

技術ノート

橋梁用予熱低減型HT780の適用について

Application of "HT780 Preheat Reduction Type for Bridge"

米 山 徹*
Toru YONEYAMA一 井 延 朗**
Nobuaki ICHII

It is required to preheat more than 100 °C to prevent the low temperature crack, in case of normal HT780. However, it is also pointed out deformation and workability by preheating more than 100 °C for truss of AKASHI KAIKYO Bridge.

Steel makers have developed new "HT780 preheat reduction type" which can reduce preheating under 50°C.

In this report, it is investigated about material quality and weldability of this new steel material.

Key words : AKASHI KAIKYO Bridge, HT 780, preheat reduction type

1. 緒 言

溶接部の冷却速度と継手の冶金的性質には、次のような関係がある。冷却速度が速ければ、硬化組織の生成、低温割れ、機械的な延性および靱性の低下を招く。逆に、冷却速度が遅い場合、調質された鋼材では軟化、脆化の原因となる。

この防止策として、適正な予熱およびパス間温度の設定が必要とされる。表-1は本州四国連絡橋公団鋼橋等製作基準より抜粋した仮付溶接時の最小予熱温度を示すものである。明石海峡大橋の主構にはHT780材が採用されており、これまでのやり方では、表-1により板厚が34 mmの場合には100°Cの予熱が要求される。しかし、実橋製作において主構上下弦材は部材長が28.4 mと長く、100°Cの予熱をしながら弦材を組み立てた場合、予熱温度による伸びがひずみとなって逐次蓄積されて、弦材の組立精度ならびに変形に大きな影響を与えることになる。その影響を低減するためには、大変難しい組立作業が必要となる。また、ダイヤフラムの溶接においても、高い予熱温度のため弦材箱内側は高温となり、作業環境上きわめて好ましくない。

そこでこれらの問題を解決するため、予熱温度を100°Cから50°Cに低減することができる橋梁用予熱低減型

表-1 仮付け溶接の最小予熱温度

(°C)

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	120	150
	CO ₂ 半自動	100	100	100	120

表は手動バーナーによる場合について示した。(本四鋼橋等製作基準)

HT780が高炉メーカー5社により開発され、明石海峡大橋補剛桁に適用されることとなった。その予熱低減型HT780を実橋に適用するにあたり、素材ならびに溶接施工性について事前に試験、検討を行ったので報告する。

2. 予熱低減型HT780について

予熱低減型HT780は、高張力鋼の低温割れ防止対策を従来よりも強化することによって、予熱低減を図っている。そこでまず、高張力鋼の低温割れ防止の考え方について述べる。

