鋼橋製作におけるすみ肉溶接予熱条件の考察*

南 邦明**, 糟谷 正***, 三木千壽****

Preheat conditions of Fillet Weld for steel bridge fabrication*

By MINAMI Kuniaki**, KASUYA Tadashi*** and MIKI Chitoshi****

According to the specification for Highway Bridges, the preheat temperature is determined by thickness of plate, PCM and diffusible hydrogen. The standard of the minimum preheat temperature has been determined based on the results of y-groove weld cracking test. Therefore, it is considered to require the superfluous preheat temperature, when this standard is applied to the fillet welding. However, the discussion of preheat temperature with the results of fillet weld cracking test has been still insufficient. In this paper, to discuss the standard for fillet welding, we examine the cold cracking susceptibility and the HAZ hardness distributions of the fillet welds using 50mm thick plates whose PCM ranges from 0.24% to 0.27% with various preheat temperatures. Using the present results, we propose a modified standard of the minimum preheat temperature for fillet welding.

Key Words : fillet weld, minimum preheat temperature , weld crack, hydrogen, PCM

1. 緒 言

鋼橋製作において、溶接割れを防止するため、道路橋示方書¹⁾には、予熱に関する基準が示されている。予熱基準の条文では、「鋼種、板厚及び溶接方法に応じて、溶接線の両側100mm及びアークの前方100mm範囲の母材をTable1により予熱することを標準とする。」と示されている。この前提条件として、Table2に示す鋼材のP_{CM}を前提に予熱温度の標準が設定されている。すなわち、各鋼材における想定されるP_{CM}の上限値で基準が決められているので、安全側の予熱条件となっている。ただし、解説中には、Table3に示すように、使用する鋼材のP_{CM}値により予熱温度を緩和できることが示されている。

この予熱基準は、以下に示す作業条件を設定し、伊藤^{2),3)}らが提案した算定式(1)を用いて、予熱温度を求めている。予熱温度算定式(1)が発表される以前は、溶接割れはCeqあるいは硬さに依存すると考えられており、P_{CM}という新たな化学成分に関する指標が見いだされたことは画期的であった。さらに、拡散性水素量、継手拘束を考慮したことで予熱温度をより精度よく算出することが可能となった。また、

【予熱温度算定式】

$$Tp=1440 \left\{ P_{CM} + \frac{H_{GL}}{60} + \frac{K}{400000} \right\} - 119 \quad (1)$$

Tp : 予熱温度(K)
K : 継手の拘束度(200t N/mm・mm : tは板厚)
H_{GL} : 拡散性水素量(グリセリン法)
(SMAW : 2ml/100g, SAW and GMAW : 1ml/100g,)

* 受 付 日	平成18年5月22日 受理日 平成18年11月9日 平成18年度春季全国大会で発表
** 正 員	元(株)サクラダ (現(独)鉄道・運輸機構) Member, Japan Railway Construction, Transport and Technology Agency.
*** 正 員	新日本製鐵(株) Member, Nippon Steel Corporation.
**** フェロー	東京工業大学 Fellow, Tokyo Institute of Technology.

この算定式は単純化されており使用が容易で、この論文が発表されて約36年を経過した現在でも、予熱温度算定式(1)が広く用いられている。建築鉄骨の基準でも、拘束度などの前提条件は道路橋示方書とは異なるが、(1)式を用いて予熱温度を設定している⁴⁾。しかし、この算定式でも、高精度な予熱温度を算出するには適用範囲が限定されている。これは、伊藤らの研究ではy形割れ試験で行っているの、基本的には拘束状態の大きい突合せ溶接を対象としているためである。また、入熱量が1700J/mm(溶接サイズは約6mm)のみで検討されている。このため、予熱温度算定式(1)をすみ肉溶接に適用した場合、精度が落ちことが予想される。また、入熱量(溶接サイズ)はパラメータに含めていないので、1700J/mmを超える入熱量で行えば過剰な予熱温度となると言った課題もある。著者の一人は、この問題に対し入熱量をパラメータに取り入れた予熱温度算定式を提案している⁵⁾。この算定式は、チャート方式による予熱温度算定式と呼ばれ、伊藤らの式よりさらに精度が向上している。ただし、この算定式もy形割れ試験で行っており、すみ肉溶接は考慮されていない。

著者らは、道路橋示方書で示されている最小すみ肉溶接サイズの基準を考察するため、溶接割れに対し非常に厳しい作業条件{予熱なし、小溶接サイズ(4mm)、厚板(50mm)、高P_{CM}(0.272)、高水素(H_{GC}(ガスクロマトグラフ法)≒15ml/100g)}で、合わせて44体の試験体を用いてすみ肉溶接割れ試験を実施した⁶⁾。これらの結果より、P_{CM}が0.205～0.272、拡散性水素量が5～15ml /100gの範囲で、予熱を行わないで溶接割れが発生しない限界値を把握することはできた。しかし、予熱を行った場合の割れ発生限界点を把握しておらず、すみ肉溶接における予熱条件を考察するに到ってはいない。また、これらの試験結果では、具体的には示さなかったが、伊藤^{2),3)}らの算定式で割れの発生を想定して試験条件を設定したが、想定していたほど溶接割れは発生

