

# 高速引張りをうける十分長い切欠帯板 での動的応力集中について

河田幸三・橋本彰三・本堂 明・井手 徹

On the Dynamic Stress Concentration of Very Long Strips with  
Notches under High Velocity Tension

By

Kozo KAWATA, Shozo HASHIMOTO, Akira HONDO and Toru IDE

**Abstract:** The relation of time variation of dynamic stress concentration factor  $f_d$  vs static stress concentration factor  $f_s$  of very long strips with notches under dynamic tension is analyzed by high speed photoelasticity by means of a multi spark gap camera using hard epoxy resin specimens and numerical analysis by FEM and Newmark's  $\beta$  method. As the shapes of notches, central circular hole and U-shaped notches at both sides are chosen. By these analyses, the phenomenon of maximum stress position deviation up to incident side at the passage of stress wave front and the behaviour that  $f_d$  increases with increasing time and tends to the value of  $f_s$  for all notches are found. This behaviour well coincides with the general tendency predicted by the one-dimensionalized approximation theory previously derived by one of the authors.

## 概 要

十分長い切欠帯板の動的引張り時の動的応力集中係数  $f_d$  の時間変化と静的応力集中係数  $f_s$  の関係を、硬いエポキシ樹脂試片を用いての多重閃光間隔型カメラによる高速光弾性と FEM 及び Newmark の  $\beta$  法を用いた数値解析とにより解析した。切欠の形は中央丸孔と両側 U 字切欠である。この結果、応力波頭通過時応力集中位置が上流側に偏る現象と、 $f_d$  が時間経過と共に 0 より増大し  $f_s$  に収束する挙動が見出された。この挙動は 1 次元化近似理論の示す結果と大勢においてよく合致する。

## 1 ま え が き

十分に長い切欠帯板が高速引張りを受ける時の動的応力集中係数の時間変化と静的応力集中係数との関係を、エポキシ帯板を用いての高速光弾性と有限要素法及び Newmark の  $\beta$  法による数値解析とにより研究した結果について報告する。切欠の形としては、中央丸孔と

両側U字切欠の場合をとった。

## 2 高速光弾性解析装置と同実験手法

高速 16 コマ多重閃光間隙カメラ [7, 5, 8, 9] を用いる。実験装置全体の配列は Fig. 4 の通りである。負荷は落錘により impact block に加えられ、落錘と impact block の接触開始がトリガーとして用いられている。弾性波（縦波）速度は歪ゲージ出力よりの値  $1720 \text{ m/sec}$  と光弾性等色線縞 ( $N = 1.5 \sim 5.5$ ) の速度よりの値  $1710 \sim 1780 \text{ m/sec}$  とがよく一致する。これから  $E_d = 370 \text{ kgf/mm}^2$  と求められる。歪計の示す動的歪,  $E_d$ , 動的縞次数  $N_d$  より動的光弾性感度  $\alpha d$  を求めた結果は,  $0.97 \sim 1.1 \text{ mm/kgf}$  のバラツキに収まり, 平均  $1.0 \text{ mm/kgf}$  と見てよい。切欠なしの平滑帯板への入力波形は Fig. 6 に示す如くで, 応力平坦部の長さ略  $320 \text{ mm}$ , 従って同応力平坦部の継続時間  $320 \text{ mm} / (1720 \text{ m}$

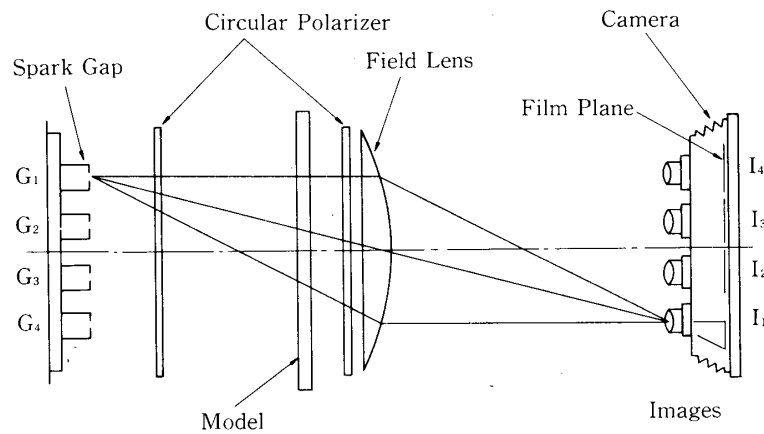


Fig. 1 Optical system for high speed photoelasticity.

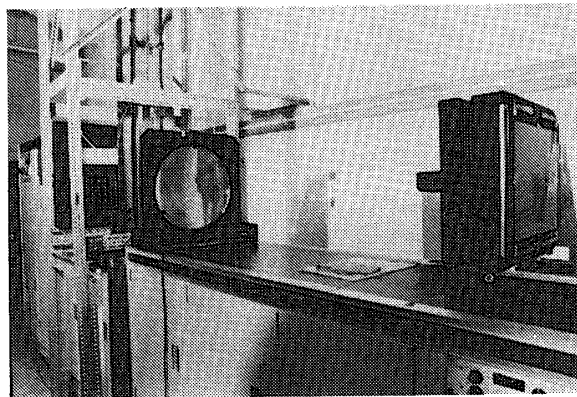


Fig. 2 Multiple spark gap camera and loading system.

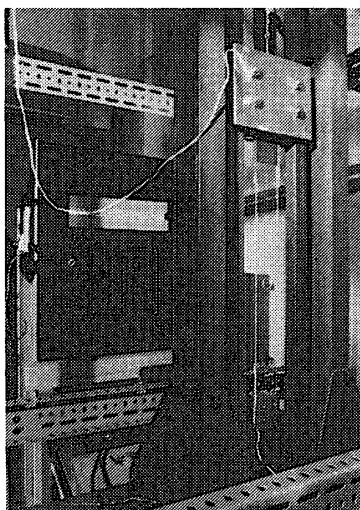


Fig. 3 Spark gaps, loading system and epoxy specimen.

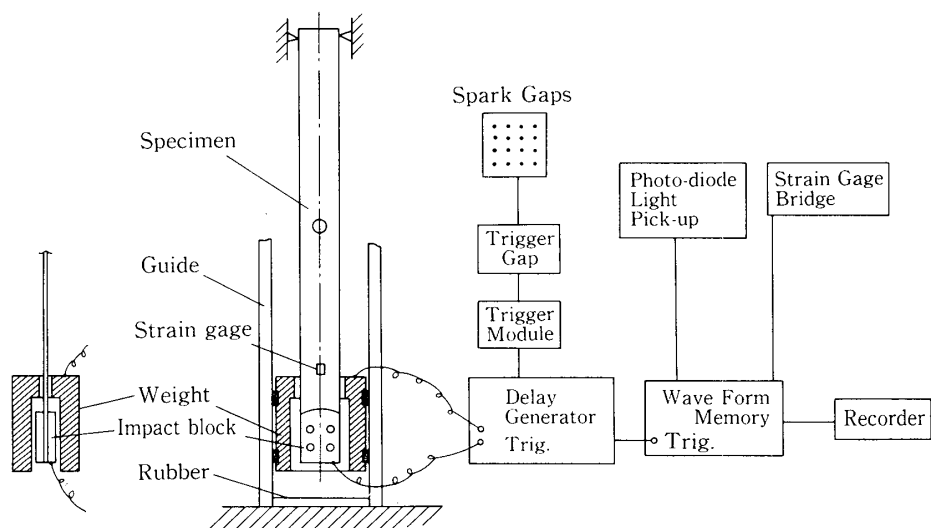


Fig. 4 Experimental arrangement.

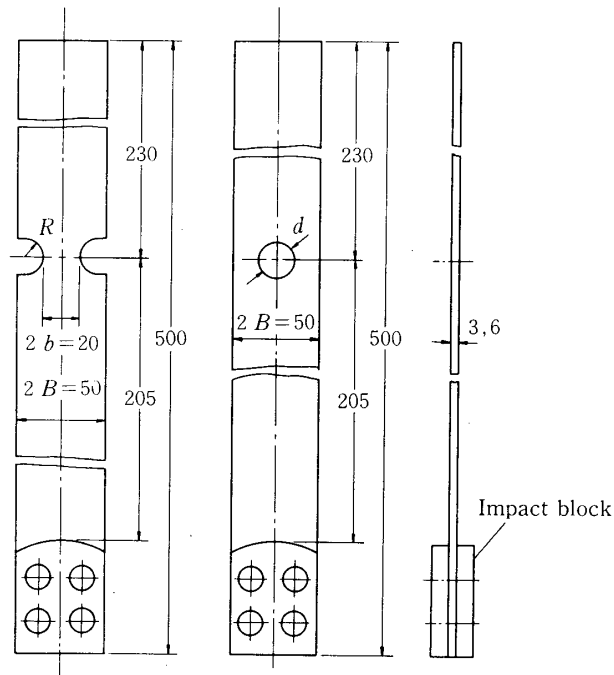


Fig. 5 Specimen dimension.

