牛骨の疲労強度並びにき裂進展特性に及ぼす
応力繰返し速度および骨密度の影響*石 原 外 美^{*1}, 五 嶋 孝 仁^{*1}
東 川 弥^{*2}, 盛 野 優 之^{*2}Effects of Stress Frequency and Bone Density on Fatigue Lives
and Crack Growth Behavior in Bovine BoneSotomi ISHIHARA, Takahito GOSHIMA,
Hisashi HIGASHIKAWA and Masayuki MORINO

To investigate the effects of stress frequencies and bone density on the fatigue lives and crack growth behaviors, rotating bending fatigue tests on bovine compact bone were performed under various stress frequencies ranging from 0.3 Hz to 30 Hz. Cycle-dependent features were observed in the fatigue behavior of bovine bone within the above range of stress frequencies. This result differs from the previous findings that fatigue lives increase with stress frequency in the range above 30 Hz; therefore in bone fatigue tests, it is wrong to estimate fatigue behaviors at lower stress frequencies from those obtained at higher stress frequencies. The fatigue lives and the crack initiation time for the bone specimens were expressed as functions of both the applied stresses and the bone density. These expressions may be useful for predicting the time when cracks may be induced in bone by daily activities.

Key Words: Biomechanics, Bovine Bone, Fatigue, Crack Propagation, Crack Initiation, Stress Frequency, Bone Density

1. 緒 言

近年、若年者の過度の運動による疲労骨折や老年者の骨粗しょう化が問題となっている。これらの症状は気がついたときには症状が悪化していることが多い。したがって症状の悪化を防止したり臨床学的立場から、骨の疲労破壊過程やき裂進展特性を明確にすることは重要であると思われる。

著者らは既報⁽¹⁾において牛骨の応力繰返し速度 30 Hz における破壊寿命とき裂進展特性について報告した。しかし、人間が日常生活で体験する 2~3 Hz 前後⁽³⁾ のより低い応力繰返しの場合にこれらの結果が適用できるかについては不明である。また骨の疲労寿命はばらつきが多く、その原因の一つに骨密度の差異が考えられる。

骨の疲労寿命に及ぼす応力繰返し速度の影響に関する研究として、以下の研究がある。Lafferty ら⁽²⁾⁽³⁾ は 30 Hz 以上の応力繰返し速度域では、応力繰返し速度の増加とともに疲労寿命が増加することを報告し、これを、静的機械的性質のひずみ速度依存性より説明し

ている。Carter ら⁽⁴⁾ は応力繰返し速度 2 Hz のもとで、人骨の片振り疲労試験と完全両振り実験およびクリープ実験を行い、疲労寿命に及ぼす波形の効果を、時間依存型の損傷モデルにより説明している。しかし、Lafferty らの研究⁽²⁾⁽³⁾ では、より低繰返し速度域の特性が明確ではなく、また Carter らの研究⁽⁴⁾ では低応力域、長寿命域の特性が明確になっているとはいえない。

骨の力学的性質に及ぼす骨密度の影響に関しては、静的機械的性質に関して、多くの研究がなされているが^{(5)~(7)}、疲労に関しては、Carter らの研究⁽⁸⁾ を除いて知見しない。Carter らの研究においても、疲労寿命に関してのみ、骨密度の影響を検討したものであり、骨密度の差異により疲労損傷過程がどのように変化するかに関しては明確になっていない。

本研究は骨の疲労過程の損傷進行過程を明確にする研究の一環として、0.3 Hz から 30 Hz までの範囲で応力繰返し速度を変化させながら疲労実験を行い、牛骨の疲労寿命およびき裂進展特性に及ぼす応力繰返し速度の影響を明らかにし、その場合の骨密度の影響を検討したものである。

* 原稿受付 平成 6 年 6 月 9 日。

^{*1} 正員, 富山大学工学部 (〒930 富山市五福 3190)。^{*2} 学生員, 富山大学大学院。

2. 試験片および実験方法

2.1 試験片 供試材は市販の牛大腿骨のち密質である。試験片形状を図1に示す。試験片の加工は、図2に示すように、まず骨頭部を切断し骨内部の骨髓を除去した後、A部で示される骨幹を取り出し、その半分を約 $10 \times 10 \times 60$ mmの大きさに切断した。その後旋盤で機械加工した。試験片の軸方向は大腿骨の長手方向に一致するように、また最小断面部が大腿骨の中央部にくるように加工した。試験片表面仕上げは、エメリー紙(#1000~1500)で表面研磨後、さらにダイヤモンドペーストによる仕上げ研磨を行い、実験に供した。加工後、腐敗と乾燥を防止するために、試験片を実験を行うまで273 Kの一定温度の3%塩水中に入れて保管した。

