

二段多重変動振幅荷重下のスポット溶接継手の疲労寿命評価
 - 修正マイナー則による疲労寿命予測 -

Fatigue Life Evaluation of Spot-Welded Joint under Multi Two steps Variable Amplitude Load
 - Prediction of Fatigue Life using Modified Miner's Law -

石岡大誠¹, ○石渡雅洋¹, 高塚千尋², 富岡昇³, 岡部顕史³
 Taisei Ishioka¹, *Masahiro Ishiwata¹, Chihiro Takatsuka², 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. Both of variable amplitude load were above the fatigue limit, and nominal structural stress ratio $\Delta\sigma_{ns2}/\Delta\sigma_{ns1}$ is 1. As a result, in case of amplitude cycle $n_2=10^3$ below, the experimental fatigue life was shown good correspondence to the estimate fatigue life by Modified Miner's law. But, in case of amplitude cycle $n_2=10^4$ above, the experimental fatigue life was not shown it. It is considered that the effect rate α is equal to 99% above, the difference of the estimate fatigue life has occurred.

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。そのため、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。

自動車技術会疲労信頼性部門委員会は公称構造応力を用いたCAEによるスポット溶接構造物の疲労寿命予測手法を提案している⁽¹⁾。また、富岡らは公称構造応力を用いた疲労寿命評価方法を提案し、定振幅荷重下の疲労試験結果より、継手形式・寸法によらず統一的评价できることを示した⁽²⁾。

公称構造応力によ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、定振幅荷重下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、引張せん断荷重を受ける単点スポット溶接継手に対して、公称構造応力比 $\Delta\sigma_{ns2}/\Delta\sigma_{ns1}=1$ とした二段多重変動振幅荷重疲労試験を実施し、その疲労試験結果を公称構造応力範囲-疲労寿命線図を用いた修正マイナー則より算出した疲労寿命予測値との比較を行い、振幅数比 $\beta = n_2/n_1$ によらず疲労寿命が一定となるか検討した。

2. 疲労試験

2.1 試験概要

図 1 に示す単点スポット溶接した引張せん断疲労試験片(板厚 $t=1.0$ mm)を JISZ3138 に準じて作成し、疲労試験を実施した。供試材料は冷間圧延鋼板 SPCE である。疲労試験は荷重制御、片振りで行い、疲労き裂がナゲット端の接合面から発生し板外表面に現れ、圧痕径程度に成長した時を疲労寿命とした。

次に本研究では、図 2(a)のように下限荷重を揃え、高荷重範囲を ΔL_1 、低荷重範囲を ΔL_2 、1 シーケンス内の ΔL_1 、 ΔL_2 の振幅数をそれぞれ n_1 、 n_2 と表した振幅荷重波形、および図 2(b)のように荷重範囲 ΔL を揃えた振幅荷重波形を用いる。

2.2 二段多重変動振幅荷重下における疲労寿命推定

修正マイナー則を用いて二段多重変動振幅荷重下の疲労寿命予測を行う。定振幅荷重疲労寿命線図として、破断繰り

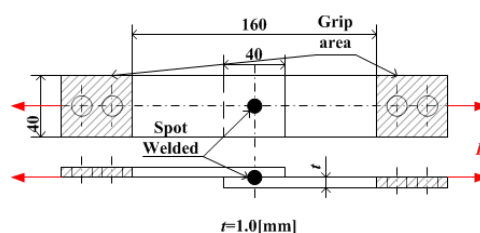
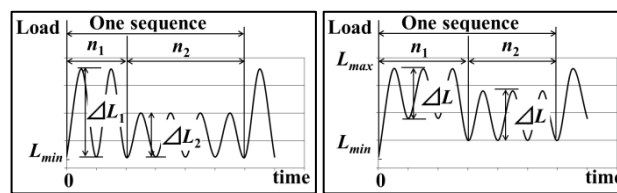


Fig.1 Schematic diagrams of specimen used for fatigue test



(a) Constant minimum load waves (b) Constant load range waves
 Fig.2 Repeating load waves used for fatigue test

