研究論文

応力除去焼鈍われ(再熱われ)に関する研究(第1報)*

金沢正午** 山戸一成**
武田鉄治郎** 橋本勝邦**

Study of Reheat Cracking in Weldment (Part 1)*

by Syogo Kanazawa**, Kazunari Yamato**,

Tetsujiro Takeda** and Katsukuni Hasimoto**

It is generally said that residual stress existing in weldment must be removed for its unfavourable effects on brittle fracture, delayed cracking or stress corrosion cracking etc.. Postweld heat treatment is usually applied to remove the residual stress. Some problems are met when the heat treatment is applied, namely toughness decrement, reheat cracking especially in weldment of high tensile steel.

This report describes, concerning mainly with high tensile steel weldment, proposal of testing method to evaluate the cracking susceptibilities and some characteristics of the cracking.

The results obtained are summarized as follows;

- 1) Reheat cracking susceptibilities can be evaluated quantitatively, easily and precisely by newly developed testing methods. Same crack is obtained as in the actual weldment.
- 2) This crack is typical grain boundary crack along prior austenite grain boundary. At the tip of crack, voids are observed and some of them coalesce to become a small crack. These voids exist on grain boundary which is perpendicular to stress axis and they are round type just like ones observed in creep phenomenon.
- 3) The behavior of the cracking is considerably affected by the existence of notch. When the weld reinforcement is removed, the crack can not be found at the surface but small cracks are observed at the interior of plate and so it is difficult to detect the crack with NDT. There is no effect of heating rate in generally used range on the susceptibility of cracks and cracks begin to grow at the temperature of about 550°C.
- 4) There is a tendency that cracking susceptibility decreases with higher preheat temperature or lower strength electrode.
- 5) Alloying elements, V, Cu, Cr, Mo, Nb and C are unfavourable for the reheat cracking. But only Mn is favourable. Quantitative effects of these elements on the cracking are obtained.

1. 緒言

一般に溶接部には溶接後の冷却による収縮のため残留応力が発生しその応力は降伏点に近い値に達することもある。この残留応力は応力腐食われ、脆性破壊などの低応力破壊の原因になる場合もあり、残留応力の大きさ、使用状況によっては除去されねばならない。

残留応力を除去するにはいくつかの方法があるが、もっとも一般的に用いられる方法は焼鈍(応力除去焼鈍、以下SR)である。

溶接継手部、とくに 70 kg/mm² 級以上の高張力鋼、

ステンレス鋼、Cr-Mo 系鋼などの継手をSRするとボンド部に近い粗大結晶粒域で粒界(旧 γ 粒界)に沿ってわれが発生することがある。このわれはSRわれ、応力除去焼鈍われ、再熱われなどと呼ばれ多くの研究が行なわれている¹⁻⁸⁾。

また、溶接後、脱水素処理を行なう目的でバーナーで後熱をすると、局部的に高温になる部分は再熱われが発生する可能性がある。あるいは、SRをしない場合でも使用条件が 600°C 付近の温度であれば再熱われ発生の危険は十分考えられることになる。

筆者らは再熱われについて種々検討を行なってきたが、今回は 80 kg/mm² 級高張力鋼を中心として再熱われ試験法の検討、われの特徴、われ発生に影響をおよぼすいくつかの因子などについての調査結果を報告する。

*原稿受付 昭和50年4月9日(昭和45年度秋季全国大会にて発表)

**正員 新日本製鉄(株)製品技術研究所 Member, Products Research of Development Lab., Nippon Steel Corp.

2. 再熱われ試験法

従来, 再熱われを判定するために種々の試験法が用いられてきたが, これらは簡易性あるいは実際の溶接構造物に発生するわれとの対応性に不十分な点があったり, われ感受性の定量的評価が困難であった。そこで, これらの諸点を考慮に入れて

- 1) 試験片の作成やわれ検査が簡単であり, われの再現性が良好であること。
- 2) 実際の再熱われとの対応が良好であること。とくに低温われなどのわれにより結果が影響されないこと。
- 3) 定量的にわれ感受性を評価できること。

などを目的として試験法の検討を行なった。

基本的な試験片形状としては, 数多くの予備試験の結果から, 表面に試験ビードをおき, 裏面開先内に拘束ビードを所定のパス数溶接して拘束ビードの収縮応力により試験ビードのトウ部に

