

2 橋梁製作における板継ぎ溶接方法と溶接欠陥

本研究部会構成会社（14工場）における板継ぎ溶接方法は1工場が全板厚炭酸ガスアーク片面溶接法を採用しているが、他の13工場はサブマージアーク両面溶接（内2工場はBPの初層溶接のみ炭酸ガスアーク溶接）である。

図2-1 に板継ぎ溶接継手における基本的な開先形状を図2-2 に板継ぎ溶接における板厚差の処理方法を示した。

片面溶接の場合は板厚差を組立時上側に逃がすが、両面溶接の場合は各工場の組立方法によって上逃げ、下逃げが行われている。

I 開先： $t < 14\text{mm}$

V 開先： $t \leq 25\text{mm}$

X 開先： $t > 25\text{mm}$

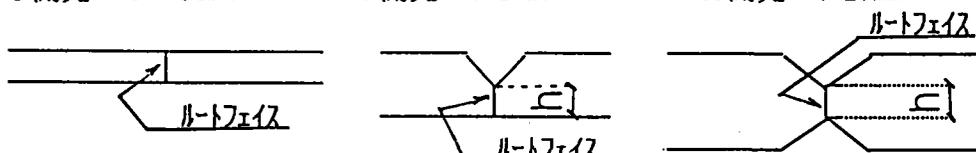


図2-1 板継ぎ溶接継手の基本的な開先形状

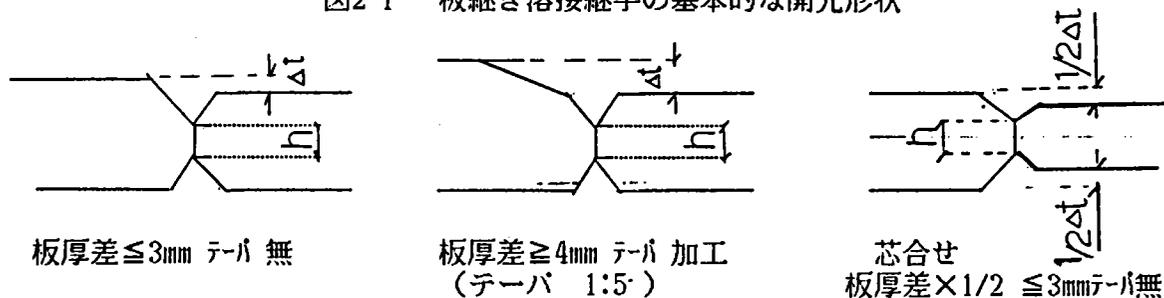


図2-2 板継ぎ溶接継手の板厚差の処理方法の例

両面からのサブマージアーク溶接では、完全溶込みを確保するため、片面の溶接(BP)を完了し、鋼材を反転後他面の開先部(FP)を裏ガウジングする場合が多い。

裏ガウジングはルートフェイスの未溶込み部を完全にはつり取る場合（完全ガウジング）とルートフェイスの1部をはつり取る場合がある。また、開先加工精度と溶接条件を十分管理し、溶込みをコントロールして全く裏ガウジングをしない場合もある。

図2-3 に各工場における板継ぎサブマージアーク溶接の板厚別の開先形状と裏ガウジングの有無の実情を示した。

比較的薄板（14mm以下）では開先加工をしないI開先形状を採用している場合が多く裏ガウジング無し、部分裏ガウジングおよび完全裏ガウジングが、各々同程度採用されている。板厚15mm以上となるとVまたはX開先となり、完全裏ガウジングが圧倒的に多く、部分裏ガウジングが4例あり、裏ガウジング無しは1例のみである。