*川田工業㈱生産事業部四国工場橋梁部橋梁技術課係長 **川田工業㈱生産事業部溶接研究室

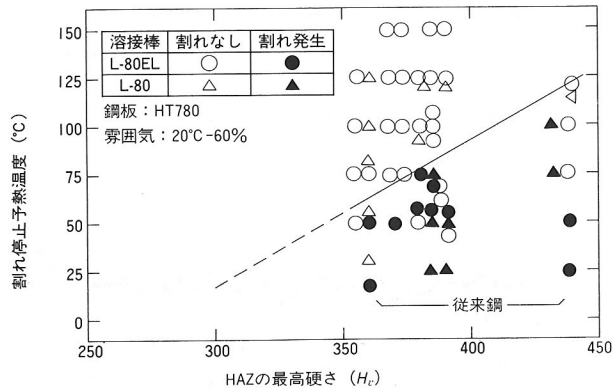


図-1 従来HT780鋼のy型拘束割れ試験の割れ停止予熱温度とHAZ最高硬さの関係³⁾

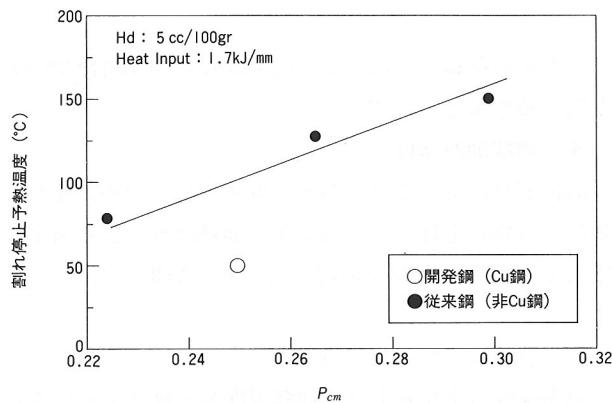


図-2 y型拘束割れ試験の P_{cm} と割れ停止予熱温度の関係³⁾

(1) 高張力鋼の低温割れ防止の考え方

一般に、高張力鋼の低温割れの要因として、

- ① 熱影響部の硬化性
- ② 溶接部の拡散性水素
- ③ 継手の拘束度

の三大要素が挙げられる。

そして、これらの要素を判断する評価式として炭素当量 C_{eq} 、割れ感受性指数 P_w および割れ感受性組成 P_{cm} がある。

a) 炭素当量 C_{eq}

熱影響部の硬化は一般に予熱が高いほど割れやすく、その原因の一つとして鋼材の化学組成の影響が考えられる。ここで鋼の硬化性は、WES（日本溶接協会）で適用されている式として、合金元素を炭素に換算した炭素当量 C_{eq} で示される。

$$C_{eq} = C + Mn/6 + Si/24 + Ni/40 + Cr/5 + Mo/4 + V/14 \quad \dots\dots\dots(1)$$

また、 C_{eq} と最高硬さ H_{max} には、

$$H_{max} (10kgf, H_v) = (666 \times C_{eq} + 40) \pm 40 \quad \dots\dots\dots(2)$$

という関係式が成り立つ。

図-1は、HAZの最高硬さと割れ停止予熱温度の関係を表している図であるが、 $H_{vmax} = 350$ 以下にすることに

表-2 予熱低減型および従来型HT780の特徴比較

	特 徴
Cu析出型 予熱低減 HT780	・焼き入れ性を増して溶接HAZ硬さに影響をおよぼす元素を低減した鋼材。 HAZ硬さ$H_v \leq 350$, $C \leq 0.07\%$, B:フリー ・低Cによる母材の強度不足を確保するために析出強化元素Cuを1%程添加。 ・TMCP技術である制御王延-DQTプロセスの製鋼法を採用して析出強化作用による高強度化と強靱性化を図っている。
低 P_{cm} 型 予熱低減 HT780	・$P_{cm} \leq 0.23\%$, $C \leq 0.09\%$により割れ感受性を確保した鋼材。 ・Nb, Vの添加によって軟化対策を施している。 ・適正な焼き入れ性を確保するために$C_{eq} = 0.45 \sim 0.53\%$の範囲に収めている。 ・TMCP技術によって高強度化および強靱性化を図っている。
従来型 HT780	・強化合金元素を添加して強度を上げかつ焼き入れ性の向上を図っている。 ・靱性改善のため、Ac3変態点まで再度焼き戻しをした調質鋼である。 ・合金元素が多くC_{eq}およびP_{cm}が高い傾向にあり、より高い予熱が必要。

よって割れ停止温度を 50°C 以下に抑えることができる。予熱低減の要因としては、HAZ硬さを抑えることであり、(1), (2)式よりCの低減が大きく効いてくる。

b) 割れ感受性指数 P_w と割れ感受性組成 P_{cm}

一般に、割れ防止予熱温度を決定するのに斜めY型試験が適用されるが、このルート部の割れを評価する式として、溶接割れ感受性指数 P_w が次式で示されている¹⁾。

$$P_w = P_{cm} + H/60 + t/600 \quad \dots\dots\dots(3)$$

なお、 $P_{cm} = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20$

$$+ Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5P \quad \dots\dots\dots(4)$$

