

7.1 複合材料設計支援エキスパートシステムの開発 (2)

—FRP船外板設計エキスパートシステム—

田中雅夫* 西川 孝* 浜口純一* 林 茂雄** 増田峰知

* 三重県工業技術センター

** 三重県窯業試験場

1 はじめに

複合材料の設計は、基材（マトリックス樹脂、強化材）の選定や強化材の形態（一方向材、マト材、クロス材）、構成比率（含有率）、配置（積層角、積層順序）を決定することであるが、複合材料の構成要素の組み合わせが無数に存在すること、更には異方性理論など高分子系複合材料固有の理論が必要なことから、その設計に当たっては高度な専門知識を必要とする。従って、複合材料の高度な専門家ではなくても一般の技術者が、容易に複合材料の力学解析や材料設計を専門家（エキスパート）と同程度に実行できるシステムを開発することは大いに意義がある。そこで、複合材料の設計を支援するためのシステムを開発した^{1) 2)}。

このシステムは基本設計システムと応用設計システムの2つのシステムから構成されており、基本設計システムでは積層パラメータ法とAI法 (Artificial Intelligence) を用いて、一方向材による強化繊維の選定、積層角の積層順序の決定などの基本的な複合材料の設計がシミュレーションできる。応用設計システムはFRP 製品の設計を支援するシステムであり、ここではFRP の代表的な応用例の一つであるFRP 船を取り上げ、その外板設計エキスパートシステムについて報告する。

FRP 船の外板設計においては、使用するガラス繊維基材の種類によって多数の組合せが存在し、それぞれの積層構成により外板の力学的特性などが大きく変化するため、最適な積層構成を決定することは困難を要する。そこで、外板の積層設計を効率的に支援するシステムを開発した。

2 FRP 船外板設計エキスパートシステムの概要

本システムのフローチャートを図1に示す。

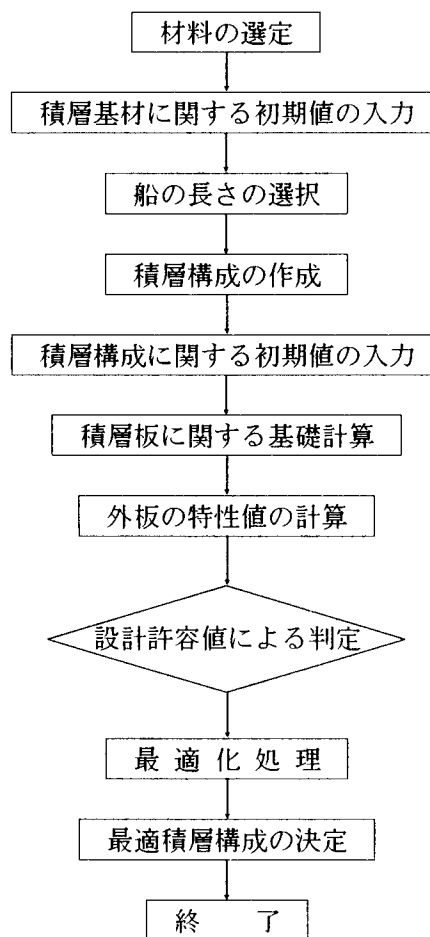


図1 FRP船外板設計のフローチャート

その概要は、まず積層組合せに関する知識ルールを用いて組合せ数の絞り込みを行い、外板に要求される力学的許容値を満たす組合せに対して重量、価格、力学的特性を総合的に考慮して最適な積層構成を決定する。最適化処理にはファジィ積分による評価法を用いた。なお、システムはPC-9800シリーズおよびその互換機で動作する。

2.1 材料の選定

外板に使用する材料は、ガラス基材として2種類のチョップドストランドマット (M450、M600：日本硝子繊維)と2種類のロービングクロス(R580、R810：日本硝子繊維)を、マトリックス樹脂としてオルソフタル酸系不飽和ポリエステル樹脂 (ポリマール8285:武田薬品工業)を用いた。その積層基材の主な物性値を表1に示す。

2.3 外板の特性値の計算

2.2のルールにより組合せされた積層板について、ポアソン比、引張弾性率、曲げ弾性率、引張強度、曲げ強度、ガラス基材所要量、マット換算値、ロービング比、重量、価格を計算する。主な特性値の計算式を次に示す³⁾。

