

K5-67

## 変動応力振幅下におけるスポット溶接継手の疲労限度

## Study on the Fatigue Limit of Spot Welded Joints Under Variable Stress Amplitude

○北原有吾<sup>1</sup>, 高橋有弥<sup>1</sup>, 河田涼平<sup>2</sup>, 富岡昇<sup>3</sup>, 岡部顕史<sup>3</sup>

Yugo Kitahara, Ariya Takahashi, Ryohei Kawata, Noboru Tomioka, Akifumi Okabe

In this study, the fatigue limit of spot welded joints under multiple two-step variable stress amplitude was investigated using the tensile shear joints. As a result, the stress below the fatigue limit contributes to fatigue damage under variable stress. The fatigue damage will increase with the increase of stress below fatigue limit and the ratio of the number of its stress amplitude. Modified Miner's law using nominal structural stress - number of cycle to fracture curve can predict the fatigue life of variable stress amplitude.

## 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。本研究では公称構造応力を用いた疲労寿命評価法を提案しており、定応力振幅の疲労試験結果より、継手寸法、負荷形式によらず統一的に評価できることを示した。

実働応力下では疲労限度以下の応力振幅が支配的で、疲労限度以上の応力範囲との組み合わせになることが多く、これに対して公称構造応力による疲労寿命評価はまだ行われていない。

本研究では、まず一定応力振幅疲労寿命線図を求め、疲労限度以下の応力と疲労限度以上の応力の二つを組合せた二段多重変動応力振幅とし、疲労繰り返し破断数の測定を行った。その結果と一定応力振幅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、疲労限度以下の応力が疲労寿命にどのような影響を与えるか検討した。

## 2. 変動荷重下における疲労寿命評価

一定応力振幅下においては、疲労限度応力以下で疲労損傷が起きないとされているが、変動荷重のように疲労限度以上の応力と組み合わせることにより、疲労限度以下の応力も疲労損傷に寄与することがある。本研究では、公称構造応力(NSS)  $\Delta\sigma_{ns}$  と破断繰り返し数からなる図1のような  $\Delta\sigma_{ns}$ - $N_f$  線図を用いて疲労寿命を予測する。

繰り返し数を  $n_i$  と置き、 $\Delta\sigma_{ns}$  が一定振幅で繰り返されたときの疲労寿命を  $N_i$  とする。ただし、 $\Delta\sigma_{ns}$  が一定振幅応力下の疲労限度以下であれば、 $N_i = \infty$  である。 $\Delta\sigma_{ns}$  が  $n_i$  回繰り返されたときの疲労損傷度を  $D_i$  と定義し、損傷度の合計  $D_m$  が

$$D_m = \sum D_i = \sum (n_i / N_i) = 1 \quad (1)$$

となったときに疲労破壊が生じるとする。これがマイナー則  $D_m$  と呼ばれる変動応力振幅下の疲労寿命評価方法である。しかし、疲労損傷度が大きくなれば、疲労

限度以下の応力範囲成分によっても疲労損傷は進行する。このことは、疲労損傷が進行するにしたがって疲労き裂は大きくなり、疲労限度以下の小さい応力範囲まで疲労き裂の進展に寄与するようになることから明らかである。

したがって、マイナー則  $D_m$  では危険側の評価を与えることになる。自動車などの構造物における応力範囲頻度分布の大半はこの疲労限度以下の応力範囲成分によって占められることが多く、そのような応力範囲成分の取り扱いが特に問題となっている。このような疲労限度以下の  $\Delta\sigma_{ns}$  の影響を考慮する方法に修正マイナー則  $D_{mm}$  がある。

修正マイナー則  $D_{mm}$  は、疲労限度以下の  $\Delta\sigma_{ns}$  に対する  $N_i$  を無限とするのではなく、図1に示すように疲労限度以上の  $\Delta\sigma_{ns}$ - $N_f$  の関係を疲労限度以下を求め、それを式(1)に代入することにより疲労寿命を計算することができる。

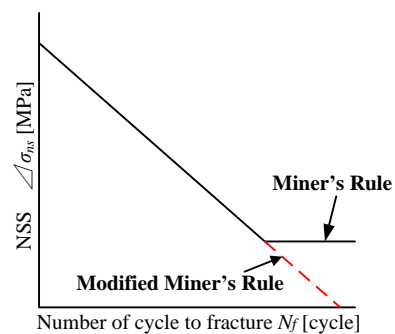


Fig. 1 Miner's rule and Modified miner's rule

## 3. 疲労試験

## 3. 1. 試験概要

せん断が主たる分担荷重となるスポット溶接した引張せん断試験片を作成し、定応力振幅および変動応力振幅疲労試験を行い、疲労寿命の変動を調査した。供試材料は冷間圧延鋼板 SPCE で、板厚は 1.0 mm である。

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。

疲労試験は荷重制御，完全片振りとした．疲労寿命は疲労き裂がナゲット端の内部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とした．

図 2 のように，二段多重変動応力振幅は最小値を揃えた 2 種類の応力を用い，高応力振幅を  $\Delta L_1$ ，低応力振幅を  $\Delta L_2$ ，1 シーケンス内の高応力振幅数を  $n_1$ ，高応力振幅数を  $n_2$  とした．

### 3. 2. 疲労試験結果

一定応力振幅の疲労試験結果を図 3 に示す．疲労限度は  $\Delta\sigma_{ns}=388[MPa]$  で，これを荷重範囲で示すと  $\Delta L=1.2[kN]$  となる．

