

JAERI-M

7884

光弾性法による応力集中の観察
(PCIモデル実験)

1978年9月

菊地 章・藤田 操

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

光弾性法による応力集中の観察
(PCIモデル実験)

日本原子力研究所東海研究所
安全工学部

菊地 章・藤田 操

(1978年9月1日受理)

軽水炉燃料被覆管の破損誘因としてPCI/SCC(ペレット・被覆管相互作用/応力腐食割れ)が挙げられている。破損とはクラックの伝播を意味するが、このクラック伝播挙動を解析する場合、クラック先端部における応力の分布と集中を正しく求める必要がある。我々の研究室ではクラックの入った体系での応力解析を行うための計算コードを、現在、開発中であるが、計算モデルの妥当性をチェックする必要がある。本報に述べる実験はこの妥当性チェックに必要なデータを提供するために行われたものである。

高温埋込樹脂を成形して得た透明模擬試料を用い、これにクラックを入れて、光弾性法による応力分布を直接観察した。本報には実験で得られた光弾性縞およびそれらの解析が述べられている。

Observation of Stress Concentration by Photoelastic
Method (Experiment of PCI Model)

Akira KIKUCHI and Misao FUJITA

Division of Reactor Safety, Tokai Research
Establishment, JAERI

(Received September 1, 1978)

PCI/SCC (Pellet Cladding Interaction/Stress Corrosion Cracking) causes a cladding failure in LWR fuel rods. The analysis of crack propagation whereby the fuel failure occurs involves precise determination of the stress distribution and concentration at the crack tip. For stress analysis of the system with cracks in the cladding, a computer code is being developed in the authors' laboratory. To confirm validity of calculation models in the code, the present experiment has been quite useful.

Stress distribution in transparent dummy specimens including cracks were observed directly by photoelastic method. Variety of photoelastic pattern and information acquired are presented.

Keywords : Photoelastic Procedure, Stress Concentration,
Pellet-Cladding Interaction,
Stress corrosion Cracking,
Fuel Cladding,
Stress Distribution.

目 次

1. 序 論	1
2. 実 験	1
2.1 試 料	1
2.2 光弾性装置および応力負荷用治具	2
3. 結果および検討	3
3.1 応力感度の測定 (E 1 実験)	3
3.2 応力負荷用治具の性能 (E 2 実験)	3
3.3 単一クラックにおける応力集中	4
3.4 8本クラックにおける応力集中	4
3.5 単一クラックにおけるP C I挙動 (E 5 実験)	5
3.6 特殊クラックにおける応力分布 (E 6 実験)	5
4. 結 論	6
謝 辞	6
参考文献	6

Contents

1. Introduction	1
2. Experimental	1
2.1 Specimens	1
2.2 Photoelastic Equipment and Stress Loading Instrument	2
3. Results and Discussions	3
3.1 The Measurement of Stress Sensitivity (E1 Experiment)	3
3.2 The Performance of Stress Loading Instrument (E2 Experiment)	3
3.3 Stress Concentration on Single Crack	4
3.4 Stress Concentration on Eight Cracks	4
3.5 The PCI Behavior on Single Crack (E5 Experiment)	5
3.6 Stress Distribution for Special Cracks	5
4. Conclusion	6
Acknowledgement	6
References	6

1. 序 論

軽水炉燃料の安全性試験研究の主要課題は通常運転時における過渡的出力急昇下での被覆管破損挙動の解析である。我々は、現在、このための炉内照射試験（ハルデン、インターランププロジェクトその他）を実施しているが、破損現象を広く把握し、基本的な破損機構を確立して破損過程を理解することにつとめている。このためには炉内照射実験データを系統的にまとめる燃料挙動解析計算コード⁽¹⁾が必要であり、この仕事も現在実施中である。さらに計算コード自体の妥当性を充分検証するための炉外実験も場合によって必要となる。

燃料破損はPCI（ペレット・被覆管相互作用）およびSCC（応力腐食割れ）の両者、すなわちPCI/SCC、によることが現在の定説となっている。被覆管破損とは、換言すれば被覆管内面に生じたクラックの被覆管外面への伝播を意味する。被覆管にある長さのクラックを想定するとき、クラック先端部には応力集中が現われ、このような応力分布下におけるクラックの進展可能性を求めなければならない。この体系に対しては線形破壊力学が適用される。被覆管のような円筒形状をもち、かつPCIによって局所的な応力集中外部負荷の重合する複雑な体系の場合、計算コードでモデル化した応力集中結果の妥当性を確認する必要がある。本報に記述する諸実験結果は、将来、この目的のための計算コードモデル妥当性に関する照合用データとして利用される予定である。

光弾性法はクラック先端部の応力分布状態を直接知る手段として最も便利な方法である⁽²⁾。実験結果としての光弾性縞は体系内における主応力差の等しい位置を結ぶ線であり、これより応力分布の様相あるいは応力の大きさなどを直接観察することができる。被覆管は不透明体であり、従ってこれを試料として用いることが不可能であるため（もつとも薄膜蒸着法もあるが）、高温用埋込み樹脂（透明体）を成形して得たものを実験用試料として用いた。最終的目標はPCIモデル下での応力集中の観察である。これに先立って行われた試料の特性、すなわち応力感度、密度およびヤング率を求める実験、外部応力負荷用治具の性能をみるための実験なども本報に述べられている。

2. 実 験

2.1 試 料

実験に用いた試料は円盤状の透明な成形埋込み樹脂である。原材料は高温埋込み樹脂粉末（丸本工業K・K製#301）で、これを高温プレス機により温度200℃、時間10分、圧力200Kg/cm²で円盤状に成形した。成形体には少しのボイドもなく、その密度は約1.2g/cm³であった。なお光弾性実験における光の透過方向は、成形時のプレス負荷方向である。

1. 序 論

軽水炉燃料の安全性試験研究の主要課題は通常運転時における過渡的出力急昇下での被覆管破損挙動の解析である。我々は、現在、このための炉内照射試験（ハルデン、インターランププロジェクトその他）を実施しているが、破損現象を広く把握し、基本的な破損機構を確立して破損過程を理解することにつとめている。このためには炉内照射実験データを系統的にまとめる燃料挙動解析計算コード⁽¹⁾が必要であり、この仕事も現在実施中である。さらに計算コード自体の妥当性を充分検証するための炉外実験も場合によって必要となる。

燃料破損はPCI（ペレット・被覆管相互作用）およびSCC（応力腐食割れ）の両者、すなわちPCI/SCC、によることが現在の定説となっている。被覆管破損とは、換言すれば被覆管内面に生じたクラックの被覆管外面への伝播を意味する。被覆管にある長さのクラックを想定するとき、クラック先端部には応力集中が現われ、このような応力分布下におけるクラックの進展可能性を求めなければならない。この体系に対しては線形破壊力学が適用される。被覆管のような円筒形状をもち、かつPCIによって局所的な応力集中外部負荷の重合する複雑な体系の場合、計算コードでモデル化した応力集中結果の妥当性を確認する必要がある。本報に記述する諸実験結果は、将来、この目的のための計算コードモデル妥当性に関する照合用データとして利用される予定である。

光弾性法はクラック先端部の応力分布状態を直接知る手段として最も便利な方法である⁽²⁾。実験結果としての光弾性縞は体系内における主応力差の等しい位置を結ぶ線であり、これより応力分布の様相あるいは応力の大きさなどを直接観察することができる。被覆管は不透明体であり、従ってこれを試料として用いることが不可能であるため（もつとも薄膜蒸着法もあるが）、高温用埋込み樹脂（透明体）を成形して得たものを実験用試料として用いた。最終的目標はPCIモデル下での応力集中の観察である。これに先立って行われた試料の特性、すなわち応力感度、密度およびヤング率を求める実験、外部応力負荷用治具の性能をみるための実験なども本報に述べられている。

2. 実 験

2.1 試 料

実験に用いた試料は円盤状の透明な成形埋込み樹脂である。原材料は高温埋込み樹脂粉末（丸本工業K・K製#301）で、これを高温プレス機により温度200℃、時間10分、圧力200Kg/cm²で円盤状に成形した。成形体には少しのボイドもなく、その密度は約1.2g/cm³であった。なお光弾性実験における光の透過方向は、成形時のプレス負荷方向である。

プレス成形時、プレス材の特性のため試料外周部にわずかの残留応力のあることが認められた。しかしながら実験精度に比較してこれらに問題のないことが確認されたので、残留応力の除去は行っていない。試料の外径は30 mmであるが、試料には内圧負荷用治具挿入のため内径10 mmあるいは15 mmの中心孔が開けられている。

Fig. 1に、行った実験の番号(E1~E6)と目的およびそれぞれの試料の形状を示す。実験E1に用いた試料は特性として重要である応力感度測定のためのもので角柱形状である。実験E2は応力負荷用治具の性能をみるためのもので、本実験の標準となる試料である。E3およびE5実験における試料には微小なひとつのクラックを内面に設け、またE4実験用試料には8個のクラックを設けた。E6実験用試料の内面には図のような凹凸を設けているが、これはいわゆる応力集中の緩和を計るためのレメディーモデルである。

なお、応力値の推定の際、試料のヤング率を必要とする。角柱試料を用い、超音波法によりヤング率を測定した。試料のヤング率測定値は $6.64 \times 10^2 \text{ Kg/mm}^2$ であった。

2.2 光弾性装置および応力負荷用治具

実験に用いた光弾性測定装置は溝尻光学工業所製PE-L型である。装置の構成をFig. 2に示す。光源(1)は白色光あるいは水銀燈の切換え式で、光はシボリ(2)を経て集光レンズ(3)により平行ビームとなる。平行光線は偏光板(4)を通過して平面偏光となり、さらに1/4波長板(5)によって円偏光となる。試料(S)を通過した光は1/4波長板(6)、検光板(偏光板-7)をとおり、集光レンズ(8)でしばられて、スクリーン(9)上に光弾性縞を写す。なお平行光線の直径は約60 mmである。

