

図63 590N/mm²級鋼板の溶接初期温度と最高硬さとの関係 (手溶接)

7・2・2 割れ

溶接割れは、鋼構造物の破壊につながる大きな要因となることから鋼板を溶接する時にもっとも配慮を要する点である。

したがって、製造者においても鋼板の製造にあたって溶接性を考慮することが重要な課題の一つになっている。

表27は各種溶接割れとその原因および防止対策の一例を示したものであり、割れは、高温割れ、低温割れ、再熱割れの3種に大別される。

表27 各種溶接割れの発生原因と一般的対策

| 種別 | 割れ名称 | 割れの発生場所 | 割れの形状例 | 原因 | 一般的対策 |
|------|----------|--------------|--------|---|--|
| 高温割れ | クレータ割れ | 溶接金属 | | クレータ中心部への不純物析出 収縮による空孔 | ・クレータ処理 |
| | 粒界マイクロ割れ | 熱影響部 溶接金属 | | 溶接熱による鋼中のP、Sなど不純物の析出 1000 付近における拘束度 | ・鋼材中の不純成分の減少 |
| | 梨形ビード割れ | 溶接金属 | | 低融点不純物の偏析 | ・溶接条件の選択によりビード断面形状調整 |
| 低温割れ | ルート割れ | 熱影響部 溶接金属 | | 拡散性水素 鋼材の硬化性 拘束度 応力集中 | ・予熱、後熱 ・低水素系溶接棒の乾燥と使用 |
| | 縦割れ | 熱影響部 溶接金属 | | 拡散性水素 鋼材の硬化性 溶接線に直角方向の拘束力 | ・ルート割れと同じ |
| | 横割れ | 熱影響部 溶接金属 | | 拡散性水素 鋼材の硬化性 | ・ルート割れと同じ |
| | ビード下割れ | 熱影響部 | | 拡散性水素 鋼材の硬化性 | ・ルート割れと同じ |
| | トウ割れ | 熱影響部 | | 拡散性水素 鋼材の硬化性 アングカッタなど形状的不連続による応力集中 | ・予熱、後熱 ・低水素系溶接棒の乾燥と使用 ・トウ部の整形 |
| | ヒールクラック | 熱影響部 | | 拡散性水素 鋼材の硬化性 溶接金属の収縮による角変形 | ・予熱、後熱 ・低水素系溶接棒の乾燥と使用 ・溶接ビードを長くする。仮付溶接により角変形を阻止する。 |
| | ラメラテア | 熱影響部 | | 板厚方向延性低下 板厚方向に働く収縮応力 角変形によるひずみ集中 拡散性水素 鋼材の硬化性 | ・鋼中介在物の低減 ・継手設計の配慮 ・溶接方法の選択 ・予熱、後熱 ・低水素系溶接棒の乾燥と使用 ・バダリング法 |
| 再熱割れ | SR割れ | バック側上端部 | | 鋼の化学成分 残留応力 ひずみ集中 | ・溶接施工法 ・残留応力の低減 ・化学成分の検討 |

1) 高温割れ

高温割れは約1000℃以上で生ずる割れであり、溶接熱影響部の液化割れと溶接金属の凝固割れ（梨形ビード割れともいう）が代表的である。いずれも、P、S、Nなどが作る低融点化合物が原因の結晶粒界割れである。

熱影響部の液化割れはP、Sの著しく高い鋼板や高Ni鋼板に生じ通常の高張力鋼板ではほとんど生じることはない。割れを防ぐには小入熱溶接が望ましい。

一方、溶接金属の凝固割れは、突合せ溶接やすみ肉溶接などでよく見られるものであり、サブマージアーク溶接時の溶接条件と割れ発生域の関係の一例を図64に示す。

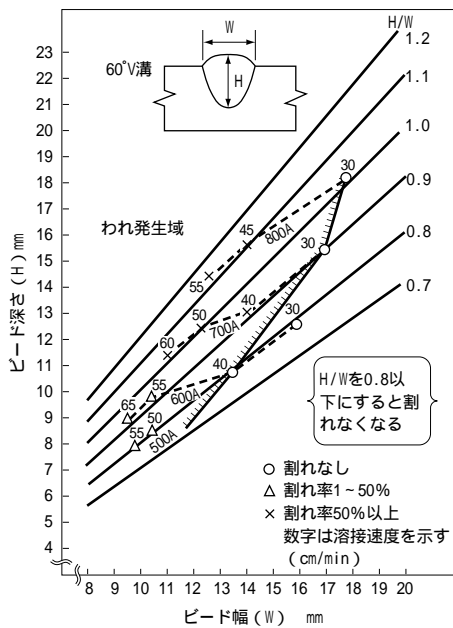


図64 ビード幅、ビード深さおよびサブマージアーク溶接条件と割れ発生域との関係⁶¹⁾

凝固割れは、ビード断面形状、すなわち、ビード幅(W)とビード高さ(H)の比(H/W)が大体0.8以上になると割れを生じるとされており、また、溶接速度が遅くなるとH/Wの限界値は大きくなる傾向を示す。

