

遺伝的アルゴリズムの適用による クリープ疲労損傷則の改良検討

近畿大学 [院] 〇高畑 智 近畿大学 時政勝行

1 緒 言

遺伝的アルゴリズム (GA) は生物学的最適化手法のひとつであり、材料強度学の分野でもその応用が期待される課題が少なくない。とくに、複雑な材料損傷モデルを記述する多数の材料パラメータを実験的に決定する場合に有用であると考えられる。筆者らは前報において、Mod.9Cr-1Mo 鋼に関する既提案のクリープ疲労損傷モデルを記述するのに必要な材料パラメータの決定に GA を適用することにより、材料パラメータの決定に必要な試験の種類とその数の削減が可能であることを明らかにした。¹⁾

ここでは、表面き裂測定に基づく余寿命評価法に適用した結果²⁾、更なる改善が必要と判断された Mod.9Cr-1Mo 鋼のクリープ疲労損傷則の改良検討に GA を適用した結果を報告する。

2 既提案クリープ疲労損傷則

筆者らの既提案クリープ疲労損傷則は、二段二重変動ひずみ振幅クリープ疲労試験に代表される変動ひずみ条件下のクリープ疲労試験における余寿命を評価できるポテンシャルを有している。Mod.9Cr-1Mo 鋼と 316LC 鋼のクリープ疲労損傷則の差を二段二重変動ひずみ振幅クリープ疲労試験における余寿命評価の場合について以下に示す。

2.1 Mod.9Cr-1Mo 鋼の場合²⁾ PP 試験のとき、 $\Delta\epsilon_{pp1}$ が n_1 回繰り返されたあと、 $\Delta\epsilon_{pp2}$ が繰り返されたときの余寿命 n_2 は次式で与えられる。

$$\frac{n_2}{N_{pp2}} = (1 - \alpha_2) \frac{\ln(a_f/a_0)_{pp}}{\ln(a_f/a_0)_{pp}} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{n_1}{N_{pp1}} &= \alpha_1 + (1 - \alpha_1) \frac{\ln a_1/(a_0)_{pp}}{\ln(a_f/a_0)_{pp}} \quad \text{for } \frac{n_1}{N_{pp1}} > \alpha_1 \\ \alpha_1 &= (a_0)_{pp} \quad \text{for } \frac{n_1}{N_{pp1}} \leq \alpha_1 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここで、 α_1, α_2 は全寿命 N_{pp1}, N_{pp2} に占めるき裂発生寿命の割合で、次式で計算される。

$$\begin{aligned} \alpha &= C_1 \log \Delta\epsilon_{pp} + C_2 \quad (\Delta\epsilon_{pp} < (\Delta\epsilon_{pp})_{cr}) \\ \alpha &= 0 \quad (\Delta\epsilon_{pp} \geq (\Delta\epsilon_{pp})_{cr}) \end{aligned} \quad (3)$$

また、 N_{pp1}, N_{pp2} は $\Delta\epsilon_{pp1}, \Delta\epsilon_{pp2}$ に対応して次式により計算される寿命である。

$$\Delta\epsilon_{pp} = A_{pp} N_{pp}^{-m_{pp}} \quad (4)$$

より計算される寿命である。

PC 試験、CP 試験あるいは CC 試験のとき、 $\Delta\epsilon_{in1} = \sum \Delta\epsilon_{ij1}$ が n_1 回繰り返されたあと、 $\Delta\epsilon_{in2} = \sum \Delta\epsilon_{ij2}$ が繰り返されたときの余寿命 n_2 は、き裂発生寿命が全寿命に対して無視でき

ると仮定した次式で与えられる。

$$\frac{n_2}{N_{f2}} = \frac{\ln a_{c2}/a_1}{\ln(a_{c2}/a_0)_{\Sigma ij}} \quad (5)$$

$$\frac{n_1}{N_{f1}} = \frac{\ln a_1/(a_0)_{\Sigma ij}}{\ln a_{c1}/(a_0)_{\Sigma ij}} \quad (6)$$

ここで、 N_{f1}, N_{f2} は $\Delta\epsilon_{in1}, \Delta\epsilon_{in2}$ に対応して式(7)、(8)より計算される寿命、 a_{c1}, a_{c2} は $\Delta\epsilon_{in1}, \Delta\epsilon_{in2}$ に対応して式(9)で計算される最終き裂半長である。また、 $(a_0)_{\Sigma ij}$ は $\Delta\epsilon_{in}$ 中の最も大きな $\Delta\epsilon_{ij}$ に対応する $(a_0)_{ij}$ に等しい。

$$\frac{1}{N_f} = \sum \frac{1}{N_{ij}} \quad (7)$$

$$\Delta\epsilon_{ij} = A_{ij} N_{ij}^{-m_{ij}} \quad (i, j = p, c) \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \ln(a_c/a_0)_{\Sigma ij} &= \Sigma(B'_{ij} F_{ij}^{1/m_{ij}} \Delta\epsilon_{in}^{1/m_{ij}}) \\ &\quad / \Sigma\{B'_{ij} F_{ij}^{1/m_{ij}} \Delta\epsilon_{in}^{1/m_{ij}} / \ln(a_f/a_0)_{ij}\} \end{aligned} \quad (9)$$

