光干渉法による切欠先端のひずみ分布の測定*

—塑性域ならびに厚み方向ひずみと COD 値の関連—

田 村 博** 加 藤 昇** 金 永 植**

Measurements of Strain Distribution near the Notch Front by Optical Interference Method*

—Plastic Zone, Through-the-thickness Deformation and their Relation to COD Value—

by Hiroshi Tamura** Noboru Kato** Young Sik Kim**

Using an optical interference method, the plastic strain behaviours and the progress of the through-the-thickness deformation close to the crack tip were observed continuously on 3-point bending test specimens, made of nitrogen containing mild steel and HT 80 steel. The plastic zones on plate surface and interior section were determined also by etching technique for comparison.

In addition, the fracture criterion, COD, was discussed based on the observed plastic strain behaviours and the progress of the through-the-thickness deformation.

Main results are summarized as follows:

- (1) The plastic zone and the through-the-thickness deformation close to the crack tip both loading and unloading could be measured by optical interference technique using sodium light source.
- (2) At local yielding stage near the crack tip, the length of plastic zone on plate surface was larger than that on interior section. But when the hinge type plastic strain widely spreaded on both cases, the length of plastic zone on plate surface was about the same or rather smaller than that on interior section.
- (3) The crack opening displacement was proportional to the through-the-thickness deformation near the crack tip. Moreover, the crack opening displacement was confirmed to be proportional to the size of plastic zone. But its proportionality was different each other at local yielding stage near the crack tip and hinge type plastic strain stage.

1. 緒 言

溶接構造用鋼など延性材料の破壊挙動を解明するためには、材料内部に存在するき裂のような切欠先端領域における応力とひずみ分布を把握する必要がある。き裂先端のひずみ分布を解析するための解析的手法としては、Green¹⁾, Bilby ら²⁾, Irwin³⁾, Tuba⁴⁾, Rice⁵⁾ などにより数多くの研究結果があり、また Swedlow ら⁶⁾ により開発された有限要素法のような数値解法がある。

しかし、これらの解析および数値解法は、平面応力あるいは平面ひずみ状態のような理想的なモデルのもとで行なわれているから、き裂先端のように複雑な要素がからみ合っている所にはそのまま適用できないので、ひずみの直接測定が必要となる。き裂先端領域のひずみ分布

を直接測定する方法としては、従来から光弾性皮膜法、ひずみ塗斜法、モアレ法、および特殊な材料に限るエッチング方法などが多く使われてきた。しかし、このような方法はいずれも平面上での測定法であり、応力集中によってき裂先端で生じる厚み方向のひずみ測定に対しては適当でない。

光干渉法は1962年、Oppel と Hill⁷⁾によりき裂先端のひずみ測定の一方法として提案された。それ以来この方法は厚み方向と平面上のひずみの同時測定、測定精度、および実験の簡単さなどの非常に優れた長所を持っているにもかかわらず、実際に応用された例は極めて少なく、ほとんど研究されていない。

一方延性材料の破壊クライテリオンとして COD あるいは J 積分値が多く使われている。しかし破壊条件を決定すると考えられるより重要な因子であるき裂先端領域における平面上および厚み方向のひずみと、これら破壊クライテリオンとの関係は十分に明らかではない。

*原稿受付 昭和52年10月26日 (昭和52年度春季全国大会にて発表)

**正 員 東京工業大学 Member, Tokyo Institute of Technology

著者ら⁸⁾はさきに光干渉を利用して溶接部における微小域の残留応力分布を調べて来たが、本研究ではこの光干渉を用いたき裂先端の塑性域の測定法を提示した。また 3 点静的曲げ試験について、き裂先端で塑性ひずみが発生してから全面降伏に至るまでの塑性ひずみ挙動を、窒素入り軟鋼および HT 80 鋼について光干渉法によって連続観察し、その挙動を明らかにした。

さらにエッチング法によって塑性域が現われやすい材料を使って、外部と内部の塑性ひずみ挙動の差を明らかにし、これら塑性ひずみ挙動およびき裂先端で生じる厚み方向の変形量と COD との関係を明らかにした。

