

厚板開先なしサブマージアーク溶接施工試験

工藤 憲二¹⁾ 露野 公則²⁾ 杉本 智美³⁾

最近、建築鉄骨の高層化に伴い、BOX柱のみならず、ビルトアップHの柱および梁やクロス十字タイプの柱にも、厚板材料の使用が増えてきている。サブマージアーク溶接法の溶込みが深いことは以前からわかっている。今回、この特性を有効に利用して、ウェブ材を無開先にて溶接する施工法の確立に取り組んだ。本文はその成果について報告する。

まえがき

今回の施工試験は、十字形のウェブすみ肉溶接部に深溶込みを目的としたタンデムサブマージアーク溶接法を採用し、開先加工をしなくても、その溶接継手の性能が開先加工をした時と同等以上であることを断面マクロ試験、引張試験、衝撃試験、曲げ試験および溶接金属の化学成分分析により確認する目的で行った。

1. 試験体

施工試験は、日本建築学会・建築工事標準仕様書・同解説・付則1「サブマージアーク自動溶接の承認試験」の3.3すみ肉溶接試験を参考に行い、図-1および表-1に試験体の形状および寸法を示す。鋼板板厚は25mm、40mm、50mmの3形式を採用した。ウェブの開先加工は無開先とした。溶接方法はタンデムサブマージアーク溶接法とした。表-2および表-3に使用鋼材の引張特性、化学成分値および溶接材料を示す。

各板厚の十字すみ肉溶接継手を施工する際に採用した溶接条件を表-4および図-2に示す。

溶接部の機械的性質の確認試験のための試験片は図-3に示す要領で採取した。図-4、図-5および図-6に十字引張試験片、十字曲げ試験片、すみ肉

溶接マクロ試験片の形状を示し、図-7および図-8に丸棒（溶接金属部）引張試験片および衝撃試験片の採取位置を示す。

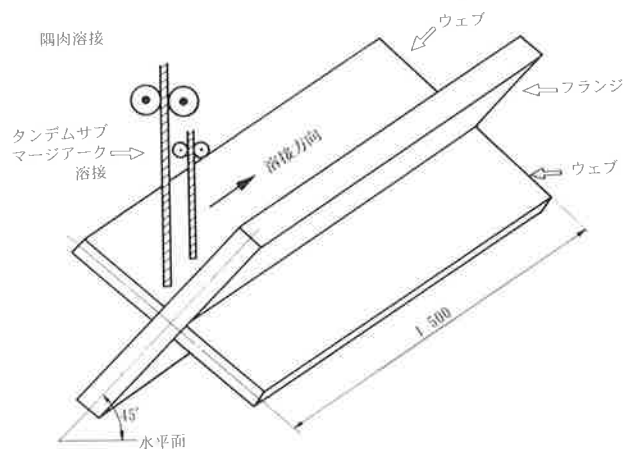


図-1 試験体の形状

表-1 試験体寸法

フランジ		ウェブ		溶接長 (mm)
T1 (mm)	W1 (mm)	T2 (mm)	W2 (mm)	
25	400	25	400	約 1,500
40	500	40	500	
50	600	50	600	

1) 東北鉄骨橋梁(株) 管理技術部長 2) 東北鉄骨橋梁(株) 技術開発課課長 3) 東北鉄骨橋梁(株) 技術開発課

表-2 供試鋼板

鋼種	板厚 (mm)	引張特性 (N/mm ²)			化学成分 (Mass%)						
		YS	TS	EI (%)	C	Si	Mn	P	S	V	CE
SM-490 A	25	365	511	33	0.15	0.35	1.35	0.015	0.002	0.033	39
SM-490 A	40	400	543	27	0.17	0.35	1.34	0.015	0.002	0.034	41
SM-490 B (TMCP)	50	366	510	33	0.14	0.36	1.23	0.008	0.001	0.01	36

表-3 供試溶接材料

溶接法	銘柄	サイズ	JIS規格			メカ-
			ワイヤ	フラックス	溶着金属の品質区分	
サブマージアーク溶接	KW-50	4.8mmφ	YS-S6	—	JIS Z3183	川崎製鉄(株)
		6.4mmφ	YS-S6	—		
		KB-U	—	FS BML		

