

(昭和 57 年 11 月 日本造船学会秋季講演会において講演)

定荷重下における K 値減少型試験法について

——テーパ型 DCB 試験片の圧縮——

正員 阪 野 賢 治* 荒 井 進*

On a Constant Load K -value Decreasing Type Testing Method

——Compression of Tapered DCB Specimen——

by Kenji Sakano, *Member* Susumu Arai

Summary

Tapered Double Cantilever Beam Compression (TDCBC) test is proposed as a stress intensity factor K decreasing type testing method. In this test, Tapered Double Cantilever Beam (TDCB) specimen is compressed in the direction of the crack growth, and K -value decreases with increase in the crack length under constant load. The increase of the specimen width in the crack growth direction is effective for obtaining K -value decreasing tendency. The compression load is effective for the crack path directional stability. It is recommended that cracked side of two specimens be placed facing each other and compression load is transmitted through a pair of rollers between the specimens. This method is effective in minimizing the constraint in the crack opening displacement. The rollers have to be placed near the edges of the cracked side of the specimen in order to obtain positive K -value.

K -value was analyzed numerically and the effects of the specimen geometry and the loading position on K -value were examined. Approximate polynomials for K -value calculation of three kinds of the specimen shape are given. TDCBC static fracture test of PMMA was conducted and fracture characteristics were investigated. It was confirmed that brittle crack grows straightly and stably in the K -value decreasing zone and that K -value of the stably growing crack is almost constant.

1 緒 言

き裂長さ a の増大に伴い応力拡大係数 K が減少する傾向 ($(1/K) \cdot (\partial K / \partial a) < 0$) を有する試験片を用いれば、脆性き裂の伝播、停止特性の評価、疲労あるいは応力腐食によるき裂成長の下限界特性値の調査などを容易に実施できる。

定変位下において K 値減少傾向を有する試験片・負荷法は数多くあり¹⁾ 実用にも供されている。脆性き裂伝播停止靱性 K_{1a} 計測のための Compact Crack Arrest 試験はその 1 例である²⁾。一方、定荷重下において K 値減少傾向を有する試験片・負荷法は数が少なく¹⁾、しかも実用上の問題点を含んでいる。例えば、splitting force を受ける無限板中の貫通き裂は K 値減少傾向を有しているが、試験片として K 値減少傾向を得ようとするとその寸法を大きくする必要があり、負荷点の強度の保持という問題がある。

しかし、定荷重下において K 値が減少するということとは、定変位下において K 値が減少するということに比べて K 値減少の特性が強く³⁾、 K 値減少状態における破壊試験を容易に実施できるという利点がある。また、結果の表示は荷重に関係した量でなされるのが一般であるから、定荷重下において K 値減少傾向を有する試験片を用いた荷重制御試験の方が結果の整理に便利である。このように、定荷重下において K 値減少傾向を有する実用的な試験片・負荷法があれば有用である。

本報告は、定荷重下において K 値減少傾向を有する新しいタイプの試験片・負荷法として、Tapered Double Cantilever Beam (TDCB) 試験片にき裂に平行な方向に圧縮力を作用させる TDCB Compression (TDCBC) 試験法を提案し、その特性を検討したものである。

2 基本的考え方

Fig. 1 (a) に示すように、Double Cantilever Beam (DCB) 試験片にモーメント M を作用させた場合の K

* 石川島播磨重工業(株)技術研究所

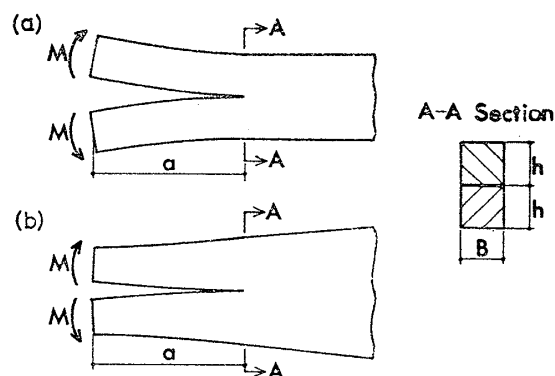


Fig. 1 (a) DCB and (b) TDCB specimens under a pair bending moment

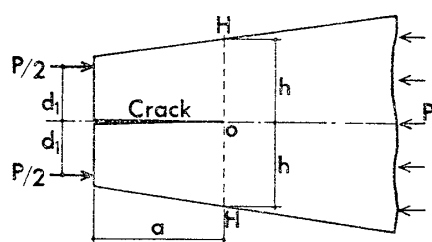


Fig. 2 TDCB specimen compressed parallel to the crack line

値は次式で与えられ、き裂長さには関係しない⁴⁾。

$$K = CM / \sqrt{BI} \quad (1)$$

ここで、 $C = \begin{cases} 1 & \text{：平面応力} \\ 1/\sqrt{1-\nu^2} & \text{：平面ひずみ} \end{cases}$

