研究論文

溶接継手のクリープ性能評価に関する検討(第1報)*

—母材と溶接金属のクリープ特性の相違が溶接継手のクリープ強度, 延性に及ぼす影響に関する検討—

佐藤邦彦**, 豊田政男**, 松井繁朋***, 森 英介***, 清水茂樹***, 佐藤瓊介***

Study on Evaluation of Creep Behavior of Welded Joint (Report 1)*

—Effect of the Difference of Creep Properties between Base Metal and Weld Metal on Creep Behavior of Welded Joint.—

by Kunihiko Satoh**, Masao Toyoda**, Shigetomo Matsui***,
Eisuke Mori***, Shigeki Shimizu*** and Keisuke Satoh***

The creep tests for welded joints with higher creep rate and lower strength weld metal and with lower creep rate and higher strength weld metal respectively which are subjected to transverse and longitudinal loads respectively have been carried out.

In case of the joints subjected to transverse load, the creep strain is influenced not only by the magnitude of a gage length but also by the ratio of the weld metal width to the diameter of a specimen. The rupture strength is dominated fundamentally by the ratio of the weld metal strength to base metal strength, though there is an effect of the ratio of the weld metal width to the diameter of a specimen on the rupture strength of a welded joint with higher creep rate and lower strength weld metal.

In case of the joints subjected to longitudinal load, the secondary creep rates are affected by the ratio of the weld metal width to the specimen width. The rupture strength is dominated not only by the rupture strength ratio of the weld metal to the base metal but also by the creep rate ratio of the weld metal to the base metal.

1. 緒 言

溶接継手のクリープ性能を評価する場合, 従来一般的に行われている方法は, 試験片形状(平行部の寸法及び標点距離)を溶接部の寸法に関係なく規格化し, しかも溶接継手が直角方向に荷重を受ける横継手試験片にてクリープ試験を行い, 破断延性及び破断強度を比較評価している。しかし, 一般に溶接継手では溶接金属とこれに隣接する母材部の特性は異なる。このような継手が高温下で一定荷重を受けた場合, そのクリープ強度及び延性は溶接部の寸法と試験部寸法に依存し, また延性は標点距離の大小にさえ大きな影響を受けることは静的引張試

験の結果¹⁾からも容易に推定できる。更に, 実構造物を考えた場合, 溶接継手部は種々の方向に荷重を受ける。そして継手が直角に荷重をうける横継手と平行に荷重を受ける縦継手とは本質的にクリープ挙動が相違することは明らかである。

溶接構造物の高温設計の観点からみて, 溶接継手の破断強度及び延性に及ぼす試験片寸法の影響, 母材と溶接金属のクリープ特性の差異による影響, 更に荷重方向の影響などを基本的に解明する必要がある。これらの解明は従来の蓄積された横継手クリープデータを高温設計基準に整理適用する上からも必要である。

本報は, 母材に比して溶接金属のクリープ強度が低くクリープ速度が大なる継手(以後軟質溶接継手と呼ぶ), 逆にクリープ強度が高くクリープ速度が小なる継手(以後硬質溶接継手と呼ぶ)をモデル化し, 溶接継手が直角に荷重を受ける場合(以後横継手と呼ぶ)及び平行に荷

*原稿受付 昭和56年9月2日

**正 員 大阪大学工学部 Member, Faculty of Engineering, Osaka University

***正 員 川崎重工業(株) Member, Kawasaki Heavy Industries, Ltd.

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of materials used

Material	Chemical compositions(%)													Mechanical properties				
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Co	W	Fe	B	Al	Ti	0.2% P.S. (kg/mm ²)	T. S. (kg/mm ²)	Elong. (%)	Hardness (Hv)
Hastelloy X	0.085	0.09	0.74	0.006	0.0022	47.51	22.36	8.87	1.50	0.25	18.08	0.0022	—	—	42.3	83.8	40	—
SUS 316	0.06	0.81	1.82	0.034	0.007	11.27	17.59	2.26	—	—	—	—	—	—	—	61	63	152
Incoloy 800	0.056	0.37	0.77	0.01	0.002	32.13	21.21	0.18	0.50	—	Bal.	—	0.51	0.59	22.1	58.2	52	—

