

## 技 術 資 料

### 最近の高張力鋼について (I)

山 木 正 義\*

#### On the Recent High-Tensile Steels (I)

Masayoshi Yamaki

#### I. 緒 言

高張力鋼というのは、文字通り、普通鋼に比して抗張力、すなわち、引張り強さの高い鋼のことであるが、溶接技術が飛躍的に進歩した今日では、単に高張力鋼といえは溶接構造用高張力鋼、すなわち、溶接性が良好で強度の高い構造用鋼を意味することが常識である。したがって本文においてももっぱら溶接構造用高張力鋼について述べる。本鋼種の特色として、文献、カタログなどに示されていることを列挙すれば次の通りである。

1. 引張り強さ、降伏点が高いこと。普通鋼に比して強度が 30% 程度、あるいはそれ以上高い。したがって一般にはそれだけ鋼材の使用量が節約できる。

2. 降伏比が高いこと。降伏点/引張り強さが 65% 程度以上のものが多い。したがって、構造物の設計上有利である。

3. 溶接性がすぐれていること。高張力鋼にとつて最も大切な条件であつて、軟鋼に比しいちじるしい遜色のないことがうたわれている。

4. 加工性が良好なること。冷間加工、熱間加工ともに容易で、軟鋼とあまり違わない。

5. 耐蝕性、耐摩耗性が良好なること。Cu, P などを含むものが多いから、大気中における耐蝕性が普通鋼よりすぐれている。また、普通鋼に比し耐摩耗性も良好である。

6. 熱処理が不要なること。一般には、圧延のままの状態、普通鋼同様に手軽に使用できるものが多い。特に高性能を要求される場合には焼準、調質などの熱処理を施して使うこともある。

7. 比較的安価であること。したがって、鋼材使用量が節減されることと相俟つて、経済的にも有利である。

本文においては、上記のような特色を持つため、近來とみに注目を浴びている高張力鋼の溶接性に重点をおい

た材質、現用規格、使用法、実用例、最近の研究経過などにつき概説を試みる。

#### II. 発達の経過<sup>1)2)</sup>

構造用材料としては古くから軟鋼が用いられており、現在もなお最も重要な地位を占めていることに変わりはない。しかし、たとえば、長大なスパンを有する橋梁において許容応力の比較的低い軟鋼を用いたのでは部材断面が過大となり構造上の困難を生じてくるので、ある程度以上のスパンのものでは許容応力の高い高張力鋼を用いる方がはるかに有利となる。また船舶においては大型になるにつれて鋼材重量の最大排水量に対する比率が加速度的に増大するので、許容応力の高い材料を用いて重量を減じ、積載能力の増大をはかることが必要となつてくる。特に海軍艦艇において然りである。か様な理由で、欧米においては 19 世紀末以来、高張力鋼が研究生産され使用されてきた。まず最初に考えられたのは鋼の C% を増して強度をあげることである。すなわち、 $c = 0.2, 5 \sim 0.35\%$ 、引張り強さ =  $44 \sim 58 \text{ kg/mm}^2$  程度のものでこの中には 1923 年以来生産されたドイツの St 48 鋼などが含まれている。これだと、許容応力を軟鋼の 1.1 ~ 1.3 倍に取りうる。ついで、Ni, Cr, Si, Mn などの合金元素を単独にまたは数種添加したいわゆる低合金高張力鋼が現われてきた。Ni 鋼は米国では比較的 Ni% の高いもの (3.5% 以下) が用いられ、1931 年完成の New York の Hudson 河上の George Washington 吊橋、San Francisco-Oakland Bay 橋などに使われた。ドイツの Ni 鋼は米国のそれよりやや Ni% が少なく、2 ~ 2.5% であつたが、後に Ni の一部を安価な Cr におき換えた Ni-Cr 鋼が使用された。Si 鋼もおもに米国およびドイツで使用され、米国のものは C が多く

\* 東都製鋼株式会社東京製鋼所。工学博士

Table 1. St 52 鋼の変遷

年 代	化 学 成 分 (%)				肉 厚 t (mm)	最低降伏点 (kg/mm <sup>2</sup> )
	C	Si	Mn	Mo		
1938年以前	0.14~0.20	0.40~0.50	0.90~1.10	0.10~0.15	—	36
1938年以降	0.14~0.20	0.40~0.50	0.90~1.10	—	—	36
戦 時 中	0.17~0.22	0.50~0.60	0.80~0.90	—	t ≤ 18	34
	0.17~0.22	0.50~0.60	0.90~1.00	—	t > 18	32
	0.16~0.20	0.50~0.60	1.00~1.20	—	t ≥ 40	34*
1946年より	0.16~0.20	0.45~0.55	1.00~1.25	—	t ≤ 16	35
1951年まで					16 < t ≤ 30	34
					t > 30	33

\* 潜水艦船殻用鋼板

Si が比較的少ないのに対して、ドイツのそれは C を少なくして Si により高い強度を出すようにしたものである。そのため、ドイツの Si 鋼は靱性がよくなっているが、圧延が困難なため、1929 年に至り Si を減じて Mn, Cu, Cr, Mo などを加えた高張力鋼が生産され、これが初期の St 52 鋼となった。ちなみに、現在でもドイツにおける代表的な高張力鋼であるこの St 52 鋼の成分の変遷経過を示せば Table 1 の如くである。Mn 鋼はおもに英国で研究生産され、Ducol 鋼として広く知られている。その後溶接技術の目ざましい発達により、ほとんどすべての構造物に溶接が採用されるに至り、高張力鋼に対しても溶接性ということが最も重要な条件となってきた。溶接性を左右する第一の因子は鋼の化学成分であるので、溶接に対して好影響を与えるような種々の添加元素の組合せが研究され、後述するような鋼種が各国で現在使用されているわけである。

わが国における高張力鋼の発達は旧海軍が中心であった。すなわち、昭和初年以來艦艇に Ducol 鋼、高炭素鋼を使用してきたが、その後溶接性の良好な高張力鋼の研究も活発となった。昭和 16 年にはおもにドイツの技術を参考にし、全溶接潜水艦建造用の高張力鋼の研究を開始した。第 2 次大戦の末期にはかなり多量の高張力鋼が溶接潜水艦の建造に使用されている。当時の目標成分および機械的性質は、C=0.15~0.20%, Si=0.5~0.7%, Mn=0.9~1.2%, 引張り強さ ≥ 55 kg/mm<sup>2</sup>, 伸び ≥ 20% である。終戦後、輸出用車輛や占領軍の組立式橋梁の引合に際して高張力鋼を使用することが問題になったが、これを契機として、早晩、わが国においても欧米諸国におけると同様に高張力鋼が普通鋼に代って広く使用されるべきであるとの考えにもとずき、昭和 25 年

ごろより、二、三のメーカーで製造を開始した。後述するごとく、鋼種は Si-Mn 系がおもになつている。

### III. 機 械 的 性 質<sup>3)</sup>

高張力鋼の具備すべき第一の条件は文字通り高い強度である。強度を高めるためには第一に適当な合金元素を添加することが考えられ、第二には、適当な熱処理を施すことも考えられる。ただ単に鋼の強度を増すことだけでは比較的容易であるが、良好な溶接性を維持しながら強度を上げることは、なかなか困難なことである。さて、強度には、引張り強さと降伏点の二つが考えられ、一般に構造物の設計応力値の基準として採られるのは降伏点であるが、溶接構造物ではいろいろの意味の切欠きが存在し、また使用目的によつては衝撃荷重を受けることも考えられるので、このような場合に生ずる応力集中にともなう過荷重に対しても耐えるためには充分な引張り強さと伸びが必要である。したがって降伏点と引張り強さのいずれを採るかということは、いろいろと議論の余地のあるところであろうが、最近では、降伏点の高い鋼を使用してゆく傾向にあるようである。

