解析的平均化手法を用いた梁の曲げ試験挙動 とその強度の予測

東北大学工学部	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強化プラスチック(CFRP)とガラス繊維強化プ ラスチック(GFRP)とがあり、従来の土木材料よりも軽量で高強度なことから土木分野でも近年用いられつつあ る.本研究では、介在物の向きや形状を考慮できる森・田中理論を組み込んだ解析的な平均化手法によって複合材 料の構成モデルを構築し、それを用いて複合材料でできた梁の曲げ試験の抵抗挙動と強度を予測する。埼玉大学 では、炭素繊維とガラス繊維を含む複合材料積層板を組み合わせてI形断面梁を設計し、その曲げ試験を実施した が、その抵抗挙動は破壊まで線形で靭性が少ない、そのため、解析的な簡便な平均化手法による構成モデルでも数 値的に追跡が可能であり、数値解析によって、破壊の原因となる因子メカニズムを特定し、複合材料でできた梁の 終局強度特性を明らかにしたい。

2. 解析手法

森・田中理論では,複合材料の平均弾性係数は次式で計算される.

ここに f は介在物の体積比率で, $C_{\rm M}$, $C_{\rm I}$ はそれぞれ母材, 介在物の 弾性係数, S は母材のポアソン比と介在物の半径比によってその向きで 決まる Eshelby のテンソルである.本研究では,まず森・田中理論より 得られる CFRP, GFRP それぞれの複合材料の平均材料定数が,実験²⁵⁰ に用いられた平均材料定数と一致するように,母材 (不飽和ポリエステ ル) と介在物 (繊維) のそれぞれの弾性係数,ポアソン比,介在物の体積 比率,半径比を現実的な範囲内で適当に選定する.

3. 解析モデル

埼玉大学の曲げ試験では図1に示すようなI型断面の梁が用いられ,¹ ウェブ部はGFRPの積層材料であり,上下フランジ部はGFRPと CFRPからなる複合積層材料である.フランジ部のCFRPの積層比 率を55%,35%,15%に変化させた3パターン(それぞれモデルA,B, C と呼ぶ)の供試体を用いそれぞれ曲げ試験を行った.本研究ではこの 実験を対象として,要素分割を行い載荷した.材料定数としてCFRP には, $E_m = 3300(MPa), \nu_m = 0.18, E_i = 250 \times 10^3(MPa), \nu_i =$ 0.3, 介在物率fr = 0.446を用いて平均材料定数を算定する.値は表1に 示すとおりである. 表-1 平均材料定数

	E_{11}	E_{22}	ν_{12}	ν_{21}	G_{23}	G_{31}	G_{12}
CFRP(本研究)	113100	7400	0.248	0.016	2958	3536	3536
CFRP(埼玉)	113000	7400	0.328	0.021	3200	3500	3500
GFRP(本研究)	15000	15000	0.28	0.28	5859	5859	5859
GFRP(埼玉)	24000	24000	0.28	0.28	3500	3500	3500



図−1 4 点曲げ試験モデル



図−2 荷重−変位関係

4. 解析結果

図2に示したのはCFRPの積層比率が異なる3つのモデルにおける荷重一変位関係を実験値と解析値でそれぞ れプロットしたものである.実験値と解析値では若干のズレはあるが,概ね梁の剛性については再現できている. そこで各モデルにおいて実験の破壊点に対応すると思われる点(図2のa,b,c1~c3)に着目し,破壊を引き起こ す要因を探してみる.実験では,破壊時にはスパン中央で上フランジの層間の剥離とウェブ上部の局部座屈が観 察されている.そこで解析モデルの上フランジ部のCFRP積層材とGFPR積層材の層間に微小厚さの要素を境 界層として挿入し,そこでの応力を層間の応力とみなし数値解析を行った.図3,図4に示すのがスパン中央部 (y=1000~2000)における層間応力 σ_{xx}, σ_{yy} (他の応力成分はほとんど零(ゼロ))である. σ_{xx}, σ_{yy} ともにそれぞ れの注目した載荷段階で共通の値をとることはなく,層間剥離が層間に生じる応力によって発生するというメカ ニズムを数値的に解明できていない.また図5,図6はスパン中央部の断面での断面高さ方向と応力 σ_{xx}, σ_{yy} (他の応力成分はほとんど零(ゼロ))の関係をプロットしたものであるが,これらからも注目したそれぞれの載荷段階 における,ウェブやフランジでのGFRPおよびCFRP積層材料が受け持つ応力に共通した関係性は現れておら ず,実験で観測された層間剥離や局部座屈の発生メカニズムは特定できず,梁の終局強度を予測するに至っていない。



図-5 スパン中央断面における応力分布 σ_{xx}



100

50

5. おわりに

上にも述べたように,現段階では曲げを受ける複合積層材料の梁の破壊メカニズムの解明に至っていない.また図2に示されるように梁の剛性はCFRPの積層比率が増加するにつれ大きくなるのに対して,耐力に関しては CFRPの積層比率が中間である供試体(Model-B)が最も大きいことが興味深く,実験での3つの供試体の破壊形 式はすべて同一ではなく,それぞれ,あるいは1つが違った破壊メカニズムによるものである可能性も高い.今後,これらの破壊メカニズムを明らかにし,複合積層材料梁の終局挙動を予測する為,更なる研究を続けたい. 参考文献

1) 川田忠樹: 複合構造橋梁, 技報堂出版, 1994.

2) 土木学会 複合構造委員会 新材料による複合技術小委員会: 複合構造技術の最先端,社団法人 土木学会,1984.