
スタッドジベル溶接部の性質と疲労強度について

A Study on Mechanical Properties and Fatigue strength of Stud Weld Zone

前田 幸雄(Yukio Maeda) 梶尾 靖治(Yasuharu Kajikawa) 石渡 正夫(Masao Isiwata)

要旨：

スタッド溶接は合成桁において、コンクリート床版と鋼桁との接合材として効率的、経済的な方法として多用されているが、スタッドと鋼桁との溶接部の研究は十分でなく、設計施工上多くの問題点が残されている。本研究ではスタッド溶接部の諸性質、とくに溶接部の硬度上昇、ブローホールなどの内部欠陥と曲げ、せん断強度など力学的性質との内線を調べた。また連続合成桁を対象とした、鋼板に引張応力、スタッドにせん断応力が同位相で作用するときの疲労試験を行なった。この研究により、スタッドジベルの設計施工上有用なる資料が得られた。この結果は建設省道路局「アークスタッド溶接施工指針」に採用された。

Synopsis：

In the recent civil construction projects, especially those for bridges, studwelding technique has a very wide application as shear connector of concrete slab and steel girder because of its effective and economical feature. Nevertheless, there is a considerable room left unstudied on the weld zone consisting of stud and steel girder, with many problems on designing and execution calling for complete solution. In this study on stud-weld zone, emphasis was placed on various mechanical properties including such internal defects as hardness increase and blowholes, their relations with bending moment and shearing strength. Also, fatigue tests were conducted in such a way that both tension and shearing stresses were applied simultaneously onto the testpieces of steel plates intended for a continuous composite girder. This study was instrumental in obtaining valuable data on the designing and execution of stud connector, and the result of the study was adopted by the Road Bureau of the Construction Ministry as "Specifications for Arc Stud-welding". The study also received a 1969 governmental subsidy for the construction technique research.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

スタッドジベル溶接部の性質と疲労強度について

A Study on Mechanical Properties and Fatigue strength of Stud Weld Zone

前 田 幸 雄*

Yukio Maeda

梶 川 靖 治**

Yasuharu Kajikawa

石 渡 正 夫***

Masao Isiwata

Synopsis :

In the recent civil construction projects, especially those for bridges, stud welding technique has a very wide application as shear connector of concrete slab and steel girder because of its effective and economical feature.

Nevertheless, there is a considerable room left unstudied on the weld zone consisting of stud and steel girder, with many problems on designing and execution calling for complete solution.

In this study on stud-weld zone, emphasis was placed on various mechanical properties including such internal defects as hardness increase and blowholes, their relations with bending moment and shearing strength. Also, fatigue tests were conducted in such a way that both tension and shearing stresses were applied simultaneously onto the testpieces of steel plates intended for a continuous composite girder.

This study was instrumental in obtaining valuable data on the designing and execution of stud connector, and the result of the study was adopted by the Road Bureau of the Construction Ministry as "Specifications for Arc Stud-welding". The study also received a 1969 governmental subsidy for the construction technique research.

1. ま え が き

わが国でスタッドジベル（以下スタッド）が合成桁のずれ止めとして使用されるようになったのは昭和36年頃であり、その後昭和40年に制定された「鋼道路橋の合成桁設計施工指針」にスタッドの使用が認められ、スタッドは剛ジベルに代わって広範囲に使用されるようになった。

スタッド溶接は溶接歪が少ない、施工能率がよ

い、応力伝達が円滑であるなどの特長を有し、橋梁での年間使用量は1,000万本以上であると見られている。

スタッド溶接は作業が比較的容易であることから、一部には安易に施工されている面もあり、スタッド溶接部の性質の研究が十分ではなかった。一方、スタッドの疲労強度については今までかなりの研究があるが、連続合成桁支点上に着目したスタッド付鋼板の疲労強度に関する研究はなお不十分であり、設計上の問題点であった。

* 大阪大学工学部土木工学科教授・工学博士

*** 本社建材開発部土木開発室長

** 大阪大学工学部土木工学科助手

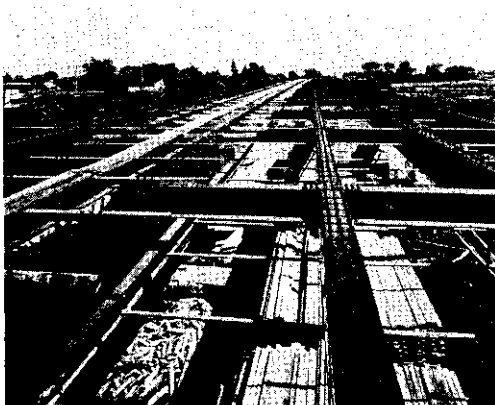


Photo. 1 Composite girder using studs

本研究では、スタッド溶接部の性質試験並びに鋼板には引張応力スタッドにはせん断応力を同位相で作用させる特殊な疲労試験装置を用いて、実際の組合せ応力状態における鋼板の疲労強度を求めた結果について報告する。なおスタッド溶接部の性質試験は、昭和44年度建設技術研究補助金の交付を受けて研究を行ない、一部はスタッド溶接施工指針¹⁾に生かされている。

2. スタッド溶接部の性質

スタッド溶接は、ほとんど自動的に能率よく施

工されるが、反面、他の溶接に比べると溶接部に内部欠陥が多く、また局部的に硬度が高いので、ワレ、スタッド剥離が生ずることが多く、品質管理上究明すべき点が残されている。スタッド溶接の性質に関連する要因は次のとおりである。

(1) スタッド材質、付属品

スタッドの径、長さ、成分、加工法（冷間熱間）、形状（丸棒、異形）、スタッド先端加工、付属品の成分形状

(2) 母材

鋼種、板厚、予熱温度

(3) 溶接機使用条件

電流、電圧、溶植時間、アーク距離、押込み量、溶接機型式、溶接姿勢、電源、二次電線の長さ

(4) 施工条件

天候（気温、湿度、風、湿度）、溶接位置（縁端距離、アースよりの距離）、溶接面の仕上、技能者

これら多くの要因の中で、ここでは特に問題となるスタッド材質、母材の鋼種および板厚に注目し、内部欠陥、硬度との関係を明らかにするため実験を行なった。

Table 1 Requirements for stud material

Welding method	Material	Chemical composition (wt %)					Mechanical properties					
		C	Mn	Si	P	S	T. S. (kg/mm ²)	Y. P. (kg/mm ²)	E. l. (%)	Speci- men	Bend angle	Radius of bend
Cyc-arc method Phillips method (marketing use)	YOS41	0.16 }	0.60 }	0.15 }	≤0.035	≤0.040	41 } 52	>24	≥20	No. 2	180°	1.5D
AASHO ⁽³⁾ AWS ⁽⁴⁾	ASTM A108- 1010, 1015, 1017 1020 Killed or semi-killed						≥42.1		≥20 (2in)			
Gregory Co. (U. S. A.)	ASTM A108 -61T	0.13	0.30 }		≤0.040	≤0.050	≥45.7	≥35.2	≥20			
	Grade 1015	0.18	0.60									
	ASTM A108 -61T	0.18	0.30 }		≤0.040	≤0.050	≥45.7	≥35.2	≥20			
Crompton Co. (England)	Grade 1020	0.23	0.60									
		0.11	0.45	0.05 }	≤0.050	≤0.050	≥50.3	≥39.3				
		0.17	0.65	0.30								
Spec. for stud weldng ⁽¹⁾ (Japan Constru- tion Ministry)		≤0.2	0.50 } 0.90		≤0.040	≤0.040	41 } 52	≥24	≥20	No. 4		

Table 2 Classification of stud materials

Stud No.	Phillips	Cyc-arc	Material	Class *	Chemical composition (wt%)						Mechanical properties	
					Analysis number	C	Si	Mn	P	S	Y. P. (kg/mm ²)	T. S. (kg/mm ²)
A	PA	NA	SS 41	M Killed	5	0.13	0.20	0.50	0.016	0.022	32	45
B	PB	NB	S 25C	H Killed	5	0.29	0.26	0.55	0.016	0.011	34	54
C	PC	NC	Cold finished bar (a)	H Rimed	4	0.26	—	0.45	0.009	0.033	29	43
D	PD	ND	" (b)	M Rimed	5	0.19	—	0.46	0.010	0.048	28	41
E	PE	NE	SR-24	M Killed	5	0.17	0.24	0.39	0.011	0.040	32	47
F	PF	NF	"	L Killed	5	0.11	0.12	0.36	0.023	0.045	30	41
H	PH	NH	"	L Killed	4	0.11	0.21	0.48	0.019	0.031	31	42
J	PJ	NJ	"	M Killed	5	0.20	0.19	0.76	0.031	0.031	36	53
K	PK	NK	Cold finished bar (c)	M Rimed	5	0.23	—	0.50	0.012	0.025		57
L	PL	—	" (d)	M Rimed	3	0.18	—	0.75	0.009	0.030	22	42
M	—	NM	" (e)	M Rimed	2	0.14	—	0.72	0.009	0.028	26	47

* Class L: ~0.12%C M: 0.12~0.25%C H: ~0.25%C

2.1 スタッド材質試験

2.1.1 試験概要

スタッドの先端部は溶融結合されるため、溶接棒と同じ性能が要求される。Table 1 にスタッド材質の各規定を参考に示す。この試験はスタッド材質と内部欠陥との関係を明らかにし、材質を規定することを目的とした。

試験に用いたスタッド材はCの高低、脱酸元素(Mn, Si)の有無, P, Sの高低を目標に一般に市販

されている棒鋼を入手し、化学分析を行なってTable 2 のように類別した。スタッドの形状をFig. 1 に示す。スタッド軸部には真円度を出すため軽度のスキンパス加工が行なわれているが、K材のみはφ25mm からφ22mm に冷間引抜加工を行なっている。サイクアーク方式では先端をとがらせ溶剤処理を行なっているが、フィリップス方式では軸に直角な平滑面に切断し、そのまま使用している。

サイクアーク²⁾、フィリップス³⁾ 両方式のスタッド溶接はスタッド側と母材側とを両極とし、大電流(1,500~2,000A)を短時間(1.0sec 前後)流し、溶融状態のスタッドを母材に圧着する方法である。なおスタッド先端の付属品(フェールル、カートリッジ)は外気を遮断するとともに溶接時溶融鋼中に溶融し、脱酸精練する役割も持っている。Fig. 2 にスタッド溶接の順序を示す。

