

4. (2) 耐候性鋼を用いた無塗装橋梁に関する調査研究

鋼構造委員会鋼材規格小委員会

まえがき

鋼材規格小委員会は土木学会の鋼構造委員会に属しており、その役割は土木技術に関連して国内、国外の鋼材規格および現実に用いられている鋼材の実状を調査・研究し、その基本的な考え方や問題点などを明らかにすることであるが、さらに、ポテンシャルを向上するために鋼材に関連するものの中で、ある程度自由にテーマを選んで併行して研究を行っている。前回は各国の主に橋梁の製作示方書の条項中、鋼材に關係の深いものを比較検討し、まとめを 1977 年 11 月号に「各国の橋梁の製作示方書」という題で発表した。

その後、テーマを耐候性鋼材に絞って同じく調査・研究し、併せて鋼材メーカーの協力を得てひづみ時効を受けた耐候性鋼材の衝撃値の実験も行った。鋼材は土木分野の材料としても最も重要な材料のひとつであるが、腐食し易いことやこれを防ぐためには塗装や電気防食など保守費がかさむという欠点がある。そこで、大気環境で耐腐食性があり、価格も普通鋼に比べてあまり高くない、いわゆる、耐候性鋼材 (Weathering Steel) が開発され、アメリカ合衆国を始め、わが国でもかなり使用実績が多くなってきた。わが国では、昭和 37 年、新幹線、長良川橋梁の縦桁に使用したころが橋梁への適用の初期に属し、43 年 10 月に初めて JIS として規格が制定され

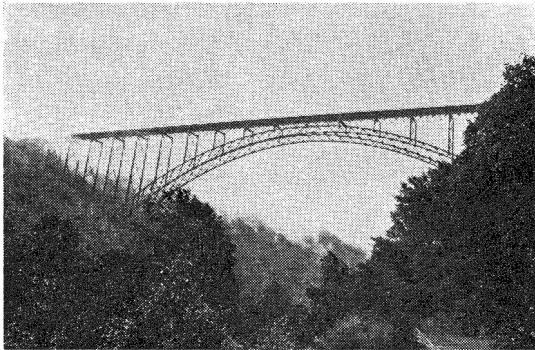
たが、多くは塗装を施して使用してきた。

近ごろ、保守費の節減の意味から無塗装の耐候性橋梁への関心がとみに高まっているが、ステンレスとは耐食の性質が本質的に異なっており、使用方法を誤ればやはり腐食の問題が生ずる。もちろん、鋼材の今後の改良により、耐食性が高く、溶接性が良く、しかも安価な耐候性鋼材が開発されることが期待されるが、使用者側もその特質と限界をよくわきまえ、適材適所にこれを用いて経済効果を上げるのがよいと考えられる。

なお、さきに（昭和 51 年）に当小委員会から橋梁の発注機関や製作企業に広くアンケート調査を行ったところ、次のふたつの相反する意見に集約された。すなわち、「耐候性鋼使用の意義はその無塗装使用にあるから、耐候性の賦与が優先されるべきで、これに伴う溶接上の問題等は製作にそれだけの費用をかけて対処すべきである」、および「耐候性が定量的に保証されない限りは無塗装使用に踏み切れない。塗装がなされるからには耐候性は絶対条件とは言いがたく、溶接性を損わないことを優先にして成分を決めるべきである」。

本報告は当小委員会において検討したことを主としてまとめたものであり、既発表のものとなるべく重複しないように配慮した。紙数の関係もあり、耐候性鋼板について知るところを網羅したわけではなく、また、マニュアルを目指したものでもない。

なお、耐候性鋼の橋梁への適用については近年各所で



(New River Gorge 橋)

写真-1 世界最大の耐候性鋼橋梁

系統立った研究活動が行われている。例えば、北海道開発局、阪神高速道路公団等発注者側のものや、各鉄鋼メーカーをはじめ、日本橋梁建設協会、(財)鋼材俱楽部等生産者側のものや、日本鋼構造協会のように両者合同のものなどさまざまある。また、土木界以外に車両、建築、送電鉄塔などの分野でも研究されており、日本鋼構造協会では、JIS の改訂の検討作業が始まられている。

写真-1 はアメリカ合衆国・ウェストバージニヤ州にあるニューリバーゴージ橋で、1977 年秋開通した。本橋は世界最大規模の無塗装耐候性鋼橋梁で、中央スパンは 518 m、鋼重 2.1 万 t で、橋面から水面までの高さは 276 m もある。

1. 耐候性鋼材の概要

鉄鋼自体を腐食しにくくする研究は、20 世紀初頭から欧米で開始されており、含銅鋼、高リン鋼等が大気中の腐食に強いことが知られていた。これらの個々の研究結果を統合する形で、1916 年ころから合衆国材料試験協会、イギリス鉄鋼協会により、鉄鋼の耐候性に関する大規模で系統的な大気曝露試験が実施された。この結果、耐候性には P, Cu, Cr などが最も効果的であり、次いで Ni, Mo, Al, V, Ti なども助長効果のあることが判明した。現在用いられている耐候性鋼材に対しては、この結果をもとにさらに溶接性、経済性などを考慮し、これらの耐候性元素を少量ずつ組み合わせて添加配合している。

耐候性鋼材に塗装した場合、普通鋼の場合に比べて塗膜のふくれや剝離が少なく、塗装寿命が延びると言われている。しかし、合衆国において 1960 年ころから建築を対象として耐候性鋼材の無塗装使用が始まり、さらには橋梁にもこれが及んできた。それに刺激されて、日本でも塗装せずに耐候性鋼材を使用する例が建築や橋梁に見られるようになってきた。

耐候性鋼材の曝露試験を行うと、初期には普通鋼材同

様に錆が発生するが、濡れと乾きを繰り返しているうちに、多くの場合、数年程度でほとんど錆が進行しなくなるという特徴がある。これは、耐候性鋼材中に含まれる耐候性元素により普通鋼の錆とは違った緻密で定着性のある錆層（安定錆と呼ぶ）で形成され、この錆層が表面をおおうことにより錆の進行を抑止するからと考えられている。

しかし、耐候性鋼材に十分な安定錆が生ずるかどうかは、使用環境（山間部、田園地帯、工業地帯、海浜など）や構造物の形状（板桁、箱桁、パイプなど）、また、部位（トラス、フランジの上・下面、箱桁の内・外側、日照側か日陰側など）にも大きく左右される。

安定錆が生ずる条件としては、一般に、① 鋼表面が外気に触れること、② 水の洗い流しと乾きを繰り返すこと、③ 生成した酸化被膜を機械的に剝離しないこと、などがあげられる。しかし、実際には、大気中の塩分や SO₂ 等も複雑に影響し合うため、どのように用いれば必ず耐候性鋼材に安定錆が生ずるかは、いまだに明確ではないのが現状である。特に、日本の場合は合衆国に比べて一般に高温、多雨、多湿で、地形的にも海塩粒子の影響を受け易い所や、また、工業地帯も多いので、腐食環境は相当厳しいと言える。このような事情から、日本では今のところ、無塗装といっても初期に流出する錆を防ぐことを主な目的として化成処理をして用いている例が多い。しかし、比較的環境条件の良いところや、初期に流出する錆をあまり問題にしない場合は、この処理も施さないで無塗装で使用している。両者とも無塗装であるが、特に後者を裸使用 (bare use) と呼んでいる。