光弾性縞次数 N 、主方向応力差 $(\sigma_1 - \sigma_2)$ 、応力感度 α および試料厚 t の間には光弾性理論より次の関連が与えられる⁽³⁾。

$$N = \alpha t (\sigma_1 - \sigma_2) \quad (1)$$

故に N 、 α および t を知ることによって主応力差 $(\sigma_1 - \sigma_2)$ を知ることができる。この等主応力差を示す縞はFig. 2に示した系全体で求められるもので、等色線と云われる。Fig. 2の構成より2枚の1/4波長板を除くことにより、すなわち平面偏光で得られる縞は等傾線と云われ、これは主応力軸のなす角度すなわち方向を示すものである。このようにある系の応力分布と応力値は等色線と等傾線の観察によって求められる。

ところで、本実験の主な目標は、第1章に述べたように、ペレットと被覆管との相関すなわちPCI下における応力集中の観察であり、特にペレットの径方向クラックの開きによって生じる被覆管応力集中の様相を知ることである。この状態をFig. 3(A)に示す。同図(B)はこれの実験用モデルを示したものである。本実験ではペレット外周の円周方向スベリによる状態をリングの開きによって模擬した。このために試作した具体的な応力負荷用治具の構成をFig. 4に示す。ネジをしめることによってテフロン製円筒ピースは径方向に変位し、試料に拘束されることによって試料に径方向負荷応力を生じる。本図ではFig. 3に示したリングを

省いているが、POIモデル実験では試料とピースの間にこれを挿入した。試料外面にはその円周方向にひずみゲージがとりつけられた。これは負荷された内圧を計算するためのもので、外面の円周応力およびヤング率より負荷内圧が求められる。

3. 結果および検討

3.1 応力感度の測定 (E 1 実験)

実験に用いた試料の応力感度 α は式(1)で求められるが、本研究ではこの測定のために4点曲げ試験法を採用した。Fig. 5に示すように、下端の2点を支え、上端2点にそれぞれ $W/2$ の荷重をかけると光弾性等色線の縞が得られる。中央軸($y=0$)のところには次数零($N=0$)の縞が現われ、上下方向の対称位置($y=y_1, y_2, y_3, \dots$)に1次以降の縞が平行に生じる。厚さを t 、高さを h 、支点間距離を L および ℓ とすると、応力感度 α は次式により計算される。

$$\alpha = \frac{h^3}{6W(L-\ell)} \frac{N}{y} \quad (2)$$

すなわち位置 y に対応する縞次数 N を読みとることによって応力感度 α が計算される。

実験で得られた光弾性縞の写真をPhoto. 1に示す。式(2)に従って縞の現われている位置 y を測定し、計算することにより、次の応力感度が得られた。

$$\alpha = 5.8 \times 10^{-2} \quad \text{f7. mm/Kg}$$

なお y の測定は本写真を黒化度計にかけ、そのピークの位置より求めている。

3.2 応力負荷用治具の性能 (E 2 実験)

3.2.1 等色線と等傾線

円筒試料の内部に径方向に作用する一様な径方向応力を生じさせるための応力負荷用治具を試作し、一連の実験に使用したが、本節はこの治具の性能について記述する。

Photo. 2は標準試料を用いて得られたある応力状態における縞模様(等色線)である。完全な同心円状光弾性縞であり、応力負荷用治具が首尾よく機能していることが判った。

等色線は式(1)にみられるように主応力差($\sigma_1 - \sigma_2$)の等しい縞であるが、2つの主応力 σ_1 および σ_2 、あるいは直交座標系における応力(σ_x, σ_y および τ_{xy})を計算するためには、実験上、等傾線を観察する必要がある。Photo. 3は同形試料で観察して得た等傾線である。なお等傾線の示す角度 θ_n と主応力差($\sigma_1 - \sigma_2$)より、直交座標系におけるせん断応力 τ_{xy} は次式、すなわち

$$\tau_{xy} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \sin 2\theta_n \quad (3)$$

省いているが、P O Iモデル実験では試料とピースの間にこれを挿入した。試料外面にはその円周方向にひずみゲージがとりつけられた。これは負荷された内圧を計算するためのもので、外面の円周応力およびヤング率より負荷内圧が求められる。

3. 結果および検討

3.1 応力感度の測定 (E 1 実験)

実験に用いた試料の応力感度 α は式(1)で求められるが、本研究ではこの測定のために4点曲げ試験法を採用した。Fig. 5に示すように、下端の2点を支え、上端2点にそれぞれ $W/2$ の荷重をかけると光弾性等色線の縞が得られる。中央軸($y=0$)のところには次数零($N=0$)の縞が現われ、上下方向の対称位置($y=y_1, y_2, y_3, \dots$)に1次以降の縞が平行に生じる。厚さを t 、高さを h 、支点間距離を L および ℓ とすると、応力感度 α は次式により計算される。

$$\alpha = \frac{h^3}{6W(L-\ell)} \frac{N}{y} \quad (2)$$

すなわち位置 y に対応する縞次数 N を読みとることによって応力感度 α が計算される。

実験で得られた光弾性縞の写真をPhoto. 1に示す。式(2)に従って縞の現われている位置 y を測定し、計算することにより、次の応力感度が得られた。

$$\alpha = 5.8 \times 10^{-2} \quad \text{fr. mm/Kg}$$

なお y の測定は本写真を黒化度計にかけ、そのピークの位置より求めている。

3.2 応力負荷用治具の性能 (E 2 実験)

3.2.1 等色線と等傾線

円筒試料の内部に径方向に作用する一様な径方向応力を生じさせるための応力負荷用治具を試作し、一連の実験に使用したが、本節はこの治具の性能について記述する。

Photo. 2は標準試料を用いて得られたある応力状態における縞模様(等色線)である。完全な同心円状光弾性縞であり、応力負荷用治具が首尾よく機能していることが判った。

等色線は式(1)にみられるように主応力差($\sigma_1 - \sigma_2$)の等しい縞であるが、2つの主応力 σ_1 および σ_2 、あるいは直交座標系における応力(σ_x, σ_y および τ_{xy})を計算するためには、実験上、等傾線を観察する必要がある。Photo. 3は同形試料で観察して得た等傾線である。なお等傾線の示す角度 θ_n と主応力差($\sigma_1 - \sigma_2$)より、直交座標系におけるせん断応力 τ_{xy} は次式、すなわち

$$\tau_{xy} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \sin 2\theta_n \quad (3)$$

によって計算される。

3.2.2 縞次数 (N) と主応力差 ($\sigma_1 - \sigma_2$) の関係

縞次数 (N) と主応力差 ($\sigma_1 - \sigma_2$) の間には式(1)の関係がある。次節以降の解析にも必要となるが、これらの間の関係は本報を通して共通である。Photo. 4 にこの関係を求める実験で得た光弾性縞を示す。治具により負荷応力を序々に増した段階で円周方向ひずみを測定し、これより負荷応力を計算した。この値を用いて1 定内圧負荷円筒における主応力差⁽⁴⁾すなわち

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{2 Y_o^2 Y_i^2}{Y_o^2 - Y_i^2} \cdot \frac{P}{Y^2}$$

を求めた。ここに Y_i , Y_o および Y は試料内外径, および半径位置であり, P は内圧である。N と ($\sigma_1 - \sigma_2$) の測定解析結果を Table 1 に示す。

3.2.3 PCI モデルの性能

Fig. 3 の B) における PCI モデルで得られた光弾性縞を Photo. 5 に示す。試験的にテフロンリングの開口部が広いものと狭いものについて実験を行ったが、広いものではその開口部に相対する試料位置で比較的大きな応力集中が認められた。開口部の狭いものではわずかの応力集中がみられる。従って以降の実験では開口部の広いものを採用している。

3.3 単一クラックにおける応力集中

試料内面の1ヶ所にひとつの微小クラック (Vノッチ) を入れ、内部負荷応力を増加させながら光弾性縞の現われ方とその形状とを観察した。この様相を Photo. 6 に示す。前章のはじめに述べたように、試料には a) にみられるような残留応力があつたが、e) 以降ではそれが外部に押しやられて消滅している。クラック先端部にまづ双葉状の縞が現われ、それが負荷の増大につれて試料の外部へと成長していく様子が判る。系全体についてみるとこの単一クラックによって応力状態が乱されている領域は、h) に示すように約 45 度であり、その他では縞が同心円状に分布している。

これらの縞模様を描写して得た図を Fig. 6 A) に示す。図は縞全体 (N=1~5) を示すとともに、また双葉状縞の成長過程 (a → b → ... → f) を描写している。双葉状縞のクラック軸に対する方向は約 45 度で、これは平面応力状態における破壊力学での解析結果と一致している⁽⁵⁾。当然のことながら実際には双葉状縞の内部にもさらに大きな応力の状態がある (試料の応力感度に従って現われない)。このようにクラック先端部では応力集中が存在している。なお計算コードとの比較は次節の 8 本クラックについて行うので、ここでは省略する。

3.4 8 本クラックにおける応力集中

3.4.1 光弾性縞

軽水炉燃料棒の UO_2 ペレットには熱応力による割れがあり、だいたい8本の径方向クラックの存在することが統計的にみられている。ジルカロイ被覆管のPCI/SCCでは、これら8本のクラックに対応する場所(被覆管内面)にクラックが発生する。このような状態を想定して、本実験では試料内面に8本の微小クラックを設定した。

8本の微小クラック(Vノッチ)を持った試料で得られた光弾性縞観察結果をPhoto.7およびPhoto.8に示す。Photo.7は比較的小さな4角形ノッチの場合、一方、Photo.8は3角形ノッチの場合の等色線である。いずれの場合も、系全体としてみるとほとんど同様の縞模様であり、またクラック先端部においても前節に述べた単一クラックにおける縞模様と類似している。

