

厚板耐候性高張力鋼の溶接性試験

小 西 一 郎*
奥 村 敏 恵**
大 庭 浩***

1. 緒 言

鋼橋における耐候性鋼材の採用は、その適性条件を考慮して、数年来諸外国においても真剣に取り組まれていた問題であり、昭和 43 年 4 月、JIS 規格において「溶接構造用耐候性熱間圧延鋼材」規格の制定を見るにおよんでさらに新時代を迎えたと考えられ、次第に大型かつ重要な構造物に適用されることが考えられる。しかし、耐候性高張力鋼は、従来耐候性向上のために Cu, Cr その他の合金成分が添加されており、構造用鋼としては「溶接構造用圧延鋼材」に比べて炭素当量がやや高くなる傾向があり、その使用にあたっては、溶接構造用として溶接性にやや難点が現われることが予測される。特に「溶接構造用耐候性熱間圧延鋼材」規格の制定にあたっては、使用される構造物の範囲を広くし、溶接棒の拡散性水素量の管理、予熱対策などを前提と考えて、その冶金成分にもいくらか幅広い考えの上に立って定められている。したがって、橋梁などの特定の構造物に適用するとき、使用条件に応じ特別の要求を加えた立場から鋼材の選択および溶接管理を必要とする。このため、最近、橋梁、圧力容器、海洋構造物などの高張力鋼構造物の製作加工に際して発生した溶接割れなどの問題点に着目し、上記化学成分と溶接性との関連を眺めて見ると、厚板耐候性高張力鋼板の使用にあたっては、溶接性を中心とした十分な検討の必要性が痛感される。

本研究においては、特に厚板大型構造用鋼材として、一応耐候性を満足する一面、C, Cu, Cr などの化学成分および炭素当量を中心とした溶接性に関連する条件を十分に吟味した鋼材の表-1 に示すような仕様を企画

し、これに対応する試験材として仕様上限の炭素当量を有する鋼材を試作し、その使用性能ならびに工作性を確認するとともに、施工上の各種の問題点を回避する限界条件を明らかにするために実験を実施した。

また、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」、および昭和 42 年 11 月発表された「尾道大橋製作仕様書(案)」などに盛られた従来の一般的な溶接性検討の主旨はもちろんのこと、下記のごとき種々の問題点に対処するよう考慮した。

① 橋梁など構造物の大型化に対応するため、厚板かつ高強度の供試鋼(SMA 58・ $t=50$ mm)を主体として、試験を実施した。特に、厚板における強度および切欠靱性の均質性について調査した。

② ラーメン構造への適用のため、板厚方向強度特性試験、十字継手性能試験などを実施した。

③ 仮付けを主とした小入熱条件における割れ試験を行ない、適用溶接棒とその使用条件の限界およびT形隅肉継手の密着度(ルート間隔)の影響などを明らかにした。

④ 厚板における高能率化を考慮し、サブマージドアーク溶接ならびに消耗ノズル式エレクトロスラグ溶接(以下CES溶接と略す)を適用し、この効果を明らかにした。

2. 母材試験

供試鋼板として 60 kg/mm² 級(SMA 58)、50 kg/mm² 級(SMA 50 A・B,C) 高張力鋼、およびこれらの比較材として SM 41 相当および SS 41 相当の耐候性鋼材(SMA 41 B,C および耐候性 SS 41)について、表-1のごとき製鋼仕様を定め、製鉄メーカーに試作を依頼した。この仕様に従って製作された各供試鋼板に対し、まず外観検査および超音波探傷試験、サルファープリント

* 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科

*** 工博 川崎重工業(株)鉄構事業部 野田工場部長

表-1 供試鋼板の化学成分* および機械的性質の仕様

JIS 規格 鋼種	板厚 (mm)	化 学 成 分 (%)								機 械 的 性 質			曲げ角度 1号試験片 R=1.5t	衝 撃 試 験 4号試験片	
		C max	Si max	Mn max	P max	S max	Cu	Cr	Ceq** max	降伏点 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸 び (4号試験片) (%)		温度	吸収エネ ルギー (kg-m)
SMA 58	40<t≤50	0.16	0.55	1.40	0.04	0.03	0.20 ~0.40	0.30 ~0.50	0.44	≥44	58~68***	≥20	180°	-5°C	≥4.8
	26<t≤40	0.16	0.55	1.40	0.04	0.03	0.20 ~0.40	0.30 ~0.50	0.43	≥46	58~68***	≥20	180°	-5°C	≥4.8
	t≤25	0.16	0.55	1.40	0.04	0.03	0.20 ~0.40	0.30 ~0.50	0.42	≥46	58~68***	≥20	180°	-5°C	≥4.8
SMA 50 C	40<t≤50	0.16	0.55	1.40	0.04	0.03	0.20 ~0.40	0.30 ~0.50	0.44	≥34	50~60****	≥21	180°	0°C	≥4.8
SMA 50 B	26<t≤40	0.16	0.55	1.40	0.04	0.03	0.20 ~0.40	0.30 ~0.50	0.43	≥36	50~60****	≥19*****	180°	0°C	≥2.8
	t≤25	0.16	0.55	1.40	0.04	0.03	0.20 ~0.40	0.30 ~0.50	0.42	≥36	50~60****	≥19*****	180°	0°C	≥2.8
SMA 50 A	t≤25	0.16	0.55	1.40	0.04	0.03	0.20 ~0.40	0.30 ~0.50	0.41	≥36	50~60****	≥19*****	180°	0°C	≥2.8
SMA 41 C	40<t≤50	0.17	0.35	1.40	0.04	0.03	0.20 ~0.40	0.20 ~0.40	0.38	≥22	41~52	≥24	180° (R=1.0t)	0°C	≥2.8
SMA 41 B	t≤25	0.17	0.35	1.40	0.04	0.03	0.20 ~0.40	0.20 ~0.40	0.38	≥22	41~52	≥20*****	180° (R=1.0t)	0°C	≥2.8
耐候性 SS 41	t≤25	0.17	—	—	0.04	0.03	0.20 ~0.40	—	0.38	≥24	41~52	≥21*****	180°	—	—

