
新溶接棒KS87の使用による高張力鋼リブ十字すみ肉溶接継手の疲れ強さ改善効果
Improvements in Fatigue Strength of Fillet Welded Joints of High Tensile Strength
Steels by Use of a Newly Developed Electrode KS 87

松本 重人(Shigeto Matsumoto) 小林 邦彦(Kunihiko Kobayashi) 船越 督己
(Tokushi Funakoshi) 坂本 昇(Noboru Sakamoto) 新川 耕治(Koji Shinkawa)

要旨：

疲れ強さの向上を目的として新たに開発された被覆アーク溶接棒 KS87 を用いて製作した 50, 60 および 80kg/mm² 級高張力鋼のリブ十字すみ肉溶接継手の疲労試験を実施し、以下の結果を得た。(1)KS87 を用いたリブ十字すみ肉継手の 200 万回疲れ強さは、50, 60 および 80kg/mm² 級高張力鋼でそれぞれ 48, 86 および 71%改善された。(2)この疲れ強さの向上は、溶接止端部の止端半径が大きくなったことと、余盛角度が広角度になったことに起因する。(3)リブ十字すみ肉溶接継手の疲れ強さと溶接姿勢の関係は使用する溶接材料によって異なり、KS87 については水平すみ肉等脚姿勢が、従来棒は下向すみ肉姿勢がそれぞれ適合する。

Synopsis：

Fatigue tests were carried out on fillet welded joints of 50, 60 and 80 kg/mm² class high tensile strength steels using a new electrode, KS 87, developed specially for improving the fatigue strength of fillet welded joints of the 60 kg/mm² class high tensile strength steels. Based on the experiments, the following conclusions were obtained. (1) Fatigue limit for the fillet welded joint using the new electrode was improved by 41, 96 and 75% for 50, 60 and 80 kg/mm² class steels, respectively. (2) Improvement in fatigue strength was attributed to decrease in the stress concentration at the weld toe due to large toe radius and flank angle. (3) The influence of welding position and fillet profile on the fatigue strength of fillet welded joint varied with the electrode used: the new and the conventional electrodes are fit respectively for horizontal welding and flat welding.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

新溶接棒KS 87の使用による高張力鋼リブ 十字すみ肉溶接継手の疲れ強さ改善効果

Improvements in Fatigue Strength of Fillet Welded Joints of High Tensile Strength Steels by Use of a Newly Developed Electrode KS 87

松 本 重 人*

Shigeto Matsumoto

小 林 邦 彦**

Kunihiko Kobayashi

船 越 督 巳***

Tokushi Funakoshi

坂 本 昇****

Noboru Sakamoto

新 川 耕 治*****

Koji Shinkawa

Synopsis:

Fatigue tests were carried out on fillet welded joints of 50, 60 and 80 kg/mm² class high tensile strength steels using a new electrode, KS 87, developed specially for improving the fatigue strength of fillet welded joints of the 60 kg/mm² class high tensile strength steels. Based on the experiments, the following conclusions were obtained.

- (1) Fatigue limit for the fillet welded joint using the new electrode was improved by 41, 96 and 75% for 50, 60 and 80 kg/mm² class steels, respectively.
- (2) Improvement in fatigue strength was attributed to decrease in the stress concentration at the weld toe due to large toe radius and flank angle.
- (3) The influence of welding position and fillet profile on the fatigue strength of fillet welded joint varied with the electrode used: the new and the conventional electrodes are fit respectively for horizontal welding and flat welding.

1. 結 言

高張力鋼のリブ十字すみ肉溶接継手の疲れ強さに影響を与える最も大きな因子は、継手の幾何学的形状である¹⁾ことが知られており、高橋²⁾、川崎

ら³⁾および石黒⁴⁾は、継手の余盛止端部における微視的および巨視的な形状が重要であることを明らかにした。これらを背景として、余盛止端部形状をなめらかにする研究⁵⁾、あるいはなめらかな止端部形状を与えるすみ肉溶接棒の開発^{6,7)}が進められている。すでに、軟鋼および50kg/mm²級高張

* 技術研究所厚板研究室

*** 技術研究所厚板研究室(現水島研究室)室長・工博

***** 溶接棒鉄粉工場管理課課長

[昭和52年1月31日原稿受付]

** 技術研究所厚板研究室主任研究員

**** 溶接棒鉄粉工場管理課課長

力鋼用には止端部形状を良好にする水平すみ肉専用棒が市販されている。しかし、 60kg/mm^2 以上の高張力鋼については、全姿勢用低水素系溶接棒が使用されており、止端部形状は良好とはいえない。当社では余盛止端部形状に最も影響が深い溶接スラグの物性を考慮し、被覆剤の組成を検討した結果、止端部形状をなめらかにする 60kg/mm^2 級の新しい水平すみ肉専用被覆アーク溶接棒“KS 87”を開発した。

本報告は、この KS 87 および突合せ溶接あるいはすみ肉溶接を対象とした従来の被覆アーク溶接棒を用いて製作したリブ十字すみ肉溶接継手の疲れ試験を実施して、KS 87 を使用したことによる疲れ強さの向上を明らかにするとともに、止端形状と疲れ強さの関係について検討したものである。

2. 供試材および溶接方法

2.1 供試材

供試材は 50kg/mm^2 級高張力鋼 SM 50, 60kg/mm^2 級調質高張力鋼 RIVER ACE 60 および 80kg/mm^2 級調質高張力鋼 RIVER ACE K0 の 3 鋼種で、いずれも板厚 15mm のものである。これらの化学成分および機械的性質を Table 1 に示す。また、Table 2 に供試溶接棒での溶接金属の化学成分および機械的性質を示す。溶接棒は、疲れ強さの向上を目的として新たに開発された 60kg/mm^2 級の水平すみ肉専用被覆アーク溶接棒 KS 87 と、各供試鋼材のすみ肉あるいは突合せの溶接に適するものとして従来用いられている被覆アーク溶接棒(以後従来棒と記す)の合計 8 種類である。KS 87 は従来の 60kg/mm^2 級水平すみ肉溶接棒 KS 86 F と比べて Mn, Ni, Mo などの含有量が異なっている。

2.2 溶接方法

継手は Fig. 1 に示す $15 \times 605 \times 1000\text{mm}$ の板に、 $15 \times 50 \times 1000\text{mm}$ のリブ材を手溶接して作製した。溶接にあたっては、溶接ひずみをできるだけ少なくするため表裏交互に行った。これらの溶接条件を Table 3 に示す。溶接は Fig. 2 に示すように水平すみ肉姿勢で等脚形状(X)、水平すみ肉姿勢で下肉形状(Y)および下向すみ肉姿勢(Z)の 3 条件とした。各溶接姿勢における溶接継手の断面マクロ組織の例を Photo. 1 に示す。

