

最近の高張力鋼強度化方法とHT80について

Recently Devised Methods of Making High-Tensile-Strength Steel HT80

成宮隆雄* 青木清** 百瀬敏彦***
Takao NARUMIYA Kiyoshi AOKI Toshihiko MOMOSE

Summary

Steel with a wide range of tensile strength are used in bridges, ranging from 40kgf/mm² (mild steel) to 80kgf/mm² (high tensile strength steel HT80).

As the use of stronger steel becomes more common, joints are increasingly formed by welding and the types of welded joints are becoming more diverse. Good weldability and, particularly, reduced susceptibility to weld cracks (cold cracks) have been sought earnestly by steel users.

Recently there has been remarkable improvement in steel manufacturing techniques to make stronger yet fairly weldable steel available for practical use. These techniques involve reducing the amount of carbon in the material while controlling the hot working of steel, as in the production of thermo-mechanical control process (TMCP) steel.

This paper provides a broad overview of the history of methods of making high-tensile-strength steel, and reports on the results of weldability comparison tests between conventional HT80 and a new type of HT80 that permits lower temperature preheating for welding.

はじめに

昭和34年に50キロ級高張力鋼が溶接構造用圧延鋼材としてJIS化され、昭和39年には溶接鋼道路橋示方書に採用された。鋼橋においては昭和32年頃50キロ級高張力鋼（以後HT50と称す）の溶接橋が製作され、昭和36年には60キロ級高張力鋼（以後HT60と称す）が名神高速道路の木曾川橋等に多量に用いられた。さらに昭和49年に南港連絡橋に80キロ級高張力鋼（以後HT80と称す）が、昭和58年～昭和61年には本州四国連絡橋の大鳴門橋に70キロ級高張力鋼（以後HT70と称す）が多量に、岩黒橋等の1部にHT80が用いられた。

約35年間で鋼橋の使用鋼材強度は2倍近くになっている。鋼材の高強度化に伴い加工上、特に溶接上の問題と溶接継手部の靱性上の問題が生じることになる。

最近、製鋼技術の向上により、高強度化を図りながら、溶接性が良好で、かつ溶接部の靱性低下の少ない鋼材の実用化が可能となってきている。

本報では、高張力鋼の高度化の推移と最近の溶接性の良好な高強度高張鋼、特にHT80（以後予熱低減型HT80と称す）の製鋼上の概要と従来型のHT80と予熱低減型HT80の溶接性比較実験の結果を報告する。

1. 高強度化の推移と予熱低減型HT80について

高張力鋼開発における高強度化の考え方の推移を示す

と、下記の四期に分けられる。

第一期——固溶硬化(軟鋼、C=0.25~0.35)→高強度化により伸び、絞り等の延性低下

第二期——炭素・合金固溶硬化(低C、Si-Mn系)→溶接工法の多用に伴い、溶接割れ、溶接部の靱性、延性低下

第三期——低炭素・調質硬化(熱処理技術の向上、焼戻しマルテンサイト、HT60~HT80)→高強度化に伴い溶接割れ防止予熱温度上昇

第四期——低炭素・析出・分散硬化(極低炭素化・細粒化・Nb、V、Cu等の析出元素の添加、TMCP化)→予熱温度低減、溶接部の靱性向上

従来型の高張力鋼HT50~HT80は第三期までにあたり、強度は主として炭素および合金添加元素の量によって決まり、靱性確保のため焼戻し等の調質が行なわれた。

一般に、高張力鋼の溶接性、特に低温割れ感受性を決める要因として

①鋼材の溶接熱影響部の硬さ ②溶接部の拡散性水素量

③溶接部の拘束応力度が挙げられるが、鋼材独自の低温割れ感受性の改善には溶接熱影響部の硬さの低減が要求される。

溶接熱等の加熱・冷却による鋼材の焼入れ硬化程度を示す目安として、合金添加元素の影響を炭素に置換えた炭素当量(C_{eq})式がJISに定められている。

$$C_{eq} = C + Mn/6 + Si/24 + Ni/40 + Cr/5 + Mo/4 +$$

* 千葉工場生産技術研究所長 *** 製造部生産技術課

** 千葉工場生産技術製造部長

V/14—(1)

この C_{eq} とJISの溶接熱影響部最高硬さ試験による最高硬さ (H_{vmax}) とには、 $H_{vmax} = (666C_{eq} + 40) \pm 40$ —(2)の関係がある。

図-1に、当社における過去の実験結果に基づく C_{eq} と最高硬さの相関図を示した。一方、鋼材の熱影響部低温割れ感受性はJISの斜めY形溶接割れ試験によって判定されている。斜めY形溶接割れ試験における割れ感受性指数(P_c)は次式で与えられている。

$$P_c = (P_{CM})^{*1} + (H/60)^{*2} + (t/600)^{*3} \text{—(3)}$$

*1：熱影響部の硬さに関する指数 *2：拡散性水素の指数 *3：拘束に関する (t：板厚) 指数

$$P_{CM} = C + Si/30 + Mn/20 + Ni/60 + Cu/20 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5B \text{—(4)}$$

斜めY形溶接割れ試験における割れ防止予熱温度は次式で推定できるといわれている。

$$T (^\circ C) = 1440P_c - 392 \text{—(5)}$$

第三期までの高張力鋼では、高強度になるほど C_{eq} 、 P_{CM} は大きくなり、溶接熱影響部の硬さが上昇するため低温割れ感受性が高まり、割れ防止のための予熱温度が高くなる。表-1に本州四国連絡橋公団製作基準による高張力鋼の鋼種・溶接方法・板厚別の予熱温度の規定を示

した。溶接割れ防止のための予熱作業は鋼構造物の溶接品質確保に欠かすことのできない作業であるが、高強度厚板鋼材を用いる場合は予熱温度も高くなり、溶接作業時に鋼板温度の上昇により継手近傍の雰囲気温度が $100^\circ C$ 近くになることもあり、溶接作業者の集中力にも問題を残すことになる。また、仮付け溶接時の高温予熱は各材料の熱膨張の差により構造物の組立精度維持等に苦勞することになる。これらの観点からも、ファブリケータとしても、溶接性が良好で予熱温度低減可能な高強度高張力鋼の実用化を強く望んでいた。