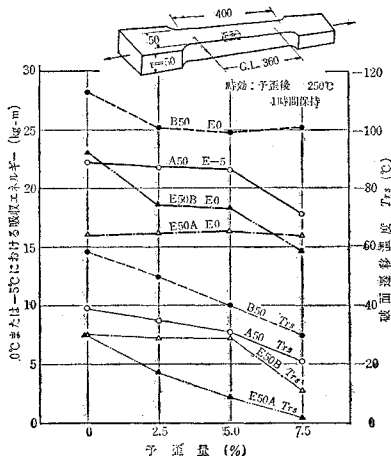
注: * (1) 供試鋼材としては上記表における Ceq の上限値を目標とした鋼板を試作する。
 (2) SMA 58 および SMA 50 については Nb, V, Ni, Mo, Zr のうちいずれか1種類以上を添加する。
 ** $Ceq = C + \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr}{5} + \frac{Ni}{40} + \frac{No}{4} + \frac{V}{14}$ (%)。
 *** JIS では 58~73 であるが、範囲を狭めた。
 **** JIS では 50~62 であるが、範囲を狭めた。
 ***** 1号試験片。

試験などの内部検査を行なったが、何ら欠陥は認められず、また非金属介在物試験でもきわめて清浄度の高い、健全な鋼材といえるものであった。

さらに、化学分析、引張試験、衝撃試験、および鋼材の塑性加工を考慮して、ひずみ時効衝撃試験を行なった。これらの結果を表-2、図-1 に示す。引張試験では各鋼材とも L, C 方向いずれも規格を満足した良好な降伏点、引張強さを示しており、衝撃試験およびひずみ時効試験でも L, C 方向とも規格値を十分に満足している。

これらの各結果は、同強度の溶接構造用鋼と比較した

図-1 ひずみ時効衝撃試験結果



場合特に差異は認められず、溶接構造用耐候性鋼材として十分使用できるものである。ただ、ここで断わっておきたいことは、表-1 に示すように、板厚 40 mm より 50 mm のものに対しても、Ceq の最大値を 0.44 におさえるように仕様し、実験に使用した鋼材もこの条件を十分に満足している点である。耐候性鋼材の規格では、Ceq をこのような形でおさえていないため、この値を著しくこえるものもあると考えられる。この実験結果を適用するとき、その使用鋼材の Ceq などに応じ、管理条件に修正を加えた形で、その数値の評価に注意を払うことが望まれる。

なお、以下の試験に使用した溶接材料を表-3 に示す。

表-3 使用溶接材料

記号	規格	被覆剤の系統	備 考	サブマージアーク溶接および消耗ノズル式エレクトロslag溶接材料		製造メーカー
				心線 フラックス	備 考	
E1	D 5 816	低水素系*	耐候性 高張力鋼用	W1	F1	50キロ級耐候 耐食性鋼用
E2	D 5 026	鉄粉低水素系				
E3	D 5 016	低水素系*				
E4	D 5 816	低水素系*				
E5	D 5 816	低水素系*	耐候性 高張力鋼用	W2	F2	60キロ級高張 力鋼用 50キロ級高張 力鋼用 60キロ級高張 力鋼用 エレクトロslag 溶接用
E6	D 5 826	低水素系*				
E7	D 5 016	低水素系*				
E8	D 5 026	低水素系*				
E9	D 5 016	低水素系*				

