

鋼槌の横衝突によりPMMA梁に作用する荷重及び応力の計測

川建, 和雄
九州大学応用力学研究所 : 助教授

石井, 秀夫
九州大学応用力学研究所 : 助手

篠崎, 高茂
九州大学応用力学研究所 : 文部技官

<https://doi.org/10.15017/4743565>

出版情報 : 應用力學研究所所報. 45, pp.385-396, 1976-11. 九州大学応用力学研究所
バージョン :
権利関係 :



鋼槌の横衝突により PMMA 梁に作用 する荷重及び応力の計測†

川 建 和 雄* 石 井 秀 夫**
篠 崎 高 茂***

概 要

高分子固体材料に横衝突が加わった時の力学的機構を明らかにするため、前報に続き、実験を行った。高10×幅10×長80及び120各mmのPMMA供試片に、先端半径1mm深さ2及び5mmの切欠を付けた。支持点間隔40及び100mmに設定し、空気式滑動台を用いて負荷、光干渉法及び光弾性法により、亀裂発生あるいは破断までの時間、試片に作用する荷重及び応力を測定した。

衝撃値は、切欠深さ小且つ支持点間隔大の時、大きくなる。亀裂発生までの時間は、切欠深さ小、支持点間隔大、且つ衝突速度小さる程、大である。亀裂発生から破断までの時間は、切欠深さによらず、支持点間隔40mmの時40~50 μ s、100mmの時70 μ sであった。弾性接触論と梁理論を組合せた荷重の計算法を用いた結果は、今回の荷重実測結果ともよく一致した。亀裂発生時の切欠底応力は、切欠深さに関係なく、一定である。

1. 結 言

高分子固体材料の耐衝撃特性を表す一つの目安としてしばしば Charpy 衝撃試験が行われる。しかしながら、得られた衝撃値の有する材料力学的意義が明確でないという難点¹⁾があり、これを取り除くために、数多くの研究が行われてきた。われわれもこれまでに、高分子固体材料に横衝撃が加わる際の力学的機構を明らかにするための基礎的実験を行ってきた²⁾³⁾。すなわち、光弾性撮影と光干渉法を用いて、衝突を受けるアクリル梁の亀裂発生あるいは破断に至るまでの時間と試片に作用する荷重を計測するとともに、その間に生ずる応力を求めた。その結果、

1) 亀裂発生までの時間 t_c は、衝突速度および切欠深さにより変化するけれども、亀裂発生から破断に至るまでの時間 $t_f - t_c$ は略一定、そこで用いた10×10×55各mm、支点間距離40mm、の試片では、切欠深さ1, 2, 5mm、先端半径1mmに関係なく、40~50 μ sであり、且つ $(t_f - t_c)t_c \leq 0.1$

† その一部は、昭和50年5月21日 日本材料学会第24期総会学術講演会 及び昭和50年10月8日 第19回材料研究連合講演会において講演、材料第25巻第269号179—185ページ昭和51年2月 及び Proceedings of the nineteenth Japan Congress on Materials Research, pp. 201—207, 1976 に所載

* 九州大学助教授、応用力学研究所

** 九州大学助手、応用力学研究所

*** 九州大学応用力学研究所文部技官

(高々). 従って, 衝撃値の大小は, 主として, 衝突から亀裂発生までの過程に依存する.

2) 衝突から亀裂発生までの試片に作用する荷重は, 梁理論と接触論を用いて計算することができる. 計算結果は実測結果と良い一致を示す.

3) 亀裂発生時の切欠底等色線縞次数は, 切欠深さに無関係に略一定であり, 静的な場合に得られた光弾性感度を用いて応力に換算すると, $8\sim 9\text{ kg/mm}^2$ となることを明らかにした.

その後, 試片の全長および支持点間隔を変化させて, 前回と同じ目的で追加試験を行なったので報告する.

2. 実 験 方 法

2.1. 供 試 片

市販のポリメチルメタクリレート (PMMA) 板から切欠試験片を準備した. 高さ $h=10\text{ mm}$, 幅 $a=10\text{ mm}$ (板厚方向にとる) とし, 今回は全長 $L=80$ および 120 mm の供試片に, 先端半径 $r=1\text{ mm}$ を持つ, 深さ $d=2$ 及び 5 mm の切欠をつけた. 図 1 参照. 鋼槌との接触を検出するため, 切欠部の反対側に, 導電塗料を塗り銅線を接着した.

