

New Weathering Steels of Extremely-Low Carbon Bainitic Type with Excellent Weldability



塩谷 和彦
Kazuhiko Shiotani
技術研究所 厚板・条鋼・接合研究部門 主任研究員(掛長)



川端 文丸
Fumimaru Kawabata
厚板セクター室 主査(部長補)・工博



天野 慶一
Keniti Amano
技術研究所 厚板・条鋼・接合研究部門長・工博

要旨

炭素含有量を約 0.02 mass% に低減した極低炭素ベイナイト型の田園用および海浜用新耐候性鋼を開発した。開発鋼は、引張強さ 570 MPa 級まで圧延ままで製造できる。極低炭素化により、アークストライク条件下においてもビッカース硬度が約 270 と卓越した耐溶接硬化性を示す。また、入熱 20 kJ/mm までの大入熱溶接において優れた HAZ 靱性を示す。JIS 規格成分範囲を満足する新田園用鋼の耐候性能は、従来耐候性鋼と同等であった。また、Ni を 2.5 mass% 以上添加した海浜用鋼では、海浜地域においても非晶質さびを主体とする保護性さび層が形成され、鋼材の腐食速度が著しく低減し、従来耐候性鋼では適用が困難とされた海浜においても、十分な耐候性能を発揮することを確認した。

Synopsis:

An extremely-low carbon bainitic steel with a C content of approximately 0.02 mass% has been successfully advanced to new types of weathering steels for rural and coastal uses. The steels can be manufactured up to TS 570 MPa grade by an as-rolled process and exhibit excellent weldability. Because of the extremely low C content, the maximum hardness values for heat affected zone (HAZ) were about 270 in Vickers number even under arc-strike conditions, and the Charpy impact energy at a large heat input of up to 20 kJ/mm was sufficiently high. The weathering corrosion resistance of the steel for rural use, which meet the chemical composition of JIS SMA570W specification, is similar to that of the conventional one. The steel for coastal use with a higher Ni content of 2.5 mass% formed a protective rust layer after long-term exposure in coastal regions. The rust layer consisted mainly of amorphous rust and the corrosion rate of the steel decreased remarkably. Therefore, the steel can be applied even in coastal regions where the conventional one has not been used.

1 緒 言

耐候性鋼 (JIS G 3114) は、大気環境において、鋼材表面に保護性のある緻密なさび層を形成し、腐食速度を低減する。この耐候性鋼を用いた無塗装鋼橋梁は初期塗装や塗り替え塗装を省略でき、LCC (life cycle cost) の低減に寄与する¹⁾。このため、日本での鋼橋梁材の年間需要約 60~70 万トンに占める耐候性鋼の適用比率は増加傾向にあり、(社)鋼材倶楽部の調査によれば、1999 年には約 15% にまで達した。

しかし、現行の耐候性鋼は、飛来塩分の多い海浜地域では、保護性のあるさび層を形成せず、腐食速度が低減しない場合がある²⁾。このため、1993 年には建設省土木研究所他の指針において海浜地域での裸使用が制限された³⁾。また、近年、非海浜地域においても冬期に路面凍結防止剤 (融雪塩) を散布するような環境で、同様の問題が指摘されている⁴⁾。

さらに、少数桁構造や全断面現場溶接からなる最近の合理化設計橋梁において解決すべき課題も少なくない。すなわち、少数桁構造とする場合、鋼材は厚肉高張力化するが、炭素量や合金成分増加による高張力化は低温割れ感受性の上昇、溶接熱影響部 (HAZ) の硬化および大入熱溶接熱影響部靱性の劣化を生じる。

そこで、これら溶接性や耐塩特性など、従来の耐候性鋼の使用制限を拡大するために極低炭素ベイナイト鋼⁵⁾ の適用を検討し、新しい田園用耐候性鋼と海浜用耐候性鋼を開発した。本報では、これら開発鋼の特性について述べる。

