

ハイブリッドFRP積層梁の剥離挙動の予測

信州大学大学院 学生員 ○東條 新
 信州大学工学部 正会員 小山 茂
 信州大学工学部 正会員 大上俊之

1. はじめに

繊維強化プラスチック複合材料(FRP)の代表的なものに炭素繊維を用いたCFRPやガラス繊維を用いたGFRPなどがあり、従来の土木材料に比べて比強度、耐腐食性が優れている。FRPは複数種類を積み重ね合わせた積層材として使われることが多く、積層比率や繊維の方向を変えることで、要求に応じて必要な特性を持たせられる設計自由度の高さがある。しかしながら、コストや環境負荷の高さや、材料の力学的特性が複雑であるといった課題があり土木構造部材に対して様々なタイプのFRPを製造することは現在のところは難しく、このような利点が必ずしも生かされていない。これらの課題を解消するために、近年FRP複合積層材料の強度試験が盛んに行われており、その一つに睦好らが行ったCFRPとGFRPを積み重ねたI型断面のハイブリッドFRP積層梁の曲げ試験¹⁾がある。この実験ではフランジ部のCFRP積層比率が異なる3種類の供試体について曲げ試験が行われたが、どの供試体も線形的な変形挙動から脆性的な破壊をし、その破壊モードは積層比率の変化によって様々な破壊形態が確認された。CFRPの積層比率が高いほど梁の剛性が大きくなる一方、梁の終局強度は、CFRPだけで積層するよりもある程度GFRPを組み合わせて積層する方が高くなるということもわかった。

本研究では、その中で確認された破壊形式の1つである層間剥離に注目する。層間剥離は板の剛性差によって、剛性の異なるFRP境界での曲げ応力の不連続性により発生すると考えられるが、明確な原因は未だ解明されていない。そこで、剛性の異なる板を積層させた梁を有限要素解析し、結果を整理することによって、剥離挙動について分析する。

2. 層間剥離挙動の分析のためのモデル

層間剥離は、積層している板の境界面における

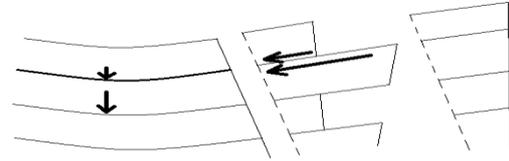


図1 層間剥離の原理

曲げ応力の不連続性により、鉛直成分に差が生じ、板と板が剥がれる現象である。図1に層間剥離の原理を示す。橋軸方向の応力が異なることにより、鉛直成分に差が生じる。それによって境界面を裂こうとする力が生じ、層間剥離が発生する。

睦好らの実験から考えられる原因としては、剛性の異なるFRP各層で曲げ応力に差が生じ、板の境界で不連続になってしまうためであるということが挙げられており、それにより鉛直方向の変位に差が生じ、剥離が発生すると考えられている。この原因と、剥離が見られた場所が荷重スパン中央付近の上フランジであるということから、層間剥離は曲げ応力の集中しやすい中央付近において、剛性の異なる板が積層されている箇所で発生しやすいということが予測される。更にこの場合、ガラス繊維を使用したGFRPに比べて、炭素繊維を使用したCFRPの方が高剛性のため、応力はCFRPに多く集中し、たわみも大きくなる。したがって層間剥離は、剛性の高い材料を下側に、剛性の低い材料を上側に積層させたときに剥離が起きると考えられる。剥離の大きさや、剥離と積層比率、積層パターンとの関係は、この実験からは予測し難い。また、梁の長さや板の厚さ等を変えることにより、剥離箇所や大きさが変わってくるのではないかと考えることも可能である。

今回は、層間剥離の挙動、傾向を分析するために、剛性の異なる2種類の材料を使用した板を、まずは2層に積層させた梁のモデルを有限要素ソフト「ANSYS」で作成し、剛性の異なる層と層の接触間に鉛直・接線方向にペナルティ剛性バネを入れた有