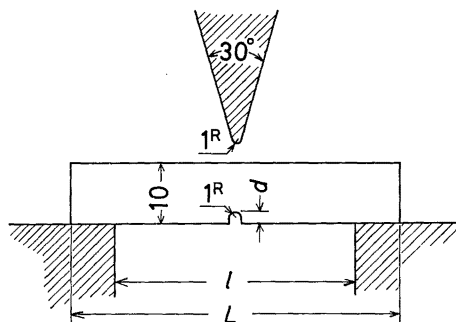


図 1 試 片

2.2. 負荷装置及び鋼槌

前報と同様²⁾³⁾, 空気式滑動台及び鋼槌により, 供試片に横衝突を与えた. 供試片支持用鋼製台は, その間隔 $l=40$ 及び 100 mm と 2 種類の配置をした. 鋼槌は Charpy 試験と同じく先端半径 $R=1\text{ mm}$ となるように製作しており, その上面には速度検出用に押ピン 2 個 (間隔 13 mm), 及び変位検出に用いる光干渉用アクリル板が接着してある. 全重量 $W=0.615\text{ kg}$. 供試片との接触を検出するため後尾に銅線を接着してある.

2.3. 光 弾 性

供試片中の亀裂発生及び応力状態をしるために, 光弾性法により計測した. 光源は東芝製マルチジェイアントパルスレーザである³⁾. ルビーレーザ光が DKDP 結晶のポッケルスセルにより変調され, 偏光パルス列が得られる. 図 2 参照. 主要性能: 波長 6943 Å , パルス幅約 40 ns , 繰返し速度 200 kHz ,

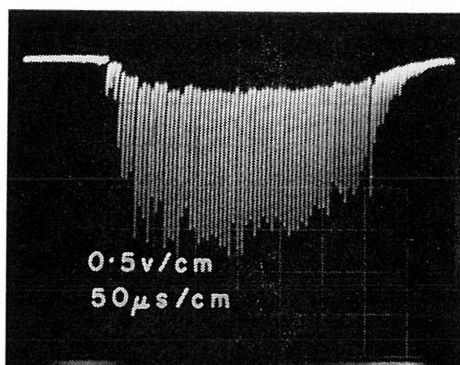


図 2 レーザ光パルス図

最大出力約 100 KW, 露光時間最大 0.5 ms, ビーム角 10 mrad, ビーム径 8 mm, 光路に偏光子, 四分の一波長板 2 個, 及び解析器を暗視野となるよう配置した。

2.4. 撮影及び実験手順

前報同様²⁾³⁾, 日立製流しカメラ SP1 のスリット部を除き, 暗室状態で撮影した。Kodak 2475 フィルムを使用した。フィルム上の光通過速度は $2\text{ mm}/\mu\text{s}$ であった。

鋼槌と供試片の接触により生じた電圧をカウンタのトリガ信号とする。一方, 供試片前面 123 mm に設けられた光電検出器は, 鋼槌の通過を感知すると, その出力信号でレーザ電源部を駆動する。撮影時間 0.3 ms 以内に亀裂発生及び破壊を記録するために, この信号を任意時間遅らせて Qスイッチを駆

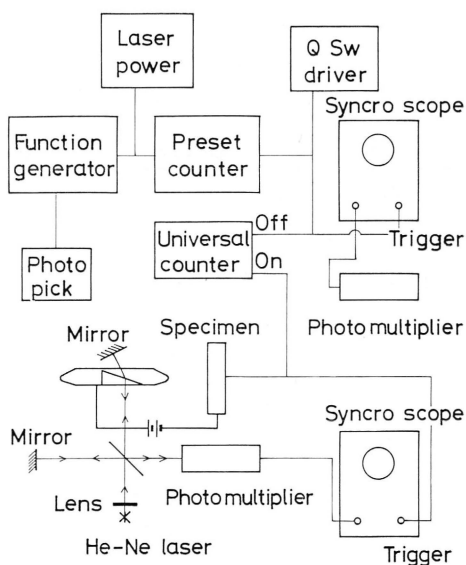


図 3 計測系統図

動する。同時にカウンタの停止信号とする。これは又オシロスコープのトリガとして用いられる。レーザの発光状態は、光電子増倍管を経て、オシロスコープに導かれ、ポラロイド上に記録される。図 3 参照。

このように、光電検出器、カウンタ、プリセットカウンタ、オシロスコープ、撮影結果を用いて、鋼槌と試片の衝突から亀裂発生及び破断までの時間を求めた。上記のことと平行して、光干渉法により鋼槌の変位を求めた。又、光電検出器を用いて、鋼槌上 2 個の押ピンの通過に必要な時間を計測し、供試片支持位置での速度を推定、供試片破断直後の鋼槌速度とした。図 4 参照。

