疲労損傷パラメータを用いた寿命予測

正員 二 瓶 正 俊* P. Heuler**

Ch. Boller*** T. Seeger***

Fatigue Life Prediction by Use of Damage Parameters

by Masatoshi Nihei, Member P. Heuler Ch. Boller T. Seeger

Summary

Cyclic stress-strain curves, strain-life curves, and notch evaluation procedure are the basic features of the local strain concept which allows predictions of initiation lives for fatigue cracks of an engineering size of the order of 0.5 mm~1 mm. For variable amplitude loading situations, the cumulative damage rule has also to be adopted mostly being a linear damage rule because of a lack of known shortcomings. Under constant amplitude loading and particularly for variable amplitude loading histories following a stress-strain path on a cycle-by-cycle basis, hysteresis loop with varying values of mean stress and mean strain have to be evaluated with respect to their damage contribution based on an appropriate strain-life curve.

In common practice, this is carried out by use of the damage parameters. In this report, the capability and accuracy of several damage parameters to predict the mean stress effect on fatigue life of smooth specimens are evaluated using the results of strain controlled fatigue tests with and without mean strains and mean stresses. By combining two proposals from the literature, an improved damage parameter is obtained and presented.

記 号

σ : 応力

ε : 歪

σ_f', b : $\varepsilon_{ea} = \sigma_f' / E \cdot (2N_A)^b$ の係数および指数

ε_f', c : $\varepsilon_{pa} = \varepsilon_f' (2N_A)^c$ の係数および指数

K', n' : $\sigma_a = K' \varepsilon_{pa}^{n'}$ の係数および指数

S : 公称応力

E : 縦弾性係数

N_A : き裂発生寿命

$P_{SWT}, \varepsilon_{eq}, Z_d, A_H, A_T, P_K, P_{eff}, P_{HAI}$: 本報告で用いた
疲労損傷パラメータ

k, γ : 材料定数

R : 応力比 ($=\sigma_{min}/\sigma_{max}$)

K_t : 応力集中係数

P_E : 実験データから得られる疲労損傷パラメータの
値

P_R : 両振り疲労データから求めた定数を用いて得ら
れる予測値

δ : 伸び

Δ : 範囲

添 字

max : 最大, min : 最小, a : 振幅, m : 平均, e : 弾
性, p : 塑性

1 ま え が き

近年、コンピュータ技術の発達に伴い、各種の疲労強度評価システムが開発されている。これらのシステムでは従来からの公称応力に基づく評価と、Topper らが提案した局所応力に基づく評価とが、それぞれ用いられ、対象構造物により使い分けられている。

後者の局所応力概念は、材料の繰返し応力-歪曲線、歪-疲労寿命曲線および切欠部の応力-歪関係が求まれば、小形平滑材の疲労データから構造物の寿命予測ができ、より汎用性のある概念と考えられ、最近の海洋構造物の疲労設計規程等にも取り入れられている。この概念を用いて、変動荷重下で疲労損傷を受ける構造物の寿命予測もまた、多くの研究者により行われている¹⁾。変動荷重下では、応力と歪の履歴が時間とともに変化し、それに伴い疲労損傷の原因となるヒステリシスループも、その形状、平均応力、平均歪等が変化する。正確な寿命

* 科学技術庁金属材料技術研究所

** IABG Ottobrunn, FRG

*** Tech. University of Darmstadt, FRG

予測を行おうとするならば、これら瞬間値とも言える応力-歪履歴を用いた損傷解析が必要となる。そのためには、ある平均応力または平均歪ごとの歪-寿命曲線を必要とし、多量の基本データ曲線群を必要とする。そこで、多くの場合、平均応力または平均歪がある場合の応力-歪履歴を両振りの状態に置き直した疲労損傷解析が行われている。この両振りの状態に置き直す際用いられるのが応力振幅、歪振幅、平均応力、平均歪等がある関数関係と仮定して組み合わせた疲労損傷パラメータである。一般に、変動荷重下にある構造物あるいは構造物材について、上述の局所応力概念を用い、本報告で取り扱うような疲労損傷パラメータを用いた寿命予測でも、Factor of 10 以上の誤差があると言われるが、その誤差のうちでも、用いるべき疲労損傷パラメータの寿命推定精度の占める割合が少なくないと考えられる。