有限要素解析を実行し、層間のたわみなどを調べることにより、層間剥離の挙動、傾向を分析する。

3. モデルの寸法, 境界条件

まず、全モデルで統一するデータを決定する、梁は幅95mm, 厚さ1.32mm, 軸方向の長さ3000mmの長方形の薄板で行う。図2に梁の寸法とモデルを示す。

モデル間での比較を可能にするために、荷重や拘束条件に関しては全モデル共通の値を用いて解析を行うようにする。拘束は、片方をヒンジ支点、もう一方をローラー支点で行う。板の総厚は1.32mmとし、1枚0.66mmの板を2枚積層させる。剛性の強い板と弱い板の2枚をそれぞれ、上が固いもの、下が固いもの、両方共硬いもの、両方とも軟らかいものの4パターンを比較した。CFRPとGFRPの各弾性係数は、睦好らが行った実験のものと同様にして、公開されていない材料係数は、森・田中の手法²⁾を応用した平均化手法³⁾により求められている。層間剥離は鉛直成分によって生じるものであるため、今回は各接触要素の節点における鉛直方向の力である接触圧力を調べ、剛性の異なる板の層間の接触圧力を求めた。この時、層の間は固着状態（摩擦係数が無限）にし、垂直・接線方向のペナルティ剛性は一定値1にした。

4. 解析結果考察

4パターンとの比較を図3に示す。上が固いモデルと下が固いモデルを比較したところ、载荷点とスパン中央の間の、板の短手方向端部で、層間の鉛直成分の力である接触圧力が、それぞれ最小値、最大値をとった。そして上が固いモデルが負の値（層同士が離れる力）であり、下が固いモデルが正の値（層同士が密着する力）であった。これは予想に反して、剛性の高い材料を上側に、剛性の低い材料を下側に積層させた場合の方が、剥離が起きやすいという興味深い結果となった。次に剛性の異なる板を2枚積層させた場合と剛性が2枚とも同じ場合を比較したところ、接触圧力が、同じ剛性のモデルは共に正の値であったが、下が固いモデルが正の値で最大値であり、上が固いモデルが唯一負の値で最小値となった。このことから、剛性の異なる材料の積層が剥離挙動に影響を与える事が明確となった。

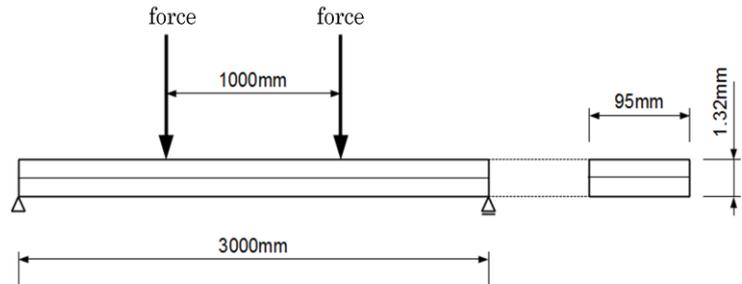


図2 梁の寸法とモデル

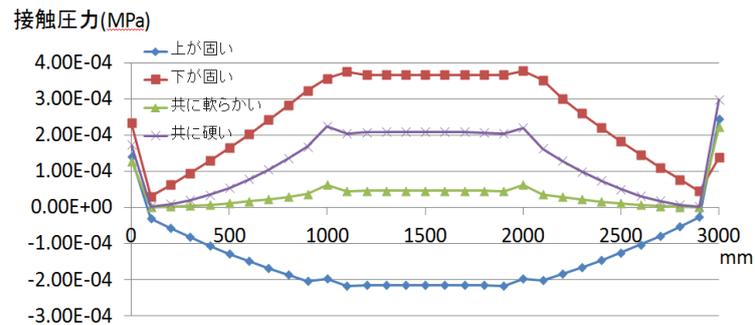


図3 積層4パターンの比較（短手方向端部）

また、以上から接触圧力が剥離の破壊基準になりえる可能性を示している。

5. おわりに

本研究では、ハイブリッドFRPを使用した部材の問題点の一つである、材料の剛性差による層間剥離に対して、剛性の異なる板を積層させた梁の剥離挙動の有限要素解析を行った。しかし現段階では積層枚数を増やした場合や、積層パターンを変化させた時の傾向を明らかにしていない。今後は、それを明らかにし、CFRPとGFRPの積層比率と梁の終局強度との関係を明確にする予定である。

参考文献

- 1) Nguyen,D.H., Mutsuyoshi,H., Asamoto,S. and Matsui,T.: Structural behavior of hybrid FRP composite I-beam, *Construction and Building Materials* 24, pp956-pp969, 2010.
- 2) Mori,T. and Tanaka,K.: Average stress in matrix and average energy of materials with misfitting inclusions, *Acta Metall.*, pp571-574, 1973.
- 3) 小山茂, 岩熊哲夫, 浦野仁美: 3相森・田中平均化手法のハイブリッドFRP梁への応用, 土木学会論文集(応用力学), Vol.70 (2014), No.2, pp375-383