

多軸応力下の木材の疲労 — 疲労寿命と疲労限度 —

名古屋大学 ○佐々木康寿

名古屋大学[院] 秋田文江
大阪大学 山崎真理子

1 緒言

木材・木質系材料に対して圧縮、引張、曲げ、ねじりなどの荷重が単独で作用するときの力学挙動については、静的、動的ともに多くの研究成果が蓄積されている。しかし、これらの荷重が同時に作用する複合応力下の力学挙動については研究例が少なく、特に疲労挙動に関する研究例は皆無である。本研究では木材（ヒノキ, *Chamaecyparis obtusa* Endl.）角棒を試験片とし、片振り軸力（引張または圧縮）・ねじり疲労試験を行い、組合せ荷重下での疲労挙動を調べ、エネルギーロスに焦点を当てて疲労寿命や疲労限度について検討した。

2 実験方法

試験片は繊維方向を長軸とする外寸 $300 \times 17.5 \times 17.5$ mm の角棒で、中央部の4面にテーパをつけ、長さ 25 mm にわたり断面寸法が 11.5×11.5 mm の部分を設けた。軸力・ねじり疲労試験の負荷波形は周波数 1 Hz の同位相の三角波（片振り）とした。試験には電気油圧サーボ式軸力・ねじり複合疲労試験機（島津製作所製 EHF-ED10/TD1-20L 型）を用いた。試験条件は、予め求めた静的強度に対して Hill 型の破壊クライテリオンを適用し、 σ - τ 平面を均等に 8 分割することにより設定した。すなわち、軸方向応力とせん断応力の比 (β) で定義すると、 $\beta=1/0$ (純引張:T), $0.93/0.38$ (TC), $0.73/0.71$ (TB), $0.41/0.92$ (TA), $0/1$ (純せん断:S), $-0.41/0.92$ (CA), $-0.74/0.71$ (CB), $-0.93/0.38$ (CC), $-1/0$ (純圧縮:C) の計 9 種類となる。疲労試験においては、破壊クライテリオン上の応力値を 100% とする 50~100% の 6 段階の応力レベルを設定した。軸力・ねじり荷重およびストローク・角度変位は試験機装着の変換器により、またひずみは試験片中央部の LT, LR 面に貼付したロゼットゲージにより、ダイナミックデータロガーを用いて計測した。試験片は静的強度試験用も含めて全 161 片であり、含水率、密度はそれぞれ $7.8 \pm 0.3\%$, $0.44 \pm$

0.01 g/cm^3 であった。なお、破壊の判定については、引張破壊は破断時、圧縮破壊は明確な座屈線に加え圧縮ひずみが 1% を超えた時、ねじり破壊は試験機の試験片掴み部の回転角が 45° を超えた時をもって破壊とした。

3 結果と考察

Fig. 1 に疲労試験によって得られた応力-ひずみ(S-S)関係の繰返し負荷による変化の一例を示す。これは、組合せ応力比が TB (引張とねじりを同等に作用させた設定条件) で、応力レベルが 90% の場合の引張応力-ひずみ関係である。これによれば、繰返し回数の増加と共に、S-S 曲線のヒステリシスループの形状が微妙に変化しているのがわかる。これらのヒステリシスループの繰返し負荷による変化に関して詳細に検討するため、ループ内の面積を 1 サイクル毎のエネルギーロスとし、繰返し負荷 1 回当たりのエネルギーロスと繰返し数の関係を調べた。これによると 1 サイクル毎のエネルギーロスは必ずしも一定ではなく、繰返し当初は大きく、その後やや小さくなり、しばらくほぼ一定値を保つ。その後徐々に増加する経過をたどった。

次に、これらの値を累積した累積エネルギーロス (H_f) と繰返し数との関係の一例を Fig. 2 に示す。これによれば、 H_f の経時変化は、繰返し負荷の開始後しばらく初期の値を保ち、ある時点から急激に増加し疲労破壊に至るという傾向が見られた。本研究では組合せ応力比や応力レベルに関わらず多くの試験でこのような傾向を示した。そこで、 H_f が増加し始める点を「急増点 (Jumping-point)」と定義し、この時の繰返し数と疲労寿命 (N_f) の関係を考察した。なお、ここでは H_f が、それまでの 2 倍に増加する時を急増点として整理した。