表1 積層基材の物性値

物性値		積層基材		M1 (M450)		M2 (M600)		R1 (R580)		R2 (R810)	
		X方向	Y方向	X方向	Y方向	X方向	Y方向	X方向	Y方向		
繊維含有率	vol%	16.5		15.7		35.6		35.6			
	wt%	29.8		28.6		54.3		54.0			
密度 (g/cm ³)		1.43		1.42		1.69		1.69			
引張強さ (kgf ² /mm ²)		8.0	7.0	7.3	6.1	31.0	30.5	34.0	28.5		
引張弾性率 (kgf ² /mm ²)		920	890	850	860	1950	1900	2000	1750		
曲げ強さ (kgf ² /mm ²)		15.3	15.0	15.2	14.2	45.0	47.0	52.0	45.0		
曲げ弾性率 (kgf ² /mm ²)		910	900	920	860	1300	1260	1300	1200		
ポアソン比*		0.310	0.310	0.311	0.311	0.119	0.119	0.119	0.119		
圧縮弾性率 (kgf ² /mm ²)		980	940	1030	920	2130	2020	2130	2020		
圧縮強さ (kgf ² /mm ²)		26.1	25.5	27.3	24.7	26.5	28.5	26.5	28.5		
板厚 (mm)		3.17		2.96		3.16		3.16			
重さ (g/m ²)		4526		4194		4273		4500			
価格 (円/m ²)		2250		2100		2960		3150			
積層数 (ply)		3		2		4		3			

*: 理論値

2.2 積層構成の組合せ

積層構成の組合せ数Nは、積層数をn plyとすると $N=4^n$ となり、莫大な数になる。そこで、次に示す積層組合せに関するルールを適用することにより組合せ数の絞り込みを行う。

◎ ルール1

外板の外表面、内表面にロービングクロス (以下Rで示す) を用いない。

◎ ルール2

接着性の考慮より、R-Rの積層構成は除外する。

◎ ルール3

Rは出来るだけ応力の高い部分に使用する。

◎ ルール4

対称積層構成とする。

2.3.1 引張弾性率

外板のX方向、Y方向の引張弾性率は次式より計算する。

$$E_x = \sum_{m=1}^N K_v^{(m)} t_m - \frac{(\sum v_v^{(m)} K_v^{(m)} t_m)^2}{\sum K_v^{(m)} t_m} \quad (1)$$

$$E_y = \sum_{m=1}^N K_v^{(m)} t_m - \frac{(\sum v_v^{(m)} K_v^{(m)} t_m)^2}{\sum K_v^{(m)} t_m} \quad (2)$$

$$\text{ここで } K_v^{(m)} = \frac{E_v^{(m)}}{1 - v_v^{(m)} v_v^{(m)}}$$

$$K_v^{(m)} = \frac{E_v^{(m)}}{1 - v_v^{(m)} v_v^{(m)}}$$

$E_v^{(m)}$: 第m層目の積層基材のX方向の引張弾性率
 $E_v^{(m)}$: 第m層目の積層基材のY方向の引張弾性率
 $\nu_v^{(m)}$: 第m層目の積層基材のX方向のポアソン比
 $\nu_v^{(m)}$: 第m層目の積層基材のY方向のポアソン比
 t_m : 第m層目の積層基材の全板厚に対する板厚比

2.3.2 曲げ弾性率

外板のX方向、Y方向の曲げ弾性率は次式より計算する。

$$E_v = \frac{1}{h^3} [E_{v1}h_1^3 + \dots + E_{vm}(h_m^3 - h_{m-1}^3) + \dots + E_{vN}(h_N^3 - h_{N-1}^3)] \quad (3)$$

$$E_v = \frac{1}{h^3} [E_{v1}h_1^3 + \dots + E_{vm}(h_m^3 - h_{m-1}^3) + \dots + E_{vN}(h_N^3 - h_{N-1}^3)] \quad (4)$$

ここで t_m : 1層目からm層目までの板厚

2.3.3 引張強度

積層理論により各層における応力配分率を求め、最大応力説から破損応力を計算する。いま、第m層のX方向の引張応力の配分率は次式で表すことができる。

$$\frac{\sigma_v^{(m)}}{\sigma} = \frac{K_v^{(m)} - \nu_v K_{vv}^{(m)}}{E_v} \quad (5)$$

