

準脆性材料の動的クラック伝播

小林 昭・大谷 信男

概要

準脆性材料の動的クラック伝播について、PMMA を対象とした研究を行ない、既に著者らによって明らかにされている、ひずみ速度に依存する動的クラック伝播速度は、本質的な粘弾性効果によるエネルギーの逸散に、ほぼ起因するものと推定され得る結果を得、外的ひずみ速度が高まるにつれて、徐々に完全脆性弾性体としての挙動を示し、完全脆性理論値に近づくことがわかった。

1. 序

PMMA (Polymethyl methacrylate) は、低温での鋼の脆性破壊挙動をよく類似するものとしてしばしば用いられるが、常温では、Berry [1] が示しているように、巨視的には Griffith の完全脆性弾性体の破壊理論によくあっており、したがって、その動的クラック伝播もこれに準じて取扱われてきた。

しかし、最近著者ら [2] が PMMA に対して行なった、外的ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ の異なった動的クラック伝播の実験においては、クラック伝播速度 \dot{a} は、常温において明らかに $\dot{\epsilon}$ に対して依存性を示し、高いひずみ速度 ($\dot{\epsilon} \approx 50/s$) で、Mott [3], Berry [4] らによる完全脆性弾性体の理論クラック伝播速度によくあった値を示す反面、 $\dot{\epsilon} \approx 10^{-3} \sim 10^{-4}/s$ の準静的場合に著しく理論曲線からはづれる結果を得た。完全脆性弾性体では、ヤング係数 E はひずみ速度に無関係に一定であり、従って後述の (1) 式より理論クラック伝播速度もひずみ速度に依存しないはずであるから、このことは、PMMA が完全脆性弾性体でないことを意味するものであり、これに対して、Mott の理論の成立を前提として、粘弾性解析によるヤング係数 E のひずみ速度依存性に基づく修正により説明を試みたが、準静的場合については、完全脆性弾性体の動的クラック伝播理論の範囲内では満足な解釈が得られなかった。

そこで、ここでは PMMA を本質的には粘弾性を呈する準脆性材料と考え、ひずみ速度に応じた完全脆性理論曲線への接近の度合を調べる上記現象の新たな解明を行なった。

2. 粘弾性の動的クラック伝播曲線におよぼす影響

PMMA を粘弾性体と考えると、ひずみ速度の小さい、いわゆる準静的場合には、粘性項が十分に働いて塑性流動域が拡散された状態になって、クラック伝播中の逸散過程が増して完全脆性弾性体の状態から遠ざかることになって、クラック伝播速度 \dot{a} が減少すると思われ、一方、ひずみ速度の大きい場合には、これと逆に粘性項が働くひまがなく、弾性項のみが応答して、より完全脆性弾性体に近い状態になるものと予想される。事実、従来からこの

種高分子には、低温若くは高ひずみ速度で、脆性を呈することが一般に認められている。ゆえに動的クラック伝播速度 \dot{c} ~ クラック長さ c/c_0 は、第1図のように、ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ に対する依存性を示しながら、 $\dot{\epsilon}$ が増加するにつれて、完全脆性理論曲線帯に近づくものと推察される。この完全脆性理論曲線帯は、Mott の理論を拡張して、鈍い初期クラック先端半径の場合にも適用できる Berry の式 [4]、すなわち、

$$\dot{c} = \dot{c}_{\max} \sqrt{1 - \left(\frac{c_0}{c}\right)^2 - 2\left(\frac{\sigma_0}{\sigma_f}\right)^2 \frac{c_0}{c} \left(1 - \frac{c_0}{c}\right)} \quad (1)$$

で与えられる上限および下限によって区切られるものであり、

$$\text{この上限は、} \sigma_f = \infty \text{ で } \dot{c} = \dot{c}_{\max} \sqrt{1 - \left(\frac{c_0}{c}\right)^2} \quad (2)$$

$$\text{又、下限は、} \sigma_f = \sigma_0 \text{ で } \dot{c} = \dot{c}_{\max} \left(1 - \frac{c_0}{c}\right) \quad (3)$$

