

## 橋梁用高性能鋼材の適用技術

Technique in application of High Performance Steels For bridge construction

古川 直宏\*

Naohiro Furukawa

ABSTRACT: "High Performance Steel" is the designation given to the steel that offers higher performances in tensile strength, toughness, weldability and cold formability and atmospheric corrosion resistance than those generally used in bridge construction. In this paper, the latest research result is summarized and the technique in application of High Performance Steels for the steel bridge is reported.

KEYWORDS: 鋼橋、高性能鋼、高強度鋼、耐候性鋼、適用技術、  
Steel Bridge, High Performance Steel, High-strength steel,  
Weathering steel, Technique in application,

## 1. はじめに

近年、社会資本の建設において、建設費の縮減、耐久性の向上、維持管理の軽減などが強く求められており、橋梁の分野でも種々の新しい概念の鋼橋が建設されている。これらの鋼橋においては、従来の鋼板に対して、より高度な性能要求を満たした鋼材の使用が不可欠とされるケースも多くあり、使用される鋼材に対するニーズも高度化、多様化しつつある。

このようなニーズに対応すべく開発されてきた鋼材のうち、汎用的な鋼種と比較して、強度、じん性、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、鋼材を総称して高性能鋼と呼んでおり、多くの製品が実用化されている。

(社)日本鉄鋼連盟に設置された橋梁用鋼材研究会では、鋼橋技術・普及と耐候性鋼に関するふたつのワーキンググループを設けて、これらの高性能鋼の普及と適用技術の開発に取り組んでいる。今回はこれまでの取り組み結果を総括して報告する。

## 2. 厚鋼板製造技術の進歩

鋼材の製造技術においては、1980年代以降に鋼板製造時における加熱、圧延および圧延後の冷却の各プロセスを一貫して適切に制御する製造技術であるTMC P (Thermo-Mechanical Control Process) と呼ばれる技術(図-1)の開発が急速に進んだ。この技術を用いて製造された鋼板のマイクロ組織は従来の鋼板に比べて微細化されており(写真-1)、この結果、少ない合金元素とすることで良好な溶接施工性を具備しながらも強度、靱性に優れた鋼材の製造が可能となる。これまで、主に造船やラインパイプ、海洋構造物の分野で広く活用されてきたが、90年代以降には建築分野でも商品開発が進み、橋梁分野においても平成8年度の道路橋示方書<sup>1)</sup>の改訂を契機に、急速に採用事例が増加している。

---

※ (社)日本鉄鋼連盟 橋梁用鋼材研究会 鋼橋技術・普及ワーキンググループ 委員  
(株)神戸製鋼所 厚板研究開発室 主任研究員 (〒675-0023 加古川市尾上町池田 2222-1)

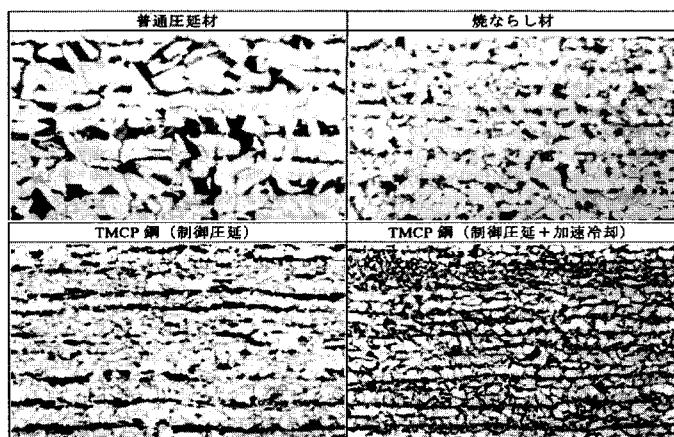


写真-1 TMCP鋼のマイクロ組織の一例

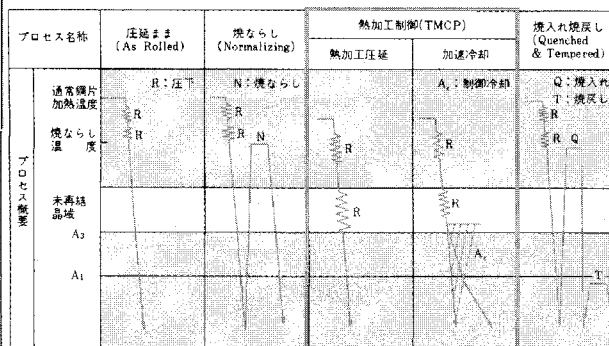


図-1 製造プロセスの概念図<sup>2)</sup>

### 3. 橋梁用高性能鋼の利用技術と適用事例

#### (1) 高性能鋼について

表-1 に、主な高性能鋼を示す。

「高じん性鋼」、「予熱低減鋼」、「降伏点一定鋼」など、平成8年度の道路橋示方書に取り込まれて以降広く普及している。また、大型の少主桁橋などを中心に「LP鋼板」や「大入熱対策鋼」の普及も進んでおり、鋼製橋脚などで板厚方向の強度特性を改善した「耐ラメラテア鋼」のニーズも高まっている。一方で、「極軟鋼」は今後制震ダンパー用などへの利用技術開発が期待される製品である。

以下に、主な高性能鋼の現状や適用事例などを紹介する。

なお、各高性能鋼に関する詳細情報については、日本鉄鋼連盟のホームページ (<http://www.jisf.or.jp/>) に適宜紹介していくので参照されたい。

表-1 主な高性能鋼 (2004.4 現在)

	名称	特性	表記例
①	高強度鋼	引張強さ 570N/mm <sup>2</sup> 以上の高強度の鋼材	
②	高じん性鋼	冷間曲げ加工や寒冷地での使用に対応した鋼材	*-5C, -5L, -7C, -7L
③	LP鋼板	長手方向に直線的に板厚を変化させた鋼材	*-LP1 など
④	予熱低減鋼	溶接施工時の予熱温度低減が可能な鋼材	*-EX
⑤	大入熱対策鋼	大入熱溶接が可能な鋼材	*-EG
⑥	耐ラメラテア鋼	板厚方向の強度特性を改善した鋼材	*-Z15, -Z25, -Z35, -Z15S, -Z25S, -Z35S
⑦	耐候性鋼	大気環境下で、鋼材表面に緻密なさび層が形成され、腐食進展が抑制される鋼材で、マイルドな環境下で無塗装での使用が可能	SMA***W (JIS 耐候性鋼) SMA***W-MOD (ニッケル系高耐候性鋼)
⑧	極厚鋼板 (降伏点一定鋼)	板厚に関係なく規格降伏点を保証した鋼材	*-H
⑨	極軟鋼	降伏点の低さと大きな伸び能力を有した鋼材	LY100, LY225 (建築構造用低降伏点鋼)

\* : オリジナル規格記号 (SM490YB など)、 \*\*\* : 強度クラス (400, 490, 570)

#### (2) 高強度鋼

高強度鋼を選定する最大の目的は、より合理的な設計による鋼重の低減である。

表-2 に、合成鈹桁を対象とし国内基準に準拠して試設計した計算例 (疲労照査は省略) を示す<sup>3)</sup>。試設計では、従来の SM570 材に対して HT690 で 20%、HT780 で 40% の鋼重低減効果が得られた。また、懸念された活荷重たわみについても、現行規定値 (L/500) を満足し問題にならない結果となった。