$\text{/sec}) = 186 \mu\text{sec}$ となる。従って、Figs. 2, 3のような切欠部をもつ試片に対し、十分長い応力平坦部をもつ応力波の入射と考えるとよいと判断される。

ここで使用したカメラは閃光間隔が4行4列に配置されており、16コマの高速光弾性等色線図を得ることが出来る。Fig. 7に示すように閃光間隔放電記録より各コマの時間々隔を決定できる。本シリーズの実験では、コマどり速度5万ppsを基準とし、後述のように略19

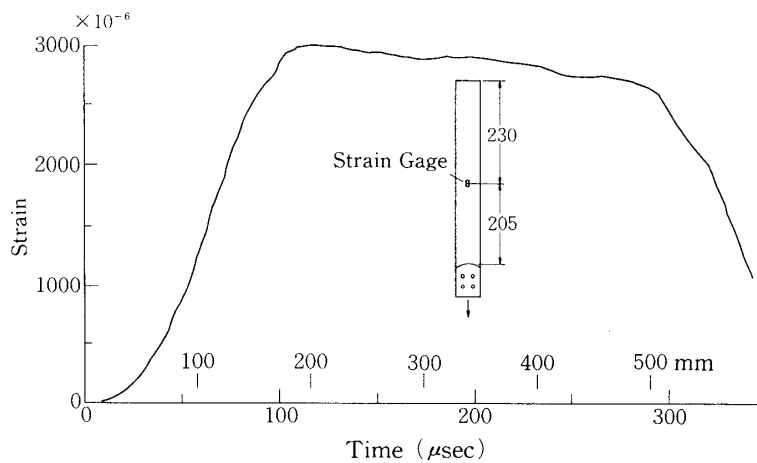


Fig. 6 Input stress wave form.

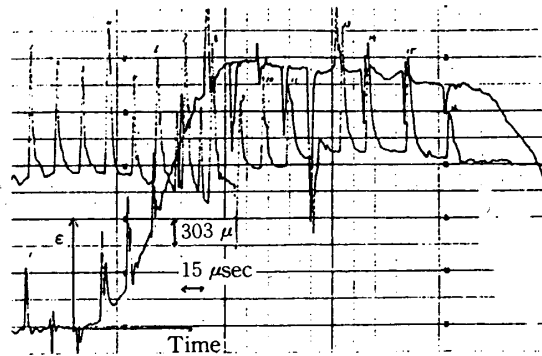


Fig. 7 Spark gap discharge record.

～28  $\mu\text{sec}$  の時間間隔の明瞭な高速光弾性等色線図(Figs. 8～13)を得た。現在まで、ポリウレタン樹脂/HIMAC 16 H (1万 pps), ポリウレタン又はエポキシ樹脂/BW Model 192 (最高140万 pps, 常用10万～数10万 pps) の組合せも多数実験を行ったが、現在のエポキシ/高速16コマ多重閃光間欠カメラの組合せが、最も尖鋭な大型高速光弾性等色線図を与えるといつてよいと思われる。カメラと実験手法については若干の既発表論文[8, 9]に詳述したので、本報告では要点に止める。

### 3 高速光弾性解析の結果[10]

得られた高速光弾性等色線図の例をFigs.8～13に示す。本図では、応力波は下方から入射して上方へ伝播している。応力集中の時間変化は明瞭である。最大応力  $\sigma_{max}$  の位置は切欠の自由縁上にあり、波頭の切欠通過時上流に偏る現象[8]が発見された。時間経過につれて、 $\sigma_{max}$  の位置は、静的の場合と同じく切欠の最狭部に移る。動的応力集中係数  $f_d = \sigma_{max} / \sigma_0$  の時間変化と対応する静的応力集中係数  $f_s$  とを Figs.16, 17 に示す。  $f_d$  は0より逐次増大し、時間  $t \rightarrow$  大と共に  $f_s$  に収束する傾向を示す。丸孔の場合とU字切欠の場合とについて傾向は全く同じであるといつてよい。測定した場合は Table 1 に示す6場合である。

### 4 FEM解析の結果[10]

丸孔については  $d/2B = 0.4, 0.6$  の両場合について、U字切欠については、切欠半径  $R = 2.5 \text{ mm}, 5 \text{ mm}, 10 \text{ mm}, 20 \text{ mm}$  の4場合について、計算した。結果を Figs. 14～17 に示す。FEM解析の結果は高速光弾性解析の結果をよく裏付けるものである。即ち、“波頭通過時の応力集中位置の上流偏位の現象”が見られ、時間の経過と共に最大応力位置は最狭部に移って来る。  $f_d$  が0より急速に増大して  $f_s$  に収束する。収束する速度はFEMの方が高速光弾性の結果より速いが、実験では Fig. 6のように、入力波の立上りが100  $\mu\text{sec}$

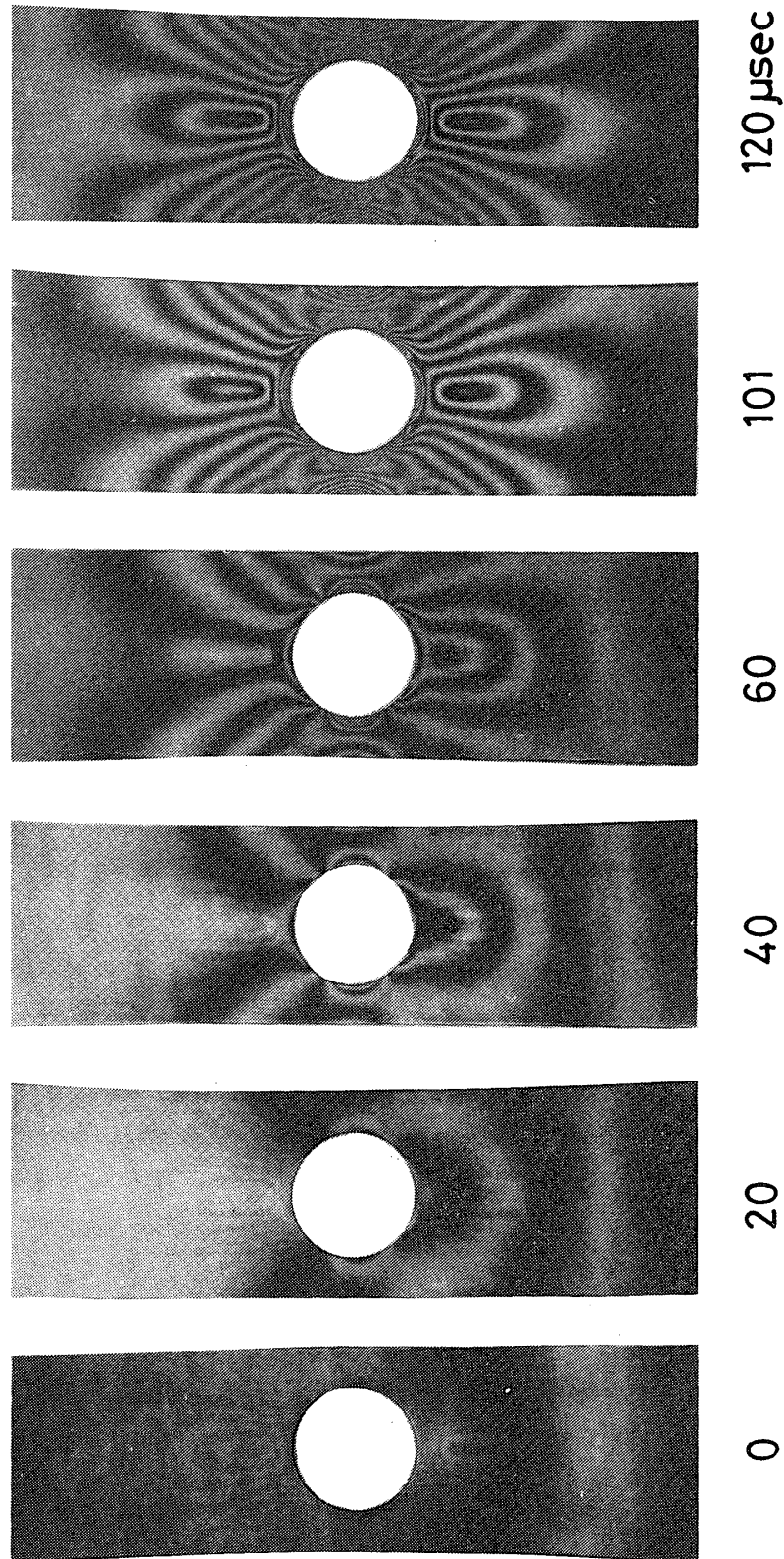


Fig. 8 High speed photoelastic fringe patterns for dynamic tension of epoxy strip specimen with a central circular hole  $d/2B = 0.6$  ( $d=30$  mm)

