突合せ溶接継手の疲れき裂発生点に関する一考察*

村木 潤次郎** 石 黒 隆 義**

半 沢 貢** 横 田 彦 二 郎**

An Aspect of the Fatigue Crack Initiation in
Butt Welded Joint*by Jyunjiro Muraki**, Takayoshi Ishiguro**, Mitsugu Hanzawa**
and Hikojiro Yokota**

Abstract

The pulsating tensile fatigue tests have been carried out on the butt welded specimens using a Vibrophore fatigue testing machine. The microscopic examination of these specimens has revealed the presence of small notches or grooves which have a sharp root radius and exist mostly at the periphery of the deposited metal near the welded toe. In any case, fatigue crack is initiated at these notches which are exceedingly small, not more than 0.03 mm in root radius and less than 0.1 mm in depth.

In case of fatigue cracking at the periphery of the deposited metal, the smaller the root radius and the deeper the notch, the shorter becomes the fatigue life. Therefore fatigue strength increases as the periphery of the deposited metal becomes very smooth and the root radius of the notches becomes large, even if an undercut may be present. The fact that the fatigue strengths of welded materials with different static strengths show nearly similar values can be explained by the presence of such a sharp notch and not by the macroscopic notch effect. Besides the macroscopic stress concentration due to the geometrical effect of the welded toe, another microscopic stress concentration caused by these small notches has been confirmed, and such notches influence the fatigue strength of welded specimen.

A conspicuous improvement of the fatigue strength of the welded joints can be attained if the welded toe and the periphery of the deposited metal in the vicinity of the toe are smoothed by some method of welding or post treatment after welding.

1. 緒 言

鉄鋼材料の溶接継手の疲れ強さについては多くの実験結果があるが、溶接性高張力鋼が開発された今日では、母材の疲れ強さに対する溶接継手の疲れ強さの低下が重要な問題となっている¹⁾。近年、この問題に関する研究はかなり行なわれてきており、溶接継手の疲れ強さの低下の主たる要因としては、熱影響部の組織の変化や溶接入熱による残留応力や余盛形状などがあげられている。

これらの要因の中で最も影響を与えるものを考えてみる。余盛を完全に削除して仕上げを行なった突合せ溶接継手の疲れ強さは、母材の疲れ強さ近くまで上昇する場合のあることが知られている。また、余盛付きの突合せ溶接継手は応力除去焼鈍を行なってもその疲れ強さはあまり上昇しないようである。したがって、余盛の形状が溶接継手の疲れ強さを大きく左右しているのは明らかである。

突合せ溶接継手の疲れ強さに対する余盛形状の影響を検討するために、機械加工によって余盛に似た形状を有する試験片を製作し疲れ試験を行なった報告^{2,3,4)}がある。また、熱影響部に切欠きを入れて疲れ試験を行ない、溶接継手における切欠きの影響を検討した報告⁵⁾もある。しかしながら、このような方法によってもまだ溶接継手の疲れ強さの低下原因を本質的に究明したとはいえない。なぜならば、巨視的にみた場合には機械加工による人工余盛の形状は溶接継手の余盛形状に似ているかも知れない。しかし、疲れ現象の特性からみれば、余盛のもっと微細な形状が影響していると考えられ、また、熱影響部などに入れた切欠きの形状は、実際の余盛形状による切欠きの効果を再現するには不適当と考えられるからである。

このような観点にたち、突合せ溶接継手の疲れき裂の発生に対しては、巨視的な余盛による応力集中に加えて、溶接止端近傍に存在し、機械加工による人工余盛では加工が困難であると思われるような微細な凹凸も影響しているのではないかと考え、突合せ溶接継手の溶接止端に

* 原稿受付 昭和43年5月8日

** 正 員 富士製鉄(株)中央研究所 Member Central Research Laboratory Fuji Iron & Steel Co., Ltd.

おける疲れき裂の発生点について検討した。

2. 実験方法

2.1 供試材および試験片形状

供試材は板厚 38 mm の Nb 系高降伏点高張力鋼を用いた。供試材の化学成分および機械的性質を Table 1 に示し、顕微鏡組織を Photo. 1 に示す。

試験片の製作は Fig. 1 に示すように、巾が 200 mm の板を K 型開先に加工して突合せ溶接し、溶接線の両端を各 20 mm 切り落とした後、溶接線方向に厚さ約 5 mm に切りだして両面を最終的に表面研削盤で試験片の長手方向に仕上げ、板厚 2 mm の突合せ溶接継手疲れ試験片とした。母材の疲れ試験片は Fig. 1 に示すように平行部の巾を 20 mm とし、突合せ溶接継手疲れ試験片と同様に板巾方向に切りだして試験片の板厚を 2 mm とした。使用した溶接棒は低水素系溶接棒 LH-55 である。また、比較のために LH-55 で溶接した後、最終外層だけをオーステナイト系ステンレス溶接棒 TS-310 で盛った試験片も製作した。手溶接棒 LH-55 および TS-310 の溶着鋼の化学成分ならびに機械的性質は Table 2 に示す。これら溶着鋼の引張強さは母材の引張強さと同程度のものである。溶接条件は Fig. 2 に示す。