表-2 道路橋の国内基準に基づく合成鉄桁の計算例

ケース	1-1	1-2	2-1	2-2
断面概要形式				
支間長	65+80+65	65+80+65	80+100+80	80+100+80
主構鋼種	SM570	HT690	SM570	HT780
鋼重 (kg/m <sup>2</sup> )	267	214	435	262
活荷重たわみ	—	L/860	L/941	L/581
鋼重低減率	—	1-1に対し20%	—	2-1に対し40%

一方、道路橋示方書では、許容応力度法が設計法として採用されており、570N/mm<sup>2</sup>級材までが使用鋼材の標準とされている。そのため、荷重抵抗係数設計法(LRF D: Load and Resistance Factor Design)を採用し、使用鋼材を降伏強度 248~690N/mm<sup>2</sup> (国内の SM400~HT780 に相当) を対象とする AASHTO を基準に検討されるケースが多い。

図-2 に、比較的短い支間長 33m の単純合成鉄桁橋を対象とした AASHTO に基づく計算例<sup>4)</sup>を示す。表-2 より鋼材の高強度化は一般に鋼重の低減につながる事がわかる。ただし、AASHTO の規定によりコンパクト断面として扱える降伏強度が 485N/mm<sup>2</sup> 以下であることから、降伏強度が 586N/mm<sup>2</sup> の鋼材では重量の増加が起こっている。今後、コンパクト断面の適用限界を拡大させることが可能となれば、高強度鋼の適用メリットはさらに大きくなると考えられる。

また、疲労限界によって鋼重が低減しない降伏強度 690N/mm<sup>2</sup> 以上においても、TIG 処理やハンマーピーニング処理などの溶接部止端仕上げにより疲労強度を向上させることができれば、高強度鋼の適用メリットをさらに引き出せる可能性がある。

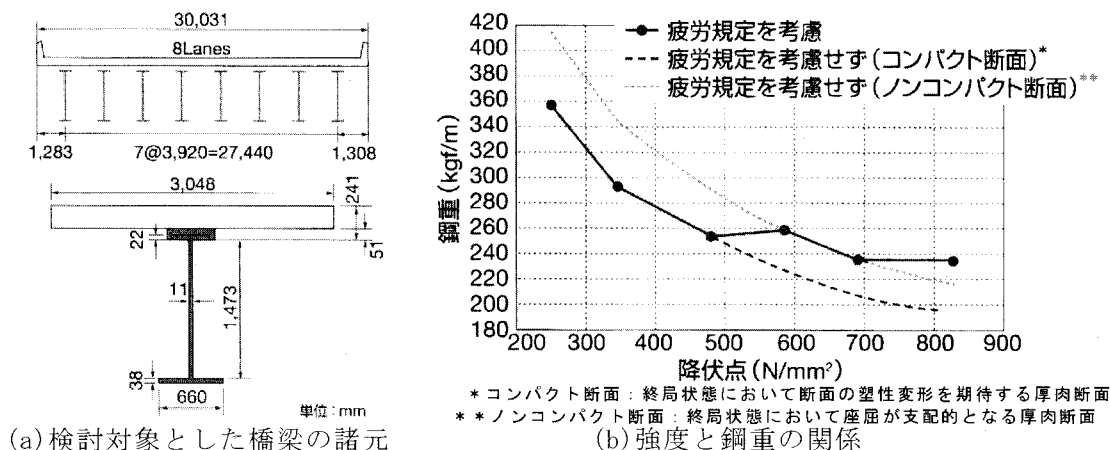


図-2 AASHTO に基づく合成鉄桁の計算例

### (3) 高じん性鋼

鋼は、本来優れたじん性を有しているが、強加工を受ける鋼材、温度が低い環境での供用においては、鋼材自身のじん性を一層高めた高じん性鋼の使用が最適となる。

以前は、冷間曲げ加工については、半径の 1.5 倍以上の緩やかな加工に規定されていたが、平成 8 年度の道路橋示方書改訂以降は、じん性の高い鋼板を使用することによって厳しい冷間曲げ加工が可能となっている。

写真-2 は、高じん性鋼を用いて、トラス構造の下弦材に角形鋼管 (350×350mm: 板厚 13~28mm) を

使用した事例である<sup>5)</sup>。角形鋼管は、道路橋示方書の上記規定を大きく上回る曲げ半径(2.5t)の冷間曲げ加工が行われたため、鋼管の母材には特に厳しい要求を満たした高じん性鋼が用いられた。

写真-3 は、極寒地に建設された事例で、建設現場となったカザフスタン共和国で、冬には-50℃近い記録も残されている。このため、本橋では鋼材のみならず溶接継手部も含めて-50℃で所定のじん性を確保することが要求され、これらの極めて厳しい要求を満足する高じん性鋼と高度な溶接施工技術によって要求性能を満足させた<sup>6)</sup>。

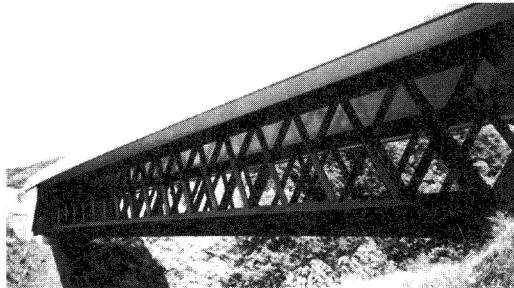


写真-2 滝下橋  
(発注：日本道路公団、施工：豊平製鋼)

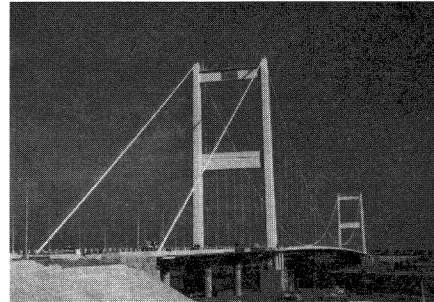


写真-3 イルティッシュ河橋  
(発注：カザフスタン共和国、施工：IHI)

#### (4) 耐ラメラテア鋼

鋼構造物の大型化かつ複雑化にともない、鋼橋分野においても構造上や景観上の面などから拘束の厳しい溶接継手となる構造が増加している。このような部位では、板厚方向に大きな引張応力を受けるため、鋼板表面に平行なラメラテアと呼ばれる割れが発生するケースがある。その発生原因は、非金属介在物(主にMnS)を起点とするもののほか、ルート割れが起点になっているものなどがある。

このラメラテアを防ぐために、板厚方向の引張試験における絞り値と鋼中のS量が規定された耐ラメラテア鋼の採用が推奨されている。表-3 に規格の概要を示す。具体的な適用部位としては、図-3 などの板厚方向への強い応力を受ける部位となる。必要性能については、溶接継手の種類、組み合わせる鋼材の厚さの比、拘束度、溶接法によって異なり個々の条件により決定する必要がある。なお、個々の試験により求める手法<sup>7)</sup>や、体系的な試験結果をもとにした提案(表-4)などが参考となる。

表-3 耐ラメラテア鋼の規格 (JIS G 3199)

クラス番号	3個の試験値の平均値	個々の試験値	S量 (%)
Z 1 5 (S)	1 5 %以上	1 0 %以上	0.010 以下
Z 2 5 (S)	2 5 %以上	1 5 %以上	0.008 以下
Z 3 5 (S)	3 5 %以上	2 5 %以上	0.006 以下