2.2 実験方法 用いた疲労試験機は図3に示すような自作の片持回転曲げ疲労試験機であり、応力繰返し速度 f は30 Hz, 1.5 Hz, 0.3 Hzの3種類である。実験は298 Kで行い、疲労過程で試験片が常に湿った

図1 試験片形状

図2 試験片の採取方法

状態にあるように、ポンプを用いて試験片にリンゲル液を滴下させながら疲労実験を行った。

疲労過程の試験片表面の連続観察並びにき裂長さの測定はレプリカ法を用いて行った。レプリカの採取は、一定時間ごとに試験機を停止させ、荷重をかけない状態で行った。得られたレプリカを、光学顕微鏡にて約100倍で観察し適宜写真撮影することにより表面組織の変化の追跡とき裂長さの測定を行った。なお、き裂長さとして、試験片軸に垂直な方向へ投影した長さを採用している。

骨密度の測定は乾燥した試験片を用いて行い、大気中で測定した重量と、水中に吊して測定した重量の両者より求めた。重量測定は分解能0.01 gのデジタル式重量計を用いて行った。

3. 実験結果

3.1 S-N線図およびS-T線図 図4は牛大腿骨の応力繰返し速度 $f=30$ Hzにおける応力振幅 σ と破壊繰返し数 N_f の関係を両対数グラフ上にプロットしたものである。なお、応力は図1の試験片の最小断面部の公称応力値を示している。図中には、応力振幅が60 MPa以上の領域において得られた、応力繰返し速度 $f=0.3$ Hzおよび1.5 Hzに対する結果も併せて示されている。また、図5は、 $N_f = fT_f$ なる関係を用

図3 実験装置略図

図4 種々の応力繰返し速度における牛大腿骨の応力振幅と破壊繰返し数の関係

いて、図4の結果を負荷応力と破壊時間 T_f との関係で再整理したものである。これらの図中には既報の結果⁽¹⁾も併せてプロットしてある。図4の σ - N_f 線図よりわかるように、 $\sigma=60$ MPa 以上では、疲労寿命 N_f のばらつきは大きいものの、 N_f には、応力繰返し速度による明確な差異は認められない。一方、図5の σ - T_f 線図では、 $\sigma=60$ MPa 以上で、 T_f は応力繰返し速度 f の低いほど長くなっており、 T_f に明確な応力繰返し速度依存性が認められる。

図6は、一定の応力振幅 70 MPa における N_f 並びに T_f と応力繰返し速度 f の関係を、両対数グラフ上に整理したものである。また、図7は同様の関係を応力振幅 90 MPa について示したものである。図中の実線は、各応力繰返し速度における実験データの平均値を結んだものであり、また、破線および1点鎖線は、それぞれ T_f =一定で表される純粋に時間に依存して

破壊が生じる場合と N_f =一定で純粋に繰返し数に依存して破壊が生じる場合を図示したものである。これらの破線および一点鎖線は、実験傾向との直接比較を行いやすくするために、便宜上、三つの応力繰返し速度の、まん中の $f=1.5$ Hz における実測の疲労寿命分布の平均値を通るようにして引かれている。

図6の $\sigma=70$ MPa の場合、 N_f の平均値を結んだ実線は、純粋な繰返し数依存を示す一点鎖線とほぼ一致することから、繰返し数依存形の破壊形態を示すといえる。図7の高応力域 $\sigma=90$ MPa においても、平均値

図5 種々の応力繰返し速度における牛骨密骨における応力振幅と破壊時間の関係

図7 $\sigma=90$ MPa における応力繰返し速度 f と N_f および T_f の関係

図6 $\sigma=70$ MPa における応力繰返し速度 f と N_f および T_f の関係

(a) き裂進展形態(組織による妨害例)

(b) き裂進展形態(複数き裂の合体例)

図8 疲労過程の連続観察例 ($f=0.3$ Hz)

