

複合材料積層板の強度・剛性複数目標最適設計への オブジェクト指向アプローチ*

轟 章^{*1}, 笹田 直伸^{*2}

Object-Oriented Approach for Multi-Objective Optimum Design on Strength and Stiffness of Composite Laminates

Akira TODOROKI and Naonobu SASADA

A system for designing the stacking sequence of a laminated plate by using an object-oriented programming system was presented in this paper. In this system, not only stiffness of a laminated plate but also its strength was considered simultaneously based on a normalized objective function for optimization. The system uses two optimization methods. One is called the sequential decision process and the other the branch and bound process. These two methods were tested and compared. As a result, the sequential decision process was found to be excellent for an actual design process. However, large variation of the stacking number with small variation of applied load was observed in the sequential decision process. To avoid this, a new approach was proposed and shown to be excellent.

Key Words: Expert System, Optimum Design, Composite Material, Object-Oriented Programming System

1. 緒言

一方向長繊維強化プラスチック積層板（以下積層板と略記）は航空宇宙機器、車両などに適用されているが、力学的異方性が著しいため、積層板の特徴を活用するには積層構成の材料設計が必要不可欠である。この材料設計に関して、既に三木ら⁽¹⁾、⁽²⁾やFukunaga⁽³⁾らおよびT. Y. Kamら⁽⁴⁾の研究が報告されている。これらの研究では積層パラメータを用いており、実機的设计製作現場では、積層構成に選択可能な繊維配向角が限定され、また繊維配向組合せにもはく離などを避けるための経験的な知識が適用されているため、これらの手法では対応できない場合がある。また、Tsai⁽⁵⁾、薄⁽⁶⁾、K. P. Paoら⁽⁷⁾はランキング法に基づく最適化を提案しているが、負荷応力の設計過程における変動に対する設計繰返しなどの場合にランキング作成に手間がかかること、積層構成がある程度限定されたものを対象としていることなどの検討すべき課題もある。このため、設計製作の現場になじむ新設計手法が望まれている。そこで、著者らの一部は前報で、積層板の剛性設計に関して、オブジェクト指向言語SmallTalk上に積層構成設計支援のオブジェクト指

向エキスパートシステムを構築した⁽⁸⁾。本研究では、このエキスパートシステムを拡張し、積層板およびサンドイッチ積層板における剛性と強度の2種の設計目標の最適化を支援するシステムを構築し、その有効性を示した。

また、実機的设计では積層の内側から逐次最急降下法で決定する逐次決定法が設計時間が少なく実用的であることを既に前報⁽⁸⁾で示した。本研究では、この方法で実機の積層構成を設計する際の基本概念を示し、設計時の問題点である設計条件の微小変化に対する設計結果への影響を調査し、解決策としての新たな設計手法を提案した。

2. 剛性・強度最適化の設計手法

本研究の積層板およびサンドイッチ積層板の最適化支援エキスパートシステムの基本部分は前報で既に報告したシステム⁽⁸⁾と同様なので、ここでは省略し、概要および変更点だけを述べる。なお、本システムには以下の基本的知識が組み込まれている。

(1) 積層板は対象積層とする。

(2) セン断一引張カップリングを消去するため、繊維配向角 θ (0° 、 90° 以外の層)の層数(+ θ と $-\theta$ の層数)をバランスさせる

(3) 繊維配向角は 0° 、 $\pm 15^\circ$ 、 $\pm 30^\circ$ 、 $\pm 45^\circ$ 、 $\pm 60^\circ$ 、 $\pm 75^\circ$ 、 90° の中から任意の数だけ選択可能である(ただし+ θ を選択するとシステムでは自動的に $-\theta$

* 原稿受付 平成6年6月9日。

*¹ 正員、東京工業大学 (〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)。

*² 北海道電力(株) (〒045-02 北海道古宇郡泊村大字堀株村726)。

が選択される)。

2. 1 目的関数 本研究では前報と同様に、負荷によるひずみを要求値以下にすることで剛性を考えた。これは、積層板の寸法を与えれば、変位を目標として設計することに他ならない。剛性設計の目的関数に用いる危険度は、負荷によるひずみ ϵ_i (または曲率: κ_i) と設計上の要求ひずみ r_i (曲率: k_i) の比 R であり、この全ての値が1以下の最小積層数を求めることが本研究における剛性最適化である。

$$R_i = \epsilon_i / r_i \quad (1)$$

ここで、 i はFRP積層板の面内荷重、曲げ、ねじり荷重の各負荷方位であり、曲げおよびねじりの場合には ϵ_i 、 r_i は曲率 κ_i 、 k_i に置き換える。

