

予熱低減型 HT980 鋼板および溶接材料の特性と 水圧鉄管への適用性*

川崎製鉄技報
30 (1998) 3, 174-180

Properties of HT980 Steel Plates and Welding Materials with Low Cold Cracking Susceptibility and Their Applicability to Penstocks



板倉 教次
Noritsugu Itakura
技術研究所 厚板・条
鋼研究部門 主任研究
員(掛長)



安田 功一
Koichi Yasuda
技術研究所 溶接・鉄
粉研究部門 主任研究
員(課長)



青木 雅弘
Masahiro Aoki
水島製鉄所 管理部
厚板・鋳鍛管理室 主
査(掛長)

要旨

水圧鉄管用として、割れ阻止予熱温度低減化要求に応え、板厚 50 および 75 mm の予熱低減型 HT980 鋼板およびその SMAW, SAW, MAG 溶接および TIG 溶接用材料を開発した。y 形溶接割れ試験の割れ阻止予熱温度は SMAW で 75°C (吸湿なし、雰囲気: 30°C, 湿度 80%)、また MAG および TIG 溶接では 50°C 以下であり、HT780 鋼と同等の耐溶接割れ感受性を有している。母材および溶接継手の機械的特性は目標を十分に満足した。また作用応力 400 MPa, 0°C の条件で、溶接部は長さ 30 mm, 深さ 10 mm の表面欠陥からの脆性破壊発生阻止性能を、母材は WES3003A 種基準を満たす脆性破壊停止性能を有していた。

Synopsis:

50 and 75 mm thick HT980 steel plates and welding materials for SMAW, SAW, MAG and TIG welding have been developed to meet the demand of saving preheating costs in constructing penstocks. Preheating at 75°C prevented cold cracking in a y-slit crack test performed by SMAW in a stringent atmosphere of 80% humidity and 30°C. No cracking was also observed in y-slit crack tests performed by MAG and TIG welding with a preheating temperature of 50°C. These results prove that the weldability of the new type HT980 is as good as that of HT780. The base metal and the welded joints satisfied the target mechanical properties. The fracture toughness of the welded joints proved that the applied stress of 400 MPa does not initiate brittle fracture from a 30 mm long and 10 mm deep surface crack at 0°C. The crack arrest toughness of the base metal satisfied the WES3003 Grade A specification.

1 緒 言

揚水発電所用水圧鉄管に使用する鋼材では、すでに HT780 鋼までが実用にいたっているが、発電所の大容量化と高落差化に対応するため、HT980 鋼の実用化が強く望まれている。これまでに HT980 鋼については多くの基礎的な鋼材開発¹⁾ および必要特性に関する研究が行われてきたが、割れ阻止予熱温度が十分とは言えず、実使用されるにはいたっていない。そこで、割れ阻止予熱温度低減化の要求に応えるため、溶接材料を含めた HT980 鋼の総合的开发を行い、上記の実用化ニーズに適合し得る板厚 50 および 75 mm の予熱低減型 HT980 鋼およびその溶接材料を開発した。

2 開発目標

予熱低減型 HT980 鋼板およびその溶接継手の開発目標を Table 1 に示す。板厚は水圧鉄管の斜管を想定し 50 と 75 mm とした。鋼

板強度に関する目標性能は、WES3001-1996²⁾ の HW885 に準拠して設定した。溶接継手部の引張強さは鋼板と同等とした。衝撃特性については鋼板および溶接継手ともに、HT780 鋼と同等以上の性能となるように設定した。また、溶接施工性を考慮して従来の HT780 鋼と同等の性能を持つよう割れ阻止予熱温度を設定した。

破壊靱性に関しては、溶接部は 0°C で脆性破壊が発生しないこと、および、母材は 0°C で脆性き裂の伝播を停止することと水圧鉄管における基本的考え方がある³⁾。そこで、母材の脆性き裂伝播停止靱性の目標値を、WES3003-1995⁴⁾ の A 種判定に基づき設定した。使用応力を 400 MPa とすると最低使用温度である 0°C における脆性き裂伝播停止靱性の目標値は 224 MPa・m^{1/2} となる。一方、溶接継手の破壊靱性の目標値は、WES2805-1997⁵⁾ に基づいて設定した。水圧鉄管溶接部に存在する欠陥としては、実工事での超音波探傷による非破壊検査を想定して水門鉄管技術基準における合格基準 (JIS Z 3060-1998 の等級 2 級) での最大欠陥評価寸法 (長さ 30 mm) を持つ表面欠陥 (深さ 10 mm) を想定した。この欠陥の欠陥特性寸法 (a) は板厚 50 および 75 mm の場合、それぞれ 6.78 および 6.65 mm となる。欠陥に作用する評価歪は、使用応力を 400 MPa とし、残留応力の影響を最大に見積り (降伏歪の 0.6 倍)、角変形