H: 拡散性水素, t: 板厚

ここで、 P_w と割れ防止予熱温度の関係は、

$$T(^{\circ}\text{C}) = 1440 P_w - 392 \quad \dots\dots\dots(5)$$

図-2は、従来型HT780の P_{cm} と割れ停止予熱温度の関係であるが、割れ感受性組成 P_{cm} を低減させることによって割れ停止予熱温度は下がってくることを示している。

その他、百合岡らによる炭素等量 $CEN^{2)}$ に基づき必要予熱温度を決定する指標もある。

(2) 予熱低減型HT780の特徴

予熱低減型HT780は、橋梁用Cu析出型予熱低減HT780と橋梁用低 P_{cm} 型予熱低減HT780の2種類のタイプがある。表-2に従来型HT780を含めてそれぞれの特徴を示す。

3. 素材の検討

素材の性能を確認するために、Cu析出型および低 P_{cm} 型について表-3に示す試験を行った。

(1) 化学成分

表-4は、今回試験した鋼材の化学成分表である。前項でも述べたように、Cu析出型においては、 $C = 0.06\%$ 、

表-3 試験項目および試験内容

試験項目	試験内容
硬さ試験	板厚方向, $H_v10\text{kgf}$
衝撃試験	試験温度 -60°C , -40°C , -15°C , 0°C
線状加熱試験	加熱温度 700°C , 750°C , 800°C ・引張試験 (引張強度および耐力)・硬さ試験 (板厚方向) ・衝撃試験 (試験温度, -40°C)・マクロ試験

Cu=0.97%, B:フリー, 低 P_{cm} 型においては, C=0.07%, P_{cm} =0.22%と設計どおりになっている。

(2) 硬さ

図-3は, 鋼材の板厚方向硬さ分布を測定した結果であるが, 前項で述べたように, 従来型に比べて予熱低減型は両者とも $H_v=300$ 前後と低い硬さを呈している。また, Cu析出型と低 P_{cm} 型の硬さ分布を比較した場合, Cu析出型は表面層において中心より50ぐらい高い表面硬化を示しているが, これはCu析出強化による影響が出ているものと考えられる。低 P_{cm} 型においては均一になっており, 直接焼き入れ (DQ) の効果が十分出ており溶接性に良い。