本報告は、著者の1人が西ドイツ、ダムシュタット工科大学に滞在中に行った研究の一部で、種々の文献に提案されているいくつかの疲労損傷パラメータについて、その寿命推定精度を平滑小形試験片を用いた歪制御疲労試験結果から検討したものである。

2 疲労損傷パラメータ

もしも、疲労過程中的繰返し応力-歪関係が完全に両振りの状態にあるならば、寿命予測に用いる基準曲線としては、通常用いられている $\epsilon_{ta}-N_A$ あるいは $\epsilon_{pa}-N_A$ 曲線で十分と考えられる。しかし、平均歪（または平均応力）が負荷された場合（実際の変動荷重下では大部分そのようになる）、Fig. 1 に示すように、平均歪レベルにより異なった歪-寿命曲線が得られる。そのため、寿

Fig. 1 Illustration of mean strain effect (7075 Aluminium alloy)

命予測に用いる基準曲線としては、解析対象となる応力-歪履歴と同一のものが必要となり、その組み合わせは膨大な数に達することが考えられる。そこで、それらの平均値が負荷された時の応力-歪履歴を平均値が無い状態に置き直すために、種々の疲労損傷パラメータが提案されているが、これらの疲労損傷パラメータでは、平均応力の効果のみを考慮している。これは、平均歪が材料の破断延性値に近い、あるいは、冷間加工等により、よほど強い加工硬化を受けない限り、平均歪そのものの効果は無視できることによると考えられる。もちろん、この疲労損傷パラメータは、事実上、繰返し数依存性が無い、安定した応力-歪関係が存在することを前提としている。

いま、疲労損傷パラメータ-寿命曲線を次式のように表わす。

$$P(\Delta\sigma, \Delta\epsilon, \sigma_m) = P(2N_A) \quad (1)$$

これは、(1)式の左辺で表わされるデータの組がある値に達した時、その寿命が N_A となることを示している。もし、定常状態の繰返し応力-歪曲線として、

$$\Delta\epsilon = f(\Delta\sigma) \quad (2)$$

を考え、これを(1)式に代入すると、(1)式は、応力範囲、平均応力と寿命との関係を表わす式となり、通常、設計に良く用いられている $\sigma_a-\sigma_m$ 曲線あるいは $\sigma_{\max}-\sigma_{\min}$ 曲線と一致することになる。

もし、疲労損傷パラメータが正しく平均応力の影響を評価しているならば、種々の平均応力がある場合の疲労データを疲労損傷パラメータを用いて整理した値は、両振りの疲労データの結果と一致するはずである。

本報告では、種々の疲労損傷パラメータの平均応力評価精度について、比較、検討を行い、パラメータの関数形として、何が最も適当なのかを検討したものである。

本報告において検討した疲労損傷パラメータを次に示す。

a) P_{SWT} : Smith, Watson, Topper²⁾ により提案された。Neuber 則³⁾から次のように導びくことができる。

$$\sqrt{\sigma_a \cdot \epsilon_a \cdot E} = K_t \cdot S_a \equiv P \quad (3)$$

(3)式中で、 σ_a の代りに最大応力 $\sigma_{\max}$ を用いることにより、平均応力効果を考慮した。

b) ϵ_{eq} : Morrow⁴⁾ により提案された。Manson-Coffin 式と同様に、全歪を弾性歪成分と塑性歪成分とに分け、弾性歪成分のみが Fig. 2 に示すように、平均応力の影響を受けるとした。また、ほとんど同じ仮定の下に、Landgraf⁵⁾ は(4)式のようなパラメータを提案しているが、本報では、Morrow の提案したパラメータとその値がほとんど変わらないため、用いなかった。

$$P_L = \sigma_f' / \epsilon_f' E \cdot \epsilon_{pa} / \epsilon_{ea} \cdot \sigma_f' / (\sigma_f' - \sigma_m) \quad (4)$$

c) Z_d : Heitmann ら⁶⁾により提案された。Wüthrich⁷⁾が疲労に対して Z -積分と呼んだ ΔJ 積分⁸⁾から求めた。これは、後述する弾性ポテンシャルエネルギーをも含めた全歪エネルギーと同様な物理的意味を持ち、Schijve⁹⁾による疲労き裂開閉挙動に対する平均応力の効果を、数式中で考慮している (Fig. 3 参照)。