* 平成10年7月21日原稿受付

Table 1 Target properties of HT980 steel plates and their welded joints

Thickness (mm)	Base metal							Welded joint				Preheat temp. to prevent cracking* (°C)
	YS (MPa)	TS (MPa)	El (%)	RA (%)	vE (J)	vTrs (°C)	Crack arrest fracture toughness at 0°C (MPa · m ^{1/2})	TS (MPa)	vE (J)	vTrs (°C)	CTOD at 0°C (mm)	
50	≧ 885	950-1 130	≧ 12	≧ 25	vE - 55°C ≧ 47	≦ -55	≧ 224	≧ 950	vE - 10°C ≧ 47	≦ -10	≧ 0.098	≦ 75
75	≧ 885	950-1 130	≧ 12	≧ 25	vE - 60°C ≧ 47	≦ -60	≧ 224	≧ 950	vE 0°C ≧ 47	≦ 0	≧ 0.081	≦ 75

*Atmosphere: 30°C, 80%, SMAW: Using as-dried electrode

および目違い量を水門鉄管技術基準の許容最大値（角変形 = 2.5°, 目違い = 6 mm）として求めると、板厚 50 mm の鋼板の場合 6.491×10^{-3} 、板厚 75 mm の鋼板の場合 5.835×10^{-3} となる。欠陥特性寸法と評価値から、破壊靱性の目標値（CTOD 値）は板厚 50 mm の鋼板の場合 0.098 mm、板厚 75 mm の鋼板の場合 0.081 mm となる。

3 予熱温度低下のための材料設計

3.1 予熱温度低下の考え方

一般的に、強度が低い（たとえば HT780 鋼）場合は、溶接熱影響部（HAZ）の割れ感受性が優先的に予熱温度を決定するのに対して、強度上昇とともに予熱温度決定位置は HAZ から溶接金属に移行してくる。HT980 鋼の強度レベルでは、予熱温度低下を図るには、母材の割れ感受性の抑制（溶接割れ感受性指数（Pcm）の低下）に加え、溶接金属の割れ感受性の上昇を抑えることも大きな課題となる。また、鋼板の低 Pcm 化は HAZ の軟化を助長するため、HAZ 軟化の抑制やそれを考慮した継手強度の設計も必要である。このように、HT980 級鋼板の予熱低減には、鋼板と溶接材料を同時に開発する総合的な開発が不可欠である。

3.2 溶接金属の設計

前述のように、HT980 級鋼において、予熱温度の低減を図るには、継手溶接金属の強度および靱性の確保と同時に、とくに初層溶接金属の耐低温割れ性の向上が必要となる。

まず継手溶接金属の強度と靱性について検討する。Fig. 1 に化学組成の異なるサブマージーク溶接（SAW）、マグ溶接（MAG）、被覆アーク溶接（SMAW）の継手溶接金属硬さと強度および靱性の関係を示す。目標の強度と靱性を満足させる継手溶接金属の硬さ Hv は 320~340 である。

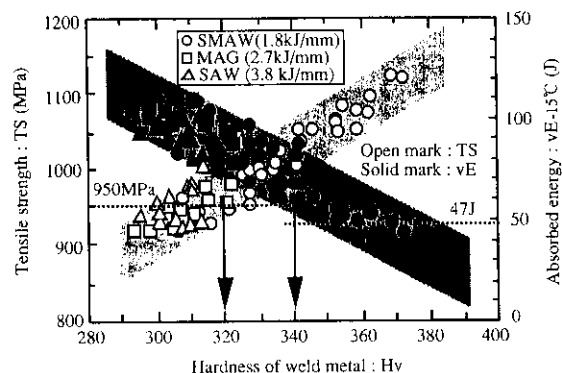


Fig. 1 Relation between hardness, tensile strength and Charpy absorbed energy of weld metal in the multi-pass welded joint

