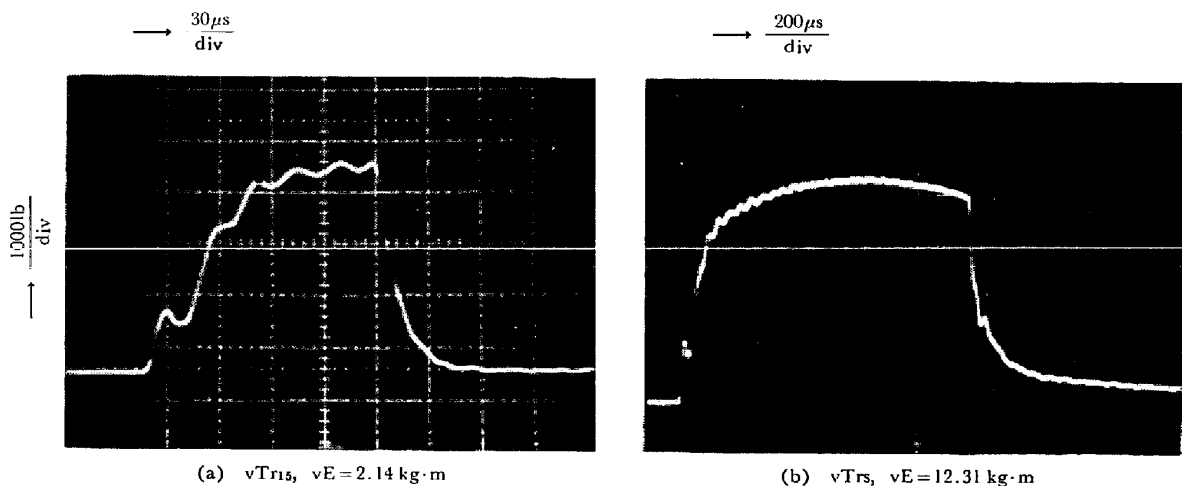


Photo. 2. Load-time curves at vTr_{15} and vTr_s for ordinary V-notch Charpy specimen, a : vTr_{15} b : vTr_s

順に破面遷移温度は上昇する。本実験では、主として、DWTT に対応する小型試験の特性値について検討を加えた結果、EBVノッチシャルピーにおける延性・脆性遷移温度 $EBVTrs=100$ が、DWTT85%SATT と一致することを明らかにした。そこで以下においては、 $EBVTrs=100$ が、大型試験との単なる統計的相関にとどまらず、物理的意味が存在するかどうかについて考えてみる。

Fig. 10 は、脆性破壊停止特性との関連において、EBVノッチ計装化シャルピーの荷重・時間曲線と破面外観とを、ステージ I～IV に分けて示したものである。各ステージの特徴を要約すると、以下のようになる。

ステージ I

低応力破壊で、延性破面はほとんど観察されない。

ステージ II

電子ビーム加熱脆化部で、降伏荷重を越えた後脆性破壊が発生し、母材部に伝播後停止する。破面は、いわゆる、正常破面を呈する。

ステージ III

脆化部で脆性破壊が発生するが、母材部には伝播しない。

ステージ IV

脆化部、母材ともに延性破壊。

$EBVTrs=100$ は、ステージ II から III への遷移温度に対応し、換言すれば、シャルピー試験においていかなる方法で脆性破壊を発生させても、もはや伝播し得ない温度であると解釈される。またステージ II に対応する $EBVTrs=100$ 以下の破面遷移温度域においては、脆性破面から延性破面に転移する正常な破面外観を呈し、吸収エネルギーのほぼ 1/2 が、脆性破壊の伝播停止に消費されている。

一方、 $EBVTrs=100$ と一致する DWTT85%SATT に関しては、その温度における K_C 値が、板厚一定の場合ほぼ一定値を示すとされており、また、この関係は単なる相関ではなく、適当なモデルを使用することにより、数値の妥当性を証明することが可能だとされている⁷⁾。

以上のような考え方から、100% 延性破面を示す下限温度 $EBVTrs=100$ が、 $vTrs$, $vTr15$ などに代わる新しい脆性破壊停止の特性値として、非常に有効であると結論される。

$EBVTrs=100$ 以下の遷移領域における K_C の推定には、計装化シャルピーの有力な手段となり、EBVノッチ

シャルピーの荷重・時間曲線を用いて K_C を計算することが可能である。計算結果は、Fig. 6, 7 に示されており、大型試験から求められた K_C 値とほぼ一致するといえよう。これに関連した問題点の1つは、荷重時間曲線の不明瞭さ、実効的な脆性亀裂長さの測定の困難さなどの理由から、 K_C の計算が不可能な場合が存在することである。この点に関しては、今後さらに検討を加える予定である。

5. 結 論

改良ノッチ計装化シャルピー試験により、脆性破壊停止特性に関連した特性値の抽出について検討を加え、以下のことを明らかにした。

(1) 改良ノッチにより、脆性破壊の発生が容易になり、 $V \rightarrow F \rightarrow EBF \rightarrow EBV$ ノッチの順に、破面遷移温度は上昇する。

(2) 電子ビーム加熱脆化 Vノッチシャルピーの延性・脆性遷移温度 $EBVTrs=100$ と DWTT85%SATT とは、ほぼ一致する。

(3) EBVノッチ計装化シャルピーの荷重・時間曲線を用いて、破面遷移温度域における K_C 値の推定が可能である。

(4) (2), (3) により求めた K_C 値は、大型試験の K_C 値とほぼ一致する。言葉をかえれば、小型試験から大型試験の脆性破壊伝播・停止特性を予想することが可能であるといえる。

文 献

- 1) 例えば、金沢：鉄と鋼，53 (1967)，p. 55
- 2) 田中，野田，関野：溶接学会全国大会講演概要，(1974，春)，p. 254
- 3) 柏村，三村，今井：日本鉄鋼協会第 89 回講演概要集，(1975)，p. 251
- 4) 小林，高井，間庭：日本金属学会誌，30 (1966)，p. 700
- 5) 小林，高井，間庭：日本金属学会誌，32 (1968)，p. 213
- 6) F. WILLIAM, Jr. BROWN, and J. E. SRAWLEY: "Plane Strain Crack Toughness Testing of High Strength Metallic Materials" p.13, ASTM Special Technical Publication No. 410
- 7) G. C. SIH and H. LIEBOWITZ: Fracture II, p. 145, Academic Press, New York and London
- 8) 小笠原：私信
- 9) 小笠原，柏村，三村，今井：日本鉄鋼協会第 89 回講演概要集，(1975)，p. 252