



# 入門講座

身近な鉄-6

## 橋梁・鉄塔・石油タンク用鋼

天野 虔一  
Keniti Amano

川崎製鉄(株) 技術研究所 部門長

Steels for Bridge, Iron Tower, and Oil Vessel

### 1 緒言

橋梁、鉄塔、および石油タンクの3分野で共通に使われる鋼材は溶接構造用の400から780MPa級鋼である。この範疇の溶接構造用鋼材はたとえ強度水準は同じでも、用途により数多くの鋼種があり、またそれらの最近の進歩は著しい。それらをすべて記述するのは誌面の制限から困難であるが、本稿では入門講座「身近な鉄 ユーザーのための鉄

鋼製品の解説」という観点から、特に最近の進歩に着目して纏めた。

### 2 橋梁用鋼

ここでは鋼橋(コンクリート橋に対する言葉)に限定する。一口に鋼橋と言っても、アーチ橋、トラス橋、桁橋、斜張橋、吊り橋等種類が多い。Fig. 1 に代表的な橋の例を示す<sup>1)</sup>。鋼橋の構造のうち、橋台、橋脚の上に設ける橋桁部分を上部構造、上部構造からの荷重を基礎地盤に伝達する構造部分を下部構造と呼び、橋台、橋脚およびそれらの基礎が相当する。橋梁用鋼として一般的にイメージされるのは使用量から言っても、橋桁部分の上部構造に用いられる構造用鋼材である。道路橋示方書<sup>2)</sup>では鋼橋の使用材料としてTable 1 に示す鋼材を構造用鋼として標準としている。一方、斜張橋、吊り橋等ではさらにケーブル用ワイヤがあり、2000MPa級の高張力鋼<sup>3)</sup>が開発されているが、本稿では取り上げない。

上部構造に用いられる構造用鋼材はJISのSS鋼、SM鋼、および耐候性鋼であるSMA鋼である。SS鋼とSM鋼は標準的な材料であり、まさに身近な鋼材であるが、その特徴などは鉄鋼便覧<sup>4)</sup>や、わかりやすい解説書<sup>5)</sup>等に記載されているので本稿では詳述しない。SMA鋼については2.3節で

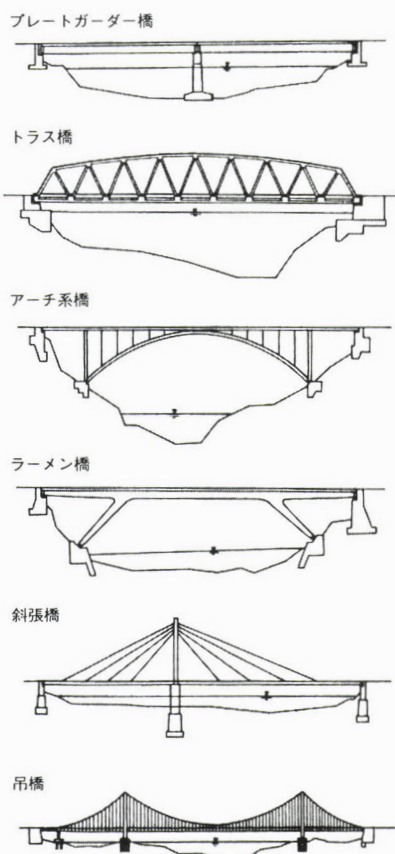


Fig. 1 上部構造の形式による橋梁の分類

Table 1 道路橋示方書で標準とする構造用鋼

| 規 定        |                    | 鋼 材 記 号                              |
|------------|--------------------|--------------------------------------|
| JIS G 3101 | 一般構造用圧延鋼材          | SS400, SS490                         |
| JIS G 3106 | 溶接構造用圧延鋼材          | SM400, SM490, SM490Y<br>SM520, SM570 |
| JIS G 3114 | 溶接構造用耐候性<br>熱間圧延鋼材 | SMA400, SMA490, SMA570               |