二段多重変動応力振幅の疲労限度以下の荷重範囲を  $\Delta L_2=1.0, 0.8, 0.6[kN]$  の 3 種類，疲労限度以上の荷重範囲を  $\Delta L_1=2.55[kN]$  の 1 つに設定し，3 種類の二段多重変動応力振幅の疲労試験を行った結果を図 4 に示す． $n_1$  は 100 一定とし， $n_2$  を 100, 1000, 5000, 10000 と変えた．破断繰り返し数と疲労限度以下の応力振幅数との関係を両対数グラフで表すと，本研究の実験範囲内では，両者は比例関係となり，疲労寿命は疲労限度以下の応力振幅数に比例して増加する．

修正マイナー則の疲労寿命予測結果を図 4 に示す．修正マイナー則の予測値は実験値に比較的近い値となっていることが分かる．

疲労限度以下の応力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  $\Delta L_2$  がスポット溶接継手に対して与える影響度を  $\alpha$  とし  $N_1$  を  $\Delta L_1$  が破断までに与えた回数， $N_2$  を  $\Delta L_2$  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 1 に示す．疲労限度以下の応力は，一定応力振幅では疲労損傷に寄与しないが，二段多重変動応力にすることにより確実に疲労損傷に寄与していることが分かる．さらに， $n_2$  の割合や  $\Delta L_2$  の増大と共に疲労損傷度も高まる． $\Delta L_2=1.0[kN]$ ， $n_1/n_2=1/100$  では，疲労限度以下の応力による疲労損傷度が全体の 58.2% となり，支配的になっていることが判る．

$$\alpha = \frac{n_2 / N_2}{n_2 / N_2 + n_1 / N_1} \quad (2)$$

Table1. Degree of damage of stress below the fatigue limit  $\Delta L_1=2.55[kN]$

$\Delta L_2[kN]$	$n_1/n_2$	$\alpha[\%]$	$\Delta L_2[kN]$	$n_1/n_2$	$\alpha[\%]$
0.6	1/1	0.130	0.6	1/50	6.33
0.8		0.500	0.8		20.1
1.0		1.37	1.0		41.0
0.6	1/10	1.13	0.6	1/100	11.9
0.8		4.78	0.8		33.4
1.0		12.2	1.0		58.2

### 4. 結論

二段多重変動応力振幅下におけるスポット溶接継手の疲労限度に対する影響を引張せん断継手を用いて検討した．その結果，疲労限度以下の応力は，変動応力下では疲労損傷に寄与し疲労限度が消失すること，また，修正マイナー則により疲労寿命を予測できることが明らかとなった．

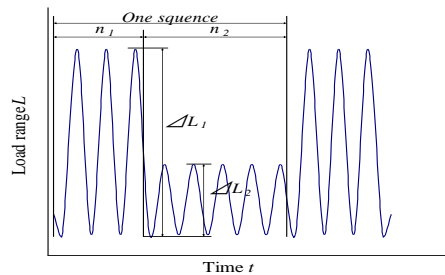
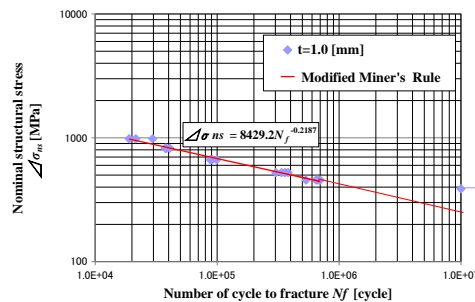
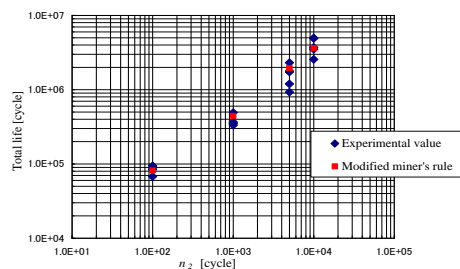


Fig. 2 Multiple two-step variable stress amplitude

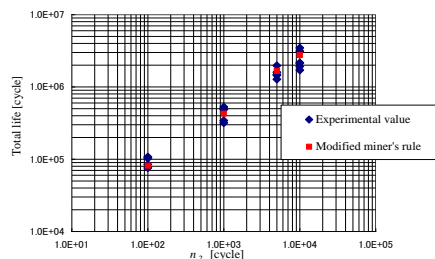


$$(\Delta\sigma_{ns}[MPa]=323 \times \Delta L[kN])$$

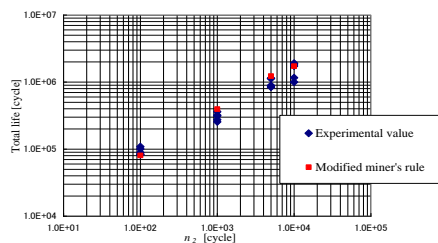
Fig 3. Results of constant stress amplitude fatigue test



(a)  $\Delta L_1=2.55[kN]$ ,  $\Delta L_2=0.6[kN]$



(b)  $\Delta L_1=2.55[kN]$ ,  $\Delta L_2=0.8[kN]$



(c)  $\Delta L_1=2.55[kN]$ ,  $\Delta L_2=1.0[kN]$

Fig. 4 Comparison of the predicted value of the modified miner's law and variable stress amplitude fatigue test results