高張力鋼の降伏点におよぼす添加元素の影響を調べたものとしては、C. E. Sims らの実験<sup>4)</sup>がある。これは、C=0.21%, Mn=1.35%, Si=0.28%, Ti=0.015%, Al 投入量 0.2 kg/t の鋼を基本に選び、これに各元素を個々に添加した場合の降伏点の変化を測定したものである。その結果をまとめて各添加元素 1% についての降伏点の増加を示したものが Table 2 である。これらの影響がかりに一次加算的であると考えると各元素の影響はつぎの等価炭素量で整理できる。

Table 2. 降伏点の増加

成 分	C	Mn	Si	Mo	V	Cr	Ti
降伏点の増加 kg/mm <sup>2</sup>	46.9	18.3	2.3	41.3	72.8	0	0
比	1	1/3	1/20	1	1.4	0	0

などがとくに大きいためであつて、一律には論じられないことを示している。

つぎに、合金元素としては、強度を高めてもなるべく伸びを減少させないものが好ましい。一定の強度増加に対する伸びの減少率を Table 3 から求めると Table 4 のごとくになる。すなわち、強度だけを高めるには P、

Table 3. 機械的性質におよぼす合金元素 1%添加の影響

成 分	降 伏 点		引 張 り 強 さ		伸 び (2'')		適 用 範 囲 %
	増加量 kg/mm <sup>2</sup>	比	増加量 kg/mm <sup>2</sup>	比	増加量 %	比	
C	52.1	1	78.7	1	-51	1	0~0.7
Mn	9.8	1/5	14.8	1/5	-6	1/9	0.3~1.5
Si	6.3	1/8	12.0	1/7	-4	1/12	0.3~2.0
P	35.2	2/3	52.2	2/3	-33	2/3	0~0.2
S	0	0	-28.2	-1/3	0	0	0~0.06
Cu	8.8	1/6	10.5	1/7	-5	1/10	0~2.0
Ni	2.8	1/19	3.5	1/22	-3	1/17	0~1.8
Cr	0	9	9.2	1/9	-12	1/4	0~1.0
Mo	4.9	1/10	0.7	1/112	-20	2/5	0~0.3
Al	81.0? 0	16? 0	-18.3	-1/4	0	0	0~0.04 0.04~0.10
Ti	0 16.9?	0 1/3?	-2.8	-1/30	-4	1/12	0~0.3 0.3~0.4
V	57.8	1.1	46.4	1/2	-40	4/5	0~0.250
B	-1760?	?	-352?	?	0	0	0~0.004

$$Ceq(\text{降伏点}) = C + 1/3Mn + 1/20Si + Mo$$

$$+ 1.4 \times V + Zero \times Cr \dots \dots \dots (1)$$

また米国海軍技術研究所の Rinebolt ら<sup>3)</sup>も基本成分 C = 0.30%, Mn = 1.00%, Si = 0.30% の高張力鋼を選び、これに各成分元素を添加した場合の影響を調べているが、その結果をまとめると Table 3 のごとくである。これらの影響も一次加算的であると考え、それぞれの等価炭素量はつぎのごとく表わせる。

$$Ceq(\text{降伏点}) = C + 1/5Mn + 1/8Si + 2/3P$$

$$+ 1/6Cu + 1/19Ni + Zero \times Cr + 1/10Mo + 1.1V$$

$$\dots \dots \dots (2)$$

$$Ceq(\text{引張り強さ}) = C + 1/5Mn + 1/7Si + 2/3P$$

$$+ 1/7Cu + 1/22Ni + 1/9Cr + 1/2V \dots \dots \dots (3)$$

$$Ceq(\text{伸び}) = C + 1/9Mn + 1/12Si + 2/3P$$

$$+ 1/10Cu + 1/17Ni + 1/4Cr + 2/5Mo$$

$$+ 1/12Ti + 4/5V \dots \dots \dots (4)$$

(ただし P は 0.05% 以上のときのみ適用)

ここでたとえば降伏点に対する影響について (1) 式と (2) 式を比較すると、C, Mn, Si, Cr, V などについてはほぼ等しいが、Mo には大差が見られる。これは、Mo に対しては共存元素の影響、C% の差異による影響

Table 4. 伸びの減少

成 分	伸の減少 (2''), %	
	降伏点 1 kg/mm <sup>2</sup> 増加に対し	引張り強さ 1 kg/mm <sup>2</sup> 増加に対し
C	0.72	0.45
Mn	0.4	0.3
Si	0.4	0.2
P	0.66	0.45
Cu	0.4	0.3
Ni	0.8	0.6
Cr	∞	0.9
Mo	3	20
V	0.49	0.61

V はきわめて有効な元素であるが、同時に伸びをいちじるしく減少させる欠点がある。伸びをなるべく減少させないで強度を高める元素を優秀なものから順にならべると、降伏点に着目した場合は、(Si, Mn, Cu), V, P, C, Ni, Mo, Cr, 引張り強さに着目した場合には、Si, (Mn, Cu), (C, P), (Ni, V), Cr, Mo となる。ただし ( ) 内は同順位を示す。これによると、Si, Mn, Cu, V, P, Ni の使用が高張力鋼として望ましいことになり、後述するごとく、実用高張力鋼の組成にはこれらの元素が多くを占めている。

つぎに熱処理によって強度を高めるものとしては、後述する T-1 鋼, 2H 鋼のように完全な焼入焼戻を施すものもあるが、また、Cu を含む鋼では、焼準後変態点直下に再加熱して析出硬化を利用するものもある。これも後述するドイツの HSB 鋼では、圧延温度を管理して圧延時に微細なアルミニウムの窒化物 (AlN) を析出せしめ、一種の析出硬化によって降伏点を高めている。

#### IV. 溶接性

##### (1) 溶接性

溶接性とはいかなることを意味するのであろうか？溶接性の定義は？ということになるとなかなか難しい問題であつて、現在までに各種の定義が提案されているが確定的な説はまだないようである。しかし構造用高張力鋼については“溶接性とは母材および溶接棒（広くは添加材）を組合せて考えるべき材料の性質であつて、できるだけ多くの溶接法によつて、欠陥のない、かつ満足すべき機械的性質を有する溶接接手が作られうる能力を表す尺度である”と定義すること、したがつて、溶接接手の機械的性質をもつて溶接性を判断する要素とすることが最も適当である<sup>9)</sup>と思われる。このように溶接性を定義した場合には、高張力鋼の溶接性を支配するおもな因子としてはつぎの3項目があげられる。

- ① 母材変質部の硬化ないし亀裂
- ② 熔着鋼の亀裂
- ③ 母材の切欠脆性

溶接構造物では<sup>2)</sup>、各部材は溶接により互に連続しているため、リベット構造とちがつて、進行性の亀裂がいつたん発生した場合にはどこまでも進行して全断面が破壊してしまう。したがつて変質部や熔着鋼に亀裂を生ずれば、これは応力の繰返しによつて次第に大きくなり、ついに急進性の亀裂となる可能性がきわめて強い。また応力除去をしない溶接構造物の中には、高い残留応力が部分的ではあつても、必ず存在するから、外力による応力とともに多軸応力状態を形成する。また溶接中のアンダーカット、ブローホール、スラッグ捲込などの欠陥を皆無にすることは現在のところ、不可能に近く、このような欠陥は切欠きの作用をして高い応力集中とともに、その付近に多軸応力状態を作り出す。この他、不良な設計工作などによつても切欠効果を生ずる可能性があるが鋼材は多軸応力状態のもとでは、温度の低下や荷重速度の増大により脆性破壊を生ずるようになる。すなわち、母材や溶接部のかかる脆化の傾向がいちじるしいこと、

換言すれば、切欠脆性がいちじるしいことは溶接構造物にとつて致命的である。さらに、変質部に亀裂を生じないまでも硬化がいちじるしいければ、その部分の延伸性が悪化し、組織的切欠効果を生ずるから好ましくない状態といえる。このように、溶接構造用高張力鋼では溶接性がいかに重要であるかがわかる。

