

新開発の橋梁用高性能鋼板

菅 俊明*・山内 学*・宮脇 淳**・淵田保司**・堺 雅彦**・中山武典(工博)***

*加古川製鉄所・技術研究センター **加古川製鉄所・厚板・線材部 ***技術開発本部・材料研究所

Newly Developed High-performance Steel Plates for Bridges

Toshiaki Kan・Manabu Yamauchi・Jun Miyawaki・Yasushi Fuchita・Masahiko Sakai・Dr. Takenori Nakayama

Reduced initial construction and maintenance costs for steel bridges has been widely called for. As a result, steel plates for bridges are required to have a higher level of weldability and better atmospheric corrosion resistance. To meet these requirements, Kobe Steel has developed and put into practical use high-performance steel plates. Such plates make effective use of reduced preheating type steels, steel for high heat input welding under severely cold conditions, and atmospheric corrosion resistant steels for marine environments. This report describes the features of these steels.

まきがき = 社会資本の建設において、建設初期コストの縮減、維持管理コストの軽減が求められている中、近年、橋梁分野では少数主桁構造や厚肉無補剛構造に代表される合理化橋および最小限の維持管理で最大限の長寿命化を目指すミニマムメンテナンス橋など、鋼橋に対する考え方も変化し、使用鋼材には、溶接施工の効率化が可能な厚肉高強度鋼、また、高塩分環境にも無塗装使用可能な耐候性鋼などが求められている。

当社では、このような要求性能の多様化に対応しうる鋼材の開発に取り組んでおり、靱性・溶接性および耐食性に優れた高性能鋼を開発・実用化している。以下に、最近実用化したこれらの高性能鋼について、その諸特性を紹介する。

1. 靱性・溶接性に優れた高性能鋼

鋼橋構造の少数主桁化は、省力・合理化による建設コストの縮減が可能となる設計である。この少数主桁化により、ウェブ・フランジ材は厚肉化し、さらに、現場溶接が普及する傾向にあることから、使用鋼材の特性として溶接予熱低減とともに、優れた大入熱溶接継手性能が要求されている。

1.1 予熱低減型高強度鋼

1.1.1 品質設計の考え方

橋梁用鋼板に関しては、施工効率向上の観点から溶接割れ防止のための予熱を低減可能な鋼板あるいは鋼重軽減や合理化設計に応える降伏点一定鋼（板厚が増大しても降伏点に変化しない鋼材）が求められるようになって

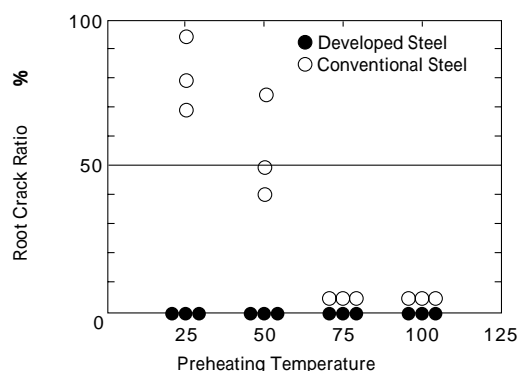
きた。平成8年に改訂された道路橋示方書には、これらの鋼材が高性能鋼として規格化されている。

溶接割れ感受性の低減と高強度の確保という相反する性能を同時に満足させるために、炭素(C)含有量の低減とボロン(B)などの合金元素の適量添加により最適成分組成を選定するとともに、オンライン熱処理であるDQ(Direct Quenching: 直接焼入れ)の活用を図った。

1.1.2 開発鋼の特徴

上記の考え方に基づいて開発した鋼板は、次のような特徴を有している。

- 1) C含有量を従来鋼の0.13%から0.07%へ大幅に低減し、溶接割れ感受性組成(P_{CM})を0.20%にまで抑制している(第1表)。その結果、板厚100mmの厚肉材において、溶接割れ防止のための予熱温度を従来の75から25までに低減可能である(第1図)。