これから、余寿命 n_2 の決定に必要な材料パラメータは $A_{ij}, m_{ij}, B'_{ij}, (a_0)_{ij}, (a_f)_{ij}, C_1, C_2, (\Delta\epsilon_{pp})_{cr}$ の 23 個である。しかしながら、すべて独立ではなく、次のような関係がある。

$$B'_{ij} = \ln(a_f/a_0)_{ij} / A_{ij}^{1/m_{ij}} \quad (10)$$

$$C_1 \log(\Delta\epsilon_{pp})_{cr} + C_2 = 0 \quad (11)$$

2.2 316LC 鋼の場合³⁾ 式(1)~(9)に示されるように Mod.9Cr-1Mo 鋼に対して構築されたクリープ疲労損傷則では、PP 波形下においてのみき裂発生寿命が全寿命に対して無視できないとして、ある限界以下の大きさのひずみが繰返される場合にはき裂発生寿命の全寿命に対する比 α を、式(3)のように定義した。その後、316LC 鋼の PP 波形および CP 波形に対して検討がなされ、両波形に対して α の存在を考慮したクリープ疲労損傷則が暫定的に構築された。それは、式(3)を CP 波形 ($\Delta\epsilon_{in} = \Delta\epsilon_{pp} + \Delta\epsilon_{cp}$) に対して次のように一般化したものである。

$$\begin{aligned} \alpha &= C_1 \log \Delta\epsilon_{in} + C_2 \quad (\Delta\epsilon_{in} < (\Delta\epsilon_{pp})_{cr}) \\ \alpha &= 0 \quad (\Delta\epsilon_{in} \geq (\Delta\epsilon_{pp})_{cr}) \end{aligned} \quad (12)$$

このような一般化は、PC 波形および CC 波形に対しても成立すると考えられるので、PP 試験によって α の式と限界のひずみ範囲の大きさ $(\Delta\epsilon_{pp})_{cr}$ を定めればよく、簡便化されたモデルであると言える。

3 検討内容

本研究では、Mod.9Cr-1Mo 鋼のクリープ疲労損傷則を改良することを目的として、以下の 3 項目を検討し比較した。

(1) 式(1)~(9)で示されるクリープ疲労損傷則を記述する

材料パラメータの最適決定 (ケース 1)

(2) 316LC 鋼と同じき裂発生寿命則式(12)が成立すると仮定した場合の材料パラメータの最適決定 (ケース 2)

(3) き裂発生寿命則をさらに次式(13)のように一般化した場合の材料定数の最適決定(ケース 3)⁴⁾

$$\left. \begin{aligned} \frac{n}{N_{ij}} &= \alpha_{ij} + (1 - \alpha_{ij}) \frac{\ln(a/a_o)_{ij}}{\ln(a_f/a_o)_{ij}} \\ \alpha_{ij} &= C_{1ij} \log \Delta \varepsilon_{ij} + C_{2ij} \quad (\Delta \varepsilon_{ij} < (\Delta \varepsilon_{ij})_{cr} \text{ のとき} \\ &= 0 \quad (\Delta \varepsilon_{ij} \geq (\Delta \varepsilon_{ij})_{cr} \text{ のとき} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式(13)に含まれる定数は、 C_{1ij} , C_{2ij} , $(\Delta \varepsilon_{ij})_{cr}$ の 12 個である。これらの間には式(11)に示すような 4 つの関係式が成立し、独立な材料定数は 8 個である。

材料パラメータ決定に際しては、8 つの A_{ij} および m_{ij} は既知であるとし、実験で定められた値 (Table 1) を用い、残りの材料パラメータを筆者らの作成した GA プログラムで最適決定した。計算は、148 個の二段二重変動ひずみ波形クリープ疲労試験データ⁵⁾すべてを用いて残りの材料パラメータを同時に決定する方法 (方法 A)、および最初に 75 個の二段二重変動ひずみ波形 PP 試験データを用いて添字 $ij = pp$ の材料パラメータを決定した後順次二段二重変動ひずみ波形 PC 試験データ (15 個)、CP 試験データ (45 個) および CC 試験データ (13 個) を用いて添字 $ij = pc$, cp および cc の材料パラメータを決定する方法 (方法 B) の 2 つの方法で行った。

