

## Chapter 9 溶接接合設計

**Abstract** この章には、溶接接合の設計問題について説明する。

### 9.1 溶接の基本

溶接 (Welding) は、接合箇所において金属材料が溶融（ようゆう）状態や粘性状態になってお互いに接合される接合法である。大きく分けると、融接、圧接とろう接の三つに分類される。鋼構造では溶接という場合、融接が一般的である。融接 (Fusion Welding) は、電極の間にアーク (Arc) を発生させることで溶接棒の心材または溶接ワイヤを高温にて溶かした溶融金属を接合箇所に供給し、同時に接合箇所の母材の一部も溶かして接合部を一体化する接合方法である。

金属材料の溶接は冶金的接合とも呼ばれ、第 8 章で説明したファスナによる機械的接合に比べて、下記のメリットとデメリットがある。

溶接のメリットとデメリット：

機械的接合に比べて、冶金的接合（溶接）は以下のメリットがある。

- 継手（つぎて）形状がシンプルである。
- 断面欠損がないので継手効率が高い。
- 施工時の騒音が小さい

また、以下のデメリットがある。

- 溶接入熱によってひずみや残留応力が生じる
- （熱影響部の）材質が変化する
- 切欠きや溶接欠陥が疲労破壊や脆性破壊の原因となる

#### 9.1.1 溶接方法

鋼構造で用いる溶接方法には、被覆（ひふく）アーク溶接、炭酸ガスアーク溶接、サブマージアーク溶接、スタッド溶接、エレクトロスラグ溶接などがあるが、炭酸ガスアーク溶接が最も一般的に使用されている。

炭酸ガスアーク溶接 (CO<sub>2</sub> Gas-shielded Arc Welding) では、リールに巻かれた溶接ワイヤをモーターで自動的に溶接トーチを通して溶接箇所に供給し、炭酸ガスを溶接トーチのノズルから噴出させることで大気からアークを遮断する溶接法である。例えば、ある炭酸ガスアーク溶接機



図 9.1 炭酸ガスアーク溶接機とその原理

は図 9.1(a)<sup>1</sup>で、その原理は図 9.1(b)<sup>2</sup>で示している。溶接ワイヤは自動的に供給されるが、溶接トーチを操作する溶接作業は溶接工が行うので、半自動溶接となる。

### 9.1.2 溶接熱影響

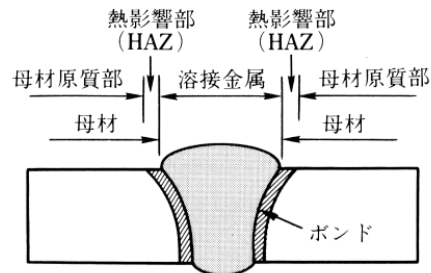


図 9.2 アーク溶接継目の断面（熱影響部）

アーク溶接を行うと、母材と溶接棒（または溶接ワイヤ）が溶融して溶接金属を形成すると同時に、溶接金属に近接した母材は熱的变化をうける。この溶接入熱によって変質した母材の部分を熱影響部 (Heat-affected Zone, HAZ) という。図 9.2 に示すように、溶接線に垂直断面を見ると、溶接継目の部分は溶接金属、熱影響部、母材原質部に分けられる。溶接金属と熱影響部の境界は非溶融の境目でボンド (Bond) という。

溶接入熱が大きいほど熱影響部の幅が広がり、また変質の度合いも大きくなる。また、熱影響部は組織、硬さ、強さ、延性、靱性などが母材原質部と異なっている。一般に、熱影響部は母材原質部より硬くなり、硬化という。特に、ボンド近傍で硬さは最高となり、最高硬さと呼ぶ。最高硬さは鋼材の化学成分と冷却速度に依存する。

<sup>1</sup> <http://okinawa-okano.co.jp/e2892381.html>

<sup>2</sup> [http://www.sanpo-pub.co.jp/omoshiro/freshman/post\\_696.html](http://www.sanpo-pub.co.jp/omoshiro/freshman/post_696.html)

**鋼材の最高硬さへの影響要素：**

- 合金成分が多いほど、最高硬さが高くなる。炭素当量という合金成分の多さを示す指標がある。
- 冷却速度が速いほど、最高硬さが高くなる。
- 溶接入熱が小さいとき、母材の温度が低いとき、または母材の板厚が大きいとき、冷却速度が速くなる。そのため、厚い板を溶接するときには冷却速度を緩和するために母材に予熱あるいは後熱を施すと溶接割れ防止に有効である。

鋼材が硬くなると強さが増やすが、延性が減るため割れが発生しやすくなる。特にボンドに接近した熱影響部部分の靱性が、溶接入熱が大きい場合に、この部分の結晶粒が粗大化し、靱性が低下する。これはボンド脆化といい、溶接端部から脆性破壊しやすい原因となる。