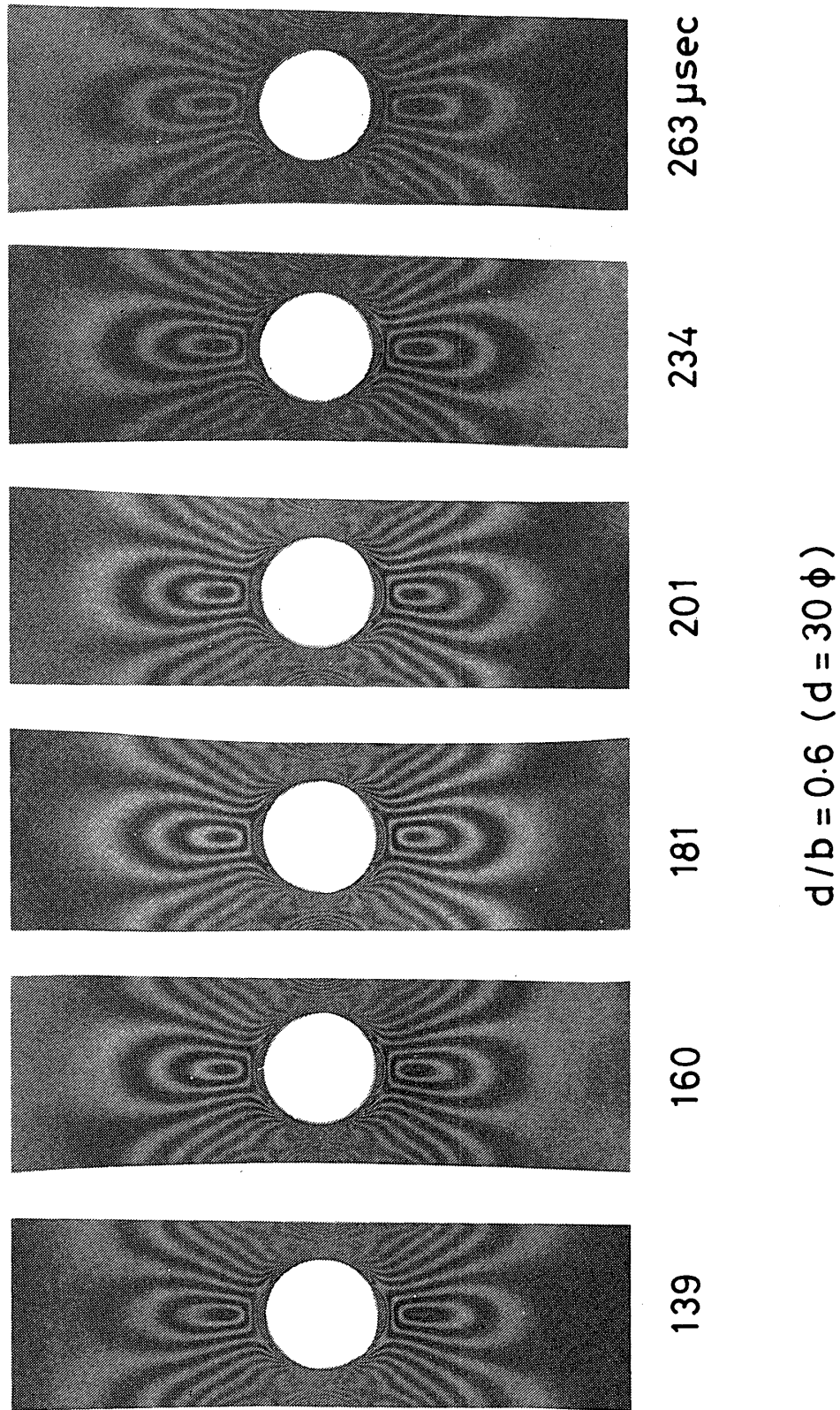


Fig. 8

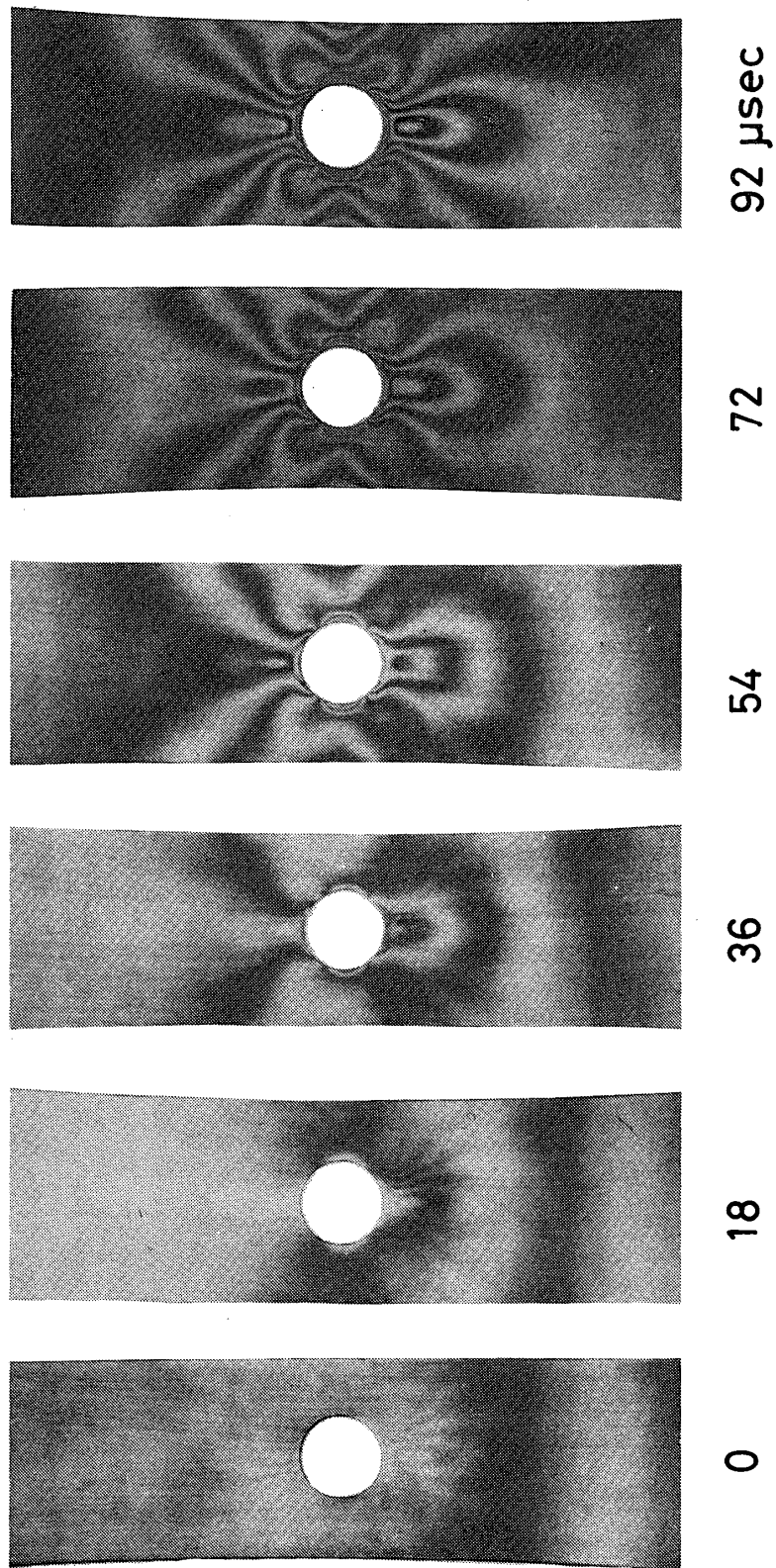
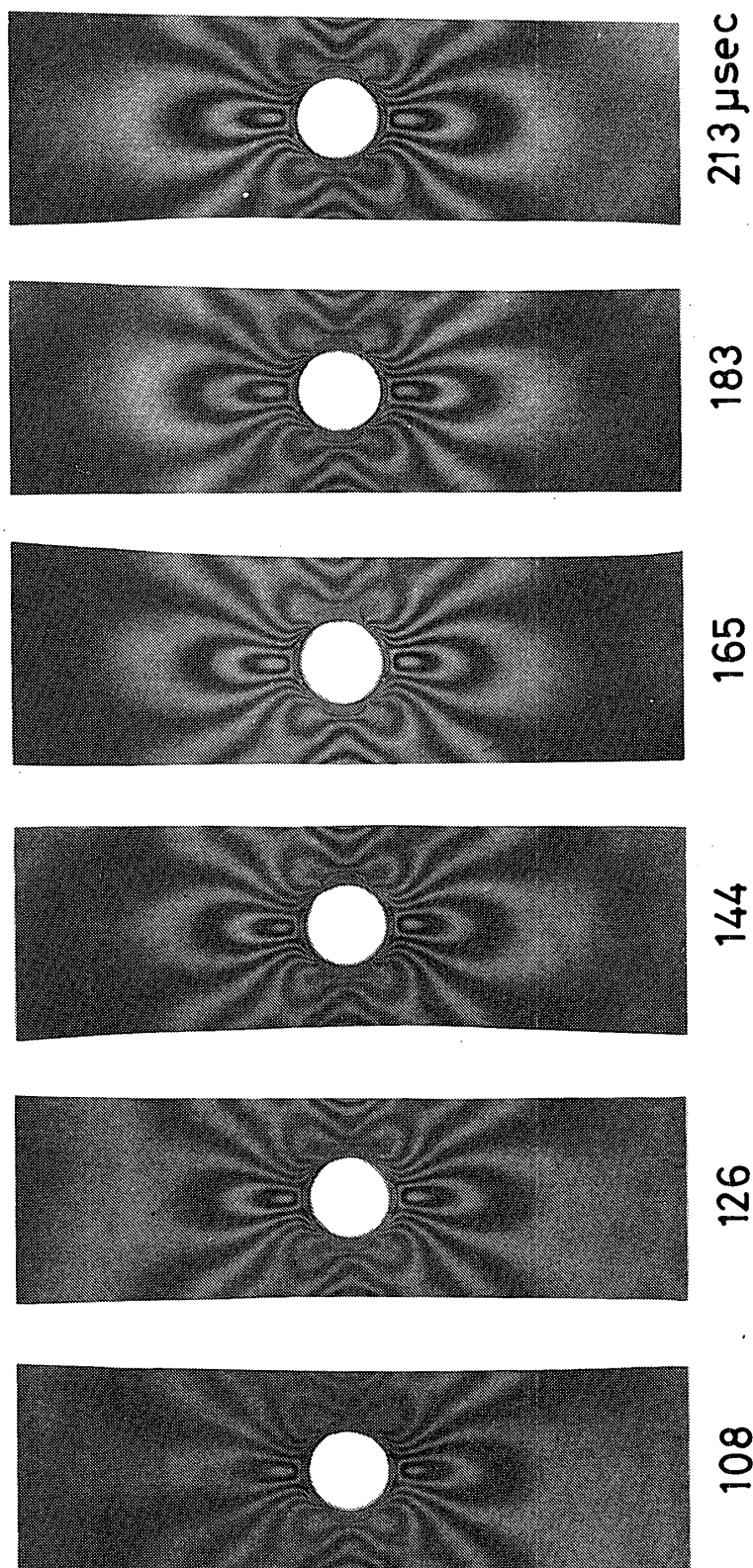


