《特別講演》

長大トラス橋の溶接*

笹戸 松 二**

Welding of Long-Spanned Truss Bridges*

by Matsuji Sasado**

1. ま え が き

最近の構造物は種々の社会的要請により大型化、巨大化の傾向は構造物の解析の高度化および鋼材の発達に伴い、ますますその可能性を大きくしている。

すなわち、構造解析も平面的な取り扱いより立体的な取り扱いへと変化し、より実構造物に合致した合理的な解析が可能となってきた。

一方、立体解析による構造物の解析の高度化の背景において、電算機を利用した演算技術の進歩とともに、その解析上の仮定を満たすような立体構造が高い信頼性を有した溶接技術を活用することにより、より広い可能性をもたらしてきたと考えられる。

戦後わが国の著名な長大トラス橋としては1955年に完成した支間 216 m の上路式トラスリブ固定アーチの西海橋にはじまり、101 m + 300 m + 101 m の連続トラス天門橋、最近においては 96 m + 240 m + 96 m の3径間連続トラス橋の境水道橋、そして昭和49年7月竣工をめざし現在大阪港で建設中の港大橋（旧称：南港連絡橋）がある。

これらの長大トラス橋において、長大化の傾向とともにその背景においては鋼材面の進歩を見逃すことはできない。すなわち橋梁の長大化の要請に伴い、鋼材においても必然的に高強度化の要請が高まり順次、良質な高張力鋼の開発がなされ、現在では70、80キロ鋼を大幅に使用した港大橋の建設を可能に至らしめる現状にある。

本稿文においてはこの70、80キロ鋼を大量に使用した港大橋の建設を通して長大トラス橋の溶接の問題のうち特に70、80キロ級調質高張力鋼の使用において、よりシビアさを要求される管理あるいは検査の問題に重点を絞ってふれたい。

2. 港大橋の概要

港大橋は橋脚の位置、航路限界および地質条件等よ

り、全径間長 $235\text{ m} + 510\text{ m} + 235\text{ m} = 980\text{ m}$ で中央径間 510 m 部分に吊径間長有するカンチレバートラス橋である。

中央径間 510 m 程度の橋梁形式はスタインマンの研究によると、カンチレバートラスと吊橋との間の経済限界支間長付近にある。そこで、本橋においても計画当初、アーチ橋、斜張橋を含めて比較検討を実施した。

周知のような大阪港の軟弱地盤上に構築する橋梁は外的静定構造であることが望ましく、吊橋は主塔の支持条件が構造の安全性に密接に関係することや大きな水平力を受けるアンカレッジ下部構造上の問題あるいはその用地等の問題より断念した。

同じようにアーチ橋は鋼重面、軟弱地盤上における安定性等の理由により、また斜張橋は下部構造を含めた経済的見地から、有利であるが、架設技術上および耐風安定性より今後の検討を要する点が多いため採用するに至らなかった。

このような経過のもとに港大橋はカンチレバー橋の形式を採用した。なお、本橋は世界最大支間のカンチレバー橋である Quebec 橋および Forth 橋に次ぎ世界第3位に位置するカンチレバートラス橋であり、上弦材を水平の直線に近い形で示し、美観に意を払うとともに架設時トラベラークレーンが、カンチレバーエレクションの進行に従い、上弦材の上を安易に移動できるよう配慮をしている。図-1が港大橋の一般図である。

次に港大橋の特徴として挙げられる問題は多量の70、80キロ鋼の使用に関連した事項がある。

図-2、表-1に本橋の基本断面、鋼種およびその使用量を示す。このような基本断面および鋼種の使用においては種々の要因が挙げられるが概要は下記の通りである。

まず、設計上、長大トラス橋においては無視することができない格点剛結により発生する2次応力の問題がある。この2次応力の解決の方法の1つとして部材断面の曲げ剛性をあまり増すことなく部材断面積を増すため、

* 原稿受付 昭和48年10月29日

** 阪神高速道路公団 Hanshin Expressway Public Corporation.

図-1 港大橋の一般図

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	102	103	104	105	106
上弦材	断面形	①					①	①													①	①	①						
	材質	SM50	SS41	SS41	SM50	SM58			SM58	HT70	HT80								HT80	HT70	SM58	SM58	SM50	SS41		SM50	SM58		SM58
	フランジ板厚	20	20	20	20	20	25	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	25	20	20		25	25	25	25	
	ウェブ板厚	28	20	20	22	25	30	38	46	44	40	44	48	48	48	48	46	42	46	38	25	20	20		25	25	25	28	
	リブ厚	220 ×20					220 ×20	250 ×30												250 ×30	220 ×20				220 ×20	220 ×20	250 ×28		250 ×28
材	断面形	①																											
	積	1246	1296	1296	1352	1435	1556	2508	2796	2724	2580	2724	2868	2868	2868	2868	2795	2652	2796	2244	1636	1206	1206		1576	1680	1680	1754	
	現場継手 のウェブ板厚											52	56	60	56	56	62	60	54										
	断面形	①					①	①													①	①			①			①	
	材質	SS41	SS41	SM50	SM58			SM58	HT70	HT70	HT80									HT80	HT70	SM58		SM58		SS41	SS41	SM58	
下弦材	フランジ板厚	20	20	25	25	25	32	32	32	32	32	32	36	44	48	44	32	32	32	32	25	25		20	20	20	20	20	
	ウェブ板厚	20	20	28	28	34	38	46	46	52	52	64	75	75	75	75	70	56	56	56	36	30		20	20	20	25	30	
	リブ厚	220 ×20		220 ×20	250 ×28		250 ×28	250 ×28	250 ×28	340 ×38	340 ×38	350 ×50		250 ×40	350 ×50	350 ×50	250 ×40			250 ×40	250 ×40			250 ×40	250 ×40	340 ×38			
	ウェブ板厚	220 ×20		220 ×20	250 ×28	340 ×38	340 ×38	350 ×50					250 ×40	350 ×50	350 ×50	250 ×40				250 ×40	250 ×40			250 ×40	250 ×40	340 ×38			
	断面形	①																											
材	積	1296	1296	1660	1764	2185	2662	2950	3102	3318	3318	3750	4258	5077	5300	4482	3966	3462	3462	3310	2394	2058		1120	1120	1120	1260	1400	
	断面形	①