受渡当事者間の協定  
によって適用する

備考：等級分類は、日本溶接協会 WES3008 を参考とする  
クラス番号でのS表示は、S含有量指定の場合に付加

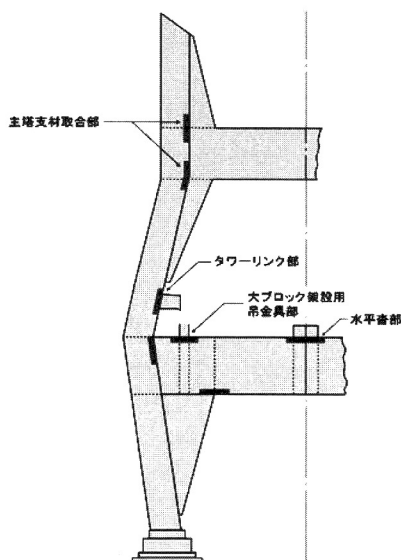


図-3 耐ラメラテア鋼の適用箇所の例

表-4 日本溶接協会 WES3008 による各種継手に対するラメラテア防止に必要な絞り値の目安<sup>8)</sup>

継手の種類		ラメラテア防止に必要な限界絞り値
貫通板継手	すみ肉溶接	1 5 %
	完全溶込み溶接	1 5 % (拘束度 ≤ 40 t <sub>2</sub> )
		2 5 % (40 t <sub>2</sub> < 拘束度 ≤ 70 t <sub>2</sub> )
完全溶込み溶接 突出しなし	2 5 % (ガス切断面の深さ 2mm 以下の微小割れは除外)	
T継手	すみ肉継手溶接	1 0 %
	両側開先溶接	1 5 %
	片側開先溶接	2 5 %
角継手		1 0 % ( t <sub>1</sub> ≤ 25mm)
		2 0 % ( t <sub>1</sub> > 25mm)

t<sub>1</sub>: ラメラテアの発生のおそれのある鋼材の厚さ(mm)  
t<sub>2</sub>: 取付あるいははさみ込み材の厚さ(mm)

(5) LP鋼板

LP鋼板 (Longitudinally Profiled Steel Plate) とは、長手方向に直線的に板厚を変化させた鋼板であり、最近開発された高度な圧延技術(図-4)とともに、圧延後のせん断や寸法検査など総合的な技術開発によって製造が可能となっている<sup>3)</sup>。

この鋼板の採用により、溶接個所の減少や重量低減などのコスト縮減が期待されている。ドイツやフランスでは既に100橋以上の採用事例があり、国内でも1994年の「深沢川橋」での初採用以降約13,000トン(2004年5月時点)の実績を有している。

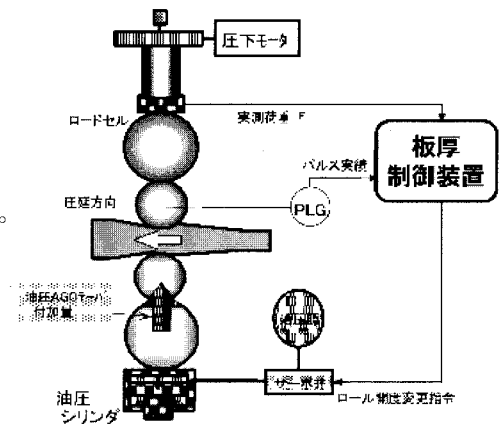


図-4 最新の板厚制御システム

4. 高性能鋼を活用した試設計例

少数主桁橋においては、特に高性能鋼の特性を活かした設計を行うことによって、製作コストの縮減が期待されている。そこで、2主桁橋を例に、高性能鋼(極厚鋼板、LP鋼板)使用によるコスト縮減効果の検証を行った<sup>9)</sup>。試設計の概要を下記に示す。

形式： ① 3径間連続合成2主桁橋 (60@3=180m) (図-5、表-5)

② 3径間連続合成2主箱桁橋 (85+100+85=270m) (図-6、表-6)

桁高： 3.0~2.5m、活荷重： B活荷重

床版： 鋼・コンクリート合成床版

その他： 設定LP鋼の最大テーパー率=6mm/M、少補剛設計

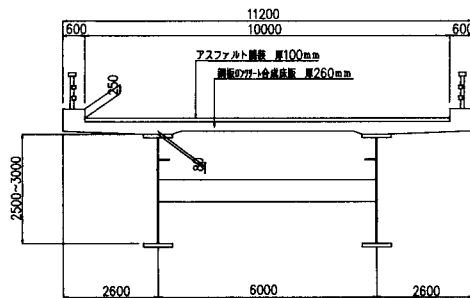


図-5 2主桁橋幅員構成

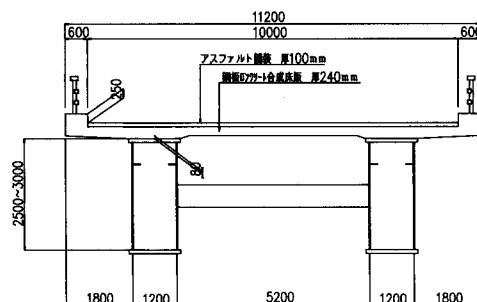


図-6 2主箱桁橋幅員構成

表-5 設計条件比較

CASE	CASE. 1	CASE. 2	CASE. 2-LP
最大部材長	13m		
基本鋼材	SM490Y	SM490Y (1部 SM570)	
LP鋼材	なし	使用	
桁高	3.0m	2.5m	
添接	HTB継手		
垂直補剛材	5m間隔		
水平補剛材	1段		

表-6 設計条件比較

CASE	CASE. 3	CASE. 3-LP	CASE. 4
最大部材長	13m		
基本鋼材	SM490Y (1部 SM570)		SM570
LP鋼材	なし	使用	なし
桁高	3.0m	2.5m	
添接	HTB継手		
垂直補剛材	5m間隔		
水平補剛材	1段	なし	

試設計結果による概算数量を表-7、表-8に、工数算定集計表を表-9、表-10に示す。

この概算数量を使用して「土木工事積算マニュアル」<sup>10)</sup>に基づいて積算した工事費の比較を行った。なお、鋼材費については建設物価版(平成14年2月)を、製作費については、製作工数に労務費単価25,700円を乗じて算出し、間接労務費は35.2%、工場管理費は28.1%としている。また、架設費については一般的なトラッククレーン・ベント工法として135,000円/トンを計上している。

それぞれの条件において工費比較を行った結果を、図-7に示す。

2主鈹桁、2主箱桁ともに、板厚の厚い高強度鋼とLP鋼板を組み合わせた場合に最も経済性が優れることがわかった。また、この組合せにより、2主鈹桁橋において、60mの支間に対し桁高2.5m(1/24)、2主箱桁橋において、100mの支間で桁高2.5m(1/34)という低い桁高の可能性が示唆された。

都市内高架橋においては、一般に少主桁橋は桁高制限の関係から適用が難しいと考えられるケースが多いが、極厚鋼板の活用により少主桁橋梁の適用が期待される。さらに、LP鋼板を活用することによって、工事費の縮減も期待される。なお、今回検討した極厚鋼板、LP鋼板を用いた細幅箱桁橋については、既に施工実績も有している(郡山バイパス「日本橋」)。

一方、設計にあたっては、支間長、主桁ブロック長、添接形式(高力ボルト接合 or 高力ボルト接合)によって、メリットに相違が生じると考えられる。今回検討した極厚鋼板やLP鋼板を生かすための設計フローの案を図-8,9に示す<sup>3)</sup>。

また、使用鋼材が極厚化することによって、ボルト列数の増加や長尺化、あるいは現場溶接などの問題が避けられなくなる。高力ボルト接合については、太径ボルト(M30程度)の採用(本四公団の橋梁に設計法および製造実績あり)や研究開発が進む遅れ破壊防止型の新高強度ボルト(F13T以上)の実用化が待たれるが、溶接においては、前述のTMC P技術を活用した「予熱低減鋼」や「大入熱対策鋼」が既に実用化されており、現地施工性の向上に寄与している。

