

3-4 溶接変形と残留応力*



寺崎 俊夫**

Weld Distortion and Residual Stress*

by TERASAKI Toshio**

キーワード 溶接入熱, 変形, 残留応力, 拘束

0. はじめに

本報告は溶接管理技術者1級の習得を目指す読者を対象に、溶接学会編「溶接・接合技術特論」の記述を補う形で記述している。

1. 溶接残留応力・変形の発生原因と支配因子

1.1 溶着金属の収縮能力と残留応力・変形

1.1.1 溶着金属の収縮能力

溶接により残留応力と変形が発生する原因は溶接入熱による温度変化である。溶接では、図1に示すように2枚の別々の母板が開先部（矩形領域とする）で溶接（溶着）されて一体になる。すなわち、ドットで示す溶けた金属である溶着金属（鋼は約1500℃で溶ける）が開先部に溶着されて、室温（図では20℃と仮定）まで冷却する温度変化過程で変形・残留応力が生じる。ドットで示す矩形領域の溶着金属が母板と分離していれば、冷却後には斜線の矩形形状に一樣収縮（変形）できる*。

*（一樣収縮の求め方）：難しく感じる人は飛ばすこと、ただし、記号の意味だけは理解すること。

この収縮量は溶接入熱 Q_{net} (J/mm) と溶着金属の寸法であるのど厚（ここでは母板の板厚と同じ） h (mm)、長さ L (mm)、幅 B_w (mm) および材料定数である線膨張係数 α ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)、密度 ρ (g/mm^3)、比熱 c ($\text{J}/\text{g}^{\circ}\text{C}$) の情報で決まる。溶着金属の熔融温度 θ_{melt} ($^{\circ}\text{C}$)、心線の初期温度を θ_0 ($^{\circ}\text{C}$) とすると、溶接長1mmに溶着される金属量 $B_w \cdot h \cdot 1 \cdot$

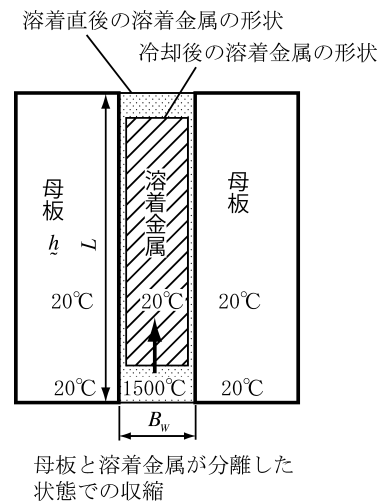


図1 溶着金属の収縮

ρ (g) を熔融するのに必要な熱量は $c \cdot (B_w h \rho) \cdot (\theta_{melt} - \theta_0)$ (J) となり、溶接長1mmあたりに投与された溶接入熱と等しくなる。すなわち、

$$Q_{net} = c \rho B_w h (\theta_{melt} - \theta_0) \quad \text{-----(1)}$$

一方、熔融温度から初期温度まで冷却するときに生じる熱ひずみは1℃温度変化するときに生じる熱ひずみである線膨張係数を使用すると $\alpha(\theta_{melt} - \theta_0)$ となるから、溶接線方向の収縮量は $\alpha(\theta_{melt} - \theta_0) \cdot L$ (mm)、溶着金属幅方向の収縮量は $\alpha(\theta_{melt} - \theta_0) \cdot B_w$ (mm) となる。式(1)を使用すると、

$$\text{溶接線方向の収縮能力} : \alpha(\theta_{melt} - \theta_0)L = \frac{\alpha Q_{net}}{c \rho B_w h} \cdot \frac{L}{B_w}$$

$$\text{溶接線幅方向の収縮能力} : \alpha(\theta_{melt} - \theta_0)B_w = \frac{\alpha Q_{net}}{c \rho h}$$

