

1. 背景および目的

10 回程度以下のひずみの繰り返しで破壊が生じるような極低サイクル疲労の領域において、負荷を変動させた場合の寿命予測を行うことは、大地震時の鋼構造物の安全性を確保する上で重要であると考えられる。しかしながら、そのような領域における寿命予測手法はいまだ確立されておらず、その構築は急務の課題であるといえる。既報¹⁾において、画像計測を用いた新たな低サイクル疲労試験システムを開発し、その有効性を示した。そこで本研究では、その試験システムを用いて鋼素材に数パターンの変動ひずみ振幅を負荷し、低サイクル疲労試験を行った。

2. 試験体および試験システム

試験体にはSM490Aを用い、その形状および寸法を図-1に、引張試験により得た機械的性質を表-1に示す。試験体は板厚12mmの平板で、長手方向中央部で最大のひずみが生じるように、その部分の板厚を滑らかに削り込んだ形状とした。また、表面に傷がなくなるまで载荷軸方向に入念に研磨した。

3. ひずみの変動パターン

試験体に与えたひずみ振幅のパターン図を図-2に示す。パターンAは、一定ひずみ振幅（ ϵ_s ）の中のあるタイミング（ n_L cycle）で大ひずみ（ ϵ_L ）を1サイクルのみ与えるというものである。これにより、大ひずみを導入するタイミングとその大きさが疲労寿命に与える影響を検討した。パターンBは、あるタイミングで一方向に大きな平均ひずみ（ ϵ_{mL} ）を与えるというものである。本研究では $\epsilon_{mL} = 25\%$ と設定し、その影響を検証した。設定したひずみ値および大ひずみを与えるタイミングと試験体の名称を表-2にまとめる。

4. マイナー則の適用性の検討

あるひずみレベル ϵ_i （ただし ϵ_i ：全ひずみ振幅）が単独に繰り返されたときの疲労寿命を N_i 回とし、そのひずみレベルを n_i 回与えたときに破壊したとすると、マイナー則は次式で表すことができる。ここで N_i は、一定ひずみ振幅下の試験結果から求めたき裂発生寿命とひずみ振幅の関係¹⁾であり、Manson-Coffin型の関係式である。

$$D_{Miner} = \sum_i \frac{n_i}{N_i} = 1.0 \quad \text{with} \quad N_i = \left(\frac{C}{\epsilon_i} \right)^{1/k} \tag{1}$$

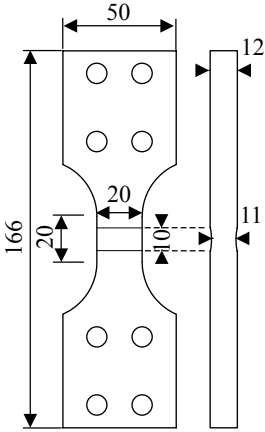


図-1 試験体の形状および寸法（mm）

表-1 供試鋼材の機械的性質

引張試験			
降伏点 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)	破断延性* ϵ_f
371	536	29.1	1.13

* : $\epsilon_f = \ln(100 / (100 - RA))$
RA : Reduction of Area (%)

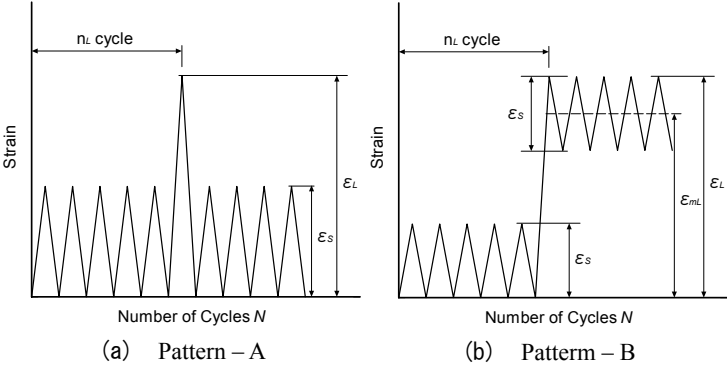


図-2 ひずみ振幅のパターン図

表-2 ひずみパターン

試験体名称	Pattern	ϵ_s (%)	ϵ_L (%)	n_L (cycle)
Va 10-20-cl	A	10	20	1
Va 10-20-cl1				11
Va 10-20-c21				21
Va 15-30-cl		15	30	1
Va 15-30-c6				6
Va 15-30-cl1				11
Va 15-35-cl	B	5	30	1
Vb 10-30-cl				1
Vb 10-30-cl1				11

k : 材料定数 (=0.575), C : 材料定数 (=0.380)

レンジペア法によりカウントしたそれぞれのひずみ振幅 ε_i から等価ひずみ振幅 ε_{eq} を算出し, その等価ひずみ振幅を用いてマイナー則より推定した寿命と試験結果の比較を図-3 に示す. なお, 大ひずみを与えるタイミング (n_L cycle) によりそれぞれのシリーズ内で有意な差はみられなかったため, 図中において結果はシリーズ毎にまとめてプロットした. 全ての試験体において試験結果は推定寿命より短寿命となった. 大ひずみ領域においてマイナー則により寿命を予測した場合, $D_{Miner} < 1.0$ でき裂が発生することとなり, 危険側の寿命評価を与える. したがって, 疲労寿命数回から数十回の領域にマイナー則を適用することは難しいといえる. また図より, 疲労寿命が短くなるほど, つまり与えるひずみレベルが大きくなると, 両者のずれが大きくなることがわかる. そこで, ひずみの最大絶対値 $|\varepsilon|_{max}$ と損傷値 D_{Miner} の関係を調べた. その結果, 図-4 に示すようにひずみの最大絶対値が大きくなると損傷値は小さくなる傾向にあり, 両者の関係性が比較的強いものと考えられる. そこで本研究では, ひずみの最大絶対値の影響を考慮した大ひずみ領域における新たな疲労寿命予測モデルの提案を試みた.

