



基礎を学ぶ

第4章 溶接施工管理

4-2

溶接施工計画と溶接施工管理*



原 沢 秀 明**

Planning and Management of Welding Procedure*

by HARASAWA Hideaki**

キーワード

特殊工程，溶接施工計画，溶接施工管理，溶接施工要領書（WPS），溶接生産性，溶接設備，溶接要員，日程計画，試験・検査

1. はじめに

溶接施工における管理（Management）の目的とはなにか。端的にいえば、「経営資源である4M－Material（材料），Machine（設備），Method（溶接施工法，試験・検査要領など），Man（要員）－を駆使して，与えられた目標－基本的にはQ（品質），C（コスト），D（納期）－を達成すること」であろう。

この目的を達成するために，わが国の産業界では早くから，TQCなどの品質管理活動も組み入れて，工場あるいは現地施工での管理能力を高め，企業の競争力を向上させてきた。管理技法も数多く紹介されているが，米国デミング博士紹介によるテミングのサイクル，いわゆるPDCA（Plan-Do-Check-Action）サイクルが活動の基本とされる。適切な管理によって，螺旋状に上昇してゆくようなサイクルを回し，生産性向上などの目標達成の度合いを高めてゆくことが重要とされ，目的はあくまで各企業の競争力向上にある。

一方，東西冷戦構造が崩壊して，1990年代からはわが国にもグローバル化の波が押し寄せてきた。品質システムの標準化－ISO9000ファミリー（ISO9000，ISO9001，ISO9004など）「品質管理および品質保証のための一連の国際規格」と，それに基づく審査登録制度の急速な普及には目を見張るものがある。このシステムには，従来のわが国の考え方と大きく相違する点がある。すなわち，供給者の立場ではなく，購入者の立場から製品が正しく製造されているという確証を与えるため，供給者の品質管理や品質保証の実態を理解してもらう，透明性の高いシステムということである。各企業の溶接施工関

係者にとっては，従来のTQC的な管理活動に加えて，ISO9000ファミリーの考え方に立脚した管理に対する，十分な理解と実行，及びその妥当性確認が求められる時代になったということである。

このISO9001:1994（1994版）で特筆すべきは，溶接は代表的な「特殊工程（Special Process）」の代表的な例と位置づけられていることである。特殊工程（溶接）の定義は，「その結果が後工程で実施される検査および試験によって，要求された品質基準が満たされているかどうかを十分に検証することができない工程」である。すなわち，溶接継手の品質保証のためには，溶接後の非破壊検査のみでは不十分であり，溶接施工の全工程に対する品質管理活動とその妥当性確認の重要性が強調されている。

特殊工程に対する要求事項は，具体的には，ISO9001:2000の翻訳版JIS Q 9001:2000の「7.5.2 製造及びサービス提供に関するプロセスの妥当性確認」に示されており，これに対応したISO3834（JIS Z 3400）「溶接の品質要求事項－金属材料の融接」に溶接施工に関わるより詳細な品質確保のための手順，事業所が実施すべき活動項目が規定された。

ISO3834（JIS Z 3400）では，プロセス（溶接施工要領）の明確化と承認の手順，および溶接に従事する要員の認証を要求しているため，WPS（溶接施工要領書）の作成と承認手順を規定した規格（ISO15607～15614），並びに要員認証に関する規格ISO14731（溶接管理技術者の任務と責任），ISO9606（溶接技能者の承認試験），およびISO9712（非破壊検査技術者の承認）を重視し引用している。これらはISO3834を中心としたセット規格といわれ，すでに欧州では工場認証制度に適用されてきている。

ISO3834（JIS Z 3400）は，前節¹⁾で詳細が紹介されたように，溶接施工管理を計画，および実行する場合の重要項目が網羅されているといってよい。本稿では，この溶接品質マネジメントシステムの考え方を念頭に置いて，

*原稿受付 平成20年6月11日

**正 員 元JFEエンジニアリング株式会社 Member, JFE Engineering Corp.

まず施工計画の基本的な考え方を示し、次いで、計画をフォローするという観点から施工管理の要点を紹介することにしたい。

2. 溶接施工計画

2.1 溶接施工計画の概要

溶接構造物を受注した場合、顧客と施工者の間でさまざまな文書、図面の確認作業が必要となる。溶接管理技術者の業務として、「施工計画書」、「品質管理計画書」、「安全・衛生管理計画書」等の提出、承認取得作業があり、この中で、「施工計画書」は最も中心的な文書とされる。そして、「溶接」は通常、施工の主体であるため、施工計画書の内容は「溶接」の記述が過半となる。なお、品質管理計画や安全・衛生管理計画等が重要であることは当然であり、これらは施工計画書が引用する文書とするか、場合によっては施工計画書に含めることもある。

顧客に提示する施工計画書の内容は、例えば ISO3834 で規定された項目を網羅しておくことが、最低限必要なことと言える。しかし、製品の出来栄の如何は、計画によって決定されるといわれるように、施工計画が不十分であったり適切でない場合は、品質が良くても日程やコストが要求されたものから大きく狂ったり、あるいは日程が良くても要求される品質を満足しない場合が起きる。また、コスト削減や日程短縮にかかわる計画/管理は、ISO3834で規定されている項目ではないが、企業が培ってきたノウハウを駆使して実行すべき項目である。したがって、溶接施工計画に際しては、ISO3834の規定以外の項目を含めて、溶接施工に関連する項目のすべてについて、事前によく問題点を把握し、対策を織り込んだものにしておく必要がある。

溶接施工計画の項目は多岐にわたるが、溶接管理技術者が計画に取り組む際の、基本的な考え方、配慮すべき事項を挙げると次の通りである。

① デザイン・レビュー等による要求品質の確認

契約内容、仕様書、設計図面、製作・工事内容、そして溶接しようとするものの要求品質を十分に検討・把握すると共に、デザイン・レビュー等により設計・製作上の懸案事項を解決し、計画に織り込む。検討すべき要求品質としては、静的あるいは動的強度、耐食性、耐摩耗性、

外観、寸法精度、残留応力除去の要否、気密・水密の要否などがある。

② 適切な溶接法の選択

溶接法の適用・選択に当たっては、各種溶接法の特徴、長所・短所についての知識・情報を得ること、とくに生産性の向上と溶接品質の確保の両面から検討・計画する必要がある。

③ 溶接材料、溶接施工要領、溶接条件

母材に適合した溶接材料を選定するとともに、保管設備・取扱い要領を検討する。溶接施工要領は詳細かつ明確に定めると共に、その承認の手順を客観的に定めておくことが重要である。工事に際しては、この溶接施工要領書を基に、組立精度管理、治具の取扱い等の全般的な注意事項を含めた「溶接作業指示書」を発行し、作業者への周知・徹底を図る。

④ 作業環境、溶接姿勢の検討

溶接作業はなるべく工場内で実施し、現場（現地）溶接は可能な限り避ける。また、溶接姿勢はなるべく下向姿勢で、能率の良い、品質の確保し易い方法で実施できるように計画する。

⑤ 工場・現場設備の効果的、効率的な運用

基本設備（電源容量、運搬移動設備、定盤・作業場所、足場、溶接機と溶接箇所との距離等）、作業場所の制約条件、作業従事者への制約条件からくる生産性への影響を考慮した計画とすること。

⑥ 溶接および試験要員の確認

生産性に適合した配員を計画し、技量資格を確認する。必要に応じて技量試験を実施すると共に、教育・訓練計画を立案する。

⑦ 溶接欠陥等の工程阻害要因の検討

溶接欠陥や過度の溶接変形が生じないように予め検討し、これらを防止あるいは最小に止めるように計画する。また、構造物の形状・寸法によっては、溶接あるいは検査ができないなど、溶接部の品質に大きな影響を与えかねないので、配慮すべき点は設計図面を変更する。

⑧ 試験・検査要領および手順の確認

万一の事故の際、事故原因を追跡できる品質計画とする。そのため、溶接品質の記録が残る仕組みを採用し、とくに原因追跡のトレーサビリティ管理を計画に織り込む。非破壊試験については、高張力鋼溶接部の遅れ割れ