2 溶接性と耐塩特性の向上

2.1 溶接性

鋼の溶接性の向上のために、極低炭素化しても圧延ままで母材強度の確保が可能な極低炭素ベイナイト化技術⁶⁾ を適用した。Fig. 1 に橋梁を対象としたときの引張強さ 570 MPa 級厚鋼板について、極低炭素ベイナイト鋼と従来の焼入れ焼戻し鋼 (Q-T 鋼) における

*平成13年2月6日原稿受付

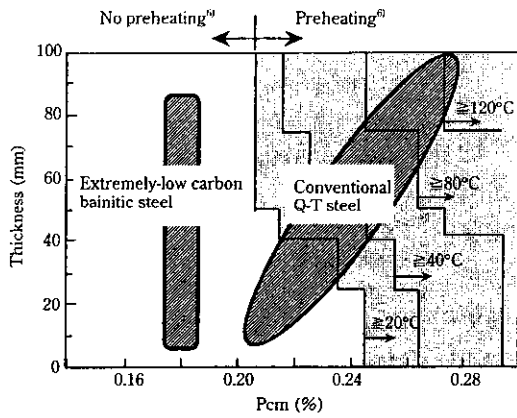


Fig. 1 Relationship between thickness, Pcm and the preheating temperature for extremely-low carbon bainitic and conventional Q-T steels

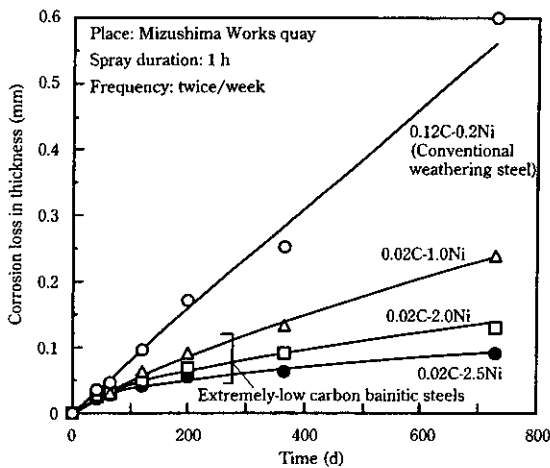


Fig. 2 Corrosion loss in thickness vs. time curves for extremely-low carbon bainitic steels as a function of Ni content and the conventional weathering steel, based on seawater spray tests

Pcm (溶接割れ感受性指数)、板厚および鋼板の予熱温度の関係を⁶⁾を示す。極低炭素ベイナイト鋼では、広い範囲の板厚において、従来鋼よりも充分低い Pcm で鋼板の製造が可能のため、溶接時の予熱を必要としない。

2.2 耐塩特性

海浜地域など塩化物を多く含む環境で、保護性のある安定さび層が形成されない原因として、(1) 塩化物の潮解性による腐食の進行^{7,8)}、(2) さびの結晶化(粗大化)^{9,10)}、(3) さび層-地鉄界面での Cl の濃化¹¹⁾、(4) Fe₃O₄、β-FeOOH の生成促進¹²⁾ などが指摘されている。これら塩化物の作用を防止することが、耐塩特性の向上に繋がるとの考えに基づき、耐塩特性に及ぼす合金元素の影響について、検討した。

2.2.1 海水散布試験

耐塩特性に効果があると考えられる Ni, Cu, Cr, Mo, P などを添加した極低炭素ベイナイト鋼を溶製し、海水散布試験(週 2 回、1h/回海水を散布)を行い、鋼の腐食速度に及ぼす合金元素の影響を評価した。その結果、Ni の添加が鋼の腐食速度低減に最も効果的であった。従来耐候性鋼と Ni 量を変化させた極低炭素ベイナイト鋼の海水散布試験における試験期間と腐食量の関係を Fig. 2

