

(1) 塑性順応の仮説とその物理的意味

崇城大学 正 ○松野 博 大阪産業大学 向井 喜彦

1. 緒 言

筆者らは先に、平滑および切欠材の疲労データの相関パラメータとして『等価応力比』を提案した¹⁻³⁾。さらに通常の疲労強度線図において平均応力の代りに等価応力比を、また応力振幅(範囲)の代りに切欠底での弾性応力振幅(範囲)を採用すれば、両者の間には、切欠の有無、応力集中係数の相違および荷重様式の相違に依存しない一義的な関係が得られることを示した⁴⁾。こうした考え方の基礎となったのは、疲労中の材料表面層の変形挙動に対し新たに導入した『塑性順応』という仮説である。当初、本仮説は連続体力学の観点から疲労荷重に対する材料表面層と内部の変形挙動の違いを表現しようとしたものであるが、疲労塑性現象に対する巨視的および微視的アプローチのギャップを埋めるひとつの考え方としても期待できる。そこで、本報ではこのような観点から本仮説のもつ物理的意味について考察した内容を表す。

2. 塑性順応の仮説

Fig.1に連続体としての材料の基本的な力学性質を概念図に表す。図では『繰返し塑性』と『疲労塑性』を分離した。前者は繰返し降伏応力依存型の均一性を基本とする巨視的な塑性現象であるのに対し、後者は繰返し回数に依存して表面層に局所的に現れる疲労固有の微視的な塑性現象である。平ら⁵⁾は、X線応力測定法により曲げ疲労中の残

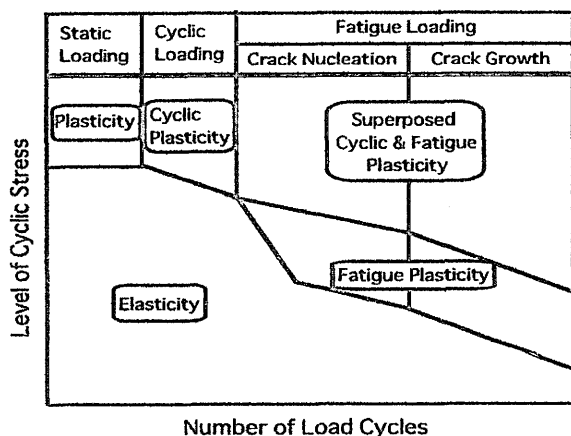


Fig.1. Fundamental mechanical properties of metals.

留応力を測定した。その結果材料表面層では負荷応力の方向に圧縮残留応力が残ることを明らかにした。これは繰返し荷重により表面層において塑性伸びが生じることを意味する。そこで、筆者らは連続体力学の立場より次のような仮定をおいた。すなわち『材料の表面層や切欠底および疲労き裂先端において、最大応力時に生じる弾性変形は繰返しにより局所的な塑性変形に変換される。その結果、表面層、切欠底および疲労き裂先端では、繰返し最大応力時に貯えられる弾性エネルギーは減少する。』本研究ではこれを『塑性順応の仮説』と名付けた。したがって、表面層の応力-歪履歴曲線はFig.2のように考えることができる。すな

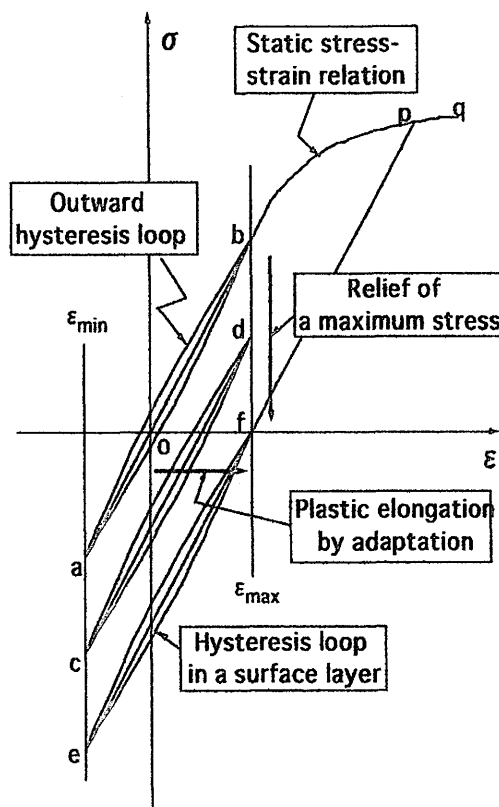


Fig.2. Illustration of fatigue plastic adaptation in a surface layer.