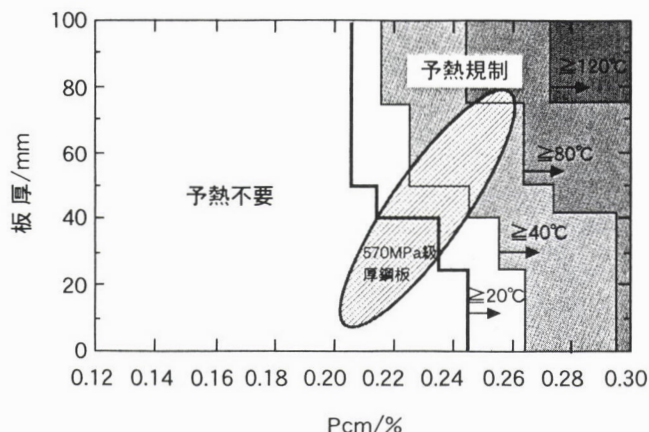


Fig. 2 道路橋示方書で規定された板厚と予熱温度の関係

述べる。最近はこの鋼の強度レベルで、種々の特性、特徴を付与した新しい材料(高性能鋼。JIS規格に適合する場合としない場合がある)が開発されており、これらを以下に述べる。

## 2.1 予熱低減鋼、極厚鋼

1996年に改訂された道路橋示方書<sup>2)</sup>では、上部構造に用いられる鋼材の適用板厚は100mmまで拡大されるとともに、予熱に関しては、ユーザーが鋼材の $P_{CM}$ 値を指定することにより、希望する予熱温度の選定が可能になった。

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

Fig. 2 はSM570級鋼の例を示す。図中に示す従来のSM570級鋼の $P_{CM}$ 値と板厚の関係では従来鋼では板厚が厚くなると予熱が必要である。そして $P_{CM}$ 値が0.20%以下の鋼材とすればすべての板厚の鋼材で予熱を省略できる。

これに対応して最近、極低炭素ペーナイト型のSM570級の予熱を省略できる新鋼材が開発<sup>6)</sup>され、実用に供されている。鋼中の炭素量を従来鋼の約1/10に下げて溶接低温割れ感受性を極めて低くした鋼で、NbやBなどの微量元素添加と熱加工制御(TMCP)の組み合わせで微細な極低炭素ペーナイト組織として強度と靱性を付与している。100mmまでの極厚SM570級鋼板を調質処理なしで経済的に製造でき納期も短い。Table 2 にこの鋼の組成と機械的特性を示す。75mmの板厚でも $P_{CM}$ 値は0.138ときわめて低く、またY型溶接割れ試験で、0℃において割れが認められていない。

## 2.2 高強度鋼材

高強度鋼材を橋梁に適用することにより鋼材板厚の薄肉

Table 2 極低炭素ペーナイト型SM570鋼の化学組成と特性

| (mass%)        |          |           |               |          |        |        |                                                                                            |               |       |       |
|----------------|----------|-----------|---------------|----------|--------|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|-------|-------|
| C              | Si       | Mn        | P             | S        | Al     | Ti     | N                                                                                          | Others        | Ceq   | Pcm   |
| 0.012          | 0.30     | 1.56      | 0.009         | 0.003    | 0.029  | 0.011  | 0.0028                                                                                     | Cu, Ni, Nb, B | 0.294 | 0.137 |
|                |          |           |               |          |        |        |                                                                                            |               |       |       |
| Thickness (mm) | Position | Direction | 0.2%P S (MPa) | TS (MPa) | El (%) | YR (%) | Ceq=C+Mn/6+Si/24+Ni/40+Cr/5+Mo/4+V/14<br>Pcm=C+Si/30+Mn/20+Cu/20+Ni/60+Cr/20+Mo/15+V/10+5B |               |       |       |
| 38             | 1/4t     | L         | 459           | 596      | 31     | 77     |                                                                                            |               |       |       |
|                |          | T         | 480           | 627      | 30     | 77     |                                                                                            |               |       |       |
|                | 1/2t     | L         | 458           | 591      | 29     | 77     |                                                                                            |               |       |       |
|                |          | T         | 485           | 626      | 29     | 77     |                                                                                            |               |       |       |
| 75             | 1/4t     | L         | 470           | 587      | 31     | 80     |                                                                                            |               |       |       |
|                |          | T         | 472           | 599      | 29     | 79     |                                                                                            |               |       |       |
|                | 1/2t     | L         | 439           | 576      | 30     | 76     |                                                                                            |               |       |       |
|                |          | T         | 458           | 596      | 27     | 77     |                                                                                            |               |       |       |

