多点スポット溶接継手の疲労強度の評価方法について*

佐藤 次彦**, 片山 襄一**, 森井 克易***

Investigation of Assessment for Fatigue Strength of Multi-Spot Welded Joints*

by Tsugihiko Satoh**, Jyoichi Katayama** and Yoshiyasu Morii***

This investigation is carried out in order to establish an estimation procedure of fatigue strength under tensile shearing load of multi-spot welded joints arranged in perpendicular to the load direction, by using maximum load vs. number of repeated cycles curve (abbreviated to L-N curve, hereafter) of single-spot welded joint which has the same nugget diameter with those of multi-spot welded joints. In general, it has been known that static tensile shearing strength of multi-spot welded joints becomes nearly equal to the product of the spot number of the joint by the tensile shearing strength of single-spot welded joint which has the same specimen width with the spot space of multi-spot welded joints (abbreviated such a single-spot welded joint to the equivalent single-spot welded specimen), no matter how the mounting of multi-spot welded specimen on the testing machine is made without sufficient cares. On the other hand, it is usual that fatigue strength of multi-spot welded joints becomes considerably lower than the product of the spot number of the joint by the fatigue strength of equivalent single-spot welded specimen, even if the mounting of multi-spot welded specimen on the fatigue testing machine is made with sufficient cares. (Here, we define that the fatigue life of multi-spot welded joints under a constant maximum load is the number of cycles when a first fatigue crack with the same length with the nugget diameter becomes visible around a spot weld of multi-spot welds.) It is made clear by the previous paper that this is mainly because of inequality of load bearing ratio of each spot weld in multi-spot welds. Moreover, it is recognized in our laboratory that when a special device is used for load bearing ratio of each spot weld in multi-spot welds to become equal, fatigue strength of multi-spot welded joints becomes nearly equal to the product of the spot number of the joint by the fatigue strength of equivalent single-spot welded specimen.

In practices of spot welded structures, load bearing ratio of each spot weld in multi-spot welds is scarcely equal. Moreover, depended on the unintentional variations of nugget diameter and spot space, inequality of load bearing ratio of each spot weld in multi-spot welds will become larger.

The purpose of this investigation is to find out a relationship between fatigue strengths of spot welded structures in practices as mentioned above and that of equivalent single-spot welded specimen. For this purpose, a hypothesis which is able to connect fatigue strength of multi-spot welded joints and that of equivalent single-spot welded specimen was set up, and experiments for the verification of the hypothesis were carried out. Materials of specimens used in these experiments are mild steel, high strength steel and commercially pure aluminum, respectively, of 0.8 mm thickness.

1. はじめに

本論文は荷重と直角方向に点配列された多点スポット溶接継手の引張りせん断荷重下における疲労強度をそれと同じ 大きさのナゲット径をもつ単点スポット溶接継手の疲労試験結果から推定する方法についての研究であ

る。

多点スポット溶接継手の静的引張りせん断強度は、多点スポット溶接試験片の試験機への取付けに特に注意をしなくても、その多点スポット溶接試験片の点間隔と同じ寸法の板巾と重ね代をもつ単点スポット溶接試験片（これを等価単点スポット溶接試験片と呼ぶ）の引張りせん断強度のほぼ点数倍になる¹⁾。一方、多点スポット溶接継手の疲労強度は試験片の試験機への取付けに十分な注意をはらっても、等価単点スポット溶接試験片の疲労強度の点数倍よりかなり低くなるのが普通である（ただし、多点スポット溶接継手の疲労強度はいずれかのス

*原稿受付 昭和55年7月11日（昭和53年度秋季全国大会にて発表）

**正 員 大阪工業大学 Member, Osaka Institute of Technology

***学 生 員 大阪工業大学大学院（現在 東亜精機（株））Student Member, Graduate School of Osaka Institute of Technology (Present Address: Toa Seiki Co., Ltd.)

