

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
 - 疲労限度以上の変動振幅荷重 -

Fatigue Life Evaluation of Spot-Welded Joint under Two Steps Variable Amplitude Load
 - Under Variable Amplitude load over Fatigue Limit -

樋口航¹, ○福田真人¹, 堀内大輔¹, 高塚千尋², 富岡昇³, 岡部顕史³
 Kou Higuchi¹, *Manato Fukuda¹, Daisuke Horiuchi¹, Chihiro Takatsuka², Noboru Tomioka³, Akifumi Okabe³

In this paper, the possibility of fatigue life prediction of spot-welded joint under two steps variable amplitude load was investigated. The constant amplitude fatigue tests for the spot-welded tensile shear specimen and peel specimen were carried out and the results were arranged by using the nominal structural stress. As a result of prediction using Miner's rule, the fatigue life of spot-welded joint under two steps variable amplitude load could be estimated by Miner's rule considering fatigue crack closure. Therefore, the nominal structural stress parameter showed the possibility of evaluating the fatigue life of spot welded joint under actual variable load.

1. 緒言

自動車車体の疲労耐久性はスポット溶接部の耐久性に支配されるため、スポット溶接部の疲労寿命評価に関する多数の研究報告がある。しかし、実際の乗用車に作用する荷重は時々刻々変化するランダムな荷重状態であるにもかかわらず、それらが継手の疲労特性に及ぼす影響や寿命評価について検討した報告例⁽¹⁾⁽²⁾は少ない。

岡部ら⁽³⁾は、定振幅荷重下の疲労寿命を公称構造応力により推定することができることを示した。このパラメータを実働荷重下のスポット溶接疲労寿命評価に適用するためには、変動振幅荷重下の疲労寿命評価の可能性を検討することが必要である。

本研究では、スポット溶接した引張せん断継手と剥離継手の二段多重変動振幅荷重疲労試験を実施し、定振幅荷重下での公称構造応力-疲労寿命線図を用いたマイナー則による変動振幅荷重下の疲労寿命推定の可能性について検討した。

2. 疲労試験概要

図 1 に示した単点スポット溶接した引張せん断疲労試験片(板厚 $t=1.0\text{mm}$ と $t=1.2\text{mm}$)と剥離疲労試験片(板厚 $t=1.6\text{mm}$)を冷間圧延鋼板(SPCE)で作成し、定振幅・変動振幅荷重疲労試験を実施した。疲労試験は荷重制御、片振りで行い、疲労寿命は、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、ナゲット径程度に成長した時とした。

振幅荷重波形の模式図を図 2 に示す。図 2(a)は定振幅荷重波形、図 2(b)~(d)は二段多重変動振幅荷重波形を表し、(b)は下限荷重、(c)は平均荷重、(d)は上限荷重をそれぞれ一定とした。二段多重変動振幅荷重疲労試験の場合、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 と表す。