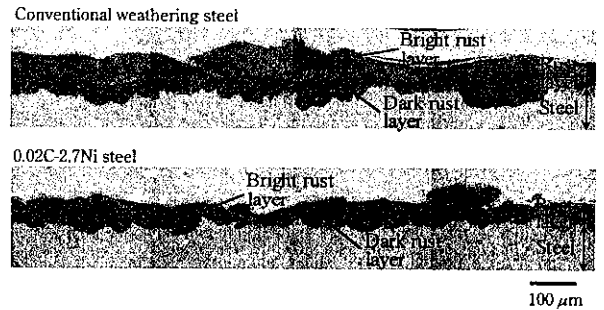


Photo 1 Observation of cross sections of the rust layers formed on the conventional weathering and the 0.02C-2.7Ni steels exposed in Okinawa for 1 year

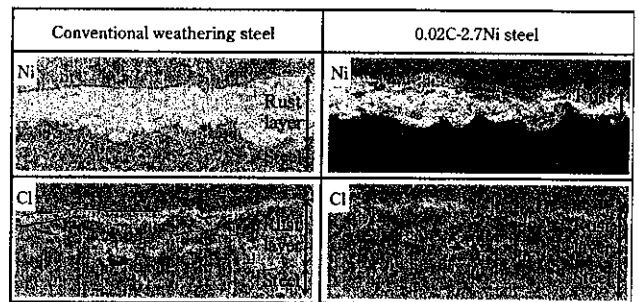


Photo 2 Distributions of Ni and Cl in rust layers formed on the conventional weathering and the 0.02C-2.7Ni steels exposed in Okinawa for 1 year

に示す。1.0~2.5 mass% の Ni を添加した極低炭素ベイナイト鋼の腐食量は従来耐候性鋼よりも小さい。Ni 量の増加とともに、腐食量は減少する。Ni 量が 2.5 mass% では、2 年経過時点で従来耐候性鋼の約 15% の腐食量を示す。また、腐食速度は充分小さく、さび安定化する傾向を示す。このことから、耐塩特性の向上には 2.5 mass% 以上の Ni を添加することが有効である。

2.2.2 さび層の構造解析

前節の結果に基づき、従来耐候性鋼と Ni を 2.7 mass% 添加した極低炭素ベイナイト鋼(0.02C-2.7Ni 鋼)の実暴露試験(沖縄、1年、飛来塩分量:0.8 mdd)を行い、形成されたさび層の解析を行った。

Photo 1 にさび層断面の偏光顕微鏡組織を示す。従来耐候性鋼では、偏光層(bright rust layer)が地鉄まで達し、防食に効果があると言われるさび層下部の消光層(dark rust layer)が分断されている箇所が比較的多く存在した。一方、0.02C-2.7Ni 鋼では、偏光層が比較的薄く、消光層が地鉄をほぼ連続的に覆っていた。

Photo 2 に EPMA で測定したさび層における Ni と Cl の分布を示す。従来耐候性鋼では、地鉄界面において Cl が比較的広範囲に存在したが、0.02C-2.7Ni 鋼では、さび層中の Cl は顕著に少なくなっていた。また、従来耐候性鋼に比べて高濃度の Ni がさび層の消光層中に一様に分布していた。

Table 1 に ZnO を内部標準物質とした定量 X 線法¹³⁾によって定量した従来耐候性鋼と 0.02C-2.7Ni 鋼のさび組成を示す。従来耐候性鋼、0.02C-2.7Ni 鋼ともに X 線の非晶質さび(100 mass% から結晶性さびの含有量を差し引いた値を X 線の非晶質さび量とした)が大半を占めるが、その比率は極低 C-2.7Ni 鋼のほうが約 10% 高い。

地鉄界面近傍での消光層の微視的構造を調べる目的で、さび層断面薄膜試料を FIB (focused ion beam) 加工により作製し、TEM により詳細観察を行った。0.02C-2.7Ni 鋼の観察結果を Photo 3 に示

Table 1 Constituents of iron rusts for the 0.02C-2.7Ni steel and conventional one exposed in Okinawa for 1 year