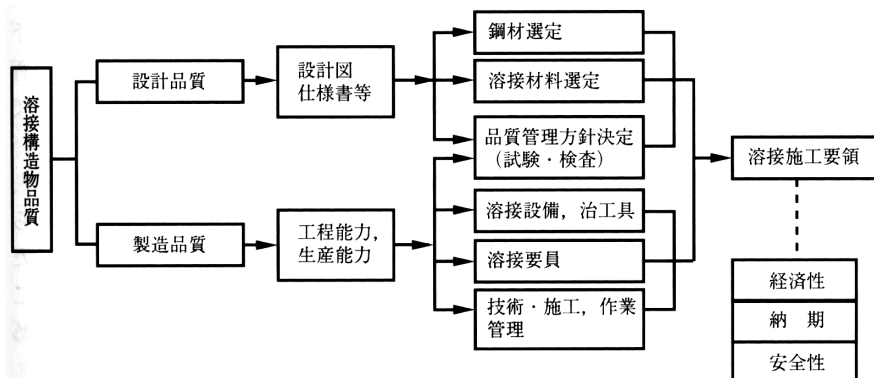


図1 溶接施工要領決定過程における各種要因の関係²⁾

への配慮のために試験時間に制限が設けられることがあり、事前に工程に組み込んでおく必要がある。

⑨ 安全・衛生への配慮

高所作業、閉所作業等とはくにアーク溶接作業にとって安全・衛生管理が重要である。溶接方法、作業環境に適応した管理について十分に配慮した計画とする。

上記の考え方を踏まえて、次項以降には各論として、施工計画項目の中でも重要とされる①溶接施工要領の決定、②溶接生産性評価と溶接コスト計画、③日程計画、④溶接設備計画、⑤溶接要員計画、⑥試験・検査計画の要点を解説する。

2.2 溶接施工要領の決定

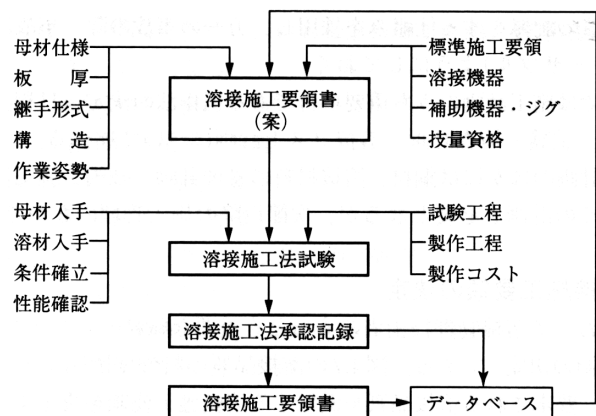
溶接管理技術者の計画段階における最も重要な職務の一つが、溶接施工要領を決定、承認取得することである。

図1には、要求されている溶接品質を満足する溶接施工要領を決定するまでの過程と各種要因の関係を示す²⁾。設計図、仕様書、工程能力、生産能力を基本に、全溶接工程について施工の方法、条件などの要領を計画、決定する。

図2には、溶接施工要領を決定するまでの手順の一例を示す²⁾。WPS（溶接施工要領書）とは、「製品に使用する母材と溶接材料の組合せ、および適用する溶接方法に

対して、溶接品質に影響を与える重要な因子（板厚、開先形状、溶接条件、積層、予熱、後熱等）について条件を設定した文書」である。JIS Z 3421-1-2003 (ISO15609-2000)「金属材料の溶接施工要領及びその承認—アーク溶接の溶接施工要領書」には、WPSに記載されるべき主な因子（溶接確認項目）として次の項目を挙げている。

- ① 材料：材料の種類、規格、板厚
- ② 溶接方法
- ③ 溶接材料：溶接棒、溶接ワイヤ、フラックスなどの規格、サイズ、銘柄
- ④ シールドガス：ガスの種類、混合比、流量
- ⑤ 継手の種類
- ⑥ 開先：形状、寸法
- ⑦ 溶接姿勢
- ⑧ 溶接条件：各パス毎の溶接電流、アーク電圧、溶接速度、積層法など
- ⑨ 予熱およびパス間温度： 有無、有りの場合は温度範囲（下限、上限）
- ⑩ PWHT：有無、有りの場合は加熱温度などの熱処理条件
- ⑪ 電極数、極数、結線方式：多電極の場合に記載
- ⑫ 文書番号：他の WPS と識別するための番号



溶接施工法試験 : Welding Procedure Qualification Test, WPQT
 溶接施工法承認記録 : Welding Procedure Approval Record, WPAR
 溶接施工要領書 : Welding Procedure Specification, WPS

図2 溶接施工要領決定手順の一例²⁾

表1 溶接施工法承認における各段階³⁾

実行事項	結果	実行者
施工法の確立	承認前の溶接施工要領書 (pWPS)	製造事業者
いずれかの方法による承認	溶接施工法承認記録 (WPAR) 該当する承認の規格に基づいた承認範囲を含む	製造事業者及び 立会検査員/検査機関
施工法の確定	溶接施工法承認記録 (WPAR) に基づく承認された溶接施工要領書 (WPS)	製造事業者
製造のために発行	承認された溶接施工要領書 (WPS) のコピー 又は作業指示	製造事業者

(注) 「いずれかの方法による承認」とは、溶接施工法試験による承認以外に、承認の方法としては、承認された溶接材料による承認、過去の溶接実績による承認、標準溶接施工法の使用による承認、製造前溶接試験による承認もあることを示している。

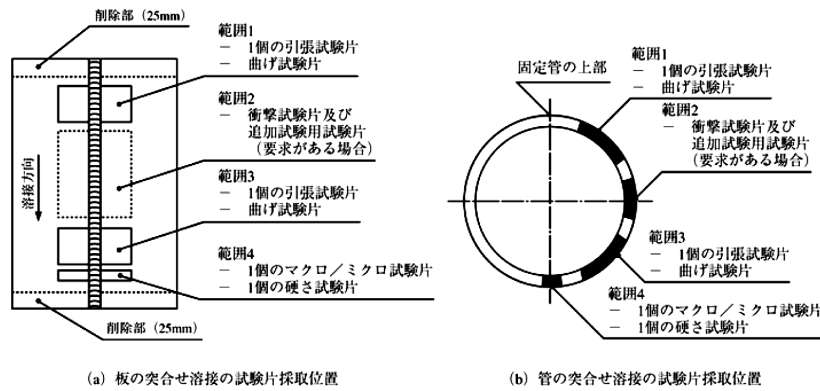


図3 溶接施工法試験における試験片採取要領^{③)}

WPSの決定手順はJIS Z 3420 (ISO15607:2000)「一般原則」の附属書B(参考)において、「溶接施工法承認における各段階」として表1に示すように記載されている^{③)}。最も基本的な手順は、まずpWPS(仮の施工要領書)を作成する。これに基づいてWPQT(溶接施工法試験)を実施する。JIS Z 3422-1 (ISO15614)「溶接施工法試験」では、母材と同材の試験板に、同一溶材、同一条件で溶接した継手に対し、図3に示すような試験片を採取して、所定の機械試験などを行うことを規定している^{③)}。この結果から、継手の性能が設計の要求性能に合致していることを確認する。これら性能は実製品の溶接品質の代用特性値として扱われる。試験結果をもとにWPAR(溶接施工法承認記録)を作成し、発注者の承認を得てWPSとなる。

なお、溶接施工法の承認方法としては、表1の(注)に示したように、上述の溶接施工法試験を実施する方法以外に、下記の承認方法も認められている。

① 承認された溶接材料の使用による承認

承認された溶接材料とは、独立した検査員または検査機関(第三者機関)によって試験され、承認された溶接材料または溶接材料の組み合わせを指す。溶接入熱が限定された範囲内に保持されるならば、熱影響部が著しく劣化しない材料に対しては、このような承認された溶接材料を使用する溶接施工要領の承認が認められる。ただし、アーク溶接とガス溶接に限定されている。

② 過去の溶接実績による承認

この方法は、過去の実績を引用することによる溶接施工法の承認を認めている。製造者は、対象とされる継手の種類と材料において、過去に満足しうる溶接を行ったことを、適切な根拠のある独立した文書によって証明できるという条件のもとに、過去の実績を引用することによって、承認前の溶接施工要領書(pWPS)の承認を得てもよい。この場合、許容される品質の溶接を一定期間継続して行ってきたことを証明する試験データが示せる場合で、実績から信頼できるとわかる溶接施工要領だけを使うべきである。

③ 標準溶接施工法の使用による承認

この方法は、標準溶接施工法を用いた溶接施工法の承認である。製造者によって準備された承認前の溶接施工

要領書(pWPS)が、そのすべての確認項目の範囲が標準溶接施工法によって許容される範囲にあるならば、承認される。

標準溶接施工法は、溶接施工法試験に関する承認に基づいて、WPSまたはWPARの様式として、発行しなければならない。最初の標準溶接施工法の承認に対して責任を持つ検査員または検査機関は、この標準の発行および改正を行わなければならない。また、標準溶接施工法の適用は、使用者が満足できる条件に従う。

④ 製造前溶接試験による承認

溶接施工法試験と同じ機能を持つ溶接試験であるが、より製造の条件に近い条件で試験材が作成される。標準化された試験材を使用しなくともよい。

試験材は製造時の継手をシミュレートするように作製されなければならない。また試験は製造に先立ち、かつ、製造に用いる条件で行わなければならない。試験材の検査および試験は要求事項の範囲内で行わなければならない。この試験は、対象の継手の状況に応じて特別な試験の追加または代替を必要とすることもあり、検査員または検査機関によって合意されなければならない。