化が可能となり、軽量化が図られる。これに付随して、長大支間化、運搬・架設の効率化、薄肉化による加工・溶接の効率化などのメリットが生じる。日本では、鋼橋の分野においては高張力鋼とは480MPa鋼以上をよんでいたが、近年は570級鋼(一般には調質鋼であるがTMCP鋼も含む)が1950年代の名神高速道路の建設以降、一般的に使用されるようになってきている。一方、780MPa鋼は本州四国連絡橋の計画が進むにつれて調査研究が進められ、1964年には京葉道路の花輪跨道橋において実験橋の性格を持って初めて主桁として使用された<sup>7)</sup>。ついで、1974年に架設された大阪の港大橋に大量に使用された。当初、溶接時の低温割れ防止のため高温での予熱作業が必須であったが、最近では780

Table 3 予熱低減型調質HT780鋼の化学組成と特性例

| 化学成分 (×10 <sup>-2</sup> mass%) |    |    |         |         |    |    |     |    |    |     |         |      |         |
|--------------------------------|----|----|---------|---------|----|----|-----|----|----|-----|---------|------|---------|
| C                              | Si | Mn | P (ppm) | S (ppm) | Cu | Ni | Cr  | Mo | Nb | V   | B (ppm) | Ceq  | Pcm     |
| 9A                             | 6  | 26 | 134     | 70      | 20 | 97 | 103 | 46 | 31 | 90  | 410     | —    | 49      |
| 9B                             | 8  | 20 | 105     | 40      | 10 | 22 | 124 | 45 | 37 | —   | —       | 48   | 22      |
| 9C                             | 8  | 26 | 91      | —       | —  | 25 | 98  | 40 | 40 | 200 | —       | 4    | 45      |
| 9D                             | 8  | 20 | 89      | —       | —  | 25 | 103 | 50 | 41 | 90  | 400     | 8    | 47      |
| 9E                             | 7  | 25 | 98      | —       | —  | 2  | 99  | 66 | 38 | —   | 470     | 13   | 50      |
| 開発目標値                          |    |    |         |         |    |    |     |    |    |     |         |      |         |
| ≤53                            |    |    |         |         |    |    |     |    |    |     |         | ≤50  | ≥50     |
|                                |    |    |         |         |    |    |     |    |    |     |         | ≥685 | 780~970 |
|                                |    |    |         |         |    |    |     |    |    |     |         | ≥16  | ≥47     |
|                                |    |    |         |         |    |    |     |    |    |     |         | ≤50  | ≤50     |

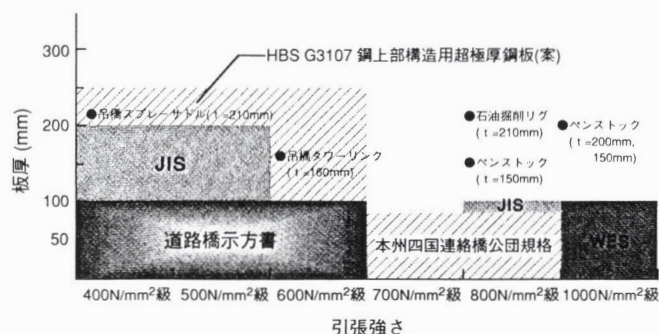


Fig. 3 板厚、引張強さと規格



MPa級の予熱低減鋼が開発され、明石海峡大橋に適用された。

Table 3<sup>9)</sup>に明石海峡大橋に適用された予熱低減型の780 MPa級鋼の組成と機械的特性を示す。

Fig. 3<sup>9)</sup>に各種鋼材規格を板厚と引張強さの関係で示す。橋梁以外の他の需要分野では例えば揚水発電所において高落差の発電所で使用される水圧鉄管では950MPa級の高張力鋼板の使用も計画されている。

