高速負荷平面ひずみ破壊じん性 $K_{Ic}(t)$ の 諸特性に関する研究*

(第 2 報, 板厚条件, 破壊時間条件の検討)

酒 井 譲**, 向 畑 正 規***, 藤 井 英 輔****

A Study on the Properties of Rapid Load Plane Strain Fracture Toughness $K_{Ic}(t)$ (2nd Report, Specimen Size Requirement and Fracture Time Limitation)

Yuzuru SAKAI, Masanori MUKAIHATA, and Eisuke FUJII

Rapid-load plane-strain fracture toughness was evaluated on type A508 class 3 steel using a high loading rate tensile machine. Tests were performed according to ASTM E399-83 ANNEX 7 in order to examine the effects of specimen thickness on initiation toughness K_0 and to clarify the significance of the fracture time limitation. The results of this study show that the variation in measured K_0 values could be reduced by increasing the specimen thickness and the present size requirements of $B \geq 2.5(K_0/\sigma_{y0})^2$ are marginally sufficient to obtain valid plane-strain fracture toughness $K_{Ic}(t)$ values, and that the fracture time limitation of ANNEX 7 is not substantial requirement but dependent largely on the accuracy of instrumentation of the testing system.

Key Words: Fracture, Rapid-Load Plane-Strain Fracture Toughness, 4TCT Specimen, Specimen Size Requirement, Type A508 cl. 3 Steel

1. 序 論

前報⁽¹⁾において著者らは、高速引張り負荷方式による動的破壊じん性試験の精度が、従来の衝撃力負荷方式の試験に比べはるかに高く、標準試験法として大いに期待できることを示した。一方、ASTM は高速引張り方式の標準試験法 (ASTM E 399-83 ANNEX 7⁽²⁾) を公表しているが、有効な破壊じん性値を得るための条件式はほとんど静的場における、いわゆる K_{Ic} 試験の場合と同一であり、その妥当性の検証は十分に行われていないのが現状である。

本論文においては、高速負荷下において平面ひずみ状態が実現されるための試験片寸法 (板厚条件)、および高速負荷を示すパラメータである破壊時間 (破壊時間条件) について検討し、標準試験法の確立の基礎データを提出している。

2. 試 験 方 法

2・1 供試材および試験片 供試材は ASTM A 508 cl. 3 材であり、前報と同一のヒートである。試験片は 2 TCT, 3 TCT, 4 TCT タイプのものをを用い、また 2 TCT タイプではその板厚を 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm, 50 mm と変化させている。図 1 に 4 TCT 試験片の形状を示すが、荷重線開口変位量を光学的に検出するため台形の切り込みが加工され、その表面に光感性テープがターゲットとして貼付されている。疲労き裂の導入は ASTM E 399-83 ANNEX 2 に従い、導入後の a/W 比が 0.5 となるように行った。試験片の負荷状態を直接知るため、疲労き裂先端から 5 mm の位置と試験片側面に、図 1 に示すようにひずみゲージを貼付した。

2・2 試験法 試験機は運輸省船舶技術研究所の大形高速引張り試験装置を用いた。試験機の概要を図 2 に示す。

試験方法は前報で述べた方法とほぼ同じである。ただし 3 TCT, 4 TCT などの大形試験片では 30 分以上かけ一定温度で冷却し、破壊発生まで均一温度が保たれるように配慮している。計測系も前報に示したものと同一であり、上・下ロードセルより荷重の検出を行

