

亀裂進展の微視的機構に基づく鋼の疲労寿命予測モデル開発

37-166306 上田航也

指導教員 柴沼一樹 准教授

1. 背景と目的

材料の疲労現象は、機械部品から大規模構造物に至るまで、あらゆる人工物において故障や損傷を引き起こすと言われており、特に橋梁や船舶などの大規模構造物の損傷のほとんどは疲労現象に関わりがあるとされている。また疲労は低い応力条件下でも発生するため、高い引張強度を有する先進材料において、適用拡大のボトルネックであるとされる。材料の疲労現象の原因には微視組織の影響や施工・工作制度、外力変動などが考えられるが、新たな材料の開発においては、微視組織の影響は特に重要であるといえる。

そこで本研究では、疲労損傷による微小亀裂の観察を行うことにより疲労現象の微視的な挙動を明らかにするとともに、微視組織の情報を基に疲労寿命を予測するモデルを構築することを目的とする。本研究では基盤材料として広く用いられるフェライト・パーライト鋼を対象に負荷形態の異なる疲労の命および疲労限の予測を行う。

2. 基礎理論

本研究では田中らの亀裂と粒界の相互作用理論[1]を拡張することで疲労寿命及び疲労限の予測を行う。この理論では、1次元的に並んだ結晶粒に対して、亀裂とすべり帯ならびに粒界の位置によって(a)平衡すべ

り帯、(b)阻止すべり帯、(c)越境すべり帯の3通りに分類し、それぞれの場合において式(1)(2)のように亀裂開口変位の定式化を行っている。

$$\delta = \frac{1}{\pi^2 A} [2\sigma_j^f \ln\left(\frac{c}{a}\right) + \sum_{k=j+1}^n (\sigma_k^f - \sigma_{k-1}^f) g(a, c, l_{k-1})] \quad (1)$$

$$g(x, c, a) = a \ln \left| \frac{(c^2 - a^2)^{\frac{1}{2}} + (c^2 - x^2)^{\frac{1}{2}}}{(c^2 - a^2)^{\frac{1}{2}} - (c^2 - x^2)^{\frac{1}{2}}} \right| - x \ln \left| \frac{x(c^2 - a^2)^{\frac{1}{2}} + a(c^2 - x^2)^{\frac{1}{2}}}{x(c^2 - a^2)^{\frac{1}{2}} - a(c^2 - x^2)^{\frac{1}{2}}} \right| \quad (2)$$

3. 疲労寿命予測モデルの構築

微視的な要素を考慮したモデルの1つである亀裂と粒界の相互作用理論を基に亀裂が発生する2次元の表面モデルと亀裂が進展していく2次元の内部モデルを組み合わせることで3次元的な次子組織の空間分布を考慮したモデルを作り上げた(Fig.1)。微視組織のフェライト粒は円、パーライト粒は楕円形としてモデル化を行っている。亀裂と粒界の相互作用理論では応力を

