

最新の高張力鋼溶接技術

- 200mm厚HT950鋼板の開発とペンストック分岐管への適用に関する研究 -

鉄構事業部

1. はじめに

高張力鋼板の開発およびその施工技術の発展において最も寄与したのは造船分野だと考えられる。特に、潜水艦船体における高張力鋼の開発および施工技術は高張力鋼利用の最先端を進むものである。現在、潜水艦救難艇では耐圧球殻に950MPa級の高張力鋼が用いられており、将来的には1150MPa級高張力鋼の使用を考えた研究も進められている¹⁾。

一般構造物に適用される高張力鋼およびその施工技術についても、潜水艦に適用された鋼板およびその施工技術が基本となっていることは否めない事実である。しかし、造船分野と違い、例えば橋梁などでは海上や現地ヤード上の溶接、水圧鉄管では高湿度下のトンネル内での溶接など、様々な環境下での溶接施工が要求される。このような溶接施工に対し、例えば橋梁分野では明石海峡大橋で採用された予熱低減型HT780鋼が開発された。

水圧鉄管の分野においては、1960年代の揚水式発電所の登場とそれに続く大規模化が水圧鉄管そのものの著しい大型化をもたらし、水圧鉄管用のHT570(HT60)、HT780(HT80)などの鋼材が開発されてきた。1995年にはエッシャー・ウイス分岐管(図1参照)の内部補強材(シクル)に、板厚175mmのHT780鋼板が使用された²⁾(図2参照)。現在では、さらに大規模な揚水式発電所が計画されており、HT780鋼板で計画すれば板厚は極めて大きくなる。そのため、鋼板製造、溶接施工などの面で、技術的、経済的な問題が生じることが予想され、より高強度の材料開発の必要性が論じられるようになった³⁾。

このような大規模な揚水式発電所水圧鉄管分岐管の構造設計諸元を検討した結果、シクル用材料として200mm

厚HT950鋼板が必要となることが予想された。そこで著者らは、HT780と同等の施工性をもつ200mm厚HT950(HT100)鋼板を開発し、エッシャー・ウイス分岐管の内部補強材(シクル)に用いる場合の諸問題について検討を行った。本報告では、特に靱性を中心に検討結果を報告する。

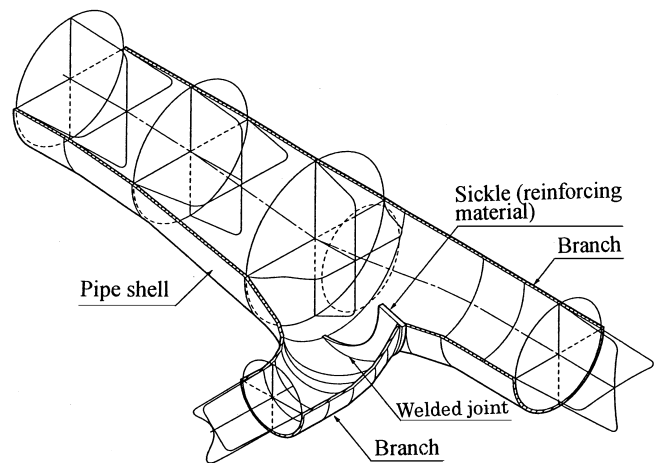


図2 エッシャー・ウイス分岐管およびシクル

2. 目標性能

2.1 目標性能の設定

2.1.1 靱性の目標性能

水門鉄管協会「高張力鋼材 (HT80) 標準仕様及び解説」(1980)⁴⁾には、HT780を使用した水圧鉄管の必要靱性の基本的考え方として、次の2つの概念をあげている。

・継手は、0 で脆性き裂を発生させないこと。

・母材は、0 で脆性き裂の伝播を停止すること。

ここで、0 とは水圧鉄管の最低使用温度を想定した値である。

本研究の対象は200mm厚HT950鋼板であり、このような極厚化、高強度化は一般には鋼材の脆性破壊感受性を高める傾向をもつこと、また、水圧鉄管分野におけるHT950鋼の使用はまだ緒についたばかりであって、特に、本研究のような極厚鋼の実用例はほとんどないことなどを考慮し、この研究においては、水圧鉄管の必要靱性の基本的考え方として、これらの考え方をとることとした。