となる。

*原稿受付 平成21年1月16日

**正員 九州工業大学 Member, Kyushu Institute of Technology

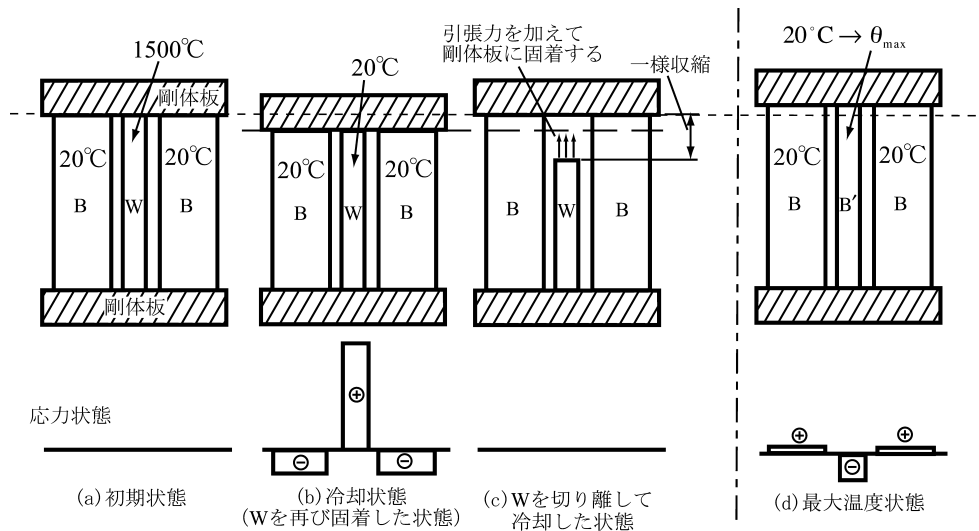


図2 溶接残留応力の発生機構模式図

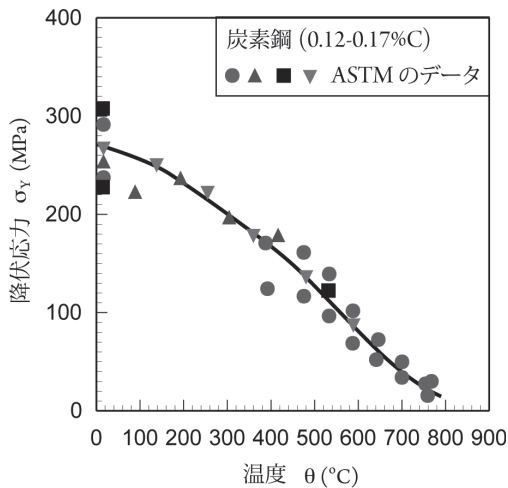


図3 炭素鋼の降伏応力の温度依存性

上記の考察より
(ポイント)

- ・収縮能力は溶接入熱，線膨張係数，比熱，密度の影響を受ける。

1.1.2 溶着金属の収縮による残留応力・変形

溶着金属は，実際には母板と一体になっているために，溶着金属の一樣収縮は母板による拘束により自由に行うことができない。このため，一樣収縮の一部は応力に変化する。一樣収縮を拘束すると残留応力が生じ，一樣収縮量から残留応力に変化した量の残りが溶接変形になる。したがって，残留応力と溶接変形は相反する関係にある。

溶接線幅（直角）方向では収縮を拘束する部分がほとんどないため，収縮（横収縮という） $S(\text{mm})$ は溶着金属の収縮能力に等しくなり，次式で与えられる。

$$S = \frac{\alpha Q_{\text{net}}}{cph} \text{-----(2)}$$

溶接線方向は拘束があるため，残留応力が発生し，変形は小さくなる。図1に示す突合せ継手に生じる残留応

力の発生機構を図2に示す簡単なモデルで考える。溶着金属の部分がWの板に，母材部分がBの板に相当する。WとBの板が剛体板（まったく変形をしない板）に固定されている。

溶着直後を図(a)に示す初期状態として，冷却過程を考える。Wの板は冷却にしたがって収縮し始めるため，引張応力が発生する。

図3に示すように，金属は高温になると降伏応力が低下するため，冷却過程ではWの引張応力はすぐに引張りの降伏応力に達し，室温（20°Cと仮定）まで引張降伏応力状態で移行する。一方，Bの板はWの板の収縮を拘束するため，圧縮力を受け，圧縮応力を発生する。

残留応力が図(b)のようになることは，図(c)の状態を考えると理解しやすい。図(c)は図(a)の初期状態において，Wの一端を剛体板から切り離して，常温まで冷却した状態であり，Wの板には一樣収縮が生じている。図(b)の状態を図(c)から作るには，Wに生じた一樣収縮を，Wに引張力を加えて引き伸ばし，剛体板に固着することである。Wの板には大きな引張りの応力が発生して引張降伏応力になり，このWの引張り力と釣合う圧縮力がB（母材）部に生じ，圧縮応力となって，図(b)の残留応力分布になる。

残留応力分布の特徴は外力が作用していないため，Wに生じた引張応力の合力とBに生じた圧縮応力の合力が互いに釣合っていること，すなわち，必ず自己平衡形の応力分布となることである。

上記の考察より
(ポイント)

- ・残留応力と溶接変形は相反関係にある。
- ・拘束がほとんどない溶接線直角（幅）方向の変形である横収縮は溶着金属の収縮能力である式(2)で与えられる。したがって，溶接入熱や線膨張係数に比例する。
- ・溶接線方向の残留応力は溶着金属部で引張りの降伏応力となり，残留応力分布は自己平衡している。

1.2 母材の収縮能力と残留応力

溶着金属に与えられた熱は、周囲の母材に熱伝導する。このため、溶着金属すぐ隣の母材の最高温度は熔融温度まで上昇し熔融する(溶着金属と母材の熔融金属を合わせて溶接金属と呼ぶ)。図2(d)に示すモデルで母材のある部分(B'とする)のみが、室温から最高温度 θ_{max} (°C)まで温度上昇したときの熱応力を考える。温度上昇差($\theta_{max} - \theta_0$) (初期温度20°Cを θ_0 で表す)により、熱膨張するが室温の母材部分の存在により、剛体板を通して拘束を受けるため、B'には圧縮の熱応力、Bには引張りの熱応力が発生する。ここで、母材B'で熔融した部分を考えて、降伏応力は図3よりゼロであるから、熱応力は発生しなくなり、図2(d)は図2(a)と同じ状態になる。冷却過程では母材B'と溶着金属Wは同じである。したがって、母材で熔融した部分の溶接線方向の収縮能力は溶着金属と同じになる。

降伏応力がほぼゼロと見なせる力学的熔融温度(図3では約800°C)以上に最高温度上昇する部分の収縮能力は溶着金属の収縮能力式において、熔融温度 θ_{melt} を最高温度 θ_{max} に変更した $a(\theta_{max} - \theta_0)L$ で与えられる。収縮能力をひずみで表すと

