

# 鋼材と溶接

## —高張力鋼板の材料特性—

前号<sup>1)</sup>では、近年の鋼の製鋼技術、圧延技術および熱処理技術の進歩により、強度、じん性および溶接性が飛躍的にすぐれた溶接構造用高張力鋼板が製造されるようになったことを紹介した。

一方、これらの技術と同時に進行した鋼の合金設計技術の進歩発展により、上記以外の諸特性も改善され、使用性能のすぐれた高張力鋼板が多数、開発・実用化されている。

本号では、これらの高張力鋼板とくに常温および低温で使用される鋼構造物に用いられる高張力鋼板について、その材料特性の概要を記述する。

# A

## 汎用高張力鋼板

汎用高張力鋼板は、良好な溶接性を保持させるために、合金元素の添加量を極力低く抑えながらいかにして強度とじん性を確保するか、という観点から製造されている。現在、引張強さが490~780 N/mm<sup>2</sup>級の高張力鋼板が実用化され、いろいろな大型鋼構造物に多量に使用されている。

### 490N/mm<sup>2</sup>級高張力鋼板

490N/mm<sup>2</sup>級の高張力鋼板(以下HT-490と略称する)は、主として熱加工制御圧延法<sup>1)</sup>(TMCPと呼ぶ)によって製造される。

造船に使用されるものは、溶接性向上の見地から、加速冷却型のTMCPによって製造されるので、鋼板の炭素当量Ceq<sup>1)</sup>は0.32~0.36%と、軟鋼のそれとあまり変わらないものになっている。したがって、通常の溶接の場合、溶接熱影響部(Heat Affected Zone, 以下HAZと略す)に発生する溶接われや、じん性劣化の懸念はほとんどない。

一方、建築、橋梁などに使用されるものは、後述する鋼板の低降伏比の問題から、軽度のTMCPが適用されることが多く、Ceqは造船用のものよりはいくぶん高くなっているため、溶接にあたっては溶接われに対してある程度の考慮を払う必要がある。

### 570N/mm<sup>2</sup>級高張力鋼板

もっとも一般的なJISのSM570、WESのHW50

## 特殊用途用高張力鋼板

鋼構造物が建造される場合、鋼板の加工条件、溶接方法や溶接条件、あるいはその構造物が使用される環境条件によって、高張力鋼板には強度、じん性、溶接性以外の特性についてもいろいろな性能が要求される。

などのHT-570は、オフラインの焼入れ・焼もどし法によって製造される。しかし、機械構造用として使用されるものやラインパイプに用いられるものは、経済性から見地から、TMCPで製造される。この場合、非調質高張力鋼と呼ばれることがある。これに対して、焼入れ・焼もどし法によって製造されるものを調質高張力鋼と呼んでいる。

HT-570はCeqが0.38~0.46%と、HT-490よりも高いので、溶接にあたっては溶接われ防止の見地から、50~75°C程度の予熱が必要である。また、HAZのじん性劣化を少なくするために、溶接入熱(1パスの溶接で発生する単位溶接長さあたりの熱量)を10KJ/mm以下に制限することが必要である。

### 780N/mm<sup>2</sup>級高張力鋼板

JISのSHY685、WESのHW70などのHT-780は、オフラインの焼入れ・焼もどし法によって製造される。強度確保のために、鋼中にNi, Cr, Mo, Nb, V, Ti, Bなどの合金元素が添加されているので、Ceqは0.46~0.53%と高くなっている。したがって、溶接時には100~125°C程度の予熱が必要となり、溶接入熱もHAZのじん性値の確保のために4.5KJ/mm以下に制限しなければならない。

これらの性能は主として、合金元素の種類とその添加量、さらには前号<sup>1)</sup>で記述した製造法の条件などに工夫、調整を加えることによって付与される。

# A-1

1) 笠松 裕:こべるにくす, Vol. 6 (1997), Apr., p.1

# A-2

## 大入熱溶接用490N/mm<sup>2</sup>級鋼板

1970年代の初頭、船舶建造時の板継ぎ溶接工数削減のために、片面一層溶接法と呼ばれる高能率溶接法が開発・実用化された。

この方法は2~3電極を用い、大電流を流して一気に1パスで溶接を完了するというもので、溶接時に発生する熱量が大きいことから大入熱溶接法とも呼ばれている。

### ① 大入熱溶接熱影響部の問題点

鋼に大入熱溶接を施すと、そこに投入される熱量が大きいために、溶接熱によって鋼板が高温にさらされる時間が長くなり、また鋼板の冷却速度も遅くなる。その結果HAZの幅が広くなり、結晶粒も粗大化する。