2.1.2 その他の機械的性質

母材の耐力、引張強さおよび伸びの目標値は、原則として、(社)日本溶接協会規格WES 3001 (1996)⁵⁾のHW

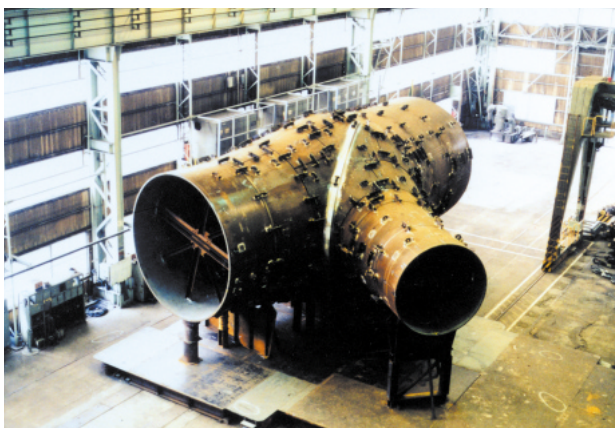


図1 エッシャー・ウイス分岐管外観

885に準拠した。ただし、ここで対象とする厚さ200mmの鋼板は、この規格に規定する鋼板厚みの適用範囲外ではあるが、同規格適用最大板厚(100mm)の値を目標値とした。シクルプレートには、分岐管の構造上、その板厚方向に引張りの力が作用するため、ラメラテアに対する配慮が要求される。そこで、板厚方向の絞りは、シクルプレートとしての過去の実績を考慮して、WES 3008(1990)⁶⁾のZ25を適用した。継手の引張強さは、母材の保証引張強さと同等とした。

2.1.3 溶接性

水圧鉄管用高張力鋼板は、トンネル内の溶接作業を考慮して、予熱温度を125以下としているが、シクルの溶接は全て工場溶接であるので、予熱温度をこれより25上げることにした。

2.2 必要靱性の算出方法

2.2.1 母材の必要靱性

母材の必要靱性は、WES3003(1995)⁷⁾A種基準による。同基準の適用範囲外であるHT950のような高強度で、かつ、100mmを超える板厚の鋼板に対し、この規格を適用できるかどうかを検討した。Kcaと $vTrs$ との関係を図3に示し、板厚効果の検討結果を図4に示す。図3および図4より、板厚200mmのHT950においてもWES3003(1995)A種基準を適用できると考えられる。目標性能は、最低使用温度(0)および許容応力(395N/mm²)より、 $vTrs = 65$ 、 $Kca = 222MPa \cdot m^{1/2}$ と計算できた。

