第４章　新鋼材の適用性

4．新鋼材の適用性

4．1　1000N級高張力鋼の水圧鉄管への適用

本節では、高強度材の厚板溶接継手の適用事例として，水圧鉄管分野での高張力鋼の適用法を調査した。水圧鉄管への高張力鋼材の適用への技術指針は，(社)水門鉄管協会「950N/mm^{2}級高張力鋼材(HT100)の水圧鉄管適用への技術指針」[4.1.1)]にて制定されており，その内容を要約した。

（1）HT100適用の狙い

水圧鉄管では近年，大落差化・大口径化が進む一方，コストダウンの観点からは板厚低減・据付ブロック大型化などによる工期短縮が期待されている。このようなニーズより，水圧鉄管では950N/mm^{2}級高張力鋼材(以後，HT100)の適用が進められている。

（2）HT100の仕様

1）基本仕様

①許容応力

許容応力σaは，次式のうちのどちらか小さい方の値で決定されている。

$\sigma a = \sigma_Y / Sf_Y$

$\sigma a = \sigma_B / Sf_B$

ここで，σ_Y：降伏点(または0.2%耐力)

σ_B：引張強さ

Sf_Y：降伏点(または0.2%耐力)に対する安全率で1.8

Sf_B：引張強さに対する安全率で2.35

HT100の許容応力は表-4.1.1に示すとおりとなり，SM400やSHY685NS-Fといった従来材料と比較して，降伏点に対する安全率は同等以上に確保出来ていることが確認されている。

表-4.1.1　降伏点，引張強さ，許容応力と安全率

鋼種	σ_Y [MPa]	σ_B [MPa]	σa[MPa]	降伏点に対する安全率
SM400	２３５	４００	１３０	１．８０
SHY685NS-F	６８５	７８０	３３０	２．０８
HT100	８８５	９５０	４００	２．２１

②靭性

靭性については，以下の２点が規定されている。

・母材は0℃で脆性き裂の伝播を停止すること

・溶接部は0℃で脆性破壊が発生しないこと

母材については，WES3003(1995)「低温用圧延鋼板判定基準」のA種(脆性破壊が特に問題となる特殊な溶接構造物)に拠っている。溶接部については母材と同等の性能を確保すること

が困難なため，水圧鉄管の最低使用温度である0℃で脆性破壊が発生しないものとし，万一発生したき裂は母材で伝播を止める思想となっている。

③欠陥

欠陥については，所要の引張強度と靭性を確保する観点から，以下が規定されている。

「母材，溶接部とも有害な欠陥がないこと」

2）化学成分

HT100の化学成分は，鋼板母材及び溶接部の強度要求性能，溶接施工条件を勘案して設計することとされており，表-4.1.2の化学成分が規定されている。一方，鋼板及び溶接部が必要な性能を有していることが確認できれば，これに拠らなくとも良いことになっている。化学成分のうちP，Sについては最近の製鋼技術の進歩で低く抑えることが可能であることを勘案し，上限値が決定されている。

表-4.1.2　鋼板の化学成分　(%)

板厚 t　(mm)	C	P	S	Ceq	P_{CM}
t≦50	≦0.14	≦0.010	≦0.005	≦0.59	≦0.29
50＜ t ≦ 100				≦0.62	≦0.33
100＜ t ≦ 200				≦0.71	≦0.36

Ceq：C＋Mn/6＋Si/24＋Ni/40＋Cr/5＋Mo/4＋V/14　(%)

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

3）機械的性質

①引張強度

引張強度に対する要求性能を表-4.1.3に示す。引張性能については，WES3001(1996)「溶接用高張力鋼板」HW885に基づき，0.2%耐力と引張り強さ，伸びが規定されているが，100mmを超える板厚の場合には，良好な溶接性と靭性を確保する観点から前述の規格値より20MPa下げた強度要求値が採用されている。

表-4.1.3　鋼板の機械的性質

	t ≦ 50	50＜t≦75	75＜t≦100	100＜t≦200
0.2%耐力 (MPa)	≧885		≧865	
引張強さ (MPa)	950～1,130			930～1,110
伸び　(%)	≧12			
厚さ方向の絞り値(%)*	≧25			
破面遷移温度(vTrs)	-55℃以下	-60℃以下		
吸収エネルギー(vE_T)	T＝-55℃	T＝-60℃		
	47J以上			

＊ 厚さ方向に作用する応力によるラメラテアの発生を防止する必要がある構造部材(例えば分岐管補強桁)に使用する場合，鋼材の厚さ方向の絞り値を規定する。

②衝撃性能

表-4.1.3に示す破面遷移温度は，許容応力を表-4.1.1，最低使用温度を0℃として決定されたものである。

要求破面遷移温度vTrs(℃)は，板厚t(mm)，許容応力σ(MPa)，最低使用温度T(℃)によって異なるものであり，これら条件が異なる場合は下式で算出可能である。板厚100mmを超える場合の板厚効果係数f(t)は，板厚の影響が100mmで飽和すると考えられることから100mmのf(t)と同じ値を用いている点が注目される。

-58℃≦vTrs≦-18℃の時

$$1.02\sigma = (260 + 2.75\,{}_{P}T_{C}) \cdot f(t) \cdot \exp[(3100 + 22.5\,{}_{P}T_{C})\{1/({}_{P}T_{C} + 273) - 1/(T + 273)\}]$$

vTrs≦-58℃の時

$$1.02\sigma = 150 \cdot f(t) \cdot \exp[(2680 + 12\,{}_{P}T_{C})\{1/({}_{P}T_{C} + 273) - 1/(T + 273)\}]$$

ただし，

$f(t) = 1 - 0.05(t-30)$	:	t≦35mm
$f(t) = 54/65 - 3t/1300$	:	35mm≦ t ≦ 100mm
$f(t) = 54/65 - 3*100/1300$	:	100mm＜ t
${}_{P}T_{C} = 18 + vTrs$	:	-58℃≦vTrs
${}_{P}T_{C} = 25.5 + 1.13vTrs$	:	-196℃≦vTrs≦-58℃

