剪断力を受ける溶接継手の低温における強度 (I)*

—試験温度の影響—

瀬尾健二**, 須清修造***, 山川武人***, 平野博幸****, 佐藤邦彦*****

Strength of the Welded Joints on which Shear Force is Applied at Low Temperature (Part I)*

—Effect of Temperature on Strength of Welded Joint—

by Kenji Seo**, Shuzo Susei***, Taketo Yamakawa***, Hiroyuki Hirano**** and Kunihiro Satoh*****

The present research deals with the fracture behavior and the strength of welded joints such as a side fillet welded joint which is loaded parallel to the axis of the weld at low temperature.

In this paper, the effect of temperature on the fracture behavior in these welded joints are investigated experimentally.

Experiments are made with five types of welded specimen in a temperature range from 20°C to -170°C. In the series of experiment, the results obtained are as follows:

- 1) Three different types of fracture mode are appeared according to the different temperature.
- 2) It is cleared that the critical shear displacement which depends on temperature can be applied as the engineering fracture criteria for fracture of these welded joints.
- 3) In these welded joints, small scale of fractures of weld metal by shear force at low temperature induce the fatal brittle fracture of base metal.

1. 緒 言

溶接構造物の脆性破壊に関する研究は従来から多くなされている^{1,2)}。しかしそれらの研究のほとんどは作爲的に切欠きあるいはき裂を含ませたいわゆる欠陥を有する突合せ継手に引張りあるいは曲げ荷重が加わる場合を対象として行なわれてきた。

しかし実用の溶接構造物では突合せ継手以外に、例えば船殻構造におけるロンジ材のビルトアップ溶接、トランス材のスティフナー、ブラケットフェイスの取り付け溶接、また建築構造におけるボックス柱のダイヤフラム溶接などいわゆるすみ肉溶接継手あるいは部分どけこみ溶接継手が多く存在し、これらは主として剪断荷重を受ける場合が多い。そしてこれらの継手では欠陥がなくて

も、欠陥と同じ作用をする不溶着部が存在し、また溶接端部は構造的な不連続となり大きな剪断応力集中を生じる。そのためこのような継手は溶接が完全に施工されたとしても低温において脆性破壊を生じる危険性が考えられる。

しかし剪断力を受ける溶接継手の低温での破壊に関する研究はほとんど行なわれておらず、数少ない例として太田の研究が挙げられる³⁾。太田は側面すみ肉溶接継手試験片を用いて+120°C~-120°Cの温度範囲での破壊様相を調べている。そして-60°Cまでの温度では継手の剪断強度は低下することはないが、それ以下の温度では母材部で脆性破壊を生じ、いわゆる母材部の引張強度がすみ肉溶接継手の剪断強度より低くなるためすみ肉溶接継手の剪断強度を求めることが出来なかったと報告している。しかしすみ肉溶接継手の脚長、溶接長、母材部寸法などを変化させた実験は行なっておらず、このような継手の低温における強度を十分明らかにしたとはいえない。

本研究は剪断力を受ける溶接継手の低温における強度におよぼす温度、継手形式、継手部寸法などの影響を明らかにすることを目的として行なった。

本報告では SM50B 材を用いた側面すみ肉溶接継手お

*原稿受付 昭和55年7月30日 (昭和50年度秋季全国大会にて発表)

**正 員 姫路工業大学 Member, Himeji Institute of Technology

***正 員 川崎重工業(株) Member, Kawasaki Heavy Industries Co., Ltd.

****学生員 大阪大学大学院 (現在石川島播磨重工業(株)) Student Member, Graduate School of Osaka University (Present Address; Ishikawajima Harima Heavy Industries Co., Ltd.).