サブマージアーク溶接は自動溶接であり、溶接前作業および溶接条件のバラツキ等に

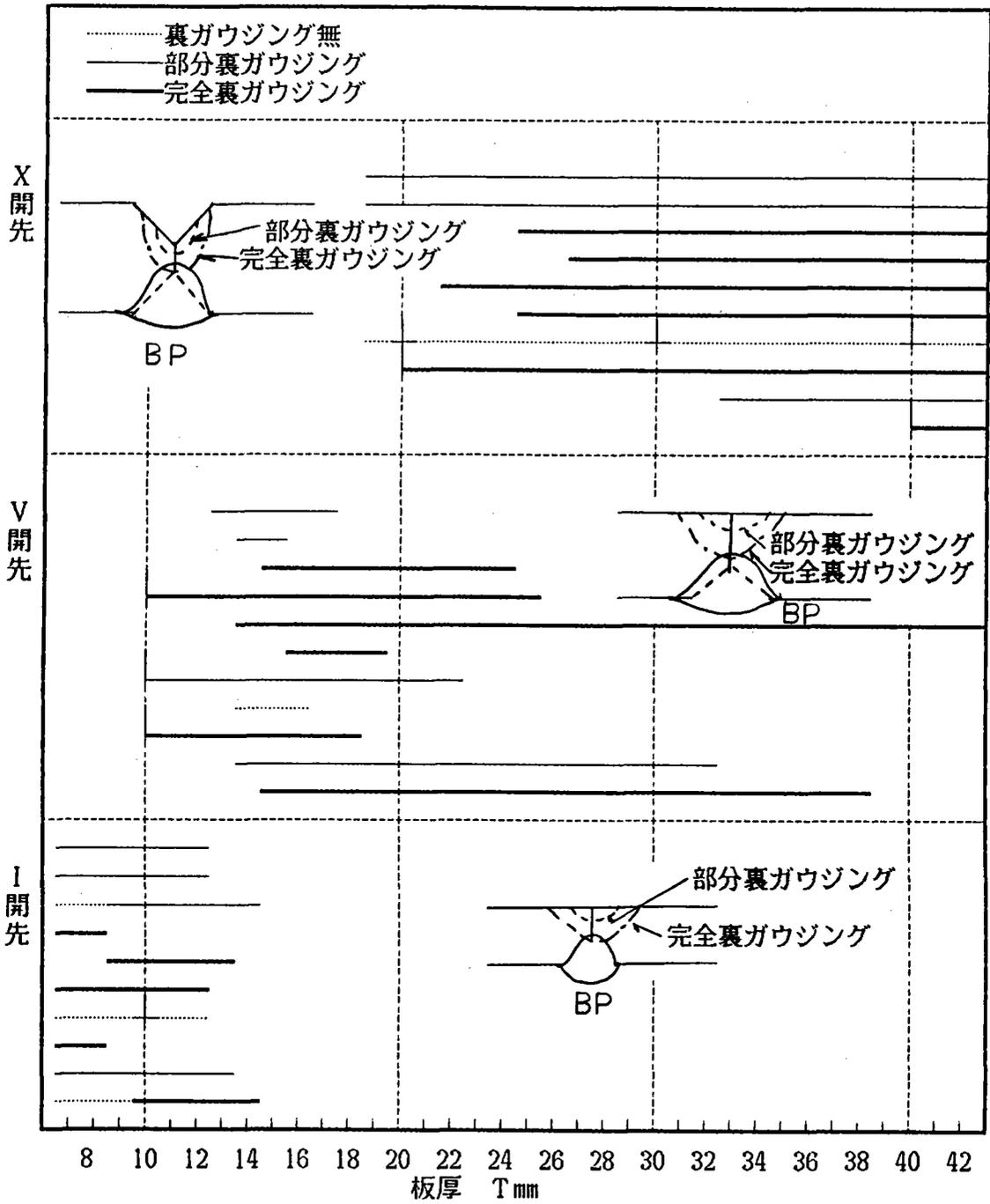


図2-3 サブマージアーク板継ぎ溶接継手における板厚と開先形状および裏ガウジングの有無

より、発生し易い欠陥を予測することが可能である。

図2-4 は各工場における過去の実績等から、各開先形状、裏ガウジングの有無別に発生する可能性のある欠陥（発生し易い欠陥）を報告してもらい、整理した結果である。これによるとサブマージアーク両面溶接（BP初層のみ炭酸ガスアーク溶接の場合も含む）における発生し易い欠陥は、一般的な欠陥であるブローホール等（BH）以外ではスラグ巻き込み（S）および溶込み不良（IP）が比較的発生率の高い欠陥であり、融合不良（LF）および高温割れ（LC）は比較的発生率が低いが発生し得る欠陥と考えられている。

表2-1 にこれら欠陥の形状、発生位置および発生原因等を示した。

板継ぎサブマージアーク両面溶接（BP初層のみ炭酸ガスアーク溶接を含む）において発生し易い欠陥をブローホール（BH）、スラグ巻き込み（S）、融合不良（LF）、溶込み不良（IP）および高温割れ（LC）とし、これらの欠陥の特徴および欠陥防止の作業条件等を表2-1 を中心に解説する。

（1） ブローホール等（BH）

① 欠陥の特徴

球状のBHとパイプ状のBHがある。球状BHは比較的大きなものが分散している場合と直径1～2mm程度のもので群生している場合とがある。

BHは溶接時に燃焼した有機物のガスおよび錆等の水酸化物、吸湿物等の分解水素等の過飽和ガスが溶接金属の凝固過程において放出されずに閉じ込められた気孔である。比較的小さな球状BHは溶接金属内のどの位置にも発生する可能性があり、パイプ状BHは溶接継手を断面的にみた時、開先面に直角に柱状晶（デンドライト）に沿って伸びたパイプ欠陥（ウォームホール）とデンドライトの会合部に溶接線方向に伸びた溝状パイプ欠陥とがあり、球状BHとは異なり発生位置は比較的特定され易い。

