

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 学 秋田 文江

### 1. はじめに

複合応力下で木材・木質材料が示す力学挙動に関する研究例は極めて少ない。しかしながら、例えば木質構造における近年の技術的進展は著しく、木材にとって、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組合せ荷重下での力学的挙動を把握することは重要である。また、木材は天然に存在し、生体の骨と同様に典型的な直交異方性を有する生物材料である。このような材料が複合応力下で示す力学的挙動に関する知見は、新たな複合材料の創出にあたっても有用な情報を提供するものと考えられる。

本研究では、ヒノキ角棒を試験片に用いた片振り軸力（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、ヒノキの疲労強度特性に及ぼす組合せ応力比の影響に焦点を当てた。

### 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。片振り軸力（引張／圧縮）・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は直線（比例的）となる。繰り返しの周波数は 1 Hz とした。このため、応力速度は、次に述べる各組合せ応力比の条件で一定とはならない。軸力とねじりの組合せ応力比は軸方向応力とせん断応力の比  $\alpha$  で定義した。すなわち  $\alpha = 11.3/0$ （単純引張：T）、 $10.5/0.9$ （TC）、 $8.3/1.6$ （TB）、 $4.6/2.2$ （TA）、 $0/2.4$ （純せん断：S）、 $-1.7/2.2$ （CA）、 $-3.1/1.6$ （CB）、 $-3.9/0.9$ （CC）、 $-4.2/0$ （単純圧縮：C）とする計9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174片である。試験片は気乾状態のものであるが、加工後、室温24℃、相対湿度55%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2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 は引張・ねじり疲労試験によって得られた S-N 曲線である。図中の各直線は片対数グラフ上で寿命曲線が直線と仮定して最小自乗法により求めた。これらより、少しパラッキはあるが、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。

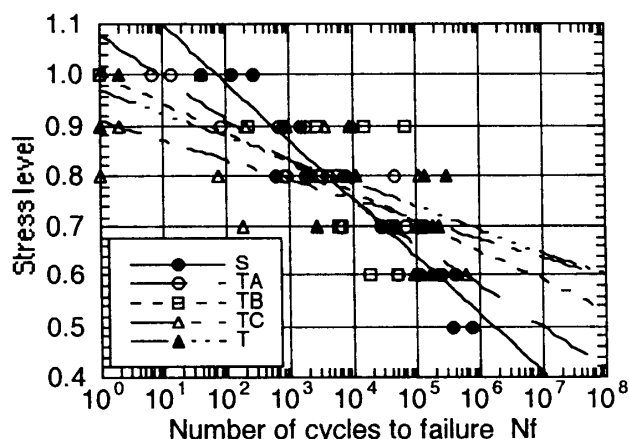


Fig. 1. Relationships between stress level and number of cycles to failure under pulsating tension-torsion combined loading.

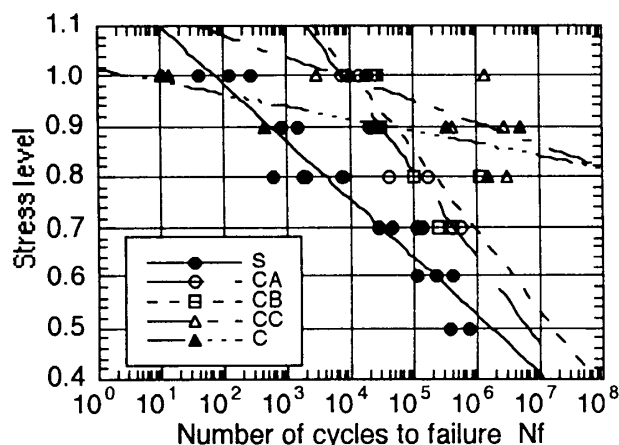


Fig. 2. Relationships between stress level and number of cycles to failure under pulsating compression-torsion combined loading.

一方、Fig. 2 は圧縮・ねじり疲労試験によって得られたS-N曲線である。この場合も疲労強度の低下率は組合せ応力比の影響を受けていることが分かる。すなわち、純ねじり(S)に対し圧縮応力成分が少し加わる状態(CA)となることによりS-N曲線の傾斜は大きくなるが、CAまたはCBを境にして、圧縮応力成分がさらに増す(CA・CB→CC→C)とS-N曲線の傾斜は逆に小さくなる。

これらのことから、特に高応力レベル(80%以上)での疲労強度の低下は、引張系と圧縮系では異なる傾向を示し、純せん断(S)を境にして引張系では短寿命、圧縮系では長寿命となることが分かる。

また、Fig. 3 は引張・ねじり疲労試験による破壊状況の一例(応力レベル: 60%時)を示す。左より(純ねじり:S)→右(単純引張:T)である。組合せ応力比がS~TBにかけては繊維に沿ったき裂が認められ、ねじり破壊が支配的であることが看取される。これに対してTCではねじり及び引張破断の複合型であり、Tになると典型的な引張破断となっている。このように、破壊形態はTBを境にしてねじりまたは引張破断がそれぞれ支配的となり、組合せ応力比の影響が見受けられた。なお、応力レベルが増加した場合、基本的にはFig. 3と同様の傾向であるが、TBでねじり及び引張の複合破断が見られるようになる。