Fig. 1 L-N curves of single- and n-spot welded joints

ポット溶接点の近傍にナゲット径とほぼ同じ大きさのクラックが観察されたときの時間強さと規定する)。われわれはこれまでの研究により、この疲労強度の低下の主な原因は多点スポット溶接部各点への荷重配分の不均等によるものであることを明らかにしている²⁾。実際のスポット溶接構造物のスポット溶接部に加わる荷重が均等であることはむしろまれである。さらに、ナゲット径や点間隔の不ぞろいなどの原因によって一層荷重配分の不均等性が助長されている。

この研究は上記のような実際のスポット溶接構造物の疲労強度と等価単点スポット溶接試験片の疲労強度とを結びつけることを目的としている。このためにスポット溶接部の大きさが同じ場合について、両者の間に存在するであろう関係を一つの仮説として与え、それを実験的に証明する方法をとった。

実験に使用した被溶接材は板厚 0.8 mm の軟鋼板、高張力鋼板 (50キロ級)、工業用純アルミニウム板である。

2. 多点スポット溶接継手の疲労強度に対する仮説と疲労寿命の推定方法

さきに述べたように、本仮説の前提条件として、多点スポット溶接継手の疲労寿命を多点スポット溶接部中のある 1 点にクラックが入った時期とする。このような定義による多点スポット溶接継手の疲労強度は等価単点スポット溶接試験片の疲労強度の点数倍より低くなるということから、等価単点スポット溶接試験片および n 点スポット溶接継手の L (繰返し荷重) - N (繰返し数) 曲線を Fig. 1 のように仮定しよう。ここで、 n 点スポット溶接継手の縦軸は単点スポット溶接試験片の場合の $1/n$ のスケールで目盛っている。

この図を使ってわれわれの仮説を説明してみる。いま、等価単点スポット溶接試験片に荷重 L_1 (繰返し引張りせん断荷重のピーク値) を負荷したときの破断繰返し

し数は N_1 である。また、 n 点スポット溶接継手に $L_1 \times n$ の荷重を負荷したときの破断繰返し数は N_2 である。 n 点スポット溶接継手の破断繰返し数が N_2 であるということは、 n 点スポット溶接部中、少なくともある 1 点には荷重 L_1 よりも大きな荷重 L_2 がちょうど加わっていたためであると考えるのがわれわれの仮説である。すなわち、 n 点スポット溶接継手の疲労強度はこの最も大きな荷重 L_2 を受持っていた点の疲労強度によって決り、そのときの n 点スポット溶接継手の疲労寿命は荷重 L_2 が加わっていたときの等価単点スポット溶接試験片の疲労寿命と同じであると考えるのである。

この仮説が成立てば、一般の多点スポット溶接継手の疲労強度は次の手順で推定することができる。まず、多点スポット溶接継手と同じ材質、同じスポット溶接部をもつ等価単点スポット溶接試験片の疲労試験を行ない、 $L-N$ 曲線を求めると同時に、疲労試験中のスポット溶接部の負荷状態を示す因子 (例えば、スポット溶接部近傍のひずみ) と破断繰返し数の関係を求める。次に、多点スポット溶接継手にある負荷を与え、そのときの各スポット溶接部の負荷状態を等価単点スポット溶接試験片の場合と同様の因子を使って求め、そのうち最大のものを取出す。そして、これを先に求めた等価単点スポット溶接試験片の場合の値と比較することにより、多点スポット溶接継手の疲労試験をすることなく破断繰返し数すなわち疲労寿命を推定することができる (ひずみ測定を有限要素法による応力解析などの計算に置換えることもできる)。

この仮説の証明は次の方法で行った。種々の負荷条件下で多点スポット溶接継手の疲労試験を行ない、疲労試験中の各スポット溶接部近傍のひずみを測定する。そして、これらの測定値の中で最大ひずみの値と破断繰返し数との関係を $\epsilon_{\max}-N$ 曲線として図に示す。この曲線が等価単点スポット溶接試験片に対する同様の曲線と一致すれば、われわれの仮説は証明されたことになる。

