ハイブリットＦＲＰ積層梁の曲げ強度予測手法の提案

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から，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．そこで，数値解析を用いてFRPの力学的特性を把握することを試みたい．

本研究では，埼玉大学で行われたハイブリットFRP積層梁の曲げ試験[1)]を対象に有限要素解析を行い，結果を整理することによってFRP複合積層梁の終局強度について考察する．

2. 曲げ試験概要

埼玉大学では，図-1に示すような，I型断面のハイブリットFRP梁（CFRPとGFRPの積層構造）に対して4点曲げ試験が行われた．

(1) 供試体情報

試験は3種類の積層比率が異なる梁C52, C33,C14（各数字はフランジ厚に対するCFRPの体積分率）を用いており，各FRP材料のフランジ部，ウェブ部の積層比率を表-1に示す．表中の0°,±45°という値は各FRP材料において，梁の長手方向に対し繊維の向く角度であり，CSMはマット材であり繊維の方向はランダムである．また，公開されている各FRP材料の巨視的材料係数を表-2に示す．

(2) 試験結果

試験結果については，表3に示すような各モデルに対して異なる破壊形式と終局荷重が報告がされている．注目すべきは，C33の終局強度が最も大きく，高剛性であるCFRPの積層比率が大きいC52よりも強度が高くなっている．また，全てのモデルにおいて，スパン中央フランジ上部での層間剥離が観察されているが，C52とC14は主たる破壊形式に伴い発生した副次的な破壊形式であると考えられる．

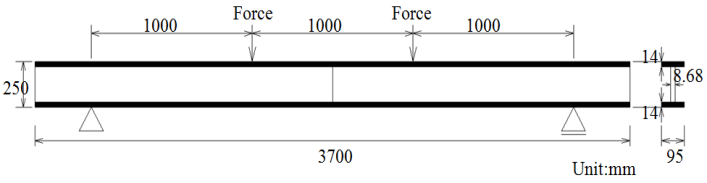

図 1　曲げ試験供試体概要

表 3　各 FRP の積層比率（%）

	フランジ部			ウェブ部
モデル	C52	C33	C14	全モデル
CFRP-0	52	33	14	0
GFRP-0/90	10	29	48	32
GFRP±45	13	13	13	42
GFRP-CSM	25	25	25	26

表 1　各積層材料の巨視的材料定数（実験）

	E_{11}(GPa)	E_{33}(GPa)	G_{31}(GPa)	ν_{13}
CFRP-0	7.4	113	3.2	0.32
GFRP-0/90	24	24	3.5	0.1
GFRP±45	11.1	11.1	10.909	0.29
GFRP-CSM	10	10	3.8	0.308

表 2　破壊形式と終局荷重

	破壊形式	破壊部位	終局荷重(kN)
C52	圧壊	荷重載荷点付近	146.9
C33	層間剥離	スパン中央上フランジ	194.9
C14	局部座屈	梁中央ウェブ上部	153.9

3. 解析モデル

本研究では，先に述べたFRP積層梁を対象にC52, C33, C14の3種類のモデルを作成し，有限要素解析を行った．試験では，積層枚数や順序は非公開であ

るため，公開されている梁のフランジ厚およびウェブ厚と各積層材料の積層比率をもとに，フランジ端部に 11 枚の FRP 板が積層していると推定し，マットと FRP を交互に積層するモデルを仮定した(図-2)．また，ウェブ部に関しては，図に示すように，フランジ下部と一体化した構造であり，ウェブ板厚中心面に対して対称に積層した．非公開である各材料定数については，森・田中の手法[2]を応用した平均化手法[3]を用いて同定解析が行われ，解析に必要な全ての材料係数が求められている（表-4)．

実験値として公開されているスパン中央部における破断直前のたわみおよびひずみを本解析により得られた結果と比較したところ，相対誤差がたわみについては最大で 1.5%（C14 にて)，ひずみについては最大で 3.7%（C33 にて）となり，実験結果を精度よく表せることを確認している．

4. 破壊基準値の設定

(1) ウェブ座屈基準

座屈は C14 での主たる破壊形式であった．そこで実際に破壊時に座屈が発生した梁中央ウェブ上部での圧縮応力σ_{33}を各モデルごとに比較したところ，C14 で最も大きくなったのでこの時の応力を基準として採用した．ただし，0/90 と±45 の剛性差から発生する応力に差があるため，厚さを重みとした加重平均の最大値を座屈基準とし，この時の値を表-5 に示す．これより C14 の 90.34(MPa)を座屈破壊基準とした．

(2)荷重載荷点での破断基準

試験の結果より載荷部直下における圧縮変形による破断が C52 で観測されていることから，圧縮応力・ひずみを基準に考えた．各モデルの値を比較したところ鉛直方向の圧縮ひずみε_{22}の値が C52 において最大であったので，この時のひずみを今回は基準として採用する．各モデルの圧縮ひずみの比較を表-6 に示し，これより C52 の 5172μ を破断破壊基準として設定した．

5. おわりに

3 種類のモデルの共通な破壊形式である層間剥離については，現段階では破壊基準を明らかにしていない．今後は，それを明らかにし，CFRP 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．

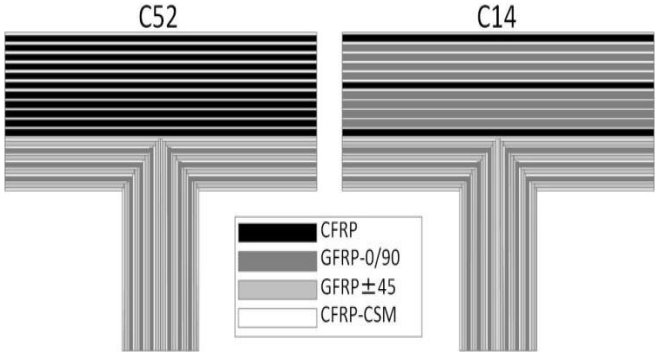

図 2 梁の積層構造

表 4 巨視的材料定数の同定値

	$E_{11}=E_{22}$ [GPa]	E_{33} [GPa]	$\nu_{23}=\nu_{13}$	$\nu_{31}=\nu_{32}$	$\nu_{12}=\nu_{21}$	$G_{23}=G_{31}$ [GPa]	G_{12} [GPa]
CFRP-0°	7.40	113	0.320	0.0210	0.359	3.200	2.722
	$E_{11}=E_{33}$ [GPa]	E_{22} [GPa]	$\nu_{23}=\nu_{21}$	$\nu_{31}=\nu_{13}$	$\nu_{12}=\nu_{32}$	$G_{23}=G_{12}$ [GPa]	G_{31} [GPa]
GFRP-0/90°	24.0	7.71	0.299	0.100	0.0960	3.192	3.50
GFRP±45°	11.1	11.9	-0.0493	0.290	-0.0529	4.371	10.9
GFRP-CSM	10.0	9.23	0.339	0.308	0.313	3.419	3.82

表 5 梁中央ウェブ上部での加重平均の最大値(MPa)

C52	C33	C14
43.51	76.62	90.34

表 6 載荷部直下の圧縮ひずみ $\varepsilon_{22}(\mu)$の最大値

C52	C33	C14
5172	4549	1733

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, *Act. 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ト FRP 梁への応用，土木学会論文集（応用力学)，Vol.70 (2014)，No.2，pp375-383