

鋼材と溶接

—鋼材の溶接性と溶接継手性能—

鋼材を溶接すると溶接部に鋼材品質の劣化や水素の侵入が起こり、また残留応力や溶接欠陥などが発生する。そしてこれらの要因が重畳すると、溶接われ、疲労き裂、ぜい性破壊などが発生する懸念が生じる。

本稿では、これらの問題点の発生原因とその防止対策について記述した。鋼構造物の溶接設計上の参考になれば幸いである。



溶接部の組織と材質

A-1

熱影響部の組織

鋼材を溶接すると溶接金属が形成される。そして溶接熱によって鋼材の製造時に調整された組織が変化し、それにもなって材料特性も劣化するが、この部分を熱影響部(Heat-Affected Zone, HAZと略す)といい、溶接金属と鋼材の境界線をボンド(Bond)、溶接熱の影響を全く受けない部分を母材部あるいは原質部と呼んでいる。

ボンド部は鋼の融点近くまでの高い温度に加熱されるので、結晶粒は粗大化し、また焼入効果も大きいので、硬いマルテンサイト組織になりやすい。そしてボンド部から離れるにしたがって加熱される温度が低くなるので、結晶粒の粗大化は少なくなり、また焼入効果も小さくなるので、マルテンサイトの生成量が減少して、ベーナイト状の組織が多くなり、最終的には母材組織に近づいていく。

溶接部の硬さ

①溶接部の硬さ分布

溶接部の組織変化にもなって、溶接部の硬さ分布も変化する。硬さと引張強さは比例するので、硬さの変化は引張強さの変化と考えてよい。

(1)硬化部

第1図¹⁾はHT-490(490N/mm²級高張力鋼)の手溶接継手部のビッカース硬さ分布を示したものである。手溶接のような溶接入熱の小さい溶接では、ボンド部に硬さのもっとも高い部分が現われ、ボンド部から離れるにしたがって急激に硬さが低下し、最終的には母材部の硬さに近づく。このように母材部よりも硬さの高いところを硬化部と呼んでいる。

硬化部には後述するように、溶接われの発生や、じん性の劣化が起こるので、この部位は溶接継手の性能上、非常に重要である。

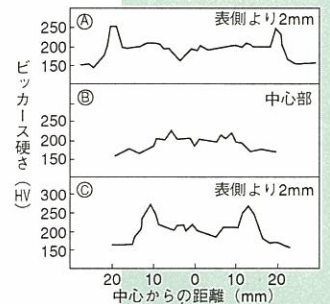
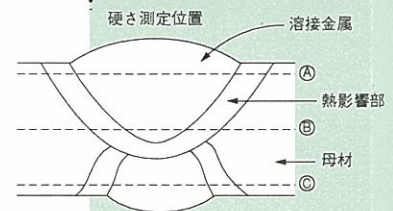
(2)軟化部

第2図²⁾は焼入れ焼もどし(調質)によって製造された調質型HT-580(580N/mm²級高張力鋼)のサブマージアーク溶接継手の硬さ分布を示したものである。

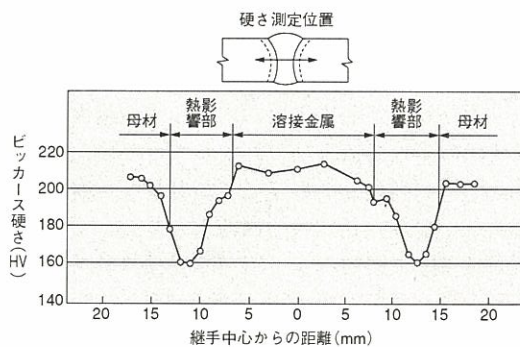
この溶接法は手溶接よりも入熱が高いため、硬化部ははっきりとは現われなくなる。そして調質鋼の溶接の特徴として、HAZの母材側に母材よりも硬さの低いところが現われる。この部分を軟化部と呼んでいる。この部分は溶接熱によってオーステナイト変態点~600℃程度までの温度に加熱されたところで、母材の組織である焼もどしマルテンサイトが、溶接熱によってより一層焼もどしされたために発生する。