耐候性鋼材の耐候性能を評価する方法としては、昔から行われてきている大気曝露試験方法のほか、短期間で実験室的に評価するために腐食促進試験が多数提案されている。しかし、種々の要素が時間をかけて複雑に絡み合って起こる大気腐食現象や、安定錆の生成のすべてを実験室的に再現することは難しく、また、そのいずれも大気曝露試験との対応が十分でないとされている。したがって、現在も長期の試験期間を要するが、耐候性能を判定する方法として大気曝露試験が最も一般的に用いられている。わが国においても、試験片による大気曝露試験は異なった環境ごとにすでに 20 年にも及ぶ測定結果が出されており、また、実橋における実績も 10 年を越えようとしている。

2. わが国における実績

当小委員会では、耐候性鋼材利用の無塗装橋梁の実績を次のようなアンケートにより調査した。

対象鋼材は、① JIS の SMA×× 規格材で無塗装使

表一 無塗装橋梁所在地別実績（国内）

都道府県	件数	重量(t)	都道府県	件数	重量(t)	都道府県	件数	重量(t)
北海道	17	5400	新潟	1	1381	岡山	3	993
青森	7	306	石川	1	25	山口	1	69
岩手	13	326	山梨	1	20	徳島	1	6
宮城	7	2471	長野	17	263	高知	3	134
山形	2	176	岐阜	2	23	福岡	1	72
福島	3	1159	愛知	2	85	佐賀	2	109
茨城	3	549	三重	1	50	長崎	4	264
群馬	4	62	滋賀	2	137	宮崎	1	25
千葉	1	5	大阪	1	69	鹿児島	1	58
東京	4	2042	兵庫	4	185	沖縄	1	193
神奈川	3	195	島根	1	448			
						合計	115	17340

注：秋田は上欄に記載されていない、15府県は件数、重量ともに0である。

用したもの、(2) 製鉄各社で無塗装用耐候性鋼として販売しているもの、および(3) ASTM 規格の A588 によるものとした。なお、(2) および(3) では塗装したものも含めた。合計 29 の橋梁製作会社から回答を得たが、その結果を表一、2、図一1 および2 に示す。例えば、1 橋が3 社で製作された場合には3 件とした。アンケートの時期は、昭和 54 年3 月現在であるので、54 年以後の実績は竣工予定のもののみである。

アンケートの結果の概要は次のとおりである。

- (1) 地域別には北海道が 31% の実績で特に多い。
- (2) 国内の実績は昭和 50 年ころより伸びが現われている。このことは、昭和 47 年から輸出の無塗装橋

梁が顕著になってきたことに刺激されていることによると考えられる。

(3) 鋼材の表面処理は、国内の場合、重量的には化成処理したものが多いが、件数的にはほぼ同数である。なお、輸出橋梁はすべて裸使用または塗装使用である。

3. 経済性に関する一考察

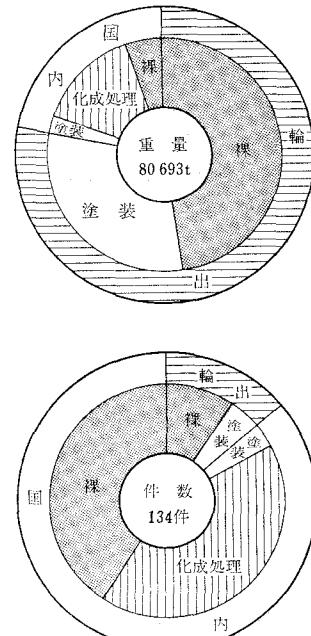
耐候性鋼材使用の経済性を具体的な数値によって試算してみる。経済性を論ずるにあたっては、絶対的金額よりも従来の塗装鋼橋との比較において論ずるほうが物価の変動の影響もなく、便利であると考えられる。また、経年後に要する費用に関しては、金利、物価、人件費等が不変であると仮定する。

(1) 初期建設費

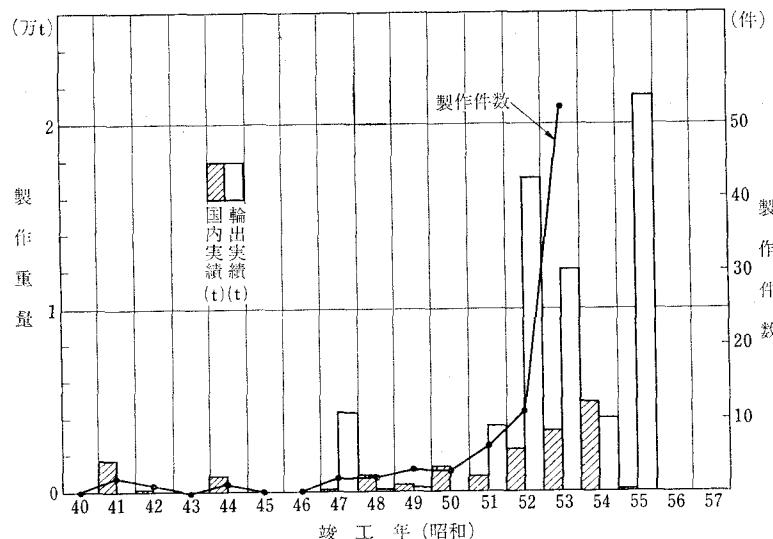
建設費単価のうち、塗装橋梁に対して無塗装橋梁の異なる点は主として表一3 のようである。

試算の対象とした橋梁の支間は 31.5 m、幅員は車道 7.25 m・歩道 2.5 m、荷重は TL-20、活荷重合成板橋で4 連、使用鋼材は次のようにある。

SM 50 YA および B	113.492 t	(58.2%)
SM 41 A	7.438 t	(3.8%)
SS 41	62.120 t	(31.9%)
高力ボルト (F 10 T)	4.607 t	(2.4%)
シュー	5.032 t	(2.6%)



図一1 無塗装用耐候性鋼橋梁の表面処理実績



図二 無塗装橋梁の製作実績

表-3 塗装橋梁と無塗装橋梁との単価の比較

区分	塗装橋梁		無塗装橋梁		単価差
	仕様	単価	仕様	単価	
鋼材費	SM 50 Y, SM 53		無塗装用耐候性 50 キロ鋼		+9 200 円/t
	SM 41		無塗装用耐候性 41 キロ鋼		+14 000 円/t
	SS 41		無塗装用耐候性 41 キロ鋼		+16 200 円/t
塗装費	原板プラスチック	400 円/m ²	製品プラスチック	700 円/m ²	+300 円/m ²
	工場 + 現場塗装	3 000 円/m ²	{ 裸使用 化成処理 }	0 円/m ² 4 000 円/m ²	-3 000 円/m ² +1 000 円/m ²
	高力ボルト	普通高力ボルト	耐候性高力ボルト	330 000 円/t	+56 000 円/t
支承	ペアリング・プレート・シュー	800 000 円/t	耐候性ペアリング・プレート・シュー	880 000 円/t	+80 000 円/t

