ばね鋼のランダム荷重フレットング疲労*

武藤 睦治^{*1}, 田中 紘一^{*1}, 近藤 雅美^{*2}

Fretting Fatigue in SUP 9 Spring Steel under Random Loading

Yoshiharu MUTOH, Kohichi TANAKA, and Masami KONDOH

The fretting fatigue strength of SUP 9 spring steel under random loading was examined by clamping the contact pads of the same material. Random loading reduced the fretting fatigue strengths by a factor of 1.5. The linear cumulative damage rule held good for fretting fatigue under random loading. The relationship between the coefficient of the friction and the slip amplitude using root-mean-square values under random loading agreed well with that under constant loading. Prediction of fatigue life was made on the basis of the fracture mechanics analysis proposed in the previous paper, where the frictional force between the fretting pad and the specimen was taken into consideration. The predicted lives were in good agreement with the experimental results.

Key Words: Fatigue, Fretting Fatigue, Random Loading, Fatigue Crack Growth, Spring Steel

1. 緒 言

一般に構造物あるいは機械類の受ける荷重は、複雑な不規則波である場合が多く、安全性評価の面からそれらの実働荷重下における部材の疲労強度の正確な予知が必要不可欠である。これまで、フレットング疲労に関する研究は基礎的知見を得るという立場から、一定荷重振幅下で行われている場合がほとんどである。

本研究では実際に問題となる実働荷重がガウス性のランダム荷重で近似できる場合が多いことを考慮に入れて標準偏差の異なる 2 種類のガウス性擬似ランダム荷重を用い、その時のフレットング疲労特性を調べるとともに、一定荷重下のフレットング疲労試験結果との比較を行った。また、一定荷重下の場合と同様にランダム荷重下のき裂伝ば曲線を用い、フレットング疲労の寿命に影響を及ぼす摩擦力、相対すべり量などの因子を考慮に入れてランダム荷重下のフレットング疲労寿命の推定を試みた。

2. 実験方法

供試材は前報^{(1)~(3)}と同様の SUP 9 鋼である。用いた通常ならびにフレットング疲労試験片および接触材(ブリッジ・タイプ)の形状寸法も前報^{(1)~(3)}と同様である。

疲労試験機は、容量±98 kN の MTS 油圧サーボ疲労試験機を用いた。

用いたランダム波形は図 1 に示すような 2 種類の平均応力が零のガウス性擬似ランダム波であり、以下では、同図(A)の標準偏差の小さな波形を Random-A、同図(B)の標準偏差の大きな波形を Random-B と呼ぶ。試験は荷重制御下で、温度 20°C、湿度 55 % の恒温恒湿中にて行った。フレットング疲労試験の詳細は前報⁽¹⁾で述べたとおりであり、接触材の押付け面圧も前報と同一の 60 MPa とした。試験中摩擦力 R および相対すべり量 S を測定したが^{(1)~(4)}、測定信号は A/D

図 1 ランダム波形

* 昭和 61 年 7 月 1 日 第 23 回シンポジウムにおいて講演、原稿受付 昭和 61 年 12 月 8 日。

^{*1} 正員、長岡技術科学大学(〒949-54 長岡市上富岡町 1603-1)。

^{*2} 准員、マツダ(株)(〒730-91 広島県安芸郡府中町 3-1)。

変換し、パーソナルコンピュータでピーク値の r. m. s. 値 R_{rms} および S_{rms} を計算した。

本研究では疲労試験とともにランダム荷重下のき裂伝ば試験も同時に行った。疲労き裂伝ば試験片の形状寸法は前報⁽²⁾⁽³⁾と同一の CCT 試験片で、中央に長さ 2 mm のスリットが放電加工により導入されている。試験片は、ゲージ部をエメリーペーパーで、1500 番まで研磨し、その後バフ研磨した。疲労き裂伝ば試験は、フレット疲労試験の場合と同様の平均荷重が零のガウス性擬似ランダム荷重を用いた。試験中荷重信号を A/D 変換し、パーソナルコンピュータでピーク荷重の r. m. s. 値 P_{rms} を計算した。き裂長さは、精度 1/100 mm の読み取り顕微鏡を用いて測定し、左右両側のき裂長さの平均をとった。なお、下限限界を求めるための荷重漸減試験の際には、荷重履歴の影響を避けるため、き裂進展量が最大荷重に対する塑性域寸法の 2~3 倍となった時、5% ずつ荷重の r. m. s. 値を減じたが、低速度域（下限限界応力拡大係数範囲 $\Delta K_{th,rms}$ 近傍）になると荷重は 3% ずつ減少させて行った。応力拡大係数の算定には ASTM E 647 にある算定式を用いた。試験は、次式に示す条件を満たさなくなった時終了した。

$$W - a \geq 4/\pi (K_{max}/\sigma_{ys})^2 \quad (1)$$

ここで K_{max} ：最大応力拡大係数 ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)