3. 実験方法

3 種類の供試材の化学成分を Table 1 に、機械的性質を Table 2 に示す。試験片の形状、大きさ、スポット点数および点配列などを Fig. 2 に示す。各被溶接材のスポット溶接条件は Table 3 に、そのときの各試験片のナゲット径および静的引張りせん断強度 (T. S. S.) を Table 4 に示す。Table 4 の値は 5 個の試験片の平均である。疲労試験は定荷重方式、応力比 (R) = 0 の完全片振り、繰返し速度 40Hz で行った (工業用純アルミニウムの場合は試験片ののびが大きく、疲労試験の都合で 25 Hz で行った)。

Table 1 Chemical compositions

Materials	Chemical compositions (%)									
	C	Mn	P	S	Si	Cr	Al	Cu	Zn	Mg
Mild steel	.019	.25	.010	.012	—	—	—	—	—	—
High strength steel	.17	1.49	.015	.009	.43	.013	.022	—	—	—
Aluminum	—	≤.05	—	—	≤.25	—	≥99.5	≤.05	≤.05	≤.05

Table 2 Mechanical properties

Materials	Mechanical properties	
	Y. P. (kg/mm ²)	U. T. S. (kg/mm ²)
Mild steel	23.1	31.3
High strength steel	40.8	53.9
Commercially pure aluminum	—	12.2

Fig. 2 Shapes and dimensions of each spot welded specimen

Table 3 Spot welding conditions

Materials	Electrode force	Welding current	Heat time
	(kg)	(kA)	(cycles)
Mild steel	190	7.8	8
High strength steel	250	8.0	8
Commercially pure aluminum	90	22.0	15

単点および多点スポット溶接部各点の負荷状態はナゲット近傍にスポット溶接後エンドミルで $\phi 10$ の穴をあけ、境界面側に貼付したひずみゲージ(ゲージ長: 0.3 mm)によって調べた。そのときのひずみゲージの

Table 4 Nugget diameters and static tensile shear strengths

(a) Mild steel

Specimens	Nugget dia. (mm)	T. S. S. (kg)
Single-spot welded joint	5.04	498
3-spot welded joint	4.95	1476
5-spot welded joint	5.02	2457

(b) High strength steel

Specimens	Nugget dia. (mm)	T. S. S. (kg)
Single-spot welded joint	5.60	794
3-spot welded joint	5.32	2349
5-spot welded joint	5.44	3894

(c) Commercially pure aluminum

Specimens	Nugget dia. (mm)	T. S. S. (kg)
Single-spot welded joint	2.92*	89
3-spot welded joint	3.10*	221
5-spot welded joint	3.23*	419

* Nugget shape is irregular, differing from circle-like one.

貼付位置などを Fig. 3 に示す。なお、予備実験でナゲット近傍の両面にひずみゲージを貼付し、平均引張りひずみとも対応させてみたが、境界面側のひずみ測定だけで十分であるということが確かめられている。ひずみの測定時期は各試験片の破断繰返し数のほぼ半分の時期である。ひずみ値は繰返しひずみ波形の全振幅をとった。一部の試験は多点スポット溶接部各点の荷重配分比を意識的に不均等にして実験を行った。その方法は3点スポット溶接試験片について、試験片の試験機への取付けを一方の側はすべての取付けボルトで、他方の側は Fig. 2 に

Fig. 3 Attached positions of strain gages

Fig. 4 Results of fatigue test for mild steel specimens

示す*印の2本のボルトだけで取付けることによって行った (Fig. 7, 8 の Load condition B).

