

# 神戸大橋の製作上の問題点に関する検討

永田 安彦\* ・ 島田 喜十郎\*\*  
村田 安房\*\*\* ・ 南方 俊二\*\*\*\*

## 1. まえがき

神戸大橋は架橋地点の特殊性から、鋼材の防錆、防食に対する配慮が重要項目の一つであり、さらに構造上の問題点をもあわせ考え、本橋には 60 キロ鋼を主体とした耐候性鋼材を全面的に使用した。さらに、過酷な腐食条件下における塗膜性能の向上をはかるため、わが国の橋梁塗装仕様としては、最初の MIO (Micaceous Iron Oxide) 系塗料を採用した。

一方、本橋の上部工の工場製作においては、従来の一般橋梁に比べて製作上の特異な問題が非常に多いこと、さらに上記の種々の特殊条件に関連して、製作工程全般にわたる綿密な検討の必要性が認められた。とくに、3 本バントを用いたフローティングクレーンによる大ブロック架設工法との関連上、製作精度の向上をはかるため、一般橋梁を対象に適用されている製作精度基準とは独立して、大型橋梁としての自主精度基準の設定に対する配慮が必要であった。そのほか、施工面からみた本橋の構

造設計上の改善、厚板耐候性高張力鋼の溶接施工条件の確立など重要な研究項目が多い。

このように、製作上豊富な内容を有する本橋の工場製作は、工程および品質管理に対する高度な生産管理技術の駆使により短工期に完了した。

神戸大橋上部工の工場製作における特殊問題点を中心とした検討内容について報告し、諸賢の参考に供する次第である。

## 2. 工場製作の概要

神戸大橋上部工の工場製作の主要工事内容を表-1 に示す。これから、本橋の製作規模が従来の橋梁に比べて非常に大規模であることがわかる。各工程の製作方針のうち、特記すべき事項を列挙すると以下のとおりである。

① 耐候性鋼材の全面的使用にあたっては、鋼材の耐候性を必要最小限に押え、溶接性を重視した鋼材仕様を制定する。

② 複雑な部材における施工性および能率性の観点か

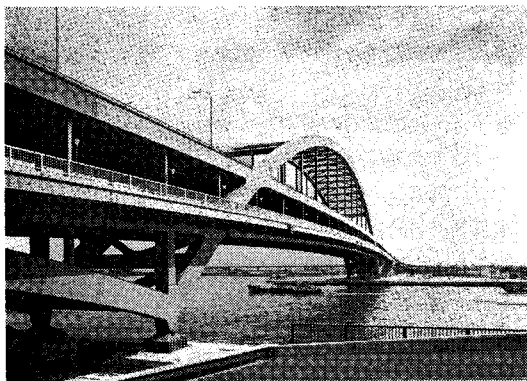


写真-1 神戸大橋全景

- \* 正会員 神戸市港湾局長
- \*\* 正会員 神戸市港湾局新埠頭関連工事事務所長
- \*\*\* 川崎重工業(株)加古川工場 工作部長
- \*\*\*\* 川崎重工業(株)加古川工場 工作部

表-1 概略工事諸元

項目	詳細分類	工事諸元	注 釈
橋体諸元	橋 長	51 000 mm	側 径 間 中 央 径 間 全 長
		217 000 mm 319 000 mm	
橋 重	ブロック総数	6 468 864 t	上部構造総鋼量 主 構 橋 門 構 端 横 桁 の み
		158本	
ブロック諸元	ブロック寸法	18 462 mm	最 大 長 最 大 幅 最 大 高 さ
		2 300 mm	
		4 350 mm	
ブロック重量	43.3 t	最 大 重 量	
副資材諸元	リベット本数	206 072 本	耐考性 SV 41A φ22, φ25 F11T φ22  6 mm 換算長 プライマー塗装を 除くすべての塗装
	ハイテンション ボルト本数	84 453 本	
	溶 接 延 長	186 000 m	
	塗 装 面 積	267 096 m <sup>2</sup>	

ら複雑な継手を極力回避し、二次部材の共通化をはかれるよう、設計段階で継手形状を中心とした構造上の改善検討を行なう。

③ 原寸図は、作成途上に累積される偶然誤差を排除するため、電算によって求められた座標値を用いて作成する。

④ 厚板耐候性高張力鋼のガス切断による硬化を緩和するための条件管理を徹底する。

⑤ 複雑な形状を有する大型ブロックについては、精度および作業能率の向上をはかるため、事前板継ぎあるいは先切削工法を適用する。

⑥ 現場添接孔の穴あけの能率化をはかるため、溶接収縮量などに関する統計的データに基づき、全ブロックについて組立前に穴あけを行なう。

⑦ 共通部材の製作は、可能な限り互換性工法を適用する。

⑧ 本橋独自の溶接施工法試験ならびに鋼材メーカーとの共同研究によって、厚板耐候性高張力鋼の溶接施工方針を決定する。

⑨ 仮付けおよび本溶接時の溶接割れを防止するため極低水素系溶接棒を使用し、同時に乾燥および取扱管理を徹底する。

⑩ 耐割れ性および能率性を考慮し、サブマージーク溶接を広範囲に適用する。ただし、調質鋼に対しては溶接熱影響部の脆化および軟化を防止するため、部分的にストリップヒーターによる電氣的加熱方式（自動制御式）を適用する。

⑪ 統計的品質管理手法に基づき、製作途上で発生する部材寸法の定誤差を定量的に把握し、単品部材寸法の精度管理を徹底させる。

⑫ 仮組立は主構については、平面組による部分仮組立方式を採用し、床組、その他の二次部材などは部材の単品検査による精度の確認を行なう。

### 3. 厚板耐候性高張力鋼の溶接性に関する検討

最近の橋梁用鋼材としては 60 キロ鋼の採用が漸増する傾向にあるが、本橋のように耐候性鋼としての採用は少なく、しかも厚板という点で施工上検討すべき問題が多い。とくに、厚板の鋼材特性、溶接性および溶接施工条件の検討は最も重要であるといえる。

