



溶接部の凝固割れとその防止について

松 田 福 久*

1. はじめに

溶接は多くの産業分野に広く利用されており、現在では溶接なくして構造物の製作ができないといっても過言ではない。さらに一般構造物のみならず、各種の特殊材料の分野にまで溶接の利用が拡大されており、それぞれに適した溶接方法が開発され利用されてきている。

このように溶接は広い分野で利用されてきているが、一方、溶接部にはまだ多くの問題点が残されている。むしろ利用の拡大とともに益々問題点も複雑な形で増加してきている。

“溶接部の割れ”もその大きな問題点の一つである。“溶接部の割れ”にはその発生時期から分けると、溶接作業中に起こる割れと、構造物の使用中に起こる割れがある。溶接作業中に起こる割れのうち、現在もっとも問題となっているものをあげると、高温割れ、低温割れ、層状割れ、応力除去焼鈍割れなどがある。

筆者は現在、上記の割れのうち、高温割れ、しかもその内で溶接金属の凝固にとまって起こる凝固割れの研究を行っている。目標はあくまで凝固割れを起こさない材料の開発であるが、現在はまだその原因の追求を行っている段階である。したがって、ここでは凝固割れの発生機構について筆者らの考えを中心に述べてみたい。

2. 凝固割れの発生機構

溶接時に凝固割れ（溶接熱影響部に起こる液化割れも含めて）を起こし易い材料は、一般構造用炭素鋼をはじめ高炭素鋼、超高張力鋼、Ni入り低合金鋼、ステンレス鋼（オーステナイト系およびフェライト系）、Ni基耐熱合金、Al合金および特殊材料（Mo, W, Be, Mg, NbおよびU合金など）など極めて広範囲である。

* 松田福久 (Fukuhisa MATSUDA), 大阪大学, 溶接工学研究所

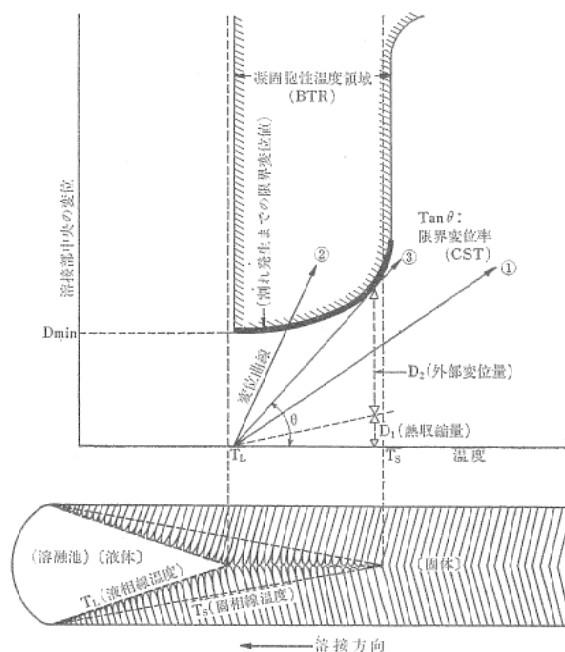


図1 凝固割れの発生機構図

一般にこの凝固割れは、材料に内在する問題点と溶接中に起こる変形挙動との組み合わせによって発生する。図1に凝固割れの発生に対する原理を図解している。すなわち図の下部に溶接（移動熱源による）中の溶接部後端近辺を示しているが、溶融金属より凝固が開始する温度（液相線温度、 T_L ）と凝固が完全に完了する温度（固相線温度 T_S ）の間では固相と液相が共存した形であり、凝固成長しつつある結晶の粒界を液相が包む形になっている。この間の温度範囲では、外部から引張られると低い応力でもすぐに伸び、少ない伸びで簡単に引き裂かれて割れが入ってしまう。このためこの温度範囲を凝固脆性温度領域（BTR）と呼んでいる。上図には材料のこのBTRにおける割れ発生までの限界変位値の変化を温度（横軸）と変位（縦軸）との関係で示している。斜線の範囲がBTRである。

これに対して T_L 近辺を出発点にして矢印で

示した線①, ①, ③があるが, これはBTRを溶接金属が通過(冷却していく)する時点において, 溶接金属が受ける変位を3段階の線(近似的に直線)で示したものである. この変位は簡単に言えば, 温度低下にともなう収縮(熱収縮量, D_1)と開先間の変位(外部変位量, D_2)の和として示される. またこれは拘束条件や溶接条件などによって異なるものである. この内で, もし変位曲線が①である場合には, BTRと交差しないために割れは生じない. しかし②の場合にはBTRの領域と交差するのでこの溶接部には凝固割れが発生してしまう. ③はその限界値となる. したがって③の直線を利用し, その接線の角度 θ を材料の固有値とし, その $\tan \theta$ を割れ発生の限界変位率(CST)と呼んでいる. 一般にこのCST値の大きい材料ほど凝固割れが発生しにくいということになる.

