論文および報告

溶接継手の低温変形*

高橋 秀 明**

Deformation Behaviour of Welded Joints at Low Temperature*

by Hideaki Takahashi**

Abstract

The temperature dependence of deformation properties of welded joints was investigated by means of the photoelastic coating technique. A smooth tensile specimen with a butt welded joint was used to study the micro-structural dependence of plastic behaviour of a mild steel. From successive developments of photoelastic fringe patterns obtained in tension tests at various low temperatures, the structural and temperature dependence of yield strength of such parts as parent metal, heat-affected zone and weld metal was determined. It was found also that the yield strength of the heat-affected zone was higher than that of the parent metal or the weld metal in the range from room temperature to -196°C . The existence of such a harder metal as the heat-affected zone produces a plastic constraint in a softer metal, on which the former borders, and then it hinders the transverse contraction of the latter and leads to the embrittlement in the constrained regions. The temperature dependence of plastic constraint was also discussed.

1. はじめに

溶接継手では溶着金属とこれに隣接する熱影響部の金属組織が母材のそれと異なり、したがって、その力学的性質も組織に強く依存している。従来このような力学的性質の組織依存性あるいは温度依存性を論ずるために、各組織より小型試験片を切り出して実験する方法あるいは各組織の切欠感受性を調べる方法などが採用されてきた。しかしながら溶接継手の変形挙動を、変形の連続観察することなしに、上記の方法で定量的に解析することは困難であると考えられる。

溶接構造物の複雑な変形挙動の観察方法として、Zandman¹⁾は光弾性皮膜法の有用性を紹介している。本報告では、まず不均一組織を有する溶接継手の低温引張試験において、塑性流動の様子を低温光弾性皮膜法²⁾により連続観察し、塑性変形の温度依存性を明らかにする。さらに、熱影響部の降伏強度が母材組織のそれより大きいために熱影響部近傍の母材組織は、前者が巨視的に降伏するまで塑性拘束状態にあることを光弾性縞写真から明らかにする。ここでは塑性拘束の温度依存性を変形の連続観察結果から定量的に論ずる。

2. 実験方法

2.1 試験片製作

市販の厚さ 20 mm 構造用鋼板から、300 mm × 150 mm

の矩形板を切断し、Fig. 1 (a) の点線の如く開先加工を施した後、炭酸ガス自動溶接を行なった。採用した溶接条件は、Table 2 に示す通りである。1層盛の溶接を施した後、Fig. 1 のように溶接方向と直角に矩形板を切断し、溶接中心線がその中央に位置するように、Fig. 1 (b) の形状の試験片を製作した。試験片表面は、平面研磨盤で仕上げした後、0/5 エメリー仕上を行ない、最後にバフ研磨を実施した。ここで使用した鋼板お

Fig. 1 Dimensions of Tensile Specimen

* 原稿受付 昭和44年7月10日

** 正員 東北大学工学部 Member, Faculty of Engineering, Tohoku University

Table 1 Chemical Composition.

	C	Mn	N	Si	Ti
Parent metal	0.29	0.49	0.002	0.005	—
Core wire	0.09	0.17	—	0.75	0.15

Photo. 1 Macrostructure of a Welded Joint**Table 2** Welding Conditions

Plate thickness mm	Wire dia. mm	Layer	Wire speed m/min.	Welding speed cm./min.	Arc current A	Arc voltage V	Gas ratio	
							CO ₂	O ₂
22	1.6	1	1.0	30	440	35	20	5

および溶加鋼線の化学組成は Table 1 に示す。溶接組織のマクロ腐食写真を Photo. 1 に示す。

2.2 光弾性観察

光弾性皮膜材料および接着剤には、低温接着剤として開発された Narmco Resin F343/F139 (Whittaker Corp., U.S.A.) を用いた。あらかじめ用意した 1 mm 厚さの皮膜を上述の試験片に接着し、48時間室温で硬化後、低温引張試験を実施した。低温領域で光弾性観察を行ないながら、引張試験を行なうために、新しく開発した引張荷重装置を用いた²⁾。引張変形速度は 5×10^{-2} mm/分で、平行部 40 mm の試験片に対する平均ひずみ速度は 10^{-5} mm/mm/秒である。荷重増加に応じて、変形にともなう等色線模様を写真記録し、これをもとにして連続的なひずみ変化を測定した。ひずみ解析において繰りかえしの端数を決定する場合には色縞法による解析を採用した。

