切欠き集中応力のX線的研究*

有馬道男** 蒲地一義***

X-Ray Measurement of Concentrated Stresses at Crack Tip of Mild Steel

by

Michio ARIMA

(Ube Industries Co., Ltd., Ube)

and Kazuyoshi KAMACHI

(Faculty of Engineering, Yamaguchi University, Ube)

In the study of fracture, X-ray stress measurement is generally used to analyze the stress distribution at a crack tip or notch root. Most of practical metallic materials have lower strength of one-tenth or one-hundredth than the theoretically calculated values.

In the macroscopic X-ray stress measurement, this discrepancy is attributed to the propagation of cracks, initiated at the pre-existed crack tips, and the stress and strain distributions around these cracks or notches are investigated. But little experimental approach from microscopic point of view have been made. Therefore, in this paper, the stress distribution at the vicinity of a notch and crack is measured by the X-ray stress measuring method, and compared with theoretical values.

(Received June 21, 1976)

1 緒言

材料の破壊を論ずるにあたって、力学的観点から現象をとらえようとする手段は重要である。大部分の金属は、普通理論的強度の1/10~1/100の負荷応力で破壊を起す。実際強度が理論強度より遥かに低い値を取ることを説明として、クラックのような切欠きの存在を仮定して、その集中応力によるクラック進展を理由とする考え方がとられている。そのためクラック周辺の応力ひずみ分布の弾塑性的解析が重要である。かくて、クラック周辺の応力解析がなされているが、これらのX線的方法による測定はなされていない。そこで、本研究においては、クラック周辺の応力分布をX線的に測定し、塑性域をも考慮した理論的解析値と比較検討をした。

また切欠き材の応力集中の温度への依存性、とくに、低温における切欠きの問題は、破壊における大きな問題であり、切欠き周辺の応力分布の温度による相違をX線的に測定し、その温度への依存性を調べようと試みた。

2 実験方法

* 原稿受理 昭和51年6月21日
** 宇部興産(株) 宇部市西本町
*** 正会員 山口大学工学部 宇部市常盤台

試験片形状を Fig.1 に示す。その化学組成を Table I に示し、機械的性質を Table II に示す。試験片の両端の切欠きは、放電加工により作製し、機械加工による影響が残らないようにした。適正な表面粗さを得るために、電解研磨を施した。Fig.2 のように試験片を横型引張試験機に取り付け、負荷方法は、

Fig. 1. Shape of specimen.

Table I. Chemical composition.

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
0.04	0.26	1.45	0.009	0.003	0.02	0.01	—

Table II. Mechanical properties.

Yield strength (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation (%)
38.3	48.1	32.6

Fig. 2. Horizontal type testing machine.

Table III. Condition for X-ray stress measurement.

Characteristic X-rays	Cr-K α
Diffraction plane	(211)
Tube voltage (kV)	30
Tube current (mA)	8
Irradiated area (mm ²)	4 $\times$ 4
Divergent angle of soller slit (deg)	0.35
Incident angle of X-ray (deg)	0, 15, 30, 45
Detector	G. M. counter
Filter	V foil
Scanning speed of detector (deg/min)	1
Time constant (sec)	4
Speed of recording chart (mm/min)	20
Determination of peak position	Half-value breadth method

手動ポンプで油圧により単軸引張荷重を加えた。試験片にはストレインゲージを貼り付け、荷重負荷とともに生じるひずみを求めて応力値に換算した。低温測定の場合は、銅-コンスタンタン熱電対を試験片に取り付け、ドライアイスで試験片を表裏両面から冷却した。平均温度は、 $-44.4 \sim -62.4^\circ\text{C}$ の値であった。試験片の応力分布の測定には、東芝製X線応力測定機を用いた。X線応力測定条件を Table III に示す。

最初に、切欠き先端が弾性領域を越えないように荷重を加えた場合 ($\sigma = 12.5 \text{ kg/mm}^2$) の応力分布を測定し、つぎに切欠きのすぐ先端に塑性変形が生じるまで荷重を加えた場合 ($\sigma = 30.2 \text{ kg/mm}^2$) の応力分布の測定を行った。そして更に、試験片に再び荷重を加え、切欠き先端に 5 mm のクラックを生ぜしめたとき ($\sigma = 29.9 \text{ kg/mm}^2$) の応力分布の測定を行った。低温測定の場合、荷重負荷は試験片を低温にした状態でを行い、 $\sigma = 30 \text{ kg/mm}^2$, $\sigma = 15 \text{ kg/mm}^2$ の 2 種類の状態について、応力分布の測定を行った。