注：塔の間隔の上、下弦材は弦材幅を1400から2200に変化させた。

図-2 上・下弦材断面

表-1 概略鋼重表

単位：ton

	HT80		HT70		SM58	SM50	SS41	HT ボルト	その他	計
	t>50	t≤50	t>50	t≤50						
定着桁	1,628	2,569	165	910	7,611	8,513	5,420	653	11	27,480
吊桁	0	0	0	0	7,109	1,175	1,587	61	4	3,936
本体小計	1,628	2,569	165	910	8,720	9,688	7,007	714	15	31,416
支承部	0	0	0	0	31	398	94	0	1,181	1,704
	0	0	0	0	105	0	0	0	55	160
付属品	0	0	0	0	0	0	1,527	48	55	1,630
小計	0	0	0	0	136	398	1,671	48	1,291	3,494
合計	1,628	2,569	165	910	8,856	10,086	8,628	762	1,306	34,910

注 1. 支承部の上段はヒンジ部、下段は支承部を示す。SM50にはSM50A、B、Cを含む。
SS41にはSM材、SMA材および型钢を含む。HTボルトにはF11T、F10T、F8Tを含む。
本表は一期分のみである。付属品には高欄、伸縮継手、排水装置、管理用施設を含む。

極厚板の使用とか、より高い強度の鋼材を使用せざるを得ないことになる。また断面構成にあたっては箱形断面を採用し、ウェブ高さを格点間隔の $\frac{1}{2}$ 以下とし、応力伝達にはガセットを通じてウェブへ流すよう、フランジに対しウェブを厚くして断面2次半径を小さくしている。

次に、従来の橋梁に使用されてきた SM58 以下の鋼材に比し、溶接施工上、非常に鋭敏な70, 80キロ鋼の溶接を考え、断面構成をできるだけ単純化し、自動溶接機の大幅な採用を可能にした。

これ等に伴い、今までの SM58 で 50 mm の最大の規定をうち破り、厚板 75 mm をウェブに、塔基部の底板には 100 mm の80キロ鋼を使用し、断面の単純化とコンパクト化をはかっている。

3. 港大橋の70, 80キロ鋼

港大橋に使用した鋼材の内訳は表-1に示されるように全鋼重の約半分が SM58 以上の高張力鋼である。

このうち70, 80キロ鋼の橋梁への適用はわが国においても初めての試みであり、あらゆる検討を行なったわけである。

そして、それまで市販されていた鋼材では問題が多いため、まず製鋼上の限界点と製作上の限界点との両面を考えて、橋梁として具備すべき条件の要請を製鋼と製作のバランスを考え、現状での製鋼技術の合理性に着目し、できる限り問題への解決を鋼材にゆだねることにして製鋼条件を設定した。

特に、70, 80キロ級調質高張力鋼のわれと溶接継手ボンド部の軟化および脆化を発生しないような新しい調質高張力鋼の機械的性質と成分系を決定した。

表-2が港大橋に使用した70, 80キロ鋼の規格である。

設定した規格に対し、これらの諸性質を予め確認するため確性試験方案を作成し、70, 80キロ級調質高張力鋼の板厚 25 mm, 50 mm, 75 mm および任意試験として

100 mm を対象として、わが国における代表的ミルメーカーにおいて確性試験を実施した。

その内容については化学成分、形状寸法精度、内部性状、機械的性質、溶接性、溶接継手性能およびディープノッチ試験等の大型試験をも含めて行なった。

これらの試験により70, 80キロ鋼の橋梁への適用は充分安全に使用できると判明した。

なお、港大橋の70, 80キロ鋼を含め使用鋼材の規格は以下に示すような基本的考えに基礎をおいた。

- (1) SM50, SM58, 70, 80キロ鋼規格を一貫した考え方でまとめる。また一応現行 JIS 規定は尊重する。
- (2) SM58, 70, 80キロ鋼の使用板厚の上限をそれぞれ、75, 100, 100 mm とする。SM50 は JIS50C 最大 50 mm とし、Ceq の制限を設ける。
- (3) 脆性破壊の発生を考慮して使用温度 -15°C で脆性破壊などの恐れのないものとする。
- (4) 上記の特性を考え、ボンド部のエネルギーまた破面遷移温度を 0°C 以下に目標をおき、あるいは(3)を満たすように溶接入熱条件を決定して、これを目標とする。
- (5) 溶接予熱温度は鋼種、板厚により当然異なるが、80キロ鋼の 100 mm 厚で予熱温度 150°C 以下で溶接を行なって問題がないものを目標とする。
- (6) 設計、施工条件、構造物の溶接組立精度を通常のものとして考える。

上記のような一連の考えに基いて設定された規格により試作された70, 80キロ鋼の確性試験における結果と実施工で港大橋に使用したマスプロ工程により製鋼された結果を比較したが非常に良い特性が出ていることが認められた。

4. 70, 80キロ鋼の確認試験

実構造物の製作にあたっては70, 80キロ鋼の種々の確性試験に引続き溶接条件、製作精度、検査方法の確立等

表-2 HT70, 80 の 規 格

適用規格	鋼種記号	適用板厚 (mm)	化 学 成 分								機 械 的 性 質			切欠きじん性	その他
			C	Si	Mn	P	S	V	B	Ceq	Y P (kg/mm ²)	T S (kh/mm ²)	E1 (%)		
橋 梁 (南港連絡橋)	HT70	6≤t≤50	0.14 以下	0.55 以下	1.50 以下	0.030 以下	0.030 以下	—	—	0.49 以下	63以上	70~85	6<t≤16 5号 17%以上 t>16 5号 23%以上 t>20 4号 17%以上	vE ₋₁₅ ≥4.8kg・m	
		50<t≤100	0.17 以下	同上	同上	同上	同上	—	—	0.53 以下	60以上	68~73		vTrE≤-35℃	
	HT80	6≤t≤50	0.14 以下	同上	同上	同上	同上	—	—	0.53 以下	70以上	80~95	6<t≤16 5号 16%以上 t>16 5号 22%以上 t>20 4号 16%以上	同 上	
		50<t≤100	0.17 以下	同上	同上	同上	同上	—	—	0.57 以下	68以下	78~93			

