

部分溶込みかど継手のルート部に発生した

ブローホールの走査型電子顕微鏡による観察

播 本 章 一¹⁾ 森 本 喜 典³⁾
千 歳 耕 一²⁾

溶接欠陥は構造物の疲れ強さに悪影響を及ぼすがそのうちブローホールについては、多少の存在は実用上問題ないとされてきた。しかし、調質高張力鋼を使用した道路鉄道併用吊橋の補剛トラス弦材のかど継手を対象とした疲労試験の結果、部分溶込み溶接の開先ルート部に発生するブローホールは疲れ強さを低下させることがわかり、問題となっている。そこで、破面解析などによく用いられる走査型電子顕微鏡を用いてこのルート部に発生したブローホールの観察と成分分析を行なった。その結果、観察した範囲内では、ブローホール内にスラグが入り込んでいる以外は通常溶接金属内に発生するブローホールとの差異は認められなかった。

はじめに

溶接部には種々の欠陥が生じる可能性がある。そして溶接された構造物が、繰り返し荷重を受けたときそれらの溶接欠陥はいずれも応力集中部となり、疲れき裂の起点となって構造物全体の疲れ強さを著しく低下させることはよく知られた事実であるが、従来は、ブローホールについては多少の存在は実用上ほとんど支障がないとされてきた。

しかし、近年、本四公団により実施された大型疲労試験の結果、部分溶込みかど継手のルート部に発生するブローホールについては、疲れき裂の起点となり易くその構造物の疲れ強さを低下させることが報告されている¹⁾。そこで、このルート部に発生したブローホールを走査型電子顕微鏡により観察し、その形態、周囲の清浄度などが通常の溶接金属内に発生するブローホールと異なっているかどうかを調査したので報告する。

1. 走査型電子顕微鏡について^{2), 3)}

フラクトグラフィ（破面解析）は破壊後に残された破面の痕跡を観察し、その痕跡の特徴より破壊の原因ならびに機構を解明しようとするものであり、その手段のひとつとして走査型電子顕微鏡が用いられる。走査型電子顕微鏡（Scanning Electron Microscope）は、電子線を細く絞って試料を照射することによって得られる像を拡大観察するもので、吸

収電子、反射電子など各種の情報が利用できるが、それらのうち二次電子線像が分解能にも優れており、破面観察にはもっぱらこれが用いられている。この走査型電子顕微鏡の特徴は、倍率が大幅に変化できること（10倍～10万倍）、焦点深度が深く凹凸の著しい破面を高倍率で観察できることなどでその分解能は $100\sim 300\text{Å}$ （ $1\text{Å}=10^{-8}\text{cm}$ ）程度である。また、同一装置で観察破面の成分分析ができるものも多く、本報告においてもエネルギー分散型分析器による点分析の結果を示している。

2. 供試材料

a) 母材：使用材料としては溶接構造用圧延鋼材 SM58（板厚42mm）を用いた。その化学組成と機械的性質を表一に示す。

表一 化学組成および機械的性質

元素	C	Si	Mn	P	S	Mo	Cu	Ni	V	Ceq
重量%	0.13	0.31	1.35	0.01	0.001	0.11	0.09	0.15	0.037	0.40

$$Ceq = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Cu}{13} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14}$$

板厚 (mm)	降伏点 (kgf/mm ²)	引張強さ (kgf/mm ²)	伸び (%)	曲げ試験	シャルピー 靱性エネルギー (kgf-m)
42	58	69	28	Good	28.7 (-5℃)

b) 溶接材料：60kgf/mm²用サブマージアーク溶接材料としてUS-49+MF-38Aの組み合わせを用いた。

c) 溶接：溶接方法はタンデムサブマージアーク

1) 大阪工場副工場長
2) 技術部技術課副課長

3) 技術部技術課

溶接を用いた。このときの溶接条件および積層方法を表-2に示す。

表-2 溶接条件および積層方法

開先形状	層	電流 (A)	電圧 (V)	速度 (cm/min)	入熱 (KJ/cm)	積層方法
開先深さ 12mm 開先角度 60°	1	先行	750	32	55	
		後行	650	38		
	2	先行	650	37	43	
		後行	640	37		