表-1 仮付け溶接の最小予熱温度($^\circ C$) (HBC製作基準)

鋼種	仮付け溶接方法	t 板厚 (mm)			
		t ≤ 25	25 < t ≤ 38	38 < t ≤ 50	50 < t ≤ 75
SS41 SM41 SMA41W	被覆アーク	—	50	50	
	CO ₂ 半自動	—	—	—	
SM50 SM50Y SMA50W	被覆アーク	—	50	100	
	CO ₂ 半自動	—	—	50	
SM58 SMA58W	被覆アーク	50	100	100	120
	CO ₂ 半自動	50	100	100	100
HT70 HT80	被覆アーク	100	100	100	150
	CO ₂ 半自動	100	100	120	120

(表は手動バーナーによる場合について示した)

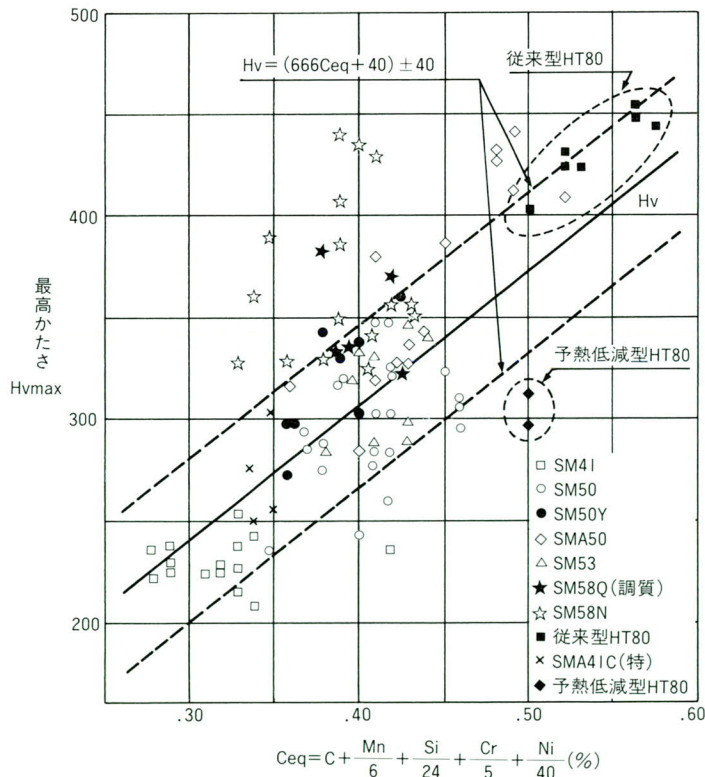


図-1 各鋼種の炭素当量と最高かたさ H_{vmax} の相関 (JIS Z3101による試験)

最近、製鋼技術の向上により、制御圧延と制御冷却を併用したTMCP (Thermo-Mechanical Control Process) が用いられるようになってきた。

TMCP鋼は第三期までの高張力鋼と異なり、高度な圧延制御や加速冷却によるマイクロ組織改善を基本としているので、合金元素の増加を伴わないで高強度化が可能となっている。従って従来鋼に較べて、低炭素、低 C_{eq} 、低 P_{cm} 化が可能であり、低温割れ防止予熱温度が低減可能となっている。これらの方法により予熱温度を低減したHT70～HT80鋼が開発されている。

一方、Cuの析出硬化を利用して高強度化した極低炭素、BフリーのHT70～HT80鋼が開発された。Cu析出硬化現象とは、1%程度のCuを添加することにより過飽和固溶体炭化物、金属間化合物等の異相(ϵ -Cu)が析出するために起こる硬化である。図-2に強度に及ぼすCu添加量の影響を示した。

象とは、1%程度のCuを添加することにより過飽和固溶体炭化物、金属間化合物等の異相(ϵ -Cu)が析出するために起こる硬化である。図-2に強度に及ぼすCu添加量の影響を示した。

Cu析出硬化高張力鋼としてはASTM-A710鋼およびA736鋼があり、溶接性が良好なことから産業機械、建設機械、水圧鉄管等に使用されている。

表-2に溶接試験に用いた従来型HT80とCu析出硬化型HT80鋼の化学成分を、表-3に機械的性質を示した。

これら供試鋼板のマイクロ組織写真を写真-1に示した。いずれもペーナイト組織であるが、従来型HT80の方が炭素量が多い分、Cu析出硬化型HT80に較べて、よりベ

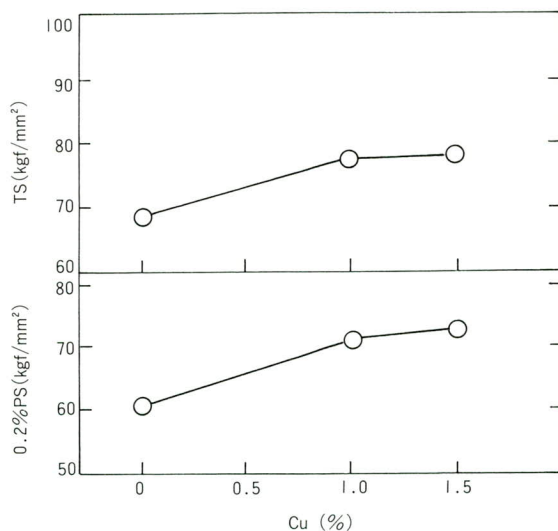


図-2 強度に及ぼすCu添加量の影響

表-3 従来型および予熱低減型HT80鋼のL、C方向引張試験結果

材質	板厚 mm	試験片形状	板厚位置	方向	引張試験			
					YS(N/mm²)	TS(N/mm²)	EL(%)	破断位置
従来型 HT80	36	JIS5号	全厚	L	766	818	41	I
				C	773	826	39	I
		JIS4号	1/4	C	786	833	24	I
予熱低減型 HT80	22	JIS5号	全厚	L	835	881	38	I
				C	847	888	37	I
	JIS4号	1/4	C	838	881	25	I	
			38	JIS5号	全厚	L	788	853
C	792	861				43	I	
JIS4号	1/4	C	761	829	25	I		