で与えられる。この下限は、初期クラック先端半径が微小な場合の、改良 Mott の理論による結果 [5] に帰着する。ここに、 c = クラック長さ、 \dot{c} = クラック伝播速度、 \dot{c}_{\max} = 最大クラック伝播速度 = $0.38\sqrt{\frac{E}{\rho}}$ 、 c_0 = 初期クラック長さ、 $\sigma_0 = \sqrt{\frac{2\gamma E}{\pi c_0}} = c_0$ の時の Griffith の破壊応力、 γ = 比表面エネルギー、 σ_f = 破断応力、 E = ヤング率、 ρ = 密度、である。

今、粘弾性体としてもっとも基礎的な3要素モデル(第2図)で考えると、その応力~ひずみ関係は、一定ひずみ速度 = K として、

$$\sigma = \frac{E_1^2 \eta K}{(E_1 + E_2)^2} \left(1 - e^{-\frac{E_1 + E_2}{\eta} \frac{\epsilon}{K}}\right) + \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2} \epsilon \quad (4)$$

で与えられるから、[2]、ひずみ速度が増すにつれて、 $\sigma \sim \epsilon$ 関係の原点でのこう配、すなわち、ヤング率 E は $K = \infty$ の場合、

$$\sigma = E_1 \epsilon \quad (5)$$

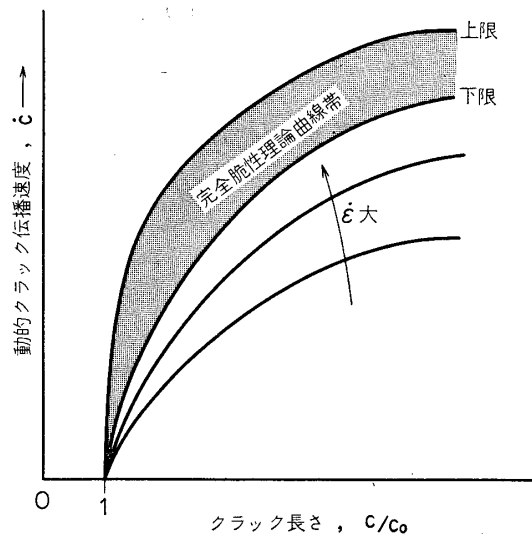
となり、これは、スプリング E_1 のみが働く、完全弾性体となっていることを示すもので、逆に、ひずみ速度が減少して、ついには $K \approx 0$ ではいわゆる準静的場合で、

$$\sigma = \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2} \epsilon \quad (6)$$

となる。明らかに(5)、(6)より、

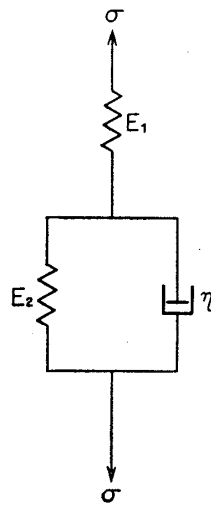
$$E_1 > \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2} \quad (7)$$

であるから、高ひずみ速度になるほど、ヤング率 E が増大することがわかる(第3図)。しかるに、(2)、(3)式より E が大きくなれば、クラック伝播速度 \dot{c} も増すことが分る。ま

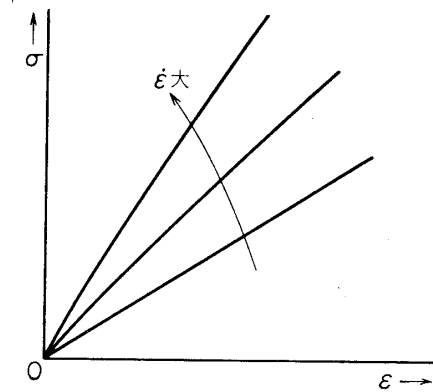


第1図 粘弾性体における動的クラック伝播のひずみ速度依存性

た、高ひずみ速度下では、より脆性化することが認められている。これらから、前述したような高分子が、高ひずみ速度下でクラック伝播を生じるときは、ひずみ速度の上昇に伴って、だんだんと完全脆性弾性体の挙動を示し、クラック伝播速度 v は早くなって、完全脆性理論帯に近づいていくものと解される。つまり、最初、粘弾性体として挙動していたものが、ひずみ速度の増大に伴って、完全脆性弾性体に近づくと考えるのである。