のために施工試験として、ラメラティアー試験、拘束われ試験、小型隅角部試験、中型試験およびパイロットメンバー試験等を行なった。

これらの試験結果より最大溶接入熱量 50 kJ/cm 以下という条件のもとに、各種溶接法による入熱量、最小予熱温度、最高予熱およびパス間温度、仮付予熱温度および溶接材料の乾燥条件等を設定した。

また、今までの予熱管理の考え方を一変させ、各種溶接箇所および方法ごとの予熱方式（自動制御を有する電気予熱システム、固定バーナー式、手動バーナー式を区別）の統一と予熱温度測定箇所を定め、熱履歴カードの提出義務付けを施工計画書に明記させる等の実際的な問題を含めて、これらの施工試験により検討を行なった。

施工試験あるいは実部材の製作を通じ極厚板の80キロ鋼の使用は溶接変形上あるいは残留応力に対しても有利であることが判明した。

これら諸試験の詳細にふれると長くなるのでここでは省略する。

5. 突合せ溶接およびスミ肉溶接

港大橋の溶接施工の特筆すべき点は、極厚の調質高張力鋼をいかに安全に施工するかに尽きよう。さらに、架設工法がカンチレバー工法を採用する関係上高い部材精度の確保の問題があらう。

この2つの問題は港大橋建設における種々の問題点があるうちで図-3に示される製作精度および管理の項目

で位置づけられる。

特に、溶接構造物の信頼性を左右する管理の問題については後述することにして、ここでは代表的な部材の溶接方法に関して紹介する。

図-4が港大橋の代表的部材の上、下弦材の溶接施工手順図である。図-5は上、下弦材に比較して溶接箇所延長の大きな塔基部の溶接施工手順図である。

まず、70、80キロ鋼の突合せ溶接は基本的にサブマージアーク溶接（以下（S.A. 溶接））を使用した。S.A. 溶接の作業能率を損わないで、かつこの種の高張力鋼に対し問題となる溶接ボンド部の脆化に対処するため下記のように溶接時の最大入熱量（ $Q_{\max}$ ）とパス間温度とを制限して施工した。

$$Q_{\max} \leq 50,000 \text{ J/cm}$$

$$t \leq 50 \text{ mm} \quad T \leq 200^\circ\text{C}$$

$$50 < t \leq 100 \text{ mm} \quad T \leq 230^\circ\text{C}$$

本橋の施工開始の時点においては80キロ鋼の S.A. 溶接の問題として水素にからんだ横われの問題があり、そこで施工にあたっては表-3のような溶接材料の管理基準を設けて極力水素源の遮断に注意した。

一方、横われは溶接金属強度やフラックスの種類にも関連を有するが、一般的に余り高強度の溶融型フラックスと溶接材とを組合せて使用することは好ましくない状況であった。そこで、溶接材料強度の規格は引張強度で 77 kg/mm^2 以上とやや低目に押えとともに耐力の規定は設けていない。しかしながら、構造物の継手性能の

図-3 港大橋建設における問題点の関係

※ 図-9に続く

順序 項目	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰
溶接方法	SAW	SAW	手溶接	(手)* MIG半自動	MIG全自動	(手)* MIG半自動	(手)* MIG半自動	(手)* MIG半自動	(手)* MIG半自動	(手)* MIG半自動	(手)* MIG半自動	(手)* MIG半自動	(手)* MIG半自動	(手)* MIG半自動	手溶接	MIG半自動	手溶接
予熱方法	スリッパヒータ	スリッパヒータ	固定バーナ	固定バーナ	スリッパヒータ	スリッパヒータ	スリッパヒータ	スリッパヒータ	スリッパヒータ	スリッパヒータ	スリッパヒータ	スリッパヒータ	スリッパヒータ	スリッパヒータ	固定バーナ	手動バーナ	固定バーナ
検査方法	U.T.** R.T.	C.T. M.T.	C.T. M.T.	C.T. M.T.	C.T. M.T.	C.T. M.T.	C.T. M.T.	C.T. M.T.	C.T. M.T.	C.T. M.T.	C.T. M.T.	C.T. M.T.	C.T. M.T.	C.T. M.T.	C.T. M.T.	C.T. M.T.	C.T. M.T.

注) MIG半自動と手溶接
は各社別に選択した。

※※厚板に対し自主検査として併用。

(凡例)
R.T.: 放射線透過検査
U.T.: 超音波探傷検査
M.T.: 磁粉探傷検査
C.T.: 液体浸透探傷検査

図-4 上・下弦材溶接施工手順図

順序 項目	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭
溶接方法	(手)* MIG半自動	(手)* MIG半自動	(手)* MIG半自動	手溶接	(手)* MIG半自動	手溶接	(手)* MIG半自動	SAW	(手)* MIG半自動	(手)* MIG半自動	手溶接	手溶接	(手)* MIG半自動	(手)* MIG半自動
予熱方法	固定バーナ	固定バーナ	手動バーナ	手動バーナ	固定バーナ	手動バーナ	固定バーナ	スリッパヒータ	手動バーナ	固定バーナ	手動バーナ	手動バーナ	手動バーナ	手動バーナ
検査方法	C.T. M.T.	C.T. M.T.	C.T. M.T.	C.T. M.T.	C.T. M.T.	C.T. M.T.	C.T. M.T.	C.T. M.T.	C.T. M.T.	C.T. M.T.	C.T. M.T.	C.T. M.T.	C.T. M.T.	C.T. M.T.

