三次元強化繊維複合材料解析手法の研究*

(第1報, 引張弾性定数の解析)

長井 謙 宏^{*1}, 横山 敦 士^{*2}, 前川 善一郎^{*3}
濱田 泰 以^{*3}, 野口 義 治^{*4}

The Study of Analytical Method for Three-Dimensional Composite Materials

(1st Report, Evaluation of Tensile Elastic Modulus)

Kanehiro NAGAI, Atsushi YOKOYAMA, Zen-ichiro MAEKAWA,
Hiroyuki HAMADA and Yoshiharu NOGUCHI

This paper describes an analytical method for evaluating the elastic properties of three-dimensional fiber reinforced composite materials on the basis of a micromechanical analysis of a unit cell structure. The unit cell is a small repeating geometrical unit of fiber bundles. A special feature of this study is to treat the unit cell as a rigid frame structure constructed of fiber-beam and matrix-beam elements. This analytical structure model can faithfully represent actual fiber composition. For two types of carbon/epoxy three-dimensional composite test pieces cut out of I-beam structure, the tensile elastic moduli are computed by finite element method. Comparisons between analytical and experimental results are also made. This analytical method shows good agreement with the experimental data.

Key Words: Composite Material, Finite Element Method, Three-dimensional Composite Materials, Unit Cell, Elastic Modulus, Rigid Frame Structure

1. 緒 言

近年の複合材料に関する研究・開発には目ざましいものがあり, つぎつぎと新しい高性能な複合材料が生み出されている。その中でも繊維を立体的に織りあげた三次元強化繊維複合材料は, 積層型複合材の弱点であった層間強度の低さを克服し, また耐衝撃性および複雑形状への適応性にも優れているため, 従来は複合材化が難しかった構造部材への適用が期待されている。

しかしながら, こうした特長を有する三次元複合材料も, 実用化するには, 成形, 評価, 解析等, 様々な技術的課題を乗り越える必要がある。中でも解析技術の確立は, 三次元強化繊維複合材料の繊維構成を決定する上で必須の課題項目である。

三次元強化繊維複合材料の解析に関する研究は, 1980年代後半に入って活発化し, これまでに種々の論

文が発表されている。それらのほとんどは, ユニットセルと呼ばれる複合材構成繊維の微小繰返し単位についてミクロ的な解析を行い, その結果を利用して構造全体のマクロ的な解析を行う手法を用いている。ユニットセルの解析には, Whiteney⁽¹⁾, Yang⁽²⁾, Crane⁽³⁾などの二次元積層理論を応用した方法, Ko⁽⁴⁾の複合則を適用する方法, 八田⁽⁵⁾による等価介在物法を応用したやり方, それに Lei⁽⁶⁾, Ma⁽⁷⁾といった力学的構造モデルを構築する方法が報告されている。しかしながら, これらの研究は, どれもまだ試行的な段階であり, 一部には強度解析にまで踏み込んだ研究があるものの, 大部分は弾性定数の解析が中心である。

二次元積層理論を応用する方法, 複合則を適用する方法, および等価介在物法を応用する手法は, とともに従来の積層型複合材に適用されてきた解析方法を三次元複合材に拡張した方法である。いずれも弾性定数の解析においては良好な結果を報告しているが, 三次元複合材特有の, 連続性やからみなどの繊維の三次元的な相互関係を表現することが困難であるため, 将来的に強度解析まで発展させることは難しいと思われる。

