

3.6 継手の種類と継手設計

■ 3.6.1 溶接継手の形式

溶接継手は部材の組み合わせ方によって、図3.39に示すように突合せ継手、T継手、角継手、重ね継手、当て金(当て板)継手、へり継手に分けられる。突合せ継手は2部材を同じ面内で突合せて開先(グループ)を設けて溶接する継手である。

	開先溶接	すみ肉溶接	せん溶接	スロット溶接
突合せ継手				
T継手				
角継手				
当て金継手				
重ね継手				
へり継手				

図 3.39 溶接継手の分類

T継手は2部材がほぼ直交してT字形になるときの継手である。もう一つの部材が加わって十字形になる継手を「十字継手」という。ただし、建築鉄骨分野ではT継手の開先溶接の場合でも、完全溶込み溶接ならば「突合せ」の用語を用いている。

角継手は2部材が直交し、かつ2部材のへりが継手となる場合をいう。ボックス部材によくみられる継手である。内部から溶接できる場合には、内側にすみ肉溶接

を併用することもある。

重ね継手は2部材の端部を重ねてすみ肉溶接で接合する継手で、薄板の接合やガゼットプレートなどの小部材を主部材の面に取り付ける場合に用いられる。

当て金継手は2部材の端面を突き当てて、それに別の板を重ねてすみ肉溶接で接合する継手であるが、現在では重要な継手にはほとんど用いられないことがない。

また、溶着部の形状によって継手の溶接は、

- ① 開先(グループ)溶接
- ② すみ肉溶接
- ③ せん(プラグ)溶接
- ④ スロット溶接

に分類される。図3.39は継手形式と対応させて溶接継手の分類を示したものである。

■ 3.6.2 溶接開先の種類と選定

開先(グループ)溶接は図3.40に示すフレア溶接を除いて、部材の接合面に適当な形の溝を加工して溶接するもので、突合せ継手、T継手、角継手に適用される。完全溶込みの健全な開先溶接は母材なみの十分な強度が保証されるので、強度部材に用いられる。開先の形状、寸法は欠陥のない完全な溶接ができる範囲内で、開先断面積をできるだけ小さくするのが原則である。

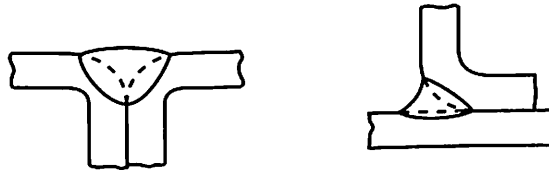


図3.40 フレア溶接

図3.41に突合せ継手に用いられる主な開先形状を示す。同図は完全溶込み溶接用の開先を示してあるが、完全溶込み溶接については裏当て金(板)を用いるか、あるいは裏波溶接のように片側から施工する場合と両側から施工する場合とがある。後者の場合、裏側から溶接する前に裏はつりをする必要がある。溶込みの大きいサブマージアーク溶接で施工するときでも、裏はつりを省略すると不溶着部が生じることがあるので注意しなければならない。

不溶着部が存在する場合を「部分溶込み溶接」というが、米国溶接学会規格(AWS D1.1, Structural Welding Code - Steel)²⁰⁾では原則として、裏当て金を用いない片

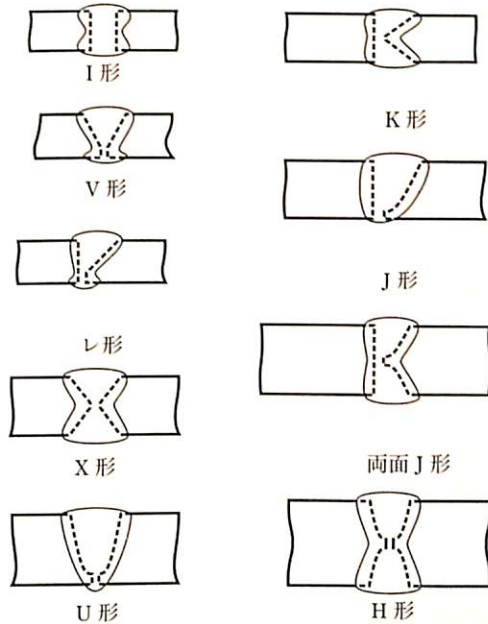


図3.41 突合せ継手に用いられる主な開先形状

側溶接や裏はつりを行わない両側溶接を部分溶込み溶接と定義している。

圧力容器の規格(JIS B 8265)では裏波溶接あるいは融合インサートを用いる方法によって十分な溶込みが得られ、裏側ビードが滑らかな突合せ片側溶接継手は完全溶込みの両側突合せ継手と同等とみなしている。

開先形状の選定に際しては次の諸点に留意しなければならない。

- ① 板厚
- ② 溶接法
- ③ 開先加工の難易
- ④ 溶接の難易
- ⑤ 欠陥防止
- ⑥ 溶接姿勢
- ⑦ 反転可能か
- ⑧ 積層法
- ⑨ 溶着量の大小
- ⑩ 変形の大小

適用可能な板厚、適用溶接法、溶接姿勢、開先各部の寸法の推奨値と許容誤差範囲などは、継手形式ごとに、例えばAWS規格²¹⁾などに詳細に定められている。代

表的な開先の特徴をあげると以下ようになる。

① I形開先

開先加工が容易で溶着量が少なく、変形も小さいが厚板には適用できない(被覆アーク溶接で4 mm程度、炭酸ガス溶接法で6 mm程度まで)。また、電子ビーム溶接やレーザー溶接では、板厚に関わらずI形開先が原則となる。

② レ形開先

開先加工、開先合わせが容易で溶着量も比較的少なく、横向き溶接に適している。建築鉄骨ではこの形式の開先で裏当て金溶接が下向き・横向きともに多用されている。溶接施工性の観点から開先角度やルート間隔などの選択が重要となる。

③ V形開先

開先加工は比較的容易である。裏はつりを十分行って裏側溶接を行えば小さくできるものの、一般に角変形が大きい。厚板では溶着量が大きくなる。横向き溶接を除く全姿勢に適用が可能である。

④ X形開先

開先加工に手間がかかり、加工精度の確保がやや難しい。V開先に比べて溶着量が少なく、適切な開先形状を選択すれば角変形も小さい。厚板の溶接に適しているが板厚が30mm程度以上となると、両面U形開先のほうがより経済的となる。

⑤ K形開先

特徴はX形開先とほぼ同じであるが、開先加工が容易な反面、非対称なため、溶接や裏はつりがやや難しくなる。溶接低温割れが生じる場合、割れ停止予熱温度は、X形開先などに比べて高くなるので注意が必要である。

⑥ U形および両面U形開先

特徴は、それぞれV形、X形とほぼ同じであるが、極厚板では溶着量を少なくできるが、開先加工は難しい。

図3.42に代表的溶接法別にみた開先形状と板厚の関係をまとめて示す。

また、溶接止端部は応力集中の原因となり、疲労破壊が問題となる構造物では、その制御に十分な注意が必要である。止端部の応力集中の程度は止端部の滑らかさ(止端部曲率半径)に大きく影響されるが、余盛角度、余盛高さの影響も受ける。AWS規格では突合せおよび角継手の開先溶接の場合、余盛高さを3.2 mm以下とし、止端部をなるべく滑らかにするよう要求している。

道路橋示方書¹⁰⁾ではピード幅に応じて余盛高さを制限している。重要な構造物にあっては余盛を削除するが、AWS規格では、その場合には0.8 mm以上の余盛を残してはならない、板厚を減少させてはならないなどの制限を設けている。

