参考文献

- 1) N.F. Kazakov; Diffuzionaya Svarka Vakuume, Mashinostroyeniye, (1968).
- 2) M.M. Schwartz; Modern Metal Joining Techniques, John Wiley & Sons, (1969), 370.
- 3) Y. Arata, K. Terai, S. Matuda, H. Nagai and T. Yamada; Diffusion Welding of Titanium to Mild Steel, Trans. JWS, 4-1 (1973), 96-103.
- 4) G.K. Kharchenko; Problems in the Diffusion Welding of Dissimilar Metals (Reviews of Published Works), Avt. Svarka, 2-4 (1969), 29-32.
- 5) N. Iwamoto, M. Yoshida, S. Tabata, T. Takeuchi and M. Makino; Diffusion Welding of Mild Steel to Aluminium, Trans. JWRI, 4-2 (1975), 67-70.
- 6) 圓城敏男, 池内建二, 飯田孝道, 金井雅仁, 荒田吉明; Ti-15% Mo-5% Zr 合金と軟鋼 (0.06% C) との拡散溶接に関する研究, 高温学会誌, 1-3 (1976), 36-48.
- 7) R.F. Tylecote; The Solid Phase Welding of Metals, Edward Arnold, (1968), 301.
- 8) M. Hansen; Constitution of Binary Alloys, McGraw Hill, (1958), 139.
- 9) F.J.J. van Loo and G.D. Rieck; Diffusion in the Titanium-Aluminium System—I. Interdiffusion between Solid Al and Ti or Ti-Al Alloys, Acta Met. 21-1 (1973), 61-71.
- 10) S. Tsuji; On the Determination of Diffusion Coefficients and the Estimation of the Rate Constants of Phase Interface Moving in a Multi-Phase Interdiffusion, Trans. JIM, 14-5 (1973), 377-381.

各種溶接割れ試験法の相関性について*

桐原誠信** 小沼勉** 渡辺潔**

Correlation for Method of Various Weld Cracking*

by Seishin Kirihara**, Tsutomu Onuma** and Kiyoshi Watanabe**

The relationships between various weld crack test methods were discussed at the 9th Commission meeting of I.I.W. This article evaluates crack determination methods for slit groove tests, H-type restraint cracking tests, TRC tests, RRC tests and Implant tests, and discusses the intensity of restraint and restraint stress influencing crack prevention preheating temperatures. Finally the relationships between various test methods are clarified concerning cracks caused in first layer. The results are as follows:

- (1) The dependence of delayed cracks on cooling speed (preheating), intensity of restraint, restraint stress and stress concentration will be explained using 80 kg/mm² high-strength steel.
- (2) A nomograph was made up to clarify the relationships between the various test methods by relating the crack prevention preheating temperatures to critical restraint stress and critical intensity of stress in the first layer of 80 kg/mm² high-strength steel.

1. 緒 言

2. 実 験

溶接部の割れ試験法については IIW, 第 IX 委員会でも各種試験の相関関係について討議されている。一方日本国内においても日本鋼構造協会 (JSSC) の研究班によって研究が行なわれている。そこで本研究はこれらと平行してスリット形試験片, H 形試験片¹⁾, RRC 試験, TRC 試験²⁾, およびインプラント試験を行い, 割れ防止予熱温度と拘束度および拘束応力との関係を明らかにし, 初層溶接部について各種試験法の相関関係について検討を行なった。

2.1 供試料

供試母材は 80 kg/mm² 高張力鋼を用いた。溶接棒は低水素系被覆アーク溶接棒 (AWS, E11016G 相当) 4φ を用いた。

Table 1 に供試材の化学組成と機械的性質を示す。

2.2 試験溶接

溶接は下向で Table 2 に示す条件で行なった。溶接棒の乾燥は 350°C で 1 時間以上行なった。また予熱は H 形試験片, スリット形試験片およびインプラント試験の母板は電気炉で所定の温度以上に加熱し, 電気炉より取り出し所定温度に冷却するのをまて行なった。一方 RRC および TRC 試験片は溶接開先を狭み板厚の 6

*原稿受付 昭和51年5月31日(昭和50年度春季全国大会にて発表)