サブマージアーク溶接において、BHの発生傾向は溶接時のガスの発生傾向に比例関係があり、スラグ裏面（溶接金属に接していた面）のガス孔が多く存在している場合はBHが発生している可能性が高い。

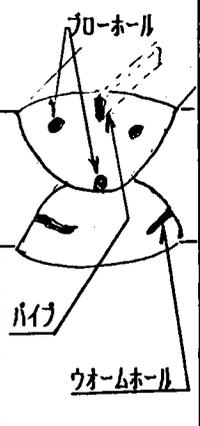
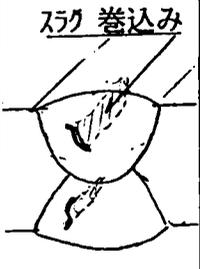
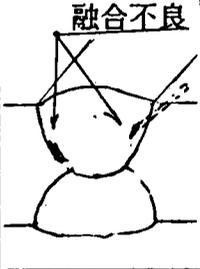
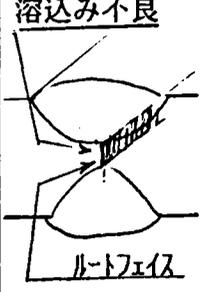
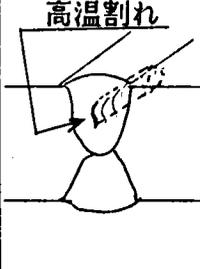
RTフィルム像としては球状BHは円形状に、ウォームホールはほぼ溶接線直角方向に比較的鮮明な細長面状に、また溝状パイプ欠陥は溶接方向に比較的鮮明な細長面状に現れるので、欠陥の種類を特定し易い。

LC: 高温割れ							○	○	
	0/4	0/7	0/4	0/1	0/5	0/7	1/1	1/3	0/7
IP: 溶込み不良	○○	○○ ○	○○	○	○○	○○ ○●	○	○○	○○ ●
	2/4	3/7	2/4	1/1	2/5	3/7	1/1	2/3	4/7
LF: 融合不良		○				○			○
	0/4	1/7	0/4	0/1	0/5	1/7	0/1	0/3	1/7
S: スラグ巻込み	○	○○	○○ ●	○	○○	○○ ●●	○	○○	○○ ●
	1/4	2/7	3/4	1/1	2/5	4/7	1/1	1/3	3/8
BH: ブローホール	○	○○ ○	○○ ●		○○ ○●	○○ ○● ●		○	○○ ○○ ●●
	1/4	3/7	3/4	0/1	4/5	5/7	0/1	1/3	3/8
欠陥種類 開先形状	I 開先 ガウジング無	I 部分 開先ガウジング	I 完全 開先ガウジング	V 開先 ガウジング無	V 部分 開先ガウジング	V 完全 開先ガウジング	X 開先 ガウジング無	X 部分 開先ガウジング	X 完全 開先ガウジング

●：BP初層のみ炭酸ガスアーク溶接

図2-4 各工場における板継ぎサブマージアーク溶接の開先形状別の発生し易い欠陥の種類認識率

表2-1 発生し易い欠陥の形状、発生位置および発生原因

	欠陥形状	欠陥発生位置	欠陥発生の原因
ブローホール等 (BH)	球状 パイプ状		1) 溶接前作業 ①継手開先面の錆び、ガス切断酸化被膜等の開先清掃不十分。 ②開先内への異物の混入。 ③開先内の仮付け溶接ビードのBHの存在 ④開先近傍の母材表面プライマー塗膜の除去不十分。 2) 溶接材料および溶接条件 ①フラックスへの異物の混入、極端な吸湿 (特に繰り返し使用フラックスの場合) ②フラックスの散布不足による局部的なオープンアークの発生。 ③炭酸ガスアーク溶接でのシールド不足。
スラグ巻き込み (S)	面状		1) 溶接前作業 ①開先角度 (ベベル角度) の不足。 ②前パスビードのスラグ除去不十分。 2) 溶接材料および溶接条件。 ①溶接電圧が高過ぎる。 ②溶接走行中のノッキング等走行不安定。 ③極端な下り溶接。
融合不良 (LF)	面状		1) 溶接前作業 ①開先角度 (ベベル角度) の不足。 ②前パスビードの凸形状。 2) 溶接材料および溶接条件 ①裏ガウジング形状不適。 ②溶接電圧が高過ぎる。(溶込み不十分) ③ワイヤ狙い位置の不適。 ④溶接走行中のノッキング等走行不安定。
溶込み不良 (IP)	面状		1) 溶接前作業 ①開先角度 (ベベル角度) の不足またはルートフェイス高さ過大。 ②仮付け溶接ビード過大。 2) 溶接材料および溶接条件 ①裏ガウジング不十分。 ②溶接条件 (電圧、電流、速度) 不適。 ③ワイヤ狙い位置の不適。 ④溶接走行中のノッキング等走行不安定。
高温割れ (LC)	面状		1) 溶接前作業 ①開先角度 (ベベル角度) の不足。 2) 溶接材料および溶接条件 ①裏ガウジングの深さと幅のバランス不適 ②溶接条件 (電圧、電流、速度) 不適。(ビード形状の幅に比べて高さが大きい) ③母材またはワイヤのC, S量が高い。