B ：板厚

I ：断面二次モーメント ($= Bh^3/12$)

h ：き裂先端部の梁の高さ

ν ：ポアソン比

したがって、(b) 図に示すように h が a の増大する方向に増大すれば、 a の増大に伴い I が増大し K 値が減少することが期待できる。そこで、試験片として TDCB 試験片を考えることにする。

次にモーメントの負荷であるが、Fig. 2 に示すようにき裂側端面の外側に寄った位置に圧縮力を作用させることにより行うことを考える。端面に作用する圧縮力を P とすればき裂先端を通る断面 O-H に生じるモーメント M は、この断面に対する外力の偏心量が $(d_1 - h/2)$ であることから、大略次式で評価できるであろう。

$$M = (d_1 - h/2) \cdot P/2 \quad (2)$$

h が増大すれば M は減少することになる。

以上のように TDCB 試験片のき裂側端面に外側に偏心して圧縮力を作用させれば、き裂長さ a の増大に伴う I の増大および M の減少により、大きい K 値減少傾向が期待できる。しかも、き裂に平行な方向の圧縮力によりき裂が横にそれることが防止されるという期待ももてる。き裂平行方向の圧縮力によりき裂が直進しや

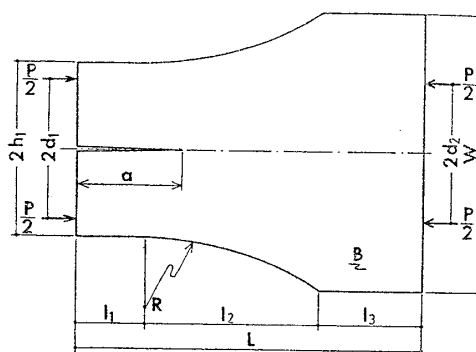


Fig. 3 TDCB specimen of which width is increased in the form of an arc

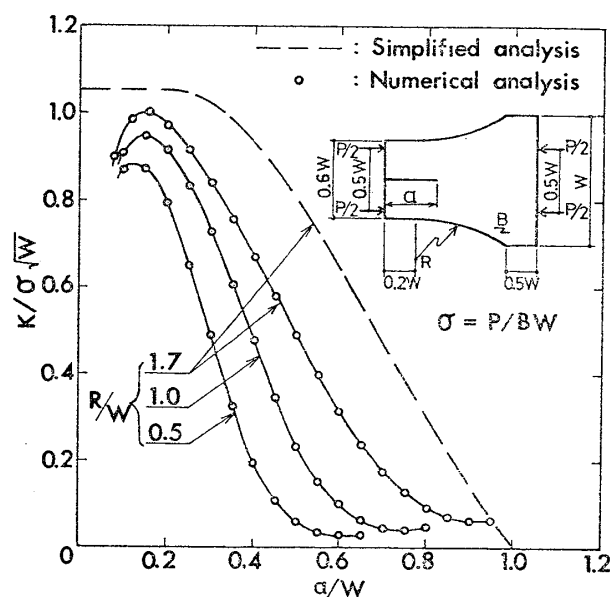


Fig. 4 K -value of the compressed TDCB specimen in relation to the crack length

すいことは J. J. Benbow⁵⁾ らにより指摘されている。

3 K 値に関する検討

Fig. 3 に示すように、幅が円弧の一部として増大する TDCB 試験片に圧縮力を作用させた場合の K 値の検討結果について報告する。 K 値は、徳田によって作成された有限要素法による解と解析解の重ね合せ法に基づいた K 値解析プログラム⁶⁾を用いて求めた。

Fig. 3 に示す試験片の K 値は、幅が直線的に増大する試験片の K 値に比べて、幅の増大開始部近くに生じる最大の K 値が大きく、幅の増大終了部近くに生じる最小の K 値が小さいという傾向にあった。

3.1 K 値の算定例

Fig. 3 に示す形状の試験片において $l_1/W = 0.2$, $l_3/W = 0.5$, $h_1/W = 0.3$, $d_1/W = d_2/W = 0.25$ とし、 R/W を 0.5, 1.0, 1.7 (それぞれ、 $l_2/W = 0.4, 0.6, 0.8$ となる) と変化させた場合について求めたき裂長さ a と K 値の関係を Fig. 4 に示す。[同図中には、数値解析結果を

