思考型有限要素法による複合材料設計 (その2 強度, 重量, 価格を考慮した場合)[†]

座古 勝* 辻上 哲也*

Design of Composite Materials by Using Intelligent Finite-Element Method (Part 2 In Consideration of Strength, Weight and Cost)

by

Masaru ZAKO* and Tetsuya TSUJIKAMI*

A personal computer program by using the intelligent finite-element method has been developed in order to analyze the construction and stacking sequence of laminate by which some design objectives can be satisfied. In this paper, the strength, weight and cost of laminate were selected as the design objectives.

As the examples of its application, the kind of lamina and the stacking sequence were analyzed for a laminated plate under the conditions of bending load and combination of bending and tension loads. As there are many possible laminate constructions by which the design objectives could be satisfied, it is difficult to determine uniquely the construction of laminate. So, a method for selecting a suitable laminate construction was also proposed. As a result, it is recognized that the optimum laminate construction for each of these conditions can be determined by the proposed method.

Key words: Composite materials, Reinforced plastic, Laminated construction, Finite-Element method, Optimum design, Failure, Weight, Cost

1 緒 言

コンピュータの計算処理時間の高速化のため、従来とは異なった解析手法が実施できるようになり、現在、計算力学の分野における複雑な力学的問題の解析や新たな解析手法の開発研究が行われている。^{1),2)} パーソナルコンピュータ(以下パソコンとする)においても、その大容量化や高速処理化のため、固有振動数解析および変動荷重下での変位等の時系列変化状態をアニメーション化することも可能となっている。³⁾ また、大型コンピュータと連動させた解析結果表示方法の工夫を凝らした研究も多い。⁴⁾ 構造解析分野においては、有限要素法が主流であるが、複合材料構造物の解析にも盛んに利用されている。我々も、以前からパソコンを用いた有限要素法による複合材料用応力解析システムを開発し、設計に対するその有用性を立証してきた。^{5),6)} 複合材料設計では構造設計と材料設計が可能であるため、⁷⁾ その設計パラメータの多様性から最適設計手法の研究や有限要素法による構造設計を基にした複合材料の最適設計支援システムの構築が行われているが、その最適値を見い出すには、非常に困難な材料であるとも言

える。

複合材料構造物では、製作はカーボンやガラス繊維等の異種材料の積層、その構造解析は有限要素法で実施されることが多いが、複合材料設計にとって最も重要な積層順序の決定は設計者の判断にゆだねられているのが現状である。そこで、この現状を鑑み、応力解析から積層構造最適化を求める手法についてのプログラム開発を行った。この手法は、応力解析を実施し、その応力状態を考慮しながら最適材料を思考選択し、設計目標値を満足する構造を決定するものである。本論文ではこのようなことからこの手法を思考型有限要素法とした。¹⁰⁾ 第1報は、強度のみを考慮した場合の最適層構成を求めたもので、他の要因(重量, 価格等)については考慮されてなかった。それ故、本論文では、強度, 重量, 価格を考慮した場合の積層構成の決定法について記述する。

2 思考型有限要素法プログラム化手法

有限要素法により実際の用途を想定した構造物の変形ならびに応力解析を実施しながら、その結果を基に材料選択を行い、材料構成、積層順序等の最適値をコ

[†] 本報を「思考型有限要素法による複合材料設計(第2報)」(強度, 重量, 価格を考慮した場合, II)とする。また、前報は材料40巻450号303頁(1991年)に掲載済である。

原稿受理 平成3年5月30日 Received May 30, 1991

* 正 会 員 大阪大学工学部生産加工工学科 〒565 吹田市山田丘, Welding & Production Eng., Osaka Univ., Yamadaoka, Suita, 565

Fig. 1. Flow chart of computer program.

