

溶接施工上の問題点について

三菱日本重工・横浜造船所* 小 田 道 隆

1. は し が き

今日では、建築、橋梁、ボイラー、鉄管、水門扉、貯蔵タンクなどの鋼構造物の生産には、溶接が広く用いられている。船の建造においても溶接は不可欠のものである。昔は鋳物でなければ作れなかった複雑な形のもので溶接で簡単に組立てられ、ボルトや鋲による接合方法に比べて、溶接は材料も人工も節約できる上に、水洩れの心配もないので、戦後、鋲に代って溶接の採用は急速に広がった。

しかし、溶接は鋲にはなかった短所も持っている。ヒズミが出ることも欠点の一つであるが、ワレやすいということが一番大きな欠点である。

戦時中、寒冷地においてドイツ軍戦車が発砲と同時に砕けた事件があり、戦後にも橋や船が突如として二つに折れるという事故がたくさく起きたので、各国で損傷対策が研究されたが、とくに米国海軍では研究者を動員して損傷原因を究明するとともに損傷防止の対策をたて、1943年に米国船級協会がつくった造船における溶接の「指導者」(Supervision of Welding in Ship Building)は当時の日本造船界における溶接施工上の基準にも大きな影響を及ぼし今日に至っている。

しかし、当時の基準はその後10年間にわたるわが国における溶接船建造の経験と、溶接工作法および損傷に対する多くの研究から振りかえってみれば、誤った部分やきびしすぎる部分も相当に見受けられる。この点に着目して、日本溶接協会・造船部会・溶接施工委員会(委員長は阪大 渡辺教授)では、それら溶接施工上の問題点を取りあげて検討した結果を昭和37年に「船体溶接施工上の二・三の問題点」として発表した(溶接技術, 37年4月号, p.265 参照)。その内容は、現在著しく改善された鋼材、溶接材料と日進月歩の溶接技術の上に立って、従来の溶接に対する考え方に対して、新しい見解を示したという点で大きな意味がある。

ここにその「二・三の問題点」のあらましを説明するが、造船以外の産業の関係者の方にも良い参考になると思う。

* 横浜市西区緑町3

2. 残留応力および溶接欠陥に対する 考え方のうつりかわり

鋼材を溶接する場合には、継手(つぎて、合わせ目)を局部的に溶融状態にして接合するために、溶接部は変態点をこえる高温状態となり、溶接作業が終ると急速に冷えてゆく。このために、溶接部は材質的に変化してしまふ。一方、溶融された部分は冷却するにつれて収縮したがるが、すでに冷えて固まった溶接部や母材自身はその収縮を邪魔するので、冷却の途中でも熱応力が発生し、すっかり冷却しても応力が残留する。つまり縮みたいものと縮ませまいとするものが斗争状態のまま同居している恰好になっている。

溶接構造物の損傷は、このような溶接の本質的な性質よによるものである。とくに過去に数多く発生したような、一大音響とともに瞬時にして船体が二つに折れたり橋が落ちたりする脆性破壊(ぜいせいはい)では、破壊部が煮餅をちぎったようではなくて、ガラスを割ったようなもろさを示すものであって、降伏点以下の応力でも、脆性破壊を生じることが明らかになり、また溶接部の小さな割れさえもその原因になることがわかった。このため、溶接施工法(つまり溶接のやり方)の基準には、溶接による割れの発生、とくに脆性破壊の防止ということが強く打ち出されてきたのであるが、従来までの考え方は次の3つにまとめられる。

- (1) 残留応力は、脆性破壊ならびに坐屈などの原因になるかも知れないので、溶接部の残留応力はできる限り小さくするようにする。
- (2) 溶接部のワレなどの欠陥は、脆性破壊の原因となるから、溶接欠陥は少なくなるようにする。また、残留応力が大きくなるような施工法は、溶接ワレ発生を助長するので、残留応力を小さくすることはこの点からも望ましい。
- (3) 溶接は母材に材質的な変化を与え、溶接部の強さ、伸び、ねばさを低下させるので、ひどい材質変化を与えることはできる限り避ける。