##### 1) 変質部の硬化ないし亀裂

高張力鋼はその強度を増すために、前述のごとく合金元素が添加されているのでその焼入性が軟鋼よりいちじるしく強い。溶接熱は油焼入と同程度の急冷作用をとまなうから熔着金属に接した母材の熱影響部、すなわち変質部に硬いマルテンサイトを生成し易く、そのためFig. 1に見られるように硬度分布における突起を示すが、場

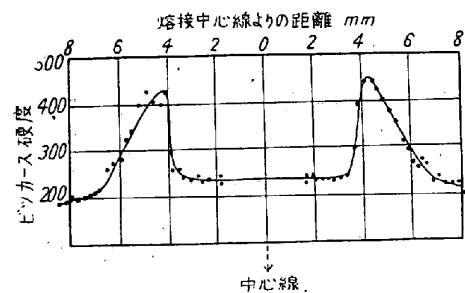


Fig. 1. 溶接部の硬度分布

合によつてはそこにビード下亀裂を生ずることもある。変質部の硬化は主として母材の化学成分、組織および溶接後の冷却速度で定まる。変質部の最高硬度  $H_{max}$  と等価炭素量  $C_{eq}$  との間にはつぎのような関係が認められている。

$$H_{max} = a C_{eq} + b$$

ただし、 $a, b$  は板厚、開先、溶接条件等できまる常数であつて、たとえば板厚 12mm の隅肉溶接の場合の実験式<sup>7)</sup>として

$$H_{max} (V.P.N.) = 1,200 C_{eq} - 200$$

( $t=12$ mmの隅肉溶接)

が与えられている。また同じく厚さ 20mm の板の表面にビード溶接 (170A, 25V; 150mm/mn) したときの実験式<sup>8)</sup>として

$$H_{max} (V.P.N.) = 666 C_{eq} + 66$$

( $t=20$ mmのビード溶接)

が与えられている。

$C_{eq}$  としては、つぎの式がよく用いられている<sup>3)</sup>。

$$C_{eq} = C + 1/6Mn + 1/15Ni + 1/5Cr + 1/4Mo + (1/13Cu + 1/2P)$$

この式中の各元素は % 値で、Cu と P はそれぞれ 0.5% および 0.05% 以上のおきのみ考慮する。  $H_{max}$

の許容値としては国際溶接学会の溶接性委員会の結論では、350 (V.P.N.) 以下なるべきことが提唱され、各国でも認められているようである。わが国の研究 (板厚 20 mm) でも最高硬度が 350 を境にして溶接部の延性が急速に失われ、さらに溶接の際に母材が割れ易くなることが確認されている。なお  $H_{max}$  に対しては母材の組織も非常に影響するのであつて、溶接前の母材の球状化処理や焼入焼戻などは  $H_{max}$  の低下にいちじるしい効果がある。また、当然のことながら、溶接後の冷却速度によつても  $H_{max}$  は影響されるのであつて、種々の板厚 (したがつて冷却速度が異なる) の Si-Mn 系高張力鋼の表面に一定条件でビードをおいた場合に  $H_{max}$  が 350 および 250 となるとき  $C_{eq}$  を求めた結果はつぎのごとくである。

板厚(吋)	1/4	1/2	1	2
$H_{max} = 350$ の $C_{eq}$	0.60	0.50	0.45	0.40
$H_{max} = 250$ の $C_{eq}$	0.45	0.40	0.35	0.30

すなわち、同一成分、たとえば  $C_{eq} = 0.45$  の板でも 1/4" の板なら  $H_{max} = 250$ , 1" なら 350 となり、うすい板ほど  $H_{max}$  の低いことを示している。

つぎに、変質部亀裂の代表的なものとして、ビード下亀裂と止端亀裂 (toe crack) がある (Fig. 2)。前者の

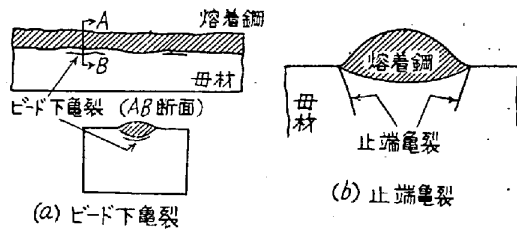


Fig. 2. ビード下亀裂と止端亀裂

原因としては変質部のマルテンサイト変態および水素による硬化部の脆化が実証されている。したがつてこれを防止するには変質部の硬化性を緩和してマルテンサイト変態を起さぬようにすることが根本である。一方、水素による脆化に対しては、低水素系溶接棒の使用が挙げられる。さてビード下亀裂に対する添加元素の影響としては、C, Mn が大きく、Si, Mo, Cr の影響は比較的少ない。  $C_{eq}$  で表わすとつぎのごとくなる。

$$C_{eq}(\text{ビード下割れ}) = C + 1/6Mn + 1/24Si + 1/29Mo + 1/14V + \text{Zero} \times Cr$$

止端亀裂も基点が変質部にあるから、ビード亀裂と同様の原因によるものと思われるが、そのほかに、ビードが冷却して収縮するさいの、ビードの表面形状の不連続部に生じた引張応力の集中も原因となろう。

2) 熔着鋼亀裂<sup>2)</sup>

熔着鋼に発生する亀裂は、その冷却にともなう収縮に起因する収縮亀裂の一種である。高温で鋼をいちじるしく脆化せしめる S, P がこの亀裂発生 of 有力な一因となることは勿論であるが、熔着鋼の脱酸にともなう脱酸生成物ないし非金属介在物あるいは析出ガス of 作用なども重要な影響を与えるものと推測されている。とくに、高張力鋼では各種の合金元素が母材からとけこんでくるがこれらの合金元素が熔着鋼亀裂 of 発生におよぼす影響を総合的かつ定量的に説明する理論はまだ提唱されていないようである。

3) 切欠脆性

鋼材 of 切欠脆性 of 比較には切欠きをつけた試験片 of 破壊までの吸収エネルギーがよく用いられる。この吸収エネルギーは Fig. 3 に示すごとく試験温度 of 低下にとも

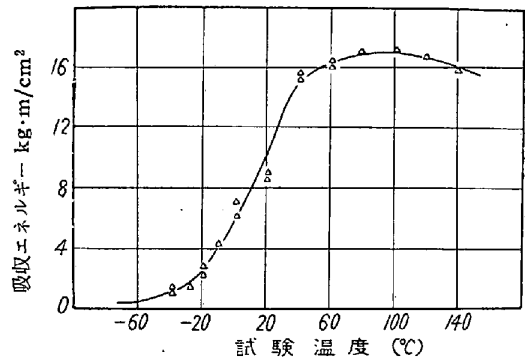


Fig. 3. 吸収エネルギー of 試験温度による変化

ない急激に減少する温度範囲があり、これよりも高温では延性破壊を、低温では靱性破壊を呈するので、この温度を破壊 of 遷移温度とよんでいる。鋼材としてはこの遷移温度が低いほど低温で安全であるから、切欠脆性 of 尺度としては遷移温度を用いることが多い。たとえば V ノッチシャルピー衝撃試験 of 吸収エネルギー遷移温度や、15ft-lb 遷移温度  $Tr_{15}$  がそれである。場合によつては 0°C of 吸収エネルギー of 値を尺度としてこれが高いほど切欠脆性がすぐれていると考えることもある。高張力鋼 of 切欠脆性におよぼす合金元素 of 影響をみるために Rinebolt らが研究した結果<sup>9)</sup>をまとめると Table 5 のごとくである。これらによると遷移温度を高める元素としては、C, P, N, Mo, V などがあり、逆に遷移温度を下げる元素としては、Mn, Ni, Al, Ti などがある。添加量が過度になるとかえつて逆効果を生じて望ましくない元素としては、Si (>0.6%), Al, Ti, Cu (>0.6%) などがある。ここで例により各元素 of 影響を一次加算的と仮定すれば、 $Tr_{15}$  に対する成分 of 影響は次式で与えられる。