調質鋼の場合、あまり大きな入熱で溶接すると軟化の度合いが大きくなり、溶接継手強度の低下を起こすので、過大な入熱の溶接は避けなければならない。

- 1) 日本鉄鋼協会：新版鉄鋼技術講座・3、鋼材の性質と試験、昭和51年(1976)、p.143
- 2) 土木学会：新体系土木工学・37、構造用鋼材、(1981)、p.106



第1図 HT-490の手溶接継手部の硬さ分布(溶接入熱:3.5~4.5KJ/mm)



第2図 HT-580のサブマージアーク溶接継手部の硬さ分布(溶接入熱:7.5~8.5KJ/mm)

②ボンド部の硬化におよぼす諸因子

(1)溶接熱影響部の最高硬さ試験

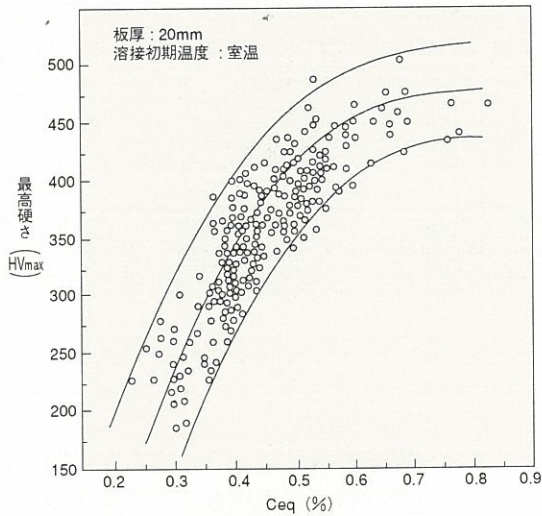
HAZの硬化の度合いは鋼材の炭素当量(Ceq)とHAZの冷却速度に影響されるが、鋼材の溶接に

溶接部のじん性

①溶接部のじん性値の分布

母材および溶接部のじん性を簡便に評価する尺度として、2mmVノッチシャルピー試験においてぜい性破面率が50%になる破面遷移温度(Fracture Appearance Transition Temperature, 以下FATTと略す)が用いられるのが通例であり、場合によっては、特定温度 t ($^{\circ}\text{C}$)における試験片の破断時の衝撃吸収エネルギー、 E_t が用いられることもある。

第5図⁵⁾は各種高張力鋼板の手溶接による溶接継手の各切欠き位置におけるFATTを示したものである。いずれの鋼板も切欠き位置Bのボンド部においてFATTがもっとも高く(悪)、ボンド部から離れるにしたがって低く(良)なり、母材の値に近づいていく。



第3図 各種鋼板の最高硬さ HV_{max} と炭素当量との関係

よる硬化性を評価する方法として、溶接熱影響部の硬さ試験法(JIS Z3101)が規定されている。鋼材の硬化性を純粋に評価するために、試験板の形状、寸法と溶接条件が規定されており、冷却条件が一定になるように設定されている。

溶接後切断して断面の硬さ分布を測定し、もっとも高い値を最高硬さ HV_{max} として表示する。

(2)最高硬さにおよぼす炭素当量の影響

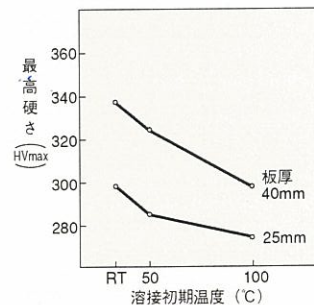
各種鋼板の HV_{max} と Ceq との関係を図示すると第3図³⁾のようになり、 Ceq の増加によって HV_{max} は上昇する。 HV_{max} が350以上では、マルテンサイトの生成量が多くなり、その増加とともに硬さが上昇する。後述するように、マルテンサイトは溶接われの発生要因の一つであるため、 HV_{max} が350を超えないように溶接施工条件を管理する必要がある。

