低水素系溶着金属の機械的性質に対する 炭素当量の算出 (第3報)*

——溶接金属の化学組成と溶接金属割れの関係——

伊藤 慶典** 小泉 勇**

Calculation of Carbon Equivalents for Mechanical Properties of Basic Weld Deposits (Report 3)*

—Correlation between Chemical Composition and Crack Sensitivities of Weld Metals—

by Yoshinori Ito** and Isamu Koizumi**

Abstract

Weld crack is one of the most difficult problems encountered in welding processes of high strength steels. It is classified into heat affected zone crack and weld metal crack. This report clarified the correlation of chemical composition, hardness and structure of weld metals to weld metal cracks.

The basic electrodes were prepared so that the main effects of C, Si, Mn, Ni, Cr, Mo and the interactions between C and the other elements for the weld metal cracks could be analyzed using orthogonal array table $L_{16}(2^{15})$. Weld metal cracking tests were carried out with U groove cracking test specimens.

From the results of the weld metal cracking tests, the carbon equivalent equations for the crack sensitivities of weld metals were calculated and the correlation between the values of the carbon equivalent equations and weld cracks was obtained.

The conclusions are as follows:

1. The carbon equivalent equations for the crack sensitivities of weld metals are expressed by the following equations.

Surface cracking percentage: $+0 \times \text{Cr} \dots\dots\dots 0.03\% \leq \text{Cr} \leq 0.53\%$

$\text{Ceq}(f) = \text{C} + 0.14\text{Si} + 0.10\text{Mn} + 0.04\text{Ni} + 0.11\text{Mo} + 0.27(\text{Cr} - 0.53) \dots\dots\dots 0.54\% \leq \text{Cr} \leq 1.49\%$

Section cracking percentage: $+0 \times \text{Cr} \dots\dots\dots 0.03\% \leq \text{Cr} \leq 0.53\%$

$\text{Ceq}(s) = \text{C} + 0.15\text{Si} + 0.11\text{Mn} + 0.05\text{Ni} + 0.12\text{Mo} + 0.24(\text{Cr} - 0.53) \dots\dots\dots 0.54\% \leq \text{Cr} \leq 1.49\%$

Root cracking percentage: $+0 \times \text{Cr} \dots\dots\dots 0.03\% \leq \text{Cr} \leq 0.53\%$

$\text{Ceq}(r) = \text{C} + 0.15\text{Si} + 0.12\text{Mn} + 0.05\text{Ni} + 0.13\text{Mo} + 0.26(\text{Cr} - 0.53) \dots\dots\dots 0.54\% \leq \text{Cr} \leq 1.49\%$

$0.10\% \leq \text{C} \leq 0.18\%, 0.12\% \leq \text{Si} \leq 0.53\%, 0.70\% \leq \text{Mn} \leq 1.38\%$

$0.03\% \leq \text{Ni} \leq 1.17\%, 0.01\% \leq \text{Mo} \leq 0.49\%, 0.03\% \leq \text{Cr} \leq 1.49\%$

2. It was confirmed after testing more than ten basic electrodes including commercial high tensile strength electrodes that the tendency of crack sensitivities of basic weld metals could be well represented by the carbon equivalent equations as above mentioned.

3. In order to prevent the initiation of weld metal cracks, the upper limit of weld metal hardness must 270Hv. The chemical composition and cooling rate must also be selected so that ferrite may precipitate in the structure of weld metals.

I. 緒 言

高張力鋼板の溶接において発生する溶接割れは溶接技術上もっともやっかいな問題の一つであり、現在各方面

でかなり精力的に研究がおこなわれている。一方、これら高張力鋼板の溶接に使用される高張力鋼溶接棒の溶接金属の割れに関する研究は比較的少なく、溶接金属の化学組成と溶接割れに対する系統的な研究も二、三の研究¹⁾²⁾をのぞいてほとんどみられない。

そこで、著者らは第1報³⁾、第2報⁴⁾において直交配列表の性質を利用して、高張力鋼溶接棒に用いられる低

* 原稿受付, 昭和42年6月6日

** 正員 住友金属工業・中央技術研究所 Member, Sumitomo Metal Industries Co., Ltd. Central Research Laboratories.

水素系溶着金属の機械的性質に対する合金元素の効果を定量的に求めたが、これとどのような方法によって、低水素系溶接金属の割れ感受性におよぼす合金元素の影響を定量的に明らかにしようとした。

