

I-53 神戸大橋の設計と製作

神戸市港湾局

正員 永田安彦

正員 ○島田喜十郎

川崎重工業KK鉄構事業部

正員 繁戸武一

村田安房

1 概要

神戸大橋は、神戸港に現在造成中のポートアイランドと臨港地区、市街地等を連絡するために建設されたものである。本橋はこのポートアイランドと新港オ4突堤間200mの水路上に建設されたが、港内に架橋されるため種々の制約条件が付された。橋梁形式、構造については種々検討を行ない、最終的にセルフアンカータイプの3全連続ダブルデッキアーチ橋(51.0m + 217.0m + 51.0m = 319.0m)に決定した。本橋の特徴を示すと以下のようなものである。

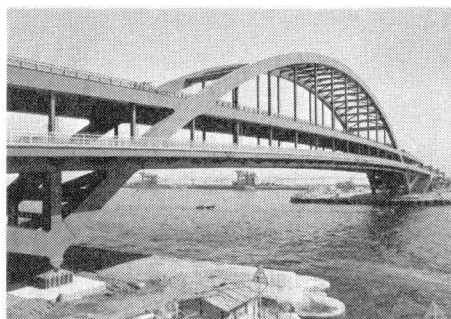


写真-1 完成した神戸大橋

- (1) アーチ橋としてはわが国で最大規模を有する。
- (2) 上、下路を有するダブルデッキ構造。
- (3) 耐候性鋼材の全面的使用。
- (4) MIO (Micaceous Iron Oxide) 系塗料の採用。
- (5) 大型フローティングクレーンを用いた大ブロック架設工法。

等の新しい試みが種々なされた。(写真-1 参照)

2 設計

この種の橋はわが国において他に例がなく設計に際しては、鋼道示設計荷重の他に本州四国連絡橋設計指針、コンテナ荷重を考慮するとともに、部分模型による風洞実験、光弾性実験を実施しそれらの結果を設計面に反映させた。神戸大橋の設計主要目は次のとおりである。(図-1 一般図参照)

型式、3全連続ダブルデッキアーチ橋

橋長、322m (伸縮継手間)

スパン割、51.0 + 217.0 + 51.0 m

橋高、49.2m (KP 0.0m上)

主構中心間隔、17.0m

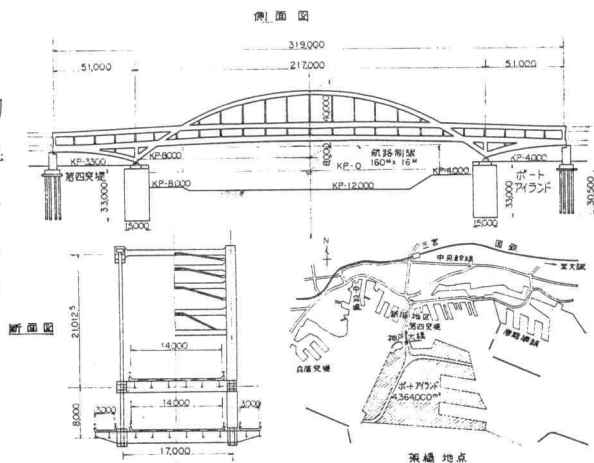


図-1 神戸大橋の架設地点および一般図

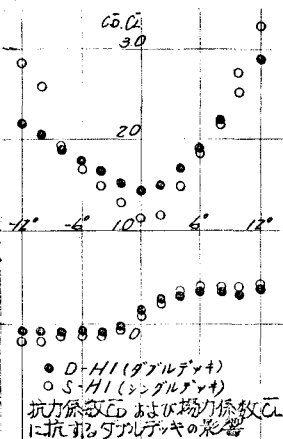
幅員 車道部(上、下デッキ) 14.0m + 2@0.5 (地覆)

歩道部(下デッキ) 2x3.0m + 2x2@0.25m (地覆)

床版、鉄筋コンクリート床版 19 cm

橫斷勾配, 12% 雙曲線勾配

本橋の詳細設計を行う場合、わが国の鋼道路橋設計示方書(適用スパン 150 m 以内)の適用範囲外となるが種々検討を行なった結果主構部、支承の設計には鋼道示を適用することとした。しかし床版および床組構造については、ポर्टアイランドより発生するコンテナ車に対処するため、4車線のうち2車線について $8' \times 8' \times 40'$