d), e) ヒステリシスループから求まるヒステリシ

Fig. 2 Schematic illustration of Morrow's parameter

Fig. 3 Schematic illustration of strain-energy-based damage parameters

スエネルギー, A_H および全歪エネルギー, A_T は、ともに Fig. 3 からわかるように、平均応力の影響は考慮されていない。しかし、 A_H については、完全両振りのデータについて、その妥当性が、疲労破壊のクライテリアの面から検討されており¹⁰⁾、本報告では、これらのパラメータも取り上げた。

f) P_K : Bergmann ら¹¹⁾により、'individual parameter' と呼ばれ、 P_{SWT} の数式表示の中で、 σ_{max} の代りに、 $\sigma_k = \sigma_a + k\sigma_m$ として用いられた。 k の値は材料定数と考えられ、個々の材料の平均応力感受性により異なるとされた。

g) P_{eff} : 新たに、本報告で提案するパラメータである。Erdogan ら¹²⁾により用いられた (5) 式の有効応力 σ_{eff} を使い、これを Smith ら²⁾のパラメータの中で用いた。

$$\sigma_{eff} = \sigma_a r \cdot \sigma_{max}^{1-r} = \sigma_a \left(\frac{1-R}{2} \right)^{r-1} \quad (5)$$

(5) 式は、疲労き裂伝播に対する平均応力の影響を考慮するため用いられたが、著者の 1 人¹³⁾による荷重制御疲労データの整理の際も、平均応力の効果を (5) 式で良く表わすことができた。

h) P_{HAI} : Haibach¹⁴⁾ が、ランダム荷重下における

Table 1 Damage parameters

Damage parameter (Experiment), P_E	Fatigue resistance (Analysis), P_R
(a) $P_{SWT} = \sqrt{\sigma_{max} \cdot \epsilon_a \cdot E}$	$\sqrt{\sigma'_f{}^2 (2N_A)^{2b} \cdot \sigma'_f \epsilon'_f (2N_A)^{b+c}}$
(b) $\epsilon_{eq} = \sigma_{cr} / E \cdot \epsilon_{pa}$ ($\sigma_{cr} = \sigma_a / (1 - \sigma_m / \sigma'_f)$)	$\frac{\sigma'_f}{E} (2N_A)^b \cdot \epsilon'_f (2N_A)^c$
(c) $Z_d = \frac{2.9}{2E} \Delta \sigma_{eq}^{2.5} \Delta \sigma \Delta \epsilon_p$ ($\Delta \sigma_{eq} = \frac{372}{(3-R)^{1.74}} \Delta \sigma$)	$\sigma'_f (2N_A)^b \left[0.64467 \frac{\sigma'_f}{E} (2N_A)^b \right. \\ \left. \cdot \frac{10}{1-n} \epsilon'_f (2N_A)^c \right]$
(d) $A_H = \frac{1-n'}{1-n} \Delta \sigma \Delta \epsilon_p$	$4 \frac{1-n'}{1-n} \sigma'_f \epsilon'_f (2N_A)^{b+c}$
(e) $A_T = \frac{2}{1-n} \sigma_a \epsilon_{pa} \cdot \frac{\sigma_a^2}{2E}$	$\sigma'_f (2N_A)^b \left[\frac{2}{1-n} \epsilon'_f (2N_A)^c \cdot \frac{\sigma'_f}{2E} (2N_A)^b \right]$
(f) $P_K = \sqrt{(\sigma_a + K\sigma_m) \cdot \epsilon_a \cdot E}$	$\sqrt{\sigma'_f{}^2 (2N_A)^{2b} \cdot \sigma'_f \epsilon'_f (2N_A)^{b+c}}$
(g) $P_{eff} = \sqrt{\sigma_a^r \cdot \sigma_{max}^{1-r} \cdot \epsilon_a \cdot E}$	$\sqrt{\sigma'_f{}^2 (2N_A)^{2b} \cdot \sigma'_f \epsilon'_f (2N_A)^{b+c}}$
(h) $P_{HAI} = \Delta \sigma_{eff} \cdot \Delta \epsilon_{eff}$ ³⁾	$\left[\sigma'_f (2N_A)^b - \sigma'_0 \right] \left[\frac{\sigma'_f}{E} (2N_A)^b \right. \\ \left. \cdot 2 \left(1 - 2^{-\frac{1}{n}} \right) \epsilon'_f (2N_A)^c \right] \\ \left(2^{1-\frac{1}{n}} \cdot \epsilon'_f (2N_A)^c \left(1 - \frac{\sigma'_0}{\sigma'_f (2N_A)^b} \right)^{\frac{1}{n}} \right. \\ \left. = \sigma'_0 \cdot 2 \left(1 - 2^{-\frac{1}{n}} \right) \epsilon'_f (2N_A)^c \right)$

