

K5-76

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

石田 伶太¹, ○三田 貴敬¹, 栗原 徹², 富岡 昇³, 岡部 顕史³
Ryota Ishida¹, Takanori Mita¹, Toru Kurihara², Noburu Tomioka³, Akihumi Okabe³

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. In addition, the crack is a failure mode different depending on where that occurs. Therefore, to be considered by FEA.

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、これらの論文で使わ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。

三浦らは、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試みた。また、き裂発生箇所による破壊モードの違いを有限要素解析によって検討した。

2. 公称構造応力に対する板厚の感度解析

板厚 t とナゲット径 d がともに微小量変化したとき、公称構造応力の変化量を基準量との割合で表すと、

$$\frac{d\sigma_{ns}}{\sigma_{ns}} = \frac{\partial\sigma_{ns}}{\partial t} \frac{t}{\sigma_{ns}} \frac{dt}{t} + \frac{\partial\sigma_{ns}}{\partial d} \frac{d}{\sigma_{ns}} \frac{dd}{d} \quad (1)$$

となる。一般に、スポット溶接では目標ナゲット径 d は

$$d = 5\sqrt{t} \quad (2)$$

であるから、これを t で微分すると、

$$dd = \frac{5}{2} \frac{dt}{\sqrt{t}} \quad (3)$$

となる。式(2)(3)を式(1)に代入すると、

$$\frac{d\sigma_{ns}}{\sigma_{ns}} = \left(\frac{\partial\sigma_{ns}}{\partial t} \frac{t}{\sigma_{ns}} + \frac{1}{2} \frac{\partial\sigma_{ns}}{\partial d} \frac{d}{\sigma_{ns}} \right) \frac{dt}{t} = (S_t + 0.5S_d) \frac{dt}{t} \quad (4)$$

となる。ここで、 S_t 、 S_d はそれぞれ板厚感度、ナゲット径感度である。

$$S_t = \frac{\partial\sigma_{ns}}{\partial t} \frac{t}{\sigma_{ns}} \quad S_d = \frac{\partial\sigma_{ns}}{\partial d} \frac{d}{\sigma_{ns}} \quad (5)$$

公称構造応力 σ_{ns} に対する板厚の感度 $S_{t,d=5\sqrt{t}}$ は

$$S_{t,d=5\sqrt{t}} = S_t + 0.5S_d \quad (6)$$

となる。

感度解析の結果を表 1 に示す。感度は板厚に依らずほぼ一定値となる。

式(4)より板厚の変動量に対する公称構造応力の変動量が得られる。こ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

$$\frac{S_t}{S_t + 0.5S_d}, \quad \frac{0.5S_d}{S_t + 0.5S_d} \quad (7)$$

で与えられる。この計算結果を表 1 に示すが、 σ_{ns} の変動量のうち 52.5% が板厚変化に起因し、47.5% 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。次章以降では、疲労試験を実施し、これらの結果を検証する。

Table1 Sensitivity of each Sheet thickness and Diameter of nugget

t [mm]	d [mm]	S_t	S_d	$S_t + 0.5S_d$	$S_t/(S_t + 0.5S_d)$ [%]	$S_d/(S_t + 0.5S_d)$ [%]
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	-1.91	52.5	47.5

3. 実験結果

3.1 試験片及び溶接条件

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 $t=1.0\text{mm}$, 1.2mm , 1.6mm の 3 種類である。スポット溶接での電極は C 型の $\phi=4.6, 8\text{mm}$ を使用した。軟鋼板のスポット溶接の標準条件を基準とし、溶接電流は静的引張せん断強度が最大となるチリ発生直前の値とした。疲労試験は荷重制御で行い、完全片振りとした。

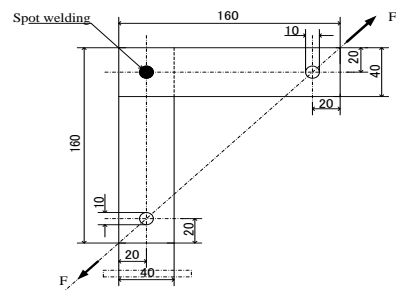


Fig.1 Spot-welded joints under torsional shear for fatigue testing

3.2 疲労試験結果

図 2 は荷重範囲と破断繰返し数線図である。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。各試験片の破壊形態を表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。公称構造応力による疲労寿命評価は、き裂がナゲット端に生じるプラグ破断を前提としているため、シャー破断には適用できない。従って、ナゲットに主としてねじりが作用する継手に対しては、2章で述べた感度解析の適用可能範囲は板厚やナゲット径に限定される。