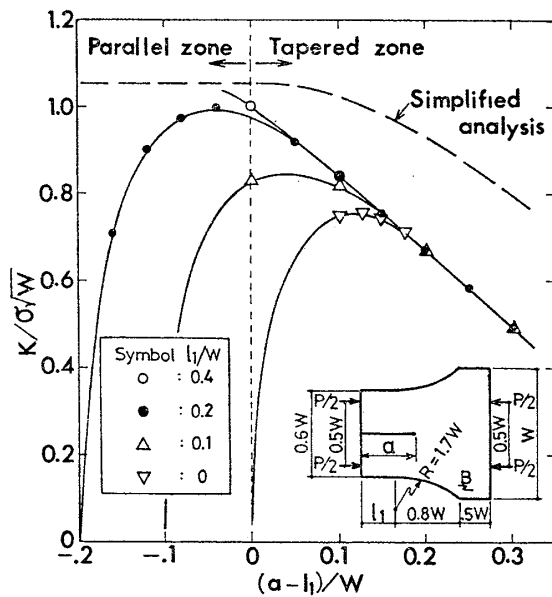


Fig. 5 The effects of the cracked side parallel zone length l_1 on K -value

最小自乗法で多項式近似した結果を実線で、また $R/W=1.7$ の場合についての梁理論に基づいた (1) 式および (2) 式による簡易解析結果を破線で示した。

数値解析結果は簡易解析結果に比べて全体的に小さい K 値を与えている。この差は試験片の形状変化による応力の乱れに関係していると考えられる。 K 値の減少勾配は両者でよい一致をみている。

R が K 値に及ぼす影響をみると、当然 R が小さいほど K 値の減少傾向は大きい、最大の K 値も R が小さくなるにしたがい低下している。また、最小の K 値も R が小さくなるにしたがいいくぶん低下するようである。

K 値の多項近似式を以下に示す。

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \cdot f(a/W) \quad (3)$$

ここで、 $\sigma = P/(BW)$

$$f(a/W) = \sum_{i=0}^5 c_i (a/W)^i$$

	$R/W=0.5$	$R/W=1.0$	$R/W=1.7$
c_0	1.921	2.153	2.429
c_1	-1.749	-5.741	-8.592
c_2	-26.41	4.846	17.02
c_3	72.01	-9.181	-24.57
c_4	-60.76	19.54	20.59
c_5	12.64	-12.01	-6.839

3.2 端部の平行部長さの影響

Fig. 3 の形状の試験片における端部の平行部の長さ l_1 および l_3 を種々変化させた場合について求めた K 値を、それぞれ Fig. 5 および 6 に示す。対象とした試験片は前項の $R/W=1.7$ の試験片 ($h_1/W=0.3$, $d_1/W=d_2/W=0.25$) である。

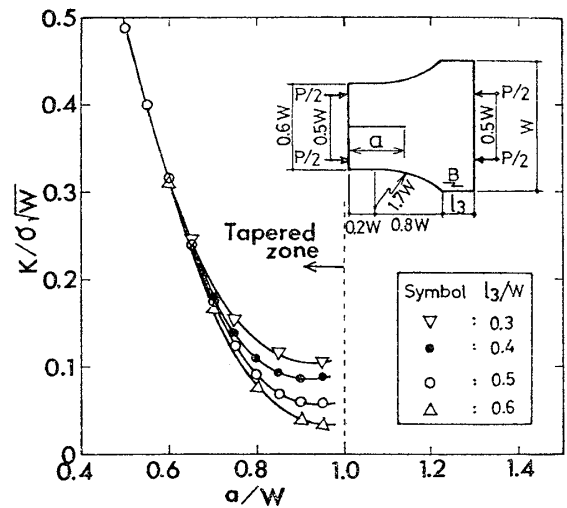


Fig. 6 The effects of the non-cracked side parallel zone length l_3 on K -value

Fig. 5 より、 l_1 が長くなれば最大の K 値は増大し、破線で示す梁理論に基づいた解析から得られる値に近づいていくこと、き裂長さ a が平行部の半幅 h_1 程度以上になると K 値は l_1 のより長いものについての値に一致することなどがわかる。