1), 2) K and r are, respectively, material constants.

3) Experimental values, $\Delta \epsilon_{eff}$ and $\Delta \sigma_{eff}$, were calculated using the following equations.

$$\Delta \epsilon_{eff} = 2\epsilon_a - \frac{\sigma_a - \sigma_m}{E} - 2 \left(\frac{\sigma_a - \sigma_m}{2K'} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (a)$$

$$\Delta \sigma_{eff} = \frac{\Delta \sigma_{eff}}{E} \cdot 2 \left(\frac{\Delta \sigma_{eff}}{2K'} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (b)$$

荷重順序の影響を評価するために提案した。このパラメータの定義については Fig. 3 に示した。

3 疲労損傷パラメータによる解析手順

前節で述べた疲労損傷パラメータを一括して Table 1 に示した。表の左側の欄には用いた疲労損傷パラメータを、右側には対応する解析式を示した。この解析式中の材料定数は、両振りの疲労データについて、(6) 式の Manson-Coffin 式を用いた回帰、および (7) 式の繰返し応力-歪曲線から得られる。

$$\epsilon_a = \frac{\sigma_f'}{E} (2N_A)^b + \epsilon_f' (2N_A)^c \quad (6)$$

$$\epsilon_a = \frac{\sigma_a}{E} + \left(\frac{\sigma_a}{K'} \right)^{1/n} \quad (7)$$

ただし、(6) 式中の σ_f', ϵ_f' の値は、 $N_A=1/2$ の時の値として求めている。

Fig. 4 に解析手順を示した。Table 1 に示す解析式か

Fig. 4 Flow-chart for analytical procedure

Fig. 5 Schematic illustration of P_E and P_R

ら予測値を求めるため、(6) 式および (7) 式の回帰を完全両振りデータについて行い、各種損傷パラメータについての予測値、 P_R を求めた。これと、実測した応力振幅、歪、平均応力から求まるパラメータの値、 P_E とを比較、検討した (Fig. 5 参照)。

4 解析に用いたデータおよび解析結果

4.1 解析に用いたデータ

6 種の鋼材および 2 種のアルミ合金を供試材とした疲労試験結果を用いた。それら供試材の化学成分、機械的性質を、それぞれ Table 2, Table 3 に示した。

42CrMo 4 は Cr 鋼で JIS-SCr 440 材に相当、49MnVs 3 は JIS に対応する規格はないが、Mn-V 鋼、CK 45 は JIS-S 45 C 相当、StE 690 および NAXTRA-70 (17 MnCrMo 33) は 80 キロ級高張力鋼、GS 13 MnNi 63 は Mn-Ni 鋳鋼、AlMg 4.5 Mn は JIS-A 5083、AlMg 1 は JIS-7000 系 Al 合金にそれぞれ対応している。

疲労試験は Table 4 に示すような平均歪を与えた軸歪制御で行った。疲労試験中、応力-歪履歴、および平均応力の変化を記録し、 $0.5 N_A$ 時の応力-歪履歴を求め