Table 5. 合金成分1%増加に対する 15ft-lb 遷移温度の上昇

成分	15ft-lb 遷移温度の上昇 °C	範囲 %
C	147	0~0.4
Mn	-56	0.3~1.5
Si	0 74	0.1~0.6 0.6~1.8
P	560	0~0.2
S	0 111	0~0.05 0.05~0.15
Cu	0 39	0~0.6 0.6~2.0
Ni	-39 -17	0~0.4 0.4~3.0
Cr	0 111	0~0.5 0.5~1.0
Mo	195 -42?	0~0.18 0.18~0.30
V	334 -278	0~0.14 0.14~0.22
Ti	-44	0~0.4
Al	0	0~0.1
B	2780	0~0.0044

$$\begin{aligned} \text{Tr } 15(^{\circ}\text{C}) &= 147\text{C} - 56\text{Mn} + 560\text{P} - 39\text{Ni} + 195\text{Mo} \\ &+ \text{Zero} \times (\text{Si} + \text{S} + \text{Cu} + \text{Cr}) + \text{Const.} \\ &= 147 \text{Ceq} + \text{Const.} \end{aligned}$$

また Tr 15 に対する Ceq(Tr 15) は同様に次式で示される

$$\begin{aligned} \text{Ceq}(\text{Tr}15) &= \text{C} - 1/2 \cdot 6\text{Mn} + 3 \cdot 9\text{P} - 1/3 \cdot 7\text{Ni} \\ &+ 1/1 \cdot 5\text{Mo} + \text{Zero} \times (\text{Si} + \text{S} + \text{Cu} + \text{Cr}) \end{aligned}$$

ただし適用範囲は、

$$\text{C} < 0.4, \text{Mn} = 0.3 \sim 1.5, \text{Si} < 0.6, \text{P} < 0.2,$$

$$\text{S} < 0.05, \text{Cu} < 0.7, \text{Ni} < 3.0, \text{Cr} < 0.5, \text{Mo} > 0.3$$

化学成分の他に組織、結晶粒度も遷移温度に大きな影響を与える。すなわち、パーライトの層状が微細なほどよく<sup>10)</sup>、また低炭素高張力鋼を焼入焼戻すことによつて得られる焼戻マルテンサイトは特に優秀であつて、このマルテンサイトにベーナイト、パーライト、フェライト、が混じると靱性は低下する。大部分がフェライトで一部にパーライトを含む組織では、靱性はフェライト粒度に強く影響され、細粒化するほど遷移温度は低下する。したがつて圧延時の仕上温度は加工硬化を生じない範囲で

低いことが望ましい。また鋼板は焼準により一般にいちじるしく靱性が向上するが、その温度も 880~900°C 程度が最も好ましい。なお、厚板は圧延の際の冷却速度が小で、かつ圧下率も小さいから、うす板と比べて不利であるから板厚 25 mm 以上の高張力鋼の場合には切欠靱性の点で焼準するのが望ましい。また、遷移温度は製鋼法によつても異なり、脱酸が進むほどよく(したがつてキルド鋼が最もよい)、また鋼中の窒素その他のガス含有量あるいは不純物によつてもいちじるしい影響を受けることはもちろんである。最後に、軟鋼では変質部の切欠脆性は母材よりやや劣るだけであるが、硬化性の大きい高張力鋼では変質部の遷移温度が非常に上昇するおそれがある。したがつて、高張力鋼では母材のみならず変質部の切欠脆性にも十分注意をする必要がある。

## (2) 熔接性の試験法

鋼材の熔接性は、以上のように、多くの因子により決定されるものであるから、単一の試験だけで完全に評価することは不可能であり、数種の試験を併用して総合判定するのが普通である。各国で行つている代表的な試験法を列挙すると次のようである。詳細については文献を参照<sup>2)11)</sup>されたい。

### 1) 変質部の硬化性およびその切欠脆性試験法

#### a 硬度試験

国際熔接学会の方法に準じて、JIS Z3101-1956 が規定されている。

#### b T曲げ試験

#### c コマレル試験 (オーストリア試験)

#### d キンゼル試験

#### e リーハイビード曲げ試験

#### f 横ビード切欠曲げ試験

### 2) 亀裂試験法

#### a ビード下亀裂試験

#### b T型隅肉試験

#### c CTS試験

#### d リーハイ拘束亀裂試験

#### e 鉄研式亀裂試験

#### f FISCO試験

#### g クリップ試験

### 3) 母材の切欠脆性試験法

#### a シャルピー衝撃試験

#### b シェナット試験

#### c カーン引裂試験

#### d ティッパ試験

#### e ファン・デア・ビーン試験

- f ロバートソン試験
- g E S S O 試験(SOD試験)
- h 二重引張試験
- i ノーレン試験

その他、鋼板または溶接接手の強度を実際の構造物に近い状態で試験することを目的とした円筒形爆破試験も行われている。

V. 諸外国における現用鋼種

Table 6 に諸外国の現用高張力鋼の主要なるものを一括して表示する。一見して明らかなごとく、成分的には多種多様にわたっていて、C%を低くして Mn, Si, Ni, Cr, Cu, Mo, P, V, Ti などを一ないし数種比較的少量添加して、溶接性をそこなうことなく強度の増加をはかるべく工夫をこらしてある。つぎにこれらのうちで特色ある二、三の鋼種について若干の説明をこころみる。

(1) Cor-Ten 鋼, Mayari-R 鋼(含磷鋼)

既述のごとく、Pはいちじるしく降伏点を高め大気中の耐蝕性をも増すので、 $P=0.07\sim0.15\%$  添加の高張力鋼として米国の Cor-Ten や Mayari-R がある。ただし、Pは切欠脆性を劣化し、また偏析によるパーライトの帯状組織をいちじるしく生成せしめるので、溶接時に亀裂を生じ易くなる。したかつて、C%をそれだけ低く( $<0.12\%$ )する必要がある、また(C+P)としても $0.25\%$ 以下に抑えなければならぬ。また、これらの鋼はPの外にCuが含まれているから、大気中の耐蝕性はさらにいちじるしくすぐれている。

(2) Vanity 鋼

強度を増すために Mn を増加すると焼入硬化性がいちじるしくなつて溶接性が悪化するので、米国では Mn の一部をVで置換することが考えられた。さらにV節約のためにその一部を Ti で置き換えた Mn-V-Ti 系高張力鋼が生れた、Vや Ti は炭化物を安定化してオーステナイト中に固溶しにくくする。またこれらの微小不溶解炭化物は高温から冷却中の変態を促進する。したがつて見かけ上低炭素鋼のごとき挙動を示すから溶接時に硬化の程度が少なくなり溶接性が向上する。しかしながら、Vや Ti を過度に加えると切欠脆性や硬化性が却つて悪化することが明かにされているので、Mn-Ti 鋼では  $C<0.15\%$ ,  $0.005\%<Ti<0.025\%$ , Mn-V 鋼では  $C<0.15\%$ ,  $0.02\%<V<0.10\%$  が理想とされている。本鋼種は、米国では艦船用として使用されているが、比較的高価なことが欠点である。

(3) "Carilloy" T-1 鋼

U.S. Steel 社製のものであつて、焼入焼戻を行つて使用する本格的調質高張力鋼である。Cを $0.2\%$ 以下に抑えた低炭素合金鋼を焼入れて得られるマルテンサイトは切欠靱性が良好で遷移温度も低く、これを高温で焼戻せばこれらの性質がさらに向上することにもとずいて作られた鋼である。本鋼は Ni-Cr-Mo-V-B 系であり、C%を低く抑えてBなどの特殊元素を加えることにより焼入性を良好にしたものである。米国では、各種圧力容器に使用されつつあるが、わが国でも、最近、石川島重工業 K.K. が東京都豊洲に本鋼を使用した全溶接の球型高圧ガスホルダーを建設した。

