

らせん積層構造を有する CFRP 長方形板の曲げ変形挙動の有限要素解析

北海道大学 学生員 ○佐野凌希
北海道大学 正会員 松本高志

1. はじめに

炭素繊維強化プラスチック (Carbon fiber Reinforced Plastics, 以下, CFRP)は、軽量でありながら高強度、高剛性、耐腐食性に優れているという特徴を有する。しかしながら、破壊時の挙動が脆性的であり、最大荷重後の急激な荷重降下と局所的な破壊が生じる。一方で、生体を模倣したらせん積層による長方形板の変形・破壊挙動の検討が行われてきた。らせん積層 CFRP は特徴的な破壊形態を示し、最大荷重後の荷重降下が小さく、脆性破壊が軽減されることが確認されている¹⁾。また、現在までにらせん積層の曲げ変形機構を明らかにするために画像解析による検討が行われている^{2),3)}。

本研究では、CFRP の異方性を考慮した積層板のモデルを構築し、有限要素解析を用いてらせん積層 CFRP の曲げ変形挙動を明らかにすることを目的としている。有限要素解析と実験の比較により、解析の妥当性を検討する。

2. 有限要素解析

曲げ荷重下のらせん積層 CFRP の基本的な変形挙動を把握するため、有限要素解析ソフト MSC/Marc により線形弾性解析を行い、実験結果と比較する。

2.1 解析モデル

本研究では、直交積層 (CP) とらせん積層 (SH9) の2種類の積層構成について解析を行った。解析モデルは既往の研究で行われた四点曲げ載荷実験に基づいて作成した。解析モデルは全て 3D ソリッド要素を用いてモデル化した。解析モデルと境界条件を図-1 に示す。

板の全体座標系を X-Y-Z とし、X, Y, Z をそれぞれ、梁軸方向、板厚方向、梁軸直角方向とする。表-1 に解析モデルの積層構成と寸法を示す。積層構成の[]内の数字は梁軸方向に対する配向角度、下付き文字は[]内の積層を繰り返した回数を示す。

2.2 材料特性

支持板と CFRP の材料特性を表-2 に示す。支持板は等方性弾性体としてモデル化し、CFRP は異方性弾性体としてモデル化している。添え字 1, 2, 3 はそれぞれ梁

表-1 積層構成

名称	積層構成	寸法(mm)
CP	[0/90] ₂₀ /0	180×4.7×40
SH9	[0/90/18/27/36/45/54/63/72/81/90/99/108/117/126/135/144/153/162/171] ₂ /0	180×5.0×40

表-2 材料特性値

	材料特性	単位	
CFRP	E_1	MPa	128000
	E_2		7900
	E_3		7900
	G_{12}		3700
	G_{23}		4500
	G_{13}		3580
	ν_{12}		0.33
	ν_{23}		0.32
	ν_{13}		0.25
支持板	E	MPa	200000
	ν		0.3

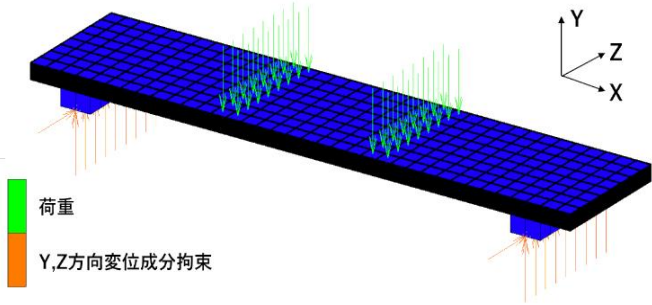


図-1 解析モデル

軸方向、梁軸直角方向、板厚方向を示す。なお CFRP の材料特性は単層板の材料特性であり、材料試験により、面内に関する 4 つの工学的弾性定数 (E_1 , E_2 , G_{12} , ν_{12}) は既に得られている。残りの面外に関する工学的弾性定数は既往の研究⁴⁾を参考に仮定した。

本解析では、配向角ごとに角度 θ における材料特性を与えている。

3. 解析結果

3.1 荷重－変位曲線

図-2 に、四点曲げ載荷実験と本解析の載荷点における荷重変位曲線を示す。解析による結果は、実験で記録された最大荷重時までを示している。

CP の実験における最大荷重は 5.45kN, 最大荷重時変位は 11.46mm であるのに対して本解析における最大荷重時変位は 10.84mm であり、実験値に対する誤差は 5.4%程度となっている。一方, SH9 の実験における最大荷重は 3.71kN, 最大荷重時変位は 8.84mm であるのに対して、本解析における最大荷重時変位は 8.40mm であり、実験値に対する誤差は 5.0%程度となっている。