注：上記の価格は昭和 54 年度の一般的な単価によった。

その他	2.216 t (1.1%)
総鋼重	194.905 t (100.0%)
塗装面積	3 817 m ² (19.6 m ² /t)
単位重量あたりの価格差は	
鋼材費 = 9 200 × 0.582 + 14 000 × 0.038 + 16 200 × 0.319	
= +11 054 円/t	
塗装費 { (裸使用) = (300 - 3 000) 19.6 = -52 920 円/t }	
{ (化成処理) = (300 + 1 000) 19.6 = +25 480 円/t }	
高力ボルト = 56 000 × 0.024 = +1 344 円/t	
シュー = 80 000 × 0.026 = +2 080 円/t	
合計 (裸使用) = -38 442 円/t	
合計 (化成処理) = +39 958 円/t	

ここで、工場管理費と一般管理費によって 20% 増とすると

管理費を含めた合計

$$\begin{aligned} \text{(裸使用)} &= -38 442 \times 1.2 = -46 130 \text{ 円/t} \\ \text{(化成処理)} &= +39 958 \times 1.2 = +47 950 \text{ 円/t} \end{aligned}$$

塗装橋梁の上部工事費を 600 000 円/t と仮定すると

裸使用 : 7.7% 減

化成処理 : 8.0% 増

となる。なお、これは単純化した仮定に基づいた一試算にすぎず、場合により多少の変化のあることは当然である。

(2) 塗替えを考えた経費

経済性の比較は、初期建設費と経年後に生ずる維持管理費の合計において考慮すべきものである。なお、公共構造物の場合、原価償却や金利の概念が確立されておらず、民間における税法的理論もない。

次に、塗装橋梁の塗替周期については複雑な要素が多いが、過去の実例から 3~12 年と仮定する。耐用年数は維持管理の程度によって異なるであろうが、一応 60 年とする。

そこで、1 回の塗替費を P 、単位塗装面積を A 、耐用年数を N 、塗替周期を C とすると、耐用年数間の総塗替費 T は次式で表わされる。

$$T = P \cdot A \left(\frac{N}{C} - 1 \right) \quad (1)$$

ここで、 $P = 3 000 \text{ kg/m}^2$ 、 $A = 20 \text{ m}^2$ とする。

表-4 塗装経費の計算結果

区分	①	②	③	④	⑤ = ① + ④	⑥ = ④ / ⑤	⑦ = ② / ⑤	⑧ = ③ / ⑥	
塗替周期	橋梁上部工の初期建設費 (千円/t)	塗装橋梁の塗替費 (千円/t)	の合計 (千円/t)	(千円/t)	(%)	裸使用	化成処理	(%)	
	3	600	554	648	1 140	1 740	66	32	37
	6	600	554	648	540	1 140	47	49	57
塗替	9	600	554	648	340	940	36	59	69
裸	12	600	554	648	240	840	29	66	77

以上の計算した結果を表-4 に示す。なお、裸橋梁および化成処理橋梁の初期建設費は、塗装橋梁に対してそれぞれ 7.7% 減および 8.0% 増とした。

4. 疲れ特性

耐候性鋼を無塗装使用する場合、腐食による局部的な板厚減少、錆による腐食孔（ピット）の形成等の形状変化が母材あるいは溶接継手の疲労寿命に与える影響を検討しておく必要がある。耐候性鋼特有の安定錆が形成されず腐食が進行するような場合は、板厚減少やあばた状の局部的な橋梁を生じ、疲労強度が著しく低下することがある。橋梁の状況が異なるので一概には言えないが、国鉄の腐食鋼材の疲労試験例では、残留断面で計算して疲労強度が 50% に低下するものもあった¹⁾ので、疲労が問題となる部分では、このようにならないよう、気をつける必要がある。

耐候性鋼が長期間大気曝露された後に示す疲労挙動について、建設省土木研究所のまとめた母材および仕上げた突合せ溶接継手（50 キロ鋼および 60 キロ鋼）のデータがある²⁾。この試験は疲労試験片数 800 本余にのぼる膨大なものであり、その一例として 50 キロ鋼母材の曝露前、2 年間曝露後、4 年間曝露後の S-N 線図を図-3 に示す。母材では、2 年間または 4 年間の大気曝

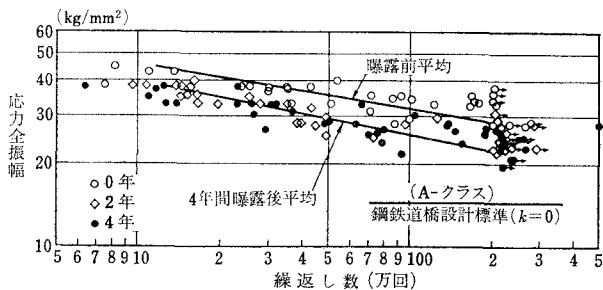


図-3 耐候性 50 キロ鋼母材の大気曝露前、後の疲労寿命²⁾

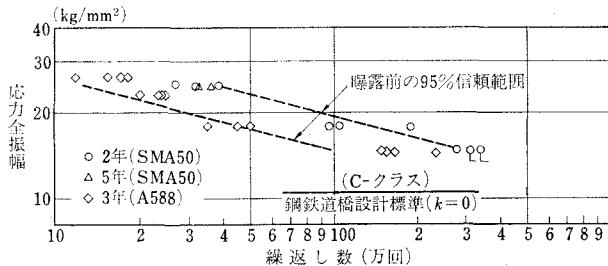


図-4 横リブ十字すみ肉溶接継手の大気曝露後の疲労寿命^{3),4)}

露の結果、200万回疲労強度は曝露前の場合の70~80%に低下したことがわかるが、これは、錆が発生してできる腐食孔の影響によるものと思われる。仕上げた突合せ溶接継手（基本的には母材と同じ疲労挙動を示すものと思われる）についても、ほぼ同様な結果が得られている。

図-4は応力集中部を有する横リブ十字すみ肉溶接継手（A 588とSMA 50）について大気曝露前後の疲労強度を比較したものである^{2),3)}。大気曝露前の疲労強度はデータの95%信頼範囲（図中で破線）で示し、SMA 50の2年間曝露後³⁾、同じく約5年間曝露後（実橋の補剛材取付溶接部から採取）³⁾、A 588の3年間曝露後⁴⁾等

のS-Nデータと比較したところ、同じようなばらつきの中に入った。このような溶接継手では、もとの構造の形状による応力集中のために疲労強度が低いので、錆によるピットの影響は母材ほど敏感に表われないものと思われる。

4年間以上の長期にわたる大気曝露後の疲労挙動に関するデータは見あたらないが、安定錆が形成されれば、それ以上の腐食は進まず、したがって、疲労強度の低下はあまり見られないと考えられる。また、図-3および4では現行の疲労設計法と比較しているが、現在までのデータから類推して、耐候性鋼の安定錆が形成される場合には、母材では疲労強度の低下が見られるが、現行の疲労設計法⁵⁾を準用してもさしつかないと考えられる。いずれにせよ、今後さらにこの方面的データを蓄積することが望まれる。

5. 脆化に関する実験

一般に、鋼材には冷間で塑性加工すると時効硬化を起こし、脆化する性質がある。西ドイツなどでは、早くからこの点を考慮し、溶接構造物の製作時の冷間加工に対し、種々の条件ごとに制限を設けている。わが国においては鋼道路橋示方書の1968年追補から冷間曲げの内側半径を板厚の15倍以上（表面ひずみ3%以下）とする規定が設けられた。