のコンテナ・トレーラー荷重を考 図-2 風洞実験結果
慮し設計した。そのほかに、風荷重、地震荷重については、
本州四国連絡橋耐風、耐震設計指針に基づき、風荷重は10
分間平均風速 $V_0 = 45 \text{ m/sec}$ とし高度および水平長の補正
を行ない、設計風速、ダブルデッキ部 $V = 63.1 \text{ m/sec}$ 、アー
チ弦找部 $V = 64.5 \text{ m/sec}$ とし、地震荷重については、基準水
平振度 $K_H = 0.2$ 、鉛直震度 $K_V = 0.1$ と決定した。特に
ダブルデッキに対する風荷重の影響を知るために、部分模型
風洞実験を実施し風荷重抗力係数 $C_D = 2.4$ を決定した。図-2

に抗力係数 C_D および揚力係数 C_L に抗するダブルデッキ影

警図を示す。また部材交差部の応力性状を知るために、光弾性実験を実施し設計面に反映させた。支
点不等沈下に対しては、沈下量 100 mm を想定し、部材力についてはそれによる最も危険なる組合せを
考え、一次部材力として断面決定に配慮を加えた。神戸大橋の設計荷重を示すと主荷重（一次荷重）

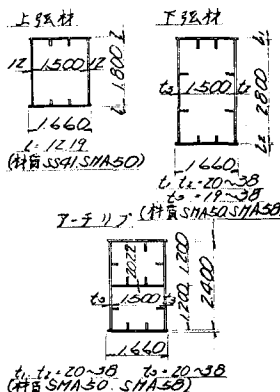


图-3 主構部枝断面

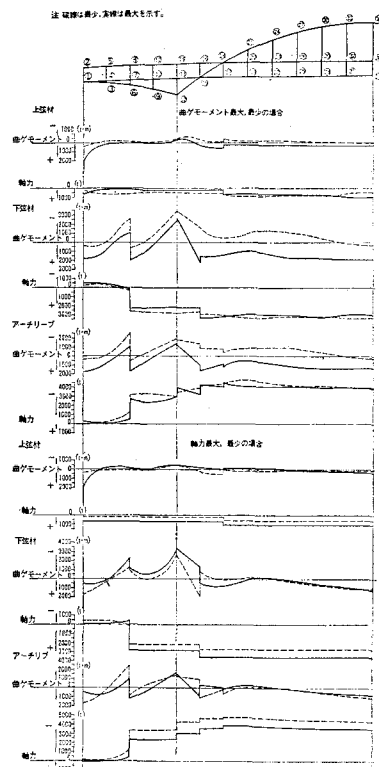


图-3 主構断面力図

① 鋼重 ② 死荷重 ③ 活荷重 ④ 支点不等流下 從荷重(2次荷重) ① 風荷重 ② 地震荷重 ③ 温度変化量 であり各部材力はこれらの組合せを考慮した。

主構は上弦枕、下弦枕、アーチリブ、吊枕、鉛直枕等の結合による内的に111次の不静定構造となる。外的支承条件は、中間の1支承と固定支承とし他の中間支承および両側の2支承の計3支承を水平方向可動支承とした。このため外的には2次の不静定構造となる。各構成部材断面は、上弦枕、下弦枕、アーチリブに対しては、曲げモーメント、軸力、剪断力に、

鉛直枝、吊枝、支柱(端鉛直枝、中間支点上支柱を除く)に対しては、軸力、剪断力に抵抗する部材とした。主構の解析は、変形法により大型電子計算機を使用した。(図-3 主構断面方図、図-4 主構部枝断面図を

示す) 床組構造は床版、縦桁、横桁にて構成されているが、本橋においては橋軸方向地震荷重に対処するため、上デッキ下デッキの中央径周部の各2ヶ所に制動構を設けた。主構の部材力による弾性変形に対する床組構造の影響を除去するため、特に縦桁の連結にはHTボルトを使用した

横構は、軸方向圧縮力の大きいアーチリブの弾性変形により生ずる2次応力の導入を防ぐ意味から、Kトラス型を採用することとした。

本橋はユニークな構造を有しているため、基本的な振動性状(固有振動周期、振動モード)を計算により把握した。図-4に1次、2次の振動モードの計算結果を示す。また本橋が完成した段階において諸種の外的条件に対する安全性の照査ならびに、理論解析と実際橋梁の比較資料を得るため、現地において種々の試験を行なった。

