

## ねじりを受けるスポット溶接継手の疲労強度に及ぼす板厚の影響 Effect of Sheet thickness on Fatigue Strength of Spot-Welded Joint under Torsion

○小島翔平<sup>1</sup>, 秦恭平<sup>1</sup>, 高塚千尋<sup>2</sup>, 富岡昇<sup>3</sup>, 岡部顕史<sup>3</sup>

\*Shohei Kojima<sup>1</sup>, Kyohei Hata<sup>1</sup>, Chihiro Takatsuka<sup>2</sup>, Noboru Tomioka<sup>3</sup>, Akifumi Okabe<sup>3</sup>

In this paper, the influence of plate thickness on fatigue strength of spot welded joints subjected to torsion was investigated. A sensitivity analysis for the torsional shear joints gave a quantitative variation of nugget diameter and sheet thickness on fatigue strength of the joint with  $5\sqrt{t}$  nugget diameter. In addition, we have attempted to validate the results of sensitivity analysis by conducting fatigue testing. Fracture mode is the shear fracture in  $d \leq 4t$  depending on the sheet thickness  $t$  and the diameter  $d$  of a nugget.

### 1. 緒言

スポット溶接継手の疲労強度に及ぼす板厚の影響を実験的に調べた論文は多く見られる。ナゲット径は一般に板厚の平方根の 5 倍を目標として溶接されるため、これらの論文で使用されている試験片は板厚と共にナゲット径も変わっている。これらの疲労試験結果にはナゲット径の影響も含まれ、純粋に板厚のみの影響を見ていることにはなっていない。

島谷ら<sup>1)</sup>は、引張せん断継手について、感度解析と疲労試験を行い、疲労寿命に対する板厚の影響を定量的に明らかにした。この板厚の影響はスポット溶接部に作用する荷重成分によって異なる。

本研究では、スポット溶接部に主としてねじりが作用するせん断ねじり継手について、感度解析を行い、ナゲット径  $5\sqrt{t}$  のスポット溶接継手の疲労強度に対する板厚による変動量からナゲット径成分を分離し、両者の変動量を定量的に明らかにした。さらに、疲労試験を実施し、感度解析結果の検証を行った。また、き裂発生箇所による破壊モードの違いを初等材料力学の解析により検討した。

### 2. 公称構造応力に対する板厚の感度解析<sup>1)</sup>

ナゲット径  $d = 5\sqrt{t}$  としたときの板厚による公称構造応力の変動量のうち、板厚変動成分とナゲット径変動成分の割合はそれぞれ

$$\frac{S_t}{S_t + 0.5S_d}, \quad \frac{0.5S_d}{S_t + 0.5S_d} \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 $S_t$ ,  $S_d$  はそれぞれ板厚感度、ナゲット径感度、 $S_t + 0.5S_d$  はナゲット径  $d = 5\sqrt{t}$  としたときの板厚感度である。この計算結果を表 1 に示す。ここで、 $\sigma_{ns}$  の変動量のうち 52.4% が板厚変化に起因し、47.6% はナゲット径の変化によるものである。これらは引張せん断継手とは大きく異なる結果である。

### 3. 実験結果

#### 3.1 試験片および溶接条件

図 1 は疲労試験に用いたスポット溶接継手の模式図である。供試材料は冷間圧延鋼板 SPCE で、板厚  $t=0.8, 1.0, 1.2, 1.6\text{mm}$  である。スポット溶接に用いた C 型電極は先端直径が  $d=4, 6, 8\text{mm}$  を使用し、ナゲット径を変化させた。疲労試験は荷重制御で行い、片振りとした。