注: * 一般低水素溶接材に比べ溶着金属中の拡散性水素量がより少ない(極低水素系)。

表-2 供試鋼材の化学成分および機械的性質

鋼板	JIS規格 鋼種	板厚 (mm)	化 学 成 分 (%)											引 張 試 験**		曲げ試験**				2mmV 衝撃試験***			熱処理	製鉄メ -カ-					
			分析 方法	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Nb	Al	Ceq.*	方 向	降伏点 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	JIS 試験片 (%)	伸び (%)	曲げ 半径			曲げ角度 180°	E ₀ **** (kg-m)	T _{rs} (°C)	T _{ris} (°C)	
A 50		50	レードル	0.14	0.47	0.93	0.014	0.010	0.23	0.40	0.35	0.09	0.040	0.016	0.027	0.421	L	58.5	66.9	4号	31	1.5t	良好	22.2 (22.0)	-39 (-44)	-92 (-80)	P社		
			チェック	0.14	0.47	0.92	0.015	0.009	0.23	0.38	0.33	0.082	0.046	0.019	0.035	0.413	C	58.8	67.1	4号	29	1.5t	良好	13.3 (11.9)	-27 (-26)	-79 (-74)			
A 38	SMA 58	38	レードル	0.14	0.45	0.93	0.011	0.008	0.25	0.41	0.34	0.12	0.029	0.018	0.022	0.424	L	59.8	67.3	4号	32	1.5t	良好	24.3 (25.9)	-61 (-58)	-94 (-81)	P社	焼入 焼戻	
			チェック	0.14	0.44	0.94	0.012	0.008	0.25	0.41	0.33	0.105	0.032	0.021	0.027	0.419	C	59.2	67.0	4号	28	1.5t	良好	15.4 (13.2)	-48 (-41)	-81 (-86)			
A 25		25	レードル	0.13	0.38	0.96	0.019	0.007	0.23	0.29	0.36	0.11	0.030	0.019	0.028	0.415	L	53.9	62.3	4号	35	1.5t	良好	28.5 (25.9)	-62 (-55)	<100 (-93)	P社		
			チェック	0.14	0.39	0.99	0.021	0.009	0.24	0.27	0.35	0.10	0.032	0.023	0.031	0.425	C	52.8	63.2	4号	30	1.5t	良好	15.5 (13.2)	-52 (-46)	-93 (-87)			
B 50	SMA 50 C	50	レードル	0.13	0.46	1.07	0.011	0.007	0.29	0.17	0.35	0.03	0.017	0.029	0.409	L	36.3	51.8	4号	39	1.5t	良好	28.2 (25.8)	-58 (-55)	-94 (-93)	P社	焼 準		
			チェック	0.13	0.49	1.09	0.011	0.008	0.28	0.15	0.34	0.016	0.002	0.016	0.034	0.408	C	36.5	52.1	4号	42	1.5t	良好	17.5 (18.2)	-45 (-46)			-84 (-87)	
C 38		38	レードル	0.13	0.42	0.95	0.009	0.007	0.22	0.29	0.36	—	0.014	0.024	0.385	L	36.6	54.2	1 B号	29	1.5t	良好	10.4 (7.4)	-2 (+1)	-55 (-32)	P社			
			チェック	0.14	0.45	0.97	0.010	0.007	0.22	0.31	0.33	—	0.013	0.031	0.395	C	37.1	54.1	1 B号	23	1.5t	良好	6.4 (4.9)	+11 (+20)	-52 (-48)				
C 32	SMA 50 B	32	レードル	0.14	0.31	0.84	0.014	0.004	0.26	0.049	0.34	0.010	0.075	—	—	0.370	L	37.5	53.5	1 B号	32	1.5t	良好	14.2 (17.5)	-5 (-6)	-48 (-48)	R社		
			チェック	0.13	0.30	0.91	0.015	0.003	0.28	0.052	0.34	0.009	0.079	—	—	0.371	C	38.0	54.0	1 B号	23	1.5t	良好	5.2 (4.2)	+18 (+16)	-44 (-42)			
C 25		25	レードル	0.13	0.42	0.95	0.009	0.007	0.22	0.29	0.36	—	0.014	0.024	0.385	L	40.1	53.9	1 B号	29	1.5t	良好	8.3 (5.2)	5 (+5)	-65 (-65)	P社			
			チェック	0.14	0.44	0.96	0.010	0.006	0.22	0.30	0.36	—	0.013	0.031	0.398	C	39.9	54.2	1 B号	27	1.5t	良好	5.2 (4.2)	+18 (+16)	-44 (-42)				
D 24	SMA 50 A	24	レードル	0.12	0.48	0.82	0.019	0.002	0.25	0.054	0.32	0.010	0.077	—	—	0.350	L	38.5	54.0	1 B号	29	1.5t	良好	15.5 (14.7)	-17 (-2)	-58 (-64)	R社		
			チェック	0.11	0.46	0.87	0.020	0.003	0.26	0.059	0.34	0.008	0.080	—	—	0.351	C	—	—	—	—	—	—	—	—	—			—
E 50 A	SMA 41 C	50	レードル	0.12	0.02	0.87	0.008	0.017	0.24	0.15	0.33	—	—	—	—	0.336	L	28.1	43.6	1 B号	35	1.0t	良好	23.0 (27.0)	-34 (-40)	-62 (-52)	P社	圧延の まま	
			チェック	0.13	0.02	0.89	0.008	0.017	0.26	0.16	0.35	—	—	—	—	0.02	0.353	C	28.3	43.6	1 B号	32	1.0t	良好	5.3 (6.1)	-17 (-22)			-43 (-38)
E 50 B		50	レードル	0.10	0.19	0.81	0.019	0.021	0.28	0.03	0.34	—	—	—	—	0.04	0.312	L	29.8	46.8	4号	40	1.0t	良好	16.0 (13.4)	-30 (-28)	-73 (-60)	Q社	
			チェック	0.11	0.21	0.85	0.019	0.027	0.28	0.03	0.36	—	—	—	—	0.04	0.333	C	30.3	46.8	4号	38	1.0t	良好	8.2 (8.1)	-27 (-25)	-66 (-61)		
F 25	SMA 41 B	25	レードル	0.12	0.21	0.69	0.015	0.024	0.27	0.03	0.36	—	—	—	—	0.05	0.317	L	32.4	46.6	1 B号	32	1.0t	良好	11.5 (11.5)	-30 (-30)	-47 (-47)	Q社	
			チェック	0.13	0.23	0.72	0.014	0.029	0.30	0.03	0.38	—	—	—	—	0.06	0.336	C	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
G 22 A	耐 候 性	22	レードル	0.16	0.03	0.82	0.009	0.021	0.25	0.01	0.01	—	—	—	—	0.300	L	27.4	44.4	1 B号	30	1.5t	良好	3.9 (3.9)	+9 (+9)	-12 (-12)	P社		
			チェック	0.17	0.03	0.88	0.009	0.021	0.25	0.02	0.01	—	—	—	—	0.001	0.321	C	26.1	44.6	1 B号	30	1.5t	良好	—	—			—
G 22 B	SS 41	22	レードル	0.16	0.21	0.64	0.02	0.028	0.30	0.02	0.03	—	—	—	—	0.01	0.28	L	29.8	45.4	1 B号	32.3	1.5t	良好	7.5 (7.5)	+7 (+7)	-30 (-30)	Q社	
			チェック	0.15	0.21	0.64	0.02	0.03	0.29	0.02	0.03	—	—	—	—	0.01	0.28	C	—	—	—	—	—	—	—	—	—		

注: * Ceq = C + Mn/6 + Si/24 + Cr/5 + Ni/40 + Mo/4 + V/14 (%)
 ** 引張試験の結果は、2個の試験片の平均値を示す。
 *** 衝撃試験の結果は、3個の試験片の平均値を示す。
 **** 鋼材 A (SMA 58) は、E-5 (-5°C) における硬取エネルギ-を示す。
 ***** 鋼材 A (SMA 58) は、(板厚)/2、() 内の数値は (板厚)/2 の値を示す。

3. 硬化性試験

(1) 最高硬さ試験

図-2 は、JIS Z 3101 による最高硬さ試験の結果である。国際溶接学会 (IIW) では、その最高硬さが H_V 350 以上になると溶接割れが発生しやすくなるという見解をとっているが、鋼材 A50, B50 における熱影響部の最高硬さは、室温においていずれもこの値をやや上回っている。しかし、 50°C ~ 100°C の予熱を行なえば 350 以下の値が得られている。

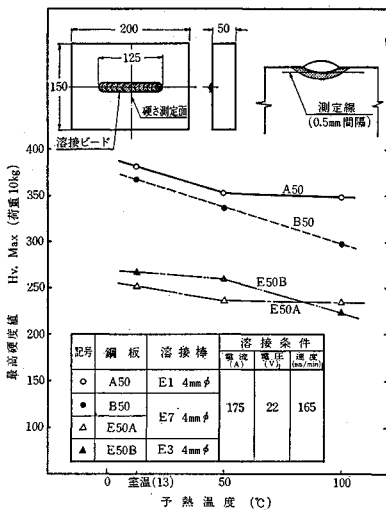
(2) テーパー硬さ試験

溶接後の冷却速度が最高硬さに与える影響を調べるために、日本溶接協会鋼種認定方法によるテーパー硬さ試験を行なった。図-3 はその結果であるが、 540°C での冷却速度を鋼板 A50 で $20^{\circ}\text{C}/\text{sec}$ 以下、B50 で $25^{\circ}\text{C}/\text{sec}$ 以下とすれば最高硬さは H_V 350 以下となり、また入熱の小さい溶接に際しては、予熱によって硬化の緩和をはかれば問題はないと考えられる。