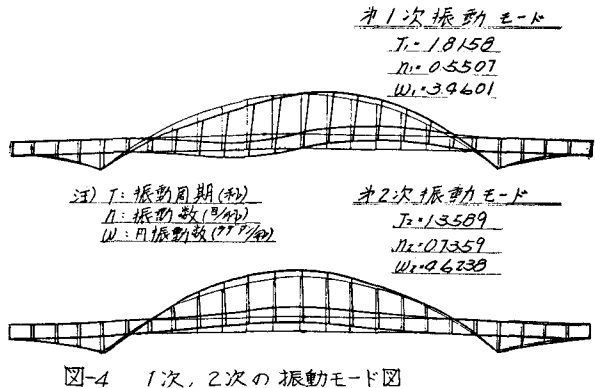


図-4 1次、2次の振動モード図

表-1 耐候性鋼材製造仕様

鋼種	板厚 (mm)	化 学 成 分 %										機 械 的 性 質	
		C	Si	Mn	P	S	CU	Cr	Ceq (2)	抗拉強度 (N/mm ²)	引張断面積 (mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	備考
耐候性 SS41	≤ 22	50/17	-	-	≤ 0.040	≤ 0.020	0.20	-	≤ 0.35	224 H-52	-	190/15	21%以上
A ≤ 32	≤ 30	50/17	≤ 0.035	≤ 1.40	≤ 0.040	≤ 0.020	0.20	0.20	≤ 0.35	224 H-52	0°C	228/19	21%以上
C ≤ 50	≤ 50						0.40	0.40		222		228/19	21%以上
A ≤ 25	≤ 30	≤ 0.16	≤ 0.035	≤ 1.40	≤ 0.040	≤ 0.020	0.20	0.30	1.535-1.042	236 (3)	0°C	228/19	21%以上
SMA50B	≤ 30						~ 0.40	0.50	1.535-1.042	236 (3)	0°C	228/19	21%以上
C ≤ 50	≤ 50						~ 0.40	0.50	1.535-1.042	236 (3)	0°C	228/19	21%以上
A ≤ 25	≤ 30	≤ 0.16	≤ 0.035	≤ 1.40	≤ 0.040	≤ 0.020	0.20	0.30	1.535-1.042	236 (3)	0°C	228/19	21%以上
SMA58Q	≤ 40	≤ 0.16	≤ 0.035	≤ 1.40	≤ 0.040	≤ 0.020	0.20	0.30	1.535-1.042	246 (4)	0°C	246/20	21%以上
500SSD	≤ 50						~ 0.40	0.50	1.535-1.042	246 (4)	0°C	246/20	21%以上

(注) ① SMA50BおよびSMA58Qについては Ni, Mo, Nb, V, Ti, Zr のいずれか1種類以上添加。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 C 18-50 ~ 62 であるが、引用を省略した。
 ④ JIS C 18-50 ~ 72 であるが、範囲を拡大した。

3 工場製作

本橋は海上に架設される構造物であり海塩粒子の影響を受け、鋼材は非常にさびやすい条件下におかれる。また、付近の重工業地帯から発生する亜硫酸ガスによる影響も考えられ、鋼材の防蝕、防錆に対しては特別の配慮が必要である。したがって本

橋では使用鋼材に耐候性鋼を全面的に採用したが、この場合耐候性鋼は一般構造用鋼にくらべて炭素当量がやや高くなるため、同鋼材の溶接性を重要視し、特に炭素当量、機械的性質および板厚公差等を規制した本橋用耐候性鋼材製造仕様を制定した。(表-1 参照)

本橋の全鋼材使用重量は約 6500 ton であるが、そのうち 60 kg/mm² 級高張力鋼材の使用重量は 2400 ton と全体の約 40% をしめ、最大板厚も 38 mm (局部的には 57 mm) となっている。したがって、本橋の溶接施工に際しては慎重を期し、溶接施工試験を SMA58Q および SMA50B のほぼ使用最大板厚のものについて実施し、基本的な施工方針を決定した。溶接施工試験の内容としては、昭和 43 年 6 月、日本道路協会で制定した「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」に準られた試験項目はもちろんのこと、供試材の CCT 測定試験、すみ肉剪断試験等の特殊試験も併せて

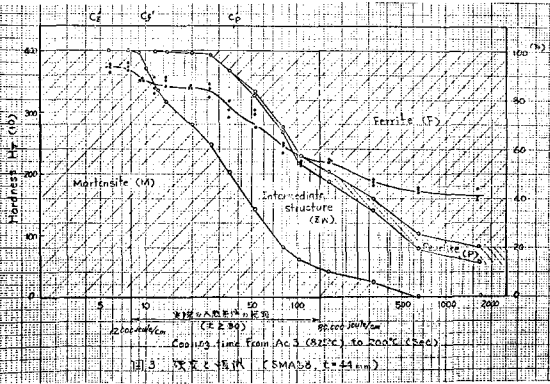


図-5 硬度と組織 (SMA58, t=44 mm)