母材は厚さ 25mm の SM50A (2.2 と同材料)を用いた。溶接条件は両方式とも現在までの経験により得られている最適条件 (Table 3) により施工した。試験片は各材質とも 5 片とし、母材厚 5mm, スタッド 5~7mm に削成し、X線透過試験により 0.25mm までの内部欠陥を検出した。

さらに各試験片は欠陥の集中している部分を切断

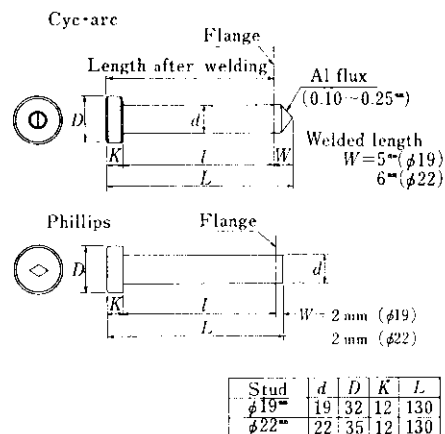
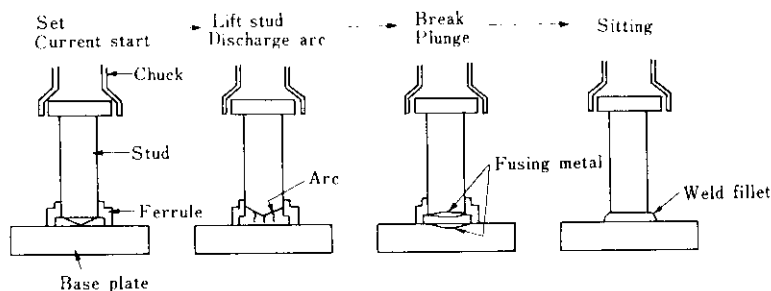


Fig. 1 Dimensions of stud

Cyc-arc welding method



Phillips welding method

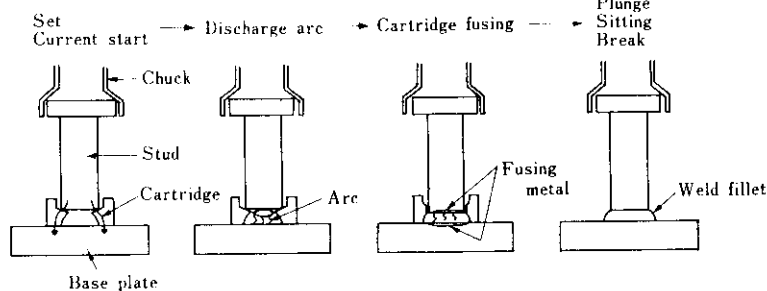


Fig. 2 Procedure of stud welding

Table 3 Stud welding system and welding condition

Welding system	Cyc-arc	Phillips
Power source	FRANK-200 (2 sets)	YD-1400L(1 set)
Control	NC-21	YS-221C
Stud welding gun	NS-101	YS 221G
Arc shield	Ferrule TA-7/8 Type	Cartridge YN 22F1
Current	DC 1900±100A	DC 1500±100A
Time	46~50/50sec	58~59/50sec

しマクロ断面検査を行ない、その断面の硬度分布を調べた。

2-1-2 試験結果と考察

各材質と溶接欠陥率との関係を Table 4 に示す。内部欠陥率は Table 5 にしたがって内部欠陥の総和を求め、全断面積との比で表わした。

溶接欠陥は Fig. 3, Photo. 2 に示すように両方式で異なった形状を示している。サイクアーク方式では、溶着金属とスタッドまたは母材の境界部に不溶着やブローホールが認められる。フィリップス方式では、溶着金属上方にブローホール、および中央部に収縮孔のような欠陥が認められる。

スタッドジベル材質と溶接欠陥率の関係は、C含有量の高い材質ほど溶接欠陥率が高い傾向を示している。キルド鋼でC含有量の大きい(B), 中(E), 小(H)と溶接欠陥率との関係は分散分析の結果、サイクアーク方式1%, フィリップス方式5%の

危険率で有意であった。

また、P、Sに関しては溶接欠陥率との明らかな関係が見出されなかった。キルド鋼とリムド鋼にも有意差は見られなかった。

C含有量の大(B), 中(E), 小(H)について高硬度を、スタッド HAZ-Bond-Depo-Bond-母材 HAZ で調べたが、この程度のC含有量では硬度に明らかな差が認められなかった。

Table 4 Relation between stud material and internal defect rate

Stud No.	Internal defect rate*1													
	Phillips							Cyc-arc						
	1	2	3	4	5	Mean	Dispersion	1	2	3	4	5	Mean	Dispersion
A	0.9	0.9	2.6	6.6	2.9	2.8	5.7	0.5	0	6.6	6.0	0	2.6	6.6
B	3.9	12.9	4.7	1.6	7.4	6.1	11.3	---	15.7	13.6	19.4	6.9	13.9	12.5
C	0	0.9	2.4	0.9	3.2	1.5	3.2	3.7	2.6	7.1	4.5	5.5	4.7	4.5
D	1.6	0	6.6	0	3.9	2.4	3.9	6.6	5.5	4.7	1.8	2.6	2.3	4.8
E	1.6	1.6	0	0.3	4.7	1.6	4.7	2.9	2.4	1.1	2.4	2.6	2.3	1.8
F	0	0.9	1.6	3.9	0.9	1.5	3.9	0.9	0.5	3.6	1.4	0.8	1.4	2.9
H	0.9	0	0.9	0	0.9	0.5	0.9	0.3	2.4	1.9	1.8	1.9	1.7	2.1
J	3.9	0.5	0	0.3	0.9	1.3	3.9	1.6	1.6	3.4	2.2	2.2	2.2	1.8
K	3.2	3.2	0	6.6	2.4	3.1	6.6	5.5	1.8	1.6	5.8	11.0	5.1	9.4
L	0	6.6	0	4.7	1.6	2.6	6.6							
M								0.3	2.9	1.4	1.6	0	1.2	2.9

* 1. Internal defect rate = $\frac{\text{Total of internal defect coefficient}}{\text{Sectional area of a stud}} \times 100\%$

2. Dispersion = maximum value - minimum value

Table 5 Classification of internal defect

Diameter of internal defect (mm)	Coefficient
0.5	0
0.5~1.0	1
1.1~2.0	3
2.1~3.0	6
3.1~4.0	12
4.1~6.0	25
6.1~8.0	49
8.1	100

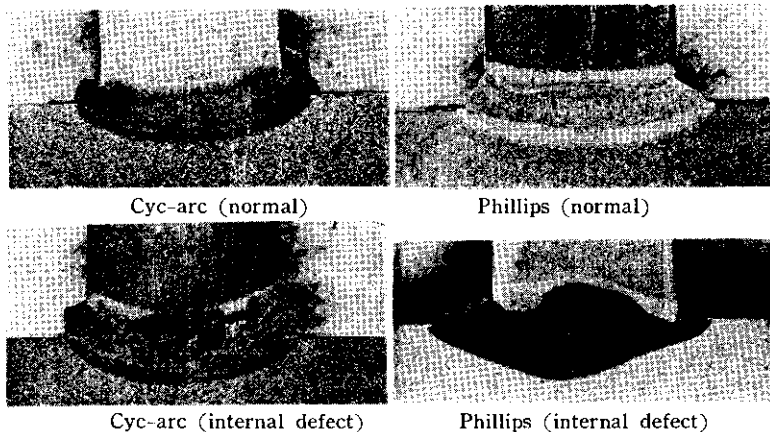


Photo. 2 Example of stud macro section, normal and having internal defects

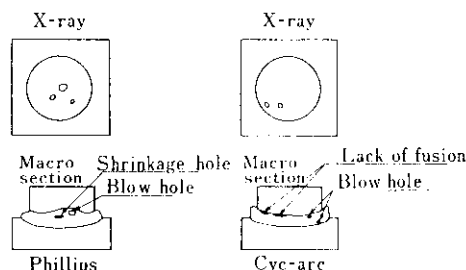


Fig. 3 Distribution of typical internal defect

これらの結果より指針¹⁾ではスタッド材質はキルド鋼を使用し、C含有量は0.20以下 Mn含有量は0.5~0.9と規定した。

2.2 各種鋼板に対するスタッド溶接

2.2.1 試験概要

各種鋼板に対するスタッド溶接の適用性を調べ

るため、サイクアーク方式、フィリップス方式について母材曲げ、スタッド曲げ、スタッドせん断、硬さの各試験を行なった。供試材の化学成分、機械的性質、スタッドの化学成分を Table 6、

Table 7 に示す。また試験項目を Table 8 に、母材曲げ試験方法を Fig. 4 に、スタッド曲げ方法を Fig. 5 に、スタッドせん断試験方法を Fig. 6 に示す。

Table 6 Mechanical properties and chemical composition of plates

Material	Plate thickness (mm)	Mechanical properties			
		Yield point (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation	Bend
S S 41 T	12	26	44	38	Good
S S 41 B	12	27	45	38	"
S M 50 A	12	38	56	24	"
S M 50 A	25	32	50	28	"
S M 50 B	38	33	55	28	"
S M 50 Y B	25	40	60	25	"
RIVER TEN 50 A	25	38	58	27	"
S M 58	25	54	63	31	"