これらの問題点に対する基本的な検討方法としては、まず鋼材仕様を設定する段階で、鋼材に要求される溶接性と耐候性の両特性を十分に満足させるための成分調整をはかると同時に、実際の工場製作に適用する溶接施工条件を施工法試験などによって具体的に明らかにすることが必要である。ここでは、とくに本橋に大量使用され

た厚板耐候性高張力鋼の製造仕様設定上の基本的な考え方および、溶接施工条件に対する検討結果について述べる。

#### (1) 製造使用上の留意点

一般に耐候性鋼材は、耐候性向上のために Cu, Cr などの合金成分が付加されるため、構造用鋼としては SM 材に比べて炭素当量が高くなる傾向があり、その使用にあたっては溶接性にやや難点があらわれることが予測される。

従来の実験報告から、耐候性に有効な添加元素はおもに Cu, Cr, P, Ni であることが知られている。したがって、これらの成分を具体的にどの程度添加するかが問題である。まず P については鋼材の偏析およびじん性の点で問題となる元素であるため、JIS 規格どおり 0.04% 以下とすることが賢明である。Ni 成分については単独効果を発揮するには数%のオーダーで添加する必要があり、かつ價格的に高価であるため、橋梁用としては耐候性ということよりも、切欠じん性を考慮した量的検討に重点をおく必要がある。最後に、耐候性を付加する Cu および Cr の添加量を検討することは溶接性との関連上、最も重要な意味を持っている。まず、Cu 単独の効果についてはその添加量に対して種々の見解があるが、Copson の報告<sup>1)</sup>によれば、図-1 に示すように暴露期間が短い場合は 0.05% 程度でも有効であるが、長期に

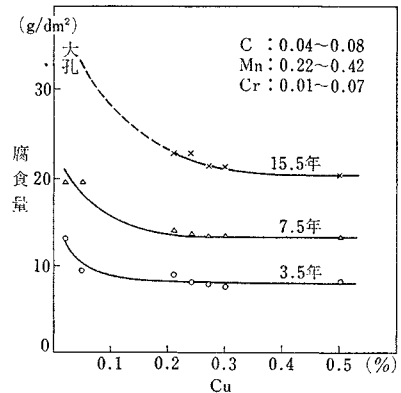


図-1 大気腐食に及ぼす鋼材中の Cu の影響 (海浜工業地帯)

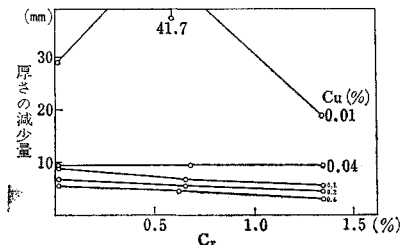


図-2 大気腐食に及ぼす鋼材中の Cr の影響

なると、0.20% 以上でない効果が認められない。ただし、それ以上では添加量の多少にかかわらず耐腐食性の効果は飽和状態となっている。また、Cr の影響については、Larrabee の報告<sup>2)</sup>によると、図-2 に示すように単独では効果が認められず、Cu との共存によって効果を発揮することが認められる。

一方、化学成分の溶接性に及ぼす影響を式(1)から経験的に判断すると、Cu と Cr の影響に

$$C_{eq}(\%) = C + Mn/6 + Si/24 + Cr/5 + Ni/40 + Mo/4 + V/14 + (Cu/13) \dots (1)$$

については Cr のそれが大きく、Cu の場合は 0.30% を越える場合にのみ上式の Cu の項が適用されるもので量的な制約条件が付与されている。

したがって、以上に述べた鋼材の化学成分と耐候性および溶接性との相対関係についての考察から、厚板耐候性高張力鋼の化学成分の添加量については以下のように結論され、これらを反映した本橋用鋼材製造仕様を制定した。

① C は JIS 規格 (SMA 50 の場合) で 0.19 以下とあるが、溶接性から考えて 0.16 以下に規制する。

② P は JIS 規格どおり 0.040 以下とする。

③ Cu は JIS 規格では 0.20~0.70 とあるが、上限をせばめ、かつ添加量のばらつきを考慮し、0.20~0.40 程度の範囲とする。

④ Cr も Cu と同様 JIS 規格の 0.30~1.30 を 0.30~0.50 程度に範囲を狭める。

⑤ Ni については、じん性向上の点からとくに具体的規制は設けず、構造物の使用条件によって個々に考慮する必要がある。

⑥ その他の元素については、JIS 規格どおりで十分である。

以上のように、本橋では鋼材の耐候性を付与する Cu、Cr などの合金成分の添加量を必要最小限に押え、ともに各鋼種各板厚別に炭素当量の規制を行なった。そのほか、機械的性質については JIS 規格を部分的に補正した仕様を設定したが、具体的には引張強さの規定は JIS