II. 実験方法

1. 供試溶接棒

合金元素として高張力鋼溶接棒、耐熱用低合金鋼溶接棒にもっとも一般的にもちいられている C, Si, Mn, Ni, Cr, Mo をとりあげた。

溶接割れに対して、C がもっとも影響すると思われるので、これらの元素と C の交互作用もあきらかにするため、Table 1 に示す $L_{16}(2^{15})$ の直交配列表を用いる

Table 1 Orthogonal array table

Array No.	(1) (2) (4)	(7) (10) (8) (12)	(3) (5) (11)	(6) (9) (13)
Alloying element	C Si Mn	Ni Cr Mo	C C C Si Mn Ni	C C C Cr Ni Mo
Electrode				
S 1	1 1 1	1 1 1	1 1 1	1 1
S 2	1 1 1	2 2 2	1 1 2	2 2
S 3	1 1 2	1 3 2	1 2 1	3 2
S 4	1 1 2	2 4 1	1 2 2	4 1
S 5	1 2 1	2 3 1	2 1 2	3 1
S 6	1 2 1	1 4 2	2 1 1	4 2
S 7	1 2 2	2 1 2	2 2 2	1 2
S 8	1 2 2	1 2 1	2 2 1	2 1
S 9	2 1 1	1 3 1	2 2 2	2 2
S10	2 1 1	2 4 2	2 2 1	1 1
S11	2 1 2	1 1 2	2 1 2	4 1
S12	2 1 2	2 2 1	2 1 1	3 2
S13	2 2 1	2 1 1	1 2 1	4 2
S14	2 2 1	1 2 2	1 2 2	3 1
S15	2 2 2	2 3 2	1 1 1	2 1
S16	2 2 2	1 4 1	1 1 2	1 2

Table 2 Aimed values of chemical composition of deposited metal

Element Level	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	P	S
Level 1	0.06	0.30	0.70	0.04	0.05	0.04		
Level 2	0.13	0.80	1.50	1.80	0.50	0.75	<0.015	<0.015
Level 3	—	—	—	—	1.00	—		
Level 4	—	—	—	—	2.25	—		

ことにした。Table 2 は全溶着金属化学組成目標値を示す。すなわち、50 kg/mm²~90 kg/mm² の高張力鋼溶接棒および Cr-Mo 耐熱鋼溶接棒の化学組成をみたすようにした。

Table 3 に供試溶接棒の全溶着金属化学分析値を示した。これらの供試溶接棒は低水素系溶接棒であり、溶接割れにもっとも影響をあたえる水素の影響をすくなくするため、拡散性水素量はすべて 0.011 cc/g 以下になるよう製作した。

2. 溶接金属割れ試験

割れ試験片は溶接金属の低温割れ感受性をもっともよく評価しうると考えられる U 形溶接割れ試験片を用い

Fig. 1 Dimension of U groove cracking test specimen

Table 3 Chemical composition of deposited metals of test electrodes (%)

	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	P	S	Cu	Diffusible hydrogen (cc/g)
S 1	0.06	0.28	0.66	0.04	0.04	0.02	0.009	0.008	0.07	0.010
S 2	0.06	0.25	0.68	1.83	0.48	0.75	0.008	0.006	0.08	0.008
S 3	0.07	0.30	1.47	0.04	0.98	0.77	0.009	0.006	0.08	0.009
S 4	0.06	0.32	1.54	1.84	2.23	0.07	0.009	0.006	0.09	0.009
S 5	0.07	0.83	0.66	1.81	0.98	0.03	0.010	0.007	0.08	0.010
S 6	0.07	0.86	0.65	0.05	2.34	0.78	0.009	0.006	0.10	0.006
S 7	0.07	0.84	1.47	1.88	0.08	0.82	0.010	0.006	0.08	0.008
S 8	0.07	0.71	1.52	0.04	0.55	0.05	0.010	0.007	0.08	0.010
S 9	0.13	0.24	0.69	0.04	0.91	0.03	0.009	0.006	0.07	0.009
S10	0.13	0.34	0.79	1.84	2.08	0.80	0.011	0.006	0.12	0.008
S11	0.13	0.30	1.49	0.04	0.05	0.75	0.010	0.006	0.08	0.009
S12	0.11	0.28	1.57	1.73	0.49	0.06	0.011	0.006	0.09	0.011
S13	0.13	0.73	0.67	1.75	0.05	0.03	0.010	0.006	0.11	0.009
S14	0.13	0.75	0.66	0.04	0.49	0.72	0.010	0.005	0.08	0.011
S15	0.14	0.88	1.52	1.86	1.00	0.81	0.009	0.005	0.08	0.009
S16	0.14	0.85	1.40	0.04	2.30	0.06	0.010	0.006	0.11	0.009

