ASME B & PV C.C. N-47 の切欠き底ひずみ 推定式の精度に関する研究[†]

池 本 喜 和* 清 水 茂 樹*
加 納 巖** 鵜 戸 口 英 善***

Experimental Study on Accuracy of Notch Root Strain Evaluation Equation of ASME B & PV C.C. N-47

by

Yoshikazu IKEMOTO, Shigeki SHIMIZU

(Nuclear System Division, Kawasaki Heavy Industries, Ltd., Kawasaki)

Takashi KANO

(FBR Development Project, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Co., Tokyo)

and Teruyoshi UDOGUCHI

(Professor Emeritus, Dr., University of Tokyo)

This paper describes the test results on strain concentration behaviour of type 304 stainless steel and 2¼Cr-1Mo steel. Type 304 stainless steel was tested at 600°C under cyclic displacement control and cyclic load control conditions, and 2¼Cr-1Mo steel was tested at 500°C under static creep condition. An improved fine grating method was developed for this study utilizing photo spots in the indentations made by Vicker's hardness tester. The results of stain measurements were compared with the predictions by the equation given in ASME Code Case N-47 and the structural design guide for Japanese fast breeder reactor. The equation was proved to give a conservative prediction.
(Received Nov. 2, 1982)

キー・ワード：SUS 304, 2¼Cr-1Mo, 応力集中部, ひずみ範囲

1 緒 言

応力集中部の疲労寿命を推定するためには、応力集中部のひずみ範囲を求める必要があり、高温構造設計に関して、ASME Code Case N-47 および国内の高温構造設計方針には簡易評価式が示されている。しかしながら、この評価式の妥当性を高温において実験的に検証した報告は非常に少いように思われる。そこで本研究では、高温ひずみ測定法として、ビッカース硬度計の圧痕中に生じる光点を標点とした格子ひずみ測定法を開発し、高温における応力集中部のひずみ範囲評価式の妥当性を実験的に検証することを試みた。SUS 304 鋼および 2¼Cr-1Mo 鋼の切欠き付平板試験片を使用し、それぞれ 600 および 500°C で実験を行った。SUS 304 鋼の場合は、繰返し荷重条件下での切欠き底部のひずみ集中挙動を連続的に計測した。2¼Cr

-1Mo 鋼の場合は、試験片表面の酸化防止のために真空中で実験を行ったため、ひずみの連続的な計測が困難であり、静的荷重条件下でのクリープひずみ集中挙動のみを計測した。

2 実 験 方 法

2・1 供試材料

供試材料は、SUS 304 鋼 (40 mm) および 2¼Cr-1Mo 鋼 (NT-SR 材, 20 mm) を使用した。本供試材料の化学成分を Table I に示し、機械的性質を Table II に示す。

2・2 試験片

Fig. 1 に切欠き付平板試験片の形状および寸法を示す。切欠きは、試験片の両側に設けた。二種類の切欠きの弾性応力集中係数 K は、それぞれ 1.5, 2.0 である。

2・3 試験装置

大気中の試験装置 (SUS 304 鋼用) としては、高周波誘導加熱炉 (100 kHz, 10 kVA) を有する容量 10 ton の高温低サイクル疲労試験機を使用した。また、真空

[†] 原稿受理 昭和57年11月2日

* 正 会 員 川崎重工業(株)原子力本部 川崎市川崎区桜本

** 正 会 員 動力炉・核燃料開発事業団 FBR 開発本部
東京都港区赤坂

*** 正 会 員 東京大学名誉教授

Table I. Chemical compositions of tested materials.

Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Co	Fe
SUS 304	0.05	0.58	1.00	0.028	0.007	9.10	18.45	—	0.07	Bal.
2 1/4 Cr-1Mo	0.13	0.20	0.55	0.010	0.012	—	2.43	1.05	—	—

Fig. 1. Test specimens.

Table II. Mechanical properties of tested materials.

Material	Temperature (°C)	0.2% proof stress (kgf/mm ²)	Tensile strength (kgf/mm ²)	Elongation (%)
SUS 304	R. T.	23	62	61
	600	14.7	34.4	36.9
2 1/4 Cr-1Mo	R. T.	42.7	58.0	26.5
	500	34.1	40.2	21.1

中の試験装置 (2 1/4 Cr-1Mo 鋼用) には, 大気中と同型の高温低サイクル疲労試験機に真空チャンバー (到達真空度: $10^{-6} \sim 10^{-7}$ torr) を付属したものを使用した。

格子写真撮影用装置には, 光学顕微鏡を用いた。像面わん曲を補正したプランアクロマート系の対物レンズ (倍率10倍) および写真用接眼レンズ (倍率5倍) を使用した。