2) 低温割れ

低温割れは、約200℃以下で生じる。溶接直後に発生するとはかぎらず室温になって数時間から数十時間経過してから発生することがあるので注意を要する。

低温割れは、次の三つの条件がかさなったときに生ずる。

溶接熱による溶接熱影響部の硬化が大きいこと。

硬化部に一定値以上の応力が作用すること。

一定値以上の水素が存在すること。

溶接熱影響部の組織がマルテンサイト主体の組織になると溶接割れを生じやすい。割れるかどうかは硬さだけで判断することはできないが、低水素系の溶接棒を使用する場合でも、通常、ピッカース硬さ400以上になると、割れる危険性が高いと考えてよい。

溶接熱による硬化の程度は、前述のCeqで推定できるので、Ceqは割れ発生を目安となりうるが、同じ硬さでも化学成分によって割れ感受性が異なるので、より正確には低温割れに対して直接化学成分の影響を調査した溶接割れ感受性組成(P_{CM})を用いるほうが望ましい。

P_{CM}は、y形溶接割れ試験におけるルート割れ防止予熱温度と鋼板の板厚、化学成分、拡散性水素量および板厚との関係を調査した結果から導き出されたものであり、溶接時の予熱温度を決定する際の目安となる。

予熱温度とP_{CM}の関係を次に示す。

$$T_0 = 1440P_c - 392$$

T₀ = 溶接低温割れ防止のための予熱温度(℃)

P_c = 溶接割れ感受性指数

$$P_c = P_{CM} + \frac{H}{60} + \frac{t}{600}$$

P_{CM} = 溶接割れ感受性組成(%)

$$P_{CM} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B(\%)$$

H = 溶接金属の拡散性水素量(μcc/100g)

t = 板厚(mm)

1983年WES 3001「溶接用高張力鋼板」の改正が行われたが、主な改正点は、P_{CM}をCeqのかわりに導入したことであり、さらに、とくにP_{CM}の低い調質型590N/mm²級鋼板についてWES 3009「溶接割れ感受性の低い高張力鋼板の特性」が制定された。WES 3009の要点はC 0.09%、P_{CM} 0.20%の規定を定めたことである。

なお、実際取引には、Ceqを適用する場合が多いので、参考のため、P_{CM}とCeqとの関係を図65に示す。

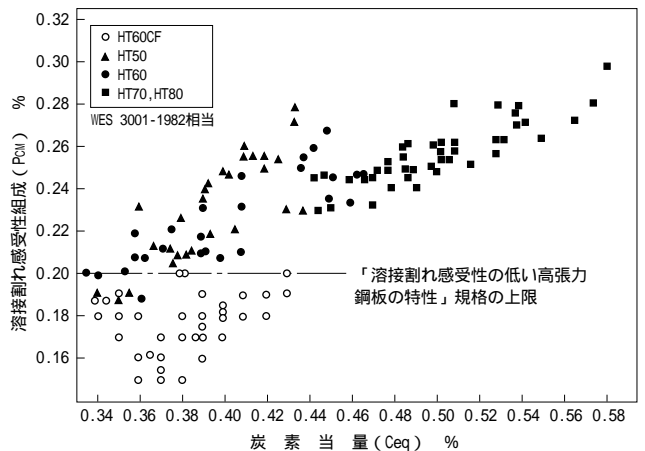


図65 溶接割れ感受性組成(P_{CM})炭素当量(Ceq)との関係⁶²⁾

3) 再熱割れ (SR割れ)

690N/mm²級、780N/mm²級などの高張力鋼板、Cr-Mo系などの压力容器用低合金鋼板などでは、溶接後応力除去焼きまし(SR)をした場合、HAZ粗粒域部に粒界割れを生じることがあり、これを再熱割れ(SR割れ)と称している。

SR割れは、熱処理中に生じる塑性ひずみが、粒界に集中しておこるもので、母材の化学成分も大きく影響しており、次式に示すようなSR割れ感受性指数が提案されている。

$$G = Cr + 3.3Mo + 8.1V - 2$$

$$P_{SR} = C + Cu + 2Mo + 10V + 7Nb + 5Ti - 2$$

G、P_{SR}とも0以上の場合にSR割れの危険性が高い。

SR割れを防ぐには適切な化学成分を選定すること、割れを生じやすい止端部の形状をなめらかにするなどの処置を講じて応力集中を少なくすること、溶接入熱を高めて硬化を防ぐことなどが有効である。

7・2・3 脆化

溶接構造物を製作するうえで留意しなければならない大きな課題としてHAZ靱性がある。

通常、溶接継手部のHAZは溶接熱により、組織変化をおこし、鋼板製造時にえられた切欠き靱性の良好な組織がこわされる。このため、HAZの切欠き靱性は、一般に母材部より劣る。