**正 員 KK日立製作所, 日立研究所, Member, Hitachi Research Laboratory, Hitachi, Ltd.

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of samples

Classification		Chemical composition (%)											Mechanical properties			Remarks
		O	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	B	σ_Y (kg/mm ²)	σ_B (kg/mm ²)	ϵ_L (%)	
Base metal	TP-1	0.12	0.26	0.76	0.005	0.004	0.23	1.00	0.49	0.50	0.20	0.005	75	80	26	H-type restraint cracking test piece TRC test piece
	TP-2	0.13	0.26	0.76	0.008	0.005	0.24	0.94	0.53	0.48	0.003	0.001	77	83	24	Slit groove test piece RRC test piece Implant test piece
Electrode	W-1	0.07	0.55	1.51	0.009	0.010	-	1.66	-	0.50	-	-	71	81	25	Applicable to TP-1 metal
	W-2	0.06	0.41	1.28	-	-	-	2.55	0.18	0.45	-	-	74	83	24	Applicable to TP-2 metal

$\sigma_Y = 0.2\%$ yield σ_B = Tensile strength ϵ_L = Elongation

Table 2 Standard welding conditions

Welding current AC (A)	Arc voltage (V)	Welding speed (cm/min)	Heat input (J/cm)	Electrode diameter (mm)
170	24	15	16,300	4

倍の範囲を所定温度にアセチレンガスバーナーでもって加熱した。

2.3 試験片形状

Fig. 1 は自拘束形の溶接割れ試験片を示し, Fig. 2 は外的拘束形の試験片を示す。インプラント試験の母板は SM-41 を用い, 溶接長は 60 mm とした。

Fig. 1 Self-restraint Type Weld Crack Test Piece

2.4 実験方法

予熱温度と割れ発生限界拘束度との関係を求めるための実験についてはスリット形試験片およびH型試験片を

Fig. 2 External-restraint-type Weld Crack Test Piece

用いた。これらの拘束度は佐藤²⁾の報告によると次式で表わされる。

1) スリット形

$$K = K_0 t \quad (\text{kg/mm} \cdot \text{mm}) \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$K_0: \text{拘束係数} \approx 70 \text{ kg/mm}^2 \cdot \text{mm}$$

$$t: \text{板厚 (mm)}$$

2) H形試験片

拘束係数 K_0 と Fig. 1(b) に示す B_s との関係は l と B 部分の弾性変形を考慮した解析解を求める計算式として渡辺, 佐藤³⁾による(2)式がある。今回 K_0 は(2)式を用いて電算機により具体的寸法を算出した。

$$K_0 = \frac{E}{B_c + \frac{L_c}{2L_s} B_s + B_c'} \quad (\text{kg/mm}^2 \cdot \text{mm}) \quad \dots \dots (2)$$

ここで

$$B'_c = \frac{4L_c}{\pi^3} (\xi + \zeta)^2 \left[\frac{\xi + \zeta}{\xi^2 + \zeta^2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m^3} \sin^2 \frac{m\pi\zeta}{\xi + \zeta} \right. \\ \left. + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m^2} \sin^2 \frac{m\pi}{\xi + \zeta} \right. \\ \left. + \frac{1}{\xi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m^2} \sin \frac{m\pi}{\xi + \zeta} \sin \frac{m\pi\zeta}{\xi + \zeta} \right] \\ \xi = \frac{2L_s}{L_c}, \quad \zeta = \frac{L_c + 2C}{L_c} \\ E: \text{ヤング率 (21000 kg/mm}^2\text{)}$$

予熱温度と割れ発生限界拘束応力との関係については TRC, RRC, インプラント試験で行なった。なお拘束応力 σ_w の算出はそれぞれの試験機に現われた荷重 P を溶接のと厚面積で除して表わした。インプラント試験はノッチ底部の断面積で除した。

3. 実験結果とその検討

3.1 予熱温度と割れ発生限界拘束度

Fig. 3 はスリット形試験片の予熱温度と断面割れ率との関係を拘束度を変化させ行なった結果である。 $K=2100 \text{ kg/mm} \cdot \text{mm}$ の場合の割れ防止予熱温度は 125°C で