2. 実験装置および供試材

2.1 実験装置

Fig. 1 に実験装置の全体を示した。また Fig. 2 に 3 点静的曲げ試験装置、および Fig. 3 に光干渉縞撮影の原理図を示した⁸⁾。ロードセルと変位検出器の出力は X-Y レコーダに連結され荷量一変位曲線で記録される。また、荷量は油圧バルブによって微調整される。試験片の表面

Fig. 1 General view of the experimental equipment

Fig. 2 Static bending equipment

Fig. 3 Principle for observing optical interference fringes

に表われる光干渉縞は、荷量一変位曲線上の一定な間隔のところで荷重を加えた状態、ならびに除いた状態で連続的に撮影するようになっている。

2.2 供試材

主要な実験に用いた窒素入り軟鋼と HT 80 鋼の化学成分および機械的性質を Table 1 に示す。またこの他光干渉法との比較のためのエッチング法には、Fe-3%Si 鋼 (0.024% C, 3.10% Si, 0.15% Mn, 0.008% P, 0.004% S) を、窒素入り軟鋼とともに用いた。

Fig. 4 3-point bending specimen

3 点曲げ試験片は Fig. 4 に示す形状のもので、中央部に深さ 2 mm、幅 0.2 mm のスリット切欠を入れた。試験片はひずみ除去ならびに粒度調整などのために、窒素入り軟鋼の場合は 900℃ で 1 時間加熱後空冷し、その後再び 650℃ で 1 時間加熱した後空冷した。HT 80 鋼は加工ひずみ除去のために、600℃ で 1 時間加熱炉冷した。熱処理後、試験片は表面をラップ仕上げした。なお Fe-3% Si 鋼は 800℃ で 1 時間加熱後空冷して使用した。

3. 実験結果および考察

3.1 光干渉法による塑性域の測定

Fig. 5(a) は HT 80 鋼の負荷時切欠先端に生じた光干渉縞の模様で、(b)は(a)の干渉縞から計算した厚み方向の変形量、および試験片表面のおうつの模様を示している。厚み方向の変形量 ΔZ は、平らな領域から数えた光干渉縞の次数を n 、光源の波長を λ とすれば次式で表わされる。

Fig. 5 Optical interference fringe pattern (a) and through-the-thickness deformation profile calculated from the fringes (b) (HT 80 steel $\frac{\sigma_n}{\sigma_Y} = 0.95$, σ_n : nominal skin stress, σ_Y : lower yield stress)

Table 1 Test steels

	Chemical composition (%)						Y. S. (kg/mm ²)	T. S. (kg/mm ²)	Elong. (%)
	C	Si	Mn	P	S	Other			
N ₂ containing mild steel*	.08	—	.32	.010	.015	.019N ₂	25	36	40
HT80	.15	.25	.99	.013	.006	.26Cu, .51Cr .45Mo, .04V	80	85	32

* 900°C×1hr. A. C. & 650°C×1hr. A. C.

$$\Delta Z = \frac{n\lambda}{2}$$

本実験では, Na 光源 ($\lambda = 0.59 \mu\text{m}$) を用いたので, 厚み方向の変化量を約 $0.3 \mu\text{m}$ のオーダで測定できる.

(a) (b)

(a) (b)

Fig. 6 Plastic zone pattern revealed by optical interference method (a) and etching technique (b) for nitrogen containing mild steel (above, $\frac{\sigma_n}{\sigma_Y} = 1.45$) and Fe-3%Si steel (below, $\frac{\sigma_n}{\sigma_Y} = 1.32$)

Fig. 6 は窒素入り軟鋼と Fe-3% Si 鋼について, 一定の荷重を加えて除いた後, その表面に現われる光干渉縞模様 (a) と, エッチング法によって現われる塑性域 (b) を比較したものである. エッチング法では窒素入り軟鋼の場合は弾-塑性変形遷移境界が鮮明にあらわれるので, その模様から塑性域が直接判別できる. 一方, Fe-3% Si 鋼の場合, 光干渉縞では弾-塑性域の境界が明瞭でない. しかしこの場合は縞密度が急に高くなる領域がエッチング法によって現われた塑性域と一致しているので, き裂先端で生じる厚み方向の深さの勾配から塑性域を判定することが可能である. Fig. 7 は, き裂先端からの距離と除荷時の厚み方向の変形量を, 各応力レベ