表-7 概算数量表(2主鈹桁)

CASE	単位	CASE.1	CASE.2	CASE.2-LP
上部工形式		3径間連続合成2主鈹桁		
支間長	m	L=60+60+60		
桁高	m	3.0	2.5	2.5
鋼重	t	450	467	424
製作工数	工数	1,335	1,429	1,360
床版面積	m <sup>2</sup>	2,016	2,016	2,016
現場塗装面積	m <sup>2</sup>	3,632	3,248	3,254

表-8 概算数量表(2主箱桁)

CASE	単位	CASE.3	CASE.3-LP	CASE.4
上部工形式		3径間連続合成2主箱桁		
支間長	m	L=85+100+85		
桁高	m	3.0	3.0	2.5
鋼重	t	1,151	1,073	1,236
製作工数	工数	3,933	3,787	4,318
床版面積	m <sup>2</sup>	3,024	3,024	3,024
現場塗装面積	m <sup>2</sup>	4,961	5,004	4,465

表-9 工数算定集計表(2主鈹桁)

種別	種類	CASE.1	CASE.2	CASE.2-LP
部材数	部材数	53	53	53
	材片数	138	138	138
大型材片	鋼重(t)	383.6	398.7	356.0
	材片数	805	805	805
小型材片	鋼重(t)	57.1	59.1	59.3
	鋼重合計(t)	440.7	457.8	415.3
加工重量	内SM570相当(t)	0.0	73.9	68.4
	H.T.B(t)	9.4	9.3	9.3
溶接	大型材T継手溶接長(m)	816	816	816
	工場塗装(m <sup>2</sup> )	3,383	3,000	3,005
塗装	現場塗装(m <sup>2</sup> )	3,632	3,248	3,254
	本体加工組立工数	1,093	1,131	1,083
製作工数	本体溶接工数	34	34	34
	570材相当品影響係数	1.00	1.04	1.04
	本体仮組立工数	169	175	158
	全体製作工数	1,335	1,429	1,360

表-10 工数算定集計表(2主箱桁)

種別	種類	CASE.3	CASE.3-LP	CASE.4
部材数	部材数	75	75	75
	材片数	220	220	220
大型材片	鋼重(t)	977.9	899.9	1,101.5
	材片数	1,269	1,269	1,085
小型材片	鋼重(t)	147.1	147.1	103.9
	鋼重合計(t)	1,125.0	1,047.0	1,205.4
加工重量	内SM570相当(t)	130.5	91.4	1,158.1
	H.T.B(t)	26.1	26.1	31.5
溶接	大型材T継手溶接長(m)	4,403	4,403	4,403
	工場塗装(m <sup>2</sup> )	9,657	9,682	7,955
塗装	現場塗装(m <sup>2</sup> )	4,961	5,004	4,465
	本体加工組立工数	2,838	2,724	2,590
製作工数	本体溶接工数	185	185	185
	570材相当品影響係数	1.03	1.02	1.24
	本体仮組立工数	596	558	633
	全体製作工数	3,933	3,787	4,318

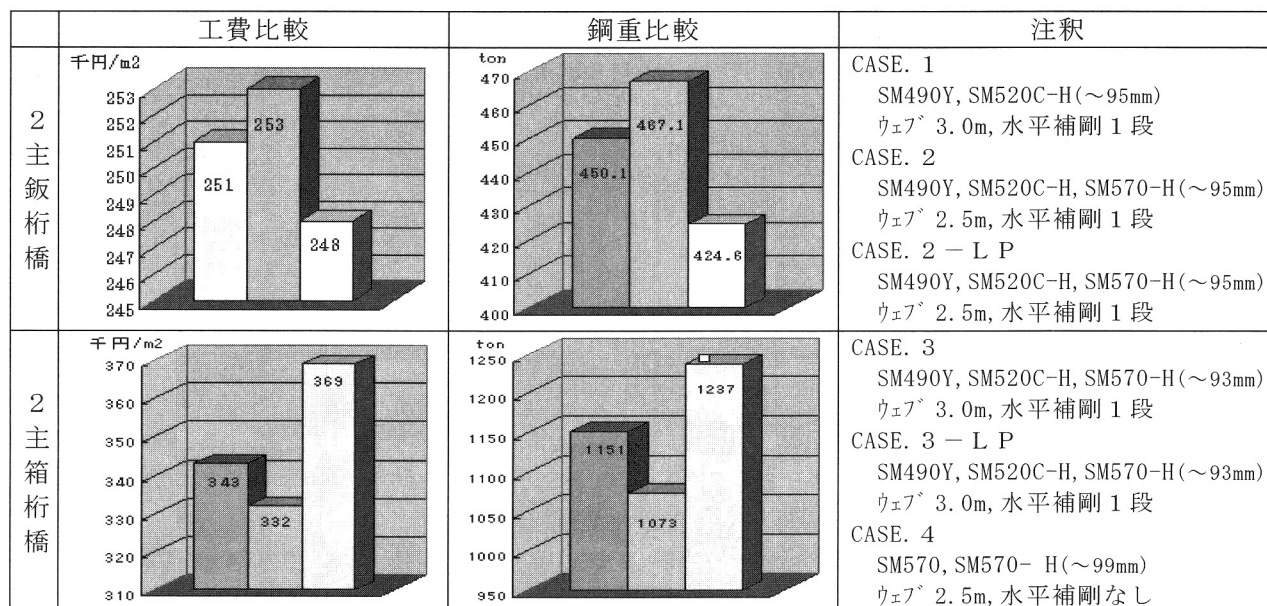


図-7 試算結果

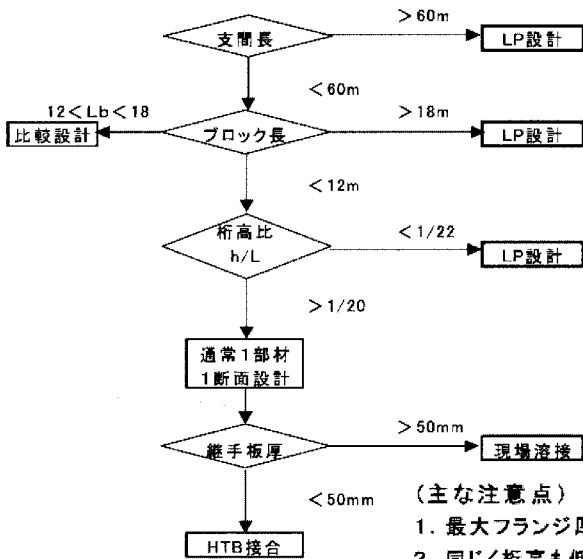


図-8 設計フローの概念

(主な注意点)

1. 最大フランジ厚が100mmを目標にフランジ幅を細くする。(中間支点上)
2. 同じく桁高も低く設定する。
3. 腹板は、極力水平補剛材を省略できる板厚とする。

