

3-7

溶接継手・構造設計の基礎*



山本元道**

Design of Welded Joint and Structure*

by YAMAMOTO Motomichi**

キーワード 溶接継手, 開先形状, 継手形状, 静的強度

1. はじめに

船舶, 橋梁, 大型プラントをはじめとする溶接構造物は, 人間の生活を支える重要な社会基盤となっており, 損傷発生によって設計時に想定された寿命に達する前に期待された機能を突然停止したり, まして人命を奪うようなことは絶対に避けなければならない。しかしながら溶接構造物および溶接継手の設計には, 母材および溶接材料の選択, 溶接プロセスおよび施工条件の選択, 溶接部評価方法や施工管理方法の選択など, 数多くの選択・決定事項が存在する。さらに施工環境や作業者の施工能力なども考慮して, 各種溶接構造物および溶接継手に求められる性能を, 合理的に実現する設計能力が技術者に求められる。本稿では, 溶接管理技術者1級の修得を目指す読者を対象に, 「新版 溶接・接合技術特論(溶接学会編)」の中で, 溶接継手・構造設計の基礎に関する項目を補う形で記述している。材料, 溶接プロセス, 強度, 施工などの基礎は, 別号にて詳細に解説されているので, 「新版 溶接・接合技術特論(溶接学会編)」およびその他有益な書籍とともに参照されたい。

2. 溶接継手の種類

溶接継手は部材の組み合わせ方によって, 突合せ継手, T継手, 十字継手, 角継手, 重ね継手, へり継手, 当て金(板)継手などに分けられる。またそれぞれの継手形状に応じて, 開先(グループ)溶接, すみ肉溶接, シーム溶接, せん(プラグ)溶接, スロット溶接などが用いられる。Fig. 1に, それぞれの溶接継手と溶接種類との組み合わせの例を示す。

*原稿受付 平成22年1月21日

**正員 広島大学大学院 工学研究科 Member, Graduate school of Engineering Hiroshima University

2.1 開先の種類と選定

開先(グループ)溶接は, 接合する2つの部材の接合面に適切な形の溝(これを開先と呼ぶ)を加工して溶接するもので, Fig. 1に示したように, 突合せ継手, T継手, 十字継手, 角継手, へり継手などに適用される。Fig. 2に, 突合わせ継手に用いられる主な開先形状を示す。開先形状は, 板厚, 溶接法, 開先加工の難易, 欠陥防止, 施工条件(溶接姿勢, 部材反転の可否, 施工精度

	開先溶接	すみ肉溶接	シーム溶接	せん溶接	スロット溶接
突合せ継手					
T継手					
十字継手					
角継手					
当て金継手					
重ね継手					
へり継手					

Fig. 1 溶接継手の分類例

など)、積層法、溶着量、変形量などに十分留意して適切に選定しなければならない。主な開先形状の一般的な特徴を以下に示す。

- ① I形開先：開先加工が容易。溶着量が少なく、ビード形状が左右上下対象となり変形が小さい。電子ビーム溶接やレーザー溶接ならびに摩擦攪拌接合(FSW)では、原則ギャップ0mmのI形開先を適用する。厚板への適用は一般的に難しい。
- ② V形開先：開先加工が比較的容易。横向き姿勢を除く全姿勢に適用可能。板厚方向に非対称なビード形状となるため、一般的に角変形が大きくなる。厚板では溶着量が多くなり、変形量も大きくなる。
- ③ X形開先：開先加工が難しい。V形開先に比べて溶着量を少なくでき、角変形も小さくできる。極厚板では、U形開先の方が溶着量および変形ともに小さくなり経済的である。
- ④ U形および両面U形(H形)開先：開先加工が難しい。極厚板では溶着量を少なくでき、変形も小さくできる。
- ⑤ レ形開先：開先加工が比較的容易。横向き溶接に適している。