表-4 溶接条件

使用板厚	溶接諸元	パスNo.	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
25mm	溶接電流 (A)	L	1200	1200	1200	1200
		T	1000	1000	1000	1000
	アーク電圧 (V)	L	35	35	35	35
		T	45	45	45	45
	溶接速度 (cm/min)		50	50	50	50
	パス間温度 (°C)		未測定			
40mm	溶接電流 (A)	L	1500	1500	1500	1500
		T	1200	1200	1200	1200
	アーク電圧 (V)	L	36	35	35	35
		T	45	44	45	45
	溶接速度 (cm/min)		37	37	37	37
	パス間温度 (°C)		33	78	154	160
50mm	溶接電流 (A)	L	1600	1600	1650	1600
		T	1300	1300	1300	1300
	アーク電圧 (V)	L	35	37	36	37
		T	45	44	46	46
	溶接速度 (cm/min)		35	35	35	35
	パス間温度 (°C)		33	90	160	180

L:先行電極 T:後行電極

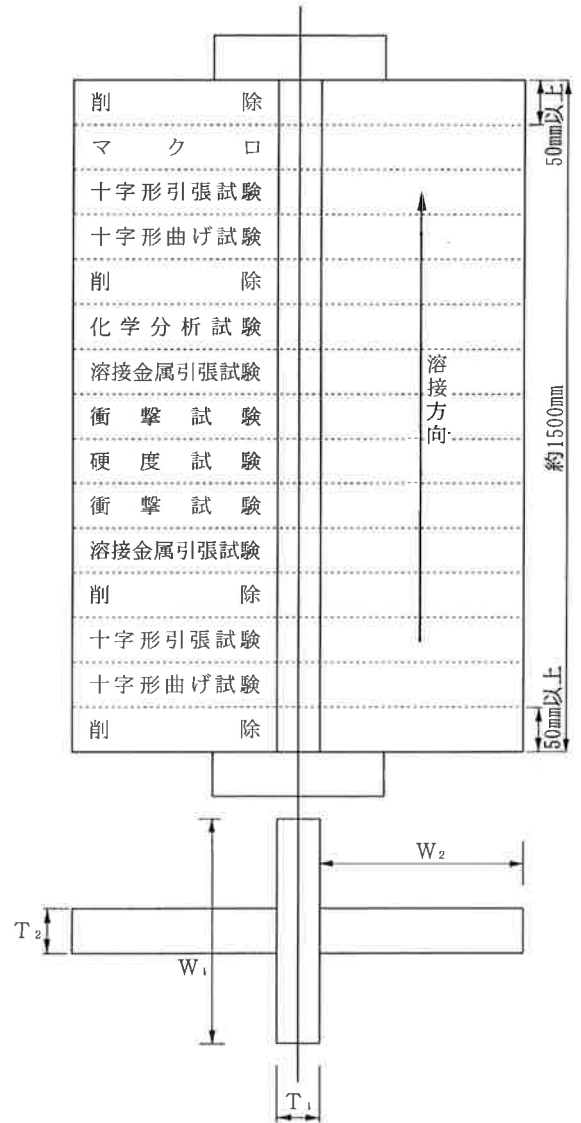