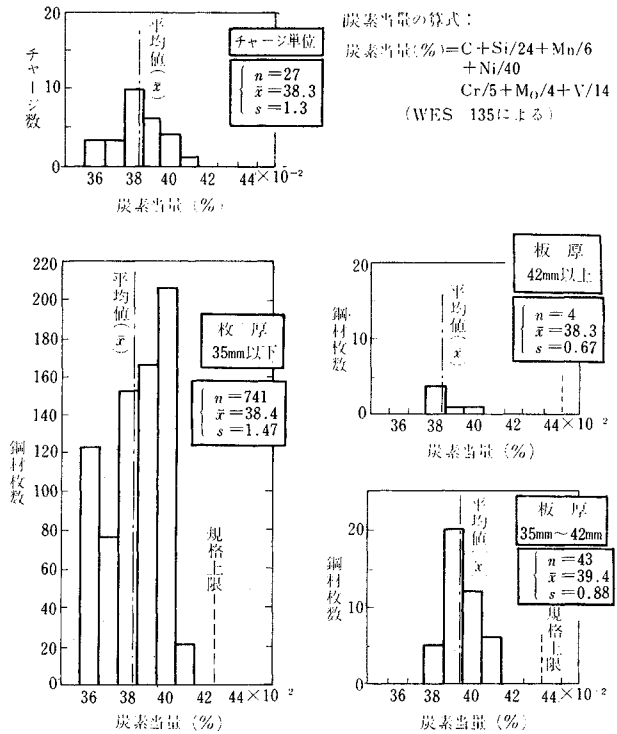


図-3 SMA 58 Q における炭素当量の実績

表-2 耐候性鋼板の製造仕様

鋼種	板厚 (mm)	化学成分 (%) ①								機械的性質			
		C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ceq <sup>2)</sup>	降伏点 (kg/mm <sup>2</sup> )	抗張力 (kg/mm <sup>2</sup> )	衝撃値 (kg-mm)	備考
耐候性 SS 41	≤22	≤0.17	—	—	≤0.040	≤0.030	0.20~0.40	—	≤0.38	>24	41~52	—	伸び 1号 21%以上
SMA 41	A ≤32	≤0.17	≤0.35	≤1.40	≤0.040	≤0.030	0.20~0.40	0.20~0.40	≤0.38	>24	41~52	0°C ≥2.8	伸び 1号 20%以上 伸び 4号 24%以上
	B ≤38												
	C ≤50												
SMA 50	A ≤25	≤0.16	≤0.55	≤1.40	≤0.040	≤0.030	0.20~0.40	0.20~0.40	t ≤ 35 ≤ 0.42	>36	50~60 <sup>3)</sup>	0°C ≥2.8	伸び 1号 19%以上 伸び 4号 20%以上
	B ≤38								35 < t ≤ 38 ≤ 0.43				
	C ≤50								t < 2.38 < 0.44				
SMA 58 Q	t ≤ 25	≤0.16	≤0.55	≤1.40	≤0.040	< 0.030	0.20~0.40	0.30~0.50	t < 35 ≤ 0.42	>46	56~68 <sup>4)</sup>	-5°C ≥4.8	伸び 4号 20%以上
	26 ≤ t ≤ 40								35 < t < 42 ≤ 0.43				
	40 ≤ t ≤ 50								t < 42 ≤ 0.44				

注: ① SMA 50 および SMA 58 Q については、Ni, Mo, Nb, V, T, Zr のいずれか 1種以上添加すること。

② 炭素当量 Ceq の計算は次式による、Ceq = C + Mn/6 + Si/24 + Cr/5 + Ni/40 + Mo/4 + V/14。

③ JIS では 50~62 であるが範囲を狭めた。

④ JIS では 58~73 であるが範囲を狭めた。

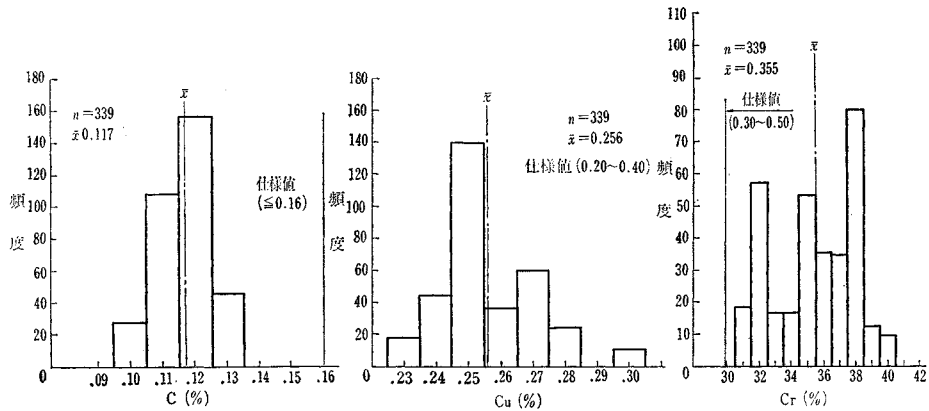


図-4 SMA 58 Q における主要化学成分の実績

表-3 母材試験結果

試験項目 鋼種	引張試験					曲げ試験		シャルピー衝撃試験			
	試験片 採取位置	降伏点 (kg/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (kg/mm <sup>2</sup> )	伸び (G.L=50%)	絞り (%)	R=1.5t 180°	表面伸び (G.L=3t.%)	試験片 採取位置	吸 エ ネ ル ギ ー (kg-m)	T <sub>ZE</sub> (°C)	T <sub>YS</sub> (°C)
SMA 58 Q (t=44mm Ceq=0.39)	L	54.0	64.5	29	76	良	25.7	L (1/4t)	-5°C 12.2	-32	-35
		55.0	64.9	30	76						
	C	53.3	63.4	33	73	良	25.8	Z	4.0	-13	-14
		51.5	62.9	33	73						
SMA 50 B (t=38mm Ceq=0.39)	L	35.9	55.2	34	70	良	30.2	L (1/4t)	0°C 10.6	5	-5
		35.8	56.2	33	68						
	C	36.0	54.6	31	64	良	31.0	Z	2.2	20	25
		33.9	55.0	32	68						

注：Lは圧延方向，Cは圧延に直角方向，Zは板厚方向。

では範囲が広いので、本橋では SMA 58 Q に対して、58~68 kg/mm<sup>2</sup>、SMA 50 に対して 50~60 kg/mm<sup>2</sup> に範囲を狭めた。また、機械試験における絞りや曲げ伸びについても、一応参考値としてデータをとるように規定した。