基本的な開先形状の特徴は上述の通りであり、各施工

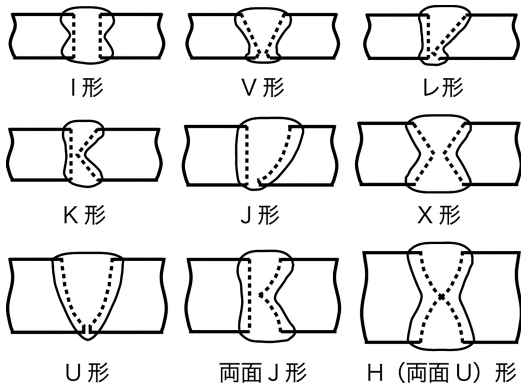


Fig. 2 突合せ継手に用いられる開先形状の例

環境のもとで欠陥の発生しない安定した溶接が可能な範囲において、できる限り少ない溶着量および上下左右対称な断面形状を実現する開先形状を選定することが理想である。例えば、開先角度はできるだけ狭くした方が溶着量および変形は小さくなるが、狭すぎると溶込み不良やスラグ巻込みを生じやすくなるので注意が必要である。また近年、高出力・高品質レーザー溶接機の適用による厚板のI形開先突合せ溶接の実現、レーザー・アークハイブリッド溶接や摩擦攪拌接合(FSW)などの新しいプロセスの特徴を活かした開先形状の選定も可能になりつつある^{2,3)}。

開先溶接には完全溶込み溶接と部分溶込み溶接があり、完全溶込みの健全な溶接継手は、一般的に母材並の強度が期待でき各種強度部材に適用できる。一方、部分溶込みの溶接継手では、必要な溶接断面(のど厚)が安定して確保できる開先および溶接条件の選定が必要であり、繰返し荷重が作用して疲労が問題となる部材に適用してはならない。開先溶接時の開先精度(開先加工および設置)は溶接継手の品質に大きく影響する。Fig. 3に、突合せ継手および角継手溶接時の開先精度管理項目の例を示す。欠陥の防止や完全溶込みの保証には、開先精度管理や施工管理が非常に重要である。特に、疲労強度や脆性破壊強度が問題となる箇所においては注意が必要である。開先溶接時の施工不良による大破壊事故例は多数発生している。Fig. 4に、木材運搬船金清丸の破壊例を示す⁴⁾。右舷上甲板全幅が脆性破壊を起こし、その起

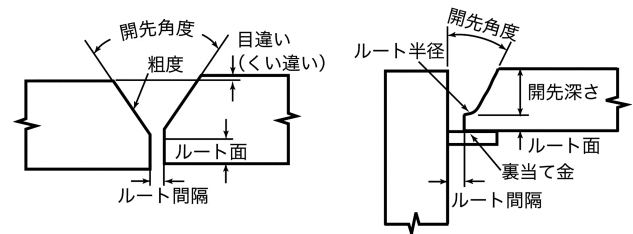


Fig. 3 開先精度管理項目の例

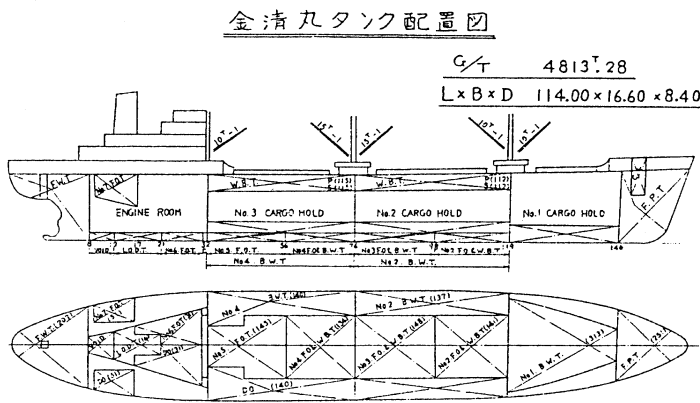
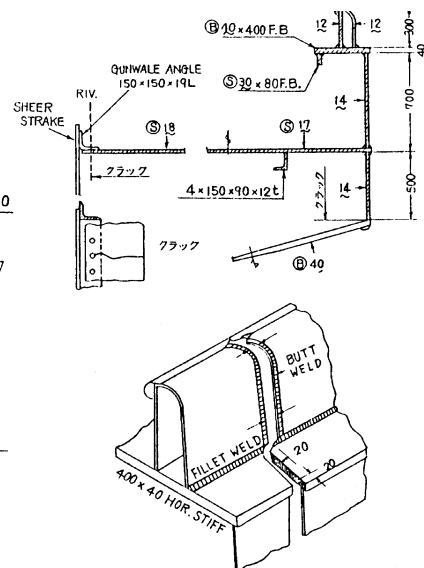
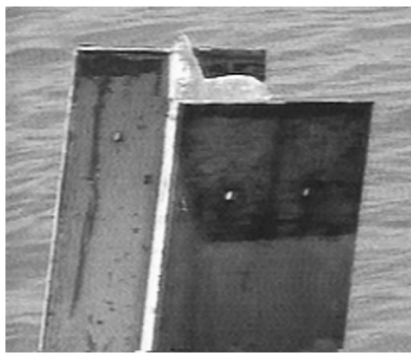