溶接継手の品質は、開先溶接では、開先形状などの溶接の前準備に大きく依存するため開先精度の管理が重要である。図3.43(260ページ)に突合せ溶接における開

溶接方法 板厚	被覆アーク (手)	サブマージアーク (自動)	炭酸ガス (半自動)	エレクトロスラッグ	エレクトロガス			
1.6	}	}	}	}	}			
2.3						}	}	}
3.2								
4.5	}	}	}	}	}			
6						}	}	}
9								
10	}	}	}	}	}			
12						}	}	}
14								
16	}	}	}	}	}			
19						}	}	}
22								
25	}	}	}	}	}			
28						}	}	}
30								
32	}	}	}	}	}			
36						}	}	}
38								
40	}	}	}	}	}			
45						}	}	}
50								
75	}	}	}	}	}			
100						}	}	}
150								
200	}	}	}	}	}			
						}	}	}
溶接姿勢	↑ 全姿勢	↑ 下向専用	↑ 全姿勢	↑ 立向専用	↑ 立向専用			

図 3.42 溶接法別の板厚と開先形状の関係

先精度管理項目の例とその管理精度目標の例を示す。適用される溶接法に応じて適切な管理が必要である。 **精**

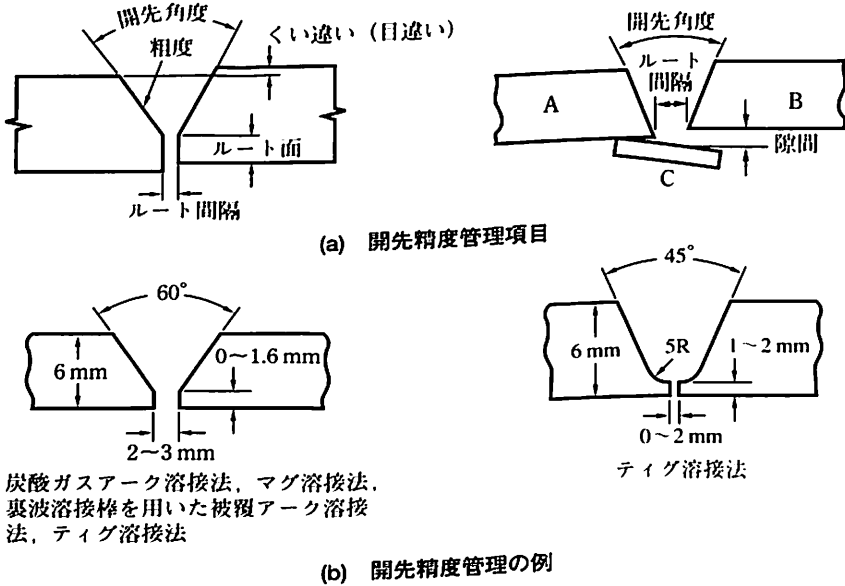


図 3.43 突合せ溶接における開先精度管理項目と必要精度の例

3.6.3 すみ肉溶接

ほぼ直交する二つの面のすみに溶接する三角形状の断面を持つ溶接を「すみ肉溶接」という。すみ肉溶接は作用する荷重の方向により、図 3.44 のように前面すみ肉溶接継手と側面すみ肉溶接継手に分けられ、両者の中間的なものに斜方すみ肉溶接継手がある。

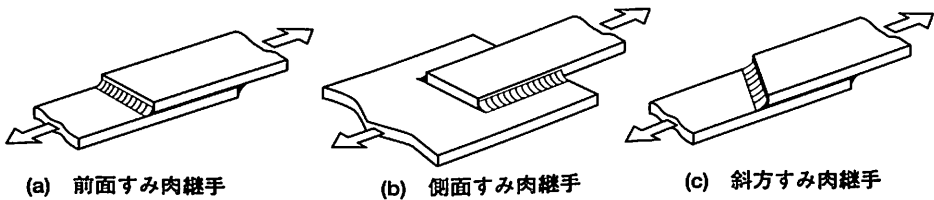


図 3.44 すみ肉溶接継手の荷重方向による分類

また、すみ肉溶接継手は図 3.45(a) のように、連続して溶接するのが普通であるが、溶接量を減らすために、同図(b),(c) のように断続に溶接する場合もある。

すみ肉溶接ではルート部や止端部に大きな応力集中を生じるため、継手強度は開先溶接よりも低い。このため主要強度部材、あるいは繰返し荷重を受ける部材には一般に用いられていない。

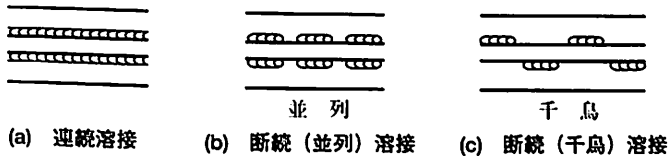


図 3.45 連続すみ肉溶接と断続すみ肉溶接

すみ肉溶接各部でルート部を頂点とする溶接金属に内接する直角二等辺三角形の一辺がサイズで、すみ肉溶接継手の強度計算の基本となる量である。すみ肉溶接のサイズ寸法は分担する荷重の大きさから決定されるが、重ね継手では重ねる板の厚さ以下とするのが原則であり、また小入熱による溶接割れを防止するために最小サイズも適用する板厚に応じて決められている場合が多い。

■ 3.6.4 プラグ溶接、スロット溶接と肉盛溶接

重ね継手において、一方の板に貫通孔をあけ、そこを溶接して両部材を接合する溶接を「プラグ(せん)溶接」という。孔をスロット状にして溶接する場合を「スロット溶接」という。これらはすみ肉溶接だけでは接合面積が不十分な場合に補助的に用いられることが多い。

部材同士の接合ではなく、部材の表面に溶接金属を置く溶接を「肉盛溶接」という。補修などの目的で用いられることもあるが、部材の表面を硬化させる、あるいは耐食性をもたせるために、目的に応じた金属の溶接材料でビードを置く。パンにバターを塗るのに似ていることから「バターリング」とも呼ばれる。

■ 3.6.5 溶接記号

溶接の種類、開先の形状、寸法、工場溶接、現場溶接の区別などを、設計図面上に表示するための記号と表示方法は、JIS Z 3021として規格化されている。溶接記号の基本記号を表3.3(次ページ)に、補助記号を表3.4(263ページ)に示す。

表 3.3 溶接記号（基本記号 JIS Z 3021）

溶接部の形状	基本記号	備 考
両フランジ形		
片フランジ形		
I 形		アブセット溶接、フラッシュ溶接、摩擦溶接などを含む。
V形、両面V形（X形）		X形は説明線の基線（以下、基線という）に対称にこの記号を記載する。アブセット溶接、フラッシュ溶接、摩擦溶接などを含む。
レ形、両面レ形（K形）		K形は基線に対称にこの記号を記載する。記号のたての線は左側に書く。アブセット溶接、フラッシュ溶接、摩擦溶接などを含む。
J形、両面J形		両面J形は基線に対称にこの記号を記載する。記号のたての線は左側に書く。
U形、両面U形（H形）		H形は基線に対称にこの記号を記載する。
フレアV形、フレアX形		フレアX形は基線に対称にこの記号を記載する。
フレアレ形、フレアK形		フレアK形は基線に対称にこの記号を記載する。記号のたての線は左側に書く。
すみ肉		記号のたての線は左側に書く。並列溶接の場合は基線に対称にこの記号を記載する。ただし、千鳥溶接の場合は、右の記号を用いることができる。
プラグ、スロット		
ビード、肉盛		肉盛溶接の場合は、この記号を二つ並べて記載する。
スポット、プロジェクション、シーム		重ね継手の抵抗溶接、アーク溶接、電子ビーム溶接などによる溶接部を表す。ただし、すみ肉溶接は除く。シーム溶接の場合は、この記号を二つ並べて記載する。