要求破面遷移温度：vTrs(℃)

板厚　　：t(mm)

許容応力　　：σ(MPa)

最低使用温度　　：T(℃)　　(水圧鉄管では0℃)

4）溶接継手部の機械的性質

①引張強度

溶接継手部は，原則として母材と同等以上の引張強さを有することを要求している。表-4.1.4に溶接継手の機械的性質の要求値を示す。

表-4.1.4　溶接継手部の機械的性質

板厚　t(mm)	T ≦　100	100＜ t ≦200
引張強さ　(MPa)	950以上	930以上
破面遷移温度 vTrs	-10℃以下	-15℃以下
吸収エネルギー　vE_T	T=-10℃	T=-15℃
	47J以上	

②靭性

溶接部の要求靭性値については，以下の2つの規格の考え方の何れかに準拠して評価するものとなっている。表-4.1.4に示す値はWES3003に準拠して算出したものである。

WES3003(1995)　低温構造用鋼板判定基準

WES2805(1997)　溶接継手の脆性破壊発生及び疲労き裂進展に対する欠陥の評価方法

要求破面遷移温度vTrs(℃)は，板厚t(mm)，許容応力σ(MPa)，最低使用温度T(℃)によって異なるものであり，以下の式で算出できる。板厚100mmを超える場合の板厚効果係数f(t)は，母材と同様に板厚の影響が100mmで飽和すると考えて，100mmのf(t)と同じ値を用いている。

-18℃≦vTrs

$0.322\sigma = 260 \cdot f(t) \cdot \exp[3100\{1/({}_{P}T_{C}+273)-1/(T+273)\}]$

ただし，

$f(t)=1-0.05(t-30)$	:	$t \leqq 35mm$
$f(t)=54/65-3t/1300$	:	$35mm \leqq t \leqq 100mm$
$f(t)=54/65-3*100/1300$	:	$100mm < t$
${}_{P}T_{C} = 18+vTrs$	:	$-58℃ \leqq vTrs$

要求破面遷移温度：vTrs(℃)

板厚　：t(mm)

許容応力　：σ(MPa)

最低使用温度　：T(℃)　(水圧鉄管では0℃)

（3）溶接施工に関する仕様

1）溶接施工法

溶接施工法は，各々の作業環境に応じて適した工法(被覆アーク溶接，サブマージアーク溶接，MAG溶接，MIG溶接，TIG溶接)を選定し，以下に示す試験を合格した方法で行うことが要求されている。引張試験については，表-4.1.4の値を満たす必要がある。

溶接性確認試験

y形溶接割れ試験，U型溶接割れ試験，多層溶接割れ試験(サブマージアーク溶接)

溶接継手性能試験

継手引張試験，継手側曲げ試験，継手シャルピー衝撃試験，継手硬さ試験

2）予熱，パス間温度，後熱条件

予熱温度，パス間温度については，低温割れに対する配慮から，表-4.1.5に示す値で管理することとなっている。但し，溶接性確認試験により割れ防止予熱温度を別途確認している場合には，その予熱温度以上でよいとされている。

一方，後熱については，望ましい条件として，150℃・2時間が示されている。

表-4.1.5　予熱，パス間温度

溶接方法	板厚　t(mm)	予熱温度　(℃)	パス間温度 (℃)
被覆アーク溶接	t　≦50	＞100	100～230
	50＜ t ≦200	＞125	125～230
サブマージアーク溶接	t　≦50	＞100	100～230
	50＜ t ≦200	＞125	125～230
MAG溶接	t　≦50	＞ 80	80～230
	50＜ t ≦200	＞100	100～230
TIG溶接	t　≦50	＞ 80	80～230
	50＜ t ≦200	＞100	100～230

3）溶接入熱量

溶接継手の各パスの入熱量については，冷却速度が遅くなると機械的性質(強度，靭性)が低下する傾向を考慮して，最大入熱量の上限，平均溶接入熱量は表-4.1.6の値を管理値としている。

表-4.1.6　溶接入熱量

各パスの最大入熱量	平均溶接入熱量
50,000J/cm以下	45,000J/cm以下

4）応力除去焼きなまし

応力除去焼きなましによる脆性破壊防止効果は，溶接止端部に生じる溶接後熱処理割れのリスクと比較して小さいとの判断から，応力除去焼きなまし(溶接後熱処理)は実施しないものとなっている。

（4）非破壊検査

非破壊検査は，原則として溶接終了後48時間以上経過後に，放射線透過試験または超音波探傷試験により行うものとされている。但し，これら検査が困難な隅肉溶接継手等の場合には，必要に応じて磁粉探傷試験または浸透探傷試験を使用しても差し支えない。

（5）確性試験

HT100を使用する場合は，表-4.1.7の確性試験を行い，鋼材及び溶接部が水圧鉄管に必要な性能を有していることを確認しなくてはならない。但し，これを確認できるデータがある場合は試験の全てあるいは一部が省略できることとなっている。

表-4.1.7　確性試験項目

母材試験	溶接性・加工性試験	溶接継手試験
化学成分分析	テーパ硬さ試験	マクロ組織試験
マクロ組織試験	y形溶接割れ試験	ミクロ組織試験
ミクロ組織試験	U形溶接割れ試験	継手引張試験
引張試験	多層溶接割れ試験	継手側曲げ試験
曲げ試験	ひずみ時効衝撃試験	継手シャルピー衝撃試験
硬さ試験		継手硬さ試験
シャルピー衝撃試験		継手破壊靱性試験
破壊靱性試験		

これら試験項目はHT80特認時の項目を基本としているが，U形溶接割れ試験が追加されている。HT100の場合は溶接金属部割れ感受性が高くなることから，溶接熱影響部を評価するy形割れ試験に加えて，溶接金属部の割れが厳しめに評価できるU形溶接割れ試験も実施する思想となっている。

〔参考文献〕

4.1.1) (社) 水門鉄管協会　溶接及び接合専門部会　水圧鉄管専門部会：950N/mm2級高張力鋼材(HT100)の水圧鉄管適用への技術指針　JESC H0001(2000)