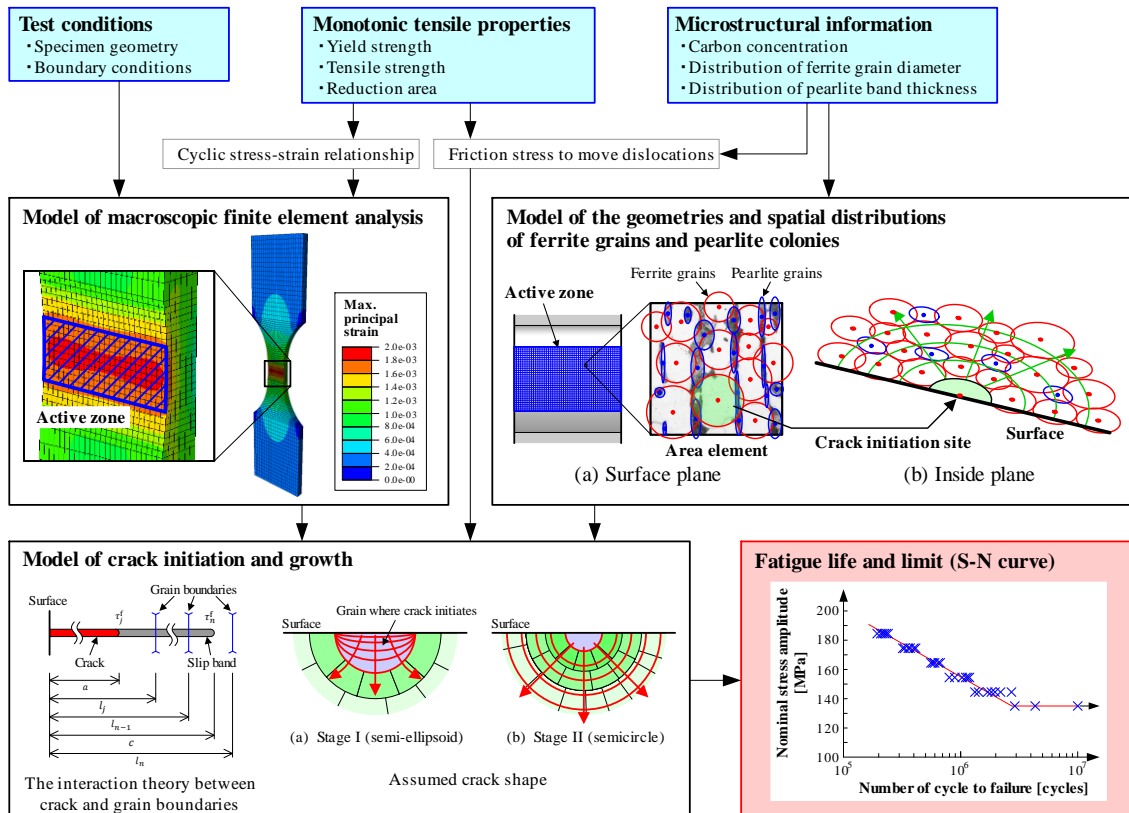


Fig.1 Outline of the proposed model

入力としているが疲労亀裂進展はひずみ支配の現象だと言われているため[2], 本研究では塑性ひずみを相当する応力に変換した相当応力を入力とした. またこの際に, 式(3)で表される繰り返しの応力ひずみ関係を用いることで疲労試験時の有限要素解析からひずみを算出している. なお, この式に必要なパラメータは引張試験から求められる. また, 結晶粒の摩擦力は式(4)で表される Hall-Petch の関係と平均粒径, フェライトとパーライトの硬さの比を用いてもとめた.

$$\varepsilon_{eq}^a = K \left(\frac{\sigma_{eq}^a}{E} \right)^m \quad (3)$$

$$\sigma_{Y0} = \sigma_0 + \frac{k}{\sqrt{d_{ave}}} \quad (4)$$

亀裂の発生判定は亀裂と粒界の相互作用理論に基づき, せん断応力が結晶粒を超えた場合とし, 表面モデルにおいて充填されたフェライト粒全てに対し発生判定を行っている.

表面モデルで発生した亀裂に対して内部進展を考える. 内部モデルでは複雑な結晶粒の配置(Fig.2(a))を Fig.2(b)のような粒の列を作ることで単純化している. この際の変形は Fig.3 のように結晶粒と同等な扇型の一部に変形し, 半周分を 1 つの粒列として平均化している.

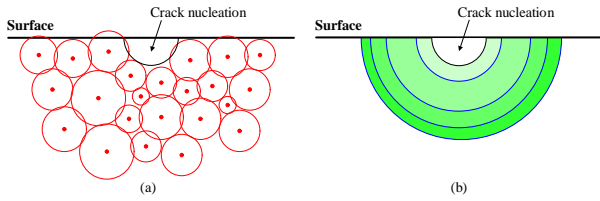


Fig.2 Schematic diagram of grains

内部モデルに於ける亀裂の進展判定は亀裂と粒界の相互作用理論に基づき, 結晶粒の摩擦力を一定, 駆動力が結晶粒によって変化するとした式(5)によって行う. また, 結晶粒界の影響を結晶方位の差によるものであると考え, 粒界を突破することに駆動力が低下すると考えた.