Table 2 Chemical composition

Element Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Al	Cu	Zn
42 Cr Mo 4	0.43	0.28	0.71	0.033	0.028	-	1.09	-	-	0.17	-	-
49 Mn Vs 3	0.45	0.29	0.81	0.027	0.057	-	0.16	-	0.09	-	-	-
Ck 45	0.50	0.26	0.69	0.015	0.029	-	0.10	-	-	0.066	0.17	-
StE 690	0.15	0.53	0.87	0.011	0.004	-	0.63	0.22	-	0.038	-	0.09
N-A-XTRA 70 (17 Mn Cr Mo 33)	0.16	0.68	0.86	0.016	0.017	-	0.78	0.32	-	0.034	-	-
GS 13 Mn Ni 63	0.15	0.412	1.4	0.015	0.009	1.01	0.028	0.010	0.004	-	-	-

Element Material	Si	Mn	Cr	Mg	Ti	Zn	Cu	Fe
Al Mg 4.5 Mn	0.19	0.72	0.096	4.82	0.01	0.085	0.026	0.30
Al Zn Mg 1	-	-	-	1.2	-	4.5	-	-

Table 3 Mechanical properties

	Static				Cyclic		
	$\sigma_{0.2}$ [N/mm ²]	σ_B [N/mm ²]	δ [%]	σ_F [N/mm ²]	$\sigma_{0.2}$ [N/mm ²]	K' [N/mm ²]	n'
42 Cr Mo 4	998	1 111	23	1 525	679	1 683	0.146
49 Mn Vs 3	556	840	44	1 152	510	1 512	0.175
Ck 45	531	790	23	1 271	452	1 392	0.181
StE 690	810	872	18		550	1 210	0.127
N-A-XTRA 70	851	929	11	1 446	650	1 371	0.120
GS 13 Mn Ni 63	312	501	26		357	896	0.148
Al Mg 4.5 Mn	298	363	13		338	555	0.080
Al Zn Mg 1	280	360	10		313	689	0.127

た。また、試験中、適宜、50 倍の実体顕微鏡を用いて試験片表面の観察を行い、試験片表面で疲労き裂長さが約 0.5 mm になった時点を N_A と定義した。

4.2 解析結果

本報告で検討した、各種疲労損傷パラメータ-寿命曲線を、例として低合金鋼、42 CrMo 4 について、Fig. 6 に示す。図中、○印は平均歪 ε_m が零のデータ、▲印は $\varepsilon_m = +1.5\%$ 、■印は -1.5% のデータで、種々の損傷

パラメータについて一括して示した。図中に示す実線は、Table 1 の右側の欄の式で、 $\varepsilon_m = 0$ のデータから得られたものである。前述したように、▲印および■印のデータが図中の実線に近いほど、そのパラメータの推定精度が良いことになる。これから、各々の疲労損傷パラメータの平均応力評価精度、言い換えると寿命予測精度が比較できる。歪エネルギーを基礎とする Z_d , A_T , A_H , P_{HAI} の各パラメータは、高サイクル領域でのばらつき

Fig. 6 Example of damage parameter-life curves for a low alloy steel

Table 4 Mean strain levels of fatigue tests

Materials	ϵ_m [%]
42 Cr Mo 4	+1.5, 0, -1.5
49 Mn VS 3	+1.2, 0, -1.2
Ck 45	+1.2, 0, -1.2
StE 690	+1.0, 0, -1.0
17 Mn Cr Mo 33	0, +1, +10, +45
GS 13 Mn Ni 63	+0.6, 0, -0.6
Al Mg 4.5 Mn	+1.0, 0, -1.0
Al Zn Mg 1	+0.8, 0, -0.8

が大きく、平均応力効果を十分に評価しているとは言えない。 P_{SWT} および Morrow パラメータは、ほぼ同程度のばらつきを示している。 P_{eff} および P_k は、今回用いた種々の疲労損傷パラメータの中で、最も良い結果

を示している。これらのことを、種々の材料について比較、検討するため、Fig. 5 に示したように P_E/P_R の値を各データ点について求め、その平均値を示したのが Fig. 7 である。横軸は本報告で用いた疲労損傷パラメータ、縦軸は解析に使用した供試材である。図中の3つのコラムは、それぞれ平均歪が零、正および負のデータに対する結果であり、コラムの高さが1になれば、 $P_E = P_R$ であることを示している。図中、 $\epsilon_m = 0$ のデータが1より外れているものがあるが、これは疲労損傷パラメータと疲労寿命に対する回帰ではなく、(6)式および(7)式の回帰データから Table 1 の解析式を用いて P_R を求めていることによる。