切欠き靱性の溶接熱による劣化は、結晶粒の粗大化組織の変化の二つの原因により生じる。

図66は溶接継手各部についての切欠き位置とvTsとの関係を示したものであるが、もっとも脆化している位置は、Bのポンド部である。ポンド部で脆化が最大となるのは上記、の脆化原因がもっとも強くあらわれることによるといえる。

また、図67は690N/mm² (70kgf/mm²) 級鋼板の溶接継手ポンド部についての溶接入熱量と2mmVノッチシャルピー特性値との関係を示したものであるが、この図から明らかなように、溶接入熱量が大きいほど脆化は著しい。

溶接部、特にポンド部の切欠き靱性は、鋼板と溶接条件の選定である程度改善できる。

大入熱溶接熱影響部の脆化原因と脆化軽減法を表28に示

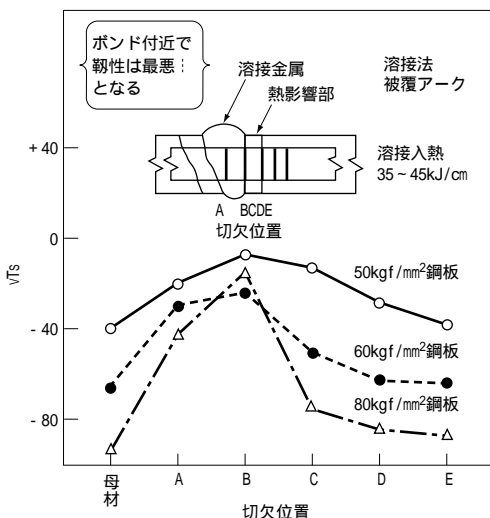


図66 溶接継手各部のvTs分布例⁶³⁾

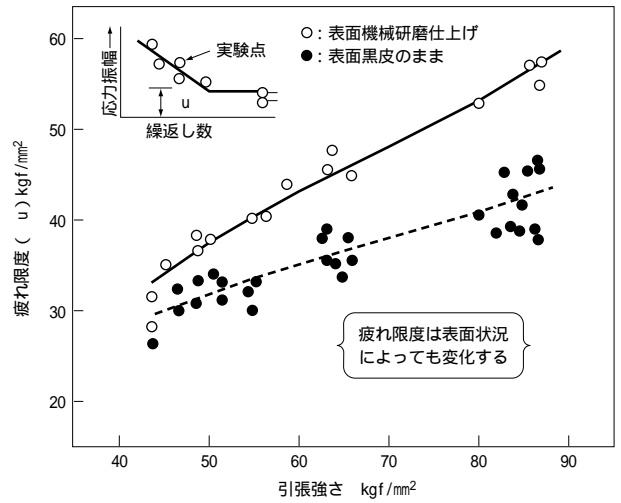


図67 溶接入熱量と破面遷移温度との関係 [690N/mm²(70kgf/mm²)級鋼板]⁶⁴⁾

表28 大入熱溶接熱影響部の脆化原因と脆化軽減法

| 因子 | 脆化原因 | 脆化軽減法 | | 対象鋼重 N/mm ² 級 |
|------|------------------------------|-------------------------|--|-----------------------------|
| | | 冶金的手段 | 具体的な手段 | |
| 結晶粒 | 粒の粗大化 | 高温で安定な析出物の微細分散 | ・TiNの微細分散 | |
| 組織 | 上部ベイナイトの生成 (島状マルテンサイトの生成) | 微細フェライト+パーライトの生成 | ・フェライト変態核となるTiN、BN、REM化合物、Ca化合物などの分散 ・低Ceq化 | 490 590 |
| | | 上部ベイナイト組織中の島状マルテンサイトの低減 | ・低C化、低Ceq化 ・低Si化 | 490 780 |
| | | 下部ベイナイトの生成 | ・焼入性を高める元素(Ni、Cr、Moなど)の添加 | 780 980 |
| 地の靱性 | — | 不純物元素の低減靱性を向上させる元素の添加 | ・P、S、Nの低減 ・Niの添加 | 590 780 980 |

す。

すなわち、結晶粒の粗大化防止のため微量のTiを添加する。上部ベイナイト生成を抑制する目的でTi、B、REM、Caなどを添加しフェライトの生成を容易にする。C、SiおよびCeqを下げ、島状マルテンサイトを低減する。合金元素を添加し下部ベイナイトの育成を容易にする。P、S、Nを低減し、Niを添加し、ベイナイト地の靱性をよくするなど、の処置が鋼種、用途に応じて選択して用いられる。

このような対策を施し、大入熱溶接を行ってもポンド部の靱性の劣化が少ない鋼板を大入熱溶接用鋼板と称し、すでに実用化されている。

一方、溶接施工面からポンド部靱性を改良するには、溶接入熱量およびパス間温度を一定値以下に管理することが必要である。溶接入熱量の上限は、靱性の要求値、溶接方法、鋼種などによって異なるが、概略、590N/mm²級鋼板で7.0kJ/mm、690N/mm²、780N/mm²級鋼板で5.0kJ/mm、低温用AIキルド鋼板で3.5kJ/mmである。