破断位置のIは、GL中央部で破断

表-2 従来型および予熱低減型HT80鋼の化学成分

材質	板厚 mm	化学成分 (Mass%)												Ceq*1	Pcm
		C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	B	Nb		
従来型 HT80	36	0.10	0.30	0.93	0.016	0.002	0.27	0.98	0.61	0.33	0.04	0.002	—	0.50	0.24
予熱低減型 HT80	22	0.05	0.28	1.32	0.004	0.001	1.00	0.75	0.02	0.45	0.04	—	0.01	0.42	0.22
	38	0.04	0.29	1.33	0.004	0.001	0.99	0.77	0.02	0.46	0.04	—	0.01	0.41	0.21

*1: (1)式による

一ナイト状組織となっている。

2. 従来型HT80とCu析出型HT80の溶接性比較試験結果

表-1および表-2に示した従来型のHT80とCu析出硬化型HT80（以後予熱低減型HT80と称す）の溶接施工性の比較試験結果を示す。

1) 最高硬さ試験 (JIS Z 3101)

従来型HT80と予熱低減型HT80鋼板を用いたJIS最高硬さ試験を、被覆アーク溶接(4φ)と炭酸ガスアーク溶接(1.2φ)について行い、それらの結果を図-3および図-4に示した。いずれの溶接方法でも予熱低減型HT80の方が最高硬さがHv90~100程度低かった。

2) テーパー硬さ試験 (JIS Z 3115)

従来型HT80(t=36)と予熱低減型HT80(t=38)鋼板を用いて被覆アーク溶接によるテーパー硬さ試験を行い試験結果を図-5に示した。

従来型HT80ではアークストライクでHv400、ショートビートでHv375、最小値でHv350であったが、予熱低減型HT80ではアークストライクでHv350、ショートビートでHv325、最小値でHv250であり、冷却速度に関係なく硬さの差は大きかった。

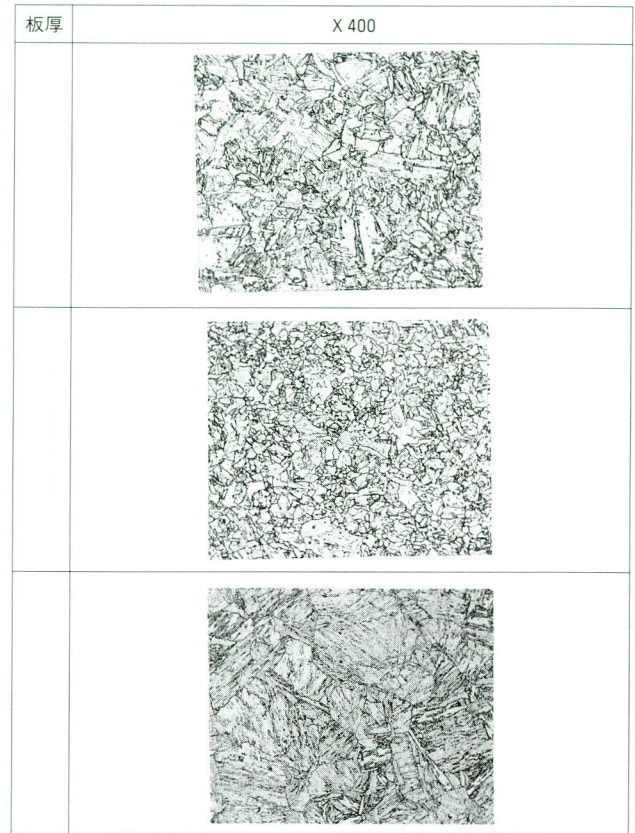


写真-1 従来型HT80と予熱低減型HT80マイクロ組織

試験片形状：JIS Z3101による
溶接材料：L-80 4mmφ
溶接条件：170A×25V 15cm/min

●	36mm 従来型HT80
○	38mm 予熱低減型HT80
△	22mm 予熱低減型HT80

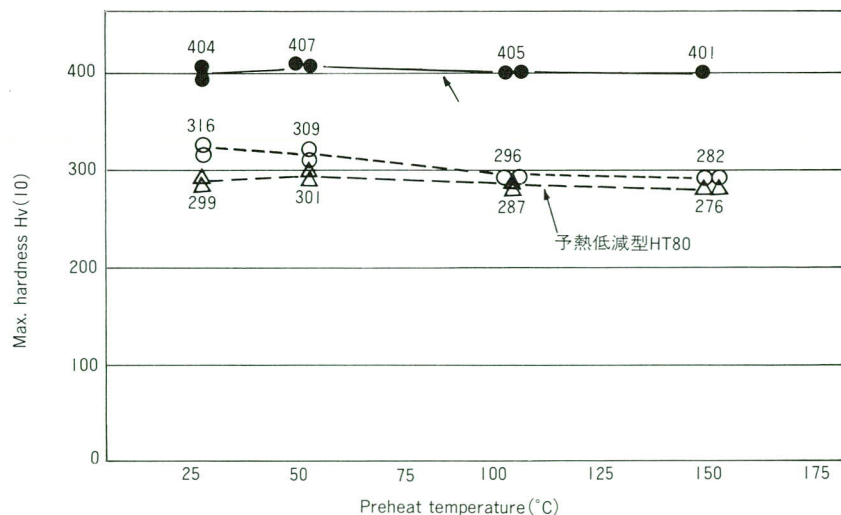
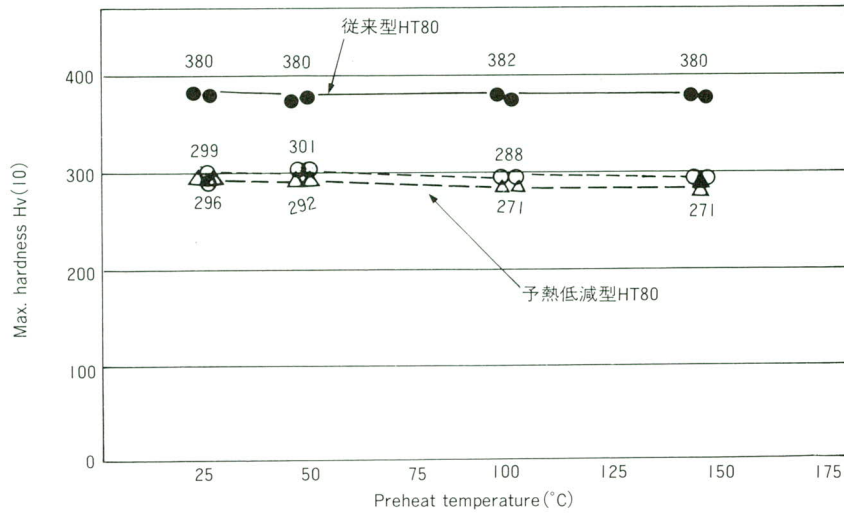