② 欠陥の防止作業条件

BH等は溶接時のガスが主原因であることから、欠陥防止には継手開先部の清浄度確保およびフラックスの吸湿防止、不純物の混入防止等が重要である。

(イ) 開先面の酸化被膜、錆等の除去(開先面のグラインダー仕上げ作業)

特にエンドタブおよびエンドタブ取り付け端面の錆等の除去が疎かになり易い。

(ロ) 仮付け溶接ビードの清掃。特に仮付け溶接時の溶接ヒュームが開先面に付着し、その部分が吸湿する場合がある。

(ハ) フラックスの吸湿防止とダスト等異物の混入防止。60キロ級以下の鋼板の板継ぎサブマージアーク溶接の場合、熔融型フラックスでは袋開封直後は特に乾燥する必要はないが、フラックスを再使用する場合は乾燥することが望ましい。

また、フラックス回収機は壁等にダストが付着し、かつダストが吸湿している場合が多いので、フラックス回収機のダスト落とし等の清掃を行うと共に、フラックス回収機よりフラックスを取出す時には、ダストの混入を避けるよう注意を要する。

(ニ) ルート部への異物の混入防止。

(ホ) 裏ガウシング後の酸化被膜等の除去(グラインダー仕上げ作業)

(ヘ) フラックス散布高さの適正化。フラックス散布量が少ないと、アーク漏れとなりまた多過ぎるとガスが逃げ難くなりBHが発生し易くなる。

(2) スラグ巻込み(S)

① 欠陥の特徴

厚みを持つ複雑な形状をした面状欠陥である。スラグ巻込みは溶融スラグが溶鋼の凝固過程において何らかの原因で浮上せず巻き込まれる場合と前バスのスラグが残存しており、溶接アーク熱で再溶融されずにそのまま残存する場合がある。

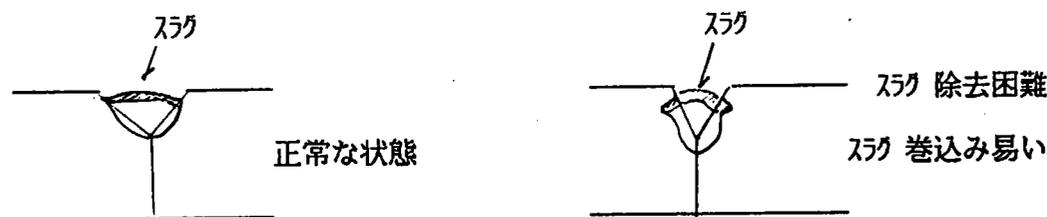
開先面の融合不良部にスラグが内蔵している場合もあるが、一般的には面状欠陥としての発生位置はランダムである。RTフィルム上は多角形または楕円状の平面像として現れる。

② 欠陥の防止作業条件

直接的には前バスのスラグを完全除去することと溶接中に衝撃等を与えず静かに安定した走行を保ち溶鋼中のスラグの浮上を乱さないことである。

(イ)開先角度(ベベル角度)の不足。

サブマージアーク溶接等の大入熱溶接では、開先角度が小さい場合ビード表面近くでの開先面への喰い込みが大きくなり、スラグ除去が困難になる。



(ロ)スラグ剝離性の良いフラックスを用いて、ビード形状をできるだけ滑らかな形状になる溶接条件を選定する。(溶接電圧が低いとビード形状が凸となり、高過ぎると(イ)のように喰い込み易くなる)

(ハ)前パスのスラグを完全に除去する。

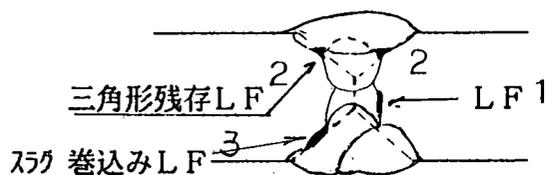
(ニ)溶接中の鋼板に衝撃を与えないようにする。

(ホ)溶接走行中にノッキング等を起こさないよう走行の安定性を計る。

(3) 融合不良 (LF)