	α -FeOOH	β -FeOOH	γ -FeOOH	Fe ₃ O ₄	X-ray amorphous rust
0.02C-2.7Ni steel	14.4	2.4	15.6	0.6	67.0
Conventional weathering steel	14.5	2.7	26.1	0.9	55.8

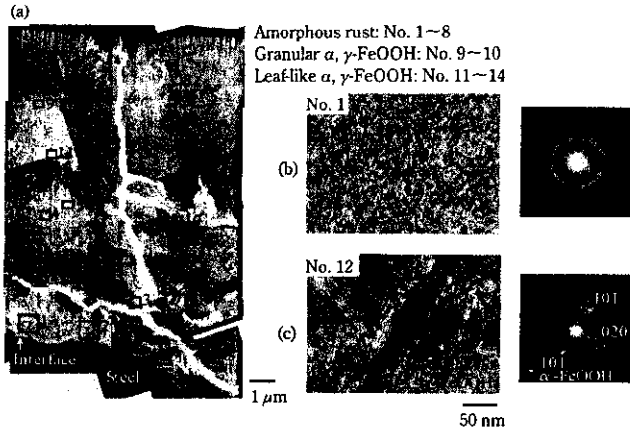


Photo 3 TEM images and electron diffraction patterns of rust layer formed on the 0.02C-2.7Ni steel exposed in Okinawa for 1 year

す。ここで、Photo 3 (a) の黒枠で示した領域については、高倍率での観察と同領域での回折パターンを測定した。その例を Photo 3 (b), (c) に示す。さび層は、(1) Photo 3 (b) に示すような非晶質さび主体の領域 (No. 1~8)、(2) 微細等軸粒子主体の領域 (No. 9~10)、(3) Photo 3 (c) に示すような粗大な α -FeOOH、 γ -FeOOH の笹状粒子主体 (No. 11~14) の領域が存在した。従来耐候性鋼においても、これら 3 つの領域が観察された。しかし、従来耐候性鋼と比較すると、0.02C-2.7Ni 鋼では非晶質さび主体の面積率が約 20% 高かった。

以上の解析結果をまとめると、0.02C-2.7Ni 鋼のさび層は、(1) 地鉄を覆う消光層の連続性が高い、(2) 高濃度の Ni が消光層に一樣分布する、(3) 非晶質さびを主体とする緻密なさびの比率が高い、(4) 地鉄界面での Cl 量が少ない。したがって、0.02C-2.7Ni 鋼の優れた耐塩特性は、Ni が一樣に分布した非晶質さびを主体とする緻密なさびで構成された消光層が、Cl の地鉄表面への侵入を防止するためと考えられる。

3 開発鋼の特性

以上の知見をもとにして開発した田園用および海浜用の 2 種の極低炭素ベイナイト型新耐候性鋼の諸特性を述べる。

3.1 化学成分

開発した田園用新耐候性鋼および海浜用新耐候性鋼の化学組成を Table 2 に示す。田園用新耐候性鋼は、耐候性合金元素として Ni, Cu, Cr を添加し、JIS G 3114 の成分規格に適合している。海浜用新耐候性鋼は、2.2 節で述べたとおり耐塩特性向上のため Ni を 2.7 mass% 添加し、400, 490 および 570 MPa 級の各強度に応じて、主に Mn 添加量を変化させている。

3.2 母材機械的特性

Table 2 に示した化学組成のスラブから、25~75 mm の厚鋼板を圧延まで製造した。それらの機械的特性を Table 3 に示す。田園用新耐候性鋼では 25 mm および 75 mm いずれの板厚でも JIS SMA570W の機械的特性の規格値を満足し、海浜用では 25 mm および 50 mm いずれの板厚でも JIS SMA400CW, 490CW, 570W の機械的特性の規格値を満足している。