図-3 被覆アーク溶接による最高硬さ試験結果の比較



試験片形状：JIS Z3101による
 溶接材料：YM80A 1.2mmφ
 溶接条件 200A×24V 17cm/min

図-4 炭酸ガスアーク溶接による最高硬さ試験結果の比較

試験片形状：JIS Z3115による 溶接条件：170A×25V 15cm/min
 溶接材料：L-80 4mmφ 170A×25V 28cm/min

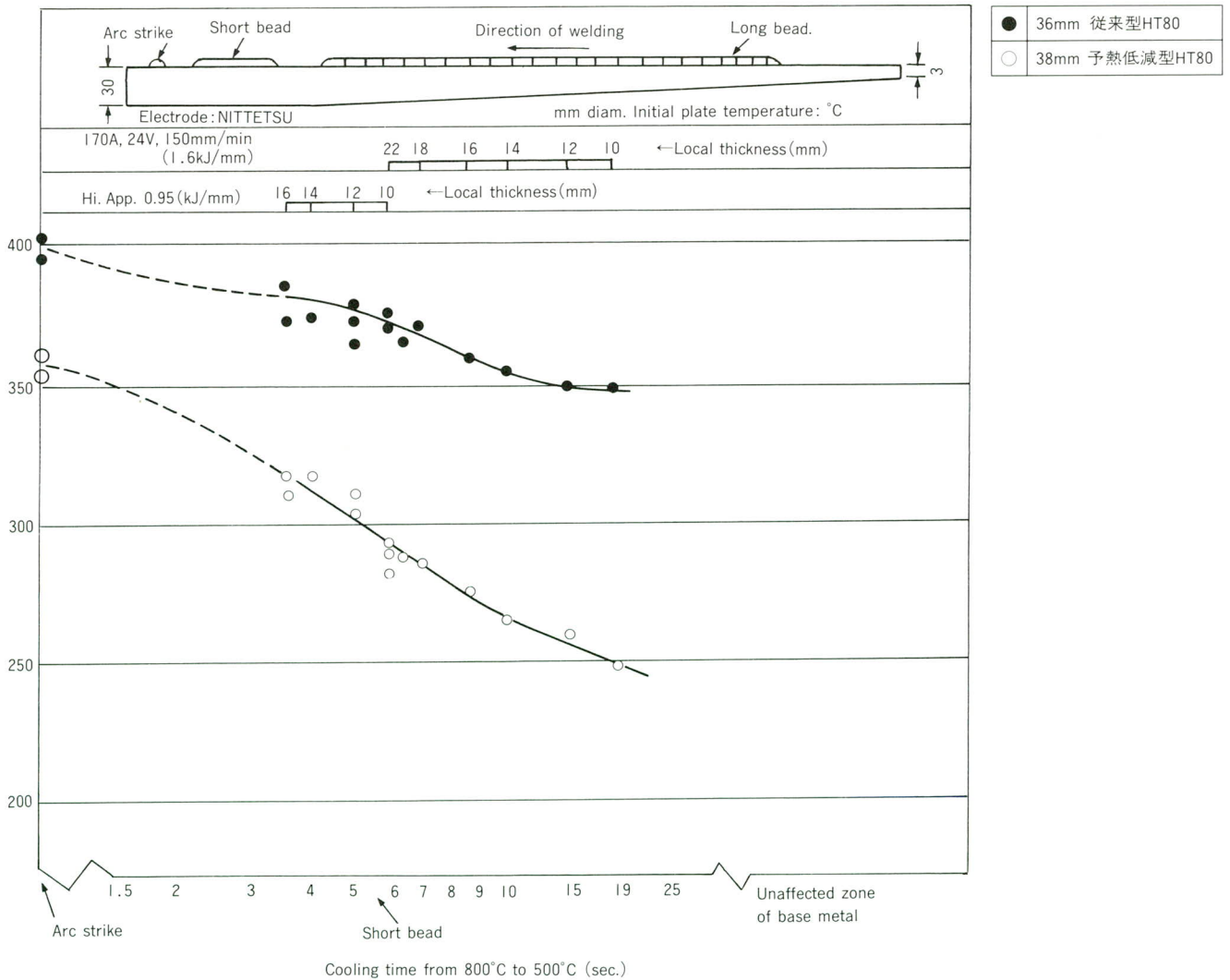


図-5 テーパー硬さ試験結果の比較

3) 斜めY型溶接割れ試験 (JIS Z 3158)

従来型HT80 (t = 36) と予熱低減型HT80 (t = 22、38) 鋼板を用いて被覆アーク溶接および炭酸ガスアーク溶接による斜めY型溶接割れ試験を行い、割れ停止予熱温度を求めた。各溶接方法および材料の割れ停止温度を表-4に示した。