突合せ溶接継手の薄板状疲れ試験片を用いた理由は次のごとくである。溶接止端の形状はたとえ溶接条件が同じであっても微視的にみると場所によって非常に異なっている。このため溶接線の短い試験片を用いることによって疲れき裂発生点のある程度限定することができる。すなわち、このような薄板状疲れ試験片ではき裂発生点は溶接線のどちらかの端となり、き裂発生点そのものを観察することができる。また、少量の材料から数多くの試験片を採取することができる点でも有利である。い

Photo. 1 Microstructure of material tested $\times 2/3$

Fig. 1 Dimensions of fatigue specimens for base metal and butt welded joint

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of materials

Chemical compositions %								Mechanical properties			
C	Si	Mn	P	S	Nb	V	N	σ_y kg/mm ²	σ_B kg/mm ²	ϵ^* %	ν_{EO} kg-m
0.16	0.04	1.09	0.010	0.013	0.026	0.054	0.012	40.6	55.5	28.0	14.8

*GL = 50mm

Table 2 Chemical compositions and mechanical properties of the deposited metal of electrodes LH-55 and TS-310

Electrode	Chemical compositions %								Mechanical properties			
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	σ_y kg/mm ²	σ_B kg/mm ²	ϵ^* %	ν_{EO} kg-m
LH-55	0.08	0.53	0.98	0.014	0.010	0.06			48.0	57.0	32.0	21.4
TS-310	0.07	0.48	1.68	0.015	0.020		25.36	21.34		60.0	39.0	

*G.L. = 50mm

Fig. 2 Welding conditions for electrode LH-55 and TS-310

ばう大型疲れ試験片では疲れき裂の発生点は溶接線の端よりもむしろ内部の場合が多く、しかも、き裂が大きく開いてしまうため、疲れき裂発生点の余盛形状を厳密に観察することは困難である。しかしながら、突合せ溶接継手の薄板状疲れ試験片による試験結果は直接には設計資料とならないかも知れないが、大型疲れ試験片との相違は平面応力と平面ひずみの相違程度と思われる。

突合せ溶接継手の板厚を Fig. 1 に示すように左右で変えたのは、試験片の幅の狭い方の溶接止端からのみ疲れき裂を発生させて観察箇所を少なくするためである。

2.2 実験方法

試験機は Vibrophore 万能疲れ試験機を使用し、荷重は片振り引張荷重で、繰返し速度は 143 c/s で疲れ試験を行なった。疲れき裂が開き過ぎるとき裂発生点の観察に支障をきたすため、発生した疲れき裂が 1 mm から 3 mm 程度の長さに進展したときに試験機が停止するように試験機の limit switch の感度を設定して試験を行なった。

疲れき裂発生点の観察はき裂の生じた部分を切りだし、全体に Ni メッキを施して樹脂に埋込み、バフ研磨してから 2% Nital で軽く腐食して光学顕微鏡で観察した。Ni メッキを行なったのは、研磨の際に試料の縁がだれて余盛などの輪廓が不明瞭になるのを避けるためである。研磨は研磨量をできるだけ少なくするように留意して行なった。

Ni メッキを施す前に、低倍率の顕微鏡でいずれの面に発生点があるかを検討したが、検鏡の結果、観察面が発生側とみなせない場合は反対側の面を同様にして観察した。両面で発生点の余盛などの形状が大いに異なるものもあったが、大部分の試料については余り相違はなかった。

3. 実験結果

3.1 S-N 曲線および疲れき裂発生点の観察

Fig. 3 は母材および低水素系溶接棒 LH-55 による突合せ溶接継手の片振り疲れ試験結果である。この S-N 曲線の繰返し数は前述のごとく完全破断までのものではなく、1 mm から 3 mm 程度の疲れき裂が入るまでの繰返し数である。完全破断までの繰返し数をとっても、S-N 曲線の位置はほとんど変化しないであろう。図中の矢印は 1.2×10^7 回以上の繰返しによっても破壊しない（疲れき裂が発生しない）ものを示す。しかし、突合せ溶接継手において 17.8 kg/mm^2 の応力で停留き裂の認められるものがあった。

Fig. 3 S-N curves for base metal and butt welded joint made with electrode LH-55

Fig. 4 S-N curve for butt welded joint in HT-60 by large specimen (cross section 25 mm $\times$ 25 mm)

Fig. 3 より、母材の疲れ限度が 32 kg/mm^2 であるのに対し、突合せ溶接継手の疲れ限度は 15 kg/mm^2 と非常に低い値を示している。また、突合せ溶接継手の実験点は大型試験片による場合に比較するとばらつきが大きい。

Fig. 4 は HT-60 の突合せ溶接継手大型疲労試験結果であるが、ばらつきはあまりみられない。

Fig. 3 の突合せ溶接継手疲れ試験片について疲れき裂発生点を観察した結果、疲れき裂は従来言われているような溶接止端からばかりでなく、溶接止端近傍の余盛

表面の窪みからも発生していることがわかった。その割合は溶接止端が 3 割、余盛表面の窪みが 7 割となっており、むしろ余盛表面の窪みから発生している方が多かった。また本実験では Signes ら⁶⁾ が言っているような溶接止端近傍の非金属介在物から発生している疲れき裂は認められなかった。