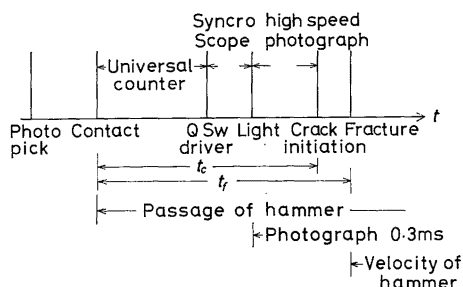


図 4 計 測

3. 結 果

3.1. 亀裂発生あるいは破断までの時間、及び衝撃値

図 5 の縦軸は衝撃値（衝突時および破断直後の鋼槌の運動エネルギーの差を試片の最小面積で除したもの）、横軸は亀裂発生までの時間 t_c 及びその右に亀裂発生から破断までの時間 $t_f - t_c$ である。支持点間隔 l が一定であれば、切欠深さ d が小さい程、衝撃値は大となる。全長 L の差による影響は見分けられなかった。又切欠深さが一定ならば、支持点間隔が大きいく程、衝撃値は大となる。更に、支持点間隔及び衝突速度が一定であれば、切欠深さが小さい程、亀裂発生までの時間は大となる。図 6 は、図 5 を書き換えたものである。横軸に衝突速度をとってある。切欠深さ及び支持点間隔が一定であれば、衝撃値はほとんど衝撃速度によらない。図 7 は、同じく図 5 を書き換えたもので、支持点間隔及び切欠深さの両者が一定の時は、亀裂発生までの時間は、衝突速度が大きくなると減少することを示すものである。

一方、亀裂発生から破断までの時間は、衝突速度及び切欠深さ従って衝撃値に関係無く、支持点間隔が一定であれば、略一定となる。すなわち、 $l=40\text{ mm}$ の時 $t_f - t_c = 40\text{--}50\text{ }\mu\text{s}$ であり、 $l=100\text{ mm}$ の時 $t_f - t_c = 70\text{ }\mu\text{s}$ が得られた。次の図 8 に示すように、亀裂が成長し、その先端が自由面に近づくにつれて、成長速度が減少するために、切欠深さの影響が現れていない。支持点間隔の影響は、それが大きいと亀裂成長速度が急激に減少するという形で、現れている。支持点間隔 $l=40\text{ mm}$ の時、 $(t_f - t_c)/t_c = 0.1$ 程度であることは既に述べた。 $l=100\text{ mm}$ の場合、 $(t_f - t_c)/t_c = 0.05$ である。支持点間隔が大きくなれば、亀裂発生に至るまでの時間の占める割合が益々大きくなる。

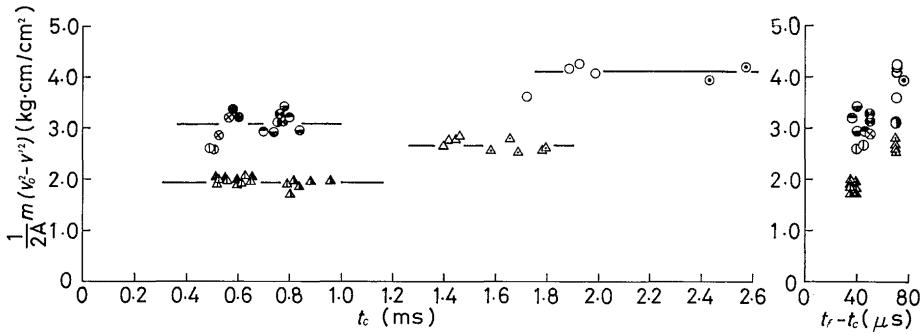


図 5 衝撃値と亀裂発生まで及び亀裂発生から破断までの時間

$\frac{L(mm)}{d(mm)}$	55	80	120	55	120
100			$\odot 1.058$ $\odot 1.25$		$\Delta 1.058$ $\Delta 1.26$
40	$\odot 1.00$ $\odot 1.04$ $\odot 1.254$	$\odot 1.072$ $\odot 1.254$	$\odot 1.072$ $\bullet 1.254$	$\Delta 0.86$ $\Delta 1.05$	
$d(mm)$	2			5	
figures show $V_0(mm/ms)$					