次に、硬化性と拡散性水素量の両面で最も過酷となる SMAW について、その初層溶接金属の耐低温割れ性向上の設計指針を述べる。拡散性水素量と溶接金属硬さを変化させた SMAW 棒を使用して低温割れの発生を調査した例を Fig. 2 に示すが、耐低温割れ性を向上するには、継手溶接金属で強度および靱性を満足する範囲において初層溶接金属の硬さを低減することが重要となる。初層溶接金属と継手溶接金属では、溶接前温度（予熱温度とパス間温度）、母材希釈率および後続溶接パスによる再熱の有無などにより、同一溶接材料を用いてもその硬さが異なるため、それぞれについて溶接金属の炭素当量と硬さの関係を把握する必要がある。

Fig. 3 に、継手溶接金属における炭素当量 Ceq (IIW) (Ceq) と硬さの関係を示す。継手溶接金属の強度および靱性を満足する Ceq は、0.78 mass% 程度である。継手の溶接における母材希釈率は平均で 12% 程度であったので、母材の Ceq を 0.63 mass% とすると、目標の強度および靱性を満足する SMAW 棒の全溶着金属の Ceq は 0.80 mass% となる。一方、y 形溶接割れ試験の溶接金属の硬さは、Fig. 4 に示すように Ceq が増加すると飽和し、その取れん値はマ

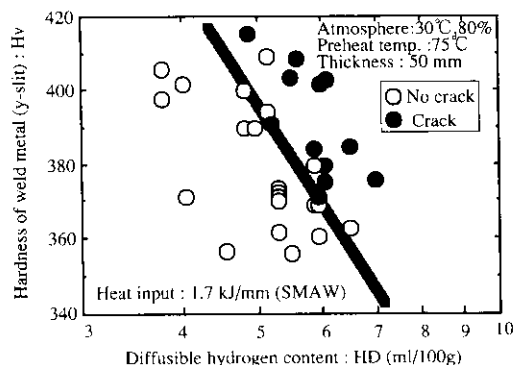


Fig. 2 Effects of diffusible hydrogen content and hardness of weld metal on y-groove weld cracking (preheating at 75°C)

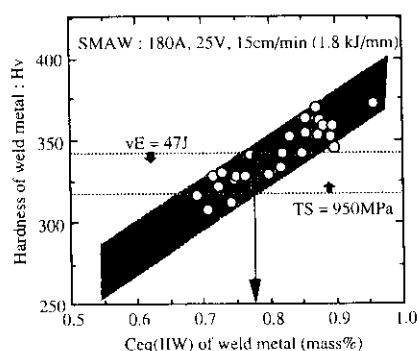


Fig. 3 Effect of Ceq (IIW) on hardness of weld metal in the multi-pass welded joint, where $Ceq(IIW) = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Cu + Ni)/15$

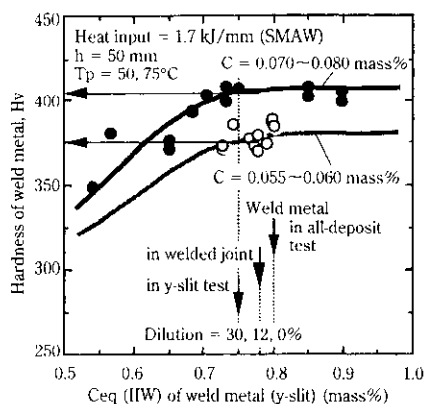


Fig. 4 Effects of Ceq (IIW) and carbon content on hardness of weld metal employed in the y-groove weld cracking test

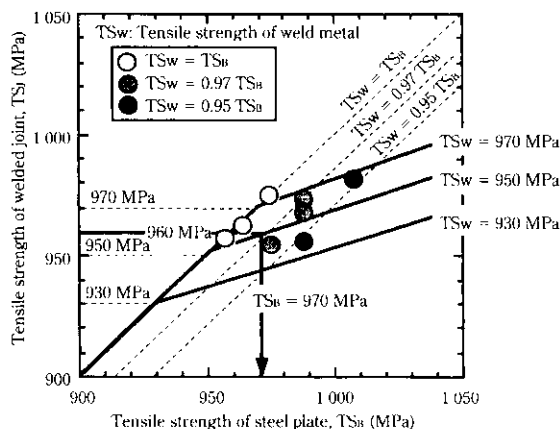


Fig. 5 Estimation of tensile strength of even- and under-matching welded joints in accordance with JIS Z 3121