WPSは溶接施工管理上もっとも重要な文書のひとつである。実工事の継手は、WPSに準拠して溶接するため、WPSは作業者に対する指示書にも記載して周知徹底を図る必要がある。

2.3 溶接生産性評価と溶接コスト計画

諸計画の中でも、どれだけの溶接作業時間がかかるのか。溶接技能者は何人必要か。溶接材料はどのくらい準備するのか、といった溶接コストの見積もり(溶接生産性の評価)は必須である。とくに、溶接コスト計画としては、そのコストで問題はないか、さらには一層のコスト削減を図れないかといったことを良く吟味する必要がある。そのためには、溶接生産性の評価尺度を適切に用いるとともに、生産性向上への不断の取り組みと計画への反映が重要となる。

(1) 溶接生産性の評価

生産性の定義は、生産物を作り出すために投入した労働力、資金、設備、原材料、土地などの生産要素に対して得られた成果がどのくらいかということであり、一般に次のように表される。

表2 溶接の生産性の種類と指標⁴⁾

生産性の種類	アウトプットの測定単位		溶接長または継手長 (m)	加工鋼材重量 (ton)	換算溶接長 (βL)	消費溶接材料重量 (kg)	製品・部材単位 (台・個など)
	溶接工労働時間 (hr)	溶接機台数時間 (台・hr)					
労働生産性	溶接工労働時間 (hr)	溶接長労働時間 (m/hr) (または逆数)	溶接長労働時間 (m/hr) (または逆数)	労働時間加工鋼材 (hr/ton) (または逆数)	単位長さ当りの溶接時間 (hr/m)	消費溶接材料重量労働時間 (kg/hr)	労働時間部材個数 (hr/個) (または逆数)
設備生産性	溶接機台数時間 (台・hr)	溶接長設備台数・時間 (m/hr台)	溶接長設備台数・時間 (m/hr台)	設備台数加工鋼材重量 (台/ton)	—	消費溶接材料重量設備台数・時間 (kg/台・hr)	部材個数設備台数・時間 (個/台・hr)
原材料生産性	消費溶接材料重量 (kg)	消費溶接材料重量溶接長 (kg/m)	消費溶接材料重量溶接長 (kg/m)	消費溶接材料重量加工鋼材重量 (%)	—	—	消費溶接材料重量部材個数 (kg/個)
総生産性	溶接工労務費 + 溶接材料費 + 溶接設備使用費 総コスト(円)	溶接総コスト溶接長 (円/m)	溶接総コスト溶接長 (円/m)	溶接総コスト加工鋼材重量 (円/ton)	—	—	溶接総コスト部材個数 (円/個)

表3 溶接コストの費目と計算式の一例⁴⁾

溶接コスト費目		計 算 式	
大 区 分	小 区 分		
溶接機使用費 (円/m) $C_{PS}=C_d+C_r+C_c+C_e+C_w$	減価償却費	$C_d = \frac{\text{装置購入費} \times \text{減価償却係数}}{\text{年間溶接長}}$	(円/m)
	装置修理費	$C_r = \frac{\text{装置購入費} \times \text{修理費係数}}{\text{年間溶接長}}$	(円/m)
	消耗品費	$C_c = \frac{\sum(\text{消耗量} \times \text{単価}) \text{消耗品}}{\text{年間溶接長}}$	(円/m)
	電力費	$C_e = \text{溶接長1m当りの使用電力} \times \text{電力料金}$	(円/m)
	冷却水費	$C_w = \text{溶接長1m当りの使用水量} \times \text{水道料金}$	(円/m)
溶接材料費 (円/m) $C_{CM}=C_r+C_w+C_f+C_g+C_{ba}$	溶接棒費	$C_r = \text{溶接長1m当りの棒使用量} \times \text{単価}$	(円/m)
	ワイヤ費	$C_w = \text{溶接長1m当りのワイヤ使用量} \times \text{単価}$	(円/m)
	フラックス費	$C_f = \text{溶接長1m当りのフラックス使用量} \times \text{単価}$	(円/m)
	ガス費	$C_g = \text{溶接長1m当りのガス使用量} \times \text{単価}$	(円/m)
	バックング材費	$C_{ba} = \text{溶接長1m当りのバックング材使用量} \times \text{単価}$	(円/m)
労務費 (円/m) C_{LB}	賃金 + 間接費	$\left\{ \text{wage} + \text{charge}^* \right\} \times \frac{\text{年間施工時間}}{\text{年間溶接長}}$	(円/m)
溶接コスト (円/m)		$C_{TOTAL} = C_{PS} + C_{CM} + C_{LB}$	

* chargeには本来設備費，動力費も含まれるが，ここでは含まないものとする。

生産性 = 産出 (アウトプット) / 投入 (インプット)
 溶接の生産性の種類とそれを表す指標としては表2に示すようなものがあり，目的に応じて使用されている⁴⁾。基本的には，インプットとなる生産要素は溶接技能者，溶接設備，溶接材料であり，アウトプットとしては溶接された構造物や継手となる。

生産性はインプットとアウトプットの比率で表されるので，それぞれの要素について何らかの単位で測定されなければならない。たとえば，「溶接技能者1人が1時間あたりで溶接する溶接長」は溶接技能者の「労働時間」という投入量で，その労働時間で施工した「溶接工事量 (溶接量)」という算出量を割った値であり，一つの生産

性の指標である。ここでは、溶接作業量の見積りのために良く使われる指標を次に紹介する。

1) 溶接長による見積り

図面より溶接継手長を読み取り、溶接長の合計で溶接作業量を見積もる方法。この場合、すみ肉継手は両側が溶接されるので溶接長としては継手長の2倍となる。溶接姿勢は無視して合計長だけで見積る場合と、溶接姿勢別の溶接長にして見積る場合がある。板厚とすみ肉脚長の要素は含まれない。

2) 溶着金属量による見積り

溶接長とともに突合せ継手では開先断面積（裏はつり部を含む）を基に、すみ肉継手では脚長を基に溶着金属量を求め、それにより溶接作業量や必要溶接材料重量を見積もる方法。必要溶接材料重量を求める場合、溶接材料の溶着効率を考慮する。

3) 換算溶接長による見積り

換算溶接長により見積もる方法。構造物の各種継手を頻度の高い一つの継手、例えば脚長6mmの水平すみ肉溶接継手に換算して、その換算長から作業量、溶接材料を見積もる方法である。

4) 鋼材重量と溶接材料重量の比率による見積り

類似の構造物の過去の実績から推定して求める方法。例えば、使用した鋼材重量と消費した溶接材料重量の比率を用いて、新たな製品の設計鋼材重量から溶接材料重量を算出し溶接作業量を見積もる方法である。

表3には溶接コストの費目と計算式の一例を示す⁹⁾。溶接工程における投入量として、溶接設備、溶接材料、溶接労働力を金額で表示して、単位溶接長あたりの金額を求めることがよく行われる。

(2) 生産性向上の方法

溶接の生産性向上のための取組みには大きく分けて3つある。設計面（溶接量を減らす）、溶接技術面（溶接方法の高能率化や自動化による省人化）および生産管理面（アークタイム率などを上げる）からの取組みである。実際的にはこれら3つを重層的、総合的に実施することにより生産性の向上が図られている。

それぞれの取組みの要点は次の通りである。

1) 溶接量の削減

設計段階で、溶接継手そのものを削減するなど、具体的には設計と協議して次のような対策をとる。

- ① 継手長、溶接長を削減する：より大きな板を使って溶接継手を減らす、部材数を減らす、T型継手やL型継手はすみ肉溶接でなく曲げ加工で成形する、など。
- ② 開先断面積を減らす：板厚を減らす、開先角度を狭くする、ルートギャップを減らす、脚長を減らすなどして溶着金属量を低減する。ただし、適用する規則、基準、仕様書の許す範囲内で、溶接欠陥が出ない範囲内で減少を検討する必要がある。
- ③ 大ブロック化や、溶接量を減らすブロック分割など。

2) 溶接の省人化

一人の技能者の溶着速度を増やせば、より少ない技能者数で仕事が終わる、生産性は向上する。

- ① 溶接の高速化を図る：多電極自動溶接機や高速自動溶接機を適用する。
- ② 高溶着量溶接化を図る：1パスでより多くの溶着量が得られる施工法を採用する。
- ③ 溶接のロボット化や無監視化を図る：一人のオペレータで複数台の溶接機を操作できるようにする。