に曲げ応力を発生せしめ, これをSRすることによりわれを発生させるものとした。試験片寸法, 開先形状を種々検討の結果前記の目的にもっとも沿った試験法として Fig. 1 の T type と Y type の試験法を選んだ。これらの方法において定量的にわれ感受性を評価するために付与する応力は拘束ビード数を変えることにより変化させ, われは試験ビードのトウ部に発生する。

いずれも試験ビードを

溶接する際には拘束が少ないので低温われなどの発生もなく再熱われの評価が正しく行なわれる。再熱われ試験の手順としては以下のようにする。

- 1) 試験ビードをおく
- 2) 裏面開先内に拘束ビードをおく (任意パス数)
- 3) 所定の規定により SR をする
- 4) 磁気探傷法により表面あるいは必要に応じて断面のわれ検査を行なう

われ率の求め方は, 試験ビードに沿って発生するわれの長さ (試験ビードの左右にわれが出ているときはいずれか一方のみ) の合計のビード長さ (150 mm) に対する割合を計算する。

T type ではわれは鋼板の表面から発生するので実際

	Test Bead	Restrict Bead
Number of Pass	1	n
Electrode	4mmφ	5mmφ
Welding Conditions	170 A 24 V 150 cm/sec	220 A 26 V 150 cm/sec
Preheat and Interpass Temp.	150°C	150°C

$$\text{Cracking ratio (\%)} = (\Sigma \text{Length of crack (mm)} / 150) \times 100$$

Fig. 1 Testing method to evaluate reheat cracking

の構造物に発生するわれに近い条件で試験が可能である。しかし, 熱処理の方法によって表面が脱炭したりすると試験結果が変化する。Y type では開先内にトウ部がくるので T type とは異なる特徴を持っている。中間焼鈍などを考える場合は Y type の方がよい。また, T type は Y type にくらべ板表面にトウ部があるので磁気探傷検査がしやすい利点があるが, 反面トウ部の応力集中度が少ないので Y type より試験条件が厳しい。

Fig. 2 に T-1

タイプの 80 kg/mm² 鋼 (以下 HT80(A))

を用いた場合の拘束ビード数と試験ビードのトウ部に付与される応力値との関係を示す。

Fig. 3 には同じように拘束ビード数と角変形量との関係を示す。Fig. 4 には HT80(A) を試験材とした場合の T type および Y type の試験結果を示す。Y type の方が試験条件が厳しいことがわかる。Photo. 1 にわれの例を示す。

また, Nb-Mo 系の析出硬化型の 80 kg/mm² 鋼 (以下 HT80(B)) の試験結果の例を Fig. 5 に示す。同じ HT80 でも成分系によりわれ感受性が異なることがわかる。これらの成分の影響については後で詳細に述べる。

Fig. 2 Relation between number of restraint bead and applied stress at test bead

Fig. 3 Relation between angular change and number of restraint bead

Fig. 4 Example of reheat cracking susceptibility

3. 再熱われの特徴

3.1 光学顕微鏡および走査型電子顕微鏡によるわれの観察

ここでわれを生成せしめた方法は前項で述べた T

Photo. 1 Typical example of reheat crack revealed with dye penetrant

Fig. 5 Example of reheat cracking susceptibilities

Photo. 2 Typical example of reheat crack, showing grain boundary crack

Photo. 3 Tip of crack. Voids on grain boundaries showing some coalescence

Photo. 4 Crack appearance observed with scanning electron microscope

type 試験法によっており、鋼板は HT80(A) を用いた。

われは Photo. 1 に示したようにビードのトウ部でボンド線に沿って生成している。この断面を切り出してみると Photo. 2 に示すようにトウ部から生成し、旧 γ 粒界に沿った粒界われであることがわかる。われの発

生点はトウ部の粗大結晶粒界と考えられ細粒部に達してわれは停止している。Photo. 3 はわれ近傍の粒界を示すもので、粒界上に void が生成し、さらに一部ではそれらが合一してわれの前段階とみられる微小われ

も認められる。これらの void は、粒界三重点に集中しているわけではなく、応力軸に直角に近い粒界上に多くみられ、クリープでみられる r 型 (round type) である。Photo. 4 には走査型電顕 (SEM) による観察結果を示す。これから明かなように典型的な粒界われであり、光顕観察結果と同じように細粒部でわれは停止している。