**9.1.3 溶接性**

溶接性 (Weldability) とは、無理のない適切な溶接作業によって良好な溶接品質が得られる母材の性質をいう。溶接性を表すには、炭素当量と溶接割れ感受性指数という指標が用いられる。これらの数値が低い鋼材ほど溶接性がよい。

熱影響部の最高硬さには母材の化学成分が関係し、特に炭素含有量が硬化性に最も大きな影響を及ぼす。炭素当量 (Carbon Equivalent) とは、ほかの合金成分の硬さへの寄与を炭素に換算して足し合わせたものである。

溶接割れ発生率と相関の高い材料特性と、溶接金属中に拡散性水素量および板厚の影響を足し合わせたものは溶接割れ感受性指数という。

**9.1.4 脆性破壊**

脆性破壊 (Brittle Fracture) は、延性破壊 (Ductile Fracture) の対義語である。

- 延性破壊は、金属材料の引張試験を行うと塑性ひずみが進行しくびれが生じたのち、荷重が低下する途中で破壊が起こる現象である。
- 脆性破壊は、くびれが生じることなく、すなわち荷重の低下が見られないまま破壊が生じる現象である。

延性のある金属材料においても、以下の三つの条件を全部そろったときに脆性破壊する可能性もある。

**延性金属材料の脆性破壊三要素：**

- 亀裂の存在
- 引張応力の存在
- 破壊靱性の不足。破壊靱性の不足材料が脆い場合だけでなく、溶接による HAZ の脆化や使用環境における温度の低下なども材料の脆化に関係する。

### 9.1.5 溶接検査と靱性実験

溶接は材料が連続体となるように接合するため、それが満たされない部分は溶接欠陥となる。溶接欠陥は、外から観察できる表面欠陥とそうでない内部欠陥がある。製品を傷つけないで、欠陥を調べることは、非破壊試験という。溶接部の非破壊試験の方法には、目視試験のほか超音波探傷試験、放射線透過試験、浸透探傷試験、磁粉探傷試験などがある。

鋼材やその溶接部の脆性破壊に対する抵抗能力を知る最も簡便な方法はシャルピー衝撃試験 (Charpy Impact Test) である。

### 9.1.6 溶接継目

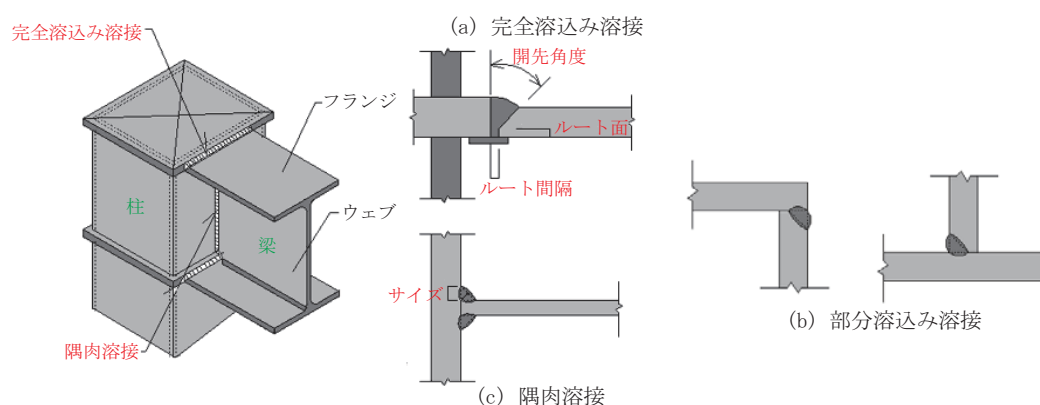


図 9.3 溶接継目 (完全溶込み溶接、隅肉溶接、部分溶込み溶接)

溶接継目 (つぎめ) の種類には、完全溶込み溶接、隅肉 (すみにく) 溶接、部分溶込み溶接、プラグ溶接、スロット溶接、フレア溶接などがある。鋼構造では、図 9.3<sup>3</sup> に示すような完全溶込み溶接、隅肉溶接、部分溶込み溶接は一般的に使用されている主要な溶接継目である。

完全溶込み溶接継目 (Full Penetration Weld) は、図 9.3(a) に示すように接合する板厚全体にわたって溶融金属を溶かし込むもので、十分な溶込みが得られるように開先 (かいさき, Groove) を設ける。溶接時には、開先内は完全に溶接金属で満たし、さらに表面に多少の盛り上がり (よもり) を設ける。被接合材の表面から盛り上がった部分を余盛 (よもり) という。完全溶込み溶接は、溶接部の長さ (通常は被接合材の板幅) 全長にわたって断続しないで溶接するものであり、設計計算では、接合される板の厚さを溶接部ののど厚としているため、溶接部の断面積は、被接合材の断面積と同じとなる。溶接金属は母材以上の強度を持っているので、応力検定は必要ない。