3. 試験方法

3.1 疲れ試験

Fig. 3 に試験片形状を示す。試験片は Fig. 1 に示す溶接継手から試験片の長手方向が鋼板の圧延方向と一致するように採取した。疲れ試験は容量 40t の Losenhausen 型万能疲れ試験機(東京衡機製)を使用し、荷重は完全片振り引張($R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max} = 0$)とし、試験片チャッキング時の偏心調整は、試験片平行部の両側面に貼付した抵抗線ひずみゲージ(共和電業製 KFC-5-C1-11)を用いて行った。

3.2 余盛止端部形状の測定

Fig. 4 に余盛止端部形状の測定要領を示す。溶接継手断面の余盛止端 8 箇所の形状を投影機にて 20 倍に拡大し、余盛止端半径 ρ および余盛角度 θ を測定した。 θ は余盛止端部から余盛(溶接金属)および母材にそれぞれ 0.5mm 離れる点での接線のなす角度とした。

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of materials

Steel	Chemical composition (wt%)											Mechanical properties		
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	B	YP (kg/mm^2)	TS (kg/mm^2)	El. (%)
SM 50	0.14	0.34	0.96	0.024	0.011	—	—	—	—	—	—	40.4	53.8	45
RIVER ACE 60	0.13	0.30	1.37	0.018	0.008	0.01	0.01	0.03	0.07	0.042	—	63.1	71.0	30
RIVER ACE K0	0.10	0.22	0.81	0.011	0.007	0.23	1.03	0.48	0.44	0.031	0.0022	78.6	81.5	32

Table 2 Chemical compositions and mechanical properties of weld metals

Type of electrode		Chemical composition (wt%)								Mechanical properties			Application
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	YP (kg/mm ²)	TS (kg/mm ²)	EL (%)	
A	KS 6	0.07	0.08	0.41	0.015	0.014	—	—	—	41	48	29	40kg/mm ² class steel, all position welding
B	KS 76	0.06	0.63	0.97	0.012	0.009	—	—	—	46	55	31	50kg/mm ² class steel, all position welding
C	KS 78L	0.07	0.15	0.50	0.016	0.016	—	—	0.57	46	57	32	50kg/mm ² class steel, fillet welding
D	KS 86	0.05	0.62	1.03	0.010	0.014	0.82	—	0.27	56	66	30	60kg/mm ² class steel, all position welding
E	KS 86F	0.06	0.65	1.09	0.012	0.013	0.78	—	0.30	54	65	30	60kg/mm ² class steel, fillet welding
F	KS 87	0.05	0.27	1.42	0.013	0.011	—	—	0.40	59	63	26	Ditto, for high fatigue strength
G	KS 106	0.05	0.44	1.19	0.015	0.008	1.92	—	0.38	67	74	26	70kg/mm ² class steel, all position welding
H	KS 116	0.05	0.55	1.28	0.014	0.007	2.42	0.23	0.38	74	84	24	80kg/mm ² class steel, all position welding

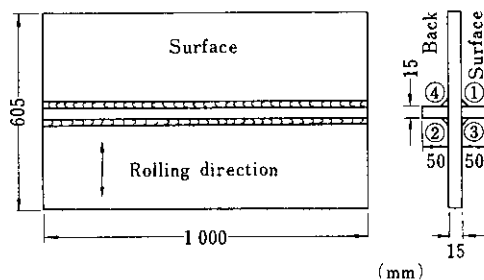


Fig. 1 Dimension of fillet welded joint (①~④ indicate the sequence of welding)

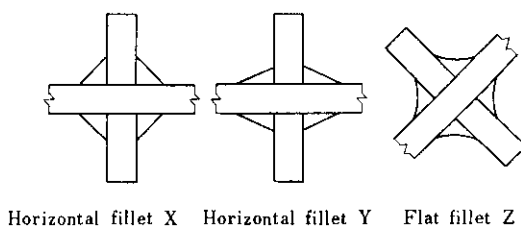


Fig. 2 Profiles of fillet weld

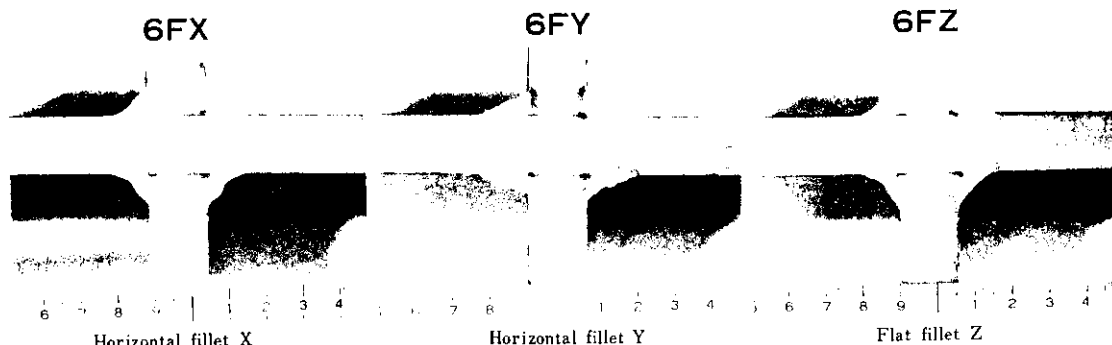


Photo. 1 Macro-structures of fillet joints welded in three profiles for RIVER ACE 60 steel

Table 3 Conditions for fillet welding

Steel	Type of electrode	Series*	Diameter of electrode (mm)	Welding current (A)	Arc voltage (V)	Welding speed (cm/min)	Heat input (kJ/cm)	Number of layers	Preheat temperature (°C)
SM 50	KS 87	5FX	6	280	30	18	28.0	1	< 50
	KS 6	5AX	4	170	32	32	10.2	3	
	KS 76	5BX	4	170	26	28	9.5	3	
	KS 78L	5CX	6	310	34	23	27.5	1	
	KS 78L	5CY	6	310	34	23	27.5	1	
	KS 78L	5CZ	6	310	34	23	27.5	1	
RIVER ACE 60	KS 87	6FX	6	280	30	18	28.0	1	100
	KS 86	6DX	4	170	24	27	9.1	3	
	KS 86F	6EX	4	170	30	30	10.2	3	
	KS 87	6FY	6	280	30	18	28.0	1	
	KS 87	6FZ	6	280	30	18	28.0	1	
	KS 86F	6EZ	4	170	30	30	10.2	3	
RIVER ACE K0	KS 87	8FX	6	280	30	18	28.0	1	150
	KS 86F	8EX	4	170	30	30	10.2	3	
	KS 106	8GX	4	170	25	28	9.1	3	
	KS 116	8HX	4	170	25	28	9.1	3	
	KS 87	8FY	6	280	30	18	28.0	1	
	KS 87	8FZ	6	280	30	18	28.0	1	
	KS 116	8HZ	4	170	25	28	9.1	3	