Table 1 Standard of Preheat temperature

Using steel	Welding method	Preheat temperature			
		Plate thickness (t)(mm)			
		t≤25	25<t≤40	40<t≤50	50<t≤100
SM400	SMAW(Non low H)	Without	323K(50°C)	—	—
	SMAW(Low H)	Without	Without	323K(50°C)	323K(50°C)
	SAW,GMAW	Without	Without	Without	Without
SMA400W	SMAW(Low H)	Without	Without	323K(50°C)	323K(50°C)
	SAW,GMAW	Without	Without	Without	Without
SM490	SMAW(Low H)	Without	323K(50°C)	353K(80°C)	353K(80°C)
SM490Y	SAW,GMAW	Without	Without	323K(50°C)	323K(50°C)
SM520	SMAW(Low H)	Without	353K(80°C)	353K(80°C)	373K(100°C)
SM570	SAW,GMAW	Without	323K(50°C)	323K(50°C)	353K(80°C)
SMA490W	SMAW(Low H)	Without	353K(80°C)	353K(80°C)	373K(100°C)
SMA570W	SAW,GMAW	Without	323K(50°C)	323K(50°C)	353K(80°C)

Table 2 Conditions of P_{CM} on Preheat temperature

鋼種	Plate Thickness (t) (mm)		
	t≤25	25<t≤50	50<t≤100
SM400, SMA400W	≤0.24	≤0.24	≤0.24
SM490, SM490Y	≤0.26	≤0.26	≤0.27
SM520, SM570	≤0.26	≤0.27	≤0.29
SMA490W, SMA570W	≤0.26	≤0.27	≤0.29

しなかった。これは、y形割れ試験体とすみ肉溶接割れ試験体では、拘束度が異なるだけでなく、溶接による変形や、溶接の熱伝達に伴う冷却速度も異なるので、必ずしもy形割れ試験で得られたデータとすみ肉溶接割れ試験で得られたデータとは一致しなかったものと考えられる。すなわち、すみ肉溶接における予熱条件を検討するには、すみ肉溶接割れ試験データでこれを検討する必要があるものと考えられる。しかし、これまで、すみ肉溶接割れ試験結果を報告されたケースは少なく^{7),8),9)}、さらに、すみ肉溶接割れ試験結果を用いてすみ肉溶接における予熱条件を検討した報告はない。

本研究は、鋼橋製作におけるすみ肉溶接の予熱条件を提案することを目的に、予熱温度、溶接サイズ、P_{CM}および拡散性水素量をパラメータとし、すみ肉溶接割れ試験を実施した。そして、伊藤らの予熱温度算定式(1)による予熱温度とこれらの割れ試験結果(前報⁶⁾の割れ試験結果を合わせて)を比較した上で、すみ肉溶接の予熱条件を考察した。

2. すみ肉溶接割れ試験方法および要領

2.1 試験体の説明

試験体は、前報⁶⁾と同様、Fig.1 に示す日本海事協会鋼船規則¹⁰⁾の「1パス水平すみ肉溶接の試験法」に示されているT継手試験体を用いた。試験体の組み立ては、6mm サイズでGMAWを用いて行った。また、溶接割れに着目する400mm溶接範囲のフランジとウェブ間は、1mmのギャップを設けた。なお、JISでは、溶接割れ試験法として、y形溶接割れ試験法が示されているが¹¹⁾、先に述べたように、この試験法は突合せ溶接を対象としたものであるため、本研究では日本海事協会鋼船規則に則って行った。

Table 3 Relationship between P_{CM} and Preheat temperature

P _{CM}	Welding Method	Preheat temperature(°C)		
		Plate thickness (t)(mm)		
		t≤25	25<t≤40	40<t≤100
0.21	SMAW(Low H)	Without	Without	Without
	SAW,GMAW	Without	Without	Without
0.22	SMAW(Low H)	Without	Without	323K(50°C)
	SAW,GMAW	Without	Without	Without
0.23	SMAW(Low H)	Without	Without	323K(50°C)
	SAW,GMAW	Without	Without	Without
0.24	SMAW(Low H)	Without	Without	323K(50°C)
	SAW,GMAW	Without	Without	Without
0.25	SMAW(Low H)	Without	323K(50°C)	323K(50°C)
	SAW,GMAW	Without	Without	323K(50°C)
0.26	SMAW(Low H)	Without	323K(50°C)	323K(50°C)
	SAW,GMAW	Without	Without	323K(50°C)
0.27	SMAW(Low H)	323K(50°C)	353K(80°C)	353K(80°C)
	SAW,GMAW	Without	323K(50°C)	323K(50°C)
0.28	SMAW(Low H)	323K(50°C)	353K(80°C)	373K(100°C)
	SAW,GMAW	323K(50°C)	323K(50°C)	353K(80°C)
0.29	SMAW(Low H)	353K(80°C)	373K(100°C)	373K(100°C)
	SAW,GMAW	323K(50°C)	353K(80°C)	353K(80°C)