重を受ける場合（以後縦継手と呼ぶ）についてクリープ試験を行い、溶接継手のクリープ破断強度及び延性に及ぼす母材と溶接金属のクリープ特性の差異による影響、試験片寸法の影響及び荷重方向の影響について実験的に検討を行った。

2. 試験方法

2.1 供試材及び試験板製作要領

軟質溶接継手製作のためには母材に Hastelloy X、インサート材に SUS 316 を使用し、また、硬質溶接継手のためには母材に SUS 316、インサート材に Incoloy 800 を使用し、EB 溶接により継手試験板を作製した。供試材の化学成分及び室温における機械的性質を Table 1 に示す。

約 3mm 幅の well 型ビードを得るため、Fig. 1 に示す開先形状を用い、Table 2 に示す溶接条件にて溶接を行い、X 線透過試験にて溶接欠陥のないことを確認した後試験片の加工を行った。

Fig. 1 Joint configurations**Table 2** EB welding conditions

V_b (kV)	I_b (mA)	U_b (mm/min)	D_o (mm)	D_f (mm)	P_{ch} (Torr)	Q_b
150	40	200	225	185	5×10^{-4}	1.22

V_b : accelerating voltage I_b : beam current
 U_b : welding speed D_o : objective distance
 D_f : focal distance P_{ch} : chamber pressure Q_b : D_o/D_f

2.2 クリープ試験方法

2.2.1 母材及び溶接金属のクリープ試験

軟質及び硬質溶接継手の母材及び溶接金属クリープ試験片はそれぞれ Fig. 2 に示す形状の試験片とした。溶接金属試験片は Fig. 1 に示す継手から溶接金属部を溶接

Fig. 2 Shape of creep test specimens

方向に採取し、これと試験片つかみ部 (Hastelloy X) を EB で溶接し、Fig. 2 に示す形状に加工した。クリープ試験はシングルクリープ試験機にて温度 700℃にて行った。クリープ変形は、GL 間の伸びをダイヤルゲージにて連続的に測定した。試験温度は、各試験片に熱電対を取り付け、温度記録計及びデジタル温度計にて温度測定を行い、試験片の温度分布を 700℃±3℃に制御した。

2.2.2 横継手クリープ試験

横継手クリープ試験片は、Fig. 3 に示すように丸棒引張試験片で、溶接部の幅 3mm に対し平行部の直径を変化させ溶接部の相対厚さ¹⁾ (溶接部の幅 H_0 と試験片平行部の直径 D_0 の比: H_0/D_0) を変化させた。試験片

Relative thickness (H_0/D_0)	Width of weld metal H_0 (mm)	Diameter D_0 (mm)	Length of tested zone l (mm)	Gage length L_0
0.2	3	15	80	H_0 $2H_0$ $4H_0$ $6H_0$ $8H_0$ $10H_0$
0.3	3	10	60	
0.4	3	7.5	60	
0.5	3	6	60	
1.0	3	3	60	
1.5	3	2	60	

Fig. 3 Shape of welded joint creep test specimen subjected to transverse load

標点距離 L_0 については, 溶接部を中央にして, 軟質溶接継手は $L_0=2H_0, 4H_0, 6H_0, 8H_0, 10H_0$ とし, また硬質溶接継手は $L_0=H_0, 2H_0, 4H_0, 6H_0, 8H_0, 10H_0$ とした。

クリープ試験は, レバー式マルチプル型クリープ破断試験機を使用し, 軟質溶接継手については温度 700°C , 初期負荷応力 17 kg/mm^2 , 硬質溶接継手は 700°C , 11 kg/mm^2 で行った。クリープ変形測定に関しては, 任意の時間に試験片を取出して, 各標点間の伸びは読取顕微鏡で, また, 各標点及び溶接中央部の直径変化はマイクロメータで測定した。試験温度は, 各試験片に熱電対を取付け温度記録計及びデジタル温度計にて温度測定を行い, 試験片の温度分布を $700^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$ に制御した。