熔融温度部分の収縮ひずみ能力： $a(\theta_{melt} - \theta_0)$,

力学的熔融温度と熔融温度の間の部分での収縮ひずみ能力： $a(\theta_{max} - \theta_0)$

で表される。

では、力学的熔融温度以下の部分の収縮ひずみはどうか考えるのか。図2(d)に示しているように、初期状態から膨張している。したがって、最高温度からの収縮ひずみ $a(\theta_{max} - \theta_0)$ から膨張量を長さLで割って求めた膨張ひずみを除くと得られる。答えは複雑であり、ここではこれ以上の検討を行なわない。

両端固定棒モデルは図2(d)の膨張量が図(c)の一様収縮に比較すると小さいから、ゼロと仮定し、図3の降伏応力の温度依存性も一定と考えたモデルである。すなわち、図2(d)の剛体板は温度加熱・冷却過程で、図(a)の位置から動かないと考えるモデルである。このモデルを使用すると、引張残留応力が発生する領域が検討できる。図2(d)のB'部分に最高温度で、圧縮の塑性ひずみが生じない場合は、冷却後の残留応力はゼロとなる。最高温度でB'部分に、圧縮の塑性ひずみが生じて室温に戻ったとき、圧縮の塑性ひずみを受けただけもとの長さよりも短くなるため、引張りの応力が発生する。すなわち、温度上昇過程で圧縮塑性ひずみが発生したことが、引張残留応力の発生原因となる。

(圧縮塑性ひずみ発生領域について) 難しく感じる人は飛ばすこと、記号の意味だけは理解すること。

降伏応力を σ_y (MPa)、ヤング率を E (MPa)とすると、降伏ひずみ ϵ_y は σ_y/E となる。加熱過程で圧縮降伏する最高温度 θ_p は熱膨張ひずみが圧縮降伏ひずみになる条件から

$$\theta_p - \theta_0 = \frac{\sigma_y}{E\alpha} \text{-----(3)}$$

となる。軟鋼では降伏応力が約240MPa、線膨張係数が $0.000012^\circ\text{C}^{-1}$ 、ヤング率が約200000MPaであるから、式(3)の右辺は100°Cとなる。室温を20°Cとすると、最高温度が120°Cになるところまで、圧縮塑性ひずみが発生し、引張残留応力が生じていることになる。なお、図2(d)の熱膨張が小さくない場合には、圧縮塑性ひずみ発生領域の最高温度は120°Cよりも大きくなることに注意する必要がある。

一方、溶接線方向にy軸を取り、板幅方向にx軸を取る(図4参照)と、x点の最高温度 θ_{max} は次式で与えられる。

$$\theta_{max} - \theta_0 = 0.242 \frac{Q_{net}}{cph} \cdot \frac{1}{x}$$

したがって、 θ_{max} が θ_p となる位置 x_p (mm)は次式となる。

$$x_p = \dots \text{-----(4)}$$

式(4)より、引張残留応力の発生領域は溶接入熱、ヤング率、線膨張係数に比例し、降伏応力、板厚、比熱、密度に反比例することが分かる。

(固有ひずみについて) 難解なので難しく感じる人は飛ばすこと

固有ひずみの概念は外力が作用していなくても、物体内部に存在する残留応力(固有応力の一種)を説明するひずみとして使用されている。

溶接では液体となる溶着金属のひずみを考えるために必要となる。ほとんどの場合は残留する塑性ひずみと等価である。今回使用した収縮ひずみは固有ひずみの発生要因であるが、冷却後の圧縮塑性ひずみを考えていないため、固有ひずみではない。収縮ひずみに冷却過程で発生する塑性ひずみを加算すると固有ひずみとなる。

上記の考察より

(ポイント)