Fig. 4 金清丸破損の概要⁴⁾





(a) 破断した H 型鋼



(b) Face Plate 突合せ溶接部の未溶着部

Fig. 5 聖水大橋橋桁落下時の H 型鋼破断面⁴⁾

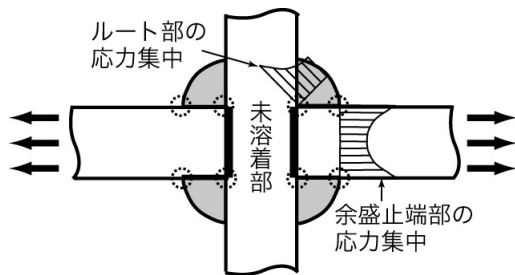


Fig. 6 荷重伝達型十字すみ肉継手の例

点はハッチのトップコーミング内側のカバープレート突合せ溶接部の溶接欠陥であった。この部材は設計上の強度部材でなかったため、“一寸付いていれば良いだろう”と開先加工せずに溶接施工され、板厚の半分程度が未溶着のまま残っていた。溶接で接合すれば力学的に連続となるため、小さな非強度部材でも十分注意して施工しなければならない。Fig. 5 に、聖水大橋の破壊例を示す⁴⁾。落下した橋桁は、H 型鋼の Face to Face に通したピンによって両側の橋桁に吊り下げられていた。この Face Plate はピン穴の位置で増厚されており、増厚のための突合せ溶接部の破断が橋桁落下の原因であった。この突合せ溶接部は開先加工が施されておらず破断面のほとんどがガス切断のままで、ごく表層部のみ溶接されていた。設計者、施工管理者、施工技術者の誰かがきちんとした対応をしていれば、32名もの尊い命が奪われることはなかった。

2.2 すみ肉溶接

すみ肉溶接は、ほぼ直行する二つの面の“すみ”をつなぐ三角形の断面を形成する溶接で、T 継手、十字継手、重ね継手などに使用される。荷重伝達型のすみ肉溶接継手の例を、Fig. 6 に示す。すみ肉溶接継手では、ルート部や止端部に大きな応力集中が生じ継手強度が開先溶接に比べて低くなるため、主要強度部材や繰返し荷重が作用して疲労強度が問題となる部材、衝撃荷重が作用して脆性破壊などが問題となる部材には一般に用いられない。

すみ肉溶接は Fig. 7 に示すように、継手に作用する荷重の方向との関係によって、前面すみ肉溶接、側面すみ肉溶接および斜方すみ肉溶接に分けられる。またすみ肉

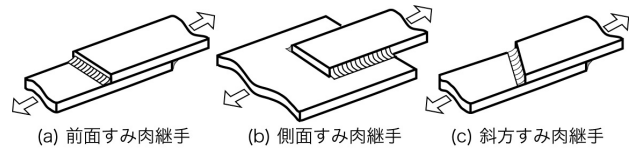
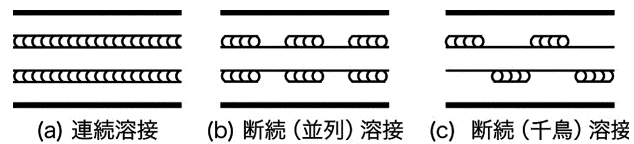


