光弾性実験による加圧熱衝撃問題の検討†

松原雅昭* 高野太刀雄** 岡村弘之**

An Experimental Study on Pressurized Thermal Shock (PTS)
Problem by Using Photoelastic Technique

by

Masaaki MATSUBARA*, Tachio TAKANO** and Hiroyuki OKAMURA**

This paper describes an experimental study on pressurized thermal shock, PTS, problem by using a photoelastic technique for the purpose of confirming the validity of application of statically indeterminate fracture mechanics to the problem. The following points are made clear from the test results:

(1) Thermal stresses obtained from the photoelastic test results agree well with those given by nonstationary thermal conduction analysis.

(2) Bending moments obtained from observation of photoelastic fringes agree well with those given by nonstationary thermal conduction analysis. It was experimentally confirmed that bending moment occurred by constraint in such structure that bending deformation was restricted. The compliance of the end of specimen was quantitatively evaluated.

(3) The good agreement was observed between the stress intensity factor obtained from observation of photoelastic fringes near a crack tip and that given by application of statistically indeterminate fracture mechanics which was described in the previous paper. It was confirmed that statically indeterminate fracture mechanics which was valid for theoretical evaluation of the stress intensity factor under PTS. Also by this experimental results, It was made clear that bending moment by constraint influenced significantly the stress intensity factor under PTS.

Key words: Experimental mechanics, Photoelastic technique, Pressurized thermal shock, Stress intensity factor, Nonstationary thermal conduction analysis

1 緒 言

原子力プラントの設計耐用寿命末期における安全性あるいはその寿命延長に関連して、構造健全性が重要視されている加圧熱衝撃 (Pressurized Thermal Shock; PTS) について筆者らは、その事象の把握を容易ならしめる新たな耐加圧熱衝撃健全性評価手法を提唱した¹⁾。また、PTS に対する破壊力学解析に不静定構造物に対する破壊力学 (不静定破壊力学) を適用して、陽な形で応力拡大係数を求める方法を示すと共に、PTS 事象の破壊力学特性を明らかにし、従来とは異なる新たな高精度の模擬試験方法の概念を提案した。

ところで、従来の PTS における理論解析の検証は実験中において計測可能なき裂の伝ば・停止挙動の計測結果との比較等、間接的な力学的情報により行われてきており、直接的な力学情報によって理論の検証がなされた例は見当たらない。

本論文では、筆者らが先に展開した PTS 問題への不静定破壊力学の適用についての検証を、PTS 事象

におけるように変形拘束によって生じる熱応力を測定できる唯一の方法である光弾性実験法を用いて行った結果について述べる。

2 供試材および試験片

供試材には光弾性実験による熱応力測定に優れたポリカーボネート材 (帝人化成 (株) 製パンライトシート) を用いることにした。Table I にはその物性値を示す。なお、供試材には光弾性しみの観察を可能とするために、160°C、1 hr 保持後炉冷の残留応力除去熱処理を

Table I. Material constants considered in analysis.

Elastic modulus (GPa)	2.20
Poisson's ratio	0.35
Thermal expansion coefficient (1/K)	8.0×10^{-5}
Thermal conductivity (W/(m · K))	0.193
Density (kg/mm ³)	1.200
Specific heat (kJ/(kg · K))	1.23
Photoelastic stress sensitivity (m/N)	1.6×10^{-3}

† 原稿受理 平成元年10月4日 Received Oct. 4, 1989

* 正 会 員 (財)電力中央研究所 狛江市岩戸北, Central Research Institute of Electric Power Industry, Iwato-kita, Komae

** 正 会 員 東京大学工学部 東京都文京区本郷, Faculty of Engineering, University of Tokyo, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo

Fig. 1. Specimen geometry for thermal shock test (unit: mm).

Fig. 2. Specimen geometry for end compliance evaluation (unit: mm).

施した。

Fig. 1 は熱衝撃模擬試験用試験片を、Fig. 2 は端部コンプライアンス評価用試験片を示す。Fig. 1 に示す試験片は既報で述べたように、压力容器を想定した円筒容器の軸方向2次元き裂に対するPTS下での応力拡大係数を自己変形拘束によって精度よく模擬できる形となっている。

3 実験装置および実験方法

Fig. 3 には実験装置の冷却剤循環系を示す。冷却剤にはメチルアルコールを用い、それはFig. 3 に示すように冷凍機とメチルアルコール+ドライアイス液によって約 -30°C に冷却される。冷却されたメチルアルコールは回転ポンプにより試験片両側面の貯液槽へ送り出される。これにより、試験片両側面は室温（約 20°C ）から急冷され、熱衝撃状態にさらされることになる。Fig. 4 は貯液槽を含む試験片断面図を示す。

Fig. 3. Cooling system.