4. 実験結果および考察

4.1 軟 鋼

等価単点, 3点, 5点スポット溶接継手の疲労試験結果を Fig. 4 に示す。この図は Fig. 1 と同様の方法で座標軸をえらんでいる。この図から明かなように、スポット点数が3点, 5点の場合とも等価単点スポット溶接試験片の疲労強度の点数倍より低くなっており、スポット点数が増えるに従い、その低下率が大きくなっている。多点スポット溶接継手のいろいろの繰返し数での疲労強度を等価単点スポット溶接継手の疲労強度との比（以下、疲労強度比と呼ぶ）をとって比較したのが Fig. 5 である。Fig. 5 によれば、高荷重では疲労強度比は高いが、低荷重では低下する傾向を示している。

次に、多点スポット溶接部各点近傍のひずみを測定

Fig. 5 Fatigue strength ratio vs. number of cycles for mild steel specimens

Fig. 6 Variation of strain in the neighborhood of multi-spot welds for mild steel specimens

し、各点の荷重配分の状態を調べた結果を Fig. 6 に示す。この図は各点のひずみのばらつきを示したもので、各点のひずみのうち最大と最小のものの差をとり、各点のひずみの平均値で除し、百分率で示したものである。高荷重ではばらつきが小さく、低荷重になるに従い、ばらつきが大きくなっている。このことから、多点スポット溶接継手の疲労強度の低下の原因は各点の荷重配分の不均等が大きき要因になっていることがわかる。

試験片の疲労試験機への取付け方法に変え、意識的に各点の荷重配分が不均等になるようにして疲労試験を行った結果を Fig. 7 に示す。予想されるように、より不均等に荷重が配分されているであろう試験片の取付け方法を用いた方が、疲労強度の低下がより大きかった。

これまでの実験で測定した各試験片の各点のひずみのうち、最大ひずみのものを集めて、縦軸にひずみを取り、 $\epsilon_{\max}-N$ 曲線にまとめてみたのが Fig. 8 である。この図から、いろいろな疲労強度を示す単点および多点ス

Fig. 7 Results of fatigue test under various load conditions for mild steel specimens

Fig. 8 Maximum tension strains of single-, 3- and 5-spot welded specimens for mild steel

Fig. 9 Results of fatigue test for high strength steel specimens

ポット溶接継手も、最大ひずみを示す点のひずみを取り出して整理するとかなりよい精度でほぼ一つの曲線にまとめられることがわかる。

Fig. 10 Fatigue strength ratio vs. number of cycles for high strength steel specimens

4.2 高張力鋼

高張力鋼に対する等価単点、3点、5点スポット溶接継手の疲労試験結果を Fig. 9 に示す。疲労強度比を示したのが Fig. 10 である。これらの図によれば、高張力鋼の場合も軟鋼の結果とよく似た結果になっているが、5点スポット溶接継手の場合、低荷重で軟鋼の場合より疲労強度比が若干低下している。これは高張力鋼が軟鋼にくらべ、のび性が悪いためと考えられる。ここでいうのび性とは、ナゲット近傍で応力集中により塑性変形する部分の降伏点と母材自身の降伏点との比較を意味している。すなわち、高張力鋼は Fig. 11(b) に示すように熱影響部の硬度は母材に比較して非常に高くなっており、この差は軟鋼の場合 (Fig. 11(a)) に比べてより大きい。硬度と降伏点はおおよそ比例していると考えてよいから、高張力鋼の場合低荷重ではナゲット近傍でののびが小さく、疲労試験中の繰返し荷重による各点の荷重配分の均等化が軟鋼にくらべて起りにくいものと考えられる。

5点スポット溶接継手について、軟鋼の場合と同様、各点近傍のひずみのばらつきを調べてみた。その結果を Fig. 12 に示す。ばらつきは軟鋼の場合にくらべてかなり大きく、かつ高サイクルに近づくほどばらつきが大きくなっていることがわかる。このときの最大ひずみを示す点のひずみと等価単点スポット溶接試験片の場合のひずみを $\epsilon_{\max}-N$ 曲線で整理したのが Fig. 13 である。5点スポット溶接継手の疲労強度は等価単点スポット溶接試験片の疲労強度の点数倍よりもかなり低いが、最大ひずみで整理するとそれぞれの曲線はほぼ一致することがわかる。

