

高性能鋼と橋梁への適用

High Performance Steel for Bridge Construction

工藤純一

Junichi Kudo

ABSTRACT This paper describes the high performance steels (HPS's) which have recently been being one of the most topical subjects in the bridge construction industry. Firstly, the Thermo-Mechanical Control Process (TMCP) is introduced as one of the most practical steel technologies to manufacture the HPS's. Secondly, the HPS of a low Pcm value and also that of being especially treated for a high heat-input-welding, which are both effectively manufactured by the TMCP, are discussed from the view point of welding. Finally, the longitudinally profiled steel plate and a weathering steel including the newly developed coastal weathering steel are described in terms of being applied for bridge construction.

KEYWORDS :高性能鋼、TMCP

High Performance Steel,

TMCP(Thermo-Mechanical Control Process)

1. まえがき

我が国では、本州四国連絡橋の建設が完了し、橋梁建設の主体は長大橋から中小スパン橋へと移行しつつある。その結果、鋼橋はPC橋との一段と激しい競争に直面することとなり、コスト節減や合理化に対する要求が一段と高まっている。

このような鋼橋を取り巻く厳しい環境は米国、ECでも同じである。米国では、1990年頃から、従来の橋梁用鋼材より優れた性能を有する High Performance Steel (HPS)とそれを活用した新たな橋梁設計をセットで開発するプロジェクト¹⁾が発足し、最近になって実橋への適用成果が報告されつつある。

また、ECでは、とくにフランスを中心に、コスト節減策の一つとして、LP鋼板 (Longitudinally Profiled Steel Plate)を適用した2主桁橋²⁾の普及が進んでいる。

我が国でも、橋梁設計面での合理化の動きに合わせて、従来の橋梁用鋼より優れた性能を有する鋼材を積極的に活用しようと言う取り組みが始っており、その一部の鋼材が道路橋示方書の平成8年度改訂版の中に取り入れられた。この動きをさらに拡大推進するため、鉄鋼高炉5社が主体となって、社団法人鋼材俱楽部に橋梁研究会を設立した。即ち、日本版 HPS とも言うべき橋梁用高性能鋼を一層有効活用することにより、鋼橋の競争力を高めることを目的として、活動を行なっている。

本報告は、橋梁用高性能鋼の概要と橋梁への適用について述べるものであるが、とくに、高性能鋼の製造において中核をなす TMCP (Thermo-Mechanical Control Process : 熱加工制御プロセス) を紹介しながら、TMCP の効果が端的に發揮される低 Pcm 予熱低減鋼、大入熱溶接用鋼について詳述する。その他については、紙面の都合上、LP鋼板と耐候性鋼について触れるに止めた。

鋼材俱楽部 橋梁研究会 (〒103-0025 東京都中央区日本橋茅場町3-2-10)

(勤務先：川崎製鉄㈱ 厚板セクター室)

表1 米国 A709 鋼規格とわが国の相当鋼規格の化学成分の比較 (mass %)

規格	C	Si	Mn	P	S	Cr	Nb	Cr	Mo	V	B ¹⁾
A709 Gr.70W	≤ 0.19 0.20– 0.65	0.20– 1.35	0.80– 1.35	≤ 0.035	≤ 0.04	0.20– 0.40	≤ 0.50 0.50	0.40– 0.70	– ²⁾	0.02– 0.10	– ²⁾
A709 Gr.100W	0.10– 0.20	0.15– 0.35	0.60– 1.00	≤ 0.035	≤ 0.035	0.15– 0.50	0.70– 1.00	0.40– 0.65	0.40– 0.60	0.03– 0.08	5– 60
JIS SMA570W	≤ 0.18 0.15– 0.65	0.15– 1.40	≤ 1.40	≤ 0.035	≤ 0.035	0.30– 0.60	0.05– 0.30	0.45– 0.75	– ²⁾	– ²⁾	– ²⁾
HBS HT780 ³⁾	≤ 0.09 0.15– 0.55	0.60– 1.50	≤ 1.50	≤ 0.015	≤ 0.015	≤ 0.50 0.50	≤ 1.50 1.50	≤ 0.80 0.80	≤ 0.60	≤ 0.06	≤ 15
SMA570WQ 鋼 実績例	0.10	0.39	1.06	0.008	0.003	0.33	0.19	0.49	0.10	0.037	–
HT780 鋼 ³⁾ 実績例	0.08	0.23	0.89	0.007	0.001	0.23	0.97	0.40	0.40	–	7

注) 1) ppm 2) 必要に応じて添加出来る

3) 予熱低減低 Pcm 型鋼 : 表中の他、Nb≤0.05, Pcm≤0.23 の規制がある

表2 米国 A709 鋼規格とわが国の相当鋼規格の機械的性質の比較

規格	板厚 (mm)	YS (MPa)	TS (MPa)	EI. (%)	vE(平均値)要求
A709 Gr.70W	≤65 (Max.100)	≥485	620–760	≥19	≥30J at -23°C ¹⁾
A709 Gr.100W	≤65 (Max.100)	≥690	760–895	≥18	≥35J at -34°C ¹⁾
JIS SMA570W	40–75 (Max.100)	≥450 ²⁾	570–720	≥20	≥47J at -5°C
HBS HT780 ³⁾	≤50 (Max.75)	≥685	780–930	≥16	≥47J at -40°C
SMA570WQ 鋼実績例	54	503	602	30	351J at -5°C
HT780 鋼 ³⁾ 実績例	34	808	842	24	238 J at -40°C

注) 1) A709 Zone3 の要求値、2) 降伏点一定鋼仕様、3) 予熱低減低 Pcm 型鋼

2. 高性能鋼の定義

米国での HPS の開発を手掛けた Naval Surface Warfare Center の報告書³⁾では、HPS の定義として、1) ASTM A709 の Gr.70、或いはそれ以上の Gr. の (降伏) 強度を有し、2) 高靱性、例えば、ASTM A709 の Zone 3 のシャルピー衝撃試験要求値を満足し、3) 溶接時の予熱フリー或いは予熱低減が可能であり、4) 耐候性を有する鋼としている。ASTM A709 Gr.70W と Gr.100W 鋼の化学成分と強度・靱性規格値をそれぞれ、表1と表2に示すが、両者に対応する日本の鋼材規格例としては、JIS G3114 SMA570 鋼（降伏点一定仕様）と HBS HT780 鋼（予熱低減仕様）が考えられ、それらの規格値と製造実績値の例を比較のため、表中に併記した。米国と日本の規格値は、完全には一致していないが、SMA570 鋼と HT780 鋼の製造実績値はそれぞれ対応する ASTM 規格を満たしている。HBS HT780 鋼は、我が国では、耐候性鋼として分類されてないが、ASTM 規格に照らし合わせて見ても、成分的には、耐候性鋼として取り扱っても問題ないと思われる。