3.2 高温顕微鏡によるわれの発生、成長の直接観察 再熱われの発生、成長を直接観察するために以下のような実験を行なった。

1) 試験方法

供試材として HT80(A) を用い、この鋼板上に標準条件によりビードをおき、Fig. 6 に示す要領で試験片を加工した。試験片にはスリットと 3 mm ϕ の孔をあけ、この孔に 3.5 mm ϕ の同一材質のクサビを万力により押し込んだ。また、本体中央部のボンド近傍にナイフとカミソリによりノッチを入れて応力集中を与えた。ノッチ深さは最大 1 mm である。

Fig. 6 Specimen for hot stage microscope

る。観察面は、クサビを入れた後ゆっくり研磨し、仕上げはバフ研磨で行なった。温度測定は Pt-Pt-Rh 熱電対をできる限り観察面に近くなるようにクサビに点接した。高温顕微鏡はユニオン光学製で加熱はプログラム方式により行ない、加熱速度を 80°C/h~400°C/h としその影響も調べた。雰囲気は Ar ガスおよび真空である。

2) 試験結果

ノッチを入れた場合 Photo. 5 に示すようにわれはノッチ底部から生成し旧 γ 粒界に沿って成長して行くことが認められる。ノッチを入れない場合、われは旧 γ 粒界上に生成するが、微細なわれが散在しており、ノッチがある場合のような大きなわれにはならない。約 200 倍の顕微鏡下では、われの生成開始温度は約 550°C である。

加熱速度の影響をみるため、80, 100, 120, 150, 300, 400°C/h の各昇温速度でわれ発生 の 状 況 を 観 察 し た が その影響は認められず、すべて昇温途中の約 550°C で

Photo. 5 Crack growth directly observed with hot stage microscope

われ発生が認められた。われの発生は昇温途中で起り、冷却速度には関係ないことがわかる。雰囲気の影響は認められなかった。

4. 再熱われの発生に影響をおよぼす因子について (I)

ここでは余盛形状、予熱条件、溶接材料の影響について述べる。用いた供試鋼の化学成分を Table 1 に示す。

4.1 余盛形状と切欠の影響

1) 試験方法

前項の高温顕微鏡による直接観察の結果からわれの発生挙動に切欠は大きな影響をおよぼすことがわかった

が、溶接継手においてどのような影響がみられるかを調べるのが目的である。

まず、余盛形状の影響をみるために HT80(A) (板厚 50 mm) を用い Fig. 7 に示すように試験ビードの余盛形状を変え

SR (600°C × 2h)			No SR
Removed Fully	Removed Partially	Not Removed	Not Removed

Fig. 7 Various shapes of test bead reinforcement

た。ここで、SRをしない場合も比較をした。拘束パス数は10, 14の2種で、われ検査は表面を磁気探傷法、断面を顕微鏡で各々詳細に行なった。トウ部を平滑に仕上げるのはライNDERによった。次に HT80(A), (B) (板厚 50 mm) を試験材としてトウ部に機械加工により人工切欠を入れ応

Removed Fully	Not Removed	Notch Introduced
		Notch: 0.5mm depth 1.5mm width

Fig. 8 Various shapes of test bead reinforcement with mechanical notch introduced

力集中度が極端に大きい場合のわれ発生状況を調べた。Fig. 8 に示すように試験ビードのトウの部分を変化させ、拘束ビード数を5, 7, 10, 14としてわれ発生の状況を調べた。

2) 試験結果

HT80(A) における余盛形状の効果も Table 2 にまとめて示す。これから明らかなように、トウ部のみを平滑にするとわれの長さは短くなり、余盛全部を板面まで削除するとわれはさらに小さくなるが、板内に内在してしまい表面から判別できなくなる。Photo. 6 にこの内

Table 1 Chemical compositions of tested materials

(wt.%)												
Steel	t (mm)	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Nb
HT80(A)	25	0.11	0.26	0.85	0.015	0.009	0.24	0.80	0.58	0.48	0.06	—
	50	0.12	0.26	0.82	0.015	0.011	0.25	0.81	0.54	0.45	0.06	—
HT80(B)	50	0.12	0.30	1.40	0.010	0.003	—	—	—	0.61	—	0.03