基本記号と補助記号の記載方法は次のとおりである。

- ① 図3.46(264ページ)に示すように溶接する部分を指し示す矢と、水平な基線および必要に応じて尾を書き、この基線にそって溶接記号と寸法を記載する。
- ② 溶接記号および寸法は矢のある側、あるいは手前側に溶接するときには基線の下側に、矢の反対側、あるいは向こう側に溶接するときには基線の上側に記載する(図3.47)。
- ③ レ形、K形、J形、両面J形の左右非対称の開先溶接においては、基線を開

表 3.4 溶接記号 (補助記号 JIS Z 3021)

区 分		補助記号	備 考	
溶接部の表面形状	平ら	—		
	凸		基線の外に向かって凸とする。	
	へこみ		基線の外に向かってへこみとする。	
溶接部の 仕上げ方法	チッピング	C		
	研 削	G	グラインダ仕上げの場合。	
	切 削	M	機械仕上げの場合。	
	指定せず	F	仕上げ方法を指定しない場合。	
現 場 溶 接				
全 周 溶 接			全周溶接が明らかなき場合は省略してもよい。	
全 周 現 場 溶 接				
非 破 壊 試 験 方 法	放射線 透過試験	一 般 二重壁撮影	RT RT-W	一般は溶接部に放射線透過試験など各試験の方法を示すだけで内容を表示しない場合。
	超音波 探傷試験	一 般 垂直探傷 斜角探傷	UT UT-N UT-A	各記号以外の試験については必要に応じ、適宜、表示を行うことができる。
	磁粉 探傷試験	一 般 蛍光探傷	MT MT-F	(例) 漏れ試験 LT ひずみ測定試験 ST 目視試験 VT アコースティックエミッション試験 AET 渦流探傷試験 ET
	浸透 探傷試験	一 般 蛍光探傷 非蛍光探傷	PT PT-F PT-D	
	全線試験		○	各試験の記号の後に付ける。
	部分試験 (抜粋試験)		△	

先を設ける側に記し、矢は折れ線として開先を設ける面に矢の先端を向ける (図 3.48: 次ページ参照)。

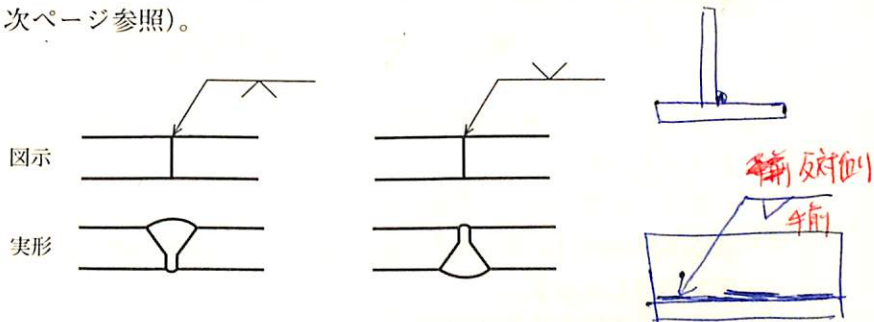
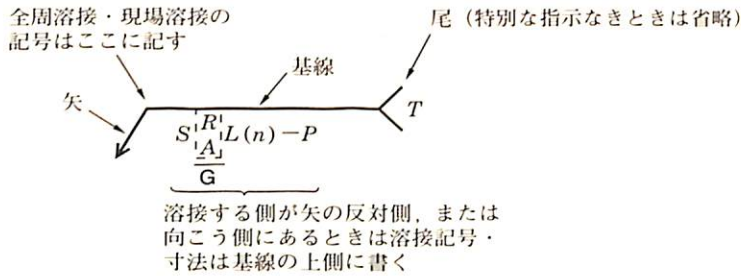


図 3.47 溶接する側と記号の基線に対する上下位置 (例)



溶接施工内容の記号例示

- : 基本記号
- S: 溶接部の断面寸法または強さ (開先深さ, すみ肉の脚長, プラグ孔の直径, スロット溝の幅, シームの幅, スポット溶接のナゲットの直径または単点の強さなど)
- R: ルート間隔
- A: 開先角度
- L: 断続すみ肉溶接の溶接長さ, スロット溶接の溝の長さまたは必要な場合は溶接長さ
- n: 断続すみ肉溶接, プラグ溶接, スロット溶接, スポット溶接などの数
- P: 断続すみ肉溶接, プラグ溶接, スロット溶接, スポット溶接などのピッチ
- T: 特別指示事項 (J形・U形などのルート半径, 溶接方法, その他)
- : 表面形状の補助記号
- G: 仕上げ方法の補助記号
- ⊙: 全周現場溶接の補助記号
- : 全周溶接の補助記号

図 3.46 溶接記号の基本

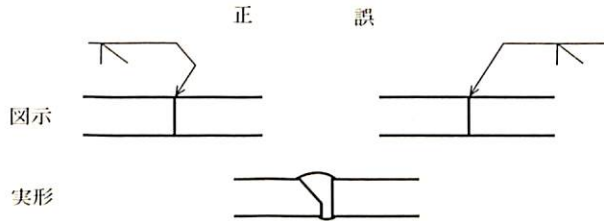


図 3.48 開先を加工する部材の指示

④ 表3.3に示した基本記号を用い, これに開先深さ, 開先角度, ルート間隔を記入する(表3.5)。

また, 必要に応じて表面形状, 仕上げ方法などの補助記号を用いる。部分溶込み溶接では開先深さの寸法を○印で囲む。この指示のないときは完全溶込み開先溶接とみなす。

⑤ すみ肉溶接の寸法は脚長で示す。不等脚長の場合は小さいほうの脚長を S_1 , 大きいほうの脚長を S_2 として($S_1 \times S_2$)と記載する。この場合, 不等脚長の方

表 3.5 開先溶接の記載例

溶接部	実形	記号
板厚19mm 開先深さ16mm 開先角度60° ルート間隔2mm		
開先深さ 矢の側16mm 矢の反対側9mm 開先角度 矢の側60° 矢の反対側90° ルート間隔3mm		
T継手 開先深さ10mm 開先角度45° ルート間隔2mm		
角継手 部分溶込み溶接 板厚25mm 開先深さ10mm 開先角度45° ルート間隔0mm		

向がわかるように示す(表3.6:次ページ参照)。断続溶接の場合は個々の溶接長さとしピッチを示す。

- ⑥ 補助記号および非破壊試験方法と、その要求品質の等級を示すときは、表3.4(263ページ)に示す非破壊試験記号を用いる。

表 3.6 すみ肉溶接の記載例

溶接部	実形	記号
脚長6mmの場合		
不等脚の場合、小さい脚の寸法を先に、大きい脚を後に書き、() でくる。この場合不等脚の方向がわかるように示す。		
両側脚長の異なる場合 矢の側9mm 矢の反対側6mm		
並列溶接 溶接長さ50mm 溶接数3 ピッチ150mm		
千鳥溶接 手前側脚長5mm 向こう側脚長7mm 溶接長さ50mm 溶接数 矢の側 3 矢の反対側 2 ピッチ200mm		
千鳥溶接 両側脚長6mm 溶接長さ50mm 溶接数 矢の側 3 矢の反対側 2 ピッチ300mm		

3.7 溶接継手および構造設計の基本

溶接設計の実際については、本書第5章(419ページ)でフレーム系構造物について、第6章(485ページ)でベッセル系構造物についてそれぞれ具体的内容について詳述してあるので、ここでは一般的な考え方のみについて記述する。