GA プログラムでは、1 定数あたり 10bit 割り当て、個体群サイズは 50 とし、交叉処理は二点交叉、淘汰処理はルーレット選択を使用した。交叉率は 90%、突然変異率は 1 変数あたり 20% に設定した。計算に際しては、世代ごとに決定した材料パラメータを用いて対応する実験余寿命 n_{2exp} の推定値 n_{2GA} を計算し、推定余寿命と実験余寿命との比の平均値 μ と標準偏差 σ を求め、標準偏差 $\sigma = 0.35$ 以下を適合の指標とした。

また、最終き裂半長 $(a_f)_{pp}$ は 5mm、4 つの初期き裂半長 $(a_o)_{ij}$ ($ij = pp, pc, cp, cc$) については 0.1mm 以下となるよう制限を設けた。

4 結果および考察

Case 1, Case 2 および Case 3 の場合に GA を適用した結果を Table 2 および Table 3 に示す。Table 2 には、初期き裂半長および最終き裂半長の値ならびに推定余寿命と実験余寿命との比の平均値 μ と標準偏差 σ の値をまとめており、方法 B で解析した場合は入力試験データごとに μ と σ の値を示している。また、Table 3 には Case 1 および Case 2 の場合に求めた $(\Delta \varepsilon_{pp})_{cr}$, C_1 および C_2 の値を示している。

Table 2 から明らかなように、Case 3 の場合には $(a_o)_{cc}$ の値が極めて小さい。また、推定余寿命と実験余寿命の対応状況が他のケースに比べてよくない CP 試験データが 2 つ存在することが判明した。したがって、式(13)を仮定した損傷則には更に検討が必要と判断される。

Case 1 の B 方法, Case 2 の A 方法および B 方法の場合には推定余寿命と実験余寿命の対応状況は良好であり、き裂長さ測定に基づく余寿命評価の精度改善につながる可能性がある。

Table 1 The values of A_{ij} and m_{ij} determined by the experiment

A_{pp}	A_{pc}	A_{cp}	A_{cc}	m_{pp}	m_{pc}	m_{cp}	m_{cc}
1.24	2.64	0.454	2.84	1.43	1.08	1.45	1.15

Table 2 The values of $(a_f)_{ij}$, $(a_o)_{ij}$, σ and μ determined by GA analysis compared with the experiment (crack size in mm)

Experimental values		Case 1		Case 2		Case 3	
		A	B	A	B	A	B
$(a_f)_{pp}$	5	5	5	5	5	5	5
$(a_f)_{pc}$	1.67	1.67	0.342	4.14	5	1.43	3.43
$(a_f)_{cp}$	1.82	1.82	1.29	2.35	1.83	2.08	1.15
$(a_f)_{cc}$	1.82	1.82	5	4.98	5	4.06	4.98
$(a_o)_{pp}$	0.023	0.031	0.027	0.044	0.027	0.080	0.027
$(a_o)_{pc}$	0.046	0.042	0.062	0.035	0.015	0.033	0.022
$(a_o)_{cp}$	0.046	0.080	0.072	0.084	0.049	0.072	0.026
$(a_o)_{cc}$	0.046	0.075	0.06	0.036	0.013	0.001	0.0001
σ	PP	0.37	0.35	0.33	0.36	0.37	0.33
	PC			0.26			0.23
	CP			0.35			0.46
	CC			0.30			0.32
μ	PP	1.10	1.10	1.03	1.11	1.08	1.03
	PC			0.99			0.95
	CP			1.15			1.09
	CC			1.29			1.29

Table 3 The value of $(\Delta \varepsilon_{pp})_{cr}$, C_1 and C_2 determined in Case 1 and Case 2 compared with the experiment

Experimental values		Case 1		Case 2	
		A	B	A	B
$(\Delta \varepsilon_{pp})_{cr}$	0.0055	0.0092	0.0096	0.006	0.0096
C_1	-0.920	-0.790	-0.688	-0.739	-0.688
C_2	-2.08	-1.81	-1.39	-1.63	-1.39

5 結言

Mod.9Cr1Mo 鋼のクリープ疲労損傷則を記述する材料パラメータの最適化とき裂発生寿命則の変更検討に GA を適用した。その結果得られた既提案損傷則を記述する材料パラメータの最適値および 316LC 鋼と同じき裂発生寿命則を適用したクリープ疲労損傷則を記述する材料パラメータの最適値は、良好に現存の二段二重変動ひずみ波形実験寿命を推定できる値であることを確認した。

参考文献

- 1) 高畑 智, 時政勝行, 機構論, No.01-1, 431(2001).
- 2) 時政勝行, 宮原光雄, 材料, 48, 144(1999).
- 3) 時政勝行, 宮原光雄, 材料, 51, 314(2002).
- 4) 時政勝行, 高畑 智, 日本材料学会第 39 回高温強度シンポジウム前刷集, 96(2001).
- 5) 宮原光雄: 私信による。