(4) St 52 鋼

先に述べたように、ドイツにおける高張力鋼としては

Table 6. 諸外国の現用高張力鋼

成分系	鋼名	化学成分 (%)											機械的性質				試験板厚 mm	備考	
		C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Ti	その他	降伏点 kg/mm <sup>2</sup>	引張強σ <sub>B</sub> kg/mm <sup>2</sup>	伸び %			
Mn-V-Ti	米 VANITY (規定用分)	0.16 ~0.18	1.10 ~1.30	0.20 ~0.30	≤0.04	≤0.05	≤0.03	0.10 ~0.20	0.05	≤0.05	0.05	0.02	0.02Al	≥33	≤62	≥20	13~19	1/2"以上他種圧延のまま	
Cr-P-Cu-Si	米 COR-TEN	≤0.12	0.20 ~0.50	0.25 ~0.75	0.07 ~0.15	≤0.05	0.25 ~0.55	0.20 ~0.65	0.50 ~1.25	—	—	—	—	≥35	≥49	≥1050 /σ <sub>B</sub>	13	〃	
Cr-P-Cu-Ni	米 MAYARI-R	≤0.12	0.50 ~1.00	0.10 ~0.50	0.08 ~0.12	≤0.05	0.50 ~0.70	0.25 ~0.75	0.40 ~1.00	—	—	—	—	≥35	≥49	≥1050 /σ <sub>B</sub>	13	〃	
Mn-V	米 JALTEN#1	≤0.15	≤1.30	≤0.10	≤0.04	≤0.05	≤0.30	—	—	—	0.035 ~0.065	—	—	≥35	≥45	—	13	〃	
Cu-Ni-P	米 YOLOY-HS	≤0.15	≤0.75	≤0.30	0.05 ~0.10	≤0.05	0.75 ~1.25	1.5~2.0	—	—	—	—	—	≥35	≥49	≥22 (2")	13	〃	
Mn-Cr-Cu	英 BS 969	≤0.23	1.30 ~1.80	0.10 ~0.35	≤0.05	≤0.05	≤0.60	—	—	—	—	—	—	≥33	55~65	≥13 (3")	13~25	〃	
Mn-Mo-Ni	米 DUCOL-W-25	0.16 ~0.20	1.3 ~1.5	—	—	—	0.3~0.8	0.15 ~0.30	0.24 ~0.30	—	—	—	Ni 0.015 ~0.035	≥43	≥58	—	≤19	圧延 ~焼戻 圧延の まま 焼戻焼戻	
Mo-B	米 FORTIWELD	≤0.15	≤0.60	≤0.40	≤0.05	≤0.05	—	—	0.40 ~0.55	—	—	—	BO-0015 ~0.0035	≥46	≥58	≥20 (2")	≤38	〃	
Mn-Cr-Ni-Mo	米 Mn-Cr-Ni-Mo	0.14	1.14	0.30	0.06	0.027	—	0.25	0.66	—	—	—	—	44	59	R A=64	13~39	〃	
Mn-Mo-V-Cr	米 DUCOL-W-30	≤0.18	≤1.4	—	—	—	≤0.50	≤0.50	≤0.60	≤0.25	≤0.10	—	—	≥47	≥60	—	≤25	〃	
Mn-Si	米 ST-52	≤0.20	≤1.20	≤0.60	≤0.08	≤0.06	—	—	—	—	—	—	P+S ≤0.10	≥35	52~62	≥19	16~20	〃	
Mn-Si-Mo	米 ST-52Mo	≤0.20	1.00	0.40	≤0.06	≤0.03	—	—	—	0.20	—	—	—	≥35	52~62	≥18(13")	—	〃	
Mn-Si-(Al)	米 HSB-50	≤0.20	0.95	0.45	≤0.03	≤0.03	—	—	—	—	—	—	Al 0.01	≥36	50~60	≥20	—	特殊圧延	
Ni-Cu-Mo(Al)	米 HSB-55	≤0.20	0.95	0.45	≤0.05	≤0.05	0.90	0.80	—	0.18	—	—	—	≥46	55~65	≥20	—	〃	
Mn-Si	米 ST-52T	≤0.20	≤1.30	≤0.60	≤0.06	≤0.06	—	—	—	—	—	—	—	≥33	52~64	≥22(2")	—	〃	
Mn-Si-Cu	米 ALPUR-58	0.20	1.40	0.45	≤0.04	≤0.04	0.35	—	—	—	—	—	—	≥40	58~69	≥22(2")	—	〃	
Cr-Cu	米 AC-54	0.20	0.60	0.30	—	—	0.45	—	0.45	—	—	—	—	≥36	54~64	≥22	—	〃	
Ni-Cr-Cu-Mn-Si	伊 104	0.14 ~0.17	0.60 ~1.00	0.50 ~0.80	—	—	0.40 ~0.70	0.80 ~1.00	0.60 ~1.00	—	—	—	—	—	—	60~60	—	—	焼 戻
Mi-Mo-V-B	米 Corilloy T-1	≤0.18	0.70 ~1.10	0.15 ~0.25	—	—	0.20 ~0.40	0.70 ~1.0	—	0.35 ~0.50	0.03 ~0.03	—	B少量	≥70	≥60	≥18(2")	6~50	焼入焼戻	
米		0.14 ~0.22	0.61 ~0.77	0.39 ~0.48	0.028 ~0.039	0.02 ~0.03	0.59 ~0.67	0.42 ~0.68	0.28 ~0.44	—	—	—	—	35~47	—	17~24	—	〃	

代表的なものであつて、古く 1930 年に規格として定められ、その後 Table 1 に示したように幾多の改良を加えられて現在にいたっている。成分的には Si-Mn 系であつて、1kg/t 程度の Al を添加して細粒鋼としている。

(5) HSB鋼

成分的には St 52鋼と同様な Si-Mn 系であつて引張り強さもほぼ同等であるが、降伏点がかかなり高くなつている。すなわち降伏比が高い。Al による脱酸に留意して熔鋼中に適量の Al を含有せしめ、Al の窒化物(AlN)の析出を利用したものである。そのためには、圧延温度を 1,000°C 以下に抑え、AlN の析出と圧延とを同時に行はしめて、きわめて微細な窒化物を析出させることが必要である。1000°C 以上では AlN はオーステナイト中に再溶解してしまうから、Al 添加の効果は失はれる。このような機構で降伏点を高めてあるから、熔接性を害うことはないわけである。圧延温度が制限されることが実際に生産する上にかんがりの困難を伴うであろう。Table 7 は現用されている HSB 鋼の種類を示すもので、HSB50 以下のものは一般構造用に用いるが、HSB55 はもつぱらボイラー用に使用され、Cu, Ni, Mo などが加わつている。Cu は、析出硬化による降伏点の増加を狙つたのであり、Ni は、Cu 添加による赤熱脆性を防ぐためである。Mo はさらに材質を改善するためである。

(6) Fortiweld 鋼

英国で研究使用されている Mo-B 系高張力鋼である。Mo 0.5% 程度の低炭素 Mo 鋼を B 処理することによつて引張り強さ、降伏点をいちじるしく高めたもので、板厚 1 1/2" までは降伏点 42 kg/mm<sup>2</sup> 程度で、しかも熔接性は軟鋼と同程度に優秀であるといわれている。ただし熱間加工温度から徐冷した場合は B 処理の効果が失

らびに主要メーカの高張力鋼に関する社内規格の要点を記す。

なお、高張力鋼の JIS 規格は、数年前から審議の対象にはなつていないが、諸種の事情でまだ制定されていない実状である。

- (1) 艦船用圧延高張力鋼材暫定規格 (防衛庁, 1957. 11. 16. 制定)

- 1) 種類  
Table 8 参照.

2) 化学成分

C	Si	Mn	P	S
≤0.16	≤0.55	≤1.35	≤0.040	≤0.040

- 3) 引張り試験および曲げ試験  
Table 9 参照

- 4) シャルピー衝撃試験  
Table 10 参照

- 5) 熔接部最高カタサ試験

記号	厚さ mm	最高カタサ (Hv 荷重 10kg)
NS30C	≥16	≤350

- (注) 1. 厚さ 16mm 以上の鋼板について行う。  
2. 次式に示す Ceq が 0.38 以下の場合には、この試験を省略して差支えない。  
Ceq = C% + Mn/6% + Si/24%

- (2) 車輛用高張力鋼規格 (日本鉄道車輛工業会, 1953 制定)

- 1) 化学成分 (%) Table 11. 参照.
- 2) 機械的性質  
Table 12 参照.

