

80 mm 厚鋼板に含まれる欠陥が溶接部に およぼす影響とその挙動について

On the Influence of Defects in 80 mm Thickness Steel Plates for Weld Quality

山 田 兼 男* 三 好 滋* 城 広**
Kaneo Yamada Shigeru Miyoshi Hiroshi Joh

I. は じ め に

大形溶接構造物として压力容器などを製作する場合に、問題点として指摘されるいくつかの因子の中に、鋼板に含まれる介在物およびラミネーションの問題がある。その問題となる理由の一つには鋼板の強度に影響を及ぼすと考えられるためであり、いま一つには鋼板の端面特に溶接開先面などにあらわれた場合、溶接することにより母材および溶接部に有害な欠陥を発生させるおそれがあると考えられるためである。前者についてはすでにこれまでにいくつかの研究もあり、また経験的にも、板厚方向に応力が増えられる場合を除き、さほど大きな影響を与えないことがすでに知られているが、後者については悪影響があるということはいわれていながらもこれを実験的に研究し明らかにした例はあまり多くない。しかし実際に現場などで鋼板を溶接する場合にもっとも多く問題になり、かつ一番その判定に苦しむのが後者の問題である。そこでわれわれはその判定の基礎資料を得るため、自然欠陥として大きなラミネーションおよび多量の介在物を有する鋼板を使用し、拘束溶接を行なってこれらの欠陥が示す挙動を調べるための溶接実験と人工的に、大きなラミネーションおよび溶接に対してもっとも悪影響をおよぼすと考えられるサルファ系介在物およびフェルサイナイト系介在物を作成した板を溶接した場合に得られる溶接部の強度をしらべるための溶接実験を行った。以下その結果について報告する。なおここで使用した鋼板はすべて板厚 80mm のものである。

II. 非破壊試験法による鋼板の内部欠陥の評価法

鋼板に含まれる内部欠陥を評価するためには通常垂直波法による超音波探傷試験が行なわれる。この場合の試験条件としては接触子の種類、大きさ、感度調整などの

組合せにより種々な条件が考えられるが、一例として米国 ASME Code. から引用して示せば次のとおりである。

ASME Code. Section III (Nuclear Vessels) 1968.
鋼板の非破壊試験

1) 装 置

パルスエコータイプの超音波探傷装置を使用し探触子としては最大 1 sq in 最小 0.750 sq in の面積を有するものを使用すること。

2) 周 波 数

通常 2.25 MHz を使用すること。ただし板厚、結晶粒度、組織、装置および探傷法などによってはこれより高い周波数かもしくは低い周波数を用いてよい。

3) 探傷面の状態

探傷しようとする鋼板の表面は探触子をあてた場合に反対側の面からの反射波が常にブラウン管上で得られる最高可読波高値の少なくとも 50% が得られるようになめらかにしなければならない。

4) 探 傷 感 度

被試験材の建全部での底面反射波が最高可読波高値の最小 50%, 最高 75% になるように感度を調整する。

5) 探 傷 面 積

全面探傷とする。

6) 受 入 基 準

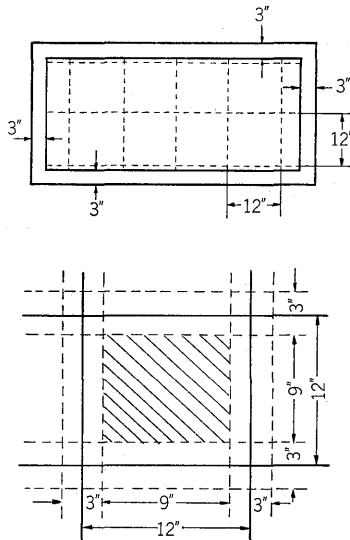
(1) 底面反射波の消失を伴った同一平面上にある欠陥からの反射波が連続している部分が径 3" (75 mm) か板厚の $\frac{1}{2}$ かいずれか大きな方の値の円内に入る場合には合格とする。

(2) (1)においてのべた欠陥よりも小さい二つ以上の欠陥でも、お互いいずれか大きい方の欠陥の最大径以上はなれていない場合、もしくは(1)で規定した円形の中に含まれない場合には不合格となる。

以上是一个の探傷条件の例を示したものであるが、同

* 原子力推進本部・建設部 ** 電力・原子力技術部

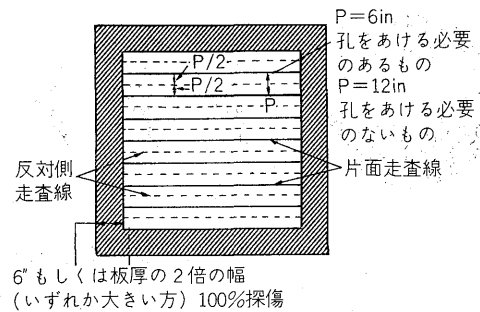
じ米国 Code でも一般的試験仕様を規定している ASTM 規格 ASTM A 435-64 a Ultrasonic Testing and Inspection of Steel Plates of Firebox and Higher Quality とは多少探傷法に相異が見られる。すなわち探傷感度は同一であるが、探傷面積の点で異っており、前者が全面探傷を規定しているのに対し、後者では 3" 幅の板周辺と 12" 間隔にひかれた格子線上 3" 幅の部分を探傷することになっている (第 1 図)。また判定基準としては、前