これらの考え方については、現在でも本質的な変りは

ないが、戦後の溶接船建造の初期と現在とでは、それらの重要度の評価が大きく変わってきている。すなわち、溶接に関して現在では、10数年前に比べて下記のような変化がある。

- (a) 母材として溶接がしやすく、ねばり気があって、ワレが進展しにくい鋼材が生産、使用されるようになり、脆性破壊の防止に大きなはたらきをしているのはもちろん溶接欠陥の防止にも役立っている。
- (b) 溶接部がワレ難く、しかも溶接作業のしやすい優れた溶接棒が開発、使用されて溶接欠陥がかなり減少した。
- (c) 溶接部に対するX線検査が実用化され、欠陥と強度との関係ははっきりつかめるようになったので、溶接部の品質が著しく向上した。
- (d) 脆性破壊に関する研究が進み、脆性破壊におよぼす残留応力の役割がかなり明らかになった。
- (e) 千数百隻の溶接船を建造し、その建造経験と就航状態の調査により幾多の貴重な経験を得ることができた。

この結果、残留応力、溶接欠陥、溶接部の材質変化などに対する最近の考え方は次のようである。

(1) 残留応力と脆性破壊に対する考え方

残留応力は溶接に伴って必ず生ずるものであるが、残留応力のある溶接構造物では、或る温度以下になると、溶接部の欠陥により脆性亀裂を生じ、降伏点以下の応力でも破壊をおこすことがある。しかし局部的に亀裂が発生しても、外力によって構造物に生ずる平均引張応力が或る程度以下であり、しかも母材がねばい材料であれば、その亀裂が構造物全体にひろがることはない。

船体に生じる応力と就航温度から考えれば、現行の船級協会の構造規則によって設計し、また十分にねばさのある規格材を使用する限り、船体では大きな脆性破壊を生じることはまずないと考えられる。

次に、溶接ビード同志が近接したり、十文字に交差する場合でも残留応力が日立ってふえることもなく、材質が日立って悪くなることもない。従って普通と違った破壊のしかたをすることもなく、一般の継手と同様に取扱ってよい。すなわち、鋼材さえ十分にねばさのあるものを使用すれば、或る程度の残留応力や欠陥があっても大きな脆性破壊は生じない。

(2) 溶接欠陥に対する考え方 (図1参照)

脆性破壊の主な原因の一つは、滑らかな表面についた鋭いキズ、すなわち切欠き(ノッチ)の存在である。

(ガス切断の際のノッチのほか、溶接中のアンダーカット、溶込み不良、スラグ巻きこみ、ビード割れ、鋭いプロホールなどの溶接欠陥はいずれも切欠きを形成するし、材料寸法が急激に変化している不連続部分や、丸味

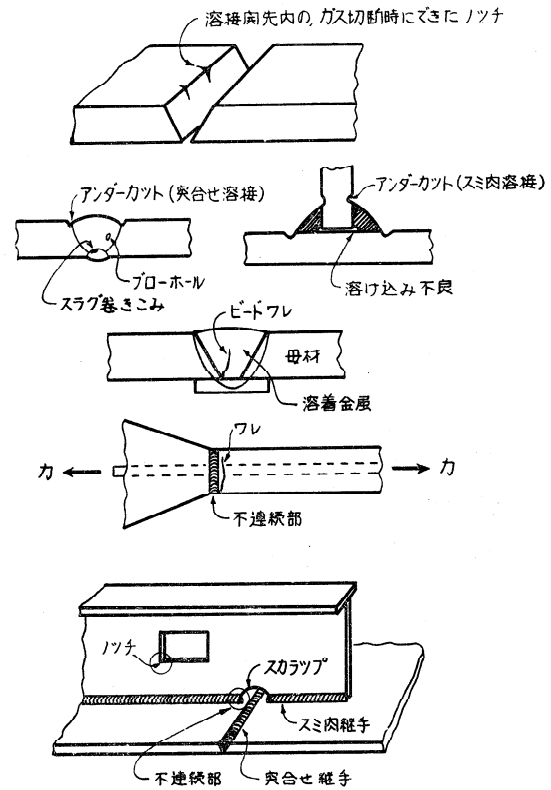


図 1 ノッチの説明

をつけない四角な孔もノッチと見なされる。)