Fig. 7 Through-the-thickness deformation vs. plastic zone (Fe-3%Si steel, unloading, σ_n : nominal skin stress, σ_Y : lower yield stress)

ルに対して図示したものである. このように, 図面上で深さ勾配が急に増加する変曲点をき裂先端からあらゆる方向に求めてこれらを連結すれば, 実際の塑性域が知られる.

3.2 切欠先端の塑性ひずみ挙動

3.2.1 表面における塑性ひずみの全面降伏挙動

Fig. 8 は窒素入り軟鋼および HT 80 鋼について, 光干渉法によって観察された全面降伏に至るまでの塑性ひずみの挙動を示した. また Fig. 9 は, Fig. 8 から画いた切欠先端の塑性ひずみ伝播挙動の模式図である. 負荷応力の増加とともにまず切欠先端 A 点から最初に局部降伏が起こり, これが AB のように伝播していく. 支点側からは支点の圧縮荷重によって頂点で最初に塑性ひずみが発生し, 荷重とともに広がる. 次に切欠底から Green ら⁹⁾, Hahn ら¹⁰⁾が定義したヒンジ形塑性ひずみ AD, AH が最小断面に対して約 45° 方向に生じ, 中央剛性域 ADJH をピボットする板の回転によって支点側に広がっていく. またこれに伴って支点の両側では JDC, JHI の剪断塑性ひずみが生じて広がるが, これと切欠先端から伝播して来たヒンジ形塑性ひずみが, 板の中央部に近づくとき急激に成長し, 全面降伏に至る.

3 点曲げの場合窒素入り軟鋼と HT 80 鋼の全面降伏

Fig. 8 Plastic strain behaviours observed by optical interference technique for nitrogen containing mild steel (above) and HT 80 steel (below). (σ_n : nominal skin stress, σ_Y : lower yield stress)

Fig. 9 Plastic strain propagation pattern

に至る様子を比較すると、後者は切欠先端で生じた局部降伏ひずみが前者に比べ非常に小さく、また支点側の J 点で最初にかかる降伏ひずみがほとんど観察されない。従って窒素入り軟鋼よりも HT 80 鋼の方が Green ら⁹⁾のすべり線理論による平面ひずみ状態での解析結果に近い傾向を示している。

3.2.2 試験片の表面および内部における塑性ひずみ挙動

Fig. 10 は窒素入り軟鋼の場合、切欠先端部に一定の大きさの局部降伏が生じて、ヒンジ形塑性ひずみが発生する前の段階で、試験片の表面と内部の塑性ひずみをエツ

(a) (b)

Fig. 10 Plastic zone on specimen surface (a) and interior section (b) at local yielding stage (nitrogen containing mild steel, $\frac{\sigma_n}{\sigma_Y}=1.05$)

(a) (b)

(a) (b)

Fig. 11 Plastic zone on specimen surface (a) and interior section (b) at hinge type plastic strain stage for nitrogen containing mild steel (above, $\frac{\sigma_n}{\sigma_Y}=1.35$) and Fe-3%Si steel (below, $\frac{\sigma_n}{\sigma_Y}=1.32$)

ティング法によって表わしたものである。この段階では、内部の塑性域は外部の塑性域よりも小さく、内部の塑性ひずみの形は Wilshaw ら¹¹⁾により観察されたと同じく、対数らせん形と認められる。また Fig. 11 は、一定の大きさの局部降伏後、切欠底からヒンジ形塑性ひずみが発生して板全体に広がる段階での、表面および内部の塑性ひずみの様子を、窒素入り軟鋼および Fe-3%Si 鋼に対して示したものである。この段階では窒素入り軟鋼の

場合は、表面に比べて内部の塑性ひずみは細くて長いことが観察される。Fe-3% Si 鋼においても、切欠先端の対数らせん形として認められる塑性ひずみは、内部の方が表面よりも小さいが、そのほかの塑性域は内部の方が表面よりも僅かながら大きいことが観察される。