を結んだ実線は、時間依存性を示す破線に向かって反時計方向へ幾分回転する傾向が認められるものの、一点鎖線とはほぼ一致し、繰返し依存形の破壊を示すといえる。

3・2 き裂進展形態の連続観察 既報⁽¹⁾の $f=30$ Hz におけるき裂進展形態の連続観察に付け加えて、 $f=1.5$ Hz 並びに 0.3 Hz においても、き裂発生、進展形態の連続観察を行った。図 8 は、一例として $f=0.3$ Hz に対する結果を示したものである。図 8 (a) にみられるように、き裂は進展途上にある先在欠陥に進展を妨害されたり、また図 8 (b) のように、他のき裂と合体しながらジグザグ状に進展し、ある一定のき裂寸法に達すると不安定に破壊した。このようなき裂進展の形態は応力振幅の大小に依らなかった。また、上述の傾向は既報の $f=30$ Hz における傾向と同一であり、応力繰返し速度による明確な差異は認められなかった。

3・3 き裂進展特性 図 9 は、種々の負荷応力、応力繰返し速度 f に対して調査した疲労過程で発生する表面き裂の長さ $2a$ と応力繰返し数 N の関係を示したものである。図よりわかるように、疲労寿命同様に力学的条件を揃えても、き裂発生およびき裂進展挙動には試験片間の大きなばらつきが存在することがわかる。図 10 はき裂長さ $2a$ を疲労寿命比 N/N_f で整理

図 9 牛骨の疲労過程におけるき裂進展曲線

図 10 $2a$ と疲労寿命比 N/N_f の関係

した結果である。図 9 の $2a-N$ 関係で認められた大きなばらつきは、図 10 の $2a-N/N_f$ 関係では小さくなり、また、き裂発生時期は、応力繰返し速度 f に依らず $N/N_f \approx 0.2 \sim 0.4$ 程度であることがわかる。

図 11 は表面き裂の進展速度 da/dN と応力拡大係数幅 ΔK の関係を、 $f=0.3$ Hz, 1.5 Hz, 30 Hz について示したものである。ここで ΔK として、本来表面き裂に対する応力拡大係数を用いるべきであるが、ここでは便宜上無限板中の貫通き裂に対する次式を用いている。ここで、 σ は応力振幅、 a はき裂半長である。

$$\Delta K = \sigma \sqrt{\pi a} \quad \dots\dots\dots (1)$$

図より一定の ΔK においても、き裂進展速度には大きなばらつきが存在するが、 f による明確な依存性が現れていない。

図 12 は、 $da/dt = f(da/dN)$ なる関係を用いて、 da/dN より単位時間当たりのき裂進展速度 da/dt を

図 11 き裂進展速度 da/dN と応力拡大係数幅 ΔK の関係

図 12 き裂進展速度 da/dt と応力拡大係数幅 ΔK の関係

求め、 da/dt と応力拡大係数幅 ΔK の関係を示したものである。図より、図 11 の da/dN - ΔK 関係とは異なり、 da/dt - ΔK 関係には f 依存性が現れており、 f の大なるほど単位時間当たりのき裂進展量が大きくなる。

以上の図 11, 12 の二つの実験結果より、疲労寿命同様、き裂進展特性にも繰返し数依存形の破壊形態が現れてくることが確認できた。

4. 考 察

4.1 牛骨の疲労寿命並びにき裂進展特性に及ぼす応力繰返し速度の影響 これまでに、Lafferty ら⁽²⁾⁽³⁾ によって骨の疲労寿命に及ぼす応力繰返し速度の影響が調査され、30 Hz 以上の応力繰返し速度域では、応力繰返し速度 f の増加とともに疲労寿命が増加することが報告されている。一方、本研究結果によれば、30 Hz 以下の領域では、高応力域を除いて、骨の疲労寿命および疲労き裂進展特性は繰返し数依存型の破壊、つまり純粋な疲労による破壊が生じることが明らかとなった。以上の実験結果の食違いは、次の理由によるものと考えられる。Lafferty らが実験を行った比較的高応力繰返し速度域⁽²⁾⁽³⁾ では、骨のもつ粘弾性的性質により機械的性質に正のひずみ速度依存性が現れ、 f の増加する程疲労寿命の増加する結果を与える。一方、本研究の低応力繰返し速度域では、上記骨の粘弾性的特徴が現れにくく、 f に依らない疲労特性を示したのと考えられる。したがって、30 Hz 以上の高応力繰返し速度域で調査された疲労特性から、人間が日常生活で体験する 2~3 Hz 前後の低い応力繰返しの場合の疲労特性を推定することは不適当であると結論される。