(3) 靱性

図-4は, 予熱低減型のVノッチシャルピー衝撃遷移曲線を示した図 (採取位置 $t/4$, L方向) であるが, 鋼材規

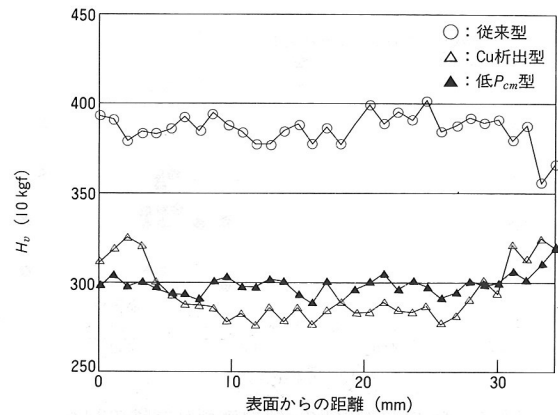


図-3 鋼材の板厚方向の硬さ分布

格である -40°C で, 両者とも200J前後と良好な靱性を示している。

また破面遷移温度は, この試験結果ではCu析出型の方が低い値を呈している。

(4) 線状加熱特性

溶接変形による部材のひずみ取りを行うために線状加熱による矯正を行うのであるが, 加熱温度による引張強度および靱性の影響を検討した。その結果を表-5に示す。

a) 引張強度および耐力

引張強度および耐力は, 加熱温度の上昇とともに下が

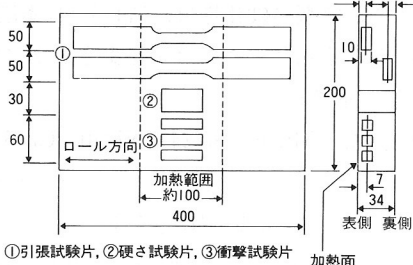
表-4 化学成分

化学成分 鋼種	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	B	C_{eq}^{*1}	P_{cm}	備考
Cu析出型	0.06	0.26	1.34	0.007	0.002	0.97	1.03	0.46	0.31	0.04	—	0.57	0.25	A社
低 P_{cm} 型	0.07	0.28	1.00	0.006	0.001	0.02	1.00	0.70	0.40	0.51	0.0015	0.52	0.22	B社
従来型 ^{*2}	0.11	0.24	0.93	0.006	0.001	0.17	0.98	0.48	0.37	0.04	—	0.49	0.25	A社

* 1) HBS鋼材規格より算出

* 2) 参考

表-5 加熱矯正試験結果

鋼 種	加熱温度	採取位置	引 張 試 験			衝 撃 試 験	試 験 片 採 取 位 置
			0.2%耐力(N/mm ²)	引張強さ(N/mm ²)	伸び(%)	吸収エネルギー(J)	
Cu析出型	700℃	表側	786	833	20.5	242	
		裏側	794	841	22.6		
	750℃	表側	775	826	19.5	242	
		裏側	797	843	22.2		
	800℃	表側	750	815	18.1	249	
		裏側	793	837	23.9		
低 P_{cm} 型	700℃	表型	768	816	17.3	240	①引張試験片, ②硬さ試験片, ③衝撃試験片 加熱面
		裏側	787	841	22.6		
	750℃	表側	751	806	17.0	233	
		裏側	783	837	21.9		
	800℃	表側	712	778	16.5	119	
		裏側	782	840	22.0		
規 格 値			≥690	≥780	≥16	≥47J: -40℃	

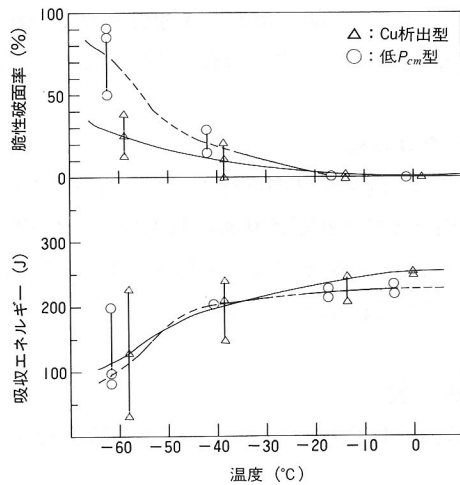


図-4 Vノッチシャルピー衝撃遷移曲線

るが、750℃以下において十分高い強度を呈しており、750℃以下の線状加熱（HBS規格）に問題はない。

b) 靱性

吸収エネルギーは、低 P_{cm} の800℃を除いてではあるが加熱することによって母材（図-4）よりも上がっており、予熱低減型はひずみ時効後、靱性は向上する傾向にある。

c) 加熱直下の硬さ分布

図-5は、750℃におけるCu析出型および低 P_{cm} 型の硬さ分布であるが、Cu析出型は、熱影響部では硬さが低くなり図-3で示す表面の硬化が加熱によって改善されたことが顕著にみられた。