Fig. 5 Schematic illustration of the shape of the periphery of the toe and the deposited metal

疲れき裂発生点の形状を明らかにするために次のような方法を用いた。300 倍の写真を作成し、き裂の部分を作り離してから、き裂の形状と組織とを考慮して慎重に接合し、これらの写真について Fig. 5 に示す値を測定した。 p は溶接止端あるいは余盛の窪み底の半径、 θ は溶接止端における余盛表面と母材表面とのなす角度、 t は余盛の窪みの深さそして u は窪み底の母材表面からの位置である。 p の測定は tracing paper に種々の半径の円を描き、これを写真に当てて比較する方法をとった。

測定結果を Table 3 に示す。これをみてわかるように、疲れき裂発生点の形状は、溶接止端の場合は p が 0.01 mm 以下となっており、余盛の場合は p は 0.04 mm

以下、 t は 0.15 mm 以下となっており、従来言われていたものよりはるかに鋭い切欠きが形成されている。 u が負になっているものがあるが、一般にこの程度のものは under cut と言わないかも知れないが、ここでは under cut と称することにする。

Table 3 は Fig. 3 の実験点をおおざっぱに長、中および短寿命に分けて余盛形状の影響をみたものであり、次のような傾向がある。き裂発生点が余盛の窪みの場合は、 p が小さいもの、 t が大きいもの、 $-u$ が大きいものは短寿命になり、 p が小さくても t の小さいものは長寿命となっている。き裂発生点が溶接止端の場合は、 p の大きいものが長寿命となっており、 θ の大きい方が p は小さくなっている。

3.2 余盛形状の影響

突合せ溶接継手における疲れき裂発生に対する余盛形状の影響をさらに検討するために次のような実験を行なった。低水素系溶接棒 LH-55 で溶接したものと、LH-55 で溶接した後に最外層のみをオーステナイト系ステンレス溶接棒 TS-310 で溶接した突合せ溶接継手疲れ試験片について、すべて片振り引張応力 21.7 kg/mm² で疲れ試験を行なった。

その結果、疲れき裂発生までの繰返し数は 1.38×10^5 回から 4.98×10^6 回の間にばらつき、 1.2×10^7 回の繰返しによってもき裂の発生が見られないものがあった。余盛形状の影響を検討するには、似た形状のものを取り出して比較するのが望ましい。しかしながら、余盛形状は複雑であり各試験片で非常に異なっている。また、試験片数が多ければ厳密な分類も可能であろうが、本実験ではまだじゅう分な数とは言いがたい。このためき裂発生点の半径の p みに着目して整理してみる。

LH-55 のみで溶接した試験片については、発生点が

Table 3 Comparison of the fatigue life of butt welded joint (electrode LH-55)

p : Radius of the groove or the toe

t : Depth of the groove

θ : Flank angle of the toe

u : Position of the crack from base metal

Position of fracture	Long life				Medium life				Short life			
	No	p mm	t mm	u mm	No	p mm	t mm	u mm	No	p mm	t mm	u mm
Deposited metal	A 12	0.01	0.03	-0.03	A 3	0.01	0.01	-0.04	A 7	0.01	0.02	-0.06
	B 2	0.005	0.005	+0.02	B 1	0.01	0.03	+0.09	A 14	0.005	0.03	-0.21
	B 7	0.02	0.01	0	C 1	0.01	0.01	-0.02	B 13	0.01	0.09	-0.07
	C 13	0.04	0.01	-0.03	C 6	0.02	0.09	-0.08	B 14	0.02	0.12	-0.04
					C 14	0.03	0.08	-0.06				
Toe					B 12	0.005	0.15	+0.10				
	No	p mm	θ°		No	p mm	θ°		No	p	θ°	
	A 2	0.01	25		C 2	0.005	55		B 11	0.005	65	
	B 3	0.01	45		C 3	0.005	60					
	B 5	0.01	50

N O. 6 1
 $\rho=0.015$ $\theta=-50^\circ$
 $t=0.07\text{mm}$ $u=-0.06\text{mm}$
 $N=1.603 \times 10^6$

Photo. 2 The periphery of the deposited metal where the fatigue crack initiated (electrode LH-55) $\times 2/3$

N O. 4 6
 $\rho=0.01\text{mm}$ $\theta=40^\circ$
 $N=3.120 \times 10^6$

Photo. 5 The periphery of the toe where the fatigue crack initiated (electrode LH-55) $\times 2/3$

N O. 7 4
 $\rho=0.01\text{mm}$ $\theta=-25^\circ$
 $t=0.05\text{mm}$ $u=-0.06\text{mm}$
 $N=5.12 \times 10^5$

Photo. 3 The periphery of the deposited metal where the fatigue crack initiated (electrode LH-55) $\times 2/3$

N O. 3 8
 $\rho=0.01\text{mm}$ $\theta=15^\circ$
 $t=0.01\text{mm}$ $u=+0.02\text{mm}$
 $N=1.021 \times 10^6$

Photo. 6 The periphery of the deposited metal where the fatigue crack initiated (electrode TS-310) $\times 2/3$