これらの縞図より描写して得た定性的拡大図をFig.6B)に示す。この図でも全体的様相と縞の成長がみられ、それらは前述と同様の成長過程をたどっていることが判った。また円周方向における対称軸はクラック軸(x)のほかこの軸と 22.5° 離れた軸(x^*)の2本である。

3.4.2 計算コードによる結果との定性的比較

軽水炉燃料被覆管におけるPCI/SCC解析に関連して、我々は既に有限要素法および線形破壊力学を用いた計算コードCRAP1を開発し、これによる試計算結果を報告している⁽¹⁾。この報告書には内圧が作用しているクラック入り被覆管における応力分布と応力拡大係数が求められている。計算で得られた応力分布に関する計算結果の例をFig.7に示す。

光弾性実験の体系とは寸法的に異なるが、主要な点は同等であり、Fig.7に示すように開き角度は 22.5° にし、内圧 P_i を負荷している。CRAP1は3角形1次の有限要素よりなり、これらに移動性の追加節点および追加要素を加えてクラックの存在を定義づけている。Fig.8の応力分布図から判るように、クラック先端の要素における応力が最大で約 45° の方向に応力の分布がみられる。この様相は光弾性実験で得られた結果(Fig.7)とよく類似している。

3.5 単一クラックにおけるPCI挙動(E5実験)

Fig.1のE5実験で得られた光弾性縞をPhoto.9に示す。これはPhoto.6に示した実験と関連し、軽水炉燃料に生じていると思われる局所的PCIをモデル化したものである。ペレットの開口を模擬したPCIの影きょうと思われるが、明らかに異った縞模様である。なおPhoto.6でみられたような多くの縞が形成されないうちに試料には径方向のクラックが入り、このこともPCIによる応力集中強化を示している。

3.6 特殊クラックにおける応力分布(E6実験)

本実験の応用として試料の内側に凸凹状の特殊クラック(ノッチ)を入れた場合の光弾性縞を観察した。この実験はH. Mogardによって提起されているRemedy燃料を模擬したものである。この結果をPhoto.10に示す。等色線の様相は前節までに述べたものたとえばPhoto.7および8、と異なり、クラック先端部でかなり柔らかくなっていることが判る。

Fig. 6 C) はこれより得た描写であるが、その相異はこの図によく現われている。

4. 結 論

軽水炉燃料の PCI / SCC 破損研究に関連し、クラック入り円筒試料における平面応力場での応力分布を光弾性法を用いて直接観察した。この結果、次のことが判った。

- 1) クラック先端部には45度方向に向いた応力分布が存在する。これはその初期において双葉状光弾性縞となって観察された。
- 2) このような様相は有限要素法および線形破壊力学を適用して開発した計算コード CRAP1 による計算結果とよく一致している。
- 3) クラック数が多くなっても単一クラックの場合とほとんど類似した縞模様がみられた。この場合にはクラック軸と2つのクラックの中間の軸が対称軸となっている。
- 4) 実際の燃料の PCI で予想されているペレットの開きによる対応ヶ所の応力集中が観察された。クラックのある場合にはこの効果が重畳された応力集中が存在する。
- 5) 特殊な凸凹ノッチを有する試料では応力集中の緩和される傾向にあることがみとめられた。

謝 辞

本実験において種々の助言をいただいた燃料安全第一研究室長市川達生氏をはじめ同研究室諸氏および補足実験の一部に協力をいただいた燃料照射研究室の飛田勉、鹿志村悟氏に対し、深く感謝の意を表したい。

参 考 文 献

- (1) 菊地章, 藤田操, クラック先端部における応力拡大係数の計算 (PCI 実験) 解析のための FEM および LFM による予備計算, JAERI-M 7716
- (2) G. R. Irwin et al., Photoelastic Studies of Crack Propagation and Crack Arrest, NUREG-0342
- (3) 川田雄一, 平修正, 多田美朝共編, 応力測定マニュアル, P. 190 ~ 光弾性実験法, オーム社
- (4) 白鳥英亮著, 材料の力学, P. 136 ~ 139, 機械工学基礎シリーズ1, 朝倉書店
- (5) 岡村弘之著, 線形破壊力学入門, P. 81, 破壊力学と材料強度講座1, 培風館

Fig. 6 C) はこれより得た描写であるが、その相異はこの図によく現われている。

4. 結 論

軽水炉燃料の PCI / SCC 破損研究に関連し、クラック入り円筒試料における平面応力場での応力分布を光弾性法を用いて直接観察した。この結果、次のことが判った。

- 1) クラック先端部には45度方向に向いた応力分布が存在する。これはその初期において双葉状光弾性縞となって観察された。
- 2) このような様相は有限要素法および線形破壊力学を適用して開発した計算コード CRAP1 による計算結果とよく一致している。
- 3) クラック数が多くなっても単一クラックの場合とほとんど類似した縞模様がみられた。この場合にはクラック軸と2つのクラックの中間の軸が対称軸となっている。
- 4) 実際の燃料の PCI で予想されているペレットの開きによる対応ヶ所の応力集中が観察された。クラックのある場合にはこの効果が重畳された応力集中が存在する。
- 5) 特殊な凸凹ノッチを有する試料では応力集中の緩和される傾向にあることがみとめられた。

謝 辞

本実験において種々の助言をいただいた燃料安全第一研究室長市川達生氏をはじめ同研究室諸氏および補足実験の一部に協力をいただいた燃料照射研究室の飛田勉、鹿志村悟氏に対し、深く感謝の意を表したい。

参 考 文 献

- (1) 菊地章, 藤田操, クラック先端部における応力拡大係数の計算 (PCI 実験) 解析のための FEM および LFM による予備計算, JAERI-M 7716
- (2) G. R. Irwin et al., Photoelastic Studies of Crack Propagation and Crack Arrest, NUREG-0342
- (3) 川田雄一, 平修正, 多田美朝共編, 応力測定マニュアル, P. 190 ~ 光弾性実験法, オーム社
- (4) 白鳥英亮著, 材料の力学, P. 136 ~ 139, 機械工学基礎シリーズ1, 朝倉書店
- (5) 岡村弘之著, 線形破壊力学入門, P. 81, 破壊力学と材料強度講座1, 培風館

Fig. 6 C) はこれより得た描写であるが、その相異はこの図によく現われている。

4. 結 論

軽水炉燃料の PCI / SCC 破損研究に関連し、クラック入り円筒試料における平面応力場での応力分布を光弾性法を用いて直接観察した。この結果、次のことが判った。

- 1) クラック先端部には45度方向に向いた応力分布が存在する。これはその初期において双葉状光弾性縞となって観察された。
- 2) このような様相は有限要素法および線形破壊力学を適用して開発した計算コード CRAP1 による計算結果とよく一致している。
- 3) クラック数が多くなっても単一クラックの場合とほとんど類似した縞模様がみられた。この場合にはクラック軸と2つのクラックの中間の軸が対称軸となっている。
- 4) 実際の燃料の PCI で予想されているペレットの開きによる対応ヶ所の応力集中が観察された。クラックのある場合にはこの効果が重畳された応力集中が存在する。
- 5) 特殊な凸凹ノッチを有する試料では応力集中の緩和される傾向にあることがみとめられた。

謝 辞

本実験において種々の助言をいただいた燃料安全第一研究室長市川達生氏をはじめ同研究室諸氏および補足実験の一部に協力をいただいた燃料照射研究室の飛田勉、鹿志村悟氏に対し、深く感謝の意を表したい。

参 考 文 献

- (1) 菊地章, 藤田操, クラック先端部における応力拡大係数の計算 (PCI 実験) 解析のための FEM および LFM による予備計算, JAERI-M 7716
- (2) G. R. Irwin et al., Photoelastic Studies of Crack Propagation and Crack Arrest, NUREG-0342
- (3) 川田雄一, 平修正, 多田美朝共編, 応力測定マニュアル, P. 190 ~ 光弾性実験法, オーム社
- (4) 白鳥英亮著, 材料の力学, P. 136 ~ 139, 機械工学基礎シリーズ1, 朝倉書店
- (5) 岡村弘之著, 線形破壊力学入門, P. 81, 破壊力学と材料強度講座1, 培風館

Fig. 6 C) はこれより得た描写であるが、その相異はこの図によく現われている。

4. 結 論

軽水炉燃料の PCI / SOC 破損研究に関連し、クラック入り円筒試料における平面応力場での応力分布を光弾性法を用いて直接観察した。この結果、次のことが判った。

- 1) クラック先端部には45度方向に向いた応力分布が存在する。これはその初期において双葉状光弾性縞となって観察された。
- 2) このような様相は有限要素法および線形破壊力学を適用して開発した計算コード CRAP1 による計算結果とよく一致している。
- 3) クラック数が多くなっても単一クラックの場合とほとんど類似した縞模様がみられた。この場合にはクラック軸と2つのクラックの中間の軸が対称軸となっている。
- 4) 実際の燃料の PCI で予想されているペレットの開きによる対応ヶ所の応力集中が観察された。クラックのある場合にはこの効果が重畳された応力集中が存在する。
- 5) 特殊な凸凹ノッチを有する試料では応力集中の緩和される傾向にあることがみとめられた。

謝 辞

本実験において種々の助言をいただいた燃料安全第一研究室長市川達生氏をはじめ同研究室諸氏および補足実験の一部に協力をいただいた燃料照射研究室の飛田勉、鹿志村悟氏に対し、深く感謝の意を表したい。

参 考 文 献

- (1) 菊地章, 藤田操, クラック先端部における応力拡大係数の計算 (PCI 実験) 解析のための FEM および LFM による予備計算, JAERI-M 7716
- (2) G.R. Irwin et al., Photoelastic Studies of Crack Propagation and Crack Arrest, NUREG-0342
- (3) 川田雄一, 平修正, 多田美朝共編, 応力測定マニュアル, P.190 ~ 光弾性実験法, オーム社
- (4) 白鳥英亮著, 材料の力学, P.136 ~ 139, 機械工学基礎シリーズ1, 朝倉書店
- (5) 岡村弘之著, 線形破壊力学入門, P.81, 破壊力学と材料強度講座1, 培風館