これらのアプローチに対し, 力学的構造モデルを構築する方法は, 弾性定数だけでなく強度まで拡張可能な解析手法であると考えられる。力学的構造モデルは,

* 原稿受付 平成4年5月19日。

^{*1} 正員, 三菱重工業(株)名古屋航空宇宙システム製作所 (〒455 名古屋市港区大江町10)。

^{*2} 正員, 三重大学教育学部 (〒514 津市上浜町1515)。

^{*3} 正員, 京都工芸繊維大学繊維学部 (〒606 京都市左京区松ヶ崎御所海道町)。

^{*4} 三菱重工業(株)名古屋航空宇宙システム製作所 (〒455 名古屋市港区大江町10)。

トラスあるいはラーメン構造により、ユニットセル内の繊維組成およびマトリックス領域を忠実に表現することができるため、前述の方法では困難であった各種の三次元複合材特有の解析因子を盛り込むことが可能となる。したがって、要素の配置の仕方や各要素の破壊クライテリアを適切に設定することで、実現象と対応した破壊メカニズムを再現できる可能性がある。

そこで、本研究では、以上の検討結果を踏まえ、三次元複合材 I 形ビームから切り出した 2 種の異なる繊維配向を有する試験片に対し、将来的には弾塑性領域を考慮した強度解析まで拡張可能な手法として、ユニットセルをラーメン構造体によりモデル化する解析手法を用い、ファーストアプローチとしてまず引張弾性定数を推測する。この手法は、著者の一人が平打組物複合材料に適用しその有効性を確認している⁽⁶⁾。

2. 三次元複合材料

三次元複合材料とは、従来の積層材のように繊維を平面的に配向したものとは異なり、繊維を立体的に織り上げた構造を有する複合材料である。三次元複合材の定義としては、ブレイディングなどのいわゆる編み物形複合材を含む場合もあるが、本研究では直交 3 軸繊維物を基礎とした三次元複合材を対象とする。図 1 に、直行 3 軸三次元繊維物平板の断面写真を示す。x 方向糸および y 方向糸を束ねるように z 方向が配向されている様子がよく観察できる。

3. 解析手法

本研究では、ユニットセルを用いた解析手法を適用する。ユニットセルとは、複合材繊維組成の微小繰返し単位である。解析手法は、まず対象とする複合材構造を構成するユニットセルを決定し、各ユニットセル

図 1 三次元繊維物平板断面写真

の材料特性を解析的に求めた後、構造全体をユニットセルにより組立て全体解析を行うものである。図 2 に、本解析手法の流れを示す。

3・1 解析対象 本報では、2 種の三次元織り構造を有する CFRP 複合材に対して解析を行う。2 種の織り構造は、基本的な直交 3 軸三次元織り構造(図 3(a))と、直交 3 軸方向に加え面内に $\pm 45^\circ$ 方向糸を配向したより複雑な織り構造(図 3(b))とした。これら 2 種の織り構造は、著者らが三次元複合材構造部材の試作として製作した I 型ビーム(図 4)のフランジ部およびウェブ部に対応しており、後に本報での解析精度の検証を、I 型ビームからの切り出し試験片を用いて行う。

図 5 にフランジ部ユニットセルの繊維組成図を、図 6 にウェブ部の厚さ方向に対するプライテーブルを、

図 2 解析手法の流れ

図 3 三次元複合材織り構造

それぞれ示す。用いた繊維は、三菱レイヨン(株)製のパイロフィル T-1 炭素繊維であり、繊維束はフランジ部で x , y , および z 方向に 36 K, 24 K, および 3 K を、ウェブ部で x - y 面内糸に 6 K, z 方向糸に 12 K を、それぞれ使用した(単位 K: 1 000 フィラメント)。

I 型ビーム三次元繊維物プリフォームは数島紡績(株)で製織し、エポキシ樹脂の含浸は三菱重工業(株)名古屋航空宇宙システム製作所で実施した。本 I 型ビームの寸法は、高さ 100 mm, 幅 50 mm, および長さ 500 mm である。

3・2 モデル化 本研究では、複合材組織をラーメン構造によりモデル化する。図 7 にフランジ部ユニットセル(図 5)の解析モデルを示す。ここで、太線は繊維束を表すはり要素であり、実際の繊維束の配向にしたがって配置している。また細線はマトリックスを表すはり要素であり、繊維束が交差あるいは隣接する位置に繊維束間の力を伝達する役割をになっている。ラーメン構造によるモデル化では、節点において荷重と