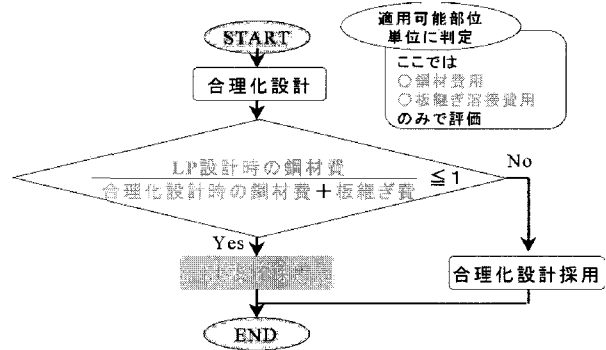


図-9 LP鋼板を使用する際の設計手順

## 5. 新しい高性能鋼

### (1) 橋梁用高性能鋼材「BHS500, 500W, 700W」

TMC Pなどの製造技術の進歩によって、溶接施工性と高強度の両立を図った鋼材の開発が進んでいる。このような中、1994年より東京工業大学 創造プロジェクト研究体に設けられた産学連携の研究會によって、橋梁用の高性能鋼材として付加すべき特性が整理され、長年の研究成果をもとに「橋梁用高性能鋼材(BHS500, 700)」の規格案が作成され提案されている<sup>11)</sup>。

この新しい高性能鋼が基本的に具備する性能の主なもの示す。

- ・ 高降伏点を保証 (BHS500, BHS500W : 500N/mm<sup>2</sup> 以上、BHS700W : 700N/mm<sup>2</sup> 以上)
- ・ 普通鋼シリーズと耐候性鋼シリーズをもつ。ただし、700N/mm<sup>2</sup>は耐候性鋼のみ
- ・ BHS500, BHS500W では予熱不要とする (参考: 図-10)
- ・ BHS500, BHS500W では入熱 10kJ/mm の大入熱溶接に対応 (寒冷地仕様を除く)
- ・ その他、冷間曲げ半径  $\geq 7t$  などの特別仕様にも対応

良好な溶接施工性を活かすことによって10%以上のコスト削減が可能との試算もあり、今後大きく期待される高性能鋼の一つである。

表-11 BHS規格(案)の記号と板厚範囲

分類		種類の記号	適用板厚(mm)
570N級鋼	一般鋼	BHS500	100以下
		SM570 (参考)	100以下
	耐候性鋼	BHS500W	100以下
		SMA570W (参考)	100以下
		HPS485W (米国)	100以下
780N級鋼		BHS700W	100以下

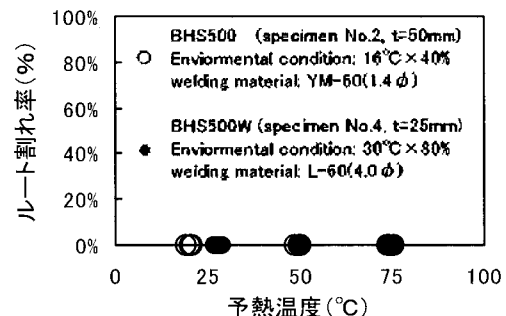


図-10 BHS500, 500W の y 型溶接割れ試験結果

### (2) 極軟鋼「LY100, 225」

耐震性の一層の向上を図るべく履歴型ダンパーを用いた制震装置の開発が進んでいる。このダンパー用の鋼材は、汎用鋼(SM400A など)に対して、より厳しい強度管理が要求される。この動きに対応し、「建築構造用低降伏点鋼 LY100, LY225」が開発され、規格化されている<sup>3)</sup>。表-12に規格の概要を示す。建築向け鋼材として必要な建築基準法 37 条 2 号による大臣認定も、2000 年 11 月に取得している。

この鋼板は、下記の 2 点の厳しい品質要求を満足している点が大きな特徴である。

- ・ 降伏応力に対する厳しい狭幅管理 ( $\Delta 40\text{N/mm}^2$ )
- ・ 高いのび特性 (LY100 :  $\geq 50\%$ 、LY225 :  $\geq 40\%$ ) (図-11)

また、地震時応答挙動においては、塑性域での安定したヒステリシスループを描くことによって、大きなエネルギー吸収を確保することができる。図-12 に建築構造ブレース材として使用した時の繰返し載荷時における履歴特性の一例を示すが、LY100, 225 は優れた特性を有していることがわかる。

建築分野では、この特性を活かした履歴型ダンパーが種々提案され、実用化されている(図-13)。橋梁分野においても適用技術に関する研究は始められているが、この鋼材の特性を如何に有効に構造部材として取り入れるかが課題であり、一層の研究開発が期待される。

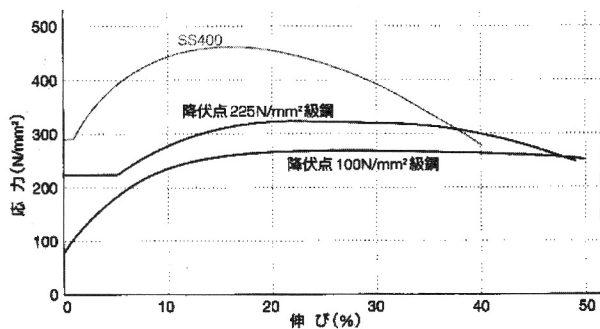


図-11 極軟鋼の応力-ひずみ曲線の例

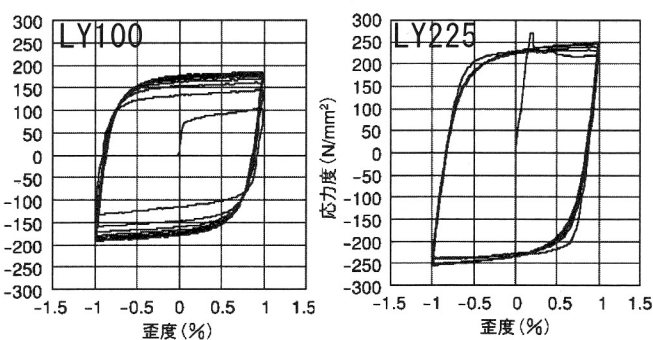


図-12 繰返し載荷時における履歴特性 (片側振幅幅 1%、1~10 サイクル)

表-12 建築構造用低降伏点鋼 LY100, LY225 の規格

種類の記号	板厚 (mm)	化学成分						機械的性質				
		C	Si	Mn	P	S	N	下降伏点 or 耐力 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	降伏比 (%)	伸び	
											試験片	(%)
LY100	6	$\leq 0.01$	$\leq 0.03$	$\leq 0.20$	$\leq 0.025$	$\leq 0.015$	$\leq 0.006$	80~120	200~300	$\leq 60$	JIS Z2201	50 $\leq$
LY225	~50	$\leq 0.10$	$\leq 0.05$	$\leq 0.50$				205~245	300~400	$\leq 80$	5号	40 $\leq$

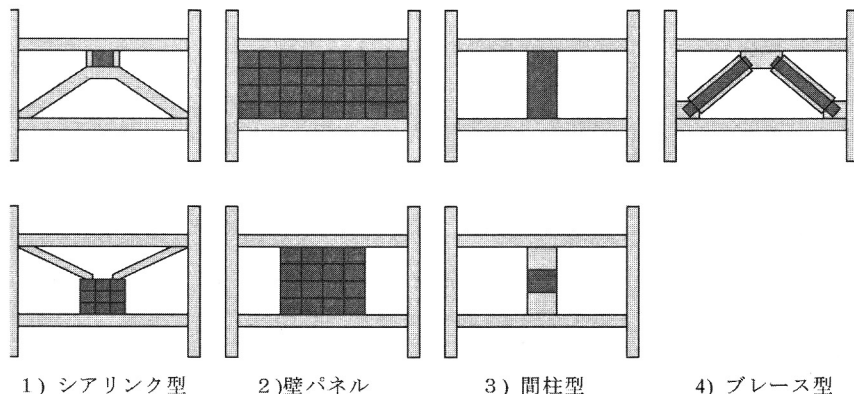


図-13 極軟鋼を用いた履歴型ダンパーの代表例

## 6. 耐候性鋼橋梁に対する取り組み

### (1) 耐候性鋼の普及と課題

耐候性鋼の橋梁へ適用は国内では 1968 年に始まり、近年では維持管理を含めたコスト縮減への期待から適用実績が増加し、鋼橋に占める耐候性鋼橋梁の割合は鋼重ベースで 15% に至っている (図-14)。