SMAW: Shielded Metal Arc Welding SAW: Submerged Arc Welding
GMAW: Gas Metal Arc Welding Low H: Low Hydrogen electrode

2.2 使用材料

使用鋼材をTable4に示す。フランジ材(底板)は板厚50mmとし、鋼H～鋼Jの3鋼材を用いた。これらの鋼材のP_{CM}は0.241%～0.274%であり、著者らの調査結果¹²⁾によると橋梁で使用されるP_{CM}の上限値付近の鋼材が多く用いられていることとなる。次に、ウェブ材(縦板)については、ウェブ側から割れを発生させないように、P_{CM}が低い鋼材を用い、板厚を12mmとした。なお、ウェブ板厚12mmは、前報で示したように、溶接割れが発生し易い板厚であることがわかっている。

溶接材料は、Table5に示す被覆アーク溶接(SMAW)用の溶材W1～W4の4種類を使用した。これらの溶接材料は、拡散性水素量の高い試作品である。なお、W1～W3の溶材の金属成分は全く同じものであるが、試作条件を変えることにより水素量を変化させたものである。

溶接割れ試験に先立ち、Table6に示す作業条件で水素量の計測を行った。Table7にはJISZ3118に則ってガスクロマトグラフ法(H_{GC})を用いた拡散性水素量の計測結果を示す。水素量は、作業条件によって計測値にばらつきがあるが、本計測結果から、溶材W1,W2,W3,W4の拡散性水素量は、それぞれ約11,12,15,30ml/100gと判断できる。

2.3 試験体の名称およびパラメータ

本試験では、鋼材のP_{CM}、溶接サイズ(入熱量)、拡散性水素量および予熱温度をパラメータとして、すみ肉溶接割れ試験を実施することとした。試験体名称およびパラメータをTable8に示す。

溶接サイズは6, 8mmの2サイズとした。溶接法はSMAWを用いて、Table7に示した拡散性水素量を約11,12,15,33ml/100gの4ケースで行った。また、予熱条件は、

Table4 Mechanical properties and chemical compositions of used steel

Used steel	Thickness (mm)	Tensile test (N/mm ²)		Chemical compositions (mass %)													P _{CM} (%)	C _{eq} (%)
				YP	TS	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Nb	V		
Flange	H	50	334	512	0.15	0.44	1.50	0.015	0.002	0.01	0.01	0.02	0	0	0	0	0.241	0.423
	I		390	561	0.16	0.47	1.44	0.010	0.002	0.01	0.02	0.02	0	0.04	0.06	0	0.256	0.429
	J		394	554	0.18	0.38	1.46	0.008	0.002	0.01	0.02	0.02	0	0	0.06	0	0.274	0.449
Web	V1	12	588	660	0.07	0.29	1.55	0.007	0.002	0.01	0.4	0.02	0	0.02	0.06	0	0.171	0.359

Table5 Mechanical properties and chemical compositions of welding materials

Covered electrode	Tensile test (N/mm ²)		Chemical compositions (mass %)				
	YP	TS	C	Si	Mn	P	S
W1	470	540	0.07	0.19	1.44	0.021	0.008
W2							
W3							
W4	460	520	0.07	0.39	0.76	0.017	0.010

Fig.1 Welded specimen**Table6** Conditions of diffusible hydrogen measurement

Covered electrode	Case No.	Welding method	Welding conditions			Atmosphere	
			Current (A)	Voltage (v)	Speed (cm/min)	Temperature (°C)	Humidity (%)
W1	1	SMAW	185	25	15	293K (20°C)	60
	2		298				
W2	1		185				
	2		298				
W3	1		185				
	2		298				
W4	1		185				

Table7 Results of diffusible hydrogen measurement (H_{GC})

Covered electrode	Case No.	Diffusible hydrogen (ml/100g)						Judgement
		First	Second	Third	Fourth	Average		
W1	1	10.4	11.9	10.6	10.1	10.8	≈ 11	
	2	11.1	11.5	11.4	10.2	11.1		
W2	1	11.3	11.2	12.5	12.6	11.9	≈ 12	
	2	12.5	12.7	12.9	12.9	12.7		
W3	1	15.2	14.8	13.3	15.7	14.8	≈ 15	
	2	14.2	15.8	13.6	13.0	14.2		
W4	1	34.6	32.4	32.6	33.3	33.2	≈ 33	