従来型HT80では軟質極低水素系溶接棒(L-43LH)が割れ停止温度75℃、それ以外では100℃であったが、予熱低減型HT80の場合は軟質極低水素系溶接棒(L-43LH)が、室温(25℃)でも割れは発生せず、その他の

表-4 斜めy型割れ試験における割れ停止予熱温度の比較
割れ停止温度

供試鋼板	溶接材料	L-43LH	L-80	YM25	YM80A
22mm予熱低減型HT80		25℃	25℃	50℃	50℃
38mm予熱低減型HT80		25℃	50℃	50℃	50℃
36mm従来型HT80		75℃	100℃	100℃	100℃

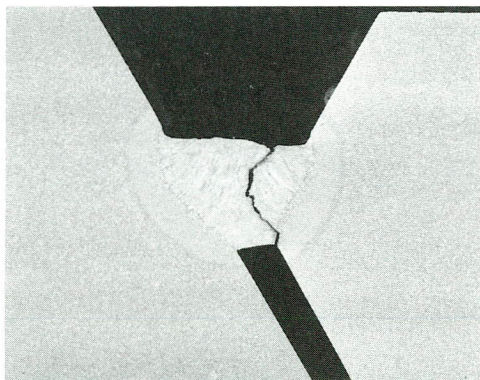


写真-2 斜めy型割れ試験断面マクロ例

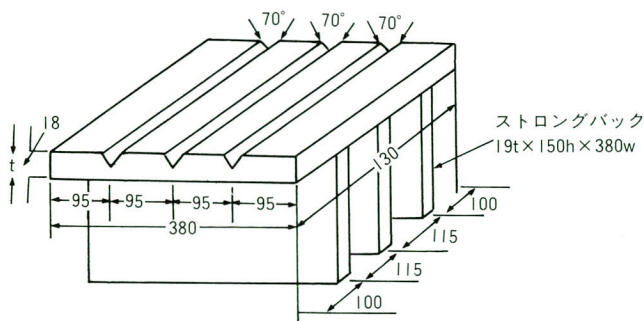


図-6 V溝高温割れ溶接試験結果

溶接材料でも50℃以下の割れ停止温度であった。写真-2に割れ試験断面マクロ写真を示した。割れは全て溶接金属に発生している。

予熱低減型HT80は従来型HT80より50℃の予熱低減ができることが分かった。

4) V溝割れ試験

サブマージアーク溶接の高温割れ感受性を確認するため図-6に示すV溝試験体を作製してサブマージアーク溶接(1パス溶接)による高温割れ試験を行なった。

試験結果を図-7に示した。従来型HT80では電流800A、

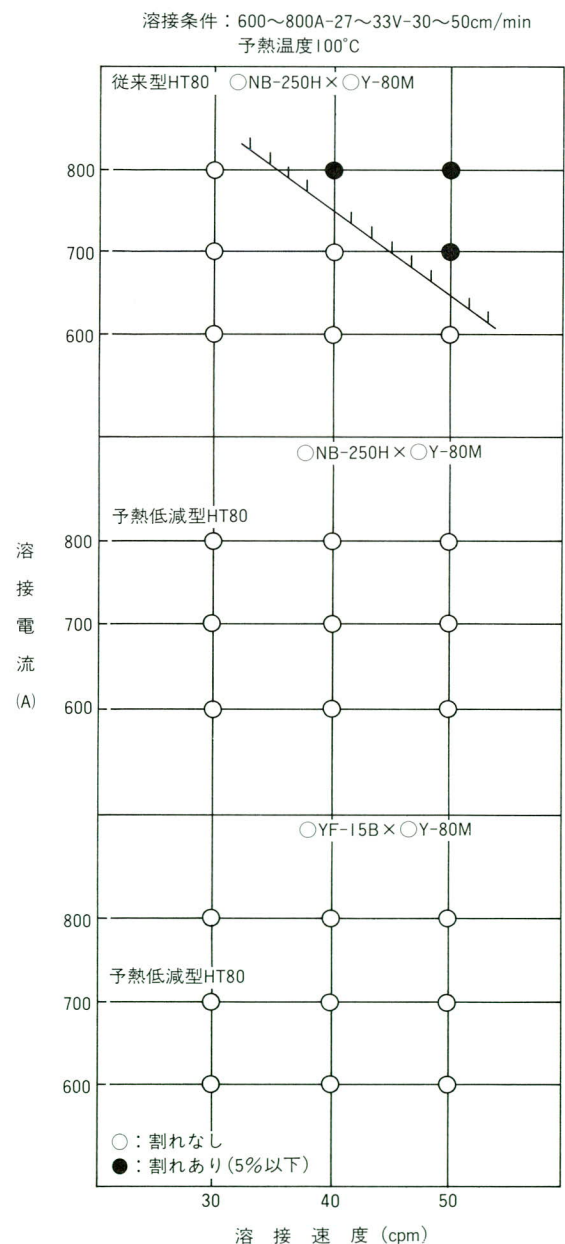


図-7 V溝溶接割れ試験体形状と寸法

溶接速度40cm/minおよび電流700 A、速度50cm/minで高温割れを発生したが、予熱低減型HT80では電流800 A、溶接速度50cm/min以下では全く割れが発生しなかった。予熱低減型HT80の高温割れ感受性が低いのはC量の少ないことによるものと思われる。

5) X開先突合せ溶接試験

従来型HT80 (t=36)と予熱低減型HT80 (t=22、

38) 鋼について板継ぎ溶接を想定した突合せ溶接試験を行なった。溶接方法はサブマージーク溶接とし、溶接ワイヤはY-80M、フラックスは溶融フラックス (YF=15B)とボンドフラックス (NB-250H)の2種類の組合せとした。溶接継手の引張試験結果を表-5に示した。継手引張強度は、いずれの継手とも母材の強度規格を満足したが、予熱低減型HT80の方がやや強度が低