切欠きの全くない鋼材は容易に脆性破壊をしないが、切欠きがあると非常にワレ易くなる。また溶接欠陥とくに亀裂は、疲労強度をはなはだしく低下させる。従って、とくに船舶や橋梁のように、外力が繰り返し繰り返し増減する構造では、溶接欠陥が極力生じないように施工法をとるべきである。

しかし一方では、戦後における溶接棒の発達と、鋼材品質の改善によって、溶接ワレなどの欠陥をかなり阻していることも事実であるから、この点に関連して、施工法の制限が相当に緩和される筈であることもまた認めべきである。

(3) 溶接による母材の材質変化に対する考え方

溶接による材質変化については、溶接部分が硬くなって伸びが足りず、もろくなることは事実である。これは加熱、急冷というちょうど焼入れ操作を施したような結果になるためであるから、炭素含有量の多い鋼材ほど硬くなりやすいわけである。しかし、現在の造船用軟鋼材は炭素含有量の少ないものが殆んどで(約0.2%以下)あるし、また厚さも40mm以下であって、寒冷には予熱(溶接にかかる前に溶接部の周囲をガスなどで温めておくこと。こうすれば溶接終了後、まわりとの温度差が小さくなるので溶接部はゆっくり冷える。)をして急冷を防いでいるので材質的な変化は実用上問題にはならな

い。近接ビードや交叉ビードによっては溶接部の硬化はむしろやわらげられる傾向があり、実船の就航実績からまず何んら問題となっていない。さらに溶接継手の脆性破壊実験においても、また実船の損傷においても、溶接のためにモロくなった部分を通して、脆性破壊が進展してゆくという傾向は認められない。従って現在の規格材を使用する限り、材質の変化はまず問題としなくても差支えない。

以上の新しい考え方を、溶接施工の面で具体的に述べると、

(1) 材料（鋼材、溶接棒など）の選定さえ正しく行なえば、残留応力の若干の増加は脆性破壊に対しては問題にしなくてもよい。従って、従来、残留応力の防止を主にねらって定められたと考えられる建造順序および溶接順序は、必ずしも厳格に守らねばならぬ要はない。

(2) 溶接順序および建造順序は、船体の溶接による変形を防止し、かつ、溶接部が亀裂や溶込み不良などの欠陥を極力つくらないように選ぶべきである。

(3) 溶接継手の集中や交叉などについては、その部分に切欠きのような欠陥が存在しない限り、残留応力および材質変化などの点で特に問題はないので、欠陥を残さないように注意して溶接すれば、特別な考慮をほらう必要はない。

(4) 溶接線の交叉をさけるために設けたスカラップ（図・1参照）はその必要はなく、構造上からも応力の不連続部分をつくることになるから、なるべく廃止するか、またはあとで溶接で埋めるようにするのがよい。

の4つにまとめられる。しかし、溶接構造物の損傷を防止する上に材料、溶接施工とならんで、もう一つの大切な要素は設計であって、過去の損傷例の多くが応力の集中部（不連続箇所）に生じている。従って、不連続構造物など応力の集中する箇所をできるだけ少なくすることが大切であって、良い溶接構造物は設計、材料、施工の三つの柱に支えられていると云えよう。

3. 溶接施工上の問題点

船体の溶接施工法に対する最近の基本的な考え方は前述の通りであるが、以下具体的な問題について検討する。

3・1 溶接順序および建造順序

- (1) 図2(a)のように、例えばA～Fの6枚の板を突合せ溶接して1枚の大きな板ブロックをつくる時、縦縁と横縁のいずれを先に行うべきか。また裏溶接の順序はいかにすべきか。