耐候性鋼の橋梁への適用に関する研究については、1981 年から建設省土木研究所、(社) 鋼

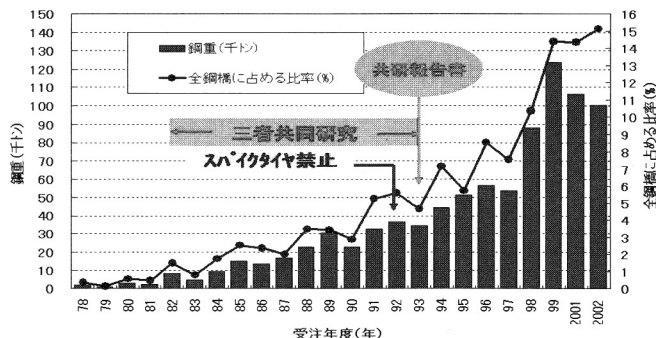


図-14. 国内の耐候性鋼橋梁の適用重量と比率 (社) 日本橋梁建設協会調べ



材倶楽部（現：日本鉄鋼連盟）、（社）日本橋梁建設協会の三者共同研究が実施された。研究成果は、長期的な全国暴露試験を含む各種検討結果に基づき「無塗装耐候性橋梁の設計・施工要領（改訂版）」<sup>12)</sup>として1993年に発行され、適用可能な環境条件を明確にした点も普及のきっかけとなった。この設計・施工要領では、耐候性鋼を無塗装で使用する場合の適用可能地域を「飛来塩分量が0.05mdd以下の地点」とし、飛来塩分量測定を省略する場合は地域区分ごとに海岸線からの距離で示している（図-15）。図-16は三者共同研究の暴露試験結果とその後の追跡した17年暴露試験結果から、このような地域環境（飛来塩分量 $\leq 0.05\text{mdd}$ ）での耐候性鋼材の板厚減少予測値を示したものであるが、片側平均板厚減少量は50年で0.3mm程度、100年で0.5mm程度と推定される。

しかしながら、既に建設された一部の耐候性鋼橋梁では、当初の想定より厳しい環境に曝される場合や予期しない箇所からの漏水等によって層状剥離さびなどの不具合が生じており、1991年以降スパイクタイヤの使用禁止に伴う凍結防止剤散布量増加の影響により新たな形態の腐食が発生していることから、適用規定の再評価と点検診断・補修技術の整備が必要となっている。また、最近では塩分に対する耐候性を高めたニッケル系高耐候性鋼や、新たな機能を有する表面処理剤も開発適用されているが、これらについては統一的性能評価方法が未整備であり、適用に関する共通的な技術基準の構築が必要である。

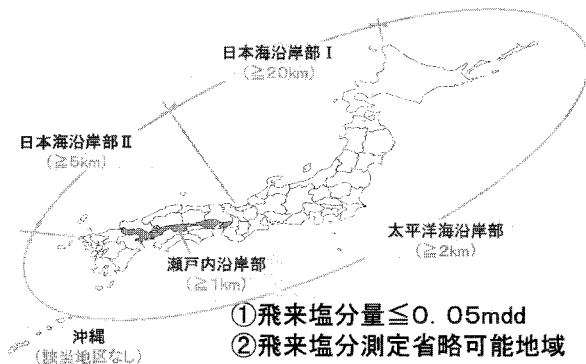


図-15 無塗装耐候性橋梁の適用可能範囲

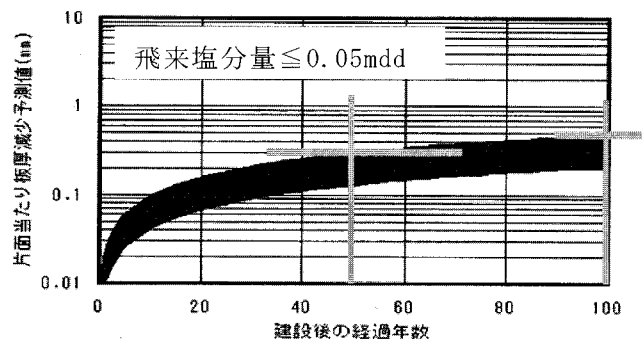


図-16 JIS 耐候性鋼の腐食予測曲線

## (2) 耐候性鋼のさび安定化評価技術

鋼材表面に形成される緻密なさびで以降のさびの進展を制する耐候性鋼の利用にあたってはさび安定化に関わる評価技術が必要である。これまでに、さびの状態の指標を外観、板厚減少、さび構造の各側面から表す試みがなされ、さらに、実際の橋梁における長期間経過したさびの状態やさまざまな環境でのさび状態について事例解析が行われている<sup>13)</sup>。

（社）腐食防食協会さびサイエンス研究会では「さびが安定した状態とは工学的に問題とならない程度に腐食速度が低減した状態とし、目安として年間腐食量が0.01mm程度以下となった状態」と提案している<sup>14)</sup>。緻密なさび層は従来「安定さび」と呼ばれていたが、このさびが形成されれば腐食進行が完全に抑止されるとの誤解を招くことから最近では「保護性さび」と呼ばれるようになった。

さび安定化の評価技術については、さび外観、さび厚、イオン透過抵抗、フェロキシル斑点、電気化学的電位、さびのX線分析結果をセンサーとし、環境条件に支配されている耐候性鋼の腐食状態を見極める考え方と具体的方法論の体系化が提言されている<sup>15)</sup>。

## (3) 耐候性鋼橋梁の点検・維持・補修

耐候性鋼橋梁の防食機能の低下は層状剥離さびの発生として現れ、それに伴って板厚減少量が大きくなる。したがって、維持管理では、層状剥離さび、およびその兆候となるうろこ状さびの発生の有無を点検し、漏水、滞水による部材の濡れやさびの外観に注意することが重要であり、点検結果に基づき必要と判断された場合は適切な維持補修を行うことが必要となる。

三者共同研究で定義された外観基準に定量的な指標を加えた外観評点が提案<sup>15)</sup>されており、その

例を表-13に示す。

表-13 目視外観観察法とさび厚測定法による評点付け基準とその解釈法(案)

状態	評点	目視外観	さび厚 (参考値)
正 常	5	腐食が進まず、さびも薄い	200 $\mu$ m 程度未満
	4	平均外観粒径 1 mm 程度以下で均一なさび	400 $\mu$ m 程度未満
	3	平均外観粒径 1 ~ 5 mm 程度のさび	
要観察	2	平均外観粒径 5 ~ 25mm 程度のうろこ状剥離があるさび	400 $\mu$ m 程度以上 800 $\mu$ m 程度以下
異 常	1	層状剥離がおきているさび	800 $\mu$ m 程度以上