d) 試験片採取方法：溶接完了後、図-1に示す方法で強制破断し、ルート部のブローホールを調査した。

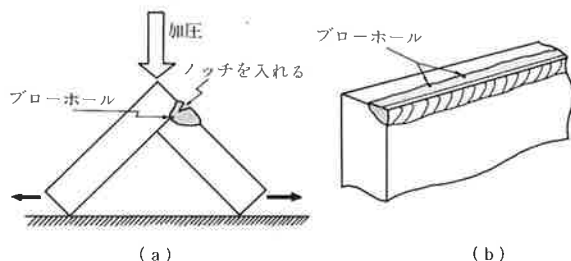


図-1 強制破断方法と破断面に見られるブローホールの発生位置

4. 破面観察結果

(1) ルート部のブローホール (ブローホールA)

写真-1にブローホールの全景を示す。このブローホールは、ルート部溶込み線に接しており、幅約0.5mmのものである。写真-1でわかるように、このブローホールは2段になっており、下の方のブローホールの内部には、サブマージアーク溶接のスラグが入り込んでいる。その拡大したものを写真-2に示す。ブローホールの周囲は全て写真-3に示すような延性破面を呈しており、非金属介在物は見当たらない。(但しデンプルの中には通常見うけられる介在物の微粒子が存在する) ブローホールの内部を写真-4に示すが、平坦な様相を呈しており結晶粒界らしき溝が見うけられる。

