

竹の組織構造から観た複合構造の力学特性

長崎大学 大学院	学生会員	○ 佐藤 英一
長崎大学 工学部	正会員	森田 千尋
長崎大学 工学部	正会員	松田 浩
長崎大学 工学部	正会員	崎山 毅
広島大学 工学部	正会員	有尾 一郎

1 まえがき

竹(円筒構造)は、断面が中空で、同一断面積でも中実の円筒構造の断面係数よりも大きく、これは軽量かつ不確定な方向からの曲げモーメントに対して有効な断面である。

本研究では、その竹の種類の1つである孟宗竹の構造形態に着目し、孟宗竹を積層構造と仮定したときの積層要素モデルを考え、その断面を5層からなる積層円筒シェルにモデル化し、円筒の多層構造モデルの有限要素解析を行い、本解析による解析結果より竹のような構造形態をした複合材料の力学的特性を明らかにする事を目的としている。

2 竹の概要

写真-1に節間部の横断面の一部を示す。最外層に1層の厚壁の表皮があり、表皮の内側には1~3層の表皮と同様に厚壁の下皮の層が存在し、さらに内側の皮層に続いている。皮層は数層のやや大型の柔細胞からなるが、内方の中心柱の基本組織への移行は緩やかなので皮層と中心柱の境界は不明瞭である。中心柱は基本組織の中に並立維管束が不規則に配列する不斉中心柱である。個々の維管束はその周囲を維管束鞘と呼ばれる多量の厚壁繊維の組織で保護されている。この維管束鞘の発達度合いと維管束の発達度合いは反比例しており、幹の外側ほど厚壁繊維の量が多く、逆に維管束の発達は悪くなっていることがわかる。

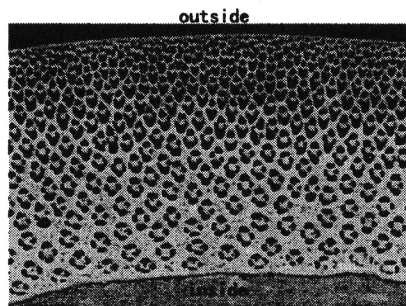


写真-1: 孟宗竹の横断面

2.1 維管束鞘の含有率と弾性係数

広島大学が行った実験結果¹⁾によると、維管束鞘の含有率と弾性係数の関係は、図-1のような結果になった。この図から、維管束鞘の含有率と弾性係数はほぼ比例関係にある事がわかる。なお、最小二乗法より、直線 $E = -1.47 + 23.09V_f$ という式が得られた。

しかし、このままでは孟宗竹の弾性係数を一概に定義する事は難しいため、弾性係数を一般的な複合材料と同様に考え、各層ごとに弾性係数が変化する積層円筒シェルの解析を行っていく。

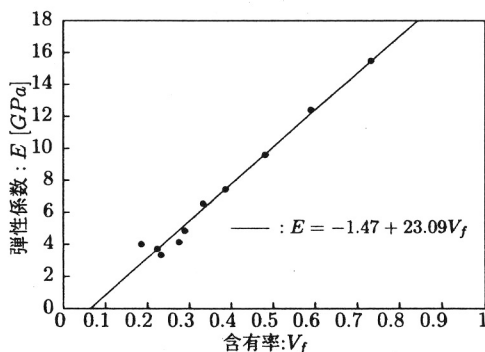


図-1: 維管束鞘の含有率と弾性係数

3 数値解析

真かん部を積層円筒シェル要素モデルとし、広島大学で得られた孟宗竹の引張試験データを用いて竹の弾塑性解析を行い、曲げ実験の結果との比較を試みる。この結果より、積層順序によってどのような力学的効果をもたらすかに着目し、材料配置に伴う積層構造の強度について検討を行う。

3.1 解析モデル

ここでは、実験で用いられた供試体を5層からなる積層円筒シェル要素モデルとして考える。モデルの境界条件は実験時と同様に四点支持とし、中央点において鉛直下向きに集中荷重 P を載荷させる。なお、モデルの寸法等は図-2に、また解析に用いた諸量を表-1に示す。

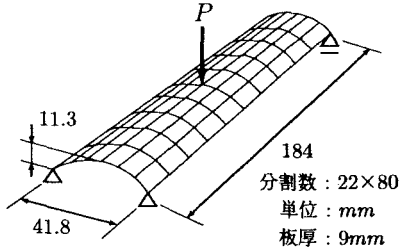


図-2：解析モデル

解析を行った各モデルは、図-3に示すように各層毎に弾性係数を変化させた5層の積層円筒シェルとして考えており、通常の竹のように半径方向に層毎の弾性係数が増えていく配置にしたものをモデル1(図-3a)とし、逆に異方性を考慮し層毎の弾性係数を全く反対に配置したものをモデル2(図-3b)とした。