(3)最高硬さにおよぼす冷却速度の影響

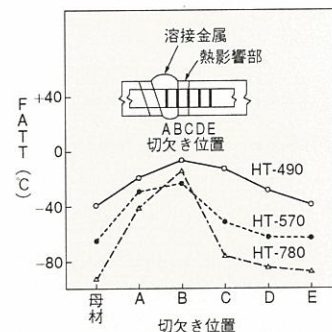
冷却速度を支配する因子として、溶接入熱と鋼板の板厚および溶接を開始するときの鋼板の初期温度がある。溶接入熱の影響については、第1図および第2図のところで述べたとおり、溶接入熱が大きくなるほど HV_{max} は低下する。

第4図⁴⁾は調質型のHT-580鋼板について、 HV_{max} におよぼす板厚と溶接を開始するときの鋼板の初期温度との関係を示したものである。この図から、板厚が増加するほど、また溶接初期温度が低くなるほど HV_{max} が高くなることがわかる。

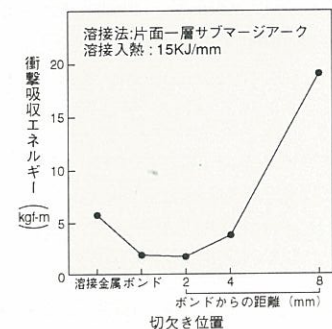
鋼材の溶接施工においては、鋼材の Ceq が高くなるほど、また肉厚が大きくなるほど、溶接する部分をあらかじめ加熱(予熱)して、溶接初期温度を高くする必要がある。



第4図 調質型HT-580の最高硬さ HV_{max} におよぼす板厚と溶接初期温度との関係



第5図 各種高張力鋼板の手溶接継手部のFATTの分布(溶接入熱:3.5~4.5KJ/mm)



第6図 焼ならし型HT-490の大入熱溶接継手部の -20°C におけるシャルピー衝撃吸収エネルギー値(vE_{20})の分布

3) 土木学会：新体系土木工学・37、構造用鋼材、(1981)、p.105

4) 神戸製鋼：'91 厚板便覧(1991)、p.394

5) 日本溶接協会：高張力鋼溶接の実際(1984)、p.69

また、第6図⁶⁾は、焼ならし型HT-490の大入熱溶接継手の-20°Cにおけるシャルピー衝撃吸収エネルギー値($\sqrt{E_{-20}}$)を示したものであるが、この場合には低い値を示す範囲が広がっている。一般に入熱が大きくなるほどこの傾向は強くなる。

②ボンド部のじん性値におよぼす諸因子

(1)冷却速度の影響

ボンド部の冷却速度は、前述のように溶接入熱、板厚、溶接初期温度によって影響されるが、もっとも大きく影響するのが溶接入熱である。実用溶接の入熱範囲では、入熱が増加するほどボンド部のじん性は劣化すると考えてよい。

(2)ボンド部組織の影響

一般に溶接入熱の増加とともに、ボンド部の組織は、マルテンサイト(M)→下部ベーナイト(LB)→上部ベーナイト(UB)→フェライト・パーライト(FP)と変化していく。各種鋼材のボンド部の組織とFATTとの関係を示すと第7図のようになり、ボンド部のFATTは組織と密接な関係のあることがわかる。すなわち、FATTはM+LB近傍でもっとも良好な値を示し、UBでもっとも悪くなる。そしてF・Pとほぼ同じ値を示すようになる。

(3)島状マルテンサイトの影響

ボンド部のUB組織の中には無数の小さな粒状組織が見られる。この組織は島状マルテンサイト(Martensite Island,MIと略す)と呼ばれるもので、ここには炭素が濃縮しており、非常に硬くて

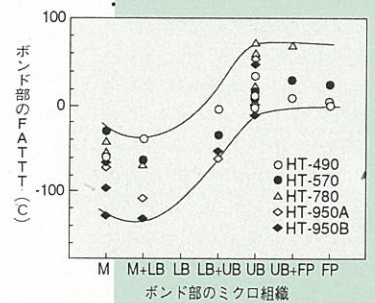
もろい組織となっている。UB組織のじん性が悪いのは、UB自体の影響もさることながら、MIの生成によるところが大きい。そして、MIはCと合金元素の含有量が多い高強度鋼ほど、また溶接入熱が大きいほど生成されやすい。したがって、最近のHT-780(780N/mm²級高張力鋼)は、MIの生成をできるだけ少なくするために、炭素量が0.14%以下で製造されるようになっており、また溶接に際してもUBおよびMIの生成量をできるだけ低く抑えるために、入熱の制限が行われている。たとえばHT-570の場合には、溶接入熱が10kJ/mm以下、HT-780の場合には4.5kJ/mm以下に制限されるのが通例となっている。