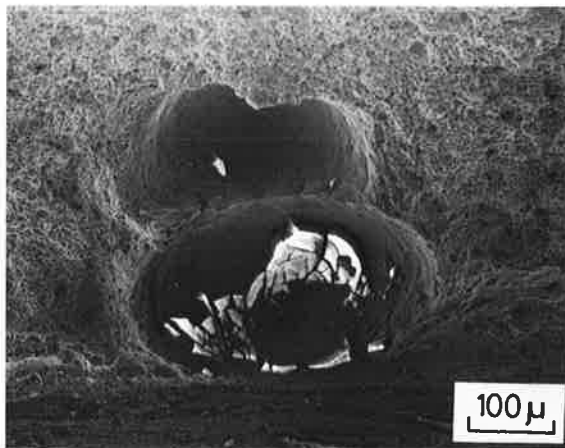


写真-1

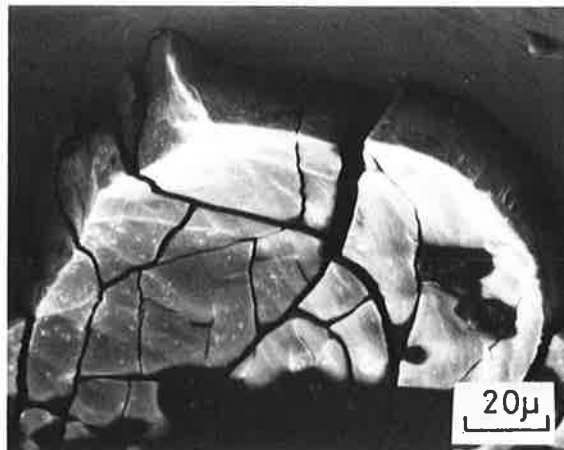


写真-2

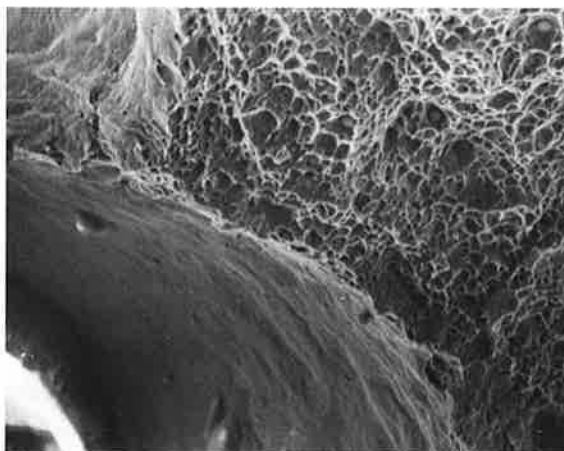


写真-3

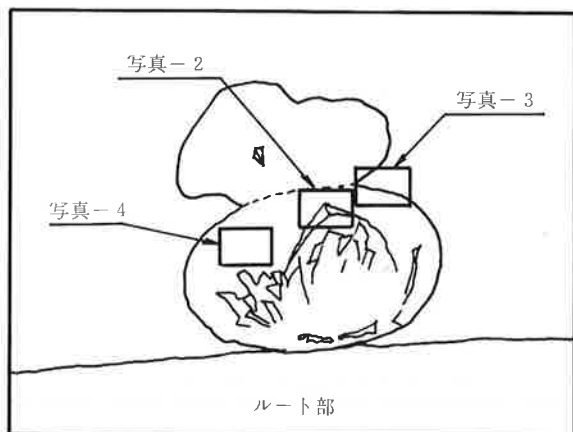


図-2 写真-1のスケッチ図

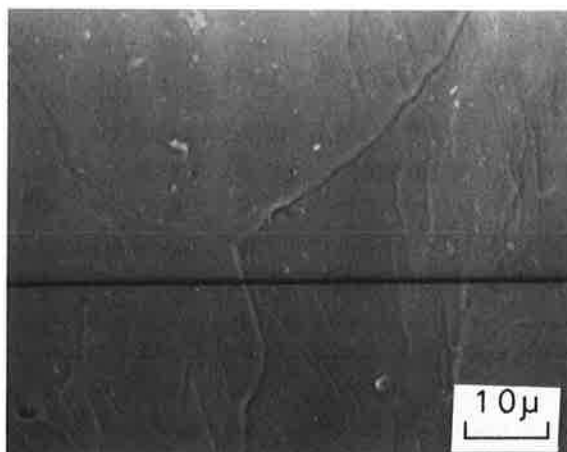


写真-4

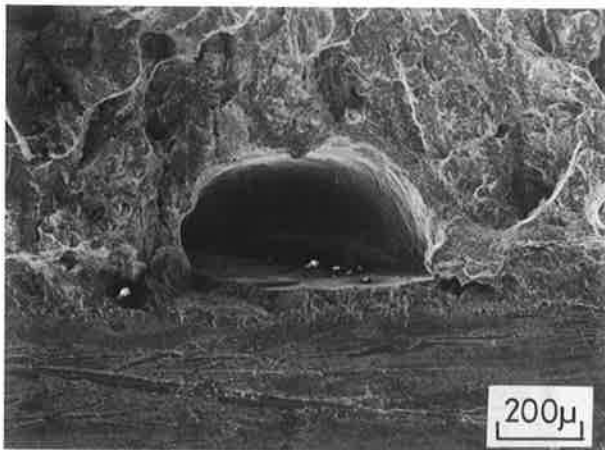


写真-5

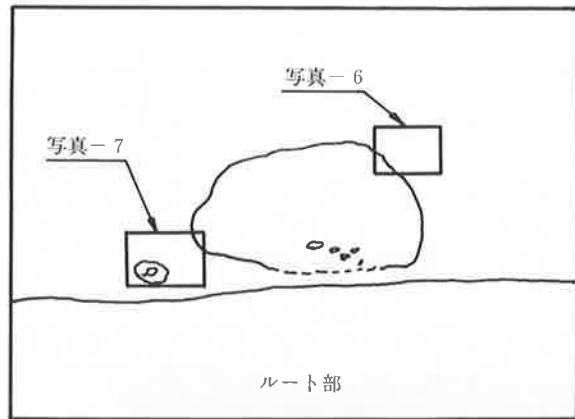


図-3 写真-5のスケッチ図

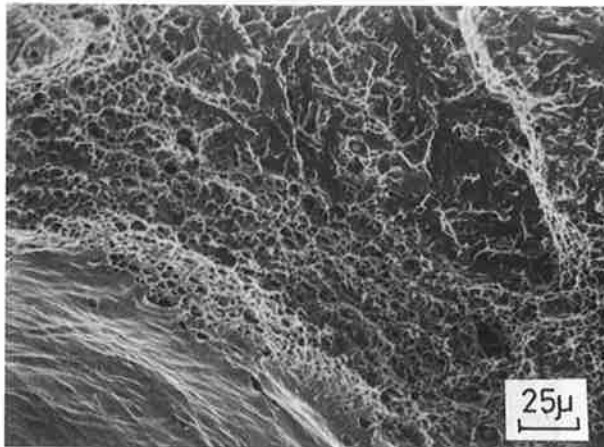


写真-6



写真-7

(2) ルート部のブローホール (ブローホールB)