表 1 S-N 曲線を与える材料定数

Test Condition	m, m'	c, c'	m'/m	σ_{wr}/σ_{wc}
Plain	Constant	11.61	6.84×10^{38}	—
	Random-A	11.82	6.15×10^{38}	1.02
	Random-B	10.90	1.43×10^{35}	0.93
Fretting	Constant	4.15	9.27×10^{15}	—
	Random-A	3.96	1.86×10^{15}	0.95
	Random-B	4.88	3.04×10^{17}	1.17

図 2 S-N 曲線

3. 実験結果

3.1 通常疲労およびフレット疲労試験結果

図 2 に SUP 9 鋼のランダム荷重下の通常およびフレット疲労試験から得られたピーク応力の r. m. s. 値 σ_{rms} と破断繰返し数 N_f の関係を示す。また、参考のため、図中には一定応力振幅下における通常疲労およびフレット疲労の S-N 曲線⁽²⁾をそれぞれ一点鎖線および二点鎖線で示す。図からわかるように、ランダム荷重下の通常疲労およびフレット疲労においてもランダム荷重を r. m. s. 値で整理すると、 $\sigma_{rms}-N_f$ の関係はランダム荷重の場合も一定荷重振幅の場合と同様、直線関係があり一般に次式で表すことができる。

$$\text{一定荷重振幅 } N_f \sigma_a^m = C \quad (2)$$

$$\text{ランダム荷重 } N_f \sigma_{rms}^{m'} = C' \quad (3)$$

ここで N_f ：破断繰返し数 (cycle)

σ_a ：一定応力振幅 (MPa)

σ_{rms} ：ピーク応力の r. m. s. 値 (MPa)

m, m', C, C' ：材料および負荷条件により定まる定数

本実験結果から求めた m, m', C, C' および比 m'/m を表 1 に示す。図 2 および表 1 からわかるように、ランダム荷重試験の $\sigma_{rms}-N_f$ 曲線の傾きは通常およびフレット疲労試験のいずれの場合とも一定荷重試験の S-N 曲線の傾きとほぼ同程度となっている。また、図 2 から、ランダム荷重試験結果を r. m. s. 値で整理すると、いずれのランダム荷重条件とも一定荷重試験結果より寿命が短い、標準偏差を大きくとり、より大きな最大荷重を含む Random-B の荷重条件で試験した場合が、通常およびフレット疲労とも、より短い寿命を与えている。

また、疲労限 σ_w を求めると通常疲労の場合、Random-A の荷重条件で 500 MPa、Random-B の条件で 420 MPa となり、フレット疲労の場合、

図 3 応力振幅と相対すべり量の関係

Random-A の条件で 304 MPa, Random-B の条件で 210 MPa となっている。このようなランダム荷重下の疲労限 σ_{wr} と一定荷重下の疲労限 σ_{wc} の比を表 1 に示す。表よりわかるように、ランダム荷重を r. m. s. 値で整理した場合、通常およびフレットング疲労試験の疲労限は、一定荷重試験のそれよりも低下している。そして、いずれの試験においても、Random-A の荷重条件の疲労限と比較し、より大きな最大荷重を含む Random-B の場合、疲労限度の低下が著しくなっている。

3・2 相対すべり量および摩擦力の測定結果 ランダム荷重下のフレットング疲労試験における摩擦係数および相対すべり量の測定結果から、最大値および r. m. s. 値で整理した応力振幅 ($\sigma_{max}, \sigma_{rms}$) と相対すべり量 (S_{max}, S_{rms}) の関係を図 3 に示す。図中には参考

図 4 摩擦係数と相対すべり量の関係

(a) 通常疲労き裂発生部 ($\sigma_{rms}=501$ MPa)