米国 Tennessee Department of Transport では、A709Gr.50W 鋼で設計されていた 3 主桁橋を、上記のような HPS Gr.70W 鋼に置き換えて建設することにより、鋼材重量を 24% 低減し、その結果、建設コストを約 10% 節減出来たと報告している⁴⁾。即ち、米国では、従来の 50 キロ級鋼に変わり、60 キロ級（或いはそれ以上）の溶接性に優れた耐候性鋼を活用してコスト縮減を図ろうという戦略のようである。

一方、我が国の橋梁研究会では、単に 60 キロ級以上という、高張力鋼に限定せず、「鋼橋に汎用的に使用されている鋼種と比較して、強度、靱性、溶接性、曲げ加工性、耐腐食性において、より優れた性能を有する鋼種、鋼材の総称」として、高性能鋼を定義している⁵⁾。橋梁研究会が取り纏めた高性能鋼の主要なものを表3⁵⁾に示す。それらの一部のものは、既に道路橋示方書平成 8 年度改訂版に取り入

れられたり、独自に実橋への適用が進んでいるものもある。但し、それらの高性能鋼の適用による橋梁建設コストへの縮減効果については、未だ、十分に解析されておらず、今後の課題となっている。

高性能鋼は上記のように、種々の優れた性能を有するものであるが、その基本特性は、高強度、高韌性と優れた溶接性である。その3つの特性を兼ね備える鋼板を製造するプロセスとしてはTMCPが有効であり、高性能鋼の広まりとともに、TMCP鋼の橋梁への適用が一層進むものと思われる。

表3 主な橋梁用高性能鋼の概要⁵⁾

名 称	概 要
高 強 度 鋼	HT690, HT780, HT950 等の高い引張強さを有する鋼材
降 伏 点 一 定 鋼	板厚 40mm を超えても保証降伏点が低下しない鋼材
極 厚 鋼 板	道路橋示方書の規定を超える板厚範囲において強度・韌性の優れた鋼板
高 韌 性 鋼	(1) 冷間曲げ加工: 小さい曲げ加工半径が可能な鋼板 (2) 寒冷地仕様: 寒冷地における要求仕様を満足する鋼板
予 熱 低 減 鋼	溶接施工時の予熱温度の低減が可能な鋼材(低 Pcm)
大入熱 溶接対策鋼	調質鋼に対する溶接入熱制限(7万 J/cm 以下)を超えて十分な韌性を有する鋼板
耐 ラ メ ラ テ ア 鋼	板厚方向特性の優れた耐ラメラテア性を有する鋼材
耐 候 性 鋼	(1) 従来の耐候性鋼材に比べ、飛来塩分、融雪材散布に強い鋼材 (2) さび安定化に効果的な表面処理法
亜 鉛めつき用 鋼板	亜鉛めつき焼け、亜鉛めつき割れを抑止する鋼板
LP鋼板(テーパープレート)	長さ(圧延)方向に板厚が連続的に変化する鋼板

3. TMCP による高性能鋼の製造

TMCP の構造用鋼への適用は、大径ラインパイプ用厚鋼板から始まり、その後、造船用鋼、建築用鋼へと広まり、近年になって橋梁用鋼へも本格的に適用されつつある。

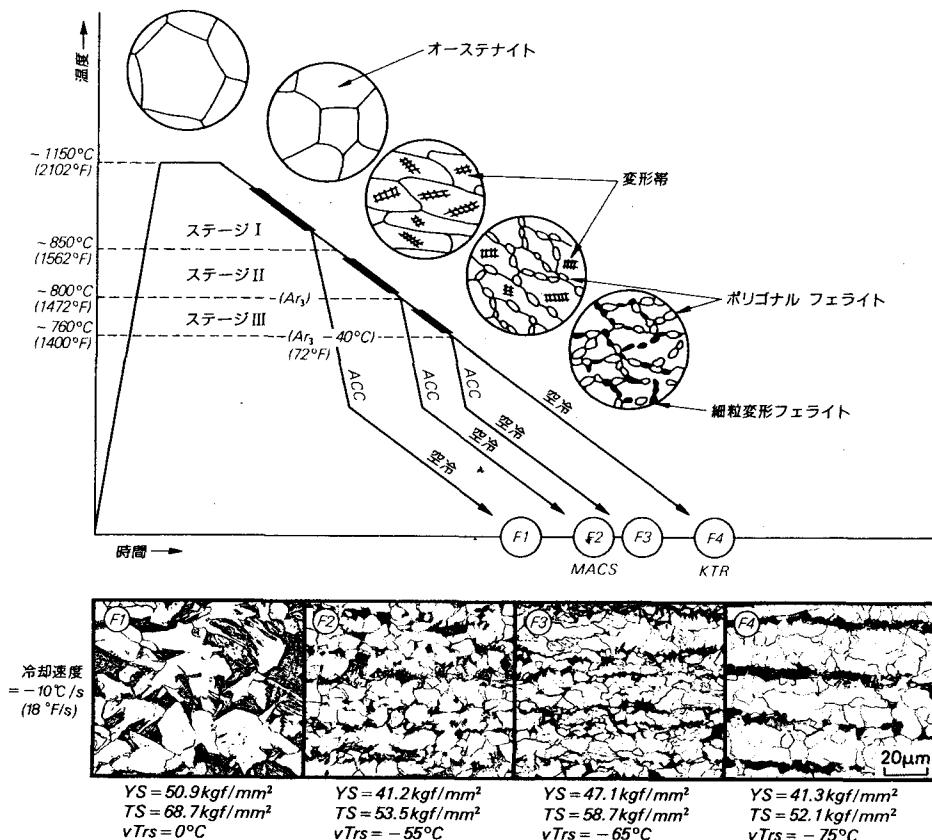


図1 TMCPにおける制御圧延と制御冷却の組み合わせによる組織の変化例

JISにおけるTMCPの定義は、図1に示すような制御圧延プロセス、或いは制御圧延と制御冷却を組み合わせたプロセスとしている。

制御圧延とは、圧延温度と圧延量をきめ細かく制御して、通常の圧延が行われる再結晶オーステナイト温度域のみならず、図1⁶⁾に示すように、より低温の未再結晶オーステナイト温度域、或いは、更に低温域のオーステナイトとフェライトの二相温度域で圧延を行なうプロセスのことである。このような制御圧延を行なうと、結晶粒が著しく細かい、微細組織となり、その結果として、とくに降伏強度の上昇と韌性の大幅な向上が得られる。