■ 3.7.1 溶接設計の基礎

鋼構造物の構造設計の基本は、構造として必要な強度や剛性などの性能を維持しつつ、所定の期待される機能を満足させなければならない。構造として期待する強度や変形レベル以前で変形が打ち切られてしまうような破壊が生じることはあってはならない。

溶接構造物の性能は、特に、溶接部そのものの品質に左右されることが多く、溶接品質は溶接設計、使用する材料、溶接施工の三つに依存する。そのなかでも溶接設計は、溶接品質そのものを前もって決めることになり、後々の施工性とも密接に関係する重要なものである。溶接設計では、材料の選択、溶接法と溶接条件の選択、溶接構造設計、継手形式の選択と継手設計など広範囲の項目を検討し、指示することになる。

溶接構造の種類によって各種の設計規格、規準があるので、その適用を受ける構造物にあってはそれらを遵守しなければならないことはもちろんである。溶接設計を取り扱っている主な構造設計規格には以下のようなものがある。

- ① 鋼構造設計規準(日本建築学会)²³⁾
- ② 道路橋示方書・同解説(日本道路協会)¹⁰⁾
- ③ AWS D1.1 Structural Welding Code-Steel(米国溶接学会)²¹⁾
- ④ JIS B 8265「圧力容器の構造—一般事項」(日本工業規格)
- ⑤ ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec.VIII, Div.1 および Div.2(米国機械学会規格)²³⁾

これらのほかに船舶、海洋構造物に関して各国船級協会規格、米国石油協会規格(API)、鋼橋に関する英国規格協会規格(BS)²⁴⁾、米国道路・輸送協会規格(AASHTO)²⁵⁾などがある。

溶接構造の詳細を設計する上での留意点として、次の諸点があげられる。

- ① 溶接箇所はできるだけ少なくし、溶接量も必要最小限とする。
- ② 溶接作業が容易であることを最優先に、溶接位置、姿勢、溶接条件などの溶接施工条件を選定する。
- ③ 溶接部は、構造上の応力集中部と重ならないよう溶接位置などに配慮する。

- ④ 狭い範囲での溶接部の集中を避ける。
- ⑤ 部材断面は荷重軸に対して対称となるようにし、偏心荷重や二次応力がかからないようにする。
- ⑥ 必要に応じて非破壊試験および補修ができるような構造とする。
- ⑦ 適用する溶接法の特徴、荷重の種類によって継手の形式、種類、開先を選定する。

また、溶接法の選定、ロボット溶接などの採用にあたっては、単に従来の施工法の代替として用いるのではなく、

- ⑧ 新しい溶接手法の適用にあたっては、その手法の特徴が生きるような構造設計、継手設計でなければならない。

次に溶接継手設計についての基本的考え方について示す。

(1) 継手形式の選択

溶接継手形式の選択に際しては、原則的には次のような手順で決定していく。

- ① 伝達すべき荷重の大きさと種類を考慮して決定する。たとえば、疲労が問題とならなければ、すみ肉溶接の適用も検討する。
- ② 工数、すなわち経済性をも考慮し、溶着量のもっとも少ない継手を選択する。可能であればI形開先、部分溶込みを採用する。
- ③ 厚板については、溶着量、変形を小さくするため、V形、U形でなく、X形、両面U形開先を採用する。

開先溶接か、すみ肉溶接かの選択は、繰返し荷重を受ける部材にあっては完全溶込み開先溶接が望ましい。静的荷重のみを考えればよい場合でも、必ずしもすみ肉溶接が経済的に有利とは限らない。

のど断面(3.7.3項:271ページ)の大きさと溶着量は比例せず、荷重もすみ肉溶接ではせん断応力で伝達されるので、開先溶接と荷重の伝達形式が異なる場合もあって、より大きな有効断面積(のど厚×溶接長)が必要になる場合がある。前面すみ肉溶接継手では一般に脚長を増しても、それに比例して継手の最大荷重は増加しない。側面すみ肉溶接も溶接長が長くなると、後述するように荷重を十分に分担しない部分がでてくる。

溶接種類の選択、すみ肉溶接の最小脚長などは、第5、6章で詳述するように、各種構造設計規準にも規定されている。

例えば、道路橋示方書では応力を伝達する継手には完全溶込み、部分溶込み開先溶接および連続すみ肉溶接を用い、断続すみ肉溶接やプラグ溶接、スロット溶接は用いないこと、また引張垂直応力が作用する継手には部分溶込み溶接は用いてはならないと定めている。また、鋼構造設計規準では部分溶込み溶接は溶接線と直角方

向に引張力が作用する場合、および溶接線を軸とする曲げが作用する場合、さらに繰返し荷重を受ける箇所には使用してはならないと定めている。

さらに、AWS規格では溶接線に垂直に引張荷重が作用する場合にも、部分溶込みの採用を認めているが、許容応力は溶接材料の保証降伏点の30%とし、繰返し荷重が作用する場合には使用してはならないと定めている。

圧力容器でも、第6章(485ページ)に記述してあるように、JISおよびASME規格とも圧力容器の種別(内圧によって分類)、溶接継手の構造上の位置に応じた等級別に採用可能な溶接種類を規定しており、形状についても詳細に規定している。

(2) すみ肉溶接のサイズと溶接長の制限

すみ肉溶接を採用する場合、応力を伝達する継手では強度上要求される脚長を確保しなければならないが、強度上問題がない場合も、あまり小さすぎると溶接割れなどの問題が生じるので適正範囲が存在する。薄いほうの部材の厚さを t_1 mm、厚い方の厚さを t_2 mm、すみ肉のサイズを S として道路橋示方書では

$$t_1 > S(\text{mm}) \geq \sqrt{2t_2} \quad \text{かつ} \quad S \geq 6\text{mm} \quad \dots\dots\dots(3.18)$$

のように、鋼構造設計規準では $t_1 > 6\text{mm}$ のとき、

$$t_1 \geq S(\text{mm}) \geq 1.3\sqrt{t_2} \quad \text{かつ} \quad S \geq 4\text{mm} \quad \dots\dots\dots(3.19)$$

と制限している。鋼構造設計規準ではT継手で板厚が6 mm以下のときは、サイズを $1.5t_1$ かつ6 mm以下まで増すことができる。

AWS規格では表3.7に示すように厚い方の板厚の範囲に応じて、最小サイズを規定している。この場合、すみ肉はシングルパスで行わなければならない。

また、溶接長の短いすみ肉溶接は冷却速度が速く、溶接割れの危険があるので溶接長についても制限がある。応力を伝達するすみ肉溶接の有効長さ(3.7.3項：271ページ参照)は鋼構造設計規準ではサイズの10倍以上、かつ40 mm以上、道路橋示方書ではサイズの10倍以上、かつ80 mm以上必要としている。

表3.7 すみ肉溶接の最小サイズ寸法 (AWS D1.1)

厚いほうの部材の板厚 t (mm)	最小すみ肉サイズ(mm)*
$t \leq 6$	3
$6 < t \leq 12$	5
$12 < t \leq 20$	6
$20 < t$	8

*ただし、薄いほうの部材の板厚を超えないこと。

一方、側面すみ肉溶接の場合、溶接長が長いと溶接線中央部付近は応力を分担しなくなるので、鋼構造設計規準では溶接長がサイズの30倍を超えるときには許容応力を低減している。

すみ肉溶接の始末端は欠陥が生じやすく、また応力集中の原因となる。鋼構造設計規準では側面すみ肉溶接または前面すみ肉溶接で、角部で終わるものは連続的に角を回して溶接し、その回し溶接の長さはすみ肉のサイズの2倍を原則としている。ただし、最近ではロボット溶接を適用する場合には、施工性の観点から、この制限が適用されない例もあり、適用する手法に対して十分な性能を持つことを確認することが必要である。