## 2.3 耐候性鋼

近年、橋梁のミニマムメンテナンス化が注目されているが、これに対応する鋼材として耐候性鋼の無塗装裸使用がある。耐候性鋼は無塗装の状態で、時間の経過とともに腐食の進行が抑制される。普通鋼に塗装する鋼橋の場合、平均10年に1回の割合で塗り替えが必要とされるが、耐候性鋼を使用した場合には塗り替え費用が不要になるため使用年数が経過するほど累積コストが軽減できる。経過年数が40年の場合の試算では、37%の累積コスト減となる<sup>9)</sup>。

耐候性鋼は1933年に米国で開発され、1960年頃に日本に技術導入された。広く普及し始めた1968年にはJIS G3114「溶接構造用耐候性熱間圧延鋼材」SMA鋼として規格化され、さらに1983年には裸のまま、またはさび安定化処理を行って使用するWグレードと、塗装して使用するPグレードに改訂された。一般には塗装使用はきわめて少なく、大部分が裸使用で一部にさび安定化処理が使われている。

SMA鋼は約0.4%のCu、約0.6%のCrおよび約0.2%のNiが添加されているのが特徴である。なおさらに耐候性に有効なPを0.07から0.15%添加したP-Cu-Cr系高耐候性圧延鋼材がJIS G3125にSPA鋼として規格化されている。この鋼は耐候性はさらに優れているがPによる溶接性の劣化の観点から板厚が16mm以下に限定されており、橋梁にはあまり使われない。

これら耐候性鋼の使用に際しては、(1)塩分環境に弱い、

(2)初期の段階で流れさびが発生し景観を損ねる懸念がある、などを考慮する必要がある。塩分に関しては、1981年から「耐候性鋼材の橋梁への適用に関する共同研究」委員会が、50年後の板厚減少量が0.2mm以下となる限界の飛来塩分量は0.05mdd(mg/dm<sup>2</sup>/day)であることを確認し、飛来塩分量が0.05mdd以下で耐候性鋼の無塗装使用が可能な地域を、Fig. 4に示すように海岸からの距離で明示した<sup>10)</sup>。

最近では上記の制限地域でも使用可能な、主にNiを含有した海浜耐候性鋼<sup>11)</sup>も開発されており、建設省土木研究所では1999年4月よりこれらの新開発された海浜耐候性鋼の適用性を調査する目的で、種々の海浜環境で橋桁構造を模擬した試験体の暴露試験を実施している。また、実橋にも使用され始めており、今後の普及が期待される。

耐候性鋼を裸で使用する場合、安定錆が形成されるまでの間はさびの色調や均一性の点で耐候性鋼の外観は必ずしも良好でない場合がある。また、腐食で生成した鉄イオンを含む雨水によるコンクリートなどの着色や初期流れさびによる汚染も指摘されている。この汚染を軽減して外観を良好にするとともに、実用上好ましい安定さびを形成するさび安定化処理法が1965年頃から開発され、さらに、最近では安定さびを早期に形成するというさび安定化処理法<sup>12)</sup>も開発されている。

## 2.4 LP鋼板

近年の合理的な橋梁製作法として、主桁断面の一部材一断面化による溶接工数低減が図られている。LP鋼板<sup>12)</sup>(Longitudinally profiled plate)は、鋼板長手方向で板厚を変化させており、これをフランジまたはウェブに使用することにより、さらに合理的構造とすることが出来る。LP鋼板を使用することにより、鋼材の重量を低減できるだけでなく、接合部の等厚化によりフィラープレートやテーパ加工の省略など、作業性の改善も期待できる。LP鋼板は厚板圧延時に鋼板長手方向の厚さを変化させるため、高度な油圧式板厚制御技術が適用されている。またTMCPの適用も可能である。LP鋼板の製造可能寸法はTable 4<sup>9)</sup>に示す通りであり、適用鋼材規格は道路橋示方書に指定されているJIS鋼材規格である。Fig. 5<sup>9)</sup>には桁フランジへの適用例を示す。