3.3 溶接割れ感受性

田園用および海浜用 570 MPa 級新耐候性鋼を用い、アークストライク溶接条件 (JIS Z 3115) で、最高硬さ試験 (JIS Z 3101) を行った。Fig. 3 に、従来 Q-T 鋼の結果と合わせて示す。田園用および海浜用新耐候性鋼の最高硬さは、ピッカース硬さでそれぞれ 265, 275 ポイントと、通常溶接割れ発生防止のための溶接熱影響部の最高硬さの上限の指標といわれる 350 ポイントよりも十分低い値である。この結果は本開発鋼が優れた溶接性を有することを示唆するとともに、アークストライクをも許容できる鋼であることを示している。

また、溶接割れ感受性を評価するために、JIS Z 3158 による y 形溶接割れ試験を実施した。溶接条件について田園用では、板厚 50 mm、溶接方法：SMAW、溶接材料：JIS Z 3214 DA5816W 該当 (4.0 mmφ)、170 A-25 V-2.5 mm/s、湿度 60% とし、海浜用では、板厚 50 mm、溶接方法：FCAW、溶接材料：FG-60SSW (1.2 mmφ)、250 A-30 V-5 mm/s、湿度 60% とした。結果は 2 種の鋼材とも 20°C でも表面、ルートおよび断面割れ率が 0% であった。

3.4 溶接熱影響部靱性

溶接熱影響部 (HAZ) の靱性をピーク温度 1400°C の熱サイクル

Table 2 Chemical compositions of new weathering steels

Steel	Grade	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Ceq	Pcm
Rural use steel	570 MPa	0.02	0.32	1.37	0.011	0.004	0.49	0.24	0.51	0.37	0.16
	400 MPa	0.02	0.29	0.30	0.011	0.002	0.42	2.75	0.02	0.15	0.11
Coastal use steel	490 MPa	0.02	0.30	1.02	0.009	0.003	0.38	2.67	0.02	0.27	0.15
	570 MPa	0.02	0.29	0.99	0.011	0.003	0.37	2.70	0.02	0.27	0.15
JIS G 3114 specification	400 MPa	≤0.18	0.15~0.65	≤1.25	≤0.035	≤0.035	0.30~0.50	0.05~0.30	0.45~0.75	—	—
	490 MPa			≤0.41*						≤0.24*	
	570 MPa			≤0.43**						≤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

*Thickness (t): t ≤ 50 mm

**Thickness (t): 50 mm < t ≤ 100 mm

Table 3 Mechanical properties of new weathering steels

Steel	Grade	Thickness, <i>t</i> (mm)	Tensile properties*					V-notch Charpy properties**				
			Thick. position	Test piece	YS (MPa)	TS (MPa)	EI (%)	Thick. position	Test piece	vE ₀ (J)	vE ₋₅ (J)	vE ₋₂₀ (J)
Rural use steel	570 MPa	25	Full thickness	No. 5	494	670	29	1/4 <i>t</i>	No. 4	—	270	258
		75	1/4 <i>t</i>	No. 4	459	615	28	1/4 <i>t</i>	No. 4	—	292	299
Coastal use steel	400 MPa	25	Full thickness	No. 1A	395	499	37	1/4 <i>t</i>	No. 4	388	—	362
		50	1/4 <i>t</i>	No. 4	382	481	37	1/4 <i>t</i>	No. 4	397	—	395
	490 MPa	25	Full thickness	No. 1A	447	568	23	1/4 <i>t</i>	No. 4	341	—	333
		50	1/4 <i>t</i>	No. 4	448	580	33	1/4 <i>t</i>	No. 4	357	—	310
570 MPa	25	Full thickness	No. 5	514	664	30	1/4 <i>t</i>	No. 4	—	322	263	
	50	1/4 <i>t</i>	No. 4	483	629	28	1/4 <i>t</i>	No. 4	—	292	261	
JIS G 3114 specification	SMA400CW	16 < <i>t</i> ≤ 40	Full thickness	No. 1A	≧235	400~	≧21	1/4 <i>t</i>	No. 4	≧47	—	—
		40 < <i>t</i> ≤ 75	1/4 <i>t</i>	No. 4	≧215	540	≧23	1/4 <i>t</i>	No. 4	≧47	—	—
	SMA490CW	16 < <i>t</i> ≤ 40	Full thickness	No. 1A	≧355	490~	≧19	1/4 <i>t</i>	No. 4	≧47	—	—
		40 < <i>t</i> ≤ 75	1/4 <i>t</i>	No. 4	≧335	610	≧21	1/4 <i>t</i>	No. 4	≧47	—	—
	SMA570W	16 < <i>t</i> ≤ 40	Full thickness	No. 5	≧450	570~	≧26	1/4 <i>t</i>	No. 4	—	≧47	—
		40 < <i>t</i> ≤ 75	1/4 <i>t</i>	No. 4	≧430	720	≧20	1/4 <i>t</i>	No. 4	—	≧47	—