逆に、低 P_{cm} 型では熱影響部の境界部の硬さは、溶接HAZ部にみられるような弱い軟化の現象がみられる。

4. 溶接性能の検討

(1) 最高硬さ試験

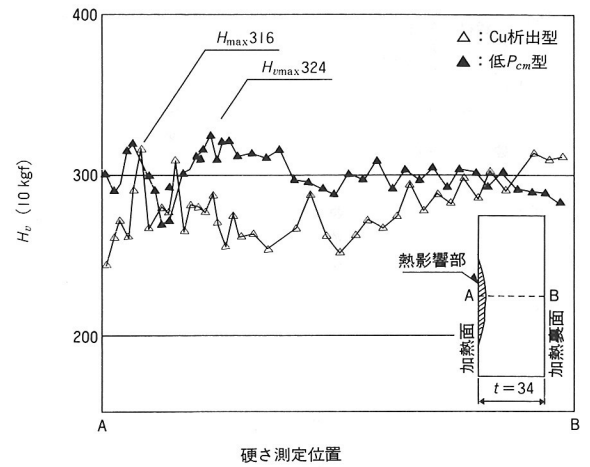


図-5 加熱矯正の鋼材の板厚方面の硬さ分布

低温割れの目安として、最高硬さ試験を行った。図-6は予熱低減型必要予熱温度50℃における最高硬さ試験の結果である（本四鋼橋等製作基準 $H_{max} \leq 420$ ）。

Cu析出型は、設計どおり最高硬さ $H_{vmax} \leq 350$ に収まっ

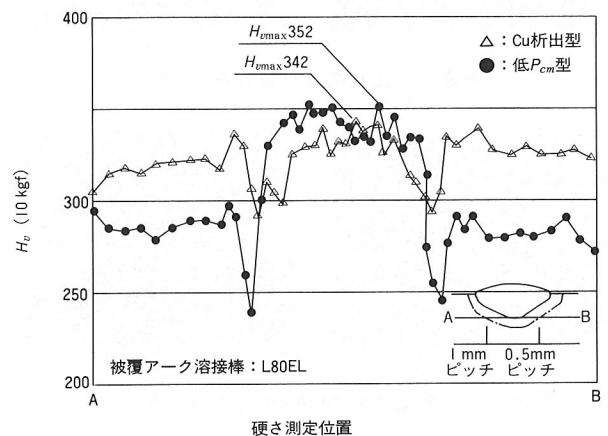
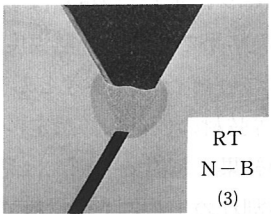
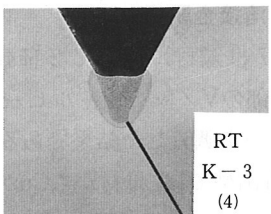


図-6 最高硬さ試験，硬さ分布

表-6 斜めY型試験結果

溶 材	予熱温度	鋼 種	表面割れ率(%)	断面割れ率(%)	ルート割れ率(%)	断面マクロ写真(一例)
被覆アーク 溶接棒 L80EL (4.0φ)	RT	Cu析出型	0	0	0	
		低 P_{cm} 型	0	0	0	
	50℃	Cu析出型	0	0	0	
		低 P_{cm} 型	0	0	0	
	75℃	Cu析出型	0	0	0	
		低 P_{cm} 型	0	0	0	
ソリッド ワイヤ YM-28 (1.2φ)	RT	Cu析出型	0	0	0	
		低 P_{cm} 型	0	0	0	
	50℃	Cu析出型	0	0	0	
		低 P_{cm} 型	0	0	0	
	75℃	Cu析出型	0	0	0	
		低 P_{cm} 型	0	0	0	