縦縁および横縁の溶接は、そのいずれを先に行なっても継手の強度および残留応力には大きな差はなく、また就航実績上、この順序が原因となって損傷を生じた例は

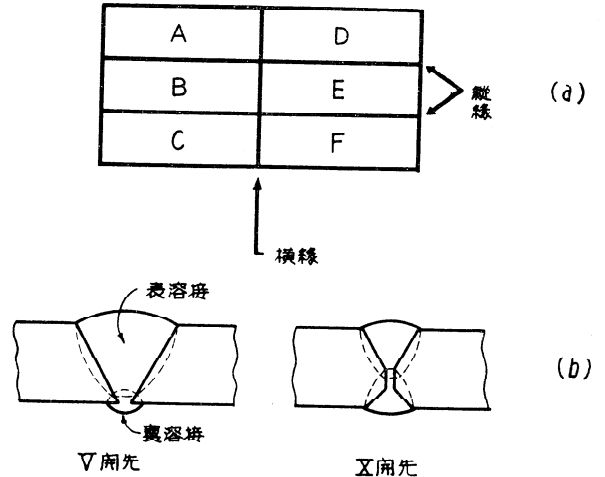


図 2 板継ぎの説明

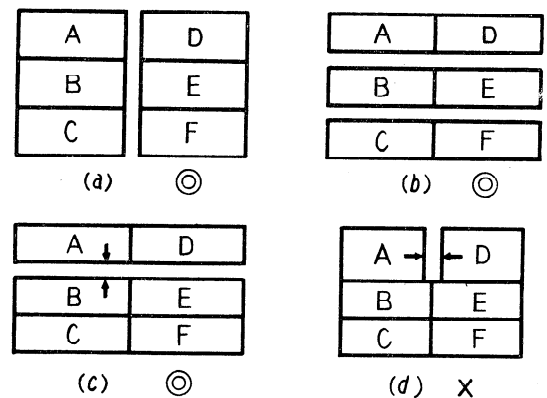


図 3 板継ぎの溶接順序

ないので、施工上都合のよい順序を選んで差支えない。その場合でも図3の(a)又は(b)に示す順序ならよいが、工程の都合で板Aと板Dとをあとでつける場合には図3(c)のようにA×Dを先に溶接すべきであって、図3(d)のようにA×B、D×Eを先に溶接するのはいけない。つまり図・3(d)ではA×Dの溶接のとき、この継手は矢印の方向に縮まろうとするが、最早A×BおよびD×Eが一体となっているため、収縮に強く抵抗するので割れが生じるおそれがあるからである。（止むを得ずこの方法によるときは、A×B、D×Eの溶接は交点附近の溶接をしないでおくこと）

次に、裏溶接は手溶接についてはV開先のように裏溶接の量が少ないときは、表溶接が板ブロックについて全部終わってから行って差支えない。しかし、X開先のように裏溶接の溶着量（溶着金属の量）が多いときは、交叉部に亀裂が発生するから、図3(a)または(b)の状態のときに裏溶接をすませる。自動溶接の場合には、ある板厚に

下のときは手溶接V開先の場合と同様の順序でよろしいが、これ以上の板厚のときはやはり図3の(a)または(b)の状態で見溶接をすませる。その限界板厚は従来の研究と経験の結果から考えると16mm程度である。

(2) 図4の如き防撓材のあるブロック内の、板と板との突合せ溶接と、板と型鋼(または桁板)とのスミ肉溶接とは、いずれを先に行なうべきか。また、板と防撓材のスミ肉溶接は、ブロックの中心から始めて順次外側(Free end)に向かって行なうことが良いとされているが、これについてはどう考えるべきか。