第 1 図
ASTM A 435-64 a
による走査範囲

Fig. 1.
Scanning area by
ASTM A 435-64 a

者が径 3" の円を規定しているのに対し後者は 2" 径の円を規定しており、Section III よりも探傷面積としては少なくなっているが判定の面では厳しくなっている。このことは、使用目的を考えた場合少しく矛盾を感じるもので、ASME Section III の場合には原子炉压力容器鋼板を対象としているため、この規格で全面探傷を要求しているのはその品質の重要性からいって当然といえるであろうけれども、判定基準が通常目的に使用される鋼板に比べ許容度が大きいのはいかなる理由づけによるものであろうか？ その説明にはかなりの困難を伴うのではあるまいか。いずれにしてもこのように探傷面積と判定基準との間に解釈に苦しむところがあるということは、結局実験的にもまた理論的にもこれらの欠陥と溶接による影響との関係を裏付ける十分な結論が得られていないということに帰着させることができるのではないだろうか。特に探傷面積については、溶接に対する影響のみを考慮した場合を考えたならば当然後者の規格 (ASTM) で採用されている周辺および交線探傷法 (後に一部を切断しノズル穴などをあける場合にはその穴の周辺についても行なうことを含めて) で充分であろうと考えられる。このような考え方は単には ASTM のみならずすでに英国規格 (B. S. 3915) およびドイツ規格 (Technische Lieferbedingungen der Vereins Deutscher Eisenhüttenleute) においても見られる考え方である。まず英国規格 B.S. 3915 Specification for Carbon and Low-Alloy

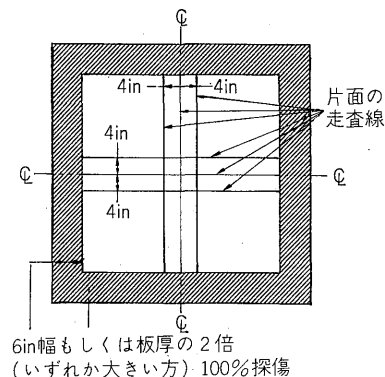


第 2 図 カテゴリー A の走査範囲

Fig. 2. Scanning area by B.S. 3915 for category A

Steel Pressure Vessels for Primary Circuits of Nuclear Reactor についていうならば、B.S. 3915 の Category A. および B. に属する部分に使用される鋼板は超音波探傷試験が要求されるが、その場合の探傷面は次のとおりである。すなわち

- 1) Category A の板については、周辺 6" 幅もしくは板厚の 2 倍の幅のうちいずれか大きい方の幅の部分について全面探傷し、その他の部分は 12" 間隔 (後に部品の取付穴をあけないものの場合) か、または 6" 以下の間隔 (後に部品取付穴をあけるものの場合) で板両面より探傷を行なう。この場合片面に引いた走査線は反対面表面に引いた走査線の中央になるように引く (第 2 図)。
- 2) Category B の板については、周辺部の探傷条件は Category A でのべたものと同様であるが、その他の部分では中央に引いた 2 本の中心線を中央にして両側 4" 間隔に引いた線にそって探傷を行なう (第 3 図)。



第 3 図 カテゴリー B の走査範囲

Fig. 3. Scanning area by B.S. 3915 for category B

判定基準については特に明文化された規定はないが、一定の感度標準試験片によって設定した可読波高値の 1/2 にひとしい波高がブラウン管上で欠陥反射波高として得られた部分をマークしておき、全部の探傷終了後発注者と協議の上総合的にみて合否を判定することになっている。これに対し前述したドイツ規格 (Stahl-Eisen Lieferbedingungen 072-58 (Sep 072-58) Technische Lieferbedingungen für Ubershallgeprüfte Grobbleche und Breitflächenstähle) では、適用限界を板厚 15 mm 以上

のボイラ用鋼板および板厚 10mm 以上の広い面積をもつ鋼板とし、探傷面積としては次の 3 種類に分けて行なうことを規定している。

1) 周辺検査 (Kantenprüfung) (第 4 図)

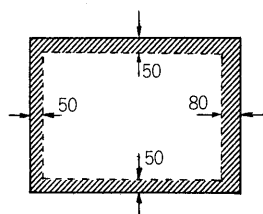
板の周辺 50mm の幅を全面探傷する。

2) 中央帯検査 (Mittelstreifenprüfung) (第 5 図)

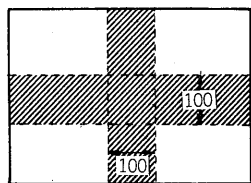
鋼板の中央部 100mm の幅を全面探傷する。

3) 平板検査 (Flächenprüfung) (第 6 図)

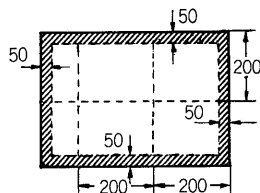
板周辺部は 50mm の幅の部分进行全面探傷し、その他の部分は 200mm 間隔で格子線を引き、その上を直径 24mm の探触子で走査する。



第 4 図
周辺検査
Fig. 4.
Scanning area by German standards: KANTENPRUFUNG



第 5 図
中央帯検査
Fig. 5.
Scanning area by German standards: MITTELSTREIFENPRUFUNG



第 6 図
平板検査
Fig. 6.
Scanning area by German standards: FLACHENPRUFUNG

第 1 表 Impulse Echo 法によるボイラ用鋼板
および平板の供給基準用級別

Table 1. Classification of boiler plates by
impulse echo method

指示の 級 別	ブラウン 管上の 図形	中反射エコー と底面反射エ コーとの関係	反射位置の 最大許容大 きさ mm ²	平板上での反射 位置の 分布
0		—	~10 ⁰ 1	指 示 な し
1		< 1	~10 ⁰ 10×10	小さな反射位置 (m ² 当り 25 まで)
2			10 ⁰ ~ 10×10	小さな反射位置 (m ² 当り 25 以上)
3		> 1	~10 ⁰ 30×35	中の大きさの反 射位置 (m ² 当り 15 まで)
4			~10 ⁴ 30×35	中の大きさの反 射位置 (m ² 当り 15 以上)
5		> 1	~10 ⁴ 100×100	大きな反射位置 (2m ² 当り 1 まで)
6			~10 ⁴ 100×100	大きな反射位置 (2m ² 当り 1 以上)
7		> 1	~12 ⁵ 200×500	大きな反射位置 (5m ² 当り 1 まで)
8			~10 ⁵ 200×500	大きな反射位置 (5m ² 当り 1 以上)
9		> 1	~10 ⁵ 200×500 以 上	