これは、諸外国の例をも参考にしたものであるが、設計・製作の側からはもう少し緩和してもよいのではないかとの意見もあり、堀川らは今回の示方書の見直しに際し、多くの一般および溶接構造用鋼について、ひずみ時効試験を行っている⁷⁾。それによると、あえて規定を変

表-5 脆化実験のための供試鋼材の化学成分および機械的性質

供試鋼材			化 学 成 分 (%)												機械的性質**				
呼称強度 レベル	No.	板厚 (mm)	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	V	Mo	Ti	Al	N	σ_Y (kgf/mm ²)	σ_B (kgf/mm ²)	ϵ (%)	
														Sol	Insol				
41 kgf/mm ²	1	16	0.10	0.23	0.63	0.017	0.008	0.26	0.12	0.53	0.001	—	—	0.039	0.002	—	30.4	45.8	33.4
	2	40	0.10	0.27	0.71	0.020	0.020	0.29	—	0.50	—	—	—	—	—	—	30.8	42.9	40.6
	3	25	0.11	0.25	0.85	0.024	0.014	0.25	0.09	0.23	—	—	—	0.015	0.003	0.0070	33.0	47.0	27.0
	4*	30	0.05	0.21	0.79	0.080	0.010	0.28	—	0.36	—	—	0.012	0.034	0.002	0.0065	32.0	44.0	35.0
	5*	20	0.06	0.30	0.81	0.092	0.009	0.30	—	0.37	—	—	0.009	0.027	0.002	0.0038	38.0	48.0	30.0
50 kgf/mm ²	6	16	0.13	0.44	0.92	0.014	0.008	0.27	0.11	0.43	0.033	—	—	0.015	0.003	—	41.4	55.7	29.0
	7	22	0.09	0.42	1.07	0.022	0.004	0.36	0.13	0.54	0.530	0.05	—	0.025	—	—	42.0	55.0	29.0
	8	25	0.12	0.43	1.17	0.019	0.004	0.31	0.24	0.55	—	—	—	0.018	0.002	0.0031	39.0	54.0	34.0
	9	25	0.13	0.40	1.11	0.019	0.003	0.26	0.02	0.40	0.050	0.01	—	0.029	—	0.0028	42.2	55.0	27.6
	10	18	0.14	0.33	1.07	0.016	0.005	0.27	—	0.35	0.040	—	—	0.026	0.002	0.0031	40.0	54.0	28.0
58 kgf/mm ²	11*	30	0.05	0.33	1.27	0.088	0.004	0.31	0.29	0.39	0.046	—	0.013	0.028	0.002	0.0057	39.0	58.0	34.0
	12	16	0.12	0.22	0.87	0.015	0.008	0.27	0.02	0.51	0.027	—	—	0.031	0.003	—	50.5	60.5	18.8
	13	25	0.12	0.40	1.10	0.017	0.002	0.26	0.02	0.40	0.050	0.01	—	0.029	—	0.0027	60.4	70.2	39.9

注：① * 印は高リン系（SMA）（規格よりPが多い）。

② ** 印は σ_Y ：降伏点、 σ_B ：引張強さおよび ϵ ：伸び率。

更するほどの積極的な根拠は得られなかった、としている。

一方、当鋼材規格小委員会の希望で（財）鋼材倶楽部の昭和 53 年および 54 年度土木専門委員会事業の一環として耐候性鋼のひずみ時効試験が行われたので、ここにその結果の概要を述べ、先の堀川らの結果とも比較す

る。

(1) 供試材および試験方法

試験に供されたのは、41, 50 および 58 kgf/mm² 級の溶接構造用耐候性鋼材である。表-5 にそれらの化学成分および機械的性質を示す。これらのうち、No. 3 以外のものは、すべて裸使用の鋼材としてつくられたものである。なお、No. 4, 5 および No. 11 は高リン系のもので、必ずしも SMA 材の規格には該当しない。

試験の方法は次に示すとおりである。

塑性ひずみ量：0, 3, 5, 10%
時効処理：250°C × 1 hr (0% ひずみのものを除く)
シャルピー試験温度：-60, -30, 0, +30°C

なお、塑性ひずみの方向は、圧延 (L) 方向およびその直角 (C) 方向の 2 通りであるが、シャルピー試験片の方向はすべて L 方向である（図-5 参照）。

(2) 試験結果

図-6 に L 方向ひずみの場合の 0°C における吸収エネルギーと 50% 脆性破面率遷移温度を示す。これによれば、吸収エネルギーはひずみが大になるほど低下しており、0% ひずみ（素材のまま）の値との比でみると、表-6 のようになり、41 および 50 kgf/mm² 級について 5% ひずみを与えると 0.5 を下回るものもある。ちなみに、堀川らの報告⁷⁾のうち SM 材についてみると、6 種類のうち 3% ひずみで 1 種類が、また、5% ひずみで 4 種類が 0.5 を下回っている。