N O. 7 1
 $\rho=0.005\text{mm}$ $\theta=25^\circ$
 $t=0.09\text{mm}$ $u=-0.02\text{mm}$
 $N=2.42 \times 10^5$

Photo. 4 The periphery of the deposited metal where the fatigue crack initiated (electrode LH-55) $\times 2/3$

N O. 3 1
 $\rho=0.005\text{mm}$ $\theta=20^\circ$
 $t=0.005\text{mm}$ $u=+0.07\text{mm}$
 $N=3.55 \times 10^5$

Photo. 7 The priphery of the deposited metal where the fatigue crack initiated (electrode TS-310) $\times 2/3$

N O. 6
 $\rho = 0.005 \text{ mm}$ $\theta = 5^\circ$
 $t = 0.01 \text{ mm}$ $u = +0.03 \text{ mm}$
 $N = 2.37 \times 10^5$

Photo. 8 The periphery of the deposited metal where the fatigue crack initiated (electrode TS-310) $\times 2/3$

N O. 5
 $\rho = 0.01 \text{ mm}$ $\theta = 40^\circ$
 $N = 2.67 \times 10^5$

Photo. 10 The periphery of the toe where the fatigue crack initiated (electrode TS-310) $\times 2/3$

N O. 28
 $\rho = 0.015 \text{ mm}$ $\theta = 25^\circ$
 $N = 5.50 \times 10^5$

Photo. 9 The periphery of the toe where the fatigue crack initiated (electrode TS-310) $\times 2/3$

N O. 1
 $\rho = 0.005 \text{ mm}$ $\theta = 35^\circ$
 $N = 4.64 \times 10^5$

Photo. 11 The periphery of the toe where the fatigue crack initiated (electrode TS-310) $\times 2/3$

余盛の場合は、 ρ が 0.015 mm 以上のもの、0.01 mm のもの、そして 0.005 mm のものに分け、溶接止端の場合は試験片数が少ないため ρ が 0.015 mm のものと 0.01 mm のものとを 1 群として扱った。最外層を TS-310 で溶接した試験片については、余盛の場合は、 ρ が 0.01 mm 以上のものと 0.005 mm のものとに分け、さらに試みに後者について深さ u が 0.005 mm のものと 0.01 mm 以上のものとに分けた。溶接止端の場合は、 ρ が 0.015 mm 以上のもの、0.01 mm のものおよび 0.005 mm のものとに分類した。それぞれの形状の例を Photo. 2 から Photo. 11 に示す。Photo. 2, 3, 4 は LH-55 で余盛の場合であり、Photo. 5 は溶接止端の場合である。また、Photo. 6, 7, 8 は TS-310 で余盛の場合であり、Photo. 9, 10, 11 は溶接止端の場合である。TS-310 の場合はステンレス用腐食液マーブル溶液で腐食している

Fig. 6 Comparison of the fatigue life (electrode LH-55)

ために地の組織は不鮮明になっている。Table 4 および 5 は LH-55 および最外層 TS-310 の場合について疲れき裂発生点の余盛形状を測定した結果を前述のように分

Table 4 Size and shape of the position where the fatigue crack initiated (electrode LH-55)

At dedosited metal							
No	Specimen number	No. of cycles $\times 10^5$	Median rank	Radius of the groove mm	Depth of the groove mm	Position of the crack from the base metal mm	Flank angle of the toe °
1	53	2.46	0.129	≥ 0.015	0.01	-0.06	-15
2	72	4.83	0.315		0.04	-0.08	-10
3	65	7.32	0.500		0.03	-0.06	-25
4	63	13.11	0.685		0.05	0.10	15
5	61	16.03	0.871		0.07	-0.06	-50
1	70	2.31	0.067	-0.01	0.08	-0.04	0
2	66	3.65	0.163		0.01	-0.10	-15
3	76	3.65	0.259		0.08	-0.08	-10
4	73	4.30	0.356		0.005	0.28	-25
5	74	5.12	0.452		0.05	-0.06	-25
6	52	5.53	0.548		0.07	-0.03	20
7	62	6.92	0.644		0.01	0.01	20
8	48	15.05	0.741		0.03	0.06	10
9	42	17.58	0.837		0.04	0.11	20
10	45	23.17	0.933		0	0	0
1	68	1.38	0.074	-0.005	0.03	-0.15	25
2	79	1.57	0.181		0.11	-0.13	-30
3	67	1.72	0.287		0.005	-0.27	-40
4	77	1.96	0.394		0.14	-0.13	-10
5	71	2.42	0.500		0.09	-0.02	25
6	78	2.99	0.607		0.03	-0.08	-25
7	60	3.49	0.713		0.05	-0.01	20
8	51	4.02	0.819		0.03	0.02	45
9	69	5.25	0.926		0.04	0.02	50
At toe							
1	56	3.42	0.129	0.015			40
2	58	5.27	0.315	0.015			40
3	80	6.16	0.500	0.01			25
4	46	31.20	0.685	0.01			40
5	44	49.75	0.871	0.015			40

Table 5 Size and shape of the position where the fatigue crack initiated (electrode TS-310)