(b) 通常疲労き裂伝ば部 [(a)の拡大]

(c) フレットング疲労き裂発生部 ($\sigma_{rms}=296$ MPa)

図 5 疲労破面の観察例

のため、一定荷重振幅下でのそれらの関係⁽²⁾を実線で示す。破線は、ブリッジを剛体と仮定した場合の算定した相対すべり量 $S(S=\sigma_a \cdot l/E, \sigma_a$: 応力振幅, l : ブリッジのスパンの 1/2, E : ヤング率) を示したものである。図よりわかるように、同じ応力振幅レベルと比較した場合、ランダム荷重の相対すべり量の r. m. s. 値および最大値が図中の実線(一定荷重の相対すべり量)より、わずかに小さい傾向ではあるが、比較的良好一致している。

図 4 に摩擦係数の r. m. s. 値 (μ_{rms}) と相対すべり量の r. m. s. 値 (S_{rms}) の関係を示す。摩擦係数の r. m. s. 値は試験中測定した摩擦力の r. m. s. 値 R_{rms} とブリッジ押付力の比により求めた。摩擦係数および相対すべり量とも試験のごく初期を除けば寿命の大部分にわたり一定値を示したので、図中の実験点にはその定常値を用いている。図中には、参考のため、一定荷重試験から得た摩擦係数と相対すべり量の関係⁽²⁾を実線で示した。図より、Random-A および Random-B の荷重条件による試験結果とも r. m. s. 値で整理すると、一定荷重振幅の試験結果とよく一致することがわかる。

3・3 破面の観察結果 図 5 に通常およびフレットング疲労破面の観察例を示す。同図(a)から明らかのように、通常疲労は、すべての試験片において疲労き裂は表面あるいは表面近傍の介在物より発生し、フィッシュアイが観察された。そして、その周りには同図(b)のようにストライエーション状の疲労破面となっていた。フレットング疲労は、すべての試験片において、同図(c)に示すように、フレットング面の損傷部から発生しており介在物などの影響をうけた

in-side out-side

(a) 巨視的観察例 ($\sigma_{rms}=254$ MPa)

(b) 微視的観察例 (out-side)

図 6 フレットング面の観察例

様子は認められなかった。図からもわかるように、フレットの影響をうけたと思われるき裂発生部には、無特徴な平坦部が存在し、試験片内部に進行するに従い、通常の疲労破面と同様のストライエーション状模様が支配的な破面となる。このような破面形態は、一定荷重試験の場合⁽¹⁾⁽²⁾と同様である。

3・4 フレット面の観察結果 図6にフレット面のSEM観察例を示す。同図(a)からわかるように、損傷のより激しい部分は、すべり方向のout側の領域であった。図6(a)のフレット面の最も損傷の激しいと思われる領域について詳細に観察した例を同図(b)に示す。図より、損傷形態は一定荷重試験結果と同様に、あばた状となっており、すべり方向と直角方向に、微小き裂が存在していることが確認できた。

3・5 表面粗さの測定結果 図7にすべり方向に沿った表面粗さの測定結果の一例を示す。図より、フレット面の観察結果と同様に、out側で表面粗さが大きくなっており、その部分の損傷が激しかったことを示唆している。このような測定から求めた最大表面粗さと相対すべり量のr.m.s.値および最大値との関係を図8に示す。図中には、参考のため、一定荷重試験から得た最大表面粗さと相対すべり量の関係を実線で示す⁽²⁾。二段重複荷重下のフレット疲労試験結果⁽⁴⁾によると、最大表面粗さは高応力側の相対すべり量に依存していた。ランダム荷重下の場合も、図から必ずしも明確ではないが一定荷重試験結果と対応させると、いずれのランダム荷重条件とも最大表面粗さは相対すべり量のr.m.s.値より最大値に依存して