4．2　1000N級高張力鋼の建築構造物への適用性

近年、構造物の大型化、高層化などに伴い鉄鋼材料の高強度化のニーズが高まってきており、建築鉄骨においてもその弾性範囲の大きさに注目して1000N級鋼へ関心が高まりつつある。

ここでは、高強度鋼の最高峰である1000N級鋼（引張強度950N/mm^2）を建築構造物へ適用することを前提として、鋼材および溶接接合に関し基礎的な検討を行っている文献[4.2.1)~4.2.5)]について紹介する。

（1）目標性能

建築鉄骨分野では溶接継手の特性に対して、特に溶接金属部の機械特性が求められている。そこで、この研究では溶接金属部の目標値を表-4.2.1に示すように引張強さが950N/mm^{2}以上、シャルピー吸収エネルギーは0℃での平均値で70J以上と設定している。試験に用いられた1000N級鋼の化学成分分析結果、引張試験結果およびシャルピー衝撃試験結果をそれぞれ表-4.2.2、4.2.3および4.2.4に示す（全て、板厚36mmの鋼材例）。

表-4.2.1　溶接継手要求性能

継手(全溶金)引張特性	ｼｬﾙﾋﾟｰ特性
引張強さ [N/mm^2]	vE_0(平均) [J]
≧950	≧70

表-4.2.2　鋼材の化学成分分析結果

（分析位置：1/4t, mass%）

C	Si	Mn	P	S
0.10	0.22	0.97	0.005	0.0005
Others			Ceq	Pcm
Cu, Ni, Cr, Mo, V, Nb, Ti, B			0.54	0.26

Ceq = C + Mn/6 + Si/24 + Ni/40 + Cr/5 + Mo/4 + V/14

Pcm = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5B

表-4.2.3　鋼材の引張試験結果

（JIS 4号試験片）

採取位置	試験方向	0.2%耐力 (N/mm^2)	TS (N/mm^2)	YR (%)	一様伸び(%)	El (%)
1/4t	L	910	973	93.5	6.2	22.4
	C	920	980	93.9	6.1	21.6
1/2t	L	918	980	93.7	6.0	23.4
	C	925	986	93.8	5.5	22.8
目標値*	C	880/1065	950/1130	≦98	-	≧12

*水圧鉄管要求値を参考に暫定

表-4.2.3　鋼材のシャルピー衝撃試験結果

JIS Z 2202（Vﾉｯﾁ試験片）

採取位置	試験方向	vE at 0℃ (J)				BA at 0℃(%)				vTrs
		個値			平均	個値			平均	(℃)
1/4t	L	238	250	258	249	0	0	0	0	-35
	C	229	234	215	226	0	0	0	0	-43
1/2t	L	225	219	234	226	0	0	0	0	-37
	C	181	161	203	182	0	0	0	0	-33

（2）市販ペンストック用溶接ワイヤによる検討

1）試験パラメータ

溶接は、建築鉄骨柱接合部の溶接接合に一般的に用いられるガスシールドアーク溶接にて行い、溶接材料については、ペンストック（水圧鉄管）用として市販されている1000N級鋼用溶接ワイヤを使用している。試験は強度と靭性に影響を及ぼすとされている入熱とパス間温度、さらに、超高張力鋼の靭性に影響を及ぼすとされているシールドガスをパラメータとして実施されている。試験体パラメータを表-4.2.5に示す。

表-4.2.5　市販ワイヤ試験体パラメータ

試験体 No.	溶接法	ｼｰﾙﾄﾞ ｶﾞｽ	予熱 温度 (℃)	後熱 温度 (℃)	パス間 温度 (℃)	平均 入熱 (kJ/cm)	最大 入熱 (kJ/cm)
1	GMAW	80%Ar+ 20%CO_2	100	無し	≦250	20	≦35
2	GMAW	80%Ar+ 20%CO_2	100	無し	≦125	20	≦35
3	GMAW	95%Ar+ 5%CO_2	100	無し	≦125	20	≦35
4	GMAW	95%Ar+ 5%CO_2	100	無し	≦125	25	≦35
5	GMAW	95%Ar+ 5%CO_2	100	無し	≦125	12	≦35

2）試験結果

図-4.2.1にパス間温度と引張強度の関係、図-4.2.2に入熱量と引張強度の関係を示す。図中の点線で囲んだプロットはシールドガスに95%Ar＋5%CO_2を使用した結果であり、点線で囲んでいないプロットはシールドガスに80%Ar＋20%CO_2を使用した結果である。

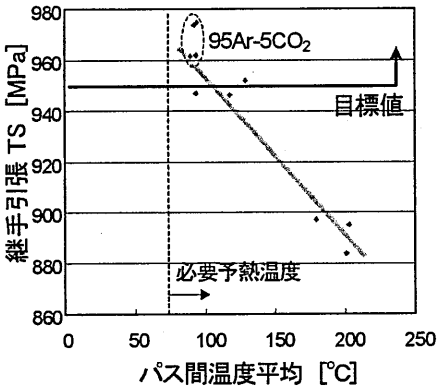


図-4.2.1　パス間温度と引張強度の関係
（市販溶接ワイヤを用いた場合）

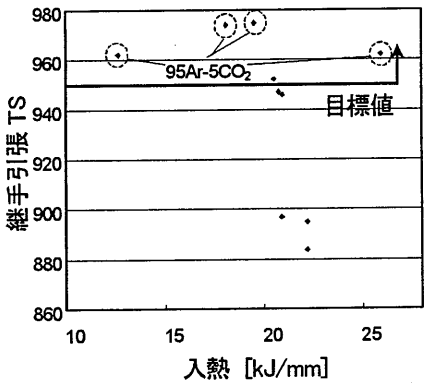


図-4.2.2　平均入熱量と引張強度の関係
（市販溶接ワイヤを用いた場合）

図-4.2.1より、パス間温度の低下に伴い強度は顕著に向上し、パス間温度を100℃程度にコントロールすることで、引張強度の目標値である950N/mm^{2}にほぼ到達可能であると判断している。これはパス間温度を低下させることで溶接金属の冷却速度を増大させ、マルテンサイト比率が上昇することに起因するものと考えている。さらに、シールドガスを95%Ar＋5%CO_2としてシールドガス中のCO_2濃度を低下させることで、より引張強度が上昇している。これはシールドガス中のCO_2ガスが溶融金属と反応し、MnやSiと酸化物を形成することにより焼入れ性を減じる原因となっていると考えている。なお、図-4.2.2では、溶接入熱の引張強度に対する影響は明確には認められないとしている。