Table 4 Chemical composition and mechanical properties of U groove cracking test specimen

SM 41 A (thickness 19 mm)	Chemical composition (%)									Mechanical properties		
	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	P	S	Cu	Y.P (kg/mm ²)	T.S (kg/mm ²)	E.L (%)
	0.18	0.03	0.76	0.03	0.02	0.02	0.022	0.023	0.03	27	47	27

As roll JIS G 3106 SM 41 A

Table 5 Chemical composition of weld metals of test electrodes (%)

	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	P	S	Cu
S 1	0.10	0.16	0.70	0.03	0.03	0.01	0.013	0.013	0.05
S 2	0.10	0.17	0.74	1.11	0.29	0.44	0.014	0.011	0.06
S 3	0.12	0.19	1.29	0.04	0.58	0.45	0.011	0.011	0.07
S 4	0.11	0.21	1.25	1.15	1.38	0.03	0.014	0.011	0.06
S 5	0.11	0.46	0.71	1.13	0.45	0.01	0.014	0.013	0.06
S 6	0.12	0.53	0.77	0.04	1.49	0.49	0.014	0.011	0.06
S 7	0.13	0.43	1.22	1.17	0.04	0.47	0.013	0.010	0.06
S 8	0.13	0.49	1.38	0.04	0.35	0.02	0.013	0.009	0.06
S 9	0.13	0.13	0.73	0.03	0.48	0.01	0.014	0.015	0.05
S10	0.13	0.13	0.76	1.12	1.26	0.48	0.014	0.013	0.06
S11	0.16	0.12	1.11	0.04	0.04	0.41	0.012	0.011	0.05
S12	0.13	0.16	1.16	1.00	0.26	0.02	0.013	0.011	0.06
S13	0.18	0.42	0.71	1.14	0.03	0.01	0.015	0.010	0.07
S14	0.15	0.30	0.68	0.03	0.27	0.37	0.014	0.011	0.05
S15	0.14	0.51	1.23	1.15	0.62	0.47	0.015	0.012	0.08
S16	0.15	0.41	1.16	0.04	1.34	0.02	0.016	0.013	0.08

た。割れ試験片寸法を Fig. 1 に示す。割れ試験片には母材割れ発生をふせぎ、溶接金属割れのみが発生するように Table 4 の SM41A (19mm) を使用した。溶接金属の割れ挙動はもちろん溶接割れ試験片の抗張力レベル、板厚等の変化による拘束度のちがいによって若干変化すると考えられるが、これらをすべて考慮することはかなり複雑となるので今回は上記の試験片をもちいて、溶接割れ試験を実施した。

U 形溶接割れ試験片におかれた溶接金属は母材との稀釈をうけ、全溶着金属化学組成とことなるため、溶接金属の化学分析をおこなった。供試溶接棒の溶接金属の化学分析値を Table 5 に示す。以後の実験結果の解析はすべて溶接金属の化学組成値でおこなった。

溶接割れ試験条件を Table 6 に示す。割れ試験はす

Table 6 Condition of U groove cracking test

Welding current	170 A
Arc voltage	22~24 V
Welding speed	150 mm/min
Dry condition of electrode	450°C—1 hr
Cracking test specimen	Ugroove cracking test specimen
Test temperature	Room temp. (20~24°C), 75°C