Table 8 Specimen and Parameter of tests

Specimen	Welding size (mm)	Used material						Preheat
		Flange plate		Web plate		Covered electrode		
		Name	P _{CM}	Name	P _{CM}	Name	H _{GC}	
H6H-F	6	H (50mm)	0.24	V1 (12mm)	0.17	W3	15ml	Without
H6H-50	6							323K(50℃)
H6B-50	6					W4	33ml	323K(50℃)
I6M-F	6	I (50mm)	0.26					Without
I6M-50	6					W1	11ml	323K(50℃)
I8M-F	8							Without
I6N-F	6					W2	12ml	Without
I8N-F	8							Without
I6H-F	6					W3	15ml	323K(50℃)
I6H-50	6							Without
I8H-F	8					W4	33ml	323K(50℃)
I6B-50	6	J (50mm)	0.27					Without
J6M-50	6					W1	11ml	323K(50℃)
J8M-50	8							323K(50℃)
J6N-F	6					W2	12ml	Without
J8N-F	8							Without
J6H-50	6					W3	15ml	323K(50℃)
J8H-50	8			323K(50℃)				
J6B-50	6			W4	33ml	323K(50℃)		

(Explanation of specimen)

Welding size : 6~8mm

Used steel : H~J → H6M-F ← Preheat : F(Without)
 Hydrogen: M(11ml), N(12ml), H(15ml), B(33ml)

Table9 Conditions of weld cracking tests

Welding size (mm)	Welding method	Welding conditions			Heat input (J/mm)
		Current (A)	Voltage (V)	Speed (cm/min)	
6	SMAW	210	25	22.5	1400
8		320			2133

(a) Macro structure test

(b) Line of Vickers hardness test

Fig.2 Macro structure test and Vickers hardness test

予熱フリー、323K(50°C)の2条件を適用した。以上の条件に対して、鋼H~鋼Jの3鋼種を用い、合わせて19体の溶接施工試験を実施した。

以上のように、本試験は前報⁶⁾に比べ、P_{CM}を細分化し、拡散性水素量をさらに高く、また予熱を加えたことが大き

く異なる。

2.4 溶接施工試験の実施要領

溶接作業は、室温 293K(20°C)湿度 60%を一定に保ち、Table9に示す条件で、SMAW(グラビティー溶接)で行った。

Fig.3 Photograph of weld crack I

Fig.4 Photograph of weld crack II

また、溶接作業は、水素を十分拡散させるため、第 1 ビード終了後 48 時間経過した後に第 2 ビードの溶接を行った。さらに 48 時間以上経過した後に、Fig.2(a)に示すように約 80mm 間隔で試験体を 5 分割し、1 つの試験体でマクロ試験片を 5 個採取し、10~40 倍のルーペを用いて 1 試験体につき 10 箇所(左右合わせて)の割れ観察を行った。さらに、鋼 I では、Fig.2(b)に示すように、第 1 ビードと第 2 ビードの表面から 2mm 位置におけるビッカース硬さ試験を行った。また、冷却速度の影響を調べるため、溶接サイズ 6mm と 8mm に対し、予熱を行ったときの温度を計測した。なお、計測は 1 ケースにつき各 2 箇所行った。温度計測は、白金-白金ロジウム熱電対を熔融プールに挿入する方法で行った。

3. すみ肉溶接割れ試験結果

3.1 溶接割れ試験結果

Table10 に溶接割れ試験結果を示す。Table10 には、各試験体における割れ発生の有無、詳細な割れ発生位置(Fig.2(a)で示した観察位置) および割れの性状を示し、さらに割れ発生率も示した。また、Fig.3,4 には溶接割れが発生した部位のマクロおよびミクロ写真の一例を示す。

溶接割れは、予熱を行わず P_{CM} が高いケースで発生した。各試験体において割れが発生した箇所は、その多くが第 1

Table10 Results of weld cracking tests

Specimen	Cracked macro structure (× :crack)											
	Crack shape	Cracked ratio	First bead					Second bead				
			①	②	③	④	⑤	①	②	③	④	⑤
H6H-F	No crack	0%										
H6H-50	No crack	0%										
H6B-50	No crack	0%										
I6M-F	Heel crack	20%					×	×				
I6M-50	No crack	0%										
I8M-F	Heel crack	10%					×					
I6N-F	Heel crack	20%					×	×				
I8N-F	Heel crack	10%						×				
I6H-F	Heel crack	20%					×	×				
I6H-50	No crack	0%										
I8H-F	Heel crack	20%					×	×				
I6B-50	No crack	0%										
J6M-50	No crack	0%										
J8M-50	No crack	0%										
J6N-F	Heel crack	30%			×	×	×					
J8N-F	Heel crack	10%					×					
J6H-50	No crack	0%										
J8H-50	No crack	0%										
J6B-50	No crack	0%										

