超高温領域のクリープ疲労寿命評価*

菊 地 賢 司^{*1}, 加 治 芳 行^{*1}
武 藤 康^{*1}, 北 出 正 司^{*2}

Life Prediction of Creep Fatigue at Very High Temperatures

Kenji KIKUCHI, Yoshiyuki KAJI,
Yasushi MUTO and Shoji KITADE

Life prediction methods of creep fatigue were investigated to consider applications to Hastelloy XRs at very high temperatures where materials would be damaged severely by creep deformation. The ductility exhaustion rule, coupled with a creep constitutive equation consisting of primary and secondary stages, showed a good prediction of creep-fatigue life as well as the damage-rate equations. The strain range partitioning method was also discussed regarding its possibility for life prediction. The results of these methods were compared with the time fraction rule in conjunction with the Miner's rule. In these experiments, creep tests were done under constant stress condition in air, and low-cycle fatigue tests were carried out with and without a dwell period in vacuum. Creep-fatigue damage was evaluated in the life of low-cycle fatigue tests with a dwell period. All specimens were fabricated from the same hot-rolled plates to reduce scatter in different heat treatments.

Key Words: Life Prediction, Creep, Constitutive Equation, Hastelloy XR, Very High Temperature, Ductility Exhaustion Rule, Damage-rate Equations, Time Fraction Rule, Strain Range Partitioning Method

1. 緒 言

クリープ損傷が支配的になる超高温域で使用する耐熱構造材料の寿命を予測するため、時間分数和則、延性消耗則、損傷速度式およびひずみ範囲分割法のクリープ疲労寿命特性を評価した。用いた材料は、高温ガス炉の一次系冷却材中で環境およびクリープ強度特性を高めたハステロイ XR および XR-II である。寿命の評価は、中間熱交換器センタパイプなどの実構造物で想定される応力緩和挙動を伴う⁽¹⁾、低サイクル疲労でのひずみ保持波について行った。

従来、クリープ温度領域に適用可能な高温構造設計基準としては、ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Case N-47⁽²⁾ があり、設計の上限温度は、Alloy 800 H が 760 °C までとされている。しかし、超高温領域の構造設計では非弾性解析が必要になるとともに、破損に及ぼすひずみ速度の影響が顕著になるため、クリープ損傷を破断時間と応力負荷時間の比である時間分数和で評価した上記基準以外の方法を

検討する必要がある。

そこで、同じ熱処理材より低サイクル疲労およびクリープ試験片を採取して、熱処理材間のばらつきをなくした信頼性の高いデータ、並びに、定応力クリープ試験により得た有用なクリープ変形・破断データに基づき、マイナー則と組合せた時間分数和則⁽³⁾、延性消耗則^{(4)~(6)}、損傷速度式⁽⁷⁾およびひずみ範囲分割法⁽⁸⁾によるクリープ疲労寿命評価結果を比較考察し、超高温領域に適用可能なクリープ疲労寿命評価方法を探った。

2. クリープ疲労寿命評価法

2.1 時間分数和則 クリープ損傷をクリープ破断時間に対する負荷時間の比で表し、疲労損傷に対するマイナー則と合わせて式(1)で示される。クリープ破断時間は、定応力クリープ試験結果に基づく。

$$N_f \left\{ \sum \left(\frac{\Delta t}{T_r} \right) + \frac{1}{N_d} \right\} = 1 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 N_f : ひずみ保持波の破断繰返し数、 Δt : 応力状態 σ の継続時間、 T_r : 応力状態 σ のクリープ破断時間、 N_d : ひずみ保持がない対称三角波の破断繰返し数である。クリープ寿命評価法の検討では、破断時の損傷評価値自体が重要になるが、ここでは、損傷値

* 平成 3 年 9 月 27 日 日立地方講演会において講演、原稿受付 平成 4 年 6 月 1 日。

^{*1} 正員、日本原子力研究所 (●319-11 茨城県那珂郡白方白根 2-4)。

^{*2} 正員、三菱重工業(株)長崎研究所 (●851-03 長崎市深堀町)。

の合計が1になったときに寿命とする。

2・2 延性消耗則 クリープ損傷を破断延性値に対する消耗したクリープひずみの比で表し、疲労損傷に対するマイナー則と組合せた式(2)で表される。クリープひずみ速度はクリープ構成式より求める。

$$N_f \left\{ \sum \left(\frac{\Delta \epsilon^c}{\epsilon_f^c} \right) + \frac{1}{N_d} \right\} = 1 \quad (2)$$