- ・温度上昇過程で発生する圧縮塑性ひずみが母材の収縮能力を作る原因であり、軟鋼では約120°Cに温度上昇する部分に圧縮塑性ひずみが生じ、引張残留応

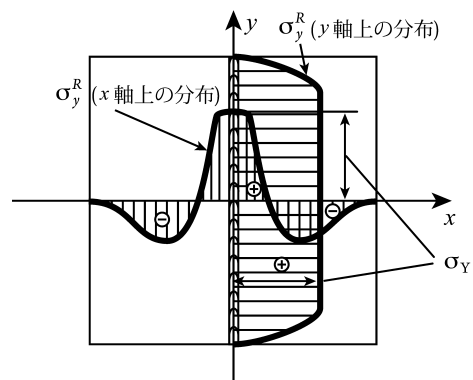


図4 突合せ溶接継手での溶接線方向の残留応力分布

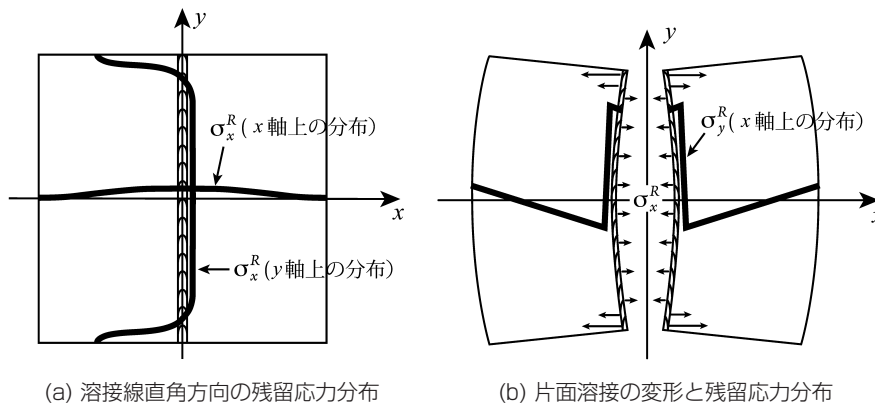


図5 溶接線直角方向の残留応力と発生原因

力となる。

- ・引張残留応力（圧縮塑性ひずみ）の発生領域は溶接入熱，ヤング率，線膨張係数に比例し，降伏応力，板厚，比熱，密度に反比例する。

2. 残留応力分布の特徴

2.1 突合せ溶接継手の残留応力分布

軟鋼の広い板（約 500 mm 角以上）の中央を突合せ溶接した場合に生じる溶接線方向の残留応力分布を図 4 に示す。

- 特徴：①溶接線方向にはビード付近で室温の降伏応力 σ_y に等しい引張残留応力 σ_y^R が生じる。
- ② x 軸上では、「残留応力の総和は零である」条件を満足するように，ビード付近の引張残留応力と釣合う圧縮残留応力がその両側に生ずる。
- ③溶着金属の中心である y 軸上では，引張残留応力 σ_y^R は室温の降伏応力 σ_y に等しい。
- ④ y 軸上の両端近傍では，「表面に垂直な応力は零である」条件を満足するような分布となる。

また，冷却中に 500℃ 以下の温度で相変態を起こして体積が変化する鋼（例えば 9%Ni 鋼）では，冷却中の相変態膨張の影響を受けて，溶接線方向の引張残留応力は降伏応力より小さな値になる。

y 方向に拘束がある場合でも残留応力分布は図 4 とほとんど変わらない。理由は図 2 に示すように， y 方向には大きな拘束があるため，更なる拘束は残留応力の発生にほとんど寄与しないからである。

溶接線に垂直な方向の残留応力 σ_x^R は x （溶接線 y 軸に垂直）方向の拘束に影響される。 x 方向の収縮が拘束されない自由な状態では， σ_x^R は小さな値となる。図 5(a) に x 軸上および y 軸上での σ_x^R 分布を示す。

特徴：溶接線上の両端で絶対値の大きな圧縮残留応力になり，その他の部分で小さな引張応力になる。

発生原因は図 5(b) に示す y 方向の残留応力 σ_y^R である。図 4 に示す突合せ継手を溶接線中心の y 軸上で切断して 2 枚板にすると，図 (b) に示すような片面溶接となりそれぞれの板は図のように変形する。変形した 2 枚板を図 5(a) の 1 枚板にするためには，図 5(b) に示す x 方向の残留応力 σ_x^R を作用させる必要がある（溶接線両端の圧

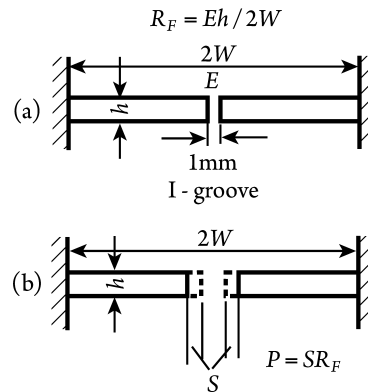


図6 拘束度の定義と拘束応力

縮残留応力は y 軸上において残留応力の総和が零である条件を満たすためである)。さらに， y 軸上での y 方向の板端部での垂直応力 σ_y^R がゼロになることが，端部で σ_x^R が圧縮残留応力になる原因であるが，説明すると長くなるので省略する。

x 方向に拘束がある場合には，図 6 で説明する拘束度 R_F (N/mm・mm) から導かれる拘束応力 σ_R が図 5 (a) の σ_x^R に加算される。

拘束度は板幅 W (mm)，板厚 h (mm)，溶接長 1 mm（図 6 において，紙面に垂直な方向）の 2 枚の板の間隔を 1 mm 縮めるのに必要な力と定義される。したがって，

$$R_F = E \cdot \frac{1}{2W} \cdot (h \times 1) = \frac{Eh}{2W} \text{ (N/mm} \cdot \text{mm)} \text{-----(5)}$$

溶接により横収縮 S (mm) が生じたときの単位溶接長当たりの拘束力 P (N/mm) および拘束応力 σ_R (N/mm²) は次式となる。

$$P = SR_F = \frac{SEh}{2W} \text{ (N/mm)}$$

$$\sigma_R = \frac{P}{h} = \frac{SR_F}{h} = \frac{SE}{2W} \text{ (N/mm}^2\text{)} \text{-----(6)}$$

板厚 30 mm 以上の極厚板では多層溶接されるため，すでに溶着されたビードが後続の溶接ビードが収縮するのを拘束する。このため溶接線方向のみならず，溶接線直角方向（板幅，板厚の両方）にも大きな引張残留応力が発生する。

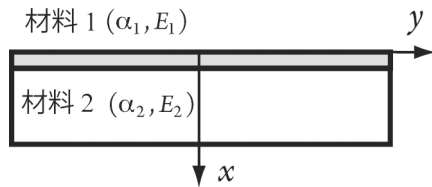


図7 片面（端面）溶接

上記の考察より
(ポイント)

- ・軟鋼では、溶接線方向の残留応力は溶接部近傍で室温の降伏応力になっている。500℃以下で冷却中の相変態が生じる鋼（例えば、9%Ni鋼）では相変態膨張の影響により降伏応力以下の値となる。
- ・溶接線に直角な方向である板幅方向の残留応力は小さな値であるが、板長さ端部では大きな圧縮応力が生じている。
- ・拘束は溶接線方向の残留応力にはほとんど影響を与えないが、溶接線直角方向である板幅方向の残留応力には影響を与える。