Fig. 3 Preheating temperature and crack ratio in Y-slit test piece

TRC 試験法：引張拘束割れ試験 (Tensile Restraint Cracking Test) 溶接後 150°C 前後で一定荷重を長時間負荷させ、負荷応力と破壊に達するまでの時間との関係を示す。

RRC 試験法：完全拘束割れ試験 (Rigid Restraint Cracking Test) 溶接の全過程を通じて常に一定の拘束間距離を保つ試験法。実機構造物の拘束度を再現し、拘束間距離および拘束応力と遅れ破壊について行う。拘束度は次式で表わされる。

$$K = \frac{E}{l} t \quad (\text{kg/mm} \cdot \text{mm}),$$

E : ヤング率 l : 拘束間距離 (mm)

インプラント試験法: (Implant Test)

$6\phi \sim 8\phi$ の試験片に 40° の人工的ノッチを作り、ノッチ底部に溶接熱影響部がくるように溶接し、 150°C 前後に冷却した時に一定荷重を負荷する。破断しない場合は $24 \sim 48 \text{ h}$ 保持する。TRC 試験と負荷方式は同じ、少量の試料で割れ評価が行えることを特徴としている。

ある。また、 $K=1400 \text{ kg/mm} \cdot \text{mm}$ では 75°C 、 $K=700 \text{ kg/mm} \cdot \text{mm}$ では予熱なしでも割れは発生しない。

Fig. 4 は H 形試験片を用い予熱温度を変えて拘束度と割れ率との関係について試験した結果である。予熱温度を上昇させることは割れ率を減少させ割れ発生限界拘束度を高くする。

Fig. 4 Restraint Intensity and Crack Ratio of H-type Test Piece

Fig. 5 は、図3および図4の自拘束形試験片で求めた予熱温度と割れ発生限界拘束度との関係を整理したものである。スリット形試験片と H 形試験片の間で多少のバラツキは認められるがほぼ1本のバンドで示される。バラツキの程度は予熱温度で表わすと $\pm 13^\circ\text{C}$ 程度、また拘束度で表わすと $\pm 200 \text{ kg/mm} \cdot \text{mm}$ である。このバラツキの原因は供試母材の材質、開先形状、溶接ビード長および溶接のど厚比 Q_w ($Q_w = t_w/t, t_w$: のど厚 t ; 板厚) などの違いによるものと考えられる。

Fig. 5 Crack Initiation Critical Restraint Intensity vs. Preheating Temperature

3.2 予熱温度と割れ発生限界拘束応力

Fig. 6 は自拘束形の試験である RRC 試験により拘束度の違いによる拘束応力の発生状況と割れ発生限界拘束度を求めたものである。拘束応力は拘束度が大きいほど高くなり短時間側に移る傾向がある。拘束度が $1400 \text{ kg/mm} \cdot \text{mm}$ 、すなわち最大拘束応力が 43 kg/mm^2 以下であると予熱なしであって溶接割れは発生しない。

Fig. 6 State of Restraint Stress and Crack Initiation in RRC Test

なお, RRC 試験の予熱は一般に溶接部近傍のみを局部的に行い拘束材は室温に保持される。ゆえに予熱を行うと溶接部に熱応力が発生し, 予熱をした試験は拘束度と拘束応力の関係において真値を示さない。そこで一般に予熱を行ったものに対しては拘束応力で割れを評価する。

Fig. 7 は RRC 試験による予熱温度と割れ発生限界拘束応力との関係について整理したものである。予熱温度を高くすることによって割れ発生限界拘束応力は上昇し, 予熱温度 150°C では割れ発生限界拘束応力は 89 kg/mm² と母材および溶接金属の引張強さを上まわる値となる。