At deposited metal							
No	Specimen number	No. of cycles $\times 10^5$	Median rank	Radius of the groove mm	Depth of the groove mm	Position of the crack from the base metal mm	Flank angle of the toe °
1	2	3.84	0.094	≥ 0.01	0.03	-0.10	35
2	38	10.21	0.230		0.01	0.02	15
3	10	11.99	0.365		0.01	0.09	15
4	37	13.40	0.500		0.005	0.08	20
5	30	13.88	0.635		0.03	-0.05	-30
6	21	15.74	0.771		0.01	0.02	20
7	27	24.37	0.906		0.005	0.03	10
1	31	3.55	0.206	-0.005	0.005	0.07	20
2	35	4.30	0.500		0.005	0.04	0
3	33	6.78	0.794		0.005	0.06	15
1	6	2.37	0.109	-0.005	0.02	0.08	0
2	14	2.48	0.266		0.01	0.03	5
3	19	2.82	0.422		0.04	0.13	20
4	20	3.48	0.578		0.01	0.06	25
5	34	3.89	0.735		0.03	0.01	5
6	15	5.07	0.891		0.02	0.13	20

At toe					
No	Specimen number	No. of cycles $\times 10^5$	Median rank	Radius of the toe mm	Flank angle of the toe °
1	40	1.85	0.083	≈ 0.015	35
2	12	3.20	0.202		20
3	7	4.62	0.321		20
4	28	5.50	0.440		25
5	36	5.61	0.560		10
6	3	6.08	0.679		40
7	26	7.97	0.798		30
8	22	14.32	0.917		20
1	13	2.29	0.109	≈ 0.01	30
2	5	2.67	0.266		40
3	4	2.79	0.422		40
4	32	3.38	0.578		50
5	29	4.63	0.734		60
6	25	6.51	0.891		80
1	17	1.46	0.074	≈ 0.005	45
2	11	1.81	0.181		35
3	16	2.36	0.287		65
4	8	2.57	0.394		40
5	39	2.62	0.500		70
6	23	2.90	0.607		80
7	9	3.78	0.713		65
8	24	3.99	0.819		75
9	1	4.64	0.926		35

Fig. 7 Comparison of the fatigue life when the fatigue crack initiated at the deposited metal (electrode TS-310)

Fig. 8 Comparison of the fatigue life when the fatigue crack initiated at the welded toe (electrode TS-310)

類したものである。

これらの結果を比較するために、Weibull の確率紙⁷⁾に記入したものが Fig. 6, 7, 8 である。Fig. 6 は LH-55 の場合である。疲れき裂発生点が余盛の窪みのときは、 ρ が 0.015 mm 以上のものと 0.01 mm のものではほとんど寿命の差はないが、 ρ が 0.005 mm のものは明らかに他のものより短寿命となっている。また、発生点が溶接止端のものは若干長寿命となっている。

Fig. 7 は TS-310 でき裂発生点が余盛の窪みの場合である。明らかに ρ が 0.005 mm のものより 0.01 mm 以上のものの方が長寿命となっており、 ρ が 0.005 mm

のものでも t が小さいとわずかながら長寿命となっている。Fig. 8 は TS-310 でき裂発生点が溶接止端の場合である。やはり ρ の大きいものが長寿命となる傾向が認められる。

Fig. 6, 7, 8 のいずれの場合についても、破壊する確率の大きな方で寿命の差が大きくでている。

4. 考 察

Fig. 3 あるいは Table 4 および 5 に示したように、突合せ溶接継手薄板状疲れ試験片の実験点は非常にばらついている。突合せ溶接継手の通常の大型疲れ試験にお

Table 6 Comparison of the fatigue life at 21.7 kg/mm² made with electrodes LH-55 and TS-301

Electrode	Position of initiation	Shape of the deposited metal	Mean life × 10 ⁵	Life for 50% failed × 10 ⁵
LH-55	at d.m.	$\rho \geq 0.015$	8.75	7.62
		$\rho = 0.01$	8.73	7.55
		$\rho = 0.005$	2.76	2.73
	at toe	$\rho = 0.01 \sim 0.015$	19.16	14.30
TS-301	at d.m.	$\rho \geq 0.01$	13.21	12.60
		$\rho = 0.005 \quad t = 0.005$	4.88	4.72
		$\rho = 0.005 \quad t \geq 0.01$	3.35	3.31
	at toe	$\rho \geq 0.015$	6.16	5.81
		$\rho = 0.01$	3.71	3.72
		$\rho = 0.005$	2.90	2.88

いては、これほどのばらつきは余りみられない。この原因は、本実験における試験片は溶接線に直角に薄く採取したものであり、各試験片の溶接止端近傍の余盛形状が異なっているためであるのは明らかである。低水素系溶接棒 LH-55 のみによる場合は応力 21.7 kg/mm² で約 90 倍以上、最外層が TS-301 の場合は同様に約 10 倍の寿命の相違がある。これに反し、大型疲れ試験片の場合は疲れ破壊は試験片の最も弱い所、すなわち、応力集中が最大の所でおきと考えられ、試験片の溶接線が長いために各試験片に同じ程度の弱い部分が存在し、そのためばらつきが少なくなるのであろう。したがって、疲れき裂発生に対する余盛形状の影響をみるには、このような薄板状試験片を用いる方がよく、また発生点の観察も容易である。