図-3 試験体形状と試験片採取位置

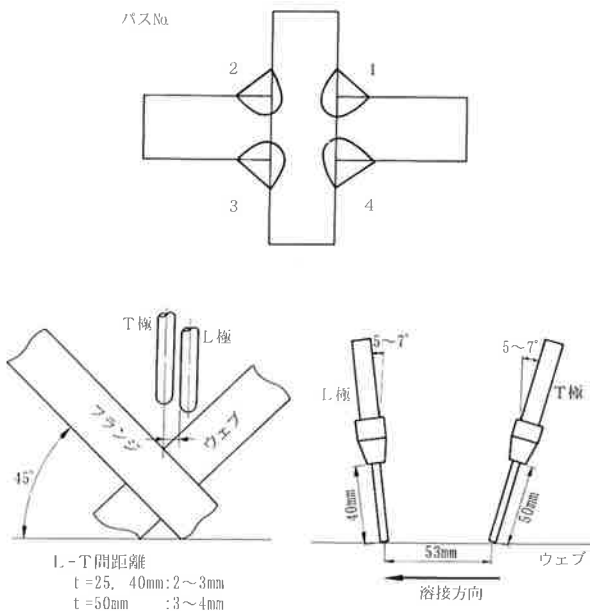


図-2 電極配置図

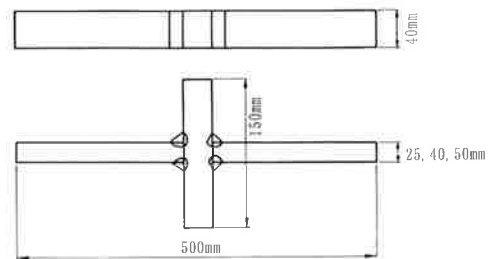


図-4 十字引張試験片

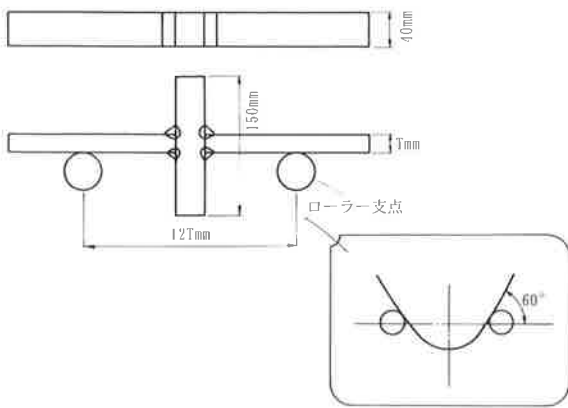


図-5 十字曲げ試験片

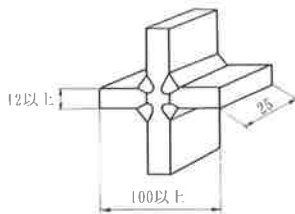


図-6 すみ肉溶接マクロ試験片

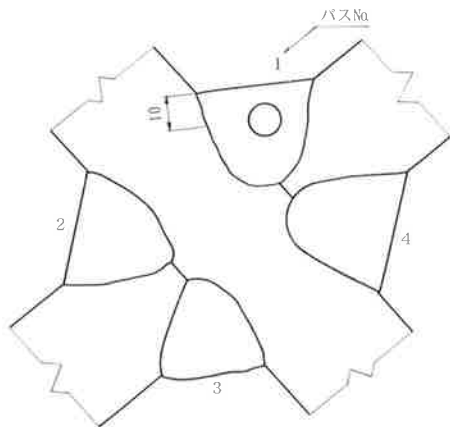


図-7 丸棒引張試験片採取位置

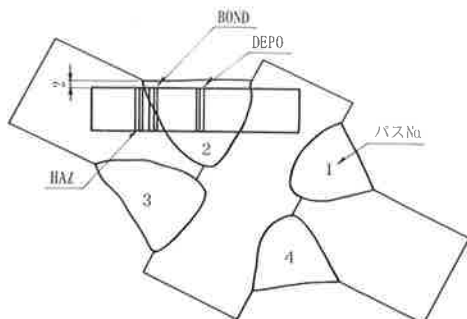


図-8 衝撃試験片採取位置

2. 試験結果

1) 外観検査

各継手の溶接部を「鉄骨精度検査基準」に準拠して検査を行った。その結果、3つの継手とも余盛り高さ、アンダカットなどはすべて許容範囲内であった。また、表面には割れ、ピットなどの発生はなく健全であった。

2) マクロ組織

写真-1, 2, 3に各板厚の十字形すみ肉溶接継手の断面マクロ組織を示す。板厚25mmのマクロ組織では、4ビードとも板厚の1/3以上の溶込み深さを確保できていたが、他の2つの継手の断面マクロ組織では、溶込み深さは板厚の1/3未満であった。