第1図 斜めy形溶接割れ試験結果
Fig. 1 Result of y-groove weld cracking test

第1表 母材の機械的性質
Table 1 Mechanical properties of base metal

Steels	Plate Thickness mm	Chemical Composition mass%				$^*3) P_{CM}$ %	Mechanical Properties		
		C	Si	Mn	Others		YP N/mm ²	TS N/mm ²	vE _{.5} J
Developed Steel	100	0.07	0.26	1.32	Cr, Mo, V, Nb, B	0.20	512	615	291
Conventional Steel	100	0.13	0.25	1.31	Cu, Ni, Cr, Mo, V	0.25	495	609	285
Specification	SM570Q ^{*1)}	0.18	0.55	1.60	-	0.30	420	570 ~ 720	47
	SM570Q-H ^{*2)}					0.21 ^{*4)}			

*1) JIS G 3106 SM570Q *2) Dorokyo-shihosho : SM570Q-H

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

*4) Preheating temperature 20 by dorokyo-shihosho

2) C含有量の低減による焼入れ性低下を補完するための合金元素の添加とDQ活用により、道路橋示方書に新たに規定された降伏点一定鋼としての特性も兼備している(第1表)。

以上のとおり、引張強度570N/mm²級高強度鋼、板厚100mm材において、予熱温度の大幅な低減を可能にした。

1.2 寒冷地仕様大入熱溶接型鋼板

1.2.1 品質設計の考え方

寒冷地という使用環境がきわめて厳しい地域での構造物用として、-50 から -20 での低温靱性を保証した鋼材を要求される場合がある。さらに、構造物の大型化にともなう鋼材の厚肉化あるいは施工効率の点から大入熱溶接化や予熱低減の必要性がますます高まっている。

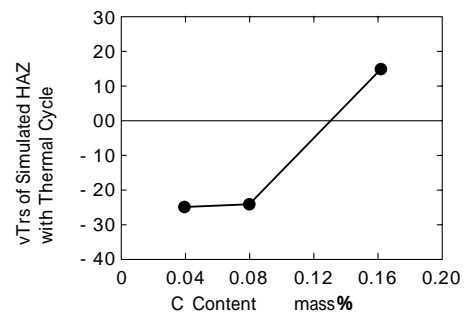
大入熱 HAZ (Heat Affected Zone: 熱影響部) 靱性に及ぼす C 含有量の影響を第 2 図に示す。従来鋼の C 含有量 0.16% では vTrs が 15 であるのに対して、0.08% 以下に抑えることにより、vTrs を -25 まで低減することが可能である。C 含有量の低減は、溶接割れ感受性組成の低減にも寄与するため、溶接時の割れ防止のための予熱低減にも有効に作用する。

以上より、0.08% C の成分系をベースとして、当社がすでに開発した Ti 処理の大入熱溶接対策¹⁾を実施した。さらに、C 含有量低減による強度不足を補完するため合金元素を適量添加し、TMCP (Thermo-Mechanical Control Process: 熱加工制御) 技術の活用を図った。