返し数 N_f を公称構造応力範囲 $\Delta\sigma_{ns}$ で整理した $\Delta\sigma_{ns} - N_f$ 線図を用いる。ここで、図 2(a)に示すように、下限荷重を一定とした二段多重変動振幅荷重について考える。この変動振幅荷重がスポット溶接継手に作用したとき、その破断繰り返し数を N_{f_total} とすると、破断までに繰り返されたシーケンス数 γ は、

$$\gamma = \frac{N_{f_total}}{n_1 + n_2} \quad (1)$$

となる。修正マイナー則によると

$$\frac{\gamma n_1}{N_1} + \frac{\gamma n_2}{N_2} = 1 \quad (2)$$

が成り立つとき破断する。ここで、 N_1 、 N_2 は荷重範囲 ΔL_1 、 ΔL_2 における定振幅荷重下の疲労寿命である。

修正マイナー則を用いて算出した疲労寿命予測値を $N_{f_estimate}$ とすると、

$$N_{f_estimate} = \frac{N_{f_total}}{\frac{\gamma n_1}{N_1} + \frac{\gamma n_2}{N_2}} = \frac{1 + \beta}{\frac{1}{N_1} + \frac{\beta}{N_2}} = \frac{N_1(1 + \beta)}{1 + \beta \frac{N_1}{N_2}} \quad (3)$$

1: 日大理工・学部・機械 2: 日大理工・院(前)・機械 3: 日大理工・教員・機械

となる。ここで、 $\beta = n_2/n_1$ である。定振幅荷重下の $\Delta\sigma_{ns} - N_f$ 線図の回帰曲線を用いて式(3)を変形すると、

$$\frac{N_{f_estimate}}{N_1} = \frac{1+\beta}{1+\beta\left(\frac{\Delta\sigma_{ns2}}{\Delta\sigma_{ns1}}\right)^b} \quad (4)$$

となる。ここで、 b は実験定数である。二段多重変動振幅荷重下の破断繰返し数比の予測値 $N_{f_estimate}/N_1$ は、公称構造応力比 $\Delta\sigma_{ns2}/\Delta\sigma_{ns1}$ と振幅数 n_1, n_2 の比 β から決まる。このことから、公称構造応力 $\Delta\sigma_{ns1}, \Delta\sigma_{ns2}$ が同一であれば公称構造応力比 $\Delta\sigma_{ns2}/\Delta\sigma_{ns1}=1$ となり、 β によらず $N_{f_estimate}/N_1$ は一定となることが言える。

平均荷重が変わる場合、公称構造応力はグッドマン線図により荷重比 $R=0$ の等価公称構造応力に変換することで、式(4)より疲労寿命が予測できる。

3. 疲労試験結果

定振幅荷重下で得られた疲労試験結果を公称構造応力算出法²⁾によって求めたナゲット端に発生する最大主応力である公称構造応力で整理した結果を図 3 に示す。これにより、疲労試験データは荷重形式、荷重比、板厚によらず統一的に整理されている。図 3 の公称構造応力は、平均荷重の影響を式(5)によって補正した等価公称構造応力 $\Delta\sigma_{ns,R=0}$ である。これは、図 2(b)の場合では、一段目の荷重範囲 ΔL_1 は、二段目の荷重範囲 ΔL_2 に比べて平均荷重が高く、平均荷重の影響を補正する必要があるためである。

$$\Delta\sigma_{ns,R=0} = 2 \frac{\sigma_{nsa} + c\sigma_{nsm}}{1+c} = \frac{1+c}{1-R} \Delta\sigma_{ns} \quad (5)$$

式(5)はグッドマン線図の直線を表し、定数 C は実験定数であり、本研究では 0.1 とした。 σ_{nsa} は応力振幅、 σ_{nsm} は平均応力、 $\Delta\sigma_{ns,R=0}$ は完全片振り $R=0$ の等価公称構造応力である³⁾。