4.3 工業用純アルミニウム

工業用純アルミニウムに対する等価単点、3点、5点スポット溶接継手の疲労試験結果を Fig. 14 に示す。軟鋼、高張力鋼の場合にくらべ差が小さくなっていること

(a) Mild steel

(b) High strength steel

(c) Commercially pure aluminum

Fig. 11 Distributions of micro-vickers hardness in spot welds

がわかる。Fig. 15は疲労強度比を示したものである。この図から、工業用純アルミニウムの場合の疲労強度比は軟鋼、高張力鋼の場合よりも低下率が小さくなっていることがわかる。これは Fig. 11(c)に示すように、熱影響部の硬度が母材よりも低下しており、ナゲット近傍のひび性が良く、繰返し荷重下での各点の荷重配分の均等化が起り易いことがその理由と考えられる。

Fig. 12 Variation of strain in the neighborhood of multi-spot welds for high strength steel specimens **Fig. 13** Maximum tension strain of single- and 5-spot welded specimens for high strength steel **Fig. 14** Results of fatigue test for commercially pure aluminum specimens

5点スポット溶接継手に対して、各点近傍のひずみの

Fig. 15 Fatigue strength ratio vs. number of cycles for commercially pure aluminum specimens

Fig. 16 Variation of strain in the neighborhood of multi-spot welds for commercially pure aluminum specimens

Fig. 17 Maximum tension strain of single- and 5-spot welded specimens for commercially pure aluminum

ばらつきを調べた結果が Fig. 16 である。この図によれば、高張力鋼よりは小さいが、軟鋼と比べると同程度ま

たはそれよりわずかに大きなばらつきであることがわかる。また、このときの $\epsilon_{\max}-N$ 曲線を示したのが Fig. 17 である。工業用純アルミニウムはさきに述べたようにのび性が良く、各点のひずみのばらつきも軟鋼の場合よりも小さくなることを予測していた。この予測が当たらなかった原因について検討を加えてみたところ、工業用純アルミニウムの場合のナゲット形状は円形よりかなりずれていた (Table 4(c) 参照)。これが各点のひずみ測定の影響を与えていたものと推察される。また、ナゲット径の平均値も等価単点スポット溶接継手のそれと、5点スポット溶接継手のそれとはかなり異っていたことも一つの原因と考えられる。

5. 多点スポット溶接継手の疲労強度に対する仮説の証明

前節で行ったいろいろなスポット溶接試験片の疲労試験結果とスポット溶接部近傍のひずみ測定の結果をもとに、2節で述べた仮説の証明を行うと次の通りである。

Fig. 1 に示すモデル図の通り、多点スポット溶接継手の疲労強度は Fig. 4, 9, 14 から明らかなように等価単点スポット溶接試験片のその点数倍より低くなっている。しかしながら、軟鋼、高張力鋼に対しては Fig. 8, 13 から明らかなように、多点スポット溶接部中、最大ひずみを示す点のひずみで整理するというような荷重配分をもつ場合でもそれらはほぼ同一曲線上にまとめられ、さらに等価単点スポット溶接試験片の場合のひずみもその曲線上にまとめられることがわかる。このことから、多点スポット溶接継手の疲労強度は最大ひずみを示す点の疲労強度によって決まっていることがわかり、同時に本仮説の証明が行われたことになる。

ただし、工業用純アルミニウムの場合にはナゲット形状の不均一性により、上記の結論に対する十分な証明は得られなかった。工業用純アルミニウムについても形状の均一なナゲットをもつ多点スポット溶接継手について実験を行えば、軟鋼や高張力鋼の場合と同様の結論が得られるであろうということは、Fig. 14 の等価単点スポット溶接継手と多点スポット溶接継手の $L-N$ 曲線がかなりよく一致していることから推察される。