ビード側の終端で発生し、第2ビードで発生した試験体は少なかった(I6M-Fのみ)。これらの結果は、前報と同様であった。また、発生した溶接割れは何れもヒールクラックであった。Fig.3では、HAZおよびBond部に沿って割れが進展しているが、溶接止端部には達せず、溶接止端近傍から鉛直方向に割れが進展し、溶接ビード上に現れた。次に、Fig.4では、表面には割れは発生しなかったが、溶接ルート部からHAZ部に沿って割れが進展し、溶接止端から約

Fig.5 Results of welding crack tests

Fig.6 Results of Vickers hardness tests (Size-6mm)

Fig.7 Results of cooling time measurement (Size-6mm)

0.5mmの内面で止まっていた。これらの状況から判断して、Fig.3, Fig.4の割れは、ルート部のBondあるいはHAZから発生したヒールクラックが、溶接ビード表面に現れるか、あるいは内部に止まったものと考えられる。

Fig.5は、試験結果を予熱条件および溶接サイズ別に整理し、横軸に P_{CM} 、縦軸には拡散性水素量で示した。また、予熱フリーのデータについては、前報のデータも合わせて示した。さらに、予熱フリーにおける溶接割れが発生しない安全側での境界ライン(以下、溶接割れ境界線と呼ぶ)をFig.5(a)(b)に示した。また、図中の点線は、伊藤³⁾らの予熱温度算定式(1)を用い、各予熱温度において溶接割れが発生しない拡散性水素量と P_{CM} の関係(以下、伊藤らの境界線)を示した。なお、ここでの算定条件として、拘束度 K は、道

路橋示方書で示されている $200tN/mm \cdot mm(t:50mm)$ を適用した。また、この当時の拡散性水素量の計測は、グリセリン法(H_{GL})を適用しており、ここでは、ガスクロマトグラフ法(H_{GC})をグリセリン法に変換(変換式： $H_{GC}=1.27 \times H_{GL}+2.19$)し、予熱温度算定式(1)を適用した。なお、予熱フリーの温度設定に関しては、試験温度である293K(20°C)として計算した。

Fig.5(a)は、6mmサイズにおける予熱フリーのデータである。本試験では、前報のデータに、さらに P_{CM} が0.241, 0.256, 0.274のデータを追加したが、両者ともに溶接割れ境界線の上側(割れ発生)にあり、 P_{CM} が0.256の実験結果では割れが生じる結果となった。ただし、前報では P_{CM} が0.242、水素量が15ml/100g、ウェブ板厚12mmでは割れが発

生したが、本試験結果では、 P_{CM} が0.241、水素量が15ml/100gのデータでは割れが発生せず、この近辺が本来の割れ発生境界と考えられる。このことは、Fig.5(a)で示した溶接割れ境界線は安全側で評価であることを示している。Fig.5(a)で示したすべての試験体は、伊藤らの境界線では割れ発生領域にあるが、水素量が5ml/100gでは割れは見られず、 P_{CM} が0.241、水素量が11ml/100gでは割れは発生していない。すなわち、実験結果から得られた溶接割れ境界線と伊藤らの境界線と大きな違いが生じる結果となった。

Fig.5(b)は、8mmサイズにおける予熱フリーのデータであるが、今回追加した試験体の溶接割れ発生の有無は、いずれも溶接割れ境界線に合致した結果であった。また、6mmサイズの溶接割れ境界線(Fig.5(a))と比較すれば判るが、溶接サイズ8mmの方が溶接割れは発生し難いことが判る。これは、入熱量の増加に伴い冷却時間が遅くなり、水素拡散が十分に行われたことによるものと考えられる。

Fig.5(c)は、6mmサイズにおける予熱を行ったケースのデータであるが、拡散性水素量が33ml/100gであっても予熱温度が323K(50℃)であれば、溶接割れは発生しなかった。すなわち、すみ肉溶接における予熱温度の最大値は323K(50℃)と考えてよいものと思われる。また、伊藤らの境界線と比較すると、予熱温度が353K(80℃)の算定式における溶接割れ領域であっても、本実験結果では割れが発生しない領域であることが判る。

Fig.5(d)は、8mmサイズにおける予熱を行ったケースのデータであるが、このデータでは、最も P_{CM} が高い0.274のみであるが、Fig.5(c)と同様溶接割れは発生しなかった。

3.2 ビッカース硬さ試験結果

Fig.6にビッカース硬さ試験結果を示す。この結果は、溶接割れが発生したI6M-FおよびI6H-F試験体である。Fig.6に示すように、最高硬さは330Hv程度であり、以前、道路橋示方書で示されていた基準値370Hvより小さかった。

前報で示したように、水素量が5ml/100gでは、ビッカース硬さが400Hvを超えているにも関わらず、割れは発生しなかった。また、本試験のように、ビッカース硬さが330Hv程度でも溶接割れが発生したことは、溶接割れは硬さによる影響ではなく、拡散性水素量や P_{CM} に強く依存することを示している。