強度設計では、全ての層で破壊則での判定が非破壊の最小積層数を求めることを本研究の強度最適化とした。本システムでは、破壊則として最大応力則、最大ひずみ則、Tsai-Wu則、Azzi-Tsai-Hill則の4種が適用可能である。最大応力則および最大ひずみ則では、目的関数に用いる危険度 D はそれぞれ次式となる。

$$D_{jk} = \sigma_{jk} / S_{jk} \quad (\text{最大応力}) \quad (2)$$

$$D_{jk} = \epsilon_{jk} / s_{jk} \quad (\text{最大ひずみ}) \quad (3)$$

ここで、 j は層番号、 k は面内繊維方位を基準にした座標系であり、繊維方向引張 (lt)、繊維方向圧縮 (lc)、繊維直角方向引張 (tt)、繊維直角方向圧縮 (tc)、せん断 (lts) のいずれかを表す。また、 S_{jk} は破壊応力であり、 s_{jk} は破壊ひずみを表す。

2次形式の破壊則 (Tsai-Wu, Azzi-Tsai-Hill) では、各層内の応力を各方位に比例倍した時にちょうど破壊則で破壊が判定される応力に達する時の比例定数 d_j (j は層番号) の逆数を危険度 D とする。

$$f(d_j \cdot \sigma_j) = 1 \quad (4)$$

$$D_j = 1/d_j \quad (5)$$

ここで、 $f()=1$ は2次形式の破壊則である。

これらの剛性設計の危険度 R と強度設計の危険度 D はそれぞれ規準化されており、無次元数なので、単純に和を求めることが可能である。そこで、剛性、強度の両者を同時に設計目標にして最適化する (設計条件を満足する最小積層数を求める) 場合には、単純に両者を足し合わせたものを複数目標最適化の目的関数とする。

本システムでは、前報 (8) と同様に、逐次決定法と分岐限定法の2種の最適解探索法を用いており、それぞれの方法での目的関数の詳細は後述する。

2. 2 逐次決定法 積層板の逐次決定法のアルゴリズムは前報と同じである。つまり、設計条件を全て

満足するまで、一層ずつ目的関数で最適と判定される層を追加積層する (ただし、積層構成の経験的知識によって積層可能な層だけが選択される)。したがって、この方法では一層先の最適化だけが実施されている。

また、目的関数は複数の設計目標の成分、積層数ごとの成分などがあり、最適化には目的関数の最大値だけを最小化するよりも、目的関数最大値以外の成分も含めて最小化することを考慮した。さらに、既に設計要求が満足された成分 (危険度が1以下) を考慮しないようにするため、逐次決定法の実際の危険度 R_R 、 D_R は次式を用いた。

$$R_{inp} = \sum_i \{ \max(0, |R_i| - 1) \}^2 \quad i=11, 12, 13 \quad (6)$$

$$R_{ben} = \sum_i \{ \max(0, |R_i| - 1) \}^2 \quad i=21, 22, 23 \quad (7)$$

$$D_R = \sum_j \sum_k \{ \max(0, |D_{jk}| - 1) \}^2 \quad j, k \text{は前述の通り} \quad (8)$$

ここで、11, 12, 13はそれぞれ面内の縦荷重、横荷重、せん断荷重方位であり、21, 22, 23はそれぞれ縦面の曲げ、横面の曲げ、ねじりである。ただし、積層構成の外側は面外剛性に著しく影響するので、剛性設計部分だけは面内危険度 R_{inp} と面外危険度 R_{ben} を分割し、付録で述べる重み付けを行なった。また、積層構成は、積層板の引張-せん断カップリングを防ぐため、アングルプライをバランスさせる必要がある。このため、 θ 層が選択された場合には、 $-\theta$ 層が選択されやすいように重み付けした。これらの詳細は付録で述べる。