2.2 片面（端面）溶接の残留応力分布

片面（端面）溶接では図7に示すように、材料2（母板）に材料1（溶着金属）が溶着される。図1と同様に（向きが90°異なっているので、x, y軸に注意）溶着金属のみに収縮能力を与えると、図5(b)のように回転変形と残留応力分布が発生する。

残留応力分布の特徴

- ・溶接線直角方向は拘束がないから残留応力は生じない。
- ・溶接線方向：力がゼロ、曲げモーメントがゼロの条件を満たすため
 - ①溶接線側の端部近傍では、室温での降伏応力に等しい引張残留応力
 - ②その外側では、これと釣合う圧縮残留応力があり、反対側端部に向かって、圧縮残留応力から引張残留応力になる直線分布

材料1の溶着金属がオーステナイト系ステンレス鋼で、材料2が軟鋼である場合には、線膨張係数が $\alpha_1 > \alpha_2$ となり、 $\alpha_1 = \alpha_2$ の同種材料の場合より収縮能力がさらに大きくなり、回転変形が大きくなる。

金属とセラミックス、あるいは異種金属同士が接合されるような場合には、接合温度（ θ_{\max} とする）から一様に室温 θ_0 に冷却されても、それぞれの材料の線膨張係数の相違に起因した収縮能力差により回転変形と残留応力が生じる。材料1の収縮能力 $\alpha_1(\theta_{\max} - \theta_0)$ が材料2の収縮能力 $\alpha_2(\theta_{\max} - \theta_0)$ より大きい $\alpha_1 > \alpha_2$ の場合には、図5(b)と同様な変形と残留応力になり、 $\alpha_1 < \alpha_2$ の場合には、図5(b)と逆向きの変形と残留応力になる。

3. 残留応力の影響

3.1 静的強度におよぼす影響

軟鋼や低合金鋼のように延性に富む材料では、溶接部の静的破壊は塑性変形後に起こるため、残留応力の影響

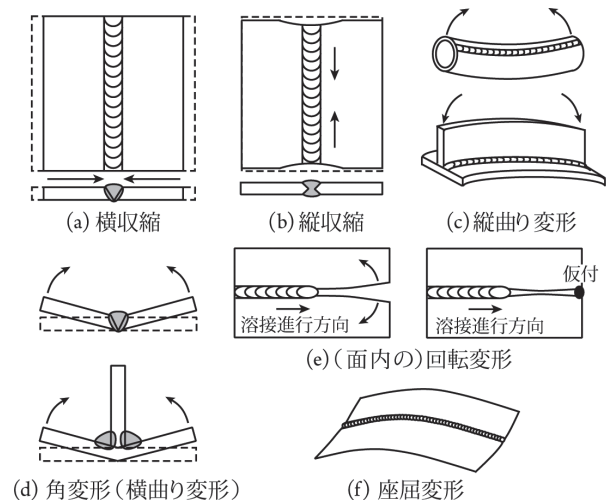


図8 溶接変形の種類

はない。これは全面降伏時に、残留応力が消滅してしまうために、全面降伏後に現れる破断強度に残留応力が影響しないからである。また、残留応力は自己平衡しているため、残留応力を有する部材が全断面降伏するために必要な降伏荷重は、残留応力の影響を受けないことも注目する必要がある。

3.2 疲労強度におよぼす影響

弾性域という比較的低応力下で、応力集中部を起点とする疲労破壊は、残留応力の影響を受ける。割れ、溶込み不良などの鋭い欠陥がある場合や、構造的に応力集中部がある場合には、この部分から疲労き裂が発生しやすい。そこに引張残留応力が存在するときは、疲労挙動における平均応力を上昇させた効果と等価となり、疲労強度はさらに低下する。逆に、溶接止端部表面にピーニングや焼入れ処理により、圧縮残留応力場を形成すると平均応力が負となり、疲労強度は改善される。

低サイクル疲労の場合には、残留応力は疲労強度にあまり大きな悪影響を与えない。これは疲労き裂の発生以前に、高い応力の繰返しにより残留応力が減少し残留応力の影響が消失するからである。

3.3 ぜい性破壊におよぼす影響

切欠き部に引張残留応力が存在すれば、それだけ高い荷重が加わったのと同じ効果があり、引張残留応力がない場合よりもはるかに低い応力でぜい性破壊が起こる。圧力容器などでは規格によりある板厚（30～40mm）以上では、残留応力除去を要求している。

3.4 座屈と応力腐食割れにおよぼす影響

残留応力、特に圧縮残留応力は、構造物の座屈強度を低下させる。応力腐食割れ（SCC）は、鋼が特殊な環境の中で引張応力を受けるときに生じる現象であるから、溶接による引張残留応力の存在は、応力腐食割れを一般に促進する。