2.2.3 縦継手クリープ試験

縦継手クリープ試験片は, Fig. 4 に示すように板状試験片であり, 溶接部の幅 $H_0=3\text{ mm}$ に対し板厚を一定にして板幅 W_0 を変化させ, いわゆる相対幅 H_0/W_0 を変化させた。標点距離については, $L_0=10H_0=30\text{ mm}$ とし, 試験片平行部中央の両側に長手方向に直角にケガキ線を入れ標点とした。クリープ試験は横継手クリープ試験と同様に行った。クリープ変形は原則として50時間毎に試験片を取出し, 母材部及び溶接金属部の伸びは読取顕微鏡にて, 更に, 標点及び標点間中央の母材及び溶接金属部の板厚変化はマイクロメータにて測定した。また, この際表面に発生する微小キ裂の有無を100倍の顕微鏡にて観察した。なお試験条件は, 軟質及び硬質溶接継手共温度 700°C , 初期負荷応力はそれぞれ 17 kg/mm^2 及び 11 kg/mm^2 とした。

Width of weld metal H_0 (mm)	Width of tested zone W_0 (mm)	H_0/W_0	Length of tested zone l (mm)	Gage length L_0 (mm)
3	6	1/2	40	30
3	12	1/4	70	30
3	18	1/6	100	30
3	30	1/10	160	30

Fig. 4 Shape of welded joint creep test specimen subjected to longitudinal load

3. 溶接継手のクリープ挙動

3.1 母材及び溶接金属のクリープ特性

軟質溶接継手を構成する母材及び溶接金属自身のクリープ曲線を Fig. 5 に, またそれぞれの負荷応力と破断時間の関係及び定常クリープ速度の関係を Fig. 6 に示す。軟質溶接継手においては, 溶接金属は母材に比してクリープ破断強度が極めて小さく, クリープ速度が極めて大である。

硬質溶接継手を構成する母材及び溶接金属自身のクリープ曲線を Fig. 7 に, 負荷応力と破断時間及び定常クリープ速度の関係を Fig. 8 に示す。硬質溶接継手においては, 溶接金属は母材に比してクリープ破断強度が大き

Fig. 5 Creep curves for weld metal and base metal of the joint with higher creep rate and lower strength weld metal

Fig. 6 Creep properties for weld metal and base metal of the joint with higher creep rate and lower strength weld metal

Fig. 7 Creep curves for weld metal and base metal of the joint with lower creep rate and higher strength weld metal

Fig. 8 Creep properties for weld metal and base metal of the joint with lower creep rate and higher strength weld metal

Fig. 9 Creep curves of the joint with higher creep rate and lower strength weld metal

く、クリープ速度は小である。

なお、Fig. 6 と 8 の中の表に母材と溶接金属のクリープ特性をそれぞれ次式で表わした時の各クリープ定数を求めている。

$$\left. \begin{array}{l} \text{クリープひずみ速度: 母材} \quad ; \dot{\epsilon} = K (\sigma^B)^n \\ \text{溶接金属; } \dot{\epsilon}^W = K_W (\sigma^W)^n \end{array} \right\} (1)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{クリープ破断時間: 母材} \quad ; t_F^B = A_B \sigma^{-m} \\ \text{溶接金属; } t_F^W = A_W \sigma^{-m} \end{array} \right\} (2)$$

ここで溶接金属については、Hastelloy X の結果²⁾をふまえ、 n, m 値を母材と同一として便宜上求めたものである。

3.2 横継手クリープ試験

Fig. 9 は軟質溶接継手の母材及び溶接金属部のクリープ変形挙動を各試験片について示したものである。溶接金属部は溶接中央の継面減少率 (δ) から求めた無限小標点距離による伸び ($\epsilon = \frac{\delta}{100 - \delta} \times 100$)、母材部は標点間 $10 H_0$ の伸びから $6 H_0$ の伸びをマイナスした値、すなわち、溶接部から十分離れた母材の伸びを示している。また比較に溶接金属及び母材試験片から求めたクリープ伸びも併記している。母材部の伸びはいずれの試験片も母材自身の挙動を示している。しかし、溶接部の伸びは相対厚さ (H_0/D_0) による依存性を示しており、相対厚さの減少に従い溶接金属自身の挙動から母材の挙動に近づく傾向を示している。これは、相対厚さの減少に伴う溶接金属部の変形の母材による拘束が大になるためと考えられる。