制御圧延に引き続いて制御冷却を行なうと、組織の微細化がもう一段進むとともに、ベイナイト組織が導入され、その結果、とくに引張強度の上昇が得られる。

即ち、TMCPを適用することにより、鋼板の韌性レベルが従来の圧延材よりも著しく向上するとともに、図2⁵⁾に示すように、通常圧延材と同じ成分（同じCeq或はPcm）で、より高強度の鋼板の製造が可能となる。逆に言うと、同じ強度の鋼板を、従来より低い成分（低いCeq或はPcm）で製造することができ、その結果として、次節で述べるように、溶接性及び溶接部韌性の向上が図れることになる。

従って、表3中の降伏点一定鋼、高韌性鋼、予熱低減鋼や大入熱溶接対策鋼の製造においては、TMCPの効果が最も良く発揮されるところであり、耐ラメラテア鋼、耐候性鋼、亜鉛めっき用鋼板、LP鋼板でも、とくに溶接性や低温韌性が必要とされる場合には、TMCPが適用される。また、高強度鋼について言うと、これまで、主としてQT（焼入れ・焼戻し熱処理）プロセスにより製造されていたSM570級鋼がTMCPにより製造可能となっている⁷⁾。さらに、QT鋼の圧延過程においてもTMCP(制御圧延)が応用されており、TMCPと直接焼き入れ（プラス焼戻し或は析出強化処理）の組み合わせにより、予熱低減の低Pcm型H780鋼が製造されている⁸⁾。一方、極厚鋼板について言うと、海洋構造物等の種々の分野での実績を含めて、TMCP鋼の適用は板厚100mmまでとなっている⁹⁾。

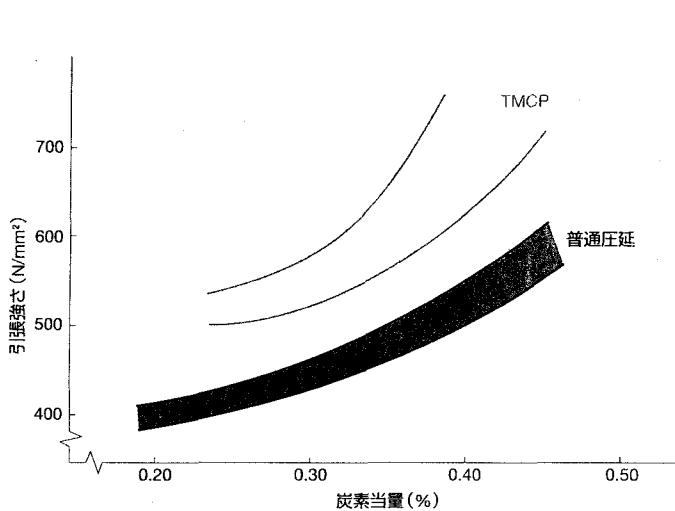


図2 通常圧延材とTMCP鋼における引張強さとCeqの関係

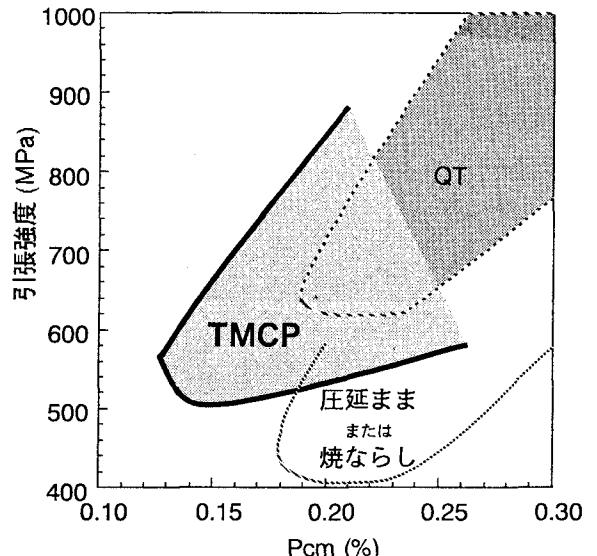


図3 製造プロセスによる強度とPcmの関係

4. 低Pcm予熱温度低減鋼

溶接性の改善は適用板厚の拡大・現地接合の溶接化等により、ますます重要になりつつある。とくに少数主桁のフランジの突合せ溶接や鋼製橋脚のブロック組み立て溶接では、最大板厚100mmまでの厚肉鋼板同士の溶接が行われることから、予熱作業は多大の負荷となり、その条件を緩和することが、施工上、不可欠になっている。道路橋示方書では、予熱温度は鋼板のPcmにより決定するようになっており、Pcmの低い鋼板を使えば、それだけ予熱温度が低減出来る。例えば、Pcmが0.26であれば、板厚 $75 < t \leq 100$ mmの鋼板の予熱温度は60~80°Cとなるが、Pcm≤0.21であれば、予熱温度は20°Cなり、殆ど常温のままで溶接出来ることになる。

一方、鋼板の Pcm と製造プロセスの関係を示すと、図 3 のようになり、前節で述べたように、TMCP を適用すると強度を確保しつつ、Pcm を低減することが可能となる。現在では、SM570 級鋼の場合、Pcm が 0.20 以下の鋼板も製造可能となっている⁷⁾。

従って、鋼板のみに関して言えば、SM570 級鋼の板厚 100mm まで予熱不要のレベルに達していると言えるが、そのような優れた耐低温割れ性能が実際の溶接作業においても発揮されるためには、溶接金属の耐割れ性も十分なものでなければならない。そこで、一例として、極低 Pcm の SM570TMC 鋼⁷⁾を用いて、市中で入手可能な溶接材料との組み合わせで、Y 形溶接割れ試験と窓型拘束割れ試験¹⁰⁾を行い、溶接継手としての割れ性能を調査した。

表 4 は、SM570TMC 鋼 (Pcm=0.17) について、種々の環境 (温度、湿度) 条件下で行った Y 形溶接割れ試験結果を示したものである。溶接材料としては、含有水素レベルの異なる手溶接棒を用いた。

表4 SM570TMC 鋼のY形溶接割れ試験結果

供試鋼	溶接棒	試験環境	割れ率(%)			拡散性水素量 (ml/100g)
			表面	ルート	断面	
SM570Q (Pcm=0.24)	A(低水素系)	30°C × 80%RH	0	67**	30*	4.52
		20°C × 60%RH	44*	100*	94*	3.38
SM570TMC (Pcm=0.17)	A(低水素系)	30°C × 80%RH	0	0	0	4.52
		20°C × 60%RH	0	0	0	3.38
		5°C × 80%RH	10***	65***	34***	3.21
		5°C × 80%RH	0	0	0	2.18
	GMAW(ソリッドワイヤー)	5°C × 80%RH	0	0	0	0.99