* Refer to Fig. 2, for X, Y, Z

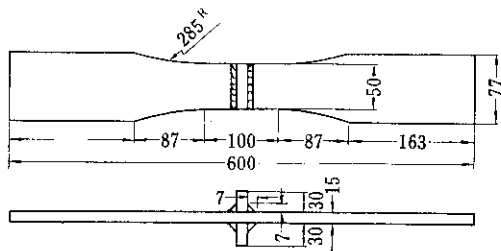
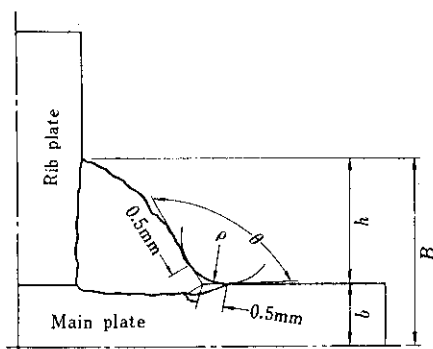


Fig. 3 Dimension of fatigue specimen

3・3 余盛止端部での応力集中の測定

Fig. 5 は溶接継手試験片の余盛止端部における応力集中の測定位置を示す。測定はゲージ長 1mm の抵抗線ひずみゲージ (共和電業製 KFC-1-D9-

Fig. 4 Definition of the toe radius ρ and the flank angle θ

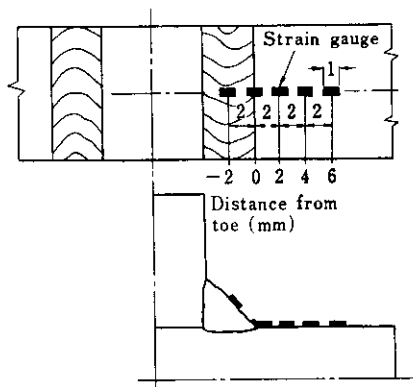


Fig. 5 Measuring positions for stress concentration at weld toe

11) を用いて行った。付加応力は供試鋼板の降伏応力以下とした。

3・4 余盛止端部の硬さ測定

溶接部の硬さ $H_V(10)$ は表面下 1mm の位置を 0.5mm 間隔で測定した。

3・5 溶接残留応力の測定

リップをはさむ試験片の表・裏面にゲージ長 2mm の 2 軸抵抗線ひずみゲージ(東京測器製 FCA-2)を 10mm 間隔で貼り、疲れ試験片の軸方向残留応力の大きさおよび分布を弛緩法⁸⁾で測定した。

4. 試驗結果

4・1 疲れ試験結果

Fig. 6 は、3鋼種の黒皮母材に種々の棒でX姿勢で溶接したときのS-N曲線を示したものである。**Fig. 7(a)**および**(b)**は、RIVER ACE 60 および RIVER ACE K0 について溶接棒をKS 87とし、溶接姿勢をX, Y, Z姿勢と変えた場合のS-N曲線を、また**Fig. 7(c)**はRIVER ACE K0について溶接棒をKS 116とし、溶接姿勢をX, Zと変えた場合のS-N曲線を示す。また、**Table 4**にこれらのS-N曲線から求めた、繰返し数がそれぞれ50万回、100万回、200万回の疲れ強さおよび疲れ限度を示す。また、**Fig. 8**は各試験片継手と疲れ限度の関係を鋼種ごとにヒストグラムで示す。**Table 4**より、KS 87を用いた継手はいずれの鋼種でも疲

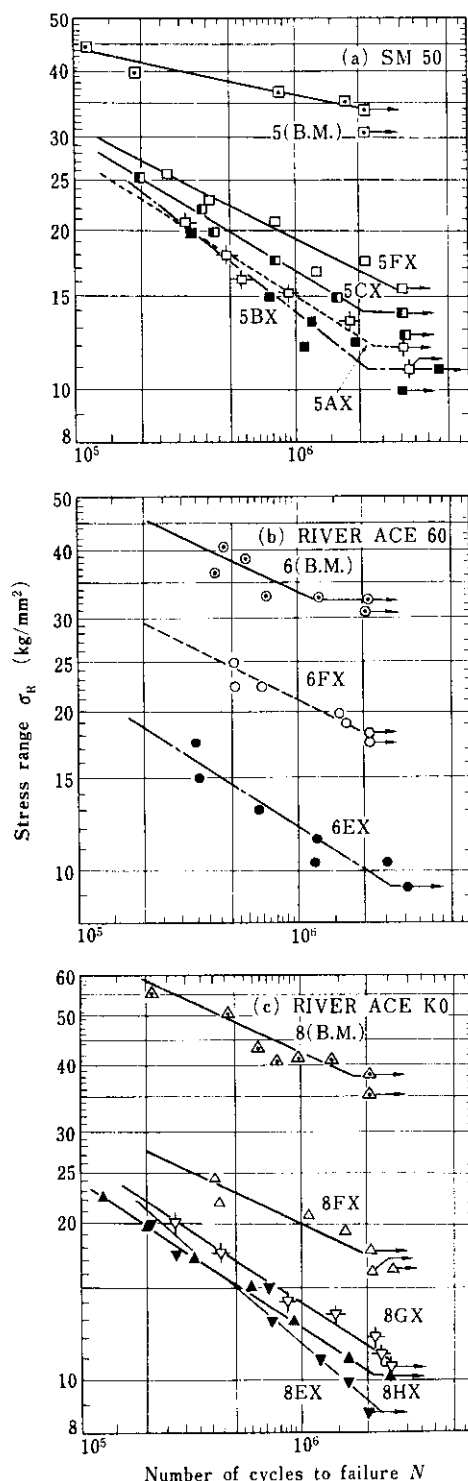


Fig. 6 *S-N* diagrams of the base metal and horizontal fillet welded joints

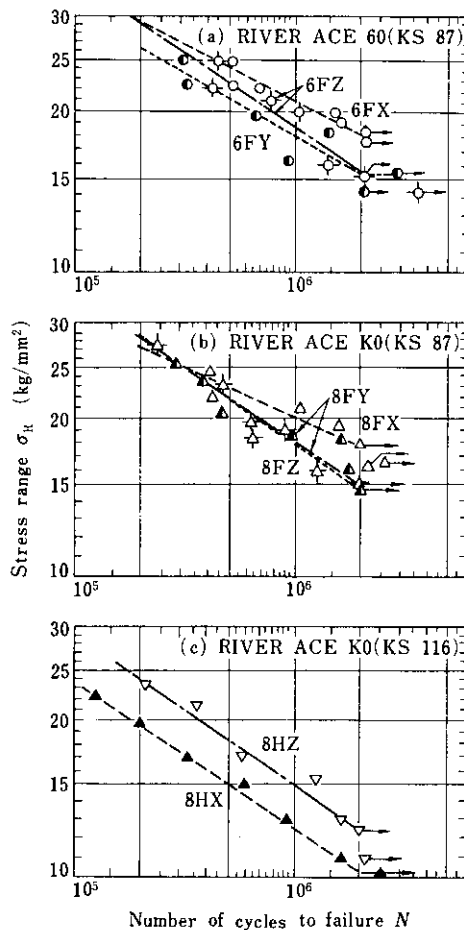


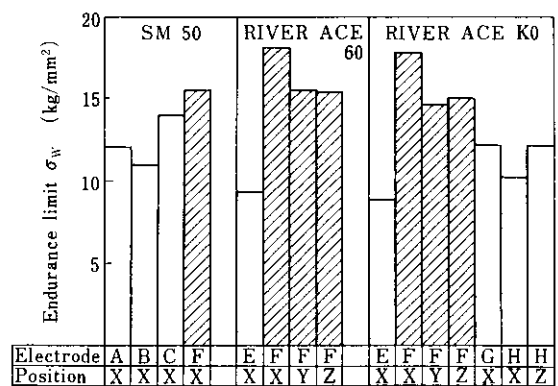
Fig. 7 S-N diagrams of fillet joints welded in X, Y, and Z profiles