4.2 牛骨の疲労寿命並びにき裂発生寿命に及ぼす応力と骨密度の影響 骨の疲労寿命は同一応力振幅下においても非常にばらつくことが知られている。そこで図 4 の S - N 線図において、各応力振幅における

疲労寿命 N_f の平均値 N_{fm} を求め、 N_{fm} と応力振幅 [MPa] の回帰直線を求め、次式を得た。

$$N_{fm} = A\sigma^B \quad \cdots \cdots (2)$$

ここで A, B は定数で、 $A = 1.023 \times 10^{18}$, $B = -7.15$ である。図 13 は無次元量 N_f/N_{fm} を縦軸に、横軸に個々の試験片の骨密度 ρ [g/cm³] をとり、 S - N データを整理した結果である。ばらつきの度合いが大きいので、縦軸の N_f/N_{fm} と横軸の ρ の間の相関関係が存在するかどうかについて、 χ^2 検定を行ったところ、有意水準 95% で両者の間に相関関係が存在するという結果を得た。図中の一点鎖線は回帰直線を示し、次式で表される。

$$N_f/N_{fm} = C\rho^D \quad \cdots \cdots (3)$$

ここで C, D は定数で、 $C = 3.162 \times 10^{-14}$, $D = 43.78$ である。式(2)を式(3)に代入し、 N_f について解くと次式を得る。ただし、計算による疲労寿命を実測値と区別するために、 N_f を N_{fc} と書き換えている。

$$N_{fc} = A'\sigma^B\rho^D \quad \cdots \cdots (4)$$

ここで A' は定数で、 $A' = 32\,347.3$ である。また、き裂発生寿命は疲労寿命の約 30% であるから、き裂発生寿命の近似値 N_{ic} は

$$N_{ic} \approx 0.3A'\sigma^B\rho^D \quad \cdots \cdots (5)$$

となる。

図 14 は実験による疲労寿命 N_{fe} と式(4)の疲労寿命の近似値 N_{fc} との関係を両対数グラフ上に示したものである。図より、多くのデータが図中の一点鎖線で示される $N_{fe} = N_{fc}$ なる直線上に乗ることから、近似結果はおおむね良好な結果を与えることがわかる。

4.3 疲労寿命近似式の一般化 前述したように、 f が 30 Hz 以上では疲労寿命が f に依存して増加することが Lafferty ら⁽²⁾⁽³⁾ によって、また Carter らにより、試験温度の影響を受けて疲労寿命が変化する⁽⁴⁾ ことが報告されている。そこで、これらの研究結果を用いて、式(4)を応力繰返し速度 f [Hz] と試験温度

図 13 N_f/N_{fm} と骨密度 ρ の関係

図 14 計算値と実験値の関係

$T[K]$ の影響を考慮したより一般化した近似式に改良し、次式を得た。式中、応力繰返し速度の項 f^G はLaffertyら⁽²⁾⁽³⁾によるものを、温度の項 T^E はCarterら⁽⁴⁾が得たものをそのまま用いている。

図 15 人骨データも含めた近似値と実験値の比較

図 16 短寿命試験片の疲労過程
($f=1.5$ Hz, $\sigma=70.5$ MPa, $N_f=18\,004$)

$$N_{fc} = \alpha \sigma^B \rho^D T^E, f \leq 30 \text{ Hz} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$N_{fc} = \beta \sigma^H \rho^D f^G T^E, f > 30 \text{ Hz}$$

ここに、 $\alpha, \beta, B, D, E, G$ は実験定数であり、それぞれ、 $\alpha=9.64 \times 10^{38}$, $\beta=6.75 \times 10^{41}$, $E=-13.82$, $G=0.486$, $H=-8.52$ となる。

