拡散性水素低減プロセスによる FCAW の低温割れ抑制効果

The Effect of Cold Cracking Prevention of FCAW
by the Welding Process for Reducing Diffusible Hydrogen

迎井直樹*・井上芳英*・田代真一**・菅 哲男**・田中 学**

Naoki MUKAI, Yoshihide INOUE, Shinichi TASHIRO, Tetsuo SUGA and Manabu TANAKA

(Received September 13, 2019)

Cold cracking sensibility is severe problem in the welding fabrication of large-scale steel structures. It is well-known that diffusible hydrogen content in the weld metal strongly influences this cracking. Generally, it is said that there are two ways to prevent the cracking. One is to control the heat input by pre/post heating process and interpass temperature. The other is to select low hydrogen welding materials. However, in recent years, a novel welding process using special welding torch was researched and developed. By using this process, amount of hydrogen content in the weld metal can be highly reduced than the conventional process. In this study, the effect of cold cracking prevention in FCAW by new low hydrogen process was confirmed. The y-groove weld cracking test was applied. High-tensile steel of 490 MPa was selected to both base metal and welding materials for the test. The preheat temperature level was changed from 75 to 0°C. From the result of the test, the cold cracking (root cracking) was occurred with the conventional method under 25 and 0°C preheating. On the other hand, there was no cracking with using the developed process even in the 0°C preheating condition. From the above result, the effect of cold cracking prevention by the novel welding process for reducing diffusible hydrogen were confirmed and 50°C or more preheating temperature reduction effect were demonstrated. It has been clarified that the reduction effect is appropriate as the result of applying the cold crack control index reported in the past research. This test result has proved that the reduction of the hydrogen in weld metal leads to preventing the cold crack that is reported in the past research.

Key Words: Cold Cracking, Diffusible Hydrogen, FCAW, Low Hydrogen Welding Process, Welding Torch

1. 緒言

諸産業において構造物の大型化に伴い、構成部材である鋼材は厚板化・高張力化が進められている。大型構造物の建造において、溶接による接合は不可欠な技術であるが、厚板・高張力鋼の溶接部では低温割れ感受性が増大する為、その施工には非常に高難度の管理が求められる。

低温割れの要因は、大きく4つに分類され、①母材の要因(炭素当量等)、②水素に関する要因、③残留応力などの力学的要因、④溶接部の熱履歴、である¹⁾。割れを防止する為に、これらの各要因に対して緩和対策が講じられる。例えば①の要因を緩和する為に、炭素当量を抑制し、熱加工制御によって所定の強度を発揮させる TMCP 型高張力鋼が開発され、すでに広く実用化されている²⁾。③の要因を緩和する為に溶接順序を構造物の内部から自由端に設定する等の対策が取られる。④は溶接部の硬化組織の発生や溶接部の脆化因子である水素の拡散・放出に影響する。その為、予熱や直後熱といった熱管理を適用して施工されることが一般的であるが、低温割れを完全に抑制するような高温での熱管理は多大な労力とエネルギーを要する為、経

済的とは言えず、さらに溶接施工環境の悪化という安全衛生面の重大な問題も生じる。そこで②の要因、つまり溶接時に溶接金属中に侵入する拡散性水素の絶対量に着目される。これを低減することにより熱管理の緩和を図ることも大型構造物の溶接施工管理策として重要である。

溶接金属の拡散性水素量を低減させる為には、溶接材料の選定および保管管理が重要視される。溶接材料に関しては古くから低水素化手法が検討されており³⁾⁻⁵⁾、原料選定および処理技術や添加フラックスからの非水素ガス発生によってアーク雰囲気の水素分圧を低下させる技術等が適用されている。しかし、目立った低水素化技術は近年見られず、技術的な停滞感が否めない。CF4(いわゆるフロン)を含有する特殊なシールドガスを使用するプロセスに関しても報告⁶⁾があるが、分解ガスの安全性や温室効果ガスを使用する環境面の懸念がある為か、広く適用されるには至っていない。

