

平均化手法による複合積層材料梁の曲げ強度予測

東北大学大学院工学研究科 学生員 桐木真也
 東北大学大学院工学研究科 正員 岩熊 哲夫

1. まえがき

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。これらの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、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 $E_m=3300(\text{MPa})$, $\nu_m=0.18$, $E_i=250000(\text{MPa})$, $\nu_i=0.3$, $f_r(\text{介在物比率})=0.446$ 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。

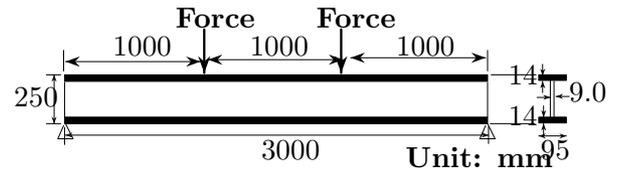


図-1 曲げ試験供試体

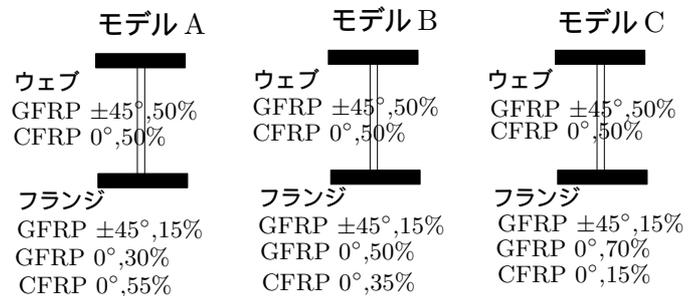


図-2 断面積層構成

表-1 平均材料定数 (単位 MPa)

	E_{11}	E_{22}	ν_{12}	ν_{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壊形式を以下に示す。

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

⇒ 上フランジの層間剥離

モデル A 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。

Key Words: 複合材料, 積層材料, 森・田中理論, 層間剥離, 3D FEM

〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06

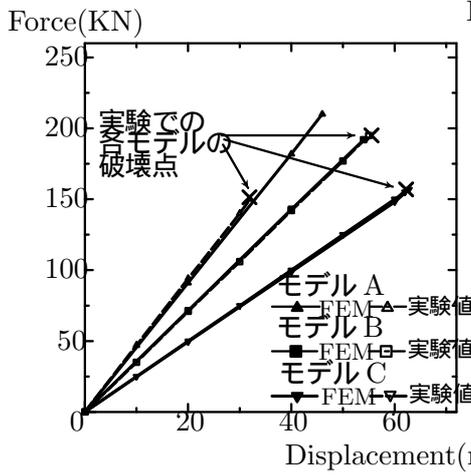


図-3 荷重変位関係

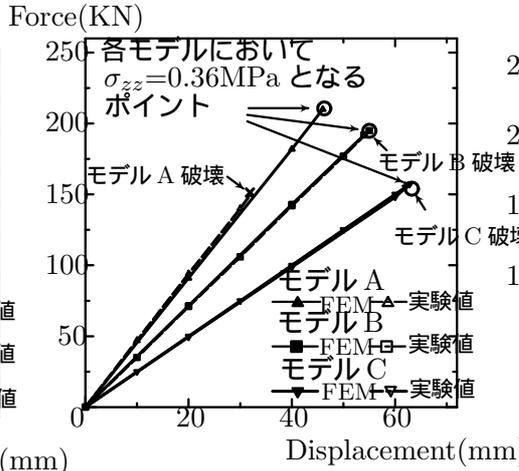


図-4 積層板面外方向層間応力に対する各モデルの荷重・変位レベル

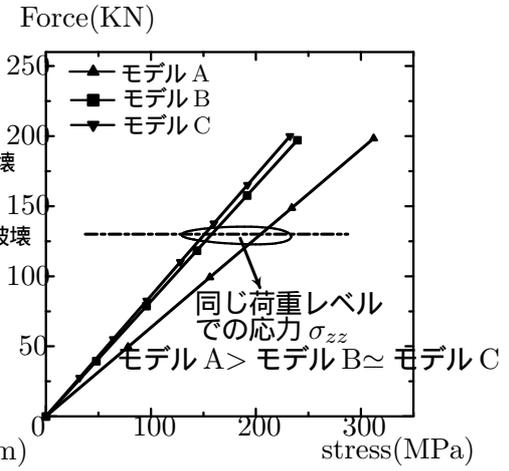


図-5 載荷点直下の積層板面外方向の圧縮応力

4. 解析結果

埼玉での実験を対象に FEM 解析を行った。3つのモデルそれぞれの荷重変位関係を実験結果と FEM 解析結果を合わせて図 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、実験において先にまとめたような状況で破壊したポイントである。

本研究ではこの脆性的な破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、上フランジの積層板面外方向の応力 σ_{zz} 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 層の間に極めて薄い層を設け、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 では実験での破壊点に対応する FEM 解析での層間応力面外方向成分 σ_{zz} は 0.36MPa であった。そこで上フランジの層間応力 σ_{zz} が 0.36MPa 付近で層間剥離発生が発生するとモデル化し、これを用いてモデル A、モデル B の破壊点を予測してみる。図 3 で示した実験値と FEM 解析値の荷重変位関係の上に $\sigma_{zz}=0.36\text{MPa}$ を満足する点を印で示したものを図 4 に示す。ここで図からも分かるように、モデル C では当然であるがモデル B においてもこれらの印と実験で破壊が生じた×印とが荷重変位関係図においてほぼ一致し、実験値とほぼ同じ変形レベル・外力レベルで破壊を予測できている。これに対し、モデル A では、印と×印は一致せず、今回のように層間応力の面外方向成分 σ_{zz} を用いた破壊予測では破壊荷重を過大に予測してしまった。これは睦好らの実験研究において、モデル B、C では層間剥離が顕著な破壊原因

あったのに対し、モデル A では層間剥離の他にも終局時に載荷点付近での局所的な破壊が見られ、それが破壊原因の一つであるとしていることから、モデル A のメインな破壊モードは層間の剥離ではなく、その為この破壊予測が外れたのではないかと考えられる。

そこで、上フランジ載荷点直下の積層板面外方向応力 σ_{zz} 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 σ_{zz} が同じ外力レベルに対して、相対的に大きな値となっている。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応力集中が生じ、終局強度の低い破壊を起こした可能性があると考えられる。

5. まとめ

- モデル C の破壊を参考に層間剥離を積層板面外方向の層間応力 σ_{zz} で判断する基準を提案し、モデル B ではよい予測が得られた。
- モデル A では他のモデル B、C より同じ荷重に対する載荷点直下の上フランジ積層板面外方向の圧縮応力が大きくなり、それが原因で他のモデルより終局強度の低い破壊を起こす可能性があることを示した

参考文献

- 1) 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.
- 2) 睦好宏史, 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, University of Stuttgart, Germany, 2007.
- 3) 小山茂, 岩熊哲夫, 岩崎智昭, 小倉崇生, 三井康司: 複合材料と多結晶体の平均的性質, 土木学会論文集, No. 661/I-53, pp.265-272, 2000.