第 2 図 3要素モデル



第 3 図 Eのひずみ速度依存性

3. 実験手法

3.1 試験機

(株)東洋ボールドウィン製 UTM-1 インストロン型万能試験機

最大能力 5000kg

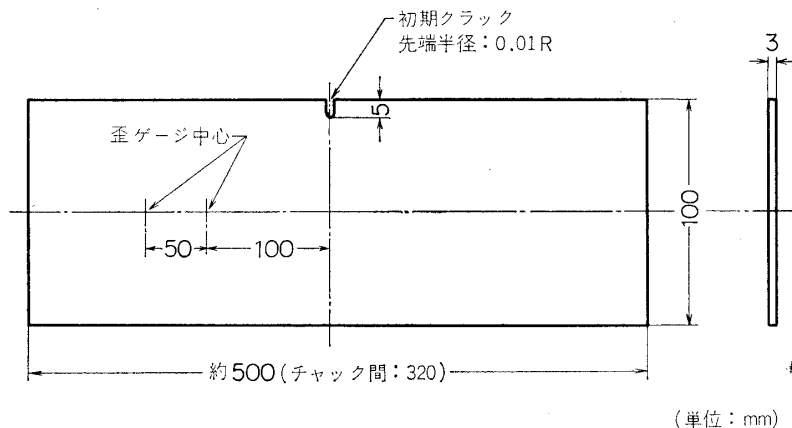
使用クロスヘッド速度 500mm/分……歪速度 $\dot{\epsilon} = 2.6 \times 10^{-2}/s$ 相当

0.5mm/分……歪速度 $\dot{\epsilon} = 2.6 \times 10^{-5}/s$ 相当

0.005mm/分……歪速度 $\dot{\epsilon} = 2.6 \times 10^{-7}/s$ 相当

2.3 試験片

住友化学(株)製 PMMA 板(商品名スミペックス)より第4図の形状寸法の試験片を製作した。初期クラック先端半径は、0.01mm、初期クラック長さ $c_0 = 5mm$ である。なお、試験機付属のロードセルにより σ_f を測定したが、2枚の抵抗線式ひずみゲージ((株)共和電



(単位: mm)

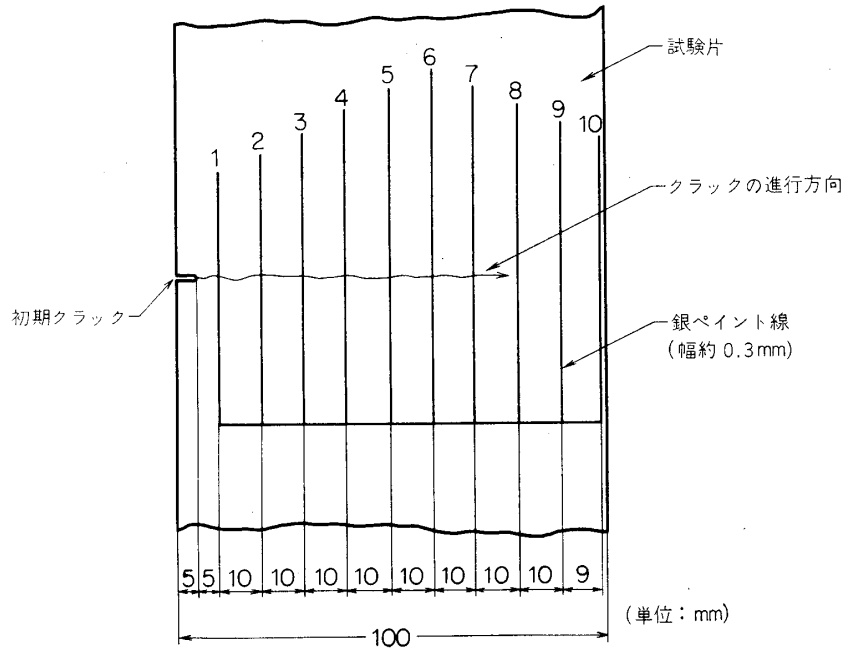
第 4 図 試験片形状寸法

業製, KFC-2-500-C1-11) による測定も平行して行なった. 3要素モデルとしての定数は, 21°C におけるクリープ試験により, $E_1=397\text{ kg/mm}^2$, $E_2=1233\text{ kg/mm}^2$, $\eta=197\text{ kg}\cdot\text{s/mm}^2$ を示した.