れ強さが著しく向上しており、とくに RIVER ACE 60 と RIVER ACE K0 の 200 万回疲れ強さは 18.2kg/mm^2 および 17.8kg/mm^2 となり、従来棒の KS 86F, KS 116 を用いた RIVER ACE 60, RIVER ACE K0 の 9.8kg/mm^2 および 10.4kg/mm^2 に比較して、それぞれ 8.4kg/mm^2 (86%) および 7.4kg/mm^2 (71%) 向上している。また、SM 50 についても KS 76 を用いた継手に比較して約 5.5kg/mm^2 (48%) の改善をもたらしている。

溶接姿勢と疲れ強さの関係は、まず KS 87 については Fig. 7 (a), (b) により明らかなように、RIVER ACE 60, RIVER ACE K0 とともに X 姿勢が Y, Z 姿勢に比較して約 3kg/mm^2 高い値を示し最もすぐれている。Y 姿勢と Z 姿勢とは明りような差異は認められない。しかし従来棒の KS

Table 4 Fatigue strengths at various cycles and endurance limit σ_w

Steel	Series	Fatigue strength (kg/mm ²)			σ_w (kg/mm ²)
		Number of cycles			
		5×10 ⁵	1×10 ⁶	2×10 ⁶	
SM 50	5(B.M.)	38.4	36.0	34.3	34.3
	5FX	22.5	19.3	16.9	15.5
	5AX	18.2	15.0	12.8	12.1
	5BX	19.6	14.0	11.4	11.0
	5CX	20.1	17.0	14.2	14.0
RIVER ACE 60	6(B.M.)	38.0	33.1	32.3	32.3
	6FX	24.2	21.0	18.2	18.2
	6FY	21.0	18.0	15.5	15.5
	6FZ	22.6	18.9	15.2	15.2
	6EX	14.8	11.9	9.8	9.3
RIVER ACE K0	8(B.M.)	48.5	42.0	38.8	38.8
	8FX	23.0	20.0	17.8	17.8
	8FY	22.0	17.8	14.6	14.6
	8FZ	22.0	18.0	15.0	15.0
	8EX	15.5	12.0	9.5	8.8
	8GX	17.5	14.5	12.2	12.2
	8HX	15.5	12.8	10.4	10.2
	8HZ	19.0	15.6	12.2	12.2



Hatched columns correspond to the new type electrodes

Fig. 8 Endurance limits for fillet welded joints of SM 50, RIVER ACE 60 and RIVER ACE K0 steels

116 は、Z 姿勢が X 姿勢に比べて 2kg/mm^2 高い値を示し、KS 87 とは逆の傾向を示す。

大部分の継手試験片の疲れ亀裂は 1 箇所の溶接余盛止端から発生し、熱影響部、母材と伝播し破断に至っている。なかには **Photo. 2** にみられるように数箇所の溶接止端部より複数の亀裂が発生している場合もあった。**Photo. 3** に破断状況の例を示す。

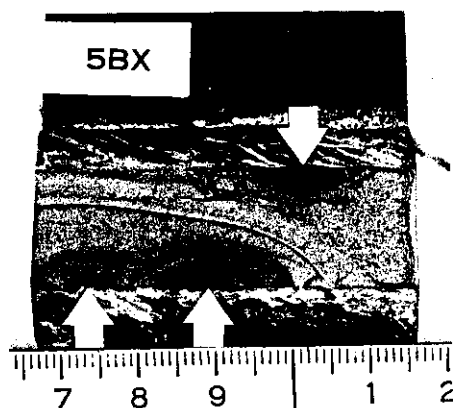


Photo. 2 An example of initiation of fatigue cracks revealed by beach mark method

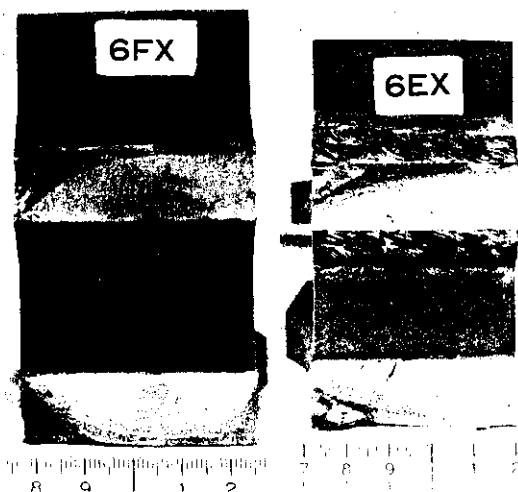


Photo. 3 Examples of the appearance of fatigue fractured specimens

4・2 余盛止端部形状の測定結果

Fig. 9 は、各鋼種について KS 87 と従来棒を用い、X 姿勢で作製した溶接継手の余盛止端部における止端半径 ρ および余盛角度 θ の測定結果で

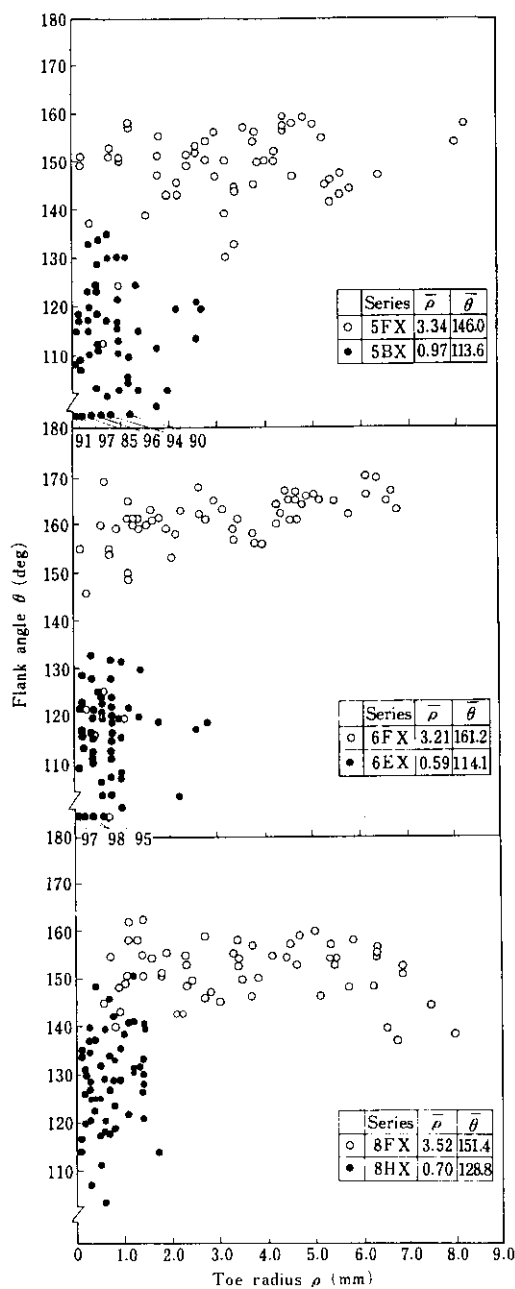


Fig. 9 Distributions of toe radius and flank angle of horizontal fillet welded joints by use of KS 87 and conventional electrodes