硬質溶接継手の母材部及び溶接金属部のクリープ変形挙動は、Fig. 10 に示すように、相対厚さの影響がほとんど認められない。いずれの試験片も溶接金属部の伸びはほぼ溶接金属自身の挙動を示している。一方母材部は、母材自身の値を中心に大きなバラツキが見られ、傾向的には相対厚さの増大に従い伸び値が減少しているが、これは相対厚さを変えるために試験片直径の大きさを変化させているので、その寸法効果が現われているものと思われる。従来行ってきた未公表の SUS 316 鋼のクリープ実験によると、平行部の直径が小なる場合クリープひずみは小になる結果を得ている。

Fig. 11 は軟質溶接継手のクリープ破断延性に及ぼす相対厚さの影響を示したもので、 $L_0 = 2 H_0$ における破断伸び、また、溶接金属破断部及び溶接近傍母材部はそれぞれの絞りから求めた無限小標点距離における伸びを示している。なお、破断はいずれも溶接金属部である。溶接金属破断部の伸びは、相対厚さが 1.0 から減少するにつれ上昇する傾向を示すが、0.5 以下になると硬い母材の拘束のため減少し始める。さらに相対厚さが小さくなると、母材部が大きく変形し始めるため溶接金属部の

Fig. 10 Creep curves of the joint with lower creep rate and higher strength weld metal

Fig. 11 Effect of relative thickness on rupture ductility of the joint with higher creep rate and lower strength weld metal

(a) Welded joint with higher creep rate and lower strength weld metal

(b) Welded joint with lower creep rate and higher strength weld metal

Fig. 12 Effect of gage length on creep elongation

伸びは逆に増加する傾向を示す。なお、 $L_0 = 2H_0$ における破断伸びは、相対厚さの減少に伴い増大する傾向を示しているが、これは相対厚さの減少に伴う母材部の一様伸びの増大が大きく影響していると考えられる。

溶接継手のクリープ伸びに及ぼす標点距離の影響については、Fig. 12 に示すように、軟質溶接継手では標点距離が小さい程、当然のことながら、溶接金属のみが大きく伸びるため伸び値は大になり、硬質溶接継手では逆に溶接金属があまり伸びないため標点距離が小なる程伸び値は小になる。

3.3 縦継手クリープ試験

Fig. 13 は軟質溶接継手母材部及び溶接金属部の標点間におけるクリープ変形挙動の差異を一例として $H_0/W_0 = 1/2$ 及び $1/10$ の場合について示したものである。いずれの場合も母材と溶接金属部とでは破断に至るまではほぼ同一の伸び値を示している。一方、板厚減少率を観察すると、Fig. 14 に示すように、クリープの中途段階までは母材と溶接金属部はほぼ等しいが、それ以後になると母材の板厚減少は溶接金属部に比してかなり大になり変形挙動に差異がでてくる。Fig. 13 に認められるクリープ後半段階における母材と溶接金属部の同一な伸び値は溶接金属部の一様な変形だけによるものではなく、後述するように、溶接金属部には比較的早期に微小キ裂が表面に発生し、これが貫通、開口して見かけ上の伸び値に大きく寄与し、母材と溶接金属の伸びが平衡を保っているものと考えられる。

硬質溶接継手では、母材と溶接金属部の標点間におけるクリープ伸びは、軟質溶接継手の時と同様に、破断に至るまではほぼ同一の伸び値が観察されたが、板厚減少は Fig. 15 に示すようにかなり早期段階より差異が認められる。このような早期段階では後述するように溶接金属

Fig. 13 Difference in creep elongation between base metal zone and weld metal zone for the joint with higher creep rate and lower strength weld metal

Fig. 14 Difference in reduction of thickness between base metal and weld metal zones for the joint with higher creep rate and lower strength weld metal.

Fig. 15 Difference in reduction of thickness between base metal and weld metal zones for the joint with lower creep rate and higher strength weld metal.