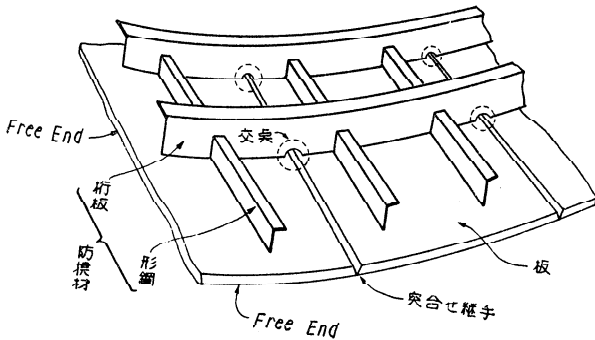


図4 ブロック組立の説明

板と板との溶接をする前に、防撓材と板とのスミ肉を先に行なうと、後から行なわれる突合せ溶接に対しては、先に溶接された防撓材が拘束材として作用するので、突合せ継手と防撓材の交点付近では、突合せ溶接は収縮を妨げられて、割れの発生を助長されることもあるので好ましくない。従って原則としては、突合せ溶接がすんでからスミ肉溶接を行なうべきである。

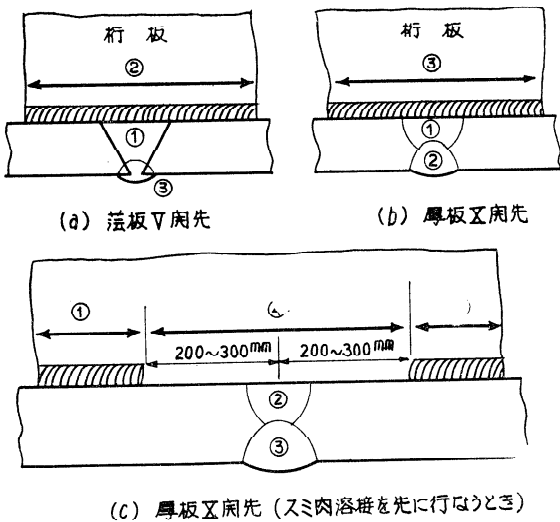


図5 板相互の溶接と板と防撓材の溶接の順序
見溶接とスミ肉溶接との順序については、V開先のように見溶接の溶着量が少ないときは、図5(a)のように表

溶接(突合せ)→スミ肉溶接→見溶接(突合せ)の順序で行なっても残留および亀裂の点で問題はない。しかし、厚板(例えば25.4mm以上)で図5(b)のように見溶接の溶着量が多いときには、収縮しようとする量も大きいから、スミ肉溶接の前に見溶接をすませるべきである。また工作上、見溶接をスミ肉溶接より先に行なえないときには、図5(c)のようにスミ肉溶接を一部分(継手の両側をそれぞれ200~300mm)残して、突合せ溶接の収縮を出来る限り自由に行なわせるようにしておいて、最後にこの部分のスミ肉溶接を行なう必要がある。

次に、板と防撓材のスミ肉溶接は、ブロックの変形の点からはブロックの中心から四周に向かって対称に行なうのが有利であろう。しかし、この溶接順序は残留応力に対してはあまり影響はしないであろう。特に多人数で同時に溶接する場合には、溶接工の配置を均等に分散させれば、溶接進行方向を細かく規定する必要はないであろう。

(3) 図6のように、突合せ継手がT字形に交叉するときは亀裂防止の見地から横縁を先にし、縦縁をあとで行なうべきであるが、図6(a)の溶接順序と(b)の順序とはどちらがよいか。また突合せ継手における溶接の進行方向は、中央から両端に向かって振分けに行なうことになっているが、この問題についてはどう考えるべきか。