Fig. 6 より、 l_3 が長くなれば最小の K 値は減少し、やはり梁理論に基づいた解析から得られる値である 0 に近づくことがわかる。

3.3 負荷位置の影響

Fig. 7 はき裂側の負荷位置 d_1 が K 値に及ぼす影響を調べた結果である。(a) 図は d_1 と K 値の関係を示したものであり、 d_1 が大きくなれば K 値は増大しその増大傾向は直線的であることがわかる。(a) 図の計算値を結ぶ直線が横軸と交わる位置 D_1 、すなわち K 値が 0 となる負荷位置をき裂長さ a との関係で整理し (b) 図に示す。 a と D_1 の関係もほぼ直線で表示できるようなのである。この直線は次のように表示される。

$$D_1 = 0.132 W + 0.129 a \quad (4)$$

上式から得られる D_1 を用いることにより、負荷位置 d_1 が Δd_1 だけ変化した場合の K 値 $K(d_1 + \Delta d_1)$ は、負荷位置が d_1 の場合の K 値 $K(d_1)$ から次式により求めることができる。

$$K(d_1 + \Delta d_1) = \frac{d_1 + \Delta d_1 - D_1}{d_1 - D_1} \cdot K(d_1) \quad (5)$$

Fig. 8 はき裂反対側の負荷位置 d_2 が K 値に及ぼす影響を示したものである。 d_2 が K 値に及ぼす影響は a が大きい範囲においてのみ認められ、 d_2 が大きくなれば K 値は減少する傾向にあり、 d_2 と K 値の関係はおおむね直線的となっている。 d_2 が大きくなると K 値が負となることがあるようである。

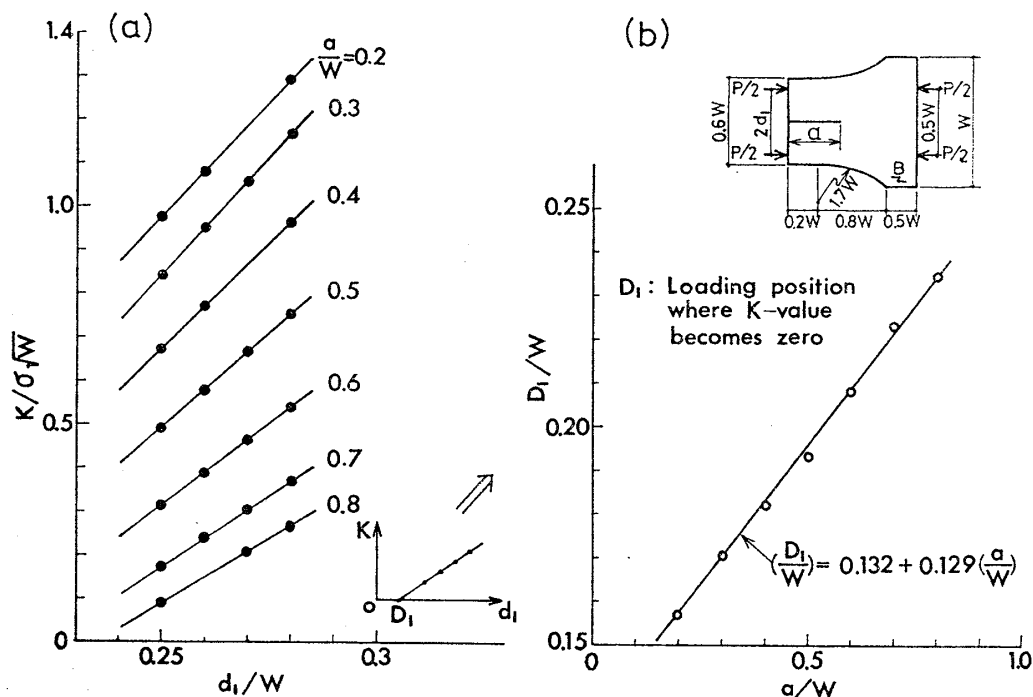


Fig. 7 (a) The effects of the cracked side loading position d_1 on K -value and (b) loading position where K -value becomes zero as a function of the crack length

