

CS-7

層構造をもつ材料の圧縮強度特性

(株)NTT 正員 ○江口正人
 東北大学 正員 岩熊哲夫
 関東学院大学 正員 倉西 茂

1. まえがき

引張強度が極めて高くかつ軽量な材料として近年注目されている炭素繊維は、引張剛性が高くなるほど圧縮強度が低下するという問題点がある。そこで本研究では、1本の炭素繊維の束を、層構造に起因する異方性、周囲の繊維束との相互作用及び空隙の存在を考慮できる「弾性支持された Timoshenko 梁-柱」としてモデル化し、座屈解析を行いその圧縮強度特性について論じる。

2. 炭素繊維のモデル化

炭素繊維の圧縮試験結果をみると図-1のように各々の繊維束が Euler 座屈を起こしたような崩壊をしている。これはキンク帯と呼ばれているものであるが、このキンク帯の特徴は繊維束の崩壊部分が繊維軸方向に対して少し斜めに傾いて並んでいることである。ここでは繊維束の間に存在する空隙位置で座屈が発生し、座屈モードが空隙中央を中心に反対称形となっていると考え、弾性床上半無限梁としてモデル化する。また炭素繊維は、褶曲状の繊維束が層状に積み重なった構造をもつため、引張剛性に比べて軸方向のせん断剛性が非常に小さいと考えられる。このため繊維束をその異方性を反映できる Timoshenko 梁-柱として表す。ここでは簡単のため弾性支持部を弾性バネに置き換え、バネ定数は炭素繊維の軸に直交する方向の剛性と等価になるように定めた。

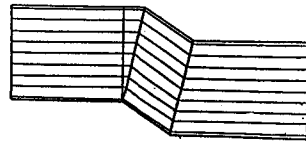


図-1 炭素繊維の圧縮崩壊モード

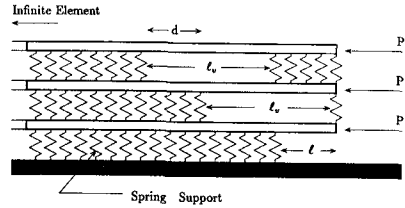


図-2 弾性バネ上半無限梁（3層構造）

3. 解析手法

構成則

$$\begin{aligned} V &= GkA(v' - \lambda) \\ M &= EIX' \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

と、弾性床上の Timoshenko 梁-柱のつり合い式

$$\begin{aligned} V' - Pv'' - k_f v &= 0 \\ M' + V &= 0 \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

より求められた仮想仕事式から剛性方程式を誘導し、繊維束の座屈問題を有限要素法で解析する。ここに P は軸圧縮力、 V はせん断力、 M は曲げモーメント、 k_f は反力係数、 k はせん断変形分布の補正係数である¹⁾。境界条件は半無限梁を考えているため

$$v = v' = 0 \quad \text{at} \quad x \rightarrow +\infty \dots\dots\dots (3)$$

とする。

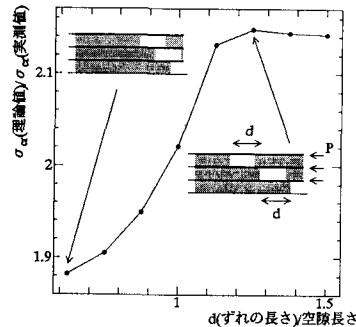


図-3 上段と中段の空隙の位置を変化させた場合

4. 解析結果と考察

(1) 空隙の並び方の影響

図-2のような3層構造モデルを用いて、空隙の並び方による座屈強度の変化を比較した。まず各々の空隙のずれが徐々に大きくなるようにずらした場合の結果を図-3に示す。この場合各々の空隙のずれが約1/2になった場合に座屈強度が最低になることがわかる。また上段の空隙のみを左側にずらしていった場合の座屈強度の変化を図-4に示す。この場合も上段の空隙と中段の空隙が約1/2ずれた場合に座屈強度が最低になることがわかる。一方図-3, 4ともに空隙が重ならないときは座屈強度がほぼ一定である。座屈強度が最低になった場合、つまり空隙どうしが約1/2ずつずれて並んだ場合の座屈モードを図-5に示す。どの束も束の下の方の空隙の弾性支持部側に若干入ったところから変位が大きくなり始めており、最大曲げモーメントの発生位置も同じ位置であることから、炭素繊維の圧縮破壊位置を示していると考えられる。またその位置が斜めに並んでいることからキンク帯の傾きについても説明できている。

(2) 初期不整の影響

ここでは実際の繊維束の褶曲構造を考慮するために初期不整のあるモデルによる圧縮強度解析を行う。張り出し先端部にモーメントを常に加えて初期たわみを発生させ、軸圧縮力と最大軸ひずみの関係を追跡し、完全系での座屈点における軸ひずみが生じたときの軸圧縮力を初期不整モデルでの圧縮強度とした。繊維束のモデルが、図中に示したそれぞれの場合についての初期不整量による圧縮強度低下の様子を図-6に示した。特に空隙がほぼ中央で重なったモデルでは、初期たわみが空隙長の1/10程になると圧縮強度は完全系に比べて約40%低下し、実測値にかなり近づくことがわかる。またこの初期たわみの値は炭素繊維の顕微鏡写真より推定されたものである。

5. 結論

炭素繊維の圧縮強度は、繊維束間の空隙がある程度ずれて斜めに並んでいる場合に最も低くなることが分かった。また、最大曲げモーメントの発生位置は空隙の両端付近にあり、その位置が斜めに並んでいることからキンク帯の傾きを説明することができた。また、繊維束の初期たわみが、実際の炭素繊維に存在すると考えられる量である空隙長の1/10程度になると、完全形に比べて約40%強度が低下し、実測値により近い値を予測することができた。

参考文献

- 1) Iwakuma, T: Timoshenko beam theory with extension effect and its stiffness equation for finite rotation, *Computers & Structures*, vol.34, No.2, pp.239-250, 1990

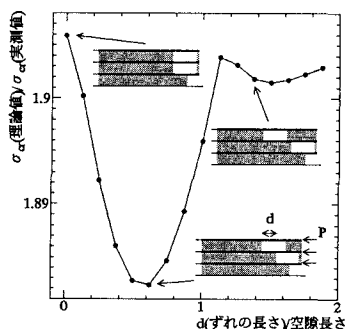


図-4 最上段の空隙の位置のみを変化させた場合

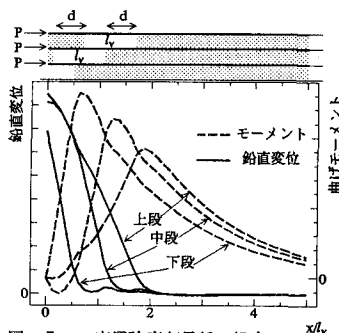


図-5 座屈強度が最低の場合の座屈モードの比較

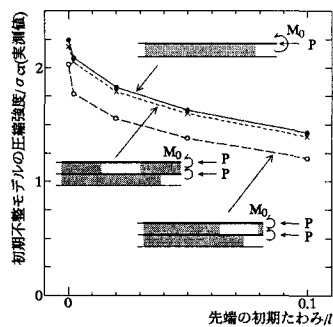


図-6 初期不整による強度の低下