3. 実験結果

3.1 低温における変形挙動の連続観察

室温から -196°C までいくつかの温度で得られた引張試験の巨視的荷重—のび曲線を Fig. 2 に示す。図で -85°C 以上の温度で得られた結果では、変形が進んで最大荷重に達し、母材部にくびれを生じた状態で変形を中止し、徐荷したため曲線の後半は点線で示してある。なお低温領域の破壊はいずれも母材部で起こり、室温附近と同様に、低温でも溶接継手の引張強度は母材部が最も低いことがわかった。 -170°C での実験で破断時の断面収縮率は 10% にすぎず、破面は完全劈開破壊で、この材料の延性—脆性遷移温度は -170°C 附近と考えられる。

液体窒素 (-196°C) に浸して引張試験を実施し、得られた光弾性縞写真を Photo. 2 に示す。Photo. 2 (e)

Photo. 2 Successive Development of Photoelastic Fringe Patterns obtained at -196°C

は破断直前の光弾性縞写真である。ここでは平滑試験片上下の母材部で降伏が起こり、中央溶着金属がこれに次ぎ、熱影響部は降伏せず最後まで残った。脆性破壊は光弾性縞写真でひずみ集中が著しい試片の上側に起こった。この温度では破面の断面収縮は観察されず完全劈開破壊であった。破断に至るまでの塑性流動については後述するので、破断面直前の Photo. 2 (e) から破断時のひずみ分布と破壊機構を考えてみる。写真の繰りかえし試験片上下端の母材組織の主ひずみ差は 5% に達しているが熱影響部では 1% をわずかに越えているに過ぎない。破断後母材部の破断面近傍あるいは破断に至らなかったひずみ集中部について光弾性皮膜を剥離して顕微鏡観察した。これによれば、従来の研究で明らかにされているように材料のフェライト結晶粒に相当する大きさの微小クラックが散在しているのが見られた。この微小クラックの分布は必ずしも破面近傍のみに局在しているのではなく、5% 主ひずみ差に達した上下 2 つの母材組織に平均的に分布していることがわかった。これより 5% 主ひずみ差を与える塑性変形が、 -196°C におけるこの

Fig. 2 Load-Elongation Curves obtained at Several Low Temperatures.

材料の微小クラック初生, 伝播の遷移状態と考えることができる。また試験片中央の溶着金属, 熱影響部およびその近傍の母材組織についても, 同様の観察を実施したが上記のような微小クラックあるいは変形帯は見られなかった。

3.2 塑性流動の組織依存性と温度依存性

荷重増加にともなう塑性流動の様子を光弾性縞写真で Photo. 3 および 4 に示す。これらはそれぞれ, -85°C および -135°C の引張試験で得られたものである。図のそれぞれの縞写真の応力表示には, 各温度での母材組織の降伏強度を基準にとり, 初期断面に対する平均公称応力との比 (σ_x/σ_y) を採用した。ここで σ_y としては光弾性観察により 1% 主ひずみ差の変形を与える平均公称応力を採用した。このような整理により, 溶接組織各部の変形状態の温度依存性, 組織依存性を定量的に比較検討することができる。すなわち, 室温附近から -100°C 附近までは母材組織に降伏が起り, 熱影響部, 溶着部の順序にそれが伝播するが, 低温になるにつれて熱影響部と溶着部の降伏強度が入れ換わることがわ

Photo. 4 Successive Development of Photoelastic Fringe Patterns obtained at -135°C . $\sigma_y = 60 \text{ kg/mm}^2$ for Parent Metal.

かる。さらに室温から -196°C までの全温度範囲にわたって, 熱影響部の降伏強度が母材部に比べて高く, その温度依存性も著しい。これらの複雑な変形挙動の温度依存性を定量的に明らかにするために母材部, 熱影響部および溶着部の 3 つの組織のそれぞれの応力ひずみ曲線を光弾性縞写真をもとにして描く。ここで Photo. 1 のマクロ腐食写真に対応して, A と A', B と B' および C をそれぞれ母材部, 熱影響部および溶着部として区別した。Photo. 3 および Photo. 4 のような光弾性縞写真による各組織の塑性流動の様子は Fig. 3 および 4 のようになる。ここで横軸の応力表示として Photo. 3 および 4 で採用した σ_x/σ_y を採用し, 溶接各組織の塑性流動曲線を描くことにより, 各部に 1% 主ひずみ差を生ぜしめた応力値を降伏強度と定め, その温度依存性を明らかにすることができる。それらの結果を Fig. 5 に示す。低温領域の溶着部の変形挙動の温度依存性は室温附近に比べ異なることがこの図からも明らかである。これは次のように考えることができる。すなわち, 母材組織に対して熱影響部はその化学成分は同じで急冷却の熱処理を

Photo. 3 Successive Development of Photoelastic Fringe Patterns obtained at -85°C . $\sigma_y = 34 \text{ kg/mm}^2$ for Parent Metal.