一方近年、特殊な溶接トーチを使用することで溶接金属の拡散性水素量を大きく低減する、拡散性水素低減プロセス(以下、水素低減プロセスと記す)の研究⁷⁾⁻¹⁰⁾がおこなわれている。このプロセスは GMAW、FCAW において、Fig. 1⁹⁾に模式的に示す2重ノズル式トーチを用いて溶接を行う方

* 株式会社神戸製鋼所 (〒251-8551 神奈川県藤沢市宮前 100-1)

Kobe Steel, Ltd. (100-1 Miyamae, Fujisawa, Kanagawa 251-8551, Japan)

** 大阪大学接合科学研究所 (〒567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘 11-1)

Joining and Welding Research Institute, Osaka University (11-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka 567-0047, Japan)

Fig. 1 Schematic illustration of novel welding torch.

法である。図中の Suction nozzle を負圧発生機に接続することで、突出し部ワイヤ近傍のガスを吸引しながら施工を行う溶接法である。それによってワイヤに含有される水分や油分に由来する水素が溶融金属へ接触することを抑制し、溶接金属中の拡散性水素量を低減するものである。これまでの研究報告において、種々の溶接ワイヤを使用した際の拡散性水素量低減効果および、種々の拡散性水素因子に対する有効性が明らかにされている。一方、実際の溶接施工において拡散性水素量の低減は、予熱温度の低下や後熱の省略等、具体的熱管理の緩和によって初めてメリットを享受することができると考えられるが、そのような効果を示す報告はこれまで見られない。

そこで、本研究では規格化された低温割れ試験である y 形溶接割れ試験を用いて水素低減プロセスによる低温割れ抑制効果の検証を行った。

2. 実験方法

2.1 供試材

試験に用いた母材および溶接材料を Table 1 に示す。溶接構造物に広く用いられる 490 MPa 級高張力厚鋼板に造船や橋梁等の製造に広く用いられるスラグ系フラックス入りワイヤを適用し、試験を実施した。フラックス入りワイヤでの溶接施工はスパッタの発生量が少ない、ビード形状や外観が美麗である等の良好な作業性から適用範囲が広がっているが、ソリッドワイヤと比較して拡散性水素量が高いことが知られており、厚板高張力鋼の分野においてはこれが制約となる。この問題に水素低減プロセスを適用することで、その効果によって制約が緩和され、フラックス入りワイヤの適用範囲がさらに広がることが期待される。一方先行研究⁹⁾において、フラックス入りワイヤの構造によってプロセスによる水素低減効果は変化することが報告されている。そこで、その効果を最大限発揮できるワイヤ構造として、本研究ではシーム有りタイプのワイヤを適用した。

試験板は JIS Z 3158 (2016) に従って Fig. 2 に示すような

Table 1 Testing materials.

	Tensile strength class [MPa]	Thickness / Size [mm]	Applicable standard
Base metal	490	50	JIS G 3106 SM490A
Welding material	490	Φ1.2	JIS Z 3313 T 49J 0 T1-1 C A-U

Fig. 2 Schematic illustration of test plate.

Table 2 Actual dimensions of root gap on test plates.

Preheat temperature [°C]	Root gap [mm]	
	Conventional process	Low hydrogen process
75	1.7	1.7
50	1.5	1.6
25	1.6	1.6
0	1.5	1.6

形状とした。ルート間隔は 1.5 mm を目標にして拘束溶接を行った。拘束溶接には 490 MPa 級鋼用ソリッドワイヤを用い、角変形が生じないように X 開先を適宜反転しながら施工を実施した。後述する試験条件の各予熱温度と溶接プロセスに対応する、拘束溶接後試験板のルート間隔は Table 2 に示す通りであった。

2.2 溶接条件

試験溶接条件を Table 3 に示す。入熱は 1.7 kJ/mm としているが、これは後述の必要予熱温度の議論を簡略化するために各パラメータを調整している。表中の吸引ガス流量は水素低減プロセス特有の条件である。本プロセスを適用する際は、2 重ノズルの内側のノズルから少量のガスを吸引しながら溶接を実施する。本研究においては、シールドガス流量 25 L/min に対して十分に低流量且つ、水素低減効果が有効に得られる吸引ガス流量として 5 L/min とした⁷⁾。試験溶接は母材表面部で開始・終了する立体的運棒法を適用した為、拘束溶接状態が微妙に異なる試験板に適宜対応できるように半自動溶接で行った。半自動溶接を採用した為、チップー母材間距離と溶接速度および入熱は厳密に管理することはできておらず、目標値を示している。ただし、チップー母材間距離に関しては、条件調整時との溶接電流値の

Table 3 Test welding condition for y-groove cracking test.