これらの溶込み不足の原因は、後述の補足実験で明らかのように、先行電極の狙い位置のずれにあった。また、割れ、融合不良およびスラグ巻き込みなどの欠陥は生じていない。

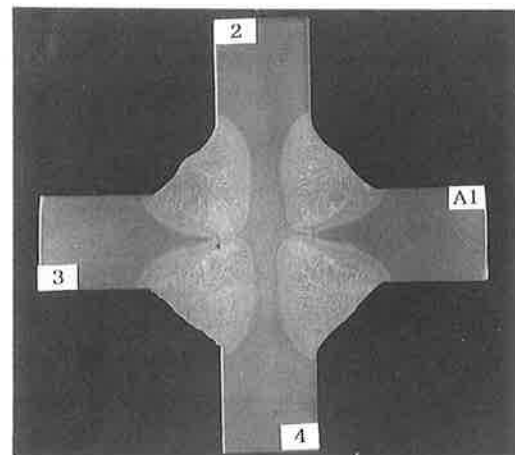


写真-1 25mm 板厚断面マクロ組織

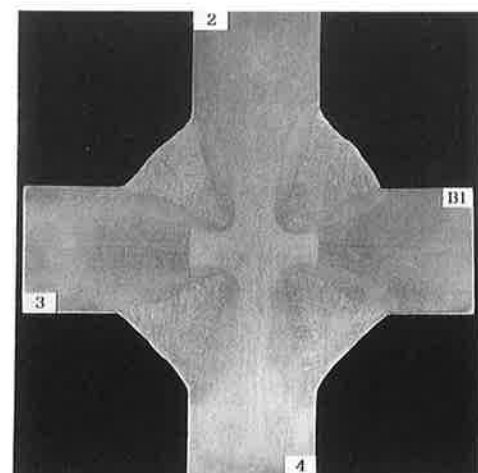


写真-2 40mm 板厚断面マクロ組織

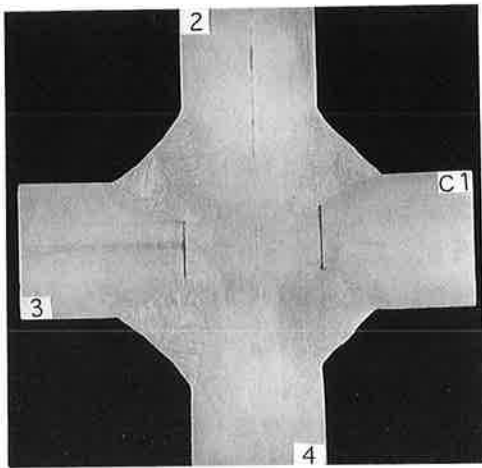


写真-3 50mm 板厚断面マクロ組織

3) 溶接金属の化学成分

表-5に各板厚の十字継手溶接金属の化学成分分析結果を示す。C量は0.11~0.13%の範囲で、かつ、SおよびPのレベルも低く、溶接金属の高温割れに対して安全側にある。

4) 溶着金属の引張試験結果

表-6に各継手の溶接金属から採取した溶着金属の引張試験結果を示す。板厚により溶接金属の大きさは異なるが、本試験では試験片形状をA2号に統一している。

いずれの試験片においても明瞭な降伏現象を示し、上降伏点および下降伏点が現れた。また、強度面では板厚25, 40mmの溶接金属の降伏点レベルは500N/mm²弱、引張強さは600N/mm²弱でほぼ同じである。これに対し、板厚50mmの溶接金属のそれらは、約450N/mm²および約570N/mm²で強度は少し低下している。

表-5 溶接金属の化学成分 (Mass%)

板厚	C	Si	Mn	P	S
25mm	0.11	0.34	1.43	0.016	0.004
40mm	0.13	0.33	1.44	0.016	0.005
50mm	0.11	0.34	1.38	0.012	0.004

表-6 溶着金属の引張試験結果

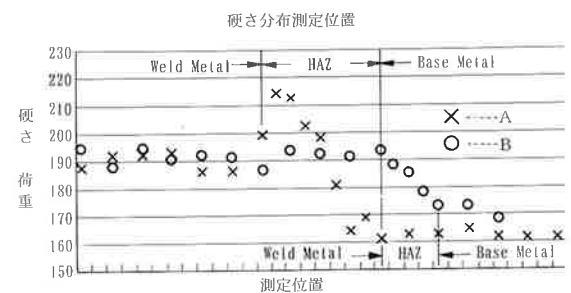
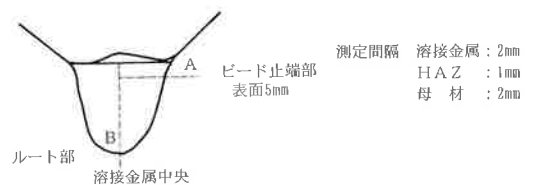
板厚	上降伏点 (N/mm ²)	下降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)	絞り (%)
25mm	491	490	590	31.7	69.3
	490	490	592	28.4	68.1
40mm	498	492	605	26.2	64.8
	487	485	594	23.5	65.1
50mm	456	449	565	23.7	65.7
	460	457	566	31.3	65.4