第 2 表 各探傷ごとの受入基準

Table 2. Acceptance standards for boiler plates

周 辺 検 査	中 央 部 検 査	平板検査
0 ~ 3 級 ただし 3 級については 周辺長さ 1 m 当り最高 3 個所とする	0 ~ 3 級 ただし 3 級については 周辺長さ 1 m 当り最高 3 個所までとする	0 ~ 3 級

以上三つのうちのどれを選ぶかは鋼板の使用目的、その後の加工条件などを考慮して決められる。こうして走査した結果得られた反射波は第 1 表に示す図形に分類されかつ鋼板の級別が行なわれる。そして上にあげた 3 種のおおのの 探傷面積 ごとに 受入基準が決められている。これを第 2 表に示す。

以上代表的な規格を取上げて鋼板の内部欠陥を評価する際に使用する鋼板の超音波探傷試験法とその判定基準を示したが、これらの規準により評価され合格とされた板では、それぞれの受入基準により許容される許容限界内の大きさの欠陥が板端面近くに存在した場合には、溶接のために端面加工をほどきした場合、当然開先面に欠陥があらわれることが考えられる。そして、その大きさとしては ASME Section III の場合には長さ最大 3", ASTM の場合には長さ 2", さらにドイツ規格の場合には 3 級の鋼板で最大 35mm であることがおこりうる。

これらの欠陥はその後の溶接開先面の検査の際にチェックされるのであるが、以上の規格のうち溶接開先面の検査を規定し、その受入基準を示したものは ASME Section III のほか 2.3 の規格においてみられるのみである。それゆえこれらをのぞいた英国、ドイツの規格を適用する場合においてはその判定はおそらく相互の協議により決められるか 検査官の 決定 によるものと考えられる。ASME Section III の溶接開先面の 受入基準は (Section III Article 5 Fabrication N-513 Examination During Fabrication)

- 1) すべてのクラックおよび薄片状でない欠陥はすべて除去すること。
 - 2) ラミネーションがあった場合には超音波探傷試験を実施し、その大きさを決めること。
 - 3) 表面に平行した不連続部で介在物のような欠陥は長さ 1" 以上の場合には補修すること。
- ということになっている。

これをさきの超音波探傷試験による判定基準と比較すると、超音波探傷試験の場合にはある大きさの欠陥まで許容されているにかかわらず磁粉探傷試験による開先面の検査では、“割れ” に対しては許容度がない。このことは一見矛盾するよう見られるが、もともと超音波探傷によっては欠陥の種類を判定することはできず、同じ底面反射波の消失といってもある場合には割れであり、

ある場合にはラミネーションであり得る。しかし磁粉探傷試験で開先面を検査した場合に得られた指示模様からは比較的明確にその種類を判別することが可能であり、有害な割れとラミネーションを区別することは困難でない。ここでいう割れとはあくまでも材料の機械的性質に有害な影響を与えるものとか、製造技術に疑いがもたれるものをさしているものと考えられるのであって、もしこのような欠陥が発見された場合には、単に開先面上にある割れをグラインダで研磨削除するというだけでなく、その発生原因のいかんによっては鋼板そのものをも廃却にすることも考えねばならない。一方同じ表面上の開口欠陥であってもラミネーションの場合は、成因も明らかであり、ある程度の発生は避けられない。そのためある程度の大きさのものまでは許容しておく必要がある。そこで開先面の受入基準においても特に限界をもうけず再度超音波探傷をその部分に行ない大きさを決定し種々な影響を考慮してから判定を行なうことになる。それゆえ当然その受入れられるラミネーションの大きさは、超音波探傷で許容される欠陥の大きさから考えてかなりの大きさになるものと考えられる。しかし介在物に対しては長さ 1" のものまでしか許容していないことから考えて開口欠陥であるラミネーションに対してもやはりこれと同程度もしくはそれ以下の大きさのものまでが許容されるものと考えるべきであろう。ラミネーションは割れに比べいくらか無害であるとはいえやはり開口欠陥であり、介在物に比べ鋼材および溶接部に対し悪影響がないと考えるのは危険である。もちろん、開先面での欠陥評価の判断はあくまでも溶接に対する影響を主要な因子として見るため、その種類によっては介在物の方がより悪影響を与える場合もあり得るものと考える。

ひるがえってわが国における基準においては、超音波探傷試験による内部欠陥の評価基準はほぼ ASME Section III と同様であり（通産省令第 58 号）、溶接開先面の磁粉探傷試験は同じように要求されているが、開先面に対する許容限界は示されておらず溶接部に対する判定基準がそのまま適用されている。

以上鋼板の内部欠陥の評価基準についての国内、国外の規格の例を示したが、はたしてこれらの評価基準が妥当なものであるかどうか、これらの規格に示された受入基準としての欠陥の大きさの根拠を示した文献は現在までのところ見当たらないし溶接に及ぼす影響についての研究もその数はきわめて少ない。わが国においてもこれまでに板厚 12mm および 20mm の鋼板についてラミネーション⁽¹⁾および種々な介在物の溶接におよぼす影響についての研究が行なわれ、大きな影響のないことが報告されているがそれ以上の板厚のものについての研究はあまり見られない。そのためここではさらに大きな板厚の鋼