ここに、 $\Delta \epsilon^c$: 応力状態 σ で生じるクリープひずみ、 ϵ_f^c : 応力状態 σ のクリープ破断延性値である。時間分数和則同様、損傷値が1で破損とする。

2・3 損傷速度式 微視き裂長さ a およびキャビティサイズ c が応力履歴に伴って、式(3)および(4)に従って成長し、あるしきい値に達したときに破壊するという考え方である。損傷は非弾性ひずみ速度の関数となる。

$$\frac{1}{a} \frac{da}{dt} = \left\{ \frac{T}{C} \right\} |\epsilon_{in}|^m \cdot |\dot{\epsilon}_{in}|^k \quad (3)$$

$$\frac{1}{c} \frac{dc}{dt} = \left\{ \frac{G}{-G} \right\} |\epsilon_{in}|^m \cdot |\dot{\epsilon}_{in}|^{kc} \quad (4)$$

上段の式は引張領域、下段は圧縮領域に適用する。式(4)は、引張領域で成長したキャビティは圧縮領域で収縮することを意味する。ただし、圧縮領域では、成長はしないとする。破損条件は、微視き裂およびキャビティの成長による損傷の和が1に到達したときとする式(5)⁽⁷⁾を用いる。

$$\frac{\ln(a/a_0)}{\ln(a_f/a_0)} + \frac{\ln(c/c_0)}{\ln(c_f/c_0)} = 1 \quad (5)$$

ここに、 T , C , G , m , k , kc は材料定数である。添字0は初期値、 f は破損時の値を指す。

2・4 ひずみ範囲分割法 ひずみ範囲分割法では、非弾性ひずみ範囲を時間依存性のない塑性ひずみと時

間依存性のあるクリープひずみに区別し、それぞれに引張りおよび圧縮の荷重方向を組合せることにより、4種類の非弾性ひずみ範囲 $\Delta \epsilon_{pp}$, $\Delta \epsilon_{pc}$, $\Delta \epsilon_{cp}$ および $\Delta \epsilon_{cc}$ を考える。そして、これらの非弾性ひずみ範囲に対して、固有の疲労寿命 N_{pp} , N_{pc} , N_{cp} および N_{cc} が存在すると仮定する。ここで検討した寿命評価則を以下に示す。

$$1/N_f = \sum (F_{ij}/N_{ij}) \quad (6)$$

$$F_{ij} = (\Delta \epsilon_{ij}/\Delta \epsilon_{in}), \quad i, j = p, c \quad (7)$$

3. 実 験

材料は、厚さ 20 mm のハステロイ XR および XR-II の圧延材である。クリープ疲労試験は、電気油圧サーボ式の試験機を用いて、標点間 15 mm の軸方向ひずみ制御で行った。高周波誘導により試験片を加熱した。試験温度は 850 および 950 °C であり、雰囲気は 10^{-3} Pa の真空中である。試験片の形状およびサイズ並びに材料の化学成分を図1および表1に示す。

寿命評価の対象とした応力履歴は低サイクル疲労試験であり、サイクル中の最大および最小ひずみ、あるいは引張りおよび圧縮過程におけるひずみ零で 2.5, 5 ないし 30 分間ひずみを一定に保持した。引張りおよび圧縮時のひずみ速度は、850 および 950 °C でそれぞれ 0.5%/s, 1.0%/s である。ひずみ範囲は 0.5, 0.7 および 1.0% である。表2に、ひずみ保持試験条件および結

表 1 化学成分

Hastelloy XR-II													
C	Mn	Si	P	S	Cr	Fe	Mo	W	Co	B	Al	Ti	Ni
0.07	0.86	0.32	<0.001	0.001	21.98	17.70	8.83	0.51	0.05	0.005	0.02	0.01	0.006 Rest

Hastelloy XR													
C	Mn	Si	P	S	Cr	Fe	Mo	W	Co	B	Al	Ti	Ni
0.07	0.95	0.33	<0.001	<0.001	21.98	18.61	9.11	0.49	0.03	0.0002	0.02	0.01	0.006 Rest

(wt%)