Fig. 4. A-A section in Fig. 3.

Fig. 5. Detail of the temperature measuring part (unit: mm).

貯液槽はアルミフレームでできている。試験片貯液槽ではオーバーフローした冷却剤が再び冷却槽内に戻るようになっており、循環系を構成している。この循環系によって後に示すように冷却剤の温度を実験中ほぼ一定に保つことができた。温度測定はFig. 5 に示す位置で行った。温度検出にはクロメル・アルメル熱電対を用いた。検出された熱起電力は増幅回路・AD変換器を経てマイクロコンピュータ内に取り込まれ、ディスプレイ上に測定結果が表示される。ここで測定された温度の精度は $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ の範囲内であった。観測された光弾性しまはカメラによって約1分おきに撮影されると共に、ビデオカメラによるモニタリングが行われた。試験片に実機における内圧相当力としての軸力を

Fig. 6. Experimental equipment.

Table II. Conditions in experiments.

Experimental No.	1	2	3	4
Non-dimensional crack depth a/W	0	0.11	0.19	0.19
Initial temperature (K)	297	294.5	298	296
Coolant temperature (K)	258	240.5	239.5	240
Applied load (N)	0	0	0	294.2

負荷する場合には、試験片直下に重錘をつるすことにより死荷重として負荷した。以上に述べた実験装置の概略図を Fig. 6 に示す。

実験は回転ポンプの起動と同時に温度測定と光弾性しき観察を開始し、これを約 30 分間続けた。Table II には実施した試験条件を示す。Experimental No. 1 にはき裂がない場合について行ったものである。No. 2 と 3 はき裂長さ a/W (a : 冷却面からのき裂長さ, W : 冷却面からのスリットまでの板幅寸法) をそれぞれ 0.11 と 0.19 に変化させている。No. 4 は No. 3 と同じき裂長さで内圧相当力に該当する軸力を負荷した。

4 解析結果と実験結果の比較

Fig. 5 に示した各点の温度測定結果を基にして熱伝達係数の決定を行う。Fig. 7 は Experimental No. 4 で測定された各温度測定点での温度の時間的変化を示したものである。図において、縦軸は温度、横軸は実験開始後の経過時間を示す。図中、実線で示されたのが実験中に測定された温度変化であり、右端に示す番号は Fig. 5 の温度測定位置を示す。解析対象としては前報と同じモデルを用い、熱伝達係数としては実験結果を精度よく再現できるものをパラメトリック計算により決定した。その結果、すべての実験に対して熱伝達係数を $232.6 \text{ W/cm}^2\text{K}$ とした。図より、破線で示された非定常熱伝導解析結果は冷却開始後 1200 秒までの間で実験結果とよく一致しており、仮定した熱伝達係数は妥当であることが確認された。

Fig. 8 は実験 4 の任意の 3 時刻における z 方向の温度分布について、解析結果と実験値を比較したものである。図において、縦軸は温度を、横軸は z 方向に

Fig. 7. Temperature changes with the passage of time (Experimental No. 4).

Fig. 8. Comparison of temperature distributions between observed and calculated values (Experimental No. 4).

無次元化した位置を示す。解析結果(実線)と実験値(プロット)は先の結果からも当然のことであるがよく一致している。また、図から明らかのように両面冷却によって断熱条件を満足していることがわかる。更に、試験片の両側にあてがわれたアクリル板の断熱効果と両面冷却が相まって、熱の流れを一方向流れ($z/W=1$ から $z/W=0$ へ)とすることが可能となった。

Fig. 9 は実験 1 について、実験中の任意の 3 時刻を選んで軸方向の応力分布の実験値と非定常熱応力解析による理論値の比較を行ったものである。実験値 σ_{ex} は Fig. 10 に示すようなき裂断面から十分離れた位置での光弾性しき観察結果から求めた。

$$\sigma_{ex} = \frac{N}{\alpha_p t} \quad (1)$$

ここで、 N : 光弾性しき次数, α_p : 光弾性感度, t : 試験片板厚である。

図より、実験値と理論値がよく一致しており、非定常熱応力解析の妥当性を確認した。

以後の応力拡大係数の理論的評価に当たっては端部のコンプライアンスを剛体として取り扱っているが、

Fig. 9. Comparison of stress distributions between observed and calculated values (Experimental No. 1).

Fig. 10. Transient fringe pattern far away from a crack (Experimental No. 3, 571s).