Material	Analysis	Chemical composition												Ceq (%)
		C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Nb	Al	
S S 41 T	Ladle													
	Check	0.25	0.004	0.48	0.008	0.026							0.001	0.33
S S 41 B	Ladle													
	Check	0.23	0.003	0.49	0.013	0.022							0.001	0.31
S M 50 A (12mm)	Ladle	0.16	0.39	1.35	0.016	0.019								
	Check	0.17	0.37	1.32	0.013	0.017	0.04						0.024	0.41
S M 50 A (25mm)	Ladle	0.13	0.38	1.31	0.020	0.015							0.015	
	Check	0.15	0.41	1.29	0.023	0.014							0.020	0.38
S M 50 B	Ladle	0.16	0.39	1.35	0.016	0.019								
	Check	0.20	0.36	1.42	0.017	0.019	0.05						0.021	0.45
S M 50 Y B	Ladle	0.18	0.04	1.24	0.009	0.021								
	Check	0.21	0.032	1.30	0.010	0.021	0.07					0.015	0.002	0.43
RIVER TEN 50 A	Ladle	0.12	0.36	0.87	0.014	0.014	0.28	0.14	0.41			0.016		
	Check	0.15	0.33	0.88	0.017	0.014	0.28	0.14	0.46	0.018	0.002	0.015	0.022	0.40
S M 58	Ladle	0.12	0.35	1.18	0.015	0.013		0.48	0.04	0.092	0.037			
	Check	0.13	0.33	1.22	0.014	0.012	0.08	0.47	0.04	0.088	0.037	0.013	0.032	0.37

$$\text{Ceq \%} = \text{C} + \frac{\text{Mn}}{6} + \frac{\text{Si}}{24} + \frac{\text{Ni}}{40} + \frac{\text{Cr}}{5} + \frac{\text{Mo}}{4} + \frac{\text{V}}{14} (\%)$$

Table 7 Chemical composition of stud material

Welding method	Analysis	Chemical composition							
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Al	Ceq
Cyc-arc	Ladle Check	0.15	0.008	0.71	0.012	0.002	0.04	0.001	0.269
Phillips	Ladle Check	0.22	0.004	0.75	0.017	0.027	0.04	0.002	0.345

Table 8 Test items and number of specimens

Material	Temp	S S 41 T	S S 41 B	S M 50 A (12mm)	S M 50 A (25mm)	S M 50 B	S M 50 YB	RIVER TEN50A	S M 58	
		20°C	20°C	20°C	20°C	20°C	20°C	20°C	20°C	100°C Preheat
Plate bending test		3	3	6	6	6	6	6	6	6
Stud bending test		6	6	6	6	6	6	6	6	6
Stud shearing test		5	5	6	6	6	6	6	6	6
Hardness test		3	3	3	3	3	3	3	3	3
Macro test		5	5	5	5	5	5	5	5	5

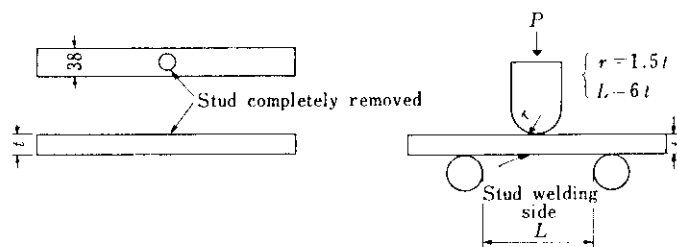


Fig. 4 Plate bending test

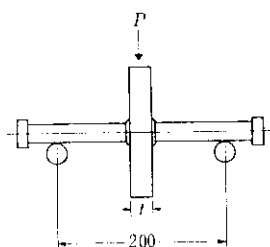


Fig. 5 Stud bending test

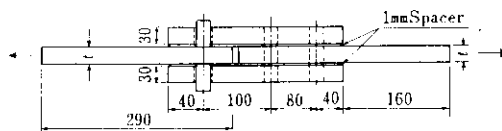


Fig. 6 Stud shearing test

2.2.2 試験結果と考察

(1) 母材曲げ試験

スタッドを除去した母材曲げ試験結果を Fig. 7(a), Photo. 3(a), (b) に示す。試験片は曲げ角度

60°で半数以上のものに幅 20mm 以上のワレが発生し、曲げ角度 180° まで達したものはわずかであった。サイクアーク方式はフィリップス方式に比して曲げ角度は大きい傾向を示している。これはあとに述べる溶接部の硬度分布の差によるものと考えられる。SM58 で 100°C 予熱を行なったものと比較したが、その効果は明らかでなかった。

WES 溶接構造用高張力鋼板ビード曲げ試験において板厚 25mm で SM50YA は 55°, SM58 級で 45° の曲げ角度を規定しているが、スタッドジ

ベル溶接ではこれ以上の値を示しているので実用上は問題ないと考えられる。

(2) スタッド曲げ試験

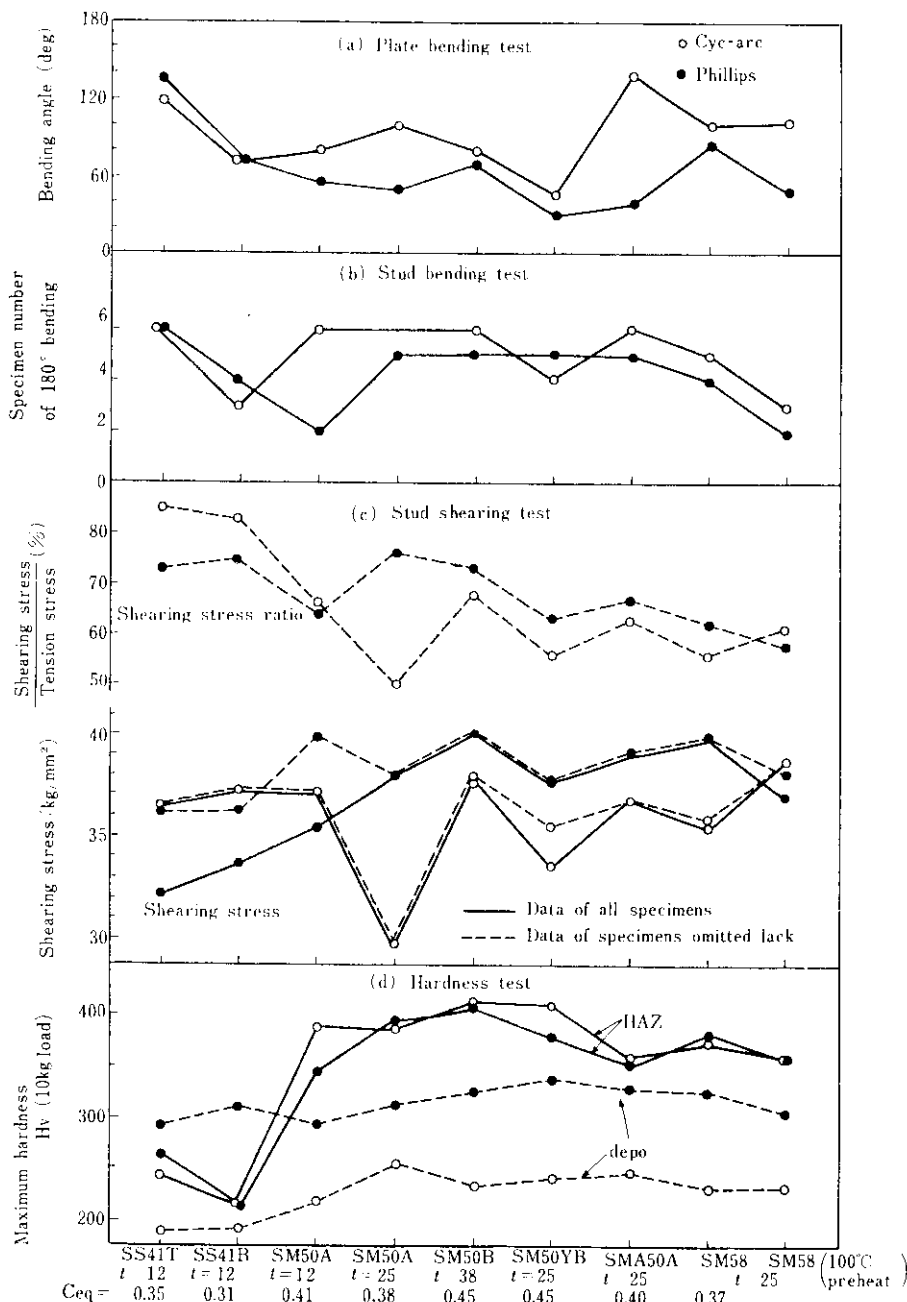


Fig. 7 Effects of stud welding for various plates



Photo. 3 (a) Plate bending test

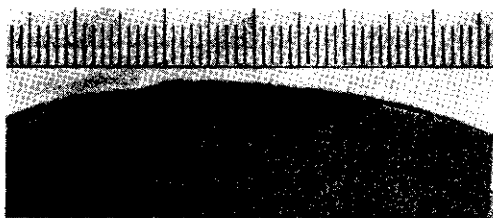


Photo. 3 (b) Crack in plate bending test

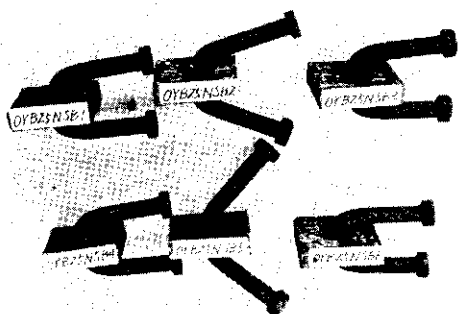


Photo. 4 Stud bending test

スタッド曲げ試験結果を Fig. 7 (b) 試験後の状況を Photo. 4 に示す。スタッド曲げ試験では、大部分の試験片が曲げ角度 90° (母材とスタッドの角度 45°) まで可能であり、 180° 曲げでワレの発生した試験片はいずれも余盛部とジベル境界部にワレが発生している。サイクアーク方式の方がやや曲げ角度は大きい。AWS⁽⁴⁾、AASHO⁽⁵⁾ では試験打で 45° 、溶接後の検査で 15° ハンマーで曲げることを規定しているが、この試験結果はこれを十分満足している。

(3) スタッドせん断試験

試験結果を Fig. 7 (c) に示す。スタッドのせん断破壊はスタッド側 HAZ、Bond 部または Depo

部で起こり、アンダーカットのある試験片を除くと大部分はせん断強度 $35 \sim 40 \text{ kg/mm}^2$ を示している。試験の状況を Photo. 5 荷重と変位関係の一例を Fig. 8 に示す。

両方式とも破断面にはかなりの内部欠陥がみられる (Photo. 6)。せん断応力と内部欠陥径の平方和との関係を Fig. 9 に示す。両方式とも、内部欠陥径の平方和が大となるにしたがって、強度低下の傾向がみられるが、スタッドジベルの許容せん断応力 8 kg/mm^2 ⁽⁵⁾ に対して、4 倍以上の安全性を有している。以上より内部欠陥は、静的強度にはほとんど影響がないことがわかったが、疲労強度との関係についての検討が必要である。