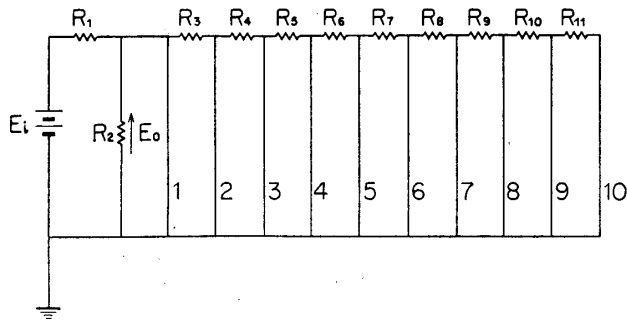
3.3 速度ゲージ (Velocity Gage)

速度ゲージ法は, 導電性ペイント線をクラックの進行によって切断して, 抵抗変化を生じさせることを利用したもので, 比較的実績ある測定手法である.

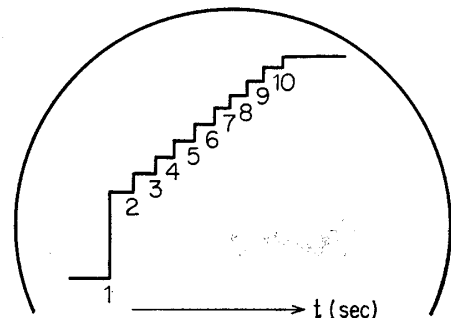
第5図に示すように, 米国 DuPont 社製特殊導電性銀ペイント (DuPont No.4817 Conductive Silver Coating Material) を幅約 0.3mm で試験片表面上のクラック伝播予想径路上に塗り, 第6図の電気的回路を構成させ, シンクロスコープ (岩崎通信機(株)製 DS-5305B) に接続する.



第5図 銀ペイント線の配置



第6図 速度ゲージ回路

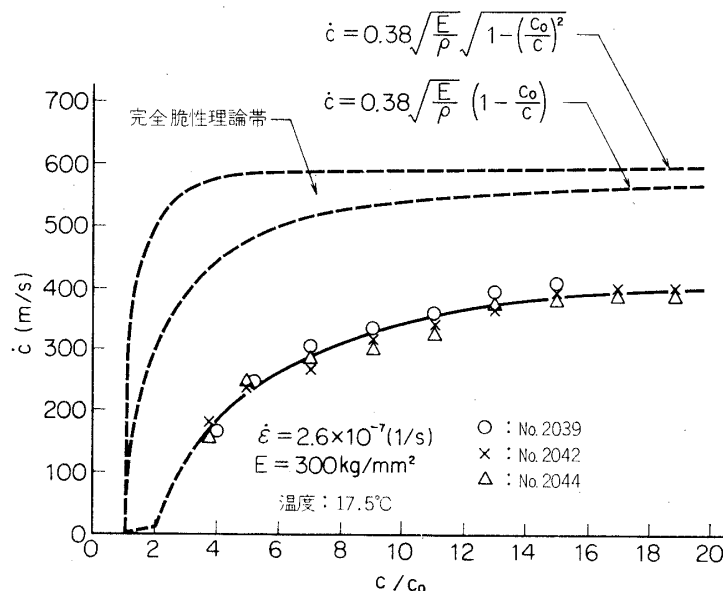


第7図 ブラウン管上の波形

クラック伝播により、これら銀ペイント線が切れて電氣的信号を出すのを、前記シンクロスコープに記録すれば、第7図のようなブラウン管上の波形が得られ、従って銀ペイント線間の各区間における平均クラック伝播速度が求められる。なお銀ペイント線間のクラック径路長の測定は、銀ペイント線の中央から中央までを、実際に得られた径路に沿って行なった。