写真-5に示すブローホールの幅は約0.6mmである。ブローホールの周囲は写真-6に見られるようにやはり延性破面となっている。ただ、この試験片は破断のために入れたノッチの深さが浅く、破断時に音をたてて急激に破断したため、一部に擬へき開破面が見られる。切欠きのある厚板を曲げあるいは引張りで負荷すると、切欠き前方に三軸引張りの状態(塑性拘束)が生じる。このことは塑性域における引張応力を上昇させ、その結果、全面降伏においてあるいはそれ以前にへき開破壊の起こる温度を上昇させ、公称延性を低下させる⁴⁾といわれているがこれが擬へき開破面の生じた理由であると考えられる。また、このブローホールの近傍に、約0.03mm程度のスラグ巻き込みらしきものが見られる。その拡大したものを写真-7に示す。これは非常に小さなブローホールにスラグが入り込んだようにも見える。なお、写真-5のブローホールの中にも同じ位の大きさのスラ

延性破壊、ディンプル

塑性変形を起こした後に破壊する様式で微小空洞の合体によるものとすべり面で破壊するものに分けられる。このうち微小空洞の合体による場合の破面の特徴的模様は、ディンプルと呼ばれる多数の小さいくぼみであり、これは工業用金属材料の延性破面に最も普通にあらわれる模様で、材料の塑性変形に伴い、材料中の析出物、介在物の微粒子などが核となって微小空洞が多数形成され、これらが合体して破壊に至るため、破面にくぼみ、すなわちディンプルができる。

グが入っている。

(3) ルート部のブローホール (ブローホールC) および成分分析

ブローホールA、ブローホールBは、その深さの関係から成分分析ができなかった。ここでは写真-8に示すブローホールの成分分析の結果を示す。なお、このブローホールについても破面的にブローホールA、Bと変るところはない。

写真-9は、写真-8のブローホール内面全体のエネルギー分散型分析器による分析の結果であるがほとんど鉄 (Fe) が検出されるのみで、きわだった非金属介在物はないことを示している。写真-10は写真-8のブローホールの内部を拡大したものであるが写真-4に示したものと同一様相を呈している。その表面にゴミの様なものが付着しているので分析を行った。その結果を写真-11(a)(b)に示す。これらは、鉄の酸化物、アルミニウムの酸化物であることがわかったが、その大きさ(数ミクロン)から見ても、通常の鋼材なら異常とは思われない。

ぜい性破壊

ぜい性破壊とは、塑性変形をほとんど伴わずに破壊する様式で、へき開破壊と擬へき開破壊に分けられる。へき開破壊は結晶のへき開面で破壊したもので、ミクロ的には破面単位を現わしているへき開ファセット(単位面)が平面状に連なった様相を示す。擬へき開破面とは、完全なへき開面に沿ったものかどうか明らかでない場合をいう。