図7 表面粗さ測定結果の一例

図8 最大表面粗さと相対すべり量の関係

いるようである。

3・6 フレット部の縦断面の観察結果

フレット面の観察より微小き裂が存在していた部分を狙って、フレット面を軸方向に沿って切断した縦断面のSEM観察例を図9に示す。このようなき裂は、ほとんどの試験片において、フレット面の最も損傷の激しいout側近傍より発生していた。図より、ランダム荷重試験のフレットき裂も一定荷重試験結果と同様に、フレット作用を強く受けたと思われるき裂発生領域では、き裂が表面に対して斜め方向に進展している様子が観察され、き裂の進展とともに、表面に対してほぼ直角方向に向きを変えている。遠藤ら⁽⁵⁾は、き裂長さの測定により、Alicら⁽⁶⁾は、ストライエーション間隔の測定によりフレット疲労き裂の進展は、その初期段階には加速されていることが報告されている。また、著者らはフレット作用により、高い応力集中を受けながら進展する第1段階き裂長さの測定を行い、その値と相対すべり量との間に比例関係があることを報告している⁽²⁾⁽³⁾。そこで、本実験においても図9に示すようなランダム荷重下での第1段階き裂長さについて測定を

図9 縦断面の観察例 ($\sigma_{rms}=324$ MPa)

図10 第1段階き裂と相対すべり量の関係

行い、相対すべり量との関係を調べた。その結果を図10に示す。図中には、参考のため、一定荷重試験結果を実線で示す。図より、ばらつきが大きく、第1段階き裂長さは相対すべり量の r. m. s. 値と最大値のいずれに支配されているのか明らかではない。しかし、その領域中において各レベルの応力が頻度高く繰返されていることを考慮すると、r. m. s. 値で一定荷重下の場合と同様の関係が得られていると考えるのが妥当なように思われる。

なお、前報⁽²⁾⁽³⁾の一定荷重下における疲労限近傍において停留き裂が観察されたが、今回のランダム荷重下では停留き裂は観察されなかった。

3.7 疲労き裂伝ば試験結果 疲労破壊の過程は、き裂発生と伝ばに分けることができる。疲労特性を検討するためには、それぞれの過程について詳細な検討が必要である。本節では、ランダム荷重下のき裂の進展の挙動について検討する。図11に Random-A および Random-B の2種類のランダム荷重を用いたき裂伝ば試験結果から、き裂伝ば速度 da/dN と応力拡大係数範囲の r. m. s. 値 ΔK_{rms} の関係を示す。なお、 ΔK_{rms} の算定には荷重範囲 ($P_{max} - P_{min}$) の r. m. s. 値を用いている。図中には、参考のため、一定荷重試験の伝ば曲線を実線で示した。北川ら⁽⁷⁾および薄ら⁽⁸⁾は、ランダム荷重においても一定荷重の場合と同様、き裂伝ばの Stage II b 領域では、疲労き裂伝ば速度は $da/$

$dN = C' \cdot \Delta K_{rms}^{m'}$ と表され、直線則が成立すると報告している。図より、本実験においてもいずれのランダム荷重条件とも、このような関係で近似できることがわかる。下限応力拡大係数範囲 $\Delta K_{th,rms}$ によって修正された Paris の式⁽⁹⁾は次式で表される。

$$\text{一定荷重 } da/dN = C(\Delta K^m - \Delta K_{th,c}^m) \dots\dots (4)$$

$$\text{ランダム荷重 } da/dN = C'(\Delta K_{rms}^{m'} - \Delta K_{th,rms}^{m'})$$

$\dots\dots\dots (5)$

式(4)および式(5)に当てはめたときの材料定数 m , C , m' , C' と m'/m を表2に示す。また、ランダム荷重試験から得られた下限応力拡大係数範囲の r. m. s. 値 $\Delta K_{th,rms}$ も同表中に示した。表より ΔK を r. m. s. 値で整理すると標準偏差(最大荷重)の異なる2種類のランダム荷重下のき裂伝ば曲線の傾き m' には大きな相違は認められない。さらに、それは一定荷重試験下の Stage II b 領域における傾き m と、ほぼ一致している。薄ら⁽⁸⁾は、アルミニウム合金 2024-T3 材を用いて、ランダム荷重下の疲労き裂進展を求めた結果、波形のパワースペクトルによらず同じ傾き m を持ち、一定荷重振幅下の Stage II b 領域の傾きとも一致すると報告しており、本実験の結果も同様な傾向を示している。しかし、ランダム荷重下の下限応力拡大係数は、一定荷重下の場合のそれと比較して、Random-A ($\Delta K_{max} = 1.45 \Delta K_{rms}$) の荷重条件では約 1/1.45 倍、Random-B ($\Delta K_{max} = 1.85 \Delta K_{rms}$) の荷重条件では約 1/1.85 倍となり、ランダム荷重の場合、 ΔK の最大値が下限応力拡大係数範囲の値と関連しているように推察される。

