厚板溶接部の溶接割れ防止の研究 (第二報)*

西尾 安弘** 吉田 康之** 三浦 譲**

Study on Prevention of Weld Cracking in Thick Weldment (Report 2)*

by Yasuhiro Nishio**, Yasuyuki Yoshida**
and Yuzuru Miura**

Following phenomena were experienced on the welding with plate thickness 100 mm to 200 mm.

- (1) The weld cracking increases with an increases of the plate thickness (number of welded layer).
- (2) Weld cracking occurs several days after welding.

In order to assure above phenomena and study the preventive method of the weld cracking, the weld cracking test was carried out and the weld cracking phenomena were observed.

The main results obtained are as follows.

- (1) It is clarified that weld cracking increases with an increase of the thickness of welded plate, and the initiating position of weld cracking lies just under the surface bead.
- (2) Incubation period of weld cracking is 4 days after welding.
- (3) Weld cracking is prevented with lower temperature postheating for 0.5 hr at 300°C in case of local gas heating for a 2 1/4 Cr-1Mo steel.
- (4) It is clarified that above phenomena are based on the distribution of hydrogen in thick weldment which is reported by authors in the previous report⁽¹⁾.

1. 緒 言

第1報¹⁾において厚板溶接部の特長として, 溶着金属中の拡散性水素は後層のビードになるほど富化すること, かつ長期間溶着金属中に残留することを明らかにした。すなわち厚板溶着金属中の拡散性水素は平均的に一様に分布せず, 板厚方向に分布量が異なり, 最大量は最終ビード直下付近の溶接金属に生じ, その値は板厚の増加に伴って増大する。

一方厚板の溶接施工において筆者らは,

- (1) 板厚が増加すると溶接割れが発生しやすい。
- (2) 溶接直後の検査では欠陥がなかった場合でも長期間経過後に溶接部に割れが発見される。
- (3) 溶接の最終ビードをはつと割れが現われる。

などの現象を多く経験する。これらの現象は, 前報の厚板溶着金属の特長的事実から容易に理解できるものであり, これらの現象もこの事実に基因するものと考えられる。この仮定が正しいとすれば前報によって, 直後熱の採用により, 溶着金属中の拡散性水素量の最高値は約30

%低減できることが明らかであるから, 直後熱の適切な利用によって板厚が増加しても溶接割れは防止できると考えられる。これらを溶接割れ試験により確かめた。

2. 溶接割れ試験

緒言で述べた厚板溶接における経験的な現象が溶着金属中の拡散性水素の層数増加に伴う水素富化および拡散性水素の残留期間の長期化に基因するものであるか否かを確かめるため, 溶接割れ試験において板厚が増加すると同じ溶接条件で溶接しても溶接割れが発生しやすくなり, 溶接割れ防止に必要な予熱温度が次第に高くなる状況を調査した。また溶接割れの発生する位置, 進展状況および溶接割れが表面に現われる潜伏期間などを観察し, これらの結果と溶着金属中の水素分布状況との関係を求めた。溶接割れの防止には前報で述べた 300°C×30 分の直後熱を用い, 溶接割れが発生する溶接条件で溶接されたものの溶接割れ防止効果を試験した。

2.1 試験方法

供試材は前報の水素量測定試験に用いたものと同一の Table 1 を用いた。割れ試験には Fig. 1 に示す試験体を用いた。図に示した拘束棒は溶接によって生ずる縦曲り, 開先を中心とした角変形を防止し, 厚板を用いて製

* 原稿受付 昭和49年11月5日 (昭和48年第53回溶接冶金研究委員会)

** 正 員 三菱重工業(株)広島研究所 Member, Mitsubishi Heavy Industries, Hiroshima Technical Institute

作した高压容器の円周継手を再現した。溶接は水素量測定試験片と同じ溶接条件 Table 2 により行なった。溶接割れ試験の予熱条件と積層ビード数の関係を Table 3

Table 1. Chemical Composition of Materials used

Materials		Thickness or Diameter (mm)	Chemical Composition (wt.%)								
			C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V
Base Metal	Steel Plate ASTMA 397 GrD 2½Cr-Mo Steel	45	0.12	0.30	0.50	0.016	0.009	0.08	2.55	1.00	0.006
		100	0.15	0.33	0.58	0.011	0.009	0.21	2.55	1.02	0.007
		200	0.10	0.36	0.40	0.005	0.009	0.08	2.31	0.94	0.009
Welding Material	Wire Y521	48*	0.04	0.45	0.82	0.018	0.009	-	2.45	1.28	-
	Flux MF-29	Fused Type

Fig. 1 Dimension of Weld cracking test.