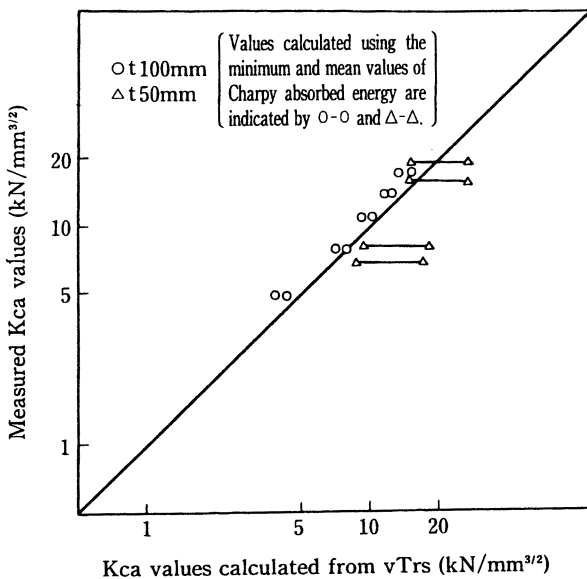


図3 WES 3003 A種基準でのシャルピ - 衝撃試験における破面遷移温度 $vTrs$ より計算したKca値と実測したKca値との比較

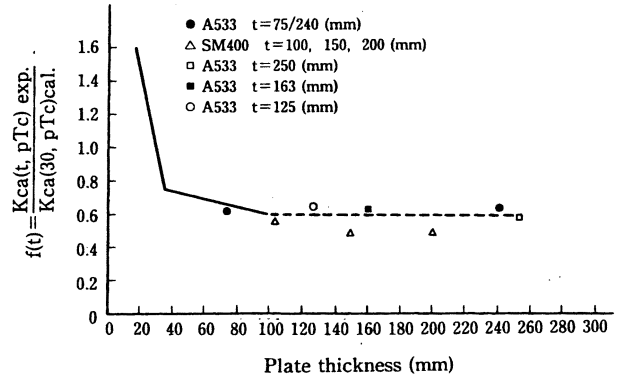


図4 100mmを超える板厚でのKca値の板厚効果 (f(t) : Kca値における板厚効果係数)

2.2.2 溶接継手の必要靱性

溶接継手の必要靱性は、WES2805(1997)⁸⁾によった。想定した欠陥の位置と方向を図5に示す。計算に使用した条件は以下のとおりである。

施工誤差：水門鉄管技術基準より、角変形2.5°、目違い3mmとする。

継手形状による応力集中係数：WES2805(1997)より、ひずみ集中係数は1.5とする。

溶接残留応力：溶接残留応力の最大値は最低保証耐力(865N/mm²)とする。

想定欠陥寸法：深さ、長さとも20mmの表面欠陥(き裂)とする。

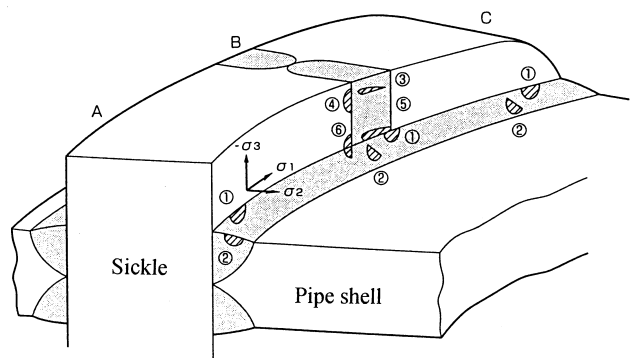


図5 想定欠陥の位置と方向

以上より、シクル用200mm厚HT950鋼板の溶接部に必要とされる破壊靱性値を計算すると、シクル同士の突合せ継手に対しては、限界CTOD値が、0で $c = 0.07mm$ 、また、シャルピー衝撃特性値(吸収エネルギー値)は、 $vE_0 = 43J$ となる。同様に、シクル - 管胴の継手に対しては、0でそれぞれ、 $c = 0.105mm$ 、 $vE_0 = 56J$ となる。

2.3 目標性能の値

鋼板および溶接継手の目標性能をまとめて表1に示す。

表1 シクルプレ - ト用HT950の目標性能値

項目		目標性能
板厚		200mm
母材の機械的性質	耐力	865N/mm ²
	引張強さ	930~1110N/mm ²
	伸び	12%
	絞り	25% (板厚方向)
	破面遷移温度	-65
	シャルピー吸収エネルギー	47J(at-65)
溶接性	割れ防止予熱温度	150
継手の機械的性質	引張強さ	930N/mm ²
	シャルピー吸収エネルギー	56J(at0)

3. 200mm厚HT950鋼板の特性

開発された200mm厚HT950鋼板の化学成分分析結果および機械的性能などの諸特性をそれぞれ表2および表3にまとめて示す。表2よりチェック分析値の板厚位置による化学成分の差はほとんど認められない。引張試験結果では、すべての採取方向、採取位置において目標性能を