軟鋼の大入熱溶接の場合にも、同様のことが起こるが、組織はじん性の良好なフェライト+パーライトが主体となるため、HAZのじん性劣化はそれほど大きくない。これに対して、当時のHT-490の場合、軟鋼よりもCeqが高いために、組織は上部ベーナイト(Upper Bainite)と呼ばれるきわめてじん性の低いものとなる。その結果、HAZからぜい性破壊が発生する懸念が想定された。

1970年代半ばに入って、船舶の大型化にともなうHT-490を使用せざるをえなくなり、大入熱溶接を施してもHAZのじん性劣化の少ないHT-490の開発が、強く要望されるようになった。

### ② 大入熱溶接用490N/mm<sup>2</sup>級高張力鋼板の開発

このような観点から鋭意、研究開発が進められた結果、鋼中にTiを0.013%程度Nを0.0035%程度添加すると、鋼中に非常に微細なTiNが無数に分散析出し、このTiNが加熱時の結晶粒の粗大化を防止すると同時に、冷却時に変態核となって、微細なフェライト+パーライト組織が生成されることが明らかとなった。

写真1(a)はこの知見を利用して開発された大入熱溶接用HT-490に、また(b)は通常のHT-490に、大入熱溶接を施した場合のHAZの組織を示したものである。大入熱溶接対策を施した鋼板は、結晶粒、組織ともにいちじるしく改善されていることがわかる。また第1図は両者のHAZのシャ

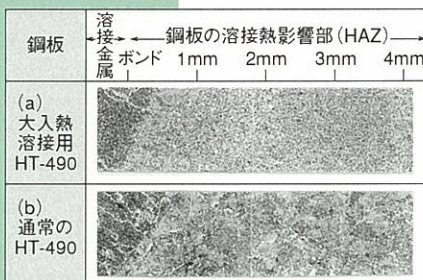
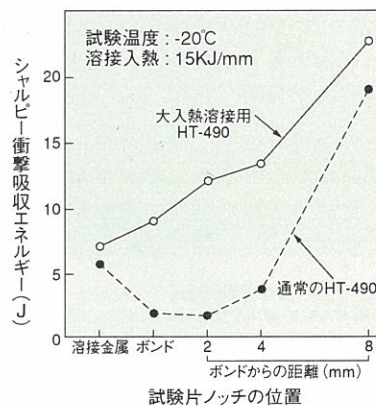


写真1 大入熱溶接用HT-490と通常のHT-490の片面一層溶接部のマイクロ組織の比較 (溶接入熱量:15KJ/mm)

ルピー衝撃吸収エネルギーを比較したものであるが、改善効果が非常に大きいことがわかる。



第1図 大入熱溶接用HT-490と通常のHT-490の片面一層溶接部のシャルピー衝撃吸収エネルギーの比較

なお、この鋼板の研究、開発、実用化を契機として、性能の優れたいろいろの高張力鋼板が出現した。この意味で大入熱溶接用鋼板の開発、実用化が果たした役割は非常に大きいといえる。

## 耐ラメラティア鋼板

高層ビルにおいて、ボックス形状の柱と梁の接合部では、柱の板厚方向に大きな引張応力が作用する。この場合、JISのSS材(一般構造用圧延鋼材)やSM材(溶接構造用圧延鋼材)では、鋼板の内部にラメラティアと呼ばれる、写真2に示す階段状の層状に引き裂かれたようなわれが発生する場合があります。

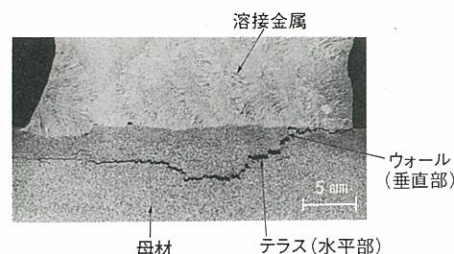


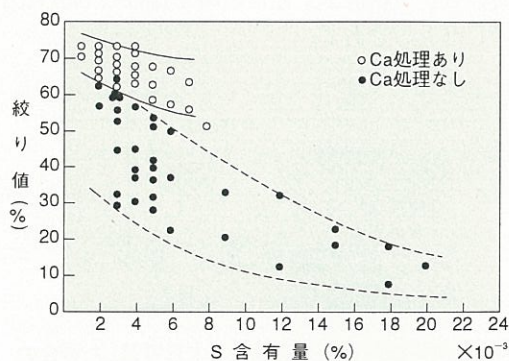
写真2 HT-490の溶接部に発生したラメラティア

これは、鋼中に存在するMnSに起因する。MnSは他の介在物に比べて融点が低いので、高温では比較的軟らかく、圧延によって引き延ばされて、薄い板状の細長い介在物となる。そして鋼板の板厚方向に大きな引張応力が作用すると、介在物の先端に大きな応力集中が起こり、引き裂かれてわれが発生する。