試験片の表面と内部の塑性域の差は、一定の荷重の下ではそれぞれの応力分布の差異と、塑性拘束力によって生じる降伏強度の上昇率に依存すると考えられる。切欠先端の表面と内部における塑性ひずみの伝播挙動と COD との関係の概略を Fig. 12 (a) に示した。また各段階における弾性応力分布と降伏強度との関係の概略を Fig. 12 (b) に示した。

Fig. 12 Schematic picture of the plastic strain behaviour on specimen surface and interior section

(1) の段階では、内部と表面とも切欠先端の最大弾性応力はまだ降伏強度まで達していないので、塑性ひずみはいずれにも現われていない。

(2) の段階では、表面の最大弾性応力は降伏強度以上になるので塑性ひずみが現われるが、内部ではその最大応力が拘束状態の降伏強度 σ_{ys}' まで達していないので、塑性ひずみは現われていない。

(3) の段階では、内部と表面ともに塑性ひずみが現われる。表面では Fig. 12 (b) の (3) に示したように、その弾性応力分布が平面応力状態での降伏強度 σ_{ys} を満足する領域まで塑性ひずみは伝播する。一方内部では、その弾性応力分布状態に比べて拘束力による降伏強度 σ_{ys}' は充分高いので、表面の塑性域は内部のそれより大きくなる。この段階では、表面ではヒンジ形局部降伏が、内部ではらせん形局部降伏が起こる。

(4) の段階は一定の大きさの局部降伏後、新たにヒンジ形塑性ひずみが内部と表面で同時に切欠先端から発生する。そして板の中央剛性域の囲りに伝播していく。表面では加えられた応力は、局部降伏塑性ひずみとヒンジ形塑性ひずみの成長に吸収される。しかし内部では、(3) の段階で成長したらせん形塑性ひずみの先端の拘束力による降伏強度が弾性応力分布に比べて充分高いので、らせん形塑性ひずみはそれ以上成長せず、主に切欠先端から45°方向に進むヒンジ形塑性ひずみのみになる。この現象は、窒素入り軟鋼の場合、Fe-3% Si 鋼に比べて一層明瞭であるから、内部の方が表面よりもヒンジ形塑性ひずみが大きく現われたものと考えられる。

3.3 塑性ひずみの領域ならびに厚み方向の変形量と COD との関係

Fig. 13 には塑性域の大きさと COD (き裂開口変位量) との関係を示した。ここで塑性域の大きさは切欠先端から一番長い塑性域の大きさを取った。また COD は切欠の一番大きな所の開き量を2倍に拡大して写真に取り、そのフィルムを60倍のコンパレタ上にのせて測定した後、FEM で計算された Rotational factor¹²⁾を利用して切欠先端の COD に換算した。この図によれば、塑性域の大きさと COD との関係は、ヒンジ形塑性ひずみが発生する前の段階と発生した後の段階でそれぞれ異なる直線性を持っていることがわかる。即ち、切欠先端で局部降伏が起こる段階では一定の COD 値に対して塑性域の大きさは小さいが、ヒンジ型塑性ひずみの段階においては塑性拘束力は働かないので一定の COD 値に対する塑性域は大きくなる。

Fig. 13 Size of the plastic zone vs. COD (under load)

Fig. 14 は切欠先端の厚み方向の変形量と COD との関係を示した。これによれば厚み方向の変形量と COD との関係は、弾性限内では直線性が認められないが、切欠先端で塑性ひずみが発生した後では全面降伏に至るま

Fig. 14 Through-the-thickness deformation vs. COD (under load)

で直線性が認められる。弾性限内で直線性が認められないのは、切欠の入口の開き量を測定して切欠先端の COD に換算しているため、開き量が比較的小さい範囲では、換算 COD が切欠先端の真実の変形量に対して過大な値を示すことによるものと考えられる。なお、この図によれば、HT 80 と窒素入り軟鋼の場合、同じ COD 値に対してその厚み方向の変形量が異なっている。これは降伏応力および弾-塑性変形遷移境界の明瞭にあらわれる材料（窒素入り軟鋼）と、比較的にあらわれにくい材料（HT 80）の差とも考えられるが、この点についてはさらに検討が必要と思われる。