2・4 試験要領

2・4・1 SUS 304 鋼 試験は, 変位制御および荷重制御片振りで実施し, 変位制御の場合には三角波, 荷重制御の場合には台形波を用いた。変位制御の場合の伸び計は, 試験片の側面から押当てた。標点間距離は 50 mm とし, 第2サイクル以後がシェイクダウンする範囲内で試験を行った。

Fig. 2 (a)にビッカース硬度計の圧痕を利用したひずみ計測用の格子を示す。圧痕中心部に生じる微小な光点を写真撮影し, ひずみ計測用の標点とした。Fig. 3に格子写真の一例を示す。Fig. 4に示す繰返し数においてひずみ計測用の格子写真を撮影し, ネガフィルム上の標点を万能工具顕微鏡 (精度 1/1 000 mm) で直接計測してひずみを求めた。ネガフィルム測定中は,

Fig. 2. Details of indentations for strain measurement.

Fig. 3. An example of photograph of indentations.

Fig. 4. Stages for strain measurement (SUS 304).

室温一定 ($20 \pm 1^\circ\text{C}$) とし, 湿度変化もなるべく少くなるように配慮した。

2・4・2 2 1/4 Cr-1Mo 鋼 荷重方法は荷重制御とし, 所定の一定荷重を保持したが, 途中でひずみ計測のため, 除荷と降温を行った。試験雰囲気には, 高温による試験片表面の酸化を防止するため, $1 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-7}$ torr の真空を用いた。

Fig. 5は, クリープひずみの求め方を模式的に示す。

クリープひずみは、試験中の連続的な計測が困難なため、試験片を試験機より取出して残留クリープひずみを計測し求めた。ただし、除荷と再負荷時にはほぼ等しいひずみが繰返されるものと仮定して求めた。ひずみ計測用の格子を Fig. 2 (b) に示す。クリープ試験の場合には、試験が長時間にわたるので、室温および温度変化によるネガフィルム自体の伸縮による誤差を除くため、写真撮影時に補正用スケール (マイクロメータ) を同時に撮影した。

Fig. 5. Schematic procedure for creep strain measurement ($2\frac{1}{4}\text{Cr-1Mo}$).

3 実験結果および考察

3.1 SUS 304 鋼

Fig. 6 は、切欠き近傍におけるひずみ分布の一例を示す。Fig. 7~8 に繰返しに伴う切欠き底のひずみ変化を示す。Fig. 6 に示すように、切欠き底近傍のひずみ分布には、測定誤差によると思われる若干のばらつきが認められるので、Fig. 7~8 の切欠き底ひずみとしては、切欠き底から 0.1~0.4 mm の範囲の測定点の平均値を用いた。三角波の場合には、第 2 サイク

Fig. 6. Total strain distribution (triangular wave, $K=2.0$).

Fig. 7. Total strain vs. number of cycles (triangular wave, $K=2.0$).

Fig. 8. Total strain vs. number of cycles (trapezoidal wave, $K=2.0$).

ル以後はほぼ同一のひずみが繰返されている。また、台形波の場合にも、荷重保持によるクリープひずみ分だけ平均ひずみが増加しているが、除荷、再負荷時に生じる弾塑性ひずみとしてはほぼ等しいひずみ範囲が繰返されている。なお、本ひずみ計測法の精度確認は、試験温度までの加熱時の自由膨張ひずみを計測することにより行った。その結果、試験片の酸化の影響が無

視できる場合には, 0.1~1.0%のひずみが約10%の誤差内で計測されることが確認された。

ASME Code Case N-47 および高温構造設計方針の応力集中部ひずみ範囲評価式は, ピーク熱ひずみによる項を除外すると次式で与えられる。

$$\varepsilon_t = \left(\frac{S^*}{S} \right) K^2 \varepsilon_n + K \varepsilon_c \quad (1)$$

ここで,

ε_t = 切欠き底全ひずみ ε_n = 公称弾塑性ひずみ

$S^* = \varepsilon_n$ に対応する応力-ひずみ曲線上の公称応力

$\bar{S} = K \varepsilon_n$ に対応する応力-ひずみ曲線上の公称応力

ε_c = 公称クリープひずみ

Fig. 9, 10 は, 式(1)の第一項で与えられる弾塑性ひずみの推定値と実験値の比較を示す。最初の1/2サイクル("Initial")の場合の解析に必要な応力-ひずみ構成式には, 本供試材料に合せ $\alpha_p = 0.9262$ としたPNC単調応力-ひずみ関係式^{*1}を用いた。繰返し("Cyclic")