実施した。参考までにSMA58QのCCT図より求められた硬度和組織の関係を図-5に示す。

溶接施工においては、特に溶接割れ防止に対処するため厳格な施工条件の選定ならびに施工に対する管理の徹底に最重責を担うよう考慮した。溶接材料は、耐割れ性および溶接棒の吸湿性の点で特に優れた極低水素系棒を使用した。(表-2) 極低水素系棒

表-2 使用溶接材料

鋼 種	手溶接材料		サブマージ溶接材料	
	規格	銘柄	芯線	フラックス
耐候性 SS41 SMA41	D5016	KS76Cu	US36	MF38(A)
	D5026	KS78Cu	"	"
SMA 50	D5016	LBW52A*	"	"
	D5026	LBW52-28A*	"	"
SMA 58 Q	D5816	KS86Cu*	US49	MF38(A)
	D5826	LBW62-28*	"	"

(注) *印は極低水素系棒を示す。

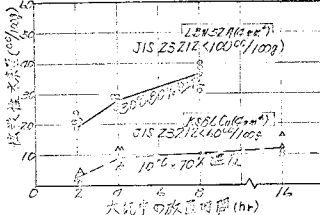
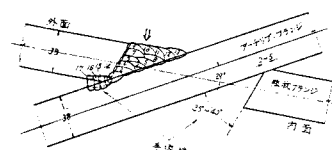


図-6 溶接棒の設置時間と拡散性水素量の関係



溶接法：サブマージ半自動溶接 層数：6層（13パス）
電流：400～450A 電圧：32～35V 速度：30～40cm/min
芯線：US49（2.4φ）フラックス：MF38A

図-7 交差部溶接条件

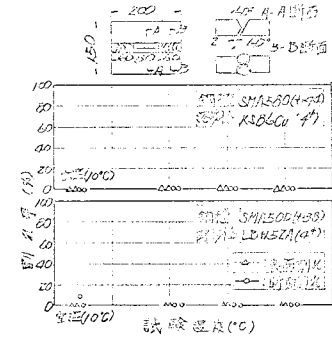


図-8 鉄研式溶接割れ試験結果

て硬さが著しく低下している。

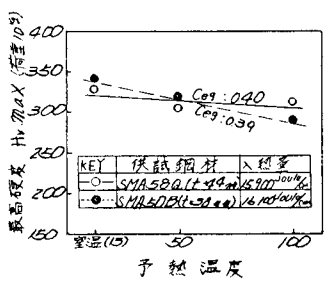
アーチリブ、上・下弦材の大ブロックは、大型フェーシングマシンによって端面切削を行ない、精度の向上に努めた。個々のブロックについては、製作各工程で入念な部材検査を行ない、ブロック単品としての精度チェックを完了したうえで、部分仮組方式により平面仮組立を実施した。

なお本橋の塗料には、防蝕、防錆に対する重要性を考慮し、MIO（Mica ceous-Iron Oxide）系塗料をわが国ではじめて採用した。

以上神戸大橋の設計および製作についての概要を述べたが、講演時にはスライドによりさらに詳細に報告する予定である。

の大気中の放置時間と拡散性水素量の関係を図-6に示すが、同図からわかるように苛酷な環境条件下においても、その吸湿特性は良好な結果を示すことが認められている。溶接方法は、割れ防止と能率向上の両観点より可能なかぎり自動溶接法の採用を考慮した。自動溶接法としては、サブマージアーク溶接の適用をはかり、板継ぎおよび箱桁外面のすみ肉継ぎに全面的に採用した。また、箱桁内面の縦リブを主体としたすみ肉継ぎおよび交差ブロックの重要継ぎの溶接には、部分的にサブマージ半自動を適用した。交差部の継ぎ形状および半自動溶接条件を図-7に示す。つぎに溶接法においては、溶接棒の吸湿対策ならびに適正な予熱施工の徹底に主眼をおいた。予熱施工については、前述の鋼材仕様を満足した材料を用い、しかも溶接棒には極低水素系のものを使用すれば図-8に示す鉄研式溶接割れ試験結果からわかるように、室温（10℃）でもほとんど割れ発生が認められていないが、実際工事に対してはSMA50の場合50℃～70℃、SMA58Qの場合で70℃～100℃の予熱を行なった。

特に交差ブロックの予熱施工においては、予熱管理の徹底を計るためストリップヒーターによる電氣的加熱方法（自動温度制御方式）を全面的に適用した。なお予熱温度とJIS最高硬さの関係は図-9に示すように、予熱によ



各鋼材の最高試験温度における予熱温度が最高硬さに及ぼす影響

図-9 予熱温度とJIS最高硬さ関係