5) 衝撃試験結果

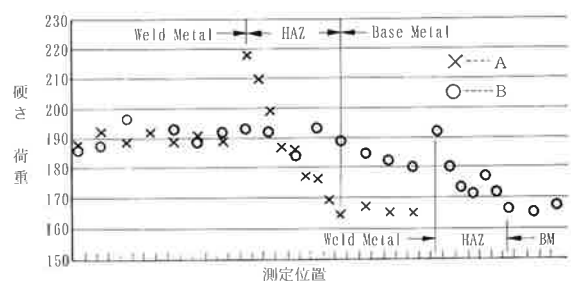
表-7に各継手溶接部の衝撃試験結果を示す。試験温度は0℃である。ノッチ位置別のシャルピー吸収エネルギーは溶接金属が最も低位であるが、いずれの継手においてもSM490Bの規格値27Jを15J程度上まわっている。

6) 硬さ分布

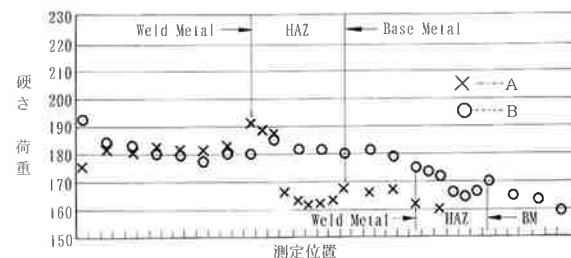
図-9に各継手の硬さ分布を示す。測定箇所は溶接金属から母材にかけて、一方向はビード止端部へ、他はルート部へ方向である。最高硬さを示す領域は止端部ポンド近傍で、硬さH_vは板厚25



板厚25mm継手の硬さ分析



板厚40mm継手の硬さ分析



板厚50mm継手の硬さ分析

図-9 十字形すみ肉継手の硬さ分布

表-7 溶接金属の衝撃試験結果 (VE₀₁)

ノッチ位置 継手区分	溶接金属		ボンド		熱影響部		
	吸収エネルギー キ - (J)	脆性破 面率 (%)	吸収エネルギー キ - (J)	脆性破 面率 (%)	吸収エネルギー キ - (J)	脆性破 面率 (%)	
25mm (1)	41	70	130	30	237	0	
	(2)	55	60	128	30	239	0
	(3)	47	65	123	35	244	0
	(平均)	48	65	127	32	240	0
40mm (1)	43	70	84	60	175	15	
	(2)	45	70	77	55	162	20
	(3)	41	75	85	60	180	10
	(平均)	43	72	82	58	172	15
50mm (1)	43	65	156	20	255	0	
	(2)	54	55	123	25	274	0
	(3)	49	55	67	35	276	0
	(平均)	48	58	115	27	266	0

mmおよび40mmの継手で220程度、板厚50mmの継手で200となった。さらに母材の硬さに比較し硬度低下は見られず、軟化域は認められなかった。硬さを評価する際の一般的な目安であるHv_{max}×370以下に比較し、十分下まわっており硬化していないと考えられる。

7) 十字形すみ肉溶接継手引張試験結果

各板厚の継手引張試験をそれぞれ2本ずつ行った。試験方法は、JASS6に規定されている合否判定基準の継手強度 (表-8参照) 以上の強度があることを確認後、破断まで試験を行い最高荷重を求めた。試験結果を表-9に示す。

溶込みが比較的浅い板厚50mmの継手では、2つの試験片とも溶接金属で破断しており、部分溶込みのルート部とビード止端部に塑性が集中しているのが確認された。溶込みが各ビードとも板厚の

表-8 すみ肉溶接継手強度と判定基準値との比較

継手区分	平均脚長 (mm)	溶接長 (mm)	すみ肉溶接継 手強度 (N/mm ²)	判定基準値 (N/mm ²)	合否
25mm	17.4	40.1	504	396 (40.4)	合格
	17.5	40.2	503		"
40mm	22.8	40.0	648		"
	23.0	40.0	644		"
50mm	24.6	40.0	683		"
	24.6	40.0	680		"