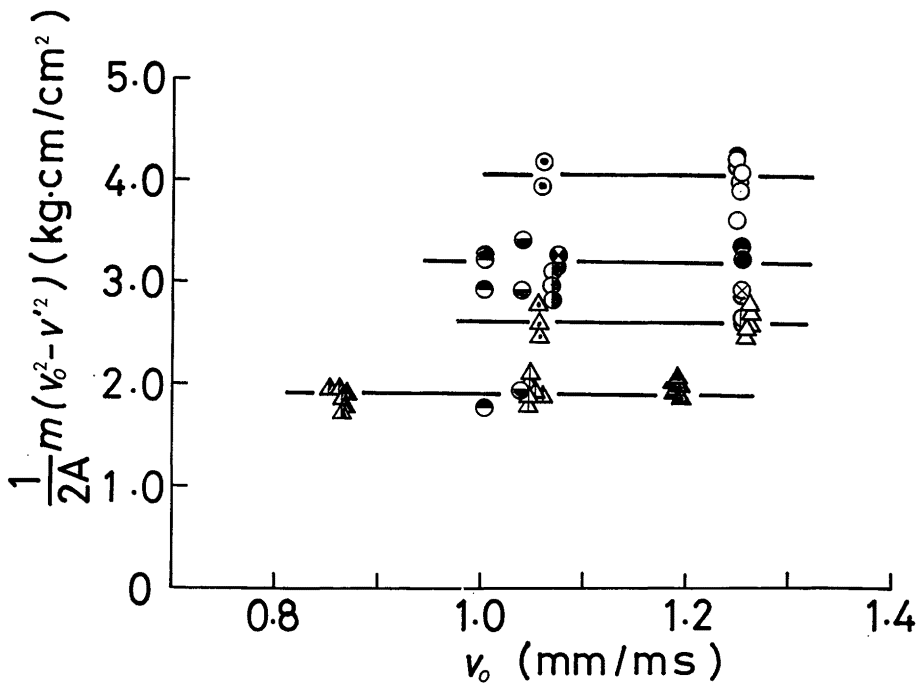


図 6 衝撃値と衝突速度

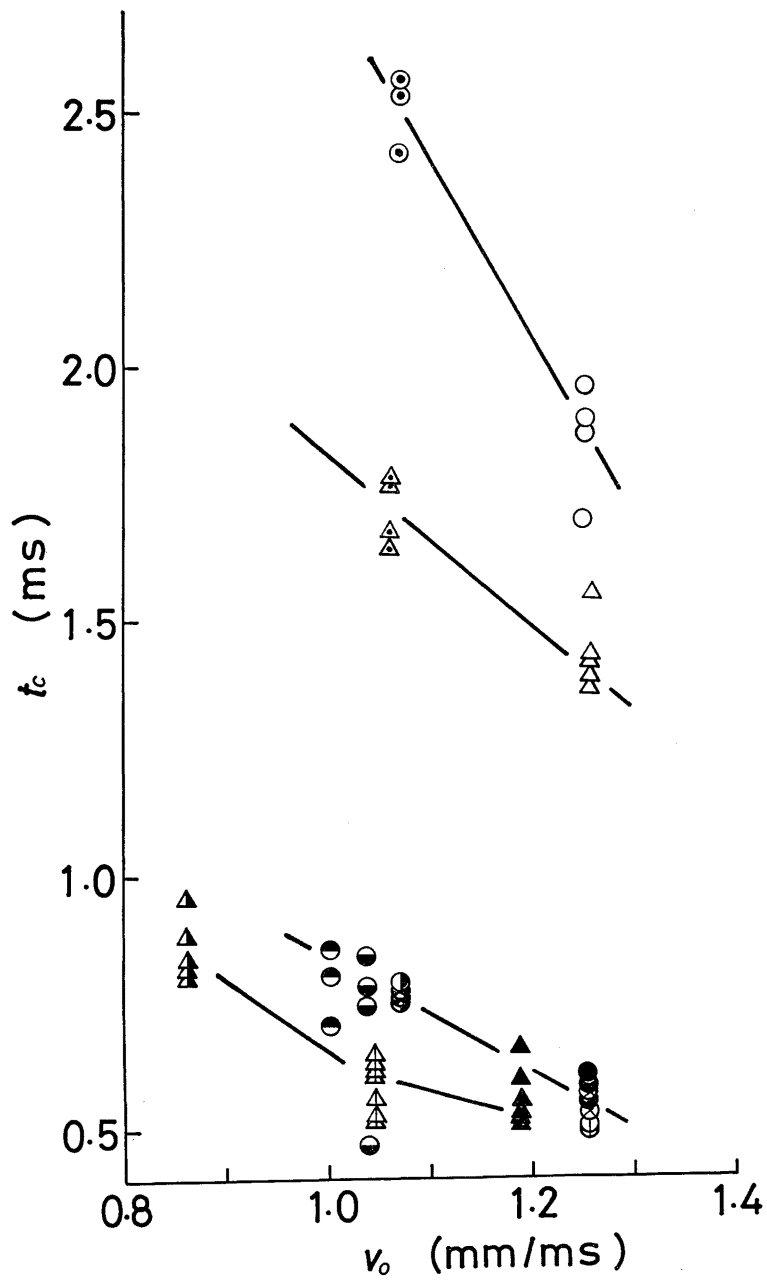


図 7 亀裂発生までの時間と衝突速度

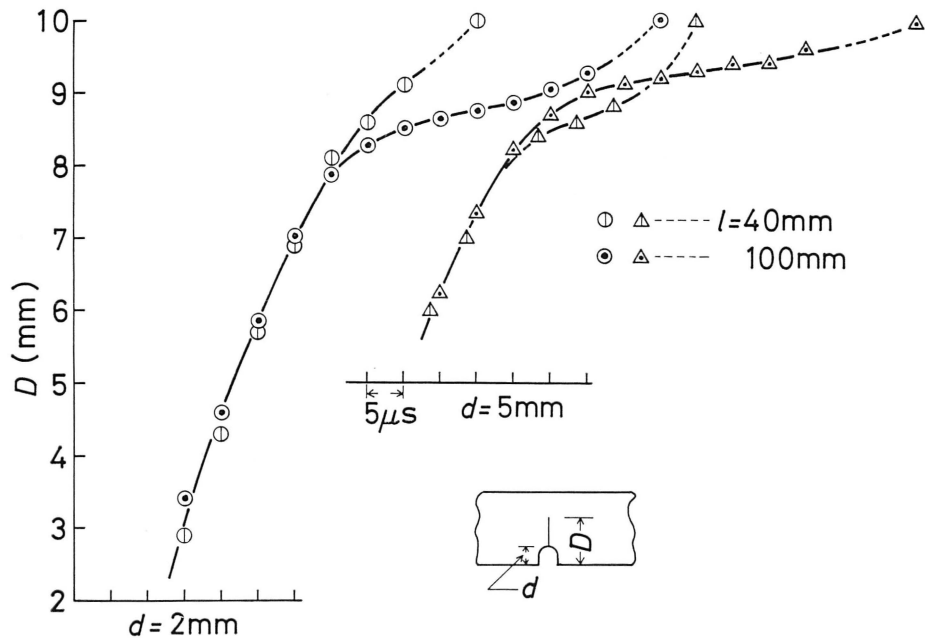


図 8 亀裂長の変化

3.2. 供試片の受ける荷重

鋼槌の変位を光干渉法により計測した。図 9 に示すものは、縞の濃度を光電子増倍管によりオシロスコープ上に導きポラロイドフィルムに記録した一例である ($d=0\text{ mm}$, $L=55\text{ mm}$, $l=40\text{ mm}$, $V_0=1.38\text{ mm/ms}$)。縦軸は縞の濃度、横軸は時間を表す。