5. 低サイクル寿命予測モデル

Lemaitre²⁾によると, 一軸引張における損傷は次式で与えられる.

$$D_{ductile} = \frac{|\varepsilon|_{max} - \varepsilon_{pD}}{\varepsilon_{pR} - \varepsilon_{pD}} \quad (2)$$

これは, ひずみが損傷発生限界ひずみ ε_{pD} を超えると損傷が生じ, それ以後はひずみと共に損傷も線形に増加するという実験結果に基づいている. ここで破断ひずみ ε_{pR} は破断延性 ε_f (=1.13) とし, 損傷発生限界ひずみは, 引張試験におけるくびれ開始時のひずみ, つまり最大荷重時のひずみ (=0.127) とした. さらに損傷力学において, 繰り返しひずみによる損傷は次式で表される. 疲労寿命が数回から数十回の領域では, 損傷発生寿命 N_0 は非常に小さくなるため, 損傷発生寿命は無視した.

$$D_{cyclic} = \sum_i \frac{n_i - N_0}{N_i - N_0} \approx \sum_i \frac{n_i}{N_i} \quad (3)$$

式(2)(3)が線形結合されると仮定し, 以下の寿命予測モデルを提案した.

$$D = D_{cyclic} + D_{ductile} = \sum_i \frac{n_i}{N_i} + \frac{|\varepsilon|_{max} - \varepsilon_{pD}}{\varepsilon_f - \varepsilon_{pD}} = 1.0 \quad (4)$$

if $|\varepsilon|_{max} \leq \varepsilon_{pD}$ $D_{ductile} = 0$

ここで N_i は, 式(1)に示した一定ひずみ振幅下のき裂発生寿命とひずみ振幅の関係式である.

6. 検証

この提案した寿命予測モデルより推定した寿命と試験結果の比較を図-5 に示す. 図-3 に比べ両者は非常によく一致していることがわかる. したがって式(4)を用いることにより, 大ひずみ領域における変動振幅下の疲労寿命を適切に推定できると考えられ, 本モデルは鋼構造物の極低サイクル疲労破壊を防止するための一手法として非常に有効であるといえる.

参考文献

- 1) 舘石和雄, 判治剛: 画像計測を用いた試験システムによる突合わせ溶接継手の低サイクル疲労強度の検討, 土木学会論文集, No.752/I-66, pp.277-287, 2004.
- 2) Lemaitre, J.: *A Course on Damage Mechanics*, 2nd ed., Springer, 1996.

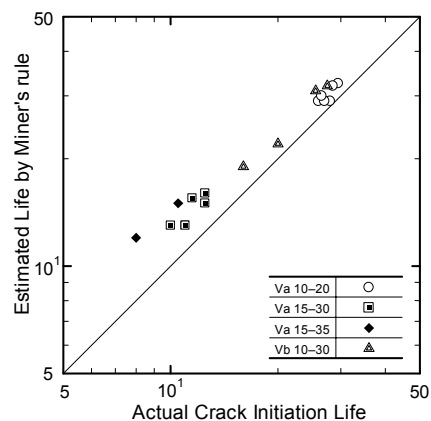


図-3 マイナー則の適用性の検討

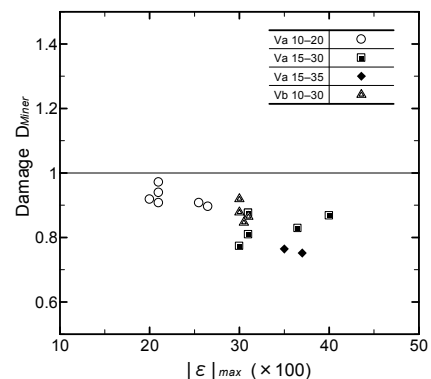


図-4 ひずみの最大絶対値と損傷値の関係

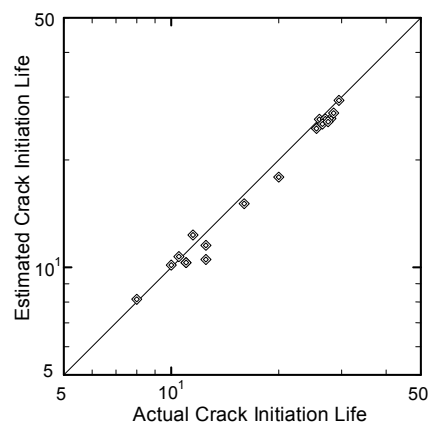


図-5 本モデルの適用性の検討