べて自動被覆アーク溶接装置をもちいておこなった。

試験の繰返し数は各 3 枚である。試験ビードを溶接後、48 時間以上経過したのち、磁気探傷により表面割れ長さを測定した。さらに、断面割れ長さ、ルート割れ長さを測定し、表面割れ率、断面割れ率、ルート割れ率を測定した。算出法を Fig. 2 に示す。

Fig. 2 Surface cracking percentage, section cracking percentage and root cracking percentage

割れは Fig. 3 に示すようにほとんど溶接金属、または溶接金属と母材境界のノッチ部に生じ、溶接金属中を

Table 7 Result of U groove cracking test

Electrode No.	Room temperature			75°C		
	Surface cracking (%)	Section cracking (%)	Root cracking (%)	Surface cracking (%)	Section cracking (%)	Root cracking (%)
S 1	0	0	0	0	0	0
S 2	4	6	7	0	0	0
S 3	2	4	9	2	11	21
S 4	70	67	67	67	67	67
S 5	0	9	9	0	0	0
S 6	97	98	100	40	40	40
S 7	60	67	67	0	0	0
S 8	0	0	0	0	0	0
S 9	0	0	0	0	0	0
S 10	100	100	100	67	67	67
S 11	9	13	12	0	1	4
S 12	37	46	49	0	0	0
S 13	0	0	0	0	0	0
S 14	4	4	6	0	0	0
S 15	67	73	70	96	96	100
S 16	100	100	100	55	58	67

(mean value of three specimens)

Fig. 3 Location of weld crack

伝播していた。

III. 実験結果

供試溶接棒の溶接割れ試験結果を Table 7 に示す。この試験結果から直交配列表の性質を利用して、各合金元素の溶接金属割れ率におよぼす効果を計算した。各合金元素 0.1% 増加にともなう溶接金属割れ率変化量の計算結果を Table 8 に示した。

この結果から、溶接金属割れに対する炭素当量式を算出した。炭素当量が $1/25 = 0.04$ 未満の項を無視すると、次式がえられる。✓

表面われ率に対する炭素当量

$$Ceq(f) = C + 0.14 Si + 0.10 Mn + 0.04 Ni + 0.11 Mo + 0.27 (Cr - 0.53) \dots \dots (1)$$

断面われ率に対する炭素当量

$$Ceq(s) = C + 0.15 Si + 0.11 Mn + 0.05 Ni + 0.12 Mo + 0.24 (Cr - 0.53) \dots \dots (2)$$

ルートわれ率に対する炭素当量

$$Ceq(r) = C + 0.15 Si + 0.12 Mn + 0.05 Ni + 0.13 Mo + 0.26 (Cr - 0.53) \dots \dots (3)$$

$$0.10 \leq C \leq 0.18\%, \quad 0.12\% \leq Si \leq 0.53\%$$

$$0.70\% \leq Mn \leq 1.38\%, \quad 0.03\% \leq Ni \leq 1.17\%$$

$$0.01\% \leq Mo \leq 0.49\%, \quad 0.03\% \leq Cr \leq 1.49\%$$

*✓

Table 8 The increase of cracking percentages per 0.1% increment of each alloying element

Alloying element	Surface cracking percentage (%)	Section cracking percentage (%)	Root cracking percentage (%)
C	33.6	34.6	31.5
Si	4.7	5.1	4.9
Mn	3.5	3.8	3.8
Ni	1.5	1.7	1.7
Mo	3.9	4.1	4.2
Cr (0.03%~0.53%)	0.1	0.7	1.0
Cr (0.54%~1.49%)	9.0	8.4	8.3

*✓ 表面割れ率，断面割れ率，ルート割れ率に対する炭素当量式はほぼ同一の式がえられ，いずれも各元素の主効果のみあらわれて，Cと各合金元素の交互作用項はなく，これら交互作用は溶接金属の割れに対してあまり大きくないことがわかる。

$$+0 \times Cr \dots 0.03\% \leq Cr \leq 0.53\%$$

$$\dots 0.54\% \leq Cr \leq 1.49\%$$

$$+0 \times Cr \dots 0.03\% \leq Cr \leq 0.53\%$$

$$\dots 0.54\% \leq Cr \leq 1.49\%$$

$$+0 \times Cr \dots 0.03\% \leq Cr \leq 0.53\%$$

$$\dots 0.54\% \leq Cr \leq 1.49\%$$

Table 9 Interaction between alloying element and test temperature

Interaction	Surface cracking (%)	Section cracking (%)	Root cracking (%)
C × T	0.16	0.10	0.20
Si × T	-0.03	-0.04	-0.04
Mn × T	-0.01	-0.01	0
Ni × T	0.001	-0.002	-0.003
Mo × T	-0.02	-0.02	-0.02
Cr × T	-0.07	-0.07	-0.07