3.3 温度計測結果

Fig.7に溶接サイズ6mmでの温度計測試験結果を示す。なお、予熱フリーのデータは、前報で示したデータである。Fig.7に示すように、温度473K(200℃)程度までは、予熱フリーのデータと予熱温度323K(50℃)のデータを比較しても大きな違いは生じていない。473K(200℃)経過後、予熱を行って場合では、温度変化が少なく、最終的には予熱を行えば、 t_{100} (溶融プールが凝固してから373K(100℃)までの時間)は、平均値では約2倍長くなった。なお、溶接サイズ

8mmの結果は図に示していないが、予熱フリーで111.2秒、予熱温度323K(50℃)では203.0秒であった。6mmデータと比較すれば、それぞれ約30秒、冷却時間が長くなった。

上記の結果に示すように、予熱を行えば t_{100} は約2倍となり、水素拡散が十分行えたことによって、厳しい作業条件(P_{CM} :0.274, H_{GC} :33ml/100g)であっても溶接割れは発生しない結果となったものと考えられる。

4. 考 察

4.1 溶接割れ発生原因の考察

本試験で発生した溶接割れは、水素が起因の低温割れと考えられる。これは、水素量が高く、低温割れ感受性指標である P_{CM} が高いほど割れ易い傾向があると実験結果から判断できるからである。また、予熱を行えば水素拡散が十分に行われ、割れの発生を抑制できたこともその理由の1つである。

一般に継手拘束度は溶接割れの要因である。一方、継手の拘束度は、当然のことであるが第1ビード側より第2ビード側の方が高く、拘束度から判断すると、第2ビード側から割れが多く発生すると考えられる。しかし、本試験結果ではその逆の結果であり、溶接割れが発生したのは拘束度の低い第1ビード側である。これは、すみ肉溶接割れ試験では、拘束度をy形割れ試験の場合と同じように扱うことができないことを示唆している。

4.2 本実験結果と予熱温度算定式(1)との違いの考察

前章で示したように、本溶接割れ試験結果で得られた溶接割れ境界線と伊藤らの境界線とは、大きく異なる結果となった。本節ではこの違いが生じた原因について考察する。

伊藤らの研究では、y形溶接割れ試験で行っており、突合せ溶接を対象としている。y形溶接割れ試験では、継手拘束度は溶接割れの1つの大きな支配因子である。継手拘束度とは、溶接継手のルート間隔を単位長さ短縮させるに要する単位溶接長当たりの力の大きさで定義されている。拘束度が高くなれば、溶接部の熱収縮を強く拘束するため残留応力も高くなり割れが生じ易くなる。一方、本試験のようにすみ肉溶接割れ試験は、木原⁷⁾らや田中^{8),9)}らが報告しているように、縦板の曲げ剛性が影響している割れであり、ウェブ板が厚くてもあるいは薄くても割れ発生率が下がり、ある板厚の時に割れ率が最も高くなるという特徴を持つ。実際、著者らによる以前の試験結果⁶⁾では、ウェブ材が19mmの場合より12mmの場合のほうが割れ発生率が高かった。このような板厚依存は、y形溶接割れ試験のような突合せ継手ではあまり見られない。

予熱温度算定式(1)をすみ肉溶接で適用する場合、一般に継手拘束を低くして、予熱条件を算定する。例えば、y形割れ試験での継手拘束度は約690tN/mm・mm (t :板厚

(a) 293K(20°C)-60%

Fig.9 Results of diffusible hydrogen measurement (H_{Gc})

(b) 303K(30°C)-80%

[mm])であるが、道路橋示方書では $200\text{tN/mm}\cdot\text{mm}$ として、予熱条件を設定している。Fig.5 では、この条件を適用し、伊藤らの境界線を示した。一方、著者らは、以前に本試験体の拘束度を調べるため、FEM 解析を行った¹³⁾。その結果、第1ビード溶接時では $29.4\text{tN/mm}\cdot\text{mm}$ 、第2ビード溶接時では $350\text{tN/mm}\cdot\text{mm}$ であり、道路橋示方書で考えている拘束度は決して大きいものではない。それにも関わらず、伊藤らの境界線より、遥かに割れ発生限界線が高くなった。これは、先に述べたように、すみ肉溶接割れ試験と y 形割れ試験では拘束度の影響が異なり、y 形割れ試験データに基づいた予熱温度推定式で拘束度を小さく設定しすみ肉溶接の予熱温度を算定したとしても、すみ肉溶接の割れ試験結果と一致させることができないことを示唆する。すなわち、すみ肉溶接の予熱条件を検討するには、すみ肉溶接割れ試験データで検討する必要があると考えられる。なお、すみ肉溶接継手ルート部の実際の残留応力については、ビード下の隠れた場所であるため直接測定が困難であり、熱弾塑性 FEM 解析などによる検証が今後望まれる。