満足し、Z方向の引張試験結果では、50%を超える高い絞り値が得られた。衝撃試験結果でも、すべての採取方向、採取位置において目標性能を満足した。C方向に5%のひずみを付与し、250℃、1時間の時効処理を施した後、C方向のシャルピー衝撃試験を行った結果も、母材の目標を満足した。ピッカース硬さも板厚方向にほぼ一様な硬さ分布を示していた。JIS G 0551に従って実施したオーステナイト結晶粒度試験結果からも、板厚位置による差は少なく、粒度番号8.2~8.5の細粒が得られていることがわかる。JIS G 0555に従って実施した非金属介在物の顕微鏡試験結果からも、非金属介在物清浄度は各板厚位置において低い値を示し、清浄な鋼であることを示している。

以上より、この鋼板は、微量Nbの添加による粒の微細化および適切な熱処理方法による板厚全領域にわたる細粒かつ整粒の実現により、強度、靱性のバランスと共に、板厚方向特性についても優れた性能を有し、本鋼が目標性能を十分満足することを実製造材により確認できた。

表2 化学成分分析結果

Thickness mm	Chemical composition(mass%)																
	Analysis	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mp	V	Nb	Sol/Al	B	Ceq	Pcm	
	Ladle	0.11	0.07	1.00	0.002	0.0008	0.23	4.89	0.54	0.63	0.028	0.010	0.043	0.0011	0.67	0.33	
200	Check	1/4t	0.11	0.07	0.99	0.001	0.001	0.23	4.86	0.53	0.66	0.028	0.010	0.041	0.0011	0.67	0.33
		1/2t	0.11	0.07	0.99	0.001	0.001	0.23	4.78	0.53	0.66	0.028	0.010	0.041	0.0011	0.67	0.33

表3 母材確性試験結果

鋼塊位置	引張試験						シャルピー衝撃試験				
	方向	採取位置	YS N/mm ²	TS N/mm ²	EL %	RA %	ひずみ 時効	方向	採取位置	vE-65 J	vTrs
Top	L	1/4t	907	975	20.3	64.5	無	L'	surface	170	-115
		1/2t	912	979	21.9	62.1			1/4t	173	-110
		1/2t	912	973	23.1	67.4			1/2t	176	-107
	C	1/4t	914	986	22.8	67.8		C'	surface	149	-109
		1/2t	912	973	23.1	67.4			1/4t	140	-101
		1/2t	912	973	23.1	67.4			1/2t	131	-105
Z	1/2t	-	971	-	55.3	有	Z'	1/2t	87	-80	
							C'	surface	144	-105	
								1/4t	146	-101	
								1/2t	123	-99	
Note	L、C方向：JIS Z 2201 4号試験片 Z方向：WES 3010 1号試験片						JIS Z 2202 4号試験片。vE-65は、シャルピー遷移曲線から算出。				
Steel position	硬さ試験			粒度			非金属介在物清浄度				
	断面の硬さ分布 Hv(98N)			採取位置	粒度番号	採取位置	A series	B series	C series	合計	
Top	291-334			表面	8.2	1/4t	0.004	0.004	0	0.008	
				1/4t	8.5						
				1/2t	8.5	1/2t	0	0.008	0	0.008	
Note	-			JIS G 0551			JIS G 0555				

注記：L、C、Z方向は、それぞれ口 - ル方向、口 - ルと直角方向および板厚方向である。

鉄構事業部

4. 溶接継手性能試験結果

開発された板厚200mmの極厚HT950鋼板をエッシャー-ウィス分岐管のシクルに適用するために、シクルの突合せ溶接継手性能試験（サブマージアーク溶接）およびシクルと管胴との十字突合せ溶接継手性能試験（MAG溶接）を実施し、その結果を目標性能などにてらして評価し実用性を検討した。溶接条件を表4に示す。

