

**連続体損傷力学を用いた軟鋼板疲労寿命予測
— スポット溶接継手への適用に向けた検討 —**
**Fatigue Life Prediction of Mild Steel Sheet Based on Continuum Damage Mechanics
— Examination for application to Spot-Welded Joints —**

○福野泰基¹, 前田一輝¹, 松園俊介², 富岡昇³, 岡部顕史³
 *Taiki Fukuno¹, Kazuki Maeda¹, Shunsuke Matsuzono², Noboru Tomioka³, Akifumi Okabe³

In this paper, fatigue life of the cold-rolled steel thin sheet used in vehicle body was predicted based on damage mechanics. In order to conduct fatigue testing of thin sheet under completely reversed tension and compression, a base material specimen was prepared considering buckling failure due to compressive loading. Tensile test and fatigue test were carried out to get necessary parameter values. Using these parameter values, fatigue life of cold rolled steel sheet was predicted by high cycle fatigue analysis method of 2-scale damage model proposed by Lemaitre. As a result, it was able to predict well.

1. 緒言

自動車車体は薄板スポット溶接構造体で、その疲労耐久性はスポット溶接の耐久性に支配される。車体の疲労耐久性を確保するためには、スポット溶接の疲労寿命特性やその評価法が重要となる。岡部ら¹⁾が提案した公称構造応力による疲労寿命予測法は基本的に疲労亀裂発生寿命が対象である。スポット溶接継手では亀裂進展寿命が全寿命に閉める割合が高く、負荷形式によって両者の寿命比が異なることがある。公称構造応力による疲労寿命評価は簡便で工学的有効性を有するが、更なる精度向上を計るには亀裂発生寿命から進展寿命まで統一的に評価できる手法が望まれる。

連続体損傷力学²⁾では、材料の損傷状態を損傷変数で表し、損傷の生成・成長過程を損傷変数の発展式として定式化し、亀裂の発生・成長・破断に至るまで統一的に評価できる。損傷力学を適用することで、スポット溶接継手の疲労亀裂の発生から成長そして破断に至るまでの寿命を一貫して予測することが可能と考えられる。

本研究では、損傷力学によるスポット溶接の疲労寿命予測法を確立するための基礎研究として、自動車車体に使用されている冷間圧延鋼板の静的引張試験及び疲労試験を実施し、連続体損傷力学に基づいた疲労寿命予測を行なった。

2. 損傷力学による高サイクル疲労損傷評価

2.1 損傷変数

損傷力学では、材料内部に微視的亀裂や空洞などが発生成長し損傷を受けるが、その損傷状態を表す損傷変数は材料のヤング率の変化によって表せる。損傷を受ける前のヤング率を E_0 、損傷を受けたときのヤング率を E とすると、損傷変数 D は、

$$D = 1 - \frac{E}{E_0} \quad (1)$$

となる。

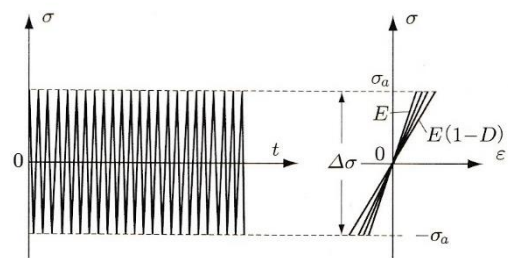


Fig.1 Stress constant amplitude of high-cycle fatigue

2.2 2スケール損傷モデルによる解析²⁾

Lemaitre²⁾は2スケール損傷モデルによる高サイクル疲労の解析を行っている。このモデルによる微視的体積要素の損傷発展式は、

$$\dot{D} = \frac{\sigma_F^2}{2ES} \left[\frac{2}{3}(1+\nu) + 3(1-2\nu) \left(\frac{\sigma_H}{\sigma_F} \right)^2 \right] \dot{\epsilon}_{EQ} H(\epsilon_{EQ} - p_D) \quad (1)$$