表-5 X開先突合せ溶接試験継手引張試験結果

鋼種	板厚	試験体記号	溶接材料		入熱量 (MAX) KJ/cm	予熱温度 °C	層間温度 °C	継手引張強さ (N/mm ²)	破断位置
			ワイヤ	フラックス					
予熱低減型 HT80	22	C	Y-80M (4.8φ)	NB-250H (12×100)	50.4	RT	95	839.4	B.M
	38	A			50.4	RT	130	828.3	B.M
従来鋼	36	E			50.4	RT	180	858.3	B.M
予熱低減型 HT80	22	D	Y-80M (4.8φ)	YF-15B (20×D)	47.6	RT	125	812.3	DEPO
	38	B			47.6	RT	135	790.4	DEPO
従来鋼	36	F			47.6	RT	165	830.3	B.M

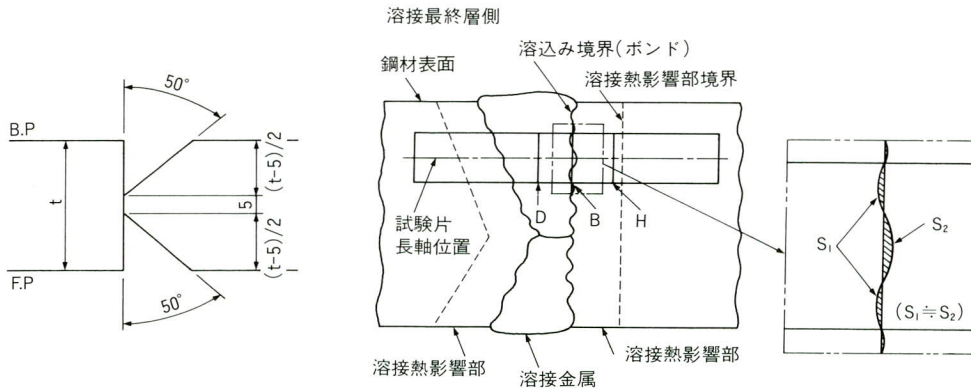


図-8 衝撃試験片採取位置

表-6 K開先突合せ溶接試験衝撃試験結果

鋼種板厚	溶接材料	試験片採取位置	衝撃試験結果 (J)				
			-60°C	-40°C	-30°C	-20°C	0°C
従来型 HT80 36mm	Y-80M × NB-250H	Depo	53	66	65	76	103
		Bond	—	57	100	116	150
		HAZ	209	227	183	228	228
	Y-80M × YF-15B	Bepo	—	40	42	51	67
		Bond	—	49	51	58	172
		HAZ	77	87	87	192	228
予熱低減型 HT80 38mm	Y-80M × NB-250H	Depo	83	100	116	146	187
		Bond	—	42	57	130	229
		HAZ	238	285	282	277	274
	Y-80M × YF-15B	Depo	—	44	46	63	83
		Bond	34	59	31	62	156
		HAZ	254	272	283	281	275

い傾向にあった。従来型HT80継手では母材のC量が高いため溶接金属は母材の希釈によりCリッチになり、予熱低減型HT80継手では母材のC量が低いため溶接金属は母材の希釈によりCプアーとなるためと思われる。

6) K開先突合わせ溶接試験

従来型HT80 (t=36) と予熱低減型HT80 (t=22、38) 鋼における熱影響部の衝撃特性を調べるためK開先溶接試験を行なった。溶接方法はサブマージーク溶接とし、溶接ワイヤはY-80M、フラックスは溶融フラックス(YF-15B)とボンドフラックス(NB-250H)の2種類の組合せとした。衝撃試験片採取位置を図-8に示した。

試験温度は-60℃、-40℃、-30℃、-20℃、0℃の5温度とし、試験結果を表-6に示した。いずれの鋼材ともボンド部では-20℃で47joule以上であった。

7) 加熱矯正による材質変化

歪取り加熱矯正を想定して従来型HT80 (t=36) と予熱低減型HT80 (t=22、38) 鋼板をガスバーナーで、600℃、700℃、800℃、900℃の各温度に加熱し、直ちに放冷、強制空冷、弱水冷および強水冷をして熱サイクルを与えた鋼板の引張試験およびシャルピー衝撃試験を行なった。