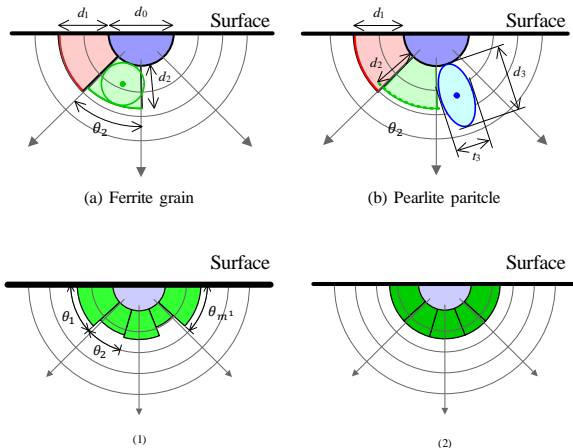


Fig.3 Schematic diagram of assignment of grains

$$\frac{\pi}{2} - \frac{\tau_j^f}{\tau_j^a} \arccos\left(\frac{a}{c}\right) - \sum_{i=j+1}^{\infty} \left(\frac{\tau_i^f}{\tau_i^a} - \frac{\tau_{i-1}^f}{\tau_{i-1}^a} \right) \arccos\left(\frac{l_{i-1}}{c}\right) = 0 \quad (5)$$

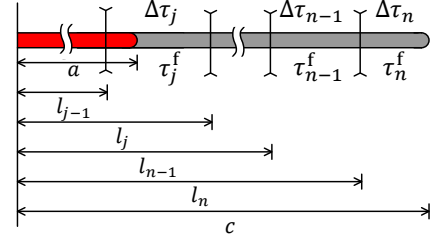


Fig.4 Schematic diagram of the theory of crack and grain boundaries interaction

本モデルでは亀裂長さを与えることで亀裂先端開口変位の値を算出し, その値と Paris 則(6)から疲労寿命の予測を行っている. また亀裂先端開口変位下限界値を導入することにより, 疲労限において亀裂の停留現象が起こることをモデル上に再現した. ここで, 先行研究に基づき[3], 式(7)のように亀裂先端開口変位下限界値は平均粒径の平方根に比例するとした.

$$\frac{da}{dN} = C (\delta^n - \Delta\delta^n) \quad (6)$$

$$\Delta\delta = A \sqrt{d_{ave}} \quad (7)$$

また, 微小な亀裂の亀裂開口について式(8)導入し[4], 亀裂進展に伴い有効応力範囲が減少していくようにしている.

$$\sigma_{op,tr} = \sigma_{min} + (\sigma_{op} - \sigma_{min})(1 - \exp[-k_{\sigma} \cdot (a - a_0)]) \quad (8)$$

また, 3 点曲げのようにひずみ集中の大きい場合は亀裂が半楕円形に進展していくことが知られており, その半楕円形状は式(9)で表される[5]. 内部モデルの結晶充填もこの亀裂形状に合わせた充填方法を使用している(Fig.5).

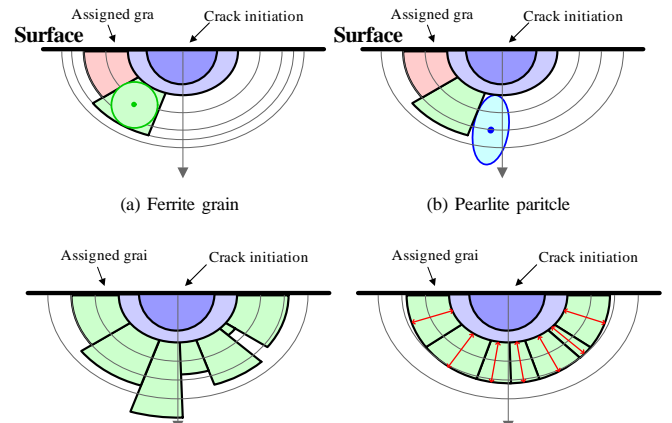


Fig.5 Schematic diagram of assignment of grains

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{a}{b} \right) = -0.06 + 0.47 \left\{ 0.5 \frac{d}{dx} \left(\frac{\sigma(0.5x)}{\sigma(0)} \right) + 0.5 \frac{d}{dx} \left(\frac{\sigma(x)}{\sigma(0)} \right) \right\} \quad (9)$$