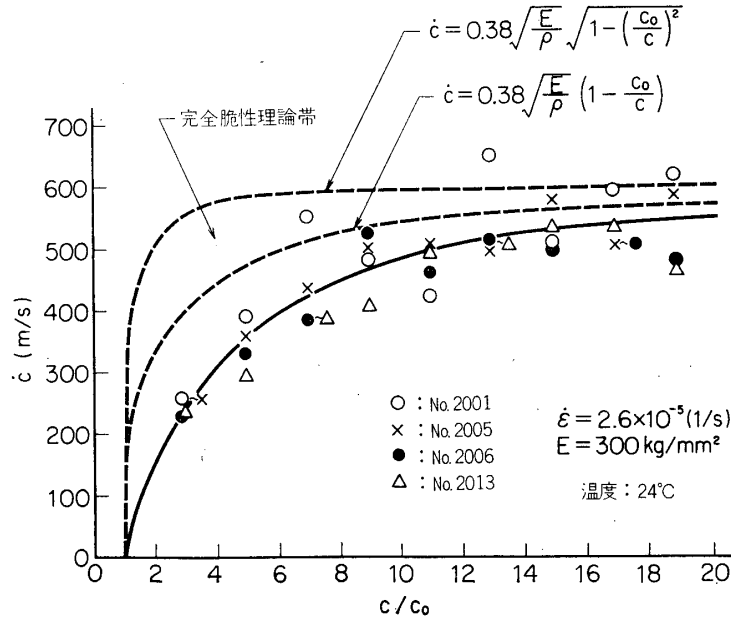
4. 実験結果と検討

上述のようにして、測定した動的クラック伝播速度 \dot{c} とクラック長さ比 c/c_0 との関係第8～10図に示す。これらにおいて、点線は、前述(2)、(3)式で与えられる、完全脆性弾性体の動的クラック伝播速度の上限および下限を示している。また、実験値の最小自乗法処理による実線を記入してある。第8図は、 $\dot{\epsilon} = 2.6 \times 10^{-7}/s$ のひずみ速度で試験片を引張った場合であるが、この場合は、 E は(6)式の $K \approx 0$ の場合と同じと考えてよく、 $E = 300 \text{ kg/mm}^2$ となる。 $\dot{\epsilon}$ が小さいために、3要素モデルの粘性項のみが働いて弾性要素はほとんど働かず明らかに粘弾性が顕著のためにエネルギー逸散過程が強まり、その結果 \dot{c} は低く、完全脆性理論帯とかけはなれるものと思われる。第9図も、 $\dot{\epsilon} = 2.6 \times 10^{-5}/s$ と、依然、粘弾性が優勢を示して、 \dot{c} はやはり低く、理論値を下まわっているが、相当近づいていることが分る。この場合も、 E はやはり $K \approx 0$ の場合の $E = 300 \text{ kg/mm}^2$ としてさしつかえない。第10図は、 $\dot{\epsilon} = 2.6 \times 10^{-2}/s$ の場合で、相当する E は、 332 kg/mm^2 * になる。かなり $\dot{\epsilon}$ が大きくなって、それに伴って、より早く3要素モデルが引張られて、より弾性要素が力学特性上、優勢になって脆性弾性体としての挙動を示しはじめるものと考えられ、クラック伝播速

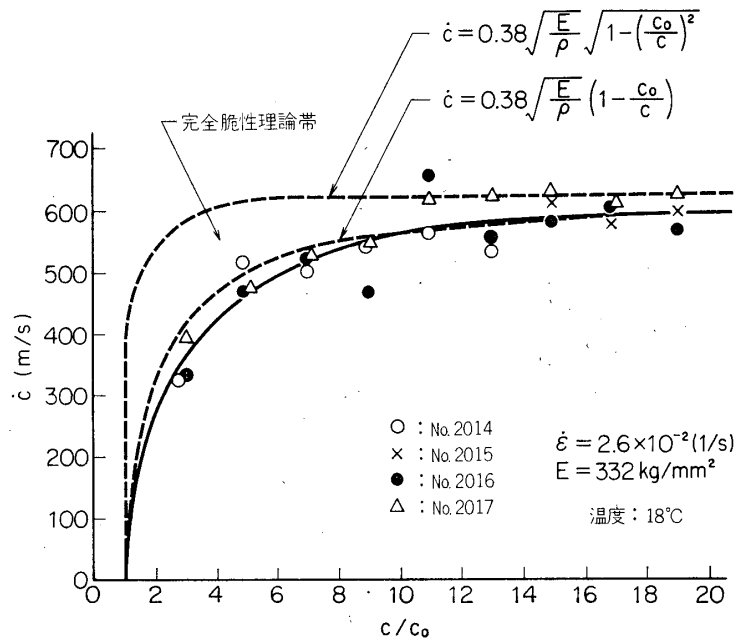


第8図 動的クラック伝播速度とクラック長さの関係
($\dot{\epsilon} = 2.6 \times 10^{-7} (1/s)$)