Fig. 8 は予熱温度, 冷却時間と拘束応力との関係について整理したもので, 比較的バラツキのない1本の線で表わすことが出来る。

Fig. 9 は TRC 試験における遅れ破壊に対する拘束応力と予熱温度との関係を示したものである。RRC 試験と同様な傾向を示し, 予熱温度が上昇すれば割れ発生限界拘束応力は上昇する, また RRC 試験においては割れ発生から破断まで比較的長時間を要するが, TRC 試験の場合は短時間で表われ, 定変位方式と定荷重方式による試験法の違いが明瞭に現われている。また, TRC 試験の割れ発生から破断までの時間は予熱温度が高い程長時間になることが判る。割れ発生限界拘束応力は予熱温度が高くなるに従い RRC 試験の結果より多少低くなる傾向にある。

Fig. 10 は最近低温割れ試験の評価法として注目されてきた試験法であるインプラント試験について切欠底部のノッチ半径を 0.1, 0.2, 0.3 R_{mm} と変化させ割れ発生限界拘束応力を求めたものである。ノッチ半径が大きくなるに従い割れ発生限界拘束応力は高くなる。この結果を Fig. 6 と対比してみると切欠部のノッチ半径が 0.1 mm の場合, RRC 試験と一致することが判る。またインプラントのノッチ半径 0.1 mm は一般に推奨されて

Fig. 7 Preheating Temperature and Crack Initiation Critical Restraint Stress in RRC Test

Fig. 8 Relation of Cooling Time and Preheating Temperature to Crack Initiation Critical Restraint Stress in RRC Test

Fig. 9 Preheating Temperature vs. Tensile Restraint stress in TRC Test

Fig. 10 Notch Radius vs. Crack Initiation Critical Restraint Stress in Implant Test

いるものであるが本実験においても確認された。

Fig. 11 は Fig. 10 を整理し表わしたものである。

Fig. 12 はノッチ半径 R=0.1 mm 一定としてインプラント母板の予熱温度を変えて行なった結果である。

Fig. 11 Radius of Implant Specimen Notch vs. Crack Initiation Critical Restraint Stress

Fig. 12 Preheating Temperature vs. Crack Initiation Critical Restraint Stress in Implant Test

RRC, TRC 試験と同様予熱温度の上昇とともに割れ発生限界拘束応力は高くなる。予熱温度 150°C での割れ発生限界拘束応力は 90 kg/mm と高くなり母材および溶接金属の引張強さを上まわる。すなわち以上の RRC, TRC, インプラント試験結果から判断すると本供試材の 80 kg/mm² 高張力鋼の初層溶接割れ防止の上限の予熱温度は加熱範囲が十分広ければ 150°C で十分であると考えられる。

Fig. 13 は以上説明した RRC 試験, TRC 試験およびインプラント試験結果を予熱温度と割れ発生限界拘束応力について整理したものである。

予熱温度と割れ発生限界拘束応力の間には直線関係がある。しかし予熱温度が 150°C 以上になると母材強度から考えて割れ発生限界拘束応力は一定の値になるものと考えられる。また各試験法間で多少のバラツキは認められるが RRC 試験とインプラント試験において溶接部のピーク温度から 100°C までの冷却時間で整理するとほぼ 1 本の線で示すことが出来る。Fig. 14 はその結果である。冷却時間が 900 秒までは冷却時間が長くなるにつれて割れ発生限界拘束応力は高くなる。また冷却時間が 600 秒まではその上昇は小さいが、600~900 秒で割れ発生限界拘束応力の上昇は大きくなる。この理由としてはこの程度の冷却時間になると溶接熱影響部の冶金学的改善および水素散効果などが顕著に現われてくるものと考えられる。なお冷却時間 900 秒以上では割れ発生限界拘束

Fig. 13 Preheating Temperature vs. Crack Initiation Critical Restraint Stress

Fig. 14 Cooling Time vs. Crack Initiation Critical Restraint Stress

応力は一定の最高値を示す。すなわち 900 秒以上の冷却時間を持つ予熱はこの鋼種では不要であることが判断される。

3.3 各種試験法の相関関係

3.3.1 溶接割れに対する予熱, 拘束応力および拘束度の影響

RRC 試験, TRC, インプラント試験は予熱温度 P_H と割れ発生限界拘束応力 σ_{cr} との関係が求まり, スリット試験片および H 型試験片では予熱と割れ発生限界拘束度 K_{cr} との関係が求まる。しかし σ_{cr} と K_{cr} の両者を同時に求め予熱との関係を表わす試験は困難である。RRC 試験は拘束度 K を設定し拘束応力 σ_w を測定し, 割れとの関係を評価することが可能な試験法であると知られているが, 予熱を行なった場合それによる熱応力が発生し K と σ_w との関係を正しく評価するには特別な検討が必要である⁹⁾。そこで, 予熱した場合の RRC 試験では拘束応力 σ_w で割れを評価するのが一般的である。