■ 3.7.2 許容応力と安全率

構造設計の基本は、各種の荷重を受ける構造物、機械が、所定の期間中に機能を阻害するような過大な変形や分離破断といった損傷を生じることがないように、適切な材料を選び、各部材の寸法を決定することである。

設計者は構造物の使用条件、すなわち荷重の大きさや種類、さらされる環境と、用いようとする材料の力学的性質を考慮して、どのような形式の損傷が起こりうるかを予測し、破損の条件(基準強さ)を設定して部材に生じる応力・変形が設定した値以下になるよう材料を選択し、部材寸法を決定することになる。

部材に生じる応力を使用応力または設計応力 σ_d とし、想定した形式の損傷が生ずることはないと考えられる最大の応力を許容応力 σ_a とし、基準強さを σ_s とすると、次式でなければならない。

$$\sigma_d \leq \sigma_a < \sigma_s \quad \dots\dots\dots (3.20)$$

σ_s と σ_a の比、 σ_s / σ_a を「安全率」あるいは「安全係数」という。すなわち許容応力 σ_a は、

$$\sigma_a = \frac{\text{降伏強さ } \sigma_Y}{n_1} \quad \text{あるいは} \quad \frac{\text{引張強さ } \sigma_T}{n_2}$$

のように、材料の基準強さである降伏強さや引張強さを一定の安全率 n_1 、 n_2 で除して決められている。

安全率は1より大きい係数で、経済的には1に近い値が望ましいが、使用応力、基準強さのばらつき、それらの推定方法の不確かさを補うための係数であるので根拠なく小さい値とすることもできない。これまでの経験を基にして設計規準や規格では荷重の種類や材料ごとに安全率を定めていて、 n_1 としては1.5～2程度、 n_2 としては2.5～4程度の値が採用されている場合が多い。

溶接部の強度は適切な溶接材料の選定と適正な施工が行われていれば、静的強度に関しては母材と同等である。したがって各設計規準に示されている溶接継手の許容応力(あるいは許容応力度)は母材と同等となっている。ただし、規格によっては工場溶接または現場溶接か、非破壊検査実施の有無によって許容応力を変化させたり、継手効率を100%以下の所定の数値に設定するよう要求しているものもある。

鋼構造設計規準²²⁾、道路橋示方書¹⁰⁾の溶接継手に対する許容応力を表3.8(276ページ)、表3.9(277ページ)に示す。通常的设计においては許容応力は静的強さ、すなわち材料(母材)の降伏強さ、あるいは引張強さに対して設定される。

建築では鋼材の降伏強さ(降伏比の高い鋼材では引張強さの70%)を基準強さ F とし、引張の長期許容応力は、 F 値を安全率 $n=1.5$ で割った値となっている。せん断力に対しては、せん断の場合の塑性降伏が引張応力の場合の $1/\sqrt{3}$ であることから、許容応力はさらに $\sqrt{3}$ で割った値となっている。

道路橋の引張および圧縮の許容応力は降伏強さを1.7で割った値であるが、降伏比の高いSM570およびSMA570Wでは安全率を大きくとっている。また、現場溶接では、小さくとられた時期もあったが、現在は原則として工場溶接と同じ値としている。

■ 3.7.3 溶接継手の強度計算

溶接設計では、使用条件下で継手を含む構造各部に生じる応力が、許容応力を超えないように継手各部の寸法や材料を決定する。すなわち、継手各部の寸法は継手に作用する応力が、許容応力を超えないという条件から決定される。評価の対象となる継手部は、一般に形状が不連続で断面は一様でなく、また、止端および不溶着部には応力集中が存在し、応力は複雑な分布をとっているが、強度計算上は次のような仮定を設けて簡略化した算定を行う。

- ① 応力のはど断面に一様に作用するものとする。ルート部や止端部の応力集中は考えない。
- ② 破壊のはど断面で起こるとは限らないが、強度計算のはど断面で行う。
- ③ 溶接残留応力の存在は考慮しない

のはど断面は(のはど厚 a ×有効溶接長さ L)とする。溶接継手に作用する荷重を P とすれば、作用応力は次式で与えられる。

$$\sigma = P / (\text{のはど断面積の総和}) ; \quad \text{引張あるいは圧縮軸力} \cdots \cdots \cdots (3.21)$$

$$\tau = P / (\text{のはど断面積の総和}) ; \quad \text{せん断力} \cdots \cdots \cdots (3.22)$$

溶接部に作用する応力は、図3.49(次ページ)に示すようにすみ肉溶接の場合はす

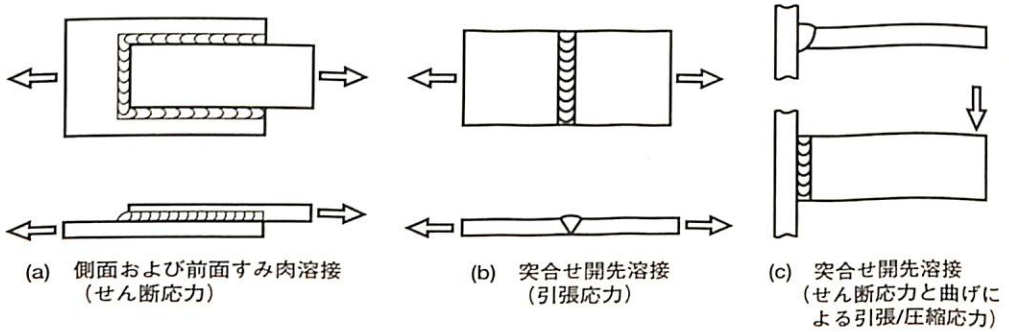


図 3.49 溶接継手に作用する応力の形式

べてせん断応力として扱い、開先溶接の場合は引張/圧縮、あるいは引張/圧縮とせん断応力の重畳したものとなる。

強度計算に用いる理論のど厚には余盛の高さ、溶込みは含まない。完全溶込みの開先溶接の場合には部材の厚さとし、部材の厚さが異なる場合には薄いほうの部材の厚さとする(図 3.50)。

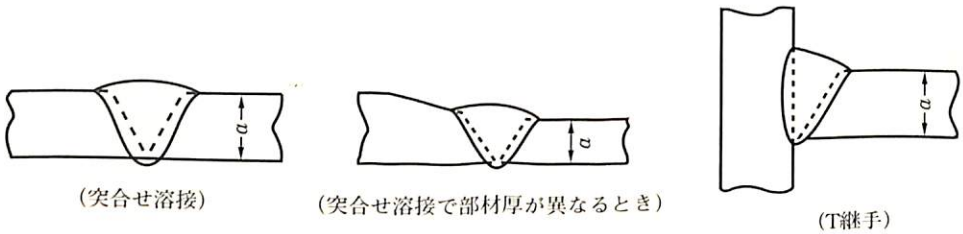


図 3.50 完全溶込み開先溶接部ののど厚

部分溶込み溶接では、のど厚は原則として開先深さをとるが(図3.51)、鋼構造設計規準では、レ形、K形開先の場合には開先深さより3 mmを減ずることとなっている(手溶接の場合)。