以上より、市販溶接ワイヤを使用した場合には、シールドガスに95%Ar＋5%CO_2を使用し、パス間温度を100℃程度にコントロールすることにより、目標の機械的性質を満足できるとのことである。ただし、非常に施工裕度が著しく狭く、特にパス間温度の上限制約は実際の建築鉄骨での柱梁接合部のように溶接長が短くパス間温度が高い領域で推移する部位での使用は難しいと報告している。

（3）建築用超高強度溶接材料の開発

この研究ではさらに、建築鉄骨における溶接施工でのパス間温度使用領域である高パス間温度領域においても強度靭性が確保できることを目標とし、新溶接ワイヤを開発し検討を行っている。また、新溶接ワイヤは、パス間温度の施工管理範囲も実情に合わせた広いものを目標として開発したとしている。図-4.2.3に開発目標の模式図を示す。

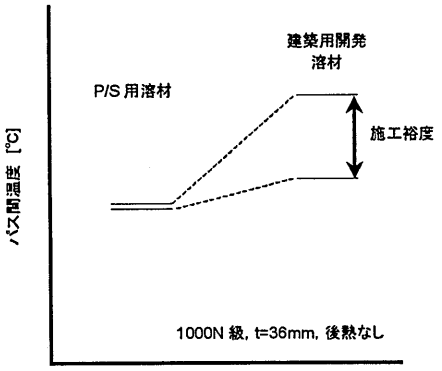


図-4.2.3　新ワイヤ開発模式図

新開発溶接ワイヤには、高パス間温度領域での引張強度確保のために、ワイヤ化学成分の高炭素当量化（Ceq：0.77）やNb添加を行ったとのことである。しかし、強度を高めたことにより、靭性の低下がみられたとしている（靭性確認はシャルピー衝撃試験によって行われている）。

シャルピー試験片の破面観察によると、靭性低下の原因が酸化物による介在物の存在が考えられるとしている。市販ワイヤでの実験において、シールドガスに95%Ar＋5%CO_2を用いることによる低CO_2化により、酸化物を減らすことが確認されており、ここでもシールドガスに95%Ar＋5%CO_2使用し、シールドガス中のCO_2分率を下げることで、強度と靭性を両立させた溶接ワイヤを開発することに成功したとしている。

（4）新開発溶接材料の性能

1）割れ防止からみた予後熱及びパス間温度

高強度鋼組織は水素割れ感受性が高く、溶接後の急冷却による溶接金属部あるいは熱影響部の硬化を防止するためや水素の拡散を促すために予熱処理が行われる。母材の割れ防止のための予熱温度はｙ型溶接割れ試験（JIS Z 3158）により、また溶接材料の予熱温度はU形開先溶接割れ試験（JIS Z 3159）により求められる。今回開発された溶接材料はパス間温度の範囲に余裕を持たせるために母材よりも高いCeq値となっており、溶接金属の割れ防止条件がより重要である判断している。溶接金属の初層割れ性を評価するためのU形開先溶接割れ試験は実施工で想定される最大厚50mmで行われ、図-4.2.4に示す結果から予熱温度は150℃としている。

また、建築鉄骨では柱梁接合部の溶接のように多層多パスでの施工となることが多い。高張力鋼の多層溶接実施においては、水素の集積や残留応力の上昇等など割れ防止にとって更に厳しい条件となる。そこで、拘束条件下における低温割れ防止の観点からパス間温度の下限値を規定する必要があり、図-4.2.5に示すU形開先多層溶接割れ試験を用いて多層溶接時の割れ防止が可能な条件範囲が決定されている。図-4.2.6に各条件において割れの有無を表示した結果を示す。板厚50mmの場合、後熱処理無しの条件でパス間温度の下限値は225℃、さらに後熱処理を行うことでパス間温度の下限値は125℃になるとしている。この結果から割れを発生させないパス間温度下限値を決定している。