わち、材料全体としての履歴曲線は図のabの位置にあるが、表面層では繰返し最大応力を緩和する方向に塑性伸びを生じ、その結果、始めabの位置にあった表面層の履歴曲線はcdの位置、さらにはefの位置で描くようになる。このことは、発生した疲労微視き裂のごく初期での成長段階が、開口応力成分がないために、モードIIの形態をとることと関係があるように思われる。

3. 塑性順応の仮説の物理的意味について

疲労過程中的の表面層では、束状およびセル状の転位集合組織の他に、疲労固有のPersistent Slip Bands (PSBs) 組織が形成される。PSB組織の内部においてはさらに大量の転位と点欠陥が生成され活動する。点欠陥の多くは原子空孔であり、その大量発生は必然的にPSBsの体積膨張をもたらす^{6,7)}。体積膨張は当初周囲の結晶によって抑えられるため内部応力を発生するが、その後内部応力と負荷応力の重畳作用により迂りを誘発し、抑えられた体積膨張は解放される。その結果、自由表面にはExtrusionsが、また負荷応力の方向には迂りの方向と配列に依存して伸び変形が現れる。迂りは不可逆的であり、それによって生じる伸び変形は戻ることなく繰返しとともに次第にその大きさと領域を増大する。こうした変形は表面上の周囲および表面直下の結晶に対して『拘束枠(frame)』あるいは『楔

(wedge)』の役割を果たすと考えられる。平ら⁹⁾は疲労中の表面から深さ方向における残留応力分布を測定した。その結果、圧縮残留応力のピーク値は表面より内部にずれることを示した。これは、ひきによる伸び変形がそのまま残留するのに対し、表面近傍の原子空孔が自由表面にsinkされ、その分体積膨張が緩和され、表面での圧縮応力が減少するためと考えられる(ひきの拘束棒効果)。この現象は以下に述べる振り疲労において顕著に認められる。

Fig.3に振り疲労における塑性順応のメカニズムを模型的に表す。両振り振りを例にとると、円周および軸方向のせん断応力に対し45°の傾きをもつ互いに直交するふたつの方向に、同じ大きさの両振り引張圧縮応力が互いに180°の位相差をもって作用すると考えてよい。(b)図において正のせん断応力 τ により生じた塑性ひきはその不可逆性により負のせん断応力 $-\tau$ に対し固着される。したがって、 $-\tau$ によるひきは別の場所あるいは別のひき系で新たに発生する。こうした不可逆性のひきが表面層で繰返しとともに発達し深まることによって振り疲労における塑性順応が進行する。その結果、振りの場合の塑性順応による伸びは直交するふたつの主応力の方向に同じようにして起こると考えてよい。これは(c)図に示すように体積膨張を必要とする。こうした体積膨張は、PSB組織の内部で生じる大量の原子空孔とその拡散によって補われると考えられる。平ら⁹⁾は振り疲労において曲げとは逆に表面で等方向に近い引張残留応力が生じることを示した。この場合もひきの拘束棒効果が曲げの場合よりも著しく現れたと考えることができる。

さて、塑性順応の仮説は、表面層に生じる伸び変形が繰返し最大主応力に依存することを表す。したがって、引張圧縮および曲げ疲労の場合、応力振幅が同じであっても平均応力値が増大すれば塑性順応によって生じる表面層の伸び量も大きくなる。しかしながら、振り疲労の場合、平均応力の影響については状況を全く異にする。Fig.2は平均応力を有する繰返し振りの応力波形を示したものであり、(a)図はせん断応力 τ_N の応力波形、(b)および(c)図はそれ

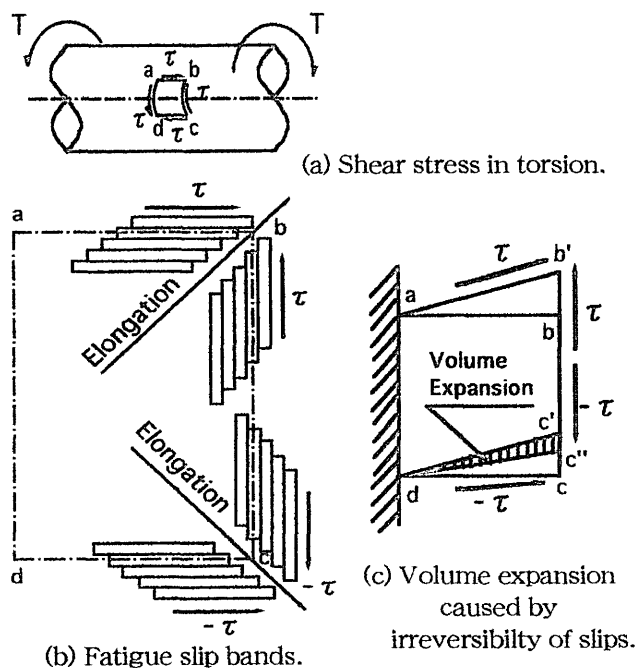


Fig.3. Illustration of plastic adaptation in torsional fatigue.