Fig. 3 に「急増点」の繰返し数と N_f の関係を示す。図中のプロットは、軸力系（引張系および圧縮系）の全ての組合せ応力比のものを示した。これによれば、組合せ応力比に関わ

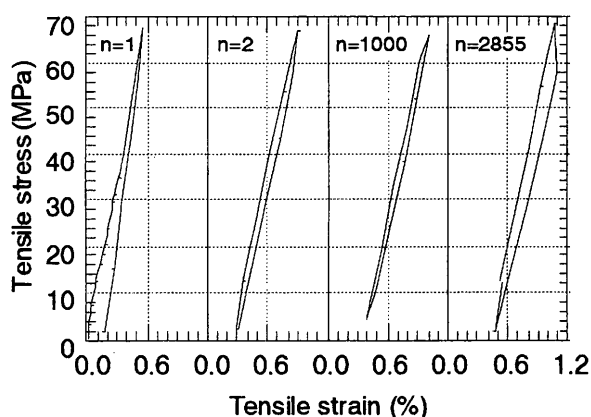


Fig. 1. Examples of stress-strain curves under pulsating axial-torsion combined loading (TB90; $N_f=2856$).

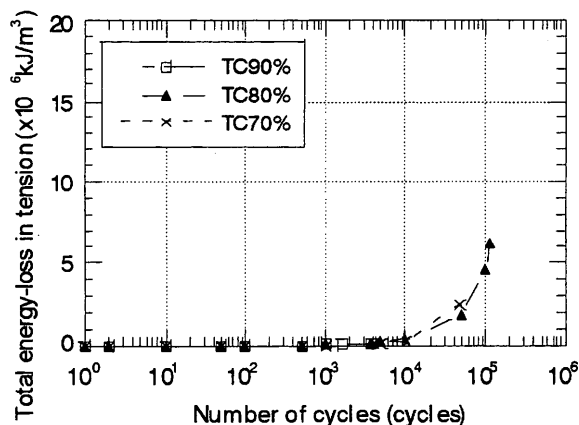


Fig. 2. Relationships between total energy loss (H_f) in tension and the number of loading cycles (N_f).

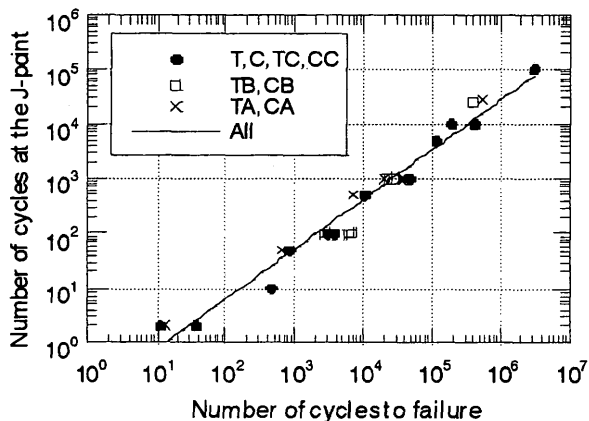


Fig. 3. Relationships between the number of cycles at the J-point and the number of cycles to failure (N_f).

らず、両者は両対数グラフ上で良好な直線関係（相関係数 0.99）を示した。ねじり系でも、同様の傾向が得られていることから、この関係を利用すれば N_f の予測が可能と考えられる。この場合、 N_f に至る過程で急増点の現れるタイミングが問題となる。そこで、これを調べたところ、ほとんどの場合において急増点は N_f の 10~20% 程度の比較的早い繰返し数で出現していることがわかった。したがって、疲労試験中に累積エネルギーをモニターし急増点を見つければ、早い段階での疲労寿命の予測が可能となる。

さて、ここまで軸力系とねじり系を個別に考えてきたが、軸力・ねじりの複合応力状態を総合的に取り扱うため相当応力-相当ひずみ曲線を作成し、これらより求めたエネルギーロスについて検討した。ここでは便宜的に von Mises の降伏条件に従うと仮定した。

Fig. 4 は、このようにして求めた疲労破壊までの累積エネルギーロス (H_t) と疲労寿命 (N_f) との関係調べたものである。これによれば、 H_t と N_f は両対数グラフ上で引張系、圧縮系共に右上がりの直線関係にあり、また同一 N_f 上の H_t の値は引張系の方が圧縮系よりも大きいようである。すなわち、破壊に要するエネルギーが等しい場合、圧縮系の方が長寿命となる。これは、圧縮系の応力振幅値の方が引張系よりも小さ