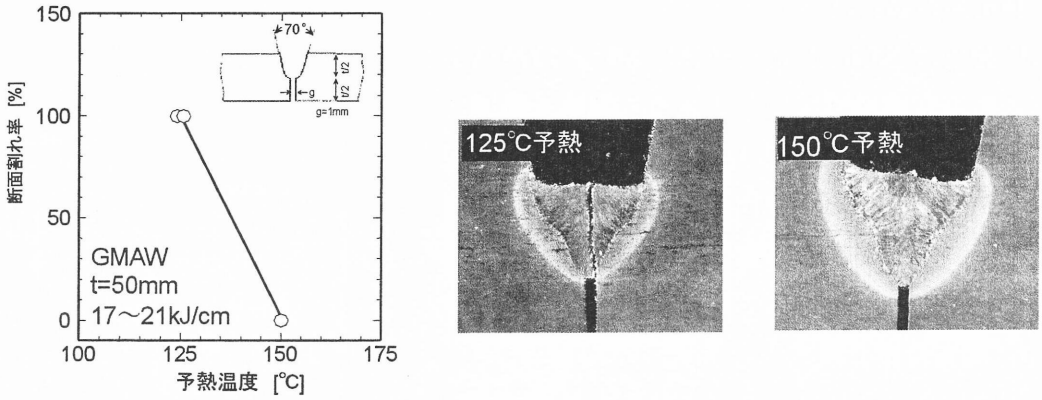


図-4.2.4　U形開先溶接割れ試験結果

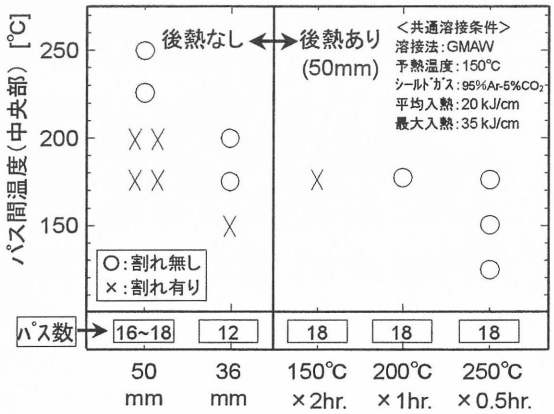


図-4.2.6　U形多層溶接割れ試験結果

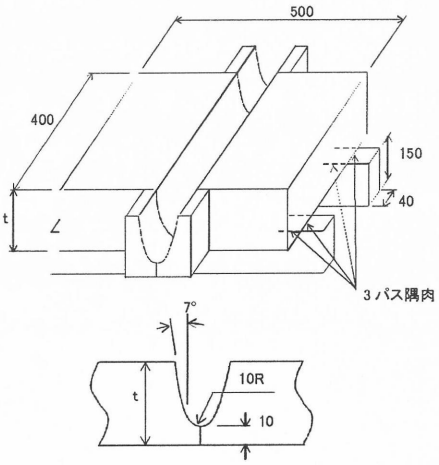
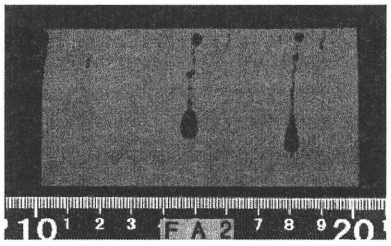
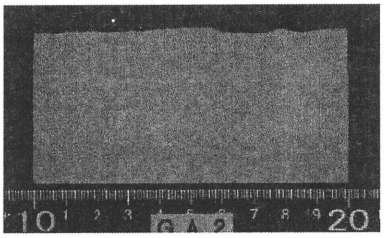


図-4.2.5　U形多層溶接割れ試験体形状



a　パス間温度 200℃後熱無し（板厚 50mm）



b　パス間温度 225℃後熱無し（板厚 50mm）

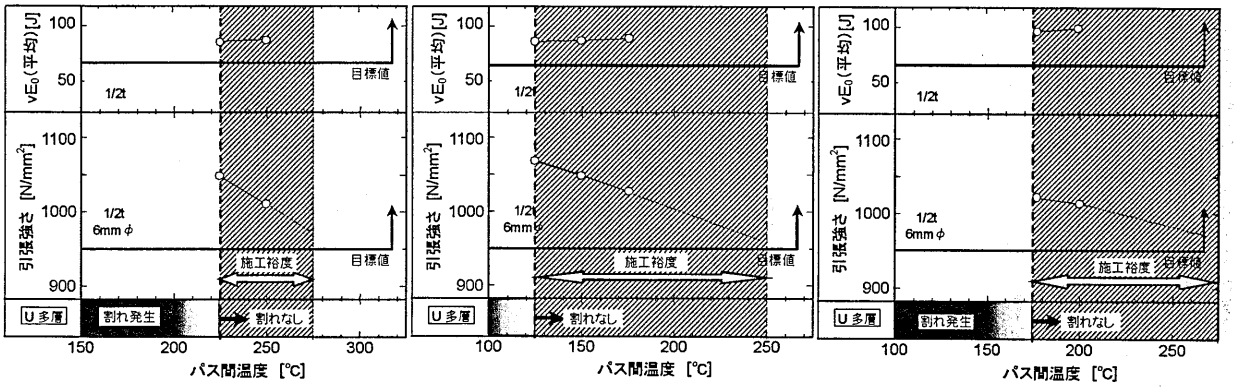
図-4.2.6　U形多層溶接割れ試験 縦断面浸透探傷試験結果

2）溶接金属強度靭性からみた後熱及びパス間温度

U形開先多層溶接割れ試験の溶接部中央部から引張特性を、端部よりシャルピー衝撃特性を評価している。その結果を図-4.2.7に示す。パス間温度の上昇に伴い強度の低下が見られるが、いずれも目標値である950N/mm^{2}を満足することを確認している。また、シャルピー吸収エネルギーは、目標（70J）を上回る安定した特性が得られたとしている。後熱処理は特に強度の低下が懸念されたが、変動幅は微少に留まったとのことである。強度が確保できるパス間温度の上限については、溶接材料開発時のデータより安全側に推定した外挿線を図中に示している。この強度確保の観点と多層溶接割れ防止条件から、適正な溶接施工範囲を導き出している。

50mm厚の後熱処理無しの結果では、実施工時におけるパス間温度の管理範囲は225～275℃であるが、後熱処理（250℃×0.5hr）を施すことによりパス間温度の下限値が広がり、管理範

囲は125～250℃になるとのことである。市販溶接ワイヤでは、パス間温度の管理は100℃程度であったが、新開発溶接ワイヤでは125～250℃となり建築鉄骨での施工に対応可能な条件となったと報告している。



(a) 50mm　後熱無し　　(b) 50mm　250℃×0.5hr 後熱　　(c) 36mm　後熱無し

図-4.2.7　多層溶接割れと強度靭性を両立できるパス間温度領域

〔参考文献〕

4.2.1) 沼田,橋田,藤平,甲津,多田,桑原：1000N級鋼(950N/mm^{2}鋼)の建築構造物への適用に関する溶接性試験,片山技報,No.25,2005.11.

4.2.2) 沼田,橋田,藤平,甲津,多田,桑原：1000N級鋼(950N/mm^{2}鋼)の建築構造物への適用性について（その２）－新GMAW溶接材料における溶接施工条件-,片山技報,No.26,2006.11.

4.2.3) 川畑,有持,橋田,沼田,甲津,多田,桑原,多賀：1000N級鋼(950N/mm^{2}鋼)の建築構造物への適用性について（その１）,日本建築学会学術講演概要集（近畿）,A-1材料施工,pp.97-98,2005.9.