サンドイッチ積層板の最適化システムは、通常の積層板とほぼ同様だが、以下の点で異なる。

(1) 設計ユーザーが指定したサンドイッチ積層板厚さで設計を行い、その指定した厚さは不変である。

(2) 最初に全てをコアとして、外側から順に複合材料に置換する。つまり、設計は内側に向かって行われ、設計が進展するにつれてコア厚さが減少する。

(3) あらかじめ予備設計として擬似等方性積層板で設計し、目標積層板厚さ以内で積層板が製作不可能と予測される場合には、最適設計前に警告を発生する。全てを積層板に置換しても目標を達成できない場合には、エラーとなり、ユーザーである設計者は再度サンドイッチ積層板の厚さを入力する。

2. 3 分岐限定法 積層板の分岐限定法のアルゴリズムは前報と同様である。以下に簡単にその詳細を述べ、追加点を示す。この方法では、可能な全ての積層構成の組み合わせを目的関数で評価する。初めに逐次決定法で得られた最適解を暫定解として、スーパープライを用いて積層構成の選択枝の枝刈りを行う。この

ため、全選択枝を検討する方法に比較して高速で真の最適解が得られるが、逐次決定法に比較すると著しく長い設計時間が必要とされるという欠点を有し、実用性という観点からは劣る。

スーパープライは積層構成探索時の枝刈りに用いる架空の最強層である。このスーパープライは、剛性の観点からは全ての方に繊維方向の弾性係数を有し、さらに強度は無限に大きいという特性を有している。このように剛性および強度の両観点から最強の特性を有している。したがって、探索途中でまだ探索していない部分の層をすべてこのスーパープライに置換しても、目的関数で評価される値が暫定解よりも劣る場合には、それより先の解を探索する必要がないことが明確となるので、枝刈りが可能となる。

サンドイッチ積層板の分岐限定法は積層板の場合とほぼ同じであるが、逐次決定法で述べたように、サンドイッチ積層板では厚さを指定し、外側から積層板に置換していく（コア厚さが減少する）。

2.4 オブジェクト指向表現 オブジェクト指向言語Smalltalkでは問題解決に必要な情報構造をクラス階層で表現する。本研究では複合材料設計に必要な知識、解析方法をオブジェクトのクラス階層に分類整理した。設計システムは、積層板を模擬したモデルオブジェクトと、設計作業を実施する設計オブジェクトに大別できる。前者は積層板を表現するクラスCompositePlateのインスタンス、積層板を構成する層のクラスPlyのインスタンスに分類される。また設計オブジェクトは、クラスCompositeDesignのインスタンスが設計全体の流れを指示する。CompositeDesignのインスタンスは、インスタンス変数の配列変数 designObjects に個々の設計対象に関する目的関数を解析するクラスDesignForStrain, DesignForMaximumStress, DesignForMaximumStrain, DesignForTsaiWu, DesignForAzziTsaiHillのそれぞれのインスタンスの中で設計ユーザーによって選択されたインスタンスが収納される。したがって、設計対象を変更、追加する場合は、これらの解析オブジェクトのインスタンスを追加、削除することで容易に実施できる。また別のインスタンス変数 designMethod 中に設計方法を指示するクラスDesignWithSDP（積層板の逐次決定法）のインスタンス、DesignWithBBP（積層板の分岐限定法）のインスタンス、DesignWithSDPForSandwich（サンドイッチ積層板の逐次決定法）のインスタンス、DesignWithBBPForSandwich（サンドイッチ積層板の