ルテンサイト主体組織となるため C 量に依存する。すなわち、高 Ceq の範囲では C 量によって溶接金属の硬さを制御できる。y 形溶接割れ試験における溶接金属の母材希釈率の測定値はおおよそ 30% であり、全溶着金属の Ceq が 0.80 mass% の SMAW 棒を y 形溶接割れ試験に適用した場合、その溶接金属の Ceq は 0.75 mass% 程度になる。その硬さは、C 量が 0.070~0.080 mass% の溶接金属で Hv410 であるのに対して、C 量が 0.055~0.060 mass% の溶接金属では Hv375 まで低減できる。

以上述べたことより、耐低温割れ性に優れた SMAW 棒の設計目標を以下のように設定した。すなわち、乾燥直後の溶接棒を使用した場合に 30°C、湿度 80% の雰囲気において割れ阻止予熱温度 75°C を満足するためには、y 形溶接割れ試験における溶接金属の C 含有量を 0.055 mass% として硬さを Hv375 にし、またそのときの拡散性水素量の上限を Fig. 2 の結果から 5.5 ml/100 g とした。

3.3 鋼板の設計

軟質溶接継手でも、実構造物のような十分な幅拘束が期待できる場合は継手強度は保証しうるが⁹⁾、JIS Z 3121 の矩形継手引張試験のような有限幅の試験では継手の幅方向拘束が不十分となり、目標継手強度達成は困難となる。そこで、JIS Z 3121 矩形引張試験片による継手強度に及ぼす鋼板強度および溶接金属強度の影響を、4.5 kJ/mm 入熱の SAW 法を用いて調査した。Fig. 5 に結果を示す。図中のプロットは実験点であり、それをもとに溶接金属強度が 930、950 および 970 MPa と一定とした場合を直線近似して示した。この

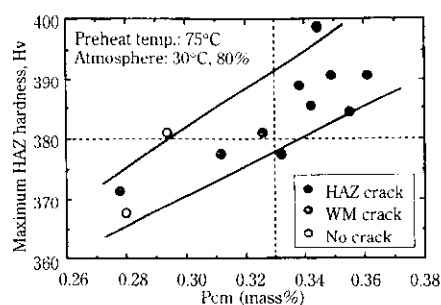


Fig. 6 Relation between Pcm value of HT980 steel plate and the maximum HAZ hardness obtained in the y-groove weld cracking test

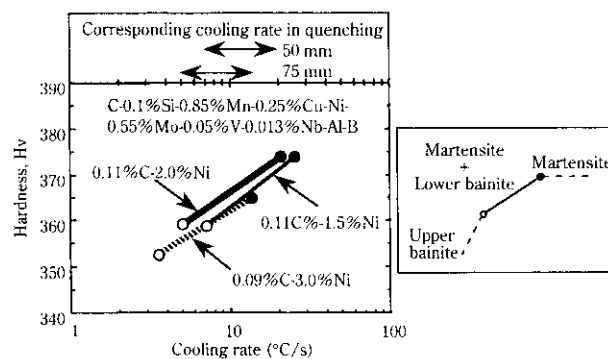


Fig. 7 Chemistry and cooling rate generating martensite-and-lower bainite microstructure

結果から、溶接金属を目標下限値 (950 MPa) とした場合においても、鋼板強度下限を 970 MPa まで高めることで、960 MPa 以上の安定した継手強度を得ることが可能である。

母材の設計は、上記の継手強度確保のための強度下限を念頭に、HAZ での低温割れを回避し得る Pcm 値で行う。Fig. 6 に、鋼板の Pcm 値と y 形溶接割れ試験における HAZ 硬さの関係と割れ発生特性を示す。HAZ の割れが起らない上限 Pcm は 0.33 mass% である。さらに、鋼板の強度と靱性の観点から以下の 5 点を考慮する。

- (1) 適正 C 量による焼入れ性確保と HAZ の耐割れ性の向上
- (2) 低 Si による HAZ 靱性の改善
- (3) P, S など不純物低減による母地の強靱化
- (4) 適正 Ni 量による焼入れ性の確保と靱性向上
- (5) V, Nb 添加による HAZ 軟化抵抗の向上

さらに、ミクロ組織を強度と靱性のバランスから最適なマルテンサイトと下部ベイナイトの混合組織⁷⁾にするためには、板厚方向に冷却速度が異なることを考慮して、その冷却速度範囲内で適正な焼入れ性が確保されるように化学組成を調整する。Fig. 7 にマルテンサイトと下部ベイナイトの混合組織が得られる冷却速度範囲を示す。