また、平滑材場合とは異なり亀裂進展方向に対してひずみが一定でない場合は亀裂進展とともに駆動力が低下してく。これを再現するために、次のように亀裂長さによって駆動力を変更する。まず、亀裂長さと有限要素解析による応力分布と式(9)により楕円亀裂のアスペクト比を決定する。楕円亀裂のアスペクト比と有限要素解析の結果から亀裂先端の K 値を算出する。無限板中の貫通亀裂において同等の K 値となる相当応力 σ_{eff} を導出し、 σ_{eff} を駆動力とする。

4. 亀裂開口観察

疲労試験において圧縮の応力がかかっても微小な亀裂は開口しており、亀裂の進展とともに閉口していくと言われている。この亀裂の開口量を画像相関法を用いて計測した。平滑材疲労試験中に荷重をかけながら試験片表面の画像を取得し、画像相関法からひずみ量を測定した。この一例を Fig.6 に示す。また、その時の応力とひずみの関係を Fig.7 に示す。ここで亀裂が開口することによって試験片のコンプライアンスが変化するために、開口点で応力とひずみの関係が変化する。この原理を利用して開口点を求めた。また、モデルに組み込んだ短い亀裂の開口応力の経験式(7)と実験による開口応力の比較を Fig.8 に示す。これからこの式の妥当性も確認した。

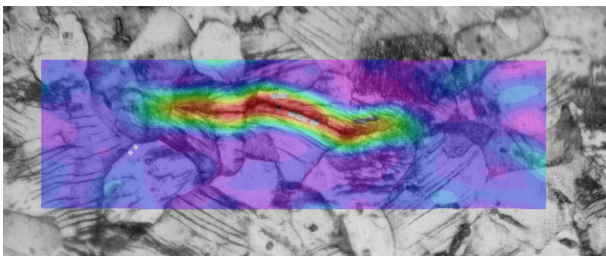


Fig.6 Strain around crack

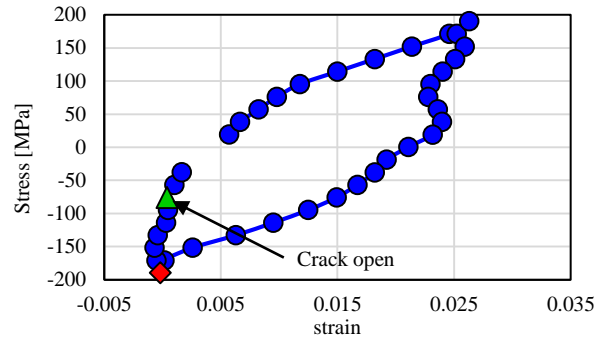


Fig.7 Crack opening stress

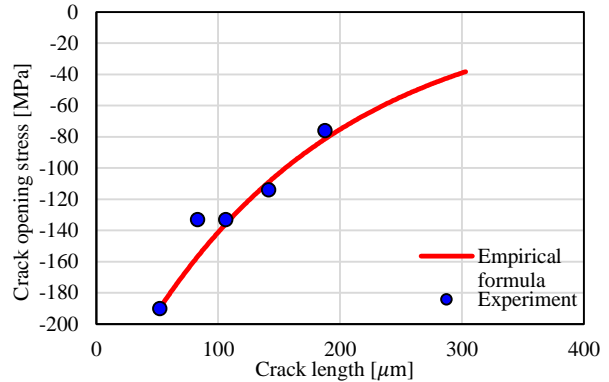


Fig.8 Comparison between experiment and empirical formula

5. 引張及び3点曲げ疲労試験

モデルの妥当性検証のために、引張及び3点曲げの2種類の負荷形態での疲労試験を行った。引張疲労試験は試験片において応力比-1, 20Hzで1種類のノルマ材を含む6種類の鋼種を用いた。3点曲げ疲労試験では応力比0.09, 20Hzで1種類のノルマ材を含む3種類の鋼種で応力集中係数の異なる2種類試験片形状の計6種類のS-N曲線および疲労限を取得した。また、引張疲労試験では、载荷途中に試験片表面を撮影することで、亀裂の発生・進展を観察した。これを Fig.9 に示す。ここから非常に早い段階で亀裂が発生し、第2粒以降で複数のすべり系がアクティブになっていることが確認できる。