Table 4 LP鋼板の製造可能寸法

|         |           |        |         |
|---------|-----------|--------|---------|
| 最大板厚差   | : 25~30mm | 最大勾配   | : 4mm/m |
| 最小薄肉部板厚 | : 10~15mm | 最大厚部板厚 | : 100mm |
| 全長      | : 6~25m   | 幅      | : ≥1.5m |



Fig. 4 現行耐候性鋼の無塗装使用に対する適用可能地域

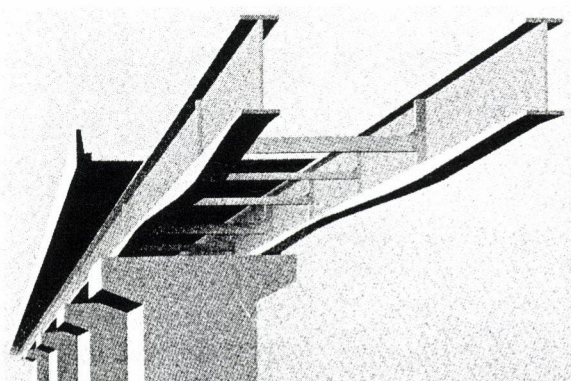


Fig. 5 桁フランジへのLP鋼板の適用例

### 3 鉄塔用鋼

鉄塔はスキー場のリフトから大型の送電鉄塔まで種類が多い。小型の鉄塔は多くは山形鋼が用いられ、大型の鉄塔では主塔やトラス材などには鋼管が用いられる。鉄塔の代表は送電鉄塔であり本稿では送電鉄塔用の鋼材について述べる。送電鉄塔用鋼材は、鉄塔合理化の一つとして、従来から電力会社、製鉄メーカー、鉄塔ファブリケーター協力のもとに逐次改良が行われ、次第に高張力鋼が使用されてきた。

Fig. 6<sup>14)</sup>に送電用鉄塔の概略図を示す。山形鋼としてはSS400からSS550が使われ、鋼管はJIS G3444「一般構造用炭素鋼鋼管」のSTK鋼管が用いられる。STK鋼管は一般には強度が重要で鋼管としての寸法精度を要求されることは少ない。厚肉管では継目無（シームレス）鋼管が若干使用されるが、ほとんどは電気抵抗溶接（ERW）鋼管およびサブマージドアーク溶接（SAW）鋼管が使用される。後者は呼び径350A以上の大径溶接鋼管であり、素材として厚板または帯鋼を用いるので、シームレス鋼管と比べて、偏肉が少ない。また外径に対して、比較的肉厚が薄い場合に経済的である。超高压送電鉄塔などに主に使われ、その強度レベルは引張強さで590MPaに達している。

高压送電鉄塔は溶融亜鉛めっきを行い、耐用年数の増加を図っている。しかし、100万ボルト（UHV）送電鉄塔に使用される590MPa級の鋼材では特に溶接熱影響部に亜鉛めっき割れが起る。1983年に設置された「送電鉄塔用HT60開発委員会」は詳細な研究を行い<sup>15,16)</sup>、その成果として、1988年にJIS G3129「鉄塔用高張力鋼鋼材」SH鋼および、JIS G3474「鉄塔用高張力鋼管」STKT鋼管が規格化された。両規格とも溶融亜鉛めっき割れ感受性当量（%）を次式で定義し