判定基準値 = $\frac{1.4 \times \sigma_n}{\sqrt{3}}$ σ_n : 公称引張強さの下限値 (本試験はSM490)
()内の数字はkgf/mm²

すみ肉溶接継手強度 = $\frac{0.7 \times \text{最大荷重}}{8 \text{ 個の脚長の平均値} \times \text{溶接長}}$

板厚50mm No. 1試験片の計算例
(最大荷重は表-9より960KNである)

すみ肉溶接継手強度 = $\frac{0.7 \times 960000}{24.6 \times 40} = 683 \text{ (N/mm}^2\text{)}$
= 69.6 (kgf/mm²)

表-9 十字形すみ肉溶接継手引張試験結果

継手区分	降伏荷重 (KN)	降伏点 (N/mm ²)	引張荷重 (KN)	引張強さ (N/mm ²)	破断位置
25mm	344.2	345.2	501.6	503.1	母材
	346.2	346.2	502.6	503.1	母材
40mm	559.0	347.2	845.3	525.6	母材
	—	—	847.3	529.6	母材
50mm	670.8	332.4	960.0	475.6	溶接金属
	678.6	335.4	955.2	471.7	溶接金属

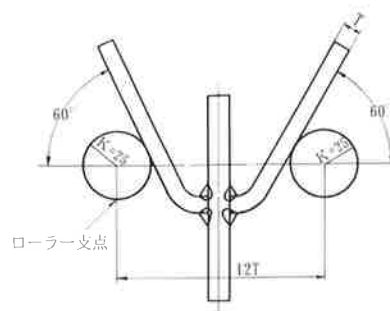
1/3以上あった25mm厚の継手および多少不足気味の40mm厚の継手は母材で破断しており、強度も供試鋼板のレベルを確保している。

8) 十字形すみ肉溶接継手曲げ試験結果

試験結果を表-10に示す。各板厚の継手とも、曲げ角度60°まで曲げ外面の溶接金属およびビード止端部に欠陥は発生せず、良好な延性を示した。

表-10 十字形すみ肉溶接継手の曲げ試験結果

継手区分	曲げ角度	評価結果
25mm	60°	無欠陥
"		"
40mm		"
"		"
50mm		"



3. 考 察

各板厚の十字形開先なしすみ肉溶接継手の試験体を、下向き角度45°姿勢にて製作した。また、継手性能の評価はJASS6日本建築学会規準に従って行った。その結果、板厚50mmを除きすべての試験項目で満足すべきものが得られた。今回の溶接継手のマクロ組織で溶込み状態を測定し、整理したものが表-11である。

表-11 溶込み深さおよびのど厚 (mm)

継手区分	測定項目	ビード番号			
		ビード1	ビード4	ビード2	ビード3
25mm	溶込深さ	9.5	10.0	10.5	10.2
	のど厚	19.1	18.7	20.0	18.3
40mm	溶込深さ	11.0	12.0	8.5	10.5
	のど厚	23.4	23.1	21.8	22.5
50mm	溶込深さ	10.0	16.0	10.5	14.0
	のど厚	22.2	24.5	25.3	25.1

この結果から明らかなように、溶込みは板厚25mmの継手においては十分な値である。これに対し、板厚40および50mmの継手の溶込みは相対的に小さい値になっている。一方、のど厚は各板厚の継手とも十分な値が得られている。

溶込み形状と十字形すみ肉溶接継手引張試験結果とを対応させると、表-8に示すように各継手とも判定基準値の1.5倍程度の強度を有し、良好な結果である。これはのど厚が確保されているからである。また、板厚50mmの継手の破断位置が溶接金属となったのは、溶込みが浅く未溶着部が相対的に大であったためである。板厚40mmの継手の未溶着部比率は板厚50mmのそれより大きい、母材破断を呈している。これには塑性拘束、ルート部の形状に歪み集中の影響などにも左右されたと推察される。

溶込み深さなどのビード形状に関しては、溶接条件とくにワイヤの狙い位置で改善できる可能性が大である。このことを実証するため、再確認試験として板厚50mmの鋼板を用い、十字形すみ肉溶接継手を製作し、断面マクロ組織でビード形状を調査した。さらに、ウェブ厚55mmのT形すみ肉溶接の適性溶接条件を求めた。