1.2.2 開発鋼の特徴

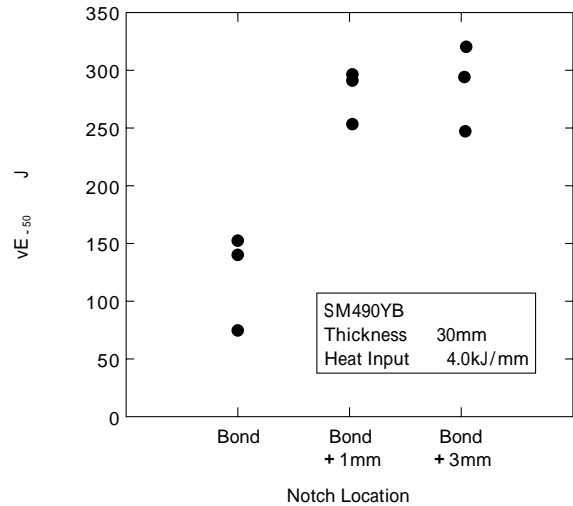
前記の考え方に基づいた開発鋼は次の特徴を有している。

- 1) 引張強度は 490 ~ 520N/mm² 級を十分に満足し、母材靱性は -20 での吸収エネルギーが約 340J、-50 では約 330J でありきわめて良好である(第 2 表)。
- 2) 継手特性に関しては、炭酸ガスアーク溶接(入熱量 4.0kJ/mm)において、-50 で良好な HAZ 靱性を有する。大入熱エレクトロガスアーク溶接(SEGARC 溶接, 入熱量 35.0kJ/mm)においても、-20 での吸収エネルギーは 100J 以上の優れた HAZ 靱性を確保している(第 3 図, 第 4 図)。
- 3) 溶接割れ感受性組成を 0.16% ときわめて低く抑えているため、溶接時の割れ防止予熱温度を 25 まで低減可能である(第 2 表)。



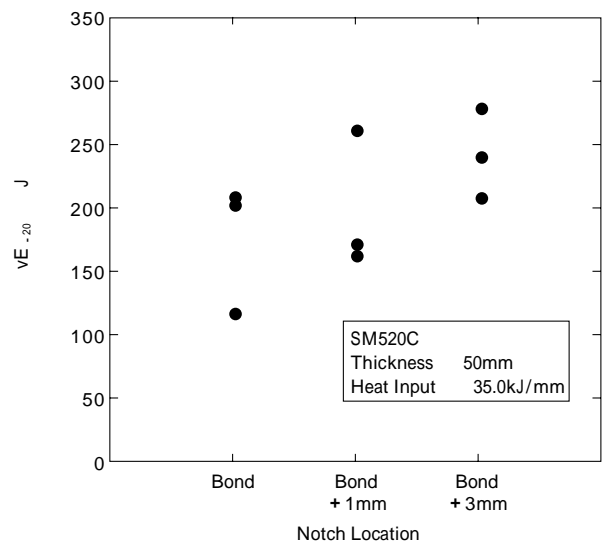
第 2 図 HAZ 靱性に及ぼす C 含有量の影響

Fig. 2 Effect of C content on impact property in HAZ



第 3 図 GMAW 継手のシャルピ衝撃試験結果

Fig. 3 Charpy impact test result of GMAW joint



第 4 図 SEGARC 継手のシャルピ衝撃試験結果

Fig. 4 Charpy impact test result of SEGARC joint

第 2 表 母材の機械的性質と溶接性

Table 2 Mechanical properties of base metal and weldability

Steels	Plate Thickness mm	Chemical Composition mass%			*1) C _{eq} %	*2) P _{CM} %	Mechanical Properties				Weldability *3) Preheating Temp .	
		C	Mn	Ti			YP N/mm ²	TS N/mm ²	vE ₋₂₀ J	vE ₋₅₀ J		
SM490YB	30	Developed Steel	0.08	1.55	0.012	0.34	0.16	485	526	339	331	25
		Conventional Steel	0.16	1.35	-	0.40	0.24	408	542	154	68	25
SM520C	50	Developed Steel	0.08	1.54	0.013	0.34	0.16	455	548	342	328	25
		Conventional Steel	0.17	1.34	-	0.42	0.26	461	562	162	59	50

*1) C_{eq} (%) = C + Mn/6 + Si/24 + Ni/40 + Cr/5 + Mo/4 + V/14

*2) P_{CM} (%) = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5B

*3) y-groove weld cracking test

第3表 開発鋼の特性の一例

Table 3 Examples of properties of developed steel

Steels	Chemical Composition mass%						*1) C _{eq} %	*2) P _{CM} %	Measure for Large Heat Input Welding
	C	Si	Mn	Cu	Cr	Ni			
Developed Steel	0.09	0.30	0.96	0.33	0.52	0.21	0.37	0.19	Ti Treatment
Conventional Steel	0.12	0.30	1.10	0.36	0.50	0.19	0.42	0.23	-

*1) C_{eq} % = C + Mn/6 + Si/24 + Ni/40 + Cr/5 + Mo/4 + V/14
 *2) P_{CM} % = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5B

Steels	Plate Thickness mm	Mechanical Properties		
		Y _P N/mm ²	TS N/mm ²	vE ₀ J
Developed Steel	22	423	531	342
	50	424	528	337
Conventional Steel	22	387	512	359
	50	425	520	312