(3) ガス切断

ガス切断に伴う加熱急冷による切断端面の硬化、および切断面の平滑度について、種々の切断条件により調査を行なった。測定結果は図-4 に示すようにガス切断に伴う硬化範囲は切断面から $3\sim 4\text{mm}$ 以内の部分であり、切断面から 0.5mm の所ではかなりの硬さの増加がみられる。しかし、これらの値は他の一般鋼材と比較して特に差は認められず、ガス切断による硬化性は合金成分の影響に

図-2 供試鋼材の JIS 最高硬さに与える予熱温度の影響



よるといよりも、切断条件 (切断速度) に依存するところが大きい。特に鋼板 A50 については、切断速度が $400\text{mm}/\text{min}$ の場合は予熱に関係なく $H_V=380\sim 395$ の値となっているが、実際の施工条件にほぼ匹敵する切断速度 $250\text{mm}/\text{min}$ の場合には $H_V < 350$ となり、硬さが低下する。

また、切断面の延性についても切断条件の違いによる切断面の形状効果の影響が大きく、側曲げ試験においては、早い速度の場合には一部毛割れを生じたが、遅い速度の場合には、良好な曲げ延性を示した。

さらに、これらの切断条件における表面粗度は 100S (JIS B 0601) 程度であった。

以上の試験結果から、供試鋼板の硬化性は全体的に SM 材と比較して、ほぼ同程度の値を示しているといえる。

4. 溶接割れ感受性

供試鋼材の溶接割れ感受性については、JIS Z 3161 「溶接ビード曲げ試験方法」、JIS Z 3158 「斜め Y 形溶接割れ試験方法」、および JIS Z 3157 「U 形溶接割れ試験方法」に示される各試験方法により、さらに鋼材の工作組立時における仮付溶接時の溶接割れ感受性については、独自の T 型拘束隅肉仮付割れ試験方法により試験を実施した。

図-3 テーパー硬さ試験結果

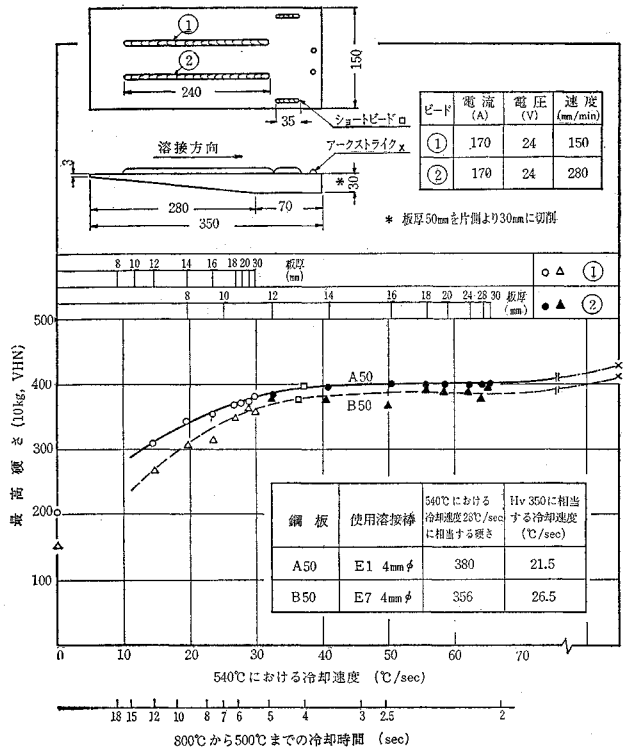


図-4 ガス切断熱影響部の硬度分布

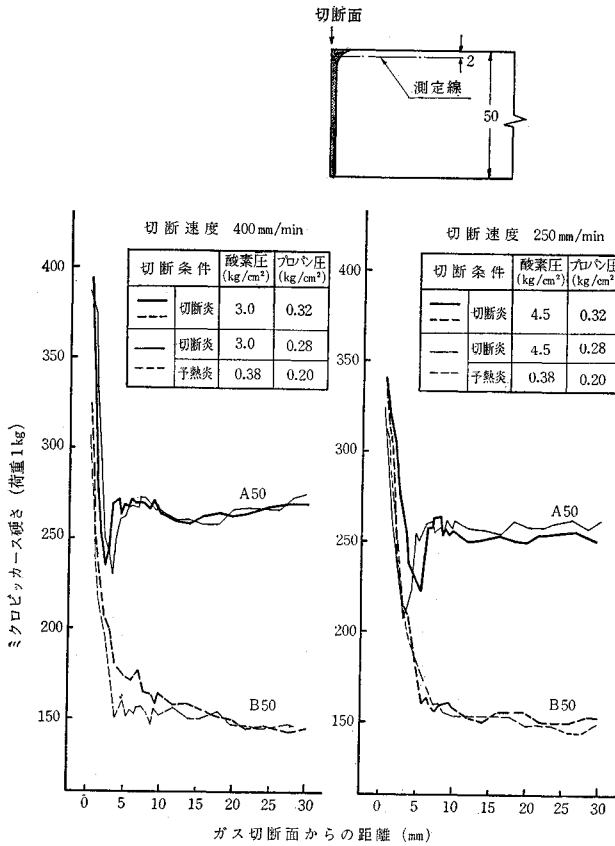
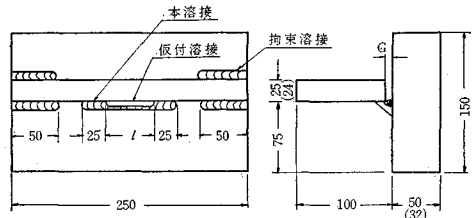


図-6 仮付け溶接割れ試験片



試験（コマレル試験）を室温、予熱温度 50°C および 100°C について行なったが、いずれの試験片も曲げ角度は 70 度以上となり熱影響部の曲げ延性は十分良好であった。