(4) 硬さ試験

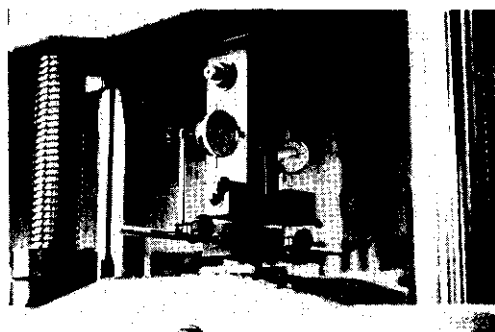


Photo. 5 Stud shearing test

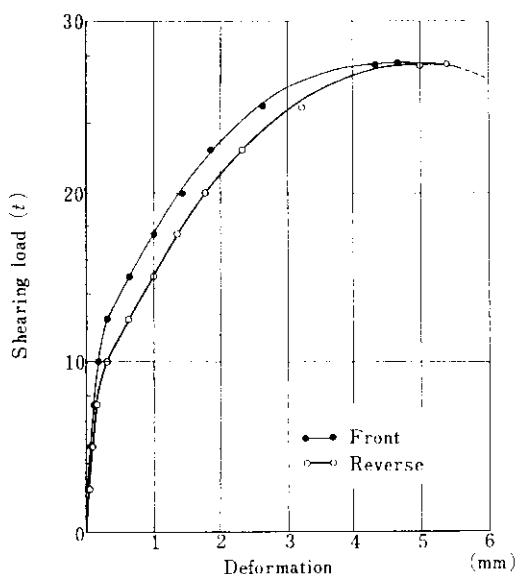
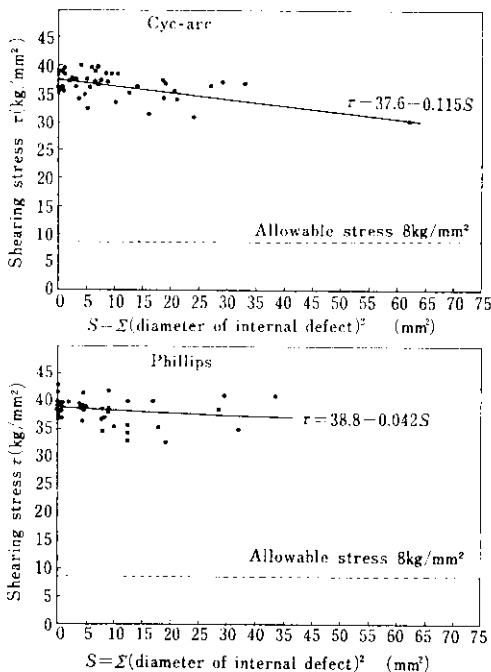


Fig. 8 Relation between shearing load and deformation (A example of Cyc-arc)

硬度試験結果を Fig. 7 (d), 硬さ分布の一例を Fig.10(a), (b) に示す。両方式の硬さ分布は特長がありサイクアーク方式では熱影響部で高く Depo 部は低いが、フィリップス方式では Depo 部の硬さも高く台形分布をなしている。



Photo. 6 Shearing surface (internal defect)



母材熱影響部の最高硬さと Ceq との関係を Fig. 11 に示す。熱影響部の最高硬さは、普通の手溶接による値に対して、およそ Hv(10) で 60 高い傾向にある。

これはスタッド溶接時の冷却速度と C. C. T 曲線との関係で説明できる。すなわち Fig. 12 は

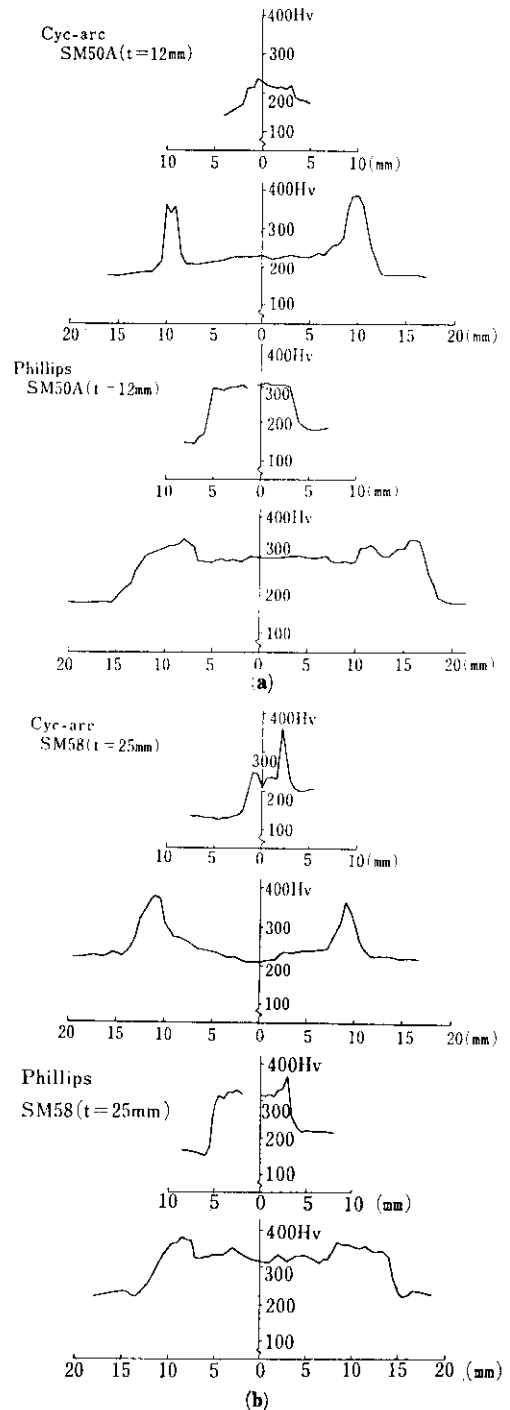


Fig. 10 Distribution of hardness

各種板厚の鋼板にスタッド溶接したときの冷却速度の測定結果であり、図中に SM50A (板厚25 mm) の C. C. T. 曲線を併記してある。これよりスタッド溶接は大入熱を短時間に与えるため、冷

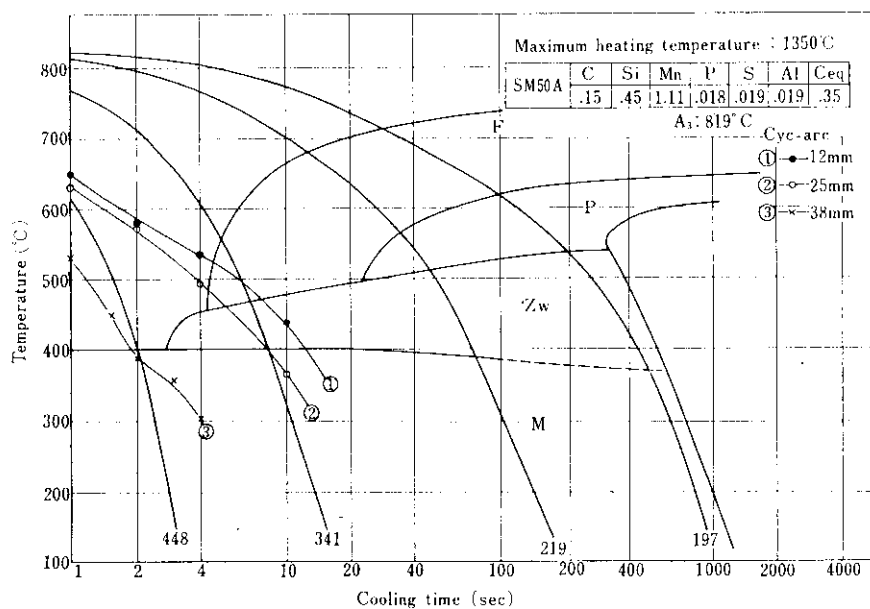


Fig. 12 Relation between C.C.T. curve and cooling curve of stud welding

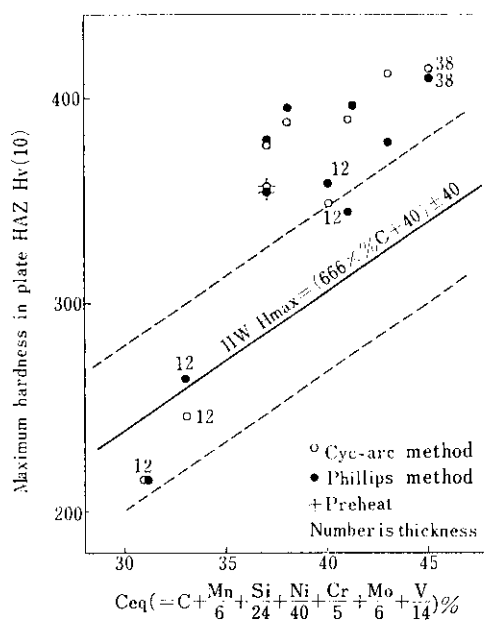


Fig. 11 Relation between maximum hardness and Ceq

母材熱影響部の最高硬さと母材板厚との関係を Fig. 13 に示す。板厚の増加とともに冷却速度が早くなり、最高硬度が上昇している。

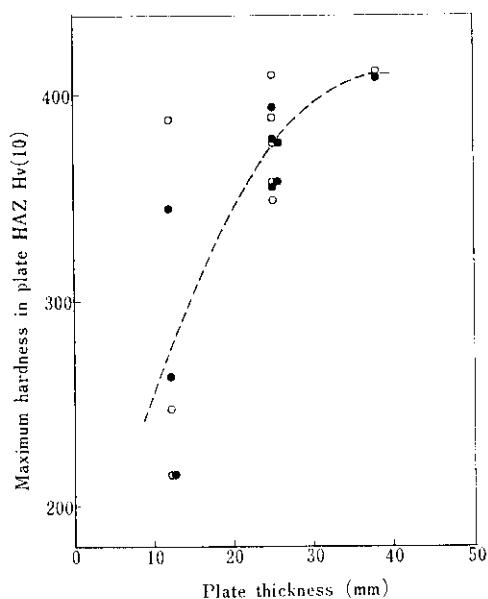


Fig. 13 Relation between maximum hardness and plate thickness

冷却速度が早くなって硬度が高くなっていることがわかる。

2.3 ま と め

スタッド材質による溶接部の性質, および SS41~SM58 の鋼板に対する溶接部の性質を, サイクアーク方式, フィリップス方式について調べたが, 次のことがいえる。