4.3 拡散性水素量の設定

すみ肉溶接の予熱条件を算定する際、どの程度の拡散性水素量で検討すればよいのかを調べるため、SMAWでは、D5016およびD5816の一般的な低水素系溶接棒を用いて、Table11に示す作業条件で水素量の計測を行った。なお、Table11のMaterial Aのみ棒径が5mmで、その他は4mmである。ここでは、異なる溶接材料メーカー2社の溶接棒を使用し、乾燥後の放置時間を0時間と、道路橋示方書で規定されている放置時間の最大値である4時間後の拡散性水素量を、JISZ3118に則ってガスクロマトグラフ法(H_{Gc})を用いて計測した。

Fig.9に拡散性水素量の計測結果を示す。水素量は、雰囲気条件によって計測値にばらつきがあった。Fig.9(a)に示す雰囲気条件293K(20°C)-60%の場合では、4時間後であっても6~7ml/100g程度の水素量であり、また、乾燥炉から取り出し直後の水素量と1ml/100g程度の違いしか生じていなかった。しかし、Fig.9(b)に示す雰囲気条件303K(30°C)-80%の場

Table11 Conditions of diffusible hydrogen measurement

Covered electrode	Welding method	Welding conditons			Atmosphere				
		Current (A)	Voltage (v)	Speed (cm/min)	Temper -rature	Humi -dify			
Material A	SMAW	220	27	15	293K(20℃)	60%			
					303K(30℃)	80%			
Material B		170	25		293K(20℃)	60%			
					303K(30℃)	80%			
Material C		170			293K(20℃)	60%			
					303K(30℃)	80%			

合では、大気中の放置時間の増加に伴い、水素量が増えており、Material Aでは、4時間後の水素量は、約15ml/100gとなった。Material Aは棒径が5mmであり、フラックスが多いため、吸湿も多くなり水素量が高くなる傾向があったと考えられる。以上の結果から判断すると、安全サイドで検討してもSMAWの水素量は15ml/100gと考えられる。なお、これは道路橋示方書で示されているものと同様である。

GMAWの溶接材料の拡散性水素量は、溶接施工時の大気の影響をほとんど受けず、出荷時での水素量で検討すればよいと言える。通常、ソリッドワイヤで1~3ml/100g、フラックス入りワイヤでも2~4ml/100gである。そこで、次節では、安全サイドを考えて、前報の実験で使用した5ml/100gの水素量を用いてGMAWの予熱温度を検討する。なお、SAWの拡散性水素量については、GMAWと同程度であり、道路橋示方書でも同じカテゴリーで分類されているので、SAWについては、GMAWと同じとして取り扱う。

4.4 鋼橋製作におけるすみ肉溶接予熱条件の考察

本試験で使用したすみ肉溶接割れ試験体は、実構造物より小さいサイズであるものの、前報で示したように熱伝導的には実構造物と等価である。また、板厚 50mm を上回る場合についても、本研究で採用している板厚 50mm と熱伝導的には等価であることも前報で示した。さらに、本試験体は、前報のデータをもとに、すみ肉溶接割れが発生し易いウェブ板 12mm で行っており、すみ肉溶接割れに対し厳しい条件である。すなわち、本試験結果で実構造物の溶接割れ感受性について検討しても問題はないと考えられる。

Table 12 Proposal of Preheat temperature on fillet weld

Welding method	Preheat temperature	
	$P_{CM} < 0.24$	$0.24 \leq P_{CM} \leq 0.27$
GMAW, SAW	Without	
SMAW (Low H)	Without	323K(50°C)

SMAW: Shielded Metal Arc Welding SAW: Submerged Arc Welding
GMAW: Gas Metal Arc Welding Low H: Low Hydrogen electrode

そこで、本節では、これらの試験結果を用い、鋼橋製作におけるすみ肉溶接予熱条件の考察を行う。なお、 P_{CM} の適用範囲については、著者らは以前に橋梁で使用される鋼材の現状調査(1412 枚のミルシート)を行ったが、 P_{CM} が 0.28 以上の鋼材はなかった¹²⁾。また、0.27 の鋼材も 1412 鋼材中 2 鋼材しかなく、 P_{CM} の最大値は 0.27 として検討することとする。

GMAW を適用した場合、想定される最大の拡散性水素量は 5ml/100g と考えられるが、Fig.5(a),(b)で示したように、 P_{CM} が 0.27 でも溶接割れは見られず、さらに、前報では P_{CM} が 0.27 で溶接サイズ 4mm と溶接割れに対し非常に厳しい条件であっても割れは発生しなかった。すなわち、水素量が低い GMAW や SAW では、すみ肉溶接においては、予熱を行わなくても溶接割れは発生しないものと考えられる。