図-9に最高加熱温度600℃の放冷熱サイクル曲線の例を示した。

図-10および11に従来型HT80 (t=36) と予熱低減型HT80 (t=22、38) の最高加熱温度および各冷却方法と引張強さおよび耐力の変化を示した。

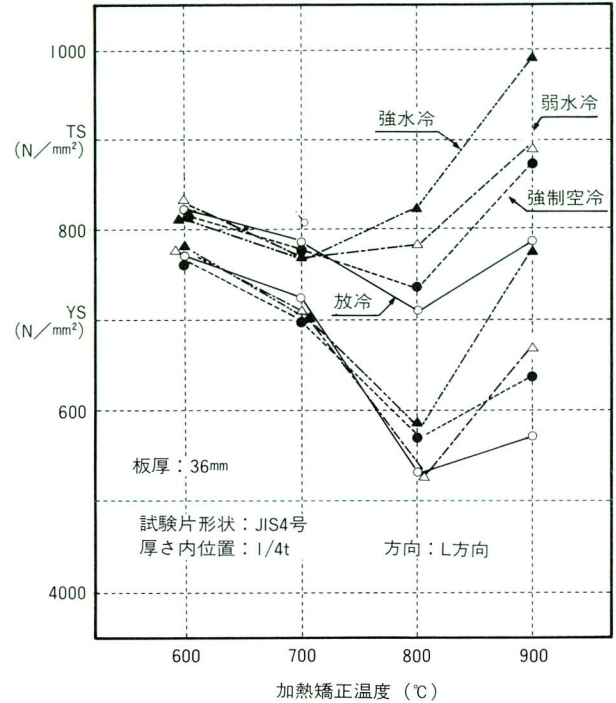


図-10 従来型HT80の最高加熱温度および冷却方法と引張強度

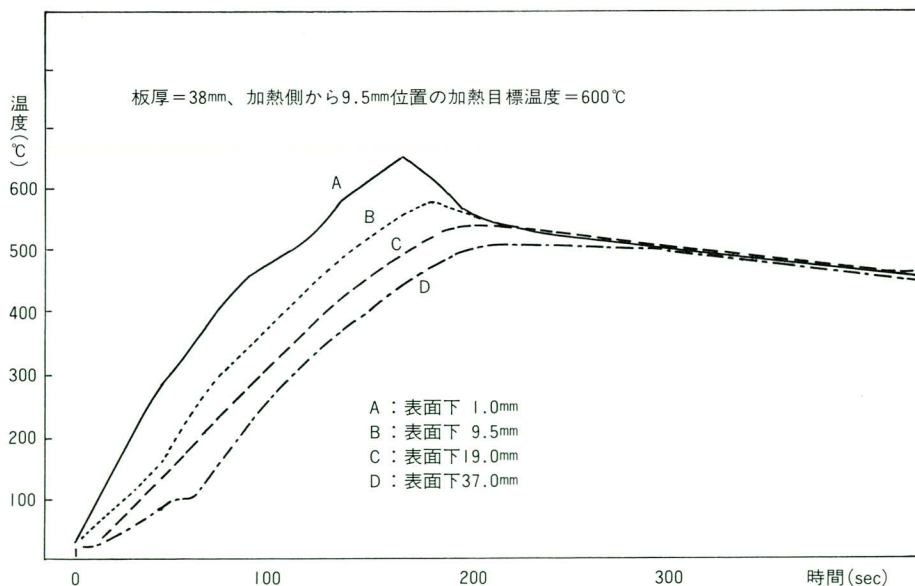


図-9 板厚方向における600℃加熱・空中放冷の冷却曲線。

従来型HT80 (t=36)では最高加熱温度800℃までは冷却速度に関係なく引張強さ、耐力とも比例的に低減したが最高加熱温度900℃では冷却速度が大きい程強度が増加した。特に、水冷では母材強度を著しく上回る強度となった。一方予熱低減型HT80 (t=22、38)では冷却方法に関係なく、最高加熱温度の上昇に応じて比例的に強度が低下した。特に耐力の低下が著しかった。

図-12、13および14にシャルピー衝撃試験結果を示した。

従来型HT80では最高加熱温度700℃を超えると冷却方法に関係なく衝撃値は著しく低下した。予熱低減型HT80 (t=22、38)は最高加熱温度900℃までは、最高加熱

温度および冷却方法に関係なく衝撃値はほとんど変化なく、母材靱性を確保した。

従来型HT80では最高加熱温度と冷却方法の両方の管理が必要であるが、予熱低減型HT80では最高加熱温度のみを厳しく管理すればよい。水冷が可能なことは矯正効率を著しく向上させることができる。

3. まとめ

最近の製鋼技術の進歩は、鋼の清浄度を著しく向上させ、制御圧延および制御冷却の実用化により低炭素化、低 C_{eq} 化および低 P_{CM} 化を可能とし、鋼材の溶接性が著しく向上した。また、被覆アーク溶接中心から拡散性水素量の非常に少ないガスシールドアーク溶接への移行によ

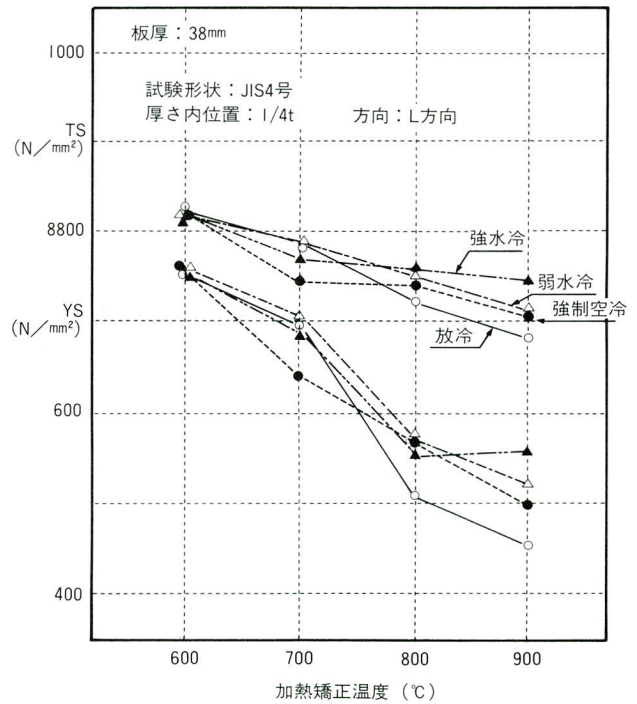
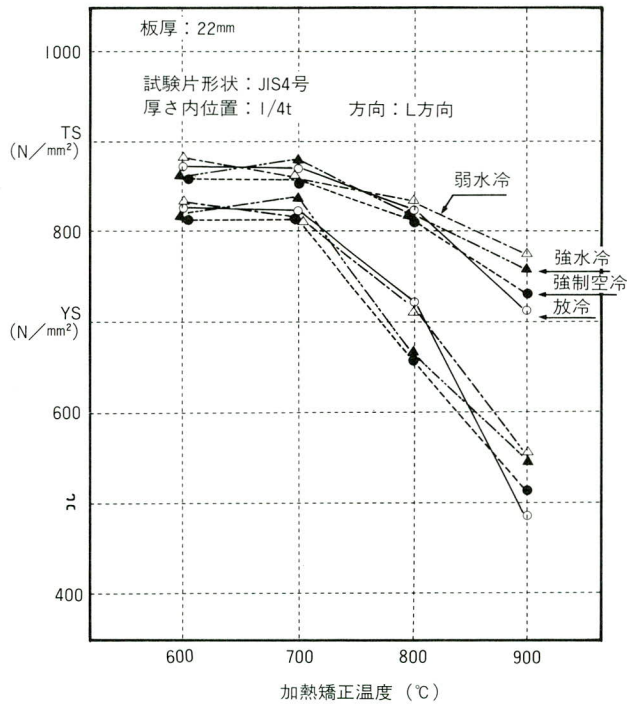


