

220 骨の繰返し荷重下における損傷蓄積と疲労寿命

Damage accumulation and fatigue life in bone under cyclic loading

石原外美 (富山大学)、五嶋孝仁 (富山大学)、〇岩脇章二 (富山大学) C.Fleck (ドイツ, カイザーラウテルン大学)

Sotomi ISHIHARA, Takahito GOSHIMA, Shoji IWAWAKI, C.Fleck

Dept. of Mechanical Engineering, Toyama University, Toyama 930-8555, Japan

Key words : Cortical bone, Fatigue life, Crack propagation, Simulation, Stress frequency

1. 緒言

緻密骨の疲労寿命は、片振り引張、両振り並びに圧縮疲労によって異なり、疲労寿命は応力比並びに平均応力によって複雑に変化する事が知られている。しかし、その特性は必ずしも明らかになっていないとは言えず、また、その疲労破壊過程には不明瞭な点が多い。

本研究では牛緻密骨試験片を用いて、片振り引張、両振り並びに圧縮疲労実験を行い、疲労寿命に及ぼす応力比並びに平均応力の影響を明確にした。ついでその疲労機構について、実験観察と疲労過程のコンピュータシミュレーションより調査し考察を加えた。

2. 試験片と実験方法

本研究で用いた試験片は、市販の牛大腿骨の骨幹のち密骨である。疲労実験は電気・油圧サーボ疲労試験機を用いて、両振り引張圧縮 ($R=-1$)、片振り引張 ($R=0.1$)、片振り圧縮 ($R=10$)の3種類の応力比のもとで行った。また、各応力比に対して、20Hzの応力繰返し速度のもとで実験を行った。

3. 実験結果

3.1 疲労寿命に及ぼす応力比の影響 図1(a), (b)並びに(c)は、それぞれ片振り引張($R=0.1$)、両振り($R=-1$)並びに圧縮疲労($R=10$)の3種類の応力比のもとで得られた牛大腿骨の最大応力 σ_{max} と疲労寿命 N_f の関係を片対数グラフ上に図示したものである。なお、圧縮疲労では縦軸に最小応力の絶対値をとり整理している。なお図中にはシミュレーション結果も示してあるが、後ほど説明する。これらの図より一定の疲労寿命 N_f に対し、両振り、片振り引張、圧縮疲労の順に疲労強度が大きくなっていることがわかる。最大の圧縮疲労強度は片振り引張疲労強度よりも約40~50%、また片振り引張疲労強度は両振り疲労強度の約30%高くなっている。

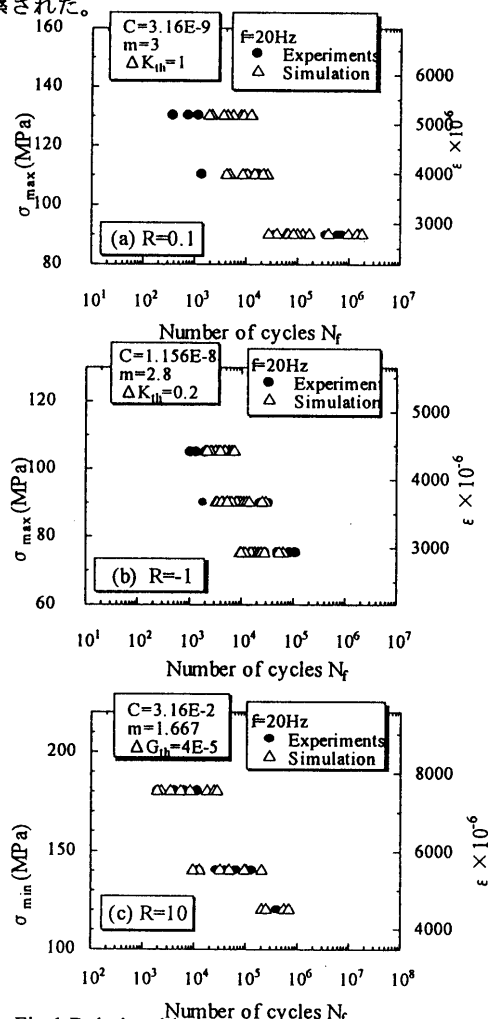
3.2 疲労寿命に及ぼす平均応力の影響 図2に応力振幅 $\sigma_a = 60\text{MPa}$ を一定にした時の疲労寿命 N_f と平均応力 σ_m の関係を示す。なお、図中のシミュレーション結果については後述する。図より平均応力が負の領域において N_f に大きな違いは認められないが、引張領域において、平均応力が大きくなるにつれて疲労寿命は低下しているから、引張りの平均応力が大きな疲労損傷をもたらすことがわかる。