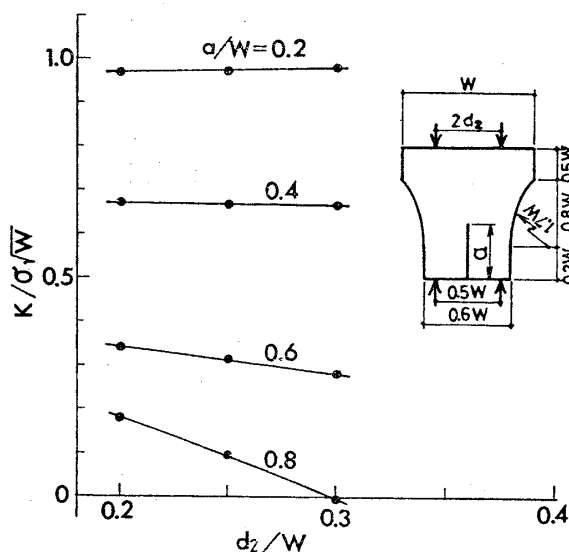


Fig. 8 The effects of the non-cracked side loading position d_2 on K -value

4 実 験

4.1 試 験 片

Fig. 3 に示す形状で、Table 1 に示す寸法の TDCB 試験片を板厚 25 mm のポリメチルメタクリレート (PMMA) 板を用いて製作した。初期切欠は長さ 15 mm 程度でその先端部 2 mm の範囲を 0.2 mm 幅 (残りの部分は 1 mm 幅) とした機械加工切欠である。供試した PMMA 板の機械的性質を Table 2 に示す。

Table 1 Dimensions of the TDCB specimen

Item No.	$d_1 (=d_2)$	h_1	R	l_1	l_2	W
1	25	30	170	20	50	100
2	20	27	50	20	30	94
3	22.5	25	50	20	30	90
4	25	27	50	20	30	94
5	27	25	50	20	30	90
6	30	10	50	20	30	70
7	30	20	50	20	30	80

Initial notch length = 15

(Unit : mm)

Table 2 Mechanical properties of PMMA used

Young's modulus (MPa)	Poisson's ratio	Fracture strength (MPa)	
		Tension	Compression
2890	0.38	60	143

なお、No. 3, 4 の試験片においては、 l_1 の範囲も円弧の一部として端部方向へ試験片幅を増大させ、また No. 5, 6, 7 の試験片においては、端部から 15 mm の範囲の幅を 70 mm とし、荷重位置 d_1 を大きくとることを可能にした。したがって、これらの場合の l_1 は、き裂長さ a が増大する方向に試験片幅が増大しはじめる位置までの端部からの距離ということになる。

4.2 負 荷 方 式

荷重は Fig. 9 に示す 2 つの方式で行った。(a) は 1

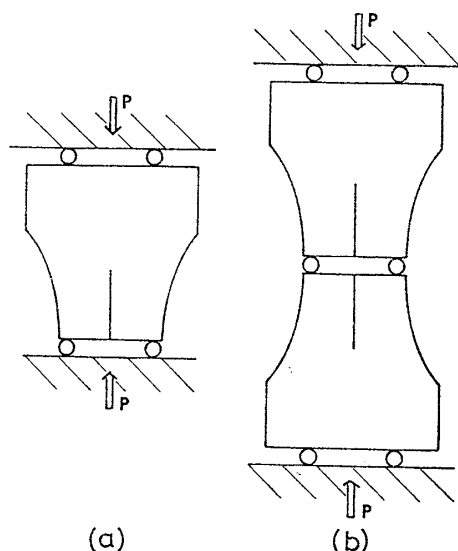


Fig. 9 Loading methods of the TDCBC test

つの試験片に平板上に置いた鋼製のピンを介して負荷する方式であり、(b)は2つの試験片を切欠側を向い合せるようにピンを介して重ね合せ切欠反対側端面にピンを介して負荷する方式である。

試験片が圧縮荷重を受けると切欠を開く方向のモーメントを生じるため、切欠側の負荷位置は外側へ変位することになる。(a)の負荷方式ではこの変位がピンと平板間の摩擦により拘束されるおそれがあるのに対して、(b)の負荷方式ではそのおそれがない。

なお、試験片の回転変形に対する摩擦の影響を取り除くために、切欠側のピンには厚さ 0.1 mm のテフロンシートを巻きつけた。

4.3 結 果

(1) き裂の進展特性

本試験においてはき裂の進展に関して特徴的な2つの現象がみられた。1つは、PMMA 材は引張力を受ければきわめて脆く不安定に破壊する特性を有しているにもかかわらず、本試験においては荷重の増大に伴いき裂が徐々に進展するという安定な破壊がみられたことである。他の1つは、平滑な TDCB 試験片にき裂を開く方向の引張力を作用させた場合のき裂進展径路は対称軸上からそれるにもかかわらず、本試験においては Photo. 1 に示すようにき裂がほぼ直進するという現象がみられたことである。