- (1) C含有量の多いスタッドほど溶接内部欠陥を生じ易く, C=0.29% のスタッドではスタッド全面積の15%を占めることもある。
- (2) C含有量0.11~0.29%程度のスタッドでは, スタッド熱影響部や溶接部の硬度に明らかな差がでることはない。
- (3) スタッド溶接された母材曲げ試験結果は, 母材の曲げ特性に比べて悪くなるが WES のビード曲げ規格に対して問題ない。
- (4) スタッド曲げ試験ではほとんどのスタッドが曲げ角度 90° まで曲げ可能であった。
- (5) 溶接部のせん断破壊強さは, スタッド素材のせん断強さと同等の値を示すが, 破断面にはかなりのブローホールなどの欠陥がみられる。欠陥が極端に多くなると, せん断強さが低下する傾向がみられるが, 許容せん断応力に比して十分な安全性を有している。したがって溶接内部欠陥によるスタッド溶接部のせん断強さは静力学的には問題ないといえる。
- (6) 母材溶接部の硬さ分布は, サイクアーク方式によるものは熱影響部で高く, 溶着部で低いが, フィリップス方式では溶着部の硬さが高く台形分布をしている。熱影響部の硬さは鋼材の炭素当量, 板厚により左右され, 手溶接による値より Hv (10) で60高い値を示しているが, 母材曲げ, スタッド曲げ試験結果からも, この程

度であれば問題ないといえる。

3. スタッドジベル付鋼板の疲労強度

3.1 試験概要

けた全長にわたりずれ止めを配置する形式の連続合成げたを対象として, その負モーメント域における, ずれ止め(主としてスタッドジベル)の取り付けられた鋼げた上フランジの引張疲労強度に関する問題について, これまでに2種類の疲労実験が行われてきた。一つは鋼板に1本または数本のスタッドジベルを溶植したものを試験片として用いる鋼板疲労試験^{57~8)}であり, もう一つは模型合成げたに負の繰返し曲げモーメントを与えるけた疲労試験^{4,5)}による方法である。しかし, 両試験方法ともスタッドジベルの溶植されたフランジの疲労強度に関するS-N曲線を得るにはそれぞれ欠点がある。まず, これまでに行なわれたいずれの鋼板疲労試験においても, スタッドにずれ止めとしてのせん断力を与えることなく, 鋼板の疲労強度が求められており, 実際とは異なった状態のもとにおけるものであること。次に, けた試験においては, 引張フランジに生ずる曲げ応力とスタッドジベルに作用するせん断応力との組合せを自由に变化させることができないので, ある一定スタッドせん断応力レベルのもとにおけるS-N曲線を得ることがむずかしいことなどである。

そこで, 著者らは二つの実験における上記のような欠点を改良し, スタッドジベル付鋼板の疲労強度に関するより実際的なS-N曲線を得るため

Table 9 Chemical composition and mechanical properties of base materials

Material	Chemical composition (wt. %)						Mechanical properties		
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Yield point (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation (%)
SS41	0.17	0.04	0.77	0.009	0.031	—	30	45	32
SM50A	0.14	0.45	1.32	0.018	0.014	—	38	54	28
SM58Q	0.14	0.36	1.21	0.019	0.012	0.03	63	66	26
Stud	0.17	0.01	0.19	0.011	0.033	—	28	43	30

に、新たな試験方法を考案した。すなわち、スタッド付鋼板試験片を用い、鋼板に作用する繰返し垂直応力と同位相で、スタッドジベルにも繰返しせん断応力を作用させ得るような特別な試験装置を製作し、いわゆる組合せ応力状態のもとにおける鋼板の疲労強度を求めようとした。さらに、このほか、静的および疲労実験を3種の試験片（母材、スタッド溶植後除去材およびスタッド溶植材）について行ない、鋼板の静的または疲労強度に及ぼす、スタッド溶接およびスタッドに余盛部における幾何学的形状の急変の影響を調べようとした。

3.2 試験片および試験方法

3.2.1 材 料

試験片の鋼板材料としては、一般構造用圧延鋼材 S S 41 および溶接構造用圧延鋼材 S M 50 A, S M 58 Q の3種類を、スタッドジベルの素材としては S S 41 相当材を用いた。これらの母材の化学成分および機械的性質のミルシート記載値は **Table 9** のとおりである。

3.2.2 試 験 片

3種類の鋼板材料に対するそれぞれの試験系列

は静的試験 (SA, SB, SC の3系列) と疲労試験 (A, B, C, D の4系列) とを合わせて7系列ずつである。これら各系列の試験片形状および寸法を **Fig. 14** に示す。鋼板の平行部断面寸法は全系列を通じて同一であり、形状および長さは S A ~ S C, A ~ C および D 系列ごとに同じである。

疲労試験の各系列は以下のとおりである。

A 系列：黒皮付母材に対する S - N 曲線を求める。

B 系列：スタッド除去材、すなわち、スタッド溶接の母材への熱影響をみるために、溶植後スタッドをその根元より切断除去し、余盛部における幾何学的形状の急変を無くしたものの。

C 系列：スタッド付材、すなわち、鋼板にスタッドを溶植したままの状態、スタッドには何れせん断力を作用させない。

D 系列：鋼板の繰返し引張りと同位相でスタッドにも繰返しせん断力を作用させ、鋼板の疲労強度に及ぼすせん断力の影響を調べる。

上記 A, B および C 系列の静的引張強度を比較するために、それぞれに対応して S A, S B および S C の各静的試験を行なった。

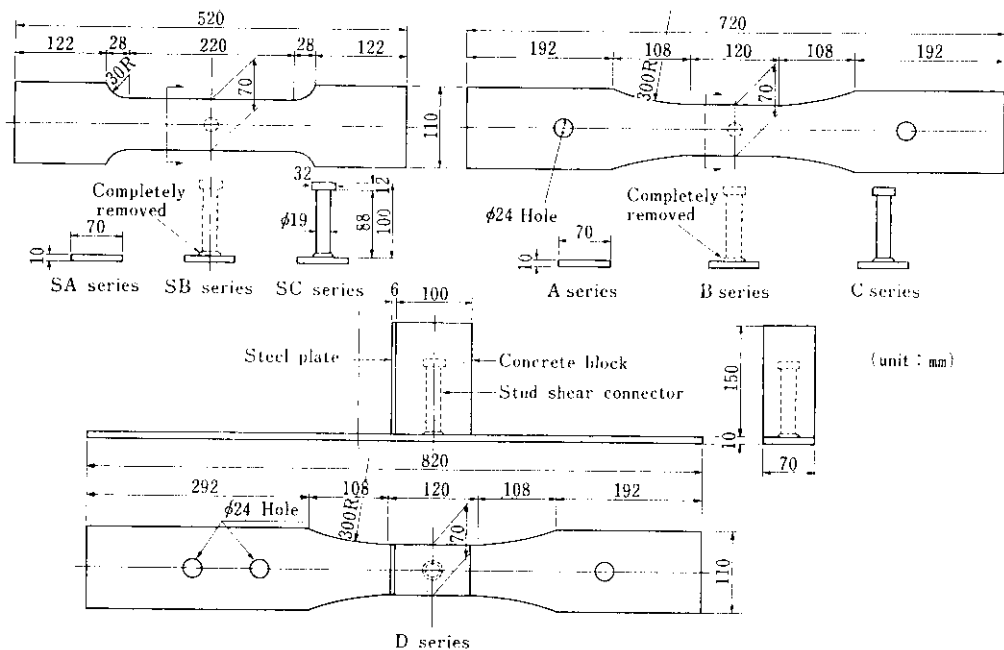


Fig. 14 Dimensions of test specimens

ただし、S S 41材についてはこれまでにほぼ全試験を実施完了したが、S M 50AおよびS M 58Qについてはまだ一部の試験しか完了しておらず、本文においては完了したものの結果のみを示す。

試験片に用いたすべての鋼板は、各材質ごとに大きな1枚の黒皮付鋼板(10×1,600+4,100mm)から切り取り、側面を試験片形状に切削したのち、S B、S CおよびB～D系列用のものには、鋼板中央に1本のスタッド(φ19×100mm)を溶接した。この時の溶接条件は各材質ごとに一定としサイクアーク方式により、S S 41では電流:2,000A、通電時間:32/60sec、S M 50Aでは1,800A、36/60sec、S M 58Qでは1,700A、36/60secであった。

S BおよびB系列の試験片は、スタッド溶接後、スタッドを根元より切断除去し、鋼板表面がなめらかになるように、溶接余盛部をグラインダー仕上げした。

また、D系列の試験片は実際の合成げたにおける応力状態にできるだけ近づけるため、Fig. 14に示すごとく、スタッドの周囲を70×150×100mmの大きさのコンクリートブロックでおおった。鋼板とコンクリートとの付着力を無くすために、鋼板表面にグリースを塗布した後、早強セメントを用いたコンクリート(1週平均圧縮強度約320kg/cm²)を打設した。

3.2.3 試験方法

疲労試験はすべてローゼンハウゼン型疲労試験機(動的最大能力40t)により、また静的試験はアムスラー型万能試験機(最大能力200t)により行なった。

(1) A、BおよびC系列

これらの系列の荷重条件はいずれも下限1tの片振り引張で、荷重速度はS S 41材では500cpm、S M 50AおよびS M 58Q材では340cpmとした。

(2) D系列

この系列では鋼板の繰返し引張力と同位相でスタッドに繰返しせん断力を作用させるために、1台の疲労試験用小型油圧ジャッキ(動的最大能力10t)により作動するせん断力荷重装置をローゼンハウゼン型疲労試験機本体に取り付けて実験を

行なった。

この組合せ応力荷重方法の原理図をFig. 15に示す。鋼板の引張力は通常の引張疲労試験の場合と同様、ローゼンハウゼン型疲労試験機により与えられ、これと同時に、スタッドには別の油圧ジャッキによりせん断力荷重装置の2本のテコを通じてせん断力が与えられる。ローゼン本体および油圧ジャッキには同一のバルブターにより脈動油圧を与え、両者が同位相で作動するようにした。スタッドへのせん断力の荷重は、鋼板に曲げモーメントが作用するのを避けるために、その位置を鋼板表面にできるだけ近づけるようにしたが、装置の都合上4mmが限度であった。また、スタッドに作用するせん断力の大きさは、図中に示した可動ヒンジを移動させて l_a と l_b の長さの比を変えることにより調節し、主テコと副テコとの間に挿入した小型の荷重計により、その値を知った。