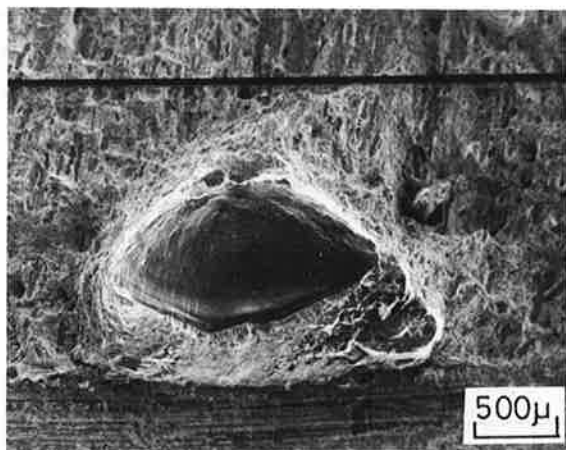


写真-8

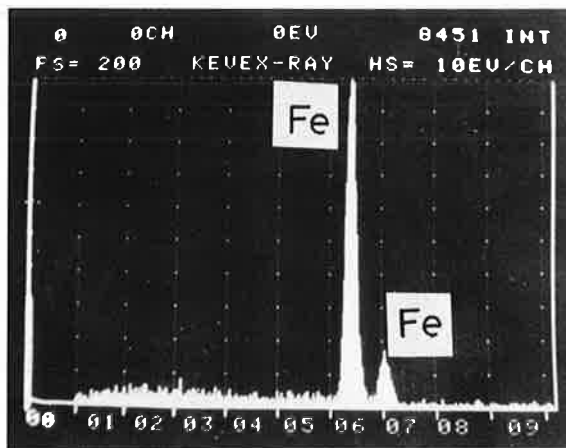


写真-9

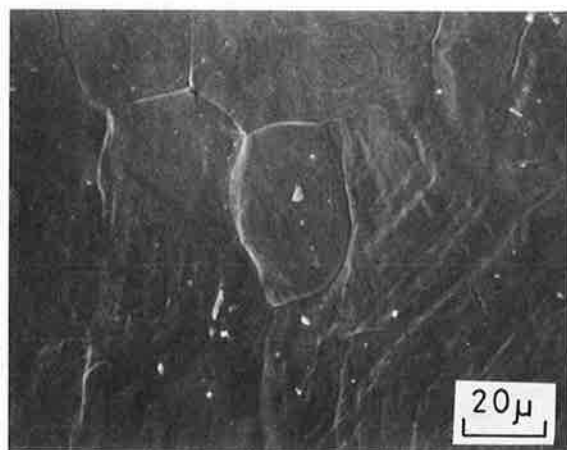


写真-10

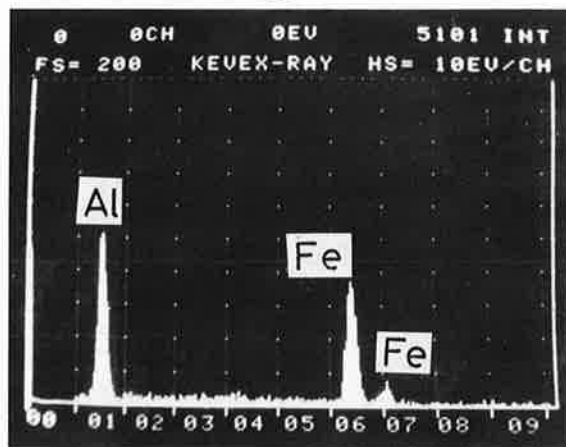


写真-11(a)

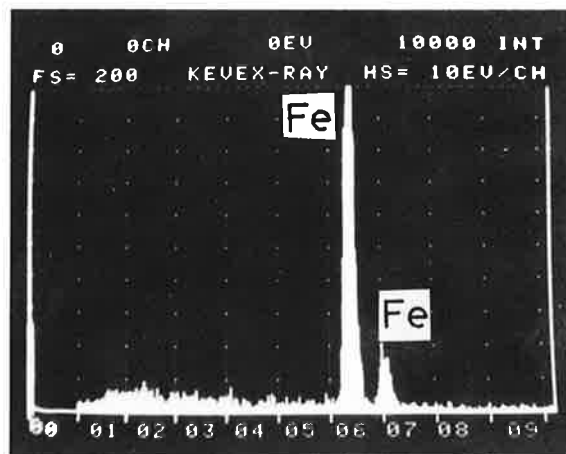


写真-11(b)

5. まとめ

以上、サブマージアーク溶接による、部分溶込みかど継手のルート部に発生したブローホールの走査型電子顕微鏡による観察および成分分析を行った。その結果をまとめると以下のようになる。

- (a) ルート部に発生するブローホールの内部には、一部溶融スラグが入り込んで凝固したものが見られる。
- (b) ブローホールの周囲は全て延性破面で、ブローホールにつながる異常物は見うけられない。
- (c) ブローホールの内部は平坦な様相を呈しており、結晶粒界が見うけられる。また、数ミクロン程度の鉄、アルミニウムの酸化物が付着している。

以上のように、ルート部に発生するブローホールは観察した範囲では、内部に一部スラグが入り込んでいる以外は、通常溶接金属内に発生するブローホール⁵⁾と何ら変りなかった。

参考文献

- 1) 田島、奥川「80kg鋼を使用したトラス格点構造の疲労試験」橋梁と基礎 1978.9
- 2) 北川他「フラクトグラフィ」培風館
- 3) 松田他「溶接部破壊破面のフラクトグラフィ集」黒木出版
- 4) A.S.TETELMAN他「構造材料の強度と破壊①」培風館
- 5) 溶接学会編「鉄鋼溶接部の破面写真集」黒木出版