4 鋼板および溶接継手特性

前章における検討から、予熱低減型 HT980 鋼板および溶接材料の工場試作を行い、母材特性および溶接継手特性を評価した。

4.1 供試鋼板および溶接材料

Table 2 に、今回製造した鋼板と溶接材料の化学組成を示す。板厚方向すべての位置で適正な焼入れ性を確保し、マルテンサイトと下部ベイナイトの混合組織とするため、Ni 量の目標を変えており、

Table 2 Chemical compositions of steel plates and welding materials

Steel or welding material	Thick- ness (mm)															(mass%)		
		C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Nb	Al	B	Ceq (WES)*1	Ceq (IIW)*2	Pcm*3	
Steel A	50	0.11	0.09	0.85	0.007	0.001	0.25	1.52	0.55	0.56	0.050	0.013	0.069	0.0011	0.55	0.60	0.27	
Steel B	75	0.11	0.10	0.88	0.006	0.001	0.25	1.99	0.53	0.53	0.047	0.014	0.058	0.0011	0.55	0.63	0.28	
KSA-146*4 (SMAW)	—	0.05	0.62	1.55	0.009	0.005	0.02	3.19	0.90	0.48	0.012	0.008	0.008	0.0004	0.72	0.80	0.28	
KT-100 (TIG) KM-100 (MAG)	—	0.05	0.46	1.92	0.002	0.002	0.31	3.63	1.14	0.54	0.002	0.003	0.066	0.0002	0.84	0.97	0.33	
KW-103D (SAW)	—	0.06	0.36	2.20	0.005	0.002	0.09	3.33	1.10	0.67	0.002	0.002	0.055	0.0001	0.91	1.01	0.34	

*1 Ceq (WES) = C + Si/24 + Mn/6 + Ni/40 + Cr/5 + Mo/4 + V/14

*2 Ceq (IIW) = C + Mn/6 + Cu/15 + Ni/15 + Cr/5 + Mo/5 + V/5

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

*4 KSA-146: Diffusible hydrogen content = 4.5 ml/100 g (as dried condition)

Table 3 Mechanical properties of steel plates

Steel	Thickness (mm)	Location	Direction	Tensile properties				V Charpy impact test properties					
				YS (MPa)	TS (MPa)	El (%)	RA (%)	Base metal			Strain aging* test		
								Test temp. (°C)	vE (J)	vTrs (°C)		vTrs (°C)	
A	50	1/4 t	L	933	972	23	71	-55	167	-66	-68		
			C	926	970	23	70		165	-63	—		
		1/2 t	L	927	972	23	71		190	-88		—	
			C	933	975	22	67		175	-66	—		
B	75	1/4 t	L	929	972	23	70	-60	183	-92		-86	
			C	935	978	22	69		153	-95	—		
		1/2 t	L	924	974	23	70		176	-96		—	
			C	921	965	23	68		155	-94			—
			Z	916	959	19	64		90	-72			
											—		
Target value				≥ 885	950~1 130	≥ 12	≥ 25	—	≥ 47	—		—	

*Strain aging : 5% + 250°C × 1 h

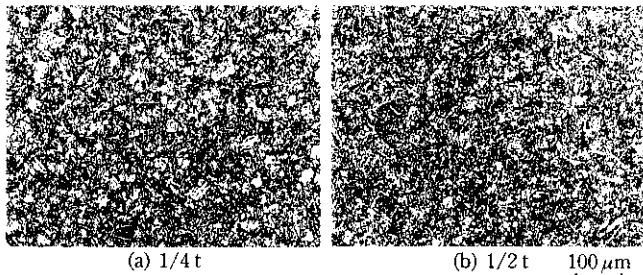


Photo 1 Microstructure of steel plate (steel B)

板厚 50 mm では 1.52 mass%，板厚 75 mm では 1.99 mass% の実績値である。鋼板はいずれも、厚板圧延の後に再加熱焼入れ焼き戻しにより製造した。

4.2 母材特性

4.2.1 基本特性

母材の板厚各位置、方向での引張試験およびシャルピー衝撃試験の結果を Table 3 に示す。機械的特性は目標性能を十分に満足し、歪時効後のシャルピー衝撃特性は歪量 5% でほとんど変化していない。