3) 作業管理の改善

作業内容を分析し、緻密な管理により、無駄を省けば生産性は向上する。

- ① アークタイム率を上げる：溶接作業時間のうちでアークが出ている時間の割合を増やす。準備、移動、待ち、片付けなどの時間の削減とともに、スラグの除去時間、ビードの清掃時間、溶接材料の取替え時間なども減らし、アーク発生時間を増やせばアークタイム率は向上する。
- ② 正味作業率を上げる：上述したアークタイム率と同じ考え方である。準備、移動、待ち、片付けなどの時間を減らし、正味作業、すなわち溶接作業時間（この場合はスラグの除去時間、溶接材料の取替え時間などは含む）の比率を上げる。具体的には流れ作業化することや、治具による下向溶接化などがある。
- ③ 開先精度を向上させる：精度管理を厳密にすることにより開先精度を向上し無駄な溶着金属を減らす。すみ肉溶接で規定脚長以上の脚長をつけないように管理することも同様の効果がある。
- ④ 手直し溶接を減らす：欠陥を出さないように作業を見直す。溶接方法、溶接材料、溶接条件の見直しを行う。溶接技能者の技術向上も図る。

2.4 日程計画

計画に際しては顧客への納期遵守を念頭に、工事量、設備能力、製作方法、手順などを総合的に考慮しなければならない。この場合、できる限り工事量の変動を少なくし、また工程間のアンバランスがないように計画することが大切である。さらに、前項コスト計画での「コスト削減」と同様、日程計画では「納期短縮」への取組みも忘れてはならない。

日程計画は大きな工事では通常大日程、中日程、小日程に区分して計画、管理される。最近では待ち行列理論などによる物流シミュレーションを適用して生産性向上、効率化を図ることもある。

通常、工事に着手した初期の段階では、工事に対する不慣れからくる能率の低下が予想されることから、多少日程上の余裕を見ておく方が良い。また極端な短日程の計画は品質を犠牲にすることにもなるので、発注、受注両者とも、余裕をもって計画を立てる配慮が必要である。

溶接品質を確保するためにも日程計画に考慮が必要な場合がある。例えば、780MPa級高張力鋼やCr-Mo系低合金耐熱鋼の溶接施工においては、水素による遅れ割れの危険があるため、一般には溶接後48時間経過した後に非破壊検査を実施しなければならない。

しかし、現地工事などのように他の工程（たとえば土木工事）との関係から48時間の検査待ち時間がとれないこともある。この場合はいわゆる溶接後の直後熱（たと

例えば780MPa級高張力鋼で250℃、2時間程度)による脱水素処理を行ったあとで24時間放置して非破壊検査をするなど、放置時間短縮のための特別な処置がなされることがある。

上述のような高張力鋼や低合金耐熱鋼では、このほか予熱、入熱量の制限、後熱(PWHT)などの施工が必要となるので、日程計画に際しては検査時間だけでなく、全般的に施工上の制約が多いことを留意して立案することが重要である。

2.5 溶接設備計画

一般に設備計画は、構造物の種類、生産量、品質レベル、組立方法、施工方法、作業能率などを考慮して決められる。溶接設備については、溶接機の仕様、台数、配置、電源容量を計画することが基本であるが、関連設備である作業定盤、反転治具やポジションなどの組立治具、搬送設備、各種治具の工夫の適否が作業能率や溶接品質に影響する。また、製造工程全般でいえば、切断、加工、ひずみ矯正、熱処理、試験・検査用機器等の諸設備の計画も必要となる。

計画すべき主な設備を列記すると、次のとおり。

- ① 溶接電源およびその他の機械
- ② 熱切断を含む、開先加工および切断設備
- ③ 温度計を含む、予熱、溶接後熱処理設備
- ④ ジグおよび固定器具
- ⑤ 溶接製作に使用するクレーンおよびハンドリング設備
- ⑥ 溶接要員の保護装置およびその他安全設備

⑦ 溶接材料の保管庫、乾燥設備、携帯容器など

⑧ 破壊試験および非破壊試験装置

最近では、溶接の自動化、とくにロボット溶接の設備化が拡大してきたことと相まって、設計(CAD)から製造(CAM)にいたる技術情報をコンピュータにより矛盾なく、効率よくデータ処理し、提供しようとするCAD/CAM(Computer Aided Design/Manufacturing)化が進んできた。そして、製品の変更や情報の変更に対応し、部品や製品の移送・管理までを自動化しようとするFMS(Flexible Manufacturing System)や、製造情報、技術情報、管理情報といった生産現場で発生する各種情報をコンピュータシステムによって統括し、生産の効率化を推進しようとするCIMS(Computer Integrated Manufacturing System)といった製造システム開発を計画に組み入れるところも増えてきた。

なお、設備計画には、溶接機や関連機器の正しい機能発揮のため、正しい操作と完全な保守整備の計画が必須である。PM(Preventive Maintenance)は、機器の故障を未然に防ぐ予防保全と機能の維持・確保を行う手法として重要である。工場全員で参加するもに行うPMを採り入れた、保守計画を作成し、確実に保守点検を実施するべきである。

2.6 溶接要員計画

十分な知識と経験を有する要員を確保し、溶接施工に当たるように計画しなければならない。また、優れた要員は短期間で育つものではなく、教育、訓練を含めた長期的な計画が必要である。

表4 わが国の主な溶接要員認証制度³⁾

技術者	<ol style="list-style-type: none"> 1. 溶接管理技術者「特別級」「1級」「2級」(JIS Z3410/ISO 14731/WES 8103) [日本溶接協会] 2. マイクロソルダリング技術者 (JIS Z3851/WES 8109) [日本溶接協会] 3. アルミニウム合金構造物溶接施工管理技術者「1級」「2級」「3級」(LWS A7601) [軽金属溶接構造協会] 4. 圧接管理技士 (日本圧接協会規則) [日本圧接協会]
作業指導者	<ol style="list-style-type: none"> 1. アーク溶接作業指導者 (WES 8103) [日本溶接協会] 2. マイクロソルダリングインストラクタ (WES 8109) [日本溶接協会]
技能者	<ol style="list-style-type: none"> 1. 手溶接技能者 (JIS Z3801/WES8201) [日本溶接協会] 2. 半自動溶接技能者 (JIS Z3841/WES8241) [日本溶接協会] 3. ステンレス鋼溶接技能者 (JIS Z3821/WES8221) [ステンレス協会/日本溶接協会] 4. チタン溶接技能者 (JIS Z3805/WES8205) [日本溶接協会] 5. プラスチック溶接技能者 (JIS Z3831/WES8231) [日本溶接協会] 6. 銀ろう付技能者 (JIS Z3891/WES8291) [日本溶接協会] 7. すみ肉溶接技能者 (WES8101) [日本溶接協会] 8. 石油工業溶接士 (JPI 7S 31/WES8102) [石油学会/日本溶接協会] 9. PC工法溶接技能者 (WES8105) [プレハブ建築協会/日本溶接協会] 10. 基礎杭溶接技能者 (WES8106) [全国基礎杭工業協同組合連合会/日本溶接協会] 11. アルミニウム溶接技能者 (JIS Z3811) [軽金属溶接構造協会] 12. 船舶溶接士 (日本海事協会鋼船規則) [日本海事協会] 13. マイクロソルダリングオペレータ (JIS Z3851/WES8109) [日本溶接協会] 14. ガス圧接技能者 (JIS Z3881) [日本圧接協会] 15. 発電設備用溶接士 (電気事業法・炉規法/WES8207) 16. ボイラー溶接士 (ボイラ及び圧力容器安全規則) [ボイラー協会]
ロボットオペレータ	<ol style="list-style-type: none"> 1. 建築鉄骨ロボット溶接オペレータ (WES8110/WES8111) [日本溶接協会]

(注) ()内は適用規格を、[]内は認証機関あるいは認証業務実施機関を示す。

如何なる要員も JIS などの適格な規格に従い認証されるべきである。要員資格制度としては、国際的には IIW の分類がある。わが国ではその国際的な制度との整合を図ってきている。資格としては従来、溶接管理技術者、溶接技能者、非破壊検査技術者がそれぞれの任務に当たってきているが、溶接作業指導者や溶接検査技術者の重要性が認識されてきた。表 4 には、わが国の溶接要員認証制度の主なものを示す³⁾。

溶接要員の中で重要な役割を持ついくつかの資格者について要点を解説する。

(1) 溶接管理技術者

ISO14731 (JIS Z 3410) で、溶接管理技術者の任務と責任が規定されている。その業務は ISO3834 (JIS Z 3400) 「溶接の品質要求事項－金属材料の融接」での規定と合致していて、溶接施工だけでなく、工事の契約内容の確認からデザインレビュー、生産計画、下請契約、材料管理、溶接設備、要員管理、試験・検査、記録・文書管理等、多岐にわたっている。溶接管理技術者は単に溶接の施工管理をするだけでなく、その前後の関連業務にも関与し、広い視野で総合的に管理業務を行う役割を担っていることを自覚すべきである。