図-11 予熱低減型HT80の最高加熱温度および冷却方法と引張強度

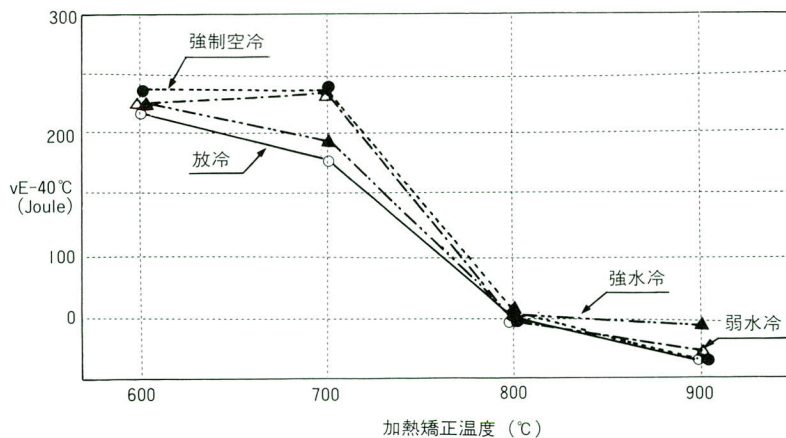


図-12 従来型HT80の加熱温度及び冷却方法と衝撃値の関係

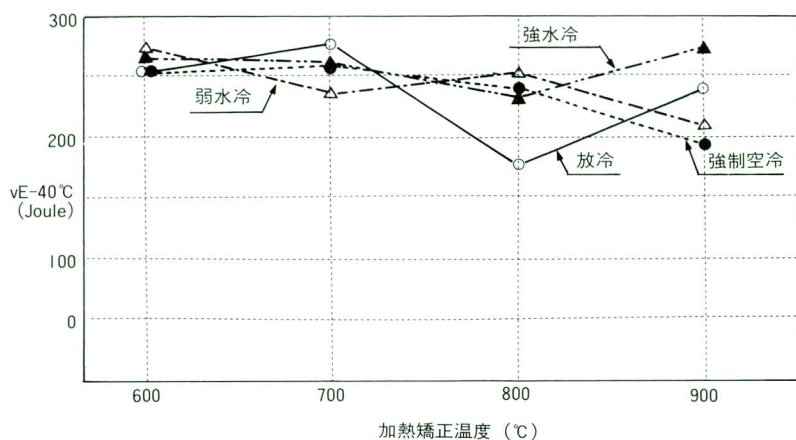


図-13 予熱低減型HT80(t=22) 加熱温度及び冷却方法と衝撃値の関係

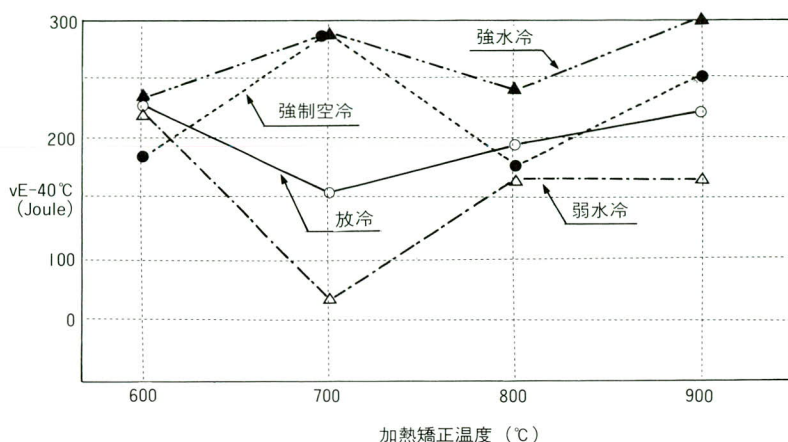


図-14 予熱低減型HT80(t=38) 加熱温度及び冷却方法と衝撃値の関係

り、低温割れ感受性は非常に低下している。さらに溶接工法も自動溶接装置・ロボットによるガスシールドアーク溶接が多用されるようになり、溶接品質の安定化が計れるようになってきている。

低温割れ防止予熱温度の低下は作業環境の改善に役立つばかりでなく、組立精度の向上および予熱変形の防止にも貢献するものと思われる。

本報では、高張力鋼の高強度化の推移の概要と新しいタイプのCu析出型HT80の溶接性試験結果を、従来型HT80と比較しながら報告した。

Cu析出型HT80は熱影響部の最高かたさが H_v350 以下にでき、従来型HT80に較べて低温割れ防止温度を 50°C 低減できることが分かった。また、溶接部の靱性も非常に良好であった。

今後、HT50～HT80についてもTMCPおよび析出硬化処理等により予熱低減型高張力鋼の橋梁への適用が計

られ、予熱温度の低減が可能となるものと思われる。

本報が今後の予熱低減型鋼の橋梁への適用の一石となれば幸いである。

なお、本試験結果は(株)宮地鐵工所千葉工場、新日本製鐵(株)君津製鐵所、日鐵溶接工業(株)の共同研究結果*1)の1部を抜粋して報告した。

最後に、予熱低減可能なCu析出型HT80鋼をロールし、提供して下さった君津製鐵所並びに実験にあたって最初から最後までご尽力頂いた新日本製鐵(株)圧板技術部渡辺部長代理および君津製鐵所品質管理部大橋部長代理、日鐵溶接工業(株)松本部長に深甚なる感謝の意を表する次第である。

*1) 宮地・新日鐵・日溶工：H4.10「予熱低減型HT80鋼の橋梁への適用に関する試験」「その1 予熱低減型HT80と従来型HT80の溶接性等の比較試験」報告書