* 昭和 61 年 10 月 7 日 第 64 期全国大会講演会において講演、原稿受付 昭和 61 年 4 月 22 日。

** 正員、横浜国立大学工学部 (〒240 横浜市保土ヶ谷区常盤台 156)。

*** 学生員、横浜国立大学工学部。

**** 正員、運輸省船舶技術研究所 (〒181 三鷹市新川 6-88-1)。

い、荷重線変位を光学式微小変位計により計測している。

試験速度は 0.1 m/s, 1 m/s, 2 m/s の 3 条件とし、試験温度は -120°C から 0°C の範囲とした。なお板厚条件を検討するため -40°C , 2 m/s において 2 TCT (板厚 10 mm~50 mm), 3 TCT (板厚 75 mm), 4 TCT (同 100 mm) を用いた一連の実験を行い、その他の温度・速度条件では主として 2 TCT (同 50 mm) 試験片を用いている。

3. 解析方法

高速負荷平面ひずみ破壊じん性 $K_{Ic}(t)$ を ASTM E 399-83 ANNEX 7 に従い求めた。解析方法は前報と全く同様であるが、本論文の主旨に関連のある部分について以下に略記する。ANNEX 7 に従って作成した荷重-変位曲線より破断荷重 P_0 を求め、下式より K_0 値を算出する。

$$K_0 = \frac{P_0}{B \cdot \sqrt{W}} \cdot f(a/W) \quad \cdots (1)$$

ここで

$$\begin{aligned} f(a/W) = & (2 + a/W) \cdot (0.886 + 4.64a/W \\ & - 13.32a^2/W^2 + 14.72a^3/W^3 \\ & - 5.6a^4/W^4) / (1 - a/W)^{3/2} \end{aligned}$$

a はき裂長さ、 B は試験片板厚、 W は試験片幅である。このようにして求められた K_0 値が高速負荷平面ひずみ破壊じん性として有効な値となるためには、次の寸法条件が満たされなくてはならない。

$$B, a \geq 2.5(K_0/\sigma_{y0})^2 \quad \cdots (2)$$

ここで σ_{y0} は動的降伏応力値である。この関係は静的破壊じん性 K_{Ic} 評価法における板厚条件をそのまま踏襲したものであることは明らかであり、降伏応力値として動的値を使用しているもののその根拠はい

まひとつ不明であるといえる。また、式(2)の合理性を動的場において示したデータは今のところ公表された例はない。しかし本手法(ANNEX 7)が標準試験法として妥当なものとなるためには、平面ひずみ状態を保障する板厚条件が合理的に確立されなければならないことは言を待たない。

さらに ANNEX 7 では、 $K_{Ic}(t)$ 値が有効となるためには破壊時間 t が 1 ms より大きくなければならないという付帯条件を設けている。

$$\text{破壊時間 } t \geq 1 \text{ ms} \quad \cdots (3)$$

この条件は材料物性から要求される条件というよりもむしろ試験法の精度に基づく基準値とみなすべきであり、ASTM の想定する高速負荷試験が従来の衝撃負荷試験よりもやや低速負荷のレベルを対象としていることがうかがわれる。ちなみに代表的な衝撃試験法である計装化シャルピー試験⁽³⁾でみられる破壊時間は数十 μs ~数百 μs レベルである。式(3)の条件はしたがって、実験装置の性能や、計測系の精度に依存する値とみなすべきであり、本試験のように光学式変位計で高精度の開口変位量を測定できる場合⁽¹⁾などは 1 ms という下限値の合理的な意味は失われると思われる。

4. 実験結果

4.1 出力データの特徴 図3~5に板厚の異なる試験片による代表的な出力データ記録例を示す。試験速度(シリンダ速度)は 2 m/s、試験温度は -40°C ~ -60°C である。

図3に明らかなように、板厚が小さな場合荷重出力に振動が重畳する傾向が認められた。ことに上部ロー

図1 4 TCT 試験片形状

図2 高速引張試験機の概要

ドセル出力が大きな振動現象を示し、しかも負荷初期のほうが後期に比べはなはだしい。一方図4および図5においては、荷重出力の振動は非常に少なく、極めて良好なデータとなっている。このように試験片サイ

図3 荷重・ひずみ・開口変位の時間変化
(2 TCT, 板厚 20 mm, 2 m/s, -40°C)