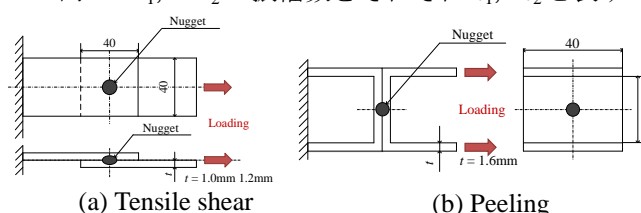


Fig.1 The spot-welded joint for tensile shear and peeling fatigue test

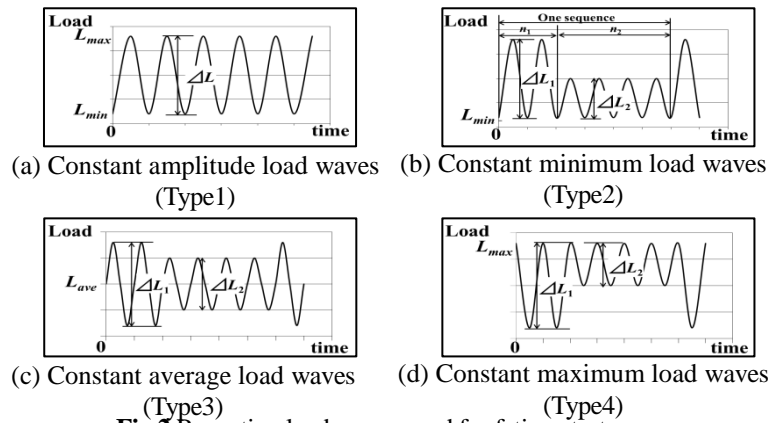


Fig.2 Repeating load waves used for fatigue test

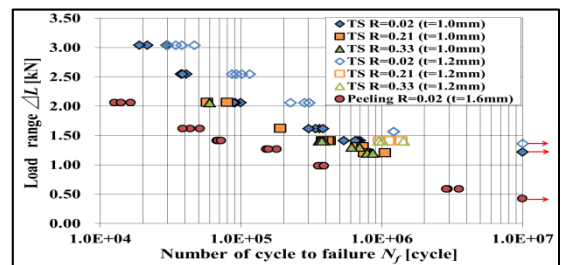


Fig.3 Load range-Number of cycle to failure

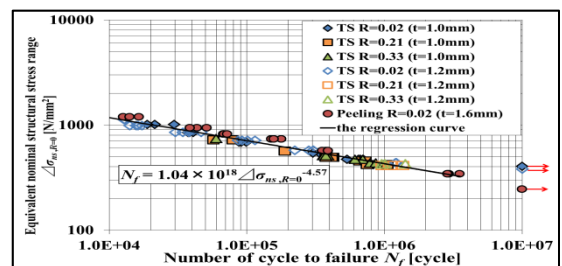


Fig.4 Equivalent nominal structural stress range - Number of cycle to failure

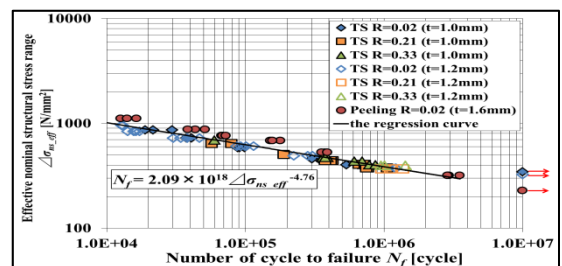


Fig.5 Effective nominal structural stress range - Number of cycle to failure

3. 疲労試験結果

3.1 定振幅荷重疲労試験結果

荷重比 R を変えて定振幅荷重疲労試験を行った結果を図 3 に示す。荷重比 R が大きくなると疲労寿命は低下し、平均荷重の影響が見られる。また、疲労限度は引張せん断疲労試験の場合、1.22kN ($t=1.0\text{mm}$)と 1.36kN ($t=1.2\text{mm}$)であり、剥離疲労試験の場合、0.42kN である。

これを公称構造応力算出法⁽³⁾によって求めたナゲット端の最大主応力である公称構造応力で整理した結果を図 4 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。さらに、図 4 の公称構造応力は、平均荷重の影響を次式⁽²⁾によって補正した等価公称構造応力範囲 $\Delta\sigma_{ns,R=0}$ である。

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

式(1)はグッドマン線図の直線を表す。係数 C は実験定数であり、本研究では、せん断の場合 0.1, 剥離の場合 0.04 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範囲である。また、剥離でも同様である。

H-F. HENRYSSON⁽²⁾ は引張せん断継手のき裂開口力を求める式を提案している。これによると、き裂開口時の公称構造応力 $\sigma_{ns,op}$ は次式で与えられる。

$$\sigma_{ns,op} = (0.15 + 0.69R)\sigma_{nsmax} \quad (2)$$

また、剥離継手のき裂開口時の公称構造応力 $\sigma_{ns,op}$ は次式で与えられる。

$$\sigma_{ns,op} = (0.071 + 0.86R)\sigma_{nsmax} \quad (3)$$

$\sigma_{ns,op}$ は定振幅荷重の最大荷重に対する最大公称構造応力である。き裂が開いている有効公称構造応力範囲を求めると、

$$\Delta\sigma_{ns,eff} = \sigma_{nsmax} - \sigma_{ns,op} \quad (4)$$

となる。

これにより図 3 の疲労試験データを整理した結果が図 5 となり、図 4 とほぼ同様の一本の直線上にデータが分布している。薄板を単点スポット溶接した引張せん断継手では、全寿命の 5~6 割⁽¹⁾⁽²⁾はき裂発生寿命であるため、公称構造応力範囲で疲労試験データを統一的に整理されていると考えられる。