3 結果および考察

3.1 弾性範囲内

X線応力測定によって得た結果を Fig. 3 に示す。図中、中実点(●)でプロットした実線はX線による応力測定値 σ_y であり、点線の値は(1)式で示す計算式によって計算した σ_y の値である。すなわち、引張応力 σ が主軸 $2C$ (σ に垂直) のだ円形切欠きを含む、弾性かつ等方性の薄板に働いているときの、Fig. 4 の座標系における切欠き先端の (r, ψ) 点における弾性応力式

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \sigma \left(\frac{C}{2r} \right)^{1/2} \left(\frac{3}{4} \cos \frac{\psi}{2} + \frac{1}{4} \cos \frac{5}{2} \psi \right) \\ \sigma_y &= \sigma \left(\frac{C}{2r} \right)^{1/2} \left(\frac{5}{4} \cos \frac{\psi}{2} - \frac{1}{4} \cos \frac{5}{2} \psi \right) \\ \tau_{xy} &= \sigma \left(\frac{C}{2r} \right)^{1/2} \left(\sin \frac{\psi}{2} \cos \frac{\psi}{2} \cos \frac{3}{2} \psi \right) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

によって計算した値を示す。(1)式は等方性無限薄板で、等性材料である場合に成立するといわれているが、

Fig. 3. Stress distributions in the vicinity of a notch in elastic state. ($\sigma = 12.5 \text{ kg/mm}^2$)

Fig. 4. Co-ordinate used to describe the stresses in the vicinity of a crack.

本実験においてはこれらの前提条件は、満されておらず、 C/W の値は0.16であり、延性のため、クラック先端付近では、横ひずみが生じて凹みが発生する。しかし放電加工した切欠き先端の曲率半径 $\rho=0.35$ mm であるとき、弾性応力下ではクラック先端のみでなく比較的よい一致を示したので、この計算を採用し比較した。Fig. 3 の上から、(a)切欠き面内 ($\psi=0$) $00'$ 線上の応力値、(b)この線より 5 mm 外れた $00'$ 線上の応力値、以下、(c), (d), (e), (f)は、それぞれ 10, 15, 20, 25 mm 外れた $00'$ 線上の応力値である。両者を比較してみると、この傾向はよく一致していることがわかる。約 3 kg/mm^2 程度の相違である。

なお、この測定値を、荷重軸方向も考慮して、2次元的に示した図が、Fig. 5 である。

Fig. 5. Two dimensional stress distributions in the vicinity of a notch in elastic state. ($\sigma=12.5 \text{ kg/mm}^2$)

3・2 切欠き先端に塑性変形が生じた場合

平均応力を 30.2 kg/mm^2 として、切欠き先端に塑性変形が生じた場合の同様のX線応力測定値のプロットを Fig. 6 に示す。X線的な切欠き面内 ($\psi=0$) における応力値は、塑性変形を起したため、試験片中央部の応力値ほど、弾性計算による応力値と異なったものとなり、応力値を結ぶ曲線の傾向が異ってくる。

以後荷重を増加しても、切欠き先端の応力はX線的には高くなり、試験片中央部の応力値が高くなる傾向にある。

なお、降伏は、切欠き先端の応力 σ_y が引張降伏応力 σ_Y より大きくなる領域で起るから、切欠き面内 ($\psi=0$) で塑性域は距離 $r=r_y$, $\sigma_y=\sigma_Y$ において近似できるから

$$\sigma_Y = \sigma \left(\frac{C}{2r} \right)^{1/2} \quad r_y = \left(\frac{\sigma}{\sigma_Y} \right)^2 \frac{C}{2} \quad (2)$$

切欠きのすぐ先端に塑性変形が生じた場合、 $\sigma=30.2 \text{ kg/mm}^2$, $\sigma_Y=46.0 \text{ kg/mm}^2$ となるので、(2)式

Fig. 6. Stress distributions in the vicinity of a notch after the occurrence of plastic deformation. ($\sigma=30.2 \text{ kg/mm}^2$)

Fig. 7. Residual stresses at the tip of the notch after the plastic deformation.