表-1：各モデルの諸係数
(繊維方向: E_L , 繊維直角方向: E_T , 引張り強度: σ_Y [GPa])

層	モデル 1				モデル 2			
	E_L	E_T	ν_{LT}	σ_Y	E_L	E_T	ν_{LT}	σ_Y
(内)1	5.0	1.04	0.03	0.03	16.01	2.81	0.3	0.21
2	6.03	1.11	0.05	0.035	13.31	1.98	0.1	0.14
3	8.31	1.36	0.06	0.05	8.31	1.36	0.06	0.05
4	13.31	1.98	0.1	0.14	6.03	1.11	0.05	0.035
(外)5	16.01	2.81	0.3	0.21	5.0	1.04	0.03	0.03

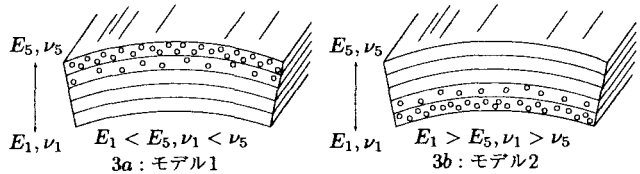


図-3：各解析モデルの想定断面図

4 解析結果

本解法による弾塑性解析の結果を、広島大学の実験値とともに図-4に示す。まず、通常の竹の組織形態に似せたモデル1の解析結果を実験値と比較したところ、モデル1と実験値の剛性がほぼ一致する結果が得られ、このことから解析に用いた各諸量は妥当と言える。しかし、耐荷力に着目すると、モデル1の耐荷力は実験値の約1.5倍程の結果となった。これは、解析するにあたって各層の降伏強度に最大引張強度を用いたのだが、まだ現段階の研究では各層の繊維方向の降伏強度のみを考えており、繊維直角方向にも同様の降伏強度を用いたため、このような結果になったと考えられる。実際には、繊維直角方向の降伏強度は繊維方向時よりも低い値となるので、おそらく耐荷力はこの値よりも低くなり、実験値に近い傾向を辿るものと考えられる。また、モデル1とモデル2に強度差が表れたのは、弾性係数の配置順序の違いによる影響であるが、この結果から積層順序を孟宗竹断面と同じ場合に配置した場合に最も剛性が高いことがわかる。モデル2はモデル1に比べ、強度が低いという予測通りの結果が得られた。

図-4に示した各モデルの解析結果は、比較的粗いと思われた5層に分けて解析を行った解析解だが、実験値との比較では同じ挙動を示したことから本解法は有効であると言える。

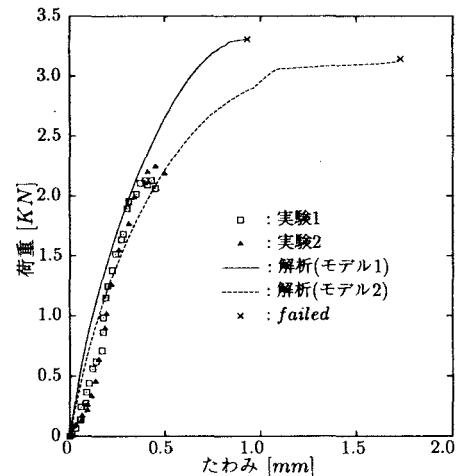


図-4：実験値と解析結果の比較

5 結論

竹を層毎に弾性係数に変化する積層構造とみなしたとき、積層順序を竹断面と同じように配置した場合に最も剛性が高いことがわかったことから、竹は内部から表皮側に向うにつれ維管束鞘が密に分布する合理的な配置となっていることがわかった。また、今回の結果から本解法は有効である事がわかり、今後さらに研究を進めていく上でも精度のよい結果が得られると期待できる。

今後の研究では、今回考えていなかった繊維直角方向の引張り強度を考慮して解析を行い、さらに精度を高めていくと同時に、竹のような組織形態をした複合材料は、実際どのような構造物に最適利用できるのかなどを検討していく予定である。

参考文献

- 1) 有尾一郎・関谷安男・藤井聖: 孟宗竹の組織構造に観る複合構造の最適性に関する一考察, 構造工学論文集, Vol.46A, pp.1693-1702, 2000.