

# 解析的平均化手法による積層材料梁の曲げ試験挙動とその強度の予測

Prediction of strength of girders consisting of laminate materials by an analytical averaging method

桐木真也\*

Shinya KIRIKI

\*構造強度学研究室（指導教員：岩熊哲夫 教授）

適材適所の観点から効率的な設計が可能である複合材料の一つとして、CFRP や GFRP といった繊維強化材料を積み重ねた複合積層材料がある。本研究では、複合積層材料からなる梁に対して、森・田中理論に基づく平均化手法を用いた有限要素解析を行い、曲げに対するその終局強度特性を数値的に追跡し解明する。

**Key Words :** laminate, composites, Mori-Tanaka theory, averaging method, 3D FEM

## 1. はじめに

繊維強化プラスチック複合材料の代表的なものとして炭素繊維を用いた CFRP や、ガラス繊維を用いた GFRP があり、その軽量性や比強度の高さが注目され、近年土木分野でも広く用いられている。これら CFRP や GFRP からなる複合積層材料は、積層パターンの他にも介在物である繊維の量や形、向きなどを自由に变化させられる利点がある一方で、それに伴い、終局強度や破壊挙動も様々変化する。このため、この複雑な複合積層材料の設計に当たって、精度良く巨視的な挙動と微視的なメカニズムを予測できる手法の開発が求められている。

その一端として本研究では、埼玉大学で行われた複合積層材料梁の曲げ試験を対象に、介在物の量や形、向きを陽に考慮できる森・田中理論に基づく平均化手法を取り込んだ有限要素解析を行い、曲げに対する梁の抵抗挙動を数値的に追跡し、その終局挙動を明らかにする。

## 2. 解析モデル

埼玉大学では図 1 に示すような I 形断面の梁に対して 4 点曲げ試験が行われた。3 種類の供試体のフランジ、ウェブそれぞれの CFRP, GFRP 積層比率は図 2 のとおりである。フランジ部の CFRP 割合が多い順にモデル A, B, C となっている。本研究ではこの曲げ試験を対象に、FEM 解析を行った。CFRP, GFRP それぞれの要素に与える材料定数には、本研究の特色であるように、母材（ポリエステル）と介在物（繊維）それぞれの弾性係数とポアソン比、および介在物の量、形、向きを微視的に与え、それらを森・田中理論に基づき平均化したものが埼玉の実験で用いられた巨視的な材料定数と出来る限り一致するようにした。CFRP については  $E_m=3300(\text{MPa})$ ,  $\nu_m=0.18$ ,  $E_i=250000(\text{MPa})$ ,  $\nu_i=0.3$ ,  $f_i(\text{介在物比率})=0.446$  とした。また実験に用いられた

GFRP 材は、繊維が積層板面内軸方向と直行方向に配置されているので、巨視的には等方材料となっている。本研究ではこの事を利用し、簡単のため GFRP は介在物なしの等方材料として扱い、 $E_m=17000(\text{MPa})$ ,  $\nu_m=0.49$  とした。表 1 に実験での材料定数および、解析に用いた材料定数（陽に与えた微視的な材料定数を巨視的な材料定数に平均化したもの）をそれぞれを示す。

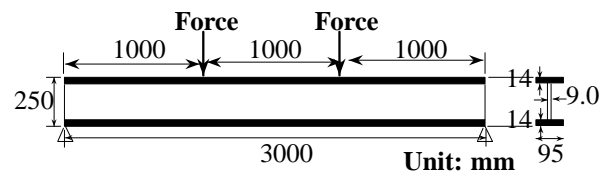


図-1 曲げ試験供試体

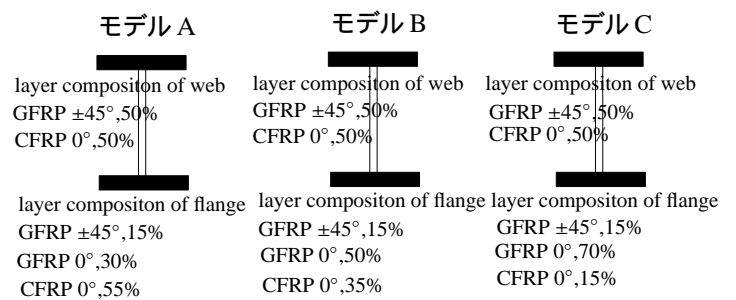


図-2 積層構成

表-1 平均材料定数 (単位 MPa)

	$E_{11}$	$E_{22}$	$\nu_{12}$	$\nu_{21}$	$G_{23}$	$G_{31}$	$G_{12}$
CFRP- 実験	113000	7400	0.328	0.021	3200	3500	3500
-FEM	113100	7400	0.248	0.016	2958	3536	3536
GFRP- 実験	24000	24000	0.28	0.28	3500	3500	3500
-FEM	17000	17000	0.49	0.49	5700	5700	5700