Table 2 Effect of shape of bead on cracking (HT80(A))

Number of Restraint Bead	Inspection Method	SR (600°C × 2h)			No SR
		Removed Fully	Removed Partially	Not Removed	Not Removed
10	Surface	○	× (35%)	× (70%)	○
	Section	×	×	×	○
14	Surface	○	× (100%)	× (97%)	○
	Section	×	×	×	○

○ not cracked × cracked

Photo. 6 Fine reheat cracks observed at the interior of plate

在しているわれの例を示す。同じ条件でSRをしない試験片の断面を詳細に顕鏡観察してもわれは認められなかった。したがって、Photo. 6に示したわれはSR前に発生したわれでない。このように、再熱われが表面に発生せず内部のみに発生する場合は実際施工の場合を考えると重要なことである。

人工切欠を入れ
た場合の結果を
Fig. 9に示す。わ
れ感受性の低い
HT80(B)でも切
欠を入れると微小
われが発生するよ
うになり、HT80
(A)に切欠を入
れると拘束ビード
が5パスでも大き
なわれがみられ
た。

以上のように、
切欠は再熱われの
発生に大きな影響
を与えるが、余盛
を完全に除去して切欠効果をなくしても溶接残留応力
が高いと鋼種によってはわれの発生が見られるので鋼板お
よび溶接設計の決定には十分な配慮が必要である。

4.2 予熱温度の影響

溶接施工時に低温われ防止のために予熱が広く行なわれ効果をあげているが再熱われに対しての効果を調べるために次のような実験を行なった。

試験ビードおよび拘束ビードを溶接するときに予熱、層間温度を150°C~300°Cの範囲で変えた。供試鋼はHT80(A)(板厚50mm)である。拘束ビード数は10で、SRは600°Cで2時間保持した。

Steel	Condition of toe	Number of restraint bead			
		5	7	10	14
HT 80(A)		○	△	△	△
		○	×	×	×
		×	×	×	×
HT 80(B)		○	○	○	○
		○	○	○	○
		○	△	△	△

○ : not cracked
△ : partially cracked
× : cracked
SR : 600°C×2h

Fig. 9 Effect of mechanical notch on cracking susceptibilities

Fig. 10に試験結果を示す。これから明らかなように250°C以上に予熱するとわれ率は0%になり予熱温度を高くするにつれて再熱われ感受性が低下する。この原因および理由については次報

Fig. 10 Effect of preheat temperature on cracking susceptibilities

で詳細に示すが、これは予熱温度を高くするにつれてボンド近傍のHAZの高温における粒界の強度が高くなるからである。したがって、予熱により再熱われを防止するためには極端な高温にせざるを得ないので実際施工では現実的でない。また極端に予熱温度を高くして行なう試験法では正当な結果が得られないおそれがある。

4.3 溶接金属の強度の影響

溶接金属の強度の影響を調べるために、試験ビードの強度を変え、あとは全く同一条件で試験を行ないわれへの影響を調べた。溶接棒としては軟鋼用、HT50用、HT60用、HT80用の低水素系溶接棒(棒径4mm)を用いた。供試鋼はHT80(A)(板厚25mm)で、拘束パス数はすべて7である。SRは600°Cで1時間保持した。なお、拘束ビードはすべてHT80用溶接棒(棒径5mm)を用いた。

Fig. 11に溶接金属の強度の再熱われにおよぼす影響を示す。これから明らかなように試験ビードの強度が低く、のびが大きいほど再熱われ感受性が低くなる。したがって、

Mechanical Properties of Test Bead				
	Mild Steel	HT50	HT60	HT80
σ_T (kg/cm ²)	46	486	535	720
el. (%)	3.3	31.3	29.7	24.0

Fig. 11 Effect of weld metal on cracking susceptibilities

のあまり必要としないところで、かつSRを実施しなければならないところには、鋼板の強度レベルより低位の溶接棒で溶接すれば再熱われはかなりの程度防止できるが、それでもかなりわれ感受性は高く防止法としては十分なものではない。

5. 再熱われの発生に影響をおよぼす因子について(II)

これまでの調査結果から同じ80 kg/mm²級高張力鋼

Table 4 Chemical compositions of tested materials (wt.%)