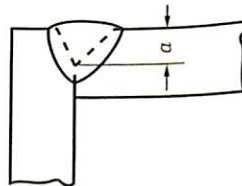


図 3.51 部分溶込み開先溶接部ののど厚

すみ肉溶接ののど厚は図3.52に示すサイズSから算定する。等サイズのときののど厚aは、サイズをSとすると、

$$a = S / \sqrt{2} \approx 0.707S \dots\dots\dots (3.23)$$

で表される。

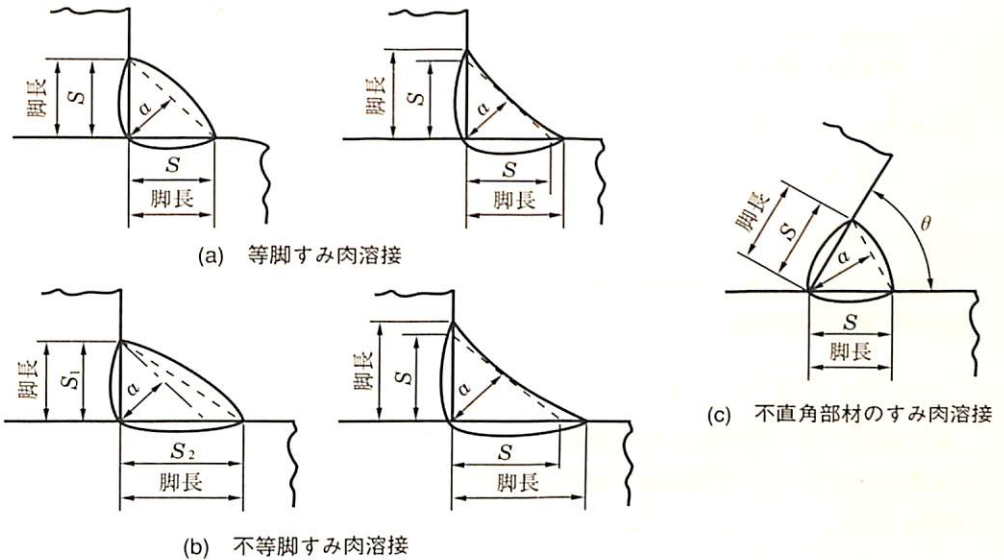


図3.52 すみ肉溶接部ののど厚

不等脚すみ肉継手の場合も、道路橋示方書のように小さいほうのサイズS₁を用いて等脚すみ肉ののど厚aを設計計算に採用するが多い。母材間の角度が直角でない場合、交差角度をθとすると、

$$a = S \cos(\theta / 2) \dots\dots\dots (3.24)$$

となる。また、道路橋示方書では、部分溶込み開先溶接にすみ肉溶接を重ね合わせた場合ののど厚は、図3.53(次ページ)に示すとおりである。

なお、溶接の始端部および終端部が継手部に残される場合には、クレータ部は有効長に含めない。道路橋示方書では始終端の回し溶接の部分は有効長に含めず、鋼構造設計規準では手溶接の場合、回し溶接を含めた全長から、サイズの2倍を減じた長さを有効長とすると定めている。

強度計算は引張応力、せん断応力のみが作用する場合には、(3.21)(3.22)式で算定された応力が、次式に示すように、それぞれ許容引張応力σ_a、許容せん断応力τ_a

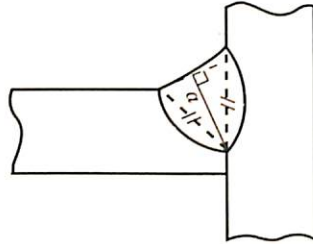


図 3.53 部分溶込み開先溶接にすみ肉溶接を重ね合わせた場合ののど厚

を超えないように算定すればよい。

$$\sigma \leq \sigma_a \dots\dots\dots(3.25)$$

$$\tau \leq \tau_a$$

引張応力とせん断応力が重畳する場合には次式によって等価な引張応力(ミーゼス応力に相当)に換算し、許容判定をする。

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \leq \sigma_a \dots\dots\dots(3.26)$$

のど断面に異なる方向のせん断応力 τ_x, τ_y が作用する場合(例えば柱、梁仕口部のすみ肉溶接など)、等価なせん断応力に換算して、許容せん断応力と比較して、許容判定する。

$$\tau = \sqrt{\tau_x^2 + \tau_y^2} \leq \tau_a \dots\dots\dots(3.27)$$

(1) 構造要素の強度計算例

【例 1】

図 3.54 に示すように板にパイプを差し込み、すみ肉溶接した部材に引張荷重が

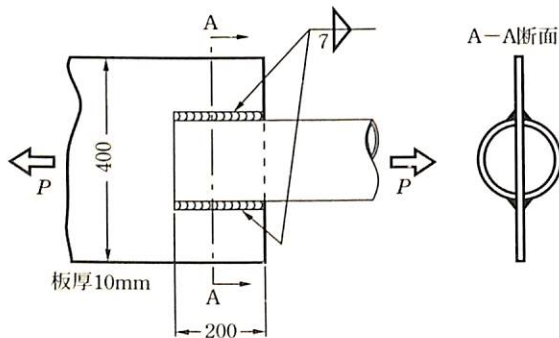


図 3.54 板と鋼管のすみ肉溶接継手

作用するとき、許容される最大の荷重 P_{\max} を求める。材料はSM400とし、鋼構造設計規準に従って設計するものとする。

【解】

すみ肉サイズ $S = 7\text{mm}$ 、また、

$$\text{のど厚 } a = 0.707S = 0.707 \times 7 = 4.95\text{mm}$$

有効溶接長さを L とすると(回し溶接をしてあるものと判断し、回し溶接長さは、両端で $2S$ 以上あるとする)、

$$L = \text{溶接長} - 2S$$

$$\approx 200\text{mm}。$$

この場合、「有効溶接長 $\geq 10S$ かつ 40mm 以上」の条件を満足しており、また、 $30S (= 210\text{mm})$ 以下であるので、許容応力を低減する必要はない。

したがって、有効のど断面積の総和は、のど厚 \times 有効溶接長の総和となり、

$$4.95 \times 200 \times 4 = 3960\text{mm}^2$$

ここで、許容せん断応力は、

$$\tau_a = F / (1.5\sqrt{3})$$

$$= 90.5\text{N/mm}^2 (\text{表 3.8 参照})。$$

許容最大荷重は、 $P_{\max} = \tau_a \times$ 有効のど断面積の総和となり、

$$P_{\max} = 90.5 \times 3960$$

$$= 358380\text{N} \rightarrow 358\text{kN}$$

【例2】

図3.55のように完全溶込み開先溶接継手に、荷重 $P = 40\text{kN}$ が作用するときの継手の安全性を検討する。なお、材料はSN400Cとする(鋼構造設計規準を適用)。

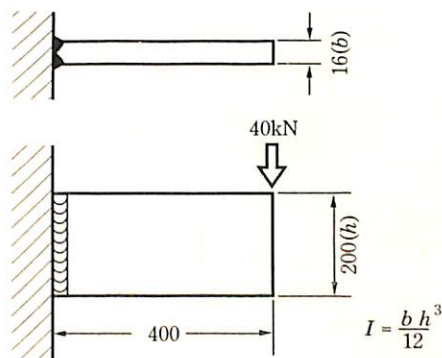


図3.55 曲げモーメントとせん断力を受ける完全溶込み開先溶接継手

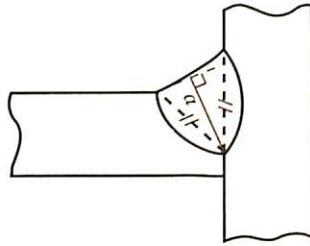


図 3.53 部分溶込み開先溶接にすみ肉溶接を重ね合わせた場合ののど厚

を超えないように算定すればよい。

$$\begin{aligned} \sigma &\leq \sigma_a \\ \tau &\leq \tau_a \end{aligned} \dots\dots\dots (3.25)$$

引張応力とせん断応力が重畳する場合には次式によって等価な引張応力(ミーゼス応力に相当)に換算し、許容判定をする。

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \leq \sigma_a \dots\dots\dots (3.26)$$