表 2 ひずみ保持試験条件および結果

Hastelloy XR II, 850°C									
Symbol	$\Delta \epsilon$ (%)	$\Delta \epsilon_{in}$ (%)	$\Delta \epsilon_e$ (%)	$\dot{\epsilon}$ (%/s)	N_f	Holding time (min)			
TH	1.002	0.794	0.208	0.5	982	5 at tension			
TH	0.688	0.504	0.184	0.5	1342	5 at tension			
TH	0.502	0.330	0.172	0.5	2512	5 at tension			
CH	1.004	0.784	0.220	0.5	1381	5 at compression			
CH	0.690	0.494	0.196	0.5	2155	5 at compression			
CH	0.486	0.292	0.194	0.5	3714	5 at compression			
TCH	0.976	0.899	0.077	0.5	1987	2.5 at each sides			
TCH	0.686	0.626	0.060	0.5	4097	2.5 at each sides			
TCH	0.500	0.450	0.050	0.5	7386	2.5 at each sides			

Hastelloy XR, 950°C									
Symbol	$\Delta \epsilon$ (%)	$\Delta \epsilon_{in}$ (%)	$\Delta \epsilon_e$ (%)	$\dot{\epsilon}$ (%/s)	N_f	Holding time (min)			
TH	0.715	0.548	0.167	1.0	560	5 at tension			
TH	0.708	0.546	0.162	1.0	645	30 at tension			
TH	0.682	0.438	0.244	1.0	1150	5 at $\epsilon=0^+$			
CH	0.701	0.552	0.149	1.0	1160	5 at compression			
CH	0.701	0.558	0.143	1.0	1040	30 at compression			
CH	0.683	0.443	0.240	1.0	1220	5 at $\epsilon=0^-$			
TCH	0.718	0.687	0.031	1.0	2440	2.5 at each sides			
TCH	0.688	0.482	0.206	1.0	4240	2.5 at $\epsilon=0^+$ & 2.5 at $\epsilon=0^-$			

0^+ : at zero strain in pulling, 0^- : at zero strain in pushing

(a) 疲労試験片

(b) クリープ試験片

図 1 試験片形状およびサイズ

表 3 塑性-クリープサイクル試験条件および結果

Hastelloy XR-II, 850°C							Hastelloy XR, 950°C						
Symbol	$\Delta \epsilon$ (%)	$\Delta \epsilon_{in}$ (%)	$\Delta \epsilon_e$ (%)	$\dot{\epsilon}$ (%/s)		N_f	Symbol	$\Delta \epsilon$ (%)	$\Delta \epsilon_{in}$ (%)	$\Delta \epsilon_e$ (%)	$\dot{\epsilon}$ (%/s)		N_f
				push	pull						push	pull	
pp	2.012	1.578	0.434	0.5	0.5	596	pp	1.983	1.627	0.356	3.0	3.0	614
pp	1.032	0.718	0.314	0.5	0.5	2570	pp	1.000	0.730	0.270	1.0	1.0	2172
pp	0.706	0.446	0.260	0.5	0.5	5497	pp	0.691	0.425	0.266	1.0	1.0	3527
pp	0.514	0.254	0.260	0.5	0.5	18350							
cc	2.001	1.700	0.301	0.01	0.01	561	cc	2.000	1.867	0.133	0.01	0.01	390
cc	1.002	0.786	0.216	0.01	0.01	2616	cc	1.003	0.855	0.148	0.01	0.01	1351
cc	0.698	0.485	0.212	0.01	0.01	4650	cc	0.704	0.554	0.150	0.01	0.01	3278
cc	0.505	0.295	0.210	0.01	0.01	15350							
cp	2.004	1.650	0.354	0.01	0.5	182	cp	2.030	1.843	0.189	0.01	3.0	76
cp	1.000	0.756	0.244	0.01	0.5	610	cp	1.007	0.780	0.227	0.01	1.0	234
cp	0.690	0.449	0.241	0.01	0.5	1530	cp	0.707	0.533	0.174	0.01	1.0	487
cp	0.505	0.270	0.235	0.01	0.5	3620							
pc	2.010	1.640	0.370	0.5	0.01	341	pc	2.040	1.780	0.260	3.0	0.1	95
pc	1.004	0.746	0.258	0.5	0.01	1095	pc	1.012	0.768	0.244	1.0	0.1	533
pc	0.705	0.439	0.256	0.5	0.01	2263	pc	0.708	0.466	0.242	1.0	0.1	881
pc	0.500	0.260	0.240	0.5	0.01	6655							