SMAW を適用した場合、想定される最大の拡散性水素量は、4 時間放置状態で 15ml/100g である。また、道路橋示方書では、最小溶接サイズは 6mm であるので、6mm サイズにおける試験結果(Fig.5(a))で検討する。水素量が 15ml/100g で P_{CM} が 0.242 では割れが認められ、0.241 では認められず、 $P_{CM} : 0.24$ が割れ発生の境界と考えられる。安全側で検討すれば、 P_{CM} が 0.24 以上では予熱が必要と考えられる。なお、 P_{CM} が 0.27、拡散性水素量が 33ml/100g と非常に厳しい作業条件であっても、予熱温度 323K(50°C)であれば、割れは見られず(Fig.5(c))、予熱温度の最大値は 323K(50°C)としてよいものと考えられる。以上の結果をまとめ、提案する予熱条件を Table12 に示す。

なお、SMAW の場合、 P_{CM} が 0.24 において 8mm サイズでは割れは発生せず(Fig.5(b))、サイズが 8mm では P_{CM} が 0.24 でも予熱フリーとしてもよいと考えられる。

本試験体のフランジ板厚は 50mm の厚板鋼板を用いているので、薄板では熱伝導の観点から割れは発生し難く、予熱温度はさらに緩和できるものと考えられる。これについては、今後の課題と考えている。

なお、Table12 で示した予熱条件は、溶接サイズ 6mm 以上の本溶接を対象としており、溶接サイズが 4mm で溶接長が 80mm 程度の組立溶接(仮付け溶接)は対象外であることは言うまでもない。

5. 結 言

- 1) 溶接割れは、拘束度が大きい第 2 ビード側ではほとんど発生せず、拘束度が小さい第 1 ビード側で多く発生し、

割れ形状はヒールクラックであった。

- 2) 予熱を 50°C で行えば、冷却時間 t_{100} は、予熱フリーの約 2 倍程度となった。これにより、予熱温度 323K(50°C)であれば、厳しい作業条件($P_{CM}:0.274$, $H_{GC}:33\text{ml}/100\text{g}$)であっても溶接割れは発生しなかった。
- 3) 本論文では、すみ肉溶接割れ試験結果から、すみ肉溶接における溶接割れの発生限界線を示した(Fig.5)。
- 4) 本論文では、すみ肉溶接割れ試験結果から、鋼橋製作における予熱温度を考察し、すみ肉溶接予熱条件を提案した(Table12)。

謝 辞

本研究を行うにあたり、新日本製鐵㈱の鶴田敏也氏、小山邦夫氏には、鋼材の提供、溶接材料の試作および溶接試験に対しご協力を頂きました。また、高田機工㈱の安田修氏には、ご意見・ご助言を賜りました。ここに、心より感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) Japan Road Association: Specification for Highway Bridges (Part II, Steel Bridges), (2002), (in Japanese)
- 2) Y.Ito, K. Bessyo: Cracking Parameter of High Strength Steels related to heat affected zone cracking, J.JWS, 37-9 (1968), 983-991, (in Japanese)
- 3) Y. Ito, K. Bessyo: Cracking Parameter of High Strength Steels related to heat affected zone cracking (Report 2), J. JWS, 38-10 (1969), 1135-1144, (in Japanese)
- 4) Architectural Institute of Japan: Design Standard for Steel Structures, 2001, (in Japanese)
- 5) N. Yurioka, T. Kasuya: A Chart Method to Determine Necessary Preheat Temperature in Steel Welding, Quar. J. JWS, 13-4 (1995), 347-357
- 6) K. Minami, T. Kasuya, C. Miki: A Study on the Standard of Fillet welding size, Quar. J. JWS, 23-3 (2005), 422-430, (in Japanese)
- 7) H. Kihara, M. Inagaki, K. Horikawa, Y. Kuriyama: On the Fillet Weld Cracking of 50kg/mm² Grade High Strength Steels -On the Heel-Crack-, J. JWS, 39-3 (1970), 156-165, (in Japanese)
- 8) J. Tanaka, T. Kitada: Study on the Fillet Weld Cracking -On the Heel-Cracking-, J. JWS, 41-8 (1972), 915-924, (in Japanese)
- 9) J.Tanaka, T.Kitada: Deformation Cracking of Single Fillet Weld and Selection of Welding Procedures for Avoiding its Cracking, J. JWS, 49-1 (1980), 45-52, (in Japanese)
- 10) Nippon Kaiji Kyokai (ClassNK): Rules and Guidance for the survey and construction of steel ships, (1993), (in Japanese)
- 11) Japanese Industrial Standards (JIS): Method of y-groove cracking test (Z 3158-1993), (in Japanese)
- 12) K. Minami, C. Miki: Investigation of Steel Mechanical Properties for Bridge, Steel Construction Engineering (JSSC), 11-42 (2004), 121-132, (in Japanese)
- 13) K. Minami, T. Kasuya, C. Miki: A Study on the Standard of Fillet welding size (Part. 2), The proceeding of the 58th JSCE Annual Meeting (2003), 151-152, (in Japanese)