これらの継手性能試験結果の概要は、表5および表6に示すとおりであるが、

- 1) 溶接継手の引張強さは、いずれも目標値を満足した。
- 2) シャルピー衝撃試験結果は、いずれの溶接継手においても目標値を満足している。

3) 継手曲げ試験では、いずれの溶接継手においても割れなどの欠陥が認められず、良好な曲げ延性を有することが実証できた。

4) 溶接継手部の硬さ測定結果では、特に異常な硬化部は認められなかった。

5) 横割れ試験では、いずれの溶接継手においても横割れが認められなかった。

などの試験結果が得られた。

これらの継手性能試験の結果から、開発されたシクル用200mm厚HT950鋼板の溶接継手部は、目標性能を満足し、かつ、溶接欠陥のない健全な継手であることが確認できた。

表4 溶接条件

溶接法	銘柄	予熱温度	溶接条件							後熱条件
			溶接姿勢	ワイヤ径 mm	溶接電流 A	アーク電圧 V	溶接速度 cm/min	溶接入熱量 kj/cm	パス間温度	
SAW	PFH-100A x US-100	150	下向	4.0	500 ~ 650	30	30 ~ 50	18.0 ~ 40.0	150 ~ 200	150 x 2h
GMAW (Ar+20% CO ₂)	MGS-100A		横向	1.2	200 ~ 260	30 ~ 36	12 ~ 40	10.0 ~ 40.0		

表5 溶接継手性能試験結果(突合せ溶接)

試験項目	継手引張試験	継手シャルピー衝撃試験			側曲げ試験		横割れ試験
	引張強さ N/mm ²	ノッチ位置	vEo(J) (minimum)	vTrs	採取位置	結果	結果
試験項目	1016 1012 (ave.:1014)	溶接金属	85	-36	Back側	180° 無欠陥	無
		ボンド	74	-53			
		熱影響部 (ボンドから1mm)	110	-74	Center		
		同 3mm	154	-168	Final側		
		同 5mm	141	-89			
目標性能	930	vEo 43			-		-
Note	JIS z 3121	JIS Z 2204			JIS Z 3122		UT,RT,PT

表6 溶接継手性能試験結果(十字溶接)

試験項目	継手引張試験	継手シャルピー衝撃試験			側曲げ試験		横割れ試験
	引張強さ N/mm ²	ノッチ位置	vEo(J) (minimum)	vTrs	採取位置	結果	結果
試験項目	1016,1012 (ave.:1014)	溶接金属	95	-38	Back側	180° 無欠陥	無
		ボンド	92	-56	Center		
		熱影響部	138	<-100	Final側		
		同 3mm	138	<-100	Final側		
目標性能	930	vEo 43			-		-
Note	JIS Z 3121	JIS Z 2204			JIS Z 3122		UT、RT、PT

5. 脆性破壊に対する安全性検討

5.1 母材の脆性破壊伝播停止性能

ESSO試験に用いた試験片の形状・寸法を図6に示し、き裂停止応力拡大係数 K_{ca} とき裂停止温度 T との関係を図7に示す。これらの目標靱性値および開発鋼母材のESSO試験結果ならびにシャルピー衝撃試験結果を表7に示す。

図7および表7によると、試験片厚さ200mmの原厚大型ESSO試験では、0 での保有 K_{ca} 値として、必要破壊靱性値 ($K_{ca} = 222\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) をはるかに上回る $460\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ といった高い値が得られるとともに、 $K_{ca} = 222\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ を示す温度、すなわち、WES 3003 によるA種温度が -27 であることが示されている。また、同表に示すように、母材のシャルピー - 衝撃試験では、開発鋼の破面遷移温度 $vTrs$ として、全板厚位置で -100 よりも低い値を示すとともに、-65 での吸収エネルギー - も、L方向

