

連続体損傷力学を用いた自動車用薄鋼板の高サイクル疲労損傷評価

High Cycle Fatigue Damage Prediction of Thin Steel Sheet in Vehicle Body Based on Continuum Damage Mechanics

○半沢淳也¹, 伊藤裕司¹, 時澤達哉¹, 木村謙太², 富岡昇³, 岡部顕史³
 *Junya Hanzawa¹, Yuji Ito¹, Tatsuya Tokizawa¹, Kenta Kimura², Noboru Tomioka³, Akifumi Okabe³

In this paper, fatigue life of the cold-rolled steel thin sheet and 590,980MPa class high tensile strength steel sheets used in vehicle body was predicted based on damage mechanics. In order to conduct pulsating fatigue tests of thin sheets under cyclic tension loading, base material specimens were prepared. Tensile test and fatigue test were carried out to get necessary parameter values for high cycle fatigue analysis method of 2-scale damage model proposed by Lemaitre. Using these experimental values of parameters, fatigue life of the steel sheets was able to be predicted by Lemaitre's method.

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占める割合が高く、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用性を有するが、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と 590,980 級高張力鋼板の疲労試験を実施し、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

損傷力学では、材料内部の損傷状態を有効面積の変化で求める。しかし、測定が困難なため、今回はヤング率の変化で表す。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 は次のようになる。

$$D = 1 - \frac{E}{E_0} \tag{1}$$

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表される。

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

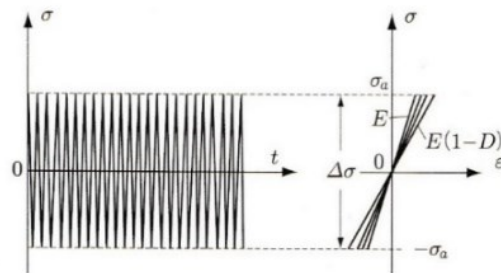


Fig.1 Stress constant amplitude of high-cycle fatigue

ここで、図 1 のような応力範囲 $\Delta\sigma$ —一定の完全両振り高サイクル疲労を考えると、

$$\frac{\sigma_H}{\sigma_F} = \frac{\sigma}{3\sigma_F}, \dot{\epsilon}_{EQ} = \frac{\dot{\sigma}}{E} \tag{3}$$

となる。(2)式はこの場合、

$$\dot{D} = \frac{\sigma_F^2}{2E^2S} \left[\frac{2}{3}(1+\nu) + 3(1-2\nu) \left(\frac{\sigma}{3\sigma_F} \right)^2 \right] \dot{\sigma} H(\epsilon_{EQ} - p_D) \tag{4}$$

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。

$$N_R = N_D + \frac{D_C}{\frac{2\sigma_F^2}{E^2S} \left[(1+\nu)(\sigma_a - \sigma_F) + \frac{1-2\nu}{9\sigma_F^2} (\sigma_a^3 - \sigma_F^3) \right]} \tag{5}$$

式(5)の損傷発生寿命 N_D は(6)式となり、平均応力 $\bar{\sigma}$ の影響を考えた場合は(7)式となる。

$$N_D = \frac{p_D}{4\epsilon_{EQ}} = \frac{E p_D}{4\sigma_a} = \frac{E \epsilon_D^p \sigma_U - \sigma_F}{4\sigma_a \sigma_{EQ} - \sigma_F} \tag{6}$$

$$N_D = \frac{E p_D}{4(\sigma_M - \bar{\sigma})} + \frac{D_C}{\frac{2E^2S}{\sigma_F^2} (\sigma_M - \sigma_F)} \tag{7}$$

- ・破断繰り返し数 N_R ・損傷発生寿命 N_D
- ・ヤング率 E ・疲労破壊時の損傷変数 D_C
- ・疲労限度 σ_F ・応力振幅 σ_a
- ・定数 S ・ポアソン比 ν
- ・疲労損傷発生のしきい値 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} ・範囲応力の最大値 σ_M

3. 静的引張試験

JIS Z 2241 に準じた試験片を冷間圧延鋼板 (SPCE) と高張力鋼板 (SPFC590, SPFC980) で作成し, 静的負荷徐荷の繰り返し試験を行った. 得られたヤング率から式(1)より算出した損傷変数 D を図 2 に示す. 損傷が開始する塑性ひずみのしきい値 ϵ_D^p は $60 \sim 150 \mu$ である. 表 1 に実験結果を示す.