板 (84mm) について溶接実験を行ない大きなラミネーションおよび介在物が溶接部に与える影響およびその挙動を観察した。以下その結果について示す。

III. 80 mm 厚鋼板の開先面に現われた欠陥が溶接部品質におよぼす影響

溶接実験は二つの項目に分けて行なった。すなわち一つは自然欠陥として大きなラミネーションおよび多量の介在物を溶接開先面にもつ鋼板を溶接した場合、これらの欠陥がどのような挙動を示すかを知ることを目的とした実験と、もう一つは大きなラミネーションおよび有害な介在物を含む開先面を溶接した場合に得られる溶接部の強度がどのような影響を受けるか、また諸規格では大きな欠陥がある場合補修溶接を実施することが規定されているがその効果はどのようなものであるかを知るため人工欠陥を作成して行なった実験との二つに分けられる。

1. 開先面上にあらわれたラミネーションおよび介在物が溶接におよぼす影響およびその挙動

1) 材 料

本実験には板厚 84mm の低炭素細粒化鋼を使用した。その化学成分および機械的性質は次の第 3 表に示すとおりである。

試験板は 4m×4m の鋼板の超音波探傷結果から特に

第 3 表 (a) 試験板材料の化学分析値

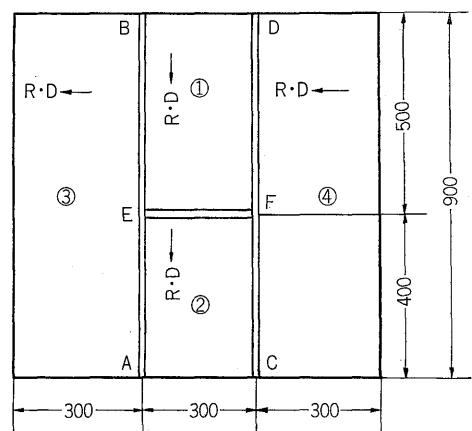
Table 3.(a) Chemical compositions of test specimen

元 素 名	C	Mn	P	S	Si
%	0.14	1.08	0.022	0.046	0.15

第 3 表 (b) 試験板材料の機械的性質

Table 3.(b) Mechanical properties of test specimen

Y. P	T. S	El	R. A
32kg/mm ²	46.4kg/mm ²	26.8%	58.2%



第 7 図 H形拘束溶接試験板配置図

Fig. 7. Plate arrangement for restraint weld test

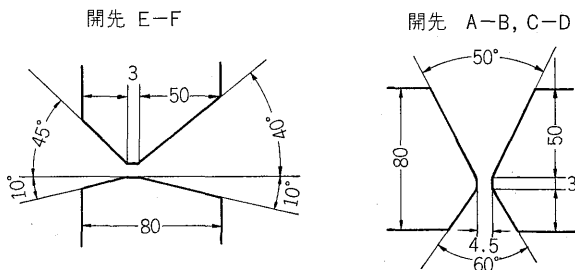
有害な欠陥が含まれていると考えられる反射エコーを示す部分から切断し第7図に示すH形拘束溶接試験用試験板とした。

試験板①、②にははなはだしい底面反射波の減衰を伴う部分を特にえらび使用した。その結果この部分からは後に開先面を加工した際に第10図に示すような欠陥が認められた。

2) 溶 接 方 法

(1) 溶 接 開 先

溶接開先は第8図に示すとおりX形開先とし、最初ガス切断で形状をつくりその後グラインダー仕上を行なった。



第8図 溶接開先形状および寸法

Fig.8. Edge preparation for restraint weld test

(2) 溶 接 方 法

溶接は手溶接法を採用し、溶接棒としては低水素系LB-55（神戸製鋼製）を使用した。溶接棒は溶接前にあらかじめ300～350℃で1時間乾燥した後常に70℃に保持し吸湿を防ぐよう配慮して使用した。

予熱は酸素プロパン焰によって、溶接前から加熱し溶接中も110～150℃に鋼板が保持されるように加熱した。

溶接はまず拘束溶接部A-BおよびC-Dを立向姿勢で行ない次に本試験部E-Fについて斜め上向きの姿勢で行なった。溶接順序としてはまずMajor Vee側から約30mm溶接後裏側よりガウジングし、グラインダ仕

上をした後両面から同時に溶接を行なった。その後現場などで補修溶接が行なわれる可能性のあることを考慮し、3回にわたって補修溶接を行ない、できるだけ現場で与えられる熱履歴および拘束を再現するようにして実施した。これらの溶接条件および補修溶接条件を第4表に示す。なおこの際第1回の溶接終了時およびおのこの補修溶接の終了時に放射線透過試験を実施し欠陥発生の有無をチェックする一方ガウジングのあとでは必ず磁粉探傷試験および染色浸透探傷試験を実施し有害欠陥存在の有無をチェックした後に補修溶接を行なうようにした。

3) 非破壊および破壊試験

(1) 非 破 壊 試 験

非破壊試験としては超音波探傷試験と磁粉探傷試験および染色浸透探傷試験、放射線透過試験をした。超音波探傷試験は、試験板を採取する際大きなラミネーションおよび介在物が含まれている位置を確認するために行なった。また磁粉探傷試験および染色浸透探傷試験は開先面加工後開先面に存在する欠陥を評価するために行なったもので開先面検査の主要な試験法であり、開先面での欠陥の受入基準はすべてこの試験法により決定される。

放射線透過試験は溶接終了後有害欠陥が溶着金属内部に存在しないか否かを、ラミネーションおよび介在物との関係において調べるためX線透過写真を撮影した。一方溶接後第9図に示すように採取した幅30mmの試験片については、ラミネーションおよび介在物が溶接によりいかなる挙動を示したかを調べるため試験片を板厚と直角方向からX線透過写真を撮影した。