Fig. 3 Plastic Flow Curves of Parent Metal, Heat-Affected Zone and Weld Metal obtained at -85°C .

Fig. 4 Plastic Flow Curves of Parent Metal, Heat-Affected Zone and Weld Metal obtained at -135°C .

うけた組織であるからその降伏強度の温度依存性も平行である。これに対し、溶着金属は他の2つの組織とは異なる組成を有するため、降伏強度も特有の温度依存性を示す。

3.3 溶接組織にあらわれる塑性拘束

熱影響部が母材組織に比べ、変形抵抗が大きく、したがって母材部で塑性変形がかなり進んで後に熱影響部の降伏、塑性流動が開始することは前節で明らかにした。特に熱影響部の塑性流動の温度依存性は著しく、このため母材組織の中で熱影響部近傍の組織の塑性変形は拘束される。これらの塑性拘束状態の温度依存性を数値的に比較するため、縮写真をもとにして次のような解析を行った。塑性拘束を受ける領域は、光弾性縮写真およびマクロ腐食写真と対応する応力ひずみ曲線を比較して、

Fig. 5 Temperature Dependence of Yield Strength of Parent Metal, Heat-Affected Zone and Weld Metal.

粒状パーライト組織（熱影響部の一部）に隣接する母材組織であることがわかった。この領域は光弾性縮の読取精度から、母材部と熱影響部の境界から1mm母材部に入ったところである。さらにこの拘束部のひずみとしては、ほぼ 1mm^2 についての平均ひずみを採用したことになる。前と同様 σ_x/σ_y に対し、この拘束部のひずみ変化

Fig. 6 Schematic Drawing of Plastically Constrained and Unconstrained Zones, and Plastic Flow Curves of Constrained and Unconstrained zones obtained at -85°C .

を描いて、この点の応力ひずみ曲線とする。これに対し非拘束部としては母材部で塑性流動が最も早く伝播する領域を選んだ。以上とのような拘束部 (a, a') 非拘束部 (A, A') は Fig. 6 の中に示すように概念図に描くことができる。非拘束部 A, A' 部は前節の母材組織の塑性流動曲線を描いた時の A, A' 部と一致する。Fig. 6 は -85°C で得られた塑性拘束部と非拘束部の塑性流動挙動の一例である。前節で得られた Fig. 4 に拘束部 (a, a') の塑性流動曲線を併記したものである。A, A' 部と a, a' 部の塑性流動曲線を比較するとその加工硬化割合の変化の様子から、B, B' 部の存在のために a, a' 部の塑性流動が拘束されていることがわかる。すなわち平均引張応力が $\sigma_y = 34 \text{ kg/mm}^2$ に達すると A, A' 部 (非拘束部) が 1% 主ひずみ差に達し降伏し、その後急激に塑性変形が伝播する。さらに応力値が増して $\sigma_x/\sigma_y = 1.05$ を越えると、A, A' 部の塑性変形も直線的加工硬化の状態で行進し、これにともない拘束部 a, a' 部の変形も増加し始める。応力値が $\sigma_x/\sigma_y = 1.05$ から 1.20 の間では A, A' 部が降伏しているにもかかわらず、B, B' 部での応力値はその降伏応力に達しないため、a, a' 部の塑性流動は拘束される。応力値が 1.20 以上になると、B, B' 部の変形が 1% 主ひずみ差に達し、塑性伝播が行進する。ここで B, B' 部の降伏前後の a, a' 部の塑性流動曲線の勾配すなわち、加工硬化割合に注目すると、 $\sigma_x/\sigma_y = 1.20$ 付近で急激に変化している。これは B, B' 部の降伏塑性流動の開始により、 $\sigma_x/\sigma_y = 1.20$ 以上の応力値で、a, a' 部の塑性拘束が解放されたことを意味する。以上のように塑性拘束を含む溶接各組織の複雑な塑性流動の温度依

存性をそれぞれの応力ひずみ曲線から得られる加工硬化係数で比較した。非拘束部 A, A' に対しては、 $\sigma_x/\sigma_y = 1.05$ から 1.20 付近まで直線的に加工硬化が行進しているので、この範囲の平均加工硬化係数 $[d\sigma/d\varepsilon]_{AA'}$ が決定できる。これに対して、拘束部の平均加工硬化係数 $[d\sigma/d\varepsilon]_{aa'}$ としては、 $\sigma_x/\sigma_y = 1.05$ から B, B' 部が降伏する $\sigma_x/\sigma_y = 1.20$ の間の平均勾配を採用した。このよう

Fig. 7 Temperature Dependence of Ratios of Work Hardening Rate in Constrained and Unconstrained Zones.