図4 荷重・ひずみ・開口変位の時間変化
(2 TCT, 板厚 50 mm, 2 m/s, -60°C)

図5 荷重・ひずみ・開口変位の時間変化
(3 TCT, 板厚 75 mm, 2 m/s, -40°C)

ズの増大は出力データの振動現象を緩和するのに有効となることが明らかとなった。

これに対し、ひずみゲージの応答にはいずれの場合についてもほとんど振動現象が認められず、単調な増加を示し破断 (Fracture と示した位置) に至っている。すなわち試験片自身の振動はいずれの場合も少なく、ロードセル位置で検出される衝撃波動は治具と試験片において減衰されているものと考えられる。

4.2 板厚依存性 図6にシリンダ速度 2 m/s, 試験温度 -40°C における K_0 および $K_{Ic}(t)$ 値の試験片板厚依存性を示す。図中黒丸印は式(2)の寸法条件を満たした値である。同図より板厚が小さな場合、評価されたじん性値は大きくばらつく傾向にあり、板厚の増大とともにじん性値のばらつきは減少してゆくことがわかる。

板厚依存性が認められなくなるのは、板厚 40 mm 近辺からであり、40 mm 以上ではほぼ一定のじん性レベルを示している。そのレベルを同図より $90 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ とすれば、この条件における σ_{y0} 値は $520 \text{ MPa}^{(3)}$ であることから、式(2)により求められる寸法係数 α は

$$\alpha = B / (K_0 / \sigma_{y0})^2 \approx 1.33$$

となり、これは ASTM の規準 $\alpha = 2.5$ よりかなり小さい。すなわち図6に示された本試験結果が妥当なものとすれば、試験片の寸法効果がなくなるための板厚条件は次式となる。

図6 K_0 , $K_{Ic}(t)$ 値の板厚依存性
(2 m/s, -40°C)

$$B \geq 1.33(K_0/\sigma_{yd})^2 \dots\dots\dots (4)$$

すなわち板厚条件は ASTM 規準よりも大幅に緩和されかなり小形の試験片を用いても有効な平面ひずみ破壊じん性を評価できることになる。

一般に材料が高速負荷をうける場合、降伏応力の増大(弾性変形の増大)、塑性変形の減少が観察され、シアリップの生成も減少する傾向にあることが報告⁽³⁾されており、静的負荷時よりも厳しくき裂先端が拘束される可能性が考えられ図6の結果もそれを示唆しているといえる。図7は本供試材と同材料(A 508 cl. 3)を用いた静的破壊じん性試験結果⁽⁴⁾を参考として示してあるが、図6と比較し板厚依存性はより大きいことがわかる。図7ではじん性レベルが一定値となるのは板厚が100 mm 以上であり、これは高速負荷条件下での値のおよそ2倍である。またじん性レベルも静的負

荷の場合のほうが高めにあることがわかる。これらの結果より高速負荷条件下では静的負荷の場合よりも板厚条件は緩和される傾向にあり、したがって ASTM の推奨式(2)はかなり安全側の評価を与え、条件式として一応妥当なものといえる。

しかし、より簡便な標準試験法を確立するためにはなるべく小形の試験片の活用が望ましく、ことに試験機の容量に制限が課せられやすい動的試験においてはその要望は切実であり、その点本試験で得られた板厚条件式(4)は板厚減少の可能性を示したもので好ましい結果となっている。もちろんこの条件はシリング速度が2 m/s というかなりの高速負荷下におけるものであり、これ以下の速度領域では α の値は増大すると考えるのが妥当であり、負荷速度が減少するとともに α の値は ASTM 規準の $\alpha=2.5$ に近接してゆくと考

図7 K_0, K_{Ic} 値の板厚依存性 (参考文献)

図8 クリティカル COD 値の板厚依存性 (2 m/s, -40°C)

図9 破壊時間の試験温度依存性 (2 TCT, 板厚 50 mm)