* 上・下限内のひずみ速度では(4)式より分るように E には必ず $\dot{\epsilon}$ が入ってくるが、ここでは $\dot{\epsilon} = 1\%$ の値を用いた。事実、実測値はほとんど $\dot{\epsilon}$ にかかわらず一定であった。



第9図 動的クラック伝播速度とクラック長さの関係
 ($\dot{\epsilon} = 2.6 \times 10^{-5} (1/s)$)

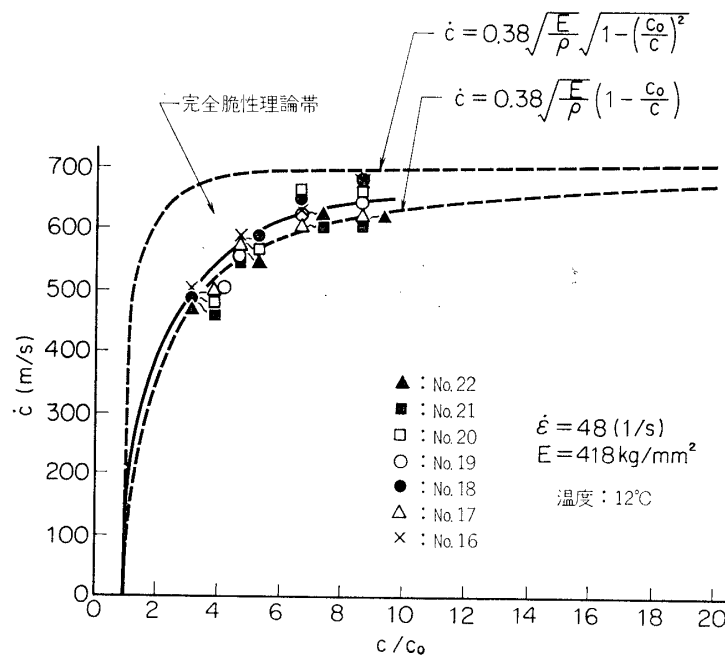


第10図 動的クラック伝播速度とクラック長さの関係
 ($\dot{\epsilon} = 2.6 \times 10^{-2} (1/s)$)

度は完全脆性体のクラック伝播理論による値に近づくことになる。事実、第10図より、実験データの最小自乗値はほぼ、理論下限値付近にまで到達している。元来、この下限値は、初期のクラック先端半径が微小のものとされているから、もし、完全脆性弾性体として挙動するならば、この実験での初期クラック先端半径は 0.01mm なので、理論下限値より上側に、実験点が得られるべきものと思われる。それゆえ、いまだ、多少は粘弾性の効果が存在していて、その実現を妨げているものと思われる。なお、温度が特に第9図の実験値では 24°C と多少、他の二つの場合より高かったが、その影響はないものと思われる。このように、ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ が大きくなるにつれて、だんだんと完全脆性弾性体としての挙動をするようになって、動的クラック伝播速度も完全脆性理論値に近づくことがわかる。

つまり、 $\dot{\epsilon}$ が小さい場合は PMMA のような本質的に粘弾性である準脆性材料は、完全脆性弾性体としての挙動をほとんど示さないのので、従って、Berry の式など、完全脆性弾性体に適用されているものを使うことはできないといえよう。

この実験では、試験機の性能上の制約から、これ以上の高ひずみ速度での実験は行なわれなかったが更により高ひずみ速度域での挙動については著者らが以前に PMMA について、改良インストロン型高速負荷装置（東洋ボールドウィン製 UTM-5）を用いて行なった実験結果を引用して、高ひずみ速度の影響を検討してみよう。[2] その結果を第11図にかかげる。この場合は 12°C において、 $E_1=418 \text{ kg/mm}^2$ 、 $E_2=1640 \text{ kg/mm}^2$ であるが、 $\dot{\epsilon}=48/s$ で行なった実験値は、ほぼ完全脆性理論帯内に入っている。事実、 $\dot{\epsilon}=48/s$ では、 $K=\infty$ （つまりひずみ速度が無限度）の場合と、 E を同一としても全くさしつかえないことが、(4)式よりいえることから、(5)式から得られる $E=418 \text{ kg/mm}^2$ をもつ完全脆性弾性体の挙動を