突合せ溶接継手における疲れき裂は溶接止端ばかりでなく余盛表面の窪みからも発生しており、き裂発生点は

非常に鋭い切欠きになっていることがわかったが、き裂発生点の形状と寿命とについてさらに検討してみる。Table 6 は応力 21.7 kg/mm² における平均寿命あるいは破壊確率が 50% のときの寿命を示したものである。LH-55 の場合はき裂発生点が溶接止端のものより余盛のものの方が短寿命となっている。これは under cut や余盛表面の窪みが溶接止端よりも疲れき裂の発生に対して厳しくきいていることを示しており、溶着鋼の柱状組織の方向のためであろう。き裂発生点が溶接止端のものは余盛表面に窪みがなかったか、あるいはあっても底の半径が大きく余盛全体がきわめてなめらかになっていたり、under cut がなかったものである。Photo. 12 は LH-55 のみで溶接した場合で、応力 21.7 kg/mm² で 1.2×10^7 回の繰返しによっても疲れき裂の発生がみられなかった試験片の四箇所の溶接止端附近を示したものである。いずれの溶接止端の角度もゆるく、その半径も大

Photo. 12 The periphery of the toe and the deposited metal where no fatigue crack was observed after 1.2×10^7 cycles at 17.8 kg/mm² × 2/3

きい (約 0.05 mm から 0.1 mm 以上). また, under cut があっても窪み底の半径はきわめて大きい. このような場合には疲れ強さは高くなり, Fig. 3 の場合と比較すると疲れ限度は約 7 kg/mm^2 以上上昇していることになる. き裂発生点が残盛の場合でも窪み底の ρ が 0.01 mm 以上のものは ρ が 0.005 mm のものよりかなり長寿命となっており, ρ の効果が大きい.

最外層 TS-310 による場合はき裂発生点が残盛のものは ρ が 0.01 mm 以上のものと 0.005 mm のものとの寿命の相違は LH-55 のみによる場合よりも大きい. また同じような ρ に対しては LH-55 より TS-310 による方が寿命が長い. これらは, 溶着鋼の切欠きに対する挙動の相違もあるが, LH-55 よりも TS-310 の余盛の方が表面がなめらかであって, 窪みがあっても浅いためであり, LH-55 によるものが under cut 気味であったためである. き裂発生点が溶接止端の場合は, 余盛表面のものより短寿命であり, ρ による寿命の相違も比較的少ない. また, ρ が 0.01 mm 以上の場合でも LH-55 の同じものより短寿命となっている. これは LH-55 より TS-310 による余盛の方が全体にふくらんでおり, このために溶接止端における巨視的形狀係数が大きくなっているためである.

LH-55 あるいは最外層のみ TS-310 による突合せ溶接継手の余盛形状は, 巨視的にみるとそれぞれ各試験片間の差異はほとんどない. しかしながら, 微視的にみると前述のように千差万別な切欠き状のものとなっている. また, 試験片によっては溶接による角変形が少しあり, その影響が懸念されたが, き裂の発生は角変形の内側ばかりでなく外側からも同じように起こり, 溶接による角変形よりも溶接止端の形状が大きく影響していることがわかった. Photo. 13 は Fig. 3 における突合せ溶接継手で, 応力 17.8 kg/mm^2 で 1.2×10^7 回の繰返し後に発見された停留き裂である. 一般に停留き裂は切欠きが鋭くて形状係数が大きいときに発生するといわれている. したがって停留き裂の存在は余盛近傍の微細な形状

Photo. 13 Non propagating crack observed after 1.2×10^7 cycles at $17.8 \text{ kg/mm}^2 \times 2/3$

がき裂発生に対して影響を与えていることを示すものである.

80キロ級高張力鋼でもその突合せ溶接継手の疲れ強さは, 50キロ級高張力鋼やさらに SM 41 の突合せ溶接継手の疲れ強さと同程度になってしまうという現象は, 従来言われてきたような溶接止端における巨視的応力集中のみによる説明は困難であり, 微視的な切欠きの存在によって説明が可能である. 巨視的にみた場合の溶接止端の形状係数は 2 以下であって, この程度の形状係数では鋼種間の切欠きに対する挙動の差異はあまりなく, 切欠き係数は形状係数に近い値となる⁹⁾. Fig. 10 は HT-50 について形状係数が約 2 の人工余盛をつけた場合の疲れ試験結果であり, 疲れ強さは 31.0 kg/mm^2 となっている. Fig. 9 の研磨母材の疲れ強さ 57.2 kg/mm^2 と比較すると切欠き係数は 1.8 となる. Fig. 4 の突合せ溶接継手の疲れ強さは 18.5 kg/mm^2 であるから, 2 程度の形状係数によって溶接継手の疲れ強さの低下を説明することは困難である.