ある。溶接棒により ρ, θ の分布状態が明らかに異なっている。また、Table 5 には ρ, θ の各系列での平均値 $\bar{\rho}, \bar{\theta}$ と各試験片で測定した ρ, θ の最小値

Table 5 Toe radius ρ , flank angle θ and stress concentration factor α at toe of fillet welded joint for various high tensile strength steels

Steel	Series	$\bar{\rho}$ (mm)	$\bar{\theta}$ (deg)	$\bar{\rho}_{\min}$ (mm)	$\bar{\theta}_{\min}$ (deg)	α_{meas}	$\bar{\alpha}_{\text{cal}}$	α_{cal}^*	β_j	σ_w (kg/mm ²)	σ_w/σ_B
SM 50	5AX	1.70	128.8	0.31	106.0	2.29	2.26	4.26	2.83	12.1	0.225
	5BX	0.97	113.6	0.16	94.6	3.58	2.87	6.34	3.12	11.0	0.204
	5CX	1.90	142.4	0.46	132.1	3.04	1.70	3.72	2.45	14.0	0.260
	5CY	1.33	146.5	0.30	122.1	—	1.80	3.85	—	—	—
	5CZ	2.55	162.7	1.20	146.8	—	1.33	1.84	—	—	—
	5FX	3.34	146.0	1.06	137.6	1.40	1.45	2.58	2.21	15.5	0.288
RIVER ACE 60	6DX	1.05	135.2	0.48	124.3	—	2.15	3.15	—	—	—
	6EX	0.59	114.1	0.24	101.2	2.22	3.04	4.95	3.47	9.3	0.131
	6EZ	0.77	128.3	0.23	122.1	—	2.52	4.55	—	—	—
	6FX	3.21	161.2	0.91	153.7	1.50	1.30	1.88	1.77	18.2	0.256
	6FY	2.11	158.5	0.50	149.7	1.51	1.43	2.41	2.08	15.5	0.218
	6FZ	4.01	153.9	1.47	145.3	1.56	1.27	1.79	2.13	15.2	0.214
RIVER ACE K0	8EX	0.68	117.3	0.30	103.5	—	2.82	4.37	4.35	8.8	0.108
	8EZ	0.64	121.3	0.35	115.1	—	2.84	3.85	—	—	—
	8FX	3.52	151.4	1.47	143.1	1.58	1.33	1.82	2.15	17.8	0.218
	8FY	2.07	153.6	0.53	147.0	1.67	1.42	2.49	2.62	14.6	0.179
	8FZ	3.31	148.0	1.11	141.1	1.36	1.38	2.01	2.55	15.0	0.184
	8GX	0.68	117.3	0.30	103.5	—	2.82	4.37	4.35	8.8	0.108
	8GZ	0.82	114.0	0.43	101.4	—	2.66	3.71	—	—	—
	8HX	0.70	128.8	0.16	115.1	2.46	2.61	5.80	3.75	10.2	0.125
	8HZ	0.72	133.3	0.23	119.4	1.98	2.50	4.61	3.14	12.2	0.149

の平均値 $\bar{\rho}_{\min}$, $\bar{\theta}_{\min}$ を示す。KS 87 の ρ は SM 50, RIVER ACE 60 および RIVER ACE K0 でそれぞれ 3.34, 3.21 および 3.52mm であり, $\bar{\theta}$ はそれぞれ 146, 161, 151° である。これに対して従来棒を用いた継手の $\bar{\rho}$ はそれぞれ 0.97, 0.59, 0.70mm で, $\bar{\theta}$ は 114, 114, 129° である。このように KS 87 を用いた継手での $\bar{\rho}$ および $\bar{\theta}$ は, 従来棒のそれに比べて著しく大きいことがわかる。RIVER ACE 60 と RIVER ACE K0 について, KS 87 を用いた継手の $\bar{\rho}$ はほぼ同じ値であるが, RIVER ACE 60 継手の $\bar{\theta}$ は 10° 大きい。Photo. 4 は各継手の止端部形状を示すが, KS 87 を用いた系列の ρ およ

び θ が大きく, 止端部がなめらかであることがわかる。

4.3 溶接余盛止端部での応力集中測定結果

各鋼種について KS 87 および従来棒を用い, X 姿勢で溶接した継手に荷重をかけたときの余盛止端部近傍の実測ひずみから計算した応力集中係数の分布を Fig. 10 に示す。また, 余盛止端部における応力集中係数 α_{meas} を Table 5 に併記した。図, 表から明らかなように, KS 87 を用いて溶接した継手の応力集中係数はいずれも 1.7 以下であり, 従来棒を用いて溶接したものに比べて小さい。従

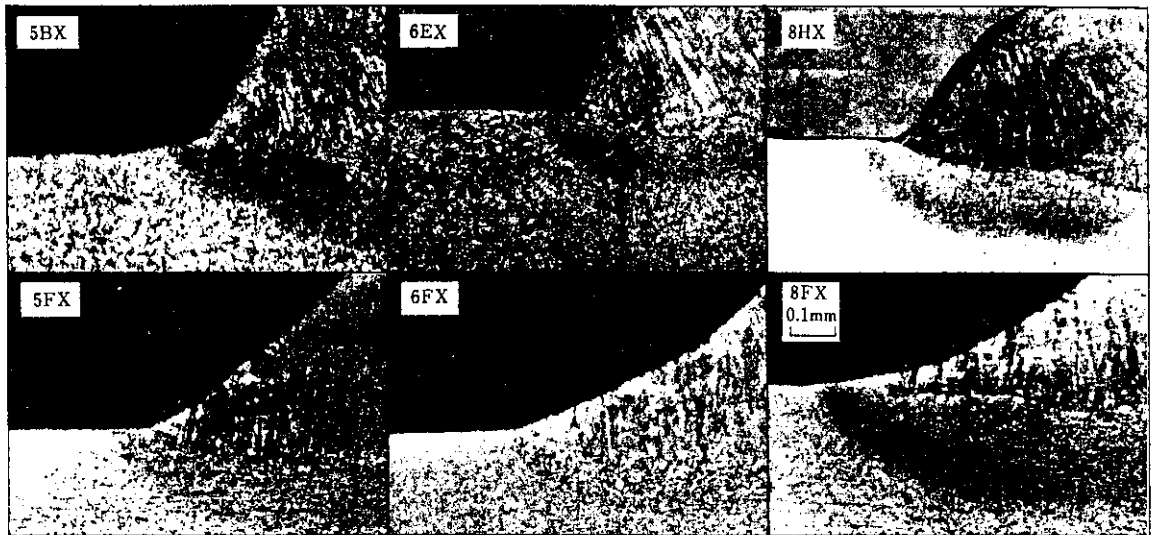


Photo. 4 Toe profiles for horizontal fillet welded joints of SM 50, RIVER ACE 60 and RIVER ACE K0 steels (original magnification : $\times 10$)