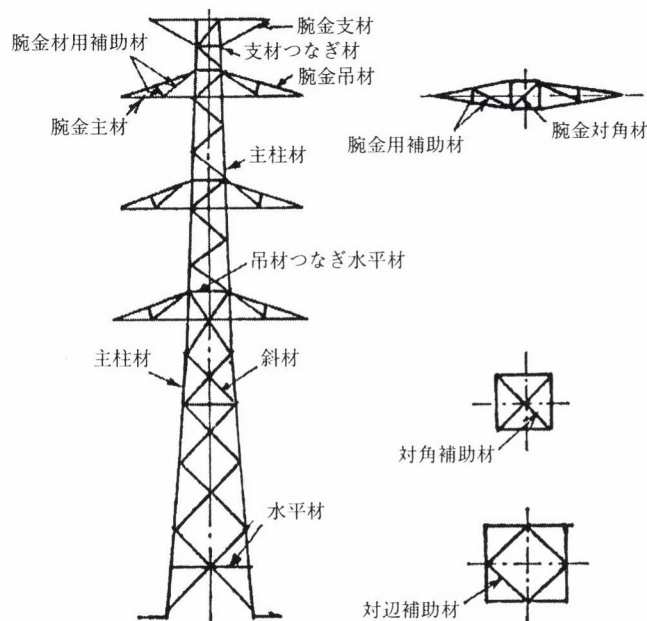


Fig. 6 送電鉄塔の概要

溶融亜鉛めっき割れ感受性当量（%）

$$= C + Si/17 + Mn/7.5 + Cu/13 + Ni/17 + Cr/4.5 + Mo/3 + V/1.5 + Nb/2 + Ti/4.5 + 420B$$

この当量を0.44%以下とし、かつSTKT590鋼管では、付属書Z12で特別品質規定としてBを2 ppm以下と規定している。

亜鉛めっきによる割れは溶接残留応力と亜鉛浴浸漬時の熱応力とによる引張応力下において、鋼材の熱影響部の旧オーステナイト粒界を亜鉛が侵入拡散して粒界割れを発生する液体金属脆化による割れである。切欠付き丸棒試験片の切欠底部に亜鉛を電気めっきし、470℃で初期応力を種々変えて破断強度—破断時間曲線を求め、この破断強度を亜鉛電気めっきがない時の破断強度で割った値を $S_{LM}$ （%）（Susceptibility of liquid metal embrittlement）と呼ぶ。鋼材の亜鉛による脆化度は $S_{LM}$ —破断時間曲線がほぼ安定する破断時間400sにおける値 $S_{LM}^{400}$ で評価される。亜鉛脆化を抑制する微量元素としてはTiやZr<sup>17)</sup>があり、前者はHAZの細粒化、後者は旧オーステナイト粒界の焼き入れ性抑制等の効果による。

さらに亜鉛脆化におよぼす微量Bの効果が注目され、 $B \leq 2$  ppmとするとHAZの組織を粒界フェライト主体の組織となり、鉄塔用鋼材の割れ防止限界である $S_{LM}^{400} \geq 42\%$ を満足し、亜鉛脆化による割れを防止できることが明らかになっている<sup>16)</sup>。この結果に基づき鉄塔用高張力鋼鋼材（JIS G3129）の $S_{LM}^{400}$ について $B \leq 2$  ppm、 $C \leq 0.12\%$ の範囲で次のような式が提案されている<sup>16)</sup>。



鉄塔用 $S_{LM}^{400}(\%) = 201 - 370C - 22Si - 51Mn - 35P + 33S - 28Cu - 22Ni - 87Cr - 123Mo - 275V - 182Nb - 82Ti + 24Al + 1700N - 155000B$

## 4 石油タンク用鋼

資源が乏しく国土の狭い日本ではエネルギー原料の多くを海外に依存しており、これらやこれらから作り出される各種製品を貯槽することが必要であり、さまざまな貯槽タンクが数多く建設されている。貯槽の内容物は水、石油、ガス、LPGやLNGなどがある。これらのなかで、本稿では石油あるいは石油類の貯蔵タンクについて述べるが、これらの貯蔵温度は常温、圧力は常圧のタンクである。これ以外に市街地でもよく見かける都市ガスなどの球形貯槽やLPGやLNGなどの低温貯槽が代表的な貯槽であり、特に低温貯槽用の9%Ni鋼は最近の進歩が著しい<sup>18)</sup>が、本稿では取り上げない。

石油類の貯蔵方式は(1)地上貯油タンク、(2)縦形地下貯油タンク、(3)岩盤貯槽の3方式に分けられるが、日本では(1)の地上貯油タンク方式が圧倒的に多い。地上貯油タンク方式はさらに、a. 固定屋根式貯槽、b. 浮き屋根式貯槽、c. 固定屋根付き浮き屋根式貯槽がある。石油コンビナートでよくみかけられるのは大型の浮き屋根式タンクである。Fig. 7にこの概略図を示す<sup>19)</sup>。