図10 破壊時間の試験温度依存性 (2 TCT, 板厚 50 mm)

えられる。また図8は光学式変位計により求められた荷重線開口変位より、破壊発生時の臨界 COD 値を算出(方法は前報に既出)しその板厚依存性を示したものである。臨界 COD 値についても板厚依存性は明らかであり、ほぼ図6にみられる挙動と同じ傾向を示している。

4・3 破壊時間条件 前述のように ASTM 標準では破壊時間(負荷開始から破壊発生までの経過時間)が1ms以上でなければならないという制限を設けているがこの意義を検討してみる。

図9, 10は2 TCT 板厚50mmの試験片を用いた場合の破壊時間の温度依存性を示している。シリング速度をパラメータとしてそれぞれの挙動をばらつき平均

で表した曲線を参考にすれば、同一速度において破壊時間は温度上昇とともに増大する。これは温度上昇による材料の破壊抵抗の増大をも意味している。図9によれば速度2m/sの場合破壊時間はほぼ0.5ms~1.0msの範囲にあり、ほとんどのデータはASTMの制限値よりも小さなものとなっている。最小の破壊時間は -40°C において450 μs という値が得られている。また速度1m/sについても -40°C 以下の領域で破壊時間は1ms以下となっている。一方図10によれば0.1m/sの場合の破壊時間は10~30msの範囲に存在しASTMの制限を満たしている。同図には本試験と共同して行われた他機関による結果⁽³⁾(シリング速度0.5, 0.05m/s)も併せて示してあるが、これらの破壊時間も含め速度ごとにその範囲を整理すると表1のようになる。すなわちASTMの制限($t \geq 1\text{ms}$)を満たすのは引張速度(シリング速度)が0.5m/s以下の領域であり、1m/s以上の高速引張力負荷ではその制限が満足されないことが同表より明らかである。

ASTMの破壊時間条件に従えば、高速引張力負荷方式による標準試験で、m/sレベルでの材料じん性評価はできないことになる。これは、ASTMの想定する試験法が現在のところ比較的低速度領域(引張速度でせいぜい0.5m/s程度)を対象としているあうわれとみてよいだろう。ASTMがこの条件を設定する理由としては、荷重線開口変位の計測器としてクリップゲージを標準仕様化しているため、高速負荷領域(引張速度で1m/s以上)での精度が十分に保障できないことが一因と考えられる。著者らの実験においても1m/s以上の引張速度下では、クリップゲージによる変位出力は振動現象や試験片変形への追従性の大幅な低下などが認められており、性能が不十分であることが確認されている。

したがってASTM規格(ANNEX 7)の標準仕様に従う範囲では、破壊時間の制限を設定し、その値を1ms程度とするのも意義があるといえよう。しかし本試験では前報でも示したとおり荷重および開口変位計測の精度は高速領域に対しても十分高く、この制限の実質的な意義はなくなるといえる。

4・4 破面観察 図11にシリング速度2m/s, 試験温度 -40°C における破面写真を示す。4 TCT 試験片(板厚100mm)の破面は完全なぜい性破面を示し、凹凸がほとんどみられない。3 TCT (75mm)では疲労き裂近傍にやや凹凸が認められるがこれも完全なぜい性破面である。一方2 TCT タイプでは板厚30mm以下の試験片の破面で、板厚の減少とともに延性破面の増加とシャーリップの生成が顕著になってゆくこと

表1 各速度における破壊時間の範囲
($-120^{\circ}\text{C} \sim 0^{\circ}\text{C}$)

Test Velocity (m/s)	Fracture Time (ms)
2	0.45 ~ 1.0
1	0.63 ~ 1.48
0.5*	2.55 ~ 3.25
0.1	14.50 ~ 30.20
0.05*	31.10 ~ 49.50