遷移温度はひずみが増すほど上昇しており、その上昇量は表-7 に示すとおりである。

図-6 (左) は、ひずみの方向による脆化の違いを表わそうとしたものであるが、一定の傾向は認められない。すなわち、No. 7, 9 お

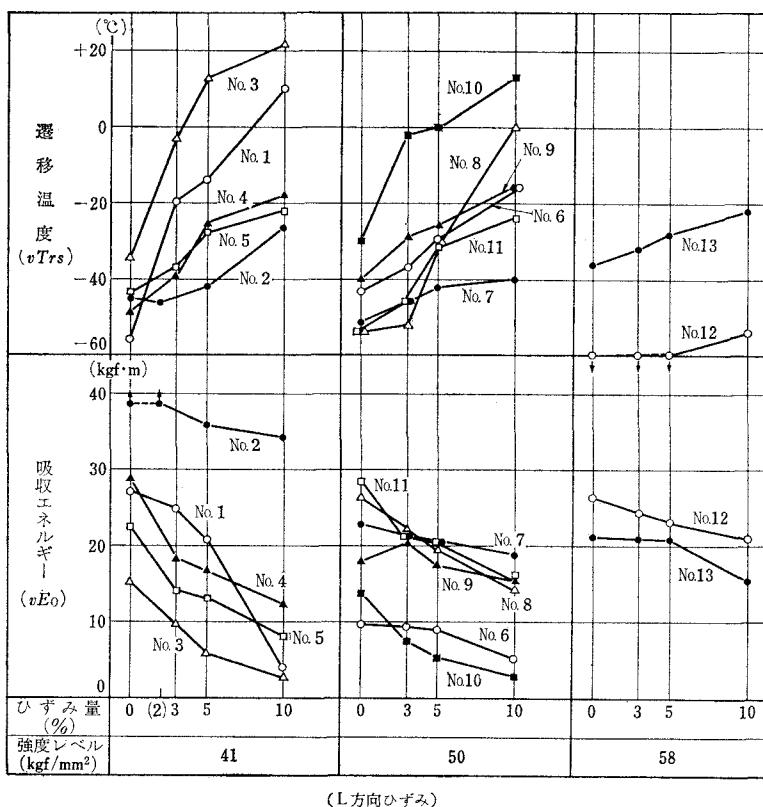


図-5 冷間塑性ひずみと吸収エネルギーおよび遷移温度の関係

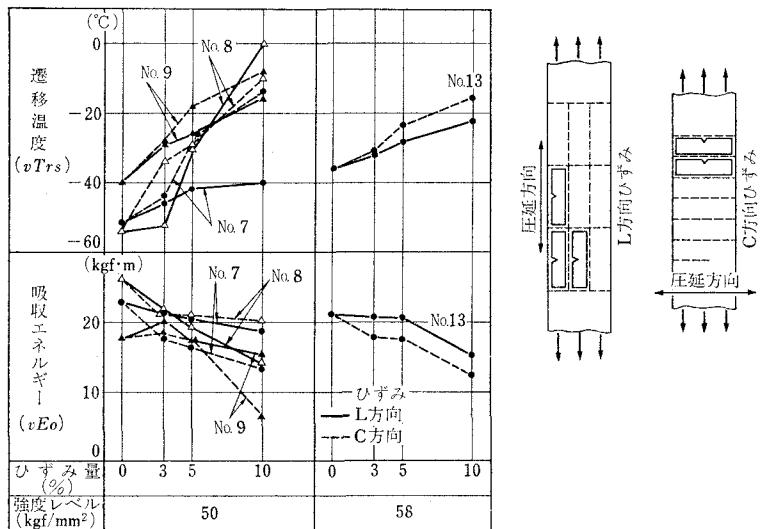


図-6 冷間塑性ひずみ方向の影響 (左) とシャルピー試験片の方向 (右)

表-6 冷間塑性ひずみ量と 0°C における吸収エネルギーの低下率

強度 レベル (kgf/mm ²)	冷間塑性ひずみ量 (L方向)		
	3%	5%	10%
41	0.65~1.00	0.40~0.95	0.15~0.91
50	0.54~0.97	0.40~0.97	0.22~0.88
58	0.93~0.98	0.88~0.97	0.70~0.80

表-7 冷間塑性ひずみ量と 50% 脆性破面率の遷移温度の上昇量

強度 レベル (kgf/mm ²)	冷間塑性ひずみ量 (L方向)		
	3%	5%	10%
41	-1~36°C	3~42°C	22~67°C
50	2~28°C	9~30°C	11~54°C
58	4°C	8°C	14°C

より 13 では、吸収エネルギーは L 方向ひずみのほうが大となっているが、No. 8 では逆になっている。

以上の結果から、耐候性鋼のひずみ時効特性は少なくとも SM 材のそれに比べて劣ることはないと言える。成分系が大きく異なる高リン系についても同様である。したがって、結論として冷間曲げ加工に関して、耐候性鋼なるがゆえに特別の考慮を払う必要はないと言える。

6. 高力ボルト接合部

耐候性鋼材を無塗装で使用したとき、高力ボルトに遅れ破壊が発生することが懸念される。しかし、塗装されている一般的な橋梁においても高力ボルトの軸部は無塗装であり、したがって、ボルト孔内の雰囲気が塗装した場合としない場合で異なるかどうかが問題となる。塗装した場合、その塗膜が健全な間はボルト孔内はかなりの気密性が期待できるが、ボルト首下位置の塗膜には早期にひびわれが生じることなどから、塗装された場合においても長期的にはボルト孔内の気密性は期待できないと考えられる。そこで、高力ボルト軸部がさらされている雰囲気は、塗装しない場合とほとんど差がないと考えられる。高力ボルトの遅れ破壊は F 13 T ボルトに多発しているが、F 11 T ボルトでもその発生例が報告されている。

高力ボルトの遅れ破壊特性は、実物の高力ボルトを試験材に締め付け、それを種々の環境に放置する曝露試験と、試験片の形状(切欠き)、雰囲気などを厳しくすることにより、短時間で遅れ破壊を生じさせる促進試験の両面から研究が進められている。日本鋼構造協会ボルト強度班が実施した曝露試験結果⁸⁾によれば、経過年数に対する破断の傾向は、鋼種、締付け力および曝露環境などにより異なるが、引張強さが 126.7 kg/mm² 以下の鋼を用いた高力ボルトはすべて健全であり、遅れ破壊の発生

にはその鋼材の静的強度レベルが大きく影響することが考えられる。

耐候性鋼材の無塗装橋梁に通常の高力ボルトのセットを使用すると、ボルト頭部、ナット、座金など部材の表面に露出する部分が特に著しく発錆する。これは美観上好ましくないので、耐候性を有する材質の高力ボルトを使用するのが好ましい。その場合、孔の中のボルト軸部に安定錆ができるかどうかについては疑問があるが、従来の高力ボルト軸部も無塗装であり、周囲の条件は同じと考えられる。また、耐候性を有するボルト材料は遅れ破壊に対しても有利であると言われているので、少なくともこのようなボルトを用いることにより、遅れ破壊の危険性が増すことはないと言えよう。

従来、高力ボルト摩擦継手の板の接触面は、すべりに対する配慮から無塗装で組み立てられている。しかし、その接触面間に水分が侵入し、発錆することが報告されている⁹⁾。今までに接触面の発錆に起因するような事故は報告されていないが、構造物が著しい腐食環境にさらされるような場合には、継手の強度低下が懸念される。耐候性鋼板を使用した場合でも、接触面で安定錆が形成されることは期待できず、接触面における発錆状態は普通鋼の場合と大差ないと考えられる。このような理由および塗装橋梁では、塗装に先立って行われる錆落としに手間がかかること、また、継手部の塗膜は一般部に比べてかなり早く劣化することなどから、接触面に防錆処理を施すことが考慮され始めている。今までに行われている実験では、すべり係数の面からは金属溶射は十分使用に耐え、無機ジンクリッヂペイントは被覆厚さなどに注意すれば実用できると判断されている。なお、防錆面からは亜鉛溶射の効果は高いが、無機ジンクリッヂペイント塗装はそれほど効果はないようである¹⁰⁾。

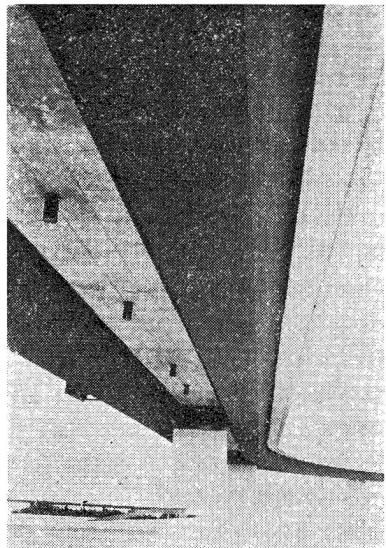
一方、接触面に防錆処理を施すと、接触面に介在する軟らかい金属層のクリープによるボルト軸力の弛緩現象や、すべり係数のばらつきが大きくなるといった問題も指摘されているので¹¹⁾、その実用化にあたっては十分な注意が必要であろう。

7. 無塗装耐候性鋼橋梁の設計例

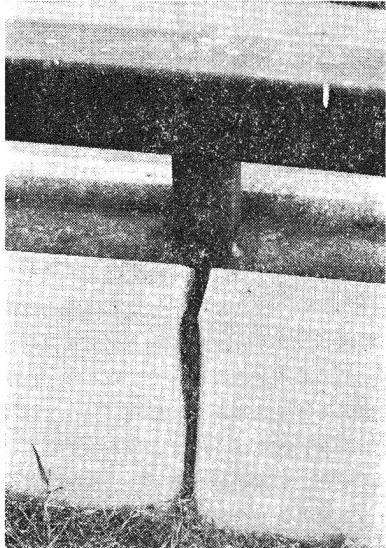
(1) 概要

耐候性鋼材を有効に利用するためには、構造の設計においても滯水を避けるとか、湿気がこもらないようにするとか、錆水を適当に導いてコンクリート橋脚面を汚さないようにするなど、種々の配慮が必要である。