いっぽう, 微視的にみた場合の余盛表面の凹凸のみの形状係数は, Photo. 4 について概算すると約 9 となり, 開き角を考慮しても約 4 となる. このように形状係数が大きい場合は切欠き係数は形状係数よりもかなり小さくなり, また, 引張強さの高い鋼ほど切欠き感受性が敏感

Fig. 9 S-N curve for polished specimen in HT-60

Fig. 10 S-N curve for specimens with artificial reinforcement in HT-60

になって切欠き係数が大となる傾向がある⁹⁾。したがって、高張力鋼突合せ溶接継手の疲れ強さの低下は、このような微小な鋭い切欠きの存在によって説明が可能である。すなわち、突合せ溶接継手において、母材および溶着鋼の引張強さが異なっている、このような切欠きが存在すると、切欠きの大きさは非常に小さいが形状係数が大きくて引張強さの高いほど切欠き感受性が敏感となるため、引張強さの高い鋼ほど疲れ強さの低下が大きくなり、結果的には同程度の疲れ強さを示すようになるのであろう。なお、この種の切欠きは試験片全体に比較して非常に小さいものであるから、Peterson の応力集中部の結晶粒数の概念¹⁰⁾からみても、形状係数が大きくても切欠き係数はそれほど大きくはないと考えられる。これまで述べてきたように、突合せ溶接継手における応力集中は比較的形状係数の小さい余盛全体による応力集中と、微小ではあるが形状係数の大きい溶接止端やその近傍の凹凸による応力集中とがあり、高張力鋼突合せ溶接継手の低い疲れ強さの説明は前者によっては不可能であり、後者によって可能である。

以上の結果から溶接継手の疲れ強さを改善する方法を考えてみる。微小な形状係数の大きい切欠きに対して鈍感な母材あるいは溶着鋼を開発することが考えられるがかなり困難と思われる。巨視的な応力集中を緩和するためには、溶接止端の角度を小さくすればよいが、通常手溶接や自動溶接ではそれ程大きな改善は得られないであろう。溶接法あるいは溶接後の処理によって、溶接止端や止端近傍の余盛表面をなめらかにするか、溶接止端近傍の窪みをつぶすかすれば疲れ強さは大きく改善されるであろう。しかし、溶接止端近傍のくぼみが残るような中途半端な処理では効果は余りないと思われる。たとえば、溶接止端附近を深さ約 1 mm グラインダーで落としたものと、溶接止端の under cut が部分的に残っているものとは約 5 倍の寿命の相違がある⁸⁾。また、流しビードは溶接止端近傍の微細な形状を改良するとは考えられず、疲れ強さ改善の効果はほとんどないであろう。

また、溶接継手の疲れ強さの改善を目的とし切欠き疲れ試験を行なう場合は、溶接止端に相当する部分や溶着金属の疲れにおける切欠き感受性を調査する必要がある。この場合の切欠きは浅くて鋭いか、ゆるい切欠きにさらに浅く鋭い切欠きを入れた一種の二重切欠きとする必要がある。なぜならば、切欠き疲れ試験では寸法効果などがあり、同じ形状係数でも試験片の大きさや切欠きの形状が異なると切欠き係数は違った値となる。このため、切欠きは疲れき裂発生点の切欠きと類似の形状にしなければならない。また、疲れき裂の発生点は溶接止端や溶着鋼の表面であるから、その部分の切欠き感受性を

求めなければならないからである。

なお、本報告の LH-55 のみによる溶接継手は大部分が under cut 気味であったが、溶接の際は under cut が生じないようにじゅうぶん注意しており、肉眼で見たところではほとんどなかった。したがって、通常 under cut はないとみなされている手溶接継手でも、この程度のものは存在しているのではないと思われる。

5. 結 言

突合せ溶接継手の薄板状試験片を用いて片振り引張疲れ試験を行ない、疲れき裂発生点の検討を行なった結果、次のようなことが明らかとなった。

1) 突合せ溶接継手における疲れき裂発生点は溶接止端だけと考えられていたが、溶接止端から 0.7 mm 以内の余盛表面の窪みからも発生しており、むしろ後者の方が多かった。いずれも発生点は従来考えられていたよりもはるかに鋭い切欠きとなっている。切欠き底の半径は 0.005 mm から 0.03 mm であるが大部分は 0.02 mm 以下である。

2) 溶接止端あるいは余盛の窪み底の半径の小さい方がより短寿命となる。余盛のくぼみが深いと短寿命となるが、ごく浅ければ半径が小さくても長寿命となる傾向がある。したがって溶接止端およびその附近の余盛表面がなめらかならば疲れ強さは上昇する。

3) 溶接止端の半径は、余盛表面と母材とのなす角度が大きいくほど小さくなる傾向がある。

4) 溶接止端近傍では、余盛全体の形状による応力集中と余盛の微細な凹凸による応力集中とが相乗的に作用していると考えられる。このような微細な応力集中源の存在によって、引張強さの異なる鋼の突合せ溶接継手の疲れ強さが同程度の値になる事実が説明できるであろう。

5) 溶接継手の疲れ強さの改善を目的として切欠き疲れ試験を行ない鋼材の切欠き感受性を調査する場合は、鋭くて浅い切欠きか、ゆるい切欠きにさらに鋭くて浅い切欠きを入れた一種の二重切欠きを、溶接止端に相当する部分や溶着金属に入れたものにする必要がある。