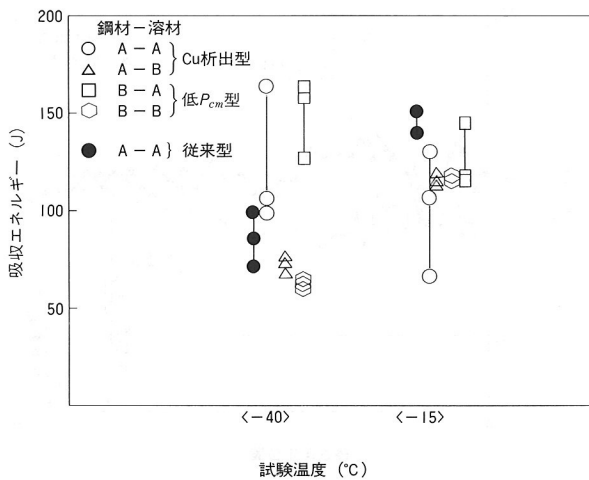
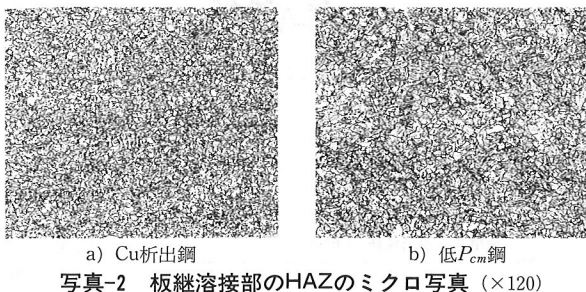
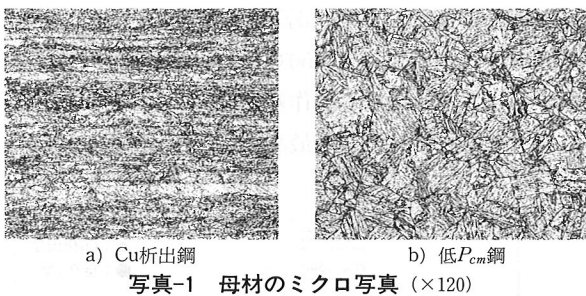


図-7 溶接金属部のVノッチシャルピー吸収エネルギー



ており、室温でも H_{max} 345であった。

低 P_{cm} 型も最高硬さ試験結果は良好であるが、Cu析出タイプに比べて軟化が大きく生じており、従来型のモディファイトタイプであることがうかがえる。

(2) 斜めy型試験

前ページに示した表-6は予熱温度確認のための斜めy型試験結果である。予熱温度はそれぞれ室温、50°C、75°Cについて行い、参考としてソリッドワイヤ（本四HT80等弦材の仮付条件想定）でも行った。

この結果、室温でも割れは見受けられず、予熱低減型は低温割れの生じにくい材料であることが確認できた。

(3) 溶接金属部の靱性

図-7は鋼材に対して2種類の溶材を組み合わせ、DEPO部のVノッチシャルピー衝撃試験を行い、吸収エネルギーを調査した結果である。

Cu析出型では、母材からCuが希釈されてDEPO部で化学成分Cu=0.25%程度となったが、衝撃性には影響はみ

られない。また、一部-40°Cで衝撃性が良いのが見受けられるが、溶材にNiを多く含有していることなどが考えられる。

(4) ミクロ写真

写真-1は、両タイプの母材のミクロ写真である。写真-2は、両タイプの板継溶接部のHAZのミクロ写真である。HAZ部は、両タイプとも下部ベイナイト組織を呈しており、HAZ靱性が良好である。

5. 結 言

予熱低減型HT780材について以下に特徴をまとめた。

- ① Cu析出タイプは、HAZ硬さ低減を基本とし、C低減、BフリーのCu析出強化材である。
- ② 低 P_{cm} タイプは、 $C \leq 0.09$ 、 $P_{cm} \leq 0.23$ に抑えた従来型のモディファイトタイプである。
- ③ 予熱低減材は靱性の良い鋼材である。
- ④ 両タイプとも素材の硬さが H_b300 前後であり、従来鋼に比べて溶接性は良い。
- ⑤ 両タイプとも耐低温割れ性の良い鋼材である。

以上、予熱低減材を適用するにあたり本四鋼橋等製作基準に沿った通常の管理で良いことが確認できた。

参考文献

- 1) 伊藤・別所：高張力鋼の溶接割れ感受性指数について（第2報）溶接学会誌，Vol.38, No.10, p.1134, 1969.
- 2) N.Yurioka *et al.* : Determination of necessary preheating temperature in steel welding, *Welding Journal*, Vol.62, No.6, p.147s, 1983.
- 3) 技術セッション「溶接構造物に対する新技術の挑戦」, (社)溶接学会関西支部, pp.34~50.