と表される。ここで特に、図1のような応力範囲 $\Delta\sigma$ 一定の単軸引張り-圧縮高サイクル疲労の場合を考えてみる。このとき、

$$\frac{\sigma_H}{\sigma_F} = \frac{\sigma}{3\sigma_F}, \quad \dot{\epsilon}_{EQ} = \frac{\dot{\sigma}}{E} \quad (2)$$

となるから、上式はこの場合、

$$\dot{D} = \frac{\sigma_F^2}{2E^2S} \left[\frac{2}{3}(1+\nu) + 3(1-2\nu) \left(\frac{\sigma}{3\sigma_F} \right)^2 \right] \dot{\sigma} H(\epsilon_{EQ} - p_D) \quad (3)$$

と書ける。この式を1サイクルにわたって積分すれば、次式を得る。

$$N_R = N_D + \frac{D_C}{\frac{2\sigma_F^2}{E^2S} \left[(1+\nu)(\sigma_a - \sigma_F) + \frac{1-2\nu}{9\sigma_F^2} (\sigma_a^3 - \sigma_F^3) \right]} \quad (4)$$

- ・破断繰返し数 N_R
- ・損傷発生寿命 N_D
- ・ヤング率 E
- ・疲労破壊時の D D_C
- ・疲労限度 σ_F
- ・応力振幅 σ_a
- ・定数 S
- ・ポアソン比 ν

式(4)の損傷発生寿命 N_D は次式となる。

$$N_D = \frac{p_D}{4\varepsilon_{EQ}} = \frac{E p_D}{4\sigma_a} = \frac{E \varepsilon_D^p \sigma_U - \sigma_F}{4\sigma_a \sigma_{EQ} - \sigma_F} \quad (5)$$

- ・疲労損傷発生のにきい値 p_D ・繰返し累積ひずみ ε_{EQ}
- ・引張塑性ひずみのしきい値 ε_D^p ・引張強さ σ_U
- ・相当応力 σ_{EQ}

3. 静的引張試験

母材の引張強さ σ_U , 損傷が開始する塑性ひずみのしきい値 ε_D^p , ヤング率 E を求めるため, JIS Z 2241 に準じた試験片を板厚 1.6mm の冷間圧延鋼板 (SPCE) で作成し, 静的負荷徐荷の繰返し試験を行った. 応力ひずみ線図を図 2, 徐荷過程から求めたヤング率と塑性ひずみの関係を図 3 に示す. このヤング率を式(1)に代入して求めた損傷変数 D を図 4 に示す. 図 4 より塑性ひずみのしきい値 ε_D^p は 150μ である. また, 非損傷時のヤング率は 207200Mpa , 引張強さは 260Mpa である.