コンピュータに思考させる思考型有限要素法を構築すれば、エキスパート的役割となり複合材料構造設計にとって非常に有用な手法となる。思考型有限要素法は、解析結果に基づき、材料データベース中から各層の材料を選択し、設計目標値を満足する材料構成を思考し、決定する手法である。そのフローチャートを Fig. 1 に示す。

本論文では、強度、重量、価格の3変量を設計目標値とし、その目標値を満足する材料構成の決定を行った。材料選択は、各層ごとの最大破壊パラメータ（以下、F 値とする）を算出し、あらかじめデータとして入力した設計目標値（設計許容値）とを比較することにより行う。F 値は、式 (1) に示す Tsai-Wu¹¹⁾ の破壊則により算出する。

$$F = F_1\sigma_L + F_2\sigma_T + F_{11}\sigma_L^2 + F_{22}\sigma_T^2 + F_{66}\tau_{LT}^2 + 2F_{12}\sigma_L\sigma_T \quad (1)$$

ここで各項の係数をつぎに示す。

$$F_1 = \frac{1}{F_{Lt}} - \frac{1}{F_{Lc}}, \quad F_2 = \frac{1}{F_{Tt}} - \frac{1}{F_{Tc}}$$

$$F_{11} = \frac{1}{F_{Lt}F_{Lc}}, \quad F_{22} = \frac{1}{F_{Tt}F_{Tc}}$$

$$F_{66} = \frac{1}{F_{LT}^2}, \quad F_{12} = F_{12}^* \sqrt{F_{11}F_{22}}, \quad -1 < F_{12}^* < 1$$

F_{Lt} , F_{Tt} はそれぞれ強化繊維方向と繊維に直角方向の引張強さ、 F_{Lc} , F_{Tc} はそれぞれの方向の圧縮強さ、 F_{LT} はせん断強さを示す。

各層の材料選択は、設計許容値以上の F 値、すな

わち強度不足になる層が存在する場合と設計許容値以下の F 値、すなわち強度余裕があり過ぎる場合に分けて行う。設計許容値以上の F 値が存在する場合は、強度不足なので高強度の材料を選択交換し、最大 F 値が設計許容値以下になるまで繰返し計算を行う。最大 F 値が設計許容値以下の場合は、強度余裕があり過ぎるので低強度の材料を選択交換し、F 値が設計許容値に近づくように繰返し計算を行う。計算ループの打ち切りは、材料データ中に選定すべき材料が存在しなくなった時点とした。材料選択アルゴリズムのフローチャートを Fig. 2 に示す。

しかし、このような解析のみでは許容値以下になる材料構成が種々存在し、どの構成が最適値であるかを決定することは不可能である。また、それらの結果は初期材料条件（初期設定材料構成）によって異なることが予想される。そこで、初期材料条件を種々変化させ、設計許容値を満足する組み合わせを求めた中から

Fig. 2. Flow chart for method of material selection.

Fig. 3. Concept of relation between each design object.

Table I. Specification of proposed computer program.

Program		Element	
Two-dimensional <ul style="list-style-type: none">• Plane stress• Plane strain		Triangle element	
Solver	Max. number of elements	Max. number of nodes	
Skyline method	1200	800	
Hardware			
Personal computer NEC PC-98 series			
Memory capacity 640 KB			
With numerical date processor			
O. S.		Program language	
MS-DOS		MS-C	

強度以外の因子を加味することにより最適積層構成を決定する手法を提案する。Fig. 3 は、強度、重量、価格の3変量を設計目標とし、その目標値を満足する材料構成の決定を行うためのそれぞれの関係の概念図で、薄墨部は各一定変量で切り出したものである。

なお、Table I に開発したプログラム仕様を示す。

3 解析結果

解析は、各層の板厚が等しい積層板モデルにおいて、曲げ荷重のみを受ける場合と曲げと引張りの2軸荷重を受ける場合の2通りについて行った。また、いずれの解析においても設計許容値は便宜上 $F=0.5$ とした。材料は最も一般的な E-glass, Kevlar, T-300, Boron, Urethane の5種類から選択するものとした。その材料物性値を Table II に示す。

3・1 曲げ荷重のみを受ける場合

Fig. 4 に積層板モデルを示す。積層板は各層同じ板厚の10層とし、両端支持のほり中央部3点に分布荷重 392 N を負荷した。要素数は200、節点数は121である。なお、解析における初期材料条件は、各層が同

Fig. 4. Mesh model of laminated plate with multi-layer under bending condition.

Fig. 5. Relation between F value and number of iterations in case of E-glass as the initial material under bending condition.