試験方法: JIS Z 3158、試験片厚さ: 50mmt、吸湿条件: 試験環境に1時間放置

割れ位置: *; 溶接熱影響部、 **; 溶接金属

比較のため、表中には従来型 SM570Q(Pcm=0.24)の結果も記載したが、従来鋼では 30°C でも割れが発生し、発生位置は溶接熱影響部 (HAZ) であった。これに対して、極低 Pcm の TMCP 鋼の試験片では、割れは、HAZ ではなく発生せず、溶接金属内でのみで発生している。即ち、高 Pcm の従来鋼では、HAZ での硬化が大きいため、HAZ で低温割れを生ずるが、極低 Pcm の TMCP 鋼では、HAZ での硬化が小さいため、割れは HAZ では起こらず、溶接金属内で起こることになる。そして、溶接金属の割れは、試験環境と溶接材料の含有水素量から決まる拡散水素量により大きく左右されている。例えば、20°C × 60% の環境であれば、通常の低水素棒 A (約 3 ml/100g) で割れは生じないが、5°C × 80% の環境において、割れを発生させないためには、極低水素棒 B (約 2 ml/100g) を使用する必要がある。参考のために行った GMAW (ソリッドワイヤー) では、水素量がさらに下がるため、5°C で割れは発生せず、TMCP 鋼の優れた耐割れ性能が活かされることになる。一方、表 5 は板厚 83mm の SM570TMC (Pcm=0.18) を用いて行った窓型拘束割れ試験結果を示したものである。本試験は、図 4 に示すように、四周を全面拘束溶接された極めて拘束力の大きい試験片を用い、小入熱 - 多層溶接継手での、溶接金属の耐割れ性を評価するものである。溶接材料としては、実溶接施工で汎用されている GMAW のソリッドワイヤー (SW) とフラックスコアードワイヤー (FCAW) を用いた。前者はその低水素性故、耐割れ性に優れ、後者は比較的含有水素量は高いが、溶接作業性に優れている。両ワイヤーを使って、予熱温度 - パス間温度を 20°C - (20~50°C) 及び 50°C - (50~150°C) の 2 条件で試験溶接を行った。その結果は、表 4 に示すように、両ワイヤーのいずれの予熱 - パス間温度条件でも割れは発生しなかった。即ち、常温で、予熱なしでそのまま溶接を行っても、HAZ と溶接金属を含めて、割れ発生の恐れはないことが分かった。

以上に述べた Y 形溶接割れ試験と窓型拘束割れ試験結果から、市中で販売されている溶接材料を適正

に選択し、溶接条件の適正化を図れば、極低 Pcm 型 TMCP 鋼の優れた耐割れ性が活かされることが分かった。実構造物の製作・施工は複雑であるため、上記の試験結果をそのまま当てはめることが出来るとは限らないが、低 Pcm 鋼を適用すれば、施工条件が緩和出来る場合もあると考えられる。

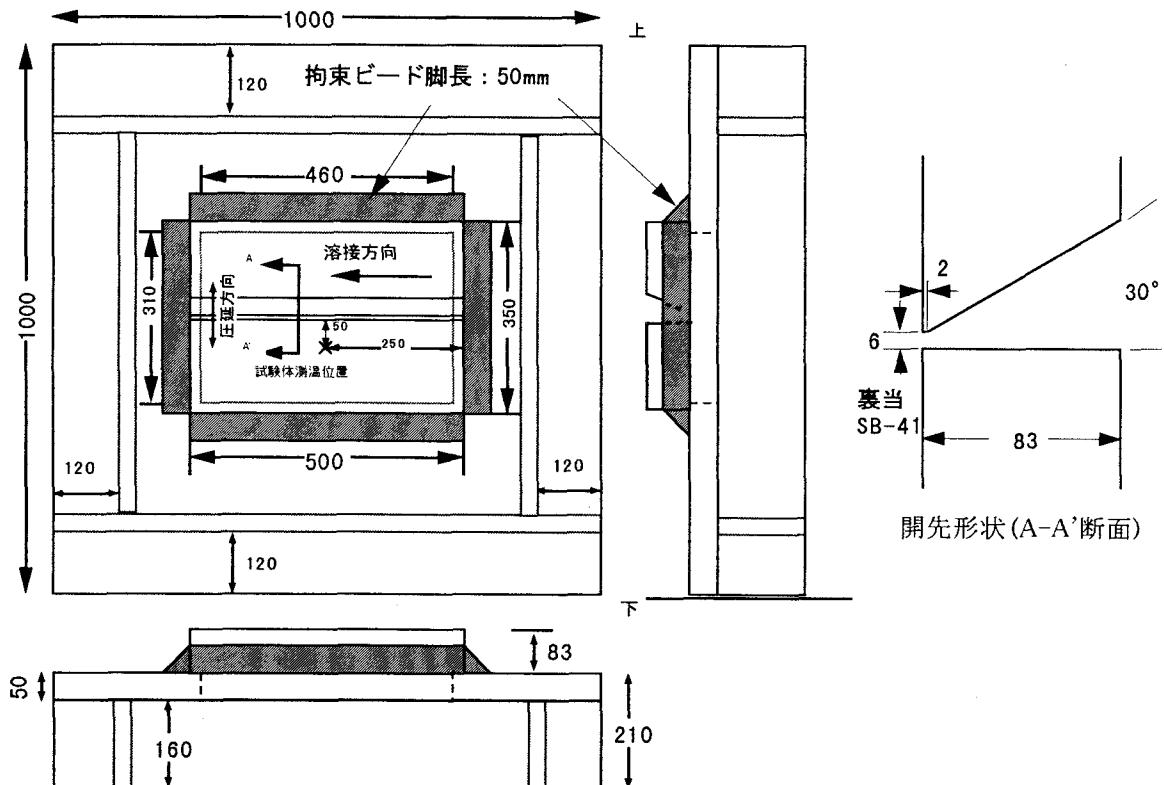


図4 窓型拘束割れ試験片形状

表5 窓型拘束割れ試験結果:供試鋼板;SM570TMC(Pcm=0.17)