Table 1 Relation between N and $(\sigma_1 - \sigma_2)$

Pattern in Photo.4	*1 N	*2 Strain $\epsilon_{\theta 0}$	*3 Stress $\sigma_{\theta 0}$ (kg/cm ²)	*4 r_0/r	*5 $\sigma_1 - \sigma_2$	*6 $\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{}$ (kg/cm ²)
A	1	1.2×10^{-3}	8.0×10^1	3.8/3.2	1.12×10^2	
	2			3.8/2.1	2.61×10^2	
B	1	1.3×10^{-3}	8.6×10^1	3.8/3.2	1.22×10^2	
	2			3.8/2.3	2.36×10^2	
	3			3.8/1.7	4.31×10^2	
*7 C	1	1.5×10^{-3}	10.0×10^1	3.8/3.3	1.31×10^2	1.22×10^2
	2			3.8/2.4	2.49×10^2	2.49×10^2
	3			3.8/1.8	4.44×10^2	4.38×10^2
	4					6.00×10^2
	5					7.60×10^2

*1 Fringes order

*2 Strain measured at the outer surface

*3 Stress calculated from $\sigma_{\theta 0} = E \epsilon_{\theta 0}$

E: Young's modulus measured $\dots = 6.64 \times 10^2 \text{ kg/mm}^2$

*4 Radius ratio $\dots r_0:r$ at the outer surface

*5 $\sigma_1 - \sigma_2 = \sigma_{\theta 0} (r_0/r)^2$

*6 Average value of $(\sigma_1 - \sigma_2)$ for each fringe [kg/cm²]

*7 The values $(\sigma_1 - \sigma_2)$ obtained by the extrapolation for the fringes 4 and 5

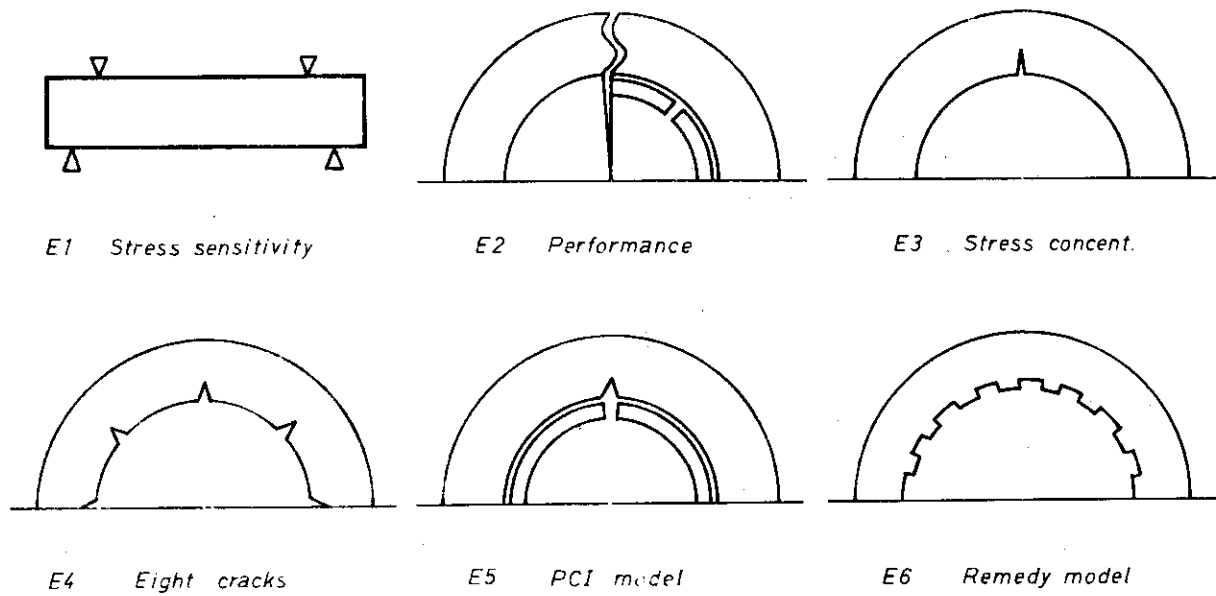
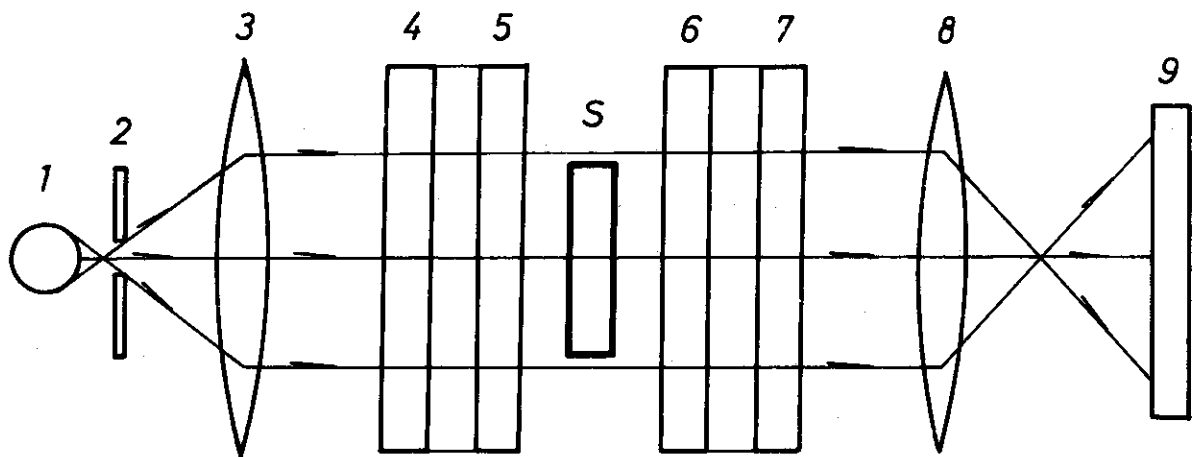


Fig.1 Specimens and objectives in photoelastic experiments.



- | | | | |
|-----|-----------------------|-----|-------------------------|
| S | : sample | | |
| 1 | : light source | 2 | : iris |
| 3,8 | : lens | 4,7 | : polarized light plate |
| 5,6 | : $1/4 \lambda$ plate | 9 | : screen |

Fig.2 Constitution of photoelastic apparatus.

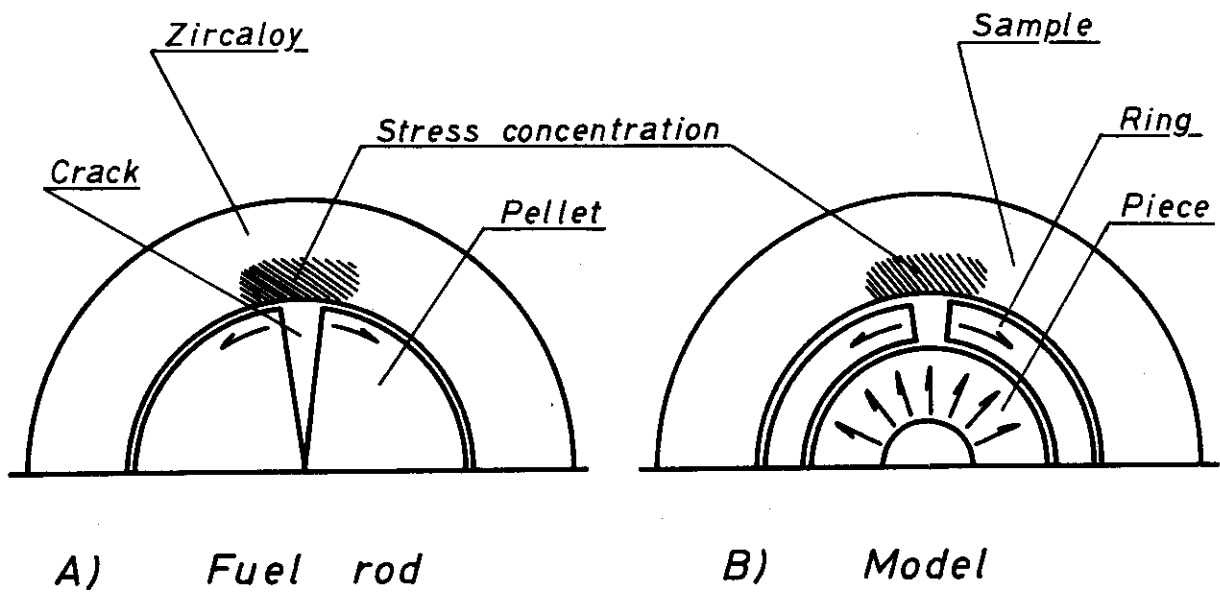


Fig. 3 Experimental model for reproducing PCI phenomenon in fuel rod.

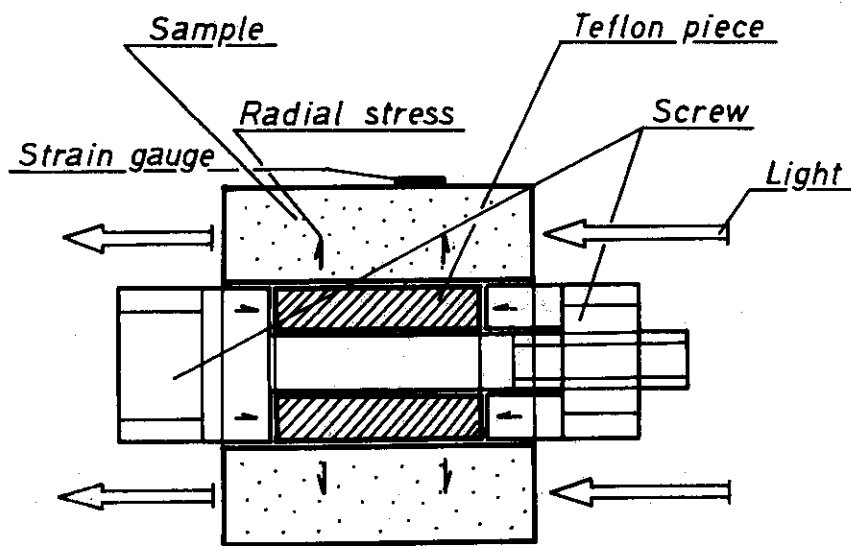


Fig. 4 Illustration of stress-loading apparatus.