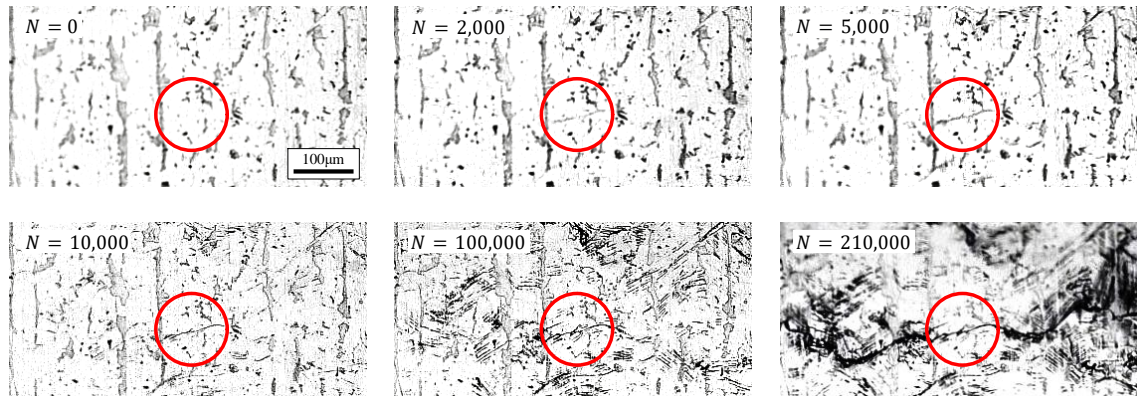


Fig.9 Optical micrographs of crack initiation and growth

6. 疲労試験の再現解析

本モデルの妥当性検証のために、実験結果との比較を行った。ここで、パリス則のパラメータを1鋼種分の疲労試験結果とモデル計算結果の合わせ込みによって同定した。その結果、 $\delta_{th} = 4.1 \times 10^{-4} \times \sqrt{d}$, $n = 2$, $C = 125$ となった。このパラメータを用いて他の5鋼種についてもモデル計算を行い比較したものの一例をFig.10に示す。ここからすべての鋼種でS-N曲線および疲労限に関して非常に良好な精度で予測できていることがわかる。

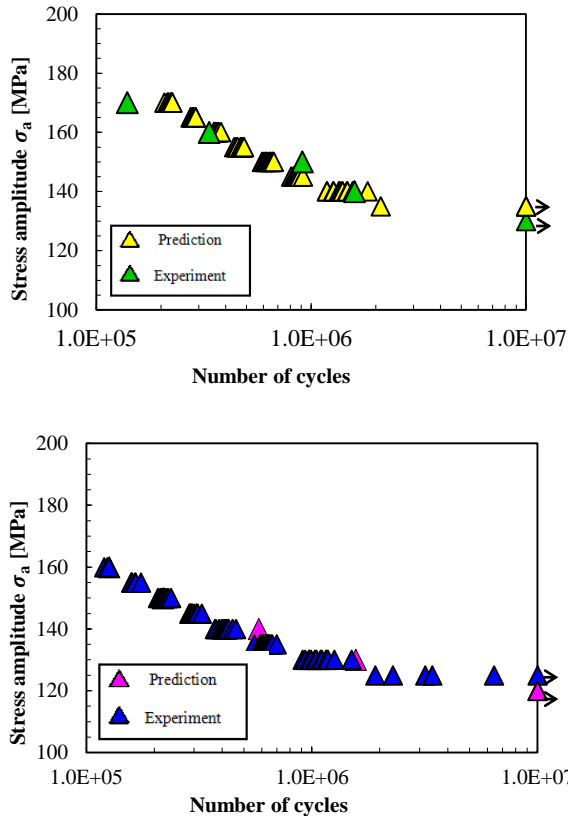


Fig.10 Comparison between experimental and prediction results of SN-curve

また、3点曲げにおいてもこのパラメータを用いて計算を行った。この結果と実験の比較をFig.11に示す。これからS-N曲線および疲労限が非常に良好な精度で予測できていることがわかる。