5 検 討

Fig. 8 に、本報告で用いた種々の疲労損傷パラメータが持っている平均応力依存性を図示した。用いたパラメータは平均応力依存性が零 (A_T, A_H) から、強い依存性を示すもの (Haibach) まで種々ある。図からもわかる

Fig. 7 Comparison of result for damage parameters; columns indicate mean values of P_E/P_R for zero, tensile and compressive mean strain, respectively

Fig. 8 Mean stress effect as predicted by use of different damage parameters

ように、 P_{SWT} と Morrow パラメータはほとんど同じ傾向を示し、 P_{eff} 、 P_k 、 Z_d パラメータもまた類似の平均応力依存性を示している。したがって、本報告で用いた疲労損傷パラメータを大別すれば、平均応力依存性に関して4つのグループに分けられる。

以下、これらのグループごと（ただし、 Z_d は A_T 、 A_H と同じグループに入れた）に、Fig. 7 を用いて検討してみる。

a) 良く用いられている疲労損傷パラメータ P_{SWT} と ϵ_{eq} は、材料ごとに多少異なるが、平均歪（平均応力）の違いによる P_E/P_R の値の変動は、ほぼ $\pm 10\%$ の範囲にある。これは、 10^5 回近傍における推定寿命の誤差としては、ほぼファクター3に相当している。もちろん、図からも明らかなように、材種によっては、この値が大きくなり、推定寿命と実際の寿命との誤差がファクター7になるような場合もあった。

b) 歪エネルギーを基とする損傷パラメータの中でも、 A_H の変動が一番大きかった。一方、 Z_d および A_T の変動も、他のパラメータに比較すると大きな変動を示すが、Fig. 5 からわかるように、疲労損傷パラメータ-寿命曲線の勾配が、他のパラメータより急になっており、この勾配の差を考慮すると、 P_E/P_R の値が $\pm 50\%$ 変動したとしても、それは推定寿命でわずかファクター3の違いにしかならず、結局のところ、これらのパラメータは、上述の P_{SWT} 、 ϵ_{eq} と同程度の推定精度を示していることになる。また、 A_T は Fig. 8 からわかるように、本質的に平均応力の影響を評価できるパラメータではないのにもかかわらず、 A_H よりもずつ

と良い推定精度を示した。これは、 A_T の方が弾性歪成分も式の中に含まれており、塑性歪成分のみの A_H よりも P_E/P_R の変動が薄まったためと考えられる。

c) P_{eff} と P_k パラメータは、本報告で用いた疲労損傷パラメータの中で最も良い寿命推定精度を示した。これらのパラメータは、その中に材料定数として γ および k の値を含む (Table 1 参照)。各材種ごとに求めた、これらの値を Table 5 に示した。しかし、Fig. 7 には、これら Table 5 に示す値の代りに、 $\gamma=0.5$ 、 $K=0.4$ の値を用いた。これから、このように材種によらず、一定の値を用いても十分な推定精度を持っていることがわかる。

d) Haibach パラメータは、ほぼすべての材種について、また用いた種々の疲労損傷パラメータの中で最も大きな変動を示した。これは、Fig. 8 に示すように、このパラメータの持つ高い平均応力依存性に起因していると考えられる。したがって、このパラメータは、平均応力効果を評価する疲労損傷パラメータとしては不適当であるが、変動荷重下において、荷重順序の影響も含めて評価しなければならないような時は、有効になるものと考えられる¹⁵⁾。

低サイクル領域においては、疲労過程に生じる塑性変形の結果、平均応力のリラクセーションが起きる。したがって、そのような場合、平均応力の影響は小さくなることになる。つまり、疲労による損傷過程は完全両振りの状態に近づくことが予想される。本報告の解析の中には、そのような低サイクル領域の疲労データも含まれており、Fig. 7 に示した結果に影響を及ぼしている可能性がある。そこで、次に平均応力が $\sigma_m \leq 0.15 \sigma_a$ のデータを除外して、各損傷パラメータについて同様な解析を行った。Fig. 9 に、StE 690 鋼についての結果の例を示した。Fig. 7 の結果と比較すると、 Z_d 、 A_H 、Haibach 各パラメータがより悪い方向になっているが、他のパラメータはほとんど影響されていない。したがって、全体