したがって, 同図よりみると溶接中に凝固割れを起こさせないためには, 次の2方面からの検討が必要となる. すなわち, (1)材質面 材料の凝固脆性特性の改善, すなわちBTRを狭くし, また $D_{\min}$ を大にする. (2)施工面 溶接中の凝固時における変位曲線をBTRと交叉させないように低くする.

次にこの両面について個々に述べてみる.

3. 材質面からの対策

凝固割れはいずれも結晶粒界でおこる. すなわち結晶粒界が強い, 弱いかで割れ易さが決まるのである. 一般に凝固の最終段階では少量の低融点の液相が固相間の結晶粒界に存在し, これに外力がかかり, 変位となり割れとなる. したがって, 最後に残留する液相の性質によって割れ易さが決まることになる. 実験結果ではBTRの最終温度は, 残留融液の凝固温度 T_s にほぼ近いことがわかっている. したがって T_L は同一でも, 低融点の液相を作る不純物などが混入している材料では, そのない材料よりBTRが広くなり割れ易くなる. たとえば低炭素鋼に例をとると, T_L は約1500°Cであり, T_s は不純物を含まないと約1450°CとなりBTRは約50°Cである. しかし, これにS(硫黄)がわずかに0.013%以上含まれていると, Fe-FeSの共晶を粒界に作るので T_s は約1000°Cにまで

低下し, BTRは約500°Cと広くなる. このような材料は凝固割れが極めて発生し易い. またこれに対して一般構造用鋼にはMn(マンガン)が入っている. この目的の一つはSの有害効果を防ぐためである. Mnが入るとFe-FeSの共晶温度がMnSの形におきかえられるため高くなる. そして十分にMn量が多いとその共晶温度は約1500°C近くにまでなり, BTRは20~30°Cにまで狭くなる. そうすると凝固割れは極めておこりにくい. 現在実用化されているサブマージーク溶接金属ではこのようにBTRの狭いものがある.

次に $D_{\min}$ および割れ発生までの限界変位値は凝固の最終段階における残留融液の形状にもかなり依存するようである. この融液の形状が結晶粒界において“ぬれ易い”状態になっていると $D_{\min}$ および限界変位値は低く, 球状化していると高くなって割れにくくなるようである. 図2は筆者らのところで二, 三のAl合金の $D_{\min}$ および限界変位値を示したものである.

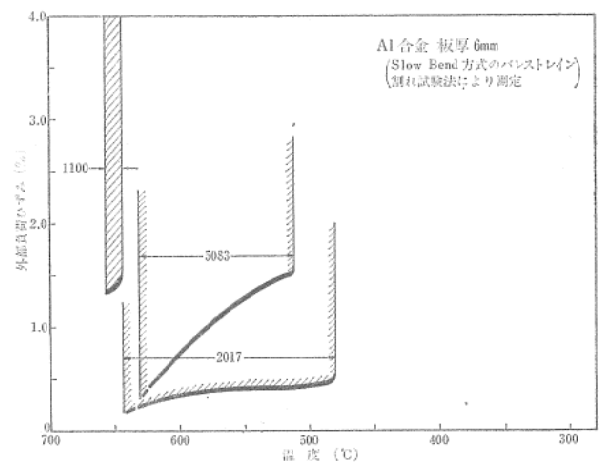


図2 Al合金の凝固脆性特性の例

る. 5083などAl-Mg系は低温度側では限界変位値が比較的大きいが, これの共晶はほぼ形状化している. これに対して, 2017(Al-Cu系)などでは共晶が低温度側でも膜状化している. このため限界変位値の増加現象はあまり顕著ではないようである. しかし一方, 共晶量が十分に多いと逆に限界変位値が増加する傾向もみられる. しかし, $D_{\min}$ の意味については目下のところ十分に解明されていないので今後の研究にまつところが大い.

4. 施工面からの対策

図1で述べた熱収縮と外部変形量の和で表わされる変位曲線をできるだけ低くすることが凝固割れを防止する上で直接的に大事な事である。BTRを狭くし、限界変位値を向上させた材料を費用をかけ努力して作ってもこの変位曲線がそれ以上に起これば割れは生じてしまう。この変位曲線の内、施工面からみて変化させ得るのは外部変位による値である。これは溶接中の熱伝導により溶接部が回転変形により開先間隔が広がることにより、溶接金属が受ける引張り変位である。したがって、この変位を小さくするには、例えば、溶接部を溶接線に向って直角方向より圧縮させるのがもっともよい方法で

あろう。そうすることにより外部変位量を負の値に持ってくることで割れにくくなる。

このように外部変位は溶接中の材料の拘束度によって変化する。完全な拘束状態ではもちろん外部変位は0であり、拘束がゆるやかで動き易いと大きくなる。そしてこれが開先間隔を広げるように動くと割れ易くなるのである。一例はすでに広く知られている片面サブマージ溶接部の終端割れ、Al合金の始端割れ、ノッチエクステンション割れなどがそれである。

以上、溶接割れの内凝固割れを例にとって筆者らのところで現在行っている研究の紹介とねらいについて簡単に述べてみた。