第11図 動的クラック伝播速度とクラック長さの関係
($\dot{\epsilon}=48(1/s)$)

していることと解される。すなわち、粘弾性体は $\dot{\epsilon}=48/s$ の高ひずみ速度では、ほぼ弾性要素のみが働き、3要素モデルのスプリング $E_1=418\text{kg/mm}^2$ のみが動いて、脆性弾性体として挙動し、従って、その動的クラック伝播特性も完全脆性理論解にあうようになると思われる。ただし、第11図の実験データは、試験温度が異なることや、試験片寸法、ロットがちがうことや、初期クラック形状も 52° 頂角のノッチとしている点や、試験片幅がせまく、 $c/c_0 \leq 9$ であることなどのため、前掲の第8~10図と完全な比較は期しがたいが、傾向としては十分評価でき、上記の判断はまず妥当と思われる。今後、更に追試を行なって完全なデータを得るつもりである。

破断応力 σ_f も平行して計測したが、その結果は第1表に示すように、ばらつきはあるが、動的クラック伝播速度がひずみ速度が上昇するに従って上昇すると、 σ_f も上昇している。このことは、前述(2)、(3)式からもうなづけるものである。ロードセルによる値とひずみゲージによる値とは計測した範囲ではおおむね実験誤差の範囲内でよく一致していた。

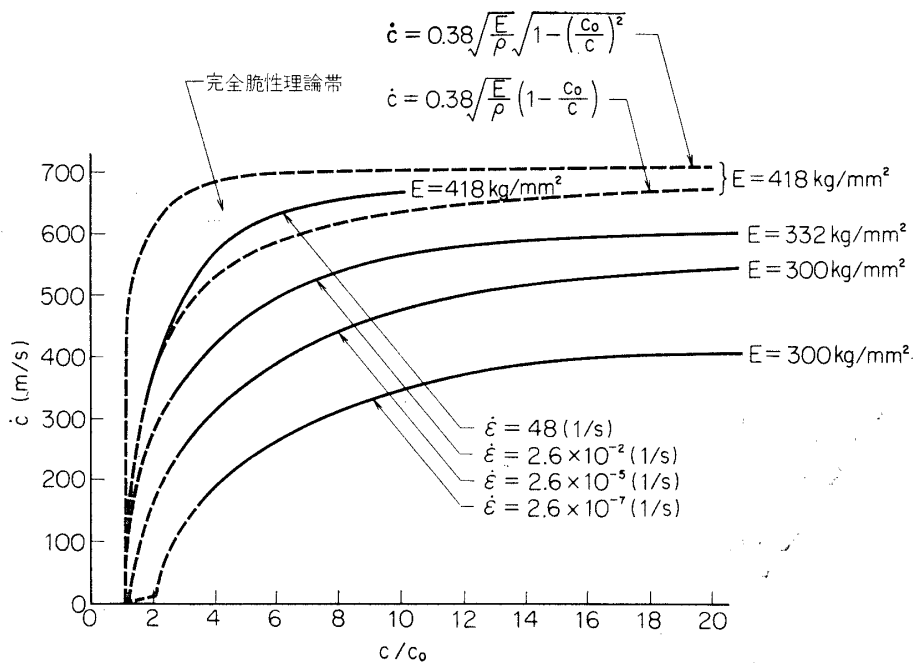
なお、 σ_0 の値を、 $\gamma E=(5.67 \pm 1.42) \times 10^{15} \text{dynes/cm}^2$ [6]、 $c_0=5\text{mm}$ とすれば $\sigma_0=0.74 \sim 0.95\text{kg/mm}^2$ となる。このとき、動的クラック伝播速度は(3)式で与えられるが、 $\sigma_f=\sigma_0$ の場合の微小な初期クラック先端半径 ρ は、 $\rho=10^{-6}\text{mm}$ のオーダーであるので [7] この実験の場合の $\rho=0.01\text{mm}$ の実験結果は、 ρ がより鈍いことから、応力集中度が小さく従って、