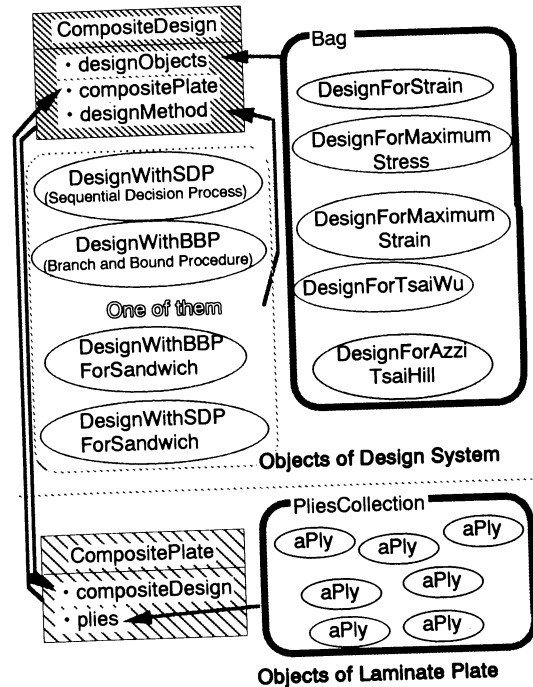


図1 オブジェクト間の通信

分岐限定法)のインスタンスのいずれかが収納される。つまりこれらのクラスのインスタンスの入れ替えによって設計手法をも容易に変更可能である。このオブジェクトのネットワークを図1に示す。なおユーザーインターフェースは、前報と同様に、グラフィカルウインドウ中のアイコンをユーザーが選択するユーザーフレンドリーなものを使用した。詳細は前報と同様であるのでここでは略す。

3. 強度最適設計の設計結果

逐次決定法、分岐限定法による強度設計結果の1例を以下に示す。

使用した計算機環境は Macintosh II si - 68882 (SmallTalk R.4)。設計に用いた複合材料は T300/5208でありコア材にアルミハニカムを用いた。材料定数を表1に示す。

表1 T300/5208の材料特性

Modulus	E _l (GPa)	E _t (GPa)	G _{12s} (GPa)		v
		181	10.3	7.17	
Strength (MPa)	S _{1t}	S _{1c}	S _{12s}	S _{12c}	S _{2c}
	1500	68	246	1500	40
ρ _{comp} = 1579kg/m ³			ρ _{alumi} = 16.0kg/m ³		

E_l: Longitudinal modulus
 E_t: Transverse modulus
 S_{1t}, S_{1c}, S_{12s}, S_{12c}, S_{2c}: Strength of composite
 G_{12s}: Shear modulus
 v: Major Poisson ratio

a) 積層板の設計結果

設計条件は以下に示す通りである。ただし、1方位は0°方位である。

負荷外力（単位幅当たり、以下同様）：

$$(N_1, N_2, N_6) = (500, 100, 0) \text{ kN/m,}$$

$$(M_1, M_2, M_6) = (500, 100, 0) \text{ N-m/m}$$

設計要求ひずみ：

$$(r_1, r_2, r_6) = (0.02, 0.02, 0.02)$$

$$(k_1, k_2, k_6) = (5, 5, 5)$$

ここで N_1, N_2, N_6 はそれぞれ横軸、縦軸、せん断の単位幅当りの面内負荷荷重、 M_1, M_2, M_6 は横軸、縦軸、ねじりの曲げモーメント、 r_1, r_2, r_6 は横軸、縦軸、せん断の要求ひずみ、 k_1, k_2, k_6 は横軸、縦軸、ねじりの要求曲率である。設計対象は強度、ひずみである。破壊則には最大ひずみ則を用いた。設計結果を表2に示す。

表2 設計結果

	Stacking Sequence	Time
(A)	[-45/0/30/0/-45/0/45/45/0/30]s	00:02:53
(B)	[0/30/0/-30/-45/-30/0/45/30]s	00:51:05
(C)	[(-45/0/45/90) ₃]s	

設計例 (A) は逐次決定法による設計、(B) は分岐限定法による設計で、最適解である。また (C) は比較のため疑似等方性の積層板で設計を行った場合の結果である。それぞれの積層数は20, 18, 32となっており、(A), (B) の最適化手法が有効であると判断できる。(B) の設計時間は (A) の約18倍である。これは曲げに比較して面内荷重の効果が大きく、スーパープライが有効に作用しないために探索枝数が約650も存在するためである。逆に分岐限定法の得意とする場合は、曲げ荷重が支配的で異方的な設計条件であり、この場合には設計時間が逐次決定法と比較してせいぜい2倍程度に削減される。