母材のミクロ組織を Photo 1 に示す。1/2 t 部、1/4 t 部ともに、目標のマルテンサイトと下部ベイナイトの混合組織を示している。

4.2.2 溶接割れ感受性

y 形溶接割れ試験の結果を Fig. 8 に示す。SMAW の割れ阻止予

	Steel	Thickness (mm)	Welding method	Conditions for moistening electrode
○	A	50	SMAW	1 h in air
●			As dried	—
◆	B	75	MAG	—
□			SMAW	1 h in air
■			As dried	—
▲			TIG	—

*Atmosphere ▼: 18°C, 60%
Others: 30°C, 80%

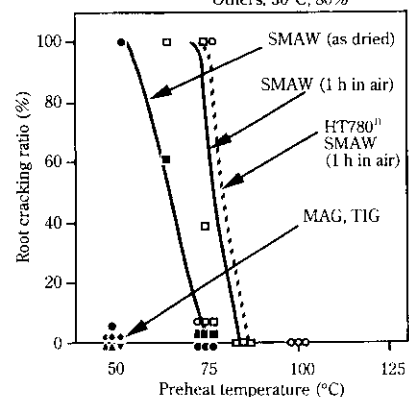
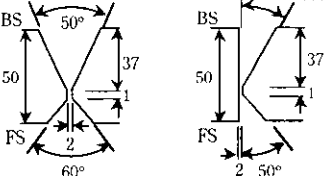
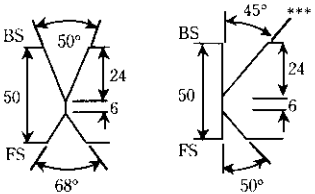
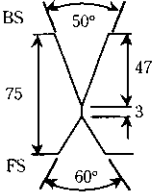
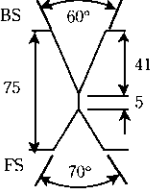
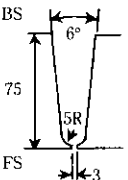


Fig. 8 Results of the y-groove weld cracking test

熱温度は、吸湿なしで 75°C、吸湿ありで 85~100°C であり、HT780 鋼と同等であった。MAG および TIG 溶接では、予熱温度 50°C で割れの発生は見られなかった。

Table 4 Welding conditions

Steel	Thickness (mm)	Welding method	Welding material	Groove shape (mm)		Cur. (A)	Volt. (V)	Speed (cm/min)	Heat input (kJ/mm)
A	50	MAG	KM-100			270~310	33~35	22~27	2.1~2.7
		SAW	KB80C KW-103D			600~650	32~36	30~40	3.1~4.4
B	75	SMAW	KSA-146			180~250	23~25	15~20	1.5~2.5
		SAW	KB80C KW-103D			420~500	30~32	30~35	2.2~3.2
		TIG* + MAG**	KT-100* + KM-100**		TIG	60~250	9~11	2~9	1.4~1.9
					MAG	110~310	18~26	30	1.4~2.1

*Root passes **Fill and cap passes ***For Charpy impact test and CTOD test

Table 5 Mechanical properties of welded joints

Steel	Thickness (mm)	Welding method	Tensile properties		V Charpy impact test properties			
			TS (MPa)	Location of fracture	Test temp. (°C)	vE (J)		
						WM	FL	Center of HAZ
A	50	MAG	1 003	HAZ-WM	- 10	76	159	160
		SAW	964	HAZ-WM		79	66	197
B	75	SMAW	995	HAZ-WM	0	89	165	168
		SAW	996	HAZ-WM		81	130	183
		TIG + MAG	1 011	HAZ-WM		63	111	146
Target value			≥ 950	—	—	≥ 47		

4.3 溶接継手特性

4.3.1 溶接条件

Table 4 に溶接条件を示す。SMAW, MAG, SAW および初層 TIG+ 積層自動 MAG 溶接の溶接継手を製作し、特性評価を実施した。

4.3.2 基本特性

Table 5 に、溶接継手の引張試験およびシャルピー衝撃試験結果を示す。引張試験の破断位置は溶接金属から HAZ にかけてであり、いずれも目標強度を満足している。シャルピー衝撃試験においても、溶接金属、フュージョンライン（切欠位置に占める溶接金属と母材の比が 1, FL）、HAZ 中央のいずれの位置においても目標特性を満