さびの経年変化と外観評点の関係についての調査として、三者共同研究の暴露試験データおよびその後引き続き暴露されてきた試験片の一部を 17, 18 年目に回収調査した結果<sup>16) 17)</sup>を整理し直し、さび外観評点と 100 年後の片面あたり平均回帰腐食量との関係を暴露期間別 (3 年、9 年、17 年、18 年) に表示したものを図-17 に示す。暴露後 9 年以降で、さび評点外観評点が 3 ~ 5 であれば、100 年後の片面あたりの平均腐食減量は 0.5mm 程度以下となっており、環境に大きな変化がない限り、将来さびが安定化すると判断して差し支えないと考えられる。外観評点 1 (層状剥離さび) の場合は、ほぼ全数において回帰腐食量が 0.5mm を超えているが、評点 2 (うろこ状さび) の場合は境界をまたぐ分布をしている。このため、評点 2 は要観察、評点 1 は異常を示すさびと解釈する方法が提案されている。

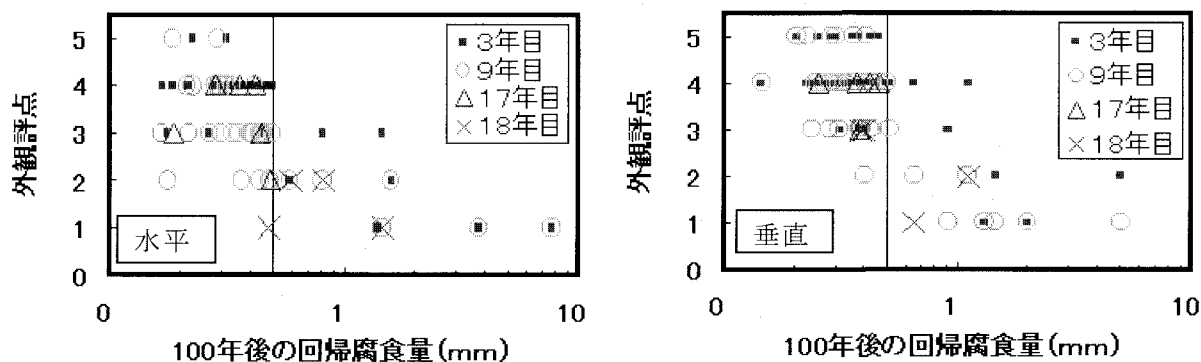


図-17 耐候性鋼のさび外観評点と 100 年後の回帰腐食減量

建設省土木研究所, (社)日本橋梁建設協会, (社)鋼材倶楽部の共同研究報告書データより, (社)日本鉄鋼連盟, 橋梁研究会, (社)日本橋梁建設協会にて再評価整理して作成

この結果をもとに、無塗装耐候性鋼橋梁の点検要領の基本的な考え方や点検・維持・補修フロー(図-18)が提案されている<sup>18)</sup>。これは、桁への漏水、滞水に注目し、第 1 回目の点検を、架設後 3 年後程度とし、約 10 年後の点検で、さび外観評点が 3 ~ 5 であれば、以降大きな環境の変化がない限り、次回近接目視点検でさび外観の点検評価を省略するなど基本的な考えとする提案である。

点検の結果、維持・補修が必要と判断された場合は、異常さび発生の原因、或いはその可能性を高めている要因を排除するとともに、将来大きな断面減少の危険性がある場合や、異常さび発生原因を完全に排除することが困難な場合は、他の防食法等による補修工事が必要となる。表-14 に日本道路公団での実施例<sup>19)</sup>を、表-15 に鉄道総合技術研究所での推奨条件を示す<sup>20) 21)</sup>。補修塗装の素地調整としてはブラスト処理によりさびを十分除去するのがよい。一方、ブラスト処理が困難な場合、動力工具による処理を前提とした塗装系が研究されているが、塗膜の耐久性としては 10 年程度と推定されている<sup>20) 21)</sup>。このため、補修塗装の更なる耐久性向上に向けて、例えば塩分を含む残留さびの無害化

等、塩害を受けた部材の下地処理方法の改良検討が必要となっている。

表-14 日本道路公団での補修塗装の試験結果例

補修塗装要領		補修塗装仕様評価	
素地調整	3種	×	表面凹部はほとんどさびが残留
下塗り1層	有機ジンクリッチ塗装(75μm)		
中塗り	ポリウレタン樹脂塗装(30μm)		
上塗り	ポリウレタン樹脂塗装(25μm)	△	表面凹部はほとんどさびが残留。下塗りに付着力、防錆効果の大きい変性エポキシを使用
素地調整	3種(塗装用シナーで拭取り)		
下塗り1層	変性エポキシ樹脂塗料(60μm)		
中塗り	ポリウレタン樹脂塗料(30μm)	○	表面のさびはほぼ除去される
上塗り	ポリウレタン樹脂塗料(25μm)		
素地調整	1種		
下塗り1層	有機ジンクリッチ塗料(75μm)		
下塗り2層	変性エポキシ樹脂塗料(60μm)		
下塗り3層	変性エポキシ樹脂塗料(60μm)		
中塗り	ポリウレタン樹脂塗料(30μm)		
上塗り	ポリウレタン樹脂塗料(25μm)		

表-15 鉄道総合技術研究所での推奨条件例

項目	要領
素地調整	動力工具による処理
下塗り1層	ミストコート
下塗り2層	厚膜変性エポキシ下塗り(70μm)
中塗り	厚膜変性エポキシ中塗り(70μm)
上塗り	厚膜変性エポキシ上塗り(70μm)

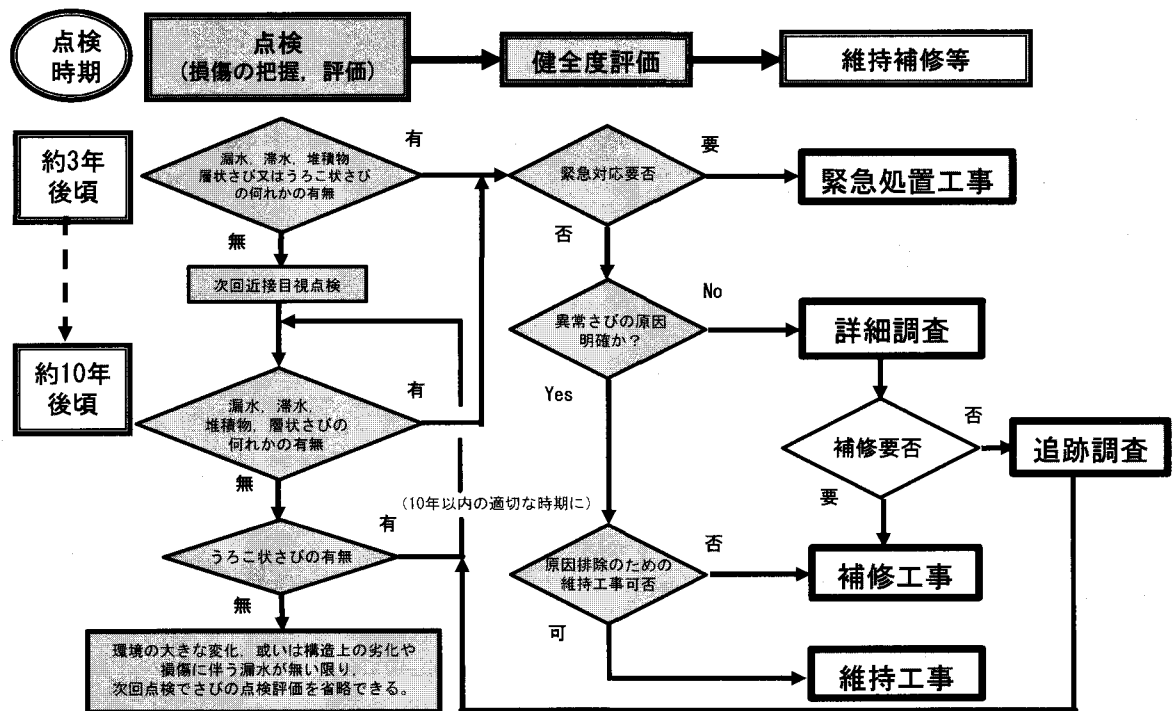


図-18 耐候性鋼橋梁の点検・維持・補修フロー (案)