Fig. 9 High speed photoelastic fringe patterns for dynamic tension of epoxy strip specimen with a central circular hole  $d/2B = 0.4$  ( $d=20$  mm)





$$d/b = 0.4 \quad (d = 20\phi)$$

Fig. 9

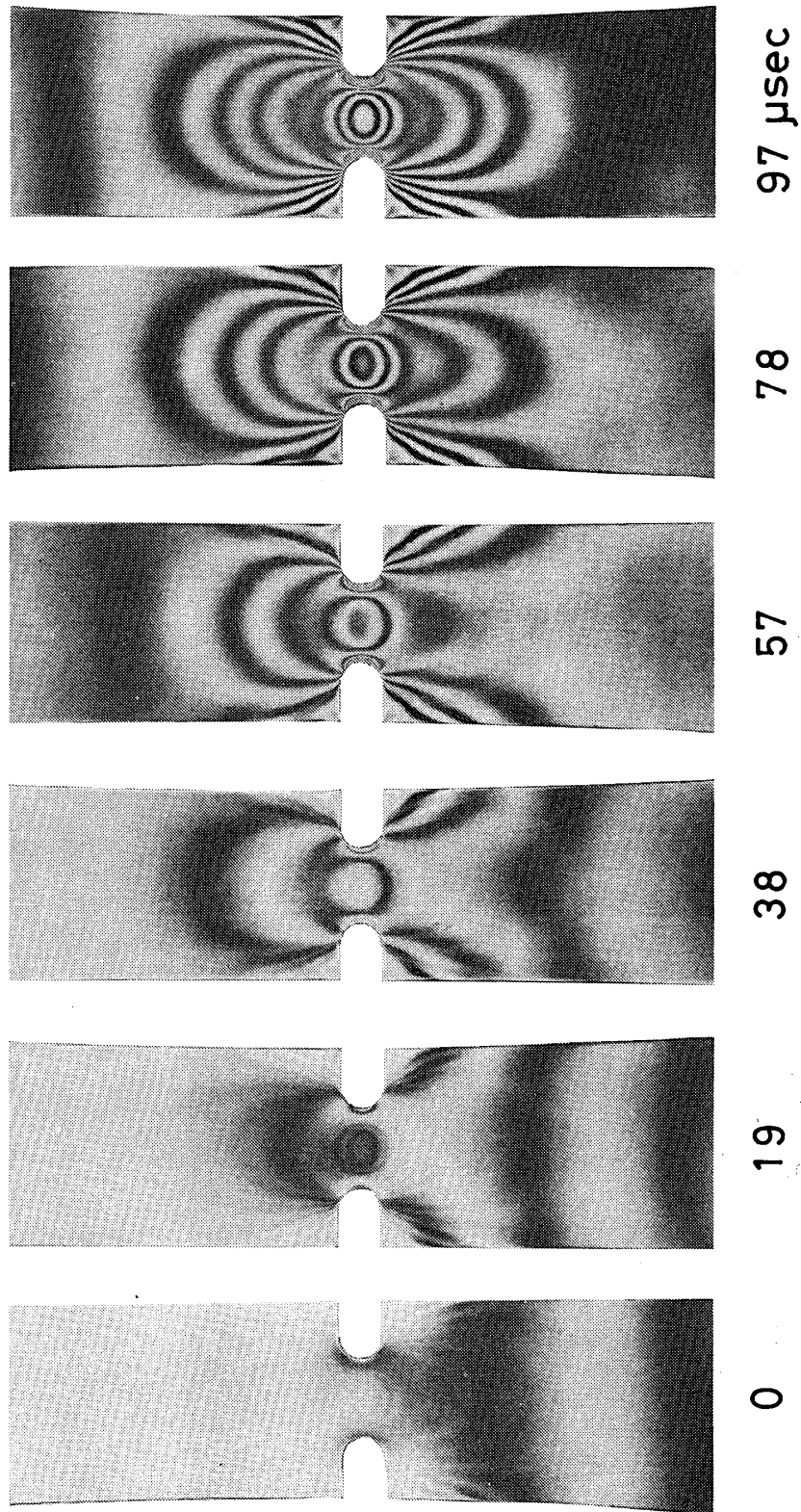


Fig. 10 High speed photoelastic fringe patterns for dynamic tension of epoxy strip specimen with U-notches at both sides  $R = 5$  mm