4. 結 論

弾-塑性変形遷移境界が鮮明な窒素入り軟鋼と、不鮮明な HT 80 鋼に対して 3 点静的曲げ試験を行ない、光干渉法によって切欠先端近傍のひずみ挙動を連続的に観察した。またエッチング法によってその塑性域が現われる窒素入り軟鋼と Fe-3% Si 鋼を用いて表面と内部における塑性ひずみ領域を比較した。さらに、これら塑性ひずみ挙動、ならびに切欠先端の厚み方向の変形量と COD との相関性について求めた。主な結果をまとめると次のようになる。

- (1) Na 光源を用いた光干渉法によれば、塑性域の測定ならびに、負荷および除荷時に切欠先端で生じる厚み方向の変形量を $0.3 \mu\text{m}$ のオーダーで測定が可能である。
- (2) 全面降伏に至るまでの塑性ひずみ挙動は、大略次のようであった。すなわちまず、切欠先端で一定の大き

さのらせん形局所降伏が起こった後、切欠先端から新たに生じたヒンジ形塑性ひずみが、支点側からの圧縮による塑性ひずみと板の最小断面の中央部で連絡して全面降伏する。

(3) 切欠先端でらせん形局所塑性ひずみが成長する段階では、表面より内部の塑性ひずみ領域は小さいが、ヒンジ形塑性ひずみが成長する段階では、表面と内部の塑性域の大きさはほぼ同じか、あるいはむしろ内部の方が大きい。

(4) 切欠先端の厚み方向のひずみと COD とは比例する。また COD と塑性域の大きさとの関係は、切欠先端でらせん形塑性ひずみが成長する段階と、ヒンジ形塑性ひずみが成長する段階でそれぞれ異なる直線性をもつ。

終わりに、本研究実施に際して窒素入り軟鋼を提供下さり、さらに種々ご助言を戴いた横浜国立大学、安藤柱助教授に心からお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) A. P. Green: Quarterly J. Mech. Appl. Maths, 6, (1953), 223
- 2) B. A. Bilby and K. H. Swinden: Representation of Plasticity at Notches by Linear Dislocation Arrays, Proc. Roy. Soc., Ser. A, 285 (1965), 22
- 3) G. R. Irwin: Dimensional and Geometric Aspects of Fracture, Fracture of Engineering Material, (1964), 211, ASM, Ohio
- 4) J. S. Tuba: A Method of Elastic-Plastic Plane Stress and Strain Analysis, J. Strain Anal. 1 (1966), 115
- 5) J. R. Rice and G. F. Ronsengren: Plane Strain Deformation near a Crack Tip in a Power-Law Hardening Material, J. Mech. Phys. Solids, 16 (1968), 1
- 6) J. L. Swedlow, M. L. Williams and W. H. Yang: Elasto-Plastic Stresses and Strains in Cracked Plates, Proc. 1st Internatl. Conf. on Fracture, 1 (1965), 259
- 7) G. U. Oppel and P. W. Hill: Strain Measurement at the Root of Cracks and Notches, Experimental Mechanics, 4 (6), (1964), 206
- 8) 加藤, 田村, 小林: 光干渉を利用した溶接部の残留応力分布測定 (第 1 報), 本誌投稿中
- 9) A. P. Green and B. B. Hundy: Initial Plastic Yielding in Notch Bend Tests, J. Mech. Phys. Slides, 4 (1958), 128
- 10) G. T. Hahn and A. R. Rosenfield: Local Yielding and Extension of a Crack Under Plane Stress, Acta. Metallurgica, 13 (1965), 293
- 11) T. R. Wilshaw and P. L. Pratt: On the Plastic Deformation of Charpy Specimen Prior to General Yield, J. Mech. Phys, 14 (1966), 7
- 12) 金沢, 町田, 萩原: 工業的試験法としての曲げ COD 試験について, 日本造船学会論文集, 132(1972)365