* from ref. 3

B = 100 mm

B = 75 mm

B = 40 mm

B = 30 mm

B = 20 mm

B = 10 mm

図11 破面写真 (2 m/s, -40°C)

がわかる。シャリーップが明らかに認められるのは板厚 30 mm 以下であり、板厚 40 mm でわずかに認められるもののそれ以上の板厚ではほとんど無視できる程度である。これは図 6 において、板厚 40 mm 以上で K_{Ic} 値のばらつきが減少し一定値に達する傾向と一致する。

5. 結 論

高速負荷平面ひずみ破壊じん性 $K_{Ic}(t)$ の板厚依存性および破壊時間について検討した結果以下の点が明らかとなった。

(1) 高速負荷下においても破壊じん性の板厚依存性は明りょうに現れるが、静的条件の場合よりも板厚条件は緩和される傾向にある。すなわち、高速負荷の

場合のほうがより小形の試験片により、有効な平面ひずみ破壊じん性を得られる。これは試験法の簡便化のためには好ましい結果である。

(2) 破壊時間はシリンダ速度、試験温度に明りょうに依存する。ASTM 規格の破壊時間制限は試験の精度に依存する一種の指標と考えられる。

文 献

- (1) 酒井・藤井, 機論, 52-480, A (昭 61), 1930.
- (2) ASTM Designation E 399-83 ANNEX 7, (1983).
- (3) 日本溶接協会, 原子力研究委員会, 4 DF 小委員会成果報告書, (昭 61), 45.
- (4) 日本溶接協会, 原子力研究委員会, 7 HST 小委員会成果報告書, (昭 53), 73.

討 論

〔質問〕 小林 俊 郎〔豊橋技術科学大学〕

本論文は静的試験と計装化衝撃試験の中間のひずみ速度範囲での破壊じん性試験を行う上で有用と考えるが、次の点に関しご意見を伺いたい。

(1) 図 3 のような板厚が小さい場合に振動波形になりやすい原因は何か。シャリーップ生成と関係があるか。この時 $0.5 P_0$ 以上で荷重の振幅が $\pm 5\%$ 以内という条件は満足されるか。

(2) 寸法係数 $\alpha 1.33$ は、例えば Shabbits (付 1) によれば動的試験では 1 になる報告例がある。静的試験の 2.5 という数字は平面ひずみ塑性域の 25 倍の寸法に対応する。 (K_{Ic}/σ_{yd}) が動的試験では小さくなるが、これがそのまま α が $1.33/2.5$ に減少した原因と考えてよいかわからない。

〔回答〕 試験片が小さい場合、試験片の剛性は小さく、したがってシリンダ、治具、試験片の構成する系の剛性も小さくなるため、ダンパで生じた振動がそのまま上側のロードセル出力に現れやすくなる。一方 4 TCT タイプ程度 (自重はおおよそ 50 kg) の大形試験

片を用いると、シリンダ・治具・試験片の構成する系の質量と剛性は十分に大きくなり、外乱に対してもその応答 (振動) は小さなものとなると考えられる。

荷重に現れる振動波形は破壊開始前の問題であり、破壊開始後のシャリーップ生成とは直接関係はないと思われる。また図 3 から明らかなように、下部ロードセルの応答は振動が比較的少なく、 $0.5 P_0$ 以上で荷重の振幅が $\pm 5\%$ 以内という条件は満足される。

(2) 高速引張負荷条件では引張方向応力 (垂直応力) と分離形の変形の割合が支配的となり、すべり変形が抑制されること、またき裂先端に生じる塑性域も、相対的に十分発達できず小規模降伏状態が維持されやすいこと (これは破面観察からも明らかである) などのため、板厚依存性は緩和されるものと考えられる。したがってご指摘のように (K_{Ic}/σ_{yd}) が動的試験では小さくなる。すなわち塑性域寸法が減少することは、板厚係数 α の減少の主要な一因と考えている。

(付 1) Shabbits, W. O., WCAP-7623, (1971).