日本での代表的な認証は、ISO14731 (JIS Z 3410)/WES8103 による溶接管理技術者認証制度で、認証等級として 3 等級 (特別級, 1 級, 2 級) を定めている。この認証者はわが国だけでなく、近年はアジア各国でも増えつつあり、日本から発信した国際的な資格の一つとなりつつある。

(2) 溶接作業指導者

溶接作業指導者に求められる資質は、溶接技能者としての実績を持ち、生産現場の経験も豊かで技術的、技能的に優秀であることである。実工事の溶接作業の監督者として欠かせないが、とくに重要なのは新人・若手の指導・育成および技能の伝承であり、今後その重要性はますます増大すると思われる。WES8107 では、溶接作業指導者の任務と職務能力を表 5 のように定めている³⁾。

(3) 溶接技能者

いかに溶接の自動化、ロボット化が進んでも、溶接技能者の重要性は変わらない。溶接作業はそれほど単純な作業ではなく、いまだに多くの溶接構造物は溶接技能者の手に依存している。知識、経験、技量を持った溶接技能者が、溶接姿勢、継手精度、作業環境などに応じて適切な判断をしながら施工して、はじめて良い品質の継手が得られる。

ただ、溶接技能者は技術検定 (技能認定) や訓練施設内での評価だけでは、重要構造物の溶接能力としては不十分である。多くの実工事の経験により技量が完成される。溶接管理技術者や溶接作業指導者は、平素から溶接技能者の品質記録を整理し、把握しておくことが必要である。また、技量向上のための教育・訓練計画を立案し、実施、フォローするとともに、個人の能力の幅を広げさせ、自動化機器の習熟等生産性向上に寄与できる多能工化を目指すことも重要である。

なお、自動溶接装置や溶接ロボットの操作 (教示、条件設定を含む) を行う要員についても技能や知識が要求される。

(4) 溶接検査技術者

設計図面、仕様書の要求通りに溶接施工が実施されているか、開先精度検査、溶接部外観検査、寸法検査や破壊試験の立会いなどを行い、非破壊試験結果も勘案して、総合的に溶接品質を評価し、記録に残す役割を持っている技術者である。溶接施工者自身とは異なる客観的な視点で溶接部を検査することが求められている、いわゆる Welding Inspector であり、欧米では資格制度が早くから定着している (例えば、AWS-CWI)。近年の溶接構造物に対する品質要求の向上にとともに、わが国でもこのような任務を持つ技術者の重要性が高まっていくものと思われる。

(5) 非破壊検査技術者

溶接構造物の非破壊検査技術者は、非破壊試験および各種検査技術についての専門的知識、経験はもとより、溶接技術についてもそれらを保有する必要がある。日本非破壊検査協会では JIS Z 2305 などにより、非破壊検査技術者の技術検定、資格認証を行っている。また、日本溶接協会では WES8701 により非破壊検査事業者の認定制度を実施している。

2.7 試験・検査計画

溶接施工前には溶接施工法試験、材料のミルシート照合確認、開先検査があり、施工中には裏はつり検査がある。溶接後には溶接構造物が計画どおりの性能を備えているかを確認するための各種試験・検査がある。試験・検査計画とは、施工計画の段階で試験・検査の項目、適用時期、条件、判定基準を確認、決定しておくことである。

ここでは計画段階での留意事項を次に示す。

- ① 試験方法によっては図面変更など設計段階の問題に派生してくることが多い。溶接はできても放射線透

表 5 溶接作業指導者の任務と職務能力³⁾

任 務	溶接及び関連作業の指導・監督並びに溶接管理技術者に対する実務的助言
職務能力	溶接作業に関する十分な経験と溶接施工及び管理に関する一般的知識
工場における溶接作業グループの班長、小規模溶接工事の現場監督などを想定した主な業務となる。	(a) 仕様書、図面及び溶接施工要領書内容の作業者に対する指示・徹底 (b) 材料および溶接材料の確認並びに溶接関連機器の点検 (c) 施工条件詳細の微修正及びその指示並びに安全衛生も考慮した溶接作業の監督 (d) 作業結果の確認及びチェックシート類の記録又はその確認 (e) 計画に対する改善提案及び異常発生の際の状況把握と報告 (f) 技量向上のための溶接作業指導者の教育・指導

過試験のX線フィルムが設置できないとか、溶接ビードをグラインダ仕上げしないと基準に合った試験結果が得られないといった問題は常にある。

- ② 溶接してから、どの時点で非破壊試験を適用するかも、施工計画の際に考えるべきことである。日程計画のところで述べたように高張力鋼溶接部の遅れ割れへの配慮のために試験時期に制限があることや、溶接以外の工程（たとえば研掃、塗装工程、保温、保冷材などの取付け工程など）との調整を事前しておかないと、後になって工程の混乱が生じ、ひいては溶接の品質に悪影響を及ぼすおそれがある。
- ③ 作業場所の安全に対する配慮。放射線透過試験では放射線被曝の危険からの回避が必要であり、法令に準拠して計画する。また、圧力容器、配管などでは耐圧試験中の破壊事例が見られている。耐圧試験に水を用いるか、水以外の油などの液体を用いるか、空気、窒素、ヘリウムなどの気体を用いるかは耐圧試験の条件や破壊の危険を考慮して選択する必要がある。圧力が高いとか、破壊の危険がある場合には水や油などの液体による試験が適用される。冬季には水や油の温度を高めて試験することもある。

3. 溶接施工管理

溶接施工管理は、溶接施工計画を基にして実行に移されるが、溶接施工特有の管理の要点を良く把握することが重要である。ここでは溶接品質を確保する観点から、溶接施工の実施過程（工程）での管理項目として、①材料（被溶接材）の管理、②溶接材料の管理、③溶接設備の管理、④材料加工と溶接準備の確認、⑤溶接施工の管理、⑥溶接結果の確認と記録をとりあげ、それぞれの管理の要点を示す。

3.1 材料（被溶接材）の管理

母材となる材料は（被溶接材）は、変形、腐食、劣化などの損傷を受けないように保管され、識別され、誤使用されないことが必要である。

(1) 保管管理

材料の種類に応じた保管管理が重要である。留意事項の例を次に示す。

- ① 鋼材を屋外に長期間保管する場合には腐食を防止するために防錆塗装やカバーなどの対策を講ずる。
- ② ステンレス鋼は、錆びの発生しやすい炭素鋼とは分離して保管する、また鉄粉が飛散してくるような場所には置かない。鉄粉や鉄錆の付着は「もらい錆」の原因となる。
- ③ アルミ合金は雨や水分で腐食が進行するので必ず屋内に保管する。

(2) 識別管理

設計図面に記載されているとおりの材質、種類、板厚の材料を誤りなく使用することは、溶接施工管理の第一歩といえる。

鋼材に限らず、材料は外観では識別が困難なものが多い。万一、溶接構造物に事故が生じた場合、原因追究のためにも納入された材料から分割された部材に至るまで

の追跡調査ができる（トレービリティのある）管理が必要である。

識別管理でまず重要なことは、納入された材料をミルシートと照合し、現物確認をすることである。切断、曲げなどの加工作業にかかる前にも確認することが必要である。次に重要なことは、切断によって分割された材料の誤使用防止対策である。部材の誤使用防止のための識別管理としては次のようなものがある。

- ① 切断した部材すべてに鋼種等をマーキングする。
- ② 鋼種別に表面のプライマやマーキングの色を変える（色別管理）
- ③ マーキングがメッキや熱処理で消える場合には、ポンチやタグで管理する。この場合、高張力鋼などではポンチやたがねの使用が制限されることがあるので注意を要する。
- ④ 切断後の残材についても、後日使用する時のため、あるいは治具等で用いる場合のことを考え、鋼種や圧延方向をマーキングしておく。
- ⑤ 最近では、部材を、ICタグやバーコードで管理することもある。

3.2 溶接材料の管理

被覆アーク溶接棒やフラックスは、水に濡らしたり大気中に放置したりすると吸湿し、アーク熱で水分が分解して水素を発生し、それが溶接金属に入り込み、欠陥発生の原因となる。とくに、高張力鋼の溶接材料では、その水素が低温割れの発生原因の一つとなるので、吸湿防止のための取り扱い、乾燥、保管に厳重な管理が必要である。

溶接棒は被覆剤中の水分を除去するため、その製造工程において被覆剤成分が変質しない範囲で高い温度による乾燥が行われている。しかし、被覆溶接棒は出荷後作業現場で使用されるまでに、温度、湿度、時間に応じて被覆剤が水分を再び吸収する。したがって、この水分を除去するために、使用前にもう一度乾燥（再乾燥）を行わなければならない。この乾燥条件は、溶接材料の種類によって標準的な適正範囲が規定されている。