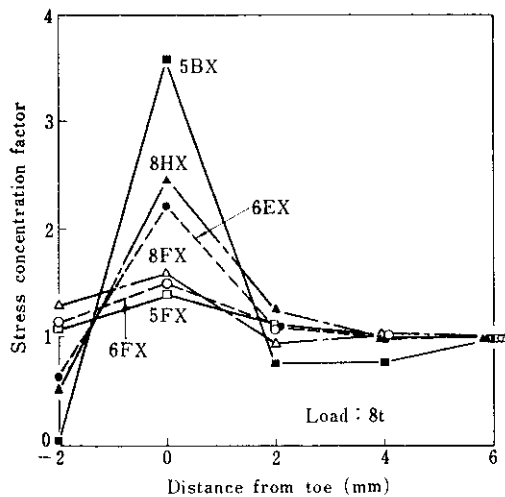


Fig. 10 Stress concentration near toe of horizontal fillet welded joints measured by strain gauge

来棒による α_{meas} は 2 ~ 4 の範囲にあり、高い応力集中を生じることがわかる。

4・4 硬さ試験結果

Fig. 11 に KS 87 と従来棒を用いた溶接部の硬さ測定結果を示す。KS 87 は 60kg/mm^2 の強度を有するため、溶接金属は 220 前後の硬さを示す。

また、KS 87 と従来棒のいずれの場合も RIVER ACE 60, RIVER ACE K0 の熱影響部にせまい軟化域がみられる。

4・5 溶接残留応力の測定結果

RIVER ACE 60 について、KS 87 と従来棒で溶接した試験片 6FX と 6EX の溶接金属付近の応力軸方向残留応力測定値を Fig. 12 に示す。KS 87 を用いた 6FX では最高 54kg/mm^2 の引張残留応力、そして従来棒の 6EX では試験片端部で最高 35kg/mm^2 の引張残留応力、中央部で 22kg/mm^2 の圧縮残留応力のあることがわかる。

5. 考 察

5・1 余盛止端部形状と疲れ強さの関係

KS 87 を用いたリブ十字すみ肉溶接継手の疲れ強さは、従来棒を用いた継手に比較して著しく改善されることが判明したが、これは余盛止端部形状がなめらかであり、したがって応力集中が小さくなったことによるものである。リブ十字すみ肉溶接継手の溶接止端部の応力集中係数 α は、 ρ 、 θ および脚長 h を用いた式で計算できる⁹⁾。

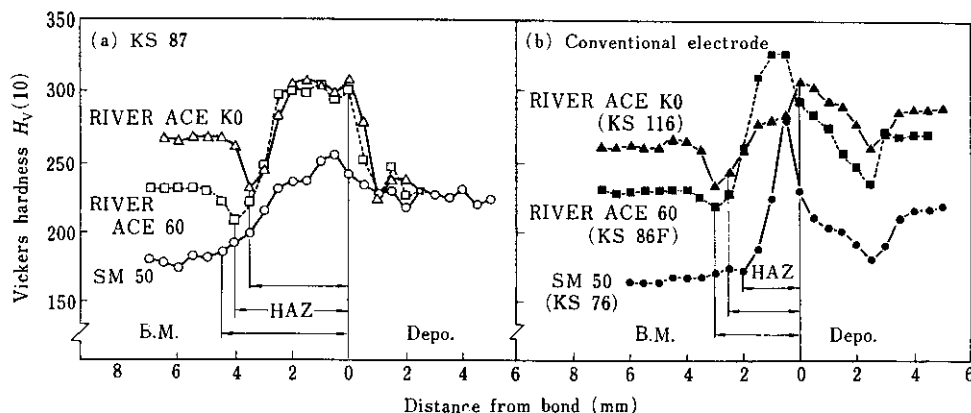


Fig. 11 Hardness distribution in horizontal fillet welded joints

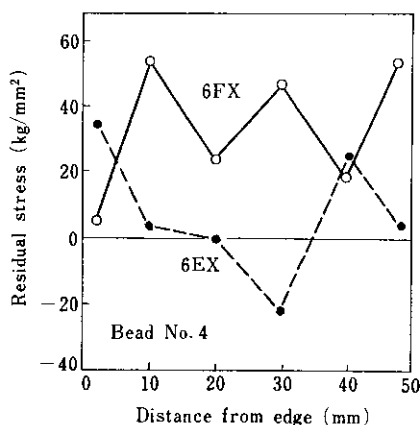
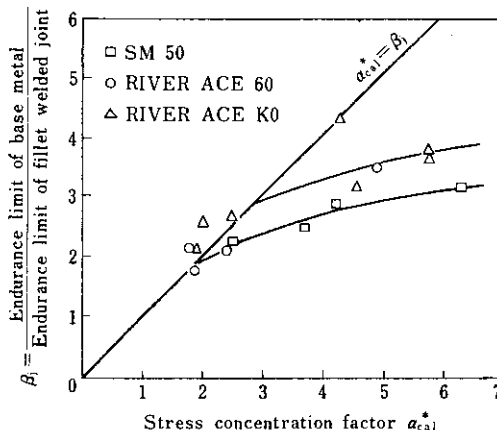


Fig. 12 Distribution of residual stress in longitudinal direction along specimen width

$$\alpha = 1 + \frac{1 - \exp\{-0.9\sqrt{B/h}(\pi - \theta)\}}{1 - \exp\{-0.9\sqrt{B/h} \cdot \pi/2\}} \times \left(\frac{1}{2.8(B/b) - 2} \cdot \frac{h}{\rho} \right)^{0.65} \dots\dots\dots (1)$$

(記号については Fig. 4 参照)

溶接止端部の応力集中の計算にあたっては、疲れ亀裂発生箇所の ρ および θ を使用すべきであるが、ここでは各試験片両側面の最小値の平均値 $\bar{\rho}_{\min}$, $\bar{\theta}_{\min}$ を用いることとし、得られた値を α_{cal}^* とした。 α_{cal}^* をゲージで求めた α_{meas} とあわせて Table 5 に示す。 α_{meas} が α_{cal}^* より小さいのは、ゲージ貼付をすみ肉止端中央部 1 箇所に限定したため測定誤差が大きくなったことや、ゲージが有限の大きさをもっているため局所的な応力集中求められないことなどによるものと考えられる。