Steels	Plate Thickness mm	Weldability*3)		Mechanical Properties of Welding Joints			
		Preheat Temperature	Welding Method	Heat Input kJ/mm	Tensile Strength	Charpy V-notch Impact Properties	
					TS N/mm ²	Notch Location	vE ₀ J
Developed Steel	22	No Crack at 25	Electro Gas Arc	14.3	534	HAZ1mm	114
	50	No Crack at 25	CO ₂ Gas Arc	3.3	578	HAZ1mm	282
Conventional Steel	22	No Crack at 25	Electro Gas Arc	14.6	528	HAZ1mm	51
	50	No Crack at 50	-	-	-	-	-

*3) y-groove weld cracking test

以上より、開発鋼は予熱低減と大入熱溶接に対応可能でかつ優れた低温靱性を有する鋼板であり、寒冷地への適用が可能である。

1.3 予熱低減・大入熱溶接型耐候性鋼

1.3.1 耐候性鋼とその溶接性

鋼橋はそのほとんどが塗装橋梁であるため、使用される鋼材の大部分は普通鋼であるが、無塗装橋梁には耐候性鋼が使用される。耐候性鋼は銅(Cu)、ニッケル(Ni)、クロム(Cr)などの耐候性向上を担う元素が微量添加されており、鋼板表面に保護性さびと呼ばれる緻密なさび層が形成されて、水や酸素などの腐食因子の浸入を防ぎ、以降の腐食の進行を抑制する。

この耐候性鋼を使用した無塗装橋梁は、再塗装などのメンテナンス費用を低減できるため腐食環境が比較的マイルドな山間部に架設される橋梁を中心に年々増加している。一般的に、耐候性鋼の溶接割れ感受性はCr成分の存在により普通鋼にくらべて大きく、溶接に際して予熱や入熱制限などの配慮が必要である。

1.3.2 開発鋼の特徴

予熱低減・大入熱溶接型耐候性鋼は、制御圧延後、空冷または制御冷却をおこなうTMCPを適用することによって、強度上昇と靱性向上を実現したもので、次のような特徴を有している。

- 1) 耐候性向上元素の含有量は従来の耐候性鋼と同等であるが、CやMnなどの強化元素の含有量を減らし、C_{eq}およびP_{CM}を低く抑え、溶接低温割れ防止予熱温度を低減している。
- 2) 低C_{eq}化に加え、Ti処理の大入熱溶接対策を採用し、溶接継手部の脆化を抑制できる。

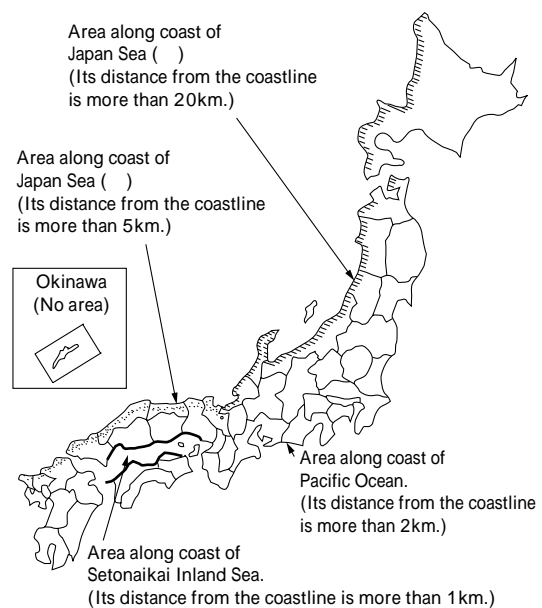
第3表に開発鋼の特性の一例を示す。板厚50mm材でも予熱フリーが実現され、入熱約14kJ/mmのエレクトロガスアーク溶接継手性能も良好であることから製作効率の向上効果が期待される。