Table 5 Individual values for γ and K

	$\gamma^1)$	$K^2)$	
		Present results	by Bergmann [16]
42 Cr Mo 4	0.494	0.447	
49 Mn Vs 3	0.265	0.754	
Ck 45	0.377	0.478	
StE 690	0.530	0.486	tension + 1, comp. + 0
17 Mn Cr Mo 33	0.251	0.757	
GS 13 Mn Ni 63	0.330	0.750	tension + 1, comp. + 0
Al Mg 4.5 Mn	0.329	0.683	tension + 1, comp. + 0.6
Al Zn Mg 1	0.307	0.988

Fig. 9 Influence of mean stress magnitude on mean values of P_E/P_R

として、Fig. 7 から得られた結論を変える必要はないと考えられる。

6 疲労損傷パラメータの利用に関する考察

Fig. 10 に局所応力概念による疲労寿命予測のブロック図を示す。図中、左側の部分が局所応力および歪の推定にかかわる部分、右側の破線に囲まれた部分が、それら推定した応力、歪から疲労寿命予測を行う部分である。従来、この疲労寿命予測に用いられる基準曲線としては、応力または歪のどちらか一方のみを用いた $\sigma-N_A$ 曲線、あるいは $\epsilon-N_A$ 曲線が用いられてきた。しかし、本報告でも指摘したように、変動荷重下での寿命予測の場合、あるいは、残留応力等、平均値成分が無視できないような場合、さらには、負荷条件が両振りではないような場合、 10^4 回を超えるような寿命予測を行う際は、平均応力効果が無視できなくなる。そのような場合、用いるべき寿命予測の基準曲線としては、(1) 式で示した疲労損傷パラメータ-寿命曲線が適当と考えられる。本報告の解析手順からも容易にわかるように、両振りの疲労データから (6) 式および (7) 式を用いて、諸定数を求めておけば、任意の平均応力がある場合の寿命予測が可能となる。

本報告で用いた疲労損傷パラメータは、一部を除き、厳密な意味での疲労損傷量としての物理的意味を検討したものではない。大部分、単に平均応力効果を評価するための応力と歪とを組み合わせた関数として用いられてい

る。本報告でも、その点については触れておらず、単にパラメータとして用いた。今後の問題としては、これら疲労損傷パラメータと疲労破壊のクライテリオンとの関係を調べる可能性がある。それにより、単に平均応力効果を評価するためのパラメータという位置付けから、疲労破壊のクライテリオンと直接に結びつけた定義が可能となる。

7 結 論

平均応力効果を評価するため、用いられている疲労損傷パラメータについて、鋼およびアルミ合金の歪制御疲れ試験結果を用い、それらパラメータの寿命推定精度を検討した。得られた結果を以下に示す。

(1) Smith らによる疲労損傷パラメータ、 P_{SWT} は実測寿命と推定寿命との間にファクター 3 の誤差があった。材種によっては、この値がもっと大きくなる場合もあった。

(2) Morrow パラメータ、 ϵ_{eq} は、 P_{SWT} とほとんど同程度の寿命推定精度を示した。

(3) 繰返し歪エネルギーに基づくパラメータ、 Z_d 、 A_H 、 A_T は、 P_E/P_R の値が平均応力により大きく変動した。しかしながら、これらのパラメータ-寿命曲線の勾配が急なことを考慮すると、これらのパラメータのうち、 Z_d と A_T は、ほぼ P_{SWT} と同程度の寿命推定精度を持っていると考えられる。

(4) Haibach パラメータ、 P_{HAI} は、本報告で用いた疲労損傷パラメータの中で、 P_E/P_R の値が最も大きく変動した。しかし、このパラメータの持つユニークな特性から、ランダム荷重下において、荷重順序の影響が生じるような場合には有効になるものと考えられる。

(5) P_k および本報告で新たに用いた P_{eff} は、両者とも、最も良い寿命推定精度を示した。また、両者の寿命推定精度の間には有意な差は認められなかった。

