

鋼材の溶接部にみられる割れ

アーク溶接は、造船、鉄構およびタンクなどの分野で幅広く利用され、金属の接合になくてはならない技術になっている。

アーク溶接が、広く適用されるようになったのは、経済性はもちろんあるが、継手効率およびその信頼性が高いことによる。

継手効率が高く、かつ、信頼性の高い溶接部は、溶接欠陥がないこと、もしくは、溶接欠陥が許容範囲内であることを前提としている。

ここでは、溶接部の性能に致命的な影響をあたえるアーク溶接部の溶接割れについて紹介する。

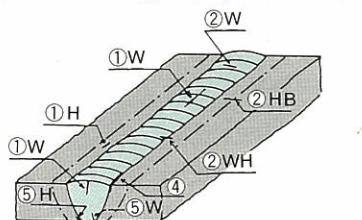
溶接割れの種類

C-1

溶接部近傍（溶接金属および母材熱影響部）に生じる割れを溶接割れと呼んでいるが、発生時期によって、低温割れと高温割れに分類される。

低温割れは、変態終了後の低温側で生じるものといい、第1表のように分類され、その発生位置は第1図、第2図のとおりである¹⁾。

高温割れは、高温で延性の乏しい状態のとき、結晶粒界が熱収縮に耐えきれず開口したものであり、一般の炭素鋼材料での発生は少なく、オーステナイト系ステンレス鋼に多くみられる。

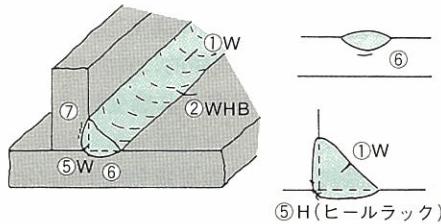


第1図 溶接割れのいろいろ(1)
(W, H, B, 記号は第1表による)

第1表 割れの位置と方向など

呼 称	発生部位	記号
縦割れ	W	①
横割れ	W H B	②
凝固割れ(高温)	W	③
止端割れ(縦)	H	④
ルート割れ(縦)	W H	⑤
ビード下割れ(低温)	H	⑥
ラメラテア(低温)	H	⑦

(注) W: 溶接金属, H: 熱影響部,
B: 母材



第2図 溶接割れのいろいろ(2)
(W, H, B, 記号は第1表による)

低温割れ

C-2

割れ発生機構

び拘束応力の環境下で割れが発生する²⁾。

遅れ割れは、高張力鋼および低合金鋼のように合金元素量が多いために、急熱、急冷による硬化性が大きいもの、また拘束応力や冷却速度が大きくなる大型構造物で発生しやすい。

なお、オーステナイト系ステンレス鋼の遅れ割れ感受性は小さく、通常の溶接により導入される程度の水素量では遅れ割れは発生しない。

① 遅れ割れ

低温割れの中でも溶接後かなりの時間を経過して割れるものをとくに遅れ割れと呼んでいる。

遅れ割れは、組織が硬いほど、水素量が多いほど、また拘束応力が大きいほど発生しやすい。

外気およびその他の要因で、溶接部に侵入した水素は、溶接部の冷却後も時間の経過とともに拡散するが、その過程で微小格子空間に集積して、ある臨界水素濃度以上に達したとき硬化組織およ

び拘束応力の環境下で割れが発生する²⁾。

2) 松村裕之: 溶接学会誌, Vol. 60(1991), p. 194.

② ラメラテア

厚板のT型開先のように板厚方向に大きな拘束応力を受け、母材熱影響部に板面と平行に階段状に生じる割れで、層状はくりとか層状割れと呼ばれている。この割れは、圧延時に生じた非金属介在物の帶、すなわち鋼材の結合力の弱い部分を選択的に割れが進展するものである。

化学成分と低温割れ

化学成分は、冷却速度と関連して硬化性に強い影響をあたえ低温割れと密接な関係がある。

低温割れ感受性を判定するパラメーターとして、炭素当量 (C_{eq}) と溶接熱影響部最高硬さが使用されていた。

$$C_{eq} (\%) = \% C + \% Mn / 6 + \% Si / 24 + \% Cr / 5 + \% Mo / 4 + \% V / 14$$

