

I - 6

層構造をもつ材料の圧縮強度特性について

東北大学 学生員 ○江口正人
東北大学 正員 岩熊哲夫
東北大学 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。電子顕微鏡写真による繊維の圧縮崩壊の様子から、強度低下の原因として炭素繊維の微視構造、つまり複数の繊維からなる束が層状に積み重なったような構造に起因する異方性及び製造過程に生じる繊維束間の空隙の存在などが指摘されている。そこで本研究では、1本の炭素繊維の束を、異方性及びその周囲の繊維との相互作用を考慮できる「弾性床上の 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、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床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。

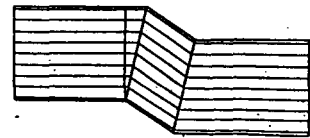


図-1 炭素繊維の圧縮崩壊モード

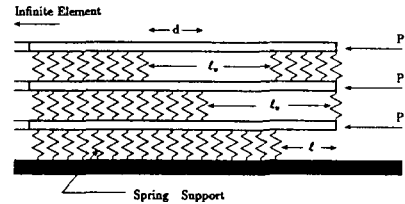


図-2 弾性バネ上半無限梁（3層構造）

3. 解析手法

構成則

$$V = GkA(v' - \lambda)$$

$$M = EI\lambda' \dots\dots\dots (1)$$

と、弾性床上の Timoshenko 梁-柱のつり合い式

$$V' - Pv'' - k_f v = 0$$

$$M' + V = 0 \dots\dots\dots (2)$$

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。

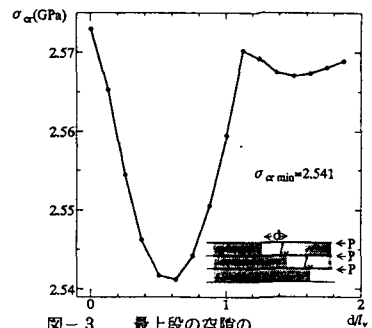


図-3 最上段の空隙の位置のみを変化させた場合

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。ただし l_v は空隙長、 $l = l_v/2$ である。まず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-3に示す。これより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。また、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-4に示す。この場合も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。その場合1層構造モデルでの解析結果に比べると座屈強度は約16%の低下を示している。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。どの束も束の下段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。

(2) 空隙長さの影響

繊維束の間に分布する空隙は、圧縮時にその長さが急激に増大するともいわれている。そこで空隙長による座屈強度と最大曲げモーメントの発生位置の変化を図-6に示した。ここで用いているモデルに限って言えば、空隙長が材料の特性値の約3倍になると、座屈強度 σ_{cr} が実測値とほぼ等しくなることがわかる。また最大曲げモーメントの発生位置は空隙長にほぼ比例していることから繊維束の圧縮破壊位置は空隙長の増大にかかわらず空隙と繊維束との境界付近であることがわかる。

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、繊維が圧縮を受ける際に、空隙長が圧縮前に比べて増大する可能性が示唆された。この結果から、炭素繊維の圧縮強度低下を防ぐためには、空隙を少なく、空隙長を短く、また空隙どうしができるだけ並ばないように製造することが必要である。

参考文献

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

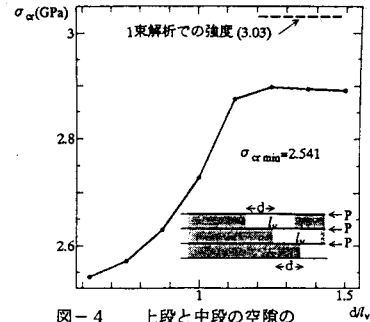


図-4 上段と中段の空隙の位置を変化させた場合

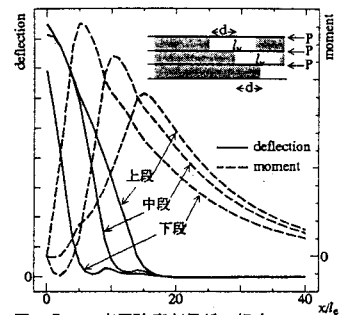


図-5 座屈強度が最低の場合の座屈モード

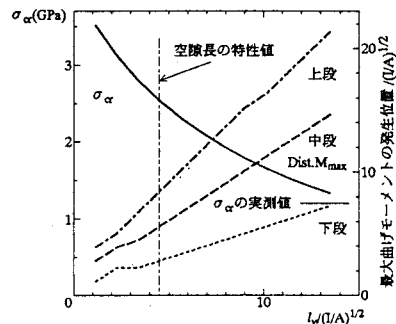


図-6 空隙長の影響