(2) 斜め Y 形溶接割れ試験および U 形溶接割れ試験

母材の熱影響部の割れ感受性の判定として、斜め Y 形溶接割れ試験を、また溶接棒の割れ感受性の判定として U 形溶接割れ試験を実施した。図-5 に試験結果を示す。

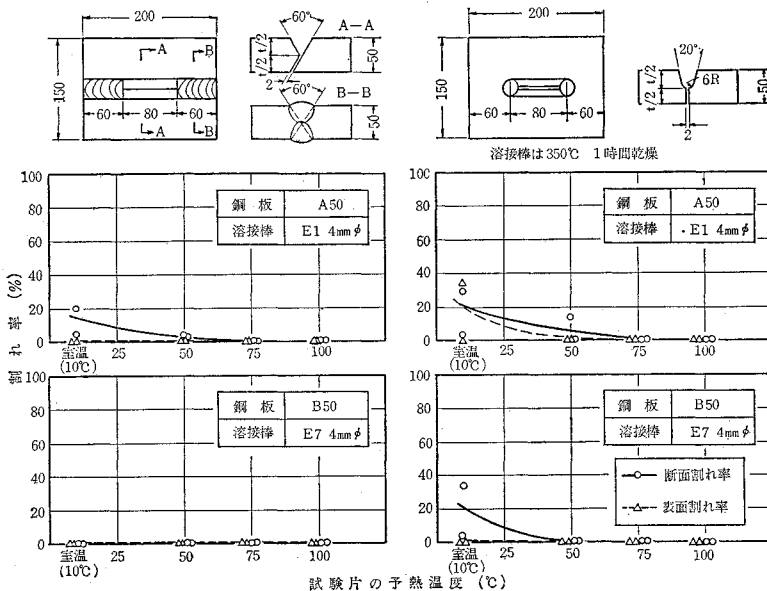
Y形溶接割れ試験においては、各鋼材ともに室温 (10°C) で表面割れは全く発生していないが、断面割れは厚板の場合 (t=50 mm) にわずかに認められた。しかし、これも 50°~75°C の予熱により割れは発生していない。U形溶接割れ試験についてはY形の場合と大差なく、50°~75°C の予熱により割れ発生は見られなかった。

(1) 溶接ビード曲げ試験

溶接部の延性を判定する試験として、溶接ビード曲げ

(3) T 形拘束隅内仮付割れ試験

図-5 斜め Y 形および U 形溶接割れ試験結果



本試験は工作時の組立精度および仮付溶接長ささらに拘束力を考慮して、図-6 に示す試験片を用い、表-4 の溶接条件により仮付溶接に対する溶接割れ感受性の調査を行なったものである。

試験方法は、まず表面割れについて染色浸透法により検査したのち、ウェブ材を削除し、磁粉探傷法により断面割れの有無を調べた。この試験でみられた断面割れの一例を写真-1 に示すが、このような断面割れが確認されたのは 270 個の試験片のうち表-5 に示される 22 個であった。表-5 からわかるように、いずれも 0.5 mm また

表-4 仮付け溶接割れ試験鋼材、溶接材料組合せおよび溶接条件

鋼板 組み合わせ	溶接条件		仮付溶接長 l(cm)	ルート間隔 G(mm)	溶接入熱 (joule/cm)	試験片 初期温度
	溶接棒*	仮付用 本溶接用				
A50×A25	E1	E6	20	0	10 000 (170A 200) (mm/min)	室温 (10°C)
	E4					
	E9					
B50×C25	E4	E8	50	0.5	15 000 (170A 150) (mm/min)	
	E9					
C32×D24	E4	E8	75	1.0	20 000 (170A 100) (mm/min)	
	E7					
E50B ×F25	E4	E3				
	E3					
E50A ×G22A	E4	E2				
	E9					

注) *溶接棒径はすべて 4mmφ, 350°C 1時間乾燥。

表-5 T形拘束隅内仮付け割れ試験結果

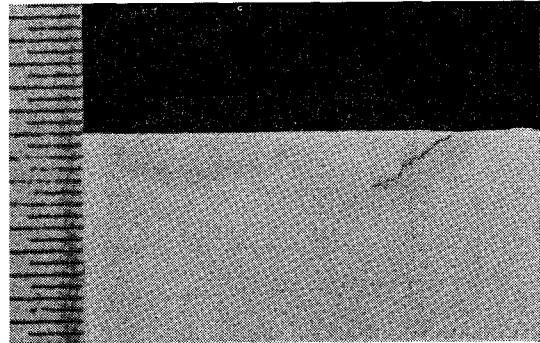
鋼板の 組合せ	溶接棒		仮付溶接長 (mm)	ルート間隔 (mm)	溶接入熱 (joule/cm)
	仮付け用	本溶接用			
A50×A50	E4	E6	75	0.5	15 000
	E4	E6	75	1.0	20 000
	E1	E6	75	1.0	20 000
B50×C25	E4	E8	20	0.5	10 000
	E9	E8	50	0.5	20 000
C32×D25	E4	E8	20	0.5	20 000
	E7	E8	20	1.0	15 000
	E7	E8	20	1.0	20 000
	E7	E8	50	0.5	10 000
	E7	E8	50	1.0	15 000
	E4	E8	50	1.0	20 000
	E7	E8	50	1.0	20 000
	E7	E8	75	0.5	15 000
	E7	E8	75	1.0	15 000
	E4	E8	75	0.5	20 000
	E7	E8	75	0.5	20 000
	E7	E8	75	1.0	20 000
E50B×F25	E3	E3	20	1.0	20 000
	E4	E3	50	0.5	20 000
	E4	E3	75	1.0	15 000
	E3	E3	75	1.0	20 000
	E4	E3	75	1.0	20 000

注：割れはすべて仮付溶接ボンド部に発生。

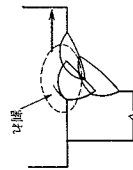
は 1mm のルート間隔があるものに発生しており、そのうち 0.5mm で 8 個, 1mm で 14 個とやや 1mm のルート間隔の方が多い。また入熱量では 10 000, 15 000, 20 000 joule/cm の順に、溶接長では 20, 50, 75 mm の順に割れ発生個数は増加しているようであるが、その傾向に特に有意性があるといえない。したがって、このような仮付時における割れに対してルート間隔の影響は大きい、今回の試験における程度の入熱、溶接長の変化はあまりないと考えられる。

この断面割れ発生は、むしろ常温(予熱なし)という試験片初期温度条件によるものと考えられ、ある程度の子熱で割れ発生が防止できることは 4.(2)の Y 形溶

写真-1 断面割れの例



注：



接割れ試験結果からも十分推察できよう。

また、鋼板 E50A と G22A を組み合わせた試験片においては、本溶接部の溶着金属にルート部より発生し、表面にまで伸びた縦割れが観察された。この溶接に使用した溶接棒は MgO を主剤とするマグネシヤ系の鉄粉低水素系溶接棒であり、比較的拡散性水素量が多いためと考えられる(7~8 cc/100 g)。