鋼板のラメラティア防止対策としては、まず第

一にSの含有量を低下させることである。第二にSの化合物を圧延によって引き延ばされないものに変えることである。このために溶鋼中にCaが添加される。CaはMnよりもSに対する親和力が大きいので優先的にCaSが生成し、MnSの生成は抑えられる。このCaSは融点が高いので、圧延によって引き延ばされることはなく、溶鋼段階の球状のまま鋼板中に存在するようになる。Caの添加により硫化物を球状化する処理をSの球状化処理と呼んでいる。

鋼板の耐ラメラティア性は、板厚方向の引張試験を行ったときの絞り値と非常に相関関係があり、鋼板の耐ラメラティア性はこの数値で評価される。



第2図 HT-490の板厚方向の引張試験における絞り値におよぼすS含有量とCa処理の影響

第2図は、この絞り値におよぼすS含有量とCaによる球状化処理の効果を示したものである。Sの含有量の低減と球状化処理が絞り値の向上に非常に有効であることがわかる。

このような観点から、建築構造用鋼板(JIS SN)の高グレードのものに対しては、S含有量は0.008%以下、板厚方向の絞り値は25%以上と規定されており、その上、超音波探傷試験も義務づけられている。

## 低降伏点鋼

大地震などによって鉄骨に降伏点を超える大きな力が加わると、降伏比すなわち降伏強さ/引張強さの値が高い鋼の場合には、塑性変形が始まると、すぐに破断する恐れがある。したがってSN鋼板では、軟鋼とHT-490について降伏比が80%以下と規定されている。HT-570についてはまだこの値がJIS化されていないが、この値が準用される場合が多い。

軟鋼の場合この値の達成は容易であるが、HT-490あるいはそれ以上の高張力鋼板では、通常の製造法ではこの値を満足させることが難しいの

で、製造法にいろいろと工夫がされている。

### 1 低降伏点490N/mm級高張力鋼板

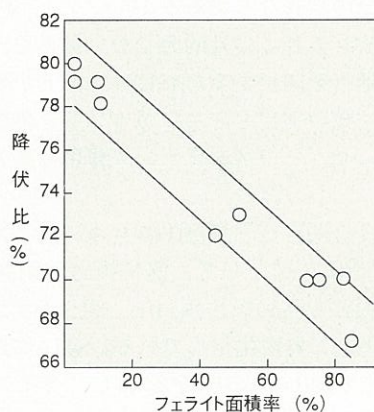
通常のTMCPで圧延を行うと結晶粒が細くなり、降伏強さが高くなるので降伏比の規格値を満足することは困難となる。したがって、この鋼板を製造する場合、通常よりも軽度のTMCP、すなわち、圧延終了温度を高くして、結晶粒があまり細くならないようにしなければならない。また、圧延後の冷却も水冷ではなく空冷される場合が多い。

この場合、通常のTMCPに比べて強度が出にくくなるので、この規格値そして強度、溶接性を満足させるために、鋼の化学成分、TMCPの条件にいろいろと工夫が加えられている。

### 2 低降伏点580N/mm級高張力鋼板

一般のHT-580はオフラインの焼入れ・焼もどしによって製造されるが、この場合の金属組織は、降伏強さの高い焼もどしマルテンサイトの1相組織であるために、降伏比は85~92%にも達する。したがって降伏比を下げるために、前号<sup>1)</sup>の第8図(b)に示したオフラインの2段焼入れ・焼もどし法が適用される。

2段目の焼入れは、オーステナイト+フェライトの2相域に加熱して行われるので、この場合の金属組織は、焼もどしマルテンサイトとフェライトの2相となる。このフェライトは柔らかいので、鋼の降伏強さは低くなり、大きな応力が作用した場合に、この部分で塑性変形して応力を吸収するので、ただちに破壊にいたることはない。

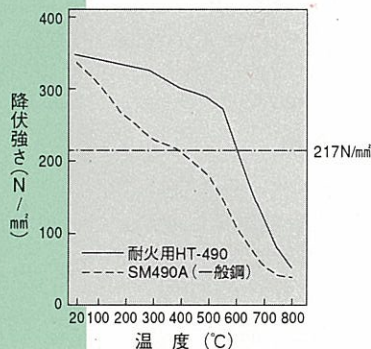


第3図 HT-570のフェライト面積率と降伏比の関係

第3図はHT-570について、2段目の焼入れ条件を変えてフェライト量を調整したときに、降伏比がいかに変化するかを示したものである。フェライト量の増加によって降伏比が低下しており、降伏比が80%以下のHT-570の製造が可能となる。