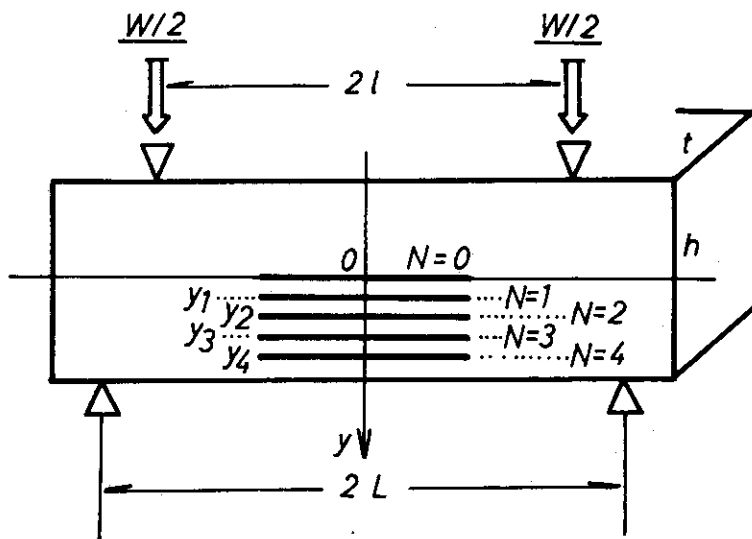


Fig.5 Determination of stress sensitivity by four points bending procedure.

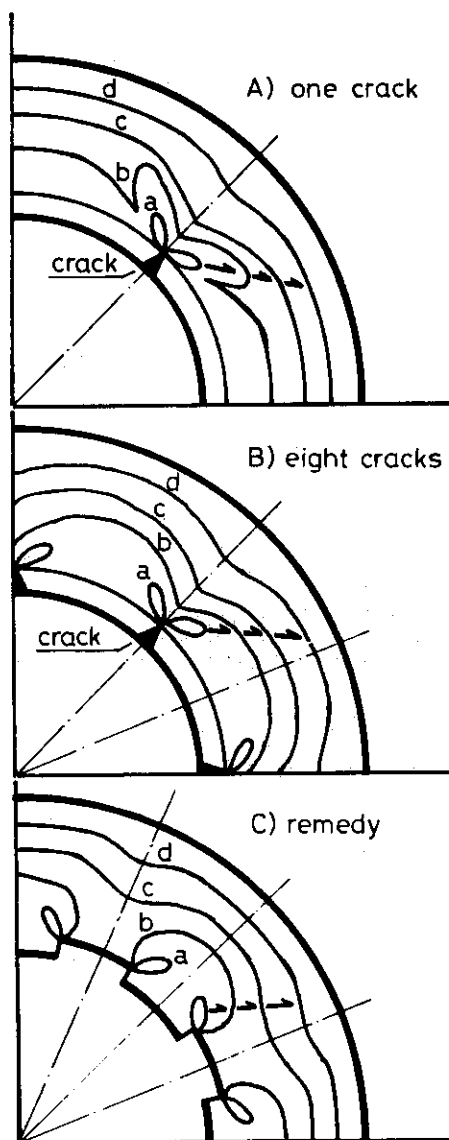
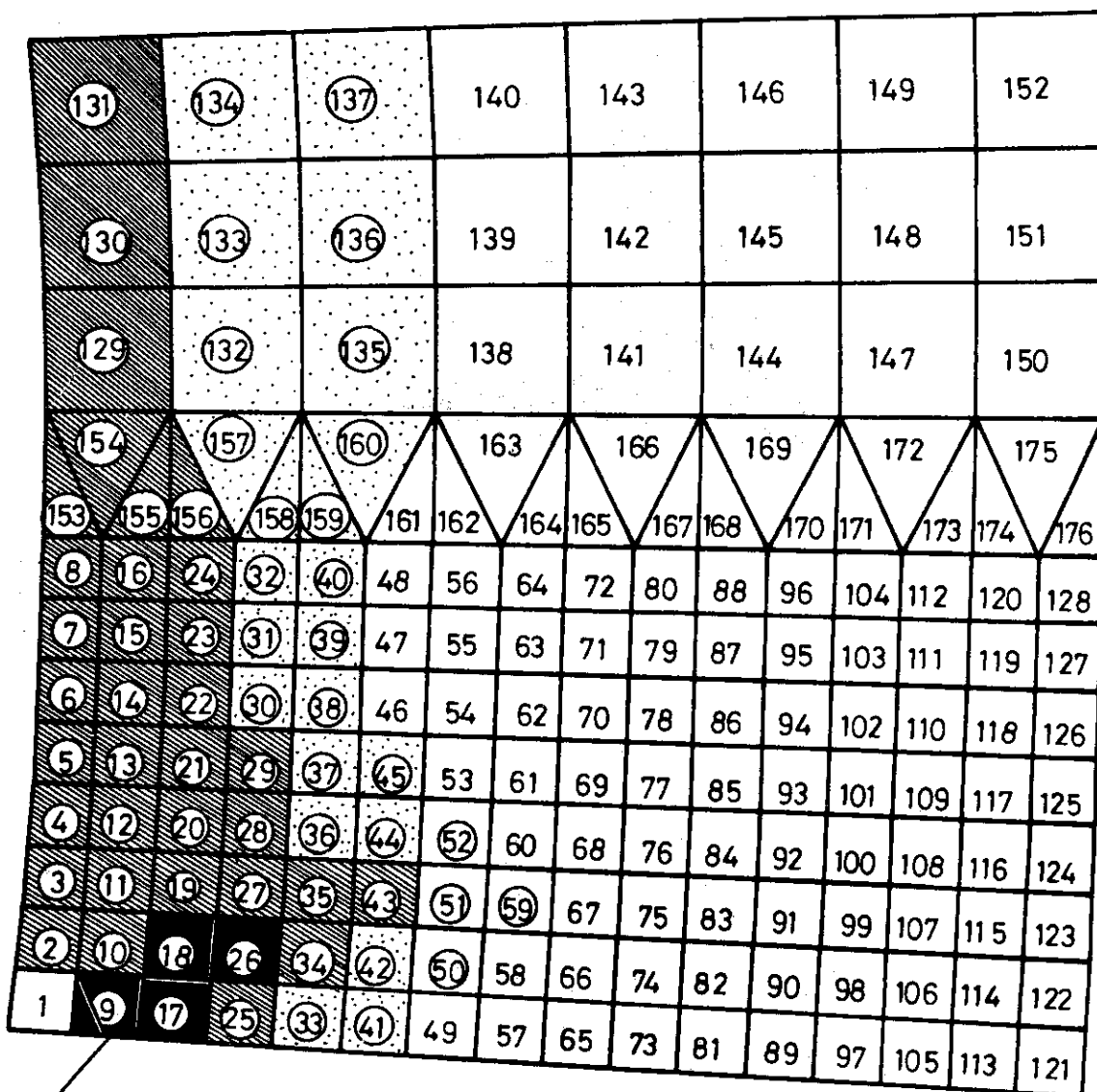


Fig.6 Illustration of photoelastic patterns in three specimens, showing the process of pattern growth.

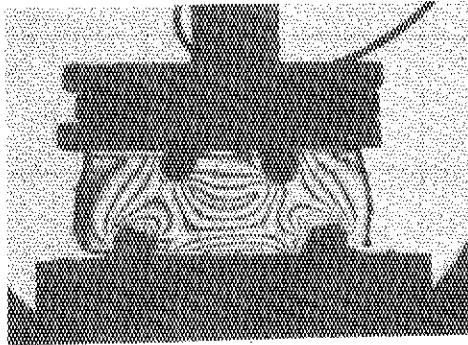


Crack tip

Element

9 8.7-5.9
 25 5.7-5.9
 33 5.5-5.7
 49 < 5.5 $\times 10^5$

Fig. 7 Stress distribution and concentration in the objective region of the system including eight cracks, which were calculated by using the computer code CRAP1.



$$W = 31.8 \text{ Kg}$$

$$h = 9.8 \text{ mm}$$

$$L = 21.5 \text{ mm}$$

$$l = 11.0 \text{ mm}$$

$$\alpha = 5.8 \times 10^{-2} \text{ frmm/Kg}$$

Photo.1 Photoelastic patterns obtained by four points-bending test.

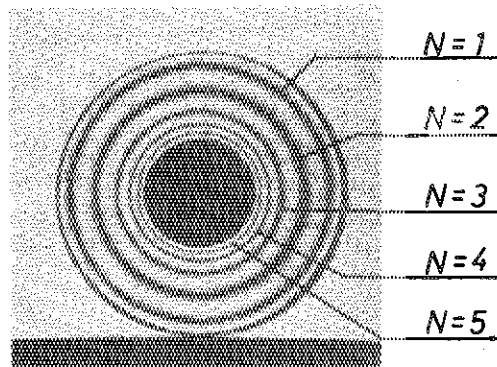


Photo.2 Photoelastic patterns observed in the standard specimen, showing concentric circles.