モーメントを伝達することができるため、特に繊維束が折り返す点での繊維束の連続性をうまく表現できると考えられる。ただし、本報では 1 方向の引張弾性定数解析を対象としているため、ここでの解析モデルはせん断や曲げ変形を考慮したものではない。

各はり要素の弾性定数には、繊維の弾性定数(235 GPa)およびエポキシ樹脂の弾性定数(3.5 GPa)をそれぞれ与えた。さらに、繊維束はり要素の断面積は、繊維束内の個々の繊維の断面積の和とし、マトリックスはり要素の断面積は、繊維束間の力の伝達に実際に寄与するマトリックスの体積と等しくなるように、要素の長さより決定した。また断面定数は円形断面として算出した。

ウェブ部についても同様に、ラーメン構造による解析モデル化を行う。

3・3 引張弾性定数解析 上述した解析モデルを用い 1 方向の引張弾性定数を解析する。負荷方向は、

図 4 三次元複合材 I 型ビーム(プリフォーム)

図 6 ユニットセルプライテーブル(ウェブ部)

図 5 ユニットセル繊維組成図(フランジ部)

図 7 ユニットセル解析モデル(フランジ部)

図7の x 方向とし、ユニットセルの境界条件は、後に行う全体解析を考慮し、端部の z 方向の変位および z 軸回りのモーメントを拘束するものとした。解析は、図7のEFGH平面上の各節点に x 方向の微小強制変位(ひずみ量0.1%)を与え、FEMにより行う。弾性定数は、強制変位を与えた節点に働く x 方向の力から求めた断面の応力と、強制変位量から求めたひずみより算出する。

次に全体解析について述べる。図8に、フランジ部の全体解析モデルを示す。形状は後に結果の比較を行うフランジ部からの切り出し試験片の形状に従った。全体構造は計48個のユニットセルから構成される。1軸負荷の場合、近似的に平面問題として扱うことができるため、ここでのユニットセルは、先に求めた弾性定数を有するFEM等方性板要素とした。解析は、図8において、AB端を固定としCD端に x 方向の微小強制変位を与えることにより実施する。

ウェブ部についても、同様の全体解析モデルを構築し、解析を実施する。

本報での解析では、フランジ部およびウェブ部とも試験片レベルを対象としており、どちらも単一種類のユニットセルから構成されるため、ユニットセルと全体構造との結果はほとんど同じとなるが、構造レベルに対しては、複数のユニットセルを用い全体構造を構築することにより解析を行うことができる。

4. 解析結果

表1に、フランジ部およびウェブ部の弾性定数解析結果と、参考として試験結果を示す。解析値と試験値とを比較すると、フランジ部で6%解析が低め、ウェブ部では2%解析が高めと、どちらの場合も両者はよく一致している。これは、どちらの繊維構成においても、 x 方向の弾性定数の決定に対しては、 x 方向に走る繊維の弾性定数が大きな割合で寄与したからではないかと思われる。ただ、表1で示した試験結果は、I型ビームからの切り出し試験片を用い実施した材料試験から得られたものであり、試験片の本数も少ないため、

図8 全体解析モデル(フランジ部)

あくまでも参考値としてとらえる必要がある。また試験値に対する解析値の大小関係が、フランジ部とウェブ部で逆転していることについても、その原因が解析のモデル化にあるのか、あるいは試験結果に存在するのか今後検討する必要がある。

実際の繊維束は、解析モデル化したような直線状にはならず、蛇行していることが多分に考えられる。また三次元複合材はまだ萌芽期に位置しており、ボイドやクラックなどの成形過程における欠陥も十分予想される。したがって、これら因子の結果へ与える影響度を把握することや解析への組み込み方などが、本解析手法を実用化する上での課題になると考える。さらに、今後強度解析にまで拡張して行くためには、繊維とマトリックスの界面の影響や、マトリックス領域自身のモデル化など、本報では考慮していなかった問題も取り入れて行く必要があると考えられる。