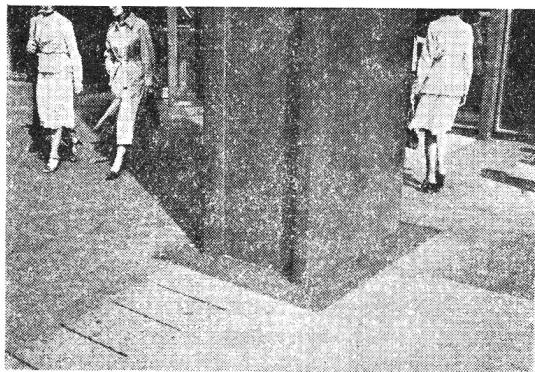
写真-2~4 は耐候性鋼の無塗装使用にあたって構造に工夫を加えた合衆国諸州の諸例である。写真-2 はボック



(Dallas/Fort Worth 空港)
写真-2 防錆を工夫した耐候性鋼の橋梁例



(Dallas/Fort Worth 空港)
写真-3 ガードレールの錆水処理



(US スチール本社ビル)
写真-4 ビルディング柱基部の錆水処理

スガーダーであるが、コンクリートスラブを通常のものより大きく張り出してガーダーがあまり水に濡れないようにしており、また、中間支承部に頑丈な横ばりを設け、これを幅の狭い橋脚が支える構造とし、錆水が橋脚面を流れないようにしてある。写真-3はガードレールで下部のコンクリートブロックが錆水で汚れることがないよう、コンクリート上面に溝を設けて水を導いている。写真-4はビルディングの柱の下部に排水用グレーティングを置き錆水が路面に流れ出しないようにしている例である。

もっとも、空気がきれいで湿度がきわめて低い環境にある場合には、従来とほとんど同様な構造ディティールでなんら支障のない例も多いようである。

以下に、日本において近く製作が計画されている無塗装耐候性鋼使用の鉄道橋および道路橋を一例ずつあげ、設計上特に考慮を払った点について簡単に説明する。

(2) 鉄道橋の例

わが国における鋼鉄道橋は従来より塗装使用することが原則となっていたが、今回、メインテナンスフリーを考慮して耐候性鋼の裸使用で、レールの締結にも鋼桁直結方式を採用した橋梁を国鉄が建設することとなった。

この橋梁は、ダムの建設に伴って会津線に架設される開床式の上路トラス橋（図-7 参照）で、無塗装鉄道橋としては初めての試みであり、コンクリート床版でおおわれている道路橋とは構造的に異なっている。

ここでは、主として、裸使用にからんで検討した事項について報告する。

a) 無塗装使用に対する基本的事項

- ① 幅の広い部分は極力避けて自然排水が可能な構造とする。
- ② 弦材などは密閉構造とする。
- ③ 弦材で気密を保持できない部分（添接部）の内面などは重防食塗装とする。
- ④ 格点および連結部などは雨水を溜めたり、湿潤が続く状態にならないような構造とする。
- ⑤ 高力ボルトは耐候性を有するものとする。
- ⑥ 溶接材料は耐候性を有するものとする。
- ⑦ 高力ボルトで連結する接合面には、無機ジンクリッヂプライマーを塗布する。

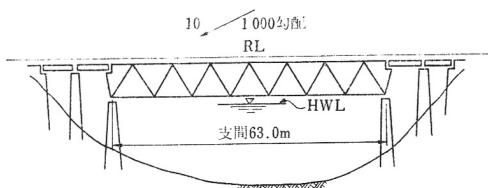


図-7 会津線に架設される無塗装橋梁の一般図

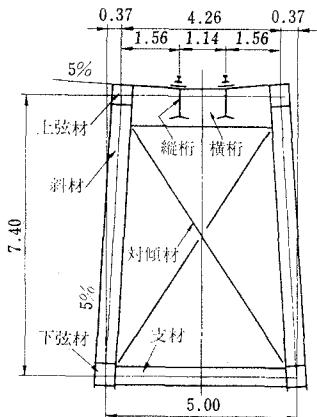


図-8 排水を考慮した橋梁断面図

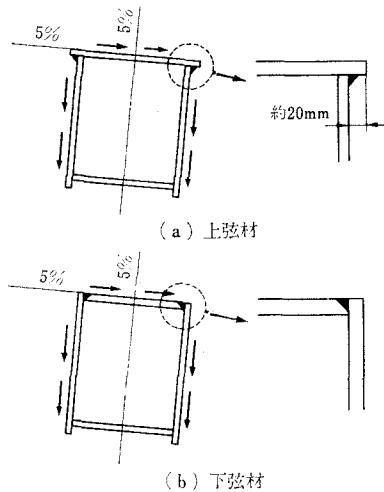


図-9 水の流れを考慮した上下弦材の形状

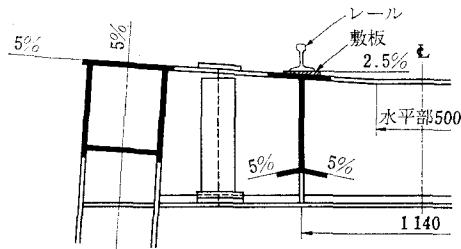


図-10 勾配をつけた横桁と縦桁

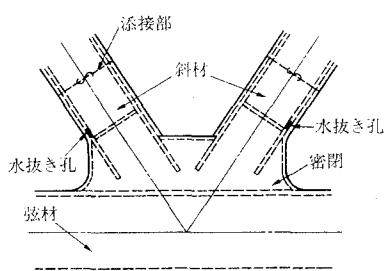


図-11 密閉部と水抜き孔をもつ格点部

⑧ 橋脚の汚れを防止するため、錆汁の水みちを橋脚に設ける。

⑨ 人体に接する高欄などには溶融亜鉛めっきを施す。

b) トラスの断面形状

トラス全体の断面形状は、排水と主構の製作を考慮して、図-8に示すように5%の傾斜を持つ台形とした。

c) トラス部材の形状

上弦材および下弦材の断面形状は図-9(a)および(b)に示すように箱形とし、5%の傾斜を設けたので矢印で示す水の流れが期待できる。なお、弦材の下フランジは水の流れを考慮して腹板に挟まれる構造とした。

斜材は、圧縮材、引張材とも、内部の気密性を考慮して箱形構造とし、両端の連結部では箱形を絞ってH形とした。

d) 床部材

縦桁の上フランジには、排水を考慮して5%の横断勾配を設け、鋼桁直結軌道の敷板は通常と逆の向きにして使用することとした。下フランジは、腹板中心を頂点とする勾配5%の山折れ断面とした(図-10参照)。