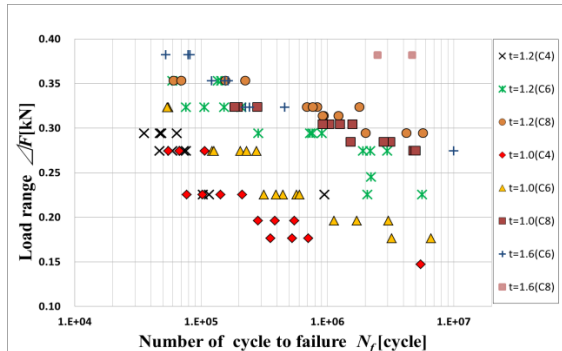


Fig.2 Load range-number of cycle to failure



(a) Plug fracture (b) Partly Plug fracture (c) Shear fracture
Fig.3 Shapes of fatigue fracture in and around the nugget

Table2 Fatigue fracture mode

		Nugget diameter d [mm]			
		4	6	8	
t [mm]	1.0	■	●	●	●: Plug ▲: Partly Plug ■: Shear
	1.2	■	▲	▲	
	1.6	■	■	■	

4. 有限要素解析

前章で述べた破壊モードの違いは、き裂の発生個所の違いによるものと考えられるため、有限要素解析 (FEA) によってナゲットの側面及び界面の応力分布を検討した。

解析に使用した FEA モデルの概要を図4に示す。図1に示すせん断ねじり継手では、ナゲットに作用する分担保荷の主たる成分はねじりモーメントで、ナゲット端に生じる応力の周方向分布はほぼ一定となるため、厚さ t の円柱2つを突き合わせ、ナゲットに相当する部分を接合した解析モデルを作成した。上の円柱側面に周方向力を一様に作用してねじりを負荷し、下の円周側面の全自由度を零とし、完全固定とした。FEA モデルはソリッド要素を用いて作成し、3次元線形弾性解析を行った。

ナゲット中心を含む断面上のミーゼス応力のコンター図を図5に示す。ナゲット端に応力集中が生じている。

ナゲットの側面また接合面 (界面) に生じる主たる応力成分はせん断応力である。ナゲット側面の周方向せん断応力 $\tau_{r\theta}$ と接合面に生じるせん断応力 $\tau_{z\theta}$ の最大値をそれぞれ τ_{side} , $\tau_{interface}$ と表示して、両者の比を示したのが表3である。板厚 1.0mm の場合、 $d=6, 8$ mm では $\tau_{side} > \tau_{interface}$ となり、ナゲット側面のせん断応力が接合面より大きいため、疲労き裂はナゲット端全周に渡って発生し接合面側から板厚方向に進展してプラグ破断に至る。板厚 1.6mm の場合、 $d=4, 6, 8$ mm のいずれの場合でも $\tau_{side} < \tau_{interface}$ となり、接合面のせん断応力が側面より大きいため、シャー破断となる。

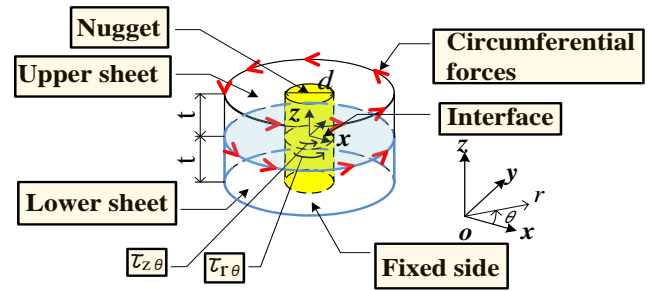


Fig.4 FE Analysis model

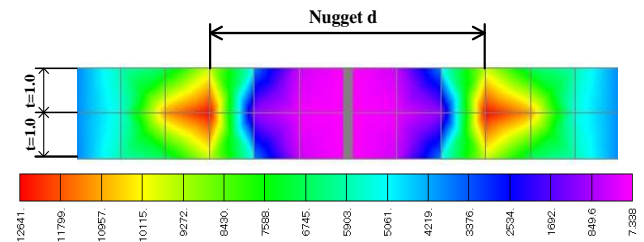


Fig.5 Mises stress contours on the cross-section through the center of nugget by FEA ($t=1.0$ mm, $d=6$)

Table3 Ratio of shearing stresses on side of nugget and interface

		$\tau_{side}/\tau_{interface}$				
		Nugget diameter d [mm]				
		2	4	6	8	10
t [mm]	1.0	0.745	1.06	1.05	1.05	1.08
	1.2	0.815	1.05	0.965	1.03	0.986
	1.6	0.366	0.455	0.521	0.483	0.515

5. 結論

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、有限要素解析を行い、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) 解析により、疲労強度の変動量のうち 52.5% が板厚変化に起因し、47.5% はナゲット径の変化によるものである。
- (2) 板厚 1.0mm ではプラグ破断、板厚 1.6mm ではシャー破断となるため、き裂の進展方向は板厚に起因する。板厚 1.2mm では応力が側面破壊と界面破壊の状況が混同し、部分プラグ破断となる。
- (3) 有限要素解析による最大せん断応力の発生個所と疲労き裂発生箇所は良い対応を示した。

文献省略