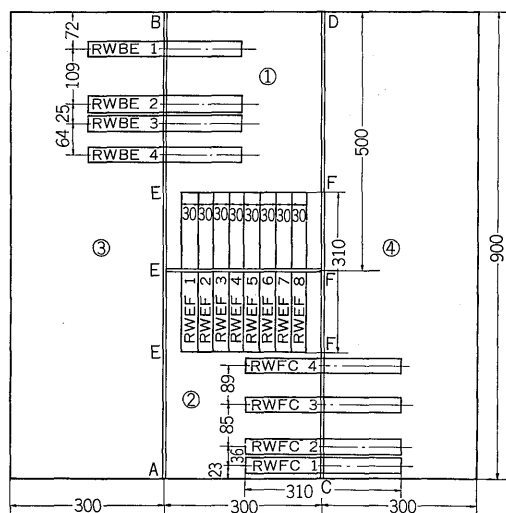
(2) 破 壊 試 験

母材中に含まれるラミネーションおよび介在物の溶接におよぼす影響および溶接によるこれらの欠陥の挙動をしらべるため、溶接部は第9図のように幅30mm長さ

第4表 溶接条件および補修溶接条件

Table 4. Welding and repair conditions

	場 所	層 数	棒 径	電 流	予 熱	姿 勢
拘 束 溶 接	Major Vee	1～16	4 mm	135～190 A	110～150℃	Semi-Overhead Horizontal
	(Arc Air Gouging)			500 A	50℃	Semi-Vertical Horizontal
	Major Vee	1～47	5 mm	210 A	110～150℃	Semi-Vertical Horizontal
	Minor Vee	1～73	5 mm	190 A	110～150℃	Semi-Vertical Horizontal
第一次補修溶接	(Arc Air Gouging)			500 A	50℃	
	Major Vee	1～69	4 mm 1- 3 5 mm 4-69	165 A 190 A	110～150℃	Semi-Overhead Horizontal
第二次補修溶接	(Arc Air Gouging)			500 A	50℃	
	Major Vee	1～16	4 mm 1- 3 5 mm 4-63	160 A 185 A	110～150℃	Semi-Overhead Horizontal
第三次補修溶接	(Arc Air Gouging)			500 A	50℃	
	Minor Vee	1～55	4 mm 1- 2 5 mm 2-55	170 A 220 A	110～150℃	Semi-Vertical Horizontal



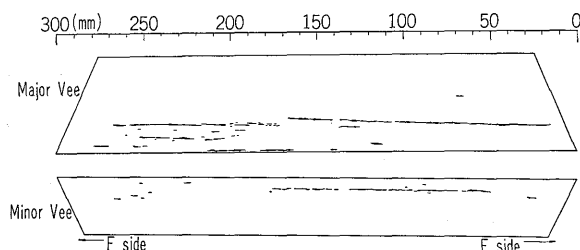
第9図 溶接完了後の試験片採取位置

Fig. 9. Cutting diagram of test coupons from restraint weld test plate

310mm の試験片に切断し、両面を研磨し、放射線透過試験により内部欠陥の状況を調べると同時に、両面を磁粉探傷試験および液体浸透探傷試験により試験し、特に大きなラミネーションおよび介在物が溶着金属の近くで検出された場合にはその部分よりマイクロ試験片を採取し、光学顕微鏡により観察した。

4) 試驗結果

拘束溶接用試験片の開先 E F の磁粉探傷試験結果を第 10 図に示す。これらの欠陥は一部に割れを伴ったラミネーションおよびサルファ系介在物であり、後者はサルファプリントにより確認された。ラミネーションおよび割れの長さは溶接開先面全長にわたっており、II 章でのべたどの規格に照らしてみてもそのまま受入れられる欠陥ではない。しかしながらその後に行なわれた拘束溶接試験板から採取した 16 枚の薄板試験片についての試験結果では放射線透過試験においてもまたマイクロ試験によってもこれら開先面にあらわれた母材欠陥と溶接部欠陥との間になんらの関連性も認めることはできなかった。その一例を第 11 図(X線透過写真)および第 12 図(表面の磁粉探傷試験結果)および第 13, 14 図(光学顕微鏡写真)に示す。特に第 13 図および第 14 図ではラミネーションおよび割れと溶接部との関係が明らかにされている。



第 10 図 E-F 開先面の磁粉探傷試験結果

Fig. 10. Magnetic particle indications on plate edge



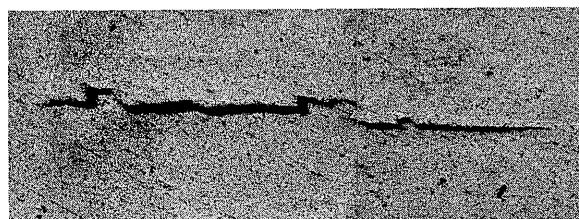
第 11 図 試験片 RWEF-1 の放射線経過写真

Fig. 11. Radiograph of test coupon RWEF-1



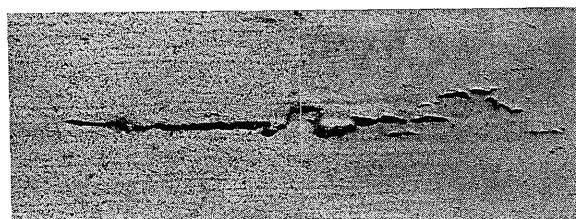
第 12 図 試験片 RWE F-1 表面の磁粉探傷試験結果

Fig. 12. Magnetic particle indications on test coupon RWEF-1



第 13 図 溶接ボンド部近くにおける欠陥の状況(1)