横桁の上フランジには桁方向に上弦材の上フランジと同じ縦勾配を設けたが、中央部は水の流れの分散を考慮して50cmにわたって水平部を設けた。また、下フランジは、腹板中心を頂点とする勾配5%の山折れ断面とした(図-11参照)。

e) 横構、支材および対傾材

上横構の断面はI形とし、下フランジは勾配5%の山折れ断面とした。また、下横構および支材は箱断面の密閉形とし、両端部の連結部は絞ってH形となる構造にした。なお、連結部の中板は排水および通風を良くするために5%の勾配と円形の隙間を設けた。対傾材の断面はH形とし、部材の途中に水抜孔を設けた。

f) その他の二次部材の排水勾配

フランジ幅が220mm以内の場合、水平面はそのままとし、220mmを超える場合には5%の横断勾配を設けた。

g) トラス格点部

トラスの格点部は、上弦材、下弦材とも密閉構造とし、水が溜まり易い添接部の下側には水抜孔を設けた(図-11参照)。

h) 弦材の添接部

上弦材および下弦材の添接部は、水の浸入を防ぐために、添接板を図-12に示すように配置した。また、この橋梁には全体的に10/1000の縦勾配があるので、勾配の低いほうの弦材のダイヤフラムの手前に水抜孔を設けた。

i) 橋脚部の錆汁の水みち

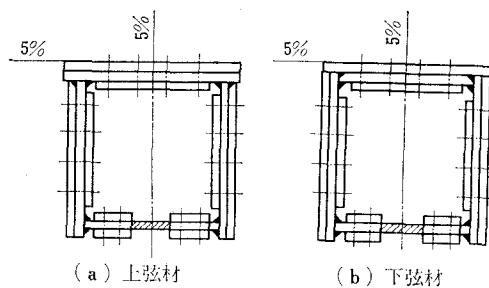


図-12 防水策を施した弦材の添接部

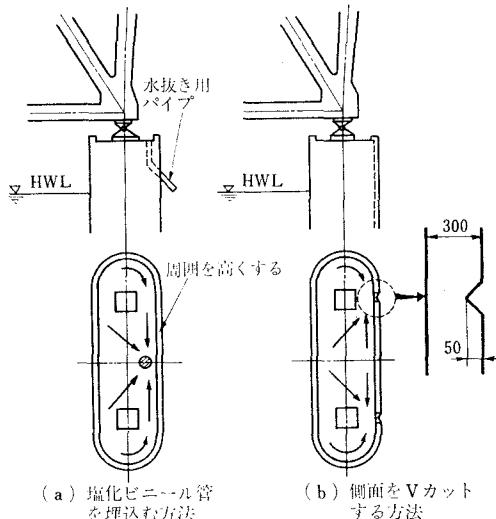


図-13 橋脚における錆汁の水みち

橋脚上を流れ落ちる錆汁によりコンクリート橋脚の側面が汚れるのを防ぐため、図-13に示すように橋脚上面の縁を一段高く囲み、水を一定箇所から流出させる口をあけたり、橋脚側面に堅溝を設けたりする計画である。

(3) 道路橋の例

阪神高速道路公团においては、昭和54年4月から橋梁の防錆方法および耐候性鋼板の無塗装使用について、防錆橋梁研究委員会（委員長・小西一郎）を設立して研究を進めている。

ここに紹介する無塗装橋梁は、同研究委員会のテーマとする耐候性鋼材の橋梁への適用に関する調査・研究の一環として建設されるものであり、実験橋としての性格を帯びている。この橋梁は、昭和55年3月ころ製作が開始され、仮組立後、1年間程度工場内で仮置きして錆の発生状況を観測した後、堺市の臨海工業地帯に架設される計画である。

橋梁の形式は3径間連続非合成I桁橋（29.5+35.0+29.5 m）であり、鉄筋コンクリート床版でおおわれている点が前節で紹介した開床式の鉄道トラス橋とは構造的に異なっている。

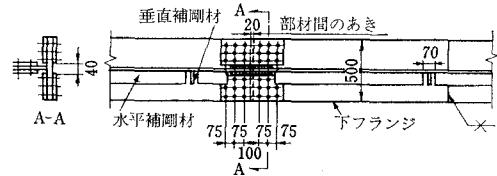


図-14 排水の良い添接部と水平補剛材

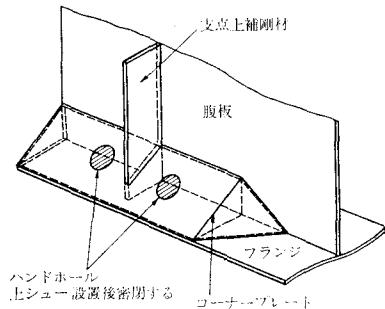


図-15 水やほこりが溜り難い形の支点上補剛材とコーナープレート

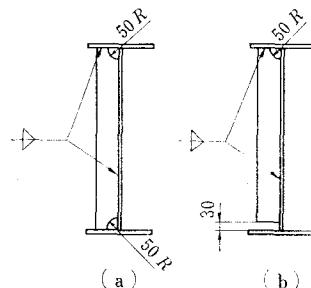


図-16 工夫をこらした垂直補剛材下端

ここでは、主としてI桁の無塗装道路橋構造の概略について、鉄道橋において述べた事項と重複するものはなるべく除いて報告する。

a) 主桁の下フランジ

一般に、下フランジの断面を変化させるには板幅と板厚をともに変化させているが、幅を変えると下フランジ上面を流れる水が断面変化した箇所で下面に回り、水みちができる可能性があるので、下フランジ幅を一定にして厚さのみを変えた。また、下フランジは、腐食しろとして1 mm余分を見た。

b) 主桁の添接部

高力ボルト添接部は部材間を通常より広くあけて20 mmとし、添接板に挟まれた部材間の隙間に水が溜まつても自然に抜けるように配慮した。また、下フランジの下側添接板を2枚に分割することにより、排水の可能性を大きくした（図-14参照）。

c) 主桁腹板の補剛材

主桁支点上は、腹板、フランジおよび支点上補剛材の3材片が交差し、水やほこりが溜まり易いので、図-15

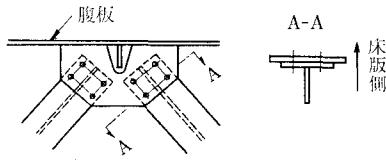


図-17 滞水を避けた横構とガセット

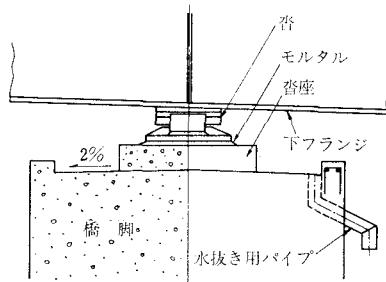


図-18 風通しの良い支承付近

に示すようなコーナープレートを取り付けた。

中間補剛材については、通常は主桁の曲げモーメントが正の区域において、下フランジと補剛材下端とは密着させるが、この部分に水やほこりが溜まり易いので、図-16 (a) および (b) に示すような構造とした。なお、今回 (a) と (b) の構造を併用したのは錆安定化の程度を比較調査するためである。

d) 横構

本橋の場合、横構の断面形状は T 形であるが、横構部材を図-17 に示すようにガセットプレートの下に取り付けることによって、ガセット上面および横構のフランジ上面に水やほこりが溜まりにくくするように配慮した。また、ガセットプレートはできるだけ小さくし、垂直補剛材貫通部のスカラップは通常より大きくした。

e) 支点付近

橋脚と桁との空間をできるだけ広くすることにより桁端部および中間支点部の風通しをよくして耐久性をあげるよう配慮した。そのためにシュー座を設けて支承点を一段高くした(図-18 参照)。