2. 塩化物環境において耐食性に優れた高性能鋼

2.1 海浜・海岸耐候性鋼

2.1.1 耐候性鋼の現状

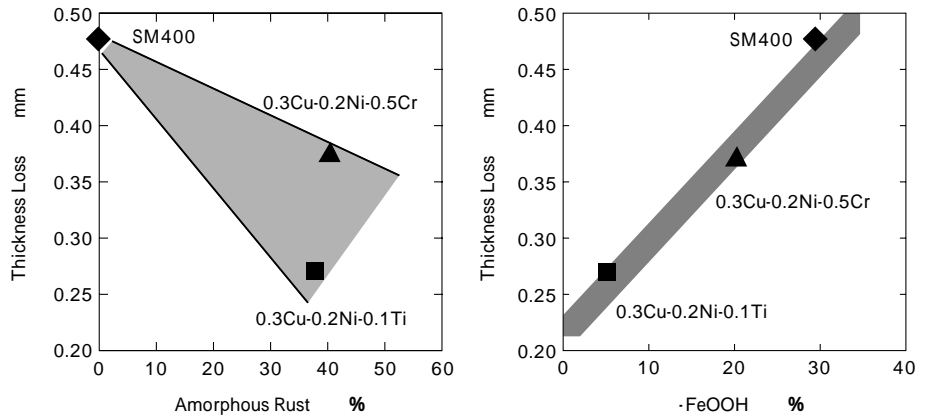
耐候性鋼は前述のように耐候性向上元素の作用により、鋼材表面に保護性さびと呼ばれるさび層が形成される。しかしながら、海塩粒子や凍結防止剤などに含まれる塩化物イオン(Cl⁻)の影響により緻密な保護性さびが生成せず、層状に剥離する非保護性さびが生じることがある。このため耐候性鋼の無塗装橋梁適用地域に制約があり、建設省土木研究所、鋼材倶楽部、日本橋梁建設協会の三者共同研究により、飛来塩分量が0.05mdd(mg/dm²/day)以下であることが適用可否の判断基準になっている。具体的には、第5図に示すように飛来塩分量の測定を省略して耐候性鋼を無塗装で使用して良



第5図 飛来塩分量の測定を省略して良い地域
 Fig. 5 Regions not requiring measurement of chloride level of airborne salt

第6図 加古川製鉄所岸壁にて1年間暴露した裸材の板厚減少量と非晶質さびおよびさび量の関係 (週1回5%食塩水散布)

Fig. 6 Relationship between thickness loss and amount of rusts (amorphous rust and $\cdot\text{FeOOH}$) of unpainted steels exposed at Kakogawa Works' quay for 1 year (5% NaCl aq. sol. spray once a week)



第4表 加水分解によるpHの到達限界値の報告例³⁾
Table 4 Example of limiting pH values by hydrolysis reaction

Reaction Formula	Equilibrium pH in 1N Fe^{2+} or Cr^{3+} Solution
$\text{Fe}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2 + 2\text{H}^+$	6.64
$\text{Cr}^{3+} + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Cr}(\text{OH})_3 + 3\text{H}^+$	1.60

い地域が示されている²⁾。

ところが、我が国の道路網は海岸線に近いところを通ることが多く、また、スパイクタイヤの使用が禁止されて以降、凍結防止剤の散布量が増加しており、高塩分環境下においても、保護性さびが生成し、無塗装使用が可能な耐候性鋼の出現が望まれていた。

当社では、後述するように、高溶接施工性も考慮して予熱低減・大入熱溶接性能を具備したCu-Ni-高Ti (Crフリー) を特徴成分とする海浜・海岸耐候性鋼を開発した。以下に、開発鋼の特徴成分元素の作用効果を述べる。

2.1.2 塩化物環境下における合金元素の耐候性向上効果

上述したように、開発鋼では、一般耐候性確保のためにCu, Niを必須成分としており、塩化物環境でのよりいっそうの耐候性向上を目的として、従来の耐候性鋼の必須成分であるCrを無添加とすると同時にTiを添加している。これらの作用効果の一例を第6図に示す。第6図は普通鋼 (SM400)、従来耐候性鋼 (Cu-Ni-Cr)、開発鋼 (Crフリー/Cu-Ni-高Ti) について、海浜地区 (加古川製鉄所岸壁) で実施した促進暴露試験結果を生成さび (非晶質さび、さび: $\cdot\text{FeOOH}$) で整理したものである。板厚減少量は生成さび量と相関があり、Cu, Niは非晶質さびの形成作用、Tiは安定性に劣るといわれるさびの形成抑制作用があることを示唆している。以下に、Cr無添加とTi添加の作用機構について考察する。