(凡例)
R.T.: 放射線透過検査
U.T.: 超音波探傷検査
M.T.: 磁粉探傷検査
C.T.: 液体浸透探傷検査

図-5 塔基部溶接施工手順図

表-3 溶接材料の管理基準

溶接方法	対象鋼種	溶接材料	乾燥条件		保管温度 (°C)	大気中での 使用可能時間 (Hrs)	備 考
			温度 (°C)	時間(分)			
被覆アーク 溶接	SM58	D6016	300~max 400	45~75	120	4	
	HT70~HT80	70~80キロ 低水素溶接棒	380~max 450	45~75	120	1.5	再乾燥2回迄
サブマージ アーク溶接	SM58	熔融型フラックス	150~200	60~	—	4.0	
	"	焼結型フラックス	200~250	60~	—	4.0	
	HT70~HT80	熔融、 焼結フラックス	250~300	60~	120	4.0	

観点からいえばある程度以上の板幅と板厚の比率を確保すれば溶接金属が多少低強度であっても十分な性能を発揮しうることが施工試験等により確認した。

ボンド脆化にからんだ問題として80キロ鋼の溶接施工法は S.A. 溶接と MIG 溶接の2法が挙げられるが、MIG 溶接は小入熱でありボンド脆化に対しては有利といえる。しかしながら、作業能率上の問題および MIG 溶接で施工された溶接金属部の強度は S.A. 溶接で施工されたものに比較して高くなり、硬度上昇に伴う問題がある。すなわち、突合せ溶接完了後、角変形をプレス等で矯正する場合に溶接金属強度が余り高すぎることは塑性ひずみが、ボンド近傍の軟化部に集中し脆化をきたす恐れがあると思われる。

写真-1 突合せ溶接

写真-2 スミ肉溶接

これらの種々の検討のもとに港大橋の突合せ溶接は S.A. 溶接による施工で溶接ボンド部の $vTRe$ 値を $0^{\circ}C$ 以下にすることが充分可能であることを施工試験により確認した。写真-1は突合せ溶接の状況を示す。

次に70, 80キロ鋼のスミ肉溶接の状況を写真-2に示す。スミ肉溶接は60キロ級ワイヤーを用いて S.A. 溶接により施工した。写真-2に示されるように施工中に発生するひずみを小さくするよう対称溶接も実施した。

予熱は下面より電気予熱システムあるいは固定バーナーにより均一加熱を行なわないとひずみの残留あるいは熱応力等により仮付溶接が破断する問題があった。

溶接棒の強度については、溶接材料の特性にも大きく左右されるが、一般的に余り高強度の溶接金属を形成するような施工法を採用することは好ましくない。すなわち、本橋の施工試験の結果においても、80キロの母材に対し80キロ級のワイヤーを使用すると溶接金属強度は90キロをこえ、われ感受性の増大および靱性の低下の問題があったので、実施工においては60キロクラスのワイヤーを使用した。なお、スミ肉溶接に対して60キロクラスの溶接棒を使用しても80キロ級母材の影響と冷却速度の関係を検討した結果、継手強度とすれば充分80キロを確保できることが判明している。

6. カド継手溶接施工

カド継手はスミ肉継手と並んで橋梁用部材を構成する基本となる溶接であるにもかかわらず設計、製作および検査に至るまでいろいろな問題点がある。港大橋におけるカド継手（いわゆる綴り合せ溶接継手）に関連した問題を簡単に紹介する。

通常の橋梁であれば示方書等において示される $\sqrt{2t}$ (t : 構成する2枚の板の厚い方の板厚) を基準にすることが多い。この $\sqrt{2t}$ という値は溶接施工における入熱等の施工上の問題にからんだ値であると想定される。

一方、橋梁用部材を構成するカド継手は一般には Steady Weld として扱われることが多いが、必ずしも Steady Weld と断言することはできない。すなわち、

トラスの格点部あるいは現場継手部に発生する複雑な応力に対して充分抵抗する強度を有する必要もあり Strength Weld としての扱いも要する。

一方、最近施工された米国のフレモント橋はアーチ部材は極厚の T-1 鋼を使用しているにもかかわらずカド継手に小さな脚長のスミ肉溶接を使用し、チェスター橋においてはトラス弦材のカド継手に裏当て金を使用したフルペネの溶接を行なっているのが実情である。このようにカド継手の溶接強度あるいは溶接剛度の取り扱いに関しては充分明確にされていないのが現状と思われる。

港大橋では、カド継手溶接の具備すべき条件を充分満足しかつ溶接ひずみを極力小さくするという2つの条件より部分溶け込みのカド継手を採用した。

この部分溶け込みのカド継手に関して、大きな、問題点として以下のような事項があり種々の検討討論がなされてきた。

第1に設計上の問題として作用力の取り扱いが残留応力、拘束応力等の内力の算定評価の困難性と通常の構造力学レベルの問題として扱う場合の仮定の妥当性や応力集中、剪断遅れ等の局部応力の取り扱いの問題がある。

さらに、算定された応力値の評価においても Mises の合成応力的な取り扱い方や 1972 年 IIW の XV 委員会の報告にあるようなスミ肉溶接においては L 方向応力を無視しうる考え方もある。また、許容応力の設定においても種々の問題があった。

このように問題はあるが、港大橋のように極厚板で、しかも高降伏点の材料により大断面部材を構成する場合において橋全体として安全性をとらえるためには部材別、材質別の安全率のバランスの確保は重要な問題である。そこで設計のど厚の設定においては上記の“安全率のバランス”という観点にたち、構造力学レベルの問題としてカド継手に作用する応力を細かく分解し、算定して一つの目安をつけている。しかしながらこの種の問題を構造力学レベルのみで取り扱う場合の問題として、前述の残留応力あるいは拘束応力等の内力の取り扱いの問題とともに溶接金属部の応力状態は溶接時の熱収縮等によりかなりの範囲が塑性域にさらされていると思われ、この領域の問題を応力レベルのみの取り扱いで処理することは自ら限界があると思われる。そこで、今後この種の問題をより明確にするためには、弾塑性領域内での亀裂の成長の問題を取り扱った COD 理論等の実構造物への適用等も併せて行なわれることが期待される。

図一6は港大橋のカド継手の基本形状である。外側より45°のレ形開先をとり、裏側よりスミ肉溶接を施工している。製作上80キロ鋼等の予熱温度の高い悪環境下のボックス内の溶接施工をより少量にしたいという製作上

図一6 カド継手の形状

の要求と、本橋供用時においてレ形のルート部に作用力がある場合、ルート部をより中立軸に接近させて外力により応力振幅レベルを小さくしてやり、溶接時に塑性化しているだろうルート先端部の時効に伴った脆化による亀裂の成長を防止するというような総合的な工学的判断により裏側スミ肉溶接を施工した。