Fig. 13. Photomicrograph of defect



第 14 図 溶接ボンド部近くにおける欠陥の状況(2)

Fig. 14. Photomicrograph of defect

るが、いずれも溶着金属中には浸入せずボンド部ですべて停止している。

2. 開先面上にラミネーションおよび介在物を有する材料の溶接部の強度と補修溶接の効果

1) 材 料

材料としては前項でのべたと同じ化学成分を有する低炭素細粒鋼を使用した。この実験では人工的に作成した大きなラミネーションおよびサルファ系およびフェルサイナイト系介在物が溶接部強度に与える影響とその補修効果を知るため第 15 図に示す組合わせて試製片を作成し溶接を行なった。すなわち、一つは比較のため、自然欠陥を有するものについて同様な開先形状、補修条件および溶接条件で溶接し、ほかは 2 枚重ね合わせて 84mm になるように試験片を作成し、一部のものについては第

大きな欠陥のある鋼板	実際の板で欠陥	補修溶接しないもの (1-1)	
		補修溶接したもの (1-2)	
	人工欠陥で硫黄粉を入れたもの	補修溶接しないもの (2-1-0)	
		補修溶接したもの (2-1-R)	
	人工欠陥でアルミ箔を入れたもの	補修溶接しないもの (2-2-0)	
		補修溶接したもの (2-2-R)	
実際の板で欠陥の小さい板		補修溶接しないもの (3-1)	
		補修溶接したもの (3-2)	

第 15 図 溶接部強度試験片の種類

Fig. 15. List of weld strength test plates

15 図に示すような模擬欠陥をこの 2 枚の板の間に作成し溶接実験を行なった。たとえば“人工欠陥で硫黄粉を入れたもの”とあるのは重ね合わせた 2 枚の板の間にサルファ系介在物を挟んでサルファの粉末を一面においたものについて補修溶接を行なったものと行なわないものについて溶接実験を行なった意味である。

試験片の形状としては 300 mm×250 mm (開先面の長さが 300mm) のものを使用した。

2) 溶 接 方 法

(1) 溶 接 開 先

溶接開先は図に示すような V 形開先とし、板 2 枚を重ね合わせた人工欠陥母材については上下の板が分離しないようにそれぞれ 4 隅で仮止め溶接を行なった。またこれと溶接される板の開先面については磁粉探傷試験および液体浸透探傷試験を行ないあらかじめ欠陥の種類、大きさ、位置を記録した。

(2) 溶 接 方 法

溶接はすべて手溶接とし、溶接棒としては低水素系 LB-55 (神戸製鋼製) を使用した。溶接棒は前項の実験でのべたと同様あらかじめ 300~350℃ で 1 時間乾燥後 70℃ に保持吸湿を防ぐよう配慮し使用した。

予熱は溶接中も含めて常に 110~150℃ になるよう酸素-プロパン炎を用いて行なった。

溶接は斜立向姿勢で片面盛上げ溶接で行なった。

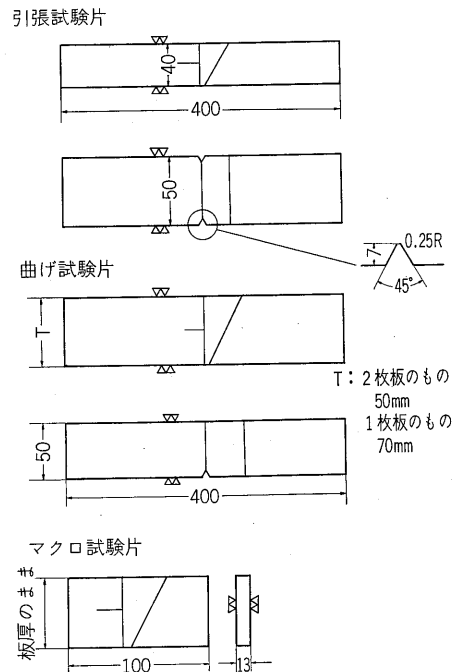
3) 非破壊および破壊試験

(1) 非 破 壊 試 験

前述した溶接開先面に対して行なった磁粉探傷試験および染色浸透探傷試験のほかに、溶接終了後放射線透過試験を行ない有害欠陥発生の有無を調べた。

(2) 破 壊 試 験

ラミネーションおよび介在物の溶接部強度に及ぼす影響を知るため、引張り試験および曲げ試験を実施した。さらに溶着金属への影響を詳細に調べるためマクロおよびミクロ組織試験を実施した。引張り試験および曲げ試験の際には、母材と溶接部境界との強度におよぼすラミネーションの影響を調べるため、ボンド部に深さ 7mm のノッチを付けて試験した。それぞれの試験片の形状を第 16 図に示す。



第 16 図 各種試験片の形状

Fig. 16. Weld strength test specimen

4) 試 験 結 果

(1) 非破壊試験結果

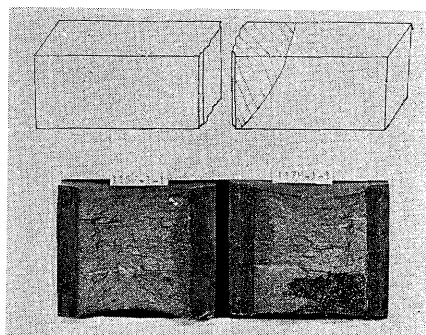
開先面の磁粉探傷試験および染色浸透探傷試験では人工的に作成したラミネーション部および介在物の部分以外では特に大きな欠陥は発見されなかった。また X 線透過試験によっても、これら人工欠陥と関連づけられる有害欠陥の存在は認められなかった。