次にサンドイッチ積層板の設計例を示す。

負荷外力：

$$(N_1, N_2, N_6) = (500, 200, 0) \text{ kN/m,}$$

$$(M_1, M_2, M_6) = (10, 4, 0) \text{ kN-m/m}$$

設計対象は強度だけとし、破壊則には最大ひずみ則を用いた。設計結果を表3に示す。

表2と同様に(A)は逐次決定法、(B)は分岐限定法、(C)は疑似等方性での結果である。また(A')は選択可能な配向角を{0°, ±45°, 90°}に限定して逐次決定法で設計した結果である。

この場合、逐次決定法(A)では分岐限定法の約1/12

表3 設計結果(サンドイッチ積層板)

	Stacking Sequence	Time
(A)	[-30/-45/0/45/30/0/-30/0/30/30/0/-30]s	00:01:33
(A')	[-45/0/45/0/0/45/0/-45]s	00:00:23
(B)	[45/0/-45/-45/0/45/0]s	00:18:55
(C)	[(-45/0/45/90) ₃]s	

の時間で設計しているが、総積層数が24層であり、分岐限定法の1.7倍に増加している。これは逐次決定法では層を増加させながらアングルプライθの数をバランスさせるため、選択可能なアングルプライが多い場合にはθ層数をバランスさせるための積層数を多くしてしまうからである。このため選択できるアングルプライを制限して設計した(A')では、総積層数が16層に減少した設計結果が得られている。

4. 逐次決定法における感度解析

4.1 設計結果に及ぼす破壊則の影響

前述の逐次決定法は適合解を求めるため、設計時間が極めて短く実用的な手法である。本システムを用いて、複合材料構造物を設計する場合には、繰返し計算が必要である。例えば以下のように実施する。

- (1) 構造物のFEMモデルを作成する。
- (2) FEMモデルを疑似等方性もしくは弱い異方性として応力、モーメント分布を求める。
- (3) 求めた応力分布を用いて上記の積層構成設計システムを用い積層設計を行う。
- (4) この積層構成での剛性特性でFEMモデルの応力、モーメント分布を用いる。
- (5) 上記(3), (4)を積層設計が各要素で収束するまで繰り返す。

ただし、この手法では、各層ごとに積層構成が異なり、現実的ではない。全体での積層構成のバランスは応力解析システムが必要であり、今後の課題である。

この手法を用いた場合、図2に模式的に示すように微小な設計条件（負荷荷重）の変化に対し、設計結果（積層構成）が過敏に変化する場合には、構造物全体で積層構成は収束せず、重大な問題となる。そこで破壊則が設計結果の変動に与える影響を積層板、およびサンドイッチ積層板について検討し、さらに設計結果の変動を抑制する新設計手法の検討を行った。

4.2. 解析方法及び結果

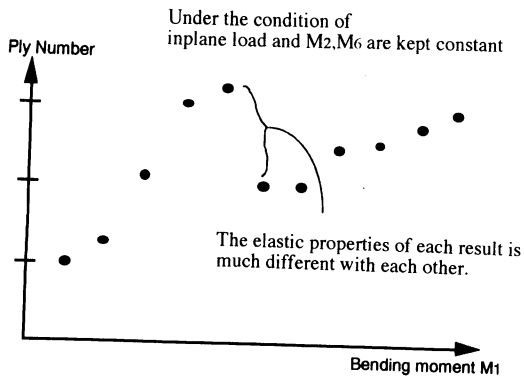


図2 設計結果の変動例

まず基本的性質を調べるため、荷重条件を簡略化した。実構造物では荷重条件 ($N_1, N_2, N_6, M_1, M_2, M_6$) が複雑に変化するが、本研究ではこのうち1つだけを約1%ずつ変化させ、他は一定に保持し、設計した。各種の荷重条件で解析した結果、ねじりモーメント M_6 を変動させた場合だけ、特異な結果得られた。ここではその結果だけを示す。

荷重条件を $N_1=100, N_2=200, N_6=300$ (kN/m), $M_1=100, M_2=200$ (N-m/m) として、ねじりモーメントを $50 < M_6 < 300$ の範囲で変化させた。その結果の中で、最大ひずみ則を用いた場合を図3に、Azzi-Tsai-Hill則を用いた場合を図4にそれぞれ示す。ここで設