Fig. 7 すみ肉溶接継手の荷重方向による分類



(a) 連続溶接 (b) 断続(並列)溶接 (c) 断続(千鳥)溶接

Fig. 8 断続すみ肉溶接の例

溶接継手は、Fig. 8 (a) に示すように連続して溶接するのが普通であるが、主要強度部材でない場合には溶接量を減らすために、Fig. 8 (b) (c) に示すような断続すみ肉溶接が用いられる場合もある。

2.3 シーム溶接およびその他

先に Fig. 1 中に示したように、重ねた板の片側から溶接して二枚の板を接合する溶接をシーム溶接という。電子ビーム溶接やレーザー溶接を用いた重ね溶接時に用いられることが多い。抵抗スポット溶接を連続して行う抵抗シーム溶接や摩擦攪拌接合 (FSW) を用いたシーム溶接も行われている。

上記溶接継手以外に、重ね溶接において一方の板に貫通孔をあけてその部分を溶接するプラグ (せん) 溶接、貫通孔をスロット (溝) 状にして溶接するスロット溶接がある。これらは単独で強度を保証する部分に用いることはなく、重ねすみ肉溶接時に接合面積が不足する場合に補助的に用いられることが多い。

また部材同士の接合ではなく、母材表面に各種溶着金属を盛り上げる肉盛溶接がある。肉盛溶接は、部材表面の耐食性や耐酸化性の向上および硬化、部材の補修などに用いられる。

3. 溶接継手設計および構造設計の基礎

3.1 溶接設計の基礎

溶接構造物の設計の基本は、設計する構造物に期待さ

れる性能を発揮させつつ設計寿命を全うさせることである。溶接部の品質には、材料・溶接法の選択や各種強度計算結果の妥当性はもとより、溶接施工の難易など溶接設計が直接的・間接的に影響を与える。また溶接構造物全体の性能・品質は、各溶接部の性能・品質に直接影響を受ける場合が多く、溶接設計は広範囲の項目に十分留意して慎重に行う必要がある。さらに溶接構造物では、残留応力、溶接変形、材質変化を考慮した設計も必要である。

溶接構造物の設計時には、その構造物に適用される各種設計規格、基準、法規を遵守したうえで、経済性を考慮した合理的な設計が求められる。溶接構造物の設計は、概略、以下の手順で行われる。

- ① 構造物の使用環境、荷重条件、施工条件、経済性などを考慮した構造物の基本形状、継手形式・位置、使用材料などの基本項目の決定。
- ② 構造物使用期間中の作用応力や環境、さらに重量、機能、加工性、経済性を考慮した継手形状、断面寸法、溶接法などの決定。
- ③ 強度計算等によって要求された断面寸法からの溶接継手の詳細設計、および溶接条件の決定。