一方、鋼材の寸法許容差については、JIS G 3193「熱間圧延鋼材」と鋼帯の形状寸法および重量ならびにその許容差によるものとし、とくに板厚の許容差についてはショットブラストによるミルスケール除去後 8 点計測によるものとし、SMA 58 Q についての許容差は JIS G 3103「ボイラ用圧延鋼材」に準拠し、(-) 側公差は 0.25 mm と一律にした。

使用鋼材は前述の製造仕様に基づき全数立会検査を行ない、鋼材の性能および寸法許容差の確認を行なった。その検査結果の一例として、SMA 58 Q 材の炭素当量および主要化学成分の実績を図-3,4 に示す。実績値は全数が仕様規格値を満足し、炭素当量の平均値は 0.38~0.39 と、この種調質鋼としては低い値を示している。

## (2) 溶接施工条件の確立

すでに述べたように、本橋においては鋼材仕様の面

溶接性に重点をおき、耐侯性特有の不利な条件を基本的に解決できるよう考慮したが、本橋には厚板が大量に使用され、かつ交差部ブロックなど拘束の大きい状態で溶接施工が多いことを考慮すると、別途実験的検討の必要性が認められた。

したがって、製作に先立ち、各種の厚板耐侯性高張力鋼について、その使用性能と溶接工作性における問題点に対して、製鋼メーカーとの共同で詳細な調査研究を行なった<sup>3)</sup>。

さらに、製作の施工法試験を SMA 58 Q (t=44 mm) および SMA 50 B (t=38 mm) の、ほぼ使用最大板厚について実施し、具体的な施工方針を決定するよう考慮した。

試験の内容としては、従来の一般的な溶接性検討の主旨はもちろん、厚板高張力鋼の強度および切欠じん性の均質性、板厚方向の強度特性さらに鋼材特性の基礎条件を得るための CCT 特性値を調査するための特殊試験をあわせて実施した。

まず、母材性能については表-3 に示すように機械的性質は JIS 規格および本橋仕様を満足する良好な値を示しているが、母材板厚方向の衝撃特性は圧延方向に比べ

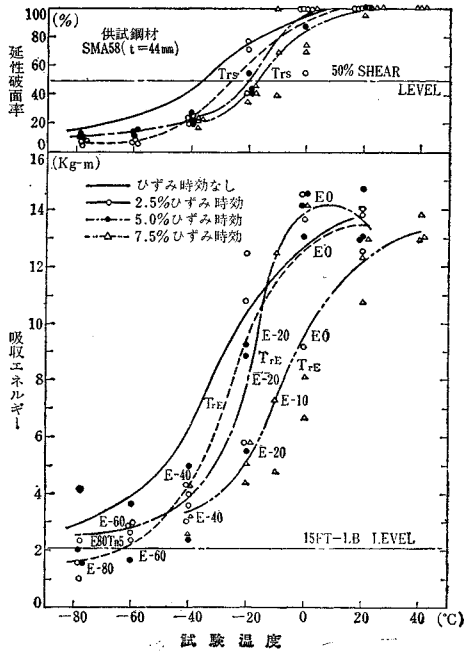


図-5 SMA 58 Q のひずみ時効が吸収エネルギーと延性破面率に及ぼす影響

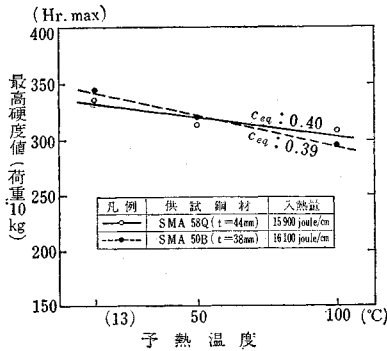


図-6 予熱温度が JIS 硬さに及ぼす影響

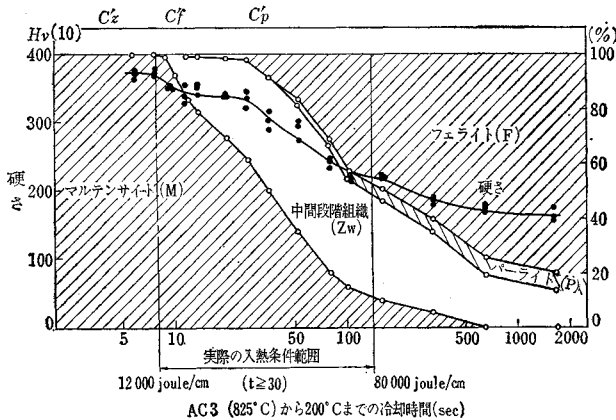


図-7 CCT 図から求められた SMA 58 Q (t=44mm) の硬さ、組織と溶接入熱量の相対関係

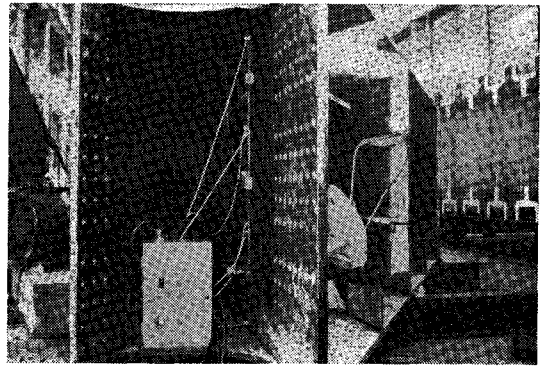


写真-2 交差ブロックのストリップヒーターによる予熱状況

てかなりの劣化がみられる。また、ひずみ時効については、ひずみ量が 75% の場合の衝撃値は、規格を一応満足しているが、時効の影響が顕著となることが認められる。

次に、耐候性鋼溶接熱影響部の硬化性、曲げ延性および割れ感受性を明らかにするために種々の溶接性試験を実施したが、その結果は図-6,7 に示すように耐候性鋼といえども一般鋼材と同等以上の良好な特性を示すことが認められる。とくに問題となる溶接割れについては、本橋用として特別に溶接棒メーカーで開発した極低水素系溶接棒の使用によって、過酷な条件下でも常温付近で割れ発生を避けることが可能であり、その使用が効果的であることが明らかになった。