① 欠陥の特徴

融合不良は開先面に生じる場合と層間に生じる場合がある。開先面に生じる場合はスラグが介在している場合がある。融合不良は母材または前パスの溶接金属表面が溶接アークにより溶融されず、十分な濡れ性が得られていないところに溶鋼が先行した場合に起こり易い。スラグが介在する場合を除いて欠陥は厚みのない面状となる。また、面状欠陥は板厚方向にある程度の角度を持っており、厚みの無いことから、RTにおいては十分に検出されない場合が多い。スラグが介在している場合および開先部に三角形の融合不良が生じるような場合はRTにおいて面状または線状的に欠陥像が得られる。(図2-5 参照)



断面マクロ(A-A)における融合不良

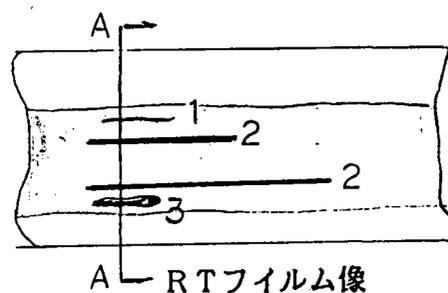


図2-5 断面マクロにおける融合不良とRTフィルム像

② 欠陥防止の作業条件

原則的には、母材または前パスの金属表面が十分溶融されて濡れ性が得られてい

る部分に溶鋼が充填されないと融合不良を起こすことがある。

従って溶接前の溶接部の形状と溶鋼が必要以上に先行しない事が必要であり、必要以上に溶接電流等を高くして深溶込みにすると後述する高温割れを起こす場合があるので注意を要する。

- (イ) 適切な開先角度を取る。(開先角度が小さいとビードが凸ビードとなり、次層に融合不良を起こすことがある。)
 - (ロ) 前パスビードが凸ビードの場合はグラインダー等で平滑に仕上げる。(図2-6参照)
 - (ハ) 裏ガウジ形状を適切にし凹凸の無いようにする。カーボンの付着等が残らないよう必要に応じてグラインダー仕上げをする。
- (二) 開先幅が広くなったら、振分けバス溶接(1層多パス溶接)とする。(図2-6参照)
- (ホ) ワイヤ狙い位置および角度を適切にする。
 - (ヘ) 溶接走行中にノッキング等走行不安定を起こさないようにする。
 - (ト) 必要以上に溶接電圧を高くしない。

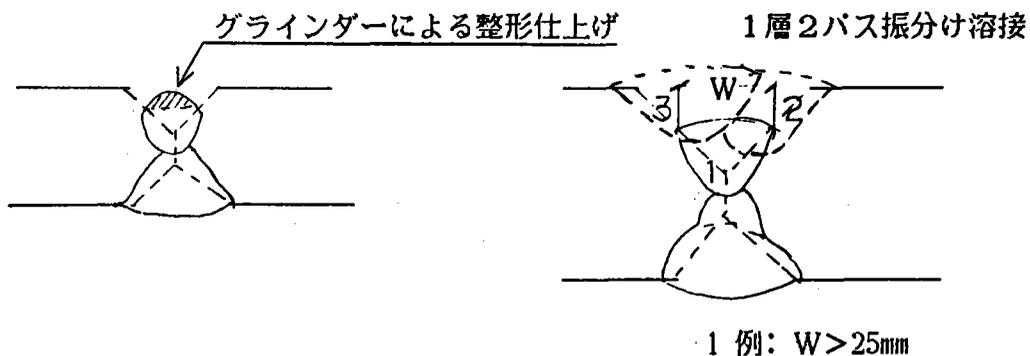


図2-6 凸ビードの整形と振分けバス溶接

(4) 溶込み不良 (IP)

① 欠陥の特徴

サブマージアーク両面溶接での溶込み不良は開先のルートフェイスが溶込まずに残存したものであり、溶接ビードの中央に板面に直角に生じる。

サブマージアーク溶接の母材への溶込み深さは溶接電流、電圧、速度および開先

形状に影響される。両面溶接の完全溶込み継手は両面からの溶込みが完全にラップしなければならぬ。そのため図2-3 に示したように、工場独自のノウハウにより完全裏ガウジング、部分裏ガウジングおよび開先形状と溶接条件を厳しく管理した裏ガウジング無のいずれかの方法が取られている。

IPはRTフィルム上には溶接中央部に溶接方向に長い一様な濃度の直線像として現れる。

図2-4 によると、完全裏ガウジングでもIPを発生し易い欠陥としている工場がかなり見受けられる。この場合、裏ガウジング作業において部分的にルートフェイスが残存しているか、後述する高温割れと混同している可能性も否定できない。前者の場合は完全裏ガウジングを前提に溶込みの浅い溶接条件を採用していると考えられる。後者の場合はガウジング幅に比べて深さが大きい場合に可能性が指摘される。