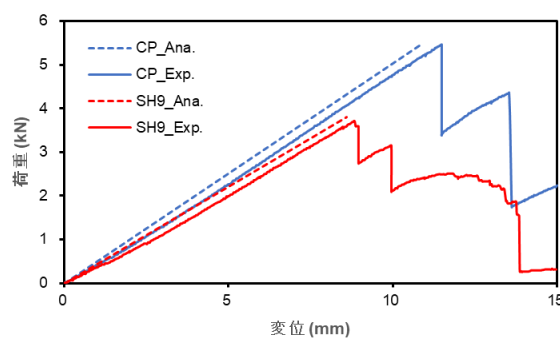


図-2 荷重変位曲線

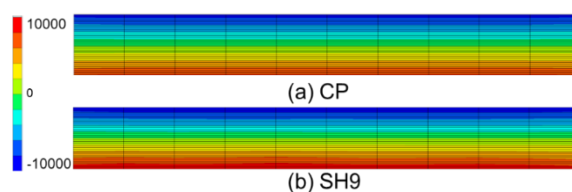


図-3 X 軸方向直ひずみ分布

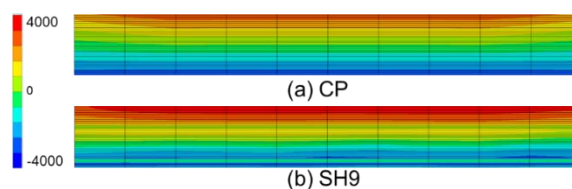


図-4 Y 軸方向直ひずみ分布

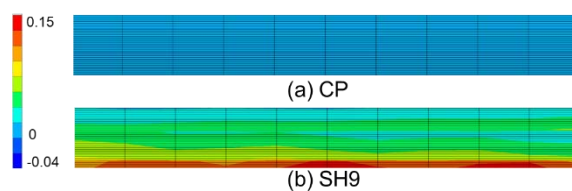


図-5 Z 軸方向変位分布

3.2 X 軸方向直ひずみ分布

図-3 に変位 8mm 時点での曲げ支間における X 軸方向直ひずみ分布を示す。どちらの積層構成でも板上縁で圧縮ひずみが最大、板下縁で引張ひずみが最大となることが確認でき、中立軸は中央付近に位置している。CP では最大圧縮ひずみが約 -9000μ 、最大引張ひずみが約 9000μ であることに對し、SH9 では最大圧縮ひずみが約 -9000μ 、最大引張ひずみが約 10000μ となった。

3.3 Y 軸方向直ひずみ分布

図-4 に変位 8mm 時点での曲げ支間における Y 軸方向直ひずみ分布を示す。どちらの積層構成でも板上縁で引張ひずみが最大、板下縁で圧縮ひずみが最大となることが確認できる。CP では最大圧縮ひずみが約 -3100μ 、最大引張ひずみが約 3100μ であることに對し、SH9 では最大圧縮ひずみが約 -4400μ 、最大引張ひずみが約 3900μ となった。

3.4 Z 軸方向変位分布

図-5 に変位 8mm 時点での曲げ支間における Z 軸方向変位分布を示す。CP では変位がほとんど生じていないのに対し、SH9 では板上縁で変位がほとんど生じていないが、板下縁に近づくにつれ奥側方向に変位が大きくなり、板下縁で約 0.15mm の変位が生じた。

4. まとめ

本研究では、CP と SH9 の 2 種類の長方形板を対象として、有限要素解析を行った結果より以下のことが確認できた。

本解析では、実験、画像解析と概ね一致する変位と分布の傾向を得られた。また、Z 軸方向変位において、CP では変位がほとんど生じていないのに対し、SH9 では変位が生じており、面外変形が確認された。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 21H01411 (基盤研究 (B)、生体模倣らせん積層 CFRP による構造部材の変形・耐荷挙動の研究) の助成で実施された。ここに謝意を示す。

参考文献

- 1) 在家頌一, 細目貴之, 松本高志: らせん積層 CFRP の曲げ特性に関する実験, 第 72 号土木学会北海道支部論文報告集, A-15, 2016.
- 2) 遠藤祐希, 鄧朋儒, 松本高志: DIC 解析によるらせん積層構造を有する CFRP の曲げ変形挙動の検討, 第 78 号土木学会北海道支部論文報告集, A-03, 2022.
- 3) 関口拓哉, 松本高志: らせん積層 CFRP 長方形板の曲げ挙動の三次元 DIC 解析, 第 79 号土木学会北海道支部論文報告集, A-09, 2023.
- 4) S. Sankaer Reddy, C. Yuvaraj, K. Prahlada Rao: Design, Analysis, Fabrication and Testing of CFRP with CNF Composite Cylinder for Space Applications, International Journal of composite material, 102-128, 2015.