Fig. 13 Relation between stress concentration factor and β_j of fillet welded joints for various steels

つぎに、溶接継手試験片を一種の切欠付試験片とみなし、切欠効果を継手に対する切欠係数 β_j (母材の疲れ限度/すみ肉継手の疲れ限度) を用いて検討する。 β_j の実験値を Table 5 に示す。Fig. 13 に α_{cal}^* と β_j の関係を示す。 β_j は、 α_{cal}^* が 2 程度までは $\alpha_{\text{cal}}^* = \beta_j$ の線上に存在しており、 α_{cal}^* の増大に伴い直線的に増加することが予想される。また、 α_{cal}^* が 3 以上になると β_j は α_{cal}^* より小さくなり、いずれの鋼材も α_{cal}^* の増加に伴う β_j の増加は緩やかとなり、 β_j の値が 3 程度で飽和状態となる。これは、 α_{cal}^* が材料の性質とは無関係に形状だけで定まるのに対し、 β_j は形状のほかに材料の性質が関係してくるためである。この傾向は通常の切欠試験片で得られる $\alpha \cong \beta$ の関係とまったく同様である。また、切欠に対する感受性を示すパラメーターとして切欠感度係数 $\eta = (\beta - 1) / (\alpha - 1)$ が用いられる。 $\beta = 1$ のときは $\eta = 0$ となって、

材料に切欠を付けても強度低下が起こらず、切欠に対してまったく鈍感である。 η が増加して1に近づくにつれて切欠に対する感受性が大きくなる。Fig. 14は α_{cal}^* と η ($=(\beta_j - 1)/(\alpha_{cal}^* - 1)$)の、Fig. 15は $\bar{\rho}_{min}$ と η の関係をそれぞれ各鋼種ごとに示す。図から明らかなように、 α_{cal}^* が大きくなると、 $\bar{\rho}_{min}$ が小さくなるほど η は小さくなることからわかる。この理由は、前述したように α_{cal}^* の大きい範囲においては、 β_j より α_{cal}^* が大きくなり、また、 $\bar{\rho}_{min}$ が小さいほど α_{cal}^* は大きくなることによる。また、引張強さの高い鋼材ほど η の大きいことがわかる。KS 87を用いた各鋼材の継手の α_{cal}^* は、いずれも1.8~2.6の範囲にある。これに対して従来棒を用いた継手、たとえば5BX, 6EX, 8HXはそれぞれ6.34, 4.95, 5.87となり、とくにRIVER ACE 60, RIVER ACE K0ではKS 87を用いた場合

に比べて2~3倍となっている。これらの結果からKS 87による継手の α_{cal}^* は、実測値の α_{meas} と同様に従来棒のそれに比べて明らかに小さい。このことが疲れ強さの著しい改善をもたらした原因になっている。Fig. 16は(1)式による ρ , θ と α の関係を等 α 線図で示したものであるが、図中には実測した $\bar{\rho}_{min}$, $\bar{\theta}_{min}$ も示してある。 ρ の小さい領域では α に対して θ より ρ の効果が大きいこと、そして ρ が大きい範囲では θ の効果が顕著になってくることがわかる。したがって、疲れ強さを向上させるためにはまず ρ の大きい止端部形状を得ることが最も効果的であろう。

5.2 溶接棒・溶接姿勢および硬さと疲れ強さの関係

リブ十字すみ肉溶接継手の疲れ強さを向上させるためには、余盛止端部形状をなめらかにすることにより応力集中を緩和することが必要である。一方、余盛止端部形状は主として溶接棒により左右されることが明らかである。すなわち、各種鋼材についてKS 87と従来棒を用いた継手の疲れ強さは、Table 4から明らかなように、疲れ限度で見ると、SM 50は41%、RIVER ACE 60およびRIVER ACE K0ではそれぞれ96, 75%と顕著な

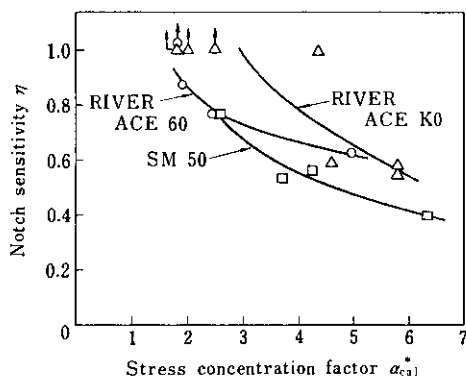


Fig. 14 Relation between stress concentration factor and notch sensitivity of fillet welded joints for various steels

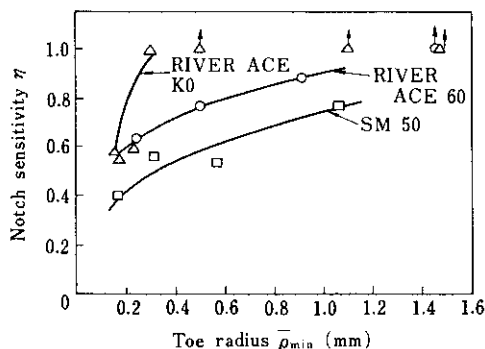


Fig. 15 Relation between toe radius and notch sensitivity of fillet welded joints for various steels

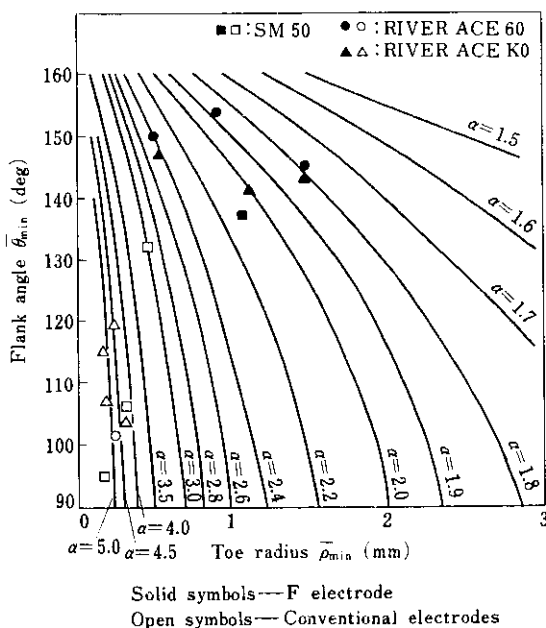


Fig. 16 Equi- α lines in the ρ - θ plane

向上がみられる。一方、溶接姿勢については、水平すみ肉継手（X 姿勢）に比べて下向すみ肉継手（Z 姿勢）の方が止端形状がなめらか（凹面）になり、疲れ強さがやや改善されるという報告^{10,11)}があるが、本実験では Table 5 にみられるように、従来棒を用いた継手の 8HX, 8HZ でこの傾向がある。また、5CX と 5CZ, 6EX と 6EZ, 8GX と 8GZ は、従来棒を用いて溶接姿勢を X 姿勢と Z 姿勢に変えた場合の結果であるが、いずれについても Z 姿勢の方が応力集中係数 α_{cal}^* が小さいことがわかる。5CZ, 6EZ, 8GZ は疲れ試験のデータはないが、Fig. 17 の関係から推測すると、Z 姿勢の疲れ強さは X 姿勢のそれに比べて若干高くなるものと思われる。しかしながら、KS 87 を用いた継手