(4)不純物の影響

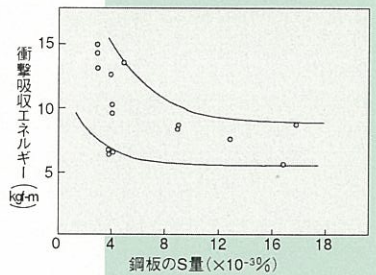
鋼中のP,Sなどの不純物もボンド部のじん性値に悪影響をおよぼすが、いずれも0.010%以下になると、衝撃吸収エネルギーはいちじるしく改善される。

その一例として、第8図⁷⁾に大入熱溶接用HT-490のボンド部の-10°Cにおけるシャルピー衝撃吸収エネルギー($\sqrt{E_{-10}}$)におよぼすSの影響を示す。

6) 日本鋼構造協会：新しい構造用鋼材とその諸性質、昭和56年(1981)、p.113



第7図 ボンド部のマイクロ組織とFATTとの関係



第8図 大入熱溶接用HT-490のボンド部の-10°Cにおけるシャルピー衝撃吸収エネルギー($\sqrt{E_{-10}}$)と鋼板のS量との関係

7) 鉄鋼協会：第8回鉄鋼工学セミナー材料コーステキスト(1982)、p.11

溶接低温われ

溶接われには、低温われ、高温われ、再熱われの3種類があるが、ここではもっとも重要な低温われについて述べる。

低温われの特徴

低温われは溶接終了直後には発生しないが、溶接部が約250°C以下の温度に低下してから発生する。そして、時間の経過とともにわれが進展し、溶接後数10時間経過すると表面に現われるようになるので、十分に注意しなければならない。

このわれにはその発生位置によって、ルート(root)われ、ヒール(heel)われ、トウ(toe)われ、ビード下(under bead)われなどの名称がつけられている。

低温われにおよぼす諸因子

低温われは、溶接部に侵入した水素、溶接部に発生した応力、硬化部に生成したマルテンサイト

の三つの因子が重畳して発生し、いずれか一つの因子が欠けると発生することはない。

①水素

溶接材料のフラックス中の結晶水や吸湿水分、シールドガス中の不純物としての水分、さらには大気中の湿分としての水分が溶接アークの熱エネルギーによって分解し、溶接金属中に原子状の水素として侵入する。この水素は原子半径が非常に小さいのでHAZ部へ拡散して行く。

したがって、この水素を拡散性水素と呼んでいる。マルテンサイトに水素が拡散濃縮すると、水素ぜい化が起り、非常にもろくなってわれが発生しやすくなる。

低温われが時間の経過とともに進展するのは、鋼中の水素の拡散速度に由来する。

低温われを防止するためには、水素の侵入をできるだけ低く抑えることが重要であり、低水素型あるいは極低水素型溶接材料の使用と、その十分な乾燥、あるいは低水分型シールドガスの使用が肝要となる。

②応力

溶接部の加熱冷却にともなう膨張収縮によって応力が発生し、溶接後、残留応力として存在するようになる。そしてこの応力が引張応力として作用する個所に低温われが発生しやすい。

③マルテンサイト

マルテンサイトは、溶接後の冷却過程でボンド部の温度が約350℃以下の温度になってからオーステナイト→マルテンサイト変態によって生成される。マルテンサイトは、HAZの中でもっとも水素ぜい化を起こしやすい組織で、これに水素が拡散濃縮すると非常にもろくなり、引張応力が作用すると容易にわれが発生する。