干渉には、頂角 $\theta=3^\circ 35'$ 、屈折率 $n=1.492$ の楔状アクリル板、及び光源として波長 $\lambda=6328\text{ \AA}$ の He-Ne ガスレーザを用いた。図 10 に従って光路

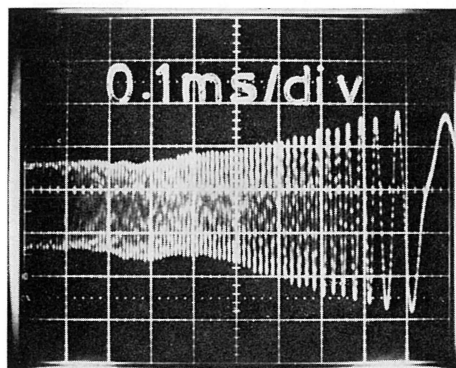


図 9 干渉縞

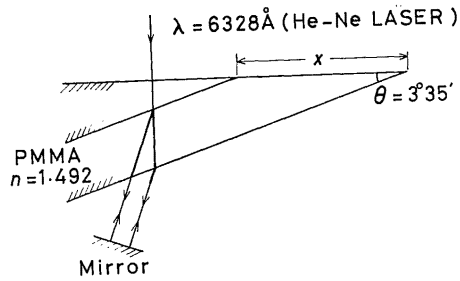


図 10 光 路 差

差を計算すると、楔が、

$$x_0 = \frac{\lambda}{n^2 - 1} \frac{n \cos \theta + \sqrt{1 - n^2 \sin^2 \theta}}{2 \sin \theta} = 0.01026 \text{ mm}$$