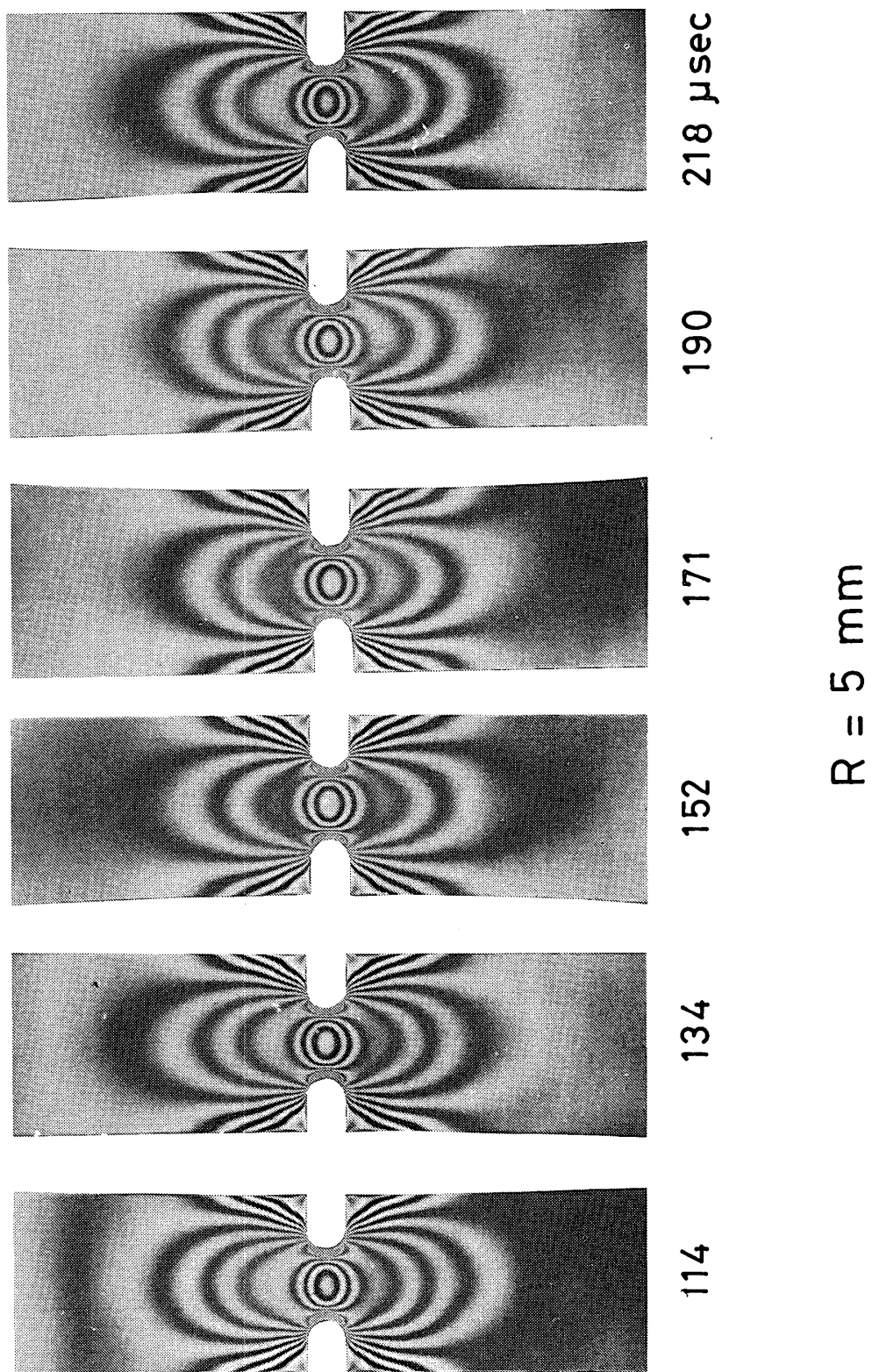


Fig. 10

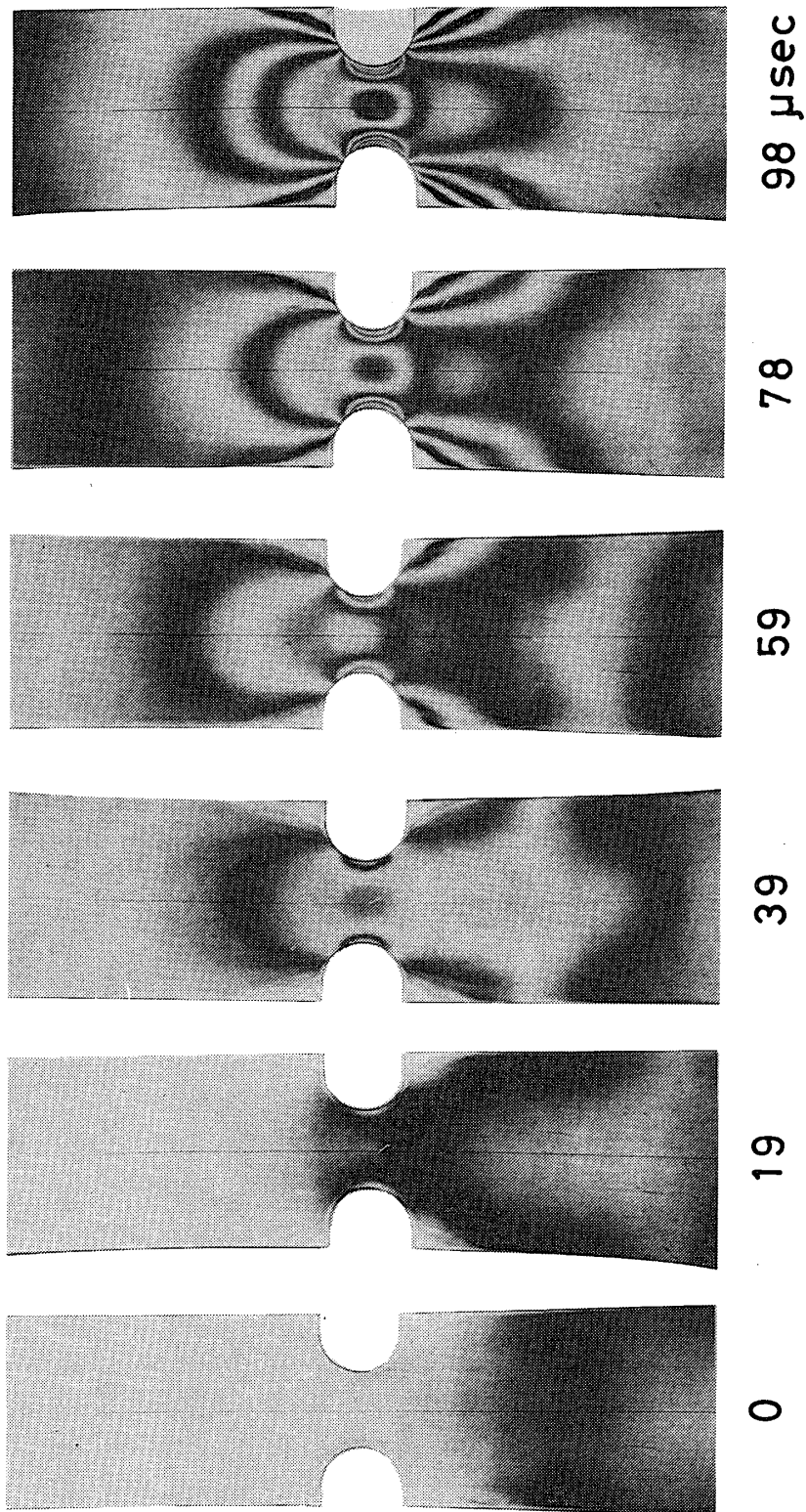


Fig. 11 High speed photoelastic fringe patterns for dynamic tension of epoxy strip specimen with U-notches at both sides  $R = 10 \text{ mm}$