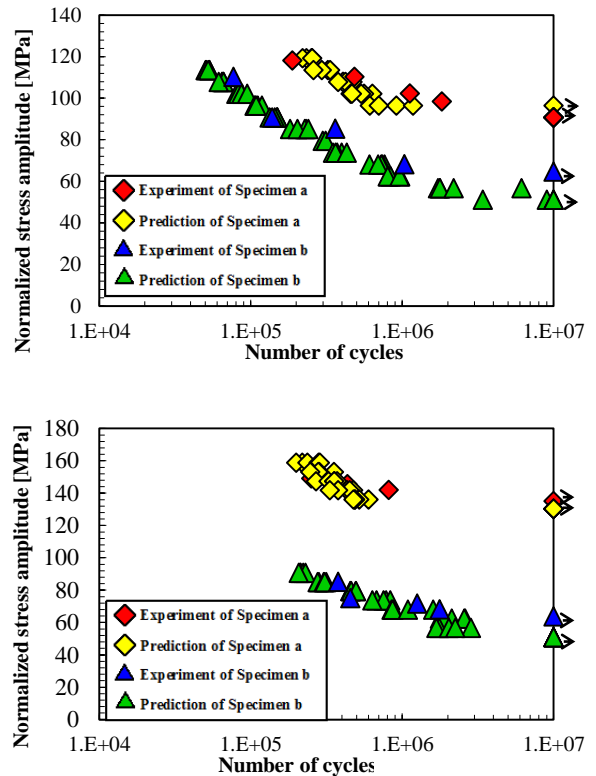
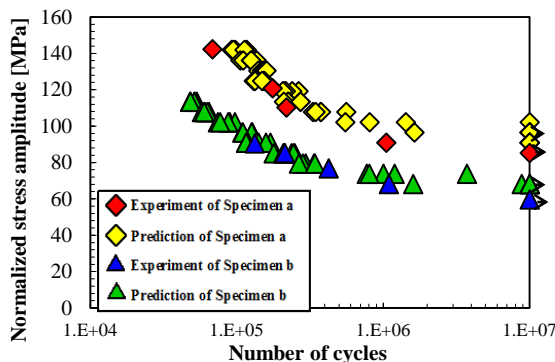


Fig.11 Comparison between experimental and prediction results of SN-curve

7. 結論

本研究では、フェライト・パーライト鋼を対象として、疲労寿命および疲労限を、微視組織情報に基づいて、非常に高い精度で予測することができた。本研究で対象としている本研究で開発したモデルは、構造材料の破壊・損傷に関する現象説明という学術的価値だけでなく、材料開発の設計指針としても非常に強力なツールとなりうるため、ベイナイトや溶接部などのより複雑な材料に対しても本モデルの適用性を拡大することが期待される。

参考文献

- [1] K.Tanaka, Y.Akimiwa, Y.Nakai, R.P.Wei, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 24, Vo.6, pp.803-819, 1986.
- [2] 城野政弘, 宋智浩, 三上省二, 大垣雅由, 機械構造用材料の疲労き裂進展抵抗とき裂開閉鋼挙動, Vol.33, No.367, pp.468-474, 1984
- [3] J. Masounave, J.-P. Bafilon, Effect of grain size on the threshold stress intensity factor in fatigue of a ferritic steel, *Scr. Metall.* 10 (1976) 165-170 [4] bishoukiretunokaikou
- [4] McEvily Aj, Endo M, Murakami Y. On the square root area relationship and the short crack threshold. *Fatigue Fract Eng Mater Struct* 2003; 26(3) 269-278
- [5] Yosuke Anai, Toshio Niwa, Koji Gotoh, PRACTICAL FORMULA OF THE SHAPE EVOLUTION OF A SURFACE CRACK UNDER FATIGUE LOADING, MAE2015-41978, 2005.