*T-direction, **L-direction

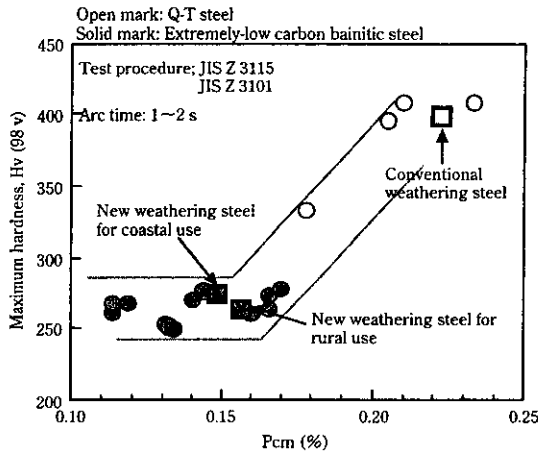


Fig. 3 Effect of Pcm on maximum hardness for 570 MPa grade weathering steels in arc strike welding

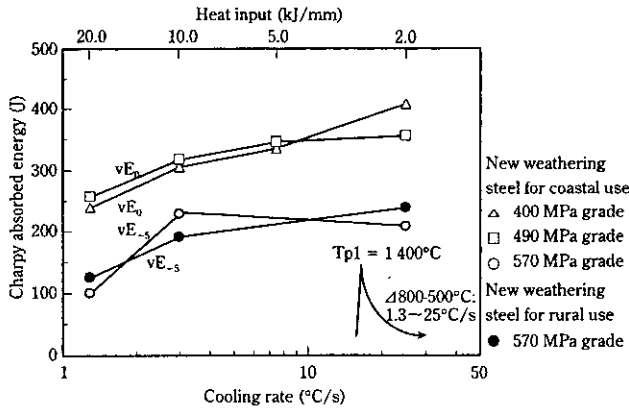


Fig. 4 Effect of cooling rate on Charpy absorbed energy of simulated HAZ

試験で評価した。Fig. 4 に再現 HAZ のシャルピー吸収エネルギーに及ぼす 800~500°C 間での冷却速度および想定入熱の影響を示す。田園用および海浜用いずれの鋼でも、JIS G 3114 に規定される温度でのシャルピー吸収エネルギーは、2~20 kJ/mm 相当の入熱範囲で規格値である 47J を超える値を示した。このことから本開発鋼は 20 kJ/mm までの大入熱溶接が可能であることが示唆される。

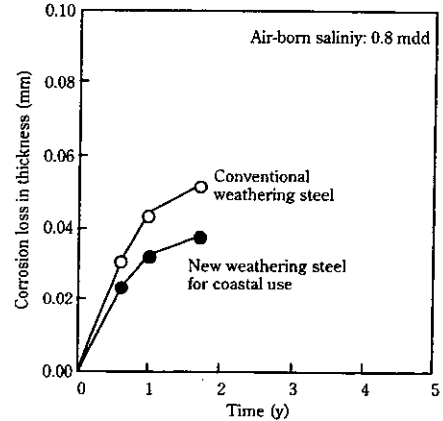


Fig. 5 Corrosion loss in thickness vs. time curves for the new weathering steel for coastal use and conventional one exposed in Okinawa