溶接材料	拡散性水素量 (ml/100g)	溶接パス (計:約 80)	溶接入熱 (kJ/cm)	予熱温 度 (°C)	パス間温 度 (°C)	浸透探傷 試験結果
GMAW ソリッドワイヤー (1.2mm φ)	(30°Cx80%RH) 1.9	初層	32	20	20~50	割れ無し
		中間層	17			
		仕上げ層	10	50	50~150	割れ無し
		最終パス	8			
GMAW FCAW (1.2mm φ)	(30°Cx80%RH) 4.33	初層	32	20	20~50	割れ無し
		中間層	17			
		仕上げ層	9	50	50~150	割れ無し
		最終パス	8			

5. 大入熱溶接用鋼

現地溶接施工の効率化策の一つとして、大入熱溶接が適用され始めている。主な適用例は、第2東名高速道路の大府高架橋及び名和高架橋で、I桁ウェブの突合せ溶接にエレクトロガス溶接(EGW)が採用された。少数主桁のウェブの板厚は25~30mm程度になり、これの突合せ溶接に用いられるEGWの入熱は150~200kJ/cmに達する。道路橋示方書では、溶接継手部の強度、韌性も鋼板の規格値以上で

あることを要求しているが、通常の鋼板を使用して、大入熱溶接を行なうと、HAZでの韌性が要求値を満足出来なくなる場合がある。このような HAZ 韌性劣化を防止する冶金的手法としては、基本的には、P, S 等の不純物元素の低減と、図 5¹¹⁾ にしめすように、低 Ceq (或いは低 Pcm) 化が有効である。それに加えて、TiN 析出処理、REM-Ti 処理、或いは Ti 酸化物処理等の、結晶粒粗大化防止策¹²⁾ を適用すると、図 6¹¹⁾ に示すように、通常鋼に比較して、著しく細かい HAZ 組織が得られ、十分な韌性を確保することが出来る。表 6 に大入熱溶接用鋼の EGW 継手特性データーの例を示す。

大入熱継手性能は、溶接機器、開先形状、溶接条件等によって影響されるため、大入熱溶接の適用に当たっては、原則的に施工条件毎に確認試験が必要であり、施工者と鋼材メーカーの両者が認識した上で行なうことが不可欠となる。

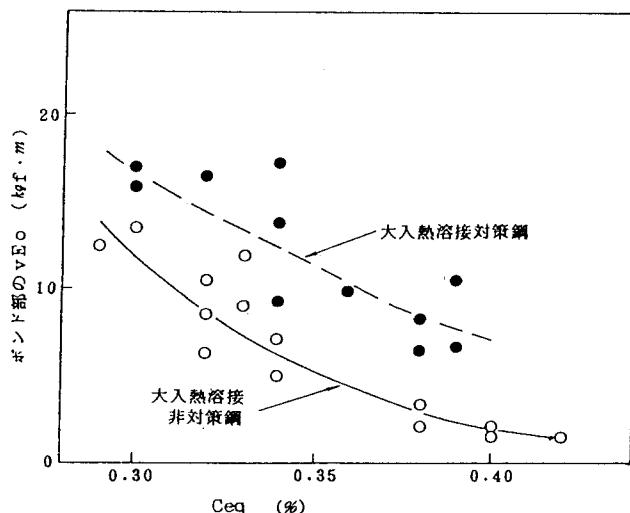


図 5 大入熱溶接継手の溶接熱影響部の韌性に及ぼす Ceq の影響(板厚:20~35mm、溶接入熱:120~250kJ/cm)

表 6 大入熱溶接用鋼の EGW 継手特性データー例

板厚:20~30mm、入熱:110~200 kJ/cm

鋼板規格	Ceq/Pcm (%)	継手引張強さ (N/mm ²)	vE (J)*	
			WM	HAZ
SM490YTM-C	0.38/0.22	589	64	139
SM570TMC	0.29/0.14	613	102	172
SM570Q	0.39/0.21	622	71	168
SMA570Q	0.42/0.22	618	130	136

注) * : 試験温度: 0°C ~ -5°C

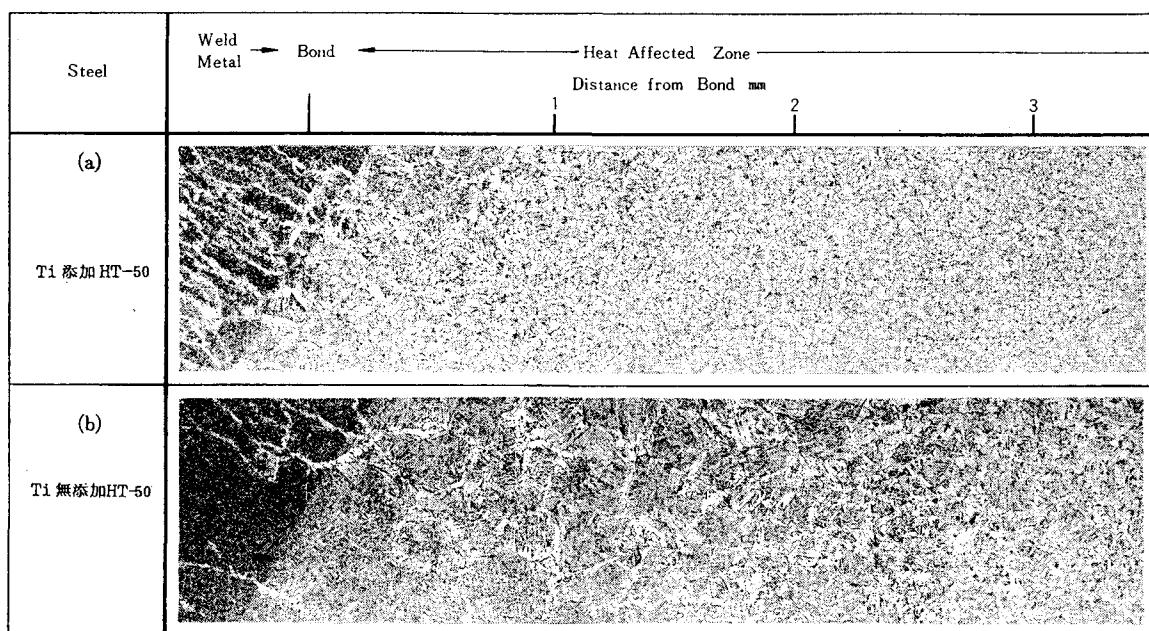


図 6 Ti 添加による大入熱溶接継手熱影響部のミクロ組織の改善(片面1層 SAW、入熱量:150kJ/cm)