最近では、高張力鋼の多用化するニーズに対応するため、低温割れの発生因子すなわち成分、板厚、拡散性水素量などと低温割れ感受性との関連を定量的に表すものとして、下記に示す P_{CM} 、 P_C 値が採用されている。

$$P_{CM} (\%) = \% C + \% Si / 30 + \% Mn / 20 + \% Cu / 20 + \% Ni / 60 + \% Cr / 20 + \% Mo / 15 + 5 \% B$$

$$P_C = P_{CM} + H / 60 + t / 600$$

P_{CM} : 割れ感受性組成

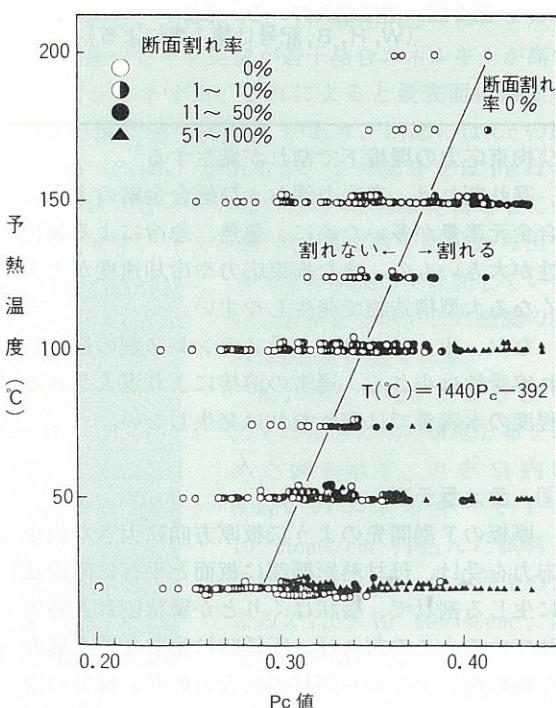
P_C : 割れ感受性指数

H : JIS Z3313による溶着金属中の拡散性水素量 (ml/100 g)

t : 板厚 (mm)

これらの式は、各種成分の高張力鋼の斜めY型溶接割れ試験によって、実験的に得られたもので、 P_{CM} および P_C 値は、低温割れ感受性との間に高い相関がある。

P_C 値と低温割れ感受性の相関を第3図に示す³⁾。



第3図 P_C 値と予熱温度の関係 (板厚16~50mm)

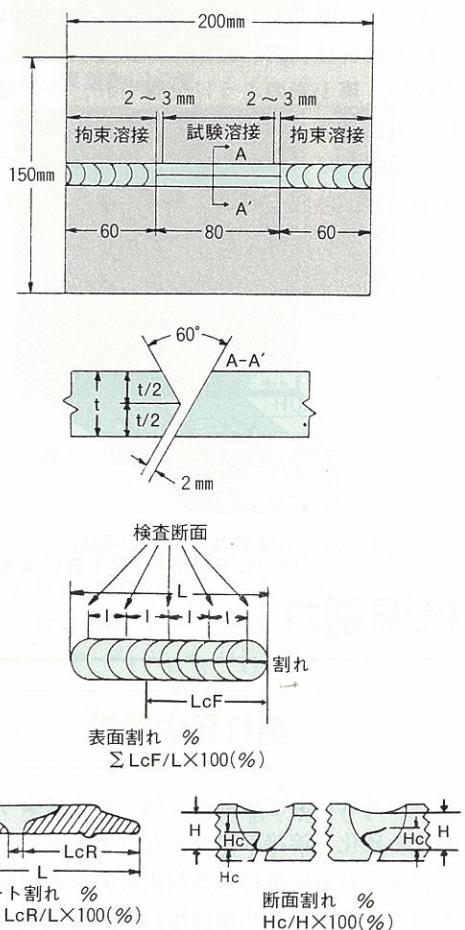
低温割れ試験方法

母材熱影響部および溶接金属の割れ感受性を見るために、多くの試験方法が提案されている。

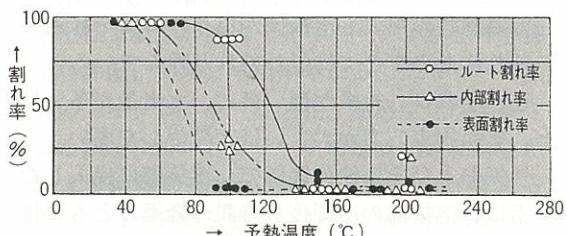
母材熱影響部の割れ感受性を調査する標準的な方法として、わが国では斜めY型溶接割れ試験方法が採用されている。

斜めY型割れ試験方法は、JIS Z3158に定められているもので第4図に示すような拘束ビードつきの試験板が使用される。所望の温度にコントロールされた試験板のルート部に試験ビードをおき、48時間経過後に割れのチェックを行う。

割れの評価は、表面割れ、ルート割れ、断面割れ率で行われる。評価方法および80kgf/mm²級高張力鋼のテスト結果の一例を第5図に示す。



第4図 斜めY型割れ試験板と評価方法



第5図 斜めY型溶接割れ試験結果の例 (80kgf/mm²級高張力鋼板)