The effects is represented in form of coefficient of carbon equivalent

つぎに試験温度が常温から 75°C に変化することによって、溶接金属の割れ率におよぼす合金元素の効果の変化を考えてみる。

Table 9 は溶接金属割れ率に対する合金元素と温度の効果の交互作用を示しており、元素と温度の交互作用は一般に小さく、試験温度の上昇により割れ率そのものは減少するが、割れ率に対する各合金元素の効果は温度によってあまり変化しないことがわかる。したがって 75°C における溶接金属割れに対する炭素当量式を常温の炭素当量式で近似することができる。

低水素系溶接金属の割れ感受性に対する炭素当量式として (1) 式, (2) 式, (3) 式がえられたが、これらの式によって、溶接金属の割れ感受性がどの程度よく評価しうるものであるか、またこの炭素当量式によって計算される炭素当量値と割れ率の間にはどのような関係があるかを明らかにするため、市販溶接棒をふくむ十数種の低水素系溶接棒について、さきにのべた溶接条件で割れ試験を実施した。

割れ試験結果を本実験でもとめた炭素当量式で整理すると、Fig. 4 から Fig. 7 がえられる。表面割れ率、断面割れ率、ルート割れ率いずれもどのような結果がえられた。本報では割れ試験の指標として比較的重要な断面割れ率、ルート割れ率の結果のみを示す。

Fig. 4 Correlation between Ceq(s) and section cracking percentage **Fig. 5** Correlation between Ceq(r) and root cracking percentage **Fig. 6** Correlation between Ceq(s) and section cracking percentage (75°C) **Fig. 7** Correlation between Ceq(r) and root cracking percentage (75°C)

常温における割れ試験結果と炭素当量の関係をみると、割れ率はいずれも炭素当量の値によってかなりはっきりとした変化を示し、炭素当量が 0.25 以下では割れは発生せず、0.25~0.40 で 0%~50% の割れ率を示し、炭素当量が 0.40 以上になると割れ率は 50% 以上になる。

予熱温度 75°C では割れの発生しない範囲は広がり、炭素当量 0.35 以下ではほとんど割れは発生しない、炭素当量 0.35 以上になると、炭素当量の増加にしたがって、割れ率は増加し、炭素当量が 0.45 以上になると、予熱温度 75°C でも、100% にちかい割れ率を示すことがある。

つぎに、溶接金属の硬度、ならびに組織と割れの関係

Fig. 8 Correlation between hardness, microstructure of weld metal and section cracking percentage.

Fig. 9 Correlation between hardness, microstructure of weld metal and root cracking percentage.

について検討した。Fig. 8, Fig. 9 は溶接金属硬度および組織と割れの関係を示したものである。

この結果より、溶接金属の割れと硬度、組織の間にかかなり顕著な関係がみられる。すなわち、溶接金属の割れの発生しない硬度の上限値はほぼ 270 Hv であり、270 ~ 300 Hv で割れ率は 0 ~ 10%，300 ~ 350 Hv で割れ率は 10 ~ 50%，350 Hv 以上では割れ率 50% 以上の割れが発生している。

溶接金属の組織についてみると、われの発生している溶接金属はほとんど、オールペーナイト組織あるいはペーナイト + マルテンサイト組織を示し、フェライトを含んでいる溶接金属は一例をのぞいて溶接金属割れを発生していない。したがって溶接金属の割れを防ぐには、溶接金属の組織にフェライトを含むような化学組成なり、冷却速度を選ぶべきである。

なおこの結果で注目すべきことは、溶接金属の硬度、組織で整理すると、試験温度にかかわらず、同一グラフに割れ試験結果がまとめられることである。これは水素量、溶接条件、拘束力が一定であれば、溶接金属の割れ率は溶接金属の硬化性とかかなり大きな関係があることを示すものであり、じゅうらい母材熱影響部の溶接割れは水素、拘束力、硬化能によって左右されるいわれているが、本実験によって、溶接金属もどのようなことがいえ

Fig. 10 Correlation between hardness, tensile strength of weld metal and section cracking percentage.