4.2.4) 川畑,有持,橋田,沼田,甲津,多田,桑原,多賀：1000N級鋼(950N/mm^{2}鋼)の建築構造物への適用性について（その２）,日本建築学会学術講演概要集（近畿）,A-1材料施工,pp.99-100,2005.9.

4.2.5) 川畑,有持,一戸,福田,橋田,沼田,甲津,多田,桑原,多賀：1000N 級鋼(950N/mm^2 鋼)の建築構造物への適用性について（その３）,日本建築学会学術講演概要集（関東）,C-1 構造Ⅲ,pp.1007-1008,2006.9.

４．３　橋梁用高性能鋼 BHS の適用性

アメリカでは 1997 年に HPS70W が ASTM 規格化されている。その後、全米で HPS を橋梁に適用するプロジェクトが進められ、既に 200 橋以上が供用されている [4.3.1)]。HPS の使用により鋼桁製作費で 11%、総工事費で 6.5%、橋梁建設費で 15%のコストダウンが図られているとされている [4.3.2)]。

BHS は以下に示すようなオールラウンド（オールインワン）を目指した鋼材であり非常に有用性が高い。

- 高降伏点　（強度）
- 予熱低減型　（施工性、品質）
- Z 方向特性、耐ラメラテア特性に配慮　（施工性、品質）
- 高じん性　（施工性、品質）
- 耐候性鋼材も用意　（耐候性）

表-4.3.1　ＢＨＳ鋼の降伏点又は耐力，引張強さ

種類の記号	鋼板の厚さ mm	降伏点又は耐力 N/mm2	引張強さ N/mm2
BHS500 BHS500W	6≦t≦100	500 以上	570～720
BHS700W	6≦t≦100	700 以上	780～970

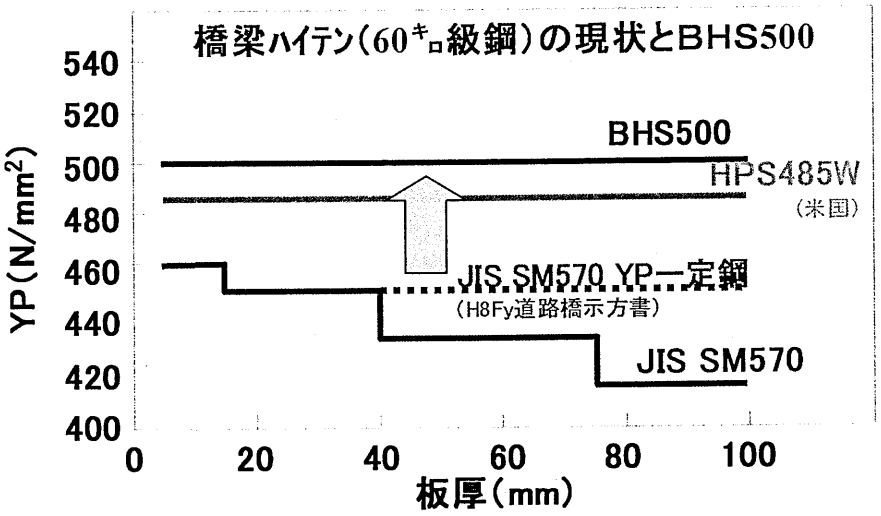


図-4.3.1　BHS500、SM570 の板厚と降伏強度の関係（比較）

表-4.3.1 に橋梁用高性能鋼 BHS500(W)（降伏強度 500MPa、W：耐候性鋼仕様）、BHS700W（降伏強度 700MPa）の降伏点又は耐力，引張強さを示す。BHS 鋼の特長として、高降伏点、高じん性、溶接性（予熱フリーまたは予熱温度低減）、溶接入熱制限、厚さ方向特性において優れた特性を有する鋼材を基本としている[4.1.3)]。さらに必要に応じて、板厚の 5 倍の曲げ加工半径に対応する冷間曲げ加工性[4.1.4)]や、耐候性鋼仕様が選択できる。研究の過程で、BHS 鋼の製作性を確認する目的で、切断、孔明け、溶接、矯正などの各種評価試験を行ってきた[4.1.5)4.1.6)4.1.7)]。その結果、BHS500 において優れた製作性が確認され、通常の SM490Y（降伏強度 355MPa）とほぼ同等の製作性を確保することが確認されている[4.1.8)]。

図-4.3.1 に示すように BHS500 は、従来の 60 キロ鋼 SM570（降伏強度 450MPa）との比較においても 11%程度の降伏強度向上があり、これを活かすことによって、鋼桁の経済設計と下部工コストの縮減が可能となるなど、設計上のメリットが得られることが報告されており[4.1.3)]、今後の活用が期待される。なお、（社）日本鉄鋼連盟製品規定（MDCR0014-2004）[4.1.10)]では、「降伏点 500MPa 及び降伏点 700MPa 溶接構造用圧延鋼材」として BHS 鋼の化学成分、機械的性質について規定しており、その付属書に BHS 鋼の有する特性として、溶接入熱量、予熱条件、冷間曲げ加工性について記載されている。

BHS 鋼の高降伏点（500MPa または 700MPa）を活用した設計を実施する場合，対象とする橋梁形式、支間長等の条件によって当然、効果に大小があることが考えられる。例えば、降伏点 700MPa の BHS700W については、上部工重量の削減が全体の経済性に影響する長大トラス橋や吊橋のような構造形式に対して有効であるのに対して、一般の支間の短い橋梁では、疲労等の影響を踏まえると、高降伏点の利点が必ずしも十分に生かしきれないことも考えられる。一方、降伏点 500MPa の BHS500 については、支間長 70m程度の桁橋で試算した結果[4.1.9)]では、従来鋼を適用した場合に比べて 10%程度の工費低減があることが報告されており鋼橋の経済性向上への期待は高いと言える。図-4.3.2 に一例を示すが、支間長 30～70mの多主桁橋を想定し、降伏点をパラメータとして、AASHTO-LRFD によって桁橋の鋼重を試算した結果[4.3.11),4.3.12)]や、支間長 60m程度の少数主