Photo. 7に試験の状況を示す。

この系列の実験はまだS S 41材についてしか行っていないが、その時の片振り組合せ応力の荷重条件は、スタッドに対して2種類の一定せん断力範囲(最大応力と最小応力の差)をとり、鋼板に対してはすべて引張下限荷重1tの片振り引張とし、荷重速度は約340cpmであった。

3.3 試験結果および考察

3.3.1 静的試験

Table 10に静的引張試験結果を示す。表に見るごとく、どの鋼材においても、3つの系列の各値はいずれもほぼ等しいことから、スタッド溶接および鋼板表面の幾何学的形状の変化が、それぞれの母材の降伏応力、引張強度または伸びに及ぼす影響はほとんど無いことがわかる。

また、どの鋼材についても、S BおよびS C系列における破断位置はいずれもスタッド溶接部から約5cm程度離れた部分であり、スタッド部で破断することはなかった。

3.3.2 疲労試験

疲労試験の結果を両対数S-N線図上に示す。S S 41鋼材に対してはFig. 16に、S M 50Aおよ

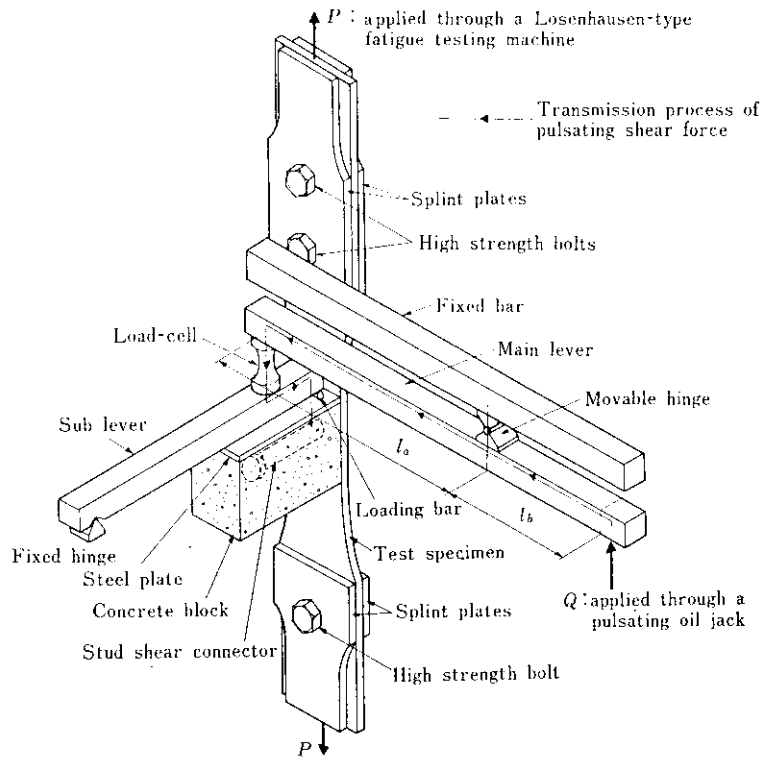
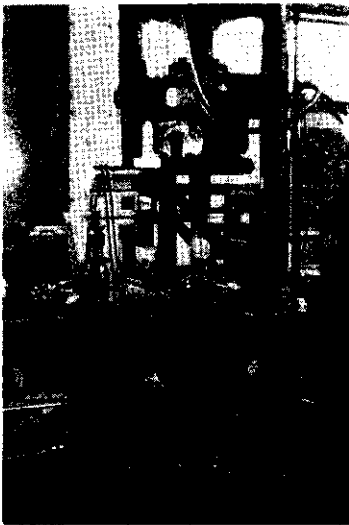
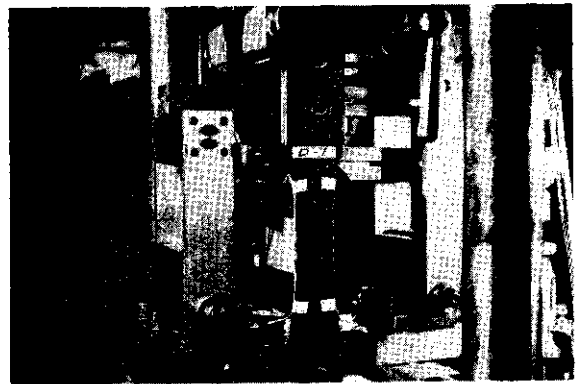


Fig. 15 Schematic diagram for combined stress loading method



(a) Setup of fatigue testing machine



(b) Installation of specimen

Photo. 7 Fatigue test of D series in progress

Table 10 Results of static tension test

Test series	S S 41			S M 50 A			S M 58 Q		
	Yield point (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation (%)	Yield point (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation (%)	Yield point (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation (%)
S A	27.7	46.2	30.7	35.6	53.6	30.5	56.2	63.9	19.9
S B	27.1	45.2	30.7	35.6	53.7	28.1	55.9	64.6	20.8
S C	26.3	44.8	29.1	35.5	53.4	28.2	56.8	65.0	20.3

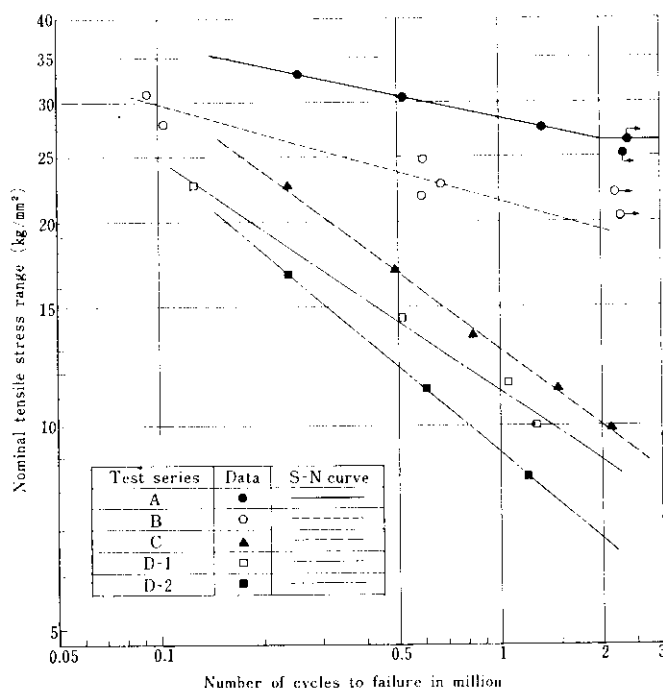


Fig. 16 Fatigue test results SS41 steel

び S M 58 Q に対しては Fig. 17 にそれぞれ示す。各図上に示した S-N 曲線は各系列の結果に最小自乗法を適用して求めたものである。

(1) S S 41 鋼材

(i) A, B および C 系列

Fig. 16 に示した A 系列の S-N 曲線より、10 万回および 200 万回時間強度として、それぞれ 36.4 および 26.3 kg/mm² の値が得られるが、これらは文献⁹⁾に報告されている S S 41 黒皮付母材の平均疲労強度 33.8 kg/mm² (10 万回) および 26.8 kg

/mm² (200 万回) という値とほぼ一致するものである。

Fig. 16 において A 系列と B 系列とを比較した場合、両者の時間強度の間には約 5~6 kg/mm² の差がみられる。これは、破断位置がすべてスタッド溶接部であったことから、スタッド溶接の影響によるものと思われ、たとえば、溶接部における溶接欠陥により生ずる応力集中、残留応力、熱影響部における材質変化（主として硬度の上昇）などいくつかの原因が考えられる。しかし、破断

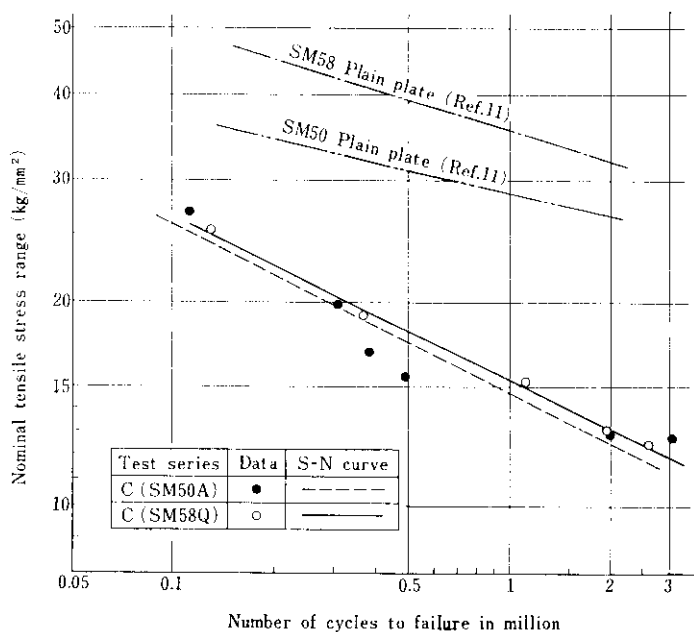


Fig. 17 Fatigue test results of C series for SM50A and SM58Q steels

面を観察した結果、破壊の起点がブローホールにあるもの2体 (Photo. 8 (a)参照)、不溶着部のあるもの3体であったことから、今回の実験では、溶接欠陥による応力集中が他の原因よりもひじょうに大きな影響をもっていたことがわかった。さらに、この応力集中の度合は、溶接欠陥の種類、位置、形状、大きさなどにより大きく左右されると考えられるので、B系列における結果が他の系列に比べて大きくばらついたのもうなずける。

Fig. 16に示したC系列の結果から、スタッド余盛部における形状の不連続性による応力集中の、鋼板の疲労寿命に及ぼす影響がひじょうに大きいことがわかる。すなわち、C系列のS—N曲線の傾きはAまたはB系列のそれらと比べてかなり急になり、繰返し数の増加とともに疲労強度が急激に低下し、200万回においてはA系列の約40%、またB系列の約50%程度となってしまっている。