(2) 引張試験結果

引張試験結果を第 5 表に示す。これよりいずれの試験板からも特に大きな差を認めることはできない。しかし一般的傾向として補修溶接を行なったものの方が補修溶接を行なわないものに比べ幾分強度が高くなっている。これはその破面を見れば分るとおり (第 17 図(a)) 破断はすべてボンド部にそって進行しており、補修溶接を行なったものの場合では第 17 図(b)および第 18 図に示すように破断クラックは補修溶接部とのボンドにそって進行

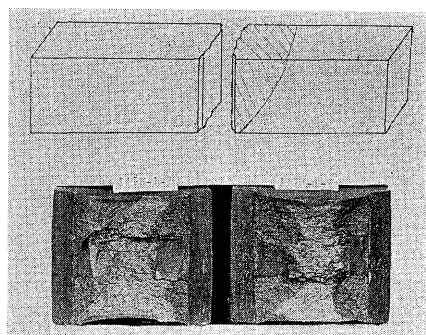
第5表 引張試験結果
Table 5. Tensile test results

		試験片 番 号	断面積 (mm ²)	降伏点 (kg/mm ²)	抗張力 (kg/mm ²)	補修の有無
欠陥大の板	実際の板で欠陥大の板	1-1	1,400	38.9	49.6	補修せず
		1-2	1,410	39.5	53.8	補修したものと修す
	二枚板	硫黄	2-1-O	1,385	40.4	補修せず
			2-1-R	1,399	38.6	補修したものと修す
		アルミ	2-2-O	1,400	39.3	補修せず
			2-2-R	1,410	38.6	補修したものと修す
	欠陥小の板	3-1	1,435	39.1	52.2	補修せず
		3-2	1,435	39.4	52.8	補修したものと修す



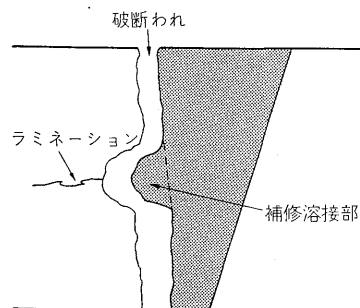
第 17 図(a) 補修をしない溶接部の引張試験片破断面
(試験片番号 1-1)

Fig. 17. (a) Fracture surface of tensile test specimen No. 1-1 (No Repair)



第 17 図(b) 補修をした溶接部の引張試験片破断面
(試験片番号 1-2)

Fig. 17. (b) Fracture surface of tensile test specimen No. 1-2 (Repaired)



第 18 図
補修溶接を行なった引張試験片の破断割れの進行経路
Fig. 18.

Schematic diagram of crack propagation in repaired weld

しているため、それだけ破断面が大きくなっているためと考えられる。このことは小さな自然欠陥を有する板で行なった実験（試験片 3-1 および 3-2）のさいには補修部の面積が小さいためほとんど破断面積に差を生ぜず、したがって補修したものとししないものとを比較した場合強度的にもほとんど差がないことから裏付けられる。

3) 曲げ試験結果

第 6 表に曲げ試験結果を示す。この場合も引張試験と同様、補修したものはしないものに比べ幾分曲げ強さが高く得られている。この場合も第 19 図(a)および第 19 図(b)に示すように破断がすべてボンド部で破断し、補修溶接をしたものにおいては補修溶接のボンド部にそって破断しているため強度の上昇はもっぱら破断部面積の増大により影響されているものと考えられる。

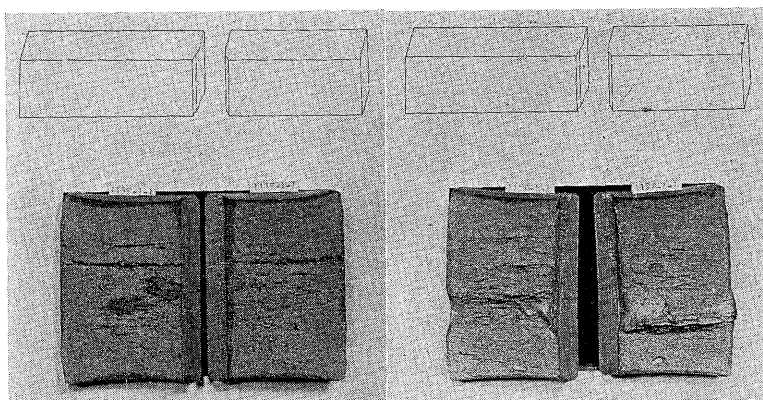
4) マクロ、ミクロ試験結果

破壊試験に使用した以外の部分よりマクロおよびミクロ試験片を採取し、溶接部におよぼす欠陥の影響をしらべた。代表的な例を第 20(a), 20(b) 図および第 21(a), 21(b) 図に示す。第 20(a), 20(b) 図は試験片番号 1-1 および 1-2 に相当する試験板より採取したものであり第 21(a), 21(b) 図は試験片番号 2-1-O および 2-1-R に相当する試験板より採取したものである。このいずれをみても欠陥はすべて溶着金属との境界で停止しており、これらの欠陥から二次的に有害欠陥が溶着金属中に進行するのは認められなかった。これらの欠陥の状況をさらに詳細にミクロ的に観察した結果を第 22 図および第 23 図に示す。これらの図より上述した結果を確認することができる。

第6表 横曲げ試験結果

Table 6. Side bend test results

		板 番 号	断 面 積 (mm ²)	BH ²	P (荷 重) (kg)	P×L=M	M/Z (kg/mm ²)	補修の有無	
欠陥大の板	実 際 の 板		1-1	2,830	114,250	27,000	81.0×10 ⁵	71.1	な し
			1-2	2,990	127,860	29,400	88.2×10 ⁵	68.9	あ り
	二枚板	硫 黄	2-1-O	2,135	91,160	15,500	46.5×10 ⁵	51.0	な し
			2-1-R	2,100	90,190	18,400	55.2×10 ⁵	61.2	あ り
		アルミ	2-2-O	2,130	90,740	15,800	47.4×10 ⁵	52.2	な し
			2-2-R	2,120	89,470	17,600	52.8×10 ⁵	59.0	あ り
欠 陥 小 の 板			3-1	3,050	133,070	24,000	72×10 ⁵	54.0	な し
			3-2	3,050	133,070	26,400	79.2×10 ⁵	95.5	あ り