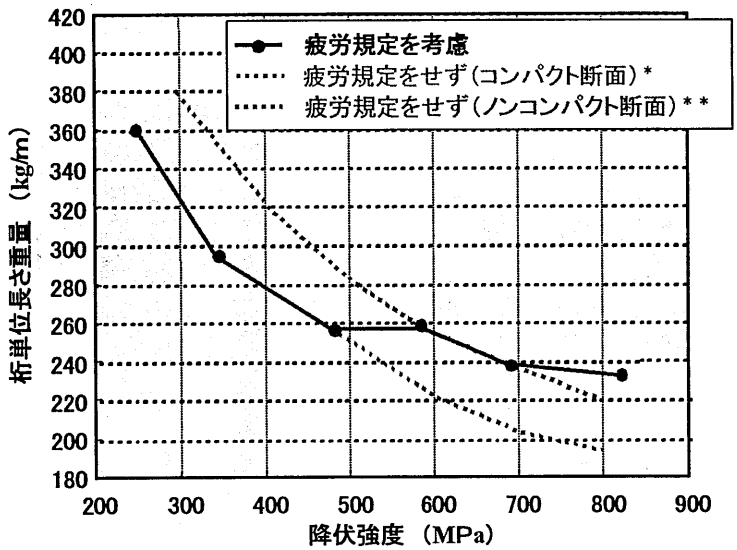


図-4.3.2 降伏強度をパラメータとして、桁橋の鋼重を試算した結果の一例[4.3.12)]

桁橋を想定し、降伏点をパラメータとして、桁橋の鋼重を試算した結果[4.3.13)]では、標準的な交通下での疲労も考慮して、鋼材重量を最小化する強度レベルは 500MPa 程度にあることが明らかにされている。良好な溶接性を兼ね備えたこのレベルの鋼材は経済設計に寄与することが期待される。

溶接構造用高張力鋼の発展過程で、強度と溶接性の両立は課題であった。強度を確保するためには一定の炭素を含有させることが必要であり、かたや溶接性をあげるためには炭素含有量を低下させることが必須であった。この背反する課題解決にあたって、TMCP(Thermo -Mechanical Control Process)と呼ばれる日本で開発された熱間圧延時の熱加工制御製造技術が大きく寄与した。TMCP 技術により鋼材の結晶粒を微細化し、炭素含有量を下げても微量の添加元素のみで所定の強度と溶接性を得ることを可能とし、さらに構造材料として重要な破壊靭性値を著しく改善した。TMCP を活用したことによって, 図-4.3.3 に示すように溶接割れ感受性組成 P_{CM} を抑制しつつ高降伏点を実現し、図-4.4.4 にあるように、高強度鋼の溶接において特にコストアップ要因となってきた予熱作業を軽減・省略することが可能となっている。

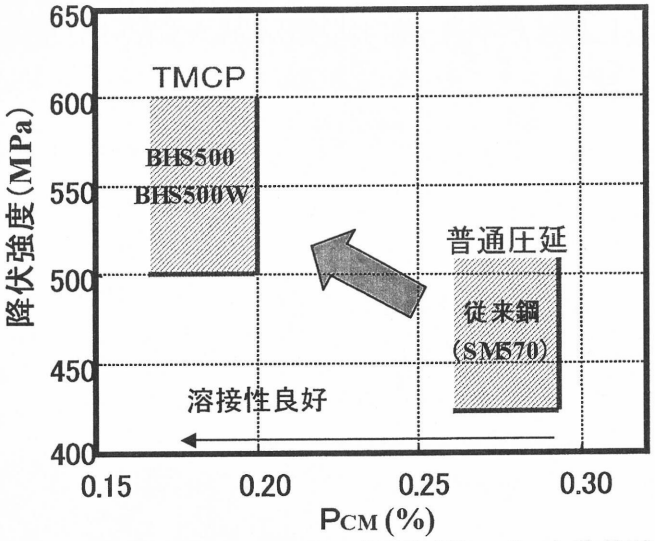
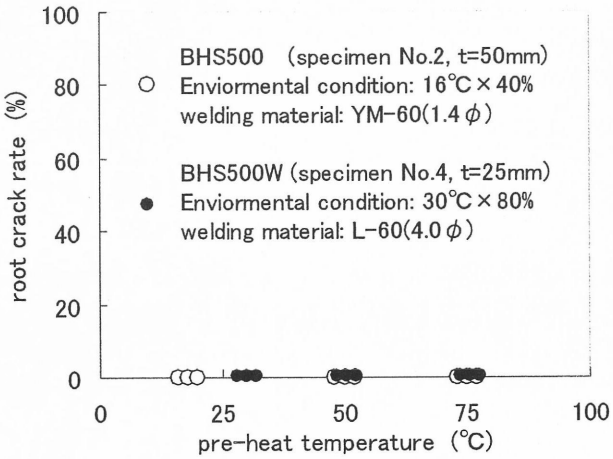