以上の溶接性試験の結果から、本橋では施工の完全性を重視し、予熱温度を SMA 58 Q に対して 70~100°C、SMA 50 に対して 50~70°C を設定し、とくに厚板で構成される交差部ブロックおよび支点上ブロックには、予熱管理を徹底するための、ストリップヒーター(写真-2)を使用した。また、極低水素系棒の使用にあたっては、一般の低水素系と同様、工場では再乾燥ならびに取扱管理を徹底し、乾燥炉から取り出したのち大気中の放置時間を 4 時間以内に規制するほか、携帯用乾燥炉の使用をもあわせて考慮した。

次に、本橋では割れ防止の観点から比較的入熱の大きいサブマージアーク溶接を広範囲に適用するよう計画した。この場合には、別途溶接熱影響部の脆化を防止するための入熱限界条件を明らかにしておく必要上、溶接入熱を 35 000 Joule/cm および 70 000 Joule/cm の 2 段階に変化させて試験を行なった結果、表-4 に示すように大入熱条件においても溶接継手各位置の衝撃値は規格を十分満足することが確認された。また、70 000 Joule/cm 以上の大入熱になると軟化域が生じているが、その領域は非常に狭いため強度的には問題に

表-4 溶接入熱量とシャルピー衝撃値の関係

鋼種	特性	35 000 Joule/cm			70 000 Joule/cm		
		溶着金属	境界部	熱影響部	溶着金属	境界部	熱影響部
SMA 58 Q ( <i>t</i> =44 mm)	$vE_s$ (kg/m)	12.3	8.0	12.5	7.0	9.4	8.0
	$T_{rE}$ (°C)	-34	-14	-38	-16	-18	-10
	$T_{rS}$ (°C)	-45	-28	-34	-28	-24	-11
SMA 50 B ( <i>t</i> =38 mm)	$E_0$ (kg/m)	11.4	12.5	17.0	10.7	10.7	18.7
	$T_{rE}$ (°C)	-20	-24	-34	-25	-22	-38
	$T_{rS}$ (°C)	-30	-16	-26	-28	-26	-43

ならないと考えられる。また、突合せ溶接および十字型継手について継手性能の確認を行なったが、引張り、曲げ、硬さなどは良好な値が得られた。これらの試験結果から判断して、実際の製作においては能率上の観点より板継ぎの溶接入熱量は、70 000 Joule/cm に目標をおき、上限は 80 000 Joule/cm 以内となるよう規制した。

ここで得られた厚板耐衝撃高張力鋼の溶接施工方針を総括すると表-5 に示すとおりである。

#### 4. 製作面からの設計上の改善

本橋において、構造上最も重要な箇所となる弦材とアーチ部材の交差部および中間支点上のアーチ部材と鉛直材の交差部付近については、光弾性実験を行ない局部的応力状態についての安全性の検討を行なったほか、交差部の実物大の継手模型実験を実施し、それに対する溶接施工法の検討をした。

継手形状は鋭角の開先を有する十字形継手となるが、施工性の面からその交差角は 30° 程度が限度と考えられ

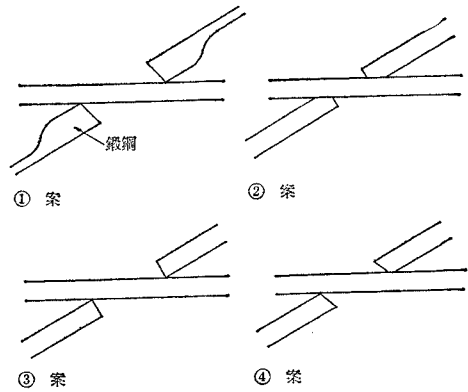


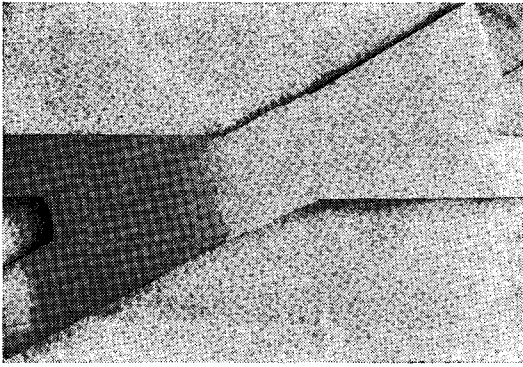
図-8 交差継手形状案

る。さらに、突合せ溶接する部材の形状に関しては、図-8 に示すように種々の継手形状案が考えられた。すなわち ① 案は継手付近のみ部材の局部的増厚を行ない、継手としては完全溶込型とするもので、材質的には鍛鋼を考えたものである。② 案は部分溶込型のもので、溶接部ののど厚を母材厚さと同等にするものである。また、③ 案は施工時におけるブロックの反転回数の減少、溶接作業の能率化という点で、エレクトロスラッグ溶接法の適用を考慮した溶接法である。④ 案は完全溶込みとなる形式であり、③ 案の開先角度を部分修正したものである。