一材料であるとした。

材料の破壊は F 値によって決定されるので、最も好ましいのは材料選定が行われた後の各層間における F 値が均一化することである。そこで、各層における F 値の推移を調査するため、各層の最大 F 値の分布を計算した。Fig. 5, Fig. 6 は、初期設定材料をそれぞれ E-glass, T-300 とした場合における計算の繰返しに伴う F 値の最大と平均の推移を示したものである。繰返しに伴いそれぞれの F 値が設計許容値に近

Table II. Mechanical properties of materials.

Materials		E-glass	Kevlar	T-300	Boron	Urethane
Properties	E_L	45000.0	76000.0	132000.0	274000.0	392.0
	E_T	12000.0	5500.0	10300.0	15000.0	392.0
Poisson's ratio	ν_{LT}	0.250	0.340	0.250	0.025	0.400
	ν_{TL}	0.067	0.025	0.020	0.014	0.400
Ultimate tensile strength	σ_{Lt}	1000.0	1380.0	1240.0	1310.0	19.6
	σ_{Tt}	28.0	28.0	45.0	34.0	19.6
Ultimate shear strength	τ_{LTs}	40.0	55.0	62.0	100.0	19.6
Ultimate compressive strength	σ_{Lc}	550.0	280.0	830.0	2480.0	19.6
	σ_{Tc}	140.0	140.0	140.0	310.0	19.6
Weight (g/mm ³)		0.00194	0.0013	0.00147	0.00186	0.0001
Cost (¥/g)		2.0	40.0	50.0	50.0	0.05

• Matrix : Epoxy
• $V_f=0.6$

Unit : Mpa

Fig. 6. Relation between F value and number of iterations in case of T-300 as the initial material under bending condition.

Fig. 8. Relation between F value and cost for E-glass and T-300 under bending condition.

Fig. 7. Relation between F value and weight for E-glass and T-300 under bending condition.

Fig. 9. Relation between cost and weight for E-glass and T-300 under bending condition.

づく様子が分かる。また、これらの結果から、設計許容値を満足する ($F < 0.5$) 材料構成が種々存在し、一意的に最適構成が決定できないことが分かる。そこで、強度と構造物の重量、価格を考慮して材料構成を決定する。

Fig. 7, 8, 9 は、それぞれの初期設定材料に対する F 値と重量、F 値と価格、重量と価格の関係を示す。価格と重量は単位厚さ当たりの値を示す。図中の矢印は、繰返し計算の方向を示す。Fig. 10 は、F 値と重量と価格の関係を 3 次元的に図示したものである。

3・2 曲げと引張を受ける場合

Fig. 11 に積層板モデルを示す。積層板は、各層同じ板厚の 10 層とし、両端支持のほり中央部 3 点に分布荷重 392 N とはりの両端に分布荷重 196 N を負荷した。なお、解析における初期材料条件は、各層が同一材料であるとした。

Fig. 12, 13 は、3・1 節と同様に初期設定材料をそ

Fig. 10. Relation between F value, weight and cost for E-glass and T-300 under bending condition.

れぞれ E-glass, T-300 とした場合における計算の繰返しにともなう F 値の最大、平均の推移を示したものである。

Fig. 14, 15, 16 は、それぞれの初期設定材料に対する F 値と重量、F 値と価格、重量と価格の関係を示す。価格と重量は単位厚さ当たりの値を示す。図中の

Fig. 11. Mesh model of laminated plate with multi-layer under bending and tensile condition.

Fig. 12. Relation between F value and number of iterations in case of E-glass as the initial material under bending and tensile condition.

Fig. 13. Relation between F value and number of iterations in case of T-300 as the initial material under bending and tensile condition.

矢印は、繰返し計算の方向を示す。Fig. 17 は、F 値と重量と価格の関係を 3 次元的に図示したものである。

4 最適材料構成の決定手法

設計目標値を満足する最終的な材料構成は、種々の初期設定材料により解析された F 値、重量、価格の関係から式 (2) により決定できる。すなわち、最適材料は、式 (2) を満足する材料構成となる。

$$\begin{aligned} S_{\min} = & \text{Min. } f(\alpha \cdot F \text{ value} + \beta \cdot \text{weight} \\ & + \gamma \cdot \text{cost}) \end{aligned} \quad (2)$$

Fig. 14. Relation between F value and weight for E-glass and T-300 under bending and tensile condition.