3.2 溶接設計上の注意点および継手形式の選択

溶接設計時の基本的な留意点を以下に示す。

- ① 溶接箇所はできるだけ少なくし、溶着量も必要最小限とする。可能であればI形開先や部分溶込みを採用し、狭開先化を行う。厚板では、X形開先や両面U形（H形）開先を採用する。すみ肉溶接では可能な範囲で断続溶接を採用する。
- ② 溶接部は、断面が急激に変化する部分など、構造上の応力集中部と重ならないようにする。特に繰返し荷重が作用し疲労が問題となる箇所では応力集中を生む構造を避け、止端部の形状に留意する。
- ③ 狭い範囲に溶接部が集中しないようにする。
- ④ 継手部断面は荷重軸に対して可能な限り対称になるようにし、溶接部に偏心荷重や二次応力が作用しないようにする。
- ⑤ 溶接組立作業、補修作業、検査ができるだけ容易になるように部材および継手を配置し、溶接姿勢、溶接条件などの溶接施工条件を選定する。溶接姿勢はできるだけ下向きを採用する。
- ⑥ 適用する溶接法の特性や荷重の種類によって、適切な継手形式、種類、開先を選定する。また溶接入熱量や冷却速度に留意し、韌性劣化、軟化、硬化などの材質変化をできるだけ抑えることができる溶接法、溶接条件を選択する。
- ⑦ 新しい溶接法を適用する際には、その特徴が十分に活かせる構造設計および継手設計にする。また開先形状や継手構造を工夫し、溶接品質の安定確保のために自動溶接やロボット溶接を適用する。
- ⑧ 溶接変形や残留応力ができるだけ小さくなる溶接設計を行う。また拘束力も過度に大きくならないように留意する。
- ⑨ 疲労破壊や脆性破壊の起点となるため、主要な強度部材に小片を溶接で取り付けないようにする。

- ⑩ Fig. 9 (a)～(c) に示すような強度上非常に危険な継手は、絶対に使用しない。Fig. 9 (d) に示すように、部分溶込み溶接部やすみ肉溶接部の未溶接部の変形が防止でき、Fig. 9 (a)～(c) に示したような危険な状態にならない場合には許容される。

3.3 許容応力と安全率

溶接継手の設計では、使用環境を考慮して、作用する荷重の大きさや種類を適切に想定し、継手部の各種寸法や材料などを決定する。設計者は、まず、どのような形式の損傷（静的破壊、動的破壊、延性破壊、脆性破壊、疲労破壊、クリープ破壊、その他）が起こりうるかを適切に予測し、強度計算の基礎となる基準強さ（破損の条件）を選定する。その後、安全率を考慮した合理的な許容応力を設定する。ここでは静的強度について述べるが、疲労強度設計に関しては別途詳細に紹介される。

溶接部の静的強度は、適切な材料選定と適切な施工が行われていれば母材と同等である。したがって各種設計基準では、溶接継手の許容応力（許容応力度）は母材と同等に設定されている。ただし、工場溶接と現場溶接、非破壊検査の有無によって許容応力あるいは継手効率を変化させている規格もあるため注意が必要である。また、せん断応力作用時の降伏点は引張応力作用時の $1/\sqrt{3}$ であるため、許容応力も引張応力に対して $1/\sqrt{3}$ に設定されている場合が多い。

溶接継手に限らず製品の強度設計をする場合には、各種不確かさを考慮した上で、設計寿命に達する前に各種損傷が生じないように安全率（安全係数）が設定される。安全率は、基準強さ（ σ_s ）と設計上の許容応力（ σ_a ）との比（ σ_s/σ_a ）で表され、経済的には1に近い値が望ましいが、根拠なく安易に小さく設定すると損傷の原因となり得るので注意が必要である。一般には、これまでの実績を基にして設計基準や規格の中で定められている。基準強さとして降伏強さを用いる場合には1.5～2程度、引張強さを用いる場合には2.5～4程度の値が採用される場合が多い。例えば建築での鋼構造設計基準では、引張の長期許容応力は安全率1.5と設定されて基準強さF（降伏強さあるいは引張強さの70%）から算出される。道路橋示方書では、引張圧縮の許容応力は安全率1.7