移動すると、1 縞の変化が現れることが判かる²⁾³⁾。

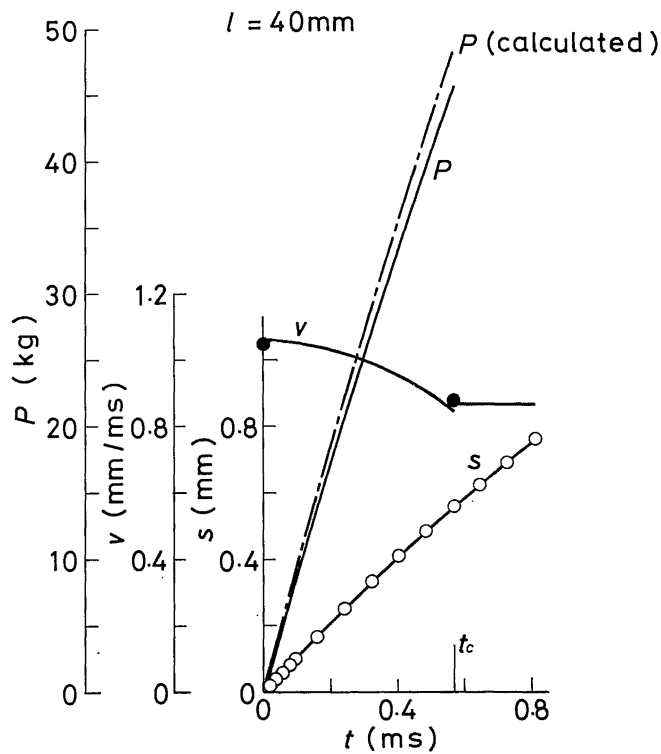


図 11 a 鋼槌の移動及び速度と試片に作用する力 例 1

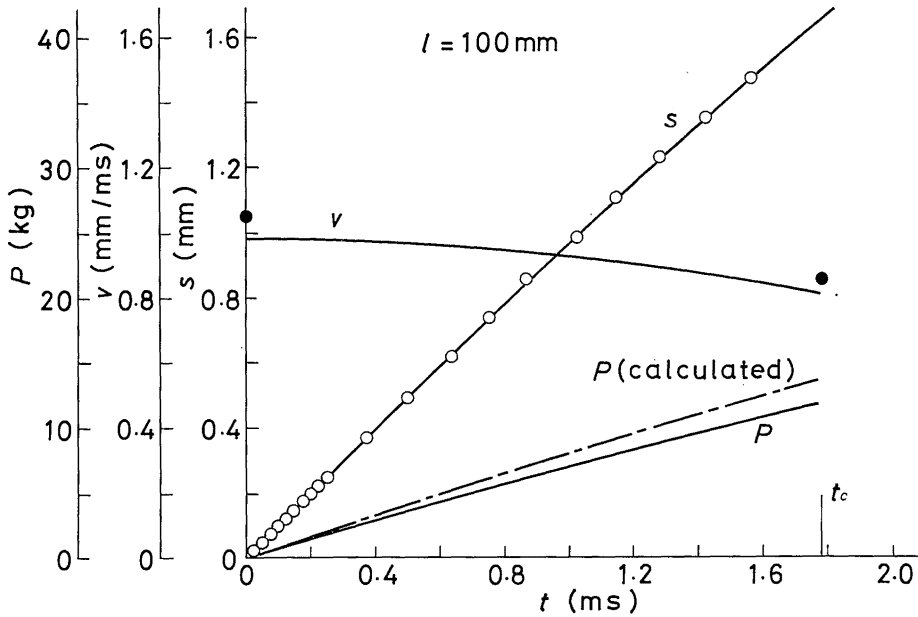


図 11 b 鋼槌の移動及び速度と試片に作用する力 例 2

さて、次に $d=5$ mm, $v_0=1.05$ mm/ms の時得られた 2 例を示す。図 11 a は $l=40$ mm ($L=55$ mm), 及び同 b は $l=100$ mm ($L=120$ mm) の場合に対応する。鋼槌の変位 S の計測値を○印で示した。この結果を最小 2 乗法を用いて、 $S=A \sin \omega t$ の形に表し、これを実線で示した。この例では、図 11 a の場合 $A=0.9348$ mm 及び $\Omega=1.1366$ rad/ms, 同 b の場合 $A=2.897$ mm 及び $\Omega=0.3393$ rad/ms であった。又、これを微分して求めた鋼槌の速度 $v=A\Omega \cos \Omega t$ (塗りつぶした●印は、速度 v の計測値) 及び試片に作用する荷重 $P=Wg^{-1}A\Omega^2 \sin \Omega t$ を同図中に示した。

この荷重は又、弾性接触論と梁理論を組合せて、次の近似式により計算することができる²³⁾、すなわち、

$$P=K \sin \lambda t$$

但し λ は

$$\left(\frac{\lambda v_0}{g}\right)^2 = \frac{\frac{v_0^2}{g} \frac{R}{a^2} \cdot \frac{\pi}{2} \frac{a^3}{R} \frac{E}{1-\nu^2} \frac{1}{W}}{0.8467 + \frac{1}{2} \ln \left(\frac{\pi}{2} \frac{a^3}{R} \frac{E}{1-\nu^2} \frac{1}{W} \right) - \frac{1}{4} \ln \left(\frac{\lambda v_0}{g} \right)^2 + \frac{\pi C}{96(1-\nu^2)} \frac{l^3 a}{I}}$$

から逐次計算により、且つ K はそれを用いて

$$K=W\lambda v_0/g$$

から定めるものとする。ここに PMMA の縦弾性係数 $E=300$ kg/mm², Poisson 比 $\nu=0.4$, 鋼槌の先端半径 $R=1$ mm, その試片との接触幅 $a=10$ mm, $l'=2r=2$ mm, $I=ah^3/12=833$ mm⁴, $I'=$

$a(h-d)^3/12$, $C=\{1-(1-l'/l)^3\}I/I'+(1-l'/l)^3$ である. 上式に従って計算した結果を一点鎖線で示す. 実験により求めた値と良く一致している. 図 11 a では $V_0=1.063$ mm/ms を用いて $K=78.2$ kg 及び $\lambda=1.1720$ rad/ms, 同 b では $V_0=0.983$ mm/ms を用いて $K=22.5$ kg, 及び $\lambda=0.3664$ rad/ms であった.