Fig. 15. Relation between F value and cost for E-glass and T-300 under bending and tensile condition.

Fig. 16. Relation between cost and weight for E-glass and T-300 under bending and tensile condition.

Table III. Determined laminate construction under bending condition for the each coefficient.

α (for F value)	β (for weight)	γ (for cost)	Determined laminate construction under bending condition
1.0	1.0	1.0	G/G/G/G/G/G/G/G/G/G
1.0	2.0	1.0	G/G/G/G/G/G/G/G/G/G
1.0	3.0	1.0	B/G/G/K/U/K/U/U/U/C
1.0	4.0	1.0	B/G/G/K/U/K/U/U/U/C
0.0	1.0	1.0	B/G/G/K/U/K/U/U/U/C
0.0	2.0	1.0	B/G/G/K/U/K/U/U/U/C

Table IV. Determined laminate construction under bending and tensile condition for the each coefficient.

α (for F value)	β (for weight)	γ (for cost)	Determined laminate construction under tensile and bending condition
1.0	1.0	1.0	G/G/G/G/G/G/G/G/G/G
1.0	2.0	1.0	G/G/G/G/G/G/G/G/G/G
1.0	3.0	1.0	G/G/G/G/G/G/G/G/G/G
1.0	4.0	1.0	B/G/G/G/K/G/U/U/K/G
0.0	1.0	1.0	B/G/G/G/G/G/G/U/U/K/K B/G/G/G/K/G/U/U/K/G
0.0	2.0	1.0	B/G/G/G/K/G/U/U/K/K

○: E-glass
●: T-300

Fig. 17. Relation between F value, weight and cost for E-glass and T-300 under bending and tensile condition.

ここで、F value, weight, cost は、それぞれの変数を最大値を 1 として正規化した値で、 α , β , γ はそれぞれの変数に対する重みを表す。

Table III は曲げのみを受ける場合、Table IV は曲げと引張りを受ける場合において、重みの変化による最終的材料構成決定状態を示す。ここで、G: E-glass, K: Kevlar, C: T-300, B: Boron, U: Urethane を示し、材料構成は下層から順に示したものである。このように、各変数の重みを考慮することにより材料構成が決定できる。

5 結 言

本論文では、設計目標値として、強度、重量、価格を考慮し、設計許容値を満足する種々の材料構成の中

から最適材料構成を決定する手法について記述した。その手法の応用例として、曲げ荷重を受ける積層板の最適積層構成を各設計目標値に重みをもたせて決定した。従来の手法と比較して、複合材料設計に対してより汎用性をもたせることができたと考える。

本プログラムにより 2 次元解析による積層板の設計が可能となったが、GFRP や CFRP 等の方向性材料で積層材を設計する場合、各層の最適繊維配向角を決定するには 3 次元解析が必要となる。従来のパソコンでは容量が小さいため、異方性 3 次元解析が不可能であったが、現在、大容量のパソコンが開発されているので、3 次元解析も可能となってきている。した

がって、本手法を 3 次元 FEM に適用すれば、上述のような積層構成も決定できると考える。今後、そのプログラムを開発する予定である。

(平成 3 年 3 月 19 日 第 20 回 FRP シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) 上田 顯, “コンピュータシミュレーション” (1990) 朝倉書店
- 2) 中谷彰宏, 北川 浩, 第 3 回計算力学講演会講演論文集, p. 83 (1990).
- 3) 松本金矢, 鈴木浩平, 材料力学講演会講演論文集, p. 200 (1990).
- 4) 三好俊郎, 日本機械学会誌, **92**, 31 (1989).
- 5) 座古 勝, 材料, **38**, 319 (1989).
- 6) 座古 勝, 辻上哲也, 材料, **39**, 242 (1990).
- 7) 三木光範, 材料, **40**, 308 (1991).
- 8) R. N. Hadcock, Design, Fabrication and Mech. of Composite Struc.” (1985).
- 9) S. J. Hardy and N. H. Malik, “Confence on Design in Composite Mat.”, p. 49 (1989).
- 10) 座古 勝, 辻上哲也, 材料, **40**, 303 (1991).
- 11) S. W. Tsai and E. M. Wu, J. Composite Mat., **5**, 58 (1971).