実際の試験片の端部はある有限のコンプライアンスを有しており、その影響を試験片長さに考慮して補正しておく必要がある。Fig. 11 は Fig. 2 に示す試験片を用いて荷重-たわみ関係を求めた結果である。Fig. 2 の試験片は Fig. 1 の試験片と端部形状を同じくしてあるが、この端部が存在することにより試験片長さが $0.3W$ 分だけ増加した結果となっており、これが端部のコンプライアンス相当分であると考えられる。よってこの分だけ試験片長さを増して解析を行った。

Fig. 12 は曲げ拘束によって生じるモーメントの実験値と理論値を比較したものである。実験値 M_{ex} は Fig. 10 に示すようにき裂断面から十分離れた位置での光弾性縞観察結果から得た応力を用いて z 方向の 2 次あるいは 3 次関数として与え、次式より求めた。

$$M_{ex} = \int_0^w \sigma_{ex} \left(z - \frac{W}{2} \right) dz \quad (2)$$

き裂が存在しない場合の軸力 P_0 および曲げモーメント M_0 の理論値は、それぞれ次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} P_0 &= \frac{L_0}{2BW} \\ M_0 &= E\alpha \int_0^w T \left(z - \frac{W}{2} \right) dz \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここで、 L_0 : 重錘による軸荷重および B : 試験片板厚、 E : 縦弾性係数、 α : 線膨張係数、 T : z 方向各位置での温度である。

Fig. 12 において縦軸は式 (2) および (3) から求められたモーメントを $EI(T_w - T_c)$ で除して基準化したものである (ここで、 I : 断面 2 次モーメント、 T_w : 試験片初期温度、 T_c : 冷却剤温度)。理論値を式 (3) で与えられる M_0 、すなわちき裂がない場合の値を用いたのは、本供試体程度のき裂寸法ではき裂が存在するこ

Fig. 11. Load-deflection relationships of the tested double-cantilever.

とによる曲げモーメントの低下は無視できるほど小さいためである。そして、Fig. 12 の縦軸のように基準化すれば一本の線で理論値を与えることができる。図より、理論値と実験値がかなりよく一致していることがわかる。既報で述べたように、実機円筒モデルの PTS 事象を精度よく模擬できるこのような 2 枚板重ね合せモデルによって曲げ拘束により生ずるモーメントの存在を確認することができた。

本供試体の熱衝撃および軸荷重が負荷された場合の応力拡大係数 K は次式で与えられる。

$$K = K_P + K_M + K_T \quad (4)$$

ここで、 K_P 、 K_M および K_T はそれぞれ軸力 P 、曲げモーメント M および自由熱膨張応力 σ_L の応力拡大係数の寄与分であり、それらは多田らの解を用いて次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} K_P &= \frac{P}{W} \sqrt{\pi a} F_P \\ K_M &= \frac{6M}{W^2} \sqrt{\pi a} F_M \\ K_T &= \frac{2}{\sqrt{\pi a} \left(1 - \frac{a}{W} \right)} \int_0^a \frac{\sigma_L(c) G}{\sqrt{1 - \left(\frac{c}{a} \right)^2}} dc \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ここで、 F_P 、 F_M および G : 引張、曲げおよびき裂面上に集中力が作用する場合の応力拡大係数に対する有限幅補正係数、 c : 冷却面からの距離である。

ここでは、既報で述べた不確定破壊力学の手法によって評価した応力拡大係数と光弾性しみの観察結果より求めたそれらとの比較により、以上で述べた応力拡大係数の評価方法の妥当性を検証するものである。

Fig. 14 には実験中に観察されたき裂先端付近の光弾性しみの一例を示す。Fig. 15 は応力拡大係数の実

Fig. 12. Comparison of moment by constraint between observed and calculated values.

験値と理論値の比較を Experimental No. 1~4 について示したものである。図において縦軸は応力拡大係数、横軸は冷却開始後の経過時間を示したものである。

き裂先端付近の光弾性しまを観察することによって応力拡大係数を評価する方法としては種々の方法があ

Fig. 13. Definition of D.

Fig. 14. Transient fringe pattern near a crack tip (Experimental No. 3, 507s).

Fig. 15. Comparison of stress intensity factors between observed and calculated values.