にして同一の母材組織を有する拘束部と非拘束部の平均加工硬化係数が定まると、塑性拘束状態を拘束部と非拘束部の加工硬化係数の比として数値的に表わすことができ、この量で塑性拘束の温度依存性を比較検討することが可能になる。これ以後、この量 $[\Delta\sigma/\Delta\epsilon]_{aa'}/[\Delta\sigma/\Delta\epsilon]_{AA'}$ を加工硬化係数比と呼ぶことにする。たとえば前述の -85°C で得られた結果では $[\Delta\sigma/\Delta\epsilon]_{aa'}/[\Delta\sigma/\Delta\epsilon]_{AA'} \approx 5$ である。他の温度で得られた結果についても同様の整理を実施し、室温から -150°C までの加工硬化係数比を Fig. 7 に示す。室温附近での係数比は、ほぼ 1 に近い値で塑性拘束部と非拘束部に対して明瞭な差が観察されない。これに対して低温になるにつれて熱影響部の塑性流動特性が顕著に光弾性写真に現われ、このため母材部の塑性拘束も明瞭になる。低温では拘束部非拘束部の差が著しく、加工硬化係数比は -100°C 以下で急激に増加する。

4. 塑性拘束についての考察

塑性拘束の概念は Orowan³⁾ が切欠材および異種金属のサンドイッチ構造に関して提示しているが、その後具体的な定量実験が余りなされていない。ここでは、前節まで述べた溶接継手に現われる塑性拘束と、従来明らかにされている切欠材の塑性拘束についてそれぞれの実験結果をもとにして比較検討する。光弾性観察により塑性拘束部と非拘束部を判定することができるが、溶接継手と切欠材について塑性拘束部と非拘束部を Fig. 6 と Fig. 8 のように対比させる。すなわち、切欠材では塑性域は切欠先端からフォーク状に伝播し、中央最小断面への伝播は、切欠による三軸応力成分のため阻止される。このような切欠による塑性拘束状態は光弾性観察により明らかにされている^{4), 5)}。溶接継手の場合には異種金属境界での三軸応力成分により硬層部が軟層部に塑性拘束状態を作る。したがって切欠材中央断面部および溶接継

手 a, a' 部を塑性拘束部、フォーク状塑性領域の交叉する部分部 F, F' および母材組織 AA' 部を非拘束部とそれぞれ考えれば、両者の加工硬化係数比の温度依存性を対比することができる。切欠材の加工硬化係数比 $[\Delta\sigma/\Delta\epsilon]_E/[\Delta\sigma/\Delta\epsilon]_F$ を決定するためには、E, F 2 点の応力-ひずみ曲線から 2 点のひずみ比 (r_F/r_E) を求め、 $\sigma_N/\sigma_y - r_F/r_E$ の関係を得る。ここで σ_N は最小断面での平均引張応力、 σ_y は材料の降伏応力である。この関係で r_F/r_E 曲線が極値を与える σ_N/σ_y の値が塑性拘束係数であるが⁶⁾、さらに曲線の勾配によって塑性拘束の連続的な変化を判定することができる。すなわち、曲線の極値近傍の正の最大傾斜を求めればこれは $[\Delta\sigma/\Delta\epsilon]_E/[\Delta\sigma/\Delta\epsilon]_F$ となり、拘束部、非拘束部の加工硬化係数比として溶接継手で得られた係数比、 $[\Delta\sigma/\Delta\epsilon]_{aa'}/[\Delta\sigma/\Delta\epsilon]_{AA'}$ と同じものである。このようにして得られた切欠材と溶接材の加工硬化係数比の温度依存性を、Fig. 7 に示す。この図から明らかなように複雑な塑性伝播は、加工硬化係数比で整理すると同一の温度依存性を有することがわかった。さらに切欠材あるいは溶接継手に現われた複雑な塑性変形が材料の力学的特性とその幾何学的形状から定まる 3 軸応力成分による塑性拘束で説明できることが明らかになった。以上からここで採用した加工硬化係数比を塑性拘束を論ずる場合の 1 つの定量的尺度と考えることができる。