低温割れの破面

低温割れは、おおむね貫粒型の脆性破壊であるが、粒界破壊や延性破壊が一部混在するのが普通である。

溶接構造用圧延鋼材 80 kg f/mm^2 級高張力鋼 (HT80) のルート部に発生した典型的な高強度材の水素脆化割れの走査型電子顕微鏡による割れ破面を写真1に示す⁴⁾。

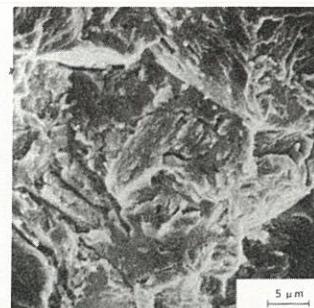


写真1 ルート部の破面（水素擬へき開破面）

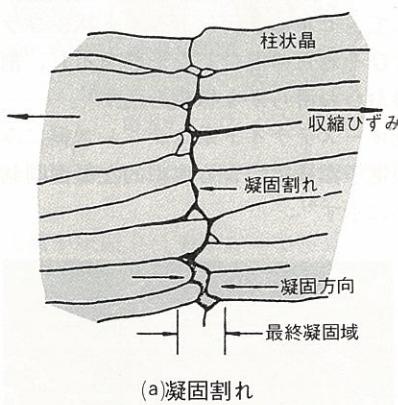
4) 溶接学会溶接冶金研究委員会：鉄鋼溶接部の破面写真集，(1982)，p. 3，黒木出版社。

高温割れ

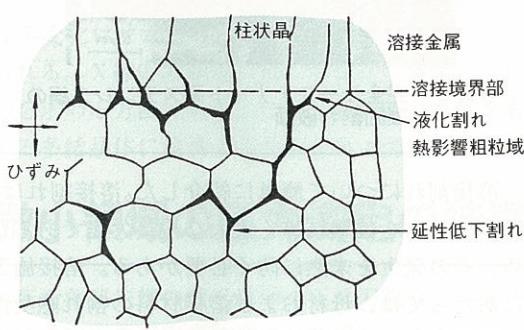
高温割れの発生機構

高温割れは、その発生時期により、凝固割れ、液化割れ、延性低下割れに区分される。

凝固割れは、溶接凝固の過程でみられるもので、第6図(a)に示すように柱状晶の境界に融点の低い液相が残留し、溶接金属冷却時の凝固収縮ひずみに耐えられず開口したものである⁵⁾。高温割れの中で最も多く観察される。



(a)凝固割れ



(b)液化割れと延性低下割れ

第6図 溶接高温割れの模式図

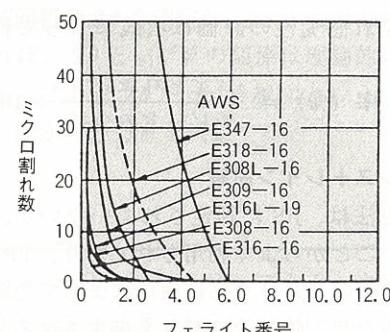
液化割れおよび延性低下割れは、第6図(b)に示すように、熱影響粗粒域の高温にさらされた粒界が、局部的な溶融、または不純物の粒界偏析が原因で、粒界の脆化および延性低下を起こし、熱収縮に耐えられず割れるものである。

組成と割れ

材料の高温脆性温度領域すなわち液相と固相の温度範囲が広いほど成分偏析が生じ、高温割れ感受性が高いとされている。

P、S、B、C、の各元素は凝固温度範囲をいちじるしく広げることが知られており、高温割れ感受性に対して是有害元素といえる。

オーステナイト系ステンレス鋼の溶接にみられる高温割れは、凝固過程においてP、S、Si、Nbなどの低融点化合物がオーステナイト粒界や柱状晶境界に析出するために生じるものであるが、デルタフェライト組織が存在すると凝固割れが少なくなることが知られている。第7図に各種ステンレス鋼のミクロ割れ数とフェライト番号⁶⁾（量）の関係を示す。各鋼ともフェライト量の増加とともに割れにくくなることがわかる。



第7図 各種オーステナイト系ステンレス鋼溶接金属の高温割れ感受性におよぼすフェライト番号（量）の影響
(AWS : American Welding Society)

5) 本間 弘之：溶接学会誌，Vol. 57 (1988)，p. 497.