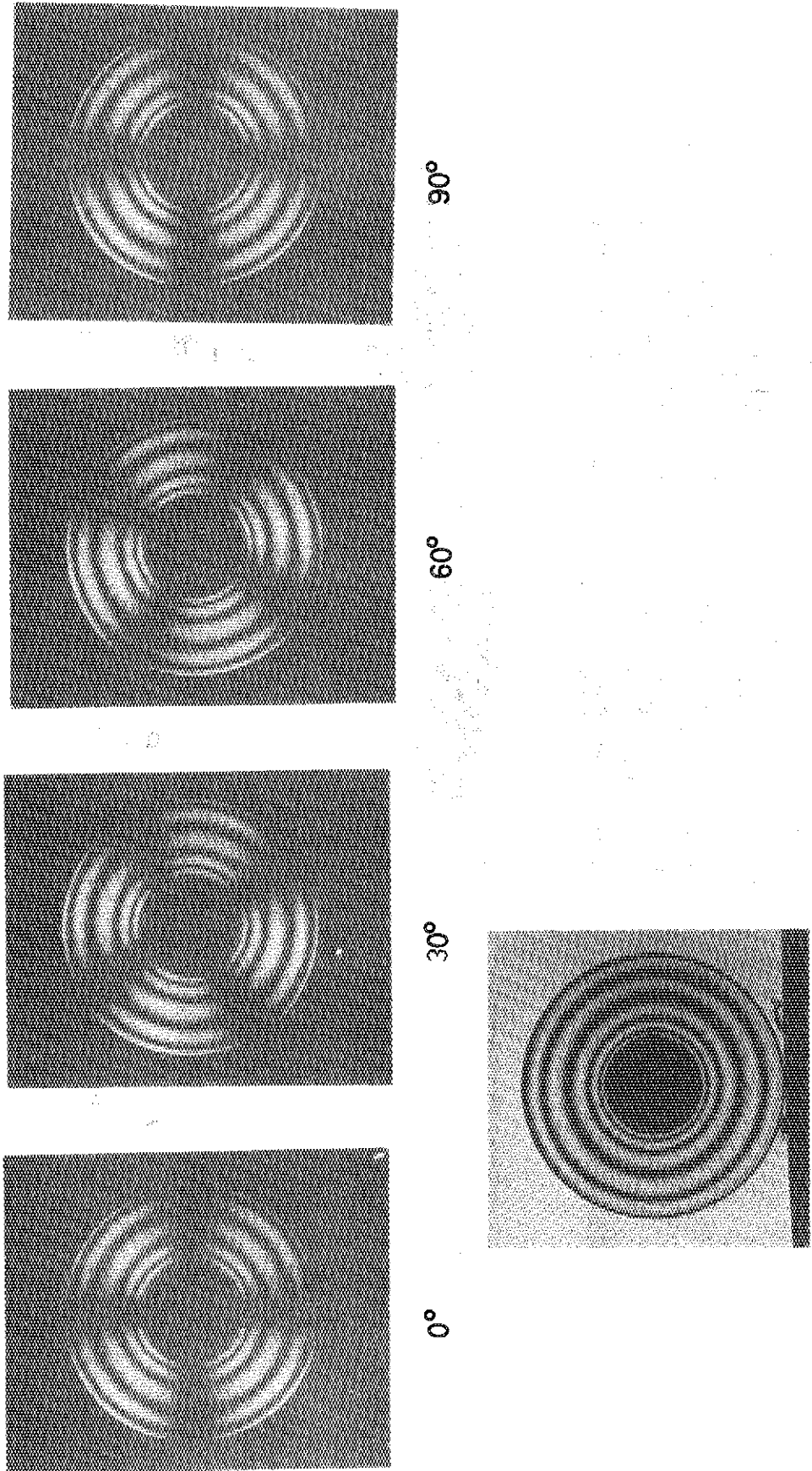


Photo.3 Isoclinic lines observed in the standard specimen.

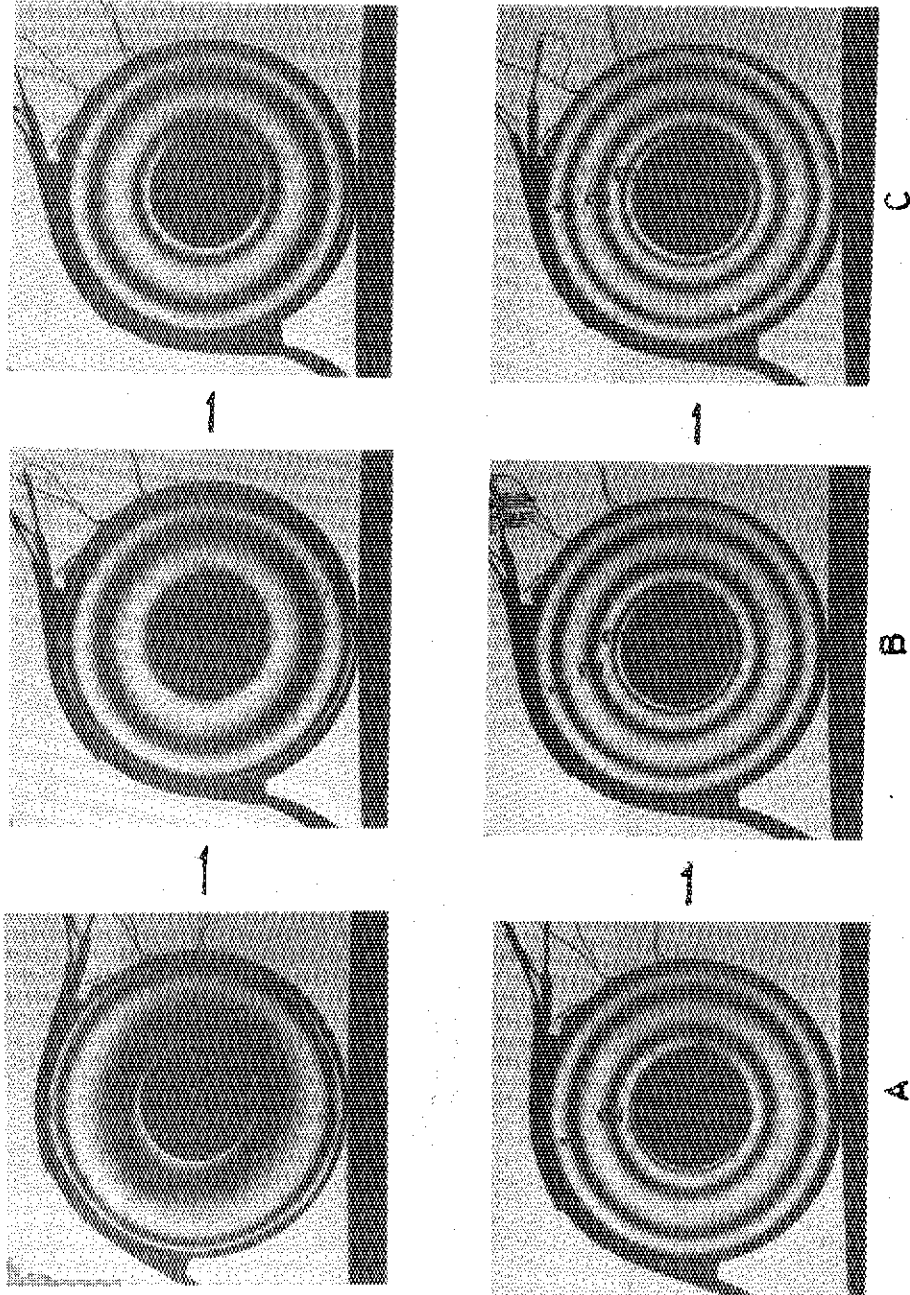


Photo.4 Photoelastic patterns used in the experiment for determining the relation between N and $(\sigma_1 - \sigma_2)$.