図 15 は式(6)による疲労寿命の近似値 N_{fc} と、文献から得られた人骨のデータを含む種々の実験結果 N_{fe} ⁽⁴⁾⁽⁸⁾⁽¹¹⁾との関係を示したものである。なお、文献によっては、個々の試験片の骨密度がわからないため、記載してある骨密度の平均値を用いた。図よりわかるように、近似値と実験値とは良く対応していることがわかる。

4・4 き裂進展速度のばらつき要因の検討 図 9 にみられるように、疲労寿命同様、同一応力振幅、同

図 17 長寿命試験片の疲労過程
($f=1.5$ Hz, $\sigma=70.4$ MPa, $N_f=252\,337$)

図 18 一定の応力拡大係数幅における da/dN と骨密度 ρ の関係

一繰返し速度においてもき裂進展特性は大きくばらつくことがわかった。これらのばらつきの原因を明確にするために、短寿命試験片のき裂進展形態と長寿命試験片のそれとを比較した。図 16 は短寿命試験片の疲労過程、また図 17 は長寿命試験片の疲労過程の連続観察結果を示したものである。これらの図より、き裂の発生初期では、両者の差異は明確ではないが、長寿命試験片では、き裂は、骨組織に妨害されながら安定的に成長するのに対し、短寿命試験片では、き裂は、骨組織の界面を通り不安定的に進展している様子がわかる。

以上のき裂進展速度に及ぼす骨組織の影響として、骨密度を取り上げ、一定の応力拡大係数幅のもとで、き裂進展速度 da/dN が骨密度 ρ によりどのように変化するかを調べ、両対数グラフ上にプロットした結果を図 18 に示す。図より、骨密度 ρ の減少とともに da/dN は増加し、この傾向は応力拡大係数の大きさに依らないことがわかる。なお、 ρ の低い領域で、 da/dN が極大値をとった後、減少する傾向がみられるが、この点に関して、今後もう少し検討する必要がある。

本研究は In vitro 状態の実験結果であり、In vivo における自己修復能⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾の影響が入っていない。In vitro 状態で得られた疲労寿命の予測結果は、In vivo における疲労寿命よりは短くなるので、実際の疲労破

壊が生じる前に対策を警告することになる。その意味で In vitro 状態で得られた疲労寿命に基づく予測は有効と考えられる。

5. 結 言

牛の大腿骨の密質を用いて回転曲げ疲労実験を行い、牛骨の疲労破壊過程に及ぼす応力繰返し速度並びに骨密度の影響を調査し、以下の結論を得た。

- (1) 0.3 Hz から 30 Hz までの応力繰返し速度の範囲で、牛骨の疲労寿命 N_f 並びにき裂進展特性は繰返し数依存型の破壊形態を示すことがわかった。
- (2) き裂発生寿命は疲労寿命の約 30% であった。
- (3) 骨密度の減少に伴い、疲労寿命の減少とき裂進展速度の加速が生じることが明らかとなった。また、牛骨の疲労寿命、き裂発生寿命並びにき裂進展速度は、骨組織との関わりで大きくばらつく。
- (4) 骨の疲労寿命近似式を、応力振幅、骨密度、応力繰返し速度および試験温度の関数として、与えた。近似式は人骨を含む種々の実験結果に適用可能である。

文 献

- (1) 石原・ほか 2 名, 機論, **59**-557, A(1993), 50.
- (2) Lafferty, J. F., *Aviation, Space and Environmental Medicine*, **49**(1978), 70.
- (3) Lafferty, J. F. and Raju, P. V. V., *Trans. ASME*, **101**(1979), 112.
- (4) Carter, D. R. and Caler, W. E., *Trans. ASME*, **105**(1983), 166.
- (5) Gibson, L. G., *J. Biomech.*, **18**(1985), 317.
- (6) Carter, D. R. and Hayes, W. C., *The Journal of Bone and Joint Surgery*, **59**-A(1977), 954.
- (7) Mammone, J. F. and Hudson, S. M., *J. Biomech.*, **26**(1993), 439.
- (8) Carter, D. R. and Hayes, W. C., *J. Biomech.*, **9**(1976), 27.
- (9) 森田・ほか 3 名, 生体材料, **4**-4(1986), 175.
- (10) Carter, D. R. and Hayes, W. C., *J. Biomech.*, **10**(1977), 325.
- (11) Swanson, S. A. V., Freeman, M. A. R. and Day, W. H., *Med. & Biol. Eng.*, **9**(1970), 23.