このタンクに使用される鋼材は鋼板、形鋼、鋼管、鋳鋼製の付属品、フランジ類、ボルトナット、溶接材料など多岐にわたるが本稿では鋼板について述べる。鋼板の選定にあたっては、強度以外にもタンクの設計条件(圧力、温度、内容物など)、鋼板の溶接性、加工性、経済性などを考慮しなければならない。

日本では、消防法およびJIS B8501「鋼製石油貯槽の構造」により、石油タンクの設計、施工がおこなわれるが、それらの中ではSS400、SM鋼、SMA鋼および、JIS G3115「压力容器用鋼板」SPV鋼の使用が許されている。ただし、耐候性鋼のSMA鋼がタンクに使われることはまれである

と思われる。

鋼板の強度の点からは、最小引張強さが390MPa程度の軟鋼と490MPa、590MPaの高張力鋼に分類できる。大型タンクには当然高張力鋼が使用されることが多い。鋼板はそれぞれ規格に定められた性能を満たすことはもちろんであるが、北海道など寒冷地に設置されるタンクではシャルピー衝撃試験が要求される。JIS B8501では、HPIS B102(WES3003)「低温用圧延鋼板判定基準」<sup>20)</sup>に基づく試験温度で試験を行うように規定されている。タンク側板の最大厚みはJIS B8501で軟鋼は38mm、高張力鋼で45mmに制限されているので、これにより石油タンクの最大容量が限定され、それは概ね16万klである。

SS鋼、SM鋼、SMA鋼に関しては橋梁用鋼の章で述べたので、ここではSPV鋼について述べる。SPV鋼はSM鋼を压力容器に向くように改善し、品質保証の程度を高くした鋼で、常温降伏点の規定値でSPV245から490の6種類がある。Cを0.20または0.18%以下に抑えたSi-Mn鋼である。またSPV450とSPV490鋼は、溶接割れに関する規定もあり、以下に示す炭素当量(WES式Ceq)または溶接割れ感受性指数( $P_{CM}$ )の上限が定められている。

$$Ceq_{WES}(\%) = C + Mn/6 + Si/24 + Ni/40 + Cr/5 + Mo/4 + V/14$$

SPV450とSPV490鋼は焼入れ焼戻し熱処理によって製造される。またTMCPによる製造もSPV315以上では可能でその場合には溶接性が向上するので、炭素当量(WES式)または $P_{CM}$ の上限も焼入れ焼戻し熱処理による場合に比べて低く設定されている。TMCPによって製造された場合、規格記号の末尾にTMCの表示がある。

SPV鋼は例えばSGV鋼に比べてMnの上限値が高いので靱性的には有利であり、WES3003によって通常は $-10^{\circ}\text{C}$ 、TMCP鋼は $-20^{\circ}\text{C}$ まで使用できることを前提に規格値も規定されている。従って、低温用高張力鋼としてもこの鋼は使用されている。

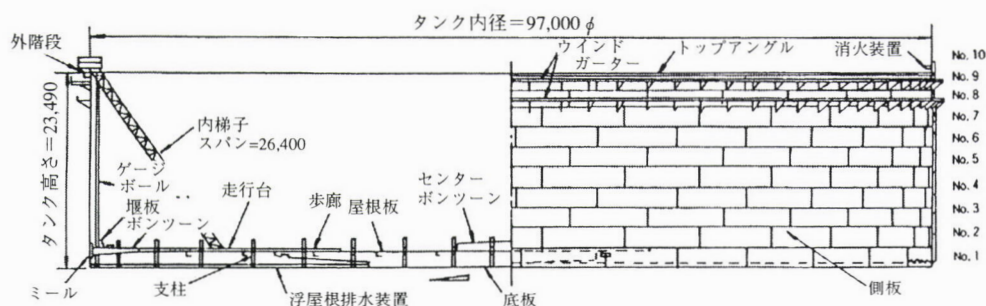


Fig. 7 浮き屋根式タンク

浮き屋根タンクの溶接施工は主にサブマージーク溶接やエレクトロガス溶接が用いられ、現地ばら組方式をとる球形タンクと異なり、溶接低温割れの恐れのある被覆アーク溶接が使われることは少ないが、低温割れ感受性を低めたクラックフリー(CF)型の高張力鋼を使うことも出来る。