6. LP 鋼板

LP (Longitudinally Profiled) 鋼板とは、長手方向に連続的に板厚を変化させた鋼板であり、我が国では、図7に示すような3種類の基本形状のものが製造されている。LP鋼板の製造は、圧延中にロール開度を連続的に変化させて、板厚差を付与する方法により行っている。そのため、製造可能寸法は、圧延設備能力により制限され、国内厚板ミルの場合は、表7に示すように、1m当りの板厚差は最大で4~5 mm程度となるが、LP鋼板の先進国であるドイツ、フランスのミルでは、8 mm/mの板厚差のものが製造されている²⁾。

LP鋼板の橋梁への適用効果としては、1) 必要断面に応じた合理的な板厚構成が可能となり、重量低減を図ることが出来る、2) 同一部材で板厚を変化出来るため、等フランジ幅設計等の合理化設計が容易となる、3) 接合部の等厚化が図れるので、ボルト接合部でのフィラープレートの省略や、溶接継手での板厚調整作業が不要となる、等が挙げられる。とくに、桁高が低い少主桁では、断面が大きくなるので、LP鋼板適用による重量軽減効果が大きくなる。LP鋼板の2主桁橋への適用例として、日本道路公団 北海道横断自動車道 千鳥の沢川橋の断面構成図を図8¹³⁾に示す。

圧延法による
LP鋼板の製造

LP鋼板の基本形状(長手方向断面)

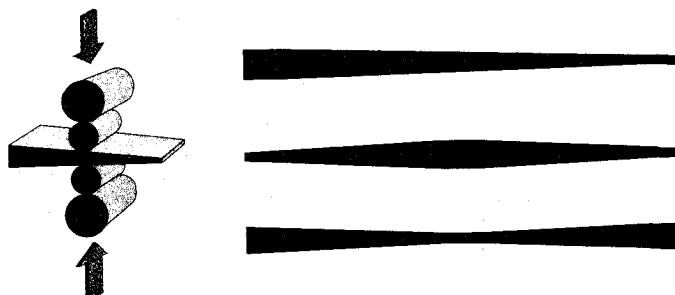


表7 LP 鋼板の製造可能寸法

最大板厚差	25~30mm*
最大テーパー勾配	4~5mm/m 程度
最小薄部板厚	10~15mm*
最大厚部板厚	100mm

注) * : 板厚差、テーパー量に依存

図7 LP 鋼板の製造法と基本形状

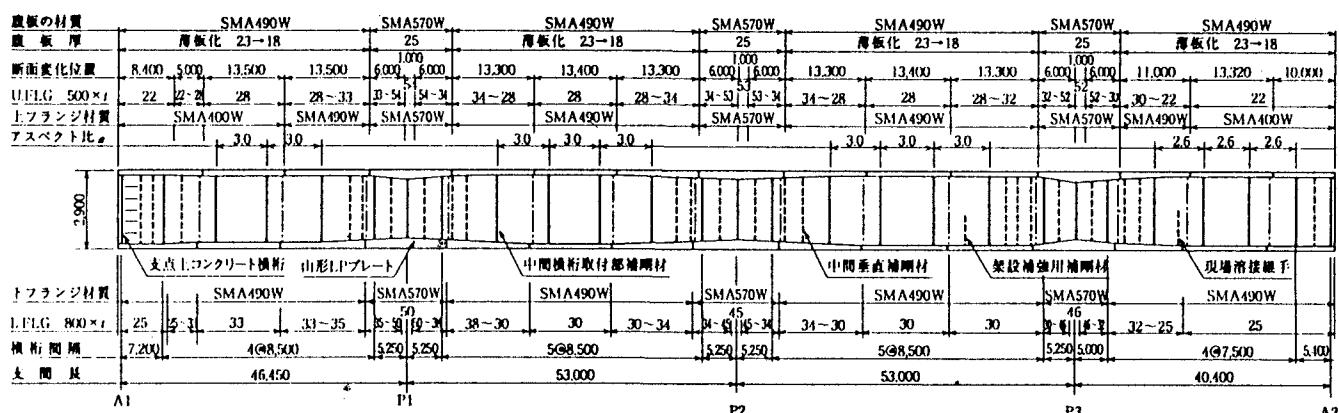


図8 LP 鋼板の適用例:千鳥の沢川橋|桁の断面構成図

日本鋼構造協会 次世代土木鋼構造研究特別委員会 合理化桁の設計法研究小委員会では、LP鋼板を桁へ適用する場合の設計法、製作上の留意点、適用による効果等について、総合的に研究している。当委員会で行なった、LP鋼板適用効果の試算例¹⁴⁾によると、鋼道路橋設計ガイドライン上で参考資料として示されている単純非合成I桁橋にLP鋼板を適用した場合、LP鋼板のみによる適用効果は4%程度である。しかし、ボルト継手の合理化設計を併用すると、継手部の板厚がより薄く出来るため、LP鋼板の適用効果は最大11%に達する結果となっている。

E Cでは、図9に示すように、LP鋼板の橋梁への適用が1983年頃から始まり、1989年以降は、2

主桁橋の普及と共に急激に適用数を伸ばし、1998年までに累計で106橋、30,000tを超える適用実績²⁾となっている。これに対して、我が国では、1994年から現在まで、日本道路公団を中心に、計20橋程度、約2,500tの適用実績に過ぎない¹⁴⁾。我が国において、LP鋼板の一層の普及を図るために、汎用設計ソフトへの組み込みやエキストラ価格の適正化等を検討する必要がある。