5. 繊維束径の弾性定数に対する影響

表2に、各方向の繊維が弾性定数に対して寄与する影響を調べるために、フランジ部のユニットセルにおいて、 x , y , および z 系の太さをパラメトリックに変えて解析した結果を示す。表2において、最上段はフランジ部のオリジナルな繊維束比での弾性定数の値であり、表1と同一のものである。また表2の2, 3, および最終段は、それぞれ x , y , および z 方向の繊維束を構成するフィラメント数を、オリジナルの1/2にしたときの値を示している。

x 方向繊維束のフィラメントを1/2にすると弾性定

表1 弾性定数解析結果

Elastic Stiffness		Analysis	Exp. (Ref.)
Ex [GPa]	Flange	71.9	(76.5)
	Web	30.5	(29.9)

表2 繊維束径の違いによる弾性定数の変化

Fiber Bundle (K*)			Elastic Stiffness (GPa)
X	Y	Z	
36	24	3	71.9**
18	24	3	36.3
36	12	3	71.8
36	24	1.5	71.5

*) K=1000 filaments. **) Basic Weaving in Flange

数は49.5%低下しており、本織り構造では x 方向に走る繊維が x 方向の弾性定数に対し支配的であることがわかる。また y 方向の繊維束に関しては、フィラメントの本数は多いが x 軸に対し垂直に配向されているため、 x 方向の弾性定数にはほとんど寄与していない。さらに z 方向の繊維束についても、 y 方向と同様 x 軸と垂直な関係にあるため、 x 方向の弾性定数に対する影響は小さいが、上下面の織り返し部で x 方向に走る繊維束が存在することで、 y 方向に比べフィラメントの本数は少ないながらも、弾性定数に寄与する割合は大きいことがわかる。

6. 結 言

本研究では、三次元強化繊維複合材構造に対し、ユニットセル(繊維束の最小繰り返し単位)を利用した解析をFEMにより実施した。本解析手法の最大の特徴は、ユニットセルを繊維束とマトリックスに対応するはり要素を用いてラーメン構造体としてモデル化することで、これにより、三次元複合材I型ビームから切り出した2種の異なる繊維構成を有する試験片の弾性定数に関して、試験値と比較し数%以下の差違でよく

一致した。また、各方向の繊維束径をパラメトリックに変化させ解析することで、各繊維束の弾性定数に寄与する影響を明らかにすることができた。

今回の結果を足掛りに、本解析手法を今後面外特性や強度の評価へも対応できるよう、改良・拡張することを検討して行きたい。

最後に、本研究の供試片製作にご協力いただいた数島紡績(株)に感謝の意を表す。

文 献

- (1) Whitney, T. J. and Chou, T. W., *Compos. Mater.*, **23** (1989), 890-911.
- (2) Yang, J. M., Ma, C. L. and Chou, T. W., *Compos. Mater.*, **20** (1986), 472-483.
- (3) Crane, R. M. and Camponeschi, E. T., *Experim. Mechanics*, (1986), 259-266.
- (4) Ko, F. K., *Proc. Compos. Mater., Testing and Design-7th Conf.*, (1986), 392-403.
- (5) 八田, 日本複合材料学会誌, **14**-2(1988), 25-32.
- (6) Lei, C. S. C., Wang, A. S. D. and Ko, F. K., *Proc. ASME Winter Annual Meeting* (1988), 45-50.
- (7) Ma, C. L., Yang, J. M. and Chou, T. W., *Proc. Compos. Mater., Testing and Design-7th Conf.*, (1986), 404-421.
- (8) 横山・小林・濱田・前川, 日本機械学会論文集 **516**-A (1989), 1942-1947.