Photo. 1 に示した No. 1 の試験片の破壊（負荷方式は Fig. 9 の (b)）の経過は以下のものであった。荷重が 1.15 tf (11.27 kN) に達した時点で2つの試験片に相前後してき裂が発生し、約 20 mm 程度進展して停止した。その後は荷重の増大に伴いき裂が徐々に成長した。き裂長さ（切欠をも含めた全長をいう）が 90 mm 程度となった頃から荷重がほとんど上昇しないにもかかわらず

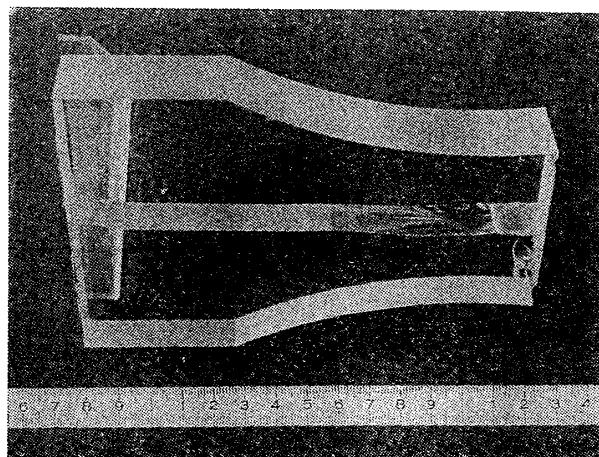


Photo. 1 Crack path in No. 1 specimen obtained by the TDCBC test

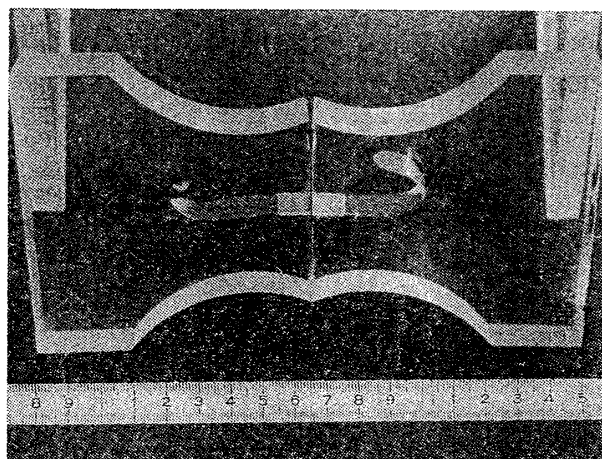


Photo. 2 Crack paths in No. 4 specimens obtained by the TDCBC test

ずき裂が進展し、き裂長さが 100 mm 程度、荷重が 2.99 tf (29.3 kN) で不安定に破断した。

不安定に破壊した破面はきわめてなめらかであるのに対して、安定に破壊した破面にはシェブロンパターンに似た筋状の模様が認められるという相違はあるが、ともに塑性変形をほとんど生じないへき開破面であった。なお、安定にき裂が成長しているときの K 値は後に示すようにほぼ一定であった。

Fig. 8 (b) の負荷方式で得られたき裂の直進性に関する結果を負荷位置 d_1 と試験片の最小幅 h_1 との関係で Fig. 10 に示す。おおむね $h_1 > d_1$ のときに直進している。 d_1 に対して h_1 が大きくなればき裂が直進しやすくなるのは、 h_1 の増大に伴い K 値とほぼ比例関係にある曲げモーメント M に対するき裂平行方向の圧縮力の比が大となり（ただし、 $M < 0$ となる程度に h_1 が大となった場合を除く）、この圧縮力がき裂がそれるのを防げるためと理解される。Photo. 2 に示すように No. 4 の試験片ではき裂が 30~40 mm となった時点で急激に曲がるという現象もみられた。き裂の直進性の解析的な評