## 3. 実験結果

3 種類の供試体それぞれの曲げ試験で、終局状態において、載荷点付近および載荷スパン内で観察された破損形式を以下に示す。

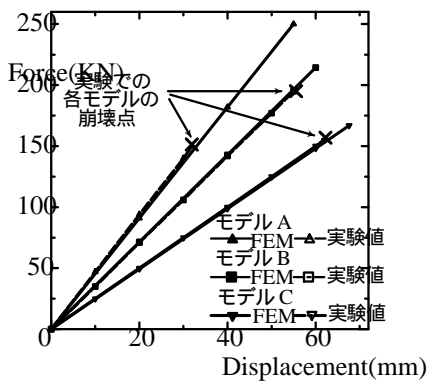


図-3 荷重変位関係

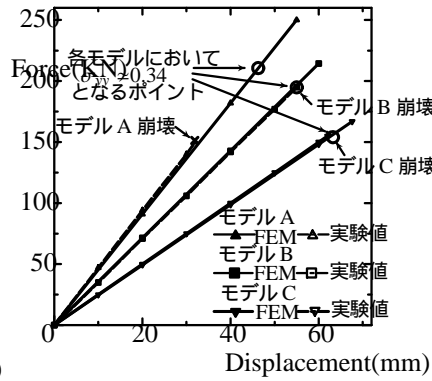


図-4 梁軸直角鉛直方向層間応力に対する各モデルの荷重・変位レベル

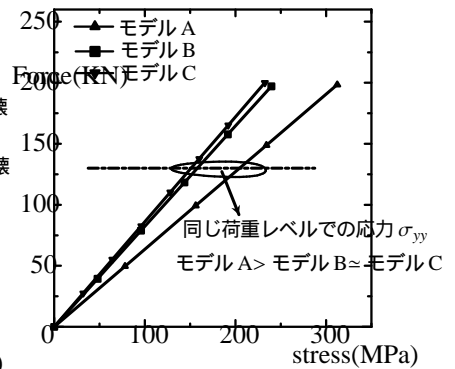


図-5 載荷点直下の梁軸直角鉛直方向の圧縮応力

モデル A

⇒ 載荷点での応力集中, 上フランジの層間剥離

モデル B

⇒ 上フランジの層間剥離

モデル C

⇒ ウェブ上部の局部座屈, 上フランジの層間剥離

モデル A, C では 2 つの破損形式が確認されているが, 破壊は極めて脆性的に起こり, どちらがメインの破壊モードかを視覚的に判断するのは困難であった。

#### 4. 解析結果

3 つのモデルの荷重変位関係を, 2 節で説明した微視構造を陽にモデル化した複合材料有限要素で解析して求めた。各材料定数も 2 節に述べたとおりである。その結果を図 3 に示す。積層板としての巨視的な材料定数が, 実験値と解析用のそれが一致するように設定されていることもあり, 実験値との剛性はよく一致している。この図の実験値の × 点は, 実験において前節でまとめたような状況で崩壊した状態に相当する。

本研究ではこの脆性的な崩壊の原因を数値解析により捉え, 予測したい。そこで, 値そのものは梁の軸方向応力よりも小さいが, 上フランジの梁軸直角鉛直方向の応力  $\sigma_{yy}$  により層間が破壊したと予想して, その値を調べた。解析は, 上フランジの GFRP 層と CFRP 層の間に薄い層を設け, そこでの応力を層間の応力とみなして計算した。モデル C の場合には, その応力が  $\sigma_{yy} \approx 0.34$  程度のときに層間剥離が生じたとすると, 図 3 におけるモデル C の崩壊点の × 点付近の状態に対応するところを確認することができた。そこで, この同じ基準をモデル A と B に当てはめ, 上フランジの層間の応力が  $\sigma_{yy} \approx 0.34$  を満足する点を示したのが, 図 4 である。このように, 実験でも層間剥離が崩壊時に顕著であったモデル B, C では実験値とほぼ同じ変形レベル・外力レベルで崩壊を予測できた。これに対し, モデル A では, 崩壊荷重を過大評価してしまった。これは, モデル A の実験観察では, 崩壊は載荷点付近の局所的な破壊が原因の一つであ

るという報告もあることから, この剥離判定の基準が当てはまらず, 予測がはずれたものと予想される。

そこで, 載荷点直下の応力  $\sigma_{yy}$  を数値計算より求めたのが図 5 である。モデル A では, 他の 2 モデルと比べて,  $\sigma_{yy}$  が同じ外力レベルに対して, 相対的に大きな値を取っていることが分かった。これによりモデル A では他のモデルの実験観察では見られなかった載荷点直下の局所的な破壊を起こした可能性があると考えられる。

#### 5. まとめ

本研究では, 次のようなことを明らかにできたと考えている。

- CFRP の割合が増えた場合には剛になるものの, 載荷点付近の応力が他の場合に比べて大きくなり, そのあたりの崩壊が先に発生する可能性があることを示した。
- 層間剥離を  $\sigma_{yy}$  で判断し, 少なくとも二つのモデル B, C ではよい予測が得られた。

なお, 層間剥離の規準と, ここでは複合材料有限要素を用いず, 等方材料として扱った GFRP について, 今後詳細に再検討する予定である。

#### 参考文献

- 1) 睦好宏史, Thiru Aravinthan, 浅本晋吾, 鈴川研二: Development of New Hybrid Composite Girders Consisting of Carbon and Glass Fibers, COBRAE conference 2007 Benefits of composites in civil engineering, 2, March 28-30 2007, university of Stuttgart, Germany.
- 2) Mori, T. and Tanaka, K.: Average stress in matrix and average energy of materials with misfitting inclusions, *Acta Metall.*, Vol.21, pp.571-574, 1973.
- 3) 王峰, 岩熊哲夫, 小山茂: 解析的均質化手法を用いた複合材料・構造の簡易解析と最適化. 構造工学論文集, 土木学会, Vol.51A, pp.1387-1396, 2005.

(2008 年 2 月 12 日 提出)