No.	C	Mn	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Nb	B	Al
85	0.13	1.45	0.10	0.03	0.02	0.66	0.07	0.04	0.0007	0.028
86	0.14	1.44	0.11	0.03	0.02	0.65	0.07	<0.002	0.0005	0.029
87	0.13	1.50	0.05	0.03	0.02	0.70	0.06	0.07	0.0007	0.028
88	0.14	1.40	0.04	0.02	0.03	0.69	0.06	0.10	0.0009	0.043
89	0.14	1.49	0.07	0.04	0.02	0.68	0.07	0.26	0.0009	0.045
90	0.14	1.39	0.08	0.04	0.03	0.05	0.07	0.04	0.0009	0.033
91	0.14	1.34	0.06	0.03	0.04	0.29	0.07	0.04	0.0008	0.035
92	0.14	1.38	0.05	0.02	0.03	1.02	0.07	0.04	0.0007	0.037
93	0.13	1.39	0.08	0.03	0.02	1.46	0.07	0.04	0.0005	0.040
94	0.13	1.45	0.09	0.04	0.04	0.76	0.06	0.04	0.0008	0.035
95	0.14	0.58	0.04	0.02	0.02	0.76	0.06	0.04	0.0009	0.032
96	0.13	1.33	0.10	0.04	0.05	0.78	0.07	0.04	0.0010	0.032
97	0.13	1.45	0.16	0.04	0.05	0.74	0.07	0.04	0.0009	0.034
98	0.13	1.40	0.30	0.04	0.04	0.73	0.06	0.04	0.0010	0.037
99	0.14	1.36	0.09	0.04	0.50	0.74	0.07	0.04	0.0008	0.033
100	0.14	1.48	0.01	0.04	0.96	0.74	0.07	0.04	0.0012	0.035
101	0.14	1.36	0.11	0.04	1.92	0.74	0.07	0.04	0.0008	0.033
102	0.14	1.45	0.09	0.34	0.04	0.70	0.07	0.04	0.0008	0.038
103	0.13	1.50	0.10	0.70	0.04	0.54	0.06	0.04	0.0007	0.035
104	0.14	1.57	0.09	1.20	0.04	0.72	0.07	0.04	0.0007	0.038
105	0.14	1.48	0.09	2.88	0.04	0.71	0.06	0.04	0.0009	0.037
106	0.10	1.42	0.04	0.02	0.02	0.75	0.07	0.03	0.0009	0.037
107	0.19	1.52	0.09	0.04	0.04	0.78	0.07	0.03	0.0006	0.037
108	0.14	1.39	0.09	0.04	0.04	0.78	0.07	0.03	<0.0005	0.035
109	0.14	1.39	0.09	0.08	0.06	0.76	0.07	0.04	0.0100	0.036
110	0.14	1.38	0.10	0.03	0.04	0.72	0.06	0.03	0.0005	0.012
112	0.14	1.42	0.10	0.04	0.04	0.73	0.06	0.04	0.0016	0.040
113	0.14	1.33	0.08	0.04	0.03	0.74	0.06	0.03	0.0014	0.129
114	0.14	1.38	0.08	0.04	0.03	0.75	0.07	0.03	0.0007	0.039
115	0.14	1.42	0.04	0.03	0.01	0.70	0.03	0.03	0.0007	0.026
116	0.14	1.42	0.03	0.01	0.01	0.69	0.15	0.04	0.0006	0.033
117	0.14	1.37	0.04	0.01	0.01	0.68	0.28	0.04	0.0009	0.038
119	0.13	1.40	0.02	0.01	0.01	0.65	0.06	0.03	0.0006	0.029

No. 85, 94, 114, 119 ... standard composition

われ感受性におよぼす合金元素の影響をまとめて示したのが Fig. 15 である。これは25%われ率に対応する拘束パス数と合金元素量の関係を示したものである。こ

Fig. 14 Change of cracking susceptibilities with V content

れらの結果によると、V, Cu は約0.3%まで、Mo は約1.5%までは含有量とともにわれ感受性を高くし、Cr は約0.5%までは含有量とともにわれ感受性を高くするが、それ以上になるとわれに影響をおよぼさなくなる。Cは約0.12%を境にしてそれ以上含まれてもわれ感受性に影響をおよぼさないが、それ以下になると低くする。Nb は約0.03%まではわれ感受性を高くするが、それ

Fig. 15 Effect of alloying elements on cracking susceptibilities.