Process	Welding current [A]	Arc voltage [V]	Welding speed [mm/min]	Heat input [kJ/mm]	Contact-tip to work distance [mm]	Welding position
Conventional	270	32	300	1.7	25	Flat
Low hydrogen						
Process	Welding method	Shielding gas		Suction gas flow rate [L/min]	Target preheat and interpass temperature [°C]	
		Type	Flow rate [L/min]			
Conventional	Semiautomatic welding	100%CO ₂	25	-	75, 50, 25, 0	
Low hydrogen				5

Fig. 3 Appearance of test welding beads under penetrant inspection.

差を、溶接速度に関しては、溶接に要する時間をそれぞれ確認し、大きな乖離が無いことを確認している。これらによって入熱についても大きな乖離は発生していないと考えられる。予熱温度 0℃ の試験では、雰囲気温度を制御可能な室内で試験板を冷却し、そのままその室内で試験溶接を実施した。この時室温は試験板温度と同一の 0℃ とした。溶接後は割れの確認を行うまで常温で保管した。

2.3 割れ確認および判定方法

試験溶接完了後、48 時間以上経過するのを待った後にビード表面に発生する割れを浸透探傷により観察した。浸透探傷を実施後、各試験体から 5 断面のマクロ試験片を採取した。試験片の観察により①溶込みの健全性、②断面割れ率、③ルート割れ率を算出した。

①～③は JIS Z 3158 (2016) に従い、以下のように判断を行った。①は開先の頂点が溶融している場合を健全とした。②は各断面を対象に、計測した最小肉厚に対する割れの垂直方向長さを百分率で表し平均値を求めた。③は 5 断面中の割れ発生数を百分率で表した。

2.4 拡散性水素量測定試験

溶接に用いたものと同一のワイヤを用いて拡散性水素量測定試験を実施した。この試験での溶接条件は JIS Z 3118 (2007) に従い、溶接速度を 350 mm/min とした。拡散性水素量測定試験では、6 軸ロボットを用いた自動溶接を適用し、チップ-母材間距離や溶接速度を細かく管理した。その他の条件は Table 3 と同様にした。

3. 実験結果

3.1 割れ観察および判定結果

Fig. 3 に浸透探傷後の外観を示す。従来溶接法を適用した試験体には予熱温度 25℃ と 0℃ の場合に表面割れが確認された。水素低減プロセスを適用した試験体にはいずれも表面割れは見られなかった。

Fig. 4 に断面マクロの観察結果を示す。従来溶接法のスタート部において 1 断面のみ (a-2 最左図) 開先頂点の未溶融があり、溶込みが不健全であったが、その他の断面では適切な溶込みが得られていた。よって十分評価に値する試験条件であると判断した。Fig. 5 に断面マクロから計測した断面割れ率とルート割れ率を示す。従来溶接法における断面割れ率およびルート割れ率は 25℃ 以下で急激に上昇していたが、水素低減プロセスを適用したものでは、予熱温度 0℃ においても、いかなる割れも見られず、低温割れの抑制効果が確認できた。また本実験条件の場合、50℃ 以上の予熱温度低減効果が得られる結果となった。

従来溶接法の割れ率が予熱温度の低い 0℃ の条件のほうが低くなっているが、これは Fig. 4 a-3 (25℃) と a-4 (0℃) を比較すると、わずかに a-4 の肉厚が厚くなっていること、さらに、a-4 中の割れの発生していない断面 (エンド部から 2 枚目) において特に溶込みが深く肉厚が厚くなっている為、局部的に応力が緩和された結果であり、運棒のバラつきによるものと考えられる。

発生した割れはいずれもルート部溶融境界からわずかに

Fig. 4 Observation results of bead cross sections.