るが、ここでは北川らによって提唱された簡易評価式⁴⁾を用いることとした。すなわち、応力拡大係数の実験値 K_{ex} は次式で与えられる。

$$K_{ex} = \frac{N}{\alpha t} \sqrt{2\pi D} \quad (6)$$

ここで、 N :等色線しま次数、 α :光弾性感度、 t :試験片厚さ、 D :円類似の等色線の閉ループパターンの直径 (Fig. 13 参照) である。

図中プロット点で与えられているのが、光弾性しま観察結果を用いて式 (6) より求めた実験値である。また、各線で与えられているのが既報で展開した理論に基づき求めた理論値である。図からわかるように、実験値と理論値はよく一致しており、不静定破壊力学の適用による応力拡大係数を求めるまでの理論的取扱いの正しいことが裏付けられた。

Fig. 16 は先に光弾性しまより得た応力分布より求めた拘束曲げモーメントのみに対して評価した応力拡大係数を Fig. 15 と同じ理論値の上にプロットしたものである。これより熱衝撃時における応力拡大係数に対してモーメント成分の占める割合がわかる。図中、特に曲げモーメントが最大値となる 600 s 以前 (Fig. 12 参照) において、熱衝撃時における応力拡大係数に対して拘束曲げモーメントの寄与分がかなり大きなものとなっていることがわかる。既報で述べた加圧熱衝撃時における破壊力学特性のひとつ、すなわち曲げ変形拘束によって生じるモーメントが応力拡大係数に

Fig. 16. Contribution of bending stress to stress intensity factor.

Fig. 17. Confirmation of the validity of stress intensity factor evaluation (Experimental No. 3).

大きく寄与することが実験的に確認できた。

最後に、き裂先端付近の光弾性しま観察結果から求めた応力拡大係数の有効性を確認する。すなわち、応力拡大係数を求める際にその特異性が失われる D の大きい領域およびき裂先端の曲率半径が有限であることや開口角、スリットの有限幅の影響によって同様に特異性が失われる D の小さい領域での光弾性しまから応力拡大係数を評価しても意味がない。そこで、求めた応力拡大係数が有効なものであるかどうかを検討した一例が Fig. 17 である。図において縦軸はしま次数、横軸は式 (7) の D の平方根であり、冷却開始後の経過時間をパラメトリックに変化させている。図は Experimental No. 3 の場合の 3 時刻に対する結果であるが、図中の 3 時刻すべてについて N と $1/\sqrt{D}$ が比例している。実験値として応力拡大係数を得た No. 3 の他の時刻および No. 2, 4 の各時刻についても Fig. 17 と同じ結果を得た。 N が $1/\sqrt{D}$ に比例するということは応力がき裂先端からの距離の $-1/2$ 乗に比例していることを意味する。これより、実験値として応力拡大係数を評価したところでは、応力拡大係数が支配する応力場の特異性を有していることがわかる。したがって、実験値として評価した応力拡大係数の有効性が確認された。

5 結 言

本論文では、既報で展開した加圧熱衝撃問題への不

静定破壊力学の適用の検証のために行った光弾性実験の結果について記した。

以下、得られた結果を要約すると

(1) 光弾性しま観察結果から求めた熱応力と非定常熱伝導解析によって求めたそれらとを比較した。その結果、両者はよく一致した。これにより、拘束曲げモーメントの存在によって比較的大なる熱応力が生じていることが確認できた。

(2) 光弾性しまより得た熱応力分布から求めた拘束曲げモーメントと非定常熱伝導解析で求めたそれらとを比較した結果、両者はよく一致した。これより、曲げ変形が拘束される構造では、拘束曲げモーメントが生じることを実験的に確認した。また、試験片の端部コンプライアンス効果を定量的に評価した。

(3) き裂先端付近の光弾性しま観察結果から求めた応力拡大係数と既報で展開した理論的取扱いによって求めたそれらとを比較した結果、両者はよく一致した。これより、既報で展開した不静定破壊力学による応力拡大係数評価のための理論的取扱いの妥当性を検証した。

つぎに、熱衝撃時における応力拡大係数において、拘束曲げモーメントの寄与分が大きな割合を占めることが実験的に確認された。これより、加圧熱衝撃時における破壊力学特性のひとつ、すなわち拘束曲げモーメントの重要性が本実験によって検証できた。

最後に、実験値として求めた応力拡大係数の有効性を確認した。

以上、本実験によってこれまで検証が行われなかった加圧熱衝撃時における理論的取扱いの検証がなされた。

(平成元年 9 月 27 日 第 5 回破壊力学シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) 松原雅昭, 岡村弘之, 日本機械学会論文集, A-53, 843 (1987).
- 2) 松原雅昭, 岡村弘之, 材料, 37, 1029 (1988).
- 3) H. Tada, *et al.*, "The Stress Analysis of Cracks Handbook" (1985) Del Research Co.
- 4) 北川英夫, 尾崎新三, 非破壊検査, 21, 473 (1976).