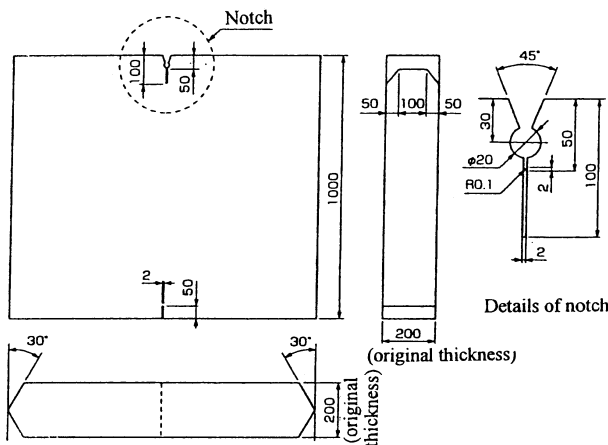


図6 ESSO試験片の形状・寸法

では170J、C方向では130Jを上回る値が得られるなど、全ての試験部位で必要値 ($vTrs = -65$, $vE_{-65} = 47\text{J}$) を十分上回る優れた特性が得られている。

なお、ひずみ時効後のシャルピー - 衝撃試験でも、C方向で $vTrs = -99$ および $vE_{-65} = 123\text{J}$ と、母材の要求値を上回る値が得られている。

以上より、開発鋼母材は、研究の対象としたエッシャー - ウィス分岐管用鋼材として、十分優れた脆性き裂伝播停止特性を有することが実証された。

5.2 溶接部の脆性破壊発生阻止性能

試験片にはWES 1108(1995)に規定されているCT (Compact Type)試験片を用いた。図8に試験片の形状・寸法を示す。試験対象はSAWの突合せ溶接継手である。切欠き導入位置は、溶接金属およびボンドとした。脆性破壊特性試験結果をまとめて表8に示す。

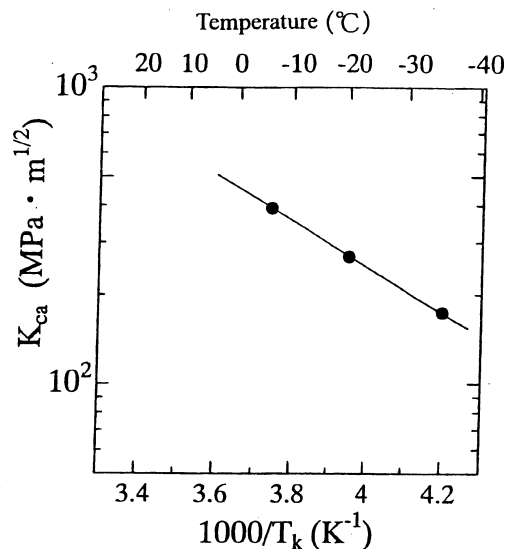


図7 き裂停止応力拡大係数 K_{ca} とき裂停止温度との関係

表7 HT950開発鋼の脆性き裂伝播停止特性のまとめ

区分	特性値	目標値	開発鋼が保有する特性値	
Kca 特性	0 における Kca	$222\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$	$460\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ A-use temperature=-27	
	シャルピー 衝撃特性	$vTrs$	-65	-107 ~ -115
		vE_{-65}	47J	173J(L direction) 131J(C direction)

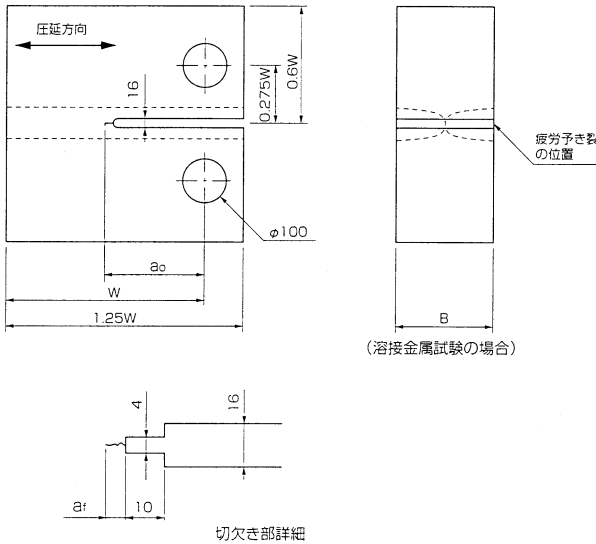
表8 溶接部の脆性破壊特性のまとめ

区分	特性値	継手の種類	目標値	開発鋼溶接部が保有する特性値	
				溶接金属	ボンド
CTOD特性	0 での限界 CTOD値 c	SAW	0.070mm	0.133mm	0.136mm 0.153mm
シャルピー 衝撃特性	0 での吸収 エネルギー vE_0	SAW	0.070mm	85J*	74J*
		GMAG	56J	95J*	92J*