のど断面に異なる方向のせん断応力 τ_x, τ_y が作用する場合(例えば柱、梁仕口部のすみ肉溶接など)、等価なせん断応力に換算して、許容せん断応力と比較して、許容判定する。

$$\tau = \sqrt{\tau_x^2 + \tau_y^2} \leq \tau_a \dots\dots\dots (3.27)$$

(1) 構造要素の強度計算例

【例 1】

図 3.54 に示すように板にパイプを差し込み、すみ肉溶接した部材に引張荷重が

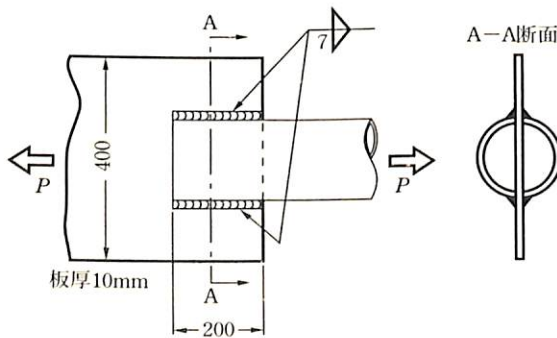


図 3.54 板と鋼管のすみ肉溶接継手

作用するとき、許容される最大の荷重 P_{\max} を求める。材料はSM400とし、鋼構造設計規準に従って設計するものとする。

【解】

すみ肉サイズ $S = 7\text{mm}$ 、また、

$$\text{のど厚 } a = 0.707S = 0.707 \times 7 = 4.95\text{mm}$$

有効溶接長さを L とすると(回し溶接をしてあるものと判断し、回し溶接長さは、両端で $2S$ 以上あるとする)、

$$L = \text{溶接長} - 2S$$

$$\approx 200\text{mm}。$$

この場合、「有効溶接長 $\geq 10S$ かつ 40mm 以上」の条件を満足しており、また、 $30S (= 210\text{mm})$ 以下であるので、許容応力を低減する必要はない。

したがって、有効のど断面積の総和は、のど厚 \times 有効溶接長の総和となり、

$$4.95 \times 200 \times 4 = 3960\text{mm}^2$$

ここで、許容せん断応力は、

$$\tau_a = F / (1.5\sqrt{3})$$

$$= 90.5\text{N/mm}^2 (\text{表 3.8 参照})。$$

許容最大荷重は、 $P_{\max} = \tau_a \times \text{有効のど断面積の総和}$ となり、

$$P_{\max} = 90.5 \times 3960$$

$$= 358380\text{N} \rightarrow 358\text{kN}$$

【例 2】

図 3.55 のように完全溶込み開先溶接継手に、荷重 $P = 40\text{kN}$ が作用するときの継手の安全性を検討する。なお、材料はSN400Cとする(鋼構造設計規準を適用)。

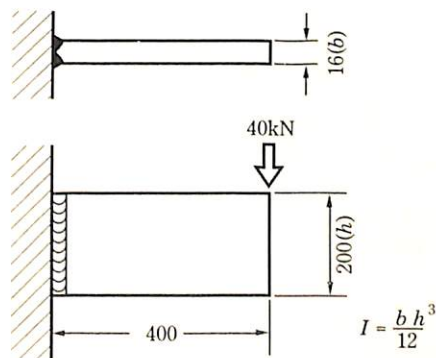


図 3.55 曲げモーメントとせん断力を受ける完全溶込み開先溶接継手

【解】

$$\begin{aligned} \text{曲げモーメント } M &= \text{荷重} \times (\text{継手から荷重作用点までの距離}) \\ &= 40\text{kN} \times 400\text{mm} = 16000\text{kN} \cdot \text{mm} \end{aligned}$$

片持ち梁として、

$$\begin{aligned} \text{断面二次モーメント } I &= bh^3/12 \\ & \quad (b \text{ は梁の幅} = 16\text{mm}, h \text{ は梁の深さ} = 200\text{mm}) \end{aligned}$$

梁の上縁で曲げ応力は最大となり、

$$\begin{aligned} \text{梁に生じる応力の算定式 } \sigma &= My / I \\ & \quad (y : \text{梁の中立軸からの距離}) \end{aligned}$$

ここで、梁上端では、 $y = h/2$ なので、

$$\begin{aligned} \text{最大曲げ応力 } \sigma &= 6M / bh^2 \\ &= 0.15\text{kN} / \text{mm}^2 \\ &= 150\text{N} / \text{mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{せん断応力 } \tau &= P / (\text{のど厚} \times \text{溶接長さ}) \\ &= 40\text{kN} / (16\text{mm} \times 200\text{mm}) \\ &= 12.5\text{N} / \text{mm}^2 \end{aligned}$$

表 3.8 建築の F 値と長期許容応力 (N/mm² (tonf/cm²))²²⁾

分類		建築構造用		一般構造用	溶接構造用			
鋼種記号		SN400 STKN400	SN490 STKN490	SS400 STK400 STKR400 SSC400 SWH400	SM400 SMA400	SM490 SM490Y SMA490 STKR490 STK490	SM520	SM570
F値	厚さ40mm以下	235	325	235	235	325	355	400
	厚さ40mm超 100mm以下	215	295	215	215	295	335 (325)	400
完全溶込み 溶接継目	引張応力	F/1.5						
	せん断応力	F/1.5√3						
すみ肉・部分溶 込み溶接継目	せん断応力	F/1.5√3						

- 注 1.短期許容応力は長期許容応力の1.5倍とする。
2.異種鋼材を溶接する場合、接合する母材の許容応力の小さい方の値を用いる。

$$\begin{aligned} \text{一方、引張許容応力 } \sigma_a &= 235\text{N/mm}^2/1.5 \\ &= 156.7\text{N/mm}^2 \rightarrow 155\text{N/mm}^2 (\text{表 3.8}) \end{aligned}$$

組み合わせ応力(等価引張応力)は、

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} = 152\text{N/mm}^2 < \text{許容応力} = 155\text{N/mm}^2$$

よって、この継手の安全性が照査できた。

(注1：梁の断面内でせん断応力は一様でないが、計算上、平均せん断応力で評価する)

【例3】

前述の【例2】、図3.55の継手がサイズ12mmの両側すみ肉溶接である場合について、同様に検討してみる(道路橋示方書を適用)。**材料はSM400を使用する。**

【解】

荷重を支える断面はのど断面であるから、すみ肉溶接の場合の断面二次モーメントの計算は、のど断面の展開図に対して行う(道路橋示方書)。この場合は【例2】の梁の幅 b に代えて、のど厚の和を用いればよい。

$$\begin{aligned} \text{のど厚の和} &= 0.707 \times 12\text{mm} \times 2 \\ &= 17.0\text{mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{梁の曲げ最大応力} &= 6M / bh^2 \\ &= 141.2\text{N/mm}^2 \quad (\text{この場合、} b = \text{のど厚の和, } 17.0\text{mm}) \end{aligned}$$

表 3.9 道路橋の許容応力 (N/mm² (kgf/cm²))¹⁰⁾

鋼種記号	SM400 SMA400W		SM490		SM490Y, SM520 SMA490W			SM570 SMA570W			
	$t \leq 40$	$40 < t \leq 100$	$t \leq 40$	$40 < t \leq 100$	$t \leq 40$	$40 < t \leq 75$	$75 < t \leq 100$	$t \leq 40$	$40 < t \leq 75$	$75 < t \leq 100$	
完全溶込み 開先溶接	引張応力	140	125	185	175	210	195	190	255	245	240
	せん断応力	80	75	105	100	120	115	110	145	140	135
	圧縮応力	140	125	185	175	210	195	190	255	245	240
すみ肉溶接 部分溶込み溶接	せん断応力	80	75	105	100	120	115	110	145	140	135