上含有しても影響を与えない。Mn は約1.5%まではその含有量とともにわれ感受性を低くする。また、Ni, Al, B は影響が少ない。

6. 結 論

高張力鋼にみられる再熱われについて調査した結果次のことがわかった。

- 1) 試験法：簡単に再現性に富みかつ定量的に再熱われ感受性を評価できる試験法を考案した。この方法には目的に応じて T type, Y type の2種類があり、これらを使いわけることにより所要の再熱われ感受性を安定して評価できる。
- 2) われの形態：われは旧 r 粒界に沿う典型的な粒界われで、細粒部で停止しており、われの先端部では void が生成しており、そのうち一部が合一しているものもある。void は応力軸方向と直角に近い方向を有している粒界上に多く分布しておりクリープで認められる r 型である。
- 3) 切欠、昇温速度の影響：切欠の影響は大きく受け、切欠があるとわれはそこから大きく成長するが、切欠がないと内部に細かいわれが分散し、表面からのわれの検査は不可能である。80°C/h~400°C/h の範囲内では昇温速度の影響はない。われは昇温途中の約 550°C になったときに発生、成長を

開始する。

- 4) 予熱温度と溶接金属の強度: 予熱温度を高くするとわれは減少するが, きわめて高温になる場合もあり防止対策とはならない。溶接金属の強度を低下させるとわれ感受性がある程度下げることが可能である。
- 5) 合金元素の影響: V, Cu, Cr, Mo, Nb, C はわれ感受性を高める元素である。逆に Mn のみはわれ感受性を低くする。さらに, これらの元素の影響を定量的に求めることができた。

今回は以上のことを明らかにしたが, 次報以下にわれ発生の理論的考察について詳細に述べる予定である。

参 考 文 献

- 1) 内木, 山崎他: “応力除去焼鈍割れに関する研究(1報)” 本誌, 第33巻, 第9号(1964), p. 710
- 2) 内木, 岡林他: “応力除去焼鈍割れに関する研究(2報)” 本誌, 第33巻, 第9号(1964), p. 718
- 3) 伊藤, 中西: “低合金鋼溶接熱影響部の応力除去焼鈍われの研究(第1報)” 本誌, 第40巻, 第12号(1971), p. 1261
- 4) 伊藤, 中西: “低合金鋼溶接熱影響部の応力除去焼鈍われの研究(第2報)” 本誌, 第41巻, 第1号(1972), p. 59
- 5) J. D. Murray: “Stress-relief cracking in carbon and low alloy steels” British W. J. Vol. 14, 8 (1967), p. 447
- 6) C. F. Meitzner and A. W. Pense: “Stress-Relief Cracking in Low-Alloy Steel Weldments” Weld. J., Vol. 48, 10 (1969), p. 431s
- 7) B. A. Glossop, N. F., Eaton et al.: “Reheat cracking in Cr-Mo-V steel weldments” Met. Const., Vol. 1, 2 (1969), p. 68
- 8) R. A. Swift: “The Mechanism of Stress Relief Cracking in $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo-Steel” Weld. J., Vol. 50, 5 (1971), p. 195s

<会 告>

第12回金属関係学協会東北支部連合シンポジウムの御案内

溶接学会東北支部

日本鉄鋼協会, 日本金属学会, 日本鋳物協会, 日本軽金属学会, 日本鋁業会, 溶接学会各東北支部共催にて下記のようにシンポジウムを行いますので多数ご参加下さい。

日 時: 昭和50年10月31日(金) 13.00~17.00

場 所: 東北大学工学部金属系大講義室(仙台市荒巻字青葉)

主 題: 「環境と構造物」

プ ロ グ ラ ム

1. 開会の挨拶 溶接学会東北支部長 小林 卓 郎
2. 石油精製および石油化学装置における高温損傷事例について 日本揮発油㈱ 泉 山 昌 夫
3. 低温および極低温装置材料の諸問題について 石川島播磨重工業㈱ 栗 山 良 員
4. 材料学的にみた原子力施設の諸問題 住友金属工業㈱ 近 藤 豊

以 上