*****正 員 大阪大学工学部 Member, Faculty of Engineering, Osaka University

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of base plate

	Chemical compositions (%)					Mechanical properties		
	C	Si	Mn	P	S	Y. S. (kg/mm ²)	T. S. (kg/mm ²)	El. (%)
SM50B	0.15	0.33	1.35	0.002	0.018	33.0	52.0	29

Fig. 1 Dimensions of specimens

および部分にとけこみ溶接継手試験片の常温から -170°C までの広い温度範囲における破壊様相を観察し、継手の剪断強度におよぼす温度の影響について検討した。

2. 実 験

2.1 供試材および試験片形状

板厚 40 mm の SM50B 材 (材料の化学組成と機械的性質を Table 1 に示す) を用い、Fig. 1 に示す 5 種類の形状の試験片を製作した。試験片 F1, F2 は側面すみ

肉溶接継手, P1, P2 は部分とけこみ溶接継手, PF1 は補強すみ肉を有する部分とけこみ溶接継手である。

試験片の溶接は 4 mmφ 低水素系 50 kg 級溶接棒 (溶着金属の降伏強さ $41\sim 49\text{ kg/mm}^2$, 抗張力 $51\sim 59\text{ kg/mm}^2$) を用い、電流 $170\pm 5\text{ [A]}$, 電圧 $22\sim 23\text{ [V]}$, 速度 $150\sim 160\text{ mm/min}$ の溶接条件で手溶接で行なった。なお P1, P2, PF1 試験片はそれぞれ Fig. 1 に示す形状の開先をとって溶接した。また問題を簡単にするためすべての試験片について主板と側板の間は 1 mm 程度の間隔をあけて溶接を行ない、両板の摩擦の影響が現われないようにした。なお通常のすみ肉溶接では間隔を設けないが、この場合発生する主板と側板の摩擦は強度上は安全側として作用するであろう。

溶接後主板, 側板には各々 Fig. 1 に示すような約 5 mm 中の切欠きを入れ所定の溶接長にし、試験部に溶接の終始端が入らないようにした。溶接長 (L) およびのど厚 (t) は Fig. 1 に示す値を規定値とした。しかし溶接部には溶接後何の処理もほどこしていないのでのど厚は各々の試験片で 1~2 mm 程度のばらつきを持っていた。それ故実験結果の整理には各々の試験片の試験後に測定した実のど厚を用いた。

2.2 実験方法

試験片の引張りは 200 ton 電子管式万能試験機を用い、 $-170^{\circ}\text{C}\sim 20^{\circ}\text{C}$ の試験温度で行なった。試験片の冷却は Photo 1 に示すように冷却槽を試験片のまわりに 2 段~3 段にとりつけこれに液体窒素を注入して行なった。試験片の温度は Fig. 2 に示すように前もって予想される破壊発生位置 6 点に CC 熱電対を取り付けて測定した。そして冷却槽内に液体窒素がなくなりかつ温度測定部 6 点の温度が均一になった状態で載荷した。そして破壊発生時の破壊部の温度をもって試験温度とした。載荷開始から破壊発生までの温度上昇は 5°C 以下であった。剪断変位の測定は Fig. 2 に示す 2 箇所で表面から 5 mm の位置にとりつけたクリップゲージにより行なった。この剪断変位は主板, 側板の変形をも含んだ値であるので厳密には溶接部の剪断変位とは異なるが、予備実験の結果今回使用した試験片では主板および側板の変形は溶接部の変形に比べて無視出来ることを確認したのでこの剪断変位をもって溶接部の剪断変位 δ とした。

Photo 1 Experimental apparatus

Fig. 2 Measurement of temperature and shear displacement

Fig. 3 Effect of temperature on load-shear displacement

3. 荷重—剪断変位曲線におよぼす温度の影響

各試験温度において荷重増加にともなう剪断変位の変化の一例を Fig. 3(a) に示す。図は F1 試験片の結果である。図の縦軸は単位溶接長当りの剪断力を、横軸は剪断変位量を示している。本実験では第1クリップゲージと第2クリップゲージはほとんど同じ値を示したので第1クリップゲージの値を剪断変位量として示した。