の場合には, "Initial" の場合の応力-ひずみ曲線に対して, 弾性挙動範囲 $1.5 S_m$ (600℃で 14.1 kgf/mm²) をベースに加えた場合の応力-ひずみ曲線を用いた。"Initial" の場合の実験値は1/2サイクルの値, "Cyclic" の場合は, 1~20サイクルまでのひずみ範囲の平均値を示した。なお, 実験値についてはいずれも切欠き底から 0.1~0.4 mm の平均値を用いた。図より明らかに, 実験値は推定値と等しいか若干小さい値となっている。これらは室温における実験結果および有限要素法による解析結果と良く一致する³⁾。

Fig. 11 は, 式(1)で与えられる全ひずみに関する推定値と実験値(切欠き底から 0.1~0.4 mm の平均値)の比較を示す。評価には, PNC 構成式をもとに弾性挙動範囲を S_{rH} だけベースに加えた応力-ひずみ曲線および本供試材料に合せ $\alpha_R = 10.56$ とした PNC クリープひずみ式を用いた。ここで S_{rH} とは, $1.5 S_m$ を初期応力として全試験期間(20サイクル)リラクセーションさせた場合の残留応力である。図に示すように, 実験データには若干ばらつきが認められるが, 推定値は実験値より大きく, 安全側の推定を与える。

Fig. 9. Relationship between nominal stress range and total strain range ($K=1.5$).

Fig. 10. Relationship between nominal stress range and total strain range ($K=2.0$).

Fig. 11. Total strain range vs. time ($K=2.0$).

3・2 2¼Cr-1Mo 鋼

Fig. 12 に最小断面部のクリープひずみ分布の一例を示す。図中の実線は, クリープひずみを切欠き底からの距離の関数として, 実験値を4次式で回帰した結果を示す。破線は, 回帰曲線より求められるクリープひずみの積分平均値を示す。

Fig. 13 は, 最小断面部におけるクリープひずみ分

*1 文献2)に示される構成式と同一。

Fig. 12. Creep strain distribution at net section ($K=2.0$).

Fig. 13. Creep strain concentration factor.

布の積分平均値を基準とした場合および同一チャージ材の単軸クリープひずみを基準とした場合のクリープひずみ集中係数を示す。断面平均クリープひずみに対するクリープひずみ集中係数は、200 hr までの実験結果では、弾性応力集中係数より約20~30%高めとなっている。一方、単軸クリープひずみを基準とした場合は、弾性応力集中係数より十分低い値となっている。これは、切欠き試験片の拘束の影響によるものと推定される。なお、クリープひずみ集中係数は、時間の経過とともに若干下がるの傾向を示しており、大谷らの有限要素法による解析結果を考慮すると、断面平均クリープひずみに基づくクリープひずみ集中係数も定常クリープ条件下では、弾性応力集中係数より低下するものと推定される。

Fig. 14, 15 は、切欠き底クリープひずみに関する推定値と実験値の比較を示す。評価は、同一素材より得られた単軸クリープ曲線と式(1)右辺第二項を用いて行った。図に示すように、実験値は推定値の1/2~2/3となっており、上の評価式により十分安全側の推定が得られることがわかる。これより、上の切欠き底クリープひずみ評価式は、公称ひずみとして同一応力下における単軸クリープひずみを用いる点に一つの安全余

裕を含んでおり、少くとも静的荷重条件下の実験データに基づいて本評価式の妥当性を評価する限り、安全側の推定を与えるといえる。なお、本クリープひずみ評価式は本来、繰返し荷重条件に適用されるものであり、2 1/4Cr-1Mo 鋼に対しては、今後、繰返し荷重条件下での本評価式の妥当性確認が必要である。

Fig. 14. Comparison between experimental and calculated notch root creep strains ($K=1.5$).

Fig. 15. Comparison between experimental and calculated notch root creep strains ($K=2.0$).

4 結 言

本研究で得られた結果を要約すると下の通りである。

(1) ASME Code Case N-47 および高温構造設計方針のひずみ範囲評価式は、SUS 304 鋼については、実験値と同程度か若干安全側の推定を与える。

(2) 2 1/4Cr-1Mo については、本評価式は、少くとも静的荷重条件下のクリープひずみ集中挙動に関する限り、安全側の推定を与える。

(昭和57年9月16日 第20回高温強度シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) R. E. Peterson, "Stress Concentration Design Factors", p. 25, 27 (1953) John Wiley & Sons, Inc.
- 2) 日本機械学会, "非弾性解析の設計への適用方法に関する研究 (II)", p. 8, 14 (1981).
- 3) L. K. Severud, Nuclear Engineering and Design, **45**, 449 (1978).
- 4) 大谷隆一, 伊藤 隆, 材料, **20**, 864 (1971).