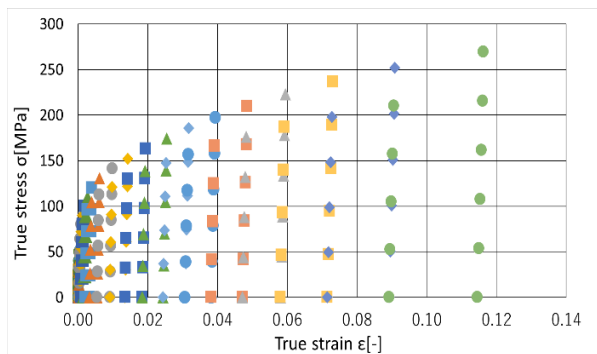


Fig.2 True stress-True strain curve of base material

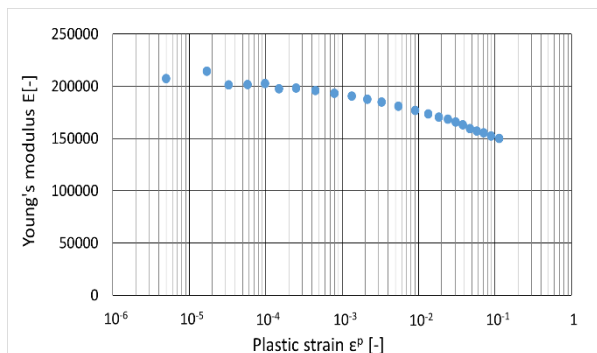


Fig.3 Relationship of plastic strain and Young's modulus

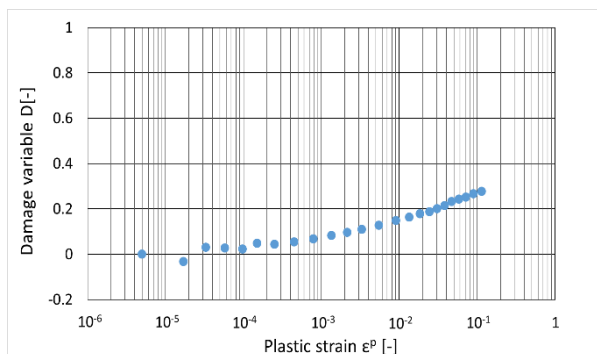


Fig.4 Relationship of plastic strain and damage variable

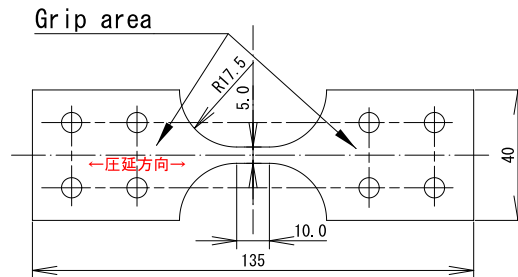


Fig.5 Fatigue test specimen used under completely reversed tension and compression ($t=1.6\text{mm}$)

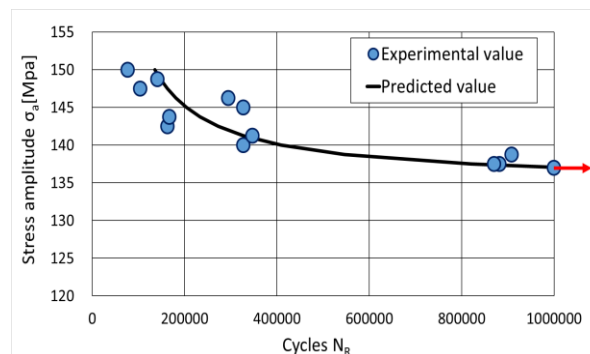


Fig.6 Results of fatigue test and fatigue life prediction

4. 疲労試験

薄板の完全両振疲労試験を実施するために, 圧縮荷重による座屈が起きないように考慮して作成した試験片を図 5 に示す. 材質は冷間圧延鋼板 (SPCE) を使用した. 両振疲労試験結果を図 6 に示す. 未破断寿命を 100 万回とした. 疲労限度 σ_F は 135Mpa であった.

5. 疲労寿命の推定

2 スケール損傷モデルによる高サイクル疲労寿命予測式(4)を用いて, 冷間圧延鋼板の疲労寿命を予測した結果を図 6 に示す. 式(4)に含まれる損傷臨界値 D_C は 0.625 , 定数 S は 4 とした. 式(4)は母材の S-N 曲線をよく表現していることが分かる.

6. 結 言

連続体損傷力学により冷間圧延鋼板の破断繰返し数を予測し, 疲労試験結果と比較した.

- (1) 静的引張負荷による損傷変数はヤング率の変化から求められ, 塑性ひずみのしきい値 ε_D^p は 150μ となった.
- (2) 2 スケール損傷モデルにより冷間圧延鋼板の疲労寿命を良好に予測することができた.

参考文献

- 1) 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)
- 2) 村上澄男, 連続体損傷力学, 第 8 章, 森北出版株式会社, 2008 年