果を示す。TH は引張応力側、CH は圧縮応力側および TCH は両側でのサイクル中ひずみ保持を指す。また、 $\Delta \epsilon$ はサイクル中の全ひずみ範囲、 $\Delta \epsilon_{in}$ は非弾性ひずみ範囲、 $\Delta \epsilon_e$ は弾性ひずみ範囲および $\dot{\epsilon}$ はひずみ速度を、並びに引張りおよび圧縮過程における全ひずみ零のひずみ保持波を ϵ^+ および ϵ^- で表す。

損傷速度式およびひずみ範囲分割法では、パラメータを決定するため、時間依存性が無視できる速いひずみ速度と時間依存性を示す遅いひずみ速度を組合せたいわゆる塑性-クリープサイクル試験が必要になる。表 3 にその条件および結果を示す。pp は引張りおよび圧縮過程とも塑性ひずみサイクル、pc は引張過程が塑性ひずみおよび圧縮過程がクリープひずみサイクル、cp は引張過程がクリープひずみおよび圧縮過程が塑性ひずみサイクル、cc は引張りおよび圧縮過程ともにクリープひずみサイクルである。

時間分数和則および延性消耗則で用いるひずみ保持がない場合の疲労寿命 N_f は、pp 波の $\Delta \epsilon_{in}$ および $\Delta \epsilon_e$ と破損繰返し数の関係より定式化したハステロイ XR-II の式(8)、ハステロイ XR の式(9)より求めた。

$$\Delta \epsilon = 48.6 N_f^{-0.538} + 1.12 N_f^{-0.157} \quad \text{..... (8)}$$

$$\Delta \epsilon = 185 N_f^{-0.733} + 1.08 N_f^{-0.174} \quad \text{..... (9)}$$

定応力クリープ試験は、レバー式の試験機を用いて、標点間体積が変形中にも一定に保たれるという仮定のもとに、分銅の重さを調節して空气中 850, 950 °C で行った。破断時間および破断延性値などのクリープ試験結果を表 4 に示す。

低サイクル疲労試験における破損の繰返し数 N_f は、定常状態の最大応力値より 25% 低下したときと定義した。また、寿命評価に際して、ひずみ保持波のクリープ損傷は、 $N_f/2$ 時の応力-ひずみ波形で代表させ

表 4 クリープ試験条件および結果

Temperature (°C)	Stress (MPa)	Time to Rupture(hr)	Strain at failure(%) ¹	Reduction of area(%) ²
850	58	3200	26	71
850	90	200	53	177
850	120	45	64	231
850	170	7.6	72	232
850	200	2.3	68	211
850	250	0.8	68	196
950	24	1220	42	40
950	41	164	42	68
950	49	76.5	51	89
950	62	31.0	67	118
950	78	10.1	67	134
950	92	5.0	72	170
950	120	1.2	66	183
950	150	0.4	65	163

1: $\ln(l_f/l_0)$, l_f : elongation at failure, l_0 : elongation before test

2: $\ln(A_0/A_f)$, A_f : area after test, A_0 : area before test

た。

4. 寿命評価結果

4.1 時間分数和則 クリープ損傷が支配的になる超高温域では、定荷重ではなく、定応力クリープ試験より破断時間を求めることが必要である。破断時間 T_r [h] と負荷応力 σ [MPa] の関係を図 2 に示す。時間分数和則による実際の寿命 $N_{f,r}$ と予測寿命 $N_{f,p}$ の関係を図 3 に示す。850 °C の引張応力下でひずみを保持した TH 波の場合に、最大ファクタ 3 の長寿命を予測し、損傷の過小評価となった。TCH 波の両側保持の場合には、いずれも予測値以上の寿命を示した。圧縮応力は相当応力換算で評価した。クリープ損傷は、ひずみ保持中のみ評価し、速度の大きいひずみ変動部のクリープ損傷は、考慮していない。

4.2 延性消耗則 クリープひずみ速度は、疲労

試験と同じ熱処理材のクリープ変形曲線より定式化した式(10)のクリープ構成式および式(11)よりひずみ硬化則を用いて計算した。

$$\epsilon^c = \epsilon_t \{1 - \exp(-rt)\} + \dot{\epsilon}_m t \quad \cdots \cdots (10)$$

$$\dot{\epsilon}^c = \epsilon_t r \exp(-rt) + \dot{\epsilon}_m \quad \cdots \cdots (11)$$