ここで E_v : 外板のX方向の弾性率

ν_v : 外板のX方向のポアソン比

従って、第m層の積層基材のX方向の引張強度を $F_v^{(m)}$ とすると、

$$\sigma_v^{(m)} = F_v^{(m)} \quad (m=1 \sim N)$$

となり、これを式(5)に代入すると、第m層の応力値 σ が計算できる。こうしてすべての層について計算し、応力配分による各層の応力値を計算する。そして、その最小の応力を初期破損応力とし、その時の層を初期破損層とする。次に、初期破損した層の弾性率を0として、初期破損と同様にして、各層の応力配分による応力値 σ を計算し、その最小の応力を第2破損応力とする。こうして、第N

破損応力まで計算し、初期破損応力から第N破損応力における最大値を積層板のX方向の引張強度とする。同様に、Y方向の引張強度も計算できる。計算のフローチャートを図2に示す。

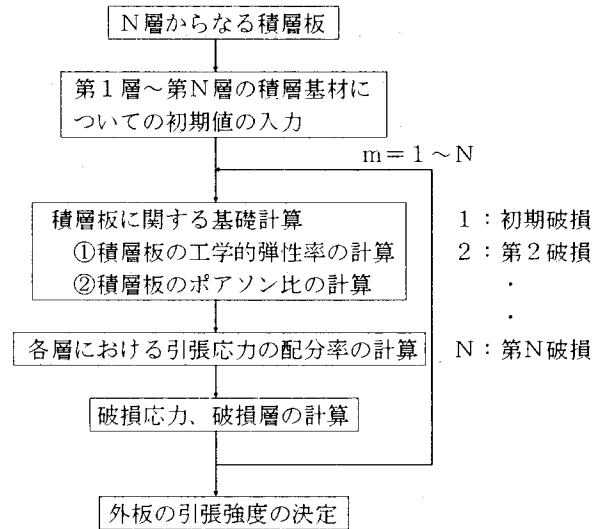


図2 外板の引張強度計算フローチャート

2.3.4 曲げ強度

初期破損による外板のX方向の曲げ強度 σ は、次式より計算する。

$$\sigma_v = \frac{E_v}{E_{out}} \sigma_{out} \quad (6)$$

ここで、 E_{out} : 最外層積層基材の圧縮弾性率

σ_{out} : 最外層積層基材の圧縮強度

E_v : 外板の曲げ弾性率 (X方向)

同様にしてY方向の曲げ強度も計算できる。

2.3.5 ポアソン比

外板のX方向、Y方向のポアソン比は次式より計算する。

$$\nu_v = \frac{\sum \nu_v^{(m)} K_v t_m}{\sum K_v^{(m)} t_m} \quad (7)$$

$$\nu_v = \frac{E_v}{E_v} \nu_v \quad (8)$$

2.4 最適化処理

設計値（マット換算値、板厚、力学的許容値）を満足する積層組合せの中から、重量、価格、力学的特性を考慮して最適な積層構成を決定する。ここでは、ファジィ理論を応用した⁽¹⁾⁽⁵⁾ファジィ測度とファジィ積分を用いて最適化を行った。

いま、ある積層構成を評価するにあたり、価格、重量、力学的特性などのいくつかの評価項目 $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ を設定する。この評価項目を設計者がどの程度重視するかという重視度をファジィ測度 $g(\cdot)$ で表し、ある評価項目 X_i にたいする積層構成の望ましさの程度を $h(X_i)$ とすると、その積層構成の評価値 μ は次式のようにファジィ積分により求めることができる。

$$\begin{aligned} \mu &= f h(X_i) g(\cdot) = \text{Sup}_{I \subseteq I \subseteq n} \{h(X_i) \wedge g(X_i)\} \\ &= \max_{I \subseteq I \subseteq n} \left(\min_{v \in X_i} h(x_i) \wedge g(X_i) \right) \end{aligned}$$