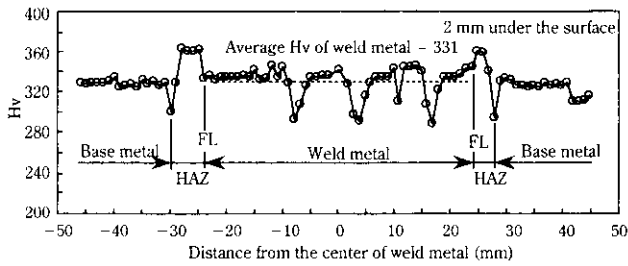


Fig. 9 Hardness distribution in welded joints (Steel B, SAW)

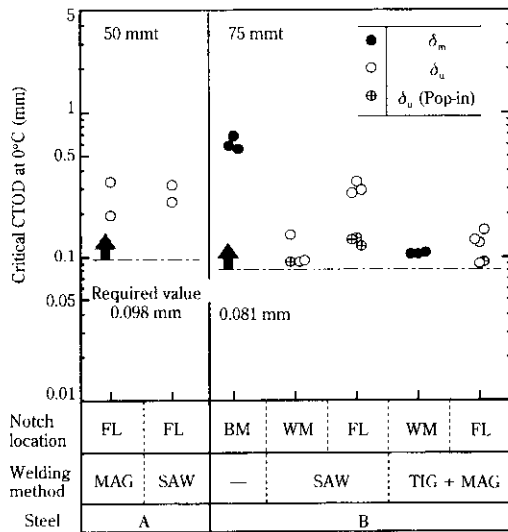


Fig. 10 CTOD test results for base metal and welded joints of HT980 steel plates

足した。Fig. 9 に SAW 継手の硬さ試験結果の例を示す。HAZ 硬化あるいは軟化は軽微であり、また溶接金属の硬さ平均値は目標硬さ (Hv320~340) を満足し、母材と同等の Hv331 であった。

4.4 鋼板および溶接継手部の破壊靱性

4.4.1 CTOD 試験結果

WES1108-1995⁹⁾ に基づき、0°C において鋼板およびその溶接継手の CTOD 試験を実施した。Fig. 10 に結果を示す。母材は延性破壊で最高荷重に達しており、限界 CTOD は 0.56 mm 以上であった。溶接継手の限界 CTOD は、板厚 50 mm 鋼板の溶接継手の FL で 0.199 mm 以上であり、また板厚 75 mm 鋼板の溶接継手の溶接金属で 0.105 mm 以上、FL で 0.090 mm 以上であり、いずれも要求破壊靱性値を満足した。また、水圧鉄管一般管胴部に付与される歪が曲げでなく引張であることを考えると、本評価にはさらに安全裕度が含まれていることになる⁹⁾。

4.4.2 T 継手広幅引張試験結果

SAW と初層 TIG+ 積層自動 MAG 溶接による T 継手を対象として、広幅引張試験を 0°C において実施した。試験片形状を Fig. 11 に、試験結果を Table 6 に示す。最大荷重時の実断面応力 (σ_{net}) は 945 MPa であり、0°C における鋼板の降伏強さ (937 MPa) を上回った。最大荷重時の限界 CTOD は 0.496 mm であり、要求破壊靱性値および CTOD 試験で得られた値よりも大きな値であった。HT980 鋼板の溶接継手は、溶接部に対して要求される脆性破壊発生阻止性能を満足している。

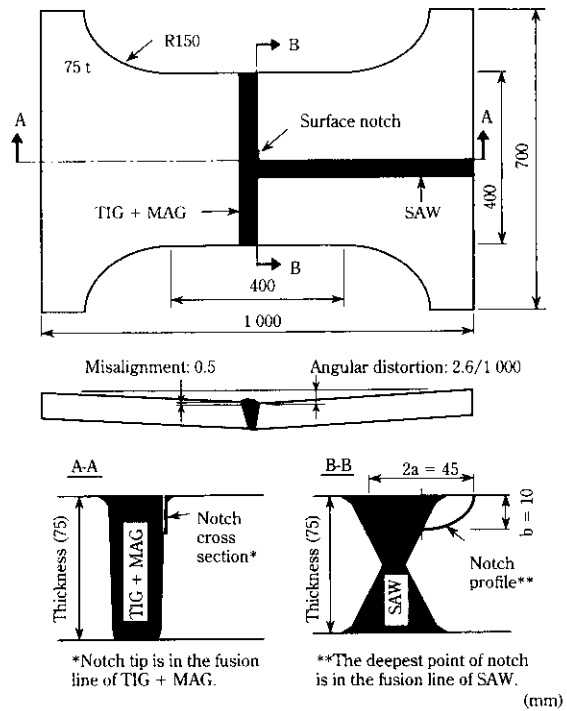


Fig. 11 Geometry of surface notched wide plate tensile test specimen

Table 6 Surface notched wide plate tensile test result for welded joint

Steel	Test temp. (°C)	Maximum stress		Critical CTOD δ_m (mm)	Overall strain		
		Gross (MPa)	Net (MPa)		Gage length 100 mm	Gage length 200 mm	Gage length 400 mm
B	0	936	945	0.496	0.64	0.94	0.92