Fig. 11 Correlation between hardness, tensile strength of weld metal and root cracking percentage.

ることが明らかとなった。

さらに溶接金属の引張強さと割れ率の関係を検討した。溶接金属の引張強さは溶接のままの引張強さに対する炭素当量式 $Ceq(T.S)^{3)}$ をもちいて、溶接金属の化学分析値からもとめた。Fig. 10, Fig. 11 は溶接金属の引張強さレベルと断面割れ率、ルート割れ率の関係を示している。この結果より本実験条件のもとで、HT 50, HT 60 では試験温度が常温、75°C において溶接金属割れ発生は少ない。HT 70 は常温では大部分溶接金属割れを発生するが、75°C の予熱によって溶接金属の割れ発生をかなり防ぐことができる。一方 HT 80, HT 90 では予熱温度 75°C においても割れの発生は防止できないことがわかる。

IV. 考 察

合金元素 0.1 % 増加にともなう溶接金属割れ率の変化量を Table 8 に示した。この結果から、溶接金属の割れ率にもっと影響を与えるのは C であり、C について溶接金属割れ感受性を高める元素は 0.54% 以上を含有する場合の Cr である。ついで悪影響をおよぼす元素は Si, Mo, Mn であり、これら 3 つの元素の間には溶接金属割れに対する効果に大きな差はみられない。Ni は本実験

Table 10 Variation of cracking percentages with increase of tensile strength of 1 kg/mm² by increasing content of each alloying element

Alloying element	Surface cracking percentage (%)	Section cracking percentage (%)	Root cracking percentage (%)
C	2.5	2.6	2.4
Si	5.1	5.5	5.3
Mn	2.5	2.7	2.7
Ni	2.8	3.7	3.2
Mo	2.2	2.3	2.3
Cr (0.03%~0.53%)	<0.1	0.5	0.6
Cr ₁ (0.54%~1.49%)	6.0	5.6	5.5

に供試した合金元素の中では比較的溶接金属割れに対する影響は小さい。

高張力鋼溶接棒を考慮する場合, いかなる元素によって, 引張強さを高めるのが溶接金属割れに対して有利であるかを知ることが重要である。Table 10 は各合金元素によって, 引張強さ 1 kg/mm² 増加することによる割れ感受性の変化を本実験結果と第1報³⁾の結果をもちいて計算した結果を示している。

この結果より単位引張強さに対して, 割れ感受性を高める元素は Si, および0.54%以上の Cr である。C, Mn, Ni, Mo はほぼ同程度であり, C は一般にもっとも溶接

をおこなっており, ルート割れ発生に対する危険なかたさの範囲は HT 50, HT 60 溶接金属では 215~290 Hv, HT 70, HT 80 では 270~330 Hv であることをのべている。また, 組織については, ルート割れ防止のためには溶接金属では熱影響部より多量のフェライトの析出を必要とし, HT 80 では組織中に若干のフェライトを含む必要があるとしており, これらの実験結果は本実験とかなり一致した結果を示している。

本研究では, 母材における割れ発生を防ぎ, 解析を容易にするため, すべて溶接割れ試験片として SM 41 A を供試した。

溶接割れ試験片として高張力鋼を使用した場合, 多少拘束度変化するため, 割れ発生限界は若干変化することが考えられる。しかし, 本研究において, すべて溶接ビードの組成値をもちいて実験結果を解析したので, 溶接割れ試験片が高張力鋼であっても, 各合金元素の溶接金属割れ感受性に対する炭素当量の係数には大きな変化はなく, 本研究でえられた炭素当量式はそのまま適用できると考えられる。