6) 溶接法や溶接後の処理において、なんらかの方法で溶接止端やその近傍の余盛表面をなめらかにするか、あるいは、溶接止端やその近傍の窪みをつぶすかすれば、疲れ強さは大きく改善されるであろう。しかし、溶接止端近傍のくぼみが残るような中途半端な処理ではあまり効果はないであろう。

参 考 文 献

- 1) たとえば、白石, “構造用高張力鋼継手の疲労強度”, 溶接学会誌, Vol 33 (1964), No. 10, 894—902

- 2) 山口, “船体用鋼板の疲労強度について”, 造船協会誌, No. 115, 89—99
- 3) R.P. Newman, T.R. Gurney, “Fatigue test of plain plate specimens and transverse butt welds in mild steel”, British W.J., vol. 6 (1959), No. 12 569—594
- 4) 村木, 石黒, 片屋, 関原, “60 kg/mm² 級高張力鋼突合せ溶接継手の疲労特性について”, 溶接学会誌, vol. 35 (1966), No. 9, 862
- 5) 村木, 石黒, 横田, “60 kg/mm² 級高張力鋼の溶接熱サイクル再現部の疲労特性について”, 溶接学会誌, vol. 32 (1963), No. 9, 122
- 6) E.G. Signes etc, “Factors affecting the fatigue strength of welded high strength steels”, British W.J., Vol. 14 (1967), No. 3, 108—116
- 7) L.G. Johnson, “The statistical treatment of fatigue experiments”, Elsevier Publishing Company, 1964
- 8) 村木, 石黒, 半沢, 横田, 未発表.
- 9) 村木, 石黒, 半沢, 片屋, “高張力鋼の疲労における切欠きの影響”, 鉄と鋼, vol. 52 (1966), No. 10, 1919
- 10) R.E. Peterson, Stephen Timoshenko 60th Anniversary, vol. 179 (1938)

研究室だより

三菱重工業株式会社技術本部神戸研究所

所在地および電話番号

神戸市兵庫区和田崎町3丁目1 (神戸研究室)

TEL 神戸 (078) 67-5061 (大代表)

兵庫県明石市魚住町清水字北沢1106の4

TEL 兵庫県二見 (07894) 2-1531
(大代表)

規 模

1. 敷地面積 神戸研究室 5300 m² 明石研究室 64400 m²
2. 建家面積 神戸研究室 6380 m² 明石研究室 9217 m²
3. 主な施設 神戸研究室 流体力学実験場など
明石研究室 材料, 化学, 溶接開発実験場など
4. 人員管理部門 32名 基礎共通部門 186名
開発部門 163名 計375名
代表者 所長 大石松三

組 織

取締役社長

↓
技術本部

技術管理部	—管 理 課	(明石・神戸)
特許契約部	—材料研究課	(明石・神戸)
長崎研究所	—溶接研究課	(明石)
神戸研究所	—構造研究課	(明石・神戸)
広島研究所	—化学研究課	(明石)
	—機械研究課	(明石)
	—流体力学研究課	(神戸)
	—技術計算課	(神戸)

主な研究設備

高性能電子顕微鏡, クリープラプチャ試験装置, X線マイクロアナライザー, 溶接用CCT図作成装置, エレクトロスラグ溶接装置, プラズマアーク溶接機, 自記赤外線分光光度計, 高速沈澱試験装置, MHD発電試験装置, 高落差水車性能試験装置, 高速空気力学試験装置, 回転振動試験装置, ガスタービン燃焼試験装置, 溶剤回収試験装置など.

国鉄山陽本線明石駅から国道2号線を車で西へ約30分. 播州平野の田園の中に緑に囲まれて三菱重工業神戸造船所明石工場と神戸研究所明石研究室が同居している. ここは昭和36年春完成したもので, 近年急速な発展をとげつつある兵庫中西部の工業都市化に役買っている. 明石工場は建設機械の専門工場として目下建設ブームにのってフル操業中であり, 概して静かな研究所とは好対称の様相を呈している. さて明石研究室は恵まれた環境のもと, 所長以下, 材料, 溶接, 化学, 構造強度, 機械各分野の研究者およびグループにより, 文字どおり三菱重工業の中核的研究所として活躍しており, 原子力プラント, ボイラ, ガスタービンの研究, 環境装置, MHD発電, 海水淡水化などの研究に目ざましい成果をあげつつある. その中で溶接研究課は課長氏家昭技師, 課長附松田国雄技師, 調査係長稲岡勝技師, 第一係長鈴木和久技師, 第二係長佐藤昭三技師の陣容で造船, 造機, 鉄構の各製品に直接つながる各種溶接技術の開発に目ざましい実績をあげている. また最近完成した開発実験場は, わが国有数の規模のテストフロアを有し, きわめて精度の高い鋼構造物実験ができるようになった. このように明石研究室は神戸研究所の本拠地として, 社内における地位はますます重要度を増していくだろう. いっぽう商港神戸港の一角に巨大なクレーンが林立する神戸造船所があり, これと隣接して神戸研究所神戸研究室がある.

ここでは現在主として流体力学研究, すなわち水車および産業機械の空気力学的研究とともに電子計算機を応用した技術計算の理論研究が行なわれている. 特に大都市特有の公害についての対策研究は盛んで, その成果も着々とあがりつつある.