第2に製作上の問題が挙げられる。

80キロ等におけるカド継手溶接部のルートわれ、はく離われおよび材料の組織成分にからんだマイクロわれ等の問題がある。ルートわれおよびはく離われに関しては、種々の試験により防止する施工法の確立が可能であったがマイクロわれに関しては100%防止することは不可能な場合が多い。

そこで、港大橋のカド継手の施工法は70, 80キロ鋼に対し、この種の欠陥に対し、より有利な靱性の高い MIG 溶接を適用した。MIG 溶接における使用ワイヤーは、母材に比しやや低強度の60キロ級を適用し、耐われ性と良好な伸び能力の確保をはかっている。この場合、溶接金属強度は施工試験結果等を検討し70キロの確保が充分可能であり、前述の応力計算においては70キロ級として取り扱った。

MIG 溶接により45°の開先内を溶接することは、アークの移行現象にからんだ種々の問題があるとともに板厚公差および組立精度誤差の影響によりカド継手の

写真一3 仮付のわれ

ど厚は大きな影響を受ける。後者の影響および検査による保証限界との関連よりレ形開先深さは $\sqrt{2t}+5\text{mm}$ と5mmの余裕を見込んで製作している。

第3にカド継手の検査法として超音波探傷検査（以下UST）を採用したが、このUSTの適用上の問題および判定基準の問題があげられる。この問題については後で詳しく触れることにする。

第4にカド継手の仮付溶接の問題がある。当件に関し

ては、実構造物の施工に先立って実施したパイロットメンバー試験において写真-3のようなわれが発生したので追跡調査試験を実施し仮付溶接時の予熱方法、予熱温度に関するきめの細かい施工法を確立して、われに対して万全の対策を行なった。表-4に港大橋の最小予熱温度を、そして図-7に予熱方法と予熱管理方法の一例を示す。

このように仮付溶接時の予熱は組立上の問題よりバー

表-4 最小予熱温度(°C)

溶接法 鋼種 板厚 (mm)	本 溶 接								仮 付 溶 接	
	被覆アーク溶接	ガスシールドアーク溶接<CO ₂ >サブマージアーク溶接	被覆アーク溶接	ガスシールドアーク溶接<CO ₂ >サブマージアーク溶接	被覆アーク溶接	ガスシールドアーク溶接<MIG>	サブマージアーク溶接		被覆アーク溶接	ガスシールドアーク溶接<CO ₂ >
	SM50		SM58		HT70, HT80				HT70, HT80	
継手	突合せ, すみ肉, 角継手		突合せ, すみ肉, 角継手		突合せ, すみ肉, 角継手	突 合 せ	す み 肉		角継手以外	角 継 手
t ≤ 25	—	—	40	—						
25 < t ≤ 38	40	—	80	40*	100	80	100	80	120	100
38 < t ≤ 50	80	角継手 40*	80	60	100	80	100	80	120	100
t > 50	100	80	100	80	120	100	150	100	150	120

注 1. HT70, HT80 材における最高予熱およびバス間温度は 200°C (t ≤ 50mm) 230°C (t > 50mm) 以下とする。

2. 太枠内は溶示18条に準じ、破線枠内は鋼材メーカー報告を参考にしている。

3. *溶示18条に準じ、「ガスバーナーで軽くあぶる程度」に準じる。

図-7 予熱方法と管理要領

予熱管理要領

区 分	予熱方法	予熱温度 (最小)	予熱温度の測定位置	測定方法
仮 付 溶 接	①板縁ぎ	ストリップヒーター 補助として 手動バーナー	50 < t 150°C 50 ≥ t 120°C	温度チャーク (152°C) (124°C)
	②板縁ぎ 取付	固定バーナー 手動バーナー	50 < t 150°C 50 ≥ t 120°C	
	③組立て	手動バーナー	CO ₂ 50 ≤ t 120°C 50 ≥ t 100°C 手 50 ≤ t 150°C 50 ≥ t 120°C	温度チャーク 101°C 124°C 152°C
本 溶 接	①板縁ぎ	ストリップヒーター	50 < t 150°C 50 ≥ t 100°C	温度チャーク 152°C 101°C
	②板縁ぎ 補助として 手動バーナー	固定バーナー 補助として 手動バーナー	50 < t 100°C 50 ≥ t 80°C	温度チャーク 101°C 83°C
	③カド継手	ストリップヒーター	50 > t 100°C 50 ≥ t 80°C	(P.T.C.併用)
	④カド 内 側	ストリップヒーター	50 < t 120°C 50 ≥ t 100°C	温度チャーク 124°C 101°C
	⑤ダイヤ フ ラ ム	ストリップヒーター (補助として 手動バーナー)		
	⑥仕 口	手動バーナー		

ナーによって行なうことが主となるので、予熱が局部的になることおよび仮付ビードは連続していないため冷却速度が速くなるので本溶接の予熱温度より $20\sim 40^{\circ}\text{C}$ 高くしている。また予熱範囲は図-7に示されるように仮付ビードに対し前後あるいは両側 100 mm に以上と広範囲にし、予熱温度の検出箇所も溶接線より 50 mm 以上離れた位置で行なった。また、カド継手の仮付の施工はより水素の侵入の少ない CO_2 溶接を採用し、仮付長さは、100 mm 以上、5 mm 脚長を標準とし、そのピッチは 1 m 当り 3 カ所を標準としている。さらに仮付溶接

図-8 仮付溶接順序

写真-4 カド継手溶接

の部分において目視によりわからないわれが万一見逃された場合においても、後の UST においてより評価が容易であるように、仮付位置のマーキングを行なって施工した。

図-8は本橋のボックスの組立時の仮付溶接順序を示す。

カド継手の本溶接施工は写真-4に示すような状態で電気予熱システムを採用し MIG 溶接で行なった。

特に組立精度の確保とともに予熱および溶接時に発生する変形を極力小さくするために対称予熱、対称溶接を大幅に採用した。その結果、当初懸念された溶接後の弦材全体のひずみはほとんど $1/3000$ 以下の初期たわみに押さえ得たことは後作業の仮組立あるいは架設における現場継手部のトラブルを皆無に近くし、工事全体としての省力化と良好な構造物全体精度の確保の一因となっていると思われる。

7. 港大橋における管理と検査

7-1 品質管理の重要性

70, 80キロ鋼等のわれ感受性の高い鋼材を溶接施工するにあたっては設計より架設さらに維持管理に至るまでの周到な配慮が重要であるが、ここでは港大橋の製作において特に重要視した管理および検査について触れる。