4. 考 察

4.1 修正マイナー則による検討 本実験で問題としているようなランダム荷重が作用している場合には、多くの応力振幅 σ_i が作用する。このような複数の応力振幅が存在する場合の疲労寿命を評価する一つの

表2 Paris 則の材料定数

	m, m'	C, C'	m'/m	$\Delta K_{th}, \Delta K_{th,rms}$
Constant	3.57	8.75×10^{-14}	—	10.80
Random-A	3.43	2.34×10^{-13}	0.96	7.62
Random-B	3.50	1.90×10^{-13}	0.98	6.06

図11 ランダム荷重下き裂伝ば曲線

図12 修正マイナー則に基づく寿命予測

考え方としてマイナー (Miner) の線形累積損傷則⁽¹⁰⁾がある。マイナー則では次式で表される累積損傷値 D が 1 になったとき破壊が生じると考える。

$$D = \sum (n_i/N_i) = 1 \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 N_i は応力振幅 σ_i が単独で繰返されたときの疲労寿命、 n_i はその応力で加えられた繰返し数である。さらに、過小応力についても $S-N$ 曲線を低応力側まで直線的に延長して同様の扱いを行う修正マイナー則がある。

修正マイナー則に基づき求めたフレット疲労の予測寿命と実験結果の関係を図 12 に示す。図中には参考のため、修正マイナー則が成立する場合を実線で、それに対する 2 倍・半分 (Factor of two) のばらつき範囲を破線で示した。図よりわかるように、本実験範囲内では一点を除き 2 倍・半分 (Factor of two) のばらつき範囲に収まっていた。

以上のようなことから、本実験内におけるランダム荷重を用いたフレット疲労試験ではほとんど累積損傷が 1 以下で危険側と評価されるが 2 倍・半分 (Factor of two) のばらつきを許せば修正マイナー則はほぼ成立している。このようにランダム荷重下で修正マイナー則が比較的良好に成立することは、前報⁽⁴⁾の二段重複荷重下の疲労試験で破断までの繰返しブロック数が増えると修正マイナー則が成立するようになることと対応しており、フレットの影響によりき裂の発生・伝ばの加速が顕著な領域に頻度高く各レベルの応力が繰返されるためと考えられる。

4.2 破壊力学的手法に基づく寿命予測 著者らは前報⁽²⁾⁽³⁾において破壊力学的手法に基づき一定荷重振幅下のフレット疲労の疲労き裂伝ば寿命の推定を試み、実験結果とよく一致することを報告している。また、二段重複プログラム荷重下のフレット疲労寿命を同様の手法により推定し、初期にフレット

ティングの影響を強く受けるという非線形性が配慮された本手法による推定寿命が、修正マイナー則に基づく推定寿命よりもよりよく実験結果と一致することを示した⁽⁴⁾。本研究でも、前報の疲労き裂伝ば寿命推定手法に準じ、ランダム荷重下のフレット疲労寿命の推定を試みた^{**1}。寿命推定に必要な材料定数などはすべて前報と同一である。すなわち、繰返し応力-塑性ひずみ ($\sigma_a - \epsilon_{pa}$) 曲線

$$\sigma_a = \sigma_{yc} (\epsilon_{pa}/0.002)^n \dots\dots\dots (7)$$

を与える繰返し降伏応力 σ_{yc} と繰返し硬化係数 n はそれぞれ 369 MPa および 0.208、第 1 段階き裂深さと相対すべり量の関係、 $d_1 = 0.22 S_{rms}$ 、および接触面圧の集中係数 $\alpha = 0.33$ である。図 13 に上記のようにして求めた推定寿命と実験値の関係を示すとともに図 2 に推定寿命を破線で示した。これらの図より推定寿命と実験値は非常によく一致しており、ランダム荷重試験の荷重、摩擦力および相対すべり量の r. m. s. 値を用い、上記のような破壊力学的取扱いによりランダム荷重下のフレット疲労寿命の推定が行えることがわかった。