3.3. 切欠底の応力

図 12 は撮影結果の一例である. これは $L=55$ mm, $l=40$ mm, $d=2$ mm, $V_0=1.26$ mm/ms について得られたものである. 図中矢印で亀裂先端の位置を表す. 又次図 13 には, 亀裂発生直前の写真を $l=40$ mm ($d=1, 2, 5$ mm) 及び $l=100$ mm ($d=2.5$ mm) の場合について示した. 又図 14 には, 亀裂発生直前の切欠底縞次数を縦軸に, 亀裂発生の時間を横軸にとり示した. 併せて同図中には, 静的に得られた光弾性感度 -0.0527 mm/kg を用いて換算した応力軸を描いた. 支持間隔 $l=40$ mm のとき $\sigma=8\sim 9$ kg/mm², $l=100$ mm のとき $\sigma=9\sim 10$ kg/mm² であった. これは単軸引張試験による強さ σ_B と同じオーダの値である⁴⁾. この図は, 亀裂発生時の切欠底応力は, 切欠深さに無関係に, 略一定であることを示唆している. この点に関して, 今後データの集積が必要である. 光弾性感度の動的

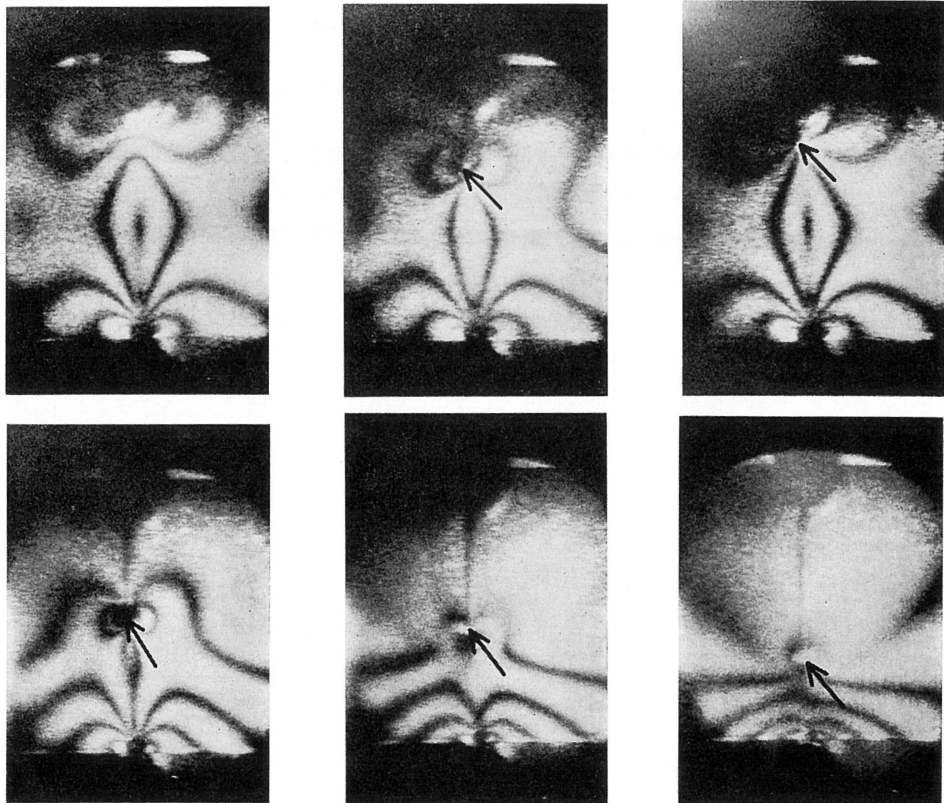


図 12 等色線縞次数の変化
(左から右へ 上 687, 712, 717, 下 722, 727, 737 μs)