Fig. 15 は以上述べたような事実から各予熱温度に対して σ_{cr} と K_{cr} の両者がどのような関係にあるかを示したものである。(A) は Fig. 13, (B) は Fig. 5 を示したものである。ここで, (A) の予熱温度 $P_H=50^\circ\text{C}$ に対する割れ発生限界拘束応力 σ_{cr} は約 57 kg/mm² で

Fig. 15 Relation of Preheating Temperature to Crack Initiation Critical Restraint Stress and Intensity

あり、(B)の $P_H=50^\circ\text{C}$ に対する割れ発生限界拘束度 K_{cr} は約 $1200\text{ kg/mm}\cdot\text{mm}$ である。(C)はこの σ_{cr} と K_{cr} の関係を示し、図中実線は $P_H=50, 100, 150^\circ\text{C}$ の σ_{cr} と K_{cr} の交点を結ぶ線である。また細い実線はバラツキの範囲を示す。一方、(C)の点線は 80 kg/mm^2 高張力鋼溶接部の K と σ_w との関係を示す。

すなわち、この曲線((C)図点線)は任意の剛性(拘束度 K)の構造物を溶接した際に発生する拘束応力 σ_w を示したもので、各種試験によって求めた割れ発生限界拘束応力がこの点線より上側に位置している時には割れが発生しないものと判定できる。この点線は K の低い範囲では直線関係が成立し、佐藤ら⁴⁾はこの関係を次式で表わしている。

$$\sigma_w = mK \text{ (kg/mm}^2\text{)} \quad \dots\dots\dots (3)$$

一方、Fikkers⁵⁾らも実験的に同様の式を提案している。(C)の実線と点線とを比較してみるとバラツキはあるが実線が点線の上方に位置している。このことは割れが発生しないことを意味している。例えば、Fig. 13およびFig. 15(A)から判るように実験に用いたHT-80の予熱温度 $P_H=50^\circ\text{C}$ に対する拘束応力 σ_{cr} は約 57 kg/mm^2 である。(この時の K_{cr} は、Fig. 15(C)より約 $1200\text{ kg/mm}\cdot\text{mm}$ である。)一方、通常の溶接ではFig. 15(C)より明かなように $\sigma_w = mK$ ($m \approx 4.0 \times 10^{-2}$)で拘束応力が求められるので、 $K=1200\text{ kg/mm}\cdot\text{mm}$ での σ_w は 48 kg/mm^2 程度であり、この値は、Fig. 13およびFig. 15(A)で求めた割れ発生限界拘束応力 $\sigma_w=57$

kg/mm^2 より低くなっているために割れは発生しない。すなわち、Fig. 15(C)の点線で示されている拘束度 K と拘束応力 σ_w との関係曲線より、上側に位置するように予熱温度 P_H を設定すれば割れの発生しない溶接継手が得られる。

3.3.2 各試験法の相関関係

Fig. 16は予熱温度に対する割れ発生限界拘束度および拘束応力についてFig. 15を単純化したものであり、多少のバラツキはあるがほぼ一致している。このバラツキの原因は試験片の材質および開先形状などに起因しているものとする。

Fig. 16 Relation of Preheating Temperature, Crack Initiation Critical Restraint Intensity and Stress

そこで、先に著者らが開発した形状を加味した割れ防止評価法によって検討することとした、図17(a),(b)の直線は割れ感度指数 P_W ⁶⁾を基にして割れ防止予熱温度 P_{HY} および P_{HK} ⁷⁾で求めた予熱温度と拘束度との関係を示したものである。ここで、インプラント、RRC、TRCについては図15を基にして拘束応力から拘束度を求めて P_{HY} および P_{HK} に代入して算出した。すなわち、レ開先のH型試験片は P_{HK} の式を用いたが、外は全てYおよびV開先であるため P_{HY} の式で算出した。この結果より、 P_W を基にした割れ防止予熱温度略算式 P_{HY} および P_{HK} で整理することによって開先形状の差