により $r_y=5.4 \text{ mm}$ である。

この塑性変形を生ぜしめた後、荷重を除き、自由状態として測定したときの残留応力値を Fig. 7 に示す。切欠き近傍の塑性変形を受けた部分は、まだ塑性変形を生じていない部分の弾性回復のために圧縮の残留応力を呈している。したがって、また試験片中央部付近は、この塑性変形のために、零まで回復できず、引張りの残留応力となっている。

3・3 切欠き先端にクラックが生じた場合

更に、荷重を負荷して、切欠き先端に 5 mm の長さのクラックが生じたときの応力分布を Fig. 8 に示す。

Fig. 8. Stress distributions in the vicinity of the notch. ($\sigma=29.9 \text{ kg/mm}^2$)

Fig. 9. Increase in effective crack length due to the plastic zone at the tip.

このとき, $\sigma = 29.9 \text{ kg/mm}^2$, $\sigma_y = 43.1 \text{ kg/mm}^2$ となるので, (2)式により $r_y = 7.2 \text{ mm}$ である。

塑性域内で最大引張応力は Fig. 9 に示すように弾性解の与える値より小さく, 降伏応力 σ_y になる。実際に $0 < r < r_y$ なる領域の弾性材料が担っている荷重をささえるためには, 塑性域は応力-距離曲線下の面積が等しくなるように $R = \beta r_y$ だけ広げられなければならない。⁴⁾⁻⁶⁾

$$R\sigma_y \cong \beta r_y \sigma_y \cong \int_0^{r_y} \sigma_y dr \quad (3)$$

$$\beta = 2$$

塑性域の長さは

$$R = 2r_y \cong (\sigma/\sigma_y)^2 C \quad (4)$$

この場合の傾向は Fig. 6 の場合と同様であって, 理論計算値と大きい違いを示している。以後クラックの進展に伴い, クラック先端近傍の応力値は大きい変化なく試験片中央部の応力値が次第に高くなりつつクラックは進展して破断にいたる。Fig. 10 に, クラックの長さ 13 mm のところで荷重を除き, 再び新たに 10 kg/mm^2 の荷重を加えたときの応力分布を示すが, このことが実に明確となる。

Fig. 11 は, 5 mm の長さのクラック, Fig. 12 は, 13 mm の長さのクラックの状況を示す写真である。

Fig. 10. Stress distributions when a crack was produced at the tip of the V-type notch. ($\sigma = 10 \text{ kg/mm}^2$)

Fig. 11. Crack.

Fig. 12. Crack and Lüders' line.

Fig. 13. Temperature dependence of stress concentration at the notch.

3・4 試験温度が低下したとき

試験片温度を, $-44.4 \sim -62.4^\circ\text{C}$ にしたとき, 30 kg/mm^2 および 15 kg/mm^2 の負荷荷重における応力分布曲線を Fig. 13 に示す。

30 kg/mm^2 の場合, 切欠き先端は, 塑性変形を起し, 応力分布は常温における場合と似ているが, 試験

片中央部付近の応力値は常温の場合に比して低い値を示している（図中の点線）。この分布は、切欠き先端の塑性変形の影響が、試験片中央部付近まで及んでいないことを示すものであって、切欠き先端付近に応力が集中していることを示す。

4 総 括

切欠き試験片の引張荷重下における応力の分布を、X線応力測定法を用いて実測した結果、弾性範囲内において、理論的計算によって得られる応力値と一致した傾向がみられた。

この結果から計算された値は、かかる場合に用いてよいことが示されたと考えられる。

有限の寸法の試験片について得た結果であり、しかも塑性範囲になると結果に差が生ずることは当然であるが、實際上、クラックが生じて開口した場合の応力計算は無意味であって、破壊防止の建前で計算するこ

とを考えれば、問題は、小さくなると思われる。温度による分布の差はむしろ重要であって、応力—変形の挙動が温度依存であるという材料因子に基づくものであり、この因子の考慮が必要であることを示唆している。

（昭和51年7月9日 第13回材料強度に関するシンポジウムにて講演）

参 考 文 献

- 1) Gilman, J. J., Strength of Ceramic Crystals, Am. Ceram. Soc. Conf., New York (1962).
- 2) Sneddon, I. N., Proc. Roy. Soc., **A187**, 229 (1946).
- 3) Beachem, C. D., Trans. ASM, **56**, 318 (1963).
- 4) Fracture Testing of High Strength Sheet Materials, ASTM Bull. (1960).
- 5) Irwin, G. R., Metals Engineering Quart., **3**, 24 (1963).
- 6) Wells, A. A., Brit. Weld. J., **855** (1963).