(6) P_k および P_{eff} は、その数式表示の中に材料定数を含むため、基本的には、各材種ごとにその材料定数を求める必要がある。しかしながら、本報告で示したように、 $K=0.4$ および $\gamma=0.5$ の値を用いても十分な寿命推定精度が得られる。

参 考 文 献

- 1) 例えば E. Haibach and D. Schütz: Fatigue Life Evaluation with Particular Attention to Local Strains and Stress Time Histories, Conference on Designing against Fatigue, 9th Oct. 1974, London.
例えば P. Heuler und T. Seeger: Betriebslastenversuche zur Analyse des örtlichen Konzepts, Bericht FD-12/1981, Fachgebiet Werkstoffmechanik, T. H. Darmstadt (1981) (in

Fig. 10 Schematic block diagram for fatigue life estimation

- German).
- 2) K. N. Smith, P. Watson and T. H. Topper: A Stress-Strain Function for the Fatigue of Metals, *J. of Materials*, JMLSA, 5-4 (1970), 767~778.
 - 3) H. Neuber: Theory of Stress Concentrations for Shear-Strained Prismatical Bodies with Arbitrary Nonlinear Stress-Strain Law, *J. of Applied Mech.*, Trans. ASME, 28 (1961), 544~550.
 - 4) JoDean Morrow: Fatigue Properties of Metals, *Fatigue Design Handbook*, Soc. Auto. Eng., 1968.
 - 5) R. W. Landgraf: Cumulative Fatigue Damage under Complex Strain Histories, *American Soc. Mech. Eng.*, ASTM STP519(1973).
 - 6) H. H. Heitmann: Betriebsfestigkeit von Stahl, Vorhersage der technischen Anrisslebensdauer unter Berücksichtigung des Verhaltens von Mikrorissen, Dissertation an der TH Aachen, 1983 (in German).
 - 7) C. Wüthrich: The Extension of the J-Integral Concept to Fatigue Cracks, *Int. J. of Fracture*, 20(1982), R35~37.
 - 8) N. E. Dowling and J. A. Begley: Fatigue Crack Growth During Gross Plasticity and the J-Integral, *American Soc. Mech. Eng.*, ASTM STP590(1976), 82~103.
 - 9) J. Schijve: Some Formulas for the Crack Opening Stress Level, *Eng. Fract. Mech.*, 14 (1981), 461~465.
 - 10) 例えば S. Klee: Das zyklische Spannungs-Dehnungs- und Bruchverhalten verschiedener Stähle, Veröffentlichung des Instituts für Statik und Stahlbau der Technischen Hochschule Darmstadt, Heft 22, 1973(in German).
 - 11) J. W. Bergmann and T. Seeger: On the Influence of Cyclic Stress-Strain-Curves, Damage Parameters, and Various Evaluation Concepts on the Life Prediction by the Local Approach, 2nd European Colloquium on Fracture, Darmstadt 1978, VDI-Fortschritt-sberichte, 18-6(1979).
 - 12) F. Erdogan and R. Roberts: The Effect of Mean Stress on Fatigue Crack Propagation in Plates under Extension and Bending, *Trans. ASME, J. of Basic Eng.*, 89(1967), 885~892.
 - 13) M. Nihei, E. Sasaki and M. Kamakura: Effects of Programmed Mean Stress on Fatigue Strength of Welded Joints of SM58 Steel, *Trans. Nat. Res. Inst. for Metals*, 23-3 (1981), 182~190.
 - 14) E. Haibach: The Influence of Cyclic Material Properties on Fatigue Life Prediction by Amplitude Transformation, Application of Computers in Fatigue, *Proc. of SEE-Conf.*, 1978, Warwick, U. K., Paper No.11.
 - 15) H. Nowack, D. Hanschmann and K. H. Trautmann: Comparison of Actual and the Predicted Crack Initiation Life Behavior of Notched 2024, 7075 and 7474 Specimens under Standard Loading Histories, *Proc. 10th ICAF-Symposium*, 1979, Brussels.
 - 16) J. W. Bergmann: Zur Betriebsfestigkeitsbemessung gekerbter Bauteile auf der Grundlage der örtlichen Beanspruchungen, Rep. No.37 of Inst. Stahlbau und Werkstoffmechanik der Tech. Hochschule Darmstadt, 1983(in German).