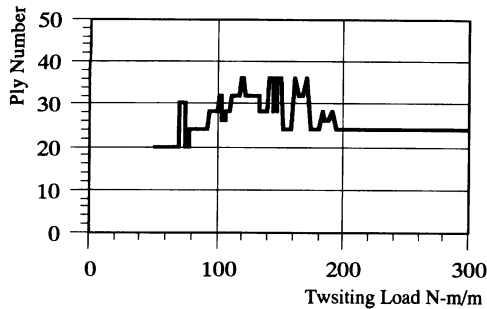


図3 変動例 (最大ひずみ則)

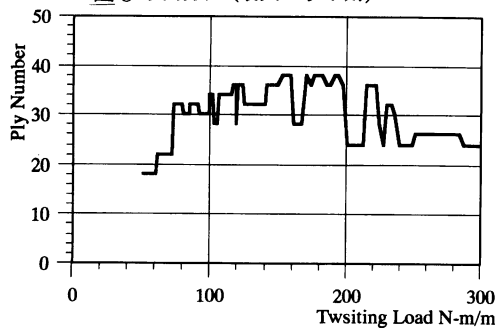


図4 変動例 (Azzi-Tsai-Hill則)

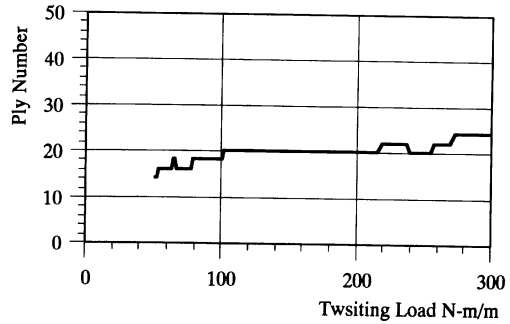


図5 変動例 (ねじり負荷のみ-最大ひずみ則)

計は積層板の逐次決定法を用いている (以下同様)。破壊則として最大応力則、Tsai-Wu則を用いて、設計結果の変化を調べた結果も同様に支配荷重が変化する100~200 (N-m/m) 付近で激しく積層数が増加した。このことから、この変動現象は破壊則には無関係であると判断できる。

設計条件としてねじりモーメント以外を0にし、積層数を調べたものを図5に示す。図3、4のような変動は観測されない。このことから積層決定を支配する負荷の支配荷重が曲げからねじりなどに変化する場合に積層設計結果の激しい変動が生じることがわかる。

図3、4と同条件で分岐限定法を用いて設計を行なった結果を図6に示す。逐次決定法に見られた激しい積層数の変動は全く認められない。つまり分岐限定法で求められる最適解では変動を生じないことがわかる。この結果から、この激しい積層数の変動は、逐次決定法における、1層先だけの最適化では容易にローカルミニマムに捕われてしまうことを意味している。しかし分岐限定法は設計時間が逐次決定法の約2~1000倍 (20層程度の積層板の場合) も必要であり、構造物の設計のような繰り返し計算の課程で用いるのは非現実的であるため、逐次決定法に立脚した新手法が必要である。

最大応力則を用いて同様の解析をサンドイッチ積層

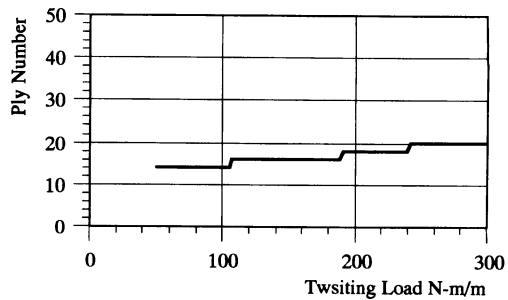


図6 変動例 6 (最大ひずみ則-BBP)

