

名古屋大学 正 ○佐々木康寿

名古屋大学 学 山崎真理子

名古屋大学 正 安藤 幸世

## 1. はじめに

木材に対して圧縮，引張，曲げ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，疲労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組合せ荷重下での力学挙動については，木材を対象とした場合，研究例が少ない。特に疲労挙動に関する研究例は皆無である。これは，木材がそのような状況下で使用されるような場面が少なかったことに理由を見出せるが，例えば土木・建築における近年の木質構造の技術的進展は著しく，木材にとっても，単軸荷重下のみならず，ねじりと軸荷重が同時に作用する場合など複合荷重下での力学的挙動を把握することの必要性が生じている。

このようなことから，本研究では複合応力下における木材の力学挙動に関する考察の一環として，ヒノキ角棒を試験片に用い，片振り引張・ねじり疲労試験を行い，組合せ荷重下での疲労強度特性について調べた。すなわち，多軸応力下での木材の疲労特性を評価する第一歩として，本研究では特に，ヒノキの疲労強度に及ぼす組合せ応力比の影響に焦点を当てたものである。

## 2. 実験方法

供試材にはヒノキ (*Chamaecyparis obtusa* Endl.) を用いた。試験片の形状は繊維方向を長軸とする外寸 300 x 17.5 x 17.5 mm の角棒状で，中央部の4面にテーパをつけ，長さ 6 mm にわたって断面寸法が 11.5 x 11.5 mm の部分を設けた。また，両端のつかみ部には補強のため添え木（ブナ材）をエポキシ樹脂接着剤により装着した。疲労試験には電気油圧サーボ式軸力・ねじり疲労試験機を用いた。片振り引張・ねじり組合せ荷重疲労試験では，同位相の三角波を用いた。これにより，応力経路における引張応力とせん断応力の関係を直線（比例的）とすることができる。繰り返しの周波数は 1 Hz とした。このため，応力速度は，今回行った各試験条件間で一定とはなっていない。引張とねじりの組合せ応力比は引張応力とせん断応力の比  $\alpha$  で定義した。 $\alpha = 0 / 2.4$ （純せん断：S）， $4.6 / 2.2$ （TA）， $8.3 /$

$1.6$ （TB）， $10.5 / 0.9$ （TC）， $11.3 / 0$ （単純引張：T）とし，計5種類の複合加力疲労試験を行った。このために選別，使用した試験片は，静的強度試験用も含めて全 120 片である。試験片は気乾状態のものであるが，加工後，室温 25℃，相対湿度 40% に調整した室内にて重量が一定になるまで養生した。選別した試験片の含水率，比重はそれぞれ  $7.8 \pm 0.3\%$ ， $0.44 \pm 0.01$  である。試験機装備のロードセル・変位計および試験片中央の LT・LR 面に貼付したひずみゲージより，荷重，トルク，試験機チャックの軸・回転変位，軸・せん断ひずみをダイナミックデータロガーを用いて計測した。

## 3. 結果と考察

Fig. 1 は疲労試験によって得られた S-N 曲線である。横軸は疲労寿命，縦軸は組合せ繰返し最大応力を静的強度で基準化したもの（応力レベル，一種の強度低下率）を示す。図中の各直線は片対数グラフ上の寿命曲線を直線と仮定して最小自乗法により求めたものである。これらより，少しバラツキはあるが，どの組合せ応力比（ $\alpha$ ）の S-N 曲線も一本の太い帯にまとまるように見受けられる。しかし，個々の S-N 曲線を見ると，疲労強度の低下率は組合せ応力比の影響を受けているようである。すなわち，組合せ応力状態のせん断応力成分が増す（TC→TB→TA→S）に従い S-N 曲線の傾斜は大きくなり，純せん断応

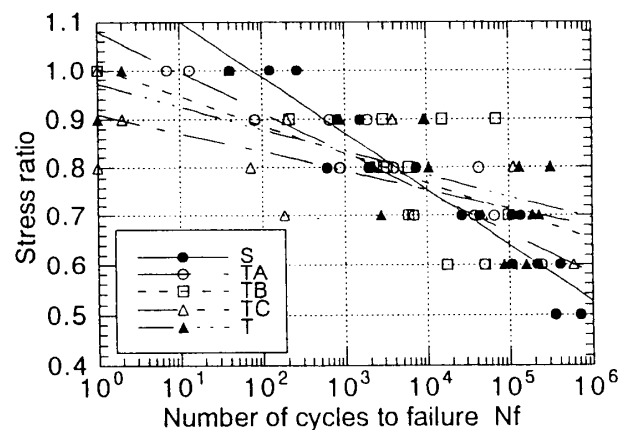


Fig. 1. Relationships between stress level and number of cycles to failure.