以上より、各積層構成の評価値 μ を求め、それが最大となる積層構成を外板の最適積層構成とする。そのフローチャートを図3に示す。

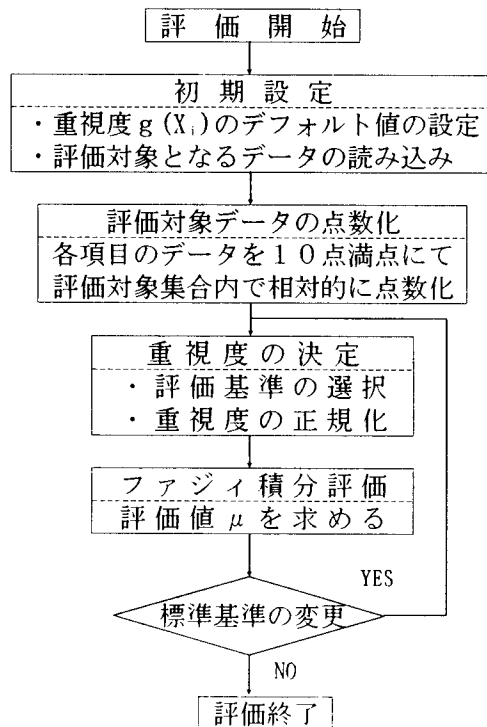


図3 ファジィ積分による最適化システムのフローチャート

3 解析結果

システムの実行例として、船の長さが12m以上15m未満、15以上20m未満、20以上35m未満の3つ場合における外板の設計を取り上げた。「ロイド規則」によればFRP 船外板の部材寸法は積層品1㎡に使用するマット換算のガラス基材重量によって表示され、船の長さによってマット換算値は決まっている。ここでは、設計基準をマット換算値とし、力学的許容値は次の値とし、

- 引張弾性率： 700 kgf/mm² 以上
- 引張強度： 10 kgf/mm² 以上
- 曲げ弾性率： 700 kgf/mm² 以上
- 曲げ強度： 15 kgf/mm² 以上

価格を重視する場合について最適化を実行した。

その結果を表2に示す。同様にして、重量、力学的特性を重視する場合についても最適な積層構成が得られる。

表2 外板の最適積層構成

船の長さ	マット積算値* (g/㎡)	積層構成
35m未満20m以上	7650～5500	M1R2M1R1M1R2M1
20m未満15m以上	5500～4800	M1R2M1M1R2M1
15m未満12m以上	4800～4350	M1R2M1R2M1

*：「ロイド規則」によるマット換算値
M1, M2：チョップドストランドマットM450、M600
R1, R2：ロービングクロスR580、R810

また、本システムでは板厚を基準とした設計も可能であり、外板の板厚を入力することにより最適な積層構成が決定される。

一方、最適化処理にかける積層組合せ数が500以上存在する場合は、更に、積層構成組合せルール（ルール5）を追加し組合せ数の絞り込みを行う。

◎ルール5

チョップドストランドマットおよびロービングクロスにおいてそれぞれ同種類の積層基材にする。（R1-R2、M1-M2の組合せは除外する）

4 ま と め

FRP 船の外板設計において、価格、重量、力学的特性を総合的に考慮した最適な積層構成を決定するためのシステムを開発することができた。このシステムでは自動選択と手動入力を選択が可能で、自動選択は設計条件を入力するだけで最適な積層構成を決定することができ、大幅な設計期間の短縮と効率化が図られる。また、手動入力では、任意の積層構成を入力することにより外板の特性値を求めることができ、設計計画案の検討などに活用できる。更に、本システムでは、有限要素法も付属してあり外板の応力解析、ひずみ解析、破壊解析が可能である。また、最適化処理に用いたファジィ積分による評価法は価格、重量、力学的特性などを総合的に考慮して最適な積層構成を決定する最適化問題に適用することができる。このように評価項目は厳密に数量化することも、それらの重視度が設計者の主観により決定されるような「あいまいさ」が存在する場合の最適化に適していると考えられる。

本研究の遂行にあたり、ご指導を頂いた三重大学 横山敦士助教授 に、また、ガラス織物に関する技術資料を提供して頂いた日本硝子繊維 (株) 中川恒文主席技師に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 田中他、三重県工技セ研報、No.17 (1993)
- 2) 新技術共同研究事業完了報告書 (H 6)
- 3) 強化プラスチック協会、“ハイブリッドFRP積層板の力学特性に関する研究報告書”(1984)
- 4) 寺野、浅居、菅野、“ファジィシステム入門”(1987)オーム社
- 5) 奥田徹示、Memoirs of Osaka Institute of Technology, Series:A, Vol.25, No.2 (1981)