3.3 疲労寿命と試験片変位幅の関係 3種類の応力比で得られた疲労寿命を支配する因子として、試験片に繰返し負荷される変位幅が予想された。変位幅は疲労過程で変動するので、代表値として $N/N_f=0.5$ における値 $\Delta\lambda$ を採用し、これと疲労寿命 N_f の関係を調査した。図3は、3つの応力比に対する $\Delta\lambda$ と疲労寿命 N_f の関係を示している。図中のシミュレーション結果については、後程説

明する。図よりデータのばらつきは大きいけれども、 N_f の長短は応力比、応力値に依らず $\Delta\lambda$ の大小でほぼ規定されることがわかる。従って、 $\Delta\lambda$ は疲労寿命を規定する重要なパラメーターであることがわかる。

3.4. 破断部近傍のき裂の発生状況

疲労試験後の骨組織の損傷度を観察するため、破断後の試験片をその軸方向にほぼ平行な断面で切断し、現れた断面を光学顕微鏡で観察した。その結果、 $R=-1$ では、試験片内部に多数の二次き裂が観察された。また、二次き裂の進展方向が試験片軸方向に対し傾き、圧縮負荷によるモードII形のき裂が生じていることがわかった。一方、 $R=0.1$ では、 $R=-1$ に比べ大きな二次き裂が観察されずその数も少なかった。また、圧縮疲労 $R=10$ の破断部では、 $R=0.1$ に比較してさらに二次き裂の数は少ないことが観察された。

Fig.1 Relationship between σ_{max} and N_f .

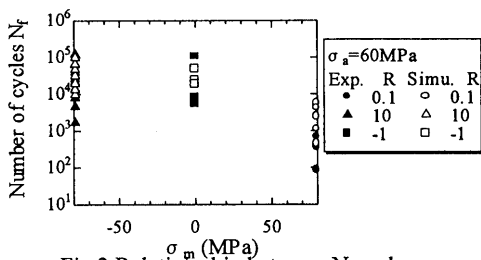


Fig.2 Relationship between N_f and σ_m

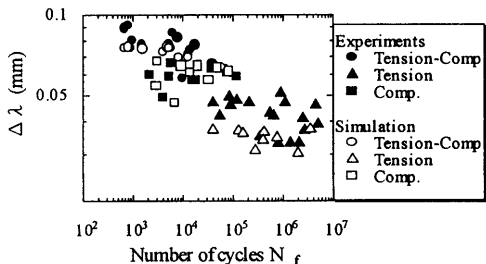


Fig.3 Relationship between $\Delta \lambda$ and N_f

4. 骨組織とモデル化

以上の実験結果を考察するために、骨モデルを用いて、疲労過程のシミュレーションを行った。以下にシミュレーション法について示す。骨組織は図 4(a)に示すように種々の寸法、形状を有するオステオンから成る。本研究では、オステオンを、図 4(b)に示すように、一定寸法、形状の組織としてモデル化し、図 5(a)に示すように、骨試験片をモデル化されたオステオンから構成される 2 次元梁構造物として近似する。疲労過程に各オステオンに発生する負荷応力の大きさは有限要素法によって求めた。解析にあたって、対称性を考慮して、試験片の 4 分の 1 のみを解析した。要素数、接点数はそれぞれ 114 及び 84 である。

骨組織は潜在的にハーバース管等の欠陥を含んでおり、き裂はこのような欠陥部から発生、進展することが明らかにされている。ここではき裂は、図 5(b)に示すように、各オステオンを構成している部材の中央部に存在する欠陥から発生、進展するものと仮定する。

4.シミュレーションの概要 骨試験片中の骨部材のうち、一個でも破壊した場合その部材の剛性が失われるので、部材の破壊の都度、各部材に再分布する応力値を FEM により計算する。以後、次の部材が破壊するまで、この新しい応力分布を用いて疲労き裂進展シミュレーションを繰り返す。試験片の最終破壊は試験片全体の剛性が初期値の 60% 以下になったときに生じるものと定義した。以下では、シミュレーションプログラムの各ルーチンの役割、内容について詳述する。