5. 溶着金属拡散性水素試験

溶着金属内の拡散性水素量の調査として 350°C・1 時間の乾燥後の溶接棒を大気中に放置し、この放置時間を種々に変化させた溶接棒を用い、実際に得られる溶着金属の常温での放出水素量を溶接ビード層数ならびに溶接入熱条件を種々変化させて JIS Z 3113 に準じた方法により測定を行なった。

図-7 は試験結果を示したもので、これより次のようなことがいえる。

- ① 今回の実験では、全体的に供試溶接棒、溶着金属に吸収される拡散性水素は非常に少なかった。
- ② 乾燥後大気中での放置時間 4 時間までは、拡散性水素は徐々に増加するが、それ以後はほぼ一定値に達する。
- ③ 溶接入熱量が増加すると、溶着重量 100 g に対する拡散性水素は増加する傾向にある。しかし、溶着金属の溶け込み面積の影響を考慮すると、吸収された拡散性水素はほとんど差はないと考えられる。
- ④ 多層盛り溶接による拡散性水素量は非常に低い値であった。これは、溶着金属に吸収された拡散性水素は最終層溶接までにほとんど大気中に逃げてしまったためと考えられる。

表-6 突合せ溶接継手試験片の開先形状および溶接条件

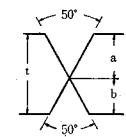
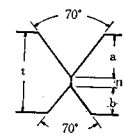
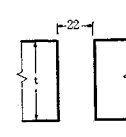
溶接法 溶接条件 鋼板	手 溶 接					サブマージーク溶接					C E S 溶 接																																																				
	溶接棒	電流 (A)	電圧 (V)	速度 (mm/min)	入熱量 (joule/cm)	心 フラックス	電流 (A)	電圧 (V)	速度 (mm/min)	入熱量 (joule/cm)	心 フラックス	電流 (A)	電圧 (V)	速度 (mm/min)	入熱量 (joule/cm)																																																
A50, A38, A25	E 1 (5mmφ)	215 ~235	25	120 ~140	24 000 ~31 000	W2(4.8mmφ) × F2(20×D)	680 ~880	31 ~36	280 ~400	30 000 ~62 000	W4(3.2mmφ) × F2(12×65)	600 ~36	36 ~38	18~27	480 000 ~760 000																																																
B50	E 7 (4,5mmφ)	215 ~235	25	120 ~140	23 000 ~30 000	W3(4.8mmφ) × F2(20×D)	740 ~860	30 ~35	220 ~430	31 000 ~75 000	—	—	—	—	—																																																
C38, C32, C25		170 ~250	24 ~25	120 ~145	18 000 ~29 000		700 ~960	32 ~35	280 ~420	33 000 ~68 000	—	—	—	—	—																																																
D24		200 ~270	24 ~25	130 ~145	21 000 ~28 000		700 ~750	33 ~36	300 ~370	38 000 ~51 000	—	—	—	—	—																																																
E50 A, E50 B	E 3 (4,5mmφ)	200 ~270	22 ~26	110 ~170	16 000 ~28 000	W1(4.8mmφ) × F1(20×D)	650 ~900	31 ~36	250 ~450	27 000 ~73 000	—	—	—	—	—																																																
F25		200 ~270	23 ~72	140 ~170	16 000 ~30 000		750 ~780	30 ~31	290 ~330	46 000 ~49 000	—	—	—	—	—																																																
G22 A, G22 B		175 ~270	22 ~26	130 ~170	16 000 ~30 000		680 ~950	30 ~32	280 ~330	45 000 ~61 000	—	—	—	—	—																																																
開先形状	 <table border="1"> <thead> <tr> <th>t (mm)</th> <th>a (mm)</th> <th>b (mm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>50</td><td>30</td><td>20</td></tr> <tr><td>38</td><td>23</td><td>15</td></tr> <tr><td>32</td><td>21</td><td>11</td></tr> <tr><td>25</td><td>17</td><td>8</td></tr> <tr><td>24</td><td>16</td><td>8</td></tr> <tr><td>22</td><td>18</td><td>4</td></tr> </tbody> </table>					t (mm)	a (mm)	b (mm)	50	30	20	38	23	15	32	21	11	25	17	8	24	16	8	22	18	4	 <table border="1"> <thead> <tr> <th>t (mm)</th> <th>a (mm)</th> <th>n (mm)</th> <th>b (mm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>50</td><td>24</td><td>6</td><td>20</td></tr> <tr><td>38</td><td>17</td><td>5</td><td>16</td></tr> <tr><td>32</td><td>14</td><td>5</td><td>13</td></tr> <tr><td>25</td><td>10</td><td>5</td><td>10</td></tr> <tr><td>24</td><td>10</td><td>5</td><td>9</td></tr> <tr><td>22</td><td>9</td><td>5</td><td>8</td></tr> </tbody> </table>					t (mm)	a (mm)	n (mm)	b (mm)	50	24	6	20	38	17	5	16	32	14	5	13	25	10	5	10	24	10	5	9	22	9	5	8				
	t (mm)	a (mm)	b (mm)																																																												
50	30	20																																																													
38	23	15																																																													
32	21	11																																																													
25	17	8																																																													
24	16	8																																																													
22	18	4																																																													
t (mm)	a (mm)	n (mm)	b (mm)																																																												
50	24	6	20																																																												
38	17	5	16																																																												
32	14	5	13																																																												
25	10	5	10																																																												
24	10	5	9																																																												
22	9	5	8																																																												