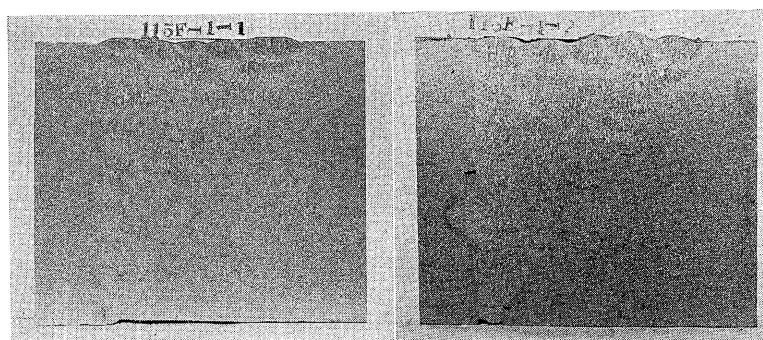


第 19 図(a) 補修溶接をしない溶接部の横曲げ試験片破面

Fig. 19. (a) Fracture surface of side bend test specimen No. 1-1 (No Repair)

第 19 図(b) 補修溶接を行なったものの横曲げ試験片破面

Fig. 19. (b) Fracture surface of side bend test specimen No. 1-2 (Repaired)

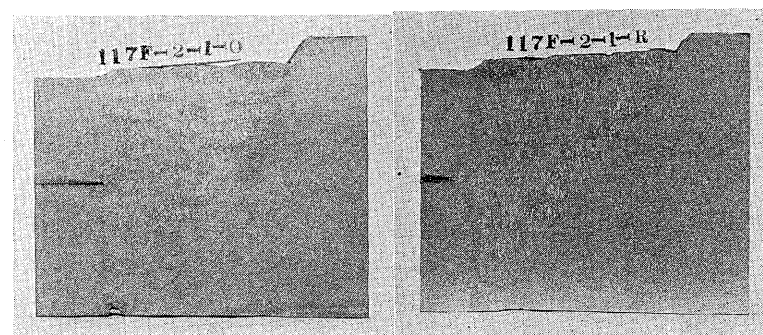


第 20 図(a) 補修溶接しない自然欠陥溶接部の断面マクロ写真

Fig. 20. (a) Macro structure of weld contain natural defect (No Repair)

第 20 図(b) 補修溶接した自然欠陥溶接部の断面マクロ写真

Fig. 20. (b) Macro structure of weld contain natural defect (Repaired)



第 21 図(a) 補修溶接しない人工欠陥溶接部の断面マクロ写真

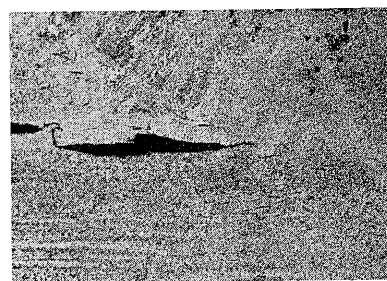
Fig. 21. (a) Macro structure of weld contain artificial defect (No Repair)

第 21 図(b) 補修溶接した人工欠陥溶接部の断面マクロ写真

Fig. 21. (b) Macro structure of weld contain artificial defect (Repaired)

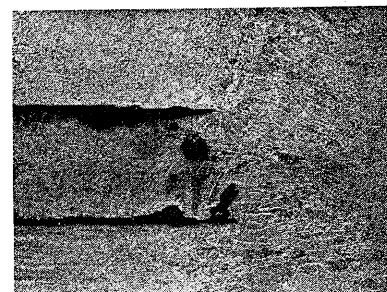
IV. 結 論

以上二つの実験を通して観察された結果として、80 mm の鋼板を溶接する場合でも鋼板中にふくまれるラミネーションおよび介在物はほとんど溶接部に影響を与えず、人工的に作成したサルファバンドおよびフェルサ



第 22 図 自然欠陥の溶接部におよぼす影響

Fig. 22. Photomicrograph of natural defect at bonded area



第 23 図 人工欠陥の溶接部におよぼす影響

Fig. 23. Photomicrograph of artificial defect at bonded area

イナイト系介在物が多少あっても溶接割れの発生は認められなかった。もちろんこの際行なう溶接条件としては低水素系の溶接棒を使用し充分管理された状態で行なうことを条件としている。しかしながら他の報告では潜弧溶接を行なった場合にはラミネーション中に残存した水分またはガスにより第一層目に気泡が発生するということがいわれているが、これは充分な予熱を行なえばさけられるもので溶接の条件さえ管理すればラミネーションなどの場合にはその形状大きさにあまり関係なく良好な溶接を実施することができるものとする。一方強度については実験結果の示すとおり補修溶接をすることにより欠陥に影響されない強度を得ることができるが、たとえ補修溶接しない場合でもその強度低下量はわずかであり、充分な強度さえ保証されるならば

特に著しい欠陥の場合をのぞいては補修溶接を行なう意味はあまり充分でないと考えられる。

参考文献

- (1) 堀田知道, 他: 溶接学会誌 Vol. 32, No. 3 1963, p. 92-93
- (2) 八幡製鉄技術研究所 第 20 回溶接施工委員会資料 溶接学会 1963



＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。