ここに、 ϵ^c はクリープひずみ、 t は時間 [h] である。各係数を表 5 に示す。定応力クリープ破断試験の標点間変位より求めた破断延性値 $\epsilon_f^c [= \ln(l_f/l_0)]$ を図 4 に示す。延性消耗値 D_c の計算手順を図 5 に示す。応力緩和中の時間ステップ Δt 間 (応力レベル σ) に生じるクリープひずみの増分 $\Delta \epsilon^c$ は、クリープひずみ速度 $\dot{\epsilon}^c$ と

図 2 クリープ破断時間

図 3 時間分数和則

図 4 破断延性値

Δt の積で与えられ、損傷のひずみ速度依存が考慮されている。延性消耗則による実際の寿命 $N_{f,r}$ と予測寿命 $N_{f,p}$ の関係を図 6 に示す。非安全側に対する予測の精度は、ファクタ 2 であり、時間分数和による寿命予測より安全側の寿命予測を示した。ただし、波形間の予測範囲のばらつきは同程度といえる。また、時間分数和則と同様に 850 °C の TH 波で損傷の過小評価となった。TCH 波では、損傷を過大に評価する結果が得られた。表 2 および表 3 に示すように、対称三角波である pp 波、cc 波および TCH 波は同じ非弾性ひずみに対する N_f がほぼ同じであることから、TCH 波では引張圧縮のひずみ保持中に変形の回復が生じていることを示唆していると考えられる。この現象は、時間分数和則による評価結果でも見られるが、延性消耗則により物理的意味の理解が可能となった。なお、クリ

表 5 クリープ構成式の係数

$$\epsilon^c = \epsilon_t \{1 - \exp(-rt)\} + \dot{\epsilon}_m t$$

parameters	XR II, 850°C	XR, 950°C
ϵ_t	$1.83 \times 10^{-2} \exp(0.0055 \sigma)$	$4.35 \times 10^{-2} \exp(0.0016 \sigma)$
r	$9.41 \times 10^{-4} \exp(0.0384 \sigma)$	$5.35 \times 10^{-3} \exp(0.0575 \sigma)$
$\dot{\epsilon}_m$	$1.18 \times 10^{-15} \sigma^{6.20}$	$3.30 \times 10^{-11} \sigma^{4.85}$
t (h), σ (MPa)

図 5 延性消耗値の計算手順

図 6 延性消耗則

ープ損傷は時間分数和則と同様にひずみ保持中のみ考慮した。

4.3 損傷速度式 材料定数の決定に際して次の仮定をした。

- pp 波および cc 波では、引張応力により成長したキャビティは圧縮応力により収縮する。
- pc 波ではキャビティは成長しない。
- cp 波ではキャビティが存在して成長する。
- クリープ破断時間は式(12)で示される定常クリープひずみ速度によるキャビティの成長に支配される。

$$\varepsilon_{in} = \dot{\varepsilon}_m t \quad \dots\dots\dots (12)$$

したがって、クリープ試験より定まる係数 kc の決定⁽⁷⁾に際しては、定常クリープひずみ速度のみが考慮される。 N_f は式(13)で与えられる。

$$N_f = 1/(d_r + d_c) \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$d_r = \frac{4A}{m+1} \left(\frac{\Delta\varepsilon_{in}}{2} \right)^{m+1} \dot{\varepsilon}_{in}^{k-1} \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$d_c = C_g \int |\varepsilon_{in}|^m \cdot |\dot{\varepsilon}_{in}|^{kc} dt \quad \dots\dots\dots (15)$$

ここで、

$$A = (T + C)/2 \ln(a_f/a_0)$$

$$C_g = G/\ln(c_f/c_0)$$

積分は、ひずみ保持中について行った。したがって、

表 6 損傷速度式のマテリアル定数

Parameters	XR-II, 850°C	XR, 950°C
A	5.47	0.444
m	0.839	0.389
k	1	1
T/C	1	1
C _g	53.1	7.26
kc	0.836	0.828

strain(mm/mm), time (h)