8. 規格に関する考察

日本においては JIS として 1968 年に G 3114「溶接構造用耐候性熱間圧延鋼材 (SMA 材)」が、また、1971 年に G 3125「高耐候性圧延鋼材 (SPA 材)」が制定された。外国においては、やはり発祥の地である合衆国が早く 1941 年に ASTM 規格として含銅鋼タイプの A-242、次いで A-440, A-441 が、また、1968 年に溶接構造用タイプの A-588 が制定された。イギリスでは、BS 4360 に WR 50 というシリーズが登場しており、ドイツ

では DIN にはその規格がないが、VDEh (ドイツ鉄鋼協会) 規格として WT St 37, WT St 52 などがある。

現在、構造用と言えば当然溶接が可能でなければ意味がない、その点、各耐候性鋼板とも相当する強度の普通鋼材に比べて若干の注意を加えれば溶接作業もまた、溶接部の健全性も問題がないものが出来ている。なお、溶接性については比較的短時間に簡単に確かめができる。しかし、耐候性鋼材は良好な溶接性に加えて大気に対してかなりの抵抗力が無ければ意味がないが、以下のところ、これを実証する規格はいずれの国にもないようである。結局、経験に基づき、化学成分の規定でもって、これに代えている。

合衆国の特徴は、A-588 として Grade A~J (ただし I は欠番) をあげているが、各グレードの内容は各社の社内規定値と同じものである。裸使用 (無塗装) に耐えるようなものを規定するには、やはりこのようにするよりほかはないのであろう。日本を含め他の国の規定は各社の社内規定を包含し、しかも、溶接性の配慮に相当重きを置くために、耐候性のための化学成分の規定値の範囲が広くなり、明確さを欠く傾向が感じられる。事実、わが国でも JIS G 3114 のままで裸使用に適するとは限らず、各社とも裸使用を考える場合に適する鋼材として自社のブランドを持ち、JIS よりも厳しく化学成分を規定したものを販売している。

なお、現在、国際的な規格として ISO が "Hot Rolled Steel Sheet of Structural Quality with Improved Atmospheric Corrosion Resistance" を作成中であるが、内容はやはり化学成分の範囲が相当広いので、現行の JIS とあまり変わらないものと思われる。しかし、将来、各国とも ISO 規格の影響は大なり小なり受けることになる。

一方、JIS のほうも見直しの動きがあるが、そこでは使裸用と塗装使用に区別して規定することを考えているようである。高い耐候性を考慮すると、当然、添加元素も増し、その結果、強度も増すので、強度の上限を厳しくおさえると矛盾が生ずる可能性がある。

また、耐候性を有する溶接用材料を JIS 化する作業も目下進められているが、耐候性については溶接金属中に母材の耐候性元素が混入するというプラス効果があることも考慮し、溶接性をも勘案のうえ、適切に規定値を設けなければならない。なお、合衆国では AWS の規格がある。

本小委員会の今後の規格に関する要望としては

- ① 裸使用に耐える溶接構造用鋼材の規格、
- ② 溶接性は必ずしも優れなくてもよいから、低価格で耐候性の高い型鋼 (大型 H を含む) などの規格、

- ③ 耐候性高力ボルトの規格.
- ④ 耐候性そのものを証明する試験方法の確立,
などがあげられる.

あとがき

耐候性鋼材は、その名のとおり、少なくとも大気中において無塗装でも高い耐腐食性能を備えていなければ意味がない。しかし他方、価格があまり高かったり、溶接性が悪いと構造用鋼材としての競争力を失う。つまり、耐候性、溶接性、価格の間のバランス、あるいは妥協で最適値をねらうべきであると思う。

そこで、使用者の要求に沿い、生産者はその開発・改良にたゆまぬ努力を期待されるが、使用者のほうも出来合いの品をただう呑みまたは無難作に採用するのではなく、その時点において開発された鋼材が最も良く効果をもたらすよう、計画や設計の段階から考慮を払い、また、ある程度、清掃、点検などの保守作業も残すことが必要であると考えられる。

なお、鋼材の機械的性質や溶接性については比較的短時間に確認できるが、耐腐食性については、目下のところ確立された促進試験方法がないようである。自然の状態でこれを証明するにはやはり 10 年以上の年月を待たなければならず、息の長い研究が必要である。当小委員会のメインテーマとしての耐候性鋼材の研究は、一応これで終えるが、今後も関心を持って注目を続けたいと考えている。

本文の執筆は、阿部英彦、堀川浩甫、三木千寿、山田健太郎、大槻正幸、夏目光尋、庄司吉弘、飯村修、太

田孝二、佐藤政勝の各委員が担当し小委員会にはかった。なお、道路橋の設計例については阪神高速道路公団の吉川 紀氏の執筆によった。

終わりにあたり、当小委員会の活動の方向づけをご教示下さった鋼構造委員会（委員長・奥村敏恵）の諸氏、アンケート調査にご協力下さった方々、および（財）鋼材倶楽部とそれを介して実験を引き受けられた鋼材メーカーの方々に感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 阿部英彦・稲葉紀昭・江口保平：腐食鋼材の疲労強度、構造物設計資料、No. 34、日本国有鉄道、1973 年 6 月。
- 2) 国広哲男・井上啓一・福田孝男：耐候性鋼の大気暴露調査、土木研究所資料、第 729 号、昭和 47 年 2 月。
- 3) 菊池・山田：大気暴露された鋼材溶接維手の動的強度に関する研究、I, II, 名古屋土木研究報告、昭和 53 年 3 月、同 IV、昭和 54 年。
- 4) Albrecht, P. and Friedland, I.: Preliminary Fatigue Test Data for a Weathered A 588 Bridge Weldment, (not for Publication). (レポートを取り寄せ中)。
- 5) 土木学会：鋼鉄道設計標準解説、昭和 46 年。
- 6) 奥田寿夫・浅川和夫：橋りょう用鋼材の腐食疲労強度、鉄道技術研究所速報、No. 73～217、昭和 48 年 11 月。
- 7) 堀川浩甫ほか：冷間塑性加工に伴う構造用鋼材のひずみ時効脆化、土木学会論文報告集、No. 300、(登載内定)，1980 年 8 月。
- 8) 高力ボルトの遅れ破壊・曝露試験最終報告、JSSC, Vol. 15, No. 158, pp. 1～54, 1979 年 3 月。
- 9) 田島二郎：鋼構造の研究、第 4 章 高力ボルト接合、pp. 271～284、奥村敏恵教授還暦記念会、1977 年 6 月 15 日。
- 10) 藤田 実・森 芳徳：海域における土木鋼構造物の腐食と防錆防食、土木学会誌、Vol. 64, No. 13, pp. 53～58, 1979 年 12 月。
- 11) 鋼構造接合資料集成・第 4 章 静的荷重を受ける摩擦接合部、pp. 380～393、技報堂出版、1972 年 3 月 15 日。

（1980.2.1・受付／委員長・阿部英彦
Hidehiko ABE、正会員 工博 日本国有鉄道鉄道技術研究所構造物研究室長）