マルテンサイトはつぎに述べる予熱によって、その生成を抑制することができる。しかし、仮付け溶接を予熱なしで行った場合には、ビード下われが発生していることが多いので、溶接終了後グラインダーなどで仮付けビードとわれを研削除去する必要がある。

低温われ防止の予熱温度

低温われの発生を防止するために溶接に先立って鋼材を予熱するが、その温度はy型溶接われ試

験(JISZ3158)によって求めることができる。予熱温度と鋼材の化学成分、溶接金属中の水素量および鋼板の板厚の関係が詳細に研究されており、予熱温度 T_0 (℃)はつぎの式で求めることができる。

$$T_0 = 1440P_c - 392$$

ここで、 P_c は溶接われ感受性指数と呼ばれ、つぎの式で表される。

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

ここで、 P_{CM} は溶接われ感受性組成(%)と呼ばれ、つぎの式で表される。

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

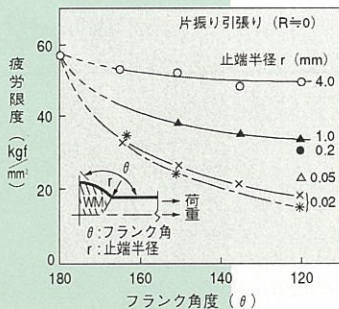
また、Hは溶接金属中の拡散性水素量(cc/100g)、tは板厚(mm)である。

C_{eq} がHAZの硬化に関する炭素当量であるのに対して、 P_{CM} は溶接低温われに関する炭素当量であるといえることができる。

なお、溶接われ防止のために、HT-570の場合には75℃程度、HT-780の場合には100℃程度の予熱を行うのが通例となっている。

A-3

疲労き裂



第9図 突合せ溶接継手を模擬した試験片の疲労限度と余盛りのフランク角、止端半径の関係

8) 日本溶接協会：高張力鋼溶接の実際、(1984)、p. 76

疲労き裂の特徴

疲労は、引張強さよりも小さな応力の繰り返しによってき裂を生ずる現象であり、このき裂がぜい性破壊発生の原因となる場合が多いので、機械や橋梁などの繰り返し応力が作用する構造物では重要な特性である。応力がある値以下になると、応力がいくら繰り返して作用しても疲労き裂が発生しなくなるが、この応力を疲労限度と呼んでいる。

溶接継手の疲労強度

第9図⁸⁾は溶接金属(WM)の余盛り形状と止端部の形状が疲労限度におよぼす影響を、溶接部を模擬して鋼板から機械加工によって製作した試験片について調査したものである。この図から明らかのように、余盛りのフランク角が小さくなるほど、また止端部の半径が小さくなるほど、溶接継手の疲労強度は低下することがわかる。したがって、疲労強度を重視する構造部材の溶接においては、余盛り、オーバーラップ、アンダーカットなどの形状不良をグラインダーで取り除くなどの対策が必要となる。

A-4

ぜい性破壊

ぜい性破壊の特徴

ぜい性破壊は鋼構造物が弾性限以下の低応力で、塑性変形をとまわずに瞬時にして破壊する

現象をいう。この破壊は破壊の発端となる溶接われ、疲労き裂などの応力集中を起こしやすい欠陥が存在すること、応力が存在すること、温度が低いこと、鋼板のじん性値が低いこと、の四つの条件が重畳して発生する。

ぜい性破壊特性の評価

①シャルピー衝撃試験

ぜい性破壊を起こした船舶、橋梁の事故調査で、鋼板のシャルピー衝撃試験値との関連がいろいろと調べられている。

第10図⁹⁾は一例としてぜい性破壊を起こした船の鋼板を、破壊の進展を阻止したものの、阻止できなかったもの、その中間のもの3種類に層別し、ぜい性破壊を起こした温度 t (°C)でシャルピー試験を実施した結果を示したもので、鋼板の $\sqrt{E_t}$ が35 ft-lbf(47J)以上で、かつ試験片の延性破面率が30%以上の場合には、ぜい性破壊の進展を阻止できるという結果がえられている。