部分溶込み溶接継目 (Partial Penetration Weld) は、図 9.3(b) に示すように接合する板に部分的開先を加工してその部分のみを溶接する接合方法である。一般には接合する板厚が大きい伝達する応力が小さい場合に用いられる溶接継目である。部分溶込み溶接継目は、被接合材の片側だけに用いる場合、引張応力や曲げ (による垂直) 応力が作用するときには十分な耐力を発揮できないので、隅肉溶接と同様にせん断力のみを伝達する溶接継目となる。

隅肉溶接継目 (Fillet Weld) は、図 9.3(c) に示すように被接合材の角の部分に溶融金属をおいて、被接合材の一部を溶かし込んで接合する溶接継目であり、開先は用いない。この角部には設計上三角形の溶接金属を想定し、その三角形が被接合材と接する部分の長さを隅肉溶接のサイズ  $s$  と (Size) 呼んでいる。実際の溶接金属が接合材に接している長さを脚長  $l$  (Leg Length) と呼ぶ。二等辺直角三角形の頂点から斜辺に垂直に引いた線の長さを理論のど厚  $a$  (Throat Thickness) と呼ぶ。各部の名称と定義は図 9.4 に示している。隅肉溶接継目では、こののど厚部分を通る断面 (のど

<sup>3</sup> [http://www6.plala.or.jp/tochio/report/report02\\_2.html](http://www6.plala.or.jp/tochio/report/report02_2.html) の図を編集したもの。

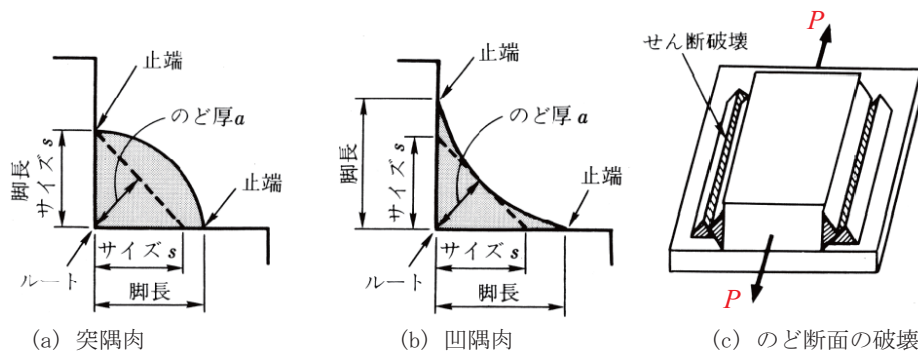


図 9.4 隅肉溶接継目の各部の定義

断面という)でせん断応力を伝達されると仮定し、許容せん断応力度を上回る応力は伝達できないとしている。

## 9.2 継目溶接の設計

### 9.2.1 完全溶込み溶接

前も述べたように完全溶込み溶接の場合に、応力を伝える溶接継目の厚さ(のど厚)が母材の厚さより大きいので、自動的に全強接合(接合部の耐力が母材のそれを下回らない接合)となる。したがって、完全溶込み溶接においては、耐力の検定を必要としない。

### 9.2.2 隅肉溶接

サイズ  $s$  とのど厚  $a$  との間に以下の関係式がある。

$$a = \frac{s}{\sqrt{2}} \approx 0.7s \tag{9.1}$$

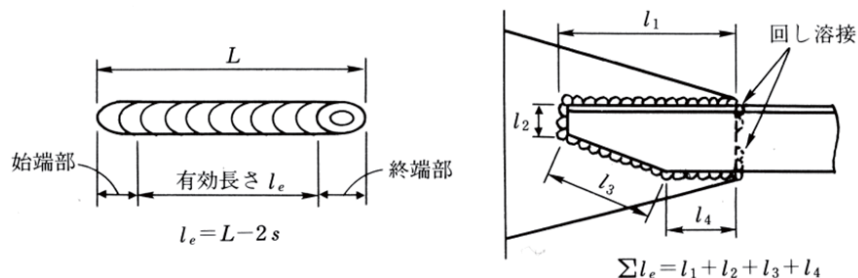


図 9.5 有効長さ  $l_e$  の取り方

隅肉溶接の有効長さ  $l_e$  を取るには、図 9.5 に示すように溶接の始末端に所要のサイズが確保されるかどうかを考慮する必要がある：

- 始末端のサイズが確保されない場合に、実長から始端と終端でそれぞれサイズを差し引いた長さを有効長さとする

$$l_e = L - 2s \quad (9.2)$$

- 回し溶接を設けたとき、回し溶接を除いた部分をすべて有効長さとしてよい

$$l_e = L \quad (9.3)$$

のど厚  $a$  と有効断面  $l_e$  が作る細長い長方形をのど断面といい、その面積  $al_e$  をのど断面積という。溶接金属の強さは母材より高くなるように施工される前提で、母材の基準設計強度（降伏強さ  $F$ 、引張強さ  $F_u$ ）を用いて（側面）隅肉溶接の耐力が以下の式で計算できる。