Table1 Sensitivity of each Sheet thickness and Diameter of nugget

$t$ [mm]	$d$ [mm]	$S_t$	$S_d$	$S_t + 0.5S_d$	$S_t / (S_t + 0.5S_d)$ [%]	$0.5S_d / (S_t + 0.5S_d)$ [%]
0.8	5	-0.990	-1.91	-1.95	50.9	49.1
0.8	6	-0.990	-1.85	-1.92	51.7	48.3
0.8	7	-1.00	-1.82	-1.91	52.4	47.6
0.8	8	-0.980	-1.74	-1.85	53.0	47.0
1.0	5	-1.00	-1.91	-1.96	51.2	48.8
1.0	6	-1.00	-1.86	-1.93	51.8	48.2
1.0	7	-1.00	-1.83	-1.92	52.2	47.8
1.0	8	-1.00	-1.74	-1.87	53.5	46.5
1.2	5	-1.00	-1.90	-1.95	51.3	48.7
1.2	6	-1.00	-1.84	-1.92	52.1	47.9
1.2	7	-1.00	-1.79	-1.90	52.8	47.2
1.2	8	-1.00	-1.65	-1.83	54.8	45.2
1.6	5	-1.00	-1.91	-1.96	51.2	48.8
1.6	6	-1.00	-1.84	-1.92	52.1	47.9
1.6	7	-1.00	-1.77	-1.89	53.1	46.9
1.6	8	-1.00	-1.64	-1.82	54.9	45.1
Average		-1.00	-1.81	-1.90	52.4	47.6

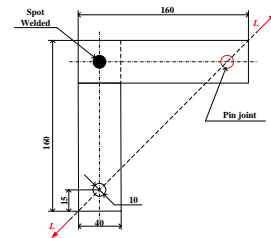


Fig.1 Spot-welded joints under torsional shear for fatigue testing

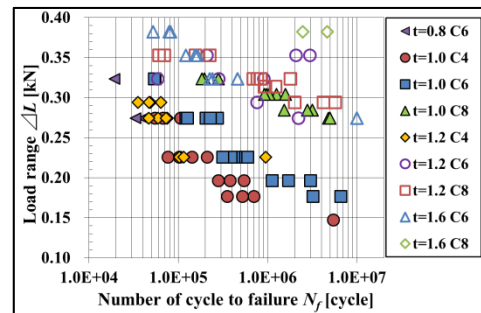


Fig.2 Load range-number of cycle to failure



(a) Plug fracture (b) Partly plug fracture (c) Shear fracture

Fig.3 Shapes of fatigue fracture in and around the nugget

#### 3.2 疲労試験結果

図 2 は荷重範囲と破断繰返し数の関係を示した図である。疲労試験終了後、スポット溶接継手のナゲット内部及

び周辺に生じる破壊の形態を観察した結果、3種類の破断モードが見られた。ナゲットの周囲で破断しナゲットが完全に抜けるプラグ破断(Plug fracture), 接合面でナゲットが破断するシャー破断(Shear fracture), 両者の混在する部分プラグ破断(Partly Plug fracture)である。これらを図3に示す。各試験片の破断形態を表2に示す。破壊形態は板厚およびナゲット径によって異なる。

**Table2 Fatigue fracture mode**

		Nugget diameter $d$ [mm]		
		4	6	8
$t$ [mm]	0.8		●	●
	1.0	■	●	●
	1.2	■	▲	▲
	1.6	■	■	■

● : Plug fracture  
▲ : Partly Plug fracture  
■ : Shear fracture

4. 破断形態の推定

ナゲットの解析モデルをナゲット径 $d$ を直径とする長さ $2t$ の円柱とした(図4)。スポット溶接継手の界面に位置する円断面に生じる最大せん断応力は、円柱の両端にねじりモーメント $M_t$ が作用するとして、

$$\tau_{z\theta max} = \frac{M_t \frac{d}{2}}{\frac{\pi d^4}{32}} = \frac{16M_t}{\pi d^3} \quad (2)$$

となる。母材と接するナゲットの側面に発生するせん断応力は、側面に一様に分布すると仮定すると、

$$\tau_{r\theta max} = \frac{M_t}{\pi d t \frac{d}{2}} = \frac{2M_t}{\pi d^2} \quad (3)$$

となる。

プラグ破断は、ナゲット側面のせん断応力 $\tau_{r\theta max}$ が母材のせん断強度に達したとき、一方、シャー破断は、ナゲット界面のせん断応力 $\tau_{z\theta max}$ がナゲットのせん断強度に達したときに破断すると仮定する。せん断強度 $\tau_s$ と引張強度 $\sigma_s$ のミーゼスの関係 $\tau_s = \sigma_s / \sqrt{3}$ 、ビッカース硬さ $Hv$ と引張強度 $\sigma_s$ の関係 $\sigma_s = 3.2Hv$ より、 $\tau_s = 1.85Hv$ となり、せん断強度はビッカース硬さより求まる<sup>2)</sup>。