板について行ったものを図7に示す。破壊則は最大ひずみ則で、設計条件は以下に示す通りである。

$$N_1=100, N_2=200, N_6=300 \text{ (kN/m)},$$

$$M_1=10, M_2=20, 5 < M_6 < 30 \text{ (kN-m/m)}$$

サンドイッチ積層板では小さな変動しか認められない。これは、サンドイッチ積層板の設計が外側から行なえるため、総積層数が少なく、最適解に近いことが原因と考えられる。

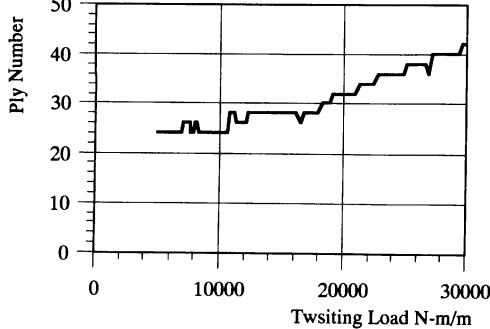


図7 変動例 (50 < M6 < 30000 - サンドイッチ積層板)

以上のことから、支配的荷重が変化する荷重条件、特にねじりモーメントが支配的荷重条件の場合に激しい変動を生じる。これを避ける新設計手法の検討が必要であることが明らかになった。サンドイッチ積層板の結果から、荷重の変化に対し、積層数の外側だけが変わる場合には、変動が小さいことがわかる。そこでこれを利用した以下の新設計手法を提案した。

- ① 複合材構造を応力解析のために要素分割した構造データで、各要素に負荷される種々の荷重の大きさが最小の荷重状態の要素を最初に設計し、順次隣接する要素の設計を行なう。
- ② 1つ1つの要素の設計は逐次決定法を用いる。
- ③ 直前に設計した積層板を次の積層板を設計する際の初期層に用いる。

図3、4と同条件でこの新設計手法で設計を行なっ

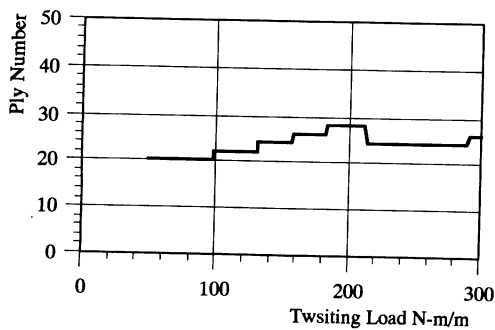


図8 新設計手法の結果 (最大ひずみ則)

た結果を図8に示す。ただし、ここではメッシュ分割せず、変化させる荷重の最小値の積層結果を初期層として荷重増加に伴い最適化を実施した。支配的荷重が変化する付近でも激しい変動は認められず、この設計手法が逐次決定法に有効であることが分かる。

6. 結 言

以上、積層板、サンドイッチ積層板の剛性・強度最適化エキスパートシステムの検討を行なった。得られた結果を要約すると以下のとおりである

- (1) 逐次決定法、分岐限定法を積層板、サンドイッチ積層板の剛性・強度2つの設計目標に同時適用しその有効性を示した。
- (2) 逐次決定法での設計条件の微小変化に対する設計結果の変動を解析し、ねじり荷重が負荷される場合破壊則に無関係に激しい積層数の変動が認められることを示した。
- (3) 逐次決定法での積層数の変動を抑制する新設計手法を提案し、その有効性を示した。

謝 辞

本研究を遂行するに際し、同志社大学工学部三木光範教授の貴重なご助言をいただいた。ここに謝意を表する。

文 献

- (1) 三木, 機械の研究, 41, 7(1989), 83
- (2) 三木, 杉山, 桜井, 材料, 40, 450 (1991), 308
- (3) H. Fukunaga and T. W. Chou, J. of Comp. Mater., 22 (1988), 1156.
- (4) T. Y. Kam and J. A. Snyman, Composite Structures, 19(1991), 351.
- (5) S. W. Tsai, Composites Design, 4th ed. (1988), Sec. 14. 14-1.
- (6) 薄, 機論, A, 55-516, (1989)1892.
- (7) K. P. Rao and J. C. Issac, J. of Reinforced Plastics and Comp., 10, (1991)447.
- (8) 笹田, 轟, 三木, 機論, 58A-551(1992), 1745.