1) Cr無添加効果

Crは生成さび緻密化を促進する元素として知られているが、Crの作用には二面性があり、塩化物環境では必ずしもこのような効果が発揮されないことが実験的に判明した。いっぽう、化学平衡論的にも、CrはFeにくらべて加水分解時の平衡pHが低下しやすいとされており、その結果、腐食先端において電気的中性を保つために Cl^- イオン存在下ではHClが形成されやすいと推定される。第4表にFeおよびCrについての加水分解によるpHの到達限界値を計算した報告例³⁾を示す。

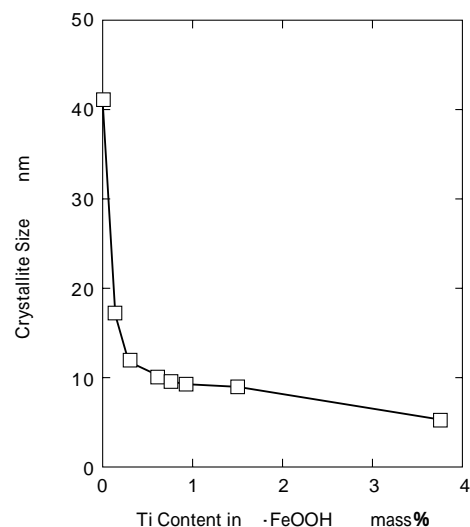
したがって、塩化物環境下でのCrの有害作用は、Cr

の加水分解作用により腐食先端の平衡pHを大きく低下させ、腐食性を高めるためと考えられる。換言すれば、Cr無添加により、さび膜下の腐食先端部のpH低下、ひいては腐食性を緩和できると推定される。

2) Ti添加効果

Tiの耐食性向上効果は一般にSやCなどの耐食性有害元素を固定化 (鋼の清浄化) することが知られている。この作用に加えて、前述したように、塩化物環境で特微的に生成し、しかも安定性・緻密性に劣ることが知られているさびの生成を抑制する効果を発揮することが実さびの調査で明らかにされている⁴⁾。

さらに、さびへのTiの効果について人工さび実験を実施し、XRD, FETEM, メスbauer分光, 分子吸着法などの最新の手法を駆使して、Tiの作用機構を調査中である。これまでの調査で、人工さび実験においてもTiを含有させることによりさびの結晶粒子の大きさを微細化するとともに、その形成を抑制し、緻密なさび層の形成に寄与することを示唆する結果をえており⁵⁾、⁶⁾、これらの作用はさび中のTi量がわずか0.1%でも効果を発揮することを確認している (第7図)。



第7図 さび中のTi量と結晶粒子径との関係

Fig. 7 Relation between crystallite size of $\cdot\text{FeOOH}$ and Ti content in FeOOH

第5表 開発鋼の特性の一例

Table 5 Examples of properties of developed steel

Steels	Chemical Composition mass%							C _{eq} ^{*1)} %	P _{CM} ^{*2)} %
	C	Si	Mn	Cu	Cr	Ni	Ti		
Developed Steel	0.05	0.30	1.10	0.98	-	0.97	0.05	0.27	0.18

*1) C_{eq} % = C + Mn/6 + Si/24 + Ni/40 + Cr/5 + Mo/4 + V/14

*2) P_{CM} % = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5B

Steels	Plate Thickness	Mechanical Properties			Weldability ^{*3)} Preheat Temperature	Mechanical Properties of Welding Joints ^{*4)}		
		YP N/mm ²	TS N/mm ²	vE ₀ J		Welding Method	Heat Input kJ/mm	vE ₀ J
Developed Steel	25	468	530	357	No Crack at 25	Submerged Arc	7.1	294
	40	454	520	365		CO ₂ Gas Arc	1.8	328
Target Properties	50	355	490/610	47	No Crack at 25	-	11.5	47