6. おわりに

本研究の主な結論をまとめると次の通りである。

1) 多点スポット溶接継手の疲労強度と等価単点スポット溶接試験片の疲労強度とを関連づける仮説 (Fig. 1) を作り、多くの実験によってこの仮説が成立つことを証明した。さらに、この仮説を使って多点スポット溶接継手の疲労強度を等価単点スポット溶接試験片の疲労

強度から評価する方法を示した。

2) 多点スポット溶接部中の最大ひずみと等価単点スポット溶接試験片のひずみを縦軸にとり $\epsilon_{\max}-N$ 曲線で整理すると軟鋼と高張力鋼についてはほぼ同一曲線上にまとめられることがわかった (Fig. 8, 13)。これは、多点スポット溶接継手の疲労強度は多点スポット溶接部中、最も大きな荷重を受持っていた点、すなわち、最も大きなひずみを受けていた点の疲労強度によって決まるということを意味する。

3) 工業用純アルミニウムの場合、多点スポット溶接継手の疲労強度と等価単点スポット溶接試験片の疲労強度との比 (疲労強度比) は、軟鋼、高張力鋼に比べて低荷重領域まで含めて高かった。これはナゲット近傍の熱影響部の軟化によるのび性の改善が繰返し荷重による荷

重配分の均等化に寄与したためと考えられる。

なお、工業用純アルミニウムの場合、ひずみ測定の結果は予測されるよりばらつきが大きく、軟鋼、高張力鋼のように最大ひずみを用いて仮説を説明することはできなかったが、これはナゲット形状の不均一性がひずみ測定に影響を及ぼしたためと考えられる。

なお、本研究の一部は大阪工業大学・中央研究所の研究費によったものである。

参 考 文 献

- 1) 佐藤次彦, 片山襄一, 阿部博司, “多点溶接部の強度について (6)”, 溶接学会, 講演概要第16集, (1975)
- 2) 佐藤次彦, 片山襄一, 藤野健一, “軟鋼薄板の多点溶接部の疲れ強さについて”, 溶接学会抵抗溶接研究委員会, Doc. No. RWS-46-78, (1978)

横向きナローギャップ溶接の自動制御 (第4報)*

—総合制御方式とアーク直視法によるワイヤ位置制御—

井上勝敬**, 柴田 泰***, 玉置光男***, 明石晴仁***, 荒田吉明**

Automatic Control of Horizontal Narrow Gap Welding (Report IV)*

—The Total Control and the Control Method of Wire Position by Direct Arc Observing—

by Katsunori Inoue**, Yutaka Shibata***, Mitsuo Tamaoki***, Haruhito Akashi*** and Yoshiaki Arata**

The investigation on the automatic control system was made to detect the change in the groove width and the welding start and stop positions, to control the weld line tracking, and to set up the optimum welding conditions corresponding to the change in the groove width, for the purpose of the automatic control of the horizontal narrow gap welding.

In this report, it is described as the principle and the algorithm of direct arc observing method which progress the reliability of weld line tracking, and as the synthetical control algorithm to realize the full automatic control.

The results obtained are summarized as follows:

- (1) The weld line and the wire position can be detected stably within the accuracy of 0.5 (mm) with the direct arc observing method.
- (2) The welding device and the algorithm which control it synthetically were manufactured as a trial.
- (3) As the experimental result of automatic control, the control device and the algorithm were certified to be used practically.

*原稿受付 昭和55年9月8日 (昭和53年度春季全国大会にて発表)

**正 員 大阪大学溶接工学研究所 Member, Welding Research Institute of Osaka University

***正 員 (株)片山鉄工所技術開発部 Member, Katayama Iron Works Ltd., Department of Research and Development