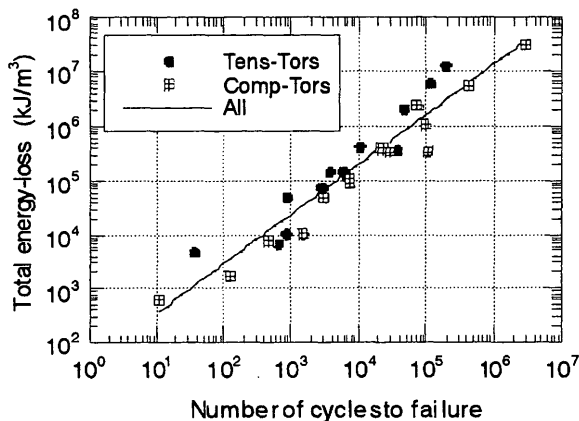


Fig. 4. Relationships between total energyloss (H_t) and the number of cycles to failure (N_f).

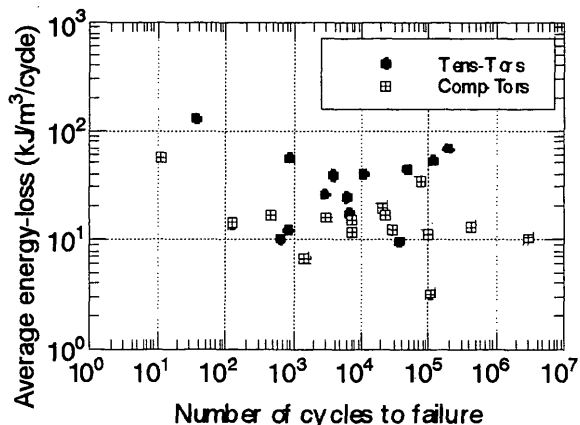


Fig. 5. Relationships between average energyloss per cycle (H_{av}) and the number of cycles to failure (N_f).

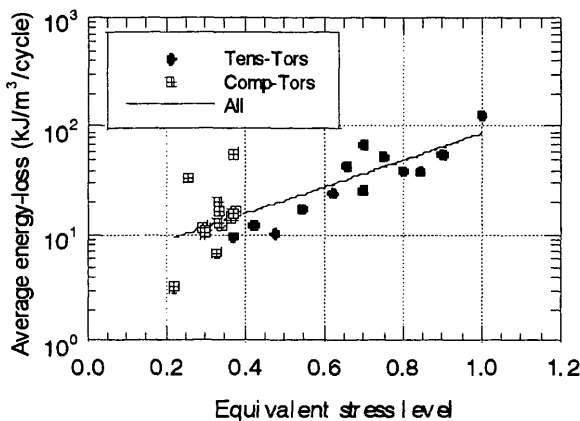


Fig. 6. Relationships between average energyloss per cycle (H_{av}) and the equivalent stress level.

いたためであると考えられる。

ところで、前述したように 1 サイクル毎のエネルギーロスは疲労過程を通じて一定ではない。そこで、このように得られた累積エネルギーロス (H_t) を疲労寿命 (N_f) で除して 1 サイクル当りの平均エネルギーロス (H_{av}) を求め、Fig. 5 に H_{av} と N_f との関係を示した。この図より、 H_{av} は引張系の方が圧縮系よりも大きく、また、 N_f が長くなると低下し、ある一定の値に漸近するよう見受けられる。すなわち、 H_{av} が大きくなると N_f は短くなり、ある一定の値以下になると N_f は無限に長くなると考えることができる。そして、そのときの応力レベルは疲労限度を意味していると考えられる。

そこで、Fig. 6 に H_{av} と相当応力に関する応力レベルの関係を示す。横軸は相当応力の最大値で基準化したため、圧縮系のプロットは低応力レベル域に集中し傾向がつかみにくい。両者は片対数グラフ上で概略直線関係にあるように見受けられる。図中には全プロットに関する回帰線を引いたが、Fig. 5 において H_{av} が例えば 10¹ kJ/m³ 以下で N_f が無限大になると仮定すれば、Fig. 6 より疲労限度は、応力レベルが 20% 程度のときであると考えることができよう。