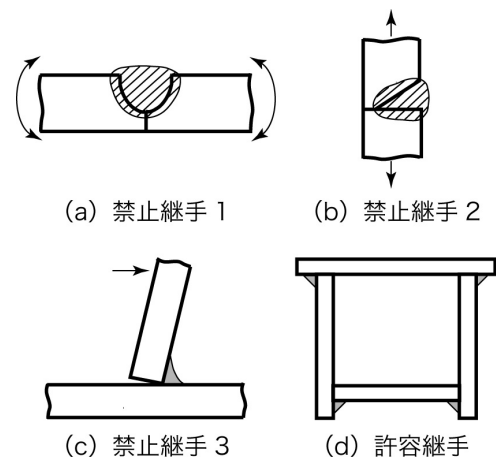


Fig. 9 禁止継手と許容継手

と設定されて降伏強さから算出されるが、降伏比の高いSM570 および SMA570W では安全率が若干高めに設定されている。

3.4 溶接継手の強度計算

溶接継手の強度計算に用いる応力は、継手形状や荷重の作用方向によって異なる。例えば、Fig. 10 (a) に示す突合わせ開先溶接継手では引張／圧縮の垂直応力を、Fig. 10 (b) に示す重ねすみ肉溶接継手ではせん断応力を、Fig. 10 (c) に示す継手と荷重の組み合わせではせん断応力と曲げによる引張／圧縮の応力を設計応力として用いる。また、不連続で断面が一樣でない継手形状や止端部および不溶着部の応力集中などによって溶接部の応力は複雑に分布しているため、強度計算上は以下の仮定を設けて“安全側に”かつ“単純化して”応力を計算する。

- ① 応力のはど断面に一樣に作用するものとし、ルート部や止端部の応力集中は考えない。この応力集中は、静的引張強度を低下させるようなことはないためである⁹⁾。変動荷重が作用する継手の疲労設計時には、応力集中を別途考慮する。
- 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。溶接金属の厚さが最も小さい部分を強度計算上使用する理論のど厚として採用することで、安全側の強度評価になる。
- ③ 溶接残留応力は自己平衡しており、また静的引張強度にほとんど影響を与えないため⁹⁾、強度計算上その存在は考慮しない。

設計上有効など断面は「理論のど厚 (a) × {有効溶接長さ (L)}」で表され、溶接部の応力 (σ, τ) は「継手に作用する荷重 (P) ÷ {有効のど断面積の総和}」で算出される。溶接継手の強度計算時には安全側の設計となるように、理論のど厚および有効溶接長さを用い、継手が受け持つことができる荷重を最小に評価する。

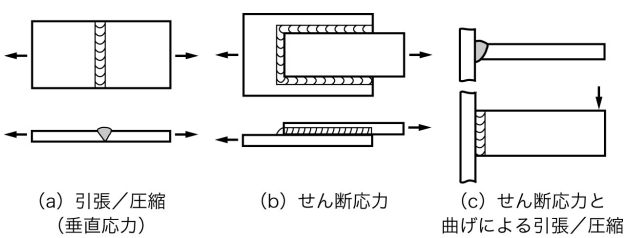


Fig. 10 溶接継手に作用する荷重（応力）の種類

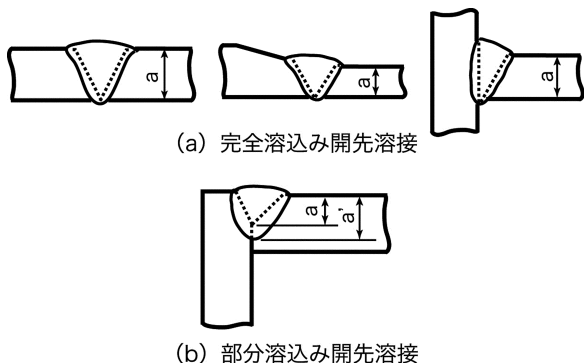


Fig. 11 開先溶接部のど厚

強度計算に用いるのど厚（理論のど厚）(a) は、開先溶接およびすみ肉溶接の場合でそれぞれ Fig. 11 および Fig. 12 に示すように設定し、余盛高さや溶込みはその寸法に含めない。完全溶込み開先溶接では Fig. 11 (a) に示すように、のど厚は接合する部材の厚さとし、接合する部材の厚さが異なる場合には薄い方の部材厚さとする。部分溶込み開先溶接では Fig. 11 (b) に示すように、のど厚は開先深さとする場合が多いが、開先形状および溶接法によってルート部に欠陥が発生しやすいことを考慮して、欠陥による断面欠損を設定し（例えば3mm）開先深さから減じる場合もある。すみ肉溶接の場合 Fig. 12 に示すように、溶接金属の内側に描けるルートを頂点とする最も大きな直角二等辺三角形の辺の長さ (S) によって、のど厚 (a) は $S/\sqrt{2}$ と表される。母材間の交差角度が直角でない場合は、 $S \cos(\theta/2)$ と表される。