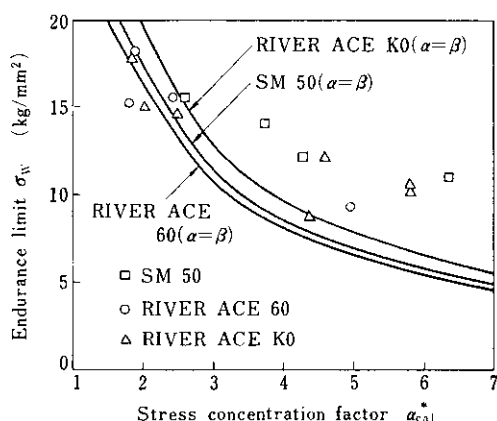


Fig. 17 Relation between stress concentration factor and endurance limits of fillet welded joints

6FX と 6FZ, 8FX と 8FZ では逆に Z 姿勢の疲れ限度が X 姿勢のそれより低い。このように疲れに対して最適な溶接姿勢は溶接棒によって異なる。しかし、いずれの溶接姿勢についても ρ, θ と疲れ限度の間にはよい相関があるので、溶接継手の疲れ強さの向上策は、それぞれの溶接棒についてよりなめらかな止端部形状を与える溶接姿勢の選択に帰着する。

一方、疲れ亀裂の発生部とみられる溶接余盛止端部付近の硬さについては、Fig. 11 から明らかに KS 87 を用いて X 姿勢で溶接した SM 50, RIVER ACE 60 および RIVER ACE K0 の継手のボンドから 0.5mm 離れる熱影響部での硬さは

それぞれ 250, 290 および 300 で、これらの疲れ限度は 15.5, 18.2, 17.8kg/mm² と硬さが増すほど疲れ強さも高くなっている。しかし、従来棒 (KS 76, KS 86F および KS 116) を用いて溶接した各鋼材の硬さが 281, 348 および 283 であるのに対し、これらの疲れ限度は 11.0, 9.3, 10.2kg/mm² と硬くなっても疲れ強さの向上はみられない。このように本実験の結果では、溶接部の硬さと疲れ強さの関連は認められなかった。

5.3 溶接残留応力の影響

疲れ強さに影響を与えと考えられる試験応力軸方向の残留応力値は試験片によってばらついており、KS 87 を用いた継手 6FX では最高 53 kg/mm²、そして従来棒を用いた 6EX では試験片幅中央で 21kg/mm² の圧縮残留応力、幅端部で最高 35kg/mm² の引張残留応力があった。一般に引張残留応力は疲れ強さを低下させる¹²⁾といわれているが、6FX が試験を行ったすべての継手の中で最も高い疲れ強さを示していることを考慮すると、残留応力がリブ十字すみ肉継手の疲れ強さに与える影響は、止端部の幾何学的形状の影響に比較してはるかに小さいと思われる。

6. ま と め

50, 60, 80kg/mm² 級高張力鋼のすみ肉溶接継手余盛止端部形状をなめらかにし疲れ強さを改善するため新たに開発された KS 87 と、従来から汎用されている突合せすみ肉溶接用の棒を用い、溶接姿勢を変えて作製したリブ十字すみ肉継手について疲れ試験を実施した。その結果つぎのことが明らかになった。

- (1) SM 50, RIVER ACE 60 および RIVER ACE K0 の従来棒によるすみ肉溶接継手（水平すみ肉等脚姿勢）の疲れ限度は、それぞれ 11.0, 9.3, 10.2kg/mm² である。これに対し、同一溶接姿勢で KS 87 を用いたすみ肉溶接継手の疲れ限度は、それぞれ 15.5, 18.2, 17.8kg/mm² であり、従来棒に比べてそれぞれ 41, 96, 75% の大幅な改善が認められた。
- (2) 溶接姿勢と疲れ強さの関係は溶接棒によって異なり、従来棒については下向すみ肉姿勢が水平

すみ肉姿勢等脚形状に比べて疲れ強さが高く、KS 87 については逆に水平すみ肉姿勢等脚形状が最も高い疲れ強さを示し、下向すみ肉と水平すみ肉姿勢下肉形状間にはほとんど差がみられなかった。

(3) いずれの鋼種についても、KS 87 を用いて作製した溶接余盛止端半径 $\bar{\rho}_{\min}$ は 0.50~1.47mm、余盛角度 $\bar{\theta}_{\min}$ は 138~153° で、従来棒による場合に比べ平均値でみると $\bar{\rho}_{\min}$ で約 3 倍、 $\bar{\theta}_{\min}$ で 20~43° 大きい。

(4) KS 87 を用いることによる疲れ強さの改善は、溶接余盛止端部の幾何学的形状がなめらかになり、応力集中係数 α_{cal}^* が従来棒では 3~6 であるのに対して 2.5 以下に低下したことに起因する。

おわりに、本研究に関して有益なる御討論をいただいた溶接学会溶接疲労強度研究委員会の白石隆義委員長、太田省三郎副委員長、飯田国広幹事はじめ各委員のかたがたに感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) W. W. Sanders, A. T. Derecho and W. H. Munse : Weld. J., 44(1965) 2, 49-S
- 2) 高橋賢司, 伊藤昭典 : 溶接学会誌, 40 (1971) 8, 723
- 3) 川崎正, 沢木洋三, 八木孝一郎 : 溶接学会誌, 37 (1968) 12, 1353
- 4) 村木潤一郎, 石黒隆義, 半沢貢, 横田彦二郎 : 溶接学会誌, 37 (1968) 11, 1203
- 5) 金沢正午, 石黒隆義, 半沢貢, 横田彦二郎 : 溶接学会溶接疲労強度研究委員会資料, FS-348-74, (1974)
- 6) 池田一夫, 出納新平, 五代友和, 小川恒司 : 溶接学会誌, 44 (1975) 2, 128
- 7) 石黒隆義, 高島弘教, 半沢貢, 横田彦二郎, 谷垣尚, 端田康彦 : 溶接学会全国大会講演概要集 第18集, (1976), 280
- 8) E. Sebel, M. Pfender : Arch. Eisenhüttenw., 7 (1934), 407
- 9) 西田正孝 : 応力集中, (1971), [森北出版]
- 10) 太田省三郎, 江口保平, 出口誠一, 小田正義 : 鉄道技研資料, (1971) 6
- 11) 土木学会本四連絡橋鋼上部構造研究小委員会疲労分科会 : 本四連絡橋上部構造に関する調査研究報告 別冊 3 高張力鋼溶接継手の疲労強度, (1972)
- 12) 日本材料学会編 : 金属の疲労 (1964) 223, [丸善]