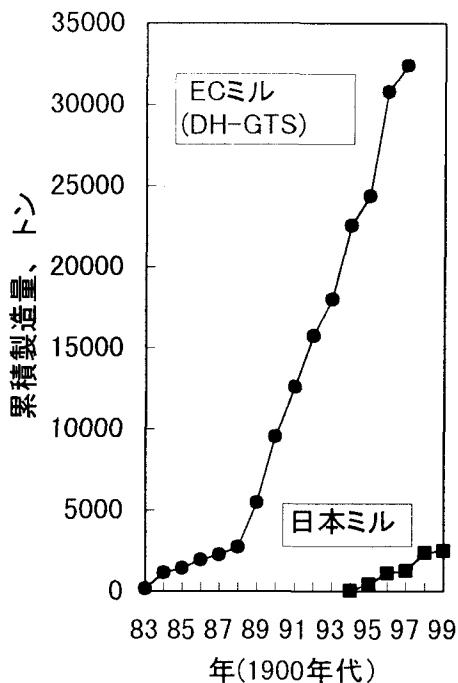


図9 橋梁向けLP鋼板の製造量の推移

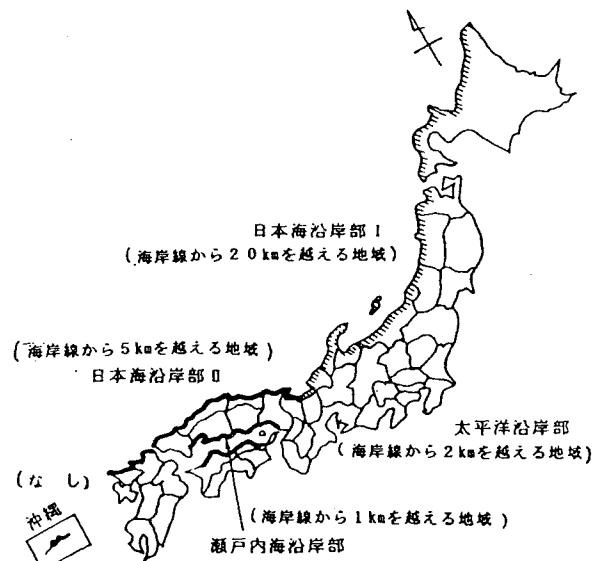


図10 耐候性鋼の使用に当たって飛来塩分量の測定
が必要な地域

7. 耐候性鋼

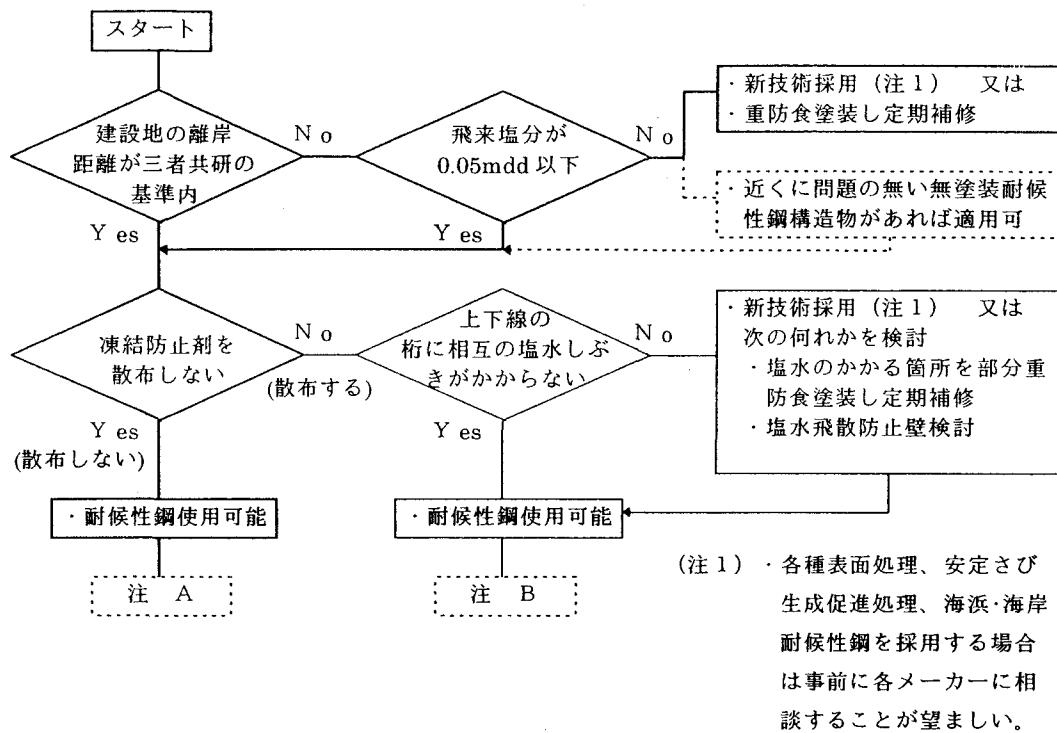
耐候性鋼は無塗装使用が可能であり、近年、鋼構造物に対して求められているTotal Life Cycle Cost Minimum化に適した構造用材料である。

日本における耐候性鋼の橋梁への適用は1967年から始まり、徐々に増加して来ているが、1998年の実績で漸く10%を若干超えた程度に過ぎない。一方、米国では鋼橋の45%(1997年実績)に耐候性鋼が使用されている。米国と日本の耐候性鋼適用比率の相違は、計画時のTotal Life Cycle Costへの意識の違いもあるが、それと共に、1989年にFHWAから耐候性鋼使用に関する設計、施工指針 "Technical advisory T5140.22:Uncoated Weathering Steel in Structure" が出されたことが大きなはずみになっている¹⁵⁾。

我が国でも、沿岸地域の耐候性鋼適用橋梁で飛来塩分による腐食の問題が起こり、更に、1990年代に入るとスパイクタイヤ禁止に伴う道路への凍結防止材(NaCl、CaCl₂等)散布量の増加で、一部で腐食の問題が発生し、耐候性鋼適用に対する疑念も生じた。このような疑念に答えるため、次のような共同研究が行われた。まず最初に、飛来海塩粒子問題への対応としては、建設省土木研究所、日本橋梁建設協会、鋼材倶楽部の3機関による共同研究として、1981~1993年の12年間に渡り、全国41ヶ所で暴露試験調査を実施した。その結果に基づいて、図9に示すような対飛来塩分無塗装耐候性橋梁適用限界基準¹⁵⁾を作成した。次に、凍結防止剤による影響についても、1997~1998年の2年間、日本道路公団、日本橋梁建設協会、鋼材倶楽部による共同調査研究を実施し、その成果を、凍結防止剤適用を考慮した耐候性鋼適用基準(図10)¹⁷⁾として纏めた。本基準に基づいた、適切な耐候性鋼の適用と維持管理によりTotal Life Cycle Cost Minimum化が実現出来るものと思われる。

ところで、従来の耐候性鋼の弱点である耐塩害特性を大幅に改善した、表8に示すような、海浜・海

岸耐候性鋼が開発され、実橋への適用も行われている¹⁷⁾。この新しい耐候性鋼は、塩分飛来環境においても、異常な層状剥離さびを生成せず、腐食の進行を抑制する性能を有するものであり、従来の耐候性鋼の化学成分と比べると、いずれもCrを無添加とし、Ni、Mo、P、Ti等を添加した低合金鋼となっている。図11¹⁷⁾は開発鋼の暴露試験結果の例を示すものであるが、これから明らかのように、従来の耐候性鋼の適用限界（飛来塩分量 $\geq 0.05\text{ mdd}$ ）を超えた環境下においても、板厚腐食減量は著しく抑制されている。今後、このような海浜・海岸耐候性鋼を活用することにより、これまで塩害問題のため、コンクリート橋が適用されていた地域環境にまで、鋼橋の適用が拡大されることが期待される。