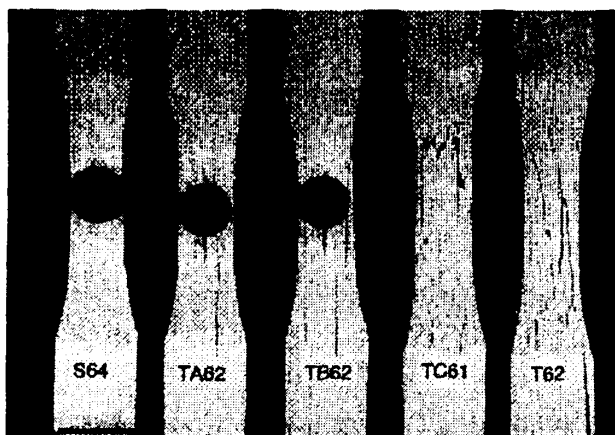


Fig. 3. Examples of failure modes of the test specimens due to the difference of tension-shear combined stress ratios.

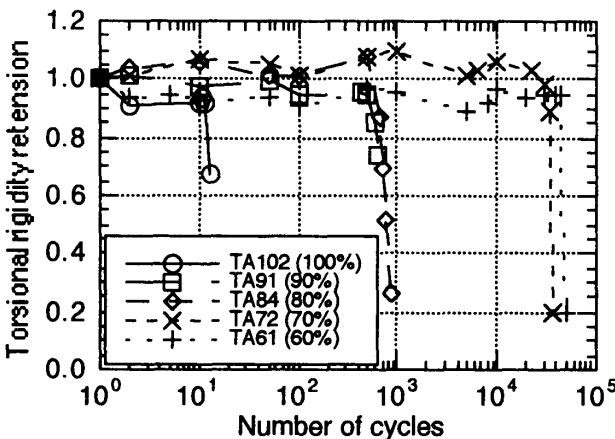


Fig. 4. Relationships between torsional rigidity retention and number of cycles under pulsating tension-torsion combined loading.

次に、剛性の経時変化の一例として、ねじり剛性と繰り返し数との関係を示す。Fig. 4 は引張・ねじり組合せ応力状態(TA)でのねじり剛性の低下を繰り返し数と共に示した。これによれば、疲労破壊の直前まで初期の剛性を維持し、寿命直前でねじり剛性は急激な低下を見せている。その程度は応力レベルにより異なり、応力レベルが小さくなるほど最終的な剛性の低下は大きい。このような傾向は純せん断(S)の場合も同様であり、さらに引張系におけるねじり剛性低下の傾向も、大略的に同様と考えられた。

一方、Fig. 5 には圧縮系(CA)でのねじり剛性の低下を繰り返し数と共に示した。これによれば、ねじり剛性は負荷開始直後に10~20%程度低下し、そのままの状態をしばらく維持した後、緩やかに低下する傾向を示した。これに対し、圧縮応力成分がさらに大きいCBでは、ねじり剛性は負荷開始直後の低下の後、引き続き、繰り返し数と共に徐々に低下した。

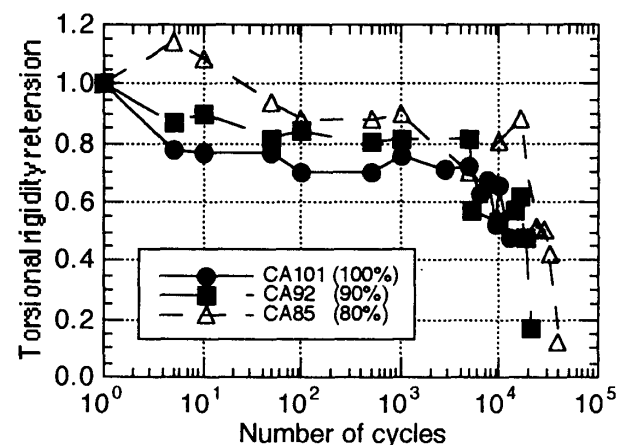


Fig. 5. Relationships between torsional rigidity retention and number of cycles under pulsating compression-torsion combined loading.

これらより、ねじり剛性の低下に及ぼす組合せ応力の影響は引張系と圧縮系では異なり、引張より圧縮との組合せによる方が、剛性低下に対する影響の大きいことが分かった。

以上の他に、軸方向の剛性の経時変化についても組合せ応力比と応力レベルの影響が認められた。特に引張系で軸方向応力が支配的な組合せ応力状態では、応力レベルが高い場合には初期の剛性を維持したまま疲労寿命に至るが、応力レベルが低い場合には繰り返し数と共に徐々に剛性が低下する傾向を示した。

#### 4. まとめ

(1) 疲労強度の低下は組合せ応力比の影響が認められた。また、高応力レベル(80%以上)では引張系と圧縮系で異なる傾向を示し、純せん断の場合を境に引張系では短寿命、圧縮系では長寿命となった。(2) 複合応力下におけるねじり剛性の経時変化は、引張系と圧縮系で異なる傾向を示した。すなわち、ねじり剛性の低下に及ぼす組合せ応力の影響は、引張より圧縮との複合による場合の方が大きかった。(3) 軸方向の剛性の経時変化も、ねじり剛性と同様に、組合せ応力比と応力レベルの影響が認められた。