

二段多重変動振幅荷重下におけるスポット溶接継手の疲労寿命評価
 - 疲労限度以下の荷重の影響 -

Fatigue Life Evaluation of Spot-Welded Joint under Multi Two steps Variable Amplitude Load
 - Influence of Load below Fatigue Limit on Fatigue Life -

遠藤裕一¹, ○佐野勇人¹, 河田涼平², 富岡昇³, 岡部顕史³
 Yuichi Endo¹, *Hayato Sano¹, Ryouhei Kawata², Noboru Tomioka³, Akifumi Okabe³

In this study, the fatigue tests of single spot welded joints were carried out under multi two-step variable amplitude tensile shear load and peeling load. One of the variable loads was above the fatigue limit and the other was below it. As a result, the load below the fatigue limit contributes to the fatigue damage of the spot-welded joints under variable load. Modified Miner's law using nominal structural stress - number of cycle to fracture curve could systematically predict the fatigue life of the spot-welded joints under variable load amplitude, regardless of different type of loading.

1. 緒言

スポット溶接は車体構造の多くの部位で用いられている重要な締結要素であり、車体構造全体の耐久性はスポット溶接部の耐久性に大きく依存している。設計段階でスポット溶接の疲労強度を的確に評価することは重要である。

富岡らは公称構造応力を用いた疲労寿命評価法を提案し、定振幅荷重の疲労試験結果より、継手形式・寸法によらず統一的に評価できること⁽¹⁾、さらに二段多重変動振幅荷重疲労試験を引張せん断継手で実施し、公称構造応力-破断繰返し数線図と修正マイナー則により疲労寿命を推定できること⁽²⁾を示した。

公称構造応力による変動振幅荷重を受けるスポット溶接継手の疲労寿命推定の有効性を確認するには、定振幅荷重と同様に変動振幅荷重下においても、負荷形式の異なるスポット溶接継手について疲労寿命評価の可能性を検討する必要がある。

本研究では、スポット溶接に作用する代表的な荷重の一つであるはく離荷重を受ける単点スポット溶接継手に対し、二段多重変動振幅荷重疲労試験を実施し、その実験結果と引張せん断継手の一定振幅荷重疲労寿命線図を用いた修正マイナー則の疲労寿命予測との比較を行った。また、疲労限度以下の荷重が疲労寿命に与える影響について検討した。

2. 疲労試験

2. 1. 試験概要

単点スポット溶接した引張せん断疲労試験片(板厚 $t=1.0, 1.2$ [mm])及び、はく離疲労試験片(板厚 $t=1.6$ [mm])を作成(図 1)し、定振幅・変動振幅荷重疲労試験を実施した。供試材料は冷間圧延鋼板(SPCE)である。

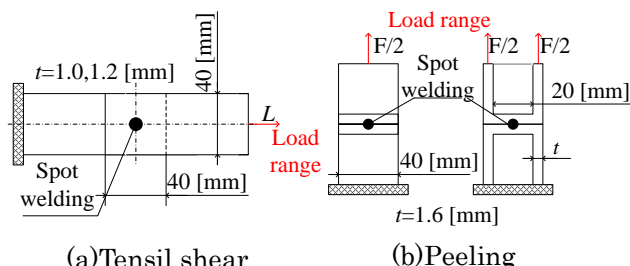


Fig. 1 Schematic diagrams of specimens used for fatigue test

疲労試験は荷重制御、完全片振りで行い、疲労寿命は疲労亀裂がナゲット端の接合面から発生し板外表面に現れ、ナゲット径程度に成長した時点とした。

スポット溶接に用いた電極は R 型を用い、標準のスポット溶接条件を基に、チリ発生直前の溶接電流を最適条件とした。

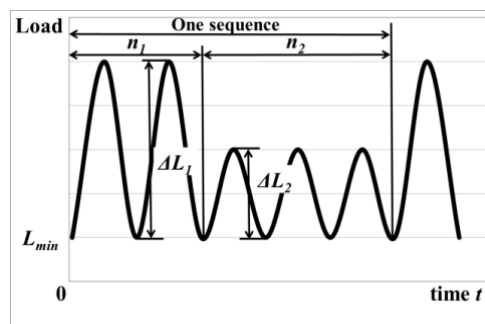


Fig. 2 Multi two-step variable amplitude load

図 2 のように、二段多重変動振幅荷重は最小値を揃えた 2 種類の荷重を用い、高荷重範囲を ΔL_1 、低荷重範囲を ΔL_2 、1 シーケンス内の高荷重振幅数を n_1 、低荷重振幅数を n_2 とした。 ΔL_1 は疲労限度以上、 ΔL_2 は疲労限度以下の荷重範囲に設定した。