図 7 損傷速度式

$\dot{\varepsilon}_{in}$ はひずみ保持中の応力緩和速度とヤング率より与えられる。計算に用いたヤング率は 850, 950 °C においてそれぞれ 135, 128 GPa である。以上の考え方より得られた材料定数を表 6 に示す。係数 k が 1 であることより、微視き裂の成長による損傷は、式(14)より明らかに、非弾性ひずみ範囲と破損繰返し数との関係より定まる。損傷速度式による実際の寿命 $N_{f,r}$ と予測寿命 $N_{f,p}$ の関係を図 7 に示す。非安全側となる予測の精度はファクタ 3 で、時間分数和則と同じ精度となったが、CH 波で生じている点が異なる。これは、時間分数和則および延性消耗則では相当応力換算で考慮した圧縮ひずみ保持中のクリープ損傷を、ここでは考慮していないためである。また、TCH 波では逆に損傷の過大評価は見られず、波形間による寿命予測精度は時間分数和則および延性消耗則に比較して高くなった。これは、引張領域で成長したキャビティが圧縮領域で収縮することを考慮したことによる。

4.4 ひずみ範囲分割法 低サイクル疲労試験における、非弾性ひずみ範囲 $\Delta\varepsilon_{in}$ と固有の疲労寿命 $N_{ij}(i, j=c, p)$ の関係を図 8 に示す。ハステロイ XR-

図 8 非弾性ひずみ範囲と固有の疲労寿命

図 9 ひずみ範囲分割法

IIでは,

$$\Delta \varepsilon_{in} = 48.7 N_{pp}^{-0.538} \dots\dots\dots (16)$$

$$\Delta \varepsilon_{in} = 66.1 N_{pc}^{-0.644} \dots\dots\dots (17)$$

$$\Delta \varepsilon_{in} = 47.2 N_{cp}^{-0.651} \dots\dots\dots (18)$$

$$\Delta \varepsilon_{in} = 50.7 N_{cc}^{-0.537} \dots\dots\dots (19)$$

ハステロイ XR では,

$$\Delta \varepsilon_{in} = 185 N_{pp}^{-0.733} \dots\dots\dots (20)$$

$$\Delta \varepsilon_{in} = 27.6 N_{pc}^{-0.593} \dots\dots\dots (21)$$

$$\Delta \varepsilon_{in} = 34.9 N_{cp}^{-0.687} \dots\dots\dots (22)$$

$$\Delta \varepsilon_{in} = 54.3 N_{cc}^{-0.569} \dots\dots\dots (23)$$

と定式化される。ひずみ範囲分割法による実際の寿命 $N_{f,r}$ と予測寿命 $N_{f,p}$ の関係を図9に示す。引張りおよび圧縮ひずみ保持の場合には、長すぎる寿命予測を行っているが、ファクタ2の精度で寿命予測可能である。しかし、長時間にわたるクリープ変形および破断データが考慮されておらず信頼性に欠けるとともに、ひずみ履歴が閉ループを描かない実際の構造物の寿命予測には応用性が欠ける。

5. 結 論

(1) クリープ損傷が支配的となる超高温領域において、ハステロイ XR のクリープ疲労寿命を評価した結果、損傷のひずみ速度依存性を考慮できる延性消耗則と損傷速度式は、時間分数和則と同等以上の予測精

度を示した。

(2) 両側ひずみ保持波では、変形の回復あるいは、キャビティの収縮によるクリープ損傷の相殺が示唆される。

(3) 圧縮応力によるクリープ損傷を考慮することによりクリープ疲労寿命予測精度の向上が図れる。

(4) ひずみ範囲分割法はファクタ2以内の予測精度を示したが、クリープ変形および破断データが考慮されず信頼性に欠けるとともに実際の応力履歴への応用性に欠ける。

文 献

- (1) 武藤, 圧力技術, 29-3 (1991), 49-53.
- (2) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, C. C. N-47-27, (1988).
- (3) Taira, S, *Creep in structures*, (1962), 96-124, Springer-Verlag.
- (4) Priest, R. H. and Ellison, E. G., *Mater. Sci. Eng.*, 49 (1981), 7-17.
- (5) Wood, D. S., Wynn, J., Austin, C. and Green, J. G., *Fatigue Fract. Eng. Struct.*, 11-5 (1988), 371-381.
- (6) Zamrik, S. Y. and Davis, D. C., *J. Pressure Vessel Technology*, 113 (1991), 180-186.
- (7) Majumdar, S. and Maiya, P. S., *Inelastic Behavior of Pressure Vessel and Piping Components*, PVP-PB-028, (1978), 43-54.
- (8) Manson, S. S., *ASTM STP*, 520 (1973), 744-782.