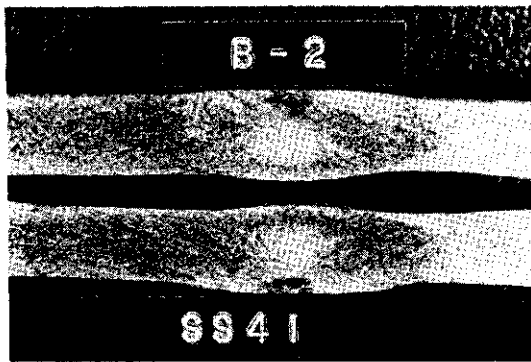
C系列における疲労亀裂の開始点は、いずれもスタッド余盛止端部であって、系列のような内部欠陥位置におけるものは全く見られなかった。このことから、スタッド溶接部にはB系列において見られたようにならずと言っていいくらい溶接欠陥が存在するが、スタッドが付いている場合に

は、これらの欠陥による応力集中よりもスタッド余盛部の外面的形状の急変により生じる応力集中の方が大きく、鋼板の引張疲労強度に及ぼす内部欠陥の影響はほとんど無いことがわかる。また、この疲労強度の低下がすべて、スタッド余盛止端部の応力集中のみによるものではなく、溶接熱によりスタッド周辺に生ずる残留応力の発生、熱影響部における硬度の上昇などの影響も含まれていることはいうまでもない。しかしながら、今回の実験では、これらの要因の個々の影響を分離して調べることはできなかった。

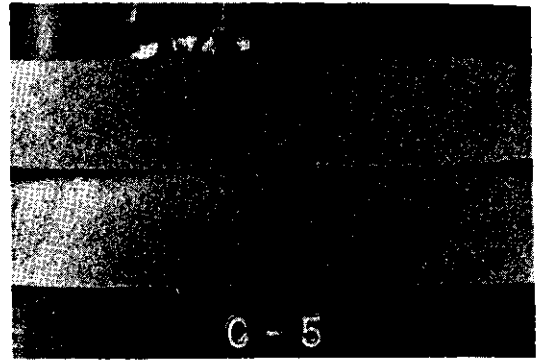
各系列の破断面の例をPhoto. 8に示す。Photo. 8(a)はB系列の例であって、疲労亀裂の開始点となったブローホールが見られる。また、Photo. 8(b)はC系列の例であって、疲労亀裂がスタッド余盛止端部において生じ、鋼板表面にはほぼ直角に進展し、破断面は比較的なめらかである。

(ii) D系列

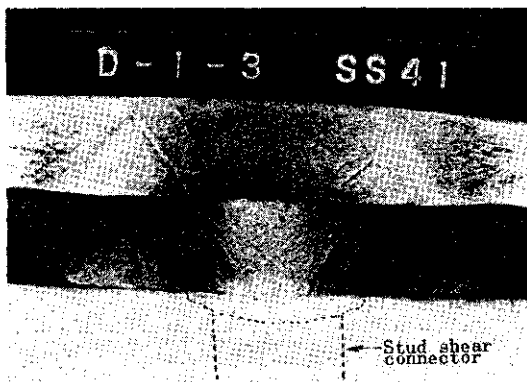
スタッドに作用するせん断応力の、鋼板の引張疲労強度に及ぼす影響を調べるには種々の異なった一定せん断応力範囲のもとにおける多くのS—N曲線を求めなければならない。今回は2種類の応力レベル、すなわち、スタッドの公称断面に作



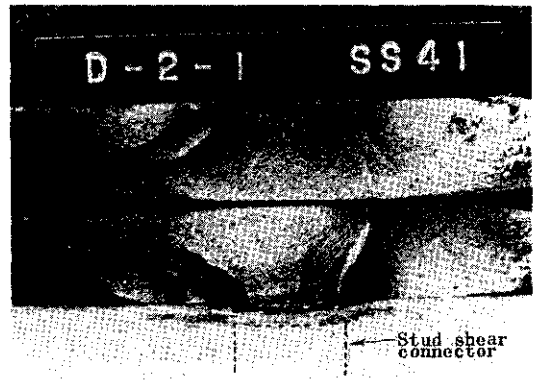
(a) B series



(b) C series



(c) D-1 series



(d) D-2 series

Photo. 8 Typical fatigue fracture surface in each test series

用する平均せん断応力範囲がほぼ 2kg/mm^2 および 4kg/mm^2 のものについて実験を行ない、それぞれD-1系列およびD-2系列として区別した。各試験片に対し厳密にこの値を保持させることはできなかったが、設定値からの偏差はだいたい5%以内におさまった。実験結果を Table 11

に、S-N曲線を Fig. 16 に示す。

この系列の試験片はすべて、せん断力が作用した側のスタッド余盛止端部において生じた疲労亀裂が進展することにより破壊した。この破断面の例をPhoto. 8(c)および(d)に示す。これらを Photo. 8 (b)のC系列のものと比較すると、C系列のもの

Table 11 Summary of fatigue test results for D series

Specimen	Nominal tensile stress range (kg/mm^2)	Average shear stress range on a stud (kg/mm^2)	Number of cycles to failure (10^6)
D-1-1	22.4	2.1	0.127
D-1-2	11.6	2.0	1.063
D-1-3	14.4	1.9	0.517
D-1-4	9.8	1.9	1.292
D-2-1	16.6	3.8	0.241
D-2-2	8.4	3.8	1.207
D-2-3	11.3	3.9	0.609

は鋼板表面にはほぼ直角な比較的平らな破面となっているのに対し、D系列のものはスタッドに作用するせん断力の存在により、亀裂が溶着線に沿って進んだ形跡が見られ、破面もかなり凹凸のはげしいものとなっていることがわかる。

Fig. 16 に示したC, D-1 および D-2 系列の S-N 曲線を比較すると、鋼板の疲労強度はせん断応力範囲が大きくなるにつれて徐々に低下する傾向が認められる。そこで、この現象を明らかにするために、今回の実験結果を同位相組合せ曲げねじり疲労試験の場合に適用されてきた各種の破壊仮説¹²⁾に当てはめることを試みた。C, D-1 および D-2 系列の200万回疲労強度、および文献¹⁰⁾に示されたスタッドの押し抜きせん断疲労試験結果の200万回時における値を組合せ応力疲れ限度線図上に示したのが Fig. 18 である。図中には各種の破壊仮説を表す曲線が示されている。

Fig. 18 に見るごとく、今回および押し抜き試験結果の4つの値を結ぶ線は、どの曲線とも合致せず、したがって、今回の実験においてみられた鋼板の疲労強度の低下という現象は従来のどの破壊仮説によっても十分に説明し得ないものと思われる。これには大きな理由として、垂直応力とせん断応力との組合せ応力状態の相違（従来は曲げ—ねじり、今回は引張—せん断）、疲労強度の評価の相違（耐久限度と200万回時間強度）、今回の

試験片のスタッド根元部には溶接と応力集中の影響が存在したことなどが考えられる。

このように、従来の破壊仮説を、組合せ応力状態のもとにおけるスタッド付鋼板の疲労破壊の場合に直接当てはめることはできないが、Fig. 18 に見るごとく、引張応力とせん断応力との間には何かある一定の関係がありそうなが予想される。しかし、今回の実験の範囲内では、実験データが少ないこともあってはっきりとした結論は出せなかった。なお、この現象を解明するための追加データを得るため、別のせん断応力レベルについての疲労試験を現在続行中であることを付記しておく。

(2) S M50A および S M58Q 鋼材

これらの鋼材に対しては、現在までに、C系列の結果しか得られていないので、黒皮付母材との比較には関西高張力鋼疲労研究グループが行なった S M50 および S M58 に対する結果¹¹⁾を用いた。このため Fig. 17 にはこれらの S-N 曲線が C 系列の結果とともに記入されている。

Fig. 17 において、S M50A および S M58Q の C 系列の結果はほぼ一致し、200 万回時間強度は、12.5~13kg/mm² であり、母材に比べると S M50A では約50%、S M58Q では約40%程度となっている。

これらの鋼材における破断位置は S S 41 の場合

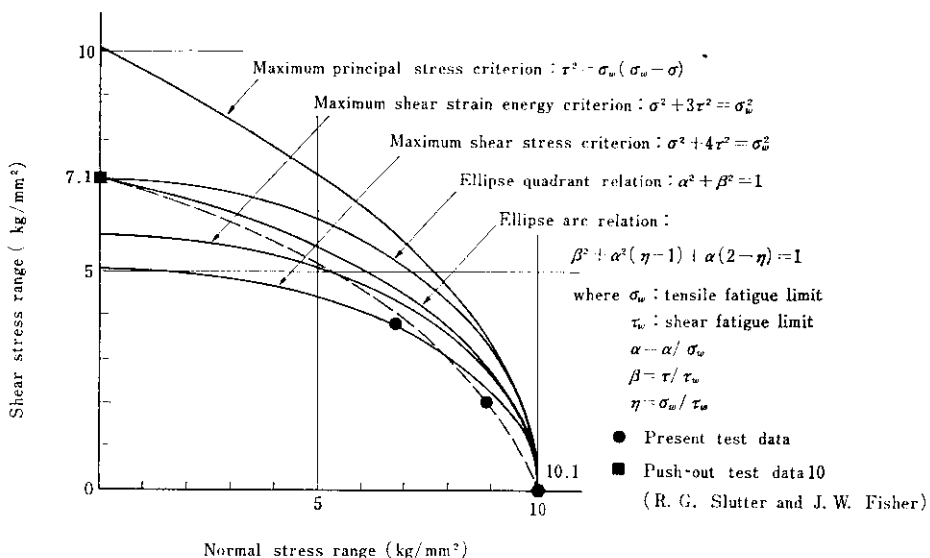
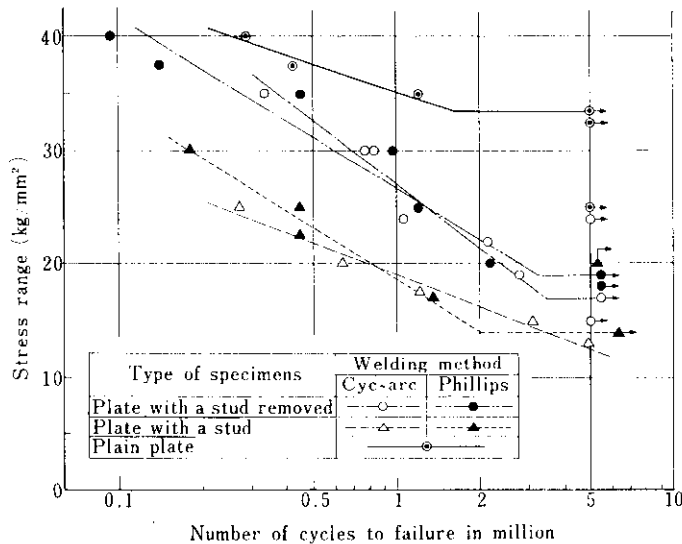