2. 2. 疲労試験結果

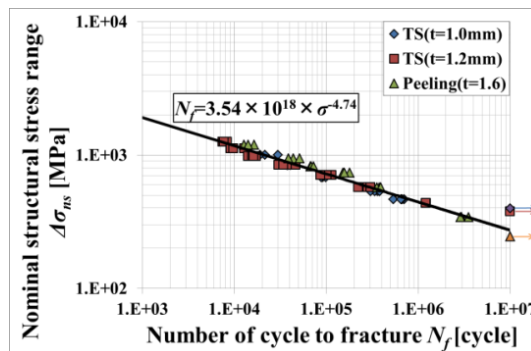


Fig. 3 Results of constant stress amplitude fatigue test

定振幅荷重疲労試験結果を公称構造応力でまとめると図 2 となる。この結果から公称構造応力を用いると板厚・荷重形式によらず、一本の線にまとまっている。

図 3 より得られた疲労限度及び本実験で使用する変動振幅荷重範囲を表 1 に示す. 引張せん断疲労試験の場合は, $t=1.0[\text{mm}]$ のとき $\Delta L_1=2.55[\text{kN}]$ 一定とし, ΔL_2 は 1.0, 0.8, 0.6[kN] の 3 種類, $t=1.2[\text{mm}]$ では $\Delta L_1=3.53[\text{kN}]$, $\Delta L_2=1.19[\text{kN}]$, はく離疲労試験の場合は $\Delta L_1=1.62[\text{kN}]$, $\Delta L_2=0.40[\text{kN}]$ とした. 表 1 には, 荷重範囲に相当する公称構造応力範囲, さらにその荷重範囲における定振幅疲労寿命を図 3 より求めた結果を示した.

二段多重変動振幅荷重疲労試験結果の一例を図 4 に示す. $n_1=100$ で一定とし, n_2 を変化させた. 図 4 には修正マイナー則による疲労寿命予測の結果を合わせて示した. 疲労寿命予測値は, 分担荷重の異なる引張せん断及びはく離疲労試験結果を組み合わせた疲労寿命線図(図 3)と引張せん断のみの疲労寿命線図の 2 種類から算出した.

2 種類の修正マイナー則による予測結果を比較すると両者はほぼ同じ値となる. 引張せん断継手の一定振幅荷重疲労寿命線図 $\Delta\sigma_{ns}-N_f$ を用いて, 負荷形式の異なるはく離継手の疲労寿命を予測することが可能である. また, 予測値は引張りせん断及びはく離の疲労試験結果と良く一致し, $n_2=10^2\sim 10^5$ の範囲では良好な予測精度を示した. ただし, 引張せん断継手においては, 低荷重範囲の繰り返し数が $n_2 > 10^5$ と高荷重の繰り返し数の 1000 倍以上になると予測値は実験値より低めとなる.

疲労限度以下の荷重が疲労損傷にどの程度まで影響するのかを確認するため, 低荷重 ΔL_2 がスポット溶接継手に対して与える影響度を α とし, N_1 を ΔL_1 が破断までに与えた回数, N_2 を ΔL_2 が破断までに与えた回数として次式より算出し, その結果を表 2 に示す. 疲労限度以下の荷重は, 一定振幅荷重では疲労損傷に寄与しないが, 二段多重変動荷重では確実に疲労損傷に寄与し, 引張せん断とはく離の両継手とも, n_2 の割合と共に疲労損傷度も高まる.

$$\alpha = \frac{N_{f(\Delta L_2)} / N_2}{N_{f(\Delta L_2)} / N_2 + N_{f(\Delta L_1)} / N_1} \quad (1)$$

3. 結論

二段多重変動振幅荷重下におけるスポット溶接継手の公称構造応力による疲労寿命評価について引張せん断継手及び, はく離継手を用いて検討した.

- (1) 定振幅の荷重下での疲労寿命が公称構造応力を用いると荷重形式によらず一直線上にまとまることから, 引張せん断継手の一定振幅寿命線図 $\Delta\sigma_{ns}-N_f$ を用いると, 負荷形式によらず修正マイナー則で疲労寿命予測が可能であるといえる.
- (2) 負荷形式に関係なく二段多重変動振幅荷重において, 疲労限度以下の荷重は疲労損傷に十分に寄与すると考えられる.