以上の二つの規格の制定された経緯については、X 項

Table 7. HSB 鋼の種類

	C% Max	Si %	Mn %	Cu %	Ni %	Mo %	T.S. kg/mm <sup>2</sup>	Y.P. kg/mm <sup>2</sup>			Elong % L = 5 d	Impact value at 0°C (DVM) kg-m/Cm <sup>2</sup> .
								t < 16	16~40	> 40		
HSB40	<0.18	0.25	0.55	—	—	—	40~50	29	28	27	28~24	9
HSB45	<0.18	0.35	0.75	—	—	—	45~55	32	31	30	26~22	8
HSB50	<0.20	0.45	0.95	—	—	—	50~60	36	35	34	24~20	7
HSB55	<0.20	0.45	0.95	0.90	0.80	0.18	55~68	46	45	44	22~17	7

われるから、厚板などの圧延では、焼準程度の人工的急冷が必要であろう。

VI. わが国における現用鋼種

以下に、わが国で現用されている高張力鋼の規格、な

Table 8. 種類 (防衛庁規格)

記号	摘要
NS 30 B	厚さ 6 mm 以上 13 mm 未満の鋼板および形鋼
NS 30 C	厚さ 13 mm 以上 20 mm 以下の鋼板および形鋼



Table 9. 引張り試験および曲げ試験 (防衛庁規格)

記 号	引 張 試 験				曲 げ 試 験		
	引張り強さ kg/mm <sup>2</sup>	降 伏 点 kg/mm <sup>2</sup>	伸 び %	試験片番号	曲げ角度	内側半径	試 験 片
NS30B NS30C	46~58 45~56	31以上 30以上	20以上 20以上	1号	180°	厚サの1.0倍 厚サの1.5倍	1号

Table 10. シャルピー試験 (防衛庁規格)

記 号	厚さ mm	試験温度	シャルピー衝撃試験値 kg-m/cm <sup>2</sup>	試験片
NS30C	13以上16未満	0°C	3.5 以上	4号
	16以上		6.0 以上	

(注) 厚さ 13mm 以上の鋼板について行なう。

Table 11. 化 学 成 分 (車両規格)

種 別	記 号	C	Si	Mn	P	S	Cu	用 途 例
第一種	SHT 1	0.18以下	0.5以下	1.30以下	0.040以下	0.040以下	0.20以上	深絞り用 一般用
第二種	SHT 2	"	0.7以下	1.40以下	"	"	"	

(注) Cu の含有量については製造者と使用者がその都度打合せる。

Table 12. 機 械 的 性 質 (車両規格)

記 号	降伏点 kg/mm <sup>2</sup>	引張強さ kg/mm <sup>2</sup>	伸 び %	曲 げ 角 度	内 側 半 径
SHT 1	32 以 上	49~57	20以上	180°	$r=0.5t$
SHT 2	36 以 上	55~65	18以上	180°	$r=1.5t$

(注) 1. 曲げ試験の  $t$  は試験片の径, 対辺距離, または厚さとする。  
2. 降伏点は引張り強サの 65% 以上を目標とする。

で述べる。

(3) 主要メーカーの社内規格

わが国主要メーカーの社内規格(抜萃)を Table 13 に示す。

以上のごとく, わが国現用の規格化された高張力鋼はほとんどすべて Si-Mn 系であつて, しかも圧延のまま使用するものがこれまたほとんど全部である。その理由としては, 安価でしかも普通鋼同様に手軽に使用できるということのためであつて, 高張力鋼そのものが未だ一般に普及期にあるからであろう。しかし, Welcon 2H 鋼のごとく, 熱処理によつて性能を十二分に発揮せしめて使用するものも次第に現われてくるものと思はれる。

## VII. 使 用 法

(1) 設計上考慮すべき点

高張力鋼を使用する場合でも設計に対する基本的な考え方は普通鋼の場合と何等変らないが, 高張力鋼の特性を十分に生かし軽量化の実を挙げるためには, 在来の観

念にとらわれずに新しい考え方をもたねばならぬ点もある。たとえば, 挫屈と撓みの点において若干問題が生じてくる。

1) 挫屈

挫屈に対しては各方面から種種の理論式あるいは実験式が提示されているが, まだ明確な最終的結論は出されていないようである。しかしながら, 従来の観念でゆけば(たとえばオイラーの公式を使うと), 高張力鋼の弾性率 ( $E$ ) は普通鋼のそれと変わらないから長柱の挫屈に対する許容応力を考える場合には,  $L/r$  が大きいとき(たとえば 100以上)には, 柱の断面積を減ずるわけにゆかず, 普通鋼を使用した場合と同じになり, 鋼材の重量を減ずる妙味はないことになる。ところが, American Society of Civil Engineers では, 1923 年以来, Special Committee on Steel Column Research を設置して, 現寸の材料について挫屈の徹底的研究を行った結果, 1954 年にいたり Secant 式といわれる次のような実験式を導き出した<sup>1)2)</sup>。

Table 13. わが国主要メーカーの高張力鋼社内規格 (抜萃)

製品名	製造所	化学成分%						機械的性質			備考
		C	Si	Mn	P	S	Cu	引張強さ kg/mm <sup>2</sup>	降伏点 kg/mm <sup>2</sup>	伸び %	
WEL-TEN50	八幡製鉄	≤0.18	0.25 ~0.45	0.90 ~1.20	≤0.045	≤0.045	—	50~58	≥33	≥20 ≥21 ≥22	t ≤ 10mm 10 < t ≤ 20mm 20 < t ≤ 30mm
WEL-TEN55		≤0.18	0.35 ~0.55	1.20 ~1.50	≤0.045	≤0.045	—	55~63	≥36	≥18 ≥19 ≥20	同上
FHT 50	富士製鉄 (FUJI-HITEN)	≤0.18	0.20 ~0.40	0.90 ~1.20	≤0.045	≤0.045	—	50~58	≥32.5	≥20 ≥21 ≥22	t ≤ 10mm 10 < t ≤ 20mm 20 < t ≤ 30mm
FHT 55		≤0.18	0.30 ~0.50	1.20 ~1.50	≤0.045	≤0.045	—	55~63	≥35.5	≥18 ≥19 ≥20	同上
FTW 50		≤0.18	≤0.40	0.70 ~1.20	≤0.030	≤0.040	—	50~58	≥33	≥27 ≥23 ≥24	同上
FTW 55		≤0.18	≤0.50	0.80 ~1.40	≤0.030	≤0.040	—	55~63	≥36	≥20 ≥21 ≥22	同上
FTW 60		≤0.24	≤0.60	1.00 ~1.60	≤0.030	≤0.040	—	60~70	≥33	≥18	t ≥ 30mm
HS-1	日本鋼管 (NK-HITEN)	≤0.18	0.30 ~0.60	1.00 ~1.30	≤0.040	≤0.040	—	52~60	≥33	≥20	曲げ 180° (r=1.5t) t) 圧延のまま
HS-2		≤0.20	0.30 ~0.60	1.20 ~1.50	≤0.040	≤0.040	—	55~63	≥34	≥20	" "
HS-3		≤0.25	0.30 ~0.60	1.30~ 1.60	≤0.040	≤0.040	—	62~70	≥37	≥18	" "
HS-1A		≤0.18	0.30 ~0.60	1.00 ~1.30	≤0.040	≤0.040	—	≥45	≥32	≥20	" 薄鋼板 焼鈍状態
HS-2A		≤0.20	0.30 ~0.60	1.20 ~1.50	≤0.040	≤0.040	—	≥50	≥34	≥20	" "
HTP47W	川崎製鉄	≤0.16	0.20 ~0.40	0.70 ~1.20	≤0.030	≤0.030	≤0.30	≥47	≥30	≥21	曲げ180° (r=1.0t)
HTP52W		≤0.18	0.30 ~0.50	0.80 ~1.40	≤0.030	≤0.030	≤0.30	≥52	≥33	≥20	GL=200mm "
HTP57W		≤0.18	0.40 ~0.60	0.90 ~1.60	≤0.030	≤0.030	≤0.30	≥57	≥36	≥19	"
SHIS49	三菱製鋼 (HER-TEN)	(0.10~ 0.15)	(0.15 ~0.45)	(0.60 ~1.00)	≤0.022	≤0.015	≤0.40	49~57	≤32	≥22	t ≥ 3.2mm 圧延のまま
SHIS54		(0.12~ 0.17)	(0.35 ~0.60)	(0.80 ~1.10)	≤0.022	≤0.015	≤0.40	54~62	≥35	≥20	t = 3.2~20mm "
SHIS60		(0.15~ 0.21)	(0.50 ~0.80)	(0.95 ~1.25)	—	—	—	60~70	≥38	≥17	t = 3.2~16mm
SHIS65		(0.18~ 0.23)	(0.65 ~0.95)	(1.05 ~1.30)	—	—	—	65~75	≥40	≥15	t = 3.2~10mm
SHIS70		—	—	—	—	—	—	≥70	≥42	≥12	t = 3.2~10mm
HS-A	東都製鋼 (HI-STREN)	≤0.18	0.35 ~0.60	1.10 ~1.40	≤0.045	≤0.045	≥0.20	55~65	≥36	≥18	圧延のまま
HS-B		≤0.26	≤0.60	1.10 ~1.40	≤0.045	≤0.045	≥0.20	60~70	≤38	≥17	"