CF型の高張力鋼板は、WES3001(溶接用高張力鋼板)<sup>21)</sup>に規定するHW450(耐力450MPa以上)及び、HW490(耐力490MPa以上)のうち、特に溶接低温割れの発生に対する感受性を低くしたもので、WES 3009-1990<sup>22)</sup>に規定されている。CF鋼の $P_{CM}$ 値は0.2以下である。溶接割れ感受性を $y$ 開先拘束割れ試験で比較すると、従来鋼の場合割れを防止するには75℃の予熱が必要であるのに対しCF鋼では常温においても割れは認められない。今後これらにも2章の橋梁用鋼材で述べた高性能のHT570級鋼が使用される時代が来るであろう。

## 5 結言

本稿は入門講座「身近な鉄 ユーザーのための鉄鋼製品の解説」として特に最近の進歩に着目して「橋梁、鉄塔、石油タンク用鋼」について纏めた。筆者の力不足もあり、また誌面の都合もあって、取り上げるべき鋼が記述されていないかもしれない。

同じ強度水準でありながらユーザーのニーズに応じて種々の新製品が現在も精力的に開発されているのには驚かされる。今後もさらにユーザーのトータルのメリットになる新鋼材の開発を期待したい。

### 参考文献

- 1) 鋼橋へのアプローチ, (社)日本橋梁建設協会, 講習会テキストNo.11, (1998)
- 2) 道路橋示方書・同解説, (社)日本道路協会, (1998)
- 3) 高橋稔彦, 大橋章一, 樽井敏三, 植森龍治, 丸山直巳: CAMP-ISIJ, 7 (1994), 777.
- 4) 第3版 鉄鋼便覧 IV, (社)日本鉄鋼協会編, 丸善, (1981)
- 5) 大和久重雄: JIS鉄鋼材料入門, 大河出版, (1978)
- 6) 岡津光浩, 林 透, 天野虔一: 川崎製鉄技報, 30, 3 (1998), 131.
- 7) 西部 剛, 木水隆夫: 橋梁と基礎, 95-10, 10.
- 8) 間瀬秀里: 新しい時代を創造する高性能厚板, 第159・160回西山記念技術講座, (社)日本鉄鋼協会, (1998), 80.
- 9) 高性能鋼の概要(橋梁向け), (社)鋼材倶楽部橋梁研究会
- 10) 日本鋼構造協会座談会, JSSC, 17 (1995), 27.
- 11) 例えば, 伊藤 実, 宇佐美明, 田辺康児, 都築岳史, 楠隆, 富田幸男: 新日鉄技報, 第371号 (1999), 78.
- 12) 岸川浩史, 幸 英昭, 原 修一, 神谷光昭, 山下正人: 住友金属, 51, 1 (1998), 53.
- 13) 弓削佳徳, 堀 紀文, 西田俊一: 川崎製鉄技報, 30, 3 (1998), 137.
- 14) 鋼構造用語略語集(第1回), JSSC, 19, 201 (1983), 13.
- 15) 送電鉄塔用HT60開発委員会, JSSC, 21-221 (1988), 11.
- 16) 家沢 徹, 井上尚志, 平野 攻, 岡沢 亨, 小関智也: 鉄と鋼, 79 (1993), 1106.
- 17) 小関智也, 天野虔一: 川崎製鉄技報, 25 (1993), 20.
- 18) 天野虔一: 溶接学会誌, 67, 7 (1998), 562.
- 19) 河野武亮: 圧力技術の現状と将来, (社)日本高圧力技術協会, (1989), 77.
- 20) 低温用圧延鋼板判定基準WES3003-1990, (社)日本溶接協会
- 21) 低温用圧延鋼板判定基準WES3001-1996, (社)日本溶接協会
- 22) 溶接割れ感受性の低い高張力鋼板の特性 WES3009-1990, (社)日本溶接協会

(2000年3月29日受付)