(I)初期き裂の分布 骨組織における貫通間や骨小腔等の空孔を初期き裂と見なし、その長さを a_i とした。初期き裂長さ a_i の分布は実測値に基づき、次式の 3 母数ワイブル分布で近似した。

$$F(a_i) = 1 - \exp\{- (a_i - 7.7) 1.31 / 78.6 \} \quad (2)$$

但し、 a_i の単位は μm である。

(II) ΔK の算出 荷重負荷時の各梁部材に生じる軸応力 $\Delta \sigma$ とモーメント ΔM は、有限要素解析によって求め、 ΔK を次式で計算した。 $\Delta K = \Delta K_\sigma + \Delta K_M$ ここで $\Delta K_\sigma = \Delta \sigma \sqrt{\pi a_i}$ 、 $\Delta K_M = 6 \Delta M \sqrt{\pi a_i} / bt^2$ である。また a_i は初期き裂長さ、 t は梁要素の幅、 b は梁要素実行きである。

(III)き裂進展下限界値 き裂進展下限界値 ΔK_{th} は、

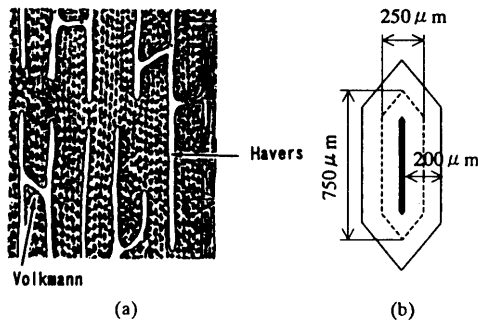


Fig.4 Microstructure of bone.

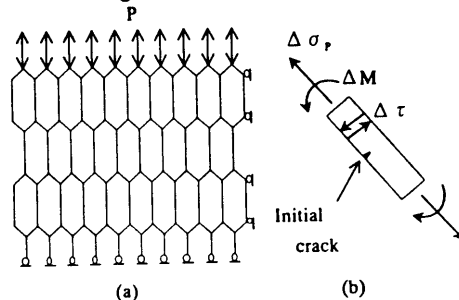


Fig.5 FEM model for specimen.

各負荷条件における実測値を用いた。

(IV)き裂進展 き裂進展則としてパリソ則を用いた。

$$da/dN = C(\Delta K)^m$$

ここで C 、 m は材料定数である。 C は対数正規分布、 m は一定値とし、これらの値は実測値より定めた。

(V)梁の破壊の定義 疲労過程における梁要素の破壊の定義は、き裂長さ a が梁要素幅 t の 80% に達した時と仮定した。

(VI)試験片の破壊の定義 有限要素解析より試験片の変位量を算出し、これより試験片の見かけのヤング率 E の変化を求めた。全体の破壊は、ヤング率 E がその初期値 E_0 の 60% 以下になった時点と定義した。

5. シミュレーション結果と実験との比較

以上のシミュレーション結果を実験結果と比較すると、図 1 より、両疲労寿命は非常によく一致している。応力比による影響も実験値と同様に片振り圧縮疲労のほうが片振り引張疲労よりも約 40~50% ほど高くなることが認められる。また図 2 の疲労寿命と平均応力の関係では、引張平均応力域で、シミュレーション結果と実験結果の間には若干差異が見られるものの、シミュレーション結果は概ね実験傾向と一致している。図 3 の $\Delta \lambda$ と N_f 関係では、シミュレーション結果には多少のばらつきは認められるものの、実験傾向と同様な結果が得られることがわかる。

5. 結言

- (1)一定の疲労寿命 N_f に対し、両振り、片振り引張、圧縮疲労の順に疲労強度が大きくなる。
- (2) 平均応力が負の領域において N_f に大きな違いは認められないが、引張領域において、平均応力が大きくなるにつれて疲労寿命は低下する。
- (3) 疲労寿命 N_f の長短は応力比によらず、試験片軸方向への変位幅 $\Delta \lambda$ の大小で規定される。両振り引張圧縮疲労実験の $\Delta \lambda$ 値は、片振り引張疲労のそれよりも大きくなる。
- (4) 六角形状のオステオンから成るモデルを用い、牛骨の疲労破壊過程のシミュレーションを行った。シミュレーション結果は実験結果とよく一致した。