② 欠陥防止の作業条件

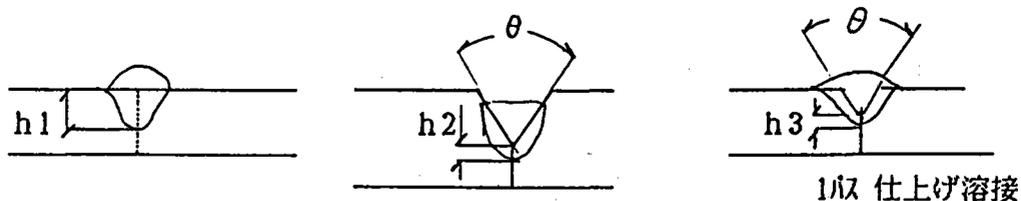
(イ) 開先加工精度のバラツキを考慮した標準溶接条件を設定する。

部分裏ガウジングおよび裏ガウジング無の場合開先角度が不足しているか、ルートフェイス高さが大きすぎると標準溶接では溶込み不良が生じる。

(ロ) 完全裏ガウジング施工において、局所的なガウジング不足のチェック方法を確立するか、部分裏ガウジングとなることを考慮して、余裕のある溶接条件を採用するかの方法をとる。

BP側に仮付け溶接ビードがある場合が多く、BP初層溶接の溶込み深さが仮付け溶接ビードの有無により、異なる場合がある。一方、裏ガウジングは深さの不均等のないよう行うことが必要であり、完全裏ガウジングを目指すときガウジング深さがかなり大きくなる。

(ハ) 開先形状、開先角度および各溶接条件の溶込みに及ぼす影響を十分把握して、溶接条件を設定する。同一溶接条件の場合の開先形状における溶込み深さの傾向は一般的に図2-7 に示す傾向がある。参考としてV開先部およびI開先部での溶接電流と溶込み量の関係の1例を図2-8 に示した。



- ① 溶込み深さの傾向 $h1 > h2 > h3$
- ② 溶込み深さの傾向 θ が大きいほど $h2$ は大きい。

図2-7 同一溶接条件における開先形状と溶込み深さの傾向

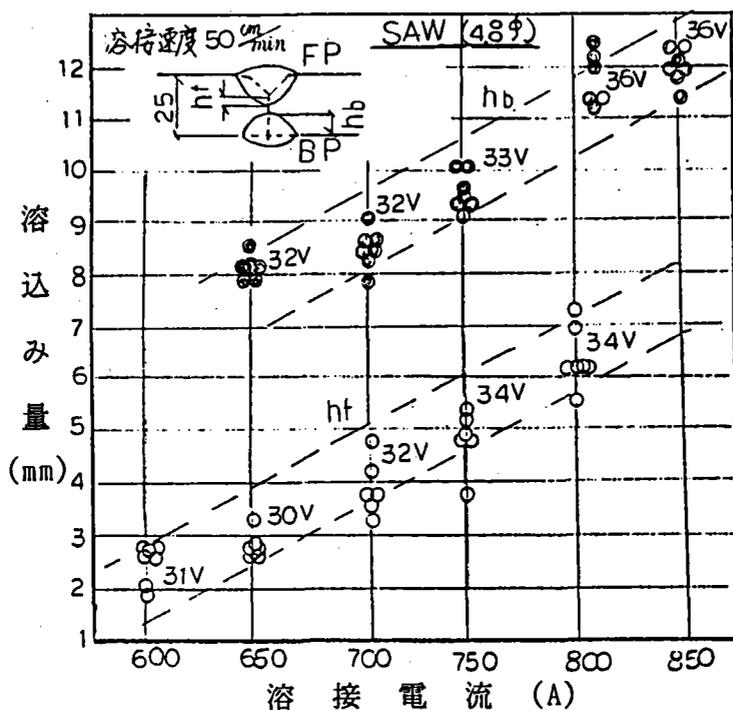


図2-8 V開先継手における溶接条件と溶込み深さの1例

部分裏ガウジングまたは裏ガウジングを省略する場合、開先形状および開先角度に留意し、バラツキを考慮して溶接条件の設定をする必要がある。

- (二) BP初層溶接時に、溶込みを極端に大きくすると、ルートフェイス高さの関連において、溶落ちを生じることがある。またFPにおいて極端に溶込みの大きい溶接条件を設定すると、後述の高温割れを生ずる恐れがある。

(5) 高温割れ (LC)