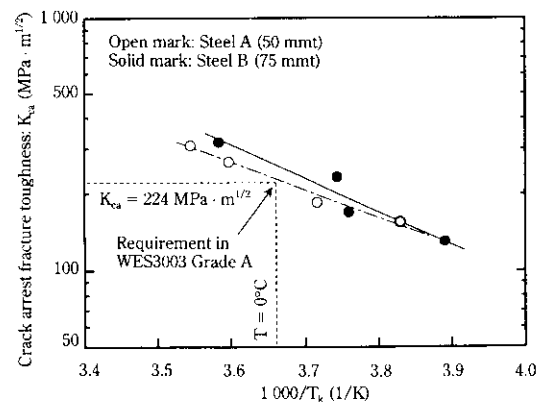


Fig. 12 Temperature dependence of crack arrest fracture toughness for HT980 steel plates

4.4.3 ESSO 試験結果

母材の ESSO 試験は、日本溶接協会鋼種認定委員会「鋼種認定試験方法」¹⁰⁾ に準拠して実施した。試験結果を Fig. 12 に示す。開発鋼板は、母材に要求される脆性き裂伝播停止靱性を満足する性能を有している。

5 結 言

割れ阻止予熱温度低減化の要求に応え、溶接材料を含めた HT980 鋼の総合的開発を行い板厚 50 および 75 mm の予熱低減型 HT980 鋼板およびその SMAW, SAW, MAG 溶接および TIG 溶接用材料を開発した。その結果、次の結論を得た。

- (1) 開発鋼板の機械的特性は、目標特性を十分に満足するとともに優れた均質性を示した。
- (2) 溶接継手特性は、目標特性を十分に満足した。
- (3) y 形溶接割れ試験の割れ阻止予熱温度は SMAW で 75°C (吸湿なし、雰囲気: 30°C、湿度 80%)、また MAG および

TIG 溶接では 50°C 以下であり、HT780 鋼と同等の耐溶接割れ感受性を有している。

- (4) 作用応力 400 MPa、0°C の条件で、溶接部は長さ 30 mm、深さ 10 mm の表面欠陥からの脆性破壊発生阻止性能を、母材は WES3003 A 種基準を満たす脆性破壊停止性能を有していた。今後、揚水発電所水圧鉄管に限らず、さまざまな分野への適用を期待したい。

なお、板厚 75 mm の開発に関しては大阪大学豊田政男教授の懇切丁寧なご指導をいただき、また川崎重工業(株)の関係する多くの方々、板厚 50 mm の開発に関しては三菱重工業(株)の関係する多くの方々から熱心な討議および実験に対するご支援とご協力をいただきました。ここに記し、深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) たとえば、三宅孝則、小林英司、小川隆生、小関智也、寺嶋久栄：川崎製鉄技報，20(1988)3, 57
- 2) 日本溶接協会：WES3001「溶接用高張力鋼板」，(1996)
- 3) 水門鉄管協会：「高張力鋼材 (HT80) 標準仕様および解説」，(1980)
- 4) 日本溶接協会：WES3003「低温用圧延鋼板判定基準」，(1995)
- 5) 日本溶接協会：WES2805「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」，(1997)
- 6) 佐藤邦彦：「溶接強度ハンドブック」，(1988)，3-34，[理工学社]
- 7) 邦武立郎、寺崎富久長、大森靖也、大谷泰夫：「鋼の強靱性」，(1972)，85，[日本鉄鋼協会，日本金属学会]
- 8) 日本溶接協会：WES1108「き裂先端開口変位 (CTOD) 試験方法」，(1995)
- 9) 南二三吉、大畑 充、豊田政男、有持和茂：日本造船学会論文集，182(1995)，647-657
- 10) 日本溶接協会認定委員会：「鋼種認定試験方法」，(1995)