6) 日本溶接協会規格委員会：オーステナイト系ステンレス鋼の溶着金属のフェライト量の測定試験方法 WES1001 (1976)，日本溶接協会。

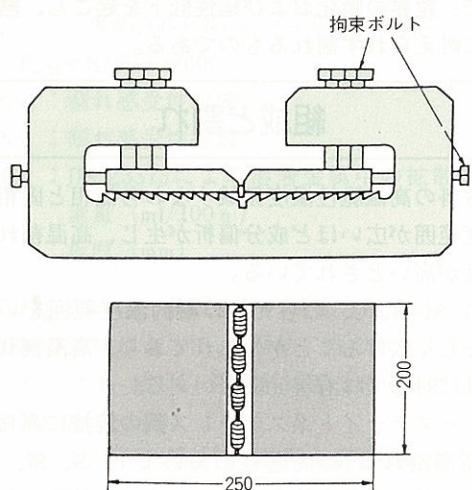
高温割れ試験方法

高温割れ感受性を判定する方法としては、JIS規格にも数種類規定され、また、これ以外にもいろいろ提案されているが、ここでは下記の2種類について紹介する。

① C型ジグ拘束突合せ溶接割れ試験方法

取扱いが簡便なこともあり、溶接金属の高温割れ傾向の判定に広く利用されており、JIS Z3155に定められているもので一般にはフィスコ(FISCO)割れ試験と呼ばれている。

ルートギャップ付きの試験板を第8図のようなジグで拘束してから試験ビードを置き、そのビードの割れを観察するものである⁷⁾。



第8図 フィスコ割れ試験

ルートギャップは、任意に変えることができるが通常2~3mmが選ばれる。

試験板は、拘束状態で10分間放置した後、拘束を解放し24時間経過後に溶接ビードの割れを検査する。

高温割れ感受性の評価は次式によって行われる。

$$\text{割れ率} (\%) = \frac{\text{全割れ長さ}}{4 \text{ ビードの全長}} \times 100$$

② バレストレイン試験

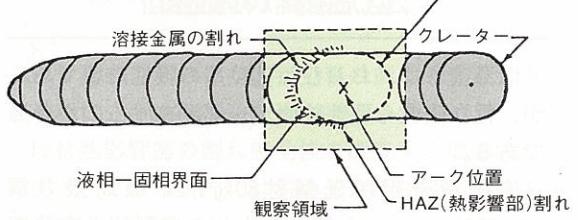
この方法は、JISに制定されていないが、再現性がよいことからよく利用されており、TIGアーキで溶接中のクレータ部に曲げによって急激にひずみをあたえ、強制的に割れを発生させる試験方法である。

試験片表面の付加ひずみは次式によってあたえられる。

$$\text{付加ひずみ } \epsilon = (t/2R) \times 100 \quad (\%)$$

t=試験板厚、R=曲げブロック曲率半径

付加ひずみをあたえた瞬間の
溶接池の位置



第9図 典型的な割れ形態のスケッチ

典型的な割れ形態のスケッチを第9図に示しているが、割れ感受性を定量的に評価する方法としては、一般的に次の指標が用いられている。

① 最大割れ長さ

割れのうち最大長さで評価する。最大長さは、凝固脆性温度領域の温度幅に対応する。

② 全割れ長さ

各割れ長さの総和でもっとも評価しやすい指標とされる。また、溶接金属と熱影響部に分類して評価することもできる。

高温割れ破面

高温割れ破面は、凝固挙動および割れ発生時に応じて、セル状、デンドライト状、コラムラー状およびそれらの混合した形態を示し、割れ表面は、おおむね滑らかな様相を示す⁸⁾。

完全オーステナイト系ステンレス鋼にみられる走査型電子顕微鏡による典型的な凝固割れ破面を写真2に示す⁴⁾。

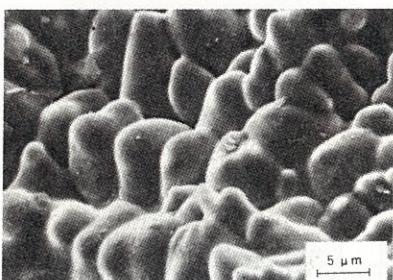


写真2 完全オーステナイト系ステンレス鋼の凝固割れ破面

溶接割れについて簡単に紹介した。溶接割れは、溶接構造物を破壊に導く重大な溶接欠陥であるため、その発生を未然に防ぐ必要がある。溶接施工にあたっては、母材および溶接材料の割れ感受性を把握し、適切な溶接施工を行うことが肝要である。

不幸にして溶接割れが発生した場合は、割れ破面の観察などによって原因を究明し、適切な対策をたてることが必要である。

[藤沢事業所材料試験室 西村勝士]

7) (株)神戸製鋼所溶接棒事業部：溶接棒各論(1964), p. 748, (株)神戸製鋼所溶接棒販売部。

8) 小川忠雄：溶接学会誌, Vol. 60(1991), p. 189.