部にはキ裂は認められない。したがって、硬質溶接継手では母材と溶接金属部の標点間のクリープ伸びが釣り合うために、体積一定とするとクリープの早期段階から溶接金属部の板幅方向の減少が母材部に比して大になっているものと考えられる。

溶接継手の第2期クリープひずみ速度に及ぼす相対幅 (H_0/W_0) の影響については、Fig. 16 に示すように、軟質溶接継手では H_0/W_0 の小さな範囲では母材自身の値を示し、 H_0/W_0 の増大に従い溶接金属自身の値に漸近する傾向を示す。一方硬質溶接継手の場合は、 $H_0/W_0 = 0.5$ 以上ではほぼ溶接金属自身の値を示し、 H_0/W_0 の減少に従い母材自身に近い値を示すようになる。

4. 溶接継手のクリープ破断寿命

Fig. 17 は軟質及び硬質横継手の破断時間と相対厚さ (H_0/D_0) の関係を示したものである。軟質溶接継手に関しては、すべて溶接金属部破断であるが、破断時間は相対厚さに依存し、相対厚さが1以上では溶接金属自身の値を示し、相対厚さの減少と共に破断時間は母材自身の値に向って増大している。なお、著者らは既報において横継手の破断時間は母材と溶接金属のクリープ破断強度の小さい方によって決まるとする考え方を示した³⁾。このようにして求まる値を Fig. 17 に併記している。これによると、硬質溶接継手の結果は当然のことながら良く一致するが、軟質溶接継手では相対厚さが小さい場合変形拘束効果を考えないものはあまりにも安全側の推定結果になっている。

縦継手の破断時間としては、Fig. 18 に示すような微小キ裂が母材又は溶接金属に生じた時間（本実験では軟質及び硬質溶接継手のいずれの試験片においても微小キ裂の発生は溶接金属部であった）とした。

Fig. 16 Effect of H_0/W_0 on secondary creep rates of the joints subjected to longitudinal load.

Fig. 17 Effect of H_o/D_o on rupture time of the joints subjected to transverse load

Temp.: 700°C
Stress: 17kg/mm²
 $H_o/W_o = 1/6$, Time: 150h
(a) Welded joint with higher creep rate and lower strength weld metal

Temp.: 700°C
Stress: 11kg/mm²
 $H_o/W_o = 1/6$, Time: 300h
(b) Welded joint with lower creep rate and higher strength weld metal

Fig. 18 Microcracks observed in weld metal zone

Fig. 19 は軟質継手の微小キ裂の発生時間と相対幅 (H_o/W_o) の関係を示したものであり、試験片が完全に破断した時間も示している。微小キ裂発生時間のデータは少ないが、試験片が完全に破断する時間が H_o/W_o の増大に従い減少することから微小キ裂の発生時間も H_o/W_o の増大に従い減少するものと考えられる。Fig. 20 は硬質継手の微小キ裂の発生時間と H_o/W_o の関係を示したものである。硬質溶接継手の微小キ裂の発生時間は H_o/W_o の増大に従い増大し、 $H_o/W_o = 0.5$ では母材の破断時間に一致している。ここで注目すべきことは、継手のキ裂発生時間は母材、溶接金属の破断時間のいずれよりも小さくなることがあることで軟質溶接継手とは傾向が異なる。

Fig. 19 Effect of H_o/W_o on rupture time of the joint with higher creep rate and lower strength weld metal subjected to longitudinal load

Fig. 20 Effect of H_o/W_o on rupture time of the joint with lower creep rate and higher strength weld metal subjected to longitudinal load.