4. 溶接変形

溶接熱による不均一膨張と冷却中の収縮の結果、溶接物は、図8に示すような各種の変形を生ずる。これらは、

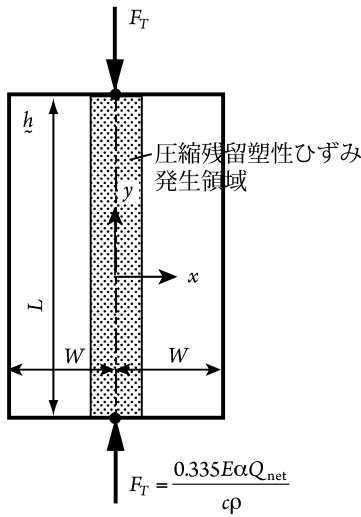


図9 縦収縮を作る力

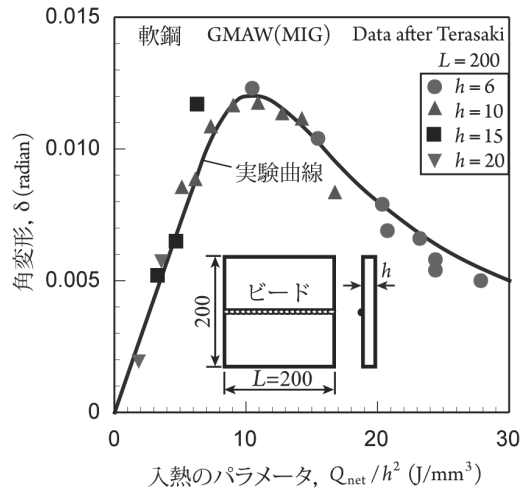


図10 ビード溶接での軟鋼の角変形

一般に組み合わさって発生する。

4.1 横収縮

横収縮は図8(a)に示す溶接線に直角方向の収縮である。1層1パスで溶接した場合の横収縮は前述したように“溶接部の収縮能力”に等しく、式(2)で与えられる。横収縮は板厚に反比例し、溶接入熱 Q_{net} (J/mm) に比例する。

多層溶接では開先の断面積が横収縮量の大きさの目安となる。溶着金属量が増えると、開先を仕上げる総入熱が大きくなって横収縮量も大きくなる。

4.2 縦収縮

縦収縮は図8(b)に示すように溶接線方向の収縮のことであり、溶接線中央が最も収縮する。縦収縮は溶接線方向の残留圧縮塑性ひずみより導かれる引張残留応力に起因して生じている。縦収縮は横収縮に比べると小さいが、造船や橋梁の溶接構造物では、溶接長が長くなり無視できない値となる。

板全体としての平均縦収縮 ΔL_{av} (mm) は図9に示す残留圧縮塑性ひずみの総和から得られる収縮力 F_T (N) から計算され、次式で予測できる。

$$\Delta L_{av} = \frac{F_T}{2hW} \cdot L \text{ (mm)} \text{-----(7)}$$

ただし、 $F_T = \frac{0.335E\alpha Q_{net}}{c\rho}$ (N) -----(8)

4.3 縦曲り変形

縦曲り変形は図8(c)に示すように縦収縮の中心が溶接継手の横断面の中立軸と一致しない場合に生じる溶接線方向の曲り変形のことである。縦収縮により生じる曲げモーメントが原因である。すみ肉溶接組立てによるT形梁や単シムの溶接管などで問題になる。縦曲り変形は式(8)の収縮力に中立軸と収縮力の作用点との距離を乗算した曲げモーメントにより予測できる。

4.4 角変形 (横曲り変形)

角変形は図8(d)に示すように溶接線に垂直な断面における面外変形である。厚板の突合せ溶接では、板の表面と裏面で溶接順序にともなう拘束の程度の違い、溶着量

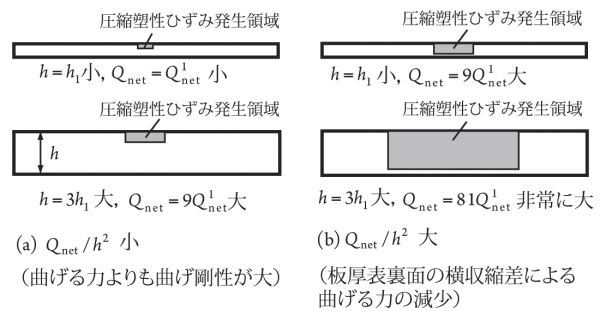


図11 角変形が小さくなる理由

の違いなどによって収縮量が非対称になり、図(d)のような角変形を生じやすい。V形開先の多層盛りでは、角変形が一方に大きく起こり、X形開先では、片面の溶接による角変形が反対面の溶接によって逆方向にある程度修正される。角変形は溶接層数が多いほど大きく、太径ワイヤを用いるサブマージアーク溶接のほうが、被覆アーク溶接よりも角変形は小さい。

T継手すみ肉多層溶接の場合の角変形量 δ (rad) はほぼ層数に比例して増加する。

厚さ20mm程度の、X形開先の両面の開先深さを、表7：裏3に振り分け、被覆アーク溶接で、初めに表側を、次に裏はつり後に裏側を溶接すると角変形は最終的にはほぼ零になる。

板厚 h の板にビード溶接したときの角変形量は図10に示すように、板厚 h が一定のとき、ある入熱のときに最大となり、その前後の入熱では小さくなる。これは図11に示すように、小入熱のビードでは板の表面と裏面の収縮量の差で生じる曲げる力が板の変形抵抗 (曲げ剛性) に比べて不足するため、また大入熱では板の裏面も収縮するようになり、板表裏の収縮量の差で生じる曲げる力が減少するため、角変形が小さくなるからである。板厚 h が変化した場合に角変形が最大になる入熱は、溶接入熱 Q_{net} (J/mm) を板厚 h の2乗で除した入熱パラメータ Q_{net}/h^2 (J/mm³) で決まる。これは図11に示す圧縮塑性ひず