Fig. 5 Comparison of cracking rate between conventional and low hydrogen process.

HAZ 側を起点としていた。一部 (Fig. 4 a-4 左から 2 枚目、3 枚目) では発生した割れが直ちに溶接金属部を伝播するケースも見られたが、多くは HAZ に沿って表面近傍まで伝播し、その後に溶接金属部に抜けていたことから、HAZ の硬化が割れ発生に大きく影響しているものと考えられる。

3.2 拡散性水素量

従来溶接法および水素低減プロセスの拡散性水素量測定結果を Table 4 に示す。従来溶接法では平均値で 6.8 mL/100 g という結果であり、これは一般的に知られている FCAW の拡散性水素量の範囲であった¹¹⁾。一方、水素低減プロセスを用いた場合の拡散性水素量は平均値で 2.4 mL/100 g であった。水素低減プロセスによって溶接金属中の拡散性水素量を 35% 程度に低減させる効果が確認できた。

4. 考察

今回の試験結果の妥当性を確認する為、ルート割れの抑制指標として Yurioka らによって提案されているマスター

Table 4 Diffusible hydrogen content measurement results.

Process	Diffusible hydrogen content [mL/100g]			
Conventional	7.1	7.1	6.0	Avg.6.8
Low hydrogen	2.4	2.6	2.4	Avg.2.4

カーブ法¹²⁾を適用し必要予熱温度を算出し、結果を比較した。マスターカーブ法は式 (3) に示すように母材の炭素当量 CEN を溶接金属の拡散性水素量 (H_D) と入熱 ($H.I.$) によって補正 ($corr.$) し、種々の y 形溶接割れ試験結果から作成された臨界予熱温度のマスターカーブに当てはめて必要な予熱温度を算出する方法である。

$$CEN = C + A(C) \cdot \left(\frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu}{15} + \frac{Ni}{20} + \frac{Cr+Mo+Nb+V}{5} + 5B \right) \quad (1)$$

$$A(C) = 0.75 + 0.25 \tanh\{20(C - 0.12)\} \quad (2)$$

$$CEN_{corr} = CEN + \Delta CEN_{(H_2)} + \Delta CEN_{H.I.} \quad (3)$$

今回の試験で用いた母材の化学成分を **Table 5** に示す。また、マスターカーブ法によって算出された必要予熱温度を、算出過程の値と併せて **Table 6** に示す。2.2 で触れたように、今回の試験の入熱は議論を簡略化する為に調整しており、 CEN の入熱による補正量は 0 である。

従来溶接法と水素低減プロセスでの、算出された必要予熱温度は 140℃ および 65℃ であり、その差は 75℃ であった。これは、プロセスの違いによって生じる拡散性水素量の差から得られる、低温割れの抑制効果であると考えられる。今回、水素低減プロセスによって 50℃ 以上の予熱温度低減効果が実験的に確認できており、結果として妥当であると考える。

一方、予熱温度の絶対値を比較すると、従来溶接法でのマスターカーブ法による必要予熱温度と、実施した試験での割れ停止温度 50℃ とは乖離があった。水素低減プロセスでの必要予熱温度も、予熱温度 0℃ で割れが発生しなかった実験結果とは乖離が見られた。このような乖離が見られた原因としては以下のようなことが考えられる。

Yurioka らのマスターカーブ法は① SMAW のデータを中心として作成されているため、入熱と溶着量のバランスが FCAW とは大きく異なり、FCAW のほうが高溶着量であること¹³⁾。同様に、② ルートギャップが 2 mm の条件で実施された試験結果を基に作成されているのに対して、本試験では 1.5 mm であったことが考えられる。① および ② のどちらの要因も、マスターカーブ法の根拠となった試験に対して、本研究で実施した試験ではのど厚が厚くなる方向に働くので、ルート部に働く応力つまり低温割れの駆動力が低減し、低温割れ回避に必要な予熱温度が低くなる。