Table 2. Welding condition

Welding Process	: Submerged Arc Welding
Welding Current	: 600A
Voltage	: 40V
Speed	: 30 cm/min
Baked Condition of Flux	: 250°C x 1hr

Table 3. Weld Cracking test condition

Preheat and Interpass Temperature (°C)	Total Number of Bead									
	5	10	15	20	25	30	40	60	80	90
100	0	0		0	0					
125		0		0	0					
150		0	0	0	0					
175				0		0	0			
200						0	0	0		
250								0	0	0

に示す。予熱は試験片全体を所定の予熱温度までバーナーにて加熱し、溶接中の層間温度も予熱温度に等しくなるようにした。

所定の層数を溶接後室温まで冷却し、冷却後染色浸透液による表面割れ検査を行なった。表面割れ検査は溶接終了後毎日 1 回定期的に行ない 6 日間連続した。これにより溶接ビード数の増加による溶接割れの発生状況および溶接割れの発生時期を観察した。

表面割れ検査を終った試験片は Fig. 2 に示すようにコ切断により、全厚板を含む巾 15 mm の溶接金属の縦断面割れ検査用試験片を採取し、検査面を研磨した

Fig. 2 Inspection Specimen for Weld cracking in thickness direction of thick weldment. (Specimen was cut out at 6 Days after Welding)

の蛍光磁粉探傷およびマクロエッチングにより割れ状況を調査した。これにより溶接割れが発生している位置、すなわち発生しやすいビード位置がわかる。次に低温直後熱による溶接割れ防止効果を Table 4 に示す条

Table 4. Test condition of postheating immediately after welding

Welding Condition		Postheating Condition
Preheat and Interpass Temp. (°C)	Total Number of Bead	
125	28	300°C x 30 min
	30	300°C x 15 min
150	28	300°C x 30 min
	60	"
	90	"

件により試験した。すなわち Fig. 1 に示した溶接試験体を所定の予熱層間温度で所定ビード数積層後、放冷し溶接部が 300°C まで冷却したのち Fig. 3 に示す溶接線近傍の約 70 mm 巾の表面をガスバーナーにより加熱し、所定時間保持後放冷した。表面割れ検査および縦断面割れ検査は前述の要領で行なった。溶着金属の組織、硬さは Fig. 2 に示したビード縦断面割れ検査用試験片のうち、溶接割れが発生した試験片、発生しなかった試

Fig. 3 The method of Postheating immediately after Welding which was carried out on welded Surface with the propane gas burner.

験片および直後熱を行なった試験片について溶着金属の最終層, その直下部ならびに肉厚の中央部を測定した。

2.2 試験結果

Table 3 に示した溶接割れ試験の結果を Table 5 に示す。表面割れ状況の図中の数字は割れが発見された日

Table 5. Weld Cracking test results of the effects of Preheat temperature and total Number of Weld bead.

Test No.	Preheat Temp. °C	Total Number of Bead	Weld Cracking on Weld Surface (Dye Penetrant Inspection) (日)	Cracking on Thickness Section of Weld Metal (Fluorescent Magnetic Particle Inspection)
1	100	5	no Cracking	no Cracking
2	"	10	4 1 2 (※2)	
3	"	20	no Cracking	
4	"	23		
5	125	10	no Cracking	no Cracking
6	"	20	2 1 1	
7	"	26	no Cracking	
8	150	10	no Cracking	no Cracking
9	"	15	no Cracking	no Cracking
10	"	20	2 2 3	
11	"	26	2	
12	175	20	no Cracking	no Cracking
13	"	30	2 3 3	
14	"	40	no Cracking	
15	200	27	no Cracking	no Cracking
16	"	41	"	"
17	"	60	2	
18	250	60	no Cracking	no Cracking
19	"	80	no Cracking	no Cracking
20	"	90	no Cracking	no Cracking

(※1) Dye Penetrant Inspection Was Carried Out for 6Days after Welding Once a Day.

(※2) Number in Figure Shows the Day Which Appear the Weld Cracking for instance 4 in Figure Mean That Cracking Was Found Out at First by the Test 4 Days after Welding.