み発生領域の面積が溶接入熱の2乗で決まること、板厚に対する圧縮塑性ひずみ発生領域の板厚方向の寸法比が角変形を決める主要因であることから導かれる。

4.5 回転変形

回転変形は図8(e)に示すように開先が溶接中に開いたり、閉じたりする変形である。アーク熱による膨張と溶融池のすぐ後方での収縮が原因である。1層1パスの溶接では、溶接熱源の移動前方に仮付けなどの拘束がある場合には、溶接進行中に左右の板が、図(e)のように回転してルート間隔が減少し、拘束がない場合にはルート間隔は開く。したがって、一般には仮付けやストロングバックなどを適当に配置して、その開口変形を押さえることが行われる。

また、小入熱で溶接される被覆アーク溶接では、大入熱で溶接されるサブマージアーク溶接よりも回転変形は小さい。片面サブマージアーク溶接の終端割れの原因となる引裂き力は、この回転変形が主要因となっている。

4.6 座屈変形

座屈変形は図8(f)に示すように、平板が溶接により馬の鞍形のように変形する溶接変形である。薄板は曲げ剛性が著しく小さいために、溶接線方向の圧縮残留応力により座屈変形が生じ易くなる。また、座屈変形は板長さ(溶接長に同じ)の2乗に比例して発生しやすくなる。

5. 溶接残留応力・変形の低減法

残留応力と変形は相反する関係にあるため、両者を同時に軽減する唯一の方法は溶接熱を小さくすることである。溶接熱が同じ場合には、厚板では拘束を小さくして変形を発生させ、残留応力を軽減することを図り、溶接割れの発生を防止する。一方、薄板構造では残留応力値が大きくなっても、溶接割れが生じないため、拘束を大きくして変形の防止を図る。

5.1 残留応力低減の方法

溶接残留応力の発生原因は、溶接部およびその近傍に残存する圧縮塑性ひずみである。溶接後に残留応力を低減するには、

- ①溶接部およびその近傍に引張りの塑性ひずみを与えて、残留する圧縮塑性ひずみを低減する。
- ②板に残留する圧縮塑性ひずみの発生領域を大きくして、溶接変形(縦収縮)を生じやすくし、溶接部の残留応力値を小さくする。ことである。

上記①の方法として、溶接部を加熱する方法と機械的処理(溶接部を局部的に降伏させる)を行う方法の二つがある。このうち特に重要なのは熱的方法の溶接後熱処理(PWHT)である。金属は、高温になると降伏点が著しく低下し(図3参照)、塑性ひずみが生じやすくなる現象と、応力をかけたまま高温に放置すると、クリープ変形により応力が緩和する方向にクリープひずみ(塑性ひずみの一種)が生じる現象がある。

PWHTでは残留応力のある溶接部を適当な高温に保持すると、残留応力は小さくなる。その程度は保持温度が高いほど、また保持時間が長いほど著しい。軟鋼では約600℃に、厚さ25mm当たり1時間(50mmなら2時間)

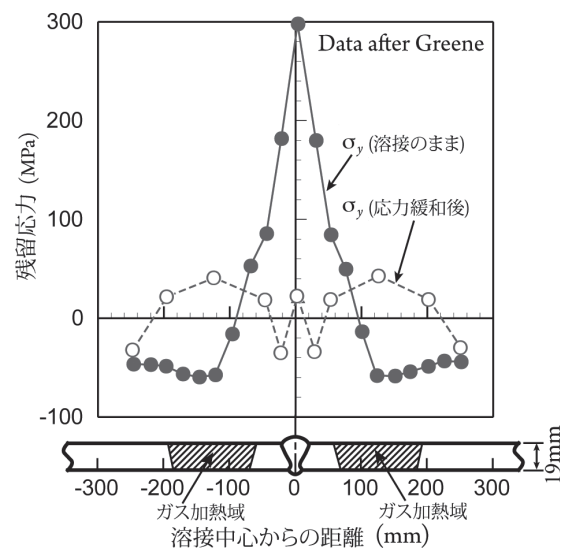


図12 低温応力低減法

保持して徐冷するのが普通である。低合金鋼(例えば、2.25Cr-1Mo鋼)では保持温度を約680℃に、板厚25mm当たり1時間保持して、徐冷するのが普通である。焼入れ焼もどし鋼では、PWHTにおける保持温度は焼もどし温度より低い温度とするのが原則である。普通は大形の加熱炉に入れて均一に加熱する。しかし、構造物が大きすぎるときは溶接部を挟んだ溶接部付近のみを加熱して局部的に熱処理する方法がとられる。

PWHTは残留応力の除去ばかりでなく、熱影響部硬化層の軟化と延性の回復、溶接部の水素の放出、切欠きじん性の回復および精密機械の寸法の狂いの防止に効果がある。压力容器では、溶接部のじん性が十分でない鋼で、板厚38mmを超える場合には、原則としてPWHTが要求されている。また、応力腐食割れの懸念があるときは、よくPWHTが利用される。

上記①の方法として、機械的応力低減法(溶接部を局部的に降伏させる)がある。溶接線方向に降伏応力程度の応力を生じさせる引張荷重を作用(溶接部を局部的に降伏)させて除荷すると、残留応力が除去できる。(溶接接合教室、3-3 溶接継手強度の基礎、3.3項参照)