Cu 1	大同製鋼	≤0.15	0.40 ~0.60	1.40 1.60	≤0.035	≤0.035	0.20 ~0.40	≥55	>36	≥18	
Cu 2		0.13 ~0.18	0.40 ~0.60	1.40 ~1.60	≤0.035	≤0.035	0.20 ~0.40	≥55	>36	≥18	
Cu 3		0.24 ~0.28	0.40 ~0.60	1.40 ~1.60	≤0.035	≤0.035	0.20 ~0.40	≥67	≤42	≥12	
Welcon 5M	日本製鋼	≤0.18	≤0.55	≤1.30	≤0.045	≤0.045	—	≥52 ≥50	≤35 ≥33	≥20 ≥21	t = 4.5~18 mm t = 18~38 mm 圧延のまま
Welcon 2H		≤0.18	≤0.55	≤1.35	≤0.040	≤0.050	—	58~68	≤46	≥16 (L=200)	曲げ180°(r=1.5) シャルピー値>60 (0°C)焼入焼戻

$$\frac{P'}{A} = \frac{\sigma \text{ Y.P.}}{1 + \frac{eC}{r^2} \sec \left[ \sqrt{\frac{P'}{AE}} \left( \frac{L'}{2r} \right) \right]}$$

ここに、 $\sigma \text{ Y.P.}$  = 降伏点 psi

$P'$  = 最大荷重 lb

$A$  = 断面積 in<sup>2</sup>

$L'$  = 有効挫屈長さ in

$E$  = 弾性係数 29,000,000 psi

$e$  = 荷重の偏心 in

$C$  = 中立軸より曲げの内側最外縁までの距離 in

$r$  = 回転半径 in

この式をさらに変形して、安全率、使用鋼材の降伏点を代入し、種類の降伏点を有する鋼材の  $L/r$  に対する許容挫屈強度を求めてある。Fig. 4 はこの式を利用して圧縮部材に高張力鋼を使用した場合の鋼材節約量を、降伏点 33,000 psi (23 kg/mm<sup>2</sup>) の普通鋼を基準として示したものである。この考え方によれば、図から明かなごとく、 $L/r$  が相当に大きいときにも、降伏点の高い材料、すなわち高張力鋼が有利なことがわかる。

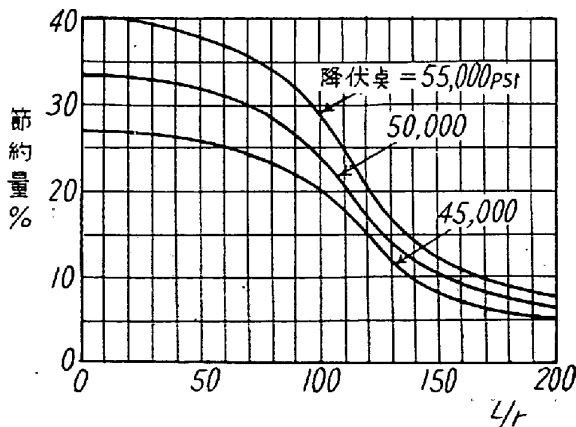


Fig. 4. 高張力鋼使用による柱断面積の節約量

2) 撓み

一般に軸方向の荷重を受けている部材の変形量を表はす式は

$$\delta = \frac{PL}{AE} \quad \text{である。}$$

ここに、 $P$  = 荷重、 $L$  = 部材の長さ、 $A$  = 断面積、 $E$  = 弾性係数

前述のごとく、高張力鋼の ( $E$ ) は、普通鋼のそれと同じであるために、断面積 ( $A$ ) が小さくなると上式から明かなように変形量 ( $\delta$ ) は増加する。しかし一般にその値はきわめてわずかであるが、特に変形量が重要な場合には設計上その形状を変更することにより変形量の増加を防止すべきである。例を梁にとると、梁の撓み量 ( $\delta$ ) は次式で示される。

$$\delta = C \frac{SL^2}{EH}$$

ここに、 $C$  = 常数、 $S$  = 曲げにおける単位応力、 $E$  = 弾性係数、 $L$  = スパンの長さ、 $H$  = 梁の高さ

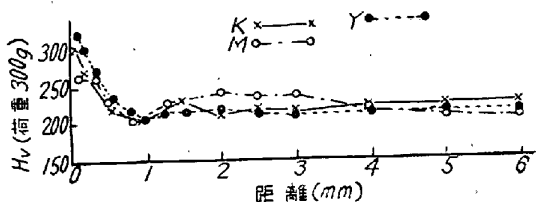
したがって、梁の高さ ( $H$ ) を増加して撓み量 ( $\delta$ ) を減少すべきである。あるいはまた荷重の分布状態や、スパンの長さ、支持状況を変更することによっても撓み量を減少することが可能である。

(2) 工作法<sup>1)2)11)13-17)</sup>

すでに述べたように現在わが国で普通に製造市販されている高張力鋼はほとんど Si-Mn 系のものであつて熱処理せずに熱間圧延したままで使用され、その引張り強さも 50~60 kg/mm<sup>2</sup> 程度のものである。したがって、ここでは主として斯様な高張力鋼について、一般に推奨されている工作法の具体例に関して概略を述べることにする。

1) ガス切断

板厚 12~22 mm のものに対して、口径 0.82~1.52 mm の吹管を用い、切断速度 3.2~4.5 mm/s でガス切断を行った場合の熱影響部はおおむね端面より 1~1.5 mm 程度であつて、この場合の組織もベイナイトが見られるにすぎず、最高硬度も Hv = 250~300 どまりであつて、熱に対しては案外不感受性である。(Fig. 5)



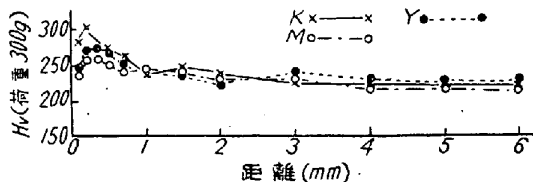
K: K社製鋼板 } 22mm厚  
 M: M社製鋼板 }  
 Y: Y社製鋼板 }

Fig. 5. ガス切断の影響

ガス切断作業は軟鋼に対する場合と全く同様で差支えない。ガス切断した縁はそのまま溶接して構はないが、それがフリーエッジである場合には自動ガス切断器で切るか、または同程度の平滑さでなければならない。切断面の凹凸が大きいと切欠靱性がいちじるしく劣るからである。