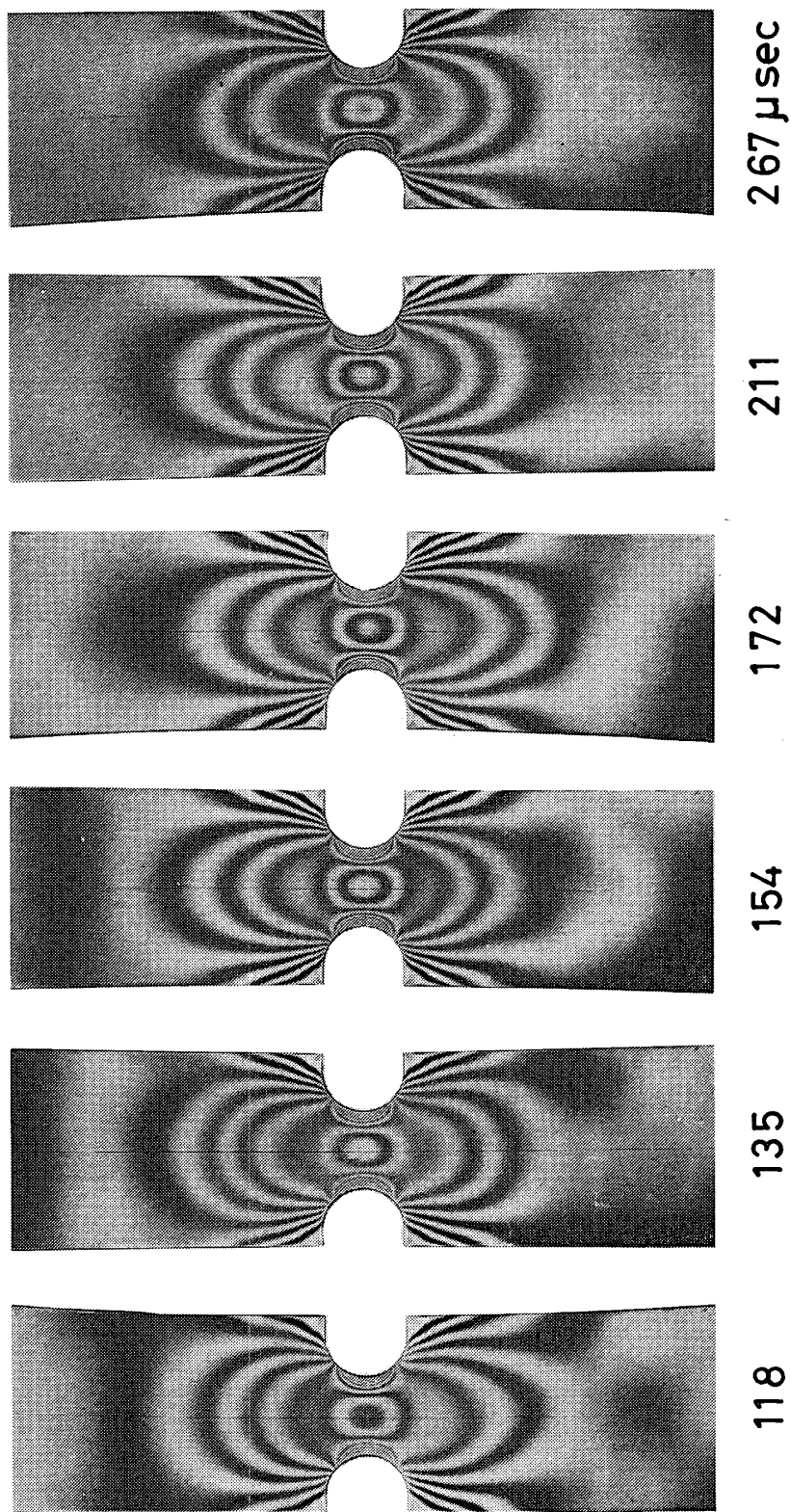


Fig. 11



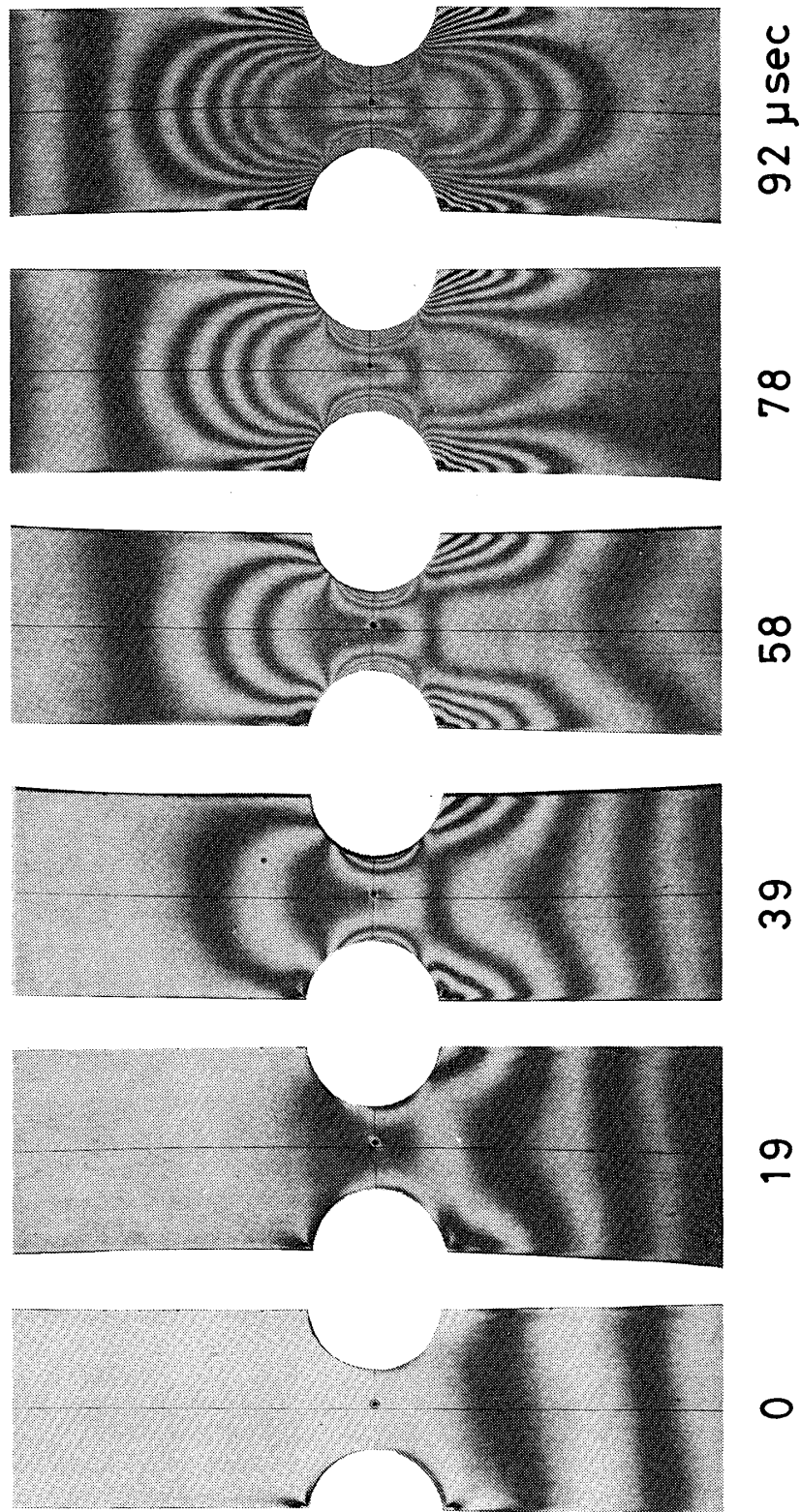
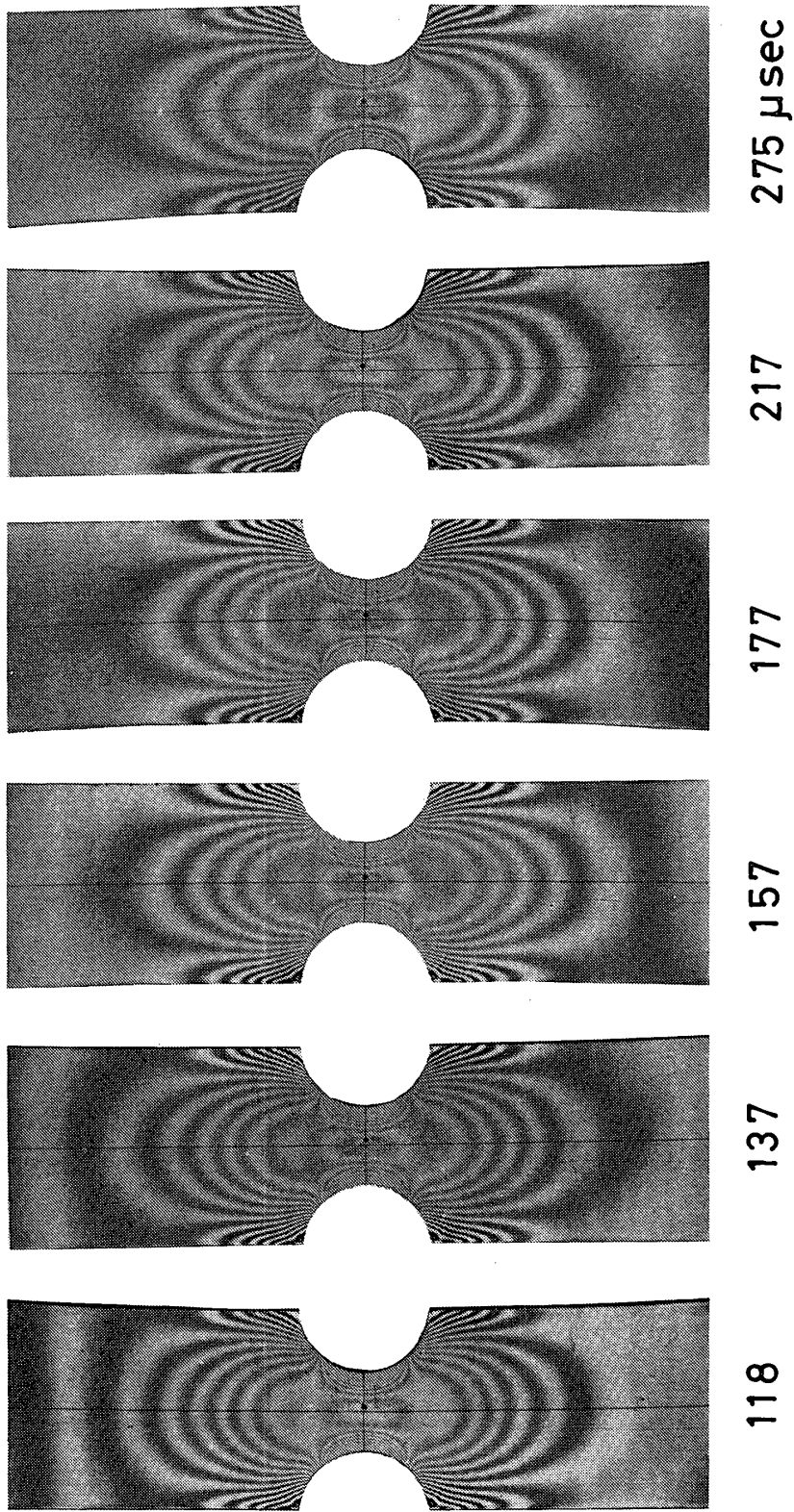


Fig. 12 High speed photoelastic fringe patterns for dynamic tension of epoxy strip specimen with U-notches at both sides  $R = 15 \text{ mm}$