Fig. 4 Relation between temperature and shear yield strength

荷重が低い間は剪断変位量 δ は荷重に比例して増加するが、荷重が高くなり溶接部が降伏すると δ は急増する。そして試験温度が低くなるとともに荷重—剪断変位曲線は高くなりまた破断までの剪断変位は小さくなる。Fig. 3 の荷重—剪断変位の関係を両対数グラフに示すと Fig. 3(b) の如く二本の直線となる。この二本の直線の交点が降伏を示し、その時の剪断力を剪断降伏力 (T_y) と考えることができる。本実験では各試験片ののど厚にかなりのばらつきがあるため、剪断降伏力を各試験片ののど厚で除し剪断降伏応力 (τ_y) を求めた。その値を温度に対してプロットしたのが Fig. 4 である。剪断降伏応力は試験片形状には影響されず Arrhenius 型の温度依存性を持つ(1)式で表わされる。図の曲線は(1)式による値を示している。

$$\tau_y = \tau_{y0} \exp\{N(1/T - 1/273)\} \quad \dots\dots(1)$$

τ_{y0} : 0 °C における剪断降伏応力 (22.5 kg/mm²)

N : 定数 (162K), T : 絶対温度 (K)

また Fig. 3 より荷重—剪断変位は(2)式で表示できる。

$$T = F \cdot \delta^n \quad \dots\dots(2)$$

T : 単位溶接長当りの剪断力

δ : 剪断変位

ここで(2)式における n は Fig. 3(b) の直線の傾きで本実験の場合、弾性域では $n=1$ 、塑性域では $n=0.13$ で試験片形状、試験温度には影響されていない。また係数 F は試験片形状および試験温度によって異なり、これについては第2報で考察する。

4. 破壊様相

4.1 破壊様相におよぼす温度の影響

種々の試験温度における破壊の一例を Photo 2 に示す。写真は PF1 試験片の結果である。常温の場合は写

Photo 2 Fracture aspect of specimen PFI

Photo 3 Example of fracture texture

真(a)の如く溶接部で剪断延性破壊(本報告では A-Type 破壊と呼ぶ)を生じる。しかし試験温度が低くなった-39℃の場合は写真(b)に示すように、すみ肉溶接線上の主板断続部から荷重軸に約45°方向に発生したき裂が側板へ伝播し、側板が荷重軸にほぼ垂直に破壊(B-Type 破壊)する。この破壊は Photo 3(a)に示すように巨視的に脆性破面を示し、破壊が溶接ルート部から荷重軸に対して45°方向に発生し、側板に伝播した様相がよく現われている。さらに試験温度が低くなった-140℃の場合は Photo 2(c)に示すように側板で荷重軸に対してほぼ垂直に脆性破壊(C-Type 破壊)を生じる。この種の破壊は B-Type 破壊と異なり、溶接端部に荷重軸と45°方向に生じるき裂は認められない。C-Type 破壊は Photo 3(b)に示すように、き裂は溶接ルート部ではなく溶接止端部(矢印で示す)すなわち構造的不連続部から発生しており、B-Type 破壊とは異なっている。

4.2 限界剪断変位量と破壊様相

破壊までの剪断変位量(限界剪断変位量)を温度に対してプロットしたのが Fig. 5 である。図中記号に○印を付けたものは A-Type 破壊を、+印を付けたものは B-Type 破壊を、無印は C-Type 破壊をしたものである。限界剪断変位量と試験温度の関係は試験片 Type にかかわらずそれぞれの破壊様式に対応して三本の直線で表わされる。すなわち A-Type 破壊の場合はほぼ一定値を示すが、B-Type 破壊では限界剪断変位量は温度の低下とともにほぼ指数関数的に低下する。そしてその値は(3)

Fig. 5 Effect of temperature on critical shear displacement

式で表わされる。

$$\delta_{cr} = 4.0 \text{ Exp } \{785(-1/T + 1/273)\} \text{ mm} \quad \cdots (3)$$

T = 絶対温度 (K)