次に溶接部では熱処理を施さない状態では残留応力が各組織に複雑に分布しており、これらが塑性変形挙動にどのように影響するかを考えねばならない。これまで溶接部に存在する残留応力値についてはいくつかの測定例があり、これによると最大でほぼ材料の降伏強度程度の値であることが明らかにされている。今、荷重増加とともに弾性変形から塑性変形に移行する場合、荷重を加える前に各部に存在した残留応力は塑性変形の進行と共に解放され、徐々に再分配されながら、じゅう分に塑性変形が進行した状態で初期の溶接残留応力は消滅する。したがって溶接各部に存在する残留応力は降伏開始の応力値あるいは降伏初生の場所などには影響するが降伏後の塑性流動に対しては、それ以前に存在した残留応力は何らの寄与もしないと考えられる。以上の観点から残留応力の塑性流動におよぼす影響は無視した前節までの整理方法も妥当である。

上述の塑性拘束を論じてきた熱影響部近傍の母材組織は準熱影響部と呼ばれ、溶接脆化が顕著に現われる領域として知られている。この溶接脆性に関する考察は多数なされているが、その殆んどが溶接熱サイクル時の焼入れ、ひずみ時効をもって検討している。しかしながら材料強度を論ずる場合、上述の光弾性観察から明らかなよ

Fig. 8 Schematic Drawing of Plastic Constraint in a Notch Structure.

うに、単に金属物理的材質の変化のみならず、変形時の力学的釣合を常に考慮しなければならない。すなわち、溶接継手のように不連続境界が存在し、一方が他方の変形を拘束する場合、この領域には必ず塑性拘束部が観察される。これに対し切欠材においては切欠先端部の静水引張応力成分の存在によって切欠中央最小断面に塑性拘束部が現われる。このような2つの異なる変形状態で、同一の加工硬化係数比を有する時、同じ塑性拘束状態にあると考えられ、その脆化の様子も類似であると推定することができる。

5. 結 論

光弾性皮膜法を採用して、溶接継手の低温引張試験を実施し、次のような知見を得た。

(1) 光弾性縞模様連続観察より、低温脆性破壊時の微小クラック初生およびその伝播の塑性変形量が実測でき、従来の観察結果に対比できた。

(2) 溶接継手の低温での塑性伝播を直接観察し、その組織と対応させた。溶接組織を母材部、熱影響部および溶着部の3つに分け、各組織の塑性流動の温度依存性を明らかにした。

(3) 1%主ひずみ差を生ぜしめる応力を降伏応力とし、母材部、熱影響部および溶着部の降伏強度の温度依存性を明らかにした。

(4) 3つの溶接組織中、熱影響部の塑性流動の温度依存性が著しく、このため熱影響部近傍の母材組織は塑性拘束をうけ、その塑性流動が阻止されることを実験的に明らかにした。さらに塑性拘束部と非拘束部の加工硬

化係数から加工硬化係数比を決定し、これを用いて塑性拘束の温度依存性を論じた。

(5) 溶接組織に現われる塑性拘束の温度依存性を切欠材のそれと加工硬化係数比で論ずる限り全く同一になることがわかり、この数値が塑性拘束を表わす1つの尺度となると考えられる。

(6) 溶接熱サイクルによる溶接脆性の問題と準熱影響部の塑性拘束という観点から検討した。

謝 辞

本研究を実施するにあたり、有益なる助言、指導をいただいた東北大学工学部、鈴木正彦、島田平八両教授に心からの謝意を表します。また実験については菊地政美、友部保両君の熱心な協力を得ましたことをあわせて深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) F. Zandman, "Photoelastic-Coating Technique for Determining Stress Distribution in Welded Structures", *Welding Res. Suppl.*, **39**, (1960) 191-198.
- 2) H. Takahashi, "A Liquid-Air Cryostat for Photoelastic Investigation", *Proceedings of JSME 1967 Semi-International Symposium, Exp. Mech.*, Vol. 2, (1968) 31-36.
- 3) E. Orowan, "Fracture and Strength of Solids", *Rep. Prog. Phys.*, Vol. 12, (1949) 185-232.
- 4) J.R. Dixon, "Elastic-Plastic Strain Distribution in Flat Bars Containing Holes or Notches", *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 10, (1962) 253-263.
- 5) H. Takahashi, "Notch Brittleness and Plastic Constraint Factor", *2nd International Conference on Fracture*, (1969) London, (in press).