数すなわち4は溶接後4日経過した検査ではじめて発見されたことを示している。これによると溶接割れは溶接後2, 3日経過後の検査では発見されないが, 4日経過後の検査ではじめて発見されることがあることを示している。なお, 4日経過しても割れが発見されない場合には6日経過しても発見されないもので, 表面割れの潜伏期間は最大4日と考えられる。Table 5 にはビード縦断面の割れ状況をスケッチ図で示している。これは溶接後6日以上経過後に採取し調べたものである。この結果, 試験番号3.7.14では表面割れが発見されないが, 最終ビードの直下付近に微小な割れが存在している。また試験番号2.4では表面に現われる割れ以外に縦断面に微小な割れが多数存在している。すなわちビード内部に存在する溶接割れはすべて表面まで成長していないことを示している。また微小割れが存在する位置は上層ビードに偏っており, 下層ビードにはほとんどない。下層ビードに存在する割れは上層ビードまで連続したものである。このことは下層ビードに存在する割れは最終ビード直下付近に発生した割れが伝播成長したことを示している。すなわち積層数が少ない場合では割れを発生しない溶接条件でも多数のビードを積層すると溶接割れを発生することを示している。ビード縦断面割れの発生状況を詳細に観察すると予熱温度が低い場合には溶着金属内に微小割れが多数発生しているが, 予熱温度が高くなるに従ってその発生数は少なく, そのかわりに発生割れの長さが長くなる傾向がある。しかしながら 250°C の予熱温度では全く発生していない。Photo. 1 に上層ビービに発生した割れの代表例として試験番号7のビード縦断面割れ検査

Photo. 1 Weld Cracking Lies Just Under the Surface Bead
(Preheat and inter-Pass Temp.:125°C)
(Total number of Bead: 26)

Table 6. Effect of Postheating on Weld cracking.

Welding Condition	Postheating Condition (t × min)	Weld Cracking
Preheating Temp. (°C)	Total Number of Bead	
125	20	non
	28	300 × 30
	30	300 × 15
150	20	non
	26	non
	28	300 × 30
	60	"
	90	"

Photo. 2 Effect of Postheating Immediately after Welding on Weld Cracking

の結果を示す。最終ビードの直下付近に割れが多数存在し、表面にまで伝播成長せずに止まっている状況がみられる。低温直後熱による溶接割れの防止効果の試験結果を Table 6 および Photo. 2 に示す。溶接のままである予熱 125°C でビード積層数が20以上になると溶接割れが発生するのに対し、300°C×30分、15分の直後熱を行なえばビード積層数が28, 30となっても溶接割れは発生していない。また予熱 150°Cでは溶接のままでビード積層数が20以上で割れが発生しているが、300°C×30分の直後熱を行なえばビード数を90ビードまで積層しても溶接割れは発生していない。とくに溶接のままでビード数を60以上を積層するには溶接割れ防止のため、予熱 200°Cでは不足で、250°Cの予熱を必要とするが、300°C×30分の直後熱により予熱 150°Cでも90ビード以上の積層が可能となっている。

Fig. 4 はこれらの結果を示している。この場合表面割

Fig. 4 Result of weld cracking test with thick weld metal such as 100-200 mm thickness

れがみられなくてもビード縦断面に割れが発生しているものは、溶接割れありとした。この結果から溶接のままである同一予熱条件で溶接すると溶接ビード数の増加にともない溶接割れが発生し、その防止には予熱温度を上昇させる必要がある。しかしながら溶接割れ防止に必要な予熱温度は約250°Cで飽和している。また低温直後熱の溶接割れ防止効果は大きく、例えば溶接のままである250°Cの予熱を必要とする場合でも低温直後熱を併用すると予熱温度を150°Cに低減できる。次に、溶着金属の硬さにおよぼす予熱温度、低温直後熱の影響を調査した結果を Table 7 に示す。この結果から予熱温度の

差および低温直後熱の有無による硬さの差はほとんどなく、また溶接割れの発生しやすい最終ビード直下付近の硬さにも差がみられない。したがって溶接割れ発生の原因はビードの硬さと直接的な関係はないといえる。

Table 7. Effect of Preheat and Postheat on hardness of Weld metal.