さらに温度が低下し-100℃以下になり、C-Type 破壊が生じると限界剪断変位量は B-Type の場合よりさらに小さくなる。しかしこの場合も限界剪断変位量は温度低下とともに小さくなりその値は(4)式で表わすことができる。

$$\delta_{cr} = 1.8 \text{ Exp } \{785(-1/T + 1/273)\} \text{ mm} \quad \cdots (4)$$

以上のことより剪断力を受ける溶接継手の破壊様相は限界剪断変位量によっても明確に三つの Type に区別できる。

5. 継手強度

5.1 継手強度におよぼす温度の影響

剪断力を受ける溶接継手の破壊は前述のように3つの

Fig. 6 Effect of temperature on maximum strength on throat depth

Fig. 7 Effect of temperature on maximum strength on main plate

Type となり、破壊が溶接部のみで生じる場合と側板あるいは主板で生じる場合がある。そこで継手強度を溶接部のど断面で考えるか、母材部断面で考えるかで破壊応力値は異なる。そこでそれぞれの破壊様相に応じて継手強度を検討する。

破壊荷重より溶接部のど断面を基準として求めた破壊応力を Fig. 6 に示す。図中記号に○印を付けたものは A-Type、△印は B-Type、無印は C-Type 破壊をしたものである。A-Type および B-Type 破壊をした場合、破壊応力は破壊様相にかかわらず温度低下とともにゆるやかに増加する傾向を示し、ほぼ溶接金属の剪断強度 (τ_u) に等しい。しかし温度がさらに低下し C-Type 破壊を生じると破壊応力は温度低下とともに急減し、溶接金属の降伏強度 (σ_y) より低くなる。なお破壊応力は試験片 Type にはほとんど影響されていないようであるが、破壊様式の遷移する温度は継手形式により異なっているようである。

次に巨視的には母材部主板あるいは側板で破壊を生じた B-Type、C-Type 破壊の場合について、破壊荷重を破壊を生じた母材部断面で除すことにより求めた破壊応力を Fig. 7 に示す。記号は Fig. 6 の場合と同様である。

Fig. 8 Explanatory figure of crack initiation in B-type fracture

また図には母材の大型 Deep Notch 試験 (板巾 400mm, ノッチ深さ 120mm) 結果も示している。破壊応力値はかなりばらついているが、B-Type、C-Type いずれの破壊の場合もかなり低応力の破壊となり、鋭い切欠を有する大型 Deep Notch 試験結果よりも低くなっている。本実験に用いた試験片の母材には切欠等の欠陥は含まれていないにもかかわらず Deep Notch 試験より低応力破壊となったことは注目すべきことであろう。次にこの原因について考察する。

5.2 破壊様相と継手強度の関連

まず B-Type 破壊に注目すると、この場合継手強度は母材部応力に関しては低応力であるが、溶接部応力で見ると溶接金属の最大強度にほぼ等しい。そして Photo 3 (a) に示した破面写真からわかるように、まず溶接部から荷重軸に 45° 方向に破壊が発生し、それが母材へ伝播して完全破断となる。以上のことより B-Type 破壊は次のように考えられる。すなわち Fig. 8 (a) に示すようにまずのど断面上で剪断力 (τ) に対応して生じる引張主応力 (σ_n) によって溶接端のルート部から高応力で脆性的に破壊が発生する。そしてその破壊が荷重軸に対して垂直に近い角度で母材へ伝播し完全破断となったものであろう。したがって母材応力が母材のき裂伝播停止応力より小さい場合あるいは試験温度がき裂伝播停止温度より高い場合は B-Type 破壊は生じないであろう。これを確かめるため母材に 9% Ni 鋼を用い、同一溶接条件で F1 試験片と同形状の試験片を製作し -120°C で実験を行なった。継手強度は F1 試験片とほぼ等しい値を示し、その破壊様相は Fig. 8 (b) に示すように、溶接部で荷重軸に対して 45° 方向ののこ歯状破壊となり主板あるいは側板の脆性破壊は見られなかった。以上のことから上述の推論の妥当性が確かめられる。