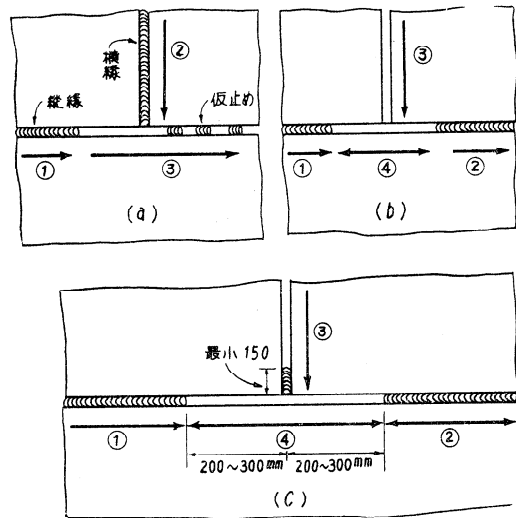


図6 突合せ溶接の交叉

T字継手の溶接順序は変形の防止、亀裂、その他の欠陥の防止などに主眼をおき、交叉部の溶接さえ完全にできれば(a)の順序でも(b)の順序でも差支えない。

たとえば、(a)の順序でも③を仮止め程度として、②の溶接を行なうと③の仮止めが切れて飛ぶおそれがあり、これを飛ばないように十分に仮止めすると、結果的には

③の溶接を②の前に行なったと同じようになる。従って(a)と(b)とはほとんど同じ結果となる。実際に(b)の溶接順序で溶接した船でも、何んら就航上問題を起こしていない。ただ(b)を採用する場合は、図6(c)のように、片側200~300mm以上を残しておくことが大切である。また④の部分を表溶接するときは、③の部分(少なくとも150mm程度)は裏溶接も完了させておかないとビード割れが生じやすい。

次に、一つの突合せ継手についての溶接の進行方向については、溶接が非常に長いときこれを1名か2名の溶接工で溶接する場合には、中央振分けで行なうことが良い方法であろう。しかし、多人数で溶接を行なうときや、溶接線が短いときは、特にこれにこだわる必要はない。しかも少数で行なうよりも、多人数で溶接をした方が拘束力も相当緩和されていることが明らかになっている。また自動溶接の場合には、中央振分けになっていないが、就航実績の上で問題はない。

3.2 溶接線の集中, 交叉とスカラップ

(1) 図7(a)のようにスミ肉溶接と突合せ溶接が交叉する点(A, B, C)は、交叉を避けて図6(b)のようにスカラップを設けるべきものとされているが、このような溶接線の交叉については如何に考えるべきか。

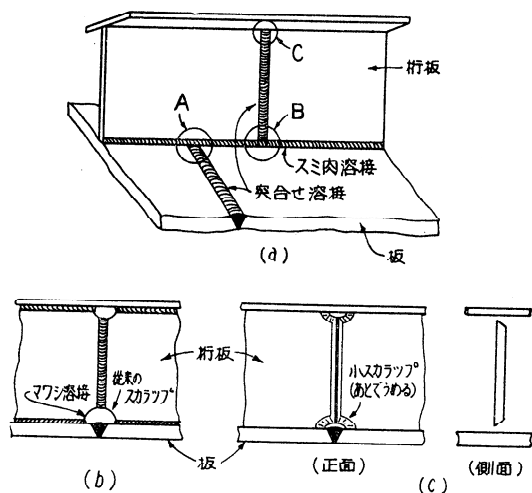


図7 溶接線の交叉

スミ肉溶接と突合せ溶接の交点は、残留応力の点でも、材質変化の点でも、欠陥がなければ心配はないと考えられるが、突合せ溶接に欠陥が残っても、これをスミ肉溶接で補強できると考えるのは、脆性破壊に対して正しくない。従って、欠陥が残らないように工作することをまず心がけなければならない。

一方、図7(b)のようにスカラップを設けるのは溶接の

交叉は避けられるけれども、構造的に見れば応力の不連続箇所をくることになるので好ましくない。事実多くの損傷例がこのスカラップの端部に発生している。従って図7(c)のように、突合せ溶接が十分に行なえる限度でなるべく小さい小スカラップを明け、あとで溶接でうめるようにすることが望ましい。ただこの小スカラップは姿勢の関係で現場できれいに明けることが困難な場合もあり、ギザギザの穴を溶接で埋めると欠陥を残しやすいので、そのような場合にはかえって図7(b)の従来のスカラップの採用も止むを得まい。

(2) 図8(a)のように、スミ肉溶接と突合せ溶接とが近接することは差支えないが、また図8(c)のようにスミ肉溶接と突合せ溶接とが相当な長さの範囲で近接しながら交叉することがあるが、これについてはどう考えるべきか。