図 2(b)での疲労試験結果を図 4 に示す。本研究の疲労試験では、一段目の荷重範囲 $\Delta L_1=0.85\text{kN}$ (荷重比 $R=0.50$)、二段目の荷重範囲 $\Delta L_2=1.00\text{kN}$ (荷重比 $R=0.02$) とし、式(5)を用いることで $\Delta L=1.00\text{kN}$ ($\Delta\sigma_{ns,R=0}=333\text{N/mm}^2$) としている。1シーケンス内の振幅数 n_1 を 10^2 回一定で振幅数 n_2 を変化させた。また、図 3 を用いて修正マイナー則式(4)より算出した疲労寿命予測値も図 4 に示す。その結果、 $n_2=10^3$ までは疲労寿命予測値と良い対応を示したが、 $n_2=10^4$ 以上では異なる傾向が見られる。これは、二段目の荷重範囲による疲労損傷が関係していると考えられる。一段目の荷重範囲を ΔL_1 、二段目の荷重範囲を ΔL_2 、 ΔL_2 がスポット溶接継手に対して与える影響度を α とすると、

$$\alpha = \frac{N_{f(\Delta L_2)}/N_2}{N_{f(\Delta L_2)}/N_2 + N_{f(\Delta L_1)}/N_1} \times 100 \quad (\%) \quad (6)$$

となる。ここで、 $N_{f(\Delta L_1)}$ は ΔL_1 が破断までに与えた回数、 $N_{f(\Delta L_2)}$ は ΔL_2 が破断までに与えた回数である。式(6)より算出した結果を表 1 に示す。表 1 より、 $\beta=10^2$ 以上では影響度 α は 99% 以上となることから予測値と異なる結果が得られ、式(4)は適用できる範囲があると考えられる。

4. 結 言

公称構造応力比 $\Delta\sigma_{ns2}/\Delta\sigma_{ns1}=1$ とした二段多重変動振幅荷重疲労試験を実施し、振幅数比 $\beta = n_2/n_1$ によらず疲労寿命が一定となるか検討した。

- (1) 振幅数 $n_2=10^3$ までは、 n_2 によらず疲労寿命はほぼ一定の結果が得られ、修正マイナー則による予測値と実験値が良い対応を示している。一方、 $n_2=10^4$ 以降では予測値とは異なる結果となった。
- (2) $n_2=10^4$ 以降では、影響度 α が 99% 以上に相当したため、修正マイナー則との相違が起きたと考えられる。

Table1 The effect of the loading on the fatigue damage of spot-welded joint

	$\Delta\sigma_{ns1}$ [N/mm ²]	$\Delta\sigma_{ns2}$ [N/mm ²]	β [-]	$\Delta\sigma_{ns2}/\Delta\sigma_{ns1}$ [-]	α [%]
TS t=1.0mm	333	333	1	1.00	49.9
			3		74.9
			5		83.3
			7		87.4
			10		90.9
			100		99.0
			1000		99.9

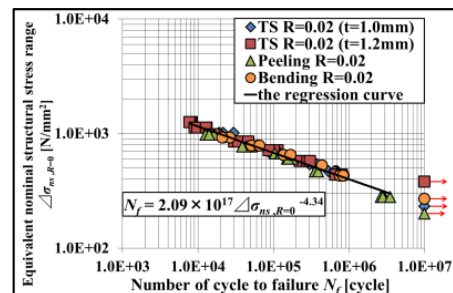


Fig.3 $\Delta\sigma_{ns,R=0} - N_f$

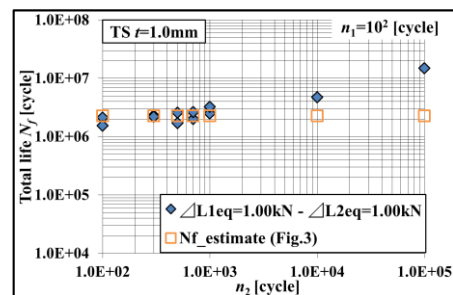


Fig.4 Variable amplitude load fatigue test results

5. 参考文献

- (1) Yuji NAKAHARA, Masayuki TAKAHASHI, Atsushi KAWAMOTO, Masao FUJIMOTO, Noboru TOMIOKA: Method of Fatigue Life Estimation for Spot-Welded Structures, SAE Technical Paper 2000-01-0779 (2000)
- (2) Okabe, A., Tomioka, N., Kaneko, T., A Method of Calculating Nominal Structural Stress of Spot Welding Structure, Transactions of JSAE, Vol.36, No.6, pp.145-150 (2005)
- (3) H.-F. HENRYSSON., Effects of mean stress and crack closure on fatigue life of spot welds, Fatigue Fract Engng Mater Struct 25, pp.1175-1185 (2002)