低水素系溶接棒については、乾燥後ただちに使用しないときは100～150℃の温度に保たれる保管容器に入れて吸湿を防ぎ、そこから適宜取り出して使用する。取り出した後の大気放置時間も制限する必要がある。通常2～4時間である。この制限時間を越えた場合には、上記基準に従って再乾燥をしなければならない。

溶接材料についても誤使用の防止のため識別管理を行わなければならない。被覆アーク溶接棒の場合は、棒端色による管理、乾燥庫や保管庫では銘柄別に置き場所を区分けするなどの方法で管理されている。

3.3 溶接設備の管理

溶接設備及び関連する付帯設備の管理は、溶接管理技術者の重要な責務の一つである。作業に使用する機器、装置を常に整備、校正された状態にしておくことは、作業の安全性面からも溶接品質、能率面からも不可欠である。

具体的に管理すべき内容の主なものを次に挙げる。

- ① 溶接機、溶接装置の計画的な整備

- ② メータ類が正しく校正されていること
- ③ 消耗部品の管理
- ④ 付帯設備の整備・調整
- ⑤ 日常点検, 始業点検の徹底

3.4 材料加工と溶接準備の確認

材料は溶接される前に所定の形状に切断される。曲げ加工される部材もある。被溶接材は開先加工され、適当な定盤や治具を利用して組立てられ、タック溶接されて溶接準備が完了する。

溶接の自動化、ロボット化の進展により、溶接前の開先精度、取付け精度が継手品質に大きく影響するため、これらの工程はますます重要となっている。

(1) 材料の切断と曲げ加工

1) 切断

切断は、熱切断または機械切断により行われる。一般の鋼構造物では、酸素アセチレンや酸素プロパンなどのガス切断で行われることが多い。切断の高速化、高品質化、高精度化のために熱ひずみの少ないプラズマ切断やレーザー切断の普及が進んでいる。

切断ノッチや切断ひずみなどは後工程の溶接品質や能力に大きな影響があるので、切断法や切断条件に十分な配慮が必要である。各切断法の特徴、長所、短所をよく把握し、材料の種類、板厚に応じた切断法を採用する必要がある。

2) 曲げ加工

曲げ加工は、一般にプレス、ローラなどによる機械的方法あるいはガスバーナによる線状加熱法などの熱的方法が単独または併せて用いられる。

機械的方法では、加工装置の能力と加工度に応じて材料の強度やじん性も考慮して冷間加工か熱間加工かを定める。鋼材の冷間加工では、ひずみ時効により材質劣化、とくに低温じん性の劣化があるので、加工の程度には注意を払う必要がある。490~780 N/mm²級高張力鋼の場合、じん性要求にもよるが、加工ひずみの許容量として5%程度までとされることが多い。加工前の注意事項としては、縁部からき裂が入ることがあるので、縁部に丸みをつけておくことを忘れてはならない。また、加工傷を付けないこと。押し治具に傷がないか、被加工材の間に異

物を巻き込んでいないかといったことにも注意を払う。

熱的方法の場合、部材の加熱温度の管理が重要である。例えば、調質高張力鋼は焼き戻し温度を超える温度で熱間加工してはいけない。TMCP鋼では600℃以上に加熱すると、強度やじん性を損なう場合がある。また、一般鋼材でも青熱ぜい性温度域(150~350℃)での加工を禁止する場合がある。

(2) 開先加工および開先精度

1) 開先加工

V開先、X開先などの開先加工は、熱切断で行われることが多い。U開先など曲面の場合は機械加工で行われる。開先面に深いノッチがあると、割れ、融合不良などの溶接欠陥の原因となる。切断スラグが付着したままの開先で溶接するとブローホールなどの発生を助長する。開先切断においては、ベベル角度、ルートの大さきなどの精度確保がとくに重要である。

2) 開先の清掃

開先面およびその近傍の異物(水分、油脂、錆び、塗装、ごみなど)は、溶接欠陥の原因となるので除去しなければならない。とくに開先部に存在する隙間内の水分や塗装などは気孔の発生を招き、ときには割れの原因となる。

ワイヤブラシで清掃する場合、ステンレス鋼、チタニウム合金などの材料に対しては同材質のワイヤを使う必要がある。これは炭素鋼ワイヤブラシを使用すると、異金属への象嵌(ぞうがん)による発錆(もらい錆)を生じるからである。

製作中に錆が発生しないように鋼材に塗装する一時防錆塗料(ショッププライマ)も除去しないとブローボール等の発生につながる。除去しなくてもよいように配慮された溶接性の良好なプライマもある。この場合にはそのまま溶接して良いが、膜厚が厚い場合(例えば20μm以上の場合)には、除去しないと欠陥が発生する。

3) 開先精度・取付け精度管理

開先精度・取付け精度がよくなると、溶接作業量の増加、溶接欠陥の発生、溶接変形の増大、製品としての寸法不良など、溶接品質全般に悪影響を及ぼすばかりでなく、ひずみ取り作業や手直し溶接が必要となり、溶接コ

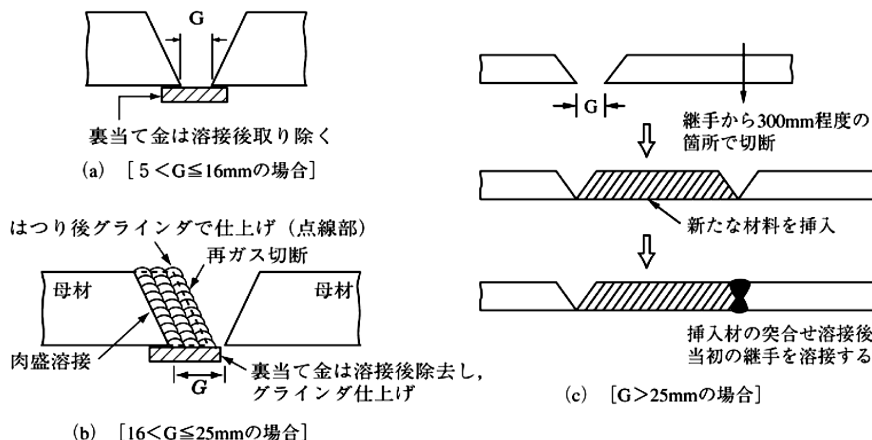


図4 突合せ継手のルート間隔過大の場合の処理方法³⁾

図5 裏当て金の使用方法³⁾

ストは著しく増える。

開先精度・取付け精度管理は、開先角度あるいはベベル角度、ルート面寸法、ルート間隔、目違い（くい違い）が、溶接施工要領書、仕様書、適用基準の要求範囲内に収まっているかを確認する。

4) 開先精度・取付け精度不良の修正

開先精度・取付け精度が要求されている範囲内に収まっていない場合は修正加工を行うか、継手の取付けをやり直して範囲内に収まるように修正しなければならない。

ルート間隔が過大となった場合の処理方法の例を図4（突合せ継手の場合）に示す³⁾。

裏当て金を用いる場合は、図5に示すように裏当て金も一部が溶けて溶接金属となるので、裏当て金の材料は溶接する材料と同質のものを使う必要がある。また、隙間が生じないように精度よく取付ける必要がある³⁾。

(3) 組立、タック溶接、エンドタブ

部材を組み立てるとき、定盤や各種溶接治具の活用は極めて重要である。その目的は主に次の3点といえる。

- ① 溶接をできるかぎり下向姿勢で行えるようにする。
- ② 溶接によって生じる変形を拘束し、または適当な逆ひずみを与えることによって製品の精度を高める。
- ③ 作業を単純化あるいは自動化して能率を向上させる。

タック溶接については、そのビードが本溶接時に溶融して継手内部に取り込まれる場合には、次のような注意が必要となる。。

- ① タック溶接が割れないように必要で十分な長さのビードを適切な間隔で配置する。高張力鋼では過度の硬化と割れ防止のため、タック溶接の最小ビード長さを40～50mmとしている。TMCP鋼の場合にはより短い最小ビード長さを規定している基準もある。
- ② タック溶接の品質は本溶接と同様に重要なので、本溶接と同等の溶接材料で行う。重要な継手、マグ溶接継手サブマージーク溶接継手あるいは厚板継手のタック溶接を被覆アーク溶接で行う場合は低水素系溶接棒を使用する。
- ③ タック溶接は、原則として本溶接と同じ技能資格を持つ技能者が行うことが望ましい。
- ④ 本溶接で予熱が必要な場合のタック溶接は、急冷によるタックビード部の硬化、割れを防ぐため、本溶接の予熱温度より30～50℃高い温度で予熱をする。