以下にその結果について述べる。

1) 溶接条件変更による溶込み深さの改善

供試鋼板は前述のとおりで、溶接材料は同材のフラックス(KB-U)、ワイヤ(KW-50、先行電極4.8φ、後行電極6.4φ)である。電源も同機種を使用している。変更した溶接条件を表-12に、電極配置を図-10に示す。

写真-4からワイヤ電極の狙い位置の変更により、溶込み方向が好ましい方向となっていることが観察される。また、表-13に示されるように、溶込み深さは平均で1.5倍程度大きくなっており、かつ、値が安定している。

表-12 変更した溶接条件

使用板厚	電極	電流(A)	電圧(V)	溶接速度(cm/min)	入熱量(KJ/cm)	L極シフト量(mm)	
						改善後	改善前
50mm	L	1700	39	35	211	8	3~4
	T	1350	42				

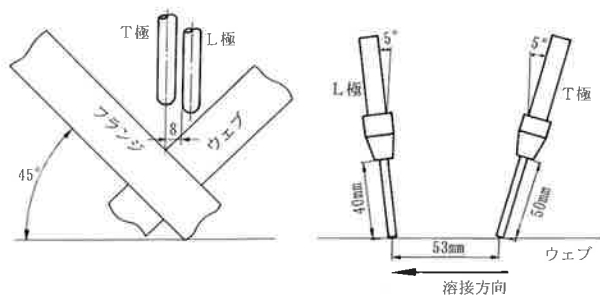


図-10 電極配置図

表-13 改善ビードの形状

施工法	測定項目	ビード番号				未溶着部長さ	
		1	4	2	3	1-4	2-3
改善後	溶込深さ	19.5	20.5	20.0	19.0	10.5	11.0
	のど厚	33.6	34.0	34.0	29.4		
改善前	溶込深さ	10.0	16.0	13.5	14.0	23.0	22.5
	のど厚	22.2	24.5	25.3	25.1		

このようなビード形状が得られるならば、十字形すみ肉溶接継手の引張試験で、溶接金属での破断が生じることもなくなる。また、両施工で溶接入熱量はほぼ同じであり、母材に与える熱影響に変化はないといえる。

2) ウェブ厚55mmのT形すみ肉溶接条件の検討 (ビード形状)

供試鋼板はSM490Bでウェブ材の板厚55mm、フランジ材の板厚80mmである。溶接材料にはフラック

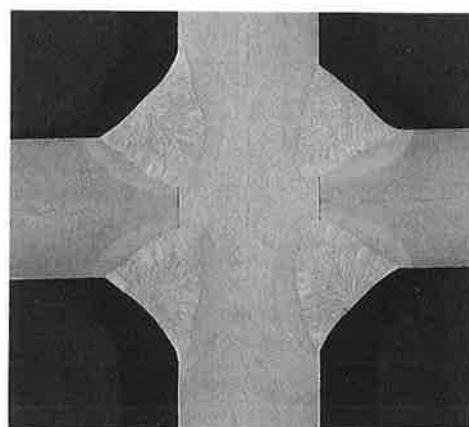


写真-4 改善ビードの断面マクロ組織

表-14 T形すみ肉溶接条件

パス位置	電極	溶接電流 (A)	溶接電圧 (V)	溶接速度 (cm/min)	入熱量 (KJ/cm)	L極シフト (mm)
第1ビード	L	1800	41	30	272	9
	T	1450	43			
第2ビード	L	1900	42	30	290	
	T	1450	45			

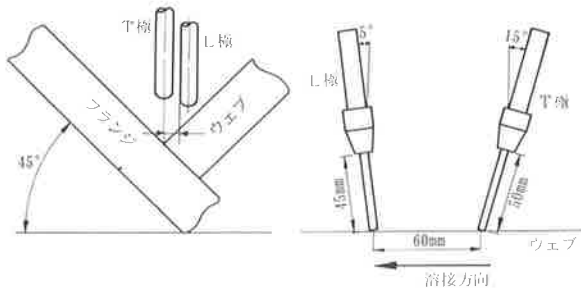


図-11 電極配置図

スがKB-U、ワイヤがKW-50(先行電極4.8mmφ、後行電極6.4mmφ)を使用している。溶接条件および電極配置を表-14および図-11に示す。

上記の溶接条件で施工したT形すみ肉溶接継手の断面マクロ組織を写真-5に示す。深溶込みになるに従い発生傾向を増す割れはなく、ビード止端部はアンダーカットもない健全な溶接である。最も重要な溶込み深さは第1ビードで23.5mm、第2ビードで25.5mmと板厚の1/3の18.3mmに対し、十分な溶込みを有している。本試験で得られた溶接金属の化学成分を表-15に示すが、両ビードともC量は低く高温割れの懸念はない。溶接入熱量は板