付 録

目的関数は基本的には、剛性の危険度の式(6), (7)および強度の危険度の式(8)をたし合わせたものとなる。剛性の全危険度 R_0 は以下になる。

$$R_0 = R_{np} + A_b \cdot R_{ben} \quad (\text{付1})$$

ここで、 A_b は曲げの剛性が積層板外側に支配されることを考慮した経験的な重み係数で、次式で表される。

$$A_b = \frac{1}{\exp\left(\frac{0.65N_{in} - N_t}{0.075N_{in}}\right) + 1} \quad (\text{付2})$$

ここで、 N_t は全設計条件を考慮した積層数予測用プレデザイナーによって最適化前に予測された全積層数の半分である。また、 N_{in} は面内負荷だけを考慮してプレデザイナーで予測した時の全積層数の半分である。

目的関数に用いられる危険度 D_0 は、上記(付1)の剛性の全危険度 R_0 と強度の危険度をたし合わせた次式となる。

$$D_0 = D_R + R_0 \quad (\text{付3})$$

目的関数 F は式(付3)に経験的な重みを付けたものであり、次式で表される。

$$F = A_f \cdot D_0 + A_0 \quad (\text{付4})$$

ここで、 A_f は次式で表される。

$$A_f = \exp\left(\frac{f}{3}\right) \quad (\text{付5})$$

$$f = \sum_{\theta} f_{\theta} \times I_{mb} \times f_{sig}(N_1, N_2, 1, 0, N_h) \quad (\text{付6})$$

ここで、 f_{θ} は隣接層の角度が 30° を越えないように考慮するための重み係数であり、 I_{mb} は θ 層と $-\theta$ 層のバランスをとるための重み係数である。 f_{sig} の関数はシグモイド関数を用いて、 θ 層のバランスを緊急に行う必要性を考慮する重み係数である。式(付6)において、 f_{θ} は次式となる。

$$f_{\theta} = f_{io} \left(\left| \theta_{next} - \theta_{pre} \right| \leq 30^\circ \right) \quad (\text{付7})$$

ただし、 θ_{next} は次に積層する層の候補、 θ_{pre} は現在積層中の積層板の一つ前のステップで積層した層(積層板とサンドイッチ積層板で最外層か最内層かが異なる)。また、式(付6)中の N_h は現在既に積層している層の総数の半分である。他の係数は次式となる。

$$I_{mb} = \sum_{k=1}^{N_h} f_{io}(\theta_k = \theta_{next}) - \sum_{k=1}^{N_h} f_{io}(\theta_k = -\theta_{next}) \quad (\text{付8})$$

$$f_{sig}(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) = \frac{x_3 - x_4}{\exp\left(\frac{x_1 - x_5}{x_2}\right)} + x_4 \quad (\text{付9})$$

$$N_1 = 0.4 \cdot N_t \quad (\text{付10})$$

$$N_2 = 0.35 \cdot N_t \quad (\text{付11})$$

式(付7)における関数 f_{io} は次式で表される。

$$f_{io}(\text{boolean}) = \begin{cases} 0 & (\text{boolean} = \text{false}) \\ 1 & (\text{boolean} = \text{true}) \end{cases} \quad (\text{付12})$$

また、式(付4)の A_0 は次式で表される。

$$A_0 = \begin{cases} 2 \cdot I_{mb} & (N_h/N_t > 0.7) \\ f_{sig}(1.5, 0.15, 0, -0.7, \text{Ratio}) & (N_h/N_t > 0.7) \end{cases}$$

・・・(付13)

ただし、 Ratio は負荷の異方性を表す指標であり、次式で表示される。

$$\text{Ratio} = \left(\frac{N_1 + N_2 + N_6}{\max(N_1, N_2, N_6)} + \frac{M_1 + M_2 + M_6}{\max(M_1, M_2, M_6)} \right) / 2$$

・・・(付14)

これらの式中で用いられている定数はすべて経験的に得られたものである。各種の経験的パラメータは乱数で発生させた多数の設計条件に対してほぼ最適化されるように経験的に調整した。このため、逐次決定法では分岐限定法の結果に類似した結果を出力する確率は極めて高いと推察される。ただし、これらのパラメータは最適である保証はなく、これは今後の蓄積に依存する。

なお、前述のプレデザイナーでは、一層の材料物性値が擬似等方性積層板の特性を有するとして簡便に積層数を見積るシステムである。