3.5 耐候性

3.5.1 海浜用新耐候性鋼

Fig. 5 に海浜用新耐候性鋼の沖縄（飛来塩分量：0.8 mdd）での腐食量の経時変化を示す。1年9ヶ月時点で、海浜用新耐候性鋼の腐食量は、従来耐候性鋼の70%であり、海浜用新耐候性鋼の耐塩効果が表れた。また、従来耐候性鋼の暴露試験片の外観は橙色のさびが目立つのに対し、海浜用新耐候性鋼では暗褐色を呈した。この暴露試験は現在も継続している。また、飛来塩分量など環境条件を変化させた暴露試験を日本全国で実施している。

3.5.2 田園用新耐候性鋼

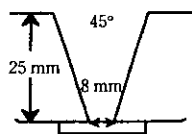
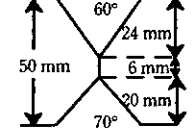
従来耐候性鋼、田園用新耐候性鋼の倉敷市（飛来塩分量：0.015 mdd）での1年間の腐食量は、ともに0.020 mmと同じ腐食量を示した。また、地鉄界面での消光層の連続性、耐候性合金元素であるCr, Cu, Niの分布、さび組成などのさび性状は従来耐候性鋼と同様であった。これらのことから、田園用新耐候性鋼の耐候性能は従来耐候性鋼と同等であると結論される。

3.6 溶接継手の機械的特性

3.6.1 海浜用新耐候性鋼

海浜用新耐候性鋼の溶接材料は、海浜耐候性を具備すべく、母材

Table 4 Welding conditions for evaluation of weld performance of 490 MPa grade new weathering steel for coastal use and mechanical properties of welded joints

Welding method	Welding material	Welding condition	Tensile test*		Side bend test**	V-notch Charpy impact test***		
			TS (MPa)	Position of fracture		Position	vE ₀ (J)	vE ₋₂₀ (J)
FCAW	Wire: FG-60SSW (1.2 mmφ)		604	Base metal	Good	Weld metal	82	71
						Bond	105	87
						HAZ1****	130	99
						HAZ3****	315	331
SAW	Wire: KW-60SW (4.0 mmφ) Flux: KB-SW		609	Base metal	Good	Weld metal	141	130
						Bond	255	286
						HAZ1****	319	320
						HAZ3****	321	324

*JIS Z 3121 (No. 1A)

**JIS Z 3122 (R = 2f)

***JIS Z 3128 (Position: 7 mm below the surface (FCAW), 1/4t (SAW))

****HAZ1: 1 mm from fusion line
HAZ3: 3 mm from fusion line

と同等量の Ni を添加して、開発した。本溶接材料を用い、490 MPa 級海浜用新耐候性鋼の多層 FCAW 継手、多層 SAW 継手を作製し、その機械的特性を評価した。Table 4 に溶接条件および継手引張、側曲げ試験、シャルピー衝撃試験結果を示す。継手強度は母材引張強度と同等以上の値を示した。また、継手の曲げ特性も良好であった。継手靱性はシャルピー衝撃試験により、ノッチ位置は溶接金属、ボンド部、HAZ 1 mm (溶融線から 1 mm)、HAZ 3 mm (溶融線から 3 mm) で評価したが、いずれの位置でも -20°C において吸収エネルギーは高い値を示した。

3.6.2 田園用新耐候性鋼

田園用新耐候性鋼には従来耐候性鋼と同じ溶接材料が使用可能である。板厚 25 mm の鋼板を用い、SAW (溶接材料: JIS Z 3183 S582-AW 該当 (4.8 mmφ)、開先形状: X、入熱: 5.0 kJ/mm) にて溶接継手を作製し、その機械的特性を評価した。継手強度は 687 MPa であり、継手靱性はボンド部において、vE₋₅: 210 J、vE₋₂₀: 196 J と良好な値を示した。また、側曲げ特性も良好であった。