V. 結 論

1 低水素系溶接金属の割れ感受性に対する炭素当量式をもとめ, 割れ率との関係をしらべた。その結果,

$$\begin{aligned}
 &\text{表面割れ率に対する炭素当量} && +0 \times \text{Cr} \cdots 0.03\% \leq \text{Cr} \leq 0.53\% \\
 &\text{Ce}_q(f) = \text{C} + 0.14 \text{ Si} + 0.10 \text{ Mn} + 0.04 \text{ Ni} + 0.11 \text{ Mo} + 0.27(\text{Cr} - 0.53) \cdots 0.54\% \leq \text{Cr} \leq 1.49\% \\
 &\text{断面割れ率に対する炭素当量} && +0 \times \text{Cr} \cdots 0.03\% \leq \text{Cr} \leq 0.54\% \\
 &\text{Ce}_q(s) = \text{C} + 0.15 \text{ Si} + 0.11 \text{ Mn} + 0.05 \text{ Ni} + 0.12 \text{ Mo} + 0.24(\text{Cr} - 0.53) \cdots 0.54\% \leq \text{Cr} \leq 1.49\% \\
 &\text{ルート割れ率に対する炭素当量} && +0 \times \text{Cr} \cdots 0.03\% \leq \text{Cr} \leq 0.53\% \\
 &\text{Ce}_q(r) = \text{C} + 0.15 \text{ Si} + 0.12 \text{ Mn} + 0.05 \text{ Ni} + 0.13 \text{ Mo} + 0.26(\text{Cr} - 0.53) \cdots 0.54\% \leq \text{Cr} \leq 1.49\% \\
 &0.10\% \leq \text{C} \leq 0.18\%, & 0.12\% \leq \text{Si} \leq 0.53\%, & 0.70\% \leq \text{Mn} \leq 1.38\% \\
 &0.03\% \leq \text{Ni} \leq 1.17\%, & 0.01\% \leq \text{Mo} \leq 0.49\%, & 0.03\% \leq \text{Cr} \leq 1.49\%
 \end{aligned}$$

割れに悪影響をおよぼすといわれているが, 引張強さをいじめるしく高めるため, 単位引張強さあたりでは, 他の元素とあまり差はない。溶接金属割れに対して比較的影響の小さい元素は 0.53%以下の Cr であり, 溶接金属割れ感受性の低い高張力鋼溶接棒をつくるには Cr を 0.53%以下におさえるとともに, Si をできるだけ低くする必要がある。

著者らは本実験条件のもとで溶接金属割れと溶接金属硬度, 組織の関係について検討をおこない, 溶接金属割れ発生防止の溶接金属硬度の上限値は 270 Hv であることを示した。また, 溶接金属の組織との関係については, 溶接金属の割れ発生を防ぐには溶接金属にフェライトを含むような化学組成, あるいは冷却速度を選ぶべきことをのべた。稲垣, 中村, 鈴木⁷⁾は数種の高張力鋼溶接棒および高張力鋼板をもちいて, 溶接金属の割れ試験

2. 市販高張力鋼溶接棒を含む十数種の低水素系溶接棒について, 溶接金属割れ試験を実施し, 本実験でえた炭素当量式で整理した結果, これらの炭素当量式によって, 溶接金属の割れ傾向をよくあらわしうることを確認した。

3. 溶接金属割れ発生防止に対する溶接金属硬度の上限値は 270 Hv である。また, 溶接金属の割れ発生を防止するには溶接金属の組織にフェライトを析出するような化学組成および冷却速度を選ぶ必要がある。

参 考 文 献

- 1) 稲垣, 中村, 鈴木 “ルート割れと高張力鋼溶接組織の関係について” 金属材料技術研究所研究報告, 第8巻, 第3号, p. 23~p. 36
- 2) 稲垣, 中村, 鈴木 “ルート割れと高張力鋼化学組成の関係について” 金属材料技術研究所研究報告, 第8巻, 第6号, p. 25~p. 36
- 3) 伊藤, 小泉 “低水素系溶着金属の機械的性質に対する炭素当量の算出 (第1報)” 溶接学会誌, 33, 12 (1964) 1047~1053
- 4) 伊藤, 小泉 “低水素系溶着金属の機械的性質に対する炭素当量の算出 (第2報)” 溶接学会誌, 34, 6 (1965) p. 572~p. 578