5. 結 言

SUP9 鋼を用い平均応力零のガウス性擬似ランダム荷重下のフレット疲労試験を行い、フレット疲労特性を調べた結果、次のような結論を得た。

(1) ランダム荷重を r. m. s. 値で整理した場合の $\sigma_{rms}-N_f$ 曲線は、一定荷重振幅下の $S-N$ 曲線と比較して、通常およびフレット疲労とも短寿命側となる。

(2) ランダム荷重を r. m. s. 値で整理して疲労限度を求めた結果、通常疲労試験では Random-A の場合 500 MPa および Random-B の場合 420 MPa となり、一定荷重試験のそれと比較して、それぞれ 17 % お

^{**1} 前報⁽²⁾⁽³⁾では寿命算定の際の ΔK 値は次式で与えている。

$$\Delta K/2 = 1.12 \sigma_a (\pi a)^{1/2} + K_{F1} + K_{F2}$$

ここで右辺の第 1 項は負荷応力振幅に基づく成分、 K_{F1} はブリッジ端部の集中摩擦力に基づく成分、 K_{F2} は等分布摩擦力に基づく成分である。式 (1) は弾性き裂の場合であるが、試験が比較的高応力で行われたことを考慮すると、弾塑性き裂伝ば、すなわち、繰返し J 積分 ΔJ による取扱いが必要である。そこで、実際の寿命算定には塑性変形した時の見掛けの ΔK 値、 $\Delta K_{app} = (\Delta J)^{1/2}$ を用いた。ここで、

$$\Delta K_{app} = g^{1/2} \Delta K$$

$$g = [1 + (1/2)(1-n)/(1+n)]$$

$$+ g_1 (E \epsilon_{pa} / \sigma_a), \sigma_a > \sigma_{yc} \text{ の時}$$

$$= [1 + (1/2)(\sigma_a / \sigma_{yc})^2 (1-n)/(1+n)]$$

$$+ g_1 (E \epsilon_{pa} / \sigma_a), \sigma_a \leq \sigma_{yc} \text{ の時}$$

$$g_1 = n + 3.85(1-n)/\pi n^{1/2}$$

破断寿命は、初期き裂長さ $a_0 = d_1$ から限界き裂長さ、すなわち試験片厚さの半分 (= 2 mm) に達するまでの繰返し数とし、き裂伝ば曲線、式 (4)、(5) を積分することにより求めた。

図 13 破壊力学的手法に基づく寿命予測

よび 32 % 程度の疲労限度の低下となる。また、フレット疲労試験では Random-A の場合 304 MPa および Random-B の場合 210 MPa となり、一定荷重試験のそれと比較して、それぞれ 5 % および 34 % 程度の疲労限度の低下を示した。

(3) ランダム荷重下の相対すべり量、摩擦係数および第 1 段階き裂長さは、r. m. s. 値で整理すると、それらの間の関係および応力振幅との関係は、一定荷重振幅の場合の関係とほぼ一致していた。

(4) 修正マイナー則を用いて、ランダム荷重の疲労寿命の評価を行った結果、いずれの試験条件とも危険側の評価となっているが、Factor of two のばらつき内でよい推定値が得られた。

(5) 第 2 段階き裂伝ばが疲労寿命の大部分を占めるという仮定の基に r. m. s. 値で整理したランダム荷重下のき裂伝ば曲線を用い推定した疲労寿命は極めて良く実測値と一致した。

終わりに、本研究の遂行に協力いただいた長岡技術科学大学大学院・竹田敬一郎、佐藤豊一両君に感謝する。また、本研究は文部省科学研究費(一般研究 B 58460082) の補助を受けた。

文 献

- (1) 武藤・ほか 4 名, ばね論文集, 29 (昭 59), 38.
- (2) 田中・ほか 2 名, 機論, 51-464, A (昭 60), 1200.
- (3) Tanaka, K., ほか 3 名, *Fatigue Eng. Met. Struct.*, 8-2 (1985), 129.
- (4) 武藤・ほか 2 名, 機論, 52-478, A (昭 61), 1477.
- (5) Endo, K. and Goto, H., *Wear*, 38 (1976), 311.
- (6) Alic, J. A. and Hawley, A. I., *Wear*, 56-377 (1979), 377.
- (7) 北川・福田, ほか 1 名, 機論, 43-371 (昭 52), 2439.
- (8) 薄・岡村, 機論, 45-390, A (昭 54), 92.
- (9) Paris, P. C. and Erdogan, F., *Trans. ASTM*, Ser. D., 85 (1963), 523.
- (10) Miner, H. A., *Appl. Mech. J.*, (*Trans. ASME*), 12 A (1945), 159.