Fig. 17 (a) P_W and Preheating Temperature

Fig. 17 (b) P_W and Preheating Temperature

によるバラツキの問題がなくなるために良く一致することが明らかとなった。

4. 結 言

以上各種試験片を用いて 30 kg/mm^2 高張力鋼の初層溶接割れについて実験検討を行なったそれらを要約すると次の通りである。

1) 本供試 80 kg/mm^2 高張力鋼の初層溶接割れ防止予熱温度は拘束度 $2500 \text{ kg/mm} \cdot \text{mm}$ 以下では 150°C 以下である。

2) 溶接ピーク温度から 100°C までの冷却時間を

900秒以上にしても割れ発生限界拘束応力はあまり上昇しない。

3) インプラント試験, スリット割れ試験, H形拘束割れ試験, RRC 試験および TRC 試験法の相関性を明らかにし, さらにこれらの試験方法で求めた割れ防止予熱温度は P_W の式を基にした割れ防止略算式 P_{HY} および P_{HK} の式で求めた予熱温度と良く一致することも併せて明らかにした。

終りに臨み, 本研究を行なうにあたり, 終始ご指導をいただいた大阪大学佐藤教授, 寺崎教官に対し深く謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Sasaki, Other 3: Effect of Stress and Intensity of Restraint on Delayed Cracks in Welds of 80 kg/mm^2 High-Strength Thick Plate Steel: Trans. JWS, Vol. 4, No. 2, 1973
- 2) 佐藤他2: 溶接割れに関する拘束応力, 歪の研究の最近の動向: 溶接誌 42 No. 1
- 3) 渡辺他1: 溶接継手の拘束度および拘束および拘束応力に関する研究 造船協会論文集 No. 110
- 4) 佐藤他1: 溶接継手の拘束応力とこれにともなう溶接割れの研究 溶接誌 36 No. 10 (1967)
- 5) Ir. A.T. Fikker: Influence of external restraint on Gold cracking: Metal const, June 1974
- 6) 伊藤, 別所: 溶接誌1969—10
- 7) 渡辺, 桐原, 小沼: IIW Document No. IX-875-74
- 8) 渡辺, 桐原, 小沼: 溶接学会春季全国大会講演概要集 (第14集) 昭49—4

溶接に関する国際行事案内

1. International Seminar on Pipeline Welding
16-17 Feb., 1977 London (UK)
THE WELDING INSTITUTE
2. 3rd International Conference on Pressure Vessel Technology (ICPVT)
18-22 Apr., 1977 Tokyo (JAPAN)
3RD INTERNATIONAL CONFERENCE ORGANISING COMMITTEE
3. AWS Annual Meeting and Welding Exhibition
25-29 Apr., 1977 (USA)
AMERICAN WELDING SOCIETY
4. The World Electrotechnical Congress
21-25 June, 1977 Moscow (USSR)
ORGANISING COMMITTEE of WELC
5. (30th) International Institute of Welding
4-10 July, 1977 Copenhagen (DENMARK)
DANISH ORGANISING COMMITTEE
6. 5th International Conference and Exhibition on Liquefied Natural Gas
28 Aug.-1 Sep., 1977 Düsseldorf (GERMANY)
DUSSELDORFER MESSEGESELLSCHAFT mbH-NOWEA-
7. International Welding Fair
21-28 Sep., 1977 Essen (GERMANY)
DEUTSCHER VERBAND FÜR SCHWEISSTECHNIK e.V.
8. 17th Welding Conference-CSSR '77-Welded pressure vessels and pipelines
31 Oct.-3 Nov., 1977 The High Tatras (CZECHOSLOVAKIA)
WELDING RESEARCH INSTITUTE
9. (31st) International Institute of Welding
1st week July, 1978 Dublin (IRELAND)
IRISH ORGANISING COMMITTEE

※参加申込等詳細については事務局まで問合せ下さい。(担当鈴木)