$R = 15 \text{ mm}$

Fig. 12

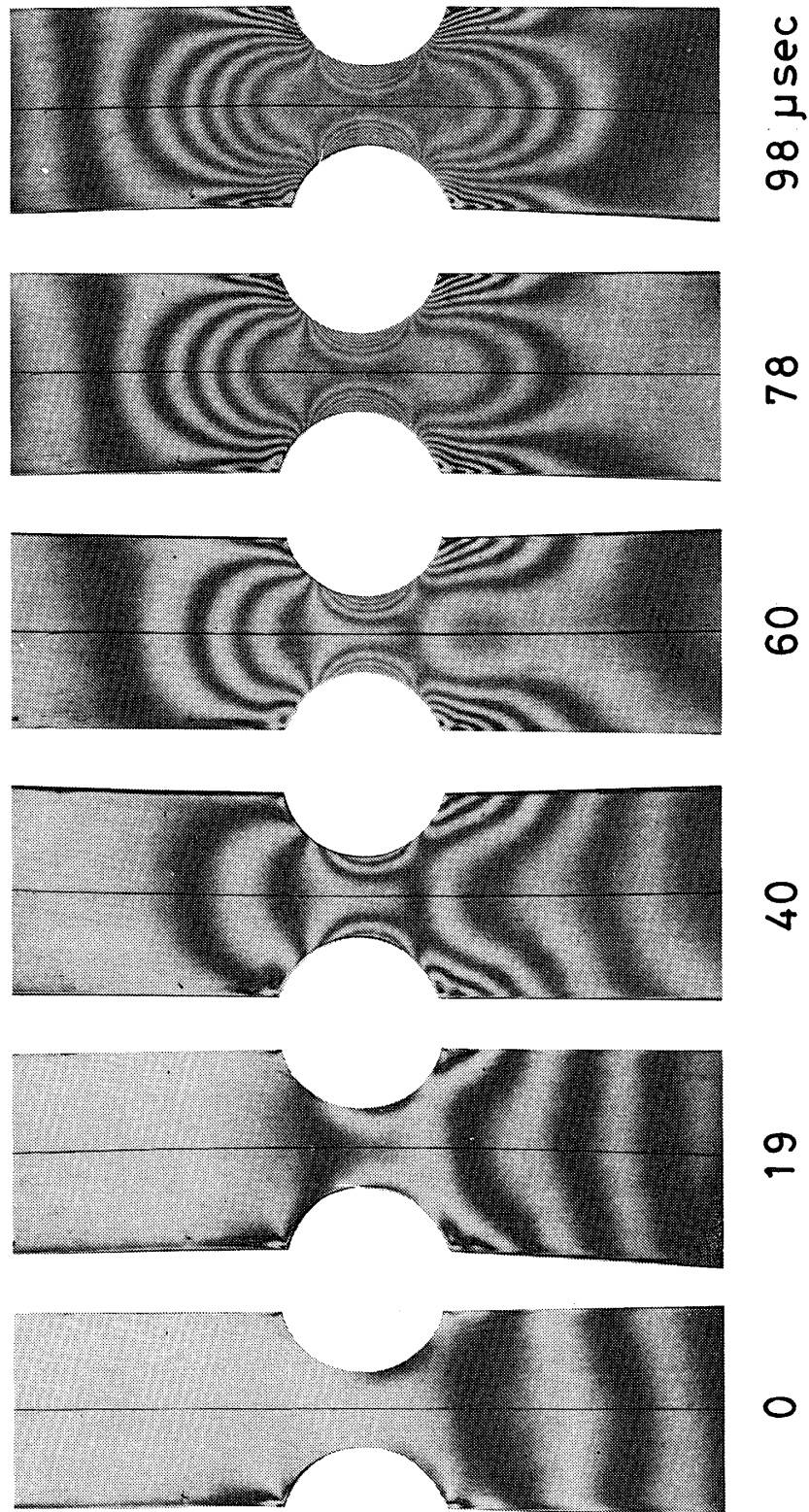


Fig. 13 High speed photoelastic fringe patterns for dynamic tension of epoxy strip specimen with U-notches at both sides  $R = 20 \text{ mm}$



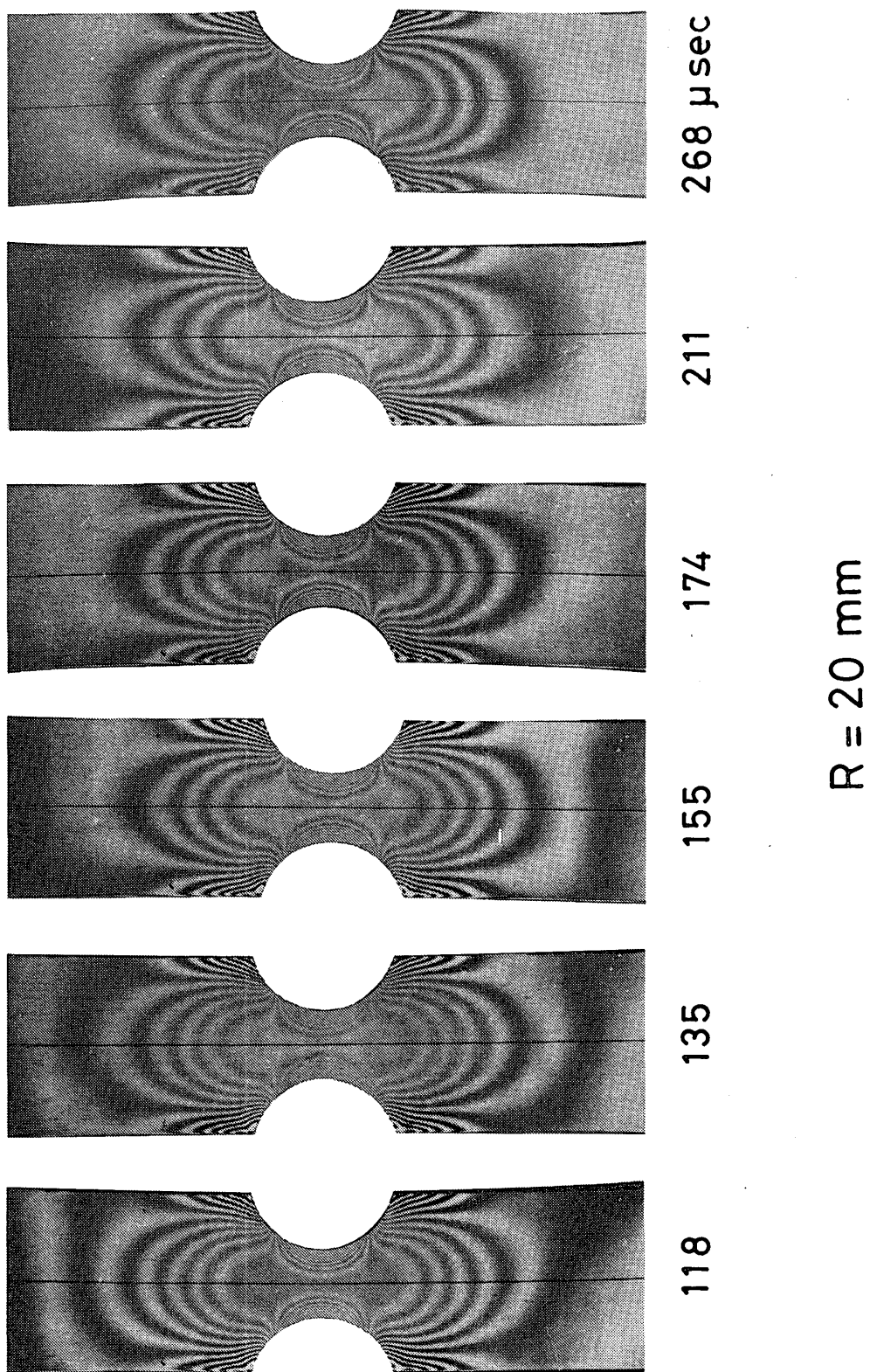


Fig. 13

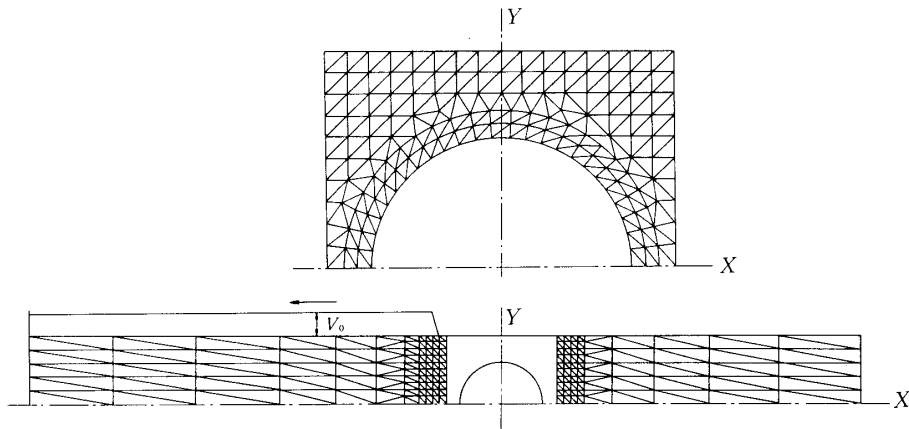


Fig. 14 Example of elements dividing.

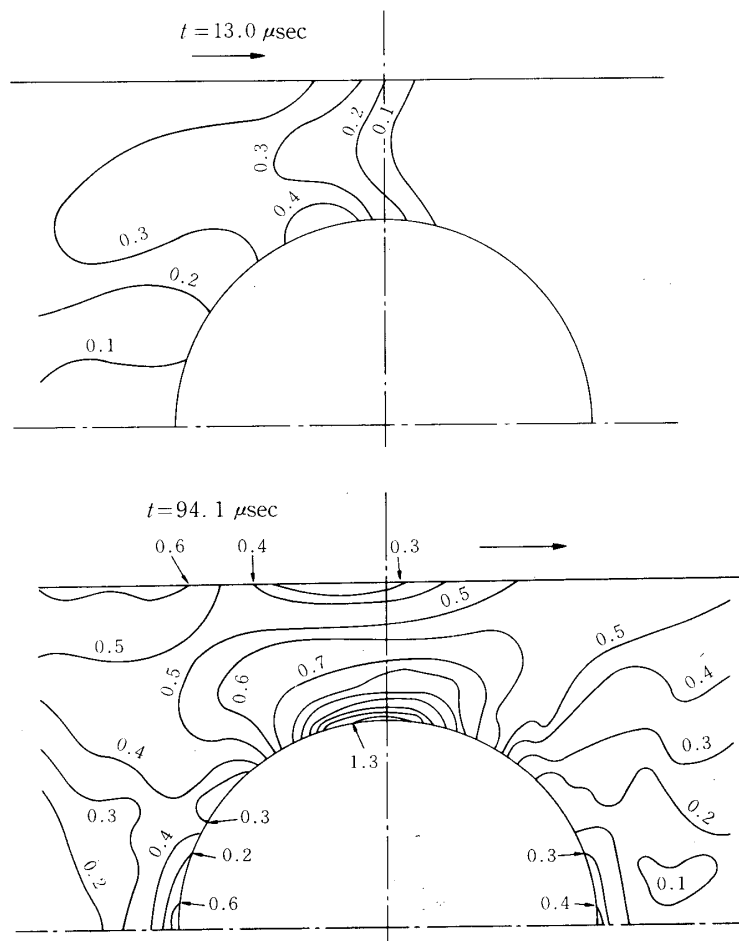


Fig. 15 Example of FEM results.