港大橋の建設における技術的な問題点において管理あるいは検査は図-3に示されるような位置にある。

従来の橋梁の場合と異なり、本橋においては非常に鋭敏な高張力鋼を多量に使用する構造物であるという背景

※ 図-10に続く

図-9 港大橋の製作管理

より、この構造物の信頼度を高めるには、従来の橋梁の場合に行なわれてきた放射線透過検査や寸法、溶接の外観検査等のエンドリザルト方式の狭義の検査だけでは不安があるので、品質管理体系全体を適確に把握して事故を未然に防ぎかつ構造物の機能向上の促進に寄与するための途中の管理をも併せて実施した。

図一9に港大橋の製作における管理系図を通常の橋梁の場合と比較して示す。

港大橋建設における場合のように大規模かつ未経験の分野の多い施工における特性として

- a. 図面、仕様書が全く完全ではあり得ないこと。
- b. 製品として大型かつ製造過程が複雑であり、また特殊材料を使用しているので悪いからといって作りかえることは工程上困難な場合が多いこと。
- c. 製作途中段階において機能あるいは安全性を左右する多くの要因を含んでいるにもかかわらず施工後の検査確認が困難であるものが多いこと。

等が挙げられる。また、施工における管理を考える場合、

- a. 課する技術管理の内容の設定
- b. これを守らせることの保証
- c. 守らなかった場合の発見法、検査技術

等が、完全でない段階であったため港大橋では図一9に示される体系に沿い、発注者側の立入り検査もかなりの頻度で実施してきた。

すなわち、発注者側の管理あるいは検査の基本方針とすれば、構造物の特性（長大橋、80キロの使用等）を充分把握した施工計画書を作成し、その中に必要な技術管理項目を施工者に課し、課した管理項目を守らせることである。そのための方法として製作過程でのチェックを実施し、手順が守られ、管理機能が充分働いていることを確認し、良好な管理体系を保持させることにより構造物の信頼性を高めることである。

特に港大橋の場合のように多量の70, 80キロ鋼使用された構造物においてはエンドリザルト方式の検査のみでは不充分と判断されたので、方針として、いかに精度よく欠陥を探知するかよりもいかに欠陥を発生せしめないかに重点をおいた。

そのためには製作中における品質管理が非常に重要となってくるわけである。

図一10に港大橋の品質管理系統図を示す。本図においては、港大橋のトラス部材の標準作業系統の流れを1より36に示し、垂直方向の流れで実施工に対して管理をいかに適用したかを示している。

図一10 品質管理系統図

図一10の系統図に示されるように港大橋の施工管理の基本的な思想は、使用経験の少ない鋼材や溶接工法の採用等の問題もあり、種々の試験を実施し、それにより確認した条件を実施工で遵守するという進め方であり、道路橋示方書における思想を踏襲している。

次に、管理とともに検査は構造物の信頼性を高める手段として重要である。検査というものは、主として欠陥の有無あるいは程度を把握することが大きな目的の一つであるから、欠陥の評価という問題が非常に重要となるので、この点について港大橋において検討した事項を簡単に触れる。

7-2 欠陥評価と安全性

溶接構造物において避けることのできない宿命である欠陥の中には、工学上使用目的から推量して無害な欠陥もある。例えば、スミ肉溶接上の数少ないブローホール等はこれにあたろう。逆に、形状的には溶接欠陥の形態をとらず、非破壊検査により欠陥の存在が確認できないもので非常に有害な欠陥もある。例えば、溶接時に発生する変形、80キロ鋼等の溶接ボンド部の脆化の問題等はこの種の欠陥にあたろう。この点よりも検査は前述の管理とあわせて考えねばならぬゆえんがあると思われる。

極厚の80キロ鋼を使用した港大橋の施工に際して、欠陥を再吟味し、各種欠陥のもつ意味を考え検査方法あるいは検査基準の再検討のため、実験あるいは検討を行な

ったので簡単に紹介する。

7-2-1 破壊現象における欠陥と検査

溶接構造物の安全性を考える場合、破壊における欠陥の位置だけあるいは欠陥の発生機構を吟味する必要があるが、港大橋の場合、図一11に示すように破壊を脆性破壊の観点より検討し、欠陥も脆性破壊発生の要因として吟味した。

周知のように脆性破壊は発生、伝播および停止の3つの観点よりのとらえ方があるが、トラス橋のような場合、船舶等の構造と異なり、板幅と板厚の比 (B/t) が小さいことおよび高応力レベルで使用されること等の理由より、一度発生した脆性破壊は停止しないと考えた。そこで港大橋の場合、脆性破壊の検討はすべて発生機構に着目している。

そこで、欠陥あるいは検査を考えるバックボーンは、欠陥が脆性破壊の発生に対し、いかなる影響を与えるか、あるいは発生を防止するためにはいかなる管理、検査を実施すれば良いかという思想に立脚した。

7-2-2 ディープノッチ試験

欠陥評価の手段として有効な試験に、ディープノッチ試験があるが、この試験によって得られた結果を港大橋に使用する70、80キロ鋼の衝撃特性の規格設定のための基礎資料としている。

Griffith-Orowan のエネルギー条件式を基本式において本試験により必要な材料の靱性と検査時に万一見逃しても許し得る欠陥寸法との相関を把握し規格に反映させている。図一12が本試験と規格との関連概要を表わす。

図一12 ディープノッチ試験と規格

7-2-3 広幅試験

一般に溶接構造物においては、ある程度の欠陥、いわゆる製作途上に生ずる目違い、溶接による角変形あるいは残留応力等は避けられない。一方、80キロ鋼等の塑性流れが悪く応力の平均化が従来の橋梁用鋼材に比べて余り期待できない材料においては、局部的な応力挙動が破壊耐力を支配する要因となり易く、また欠陥が破壊現象の引金の役割をなすことが考えられる。このような高張力鋼の特性に対し、欠陥を実用上どこまで許し得るかが重要であり、この試験により施工計画の段階で定めた施工基準の妥当性あるいは安全性を確認した。