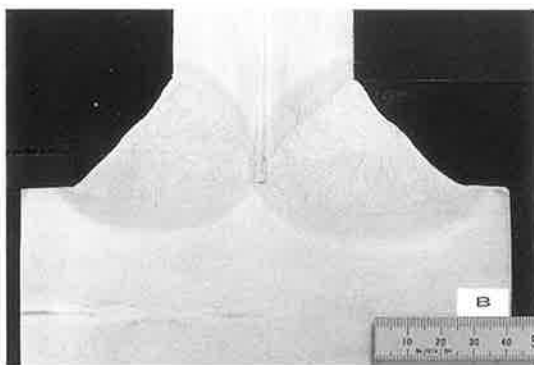


写真-5 T形継手部の断面マクロ組織

表-15 T形すみ肉溶接金属の化学成分(Mass%)

鋼板	パス位置	C	Si	Mn	P	S
鋼板	ウェブ	0.161	0.38	1.48	0.016	0.002
	フランジ	0.167	0.36	1.52	0.017	0.003
溶接金属	第1ビード	0.106	0.35	1.54	0.017	0.004
	第2ビード	0.110	0.34	1.51	0.016	0.004

厚50mmに比べ、272KJ/cmと約30%程度大きくなっているが、母材への影響を考慮しても採用可能範囲内である。今後、継手の諸特性を確認の上、実施工への採用が期待される。

4. 結論

板厚25、40および50mmの鋼板を用いて、下向き角度45°姿勢によって、開先なし十字形すみ肉溶接継手を製作し、諸特性を確認した。また、本試験の結果をふまえて、さらに板厚50mmと55mmの追加試験を併せて行い、以下の結論を得た。

- ①「鉄骨精度検査基準」により外観検査を行い、全項目とも許容範囲内で、健全であることを確認した。
- ②溶接金属中のC、S、Pは低く、入熱量の大きい溶接金属にありがちな高温割れの発生は見られなかった。また、溶接金属の強度および延性も十分であった。
- ③マクロ組織は割れや融合不良などの欠陥はなく、ビード止端部も良好であった。
- ④各継手の硬さ分布はボンド域でも硬化が少なかった。
- ⑤継手各部の衝撃試験の吸収エネルギーはいずれの板厚においても、溶接金属の値がボンドおよびHAZに比べ低い。しかし、要求値27Jに対し15J以上高い値を示した。
- ⑥十字形継手引張試験では、いずれの板厚もJASS6に規定された引張強さを満足した。
- ⑦十字形継手曲げ試験では、曲げ角度60°まで欠陥の発生はなく良好な延性を示した。
- ⑧溶込み深さについて板厚50mmで再確認試験を行い、先行電極のシフト量を変更することにより溶込みが増し、各ビードで十分な溶込みを確保できることが判明した。この改善策は、板厚40mmの継手においても採用できるものである。
- ⑨ウェブ厚55mmのT形すみ肉溶接の条件を検討し、ビード形状など施工面では採用の見通しを立てた。継手確性を行えば、実施工の可能性は大である。

あ と が き

厚板材のすみ肉溶接を行う際に開先加工を省略できる工数低減のメリットは大きく、さらに今回の施工試験により開先加工を行った場合と同程度の溶接品質および継手性能を得られることが確認できた。

今後は板厚50mmおよび55mmクラス、さらにはそれ以上の極厚化された母材への要求性能を安定的に満たす溶接施工条件の確立を目指して行きたい。

最後に、今回の施工試験にあたり全面的なご指導とご協力を頂いた川崎製鉄株式会社と川鉄テクノロジー株式会社の関係各位に感謝の意を表します。