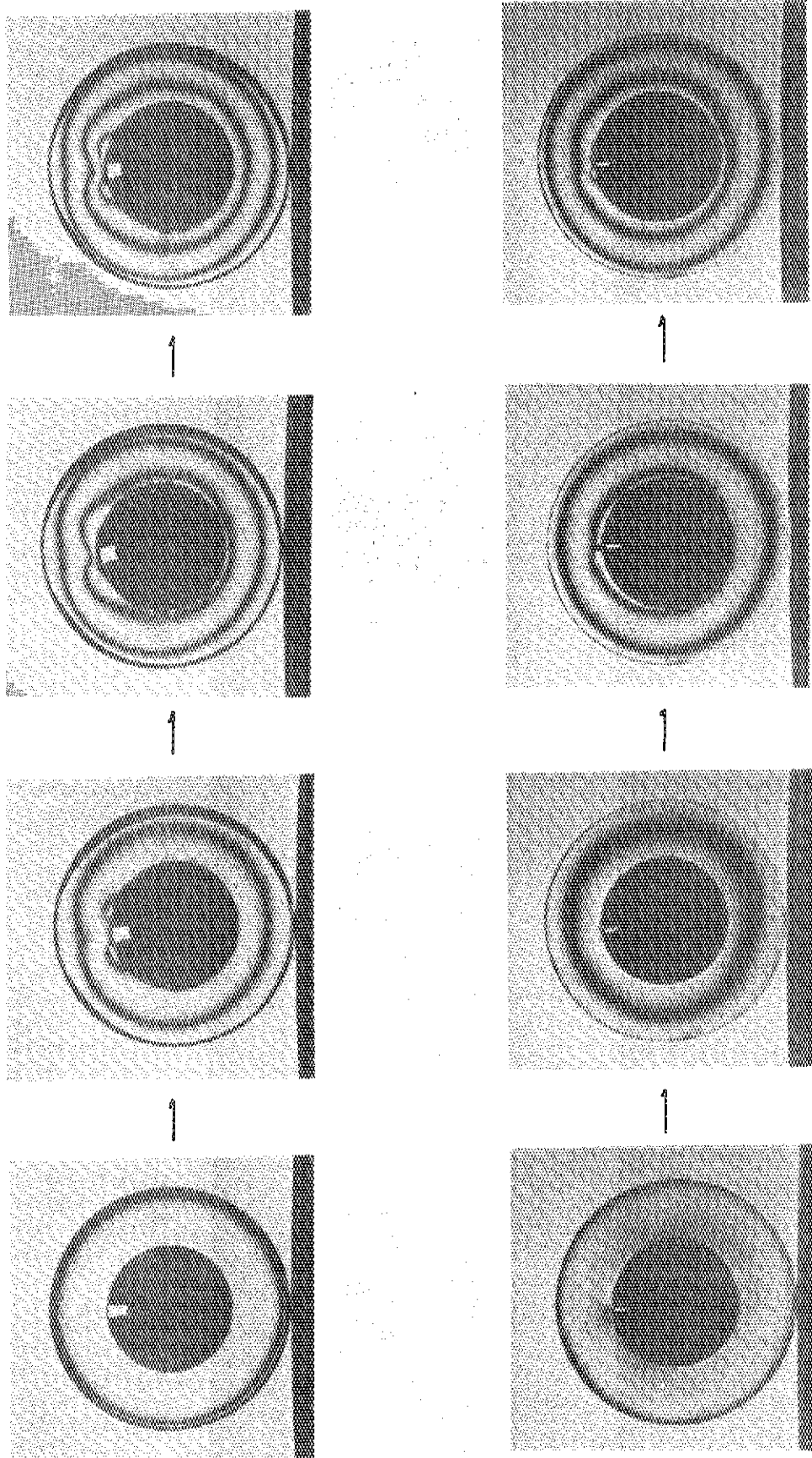
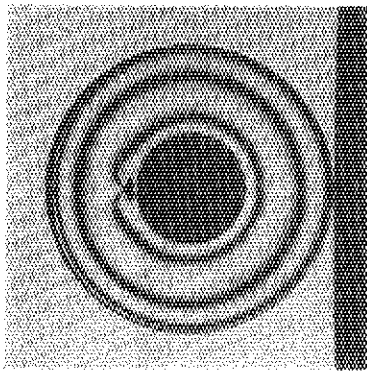
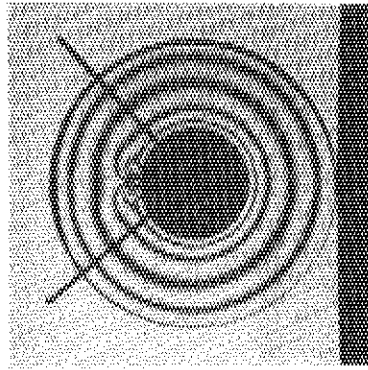


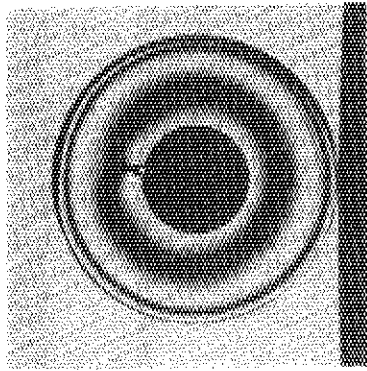
Photo.5 Photoelastic patterns obtained in PCI model experiments, showing stress concentration at the objective position.



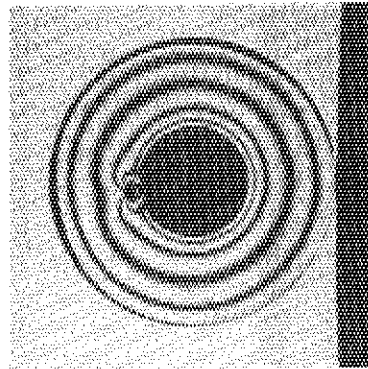
d) $n=1-3$



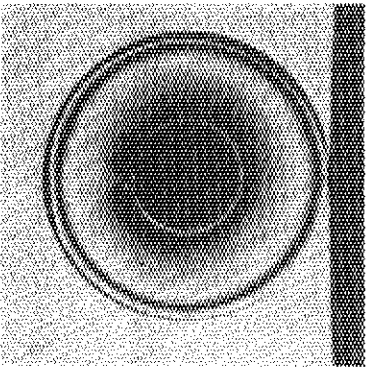
h) $n=1-5$



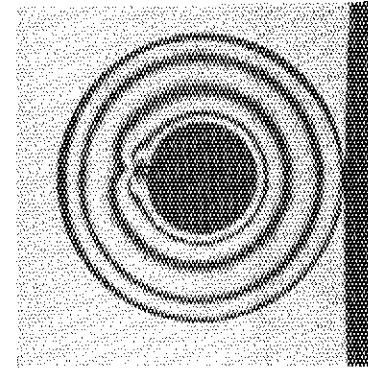
c) $n=1$



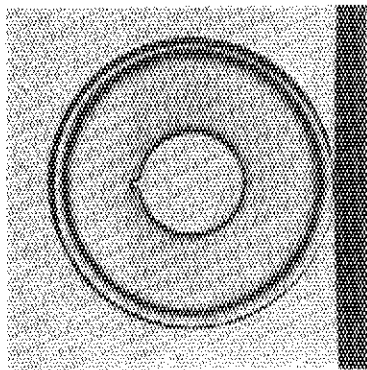
g) $n=1-4$



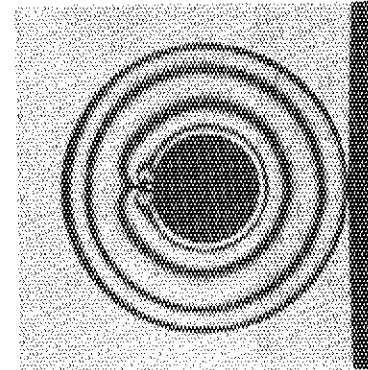
b) $n=1$



f) $n=1-4$

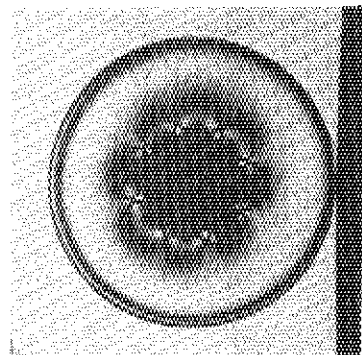


a) start

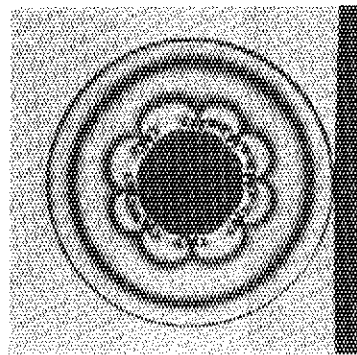


e) $n=1-3$

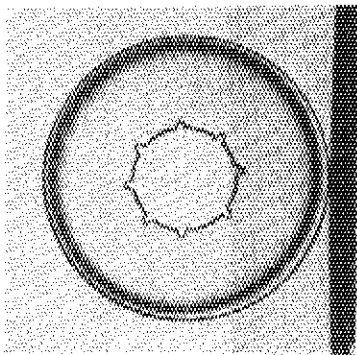
Photo.6 Stress distribution and concentration in the specimen including a crack.



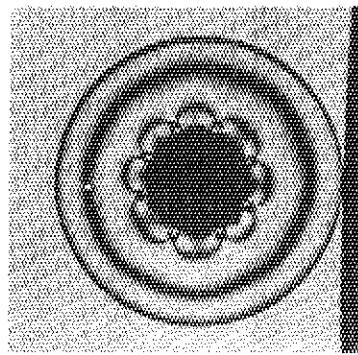
b) $n=1$



d) $n=1-3$



a) start



c) $n=1-3$

Photo.7 Stress distribution and concentration in the specimen including eight cracks with rectangular form.