## 耐火鋼板

高層ビルの火災時、鉄骨の温度が上昇するために強度が低下し、座屈を起こす恐れがある。したがって、従来は鉄骨に耐火性の厚被覆を施すことが義務づけられていたが、このためにコストアップをきたすという問題があった。このような見地から、被覆を施さなくとも高温に耐える鋼が開発され、実用化されている。この鋼にはCr, Mo, Nbなどが添加されており、高温における鋼の軟化抵抗が大きくなっている。



第4図 耐火用HT-490とSM490Aの高温強度の比較

第4図はHT-490について、通常の鋼板と耐火鋼板との高温強度を比較したものである。

耐火鋼板では、600°Cにおける降伏強さが室温における公称降伏強さの2/3以上と規定されているが、耐火鋼板の場合この値を満足していることがわかる。

## 耐候性鋼板

鋼構造物が長期間大気中に曝されると、腐食してその寿命が低下する。鋼の腐食を促進させる因子として、海からの飛来塩分、大気中のSO<sub>2</sub>、大気中の水分の結露などがある。

鋼構造物をこれらの外的因子から保護し、腐食の発生、進行を防止するためにペイントが塗布されるが、塗膜の劣化とともにペイントを再塗布する必要があり、そのメンテナンス費用も莫大なものとなる。

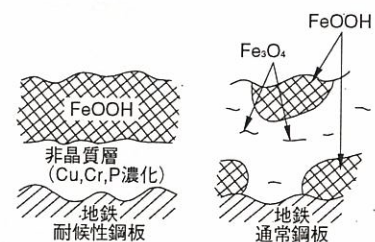
このような問題点を解決するために、大気中の腐食に耐える鋼として、溶接構造用耐候性鋼(JIS SMA)と高耐候性鋼(JIS SPA)の2種類の鋼板が開発、実用化されている。SMAには、約0.3%のCuと約0.4%のCrを添加し、ペイントを塗布して使用するPグレードと、これよりもさらにCuとCrを増量し、その上、Niを約0.2%程度添加してペイントを塗布しないで裸使用するWグレードの2種類がある。一方、SPAは上記Wグレードの成分にさらに0.1%前後のPが添加されており、耐候性が一段と優れたものとなっている。

これらのグレードは海岸から飛来する大気中の塩分含有量によって使い分けされる。すなわち飛

来塩分量が0.05mdd(1mdd=1mg/dm<sup>2</sup>/day, 1dm<sup>2</sup>=100cm<sup>2</sup>)以下の内陸部に建設される橋梁については、Wグレードを使用した場合、ペイントを塗布しなくてもよいことになっており、SPAについても同じ考え方が適用されている。一方、飛来塩分が0.05mdd以上の海岸地区に建設される橋梁については、WグレードあるいはSPAを使用しても塩分による腐食を防止することができないので、Pグレードを用いペイントを重塗装して使用するのが通例となっている。

なお、SPAは耐候性をもっとも優れているものの、溶接に有害なPを多量に含有しているため、この点に留意しておく必要がある。

第5図は、耐候性鋼を大気中に暴露したときの表面のさびの状況を、通常の鋼と比較して模式図に示したものである。



第5図 耐候性鋼板と一般鋼板の大気曝露した場合のさび層の模式図

耐候性鋼の場合、ある程度腐食が進行すると、表面にオキシ水酸化鉄FeOOHの層と、その下にCu, Cr, Ni, Pが濃縮した層が生成され、これらの二つの安定した緻密な層が腐食の進行を防止する役割を果たす。

## 低温用鋼板

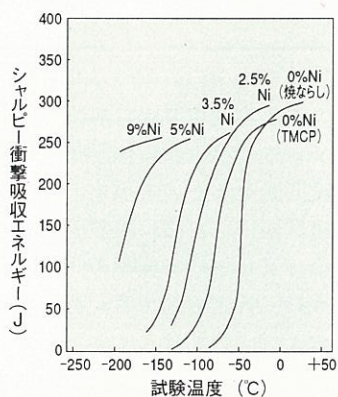
ガスを貯蔵する場合、低温度で液化して貯蔵すると、室温で高压貯蔵するよりも貯蔵効率が高くなる。この場合、貯蔵容器には低温度でも十分なじん性を備えた鋼板を使用しなければならない。