討 論

〔質問〕 河 合 末 男

〔日立製作所(株)機械研究所〕

フレット疲労においては、一般に繰返し数 10^8 回程度でも疲労限度が現れない。一方、実機でフレット疲労が問題となる部材が受ける全寿命中の繰返し数は 10^8 回以上のものが大部分である。したがって、本研究のように、実際の荷重波形に近いランダム荷重波を用いて行う研究では高繰返し数領域での疲労挙動が重要と考えられる。このことに関連し、次の点につき、伺いたい。

(1) 本研究はどのような機械の部品を想定して行われたものか。

(2) 本研究の結果を繰返し数 10^8 回以上のフレット疲労を受ける部材の強度推定にどのように活用できるか。

〔回答〕 (1) 供試材としてばね鋼をとりあげていることから推察されるように、重ね板ばね等のばねを想定して行った。例えば重ね板ばねの設計寿命は 3×10^5 回程度となっているのが一般的なようであり、重ね板ばねの疲れに関する共同研究^(付1)で行われた実機ばねの疲労試験も 10^6 回以下の疲労強度が検討の対象とされている。

(2) Random-A の場合には一定荷重下の場合と同様に S-N 曲線に明りょうな折れ曲りが認められる。Random-B の場合には、本実験範囲内では必ずし

もそれが明りょうでないので、 10^8 回以上の疲労強度について言及するにはさらに長寿命の実験結果を得ることが望まれる。なお、寿命推定に関しては、基本的には本手法はそのまま適用できるものと考えている。

〔質問〕 佐 藤 建 吉〔千葉大学工学部〕

質問者は、一定応力振幅下のフレット疲労き裂進展について材料・応力比・応力振幅・面圧等を変えて検討している(付2)~(付5)立場から興味深く拝読させていただいた。以下にご回答願いたい。

(1) 寿命予測には図 11 の $\Delta K_{rms}-da/dN$ 関係を用いているが、これは CCT 試験片による 2 mm 以上のき裂で求められたものであり、フレット疲労の場合の $d_i = \text{数 } \mu\text{m}$ からのき裂進展には微小き裂の影響がフレットの影響と重畳していると考えられる。微小き裂の影響を考慮する必要はないか。

(2) 寿命予測の結果は、図 13 において実験値と一致しているか、あるいはそれよりも長めになっている。この予測寿命には前報⁽²⁾で記述してある 10~25 % 程度(この値は低応力側ではさらに大きいと(付6)考えられるが、)のき裂発生寿命を加えてあるのか。

(3) フレット疲労における一定応力振幅とランダム荷重による強度(寿命)の相違は、図 11 の通常疲労の下限界特性の相違に基づくということか。

〔回答〕 (1) ご指摘のとおり、微小き裂の取扱いを考慮すべきと考えている。そのため必ずしも十分

とは言えないが、前報⁽²⁾あるいは本報の脚注に示したように、寿命推定にあたっては繰返し J 積分の取扱いをとり入れている。

(2) き裂発生寿命は加えていない。図 13 に示す推定寿命を 1.25 倍し整理し直しても、著者らの結論には影響がない。

(3) 寿命推定の際に必要となる諸値、例えば摩擦係数、相対すべり量、 m 値等いずれも r. m. s. 値で整理すると、一定振幅下の場合とほぼ等しくなる。異なる

のは ΔK_{th} 値であるので、そのように考えてよいと思う。

-
- (付 1) 重ね板ばねの疲れに関する共同研究, ばね論文集, 20 (昭 50), 117.
(付 2) 佐藤・ほか 2 名, 材料, 33-371 (昭 59), 1065.
(付 3) 佐藤・ほか 2 名, 材料, 34-384 (昭 60), 1076.
(付 4) 佐藤・ほか 2 名, 機論, 52-474, A (昭 61), 417.
(付 5) 佐藤・ほか 2 名, 機論, 52-483, A (昭 61), 2471.
(付 6) 佐藤・出口, 材料学会第 36 期学術講演会前刷, (昭 62), 165.