2) 剪断

この場合には、端面に迂り変形による加工硬化が見られ、その影響深度は端面から 1~1.5mm 位である。(Fig. 6) したがって剪断縁はやや脆化の傾向があるからこれを曲げ加工する場合などでは適当に仕上げる必要がある。



K: K社製鋼板 } 22mm厚  
 M: M社製鋼板 }  
 Y: Y社製鋼板 }

Fig. 6. 剪断の影響

3) 穿孔

ドリルで普通に穿孔した場合、高張力鋼母材にはほとんど加工硬化あるいは脆化の影響が認められない。ドリルは高速度鋼 2種でよいが、やや寿命が短いから、4種を用い、外周速度 21m/mn (乾切削), 送り 0.25~0.3 mm/rev. 程度がよいようである。冷却水は、重ね揉みのような特に深い孔をあける場合以外は使用しなくとも差支えない。

4) 切削

高速度鋼 2種のバイトでは切削はやや困難である。特にガス切断によつて硬化した部分はバイトの摩耗が非常に速い。したがって、バイトは高速度鋼 4種を用い、切削速度 21m/mn (乾切削), 切込み深さ 0.3~0.5mm 位が適当である。

5) 熱間加工

熱間加工性はきわめて良好であつて軟鋼と同様に取扱つて差支えないが、強いていえば、加工温度は 650~850°C が最適である。また、200~450°C はいわゆる青熱脆性の範囲であるから、この温度範囲での加工はさげなければならない。加工のあとは、空冷するのが最良の結果をうるが、場合によつては、ホースで水冷を行つても差支えない。なお、歪取りのためには、700°C 程度に加熱し、あと強制空冷することが望ましいといわれている。

2H 鋼のごとく調質した高張力鋼の場合には、それが焼戻された温度以上、すなわち一般に 600°C 程度以上の加熱は絶対にさげなければならぬ。切角の調質効果を失うからである。このことは、溶接後の後熱や冷間加工後の焼鈍に際してもいえることである。

6) 冷間加工

高張力鋼は普通鋼より降伏点が高いから永久変形を生ぜしめるには普通鋼の場合より余分のエネルギーを要することは当然であるが、高張力鋼使用によつて鋼材の断面が縮小されているから、全体の仕事量としては普通鋼の場合より大きくなることは余りないはずである。いわゆる冷間加工性も良好であつてほとんど普通鋼と同様である。曲げ加工で内側半径が厚さの 1.5 倍以上ならば常温加工をおこなつてよい。ただし、高張力鋼は降伏点が高いので安全を見て若干余裕をとつておく方がよく、たとえば、米国の例<sup>19)</sup>では Table 14 のような値を推奨している。なお、形鋼は一般に熱間圧延後冷間で矯正作業をおこなうが、そのための加工歪により切欠靱性が低下することが考えられるが、実験の結果に<sup>35)</sup>よれば、Vノッチシャルピー衝撃値 (0°C) で平均 0.5 kg/mm<sup>2</sup> 低下する程度である。

Table 14. 板厚と曲げ半径<sup>19)</sup> t = 板厚

板 厚 in	内側曲げ半径最小値	
	COR-TEN 鋼	MAN-TEN 鋼
1/16 以下	1 t	2 t
1/16超1/8以下	2 t	2 t
1/8超1/4以下	2 t	2 1/2 t
1/4超1/2以下	3 t	3 1/2 t
1/2 超	熱間加工が好ましい	

7) 銲接

銲の材質と銲接すべき母材の材質との関係は Table 15のごとくに組合せるのが適当である。ドイツ規格によれば高張力鋼 St 52 に対しては銲材として St 34 (引張り強さ 34 kg/mm<sup>2</sup> 以上) または St 44 (引張り強さ 44 kg/mm<sup>2</sup> 以上) が適当である。

mm<sup>2</sup> 以上) を使用することになっているが、一般には後者が多く使はれている由である。

Table 15. 鋸 の 材 質

母材の材質	鋸の材質	備 考
(軟鋼)+(軟鋼)	軟鋼	—
(軟鋼)+(高張力鋼)	軟鋼	ただし、鋸に大なる荷重の加わる所は、高張力鋼の鋸を使うことあり。
(高張力鋼)+(高張力鋼)	高張力鋼	ただし、鋸に加わる荷重の小なる場合には軟鋼の鋸を使うことあり。

なお、鋸焼温度としては Table 16 によるのが適当であるとされている。特に焼け過ぎのないように留意する必要がある。

Table 16. 鋸 焼 温 度

鋸の材質	鋸焼温度 °C	焼け色 (室外)
軟 鋼	1,000~1,200	黄 色
高張力鋼	900~1,100	橙 色

## 8) 熔接

## A. 熔接棒

まづ使用すべき熔接棒の基準は Table 17 のごとくである。高張力鋼用熔接棒としては低水素系のものが好

Table 17. 熔接棒の基準

母材の材質	棒の種類	備 考
(高張力鋼)+(高張力鋼)	高張力鋼用棒	ただし、場所によっては、軟鋼用棒で差支えないこともある
(高張力鋼)+(軟鋼)	軟鋼用棒	

ましい。この棒は、水素、酸素、窒素、などのガス含有量が少ないから熔接性がきわめて良好である。しかし、被覆中に多量の石灰、螢石を含んでいるので他系の棒に比較して操作が困難である。すなわち、作業性が悪いのであつて、その欠点をあげればつぎの通りである。

- (イ) ビード始端に気孔が発生し易い。
- (ロ) 竖向、上向熔接が困難である。
- (ハ) スラッグの除去が余り容易でない。
- (ニ) 電弧が切れ易い。
- (ホ) 弗素系の有毒ガスを発する恐れあり。
- (ヘ) ビードの形が凸型になり易い。

しかし、最近各メーカーが研究を進め、これらの弱

点もかなり解消されつつあるかにみえる。なお、各熔接姿勢に無難に用いられるのは 4mmφ の棒であつて、5mmφ の棒は竖向、上向には使用困難な傾向がある。また低水素系熔接棒はその使用上、特に湿気を嫌うことに注意を要する。湿気は水素発生の原因となるからである。使用前に約 300°C で 1 時間位乾燥すれば充分である。市販の低水素系熔接棒としては、LB55, FL55, HT052 (以上 50~60kg/mm<sup>2</sup> 高張力鋼用) などという商品名のものが防衛庁の試験に合格して推奨されている。また 60kg/mm<sup>2</sup> 以上の高張力鋼用としては、LB60, NL60, FL60, LB62(2H鋼用), LB116 (T-1鋼用) などがある。

## B. 予熱および後熱

一般には 50kg/mm<sup>2</sup> 台の Si-Mn 高張力鋼では、予熱、後熱の必要はないことが多いが、変質部の最高硬度が 300 (V.P.N) を超すような場合には行なつた方がよい。Table 18 はこれらの処理の一つの目安を示すものである。また、予熱、後熱は重油かガスのバーナーでおこなうのが普通である。

Table 18. 予熱後熱の基準

変質部の最高カタサ (V.P.N)	予 熱	後 熱
200 以下	不 要	不 要
200~250	行わなくともよい	なるべく行う
250~325	150°C 以上	650°C で応力除去
325 以上	250°C 以上	直後に 650°C に加熱または完全焼鈍

## C. 仮止め熔接およびアークストライク

本熔接に先立つて仮止め熔接をすることは必ずといつてよいくらい実際作業でおこなわれるが、高張力鋼の場合には注意を要する。すなわち、仮止め熔接はその目的から必然的に短いビードとなるため、急激な加熱冷却を受けその変質部は極めて高い最高硬度を示し、往々にして亀裂が発生しているのを気付かぬことなどがあるからである。試験結果の一例によればビードの最小長さを 35mm 程度に止めることが妥当であるといわれている。(ただし、板厚 20mm, 電流 170A, 熔接速度 150mm/mn) また、アークストライクが脆性破壊に対してきわめて危険であることも第 2 次大戦中事故を起した米国リパティ船の例で明らかである。これに対する事後処理法もいろいろ研究されているが、現在のところ、後熱することが最良の方法と考えられている。(以下次号につづく)