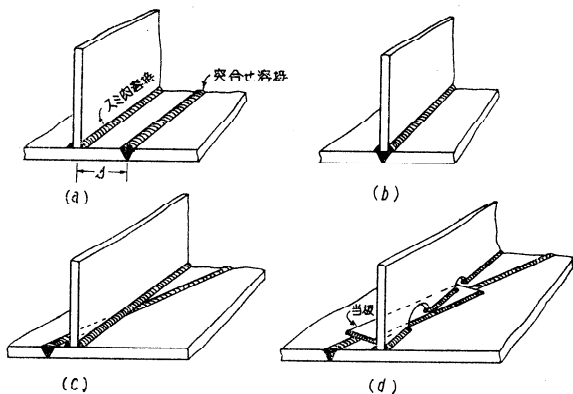


図8 突合せ溶接とスミ肉溶接との近接および斜交
残留応力の点は、片方がスミ肉であるのであまり問題にならない。従来の実験では相当近接したことはあるが、問題を生じていない。従って工作上的見地から、溶接が十分にできる範囲でその距離を適当に定めてよいはずである。ただ問題は、始めに行なう溶接中に存在した欠陥が、あとで行なう溶接の収縮力のために、亀裂に進展する可能性があるかどうかである。これらの点を考慮するならば、この距離の最小(s)は30mm程度として良いと思われる。ただしこの場合、突合せ溶接が終わってからスミ肉溶接を行うべきである。

図8(b)は突合せ溶接が完全であれば、普通の場合よりも1回か2回余計にビードを盛ったのと同じようなものであるとも考えられるが、実績による保証もないので、構造物のなかで、重要な箇所では止めた方がよい。

また図8(c)については、両溶接線の交わる角度が小さいと、近接範囲が相当の距離にわたることもあるが、程度の差はあっても、斜めの交叉はしばしば現われるものであり、これを取りたてて問題にする必要はない。

図・8(d)のように当金をあてかつスカラップを設けて二つの溶接線を接触させないやり方もあるが、残留応力の点から考えても図・8(c)の方が溶着量も少く、また工作も容易だから良いと考えられる。ただし、突合せ溶接は十分入念に行ない、またスミ肉溶接の脚長が多くなり過ぎないように注意することが必要である。

4. む す び

本稿は、従来の施工基準などの誤っている点、または厳格にすぎる点について、これらを改善し、あるいは緩和する必要がある事項のみを取扱ったため、一見して溶接施工法全般が訂正されたような印象を与えるかも知れない。しかしここには記載されていないが、従来から守るべき事項として重視されていることは、これまで通り正しく施工しなければならないことは当然のことと考えているので、この点誤解のないよう御願いたい。

多くの技術者が体験しているように、今まで経験のない仕事をする場合「この工事はこここのところで失敗しそうだ」と感じて、作業の段取りをし、作業の進行中にも細かい神経を配っていれば、なかなか失敗するものでは

ない。大きな事故が起きるのは、「事故が起きるかも知れないぞ」という警戒心が及ばなかった点から起きるのである。過去における損傷例は、技術の失敗例でもあるが、同時にこれらの事故例こそは技術の進歩にとって貴重な資料である。

一方、製品が長年月にわたって事故を生じなかったという実績は、その施工法の信頼性を保証する有力な裏付けとなる。

工作上の基準は、これらの幾多の実績と失敗の経験を基にして作られるものであるが、それはまた技術の進歩とともに改善されてゆくべきものである。溶接施工に関する事柄は、過去の研究の結果、今まで分からなかった沢山のことが明らかにされた。反面、まだはっきりわかっていない事柄も多い。溶接技術者としては、今後も正しい意味の溶接品質向上を計るため、より新しい施工法を見出すために、さらに努力を傾ける必要があろう。

なお最後に、本稿を作成するに当り前記溶接施工法委員会の報告を引用させていただいたことに対し、深く感謝する次第です。