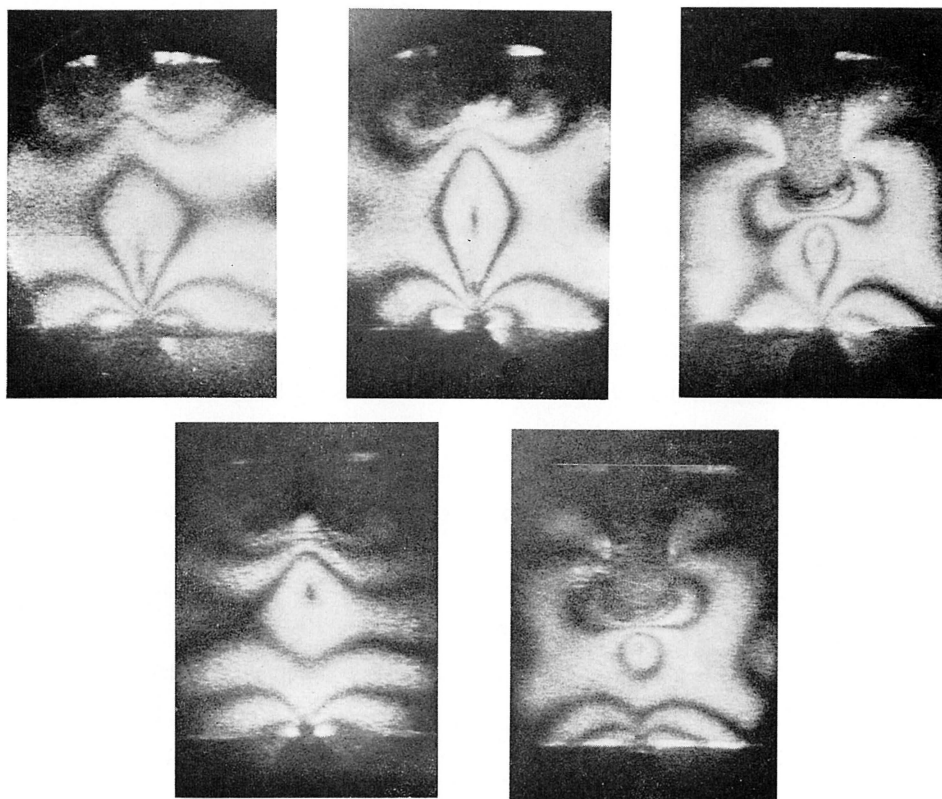


図 13 亀裂発生直前の縞次数
(上 $l=40\text{mm}$, 左から右へ $d=1, 2, 5\text{mm}$, 下 $l=100\text{mm}$, $d=2, 5\text{mm}$)

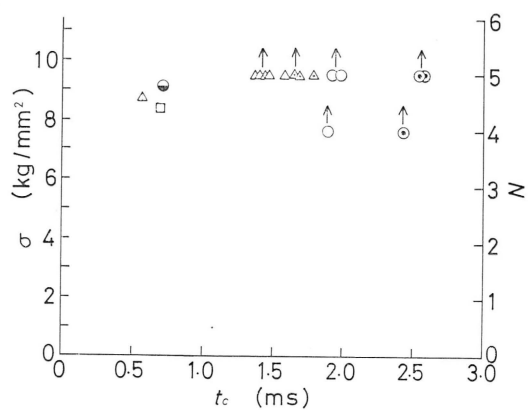


図 14 亀裂発生時の切欠底縞次数

補正と併せて、問題としたい。

4. 結 語

1) 切欠深さが小さく支持点間隔が大きいと、衝撃値は大きくなる。又切欠深さ小、支持点間隔大、衝突速度小なる時、亀裂発生までの時間は大となる。亀裂発生から破断までの時間は、採用した断面寸法 10×10 各 mm、切欠先端半径 1 mm の試片では、切欠深さ 2 及び 5 mm に関係なく、支持点間隔 40 mm の時 $40 \sim 50 \mu\text{s}$ 、100 mm の時 $70 \mu\text{s}$ であった。

2) 衝突から亀裂発生までの間、試片に作用する荷重を求めた。前報に述べた弾性接触論と梁理論を組合せた計算による結果は、今回の実測結果とも良く一致した。

3) 亀裂発生時の切欠底応力は、切欠深さに関係なく、一定であることが示された。

謝 辞

本実験を行うに当たり多大の便宜を賜った樋口正一先生に深く感謝の意を表す。原稿の浄書は杉野尚子嬢による。ここに記してその労を多とする。

参 考 文 献

- 1) Nielsen, L. E.: *Mechanical Properties of Polymers*, Reinhold Publishing Co., New York, 1962, p. 123.
- 2) 川建和雄, 石井秀夫, 篠崎高茂: 材料, **25**, 269, (1976), pp. 179-185.
- 3) Kawatate, K., Ishii, H., Shinozaki, T. Sakamoto, Y., and Ikuta, S.: Proc. 19th Japan Congress on Materials Research, (1976), pp. 201-207.
- 4) 樋口正一: 材料, **13**, 124, (1964), pp. 11-14.

(昭和 51 年 6 月 7 日 受理)