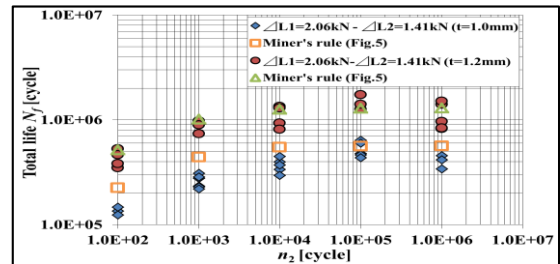
3.2 変動振幅荷重疲労試験結果

引張せん断疲労試験では、高荷重範囲 $\Delta L_1=2.06\text{kN}$ の振幅数 n_1 を 10^2 回一定とし、低荷重範囲 $\Delta L_2=1.41\text{kN}$ の振幅数 n_2 を $10^2, 10^3, 10^4, 10^5, 10^6$ 回と変え、振幅数 n_2 と疲労寿命との関係を求めると図 6 となり、図 5 に示す有効公称構造応力範囲で整理した定振幅荷重疲労試験結果をもとに、マイナー則を用いて疲労寿命を推定した値と実験値を示す。

ここでは、引張せん断疲労試験の代表例として、平均荷重を一定とした場合の結果を図 6 に示す。 $n_2=10^4$ 回 ($n_2/n_1=100$) までは、振幅数 n_2 の増加に伴い疲労寿命も増大するがそれ以上では寿命はほぼ一定であ

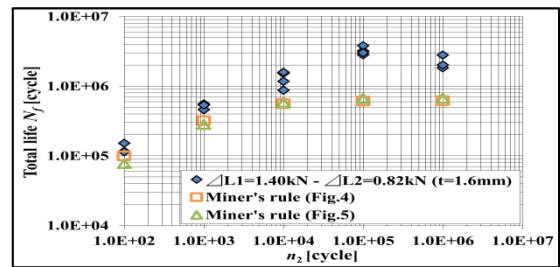
る。そして、マイナー則による疲労寿命推定値と実験値とが良好な対応を示した。このことより、二段多重変動振幅荷重下の疲労寿命推定が可能であると言える。

また、剥離疲労試験の振幅数 n_2 と疲労寿命との関係を求めると図 7 となり、代表例として、下限荷重を一定とした結果を示す。図 6 と同様に $n_2=10^4$ 回までは振幅数 n_2 の増加に伴い疲労寿命も増大する。しかし、 $n_2 \geq 10^4$ 回ではマイナー則とは一致しない結果となった。これは変動振幅荷重によるき裂進展の加速現象が起こらなかったためと考えられる。



Constant average load waves (Type3)

Fig.6 Variable amplitude load fatigue test results (TS)



Constant minimum load waves (Type2)

Fig.7 Variable amplitude load fatigue test results (Peeling)

4. 結言

定振幅荷重疲労試験データを公称構造応力で整理し、これをもとにマイナー則を用いて、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推定が可能であるか検討した。その結果、疲労寿命は、き裂閉口を考慮した有効公称構造応力で整理した疲労寿命線図をもとに、マイナー則より推定できることが明らかとなった。また、公称構造応力は、変動振幅荷重下のスポット溶接継手の疲労寿命評価パラメータとしての可能性が示唆された。

5. 参考文献

- (1) Satoh, T., Abe, H., Yokomine, T. and Nakaoka, T., On the fatigue life of the single spot-welded joint under the 2-steps repeating loads- Comparison of results for mild steel and those for high strength steel. Trans. Japan Welding Soc. 24, 3-9 (1993)
- (2) H-F. HENRYSSON, Effects of mean stress and crack closure on fatigue life of spot welds, Fatigue Fract Engng Mater Struct 25, 1175-1185 (2002)
- (3) Okabe, A., Tomioka, N., Kaneko, T., A Method of Calculating Nominal Structural Stress of Spot Welding Structure, Transactions of JSAE Vol.36, No.6 (2005), pp.145-150