第1表は、ガスの種類とその沸点およびその貯蔵容器に使用される鋼板の種類を示す。沸点が-45°C以上のガスに対しては、低温用A1キルド鋼板が、また沸点が-45°C~-196°Cの温度のものには含Ni鋼板が使用され、沸点が低下するにしたがってNi含有量の多い鋼板が用いられる。

低温用A1キルド鋼板(JIS SLA)には、鋼中にAlが0.025~0.040%添加されており、鋼中に微細に析出したAINが結晶粒の粗大化を防止する。そして圧延法としてTMCPを適用すると一層、結晶粒の細粒化が促進され、低温度におけるじん性が一段と向上する。含Ni鋼板(JIS SL)は主として

第1表 各種液化ガスの沸点とその貯蔵容器に使用される鋼種

液化ガス		適用鋼種
種類	沸点(°C)	
アンモニア プロパン	-33.4 -42.1	低温用アルミキルド鋼
プロピレン 硫化水素	-47.7 -61.0	2.5%Ni鋼
炭酸ガス アセチレン エタン	-78.5 -84.0 -88.6	3.5%Ni鋼
エチレン	-103.9	5.0%Ni鋼
メタン 酸素 アルゴン 窒素	-162.5 -183.0 -185.8 -195.8	9%Ni鋼 (特殊処理5.0%Ni鋼)
水素 ヘリウム	-252.8 -268.9	オーステナイト系 ステンレス鋼



第6図 各種低温用鋼板のシャルピー衝撃吸収エネルギーの比較

焼入れ・焼もどしによって製造される。

第6図は、Ni添加量による鋼のシャルピー衝撃挙動の変化を示したもので、Niの添加によって鋼の低温じん性値はいちじるしく向上することがわかる。

## 耐HIC鋼板

天然ガスの中にはサワーガス(Sauer Gas)と称して多量の $H_2S$ ガスを含んだものがあり、ラインパイプや石油精製装置に水素誘起われ(Hydrogen Induced Cracking, 以下HICと略す)を発生させることがある。これは $H_2S$ による鋼の腐食反応によって生成した水素が、鋼の中に侵入することによって起こる。

一般にHICは細長く薄い板状に引き延ばされたMnSの介在物に沿って板面に平行に発生し、板の表面近傍ではふくれ状に、また、内部では耐ラメラティア鋼板で述べたようなラメラティア状となる。このわれは鋼の種類、外部応力の存在などにはほとんど関係しないのが特徴である。したがってHICの発生メカニズムとしては、雰囲気中の

$H_2S$ から侵入した水素がMnSの周辺に集積し、ガス化して高圧となり、介在物の先端で強大な応力集中を起し、われを発生させると考えられている。

前述のラメラティアの発生メカニズムとの差は、MnS介在物が関与する点では同じであるが応力の点で異なっており、ラメラティアの場合には、板厚方向に作用する大きなマクロ的的外部応力であるのに対し、HICの場合には応力集中による強大なミクロ的応力であるといえる。

このようなことから鋼の耐HICを向上させるためには、耐ラメラティア鋼の場合と同様に、S量の低減とCaを添加してMnSの生成を防止すると同時に、Sを球状化することが肝要となる。

## 耐SSCC鋼板

HICと同様に、サワーガスによって引き起こされる応力腐食われを硫化物応力腐食われ(Sulfide Stress Corrosion Cracking, 以下SSCCと略す)という。

SSCCの特徴の第一は、外部応力に対して直角方向、すなわち板厚を貫通する方向に発生するという点であり、第二の特徴は強度の高い鋼ほど発生しやすいということである。また低強度の鋼でも、溶接によって硬化したHAZや、Cや合金元素の濃縮している鋼の偏析部に発生する。

一般に鋼の水素ぜい化の感受性は、高強度になるほど大きくなる。SSCCの発生メカニズムとしては、 $H_2S$ から鋼中へ侵入した水素によって、高強度の組織が水素ぜい化して延性、じん性が低下し、そこに応力が作用して、われが発生すると考えられている。

上述の事実をふまえて、鋼のSSCC感受性の低減策としては、加速冷却型のTMCPや焼入れ・焼もどし法によってできるだけ $C_{eq}$ を低くすること、Cや不純物元素の低減を図ること、あるいは連続鋳造法によって偏析を低減することが肝要となる。

現在実用化されている各種高張力鋼板の材料特性について記述した。文中、溶接性という言葉を使いながらも、その内容については、ほとんど述べていないので、次号において詳述したいと思っている。高張力鋼板の特性は、材料特性と溶接性の両者を合わせて、初めて総合的に理解できるといえる。

〔前顧問 笠松 裕〕