文献省略

Table1 Load ranges used for variable amplitude load fatigue test (a)TS($t=1.0[\text{mm}]$)

Fatigue limit $\Delta\sigma_{ns}=398[\text{MPa}], \Delta L=1.2[\text{kN}]$

ΔL [kN]	σ_{ns} [MPa]	N_f [cycle]	ΔL [kN]	σ_{ns} [MPa]	N_f [cycle]
2.55	845	47521	0.80	265	11558706
1.00	331	4014394	0.60	199	45189331

(b)TS($t=1.2[\text{mm}]$)

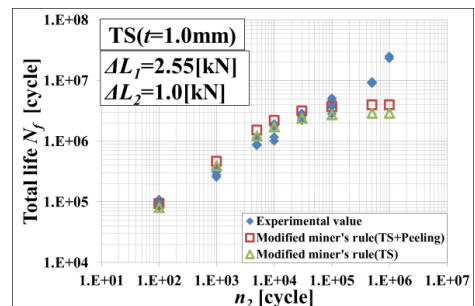
Fatigue limit $\Delta\sigma_{ns}=378[\text{MPa}], \Delta L=1.36[\text{kN}]$

ΔL [kN]	σ_{ns} [MPa]	N_f [cycle]	ΔL [kN]	σ_{ns} [MPa]	N_f [cycle]
3.53	982	23387	1.19	331	4035086

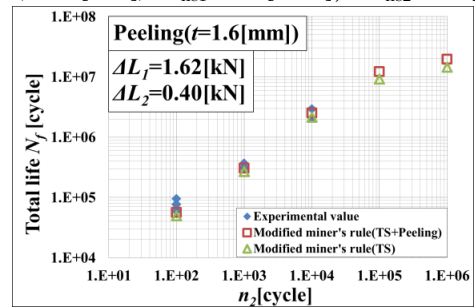
(c)Peeling($t=1.6[\text{mm}]$)

Fatigue limit $\Delta\sigma_{ns}=246[\text{MPa}], \Delta L=0.42[\text{kN}]$

ΔL [kN]	σ_{ns} [MPa]	N_f [cycle]	ΔL [kN]	σ_{ns} [MPa]	N_f [cycle]
1.62	943	28253	0.40	233	21192526



(a) TS($t=1.0[\text{mm}]$) $\Delta\sigma_{ns1}=845[\text{MPa}], \Delta\sigma_{ns2}=331[\text{MPa}]$



(b) Peeling($t=1.6[\text{mm}]$) $\Delta\sigma_{ns1}=943[\text{MPa}], \Delta\sigma_{ns2}=233[\text{MPa}]$

Fig. 4 Comparison between the predicted value using modified miner's law and variable amplitude load fatigue test results

Table2 Degree of damage by loading below the fatigue limit

(a) TS($t=1.0[\text{mm}]$), $\Delta L_1=2.55[\text{kN}]=845[\text{MPa}], n_1=100$

ΔL_2 [kN]	n_1/n_2	α [%]	ΔL_2 [kN]	n_1/n_2	α [%]
0.60	1/1	0.112	0.60	1/100	10.1
0.80		0.431	0.80		30.2
1.00		1.22	1.00		55.2
0.60	1/10	1.11	0.60	1/300	25.2
0.80		4.15	0.80		56.5
1.00		11.0	1.00		78.7
0.60	1/50	5.31	1.00	1/1000	92.5
0.80		17.8		1/5000	98.4
1.00		38.2		1/10000	99.2

(b) TS($t=1.2[\text{mm}]$), $\Delta L_1=3.53[\text{kN}]=982[\text{MPa}], n_1=100$

ΔL_2 [kN]	n_1/n_2	α [%]	ΔL_2 [kN]	n_1/n_2	α [%]
1.19	1/1	0.60	1.19	1/1000	85.9
	1/10	5.73			
	1/100	37.8			

(c) Peeling($t=1.6[\text{mm}]$), $\Delta L_1=1.62[\text{kN}]=943[\text{MPa}], n_1=100$

ΔL_2 [kN]	n_1/n_2	α [%]	ΔL_2 [kN]	n_1/n_2	α [%]
0.40	1/1	0.133	0.40	1/100	11.8
	1/10	1.32			