① 欠陥の特徴

サブマージアーク溶接ビードの凝固過程において、低融点化合物がビード中央

の柱状晶会合部に未凝固フィルム状として存在し、溶収縮力により開裂する縦割れを生じることがある。割れ発生時期が溶接中または直後に生じる高温割れに分類される。溶接金属のS、C、及びNi等の合金元素は高温割れ感受性を高める傾向にある。最近の溶接用圧延鋼材はS量が非常に少なくなっており、高温割れ感受性は小さくなっているが60キロ級以上の鋼板ではNiが添加されており、高温割れに関して特に留意することが必要である。

一般に、VまたはX開先板継ぎサブマージーク溶接においては、FPの初層溶接に高温割れが発生し易い。特にビードが梨の実形状となる場合、ビード幅に比べてビード高さが大きい場合に高温割れを発生し易くなる。

図2-9にSM50鋼材の板継ぎサブマージーク溶接におけるビード形状と高温割れの関係の例を示した。ビード高さ/ビード幅が1以下ならば高温割れの危険性は少ない。

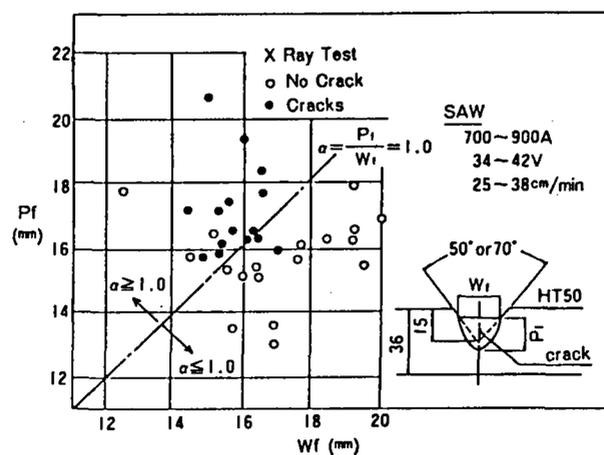


図2-9 板継ぎサブマージーク溶接におけるビード形状と高温割れの関係の例

RTにおいて高温割れは初層ビードの中央に発生するので溶込み不良との見分けが紛らわしいが、欠陥像の中央と両端では像の太さおよび鮮明度が異なりかつ不連続に発生する傾向がある。

溶接条件の設定時は高温割れ防止に十分考慮しているので、実施工においては不適当なガウジング形状となった場合以外は高温割れを生じていないようであり、図2-4においても、高温割れを板継ぎサブマージーク溶接の発生し易い欠陥としているのはX開先の裏ガウジング無および部分裏ガウジングを採用している2工場のみである。

② 欠陥の防止作業条件

- (イ) 溶接条件との対応において、ビード形状が良好になる開先角度とするとともに、ベベル角度およびルートフェイス高さの加工精度を確保する。
- (ロ) 裏ガウジング形状（幅と深さのバランス）を適切に管理する。
- (ハ) 材質別に高温割れの発生の恐れのない標準条件を設定し、標準条件を遵守する。

以上板継ぎサブマージアーク溶接において発生し易い溶接欠陥について、その特徴と防止に必要な作業条件を記述した。これらの欠陥の特徴を十分理解し、欠陥防止作業条件を完全に遵守すればこれらの欠陥を完全に防止することは不可能ではない。しかし板継ぎ作業において、作業のバラツキは好むと好まざると拘らず生ずる場合があり、また作業中に予期せぬトラブルが生じることもあり、この場合の欠陥の発生は否定できない。

図2-10に部分裏ガウジングサブマージアーク溶接を採用している或る工場での実施工におけるRT結果と欠陥種別のヒストグラムを示した。5年間における板継ぎ溶接継手のRT撮影フィルム約48,000枚の内、無欠陥1級が97.9%であり、欠陥が認められた継手の内第1種の欠陥（丸みを帯びた欠陥、BH等）が1.45%、第2種欠陥（細長い欠陥、スラグ巻込み等）が0.24%、その他融合不良、溶込み不良および高温割れ等の面状欠陥が0.42%であった。また等級分類1級が99.5%、2級が0.05%、3級が0.03%および4級が0.42%である。3級以下の欠陥（221枚）種別比率は第1種欠陥5%、第2種欠陥3%、融合不良21%、溶込み不足56%および高温割れ15%である。

これらの結果によると、作業条件および溶接条件が十分管理された状態では、第1種欠陥で3級以下となることは殆ど無いといえる。

この工場における板継ぎサブマージアーク溶接継手の最も発生し易い欠陥は溶込み不良であり、高温割れ、融合不良がこれに次いで発生し易い欠陥といえる。

前述の作業条件と照らし合せてみると、この工場では部分裏ガウジングの採用に関連して開先精度（特にベベル角度およびルートフェイス高さの開先加工のバラツキ）と裏ガウジングの形状等が更に管理されていけば、不合格欠陥を皆無とすることも不可能ではないと思われる。これらのデータは板継ぎ溶接継手の非破壊試験方法に対して検出対象欠陥の決定に関して、貴重な示唆を与えていると思われる。