一方 C-Type 破壊は溶接部応力、母材部応力のどちらに関しても低応力脆性破壊となっている。そして Photo 3 (b) に示す破壊写真からわかるように破壊は溶接端部の構造上の不連続部から生じている。したがってこの破壊

は構造上の不連続による応力集中および溶接による引張残留応力を原因とする破壊と考えられる。すなわち溶接端部に発生した大きな剪断力が母材に対しては表面に集中した剪断力として作用しこの応力および溶接による残留応力により低応力破壊を生じたものであろう。したがってこの破壊においても溶接部の寸法が破壊強度に影響する。そのため C-Type 破壊の場合においても破壊応力は母材断面積を基準とした Fig. 7 よりも溶接部断面積を基準とした Fig. 6 の方がばらつきが小さくなっている。

以上のことより剪断力を受ける溶接継手では溶接部寸法が一見溶接部とは無関係と考えられる主板および側板全体の低応力破壊に著しい影響をおよぼす場合があることがわかる。すなわち常温においては構造的にそれほど重要視しなくてもよいと考えられるような剪断力をうける溶接継手でも、低温においてはその溶接部が破壊することにより構造的に重要な部材へ破壊が伝播し大事故につながる危険性がある。したがって剪断力を受ける溶接継手を低温で使用する場合は上述のような破壊に対して十分注意を払っておく必要があろう。

6. 結 言

剪断力を受ける溶接継手の破壊挙動および強度におよぼす温度の影響について検討した。得られた結果の要点を次に示す。

1) 剪断力を受ける溶接継手の破壊様相は試験温度によって3つの Type に別れる。すなわち温度低下にともなって次のような破壊様相を示す。

(a) 常温又はそれに近い温度の場合は溶接部で剪断延性破壊 (A-Type) を生じる。

(b) 温度が比較的低くなると溶接部で荷重軸に対して45°方向に破壊が発生しこれが母材へ伝播し、母材で荷重軸にほぼ垂直に脆性破壊 (B-Type) を生じる。

(c) 温度がさらに低くなると溶接端部の構造上の不連続部から母材に直接脆性破壊が発生し伝播する破壊 (C-Type) を生じる (Photo 2 参照)。

2) 試験片の破壊は試験片 Type にかかわらず剪断変位量 (限界剪断変位量) が一定の時に発生し、この値は試験温度に依存している。そして限界剪断変位量の値によっても前述の3つの Type の破壊様相が明確に区別することができる (Fig. 5 参照)。

3) A-Type, B-Type 破壊をした場合、継手強度は溶接部のど断面で考えるとほぼ溶接金属の剪断強度に等しい (Fig. 6 参照)。一方 B-Type, C-Type 破壊をした場合、継手強度を巨視的に破壊を生じた部分すなわち母材断面で考えると、その強度は母材の大型 Deep Notch 試験結果よりも低くなる (Fig. 7 参照)。このことより剪断力を受ける溶接継手では溶接部の寸法が、一見溶接部とは無関係と考えられる母材の低応力脆性破壊に著しい影響を及ぼすことがわかる。したがって常温においては構造的に重要視されないすみ肉溶接継手でも低温においてはその溶接部の破壊が重要構造部材の破壊発生の引き金になる可能性があるので十分注意を払っておく必要があろう。

参 考 文 献

- 1) 木原, 佐藤, 豊田: “日本における溶接構造物の脆性破壊発生に関する研究 (その1)”, 本誌 42-2 (1973), pp. 69~90
- 2) 木原, 佐藤, 豊田: “日本における溶接構造物の脆性破壊発生に関する研究 (その2)”, 本誌 42-4 (1973) pp. 72~86
- 3) 太田: “すみ肉溶接継手破壊挙動の温度特性” 本誌 34-7 (1965) pp. 68~688