注 1.現場溶接の許容応力は、原則として表の工場溶接と同じ値とする。

2.強度の異なる鋼材を接合する場合の許容応力は、強度の低い鋼材に対する値とする。

梁の曲げ応力とすみ肉部の継手に垂直な方向のせん断応力 τ_x が釣り合うことになる(道路橋示方書)。

$$\tau_x = 141.2\text{N/mm}^2$$

$$\begin{aligned}\text{溶接線方向のせん断応力 } \tau_y &= 40\text{kN}/(17\text{mm} \times 200\text{mm}) \\ &= 11.8\text{N/mm}^2\end{aligned}$$

許容せん断応力は表 3.9(前ページ)より、

$$\tau_a = 80\text{N/mm}^2$$

等価なせん断応力は(3.27)式から

$$\tau = \sqrt{\tau_x^2 + \tau_y^2} = 141.7\text{N/mm}^2 > \text{許容応力 } \tau_a \text{ (} 80\text{N/mm}^2\text{)}$$

よって、この継手は強度不足である。

このように、のど断面は【例2】の完全溶込みとほぼ同じであっても、すみ肉溶接では支えられる荷重はかなり小さくなるのがわかる。

3.8 溶接構造の疲労設計

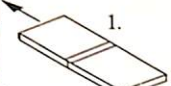
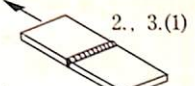
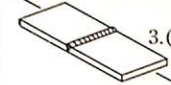
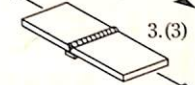
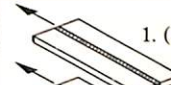

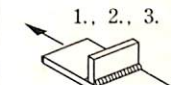
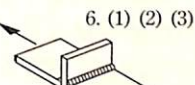
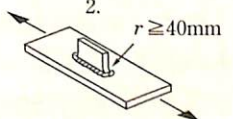
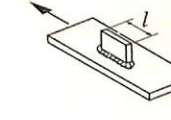
溶接構造物では継手そのものが持つ基本的な疲労強度の低下要因に加えて、構造要素にはカバープレート、スティフナ(防撓材)などの溶接付加物、その他種々の応力集中箇所を持ちやすいため、疲労に対する許容応力の設定には十分な配慮が必要である。

疲労を考慮しなければならない鋼構造物に対しては、(社)日本鋼構造協会の鋼構造物の疲労設計指針・同解説²⁶⁾、AWSの Structural Welding Code – Steel(AWS D1.1)²¹⁾、BSの橋梁設計指針(BS5400)の第10部²⁴⁾、米国道路・輸送協会(American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO)の道路橋設計指針²⁵⁾などに疲労設計指針が示されている。

疲労強度は応力集中の程度に敏感であり、応力集中部が存在する場合には鋼材の種類や強度の影響は小さい。各規格とも構造要素模型に関する膨大な疲労試験結果から継手の種別毎に等級を定め、安全率を見込んだ上でそれぞれの等級ごとにS-N線図の形で疲労に対する許容応力を設定している。

表 3.10に「鋼構造物の疲労設計指針・同解説」²⁶⁾で、定められている溶接継手の等級分類と許容応力の例を示す。疲労許容応力は作用応力の変動幅($\Delta\sigma_f$)で示されており、表には200万回時間強度を示してある。応力は3.7.3項:271ページに示

表 3.10 溶接継手の疲労強度等級分類例 (許容応力 $\Delta \sigma_f$ は N/mm^2)²²⁾

継手の種類と等級		強度等級 ($\Delta \sigma_f$)	備 考		
横突合せ継手	1. 余盛削除した継手	B (155)	 		
	2. 止端仕上げした継手	C (125)			
	3. 非仕上げ継手	(1) 両面溶接	D (100)	 	
		(2) 良好な形状の裏波をもつ片面溶接	D (100)		
(3) 裏当て金付き片面溶接		F (65)			
縦突合せ継手	1. 完全溶込み溶接継手 (溶接部が健全であることを前提とする)	(1) 余盛削除	B (155)	 	
		(2) 非仕上げ	C (125)		
	2. 部分溶込み溶接継手	D (100)			
	3. すみ肉溶接継手	D (100)			
	6. スクラップを含む溶接継手	G (50)			
十字継手	荷重非伝達型	1. 滑らかな止端をもつすみ肉溶接継手	D (100)	 	
		2. 止端仕上げしたすみ肉溶接継手	D (100)		
		3. 非仕上げのすみ肉溶接継手	E (80)		
	荷重伝達型	6. 完全溶込み溶接	(1) 滑らかな止端をもつ継手		D (100)
			(2) 止端仕上げした継手		D (100)
			(3) 非仕上げの継手		E (80)
		7. すみ肉および部分溶込みすみ肉溶接 (止端破壊)	(1) 滑らかな止端をもつ継手		E (80)
	(2) 止端仕上げした継手		E (80)		
	(3) 非仕上げの継手		F (65)		
	(4) 溶接の始終点を含む継手		F (65)		
ガセット継手 (面外)	1. ガセットをすみ肉あるいは開先溶接した継手 ($l \leq 100mm$)	(1) 止端仕上げ	E (80)		
		(2) 非仕上げ	F (65)		
	2. フィレットをもつガセットを開先溶接した継手 (フィレット部仕上げ)	E (80)			
	3. ガセットをすみ肉溶接した継手 ($l > 100mm$)	G (50)			
4. ガセットを開先溶接した継手 ($l > 100mm$)	(1) 止端仕上げ	F (65)			
	(2) 非仕上げ	G (50)			

した方法で計算する。強度等級Aは表中に示されていないが、表面および端面を機械仕上げした帯板状の母材の場合で、その疲労許容応力 $\Delta\sigma_f$ は 190N/mm^2 である。

表3.10から読みとれるように、溶接構造要素の疲労強度を決定的に支配しているのは応力集中の程度である。溶接止端部の応力集中係数 K_t は、

突合せ継手では $K_t = 1.2 \sim 3$,

十字継手またはT継手では、

板厚 10mm 程度の場合、 $K_t = 2.0 \sim 2.5$,

板厚 80mm の場合、 $K_t = 3.5 \sim 4.0$

といわれる。疲労強度の改善には、止端部を滑らかに仕上げるなど、応力集中の原因となるものを極力減らし、応力集中の度合いをできるだけ小さくすることがもつとも重要である。

3.9 溶接構造の破壊事例と解析

■ 3.9.1 溶接構造物の破壊事故例

船舶、橋梁、圧力容器などの鋼構造物では、これまでの幾多の破壊事故という苦い経験を踏まえて、破壊に対する安全性が配慮され、最近では破壊事故が著しく減少している。破壊事例は構造物の製作^{せいぞろい}にとっての大切な教科書にもなる。特に、鋼構造物におけるぜい性破壊は、鋼材が工業用材料として実用化されてより、避けることのできない問題としてついて回った。幾多の破壊・破損事故の経験は、構造の設計の改善、構造用材料の開発、施工法の改良と品質管理技術の充実、などへとつながり、過去の苦い経験を踏まえた広範囲な安全対策、材料の改善、設計、施工技術の進歩によって、最近ではぜい性破壊事例は著しく減少している。

一方、疲労や応力腐食割れなどによる局所的な損傷は、技術の進歩に伴って設計も限界に近い状態で行われることと、使用環境の激変もあって必ずしも減少していない。

表3.11に鋼構造物における代表的な過去の破壊事例をまとめて示す。ここではその影響の大きさからぜい性破壊を主に取り上げてある。いずれもぜい性破壊により構造物が瞬時に崩壊し、社会的に甚大な損害をもたらした事故である。破壊が生じる原因は、単独の理由であることが少なく、いくつかの原因が重畳して生じていることが多い。