表8より、SAW継手に対して実施された原厚CT試験によると、0 での限界CTOD値は、溶接金属、ボンドともに必要値と比較して十分高いレベルにあることが確認された。同表に示すように、シャルピ - 衝撃試験で得られた0 での吸収エネルギー - についても、ノッチ位置にかかわらず、最低値でも必要値を十分満足する値が得られていることが確認された。

一方、MAG継手については、SAW継手に対して相対的に高靱性なため、大規模な原厚CT試験は省略し、シャルピ - 衝撃試験のみを実施したが、この場合もノッチ位置にかかわらず必要値を十分上回る高い値が得られている。

これらの結果から、開発鋼溶接部はエッシャ - ウィス分岐管シクル用鋼材溶接継手として十分な脆性破壊発生防止性能を有することが実証された。



B	Thickness of sample	200mm
W	Width of sample	2B
ao	Length of notch	175+af
af	Length of pre-crack	

図8 CT試験片の形状・寸法(mm)

6. HT950の適用に関する検討

6.1 HT950の優位性

水圧鉄管における高張力鋼使用の一般的効果を表9に示す。揚水式発電所の場合、水圧鉄管は岩盤埋設形式となることが多いが、HT950を使用することにより使用板厚を低減でき、さらに岩盤負担設計を有効に活用することにより据付け工期を短縮できる。

表9 水圧鉄管におけるHT950鋼使用の一般的効果

項目	1次効果	2次効果
設計	管厚の低減	岩盤負担率の増加と管厚の低減(相乗効果)
施工	重量の低減 溶接量の低減	仮設備の低減 工期の短縮

6.2 溶接性

200mm厚HT950の溶接施工条件を同板厚のHT780と比較して表10に示す。表10より、開発鋼の溶接性は、HT780とほぼ同程度と考えられる。

6.3 経済性

HT950の場合はHT780に比べて、溶接材料も含めて単位重量当たりの材料単価は上昇するが、管厚低減による全体重量低減効果が大きい。

出力1500MW級の揚水式発電所水圧鉄管を想定し、その分岐部(マニフォルド)を設定して経済性比較を行った結果では、HT950の場合はHT780に比べて、管厚低減の効果が大きく、全体として10%程度の建設費低減が期待された。

表10 溶接条件の比較(シクルプレ - ト)

項目	-	HT950	HT780
板厚	-	200mm	200mm
Ceq	-	0.67	0.59
Pcm	-	0.33	0.28
予熱および パス間温度	SMAW	150-200	150-230
	SAW	150-200	150-230
後熱条件	-	150、2h (minimum)	150、2h (minimum)
溶接入熱量	-	4kJ/mm	5kJ/mm 平均 4kJ/mm
溶接棒の乾燥および 保管条件	乾燥条件	400、1h (minimum)	350、1h (minimum)
	保管条件	150	150
フラックスの乾燥および 保管条件	フラックスの種類	ボンド フラックス	ボンド フラックス
	乾燥条件	300、1h (minimum)	250、1h (minimum)
	保管条件	125	125

7. おわりに

大規模揚水式発電所の水圧鉄管エッシャ - ウィス分岐管の内部補強材(シクル)を想定し、200mm厚HT950鋼板を開発し、諸問題について検討を行った。得られた結果を以下に示す。