突合せ溶接の始端部および終端部にはエンドタブを取付ける。エンドタブの目的としては次が挙げられる。

- ① 端部は溶接金属が垂れやすく適切なビード形状が得にくいため、エンドタブでそれを形成しやすくする

ため。

- ② アークのスタート時は不安定でブローホールや融合不良の欠陥が発生しやすいので、エンドタブ上でアークの発生を行うため。
- ③ ビードのクレータ部には割れなどの欠陥が発生しやすいので、エンドタブ上にクレータ部をもっていくため。
- ④ 大きいエンドタブを取付けると、終始端部の溶接変形や磁気吹き防止にも効果がある。

エンドタブの材質は、母材と同材質のものを用いるのが原則である。最近セラミックス製のタブも使用されている。

(4) 一時的取付品の溶接と除去

部材の組立て、運搬や、足場などの架設のため、治具、ピース類などの一時的取付品を溶接することがある。これらの溶接は一時取付品を固定するのに必要な強度を持つのみならず、母材に有害な影響を与えないような溶接法、溶接材料および施工条件で行うことが要求される。技能資格をはじめ、原則的にタック溶接の場合と同様の管理が必要である。

工事完了後、このような一時取付品は除去されるが、その際には母材に傷をつけないように注意して除去する必要がある。母材に傷をつけた場合は、グラインダで除去したり、長めのビードで埋めたりして、その後平滑に仕上げる。深い傷の場合は補修溶接をして、平滑に仕上げる必要がある。母材が高張力鋼の場合には、仕上げた後にMTやPTで傷が残っていないことの確認が必要である。

3.5 溶接施工の管理

(1) 材料の溶接性の把握

溶接施工を適切に管理するためには、まず使用材料の溶接性を良く把握することが大切である。同じ材料の溶接部であっても、溶接施工の条件が違えば、さまざまな凝固収縮過程や熱履歴を受けるため、さまざまな顕微鏡組織を呈し、強度、延性、じん性など機械的性質の変化や、さまざまな変形、残留応力を生じ、甚だしい場合には割れなどの溶接欠陥につながることもある。

材料の溶接性の把握には、溶接用CCT（連続冷却変態）図が利用される。この図には、さまざまな溶接冷却速度によって生じた、さまざまな顕微鏡組織、硬さが示されており、健全な溶接品質を確保するための適切な冷却速度を知ることができる。

ここでCCT図の考え方を使って、溶接施工の管理という観点から、溶接部の冷却速度と継手の健全性の関係を概念的に示したのが図6である³⁾。厚板を小入熱で予熱せ

ず溶接すれば、溶接部は急冷され、硬化や低温割れの恐れがある。逆に、大入熱でパス間温度が高すぎると、溶接部は徐冷され、結晶粒が粗大化し、軟化やぜい化の恐れが生じる。したがって、適正な冷却速度領域を把握することにより、健全な継手品質が確保できる。高張力鋼あるいは低合金耐熱鋼においては、炭素当量（あるいは P_{CM} ）値や強度が高くなるほど、適正冷却速度領域は狭くなる。溶接後のPWHT（溶接後熱処理）等も含めると、溶接施工管理の基本は、適正な熱管理の実施である。

(2) 予熱

溶接割れの防止対策として施工上もっとも重要なことのひとつが予熱である。予熱を行うと、熱影響部の急冷による組織の硬化が抑制され、また冷却時間が長くなることによる拡散性水素の放出も促進される。

低温割れ防止以外の予熱としては、溶込み不良や融合不良を防ぐ目的で行われる予熱がある。通常は予熱を必要としない場合においても、開先部やその近傍の結露や湿気を除去するため、開先付近を40℃程度に加熱することがあるが、この加熱施工はウォームアップと呼ばれ、一般の予熱とは区別されている。

予熱温度は、母材の種類によって単純に決まるものではなく、溶接する構造物または部材の大きさ、板厚、溶接法、溶接材料、溶接条件、作業環境条件によって変えるべきものである。また、低温割れに関係する溶接熱影響部（HAZ）の硬さおよび溶接金属の拡散性水素量は、母材の化学成分、溶接材料に含まれる水素量、大気中の湿度、溶接冷却速度などによって変化し、さらに割れに

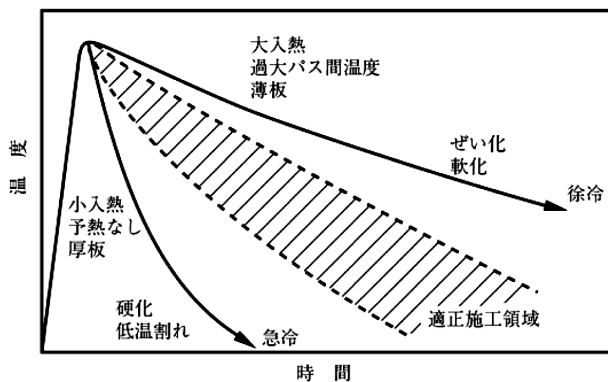


図6 溶接部の冷却速度と継手の健全性³⁾

は部材の拘束の影響も加わる。したがって、予熱温度はこれらを総合的に考慮して決められるべきである。

(3) パス間温度

多層盛溶接の場合、一つの間接パスの溶接を始めるときには、通常その前のパスで溶接した下層のビードや開先近傍の母材はまだ熱い。そのときの下層ビードや開先近傍の母材の温度のことをパス間温度という。したがって、パス間温度が設定されるのは多層盛溶接の場合だけである。

例えば、「パス間温度は、100℃～350℃」のように下限温度と上限温度で設定される。予熱と同じ目的のために設定されるものが下限温度である。予熱が規定されている場合、パス間温度は予熱温度以上に維持されなければならない。

上限温度は、多層盛溶接で下層溶接ビードの温度が高い状態のままで、すなわち、パス間温度が上限温度より高い状態で、次のパスを置くとビードがさらに加熱され過熱状態となり、冷却速度が遅くなり過ぎて、溶接金属部の結晶粒の粗大化を招き、溶接金属とボンド部のじん性低下、強度低下が生じるので、これを防止するために管理する温度である。

(4) 溶接条件

溶接条件には、溶接電流、アーク電圧、溶接速度、予熱温度、パス間温度、溶接後熱処理条件、裏当ての有無、シールドガスの流量、電極数、電流の極性、パス数、層数など多くのものがある。母材の種類、板厚、溶接法、溶接材料、溶接姿勢、溶接装置、開先形状などに応じて、これらの溶接条件は溶接施工要領書に定められ、実際の施工はその施工要領書に従って行われなければならない。

溶接条件は、一般に適正条件範囲として示されるが、その範囲の中心値が常に最適値とは限らない。開先の状態や積層の仕方によって適正条件範囲内のどこの条件で施工するかを適切に選択して施工しなければならない。

溶接条件の管理は、溶接作業管理の中でもっとも重要である。溶接が溶接施工要領書どおりに施工されていることを確認することともに後述するように重要な継手については施工した溶接条件を記録して残すことが必要である。

(5) 溶接順序と溶着法の選定

溶接の実施においては、溶接構造物のどの継手から溶接を行っていくか、また1本の溶接線をどのような積層

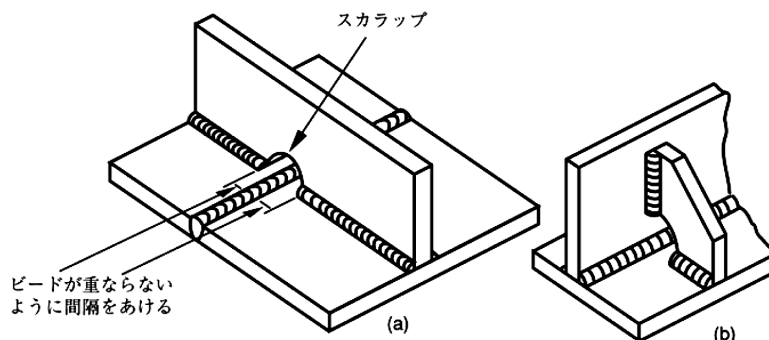


図7 スカラップの例³⁾

手順で溶接するか、という2種類の順序を考えなければならぬ。前者を溶接順序、後者を溶着法（または溶着順序）という。

1) 溶接順序

溶接順序を誤ると、部材、構造物全体の变形や大きな残留応力を生じ、過度の拘束による割れの原因となるおそれがある。溶接順序の選定は構造物が正しい形状を保つこと、著しい拘束が生じないこと、溶接欠陥が発生しないことなどを総合的に考慮して決定しなければならない。

溶接順序選定の基本的な考え方を次に示す。

- ① 部材、構造物の中央から自由端に向けて溶接する。すなわち、収縮変形をなるべく自由端に逃すようにする。
- ② 溶着量（収縮）の大きい継手を先に溶接し、溶着量（収縮）の小さい継手を後で溶接する。
- ③ 著しい拘束応力を発生させない順序を選ぶ。
- ④ 未溶接継手を通り越して溶接しない順序を選ぶ。

