

(757) 炭素繊維強化アルミニウム (CFRA1) の弾・塑性挙動 — 直交および斜交積層材の変形異方性 —

東京工業大学精密工学研究所 若島 健司

1. 緒言 在来の単一材料に比べ、繊維強化複合材料の最も特色とする点と云えば、その優れた比弾性・比強度特性はもとより、さらに強度や変形特性に著しい異方性があるという点もあげなければならない。この異方性は、材料として常に有利な点とは言えないが、それを巧みに利用することによって各種構造物（あるいはその要素）の新しい設計が可能となる。実際、フィラメントワインディング (FW) 法による FRP 製圧力容器、またより卑近なものとしてバイアスおよびラジアルタイヤなど、数々の複合材料構造体においてその実例が見られる。多くの場合、一方向 (UD) 繊維強化材を種々の様式で重ね合わせた“繊維強化積層板”が用いられ、“直交積層 (Cross Ply)”と“斜交積層 (Angle Ply)”が積層様式の基本となっている。従来、FRP の優れた比弾性特性の利用という立場から、弾性異方性に関する興味が中心であり、その設計に際しては Kirchhoff-Love の仮説に基づく古典的な積層板 (殻) の理論 (Classical Laminated Plate (or Shell) Theory) による解析法が主として用いられている。¹⁾ しかし、金属基繊維強化材においては、母材金属の降伏を許容した設計が少なからず有効とされ、このため弾性のみならず弾・塑性状態での異方性に関する知見も極めて重要となる。本講演では、はじめに、これまで我々が展開してきた“微視力学的”解析手法の特色について触れ、次いで、炭素繊維強化アルミニウム (CFRA1) の直交および斜交積層材の単軸引張負荷を例にとって、弾・塑性挙動の異方性に関する解析と実験結果との比較・検討を行う。CFRA1による構造体設計の立場からすると、個々の構造体に依存する様々な多軸応力下での力学挙動について知る必要がある。この意味で本例題における負荷条件はあまりにも単純であり、したがって得られた具体的結果の利用価値もそれほど高くはないが、複合材料構造体の弾・塑性設計に際しての留意点を指摘し、また本解析手法の有用性を示すには適当な例題と考えられる。

2. 解析と実験 こゝまで我々が展開してきた“微視力学”²⁾ というのは、ある種の多相材料——一つの連続相 (母相) と多数の不連続相 (介在物) より成る——の非弾性歪 (塑性歪、熱膨張歪、相変態歪など) を含む力学的構成関係 (Mechanical Constitutive Relations) ——負荷応力 Σ_{ij} と多相材料の巨視的全歪 Γ_{ij} の関係——を、構成相の力学的性質と組織学的因子 (不連続相の形状、配向、量比など) に関する情報より導出するものである。CFRA1のように延性な母相が脆性な高強度繊維によって (多方向) 強化された複合材料の場合、非弾性歪として母相中のみ発生する塑性歪 ϵ_{ij}^p を考えればよい。等温下でのギブス自由エネルギー G を Eshelby のだ円体介在物理論³⁾ を応用して微視力学的に評価した後、 $\Gamma_{ij} = -(\partial G / \partial \Sigma_{ij})_T$ なる熱力学の関係式を用いれば $\Gamma_{ij} = C_{ijkl}^{-1} \Sigma_{kl} + \epsilon_{kl}^p P_{klij}$ なる弾・塑性構成関係の一般式を得る。ここで、 C_{ijkl}^{-1} と P_{klij} は、母相と繊維の弾性定数および組織学的因子に依存する定数 (4次のテンソル) である。繊維による拘束のもとで生ずる母相中の塑性歪 ϵ_{ij}^p を決定するために G の最小化条件を導入すると、数学的には非線形最適化問題に帰着し、可変距離法などの数値解析手法を用いて処理できる。 $0^\circ/90^\circ$ (直交積層型) 材と $+\theta/-\theta$ (斜交積層型) 材の単軸引張負荷について具体的な解析を行い、強度および変形の異方性指標として Σ_{33} (at $\Gamma_{33} = 0.1\%, 0.2\%$) および弾・塑性“ポアソン比” $-\Gamma_{11}/\Gamma_{33}$ 、 $-\Gamma_{22}/\Gamma_{33}$ (荷重軸//3軸) を採用して結果を整理した。一方、実験には東邦ベスロン社製 CFRA1 の UD、 $0^\circ/90^\circ$ 、 $+20^\circ/-20^\circ$ 薄板材より種々の方位に切り出した短冊状試片を用い、その表裏両面にロゼット型フォイル歪ゲージをはって面内歪 (引張軸方向と横方向の垂直歪成分およびせん断歪成分) に対する応力-歪曲線を求めた。なお、繊維の体積含有率は約40% (二方向強化材では各方向につき約20%) である。

以上の解析と実験により示された CFRA1 における弾・塑性挙動の特色を要するに、母相の降伏とその後の塑性流動によって材料の変形異方性が極めて顕著となるという事実から、従来の弾性解析のみでは構造体設計に必要な正しい情報は得られないというのが結論である。

参考文献 1) 例えば、R. M. Jones: “Mechanics of Composite Materials” (McGraw-Hill Kogakusha, 1975) .

2) 若島: 第22回「炭素材料に関する夏期セミナー」テキスト, p. 52 (1984) (炭素材料学会) .

3) J. D. Eshelby: Proc. Roy. Soc. A241 (1957) 376, A252 (1959) 561.