したがって、従来から鋼材のシャルピー試験の規格値としてこの値が採用されている場合もある。

②ディープノッチ試験

破壊力学を用いてぜい性破壊特性を評価する方法として、ディープノッチ試験、二重引張試験などの大型試験、CTOD(Crack Tip Opening Displacement)試験などの小型試験が用いられるが、CTOD試験については、D章で詳細に記述されるので、ここでは大型試験のうち、よく用いられるディープノッチ試験について簡単に述べる。

(1)試験方法

ディープノッチ試験は深い切欠きを有する幅が400mmの大型試験板を用い、応力と温度を変えて引張試験を行い、つぎの式によってぜい性破壊発生温度 T_i (K)を求める。

$$T_i = k_0 / \ln(\sigma \sqrt{\pi C} / K_0)$$

ここで、 σ ：破壊応力

C：クラック長さの1/2

k_0 , K_0 ：材料特性

通常、作用する応力が公称降伏強さの1/2、クラック長さ2Cが80mmの条件でのぜい性破壊発生温度 $[Ti]_{C=40}$ をぜい性破壊発生特性の尺度として用いている。

(2) $[Ti]_{C=40}$ とFATTとの関係

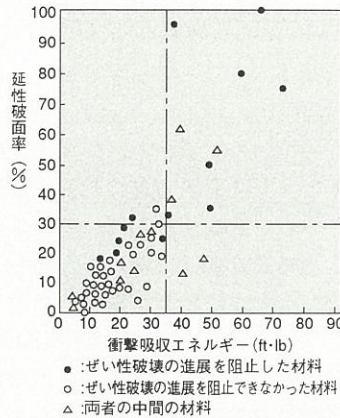
FATTが既知であれば、ディープノッチ試験を行わなくても、FATTに降伏比と板厚の補正を加えたつぎの式によって $[Ti]_{C=40}$ (K)を精度よく推定することができる。

$$[Ti]_{C=40} = 0.687 \cdot \alpha \cdot FATT + 7.83 \sqrt{t} - 54$$

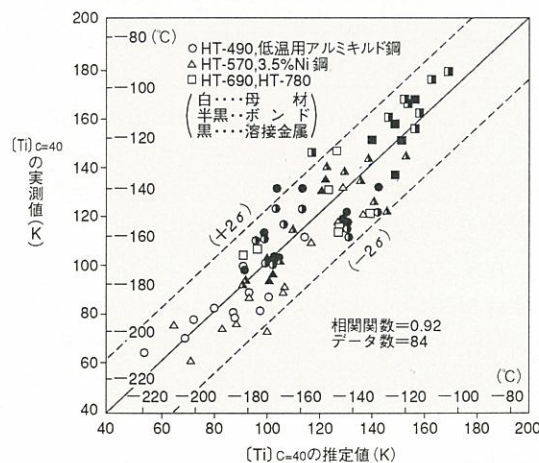
ここで、 α ：降伏比(降伏強さ/引張強さ)

t：板厚

第11図は、各種高張力鋼板とその溶接継手について、 $[Ti]_{C=40}$ の推定値と実測値との関係を示したものであるが、両者の間には、母材、ボンド、



第10図 ぜい性破壊を起こした船の構造用鋼材のぜい性破壊伝播特性とシャルピー衝撃特性値との関係



第11図 $[Ti]_{C=40}$ のディープノッチ試験による実測値とFATTによる推定値との関係

溶接金属の区別なく、相関係数が0.92という非常に高い相関関係の存在することがわかる。

この推定式は、溶接施工条件としての溶接入熱を設定する場合に、重要な指針をあたえる。たとえば、同一の $[Ti]_{C=40}$ を確保したい場合に、降伏比の高い鋼板すなわち高強度の鋼板ほど、また板厚の大きい鋼板ほど、より良好なFATTが必要であるということを示している。

高強度鋼材の溶接性と溶接継手性能について、溶接熱影響部の組織と材質、溶接われ、疲労強度、ぜい性破壊の観点から記述した。

本号と前2号の内容から、主として室温と低温で使用される鋼材の諸特性の概要をご理解いただけたと思う。

次号では、高温で使用する鋼材とその溶接について紹介する。 [前顧問 笠松 裕]