実構造物に、より近似させる試験片形状と施工法により、製作した試験片を種々の条件を変化させて試験を行

図一11 溶接構造物の破壊と欠陥

ない得られた結果をK値により整理して、欠陥評価の尺度をつけた。なお、詳細は文献^{1),2)}を参照されたい。

7-2-4 歪時効試験^{3),4)}

港大橋の製作にあたっては、部材精度の確保およびルートギャップの増加に伴う溶接われ等の欠陥防止のため高い組立精度が要求される。そのため突合せ溶接時に発生した溶接角変形を除去することは、製作途上必要な工程となる。

一方、70, 80キロ鋼を用いた構造物における最弱点部である溶接ボンド近傍に対し角変形除去のためのプレス加工により残存する塑性歪は、熱サイクルによる脆化をさらに助長し有害な欠陥となる懸念があった。

そこで、この歪による脆化の程度を把握するため、広幅試験と同形状の大型試験片により矯正角変形量をパラメーターとして、引張り試験を実施した。

本試験によりプレス加工により歪時効の影響を与えた場合溶接金属に脆化の傾向はみられたが、破壊に対してはボンド部がCritical断面であることが判明した。なお、プレスによる角変形の除去は慎重な溶接材料の選定、プレス加工前にビード仕上げを実施し、歪取りスパンを充分確保する等の十分な配慮のもとでは20 mm/1000 mm以下の角変形の除去は実用上安全であることが判明した。また、広幅試験結果とを比較して考える場合、低応力破壊発生限界温度に寄与する角変形残存による曲げ応力と角変形除去による脆化とのバランスは実用上角変形除去の方が有利であることが判明した。

7-2-5 亀裂伝播について⁵⁾

脆性破壊は、通常溶接欠陥や応力集中のある不連続構造から直接発生したり、疲労による亀裂の生長や腐蝕亀裂などの生長が、ある限界亀裂長さに達すると、脆性破壊に転化して生ずると考えられる。

前者の問題に対しては、ディープノッチ試験あるいは広幅試験を行ない線形破壊力学を前提として欠陥の大きさ等の限界を設け得る。

しかしながら、この場合は、欠陥の評価に時間的要因(応力サイクル)を無視した静的条件下のものであるので、安全性を論ずる場合、脆性破壊発生各要素は使用条件下で変化しないこと、あるいは変化の度合がある限界値以下であることが必要である。すなわち、港大橋の供用途中において欠陥が内在する場合、その欠陥が伝播しないことが必要であり、もし伝播する場合においても本橋の耐用年数内においては、脆性破壊を発生せしめる大きさまでに生長しないことが必要である。

そこで、港大橋の80キロ鋼を対象にして図-13によるこの問題についての検討を行ない一つの目安をつけた。

本橋に作用する地震あるいは風荷重による低サイクル疲労による亀裂の伝播を考える場合、検査における欠陥寸法は、ディープノッチ試験あるいは広幅試験等により得られる許容値より厳しく制限する必要があることが判明した。

7-3 港大橋の非破壊検査

欠陥をどこまで許し得るかの問題とともに潜在するわれ等の有害な欠陥を見逃さないことは、溶接構造物の安全性に対して非常に重要である。

図-13 港大橋の耐久性の検討図

港大橋における70, 80キロ鋼溶接部の検査について、その施工手順との関係は、図-4, 5の通りである。

すなわち、基本的には突合せ溶接部に放射線透過検査、カド継手あるいは T, K 突合せ溶接に UST としてスミ肉溶接には液体探傷検査または磁粉探傷検査を採用した。

放射線透過検査は70, 80キロ鋼の突合せ溶接に対し、引張側は全長そして圧縮側は30%以上の撮影を実施した。JIS Z3104に準拠して行なっているが、極厚板に対しては装置の透過能力等の問題がある。一方、高応力レベルに供される溶接継手は従来の橋梁用鋼材に対する場合よりも高い分解能が要求される。そこで、70, 80キロ鋼および38mmをこえる SM58 に対しては透過度計識別度を1.5%以下としフィルムおよび増感紙も分解能の良好なものを使用した。

撮影時期は、遅れわれの問題より溶接後48時間以上経過して撮影するとともに、撮影するときの溶接部ビード余盛は仕上げ完了の状態で行なう等の配慮をしている。

次に UST の適用は特に極厚板の探傷において放射線透過能力、分解能の関連よりフィルムに現われない欠陥の存在も懸念され、突合せ溶接部においても施工スタート時には、欠陥の検出を斜角法の UST により行なったり、鋼床版の片面溶接等にも利用している。

本格的に使用の対象としているのは、ボックスの部分溶け込みのカド継手部である。

以下、カド継手部の UST の概要と諸問題についての紹介を行なう。

港大橋の弦材のカド継手の基本形は、図-6に示されるが、このカド継手では、仮付溶接われやはく離われ等の欠陥を生じうる懸念がある。

この部分溶け込み溶接部に対し、UST でどこまで保証しなければならないか、あるいは保証しうるかは重要な問題であった。

本橋の場合、 $\sqrt{2t} + 5\text{mm}$ の開先をとっているが、組立誤差あるいは溶け込み量等を考え合せ $\sqrt{2t} + 3\text{mm}$ を保証することが望まれた。この $\sqrt{2t} + 3\text{mm}$ を保証することはボックスの組立精度、フランジプレートの板厚公差、ウェブプレートのガス切断時の鉛直度の精度あるいは、フランジプレートの開先加工精度等を考える場合にかなりの困難が予想されたものであるが、以下その要領を紹介する。

①適用範囲は70, 80キロ鋼および SM58 材からなる上下弦材、塔のカド継手および上下弦材、塔に取付く完全溶け込みによる仕口類の溶接部に UST を適用。

②溶接線と平行方向の欠陥の探傷は、図-14に示す要領によった。すなわち、基本的にはウェブ側より垂直探

図-14 溶接線と平行な欠陥の探傷

図-15 溶接線と直角な欠陥の探傷

触子により、その中心を $\sqrt{2t}$ 上にセットして探傷し(図-12の[A])、検出された欠陥の性状(種類、大きさ、位置)の推定が困難な場合、斜角探触子を使用して、フランジプレート側より探傷する。(図-12の[B])