1) 本研究であらたに開発した200mm厚HT950鋼板は、溶接構造物としてのエッシャ - ウィス分岐管シクルに用いるうえで、安全性をはじめ、十分な性能を有することが確認された。また、開発した200mm厚HT950鋼板は、所要の継手性能を得るうえで、従来のシクル用HT780鋼板とほぼ同等の溶接施工性を有していることが確かめられた。

2) HT950の実用性についても検討を行った結果、HT950のもつ高強度という特徴が十分効果を発揮し、水圧鉄管の管厚の低減ひいては施工の簡素化に寄与することが示された。さらに、モデルケ - スによる経済性の検討から、HT950の使用によって建設費低減が期待されることがわかった。

参考文献

- 1) 須清：これからの産業開発、溶接学会誌、68-1(1999)、pp.25-30
- 2) 野口建夫、片山英雄、村山弘：エッシャ - ウィス分岐管の岩盤負担設計 - 奥美濃発電所における適用 -、電力土木、231(1991)、pp.45-53
- 3) 浦沢義彦、内田善久：水圧鉄管用高張力鋼HT100について、電力土木、No.201(1986)、pp.33-40
- 4) 水門鉄管協会：「高張力鋼材(HT80)標準仕様及び解説」(1980)、3-3、5
- 5) 日本溶接協会：WES 3001(1996)「溶接用高張力鋼板」
- 6) 日本溶接協会：WES 3008(1990)「耐ラメラテア鋼材の特性」
- 7) 日本溶接協会：WES 3003(1995)「低温用圧延鋼板判定基準」
- 8) 日本溶接協会：WES 2805(1997)「溶接継手のぜい性破壊発生に対する欠陥の評価方法」

(文責 橋梁エンジニアリング部・亀谷博仁)

栗本トピックス

溶接学会「溶接構造シンポジウム'99論文奨励賞」受賞

昨年12月2日(木)大阪大学コンベンションホールにて開催された(社)溶接学会 溶接構造研究委員会主催の溶接構造シンポジウム'99(協賛：日本金属学会、日本機械学会、応用物理学会、土木学会など29学協会)において、当社、大阪臨海工場・技術総括部の廖 金孫氏を代表とする研究発表に対して論文奨励賞が授与された。

この賞は2年に1度開催される同シンポジウムで発表される、約120件にのぼる研究論文の中で特に優れた内容のものについて与えられるものである。

受賞論文は「SUS304ステンレス鋼及び溶接部の硫酸塩還元菌による微生物腐食」というテーマで、研究の内容については研究概要に譲るが、今まで重視されていなかった問題への着目、現地試験を含めた地道な取り組み、そして新たなテーマの扉を開いた点が高く評価された。

研究は廖氏の他、橋梁エンジニアリング部・亀谷博仁氏、品質保証部・岡田 斎氏、および大阪大学工学部・菊地靖志教授の手によるもので、研究の成果は鋼構造物のみならず、鑄鉄管などの微生物に関係する腐食の原因究明にも役立つと考えられる。

今回の受賞は、当社の金属材料、溶接技術に対する洞察の深さ、レベルの高さを改めて内外に示すものとなり、今後の展開が大いに期待されるものである。

研究概要：

受賞論文は、当社が施工した添架鋼管の漏水問題に対しての、漏水原因調査、現地浸せき試験、腐食再現試験などの試験調査結果をまとめ考察したものである。

研究はまず漏水原因調査から始まり、その結果から漏水した腐食部の特徴が微生物腐食と一致することを見出した。その後、現地浸漬試験、微生物腐食再現試験などの諸試験を通して、腐食の原因となる硫酸塩還元菌が実際の鋼管水中に存在すること、および、この微生物が繁殖した場合ステンレス鋼が腐食されることを実証した。

この成果より、今回の添架鋼管の漏水問題は微生物腐食に起因したことを立証し、腐食に対する従来の知識と考え方では予測できないことを明らかにした。

しかし、今回の研究は微生物腐食の確認とその再現という限られた範囲のものであるので、今後より一層の研究の積み重ねを通して、腐食機構の詳細究明および防止策を確立をしていく必要があると考える。