力が作用する場合に最も大きい。逆に、引張応力成分が増すに従い傾斜は低下する傾向にある。

次に、引張応力-せん断応力 ( $\sigma$ - $\tau$ ) 平面上で S-N 特性を示す。すなわち、疲労寿命  $N_f = 10^3 \sim 10^6$  (cycle) における各組合せ応力状態の疲労強度を静的単純強度で基準化した  $\sigma$ - $\tau$  平面上にプロットすると Fig. 2 のようになる。これら (●)

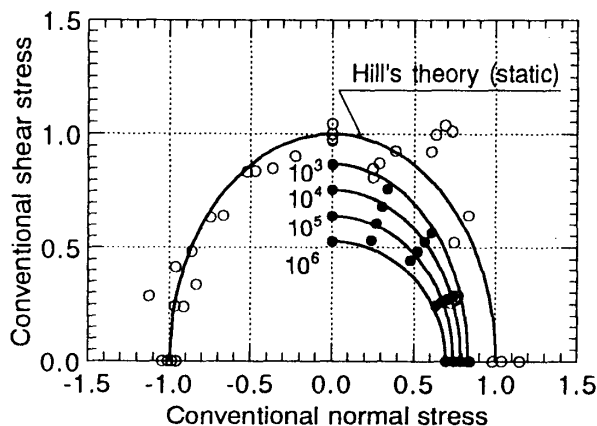


Fig. 2. Static and fatigue strength under biaxial loads.

は Fig. 1 の S-N 曲線からそれぞれ求めたものである。図中の曲線で最も外側の半円状のものは静的強度 (○) に対して適用した Hill 型のクライテリオンで、次の式 (1) のように表される。

Hill 型のクライテリオン：

$$\left(\frac{\sigma_A}{F_A(N_f)}\right)^2 + \left(\frac{\tau_s}{F_s(N_f)}\right)^2 = 1 \quad (1)$$

なお、式中  $\sigma_A$  は軸方向応力、 $\tau_s$  はせん断応力、 $F_A(N_f)$  と  $F_s(N_f)$  はそれぞれ疲労寿命  $N_f$  における軸方向強度とせん断強度である。また、図中のその他の曲線は外側よりそれぞれ疲労寿命  $N_f = 10^3, 10^4, 10^5, 10^6$  (cycle) における疲労強度 (●) に対して式 (1) を適用してみたものである。すなわち、これらの曲線は、各  $N_f$  における単軸引張疲労強度と純せん断疲労強度を用いて式 (1) による疲労強度の包絡面を決定したものである。これらの包絡面は各プロット群と概略一致しており、任意の組合せ応力比 ( $\alpha$ ) における疲労強度の予測が可能であると考えられる。

以上の結果より、さらに、圧縮・ねじり組合せ荷重下における疲労強度・寿命の推定を試みた。この場合、Hill 型のクライテリオンでは式 (1) 中の定数項  $F_A(N_f)$  が単軸引張または圧縮強度のいずれかしか扱わないので不都合である。そこで、ここでは引張と圧縮の両方を総括して一つの式で表現する Tsai-Wu のクライテリオン (式(2)) を用いることとした。

Tsai-Wu のクライテリオン：

$$\left(\frac{1}{F_{At}(N_f)} - \frac{1}{F_{Ac}(N_f)}\right)\sigma_A + \frac{1}{F_{At}(N_f)F_{Ac}(N_f)}\sigma_A^2 + \left(\frac{1}{F_s(N_f)}\right)\tau_s^2 = 1 \quad (2)$$

なお、式中  $F_{At}(N_f)$  と  $F_{Ac}(N_f)$  はそれぞれ疲労寿命  $N_f$  における単軸引張および圧縮疲労強度である。すなわち、Fig. 2 の各  $N_f$  毎のプロット群に対して (圧縮強度  $F_{Ac}(N_f)$  は未知数のまま) 式 (2) で回帰を試みた。これを Fig. 3 に示す。ただし、図中の  $N_f = 10^7, 10^8$  (cycle) 時の強度 (◇) は Fig. 1 の S-N 曲線による推定値である。これに

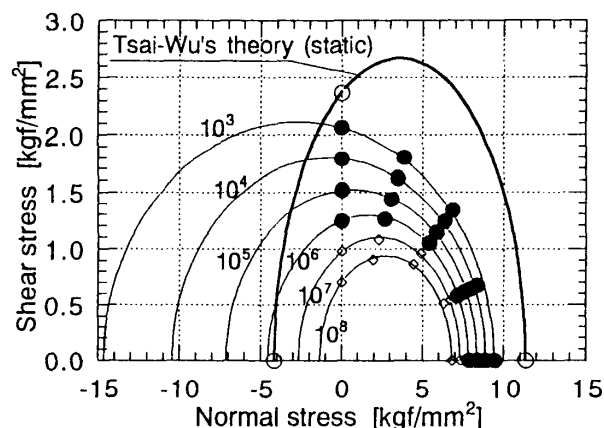


Fig. 3. Predicted and observed strength under biaxial loads.

よれば、疲労寿命  $N_f = 10^3, 10^4, 10^5$  のプロット群に対してフィッティングされたクライテリオンは静的強度のそれよりも、圧縮応力-せん断応力平面上で外側に位置している。これは、疲労強度が静的強度を上回ることを意味し、不合理である。これより、例えば単軸圧縮応力下における疲労寿命は  $N_f = 10^6$  程度に及ぶ可能性があることが推定された。

#### 4. まとめ

(1) S-N 曲線は、組合せ応力比に関わらず一本の太い帯にまとまるように見受けられた。しかし、詳細に見ると疲労強度の低下率は組合せ応力比の影響が認められ、せん断応力成分が増すに従い S-N 曲線の傾斜は大きくなった。

(2) 疲労強度は静的強度に対する既往のクライテリオンに概略合わせることができた。

(3) 引張・ねじり組み合わせ荷重下の疲労強度をもとに単軸圧縮荷重下の疲労寿命の推定を試みたところ、 $N_f = 10^6$  程度に及ぶ可能性があると考えられた。