Code	Welding Condition	Vickers Hardness (Load 10kg)	Weld Cracking Result
1	Preheat Temp 100°C Total No. of Bead 5	306, 345, 336, 317, 297, 351, 325, 307, 373, 366, 370	no Cracking
2	Preheat Temp 150°C Total No. of Bead 30	370, 370, 302, 309, 317, 302, 348, 373, 370	Cracking
3	Preheat Temp 175°C Total No. of Bead 40	348, 363, 360, 373, 304, 299, 325, 370, 380, 370	"
4	Preheat Temp 200°C Total No. of Bead 60	351, 351, 342, 346, 317, 327, 366, 376, 380, 380	"
5	Preheat Temp 250°C Total No. of Bead 90	345, 319, 342, 336, 314, 363, 390, 376, 393, 390	no Cracking
6	Preheat Temp 150°C Total No. of Bead 90 Postheating 300°C x 30min	302, 363, 348, 339, 360, 383, 390, 366, 376	no Cracking

3. 考 察

- 1) 厚板の溶接施工において筆者らは
 - (1) 板厚が増加すると溶接割れが発生しやすい。
 - (2) 溶接直後の検査では欠陥がなかったものでも長期間経過して溶接割れが現われる。
 - (3) 溶接の最終ビードをはつと溶接割れが現われることがある。

という現象を経験するが、これらは Fig. 4, Photo. 1, および Table 5 のビード縦断面割れの観察によって実験的に再現し、それらの発生過程を観察することができた。これにより上記の経験的現象は存在が疑問視され

ていたが事実であることが確認された。

2) 以上の事実は前報で明らかにした

(1) 厚板溶接部の拡散性水素は長期間 (60日以上) 残留すること。

(2) 上層ビードほど水素が富化するため、最終層直下付近のビードに水素量の最高値ができる。

という現象と併せ考えると、板厚が増加すると溶接割れが発生しやすいのは板厚の増加に伴って最高水素量が増し、ついに溶接割れ発生の限界値を超えるためである。さらに最終ビードをはつと割れが現われるのは内在した割れが、最終ビード直下に存在するためである。また長期間を経て溶着金属表面に割れが現われるのは、最終ビード直下に存在する溶接割れが、長期間残留する拡散性水素と残留応力により伝播成長してビード表面に達するその成長期間にあたる。

3) $300^{\circ}\text{C} \times 30$ 分の低温直後熱により溶着金属中の拡散性水素量の最大値を減少させると Table 6, Table 7 に示したように、硬さの改善はなくても溶接割れは防止できる。これは2)項で述べた考え方が正しいことを証明している。

4) $300^{\circ}\text{C} \times 30$ 分の低温直後熱を行えばビード積層数 90 (板厚約 200 mm) でも予熱温度 150°C で健全な溶接部をうることができる。直後熱を行わない場合には予熱温度は 250°C が必要である。したがって熱エネルギーとして非常に節約になるので省エネルギーの立場からも厚板の溶接には直後熱を用いるべきである。

5) Table 5 によると予熱温度が低い場合には微小な溶接割れが多く、予熱温度が高くなると溶接割れの数は少ないが、割れが大きくなっている。しかも予熱温度が

250°C になると直後熱がなくても溶接割れは完全に防止できる。これは予熱温度が低いと溶着金属中の拡散性水素は多量残留し、わずかな残留応力で割れが発生するためである、一方予熱温度が高いと溶着金属中の水素が少なくなり、より大きな残留応力によって、初めて割れが発生することを示し、応力が大きいために成長も大きいと考えられる。これらの結果から溶接割れ発生の限界水素量は残留応力との間に一定の関係が成り立つことを示している。

4. 結 論

$2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼の厚板溶接部について溶接割れ試験を行なった結果次のことが明らかになった。

(1) 同一の溶接条件で溶接するとビード数の増加に伴って (板厚の増加) 溶接割れが発生しやすくなる。また、溶接割れの発生位置は最終ビード直下部付近である。

(2) 溶着金属表面割れが現われる潜伏期間は4日におよぶことがある。

(3) $300^{\circ}\text{C} \times 30$ 分の低温直後熱により、溶接割れは防止できる。また、予熱温度は低温直後熱なしの場合で 250°C 必要であるが、低温直後熱の採用により 150°C に低減できる。

(4) 以上の現象は溶着金属中の拡散性水素量の富化現象ならびに拡散性水素の長期間の残留に基因するものである。

参 考 文 献

- 1) 西尾, 吉田, 三浦: “厚板溶接部の溶接割れ防止の研究(第一報)” 本誌 44-4(1975) p. 345-350.