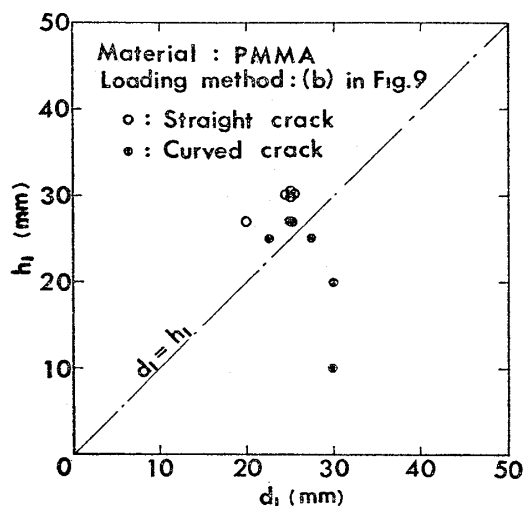


Fig. 10 The effects of h_1 on d_1 on the crack path directional stability

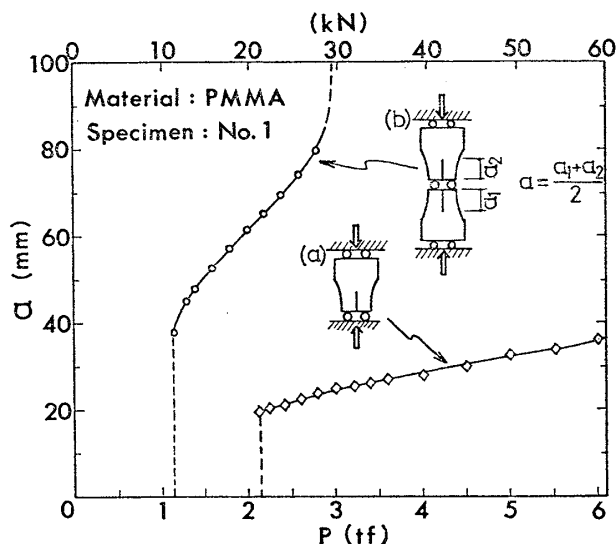


Fig. 11 The relation between P and a obtained by TDCBC test

価は、征矢⁷が行ったように、進展方向がそれたき裂がその後どの方向に進むかを検討することにより可能と考えられる。

(2) 負荷方式の影響

No. 1 の試験片に Fig. 9 の (a), (b) 2つの負荷方式で破壊試験を実施し、荷重 P とき裂長さ a の関係を求めた結果を Fig. 11 に示す。

(a) の負荷方式で得られたき裂は (b) の負荷方式で得られたき裂に比べてかなり短く、ピンと平板との間の摩擦の影響が大きいことがわかる。したがって、TDCBC 試験においては、Fig. 9 (b) の負荷方式のように切欠側負荷点に生ずる開口型変位を拘束しない方式で行うことが必要であろう。

(3) き裂進展時の K 値

Fig. 9 (b) の負荷方式で得られた Fig. 11 の P - a 関係から求めたき裂進展時の K 値 K_c を a との関係で

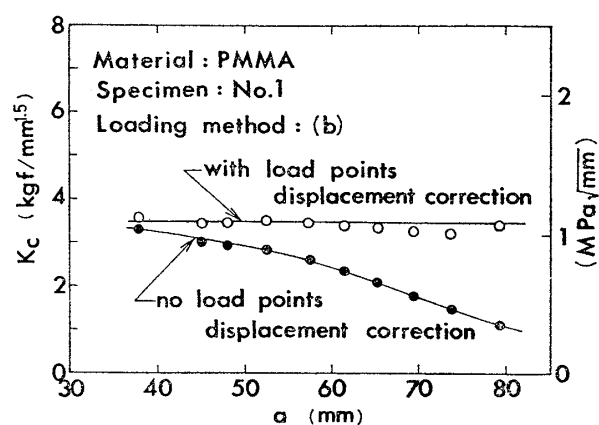


Fig. 12 K_c -value of stably growing crack

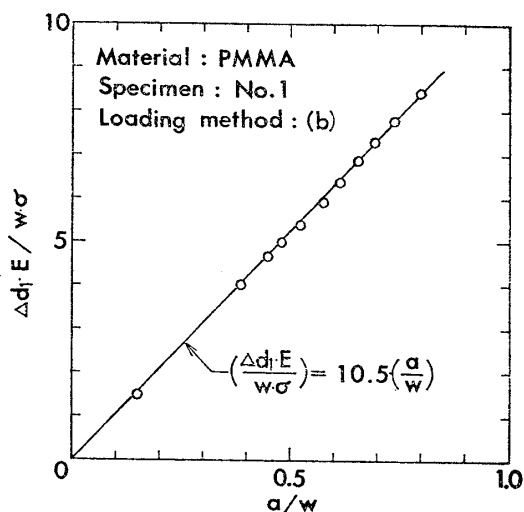


Fig. 13 Loading points displacement as a function of the crack length

Fig. 12 に示す。 K_c 値としては、切欠側負荷点の変位しないとして求めた値、および Fig. 13 に示す負荷点の変位量の実測値を用い(4)、(5)式から求めた補正値の両者を示した。負荷点の変位を考慮に入れて求めた K_c 値はほぼ一定であり、き裂の安定成長は $K = K_c$ の条件を満たしながらき裂が成長していると考えられる。