Fig. 18 Comparisons of test data with various criteria of failure

Fig. 19 Fatigue test results^{1,6)}

と同様、いずれもスタッド根元の余盛止端部であったことから、疲労強度の低下は、やはり、S S 41の場合について述べた理由(3・3・2 節(1)項参照)によるものであることがわかる。このように、スタッド付鋼板はスタッド根元における応力集中の存在により、一種の切欠き材とみなすことができるものと思われる。そこで、この場合の各鋼種についての切欠き感度を調べてみると、200 万回における切欠き係数(平滑材の疲れ強さを切欠き材の疲れ強さで除した値)は、S S 41では2.63, S M 50Aでは2.15, S M 58Qでは2.46であった。今回のスタッド付材については、材質の相違による差は小さく、一般の切欠き材について言われているような高張力鋼の疲労特性、すなわち、応力集中に対する敏感さというような性質を明瞭に見出すことはできなかった。

3・4 他の実験結果との比較(スタッド付材について)

石渡ら⁹⁾の研究は板厚 25mm の S M 50A に $\phi 22$ mm のスタッドジベルを、サイクアーク方式およびフィリップス方式の二方式により溶接した試験片を用いて片振り疲労試験を行ない、主として溶接方式の相違による S M 50A 鋼板の引張疲労強度

に現われる差を調べている。試験系列は両方式によるスタッド除去材、スタッド付材の 4 種のほか、S M 50A 黒皮付母材についても片振り疲労試験を行なって、それぞれに対する S—N 曲線、耐久限度などを求めている。Fig. 19 および Table 12 にその結果を示す。また、破断状況の一例を Photo. 9 に示す。Fig. 19 において、サイクアークとフィリップス両方式における差はほとんど無いと思われるので両者をまとめて取り扱うことにすると、スタッド除去材の 200 万回時間強度は約 22kg/mm^2 であり、スタッド付材のそれは約 16kg/mm^2 である。これらの値を母材の 200 万回時間強度と比較すると、スタッド除去材は母材の約 66%, スタッド付材は同じく約 48% となる。また、スタッド付材の切欠き係数は約 2.06 であり、本実験の S M 50A に対する値 2.15 とほぼ等しく、同種鋼材に対してはほぼ等しい切欠き感度となることがわかる。

破断位置は、スタッド除去材ではいずれも溶着金属部であり、スタッド付材では全数余盛止端部であったことから、本実験の S S 41 鋼材について述べた理由(3・3・2 節(1)項参照)が、この場合にも当てはまるものと思われる。

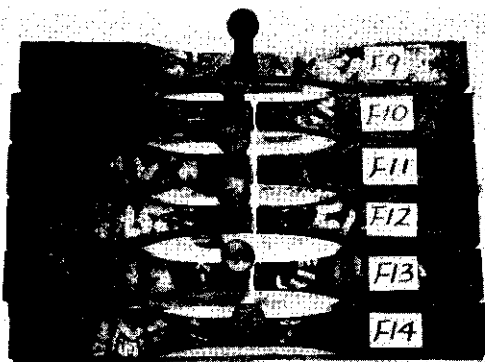
スタッド付鋼板の引張疲労強度に関しては、上

Table 12 Summary of fatigue test results³⁾

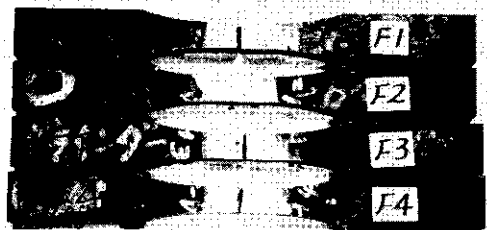
Specimen	Static test			Fatigue test			
	Cyc-arc method			Cyc-arc method		Phillips method	
	Yield point (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation (%)	Fatigue limit (kg/mm ²)	Fatigue ratio (%)	Fatigue limit (kg/mm ²)	Fatigue ratio (%)
Plain plate	32	50	28	33.5	67	33.5	67
Plate with a stud removed	33	50	26	17	34	19	38
Plate with a stud	—	—	—	12	26	14	28

Table 13 Comparisons of fatigue strength of plate with studs

Name	Material	Fatigue strength, kg/mm ²		Tensile strength, kg/mm ²	Fatigue ratio at 2 × 10 ⁶ cycles	Number of stud welded to a plate
		N=500, 000	N=2, 000, 000			
Authors	JIS SS41	16.8	10.1	44.8	22.5	One stud
	JIS SM50A	17.4	12.4	53.4	23.2	
	JIS SM58Q	18.2	13.0	65.0	20.0	
Ishiwata and Takahashi ⁸⁾	JIS SM50A	23.1	15.9	50.0	31.8	One stud
T. Wakabayashi et al. ⁶⁾	JIS SS41	18.0	11.0	44.1	24.9	One stud
	JIS SM50	21.2	15.0	53.8	27.9	
	JIS SM58	15.5	10.0	62.2	16.1	
K. A. Selby et al. ⁵⁾	ASTM A7F	16.6~20.4	10.0~12.5	37.1	30.2	One or more studs, transve- rsely
	ASTM A441			59.1	19.0	
W. Roshardt ⁷⁾	DIN St37	16.0	11.0	40.0	27.5	Three studs. longitudinally
	DIN St52	17.7	9.1	56.6	16.1	
	DIN St60	17.5	10.0	56.8	17.6	
	DIN St70			64.2	15.6	



(a) Specimens with a stud removed



(b) Specimens with a stud

Photo. 9 Typical fatigue failure⁸⁾

記のほかこれまでにいくつかの疲労試験が行なわれている⁵⁾⁶⁾⁷⁾。そこで、これらの結果を疲労強度、耐久比（疲れ強さの引張強さに対する比）などについてまとめ、本実験の結果と比較するとTable 13に示すようになる。

この表において、試験片の材料・寸法、スタッドの径・本数、繰返し応力の種類、载荷速度などが、各実験者ごとに異なるため、得られた疲労強度の値も多少ばらついている。しかし、スタッド付材の疲労強度は、両極端の値を除けば、静的強度には関係なく50万回に対し16~18kg/mm²、200万回に対し10~13kg/mm²程度となるようである。また、200万回における耐久比は、だいたいの傾向として、50キロ級以下の鋼材では20~30%程度、58キロ級の鋼材では16~20%程度となることがわかる。

3.5 ま と め

以上のことから、つぎのことがいえる。

(1) スタッド除去、スタッド付鋼板の静的強度は、スタッド溶接およびスタッド余盛部における幾何学形状の影響はほとんどみられず、どの鋼材（SS41, SM50A, SM58Q）についても、スタッド除去材またはスタッド付材の降伏点および引張り強度はそれぞれの母材の強度とほとんど同じである。

(2) スタッドジベル付鋼板の引張疲労強度は、主としてスタッド余盛止端部における応力集中により著しく低下し、200万回時間強度は平滑材の約40~50%くらいの値となり、今回の鋼材につい

ては応力範囲（最大応力と最小応力との差）で、SS41に対し10.1kg/mm²、SM50Aに対し12.4kg/mm²、SM58Qに対し13.0kg/mm²であった。

(3) 繰返しせん断力がスタッドジベルに作用する場合には、鋼板の引張疲労強度が、単なるスタッド付材に対する値よりもさらに低下し、その程度はせん断応力範囲 τ_r の大きさと関係があるようである。すなわち、今回のSS41に対する実験では $\tau_r=2.0\text{kg/mm}^2$ のとき鋼材の200万回時間強度は引張応力範囲で約8.9kg/mm²であり、 $\tau_r=3.8\text{kg/mm}^2$ のときは同じく約6.8kg/mm²であった。

4. あとがき

本研究により、スタッドジベルの材質を規定し、各種橋梁用鋼板に対しスタッドジベル溶接が適用できることがわかった。スタッドジベル溶接において、大部分の溶接部にブローホールなどの内部欠陥が発生しているが、静的せん断応力に対しては十分な安全性をもっている。しかしスタッドジベルの疲労試験では、ブローホールなどによる応力集中が疲労にかなり影響している。今後は溶接内部欠陥を少なくするため、溶接機、溶接施工方法などの検討が必要である。

本研究は昭和44年度建設技術研究補助会の交付を受け、引続き研究が行なわれたもので、建設補助会による研究にあたりご指導ご協力いただいた方々に深謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 建設省道路局：アーケスタッドジベル溶接施工指針、道路、(1971) 2, 77~82
- 2) スタッドジベル溶接と検査、大阪変圧器㈱
- 3) 大径ナショナルスタッド溶接法、松下電器産業
- 4) 前田、梶川：第16回橋梁・構造工学研究発表会論文集、(1969), 71
- 5) K. A. Selby et al.: Structural Research Series No. 270, Univ. of Illinois, (1963)
- 6) 若林他：橋梁と基礎、5 (1971) 4, 27
- 7) W. Roshardt: Schweiz. Bauzeitung, 84, 51 (1966) 22, 906
- 8) 石渡、高橋：土木学会第25回年次学術講演会概要集、(1970) I-126, 373
- 9) 土木学会：鋼鉄道橋設計標準解説、(1970), 307
- 10) R. G. Slutter, J. W. Fisher: Highway Research Record, 147 (1966), 65

- 11) 関西高張力鋼疲労研究グループ：土木学会誌，54（1969）11，56
- 12) J. A. Pope：Metal Fatigue，（1959），24，〔Chapman and Hall Ltd.， London〕
- 13) AASHO：Standard Spec for Highway Bridge，（1969）
- 14) AWS：Stud Welding，（1968），3
- 15) 山本他：第6回日本道路協会論文集，（1963），560