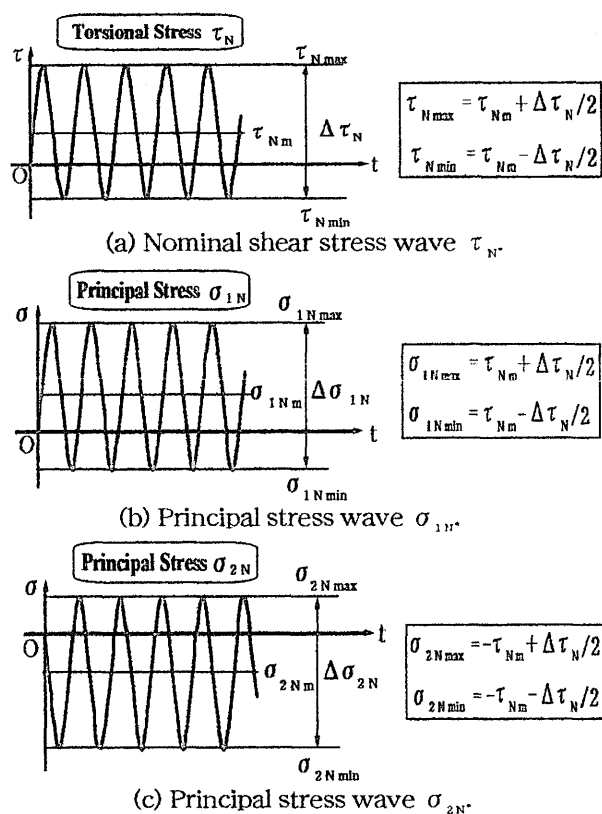


Fig.4. Principal stresses in cyclic torsion (case of non-zero mean stress).

ぞれ直交するふたつの方向の主応力 σ_{1N} および σ_{2N} の波形を表す。 σ_{1N} および σ_{2N} は互いに異符号でかつ横軸の時間軸に対称であるが、ひきの不可逆性により、それぞれを独立した繰返し応力とみなし符号も含めた形で最大応力 σ_{1Nmax} および σ_{2Nmax} と最小応力 σ_{1Nmin} および σ_{2Nmin} を定義する。その上で、最大応力どうしの総和($\sigma_{1Nmax} + \sigma_{2Nmax}$)に対する最小応力どうしの総和($\sigma_{1Nmin} + \sigma_{2Nmin}$)の比をとると、その値は振りの平均応力 τ_{Nm} の如何を問わず -1 という一定値を示すことになる。これは次のことを意味する。振りの場合瞬時瞬時の応力状態における主応力は常にゼロであるために、静的負荷の下では体積膨張は考え難いが、疲労の場合直交するふたつのそれぞれの方向に主応力の大きさに該当する引張圧縮応力が別々に独立して繰返されると考えることにより、双方向に塑性順応に起因する塑性伸びを生じ、その結果体積膨張を生じると考えられる。またこれは振りの平均応力には関係しない。こうした意味から筆者らは『公称応力比 R_N 』の単軸、振りを含む一般式として(1)式を与えた。これは平滑および切欠材の相関パラメータ『等価応力比 R_{eq} 』の算定に必要である。

$$R_N^* = (\sigma_{1Nmin} + \sigma_{2Nmin} + \sigma_{3Nmin}) / (\sigma_{1Nmax} + \sigma_{2Nmax} + \sigma_{3Nmax}) \quad (1)$$

なお、多軸応力状態における平均応力の影響を考慮するための応力パラメータとして、Sines¹⁰⁾は主応力波形の平均応力値の総和を採用し(2)式を提案した；

$$\sigma_{Nm}^* = \sigma_{1Nm} + \sigma_{2Nm} + \sigma_{3Nm} \quad (2)$$

(1)および(2)式はそれぞれ応力比と平均応力の表示の違いはあるが、物理的には同じ意味をもつものとみてよい。

(結論および参考文献については省略)