撮影枚数

材質：SM4 1～SM5 8
 板厚：8～50mm
 基本撮影総数：48,663 枚(1985～1992年)
 1級枚数：48,416 枚(99.5%)
 2級枚数：26枚(0.05%)
 3級枚数：15枚(0.03%)
 4級枚数：206枚(0.42%)

*1：融合不良、溶込み不良は全て4級に入れた。

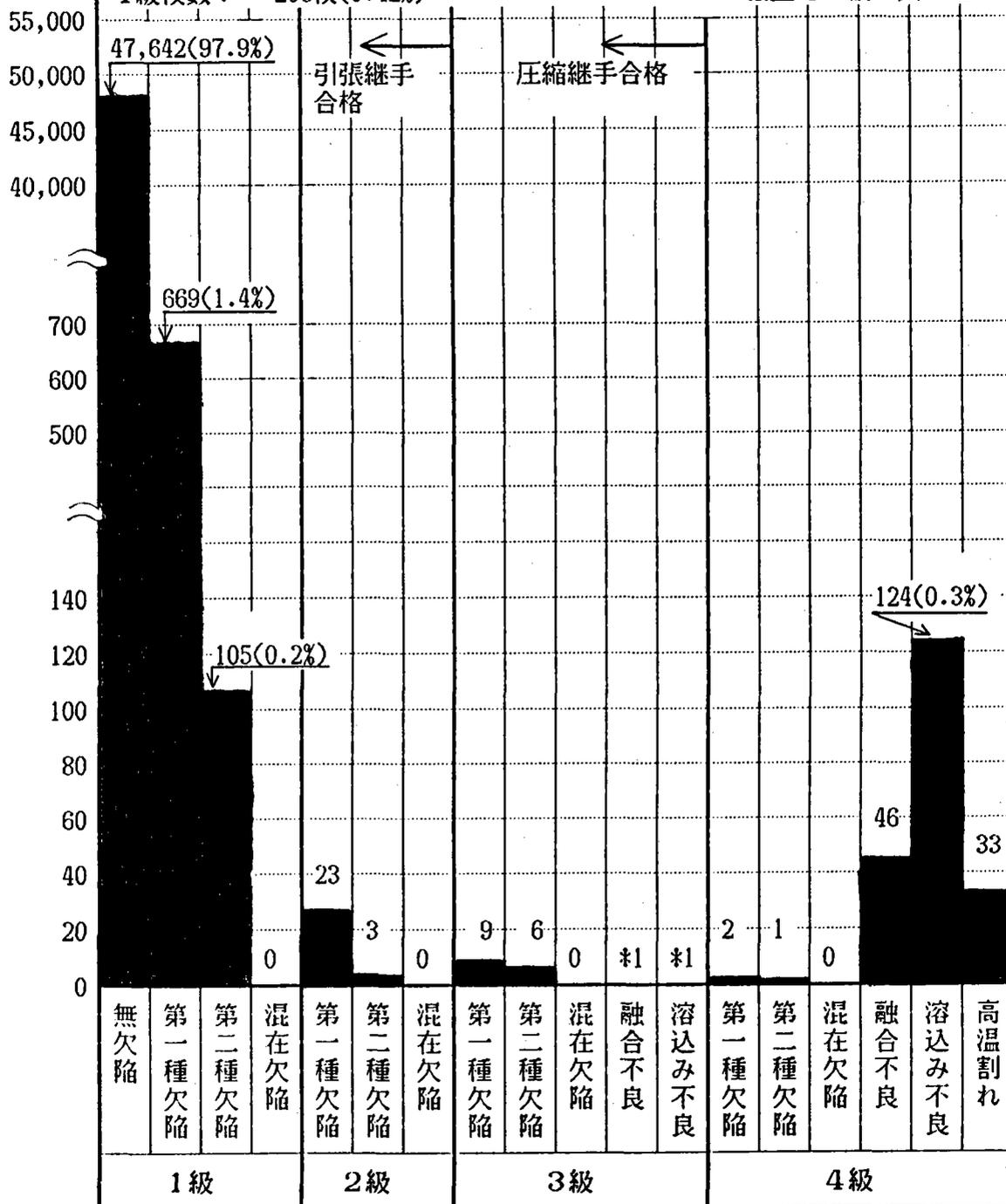


図2-10 或る工場における板継ぎサブマージアーク溶接（両面溶接、部分裏ガウジング）継手の放射線透過試験結果と発生欠陥種別の例