突合せ継手とこれに交差する方向のすみ肉継手がある場合、図7(a)のように、半円状の切り抜きを設けることがある。これを「スカラップ」という。図7(b)のように、すみ肉溶接同士の交差部に設けるものもスカラップである³⁾。スカラップの目的は、溶接線の交差部に不溶融部や溶接欠陥を残さないためである。スカラップで注意すべき点は、スカラップのすみ肉溶接の角まわし溶接が不良の場合はそこが切欠きとなるので、角まわし溶接は丁寧に行わなければならないことである。

スカラップには応力が集中し、繰り返し荷重下では疲労き裂の発生源となる恐れがある。そのため、スカラップは設けない工法やスカラップを設けても最後にそれを埋める工法が採用されることも多いが、交差部に溶接欠陥を残さないような慎重な施工が要求される。

2) 溶着法

溶着法には、溶接線方向に対する溶着法である前進法、後退法、対称法、飛石法と多層盛における溶着法である全長多層法、ブロック法、カスケード法とがある。

後退法および対称法は、横収縮を溶接線について均等にすることを狙った方法である。飛石法は、溶接熱を分散させて横収縮を均等にし、回転変形も小さくし、また薄板で問題となる縦収縮による座屈変形も小さくする方法である。

多層盛溶着法のブロック法およびカスケード法は、厚板の溶接に用いられる。溶接ビードの継ぎ目をずらして継目部の溶接欠陥の発生を防ぐために考えられた方法である。

厚板の溶接で拘束が大きい場合には、連続して多層盛の初層だけ、あるいは2、3層までだけで放置すると遅れ割れが発生しやすいので、ブロック法またはカスケード法で板厚の半分以上まで積層しながら溶接を進めていくことが割れ防止に効果がある。

(6) 裏はつりと裏溶接

突合せ継手の被覆アーク溶接やマグ自動溶接の初層は融合不良、スラグ巻き込み、ブローホール、割れなどの欠陥を生じやすい。また、タック溶接ビードも取り除く

のが望ましい。したがって、重要な継手では裏当て金付き溶接の場合と完全な裏波が得られる片面溶接の場合を除いて裏はつりを行わなければならない。

裏はつりの際に注意すべき点を次に示す。

- ① 初層溶接部とタック溶接部に発生した欠陥はすべて除去する。
- ② 裏溶接がやりやすいように、裏はつりした溝（裏開先）は裏面積に広がった形状にしなければならない。
- ③ エアアークガウジングで裏はつりした場合には、裏はつり面へ炭素、銅粉が付着していたら除去する。
- ④ 裏はつりを行った後、裏溶接を開始する前に必ず裏はつり面の表面検査を行い、欠陥が除去されているかどうかを確認する。これを、裏はつり検査という。目視試験、MT、PTなどで行われる。

(7) 溶接後の熱処理

溶接後の熱処理には、溶接直後に行う「直後熱」と応力除去焼きなましである「PWHT」（溶接後熱処理）がある。

1) 直後熱

直後熱は、低温割れが生じやすい厚鋼板の溶接などにおいて、溶接終了直後に継手部とその周辺を加熱して、溶接部の急冷による効果を防ぎ、水素の放出を促すことを目的として行われる。溶接終了後すぐに溶接部を250～350℃で30分～1時間程度加熱保持してその後除冷する。

2) PWHT（溶接後熱処理）

PWHTは、応力除去焼きなましと呼ばれるように、溶接残留応力の除去を主目的として行われるが、溶接熱影響部の軟化、溶接部の延性およびじん性の向上、水素の除去などにも効果がある。したがって、応力腐食割れ、低温割れ、遅れ割れなどの防止にも有効である。加熱保持温度、保持時間、加熱速度、冷却速度、炉外への取り出し温度などが材料の種類や板厚によって規定されている。

オーステナイト系ステンレス鋼では、通常は溶接後熱処理を行わない。しかし、過酷な腐食環境で使用する場合や、炭化物やぜい化相が析出した場合、冷間加工によって硬化した場合は、固溶化熱処理、安定化熱処理または応力除去熱処理が行われる。

(8) 溶接部の仕上げ

工事に適用されている要求仕様や品質基準に従って、ビードを検査し、その範囲内に入っているかどうかを確認し、もし入っていない場合は、グラインダなどでビード形状の修正仕上げを行わなければならない。

繰り返し荷重がかかる継手の場合は、ビードの止端部が応力集中部となりやすい。止端部形状は疲労強度に大きく影響する。さらに、止端部にアンダカットがあると疲労強度は著しく低下する。したがって、余盛のある突合せ継手では、余盛高さは低くし、ビード形状もなだらかにして、止端部の余盛角（フランク角）を大きくし、かつアンダカットのない溶接部にしなければならない。すみ肉継手についても同様に、なだらかでアンダカットのない止端部形状にする必要がある。とくに高い疲労強

度が要求される突合せ継手では、余盛は削除され平滑な面に仕上げられる。

(9) 溶接作業の記録

溶接作業の記録（溶接施工記録）は、品質記録として重要な記録の一つである。作業日、作業場所、開先形状、溶接条件、熱処理条件、作業者の技能資格、などは、規定により、また必要に応じて記録し整理・保管されなければならない。記録は「特殊工程」に対する要求事項の一つである。

厳しい品質が要求される場合には、溶接継手ごとに溶接記録を残すことが求められる。この場合には、対象となるすべての継手に識別のための継手番号を付け、継手ごとに溶接施工要領書番号、開先形状確認結果、溶接材料の製造番号、溶接技能者名、施工日時などを記録する。溶接後熱処理や非破壊検査についての記録も行う。

3.6 溶接結果の確認と記録

(1) 品質の確認

溶接施工および溶接結果の品質確認は、次のような段階に分けて実施されることが多い。

- ① 溶接技能者自身による自主管理チェック：溶接前の溶接機や道具類の日常点検、溶接前の開先形状の確認、溶接結果の目視検査など。
- ② 品質管理担当者あるいは溶接検査技術者による品質確認：作業者の技能資格の確認、溶接施工要領書記載内容と実施工条件の照合確認、溶接中の品質確認、溶接結果の外観品質と寸法精度の確認など。
- ③ 非破壊検査による表面品質、内部品質の確認：資格を有する非破壊検査技術者が実施する、RT、UT、MT、PTなど各種非破壊検査方法による品質確認。
- ④ 上記に加えて、客先の検査員や第三者機関による品質の確認検査が行われる場合も多い。

溶接管理技術者は、上記全ての段階の品質確認に関与し、総合的に溶接品質を確認、把握しなければならない。

(2) 品質基準

品質基準は、製品によっても異なるし、客先の仕様書によっても変わる。したがって、適用される規則、基準、客先仕様書、設計指示書などに合致した品質基準で作業を行わなければならない。

(3) 品質記録

溶接施工がどのように準備され、作業がどのように行

われ、どのような結果であったのかは記録に残さなければならない。それらの記録は品質記録と呼ばれ、製品の品質保証のために欠くことができないものである。

品質記録の主なものには次のようなものがある。

- ① 母材の材料証明書（ミルシート）
- ② 溶接材料の材料証明書
- ③ 溶接施工要領および承認記録
- ④ 溶接技能者の適格性証明書
- ⑤ 非破壊検査要員の適格性証明書
- ⑥ 溶接施工記録
- ⑦ 非破壊検査結果の記録
- ⑧ 熱処理記録
- ⑨ 寸法検査記録
- ⑩ 補修した場合の補修記録

これらの記録は、万一溶接部に関連する損傷や事故が起こった場合に、その原因を遡って追究するのに用いられる。このように、記録により遡って事故原因を追究できることを「トレーサビリティがある」という。トレーサビリティがあることは、品質保証のために欠くことのできない重要な項目の一つである。

4. おわりに

本稿はISO3834 (JIS Z 3400)「溶接の品質要求事項－金属材料の融接」の規定を念頭に、施工計画、施工管理の実際的な運用の要点を解説した。溶接製品（あるいは構造物）の設計、施工、検査等に携わる方々の参考になれば幸いである。内容の大部分は下記引用文献2)と3)の該当箇所を要約したものであり、紙面に限りがあるため、説明が至らなかったところも多い。ぜひ、原文を参照いただくようお願いしたい。

参考文献

- 1) 和田宏一：溶接品質マネジメントシステム，溶接学会誌，77-3 (2008)，pp.248-253.
- 2) 溶接学会編：新版溶接・接合技術特論，産報出版，(2008).
- 3) 溶接学会編：新版溶接・接合技術入門，産報出版，(2008).
- 4) 寺井，山田：現代溶接技術体系第19巻「溶接の生産性」，産報出版，(1980).