図-7 単, 多層溶接の拡散性水素量試験

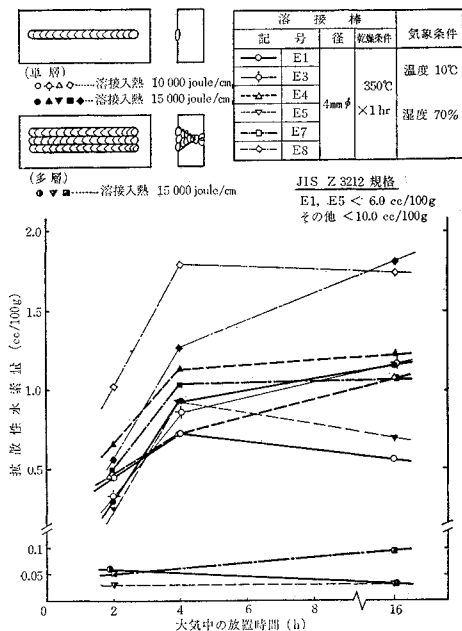
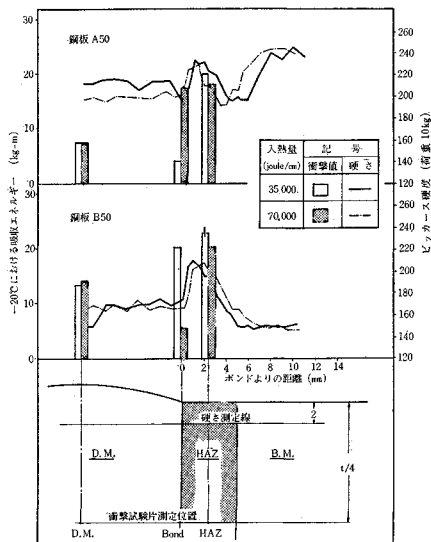


図-8 標準条件溶接継手衝撃試験および硬さ測定結果



6. 溶接継手性能試験

高張力鋼の自動溶接における問題は、その大入熱による溶着金属、および溶接熱影響部の靱性低下、さらに熱影響部の軟化である。本研究においては、この溶接入熱

量の影響を調べるために、日本道路協会「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」による標準条件溶接継手性能試験を行なった。

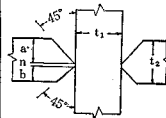
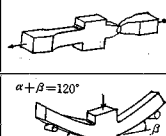
さらに、これらの耐侯性高張力鋼を使用した構造物の製作を想定し、継手性能上の問題点を明らかにすべく、各鋼板について手溶接、サブマージーク溶接、CES溶接施工試験を実施した。

表-7 突合せ継手性能試験結果

鋼板	溶接法	引張試験		型曲げ	継手部* 最高硬さ Hv (10 kg)	2mmV シャルピー衝撃試験**			鋼板	溶接法	引張試験		型曲げ	継手部* 最高硬さ Hv (10 kg)	2mmV シャルピー衝撃試験**		
		引張強さ (kg/cm ²)	破断部			ノッチ 位置	E ₀ (kg-m)	T _{rs} (°C)			引張強さ (kg/cm ²)	破断部			ノッチ 位置	E ₀ (kg-m)	T _{rs} (°C)
A50	手	71.6	DM	良好	308	DM	12.6	-19.5	C25	手	59.1	BM	良好	265	DM	8.2	+4
		71.7	DM			HAZ	20.5	-48			60.0	BM			HAZ	22.6	-55
	サブマージアーク	70.4	DM	良好	257	DM	6.4	-12	サブマージアーク	サブマージアーク	61.7	BM	良好	263	DM	5.2	+5
		71.4	DM	HAZ		8.8	-4	60.6			BM	HAZ	10.0		-9		
A38	手	71.9	DM	良好	310	DM	10.9	-20	D24	手	59.5	BM	良好	278	DM	8.3	+4
		71.3	DM	HAZ		8.9	-26	59.7			BM	HAZ	9.8		-10		
	サブマージアーク	70.7	DM	良好	259	DM	14.8	-46	サブマージアーク	サブマージアーク	60.5	BM	良好	209	DM	5.6	-7
71.3		DM	HAZ	10.2		-32	58.8	BM			HAZ	11.7	-3				
A25	手	67.3	BM	良好	304	DM	11.0	-4	E50A	手	47.7	BM	良好	226	DM	13.4	-16
		67.4	BM	HAZ		8.9	-26	48.2			BM	HAZ	20.3		-26		
	サブマージアーク	66.3	BM	良好	237	DM	8.3	-25	サブマージアーク	サブマージアーク	47.0	BM	良好	196	DM	15.1	-16
66.8		BM	HAZ	20.3		-49	49.0	BM			HAZ	17.2	-14				
B50	手	58.7	BM	良好	254	DM	14.6	-17	F25	手	52.4	BM	良好	219	DM	8.2	-4
		59.2	BM	HAZ		23.2	-47	52.4			BM	HAZ	9.4		-25		
C38	手	60.7	BM	良好	247	DM	10.1	-24	G22A	手	49.3	BM	良好	213	DM	9.8	-1
		60.5	BM	HAZ		17.5	-39	48.9			BM	HAZ	15.8		-23		
	サブマージアーク	60.6	BM	良好	260	DM	8.0	-27	サブマージアーク	サブマージアーク	46.9	BM	良好	158	DM	5.2	+28
60.3		DM	HAZ	19.4		-50	46.7	BM			HAZ	7.9	+4				
C32	手	66.3	BM	良好	265	DM	7.6	-14	G22B	手	51.4	BM	良好	211	DM	13.4	-14
		66.0	BM	HAZ		21.1	-32	50.4			BM	HAZ	13.4		-21		
サブマージアーク	61.0	BM	良好	248	DM	6.4	-14	サブマージアーク	サブマージアーク	49.6	BM	良好	189	DM	11.7	-31	
	60.6	BM	HAZ		19.0	-20	49.0			BM	HAZ	10.0		-10			

注：* 硬さ測定位置：板面から 2mm。
 ** 衝撃試験片採取位置：板面から (板厚)/4。

表-8 十字形溶接継手試験片の溶接条件および試験結果

鋼板組合せ		A50×A50		B50×C25		C35×D24		E50B×25		備考
溶接法		手	サブマージアーク	手	サブマージアーク	手	サブマージアーク	手	サブマージアーク	
溶接材料		E1 (4.5mmφ)	W2 (4.8mmφ)× F2(20×200)	E7 (4.5mmφ)	W3 (4.8mmφ)× F2(20×200)	E7 (5mmφ)	W3 (4.8 mmφ)× F2(20×D)	E3 (5mmφ)	W1 (4.8 mmφ)× F1(20×D)	
開先形状	t ₁	50	50	50	50	32	32	50	50	
	t ₂	50	50	25	25	24	24	25	25	
	a	30	30	16	13	15	12	16	13	
	n	2	5	2	5	2	5	2	5	
	b	18	15	7	7	7	7	7	7	
溶接条件	電流(A)	170~250	650~800	170~250	650~800	220~250	700~800	220~270	700~800	
	電圧(V)	22~27	33~38	22~27	33~38	25	33~36	22~26	33~34	
	速度(mm/min)	150~220	350~500	150~220	350~500	130~140	350~400	140~170	300~400	
	入熱(J/cm)	15 000 ~27 000	25 000 ~52 000	15 000 ~27 000	25 000 ~52 000	24 000 ~27 000	35 000 ~50 000	17 000 ~30 000	35 000 ~54 000	
引張試験	引張強さ(kg/mm ²)	72.9	73.5	54.4	54.9	55.0	55.0	41.7	48.0	
	曲げ試験	割れなし	割れなし	割れなし	割れなし	—	—	—	—	