5. 結言

拡散性水素低減プロセスによる低温割れ抑制効果を y 形溶接割れ試験を適用して検証した。溶接材料には造船・橋梁等の製造に広く用いられ、拡散性水素量がソリッドワイヤと比較して高値であるフラックス入りワイヤを用いた。

75℃ ～ 0℃ で予熱温度を 4 水準変化させて試験を行った結果、従来溶接法では 25℃ 以下の試験体で割れが発生した。一方、水素低減プロセスにおいては、0℃ の試験体においても割れの発生は見られなかった。

従来溶接法と比較して水素低減プロセスを用いた場合の予熱温度低減効果は 50℃ 以上であった。

シーム有りフラックス入りワイヤに対して水素低減プロセスを適用し、拡散性水素量の測定を行った。本試験においては拡散性水素量を約 35% に低減させる効果が見られた。

既往の低温割れ管理手法を適用し、本研究で実施した割れ試験の妥当性を検証した。必要な予熱温度の絶対値には乖離が見られたが、プロセスによる拡散性水素低減量に対

Table 5 Chemical composition of test plate.

C	Si	Mn	Cu	Ni	Cr	Mo	Nb	V	B
0.16	0.33	1.32	0.01	0.01	0.02	<0.01	<0.01	0.04	0.0006

Table 6 Required preheating temperature calculated with Master Curve method.

Process	CEN	Diffusible hydrogen content [mL/100g]	$\Delta CEN_{(H_2)}$	$\Delta CEN_{H.I.}$	CEN_{corr}	Required preheating temperature [°C]
Conventional	0.388	6.8	0.025	0	0.413	140
Low hydrogen		2.4	-0.070		0.318	65

する予熱温度低減効果の相対値は妥当な値であることが確認された。

参考文献

- 1) 糟谷正: “実験観察とシミュレーションによる鉄鋼材料の低温割れ評価”, 溶接学会誌, **84**-1 (2015), 45-50.
- 2) 百合岡信孝: “TMCP 鋼の溶接”, 溶接学会誌, **61**-4 (1992), 288-304.
- 3) 五代友和, 杉野守彦: “被覆アーク溶接における水素源について”, 溶接学会誌, **45**-7 (1976), 528-534.
- 4) 山根國秀: “低水素系被覆アーク溶接棒”, 溶接学会誌, **68**-2 (1999), 98-104.
- 5) 糟谷正, 志村竜一, 戸塚康仁: “フラックス入りワイヤの拡散性水素量におけるワイヤ焼鈍の影響”, 溶接学会全国大会講演概要, **84** (2009), 311-312.
- 6) S. Fiore, S. Barhorst, M. Amata and J. Bundy: “A new method for reducing diffusible hydrogen in weld metal”, IIW Doc.XII-2103-12 (2012).
- 7) N. Kawabe, T. Maruyama, K. Yamazaki and R. Suzuki: “Development of low hydrogen welding process for gas shielded arc welding”, IIW Doc.XII- 2236-15 (2015).
- 8) N. Mukai, T. Maruyama and R. Suzuki: “Research and development on the welding process for reducing diffusible hydrogen content”, IIW Doc.XII-2271-16 (2016).
- 9) 迎井直樹, 丸山徳治, 鈴木励一: “拡散性水素低減プロセスの開発と有効性に関する研究”, 溶接学会論文集, **36**-1 (2018), 86-93.
- 10) N. Mukai and R. Suzuki: “Welding Process Using Special Torch for Reducing Diffusible Hydrogen”, KOBELCO TECHNOLOGY REVIEW, **36** (2018), 7-16.
- 11) 溶接学会, 日本溶接協会: “溶接・接合技術総論”, 産報出版株式会社, (2015), 164.
- 12) N. Yurioka and T. Kasuya: “A Chart Method to Determine Necessary Preheat Temperature in Steel Welding”, Quarterly Journal of The Japan Welding Society, **13**-3 (1995), 347-357.
- 13) 黒川剛志: “マグ溶接フラックス入りワイヤの開発と発展”, R&D 神戸製鋼技報, **50**-3 (2000), 74-77.

代表者メールアドレス

迎井直樹 mukai.naoki@kobelco.com