荷重点の変位は材料のヤング率 E に反比例すると考えられる。鋼材の E は $21,000 \text{ kgf/mm}^2$ ($206,000 \text{ MPa}$) と PMMA の 295 kgf/mm^2 ($2,890 \text{ MPa}$) に比べて大きい。このため、鋼材で製作した同程度の寸法の試験片を用いて疲労き裂伝播試験を行い、き裂進展の下限界値 ΔK_{th} を求めるような場合には負荷点の変位を無視し K 値を求めても大きい誤差は生じないことになることが期待される。

5 考 察

TDCB 試験片のき裂に平行な方向に圧縮力を作用させるという比較的簡単な TDCBC 試験法により、定荷重下でのき裂進展に対して K 値減少傾向を得ることができた。試験片の形状、寸法を適当に設定することによ

り、平滑な試験片においてき裂を直進させることができ、疲労き裂伝播試験を実施できる程度の K 値を得ることができる。き裂進展経路に沿って溝を設けてき裂の直進性を確保すれば、負荷位置を外側へずらすことにより大きい K 値を得ることも可能である。

しかし、TDCBC 試験法には以下に述べるような問題点があるので、試験片の設計、試験の計画にあたってはこれらに留意する必要がある。

(a) 負荷位置、特にき裂側負荷位置の変位あるいは設定誤差により生じる K 値の変動が従来の試験片・負荷法に比べて大きい。

(b) 圧縮荷重による試験であるため薄板の試験には適さない。

(c) 大きい圧縮力を作用させた場合には負荷部分の強度が問題となる。特に脆い材料に大きい圧縮力を作用させると負荷部分が破壊し破片が飛散するおそれがある。

(d) 摩擦の影響を取り除くため試験片を2段重ねとして試験を行うが、高速のき裂伝播試験においては2つのき裂の長さの対称性が得られないおそれがある。

6 結 論

定荷重下においてき裂の進展とともに K 値が減少する傾向を有する新しいタイプの試験法として、TDCB試験片のき裂に平行な方向に圧縮力を作用させる TDCBC試験法を提案し、その特性について種々の検討を行った。得られた結果を以下に示す。

(1) き裂に平行な方向に圧縮力を作用させることにより引張りの K 値が発生し、試験片の幅が増大するに伴い K 値が減少する。

(2) 円弧の一部として幅が増大する TDCB 試験片について K 値の数値解析を行い試験片形状、負荷位置が K 値に及ぼす影響について検討した。また、2, 3 の

試験片形状について K 値算定のための多項近似式を与えた。

(3) PMMA 板を用いて製作した試験片の静的破壊試験を実施した結果、き裂に直角な方向に引張力を作用させて破壊させた場合に比べてき裂が直進しやすいこと、 K 値減少傾向域では脆性き裂が荷重の増大に伴い徐々に進展すること、き裂が徐々に進展しているときの K 値はほぼ一定であることなどが確認された。

(4) 圧縮荷重の負荷は、試験片に生じる変形を拘束しないよう、2つの試験片を切欠側を向い合せるようにピンを介して重ね合せる方式で行う必要がある。

参 考 文 献

- 1) Y. W. Mai and A. G. Atkins : Crack Stability in Fracture Toughness Testing, J. of Strain Analysis, Vol.15, No. 2 (1980), p.63~74.
- 2) P. B. Crosley and E. J. Ripling : A Compact Specimen for Plane Strain Crack Arrest Toughness Testing, J. of Testing and Evaluation, Vol.8, No. 1 (1980), p.25~31.
- 3) C. Gurney and J. Hunt : Quasi-static Crack Propagation, Proc. Roy. Soc. London, A 299 (1967), p.508~524.
- 4) H. Tada, P. C. Paris and G. R. Irwin : The Stress Analysis of Cracks Handbook, Del Research Corporation (1973).
- 5) J. J. Benbow and F. C. Roesler : Experiments on Controlled Fractures, Proc. Phys. Soc. London, B 70 (1957), p.201~211.
- 6) 徳田直明 : 2次元クラックの K 値解析プログラム, 石川島播磨技報, 第 17 巻, 第 6 号 (1977), p.553~557.
- 7) 征矢勇夫, 佐藤光雄, 中村良昭, 谷口至良 : 脆性破壊伝播停止特性に関する小型試験法の検討, 日本造船学会論文集, 第 139 号 (1976), p.274~283.