注：破断位置はすべて母材。

(1) 標準条件溶接継手性能試験

溶接入熱が溶接継手性能に与える影響の検討として、鋼板 A50 および B50 の 30°レ型開先突合せ継手試験

片にサブマージアーク溶接法により、入熱量 35 000 joule/cm, 70 000 joule/cm の 2 種の溶接を行ない、継手の硬度分布および衝撃値について調査した。継手硬度分布は板面より 2 mm 下を、熱影響部付近は 0.5 mm

間隔で、その他は 1 mm 間隔でビッカース 10 kg により測定した。また衝撃値は JIS Z 4 号試験片により、溶着金属部、ボンド部、熱影響部の 3 ヶ所について、 $-80^{\circ}\text{C}\sim 0^{\circ}\text{C}$ の温度域で遷移曲線を求めた。図-8 に測定結果を示す。硬度分布においては、調質鋼である鋼板 A50 でやや軟化がみられるが、この程度の入熱の違いによる影響は少ない。切欠靱性では、ボンド部で溶接による若干の変動が認められるが、35 000 joule/cm、70 000 joule/cm とともに鋼材の規格値程度の十分な衝撃値が得られた。

(2) 突合せ溶接継手性能試験

溶接施工試験として表-6 に示す各開先形状、溶接条件、溶接材料により鋼板 A50、A38 については手溶接、サブマージアーク溶接、CES 溶接を、他の鋼板については手溶接、サブマージアーク溶接を行なった。

試験材は X 線検査後、溶着金属化学分析、溶着金属引張試験、継手引張試験、継手型曲げ試験、衝撃試験、断面硬さ試験により継手性能の検討を行なった。

各試験結果を表-7 に示すが、手溶接、サブマージアーク溶接においては、引張り、曲げ、衝撃特性において母材の規格値を下回るものはなく、いずれも良好な結果が得られている。また、A50、A38 の CES 溶接継手においては、破面遷移温度がやや上昇しているが、 0°C および -20°C における衝撃値はサブマージアーク溶接のそれとほとんど変わらず母材の規格値 ($E_s=4.8\text{ kg}\cdot\text{m}$) を十分満足するものである。

硬度分布については手溶接、サブマージアーク溶接では熱影響部ボンド側に硬さのピークがあり、その値は鋼板 A 種 (SMA58)、B 種 (SMA50C) とともに手溶接で 310 H_V 、サブマージアーク溶接で 260 H_V 程度である。これに対して CES 溶接では硬化した部分がなく、逆に熱影響部母材側に 4~5 mm の幅にわたる $H_V=180\sim 190$ 程度の軟化域が認められたが、継手性能上の問題は認められなかった。

(3) 十字形溶接継手性能試験

ラーメン構造の隅角部などを考慮して十字形溶接継手に対しても前節と同様の試験を行なったが、表-8 に示されるごとく、引張り、曲げ性能ともに良好な結果が得られた。

(4) 隅肉施工試験

隅肉溶接を行なう際の溶接方法、溶接条件の適否を判定するための試験として、手溶接、およびサブマージアーク溶接による隅肉施工試験を行なった。その結果は、曲げ試験において割れは全く認められず、良好な曲げ延

性を示し、また、断面の硬さは鋼板 A50 と B50 では大差なく、手溶接で $H_{V\max}\cong 320$ (ボンド部)、サブマージアーク溶接で $H_{V\max}\cong 290$ (ボンド部) であった。

7. 総 括

耐候性高張力鋼を用いた大型溶接構造物を製作する場合には、使用性能面で十分な構造強度が確保されるよう、最重点が払われねばならない。特に、使用厚肉鋼材の溶接性や実際に適用する溶接施工条件に対する十分な検討が必要であることはいうまでもない。

このような観点にたって実施した本研究から、以下に示す施工に対する指針が得られた。

① 鋼材の耐候性を付加する Cu、Cr などの合金成分の添加量は、必要上最低限に押えれば、溶接性の優れた鋼材を得ることができる。

② 溶接施工においては、割れ発生の防止に重点をおき特に仮付溶接や隅肉溶接部の割れ発生に注意する必要がある。

③ 使用溶接棒の吸湿性を十分把握するとともに、現場における乾燥および取扱い管理を徹底化させることが必要である。

④ 突合せ溶接は可能な限り、比較的入熱の大きいサブマージアーク溶接を使用して割れ防止を計ることが好ましい。

⑤ 作業性の悪い比較的狭隘な構造においては、予熱温度を下げて十分割れ防止を計るために、極低水素系溶接棒の使用が有効である。

⑥ 厚鋼板の溶接方法としては、消耗ノズル式エレクトロスラグ溶接も十分な適用性をもっている。

⑦ 耐候性鋼のガス切断においては、切断条件を十分考慮するとともに、切断面の粗度に注意が払われなければならない。

以上の諸点について十分考慮を払うならば、耐候性鋼を用いた大型構造物といえども、製作時における割れ発生に対しては十分対処し得るとともに、継手の延性や切欠靱性などにおいても十分満足できる性能が得られるものと考えられる。

この報告は神戸港新埠頭運結橋の溶接製作に関連し、その重要性和比較的厚い板厚の溶接構造用耐候性熱間圧延鋼材を使用するために、工作に先立って行なった実験的研究の報告である。この報告を通じ重要な溶接構造物を製作架設するに先だてて心得うべき諸態度をくみ取っていただければ幸いである。

なお本研究の実施にあたり、川崎製鉄(株)、(株)神戸製鋼所、富士製鉄(株)の製鉄各社に多大なご協力をいただきましたことをここに記し、厚くお礼申し上げます。

(1969. 8. 13・受付)