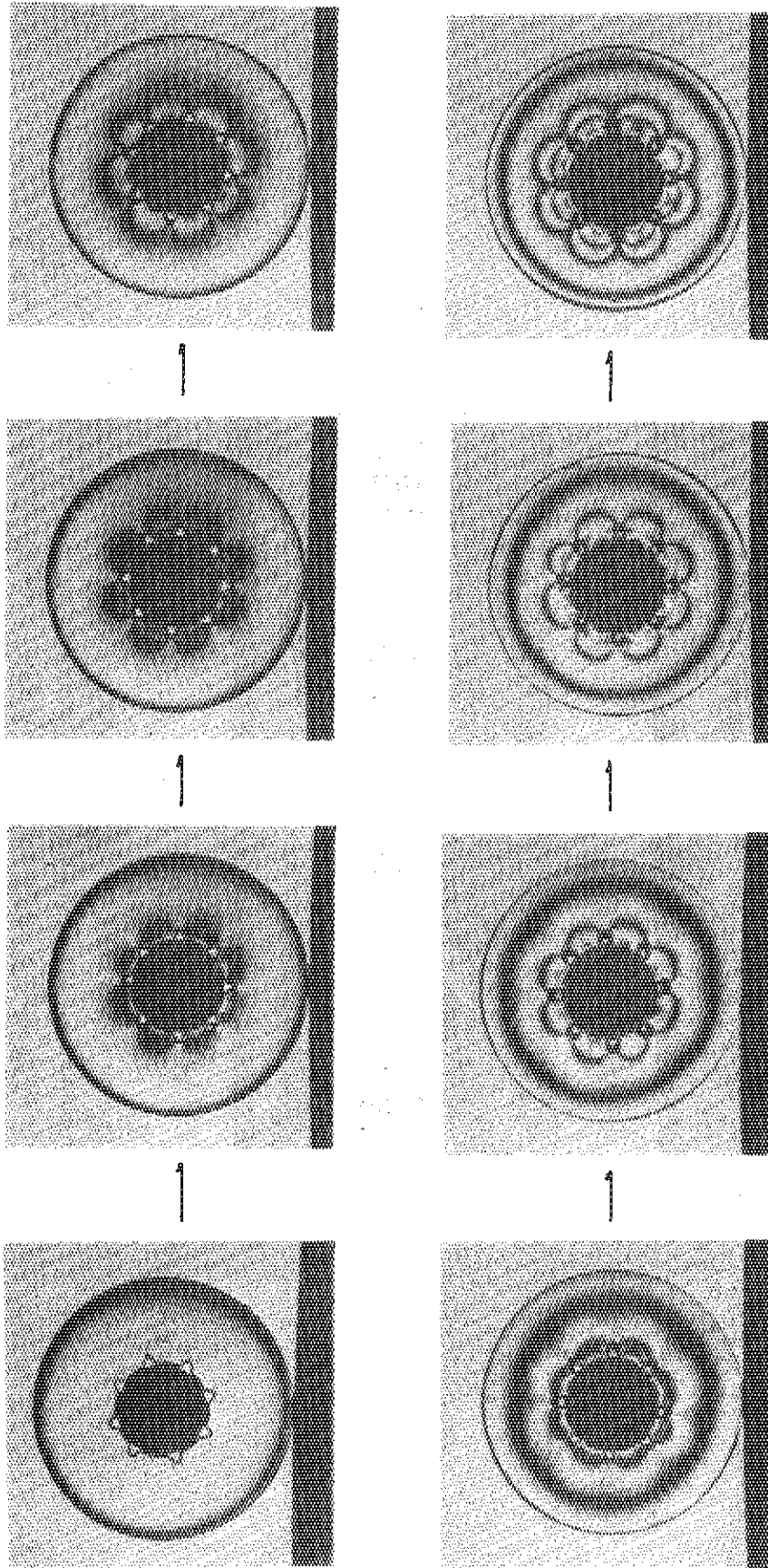


Photo.8 Stress distribution and concentration in the specimen including eight cracks with triangular form.

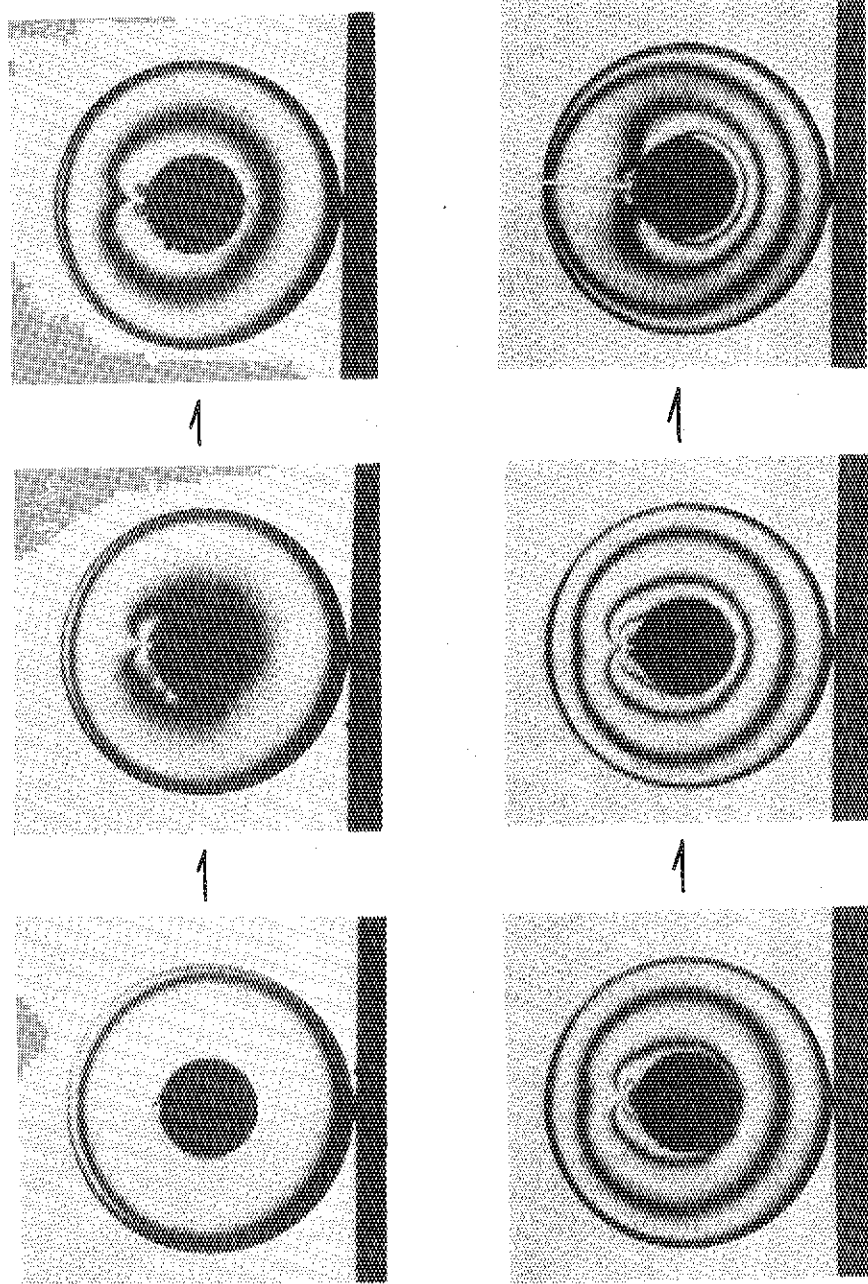
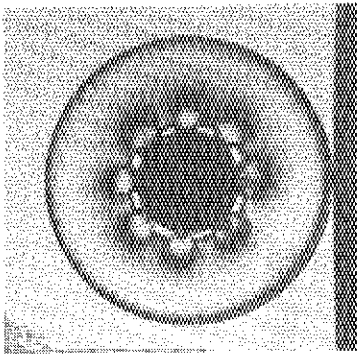
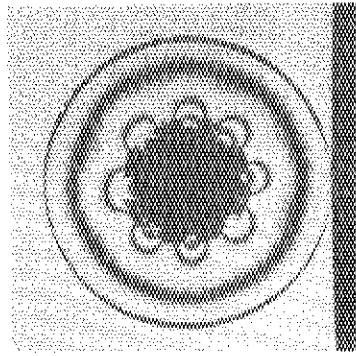


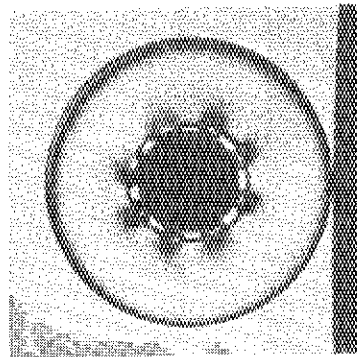
Photo.9 Photoelastic patterns obtained in the PCI model.



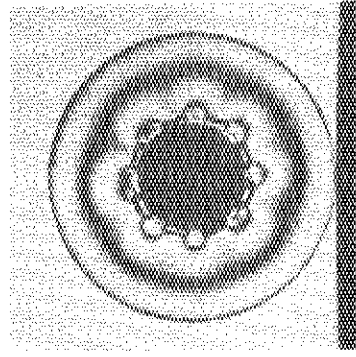
d) $n=1$



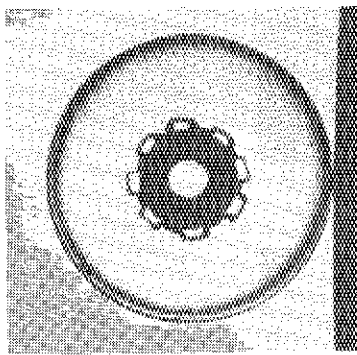
h) $n=1-3$



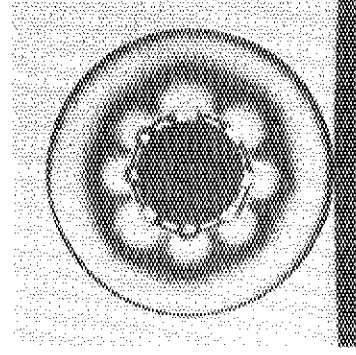
c) $n=1$



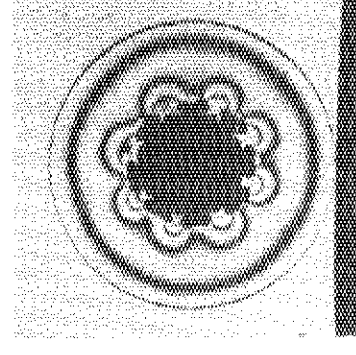
g) $n=1-2$



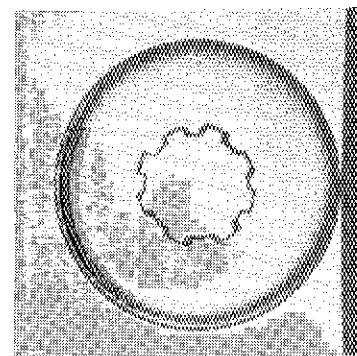
b) $n=-$



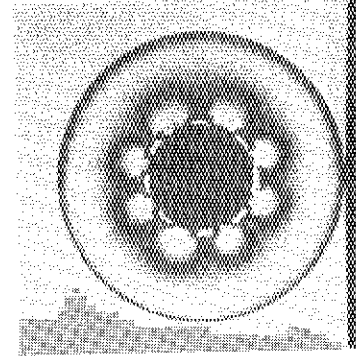
f) $n=1-2$



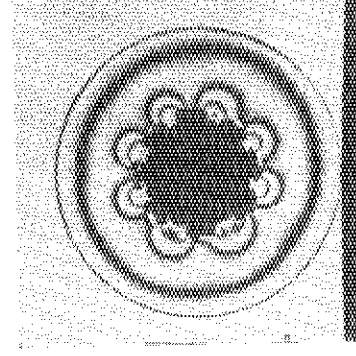
j) $n=1-4$



a) start



e) $n=1$



i) $n=1-4$

Photo.10 Stress distribution in a remedy specimen.