③溶接線と直角方向の欠陥の探傷は図-15に示すようにウェブ側より斜角探触子を使用し、溶接金属の横われを対象としている。

④探傷条件は、表-5の通りである。

表-5 探傷条件

	垂直法 [A]	斜角法 [B]	斜角法 [C]
探 傷 器	パルス 反射式		
探 触 子	周 波 数	4~5 MHz	4~5 MHz
	振動子寸法	10φまたはこの寸法に近いもの	10×10またはこの寸法に近いもの
	屈 折 角	—	45° 70°
標準試験片	NDI-STB-A ₁ 学振 III-STB-V ₅	NDI-STB-A ₁ NDI-STB-A ₂	
探 傷 態 度	学振 III-STB-V ₅ 50%	NDI-2404-70 4,7,3項に準ずる	
接 触 感 質	グリセリンまたは水		
装置の性能	探傷器	NDIS-2404-70 2,1項に準ずる。	
	探触子	—	NDIS-2404-70 2,2項に準ずる。

⑤判定基準は、エコー高さが最大エコー高さの1/2をこえる範囲の探傷子の移動距離を2mmの精度で測定して欠陥指示長さとし、下記項目に該当するものは、原則として不合格として補修した。

- 最大エコー高さが50%をこえ、かつ欠陥指示長さがウェブの板厚の1/2以上あるもの。
- 最大エコー高さが25~50%の範囲でその欠陥指示長さがウェブ板厚以上のもの。

図-16 U.S.T. のバラツキ

c) 明らかにわれと判定されるもの。

このような要領にて、港大橋のU S Tを実施したわけであるが、検査の実施に伴い、種々の問題が生じ、モデル体の回送実験等を行なって調査を実施した。以下U S Tの問題点を紹介する。

第一に港大橋の施工におけるように複数企業で施工する場合、U S Tの適用にあたっては、予め各社の探傷装置の感度を調整し機器の性能を熟知しておく必要があるほか、モデル体を製作するなどして実物との対比づけを行なっておく必要性が挙げられる。

図-16は、上記問題の一例を回送試験結果の一部より取り出したものである。このように表-4に示す条件を守りながらも、このようなバラツキがあるのは、U S T機器のみならず探触子の材料（水晶、ジルコン酸鉛、チタバリ）、保護膜の有無、表面アラサ、標準試験片の材質、媒質、探触子の圧力等により感度が大きな影響を受けるものと考えられる。

そこで、今後のU S Tの適用においては、少なくとも探触子寸法、周波数、保護膜そして媒体は統一して使用する必要があると思われる。

第2の問題点として、図-6に示される部分溶け込みはU S Tを適用する場合、ウェブとフランジとのスリット部がエコーの拡がりにより探傷範囲にかかり、これによるエコーが欠陥エコーと判別でき難い問題がある。

これについて、本橋の場合は、溶接部の溶け込み深さが比較的正確にU S Tにより測定しうることを利用して、溶け込み深さを測定することによりスリット部にU S Tが伝播しないような探触子中心の算定を行ない、探傷しなおす等により欠陥エコーとの区分を行なった。

第3にU S Tの部分溶け込み溶接への適用において、溶接設計とのバランスのかけ方の問題がある。

すなわち、 $\sqrt{2t}+5\text{ mm}$ の開先深さの溶接施工に対し、保証範囲を $\sqrt{2t}+3\text{ mm}$ 程度まで行ないたいという点における問題がある。

単純に検査において $\sqrt{2t}+3\text{ mm}$ を完全に保証するという建前からいえば開先深さをさらに深くするのも一法であるが、この考えは、本橋の場合、不必要な溶接金属を多く施工するのは部材の変形等の問題より好ましくないこと、そして、例えば $\sqrt{2t}+3\text{ mm}$ の保証に対して $\sqrt{2t}+10\text{ mm}$ の開先深さで施工するのであれば、保証範囲外における仮付溶接われやその他のルートわれがあっても、 $\sqrt{2t}+3\text{ mm}$ に達していなければ良いというような乱暴な思想が生じうる問題がある。

この点よりも良好な構造物の確保において、ただエンドレザルト方式の検査だけでは不十分で、途中における製作管理の重要性があると思われるのである。

8. あとがき

長大トラス橋の問題として現在建設中の港大橋における70, 80キロ鋼の問題をとりあげてきたが、この種の長大トラス橋は、設計上厳しい荷重条件下におかれ、しかも一構造物が多数部材よりなり立っている。

このことは、個々の部材の破壊はそのまま全体の破壊に連なることが予想される一方、構造物に作用する複雑な力の組合せによる破壊現象の多様化の問題がある。

このように、大型構造物で多数の部材により一構造物がなり立っている場合、おのずから、個々の部材に要求される均一性と安全性が従来の中小構造物に要求されてきたものより、より高く要求され、それに伴い溶接施工においては、より安定化した工法、あるいは設備等が要求されよう。

さらに、極厚の高張力鋼の多量に使用される傾向にある長大トラス橋の溶接施工にあたっては材料選定、溶接施工条件、組立溶接順序より検査に至るまで、より慎重な配慮が要求される。それと共に、設計、架設まで含めた総合的な安全性評価のもとに細心の注意をもって信頼性のある溶接構造物を製作する必要がある。

本稿は、港大橋の施工における諸問題について触れたが、港大橋は小西一郎教授を委員長とする技術委員会および奥村敏恵教授を主査とするこの委員下の製作分科会等の多数の委員をはじめ、関係者の協力のもとに現在建設中のものであり、紙面をかりて深謝するものである。

参 考 文 献

- 1) 奥村，堀川，笹戸，水元：高張力鋼の広幅試験について，土木学会第27回年次学術講演会（1972）
- 2) 奥村，堀川，笹戸，水元：JSSC Vol. 8, No. 79 (1972)
- 3) 奥村，堀川，笹戸，水元：JSSC Vol. 9, No. 89 (1973)
- 4) 堀川，笹戸，水元：大型試験片によるHT80溶接部のプレス加工の影響調査，土木学会第28回年次学術講演会（1973）
- 5) 奥村，堀川，笹戸，水元，石黒：80キロ高張力鋼の実働荷重による疲労亀裂の伝播について，日本学術会議構造研究連絡小委員会，第19回（1972）