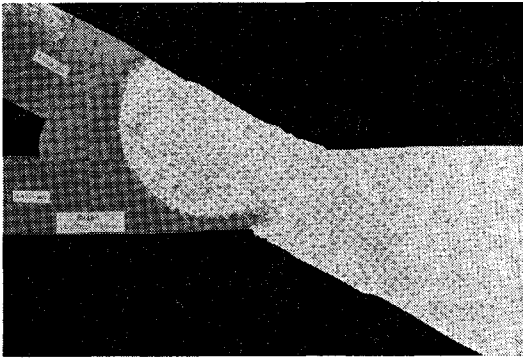
以上の4つの案について、それぞれ検討した結果、① 案については、鍛鋼材の板厚が局部的に 60 mm 程度の厚板となるため、施工上の能率性と材料コストの点で不利と考えられ、本案は除外することとした。また、② 案以降の3案については、事前に優劣を決しにくいため実験を実施した。断面マクロ写真、破断状況を写真

表-5 神戸大橋上部工の溶接施工における問題点とこれに対する具体的対策

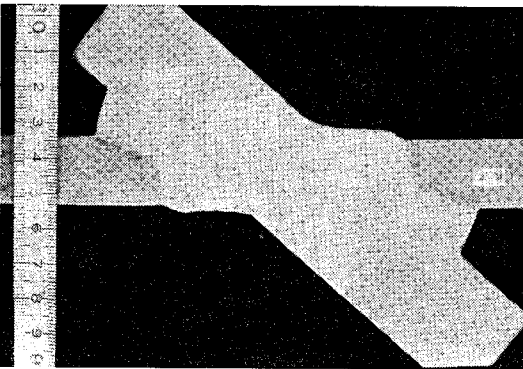
問題点	本工事における対策	備考	
溶接割れ および 遅れ破壊	鋼材	① 炭素当量 ( $C_{eq}$ , 合金成分) の規制 ② 製造履歴および材料諸特性の明確化	Cu, Cr を必要最小限に抑える 溶接継手性能の向上
	溶接材料	① 溶着金属中の拡散性水素量の規制 ② 溶接材料の包装法に対する工夫 ③ 溶接材料の再乾燥処理の厳守 ④ 溶接棒の携帯用乾燥炉による保管 ⑤ 大気中における放置時間の制限	極低水素系棒の使用 ポリカン包装または密封梱包の実施 350°C × 1 時間  大気放置時間を 4 時間以内に規制
	溶接施工条件	① 適正予熱・層間温度の保持および温度管理の徹底 ② 自動溶接法の適用範囲の拡大 ③ 溶接順序の適正化 ④ 溶接順序に対する工夫 ⑤ アークストライク、ショートビードの回避	重点的にストリップヒーターを使用  溶接変形ならびに拘束応力に対する配慮 (対称法) テンパービード法およびブロック式溶着法の採用 小入熱となる溶接の排除 (仮付溶接ビードに対する規制)
	非破壊検査	① 染色浸透、磁粉探傷検査の適用範囲の拡大 ② X線検査の適用範囲と時間の規制	検出感度の向上
鋼材の脆化	塑性加工	① 焼戻温度以上の熱間加工の禁止 ② 線状加熱の規制	SMA 58 Q (調質鋼) に対する規制 とくに SMA 58 Q に対する規制
	溶接条件	① 各鋼材に対する 1 パス当りの溶接入熱量の制限 ② 予熱温度の最高値の規定	SMA 58 Q に対する規制 (12 000 ~ 80 000 Joule/cm) ひずみ時効の防止 (200°C 以上の予熱の排除)



(1) ② 案



(2) ③ 案

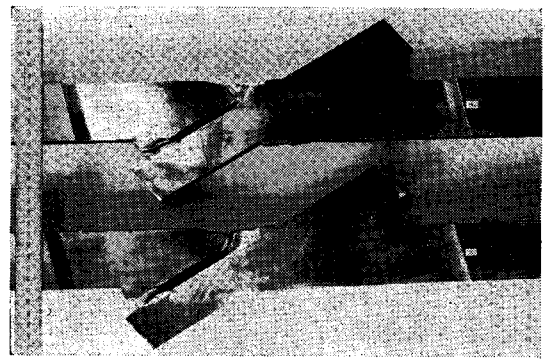


(3) ④ 案

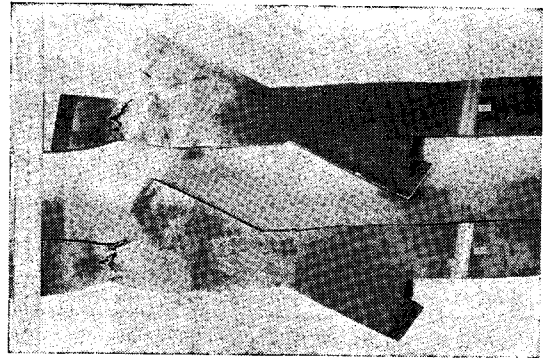
写真-3 交差継手各案の断面マクロ

—3.4 に示す。実験の結果から、完全溶込型は十分な強度を示すのに対し、部分溶込型では曲げの影響があらわれて破断応力が引張強度以下になること、また溶接工作面からは、エレクトロスラグ法では、材料の劣化の恐れがあり、部分溶込型では開先加工など溶接管理に困難があることを勘案して、④ 案を採用するよう結論した。

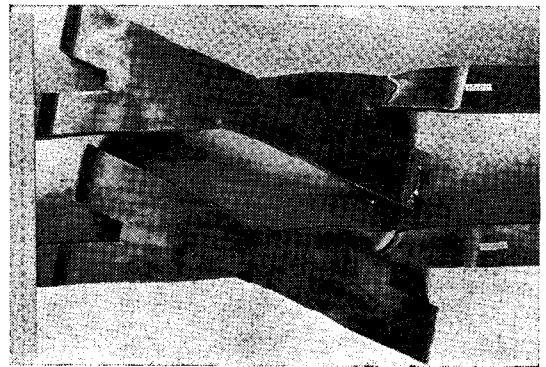
次に、中間支点上のアーチ部材と鉛直材の交差部の形式として、中央スパンと側スパンアーチ部材を円曲線で結び、鉛直材を切り離す形式と、鉛直材を貫通させアーチ部材を切り離す形式の案が考えられる。まず、前者の形式においては、アーチフランジを曲げ加工するため、