第1表 破断応力 σ_f の値

ひずみ速度 $\dot{\epsilon}(1/s)$	試験片番号	破断応力 $\sigma_f(\text{kg/mm}^2)$	備考
2.6×10^{-2}	2014	1.40	ひずみゲージ値より $E=332\text{kg/mm}^2$ として算出。 No.17の σ_f はやや不正確。 温度 18°C
	2015	1.33	
	2016	1.33	
	2017	1.60	
	平均	1.47	
2.6×10^{-5}	2001	0.90	ロードセル値 温度 24°C
	2005	0.95	
	2006	1.15	
	2013	1.11	
	平均	1.03	
2.6×10^{-7}	2039	0.75	ロードセル値 温度 17.5°C
	2042	0.56	
	2044	0.61	
	平均	0.64	

σ_f は大きくなり、もし、完全脆性弾性体として挙動するならば当然この場合の σ_f が σ_g より上まわり、 $\sigma_f = \sigma_g$ の下限よりも上方に位置せねばならないことになるが、第 12 図ならびに第 1 表よりは、 $\dot{\epsilon} = 2.6 \times 10^{-2}/s$ の場合でも、動的クラック速度曲線は、 $\sigma_f = 1.47 \text{kg/mm}^2$ を示しながらも、 $\sigma_f = \sigma_g$ の下限曲線の下側にとどまっていることは、依然この程度のひずみ速度では完全脆性弾性体の挙動をしないことを意味している。 $\dot{\epsilon} = 48/s$ では、 σ_f の計測を行なっていなかったため、その値が不明であるが、 $\rho = 0.01 \text{mm}$ の実験データが、上、下限内に入っていることから、完全脆性弾性体の挙動をしていると解され、このときの σ_f は σ_g より上まわっているものと思われる。

以上、PMMA のような準脆性材料についてひずみ速度が動的クラック伝播におよぼす影響を検討した結果をまとめて第 12 図に示すが、ひずみ速度の大小により、完全脆性理論値からのへだたり方が理解される。従来、PMMA は、完全脆性弾性体として動的クラック伝播の場合も考えられているようであるが、常温では、かなりの高ひずみ速度にならないと、その適用が無理であることを意味するものといえよう。



第 12 図 ひずみ速度の動的クラック伝播におよぼす影響

5. 結 論

PMMA のような準脆性材料の動的クラック伝播特性は、ひずみ速度依存性を示すことがわかった。ひずみ速度が大きくなると徐々に完全脆性弾性体としての挙動を示し、脆性クラック伝播理論にあうようになり、PMMA の場合、常温ではひずみ速度 $\dot{\epsilon} = 48/s$ 程度での実験的確認を得た。このような原因としては、PMMA の本質的性質の粘弾性に起因する、クラック伝播中のエネルギー逸散の強弱によるものと思われる。

謝 辞

東大宇宙航空研究所 河田幸三教授のご激励に謝意を表すと共に、同所小林研究室 佐藤正君および野坂慶蔵君の協力を御礼を申上げるものである。

1972年4月11日 材料部

参 考 文 献

- [1] J. P. Berry, "Brittle Behavior of Polymeric Solids," in "Fracture Processes in Polymeric Solids," edited by B. Rosen, Interscience Publishers, p. 195 (1964)
- [2] 小林昭, 大谷信男, 佐藤正, "動的クラック伝播におよぼすひずみ速度効果", 東大宇宙航空研究所報告, 第6巻第3号 (B). p. 738 (1970)
- [3] N. F. Mott, "Fracture of Metals: Theoretical Considerations," Engineering, 165, p. 16 (1948)
- [4] J. P. Berry, "Some Kinetic Considerations of the Griffith Criterion for Fracture—I" (Journal of Mechanics and Physics of Solids, 8, p. 194 (1960)
- [5] E. N. Dulaney and W. F. Brace, "Velocity Behavior of a Growing Crack," J. Appl Phys, Vol. 31, No. 12, p. 2233 (1960)
- [6] 文献 [1], p. 216.
- [7] A. S. Tetelman and A. J. McEviley, Jr. "Fracture of Structural Materials," John Wiley, p. 51 (1967)