側面隅肉溶接（せん断抵抗）の耐力計算：

- 降伏耐力  $Q_y$ ：

$$(Q \leq) Q_y = \frac{F}{\sqrt{3}} \sum_i (al_e)_i \quad (9.4)$$

- 最大耐力  $Q_u$ ：

$$(Q \leq) Q_u = \frac{F_u}{\sqrt{3}} \sum_i (al_e)_i \quad (9.5)$$

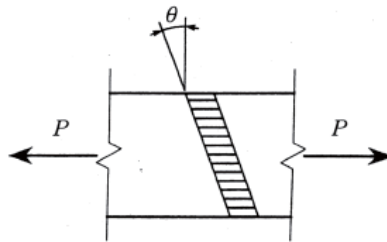


図 9.6 前方・斜方隅肉溶接

しかし、図 9.6 に示すような斜方隅肉溶接の場合に、純粋なせん断応力だけではなく、軸力方向の応力も生じるため、その降伏耐力と最大耐力の計算は以下の式を使う。

前方・斜方隅肉溶接（せん断・軸抵抗）の耐力計算：

- 降伏耐力  $P_y$ ：

$$(P \leq) P_y = \frac{F}{\sqrt{3}} \sum_i (1 + 0.4 \cos \theta_i) (al_e)_i \quad (9.6)$$

- 最大耐力  $P_u$ ：

$$(P \leq) P_u = \frac{F_u}{\sqrt{3}} \sum_i (1 + 0.4 \cos \theta_i) (al_e)_i \quad (9.7)$$

ここで、 $\theta_i$  は溶接断面と外力の直交方向との角度である。

### 9.2.3 部分溶込み溶接

部分溶込み溶接は、開先深さまで溶接金属が溶け込んでいることを前提に、開先深さをのど厚  $a$  として耐力を算定する。

部分溶込み溶接の軸力  $P$  に対する耐力計算：

- 降伏耐力  $P_y$ ：

$$(P \leq) P_y = \bar{F}(al_e), \quad (9.8)$$

ここで、長期荷重のとき、 $\bar{F} = F/1.5$ ；短期荷重のとき、 $\bar{F} = F$ 。

- 最大耐力  $P_u$ ：

$$(P \leq) P_u = F_u(al_e) \quad (9.9)$$

ここで、 $F_u$  は引張強度。

部分溶込み溶接のせん断力  $Q$  に対する耐力計算：

- 降伏耐力  $Q_y$ ：

$$(Q \leq) Q_y = \frac{\bar{F}}{\sqrt{3}}(al_e) \quad (9.10)$$

ここで、長期荷重のとき、 $\bar{F} = F/1.5$ ；短期荷重のとき、 $\bar{F} = F$ 。

- 最大耐力  $Q_u$ ：

$$(Q \leq) Q_u = \frac{F_u}{\sqrt{3}}(al_e) \quad (9.11)$$

ここで、 $F_u$  は引張強度。

軸力とせん断力を同時に受ける場合には、以下の条件式がある。

部分溶込み溶接継目が軸力とせん断力を同時に受ける場合の耐力検定：

部分溶込み溶接継目は、軸力  $P$  とせん断力  $Q$  が同時に次受ける場合、その軸力による垂直応力  $\sigma$  とせん断力による平均せん断応力  $\tau$  は

$$\sigma = \frac{P}{al_e}, \quad \tau = \frac{Q}{al_e} \quad (9.12)$$

となり、降伏しない条件および破断が発生しない条件は以下のようにまとめる。

- 降伏しない条件：

$$\sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \leq \bar{F} \quad (9.13)$$

ここで、長期荷重のとき、 $\bar{F} = F/1.5$ ；短期荷重のとき、 $\bar{F} = F$ 。

- 破断しない条件：

$$\sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \leq F_u \quad (9.14)$$

ここで、 $F_u$  は引張強度である。

部分溶込み溶接はルート面が溶け込んでいないので切欠きが内在する可能性がある。したがって、構造耐力上重要な接合部で引張力が作用する部分には、完全溶込み溶接を採用したほうがよい。