(1) ② 案



(2) ③ 案



(3) ④ 案

写真-4 交差継手各案の引張試験破断状況

精度確保の点で問題があり、しかも塑性ひずみを受けた加工硬化部で鉛直材と溶接されるため、材質の劣化が懸念される。したがって本橋では、上記の問題点の解消できる鉛直材貫通形式を採用することとした。

また、単品部材ごとの製材精度を確保するため部材の共通化ならびに単純化のための改善を行なった。

その一例としてはボックス断面を構成するウェブ部材の板厚変化点については組立精度を向上させ、ダイヤフラムなどボックス内面に取り付けられる部材の共通化をはかる目的で、すべてボックス内面側をそろえるよう配慮した。

## 5. 大型橋梁の製作精度に関する検討

本橋の部材製品の寸法精度については従来の一般橋梁の精度基準をそのまま準用することには問題があると考えられる。とくに大型橋梁で部材数が多いため、個々の部材の寸法誤差が累積して全橋長では相当量の累積誤差が発生する可能性がある。したがって本橋では、工場製作の各工程で確率的に発生する偶然誤差について誤差伝播の法則を適用し、その累積誤差を製品の許容誤差に換算して寸法精度基準を設定しようとする新しい管理システムの適用を試みた。

ここでは、大型橋梁の寸法精度に対する基本的な考え方について二、三の考察を行ない、本橋において実際に適用した検査基準ならびに検査方法について述べる。

### (1) 寸法精度に対する考察

一般にわが国の溶接鋼道路橋の寸法検査基準は、日本道路協会制定の示方書<sup>5)</sup>などを参考に、発注者側の特別仕様および、製作者側の社内基準によっている場合が多い。

ただ、仮組立検査における具体的な寸法基準としては関西橋梁鉄骨研究会の基準が一般に準用されているが、この基準の適用範囲はスパン 120 m までであり、かつスパンの増加に対しては許容誤差を正比例的に増加するよう考えられているため、この基準を大型橋梁に準用するには問題がある。

本来、仮組はできるだけ全橋一体とするのが望ましいが、長大かつ大型の橋梁では製作工場における場所的制約、設備および現地架設の工程的制約をも勘案すると、全橋一体仮組方式は現実には不可能となる場合が多く、実際には大型橋梁の仮組方法としては部分仮組方式の採用が一般的といえる。

本橋においては種々検討の結果、部分仮組による平面仮組立方式を採用したが、この場合、部分仮組によって全橋一体としての寸法精度を予測することが重要な要件となった。したがって、この方式の採用にあたっては、統計的品質管理手法に基づいて個々のブロックの寸法精度を厳重に管理することが最も重要と考えられた。

一般に測量学における誤差伝播の法則によれば、個々の加工部材を集成して橋体をつくり上げる場合、製作部材数  $N$ 、個々の部材に発生すると考えられる偶然誤差を  $ei$  として、全橋一体としたときに生じる累積誤差  $E$  は次式で与えられる。

$$E = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^N ei^2} = \pm \sqrt{Ne} \dots\dots\dots(2)$$

式(2)は、部材数がふえるにつれて全橋一体の累積誤

差は  $\sqrt{N}$  倍で増加すること、また、単品部材の製作精度は仮組立時、架設時の寸法精度に直接的な影響を持つことを示している。また逆に、架設時の要求精度を満たすために、仮組立時、単品部材の製作工程における精度基準はいかにあるべきかを類推することが可能である。

このような観点から、本橋に関しては、単品部材および仮組立の両者の精度について、密接な関連性をもたせて、二段階にわたる厳密な精度管理を行なうことが基本的かつ重要な要因と考えられる。

### (2) 部材および仮組立精度基準の設定

工場内において発生する製作上の寸法誤差のうち、定誤差については製作者側の施工基準、実績データに基づき、その大きさを予知して測定誤差から取り除くことができる。しかし、定誤差を除いたのちにも残存すると考えられる偶然誤差については、事前にこれらの具体量を把握することは不可能と考えられる。

このため、偶然誤差のみの累積値を許容誤差として設定し、これを部材精度の検査基準値に採用した。

たとえば、単品部材長さの累積誤差 ( $r$ ) は式(2)を適用して、式(3)に各工程 ( $F$ : 原寸,  $R$ : 再けがき,  $D$ : 穴あけ,  $A$ : 組立,  $W$ : 溶接,  $E$ : 切削) に対する偶然誤差を代入すると、

$$r = \pm \sqrt{r_F^2 + r_R^2 + r_D^2 + r_A^2 + r_W^2 + r_E^2} \dots\dots(3)$$

単品部材長さの累積誤差は  $\pm 2.5$  mm となる。

このような手順で、本橋における主構各部の諸寸法に対する部材精度基準を設定すると表-6に示すとおりとなる。

次に、仮組立時の寸法については、前述の単品部材に累積される偶然誤差と仮組立時に独立に発生する偶然誤差とが合成されて影響を受けるが、とくに大型橋梁ではこのほかに架設時に発生する偶然誤差を予知して架設工法に反映させる必要がある。

上述した主旨を考慮し、本橋における仮組および架設時に発生する累積誤差については、十分安全性を見込んで、工場製作における誤差の 1.5 倍程度の値を仮定した。これらの基準に基づき、本橋の主構各部の骨組寸法について、誤差伝播の法則を用いて仮組および架設精度