<注 A >

- ・初期さび汁対策
 - ・橋脚その他周辺の汚れ防止策要
 - ・各種表面処理、安定さび生成促進処理を採用する場合は事前に各メーカーに相談することが望ましい。
- ・温潤対策
 - ・桁端部漏水防止対策を盛り込んだ設計
 - ・鋼材表面の滯水、温潤塵埃堆積等を防止する構造検討
 - ・桁端部塗装し（橋脚幅程度）、定期点検補修
 - ・各種表面処理、安定さび生成促進処理を採用する場合は事前に各メーカーに相談することが望ましい。
- ・有害ガス対策
 - ・塩素系ガス、硫化水素等の腐食性ガス発生源が橋梁のすぐ近くに無いこと。

<注 B >

- ・凍結防止塩水による腐食対策
 - ・桁端部からの路面水漏水対策を十分に盛り込んだ設計
 - ・各種表面処理、安定さび生成促進処理、海浜・海岸耐候性鋼を採用する場合は事前に各メーカーに相談することが望ましい。

図11 橋梁への耐候性鋼適用検討フロー

表8 耐塩害特性に優れた耐候性鋼の例

鋼種	板厚 mm	成分系	母材特性			
			引張特性		シャルピ-衝撃特性	
			YP (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	試験温度 (°C)	吸収エネルギー J
SMA400W相当	A	25	1.5%Ni-0.3Mo系	257	439	0 351
SMA490W相当	B	25	3%Ni系	405	512	0 230
	C	25	1%Cu-1%Ni-0.05Ti系	474	584	0 322
	D	50	1.5%Ni-0.3Mo系	358	515	0 281
SMA570W相当	E	40	3%Ni系	599	666	-5 310

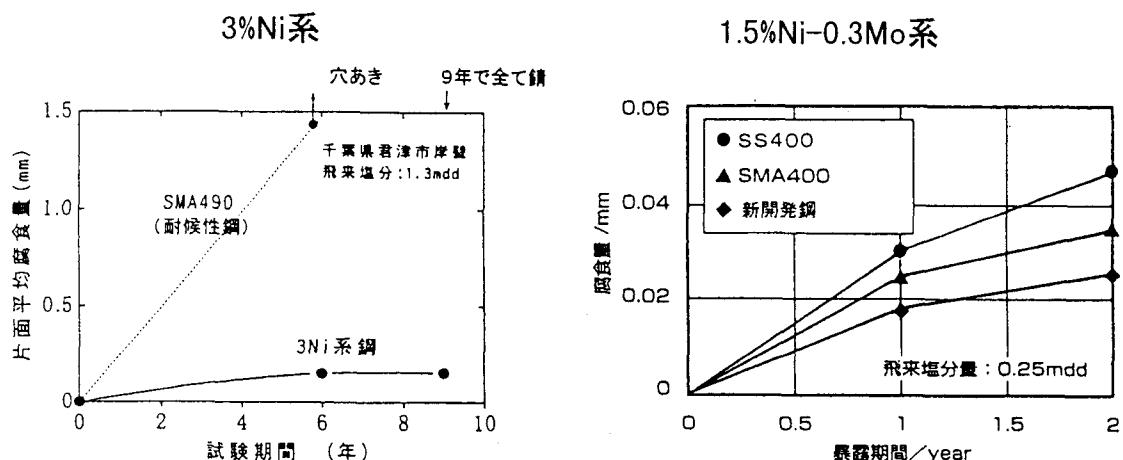


図 12 耐塩害特性に優れた耐候性鋼の腐食減量推移データー例

8. おわりに

橋梁用高性能鋼として、とくに TMCP 製鋼を中心にして取り纏めた。高性能鋼を実橋に適用した場合の定量的評価については今後の大きな課題であるが、高性能鋼をより有効に使用して行くためには、設計、製作側と一緒にになった取り組みが不可欠であると思われ、今後、関係者の一層のご指導とご協力を頂きたい。

参考文献

- 1) J.Muller : High Performance Steel Bridge Concept, Nov. 1996
- 2) J.M.Vigo, R.Hubo, J.Raoul : Modern steels for constructional bridges : Longitudinally profiled-LP-plate, J. of Constructional Steel Research vol.46, 1998, Paper No.28
- 3) E.M.Focht : High Performance Steel Development for Highway Bridge Construction : A Cooperative Effort, Naval Surface Warfare Center, NSWCCD-TR-61, May 1997

- 4) E.Wasserman, A. Azizinamini, H. Pate and W. Greer : Civil Engineering, April 1998, p69
- 5) 鋼材倶楽部 橋梁研究会：高性能鋼の概要(橋梁向け)、1998、鶴茂則：高性能鋼の橋梁適用への期待、第2回土木鋼構造研究シンポジウム、鋼材倶楽部、平成10年1月、p65、Takashi Kusunoki : High-Performance Steels for Bridges in Japan, Proceeding of 3rd Japan-China-Korea Symposium on Structural Steel Construction, Japan Society of Steel construction, April 1999, p69
- 6) 川崎製鉄株式会社：川鉄のMACS鋼板、昭和63年7月
- 7) 岡津光浩、林透、天野慶一：極低炭素ベイナイトを利用した非調質570MPa級厚肉高張力鋼板とその溶接部特性、川崎製鉄技報 vol.30 No.3, 1998, p131
- 8) 間渕秀里：第159・160回西山記念講座、日本鉄鋼協会、平成8年2月、p71
- 9) 久田光夫、三宅孝則、川端文丸：氷海域での仕様を満足するYP420MPa級高韌性海洋構造物用鋼板、川崎製鉄技報 vol.30 No.3, 1998, p142
- 10) 鈴木春義：鋼材の溶接割れ(低温割れ)、溶接学会技術資料No.1、1976年8月
- 11) 高嶋修嗣：大入熱対策鋼、TMCP鋼の溶接構造物への適用に関するシンポジウム、日本造船学会、1983, p93
- 12) 岡本健太郎：第141・142回西山記念講座、日本鉄鋼協会、1992、p37
- 13) 川崎重工業株式会社：PC床版連続合成2主桁橋の設計・施工、平成10年4月、p3-5
- 14) 日本鋼構造協会 合理化桁の設計法研究小委員会：合理化桁に関するデザインマニュアル(中間報告)、平成10年8月
- 15) 鋼材倶楽部 及び日本橋梁建設協会：無塗装耐候性橋梁 米国実態調査報告書、平成10年10月
- 16) 建設省土木研究所、鋼材倶楽部及び日本橋梁建設協会：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年
- 17) 日本道路公団、鋼材倶楽部、日本橋梁建設協会：耐候性鋼材裸使用橋梁への提言、平成11年1月