スポット溶接部における硬さ分布は、軟鋼板の場合、ナゲットのせん断強度は母材のせん断強度の約2倍となる<sup>3)</sup>。従って、

$$\frac{\tau_{z\theta max}}{\tau_{r\theta max}} \geq 2 \quad (4)$$

が成立するとき、疲労破断モードはナゲットが界面に沿って破断するシャー破断となる。

式(4)に式(2)(3)を代入して整理すると、

$$t \geq \frac{d}{4} \quad (5)$$

となる。スポット溶接継手の板厚とナゲット径の間に式(5)を満足する関係が存在するとき、疲労破断はシャー破断となる。この関係を図示すると図5となる。実験結果は式(5)の直線によって概ね分類できている。このことから、ねじりを受けるスポット溶接継手の疲労破断モードは式(5)によって判別できる。

5. 疲労強度の板厚効果・ナゲット径効果

プラグ破断である、 $t=1.0\text{mm}$ ,  $d=6, 8\text{mm}$  および $t=1.2\text{mm}$ ,

$d=8\text{mm}$  の3つの継手の疲労試験データを用いて、100万回の時間強度の板厚効果とナゲット径効果を求めると、それぞれ46%, 54%となり、表1の理論値に近い値となっている。

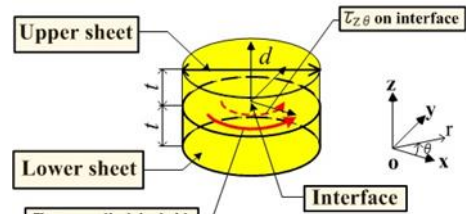


Fig.4 Analysis model for nugget

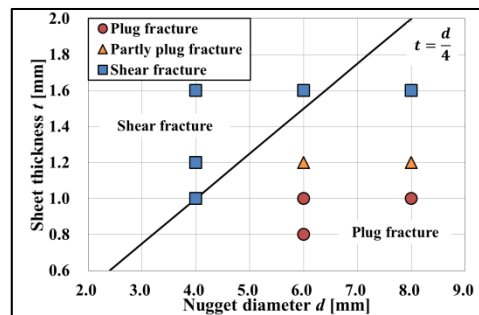


Fig.5 Distinction of fracture mode

6. 結 言

ねじりを受けるスポット溶接継手について、感度解析を行い、疲労強度に対する板厚およびナゲット径の変動量を定量的に明らかにした。さらに、疲労試験により感度解析結果を検証した。また、初等材料力学解析を行い、最大せん断応力の発生個所と疲労き裂発生個所を検証した。

- (1) 感度解析により、ねじり疲労強度の変動量のうち52.4%が板厚変化に起因し、47.6%はナゲット径の変化によるものである。これらに相応する実験値はそれぞれ46%, 54%となり、理論値は実験値に近い値となっている。
- (2) ねじりを受けるスポット溶接継手の疲労破断モードは板厚とナゲット径の組み合わせにより、プラグ破断、シャー破断、部分プラグ破断の3つの破断モードとなる。
- (3) 初等材料力学解析により、ナゲットの界面および側面の最大せん断応力を求め、両者の比較より $d \leq 4t$ ではシャー破断となることを明らかとした。この結果は実験結果と良い対応を示した。

7. 参考文献

- (1) 島谷, 齊藤, 三田, ねじりを受けるスポット溶接継手の疲労強度に及ぼす板厚の影響, 日本大学理工学部機械工学科論文集, (2013)
- (2) 富士本, 福井, 岡村, 宮原, 中山, 高張力鋼板スポット溶接継手の強度と破断形態の検討, 住友金属工業株式会社論文集
- (3) 及川, 村山, 崎山, 高橋, 石川, 自動車用高強度のスポット溶接性, 新日鉄技報第385号 (2006)
- (4) 石田, 三田, ねじりを受けるスポット溶接継手の疲労強度に及ぼす板厚の影響, 日本大学理工学部機械工学科論文集, (2014)