上記②の方法として、低温応力低減法がある。図12に示すように、溶接線をはさんで、幅約150mmを移動ガス炎で200℃に加熱し、急冷させる低温応力低減法は加熱過程で溶接部に引張りの塑性ひずみを与えて、圧縮塑性ひずみを低減する上記①の効果と、200℃に加熱した領域に圧縮塑性ひずみを発生させ、圧縮塑性ひずみの発生領域を溶接部近傍で広げて、溶接変形(縦収縮)を生じやすくして、溶接部の残留応力値を小さくする上記②の効果複合させて、残留応力値を低下させる方法である。

5.2 溶接変形の影響と防止・低減方法

角変形、縦曲り変形などの面外変形が生じると、図13に示すように、部材の軸心が直線からずれるため、二次的な曲げ応力が生じ、静的強度、疲労強度、ぜい性破壊強度、座屈強度などが低下する。このため面外変形はできるだけ小さくしなければならない。

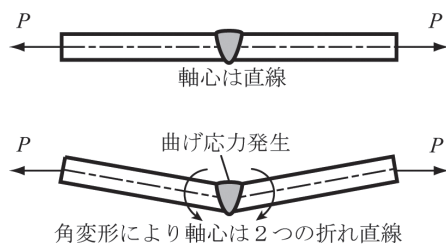
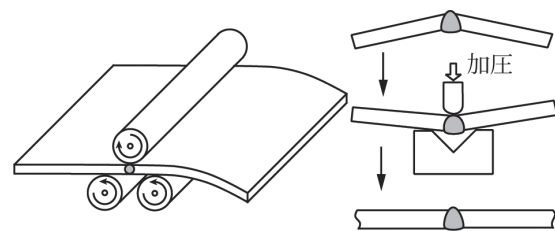


図13 角変形による軸心のずれと曲げ応力



(a) ローラによるひずみ取り (b) プレスによるひずみ取り

図15 機械的方法による溶接変形の矯正

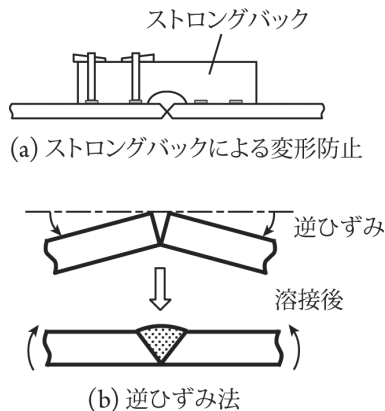


図14 突合せ継手の溶接変形防止対策

5.2.1 溶接変形防止対策

一般に、溶接変形に影響する因子は、溶接入熱、予熱温度、板厚と継手形状、拘束状態、溶接順序と溶着順序および溶接方法などであり、これらを制御することにより溶接変形を小さくできる。

溶接変形の軽減のための一般的原則を以下に示す。

(溶接設計での変形防止対策)

- ① 型材の採用などによる溶接箇所への減少や、溶接箇所への必要以上の接近を避ける。
- ② 開先形状はX形あるいはH形として、面外変形を小さくする。
- ③ 面内の収縮に対してはできるだけ自由にし、収縮量をあらかじめ見込んだ部材寸法をとり、矯正困難な面外変形を抑制するような継手配置を図る。
- ④ 比溶着熱の小さい溶接法を選定する(被覆アーク溶接よりもマグ溶接が小)。

(溶接施工での変形防止対策)

- ① 溶接入熱をできるだけ小さくする。
- ② 開先精度の向上(ベベル角度、取付精度の向上)を図る。
- ③ ストロングバックなどのひずみ防止ジグによる拘束を行う(図14(a)参照)。
- ④ 適切な溶着法と溶接順序を選ぶ。
- ⑤ あらかじめ溶接部材に逆方向に角変形を与えた状態で溶接すると、最終的に角変形をほぼ零にすることができる方法である逆ひずみ法(図14(b)参照)を採用する。

5.2.2 溶接変形の矯正方法

一度生じた変形を矯正する方法には「機械的方法」と「熱的方法」とがある。

(a) 機械的矯正法

冷間塑性加工による矯正法で、図15に示すように、ローラ、プレスなどで矯正する。設備的な制約があり、比較的小形の部材、構造物に適用される。厚板の多層溶接の角変形を小さくするために、各層の溶接金属をピーニングする方法がある。

(b) 熱的矯正法

局部加熱急冷法(お灸、線状加熱など)によって収縮させ、矯正する方法で、熱源としてはガス加熱炎が通常用いられる。比較的薄板の場合には、加熱直後に水冷すると効果が大きい。これらの作業には、経験や熟練を要するうえに、加熱・急冷により材質が変化するので、作業者の訓練や施工管理に注意しなければならない。また、収縮によって長さが短くなる欠点があるので、注意を要する。

6. おわりに

溶接変形と残留応力を平易に説明したつもりですが、分からない部分があれば、ご指摘下さい。専門家の文章は読みにくいとよく伺います。これは専門家が優しいと思っている文章が初めて読む読者にとって、難解なことが原因です。是非とも難解な部分をお教えいただけると幸いです。

参考文献

基本事項の解説であることと、論文でないので省略する。なお、教科書としては下記の本が有名である。

1. 溶接力学とその応用, 渡辺正紀, 佐藤邦彦, 朝倉書店(1965年)
2. 溶接変形と残留応力, 木原博, 増淵興一, 産報(1955)
3. 溶接変形・残留応力, 佐藤邦彦, 上田幸雄, 藤本二男, 産報(1979)

謝辞

文中の図面作成をしていただいた、九州工業大学の北村貴典先生に感謝いたします。