(4) 塩分に対する耐候性を高めた耐候性鋼「ニッケル系高耐候性鋼」

我が国は海岸沿いに沿って発展してきたことから、離岸距離の短い位置での橋梁計画も数多く、現状のJIS 耐候性鋼では裸使用が困難なケースが数多く存在する。一方で、維持管理コストの縮減ニーズは年々高まっており、耐塩害性を改善した新しい耐候性鋼を求める声が高まっている。

このような中、Ni、Cu、Mo、Tiなどの添加元素による耐塩害性向上メカニズムの解明も進められ、Niほか各種添加元素により塩化物イオンの鋼材表面への到達を抑制して保護性さびを形成させるように工夫することによって、従来の耐候性鋼と比較して塩分に対する耐候性を改善した鋼材が鉄

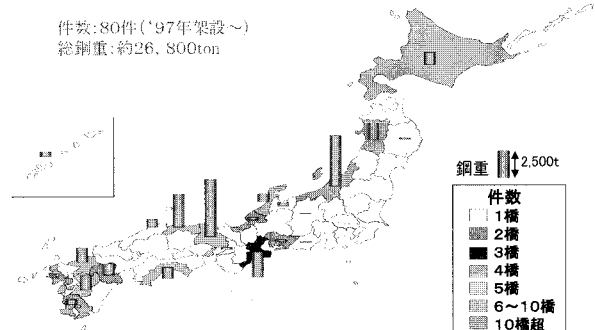


図-19 Ni系高耐候性鋼の適用実績 (2004年5月現在)

鋼各社により開発されてきた<sup>22)</sup>。現在は全社統一名称として「ニッケル系高耐候性鋼」と呼ばれており、既に日本全国で80件/約27,000トン以上の適用実績を有している(図-19)。

現時点では、このニッケル系高耐候性鋼の適用指針は作成されておらず、各社の暴露データにより適用可否が判断されているため、各種成分系の鋼材を統一評価すると共に適用可能環境を明示する必要がある。すでに、適用実橋梁の追跡調査や共通暴露試験による評価などの取り組みを開始している。

また、ニッケル系高耐候性鋼も含んだ耐候性鋼の耐候性能を表す指標「耐候性合金指標V(Weathering alloy Index)」が提案されている<sup>23)</sup>。これは、設置する環境条件に応じて鋼材選定を誤ることが無いと考えられる程度の精度を有するよう既存の研究成果を集大成して作成されたもので、このV値とJIS耐候性鋼材のデータを用いて、任意の経過年数における任意成分の耐候性鋼の長期腐食減耗量を推定する方法も提案<sup>23)</sup>されている。これは、架設環境に応じた材料選定の可能性も示唆しており、今後も試験データ拡充などによる精度の向上や架設環境の定量評価などが期待される。

#### (5) ミニマムメンテナンスを実現するための耐候性鋼の適用技術に関する今後の課題

耐候性鋼橋梁の利用技術の確立に向けて、国内の有識者や関係団体の協力も得て、2つのプロジェクト活動を中心に活動している。

##### ① JSSC鋼橋性能向上研究委員会 耐候性鋼橋梁部会での活動(H15年~17年)

- ・ JIS 耐候性鋼(SMA 鋼)の適用規定再評価と健全度評価法の規定化
- ・ 既存の表面処理技術、新しい耐候性鋼、表面処理技術の適用に関する規定化
- ・ 補修技術の確立

##### ② 創造プロジェクトでの活動(H15年~17年)

- ・ 東南アジア、国内での実暴露試験実施による耐候性合金指標V実証試験の実施と精度向上
- ・ 促進腐食試験実施と試験方法の確立

耐候性鋼の採用事例は今後益々増加するものと思われるため、各方面の協力を得ながら、利用技術の早期確立に取り組んでいく。

## 7. まとめ

製造コストと維持管理コストの縮減の動きを受け、橋梁用高性能鋼の適用事例は今後も増加していくものと思われる。しかしながら、例えどんなに優れた素材であっても、性能を最大限に引き出す利用技術の提案なくしては活かされないため、引き続き利用しやすい環境整備を目指して、橋梁用鋼材研究会の活動を行っていく。

なお、本報告は、筆者もメンバーである(社)日本鉄鋼連盟 橋梁用鋼材研究会 鋼橋技術・普及ワーキンググループの活動、および耐候性鋼ワーキンググループと(社)日本橋梁建設協会・無塗装橋梁部会の活動に基づいた内容である。

## 参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編，丸善(1996)
- 2) 大橋：分かり易い構造用鋼材，(株)建設図書，鉄鋼技術(1990.5)
- 3) (社)日本鉄鋼連盟：橋梁用高性能鋼材の利用技術(2002.11)
- 4) 村越潤：強度特性から見た高性能鋼材の橋梁への適用性について，土木技術資料，38-2(1996)
- 5) 坂田豊，楠隆ほか：橋梁用途の新鋼材および新建材，新日鉄技報 Vol. 368(1998)
- 6) 宮田明，加藤千明ほか：カザフスタン共和国「イルテッィシュ河橋梁」建設工事，石川島播磨技報(2001)
- 7) 井上尚志：ラメラテア，溶接学会誌，第73巻(2004)

- 8) (社)日本溶接協会：WES3008 耐ラメラテア鋼の特性(1990)
- 9) (社)日本鉄鋼連盟：高性能鋼を用いた合理化橋梁について(2002)
- 10) 建設省：鋼道路橋工数算定要素集計マニュアル(95.10)
- 11) 三木千壽,市川篤司ほか：橋梁用高性能鋼材(BHS500,BHS700)の提案,土木学会論文集, No.738/I-64(2003.7)
- 12) 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),無塗装耐候性橋梁の設計・施工要領(改定案)(1993.3)
- 13) 藤野,山口ほか：鋼橋の防食設計とLCC評価(その1),橋梁と基礎(2004.1) など
- 14) 大塚,三澤：第132回腐食防食シンポジウム資料,腐食防食協会(2001.6.25)
- 15) 紀平,渡辺ほか：耐候性鋼さび安定化評価技術の体系化,土木学会論文集, No.745/I-65(2003.10)
- 16) (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報告書,17年目に回収した暴露試験片の調査結果(1999.1)
- 17) (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報告書,18年目に回収した暴露試験片の調査結果(2001.1)
- 18) 渡辺,長井ほか：鋼橋の防食設計とLCC評価(その2),橋梁と基礎(2004.2)
- 19) 日本道路公団：延岡南道路門川橋の腐食対策,ハイウェイ技術, No.12(1998.12)
- 20) 江成,遠藤ほか：耐候性鋼を使用した無塗装桁の補修塗装,(社)日本鋼構造協会 第22回鉄構塗装技術討論会発表予稿集(1999.10)
- 21) 江成,町田ほか：異常腐食した耐候性鋼の塗装による補修対策,(社)日本防食技術協会 第21回防錆防食技術発表大会講演予稿集(2001.10)
- 22) 加納勇,渡辺祐一：橋梁用新耐候性鋼,土木学会誌, Vol.87(2002.4)
- 23) 三木千壽,市川篤司ほか：無塗装橋梁用鋼材の耐候性合金指標および耐候性評価方法の提案,土木学会論文集, No.738/I-64(2003.7)