表-6 部材検査基準

部材種別	長さ (mm)	断面寸法 (mm)			第一孔心距 (mm)
		幅	高さ	対角寸法	
上下弦材 アーチ部材	±2.5	±2.0	±3.0	±3.5	—
吊縦横 材材構	±2.0	±1.0	±2.0	±2.5	—
仕ガ セット	—	—	—	—	±1.0





伝播の法則を適用して、中央スパンならびに側スパンについての累積誤差を算出すると、それぞれ  $\pm 12 \text{ mm}$ ,  $\pm 6 \text{ mm}$  の範囲内におさまることが確認され、表-7 の精度基準 (中央スパン  $\pm 18 \text{ mm}$ , 側スパン  $\pm 9 \text{ mm}$ ) の約  $2/3$  となる高精度の結果が得られた。

また、図-11 にキャンパー値・水平度・ガセット・仕口に関する部材検査結果の一例を示す。

中央スパン下弦材のキャンパー値については、中心値が  $\pm 1.8 \text{ mm}$ , 標準偏差が  $2.9 \text{ mm}$  という分布をした。また、中央スパンアーチ部材の平面度については、中心値  $-0.4 \text{ mm}$ , 標準偏差  $2.0 \text{ mm}$  という分布を示すことが確認された。仮組の状況を、写真-5 に示す。

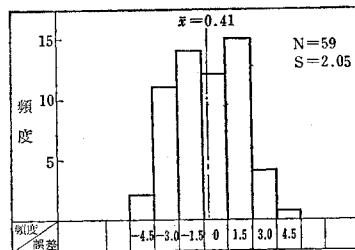
## 7. あとがき

本文では神戸大橋の工場製作上の種々の特殊問題点に関する検討内容について報告を行なったが、ここで得られた成果は、本橋の建設工事における他の新しい試みとともに、今後の海上長大橋の建設計画において、貴重な資料を提供するものと考えられる。

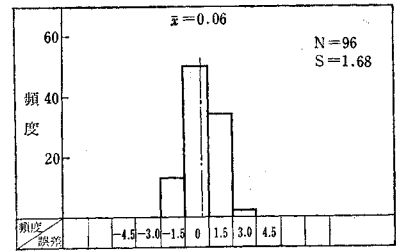
最後に、本橋の製作工事の実施にあたり終始懇切なるご指導を賜った京都大学小西教授、東京大学奥村教授、本州四国連絡橋公団村上理事ならびに種々協力をいただいた川崎製鉄 (株)、(株) 神戸製鋼所など製鋼メーカー・溶接材料メーカーの関係各位に対し感謝の意を表します。

### 参考文献

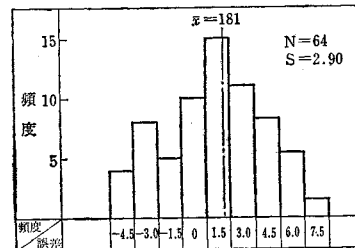
- 1) Copson, H.R: Atmospheric Corrosion of Low-Alloy Steels, Proceedings Am Soc, Testing Mats, Vol. 52, 1952.
- 2) Larabee, C.P: Corrosion Resistance of High-Strength Low-Alloy Steels as influenced by Composition and Environment, Corrosion, Nat. Assn. Corrosion Engrs, Vol. 9, 1953.
- 3) 小西・奥村・大庭: 厚板耐候性高張力鋼の溶接性について, 土木学会誌, Vol. 55, 1970, 3



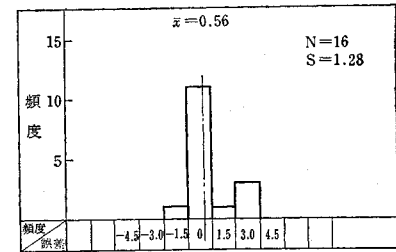
(1) 中央スパンアーチ部材の平面度



(2) 中央スパン下弦材仕口第1孔芯誤差



(3) 中央スパン下弦材の製作キャンパー誤差



(4) 側スパン上弦材横構取付ガセットの第1孔芯誤差

図-11 神戸大橋部材検査結果

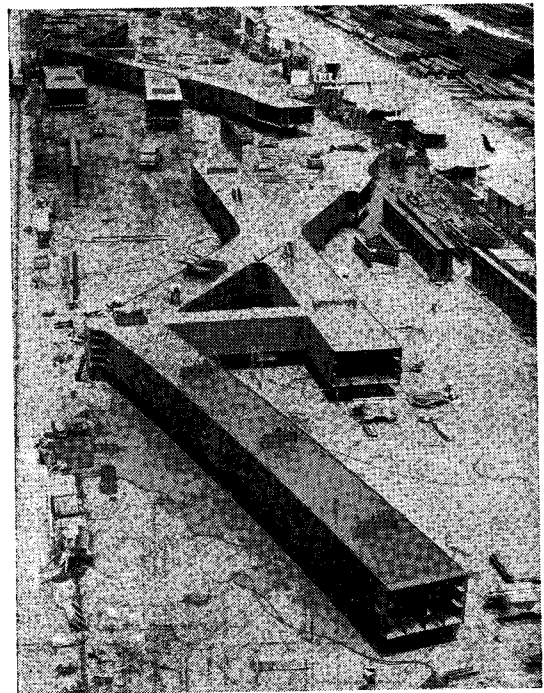


写真-5 交差部仮組状況

- 4) 日本道路協会編: 溶接鋼道路橋のための材料試験および溶接施工試験要領書, 昭和43年6月
- 5) 永田・島田・繁戸・石原: 神戸大橋の設計とその留意点, 土木学会誌, Vol. 57-4, 1972, 3.

(1971.12.6・受付)

トンネル標準示方書解説  
シールド工法指針

A5判 144 ページ 800 円 会員特価 700 円 (120 円)

A5判 138 ページ 800 円 会員特価 700 円 (120 円)