図-4. 3. 3　ＢＨＳ鋼(BHS500, BHS500W)の P_{CM} と降伏強度



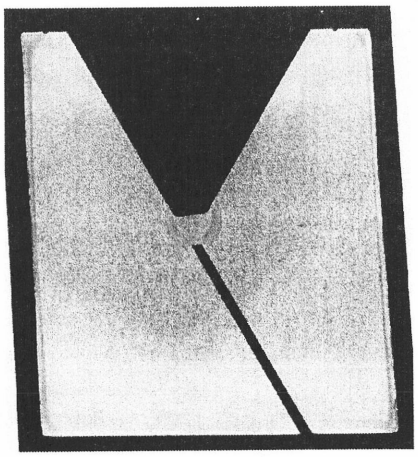


図-4. 4. 4　BHS 鋼(BHS500, BHS500W)の y 形拘束割れ試験結果

前述のように、米国では、AASHTO LRFD をもとに検討した結果、同様の考え方に基づき橋梁用高性能鋼材として有効活用できる降伏強度が 70ksi(485ＭＰa)であることが提案されている。FHWA の HPS プロジェクトにおいて、橋梁用高性能鋼 HPS485W（降伏強度 485MPa）が開発され[4.3.14)]、1997 年にテネシー州で適用された第一号高性能鋼橋梁以降、2006 年までに 200 橋以上の適用実績が報告されている[4.3.1)]。本事例では、鋼桁製作費で 11%のコスト削減、総工事費で 6.5%に相当するコスト削減が報告されている。この差異は、従来仕様として Grade345W（降伏強度 345MPa）の鋼材、すなわち 50 キロ鋼相当との比較である。HPS485W の適用によって、降伏強度が 40%向上したメリットによって鋼重が 24%低減されていると同時に、製作費が従来の Grade345W とほぼ同等であることによって、コスト削減が可能となっている。米国におけるＨＰＳの開発の経緯は、1992 年に FHWA、US-Navy、および AISI（米国鉄鋼協会）によって共同研究が発足し、研究実行に、コンサルタントの Modjeski & Masters 社と Lehigh 大学アトラス研究センター（John W. Fisher 教授）があたり、HPS の基本スペックを決定した。その後、1996 年に HPS485W が ASTM-A709-97 に鋼材規格化され、実橋に採用されるに至っている。

このような中、現在、東京港臨海大橋にて BHS を使用するプロジェクトが進められている。東京港臨海大橋はお台場の沖合いの埋めたて地と江東区若洲を結ぶ全長 760m のトラスーボックス複合形式橋梁である。径間中央部は 440m であり、このトラスの主構部材に BHS500 を使用する予定となっている。東京港臨海大橋では鋼材重量の低減や予熱作業の省略に伴い溶接作業が向上することにより、鋼重で約 3%、材料製作費で約 12%の減少が期待できると試算されている。

なお、本橋梁では、製作重量 20250 トンの内、ＢＨＳ500 鋼が 51%に相当する 10250 トン使用されている。トラスボックス複合構造における鋼材使用板厚は最大 50ｍｍ、鋼床版のデッキプレートは 16ｍｍを下限としている[4.3.15)]。

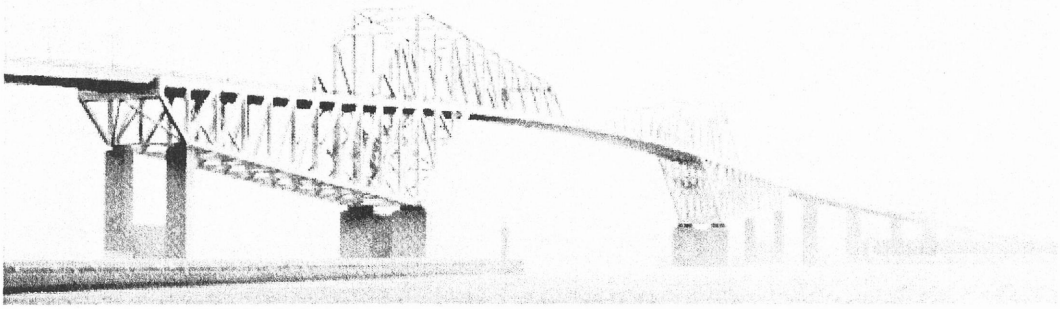


図-4.4.5　ＢＨＳ鋼(BHS500)が採用された東京港臨海大橋[4.3.15)]

〔参考文献〕

4.3.1) 三木：橋梁用高性能鋼材 BHS,橋梁と基礎,2005.8.

4.3.2) 川崎,本間：鉄鋼材料の発展と今後の展望,橋梁と基礎,2005.8.

4.3.3) 三木,市川,楠,川端：橋梁用高性能鋼材（BHS500,BHS700）の提案,土木学会論文集 No.738/I-64, pp.1-10, 2003.7

4.3.4) 本間,三木,征矢,笹尾,奥村,原：冷間曲げ加工を受けた構造用鋼材の歪時効と冷間曲げ加工の許容値に関する研究,土木学会論文集 No.570/I-40, pp.153-162, 1997.7

4.3.5) 安藤,田中,松田,岡野：BHS500 鋼の製作性評価試験と溶接継手特性(第 1 報)ーBHS500 鋼の規格と特性ー,土木学会第 61 回年次講演会,2006

4.3.6) 田中,松田,安藤,岡野：BHS500 鋼の製作性評価試験及び溶接継手特性（第 2 報）ー少数 I 桁橋桁モデルによる製作性評価試験ー,土木学会第 61 回年次講演会,2006

4.3.7) 岡野,田中,安藤,松田：BHS500 鋼の製作性評価試験及び溶接継手特性（第 3 報）ー 溶接継手特性に及ぼすパス間温度の影響確認試験結果ー,土木学会第 61 回年次講演会,2006

4.3.8) 藤田,湯田,米山,多田：橋梁用高性能鋼材の加工性・溶接性について,川田技報,Vol.25,2006

4.3.9) 織田,他：新鋼材による新しい合理化設計,創造プロジェクトシンポジウム資料,東京工業大学,pp.3-8,2003.9

4.3.10) （社）日本鉄鋼連盟：降伏点 500N/mm^2 及び降伏点 700N/mm^2 溶接構造用圧延鋼材,日本鉄鋼連盟製品規定（MDCR0014-2004）,2005.3

4.3.11)Koji Homma, Richard Sause: Potential for High Performance Steel in Plate Girder Bridges, American Society of Civil Engineers(ASCE), Proceedings of Structural Congress XIII, Vol.1, pp.177-192, 1995

4.3.12)村越：強度特性から見た高性能鋼材の橋梁への適用性について,土木技術資料,38-2,1996

4.3.13)小西,高橋,三木：高強度鋼の適用による鋼橋の合理化設計の可能性,土木学会論文集 No.654/I-52, pp.91-103, 2000.7

4.3.14)M.Myint LWIN, Alexander D. WILSON, Vasant C. MISTRY: High Performance Steel in the United States, Structural Engineering Document 8, IABSE,pp.11-43, 2005.10

4.3.14)Alexander Wilson :Improvements to High Performance Steels, www.steel.org/infrastructure/bridges

4.3.15)国土交通省関東地方整備局東京港湾事務所資料