なお、縦継手の破断時間は母材と溶接金属のクリープ破断強度比、クリープ速度比及び H_o/W_o によって計算することができ³⁾、Fig. 6 及び Fig. 8 に示したクリープ定数を用いて計算した結果を Fig. 19 及び Fig. 20 に併記している。計算結果は、軟質及び硬質溶接継手とも微小キ裂の発生時間に一致する傾向を示している。このように、溶接継手のクリープ破断強度は母材、溶接金属のクリープ破断強度比のみには依存せずクリープ速度比にも依存する。

以上のように、キ裂発生に注目した継手のクリープ破断強度は、著者らの解析³⁾ によるように、母材、溶接金属の強度比とクリープ速度比の両者を用いて推定が可能

である。

5. 結 言

母材に比して溶接金属のクリープ強度が低くクリープ速度が大なる継手（軟質溶接継手）、逆にクリープ強度が高くクリープ速度が小なる継手（硬質溶接継手）について、溶接継手が直角に荷重を受ける場合（横継手）及び平行に荷重を受ける場合（縦継手）についてクリープ試験を行った。得られた結果を要約すると次の通りである。

1) 横継手のクリープ変形は、軟質溶接継手の場合溶接金属部は相対厚さ (H_0/D_0) の影響を受け、 $H_0/D_0=1$ ではほぼ溶接金属自身の挙動を示し、 H_0/D_0 が減少するにつれ母材自身に近い挙動を示すようになる。なお、軟質溶接継手の溶接金属から十分離れた母材部及び硬質溶接継手の母材及び溶接金属部は相対厚さの影響をほとんど受けず、それ自身の挙動を示す。

2) 縦継手の母材部及び溶接金属部のクリープ変形挙動については、標点間の伸びは軟質及び硬質溶接継手共差異はない。板厚減少は、軟質溶接継手では微小キ裂の開口現象が生じるまではほぼ一様であるが、それ以後では差異が出る。また、硬質溶接継手ではクリープの早期

段階より差異が認められる。

3) 縦継手の第2期クリープひずみ速度は軟質及び硬質溶接継手共相対幅 (H_0/W_0) の影響を受ける。いずれの継手も H_0/W_0 が小さくなるにつれて母材自身のクリープ挙動に近くなり、逆に H_0/W_0 が1に近づくと溶接金属自身に近づく。本実験の場合、 H_0/W_0 が0.1以下ではほぼ母材と同一のひずみ挙動を示すと考えられる。

4) 横継手の破断時間については、軟質溶接継手では相対厚さ (H_0/D_0) の影響を受け、 $H_0/D_0=1$ ではほぼ溶接金属自身の値を示し、 H_0/D_0 が減少するに従い母材自身の値に漸近する。硬質溶接継手では相対厚さの影響を受けず母材自身の値を示す。

5) 縦継手の微小キ裂発生時間には、軟質及び硬質溶接継手共相対幅 (H_0/W_0) の影響を受け、軟質溶接継手の場合は H_0/W_0 の増大に従い減少し、硬質溶接継手では H_0/W_0 の増大に従い増大する。

参 考 文 献

- 1) K. Satoh and M. Toyoda, Joint Strength of Heavy Plates with Lower Strength Weld Metal, Welding J., Vol. 54, No. 9 (1975)
- 2) 荒田, 須沼, 清水, 佐藤, 永井, 本誌 Vol. 49 (1980) 755-760
- 3) 佐藤, 豊田, 須沼, 松井, 清水, 佐藤, 森, 圧力技術 Vol. 18 (1980) 2-8

溶接低温割れへの力学的パラメータ F_I の適用に関する実験的検討*

佐藤邦彦**, 豊田政男**, 野原和宏**, カルピー・リスト***

Experimental Investigation on Applicability of Stress Field Parameter F_I for Weld Hydrogen Cracking*

by Kunihiko Satoh**, Masao Toyoda**, Kazuhiro Nohara** and Risto, A. J. Karppi***

Stress field parameter F_I , which controls the stress level in the vicinity of the root of first-pass weld and the notch of the Implant specimen has been proposed by the authors as a controlling parameter for weld hydrogen cracking. The previous papers²⁾³⁾ reveal that the correlation between Implant test results and RRC/TRC test results of 80 kg/mm² high strength steel (HT80) can be explained with fair accuracy by using the stress field parameter F_I .

In the present paper, addresses applicability of the stress field parameter F_I to cover not only HT80 steel but also 50 kg/mm² high strength steel (HT50). Moreover, it proposes the applicability of the para-

*原稿受付 昭和56年7月23日

**正 員 大阪大学工学部 Member, Faculty of Engineering, Osaka University

*** フィンランド・アカデミー, Academy of Finland