4 結 言

炭素含有量を約 0.02 mass% に低減した 2 種の極低炭素ベイナイト型新耐候性鋼を開発し、その特性を評価した。結果は以下のようによまとめられる。

- (1) Ni を 2.5 mass% 以上添加した海浜用新耐候性鋼は、従来耐候性鋼に対し、海水散布試験 (2 年) で 15%、沖縄実暴露試験

(1 年 9 ヶ月) で 70% の腐食量であった。海浜用新耐候性鋼のこの優れた耐塩特性は、さび層の解析結果から、Ni が一様に分布した非晶質さびを主体とする緻密なさびで構成された消光層が、Cl の地鉄表面への侵入を防止するためと考えられる。

- (2) 田園用新耐候性鋼では 570 MPa グレード、海浜用新耐候性鋼では 400 MPa、490 MPa および 570 MPa グレードの強度、靱性規格を、いずれも圧延ままで満足した。
- (3) 田園用新耐候性鋼の耐候性能は、腐食量およびさび性状の観点から、従来耐候性鋼と同等であった。
- (4) アークストライクのような過酷な小入熱溶接条件においても、田園用および海浜用 570 MPa 級新耐候性鋼の溶接熱影響部の最高硬さはピッカース硬さで約 270 ポイントを示し、優れた耐溶接硬化性が実証された。また、y 形溶接割れ試験においても、20°C で割れが発生しなかった。
- (5) 想定溶接入熱が 20 kJ/mm までの範囲において、田園用および海浜用新耐候性鋼は、規格値である 47 J を超える値を示し、20 kJ/mm までの大入熱溶接が可能であることが示唆された。
- (6) 海浜用新耐候性鋼の溶接材料を開発し、多層 FCAW 継手、多層 SAW 継手を作製し、その溶接継手特性を評価した結果、継手強度、継手靱性、曲げ特性とも良好な結果を得た。

本開発により、田園耐候性および海浜耐候性を有し、かつ溶接施工性に優れた鋼板を、圧延ままで材質造り込みにより迅速に提供することが可能となった。これらは、橋梁などの施工、維持管理費用の低減に大きく寄与すると期待される。

参 考 文 献

- 1) 西川和廣: 橋梁と基礎, 31(1997)8, 64
- 2) 建設省土木研究所, (社)鋼材倶楽部, (社)日本橋梁建設協会: 「耐候性鋼材の橋梁への適用に関する共同研究報告書(XV)」, (1992)3
- 3) 建設省土木研究所, (社)鋼材倶楽部, (社)日本橋梁建設協会: 「耐候性鋼材の橋梁への適用に関する共同研究報告書(XX)」, (1993)3
- 4) (社)日本橋梁建設協会・無塗装橋梁部会, (社)鋼材倶楽部・橋梁研究会・耐候性鋼 WG: 「無塗装耐候性鋼使用橋梁における凍結防止剤の影響」, (1999)9
- 5) 岡津光浩, 林 透, 天野慶一: 川崎製鉄技報, 30(1998)3, 131
- 6) (社)日本道路協会編: 道路橋示方書・同解説, I 共通編, II 鋼橋編, (1996)12
- 7) 元田慎一, 鈴木揚之助, 篠原正, 兒島洋一, 辻川茂男: 第 46 回材料と環境討論会, (1999), 313
- 8) 野田和彦, 升田博之, 小玉俊明: 第 45 回材料と環境討論会, (1998), 407
- 9) 宇佐見明, 田辺康児, 井上尚志, 増田一広: 腐食防食 '92 講演集, (1992), 107
- 10) 塩谷和彦, 山根康義, 川端文丸, 天野慶一: CAMP-ISIJ, 11(1998), 1109
- 11) 田中 誠: 防錆管理, 34(1990), 479
- 12) 三沢俊平: 防食技術, 32(1983), 657
- 13) 岩田多加志, 中山武展, 泊里治夫, 竹内俊二郎, 横井利雄, 森 一弘: 腐食防食 '95 C-306, (1995), 341