程度あるので首肯できる結果である。

Table 1. Analyzed cases of dynamic tension

notch		static stress concentration factor	dynamic analysis	
			photoelasticity	FEM
central circular hole	d/2B			
	0.6	5.2	○	○
	0.4	3.74	○	○
U-notches at both sides	R (mm)	R/2B		
	2.5	0.05	6.98	—
	5	0.1	5.30	○
	10	0.2	4.16	○
	15	0.3	3.67	○
	20	0.4	3.41	○

## 5 結 論

以上の結果をまとめると次の通りである。

1) 多重閃光間隙カメラで静的2次元光弾性と同程度の尖鋭な大型の高速光弾性等色線図のシリーズ(16コマ)を得た。この実験法はエポキシ樹脂など硬く、弾性波速度の高い場合の解析に最適である。

2) 歪計による計測を併用して、エポキシ帯板での弾性波速度  $C$ 、動的弾性感度  $\alpha_d$ 、動的弾性係数  $E_d$  など高速光弾性解析に必要な材料定数が求められた。

3) 十分に長い中央丸孔及び両側U字切欠エポキシ帯板(静的応力集中係数  $f_s = 6.98 \sim 3.41$ )の動的引張りで  $186 \mu\text{sec}$  程度の継続時間(両側に立上り部をもつが、応力平坦部のみについての値)の矩形波を入射させた場合について、動的応力集中の高速光弾性解析を行い、(1)波頭通過時、最大応力位置の上流偏位現象の生ずること、(2)時間経過と共に  $f_d$  が急速に静的応力集中係数  $f_s$  に収束することが明かにされた。

4) Newmark  $\beta$ 法[6]を併用してのFEM解析の結果もよく符合し、これを支持する。

5) 上述の結果は、河田の前に提案した切欠帯板の動的引張りでの動的応力集中の一次元化近似解法の結論[1]~[5]の妥当であることを実証する。

1980年12月11日 材料部

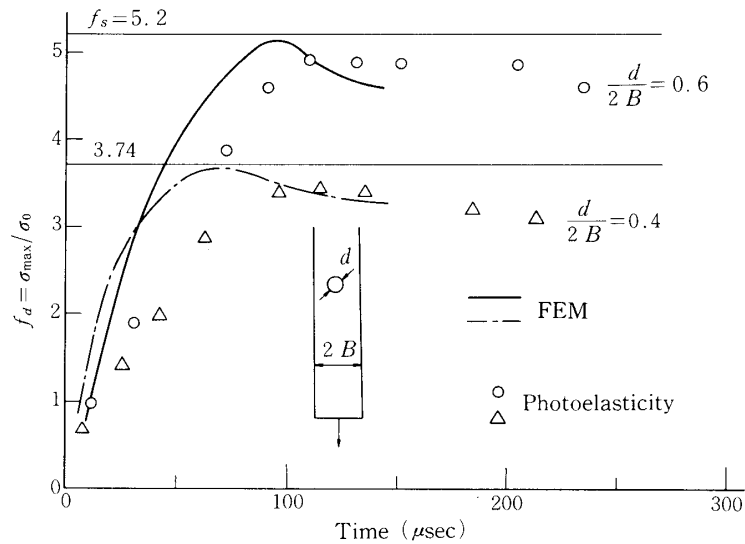


Fig. 16 Variation of dynamic stress concentration factor with time in dynamic tension of very long strip with a central circular hole. Results by photoelasticity and FEM.

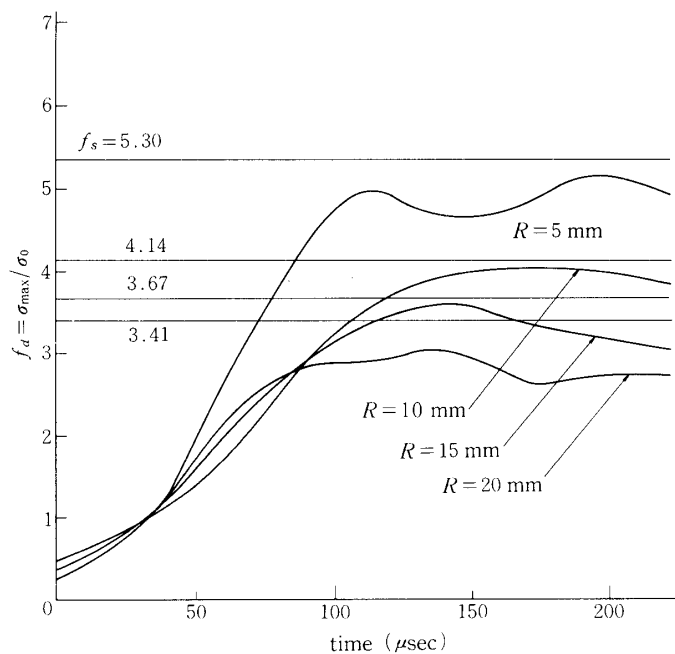


Fig. 17 Variation of dynamic stress concentration factor with time in dynamic tension of very long strip with U-shaped notches. Results by photoelasticity.

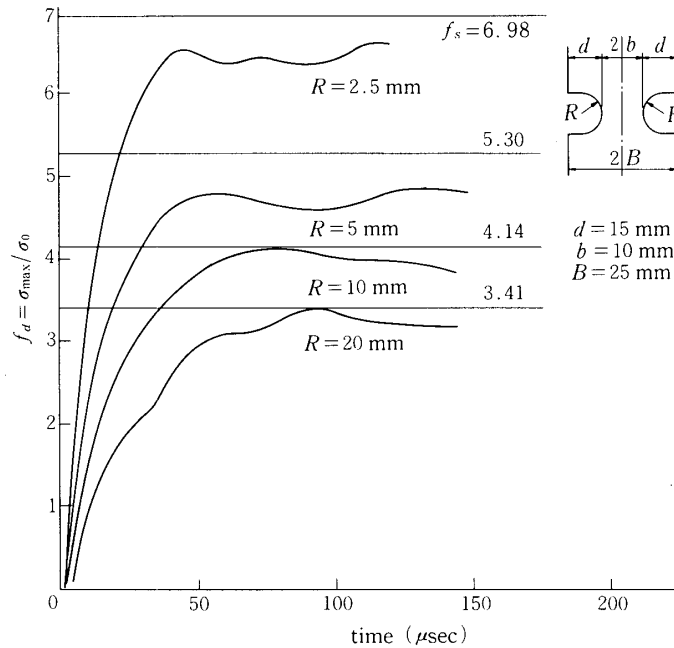


Fig. 18 Variation of dynamic stress concentration factor with time in dynamic tension of very long strip with U-shaped notches. Results by FEM.

#### 参 考 文 献

- [1] 河田幸三, 橋本彰三: 東大宇航研報告, 1, 2 (April, 1965), 69-102.
- [2] K. Kawata, S. Hashimoto: Exp. Mech., 7 (Feb, 1967), 91-96.
- [3] 河田幸三, 橋本彰三: 東大宇航研報告, 8, 2 (B) (1972/6), 377-384.
- [4] 同 上: 日本航空宇宙学会誌, 21, 250 (1973/3), 146-153.
- [5] K. Kurokawa, K. Kawata: Inst. of Space and Aeronautical Science, University of Tokyo, Report No. 540 (Vol. 41, No. 4) (May 1976), 47-89.
- [6] N. M. Newmark: Proc. ASCE EM 3 (1959), 67-94
- [7] 河田幸三, 小林 昭: 東大宇航研報告, 13, 1 (C) (1977/3), 561-573.
- [8] 河田幸三, 橋本彰三, 本堂 明, 井手 徹: 日本機械学会講演論文集 No. 800-9 (1980-7-14, 15, 16, 裾野, 第18回シンポジウム, 衝撃応答), 119-124.
- [9] 河田幸三, 橋本彰三, 井手 徹: 日本光弾性学会第2回研究発表講演会講演論文集 No. 2 (1980), 32-34.
- [10] 河田幸三, 橋本彰三, 本堂 明, 井手 徹: 第7回衝撃工学, 宇宙・特殊環境工学シンポジウム講演集 (1980/10, 東大宇航研), 54-60.