有効溶接長さ (L) は、溶接始末端部が継手に残される場合には、溶接長さから不完全な溶接部やクレータの寸法 (のど厚 × 2) を除いた長さとする。すみ肉溶接で回し溶接を行った場合、溶接始末端部の影響はなくなるが回し溶接の長さは有効溶接長さを含めない。また Fig. 13 に示すように、溶接線が荷重方向に対して斜めになっ

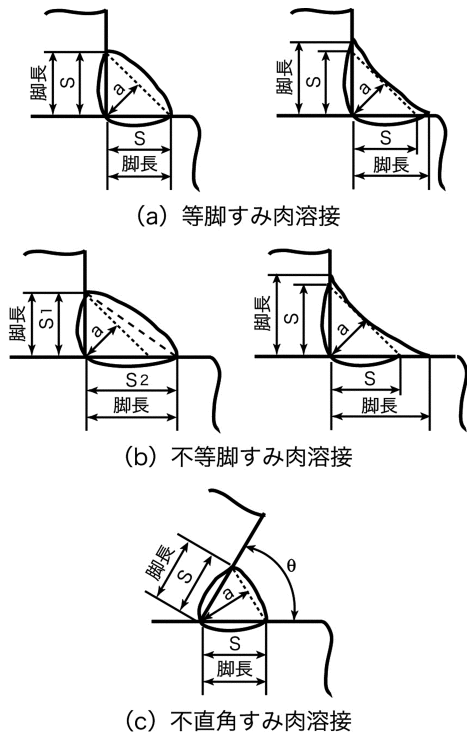


Fig. 12 すみ肉溶接部のど厚

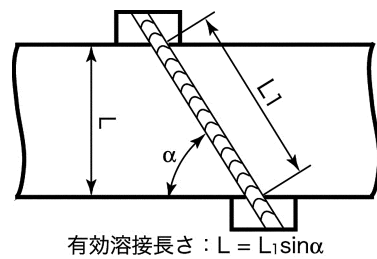


Fig. 13 有効溶接長さ

ている場合、突合せ開先溶接では実際の溶接長さをそのまま用いず、荷重方向に直角となる方向に投影した長さを有効溶接長さ (L) とする。すみ肉溶接では、回し溶接部を除いた実際の溶接長さをそのまま用いて有効溶接長さとする。

4. おわりに

本稿では、各種溶接構造物の設計の基礎となる溶接継手の強度設計を中心に解説した。今後、溶接構造物の高付加価値化を目指しつつ、更なる設計・施工の合理化や軽量化などが進められると考えられる。このような状況下で安全性・信頼性を確保し、設定した機能・性能を発揮しつつ全寿命を全うする溶接構造物を設計するためには、設計者が幅広い分野の溶接設計に関する基礎知識を習得した上で、新しい溶接機器・材料・シミュレーショ

ン技術などを総合的にうまく活用していくことが必要不可欠である。本稿が、その溶接設計基礎の理解の一助になれば幸いである。

参考文献

- 1) 例えば、木下，水谷，川人，片山：ステンレス鋼の高出力ファイバーレーザー溶接とその特徴的な溶接部の形成機構の解明，溶接学会論文集，25-1(2007)，18-23.
- 2) 例えば，浅井，小川，牧野，椎原：ステンレス鋼コイルカパープレートにおけるレーザー・アークハイブリッド溶接，溶接法ガイドブック 6 (2008)，II-160-165.
- 3) 例えば，(社)溶接学会編：摩擦攪拌接合 -FSW の全て-，産報出版(2006)，222-288.
- 4) 矢島：溶接構造物の破損事例とその教訓 (1) -破損事例からの教訓-，溶接学会誌，68-7(1999)，6-10.
- 5) 大畑：溶接接合教室 -基礎を学ぶ- 3-3 溶接継手強度の基礎，溶接学会誌，77-7(2008)，50-56.