*3) y-groove weld cracking test

*4) Charpy v-notch impact test, Notch location: HAZ1mm (Fusion line +1mm)

2.1.3 開発鋼の特徴

海浜・海岸耐候性鋼は塩分に対する裸耐食性向上を目的として、上述したようにTiを添加するとともに、Cu, Ni添加量を増加し、Crを無添加とすることにより生成錆の微細緻密化と腐食先端のpH低下を防ぎ、海岸地域においても層状剥離さびが生成しないようにしたもので、次のような特徴を有している。

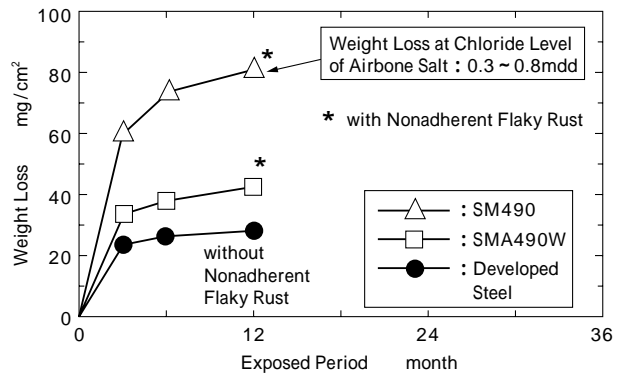
- 1) 成分系は、Cu-Ni-高Ti系 (Cu + Ni 2%, Ti: 0.04 ~ 0.05%) で裸耐食性が従来耐候性鋼の約2倍に向上した。また、飛来塩分量が0.3 ~ 0.8mddの地域にも使用可能である。
- 2) TMCPの活用によりP_{CM}を0.20%以下に低減し、大入熱溶接および溶接割れ防止に必要な予熱低減を達成している。

第5表に開発鋼の特性の一例を、また、第8図に、当社加古川製鉄所岸壁にて週1回、3%食塩水を散布する方法で暴露した1年間の裸耐食性試験結果を示す。

海岸地域の高塩分環境を想定した腐食試験において、海浜・海岸耐候性鋼は優れた裸耐食性を有する。また、板厚40mm材で予熱フリーが実証され、入熱7kJ/mmのサブマージアーク溶接継手性能も良好であることから無塗装耐候性橋梁の適用範囲拡大に貢献しうるものと期待される。

現在、570N級への高強度化および板厚100mmまでの厚肉化に取り組んでおり、専用の溶接材料とボルト・ナット類も商品化している。

むすび = 以上、鋼橋の合理化、使用環境の厳格化に対応しうる新商品として、最近開発した高性能鋼の特性を紹



第8図 加古川製鉄所岸壁における1年間の暴露試験結果 (週1回、3%食塩水散布)

Fig. 8 Result of exposure test at Kakogawa Works' quay for 1 year. (3% NaCl aq. sol. spray once a week)

介した。これらの新商品の一部は、すでに実橋に採用され高い評価をえている。また、海浜・海岸耐候性鋼については実橋での腐食状況追跡調査も開始している。

今後、ここで紹介した高性能鋼に対する需要家の理解をえて普及を図るとともに、「鋼橋の長寿命化と経済性の両立」というさらなる需要家ニーズに的確に応えられる新商品を開発し、鋼材面から貢献していきたい。

参考文献

- 1) 笠松 裕ほか: R&D 神戸製鋼技報, Vol.4, No.2 (1979), p.53.
- 2) 建設省土木研究所, 鋼材倶楽部, 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) A. J. Sedricks: "Corrosion of Stainless Steels", John Wiley & Sons, Inc., New York (1979)
- 4) 岩田多加志ほか: 腐食防食, (1995), p.341.
- 5) 中山武典ほか: CAMP-ISIJ, Vol.11 (1998), p.1110.
- 6) 中山武典ほか: CAMP-ISIJ, Vol.12 (1999), p.423.