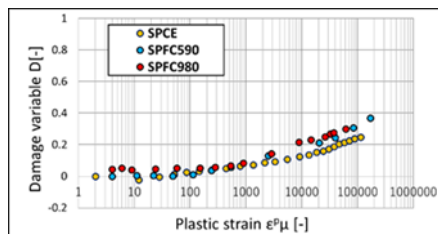


Fig.2 Relationship of plastic strain and damage variable

Table.1 Material constants measured

Material	t [mm]	σ_u [MPa]	E [MPa]	ϵ_D^p [-]	Dc [-]
SPCE	1.6	277	207200	0.00015	0.28
SPFC590	1.0	577	207523	0.00011	0.37
SPFC980	1.0	940	204415	0.00006	0.30

4. 疲労試験

各材料の疲労特性を調べるために, 引張疲労試験(荷重比 $R=0.02$)を行った. 作成した試験片を図3に示す. 材質は冷間圧延鋼板 (SPCE) と高張力鋼板 (SPFC590, SPFC980) を使用した.

本研究では負荷繰り返し数 100 万回の時間強度を疲労限度と定義した. また, 疲労破壊時の損傷変数の臨界値 D_c を求めるために, 静的引張試験の時と同じように, 試験片の中央の表裏に, 負荷方向に単軸ひずみゲージを添付した. 一定の負荷繰り返し数ごとに試験機を停止し, 静的引張の負荷徐試験を行い, ひずみ測定を行い, 応力ひずみ関係によりヤング率を求め, その値を式(1)に代入して損傷変数を計算した.

疲労試験で得られた荷重疲労寿命線図を図 4 に示す. 疲労強度は母材の引張強さにほぼ比例している. 疲労試験より得られた疲労限度を表 2 に示す.

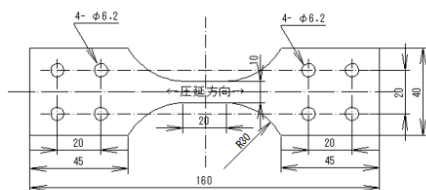


Fig.3 Fatigue test specimen used

5. Lemaitre の疲労損傷モデルによる寿命予測

以上の試験により得られた表 1 と表 2 に示す材料定数を用いて, Lemaitre の 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(7)により, SPCE, SPFC590, SPFC980 材の疲労寿命予測を行った. その結果を図 4 に示す. 予測式(7)に含まれる材料定数 S は表 2 の値を用いた.

また, 図 4 の疲労強度を各々の引張強さで除し, その応力振幅比で整理した結果を図 5 に示す. 引張強さ

の異なる 3 種類の疲労データは, 狭いバンド幅内に分布し, 応力振幅比を用いると引張強さによらず統一的に疲労寿命を評価できる. 図 5 には式 (7) の推定値も示す. 実験定数 S を除く最大応力, 平均応力, ヤング率, 損傷変数それぞれを引張強さで除し推定値を算出した. 材料定数 S は 250[-]とした. 冷間圧延鋼板と高張力鋼板の疲労寿命は荷重比 R が一定の下では, 引張強さが異なっても 1 つの推定式により予測する事ができる可能性が示唆された.

Table.2 Fatigue limit load σ_F

Material	Fatigue limit σ_F [MPa]	S[-]	R[-]
SPCE	115	7	0.02
SPFC590	206	40	0.02
SPFC980	306	200	0.02

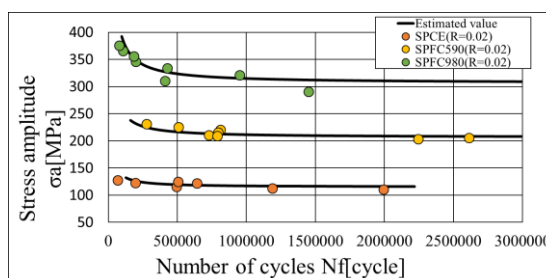


Fig.4 Results of fatigue test and fatigue life prediction (SPCE, SPFC590, SPFC980 R=0.02)

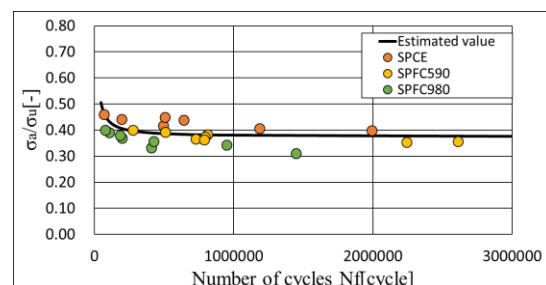


Fig.5 Stress amplitude ratio and fatigue life prediction (SPCE, SPFC590, SPFC980 R=0.02)

6. 結 言

冷間圧延鋼板 SPCE と高張力鋼板 SPFC590, SPFC980 の母材疲労試験を行い, Lemaitre の 2 スケール損傷モデルによる疲労寿命予測と比較した.

- (1) 損傷が開始する塑性ひずみのしきい値は 3 種類の鋼板とも $60 \sim 150 \mu$ の範囲内に存在した.
- (2) Lemaitre の疲労損傷モデルは, 10^6 回の時間強度を疲労限度とする範囲で疲労寿命を推定できた.
- (3) 引張強さと応力振幅の比を用いると, 疲労寿命は引張強さによらず統一的に整理された.

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