アラミド/ガラスハイブリッド積層板の衝撃破壊解析[†]

大 上 俊 光* 金 原 勲** 影 山 和 郎**
鈴 木 敏 夫*** 大 沢 勇***

Impact Damage Analysis of Aramid/Glass Hybrid Laminates

by

Toshimitsu OHGAMI*, Isao KIMPARA**, Kazuro KAGEYAMA**

Toshio SUZUKI*** and Isamu OHSAWA***

Various impact characteristics as well as fracture energy can be estimated by using an instrumented impact testing technique. The impact characteristics, such as a load versus deflection curve and maximum load, are used only for comparison among materials, but are seldom used for strength assessment in structural design. The analytical procedure which correlates the simple test data with structural strength under complex boundary conditions has not been established. In the present paper, a numerical method for dynamic strength analysis has been proposed and applied to estimate the multi-axial impact strength of aramid/glass hybrid composite plates.

Dynamic fracture simulation based on the maximum stress criterion was carried out by using a finite element method and the numerical results were compared with the experimental data obtained by an instrumented drop-weight impact testing machine. Seven kinds of hybrid laminates were used for the tests, including roving-cloth reinforced composites, glass mat reinforced composite and mat/roving-cloth reinforced composites. The progressive fracture process under impact loading was well simulated and the numerical results showed close agreement with the experimental data which exhibit brittle fracture. The fracture controlling process of mat/roving-cloth reinforced laminates was also discussed quantitatively based on the present analysis.

Key words : Composite material, Finite element method, Impact, Damage, Fracture, Hybrid, Aramid, Glass, Laminate, Impact test

1 緒 言

計装化された衝撃試験機を用いれば単なる破壊エネルギーだけではなく荷重-変位曲線等, 種々の衝撃特性を得ることができる。^{1)~3)}しかしながらこのようにして得られた衝撃特性も材料間の比較のみに利用され^{4), 5)}設計や強度保証のためのデータとして用いられることは少ないのが現状である。その理由は単純形状の試験片で得られた衝撃データから複雑形状をした複合材料構造の衝撃強度を推定する解析手法が確立していないためと考える。そこで本報では衝撃強度を評価するための解析手法の開発を目的とした研究を行った。すなわち計装化衝撃試験機を用いたFRPハイブリッド積層板の衝撃三点曲げ試験より単層板の衝撃特性を把握し, 次に設計上重要であると考えられる種々の積層構成からなる積層板の多軸衝撃(周辺を拘束あるいは支持した平板に, 平板と垂直方向に落錘を衝突させる荷重方法

で, 荷重点付近では多軸応力状態となることから multi-axial impact と呼ばれている衝撃負荷形態, 面衝撃と呼ばれることもある)について逐次破壊を考慮した動的破壊モデルを提案し有限要素法を用いた破壊シミュレーションを行い, 実験値との比較検討を行った。これより多軸衝撃試験の評価法について考察を加えた。

2 供試材および試験片

2・1 供試材

試験板は Table I に示す積層構成でハンドレイアップ成形した積層板を用いた。強化材はケブラ 49 織物が東レ(株), その他が日本硝子繊維(株)製である。また樹脂は武田薬品工業(株)製のオルソフタル酸系不飽和ポリエステル樹脂である。Table I 中の C, I および G 材はロービングクロス強化材, J 材はガラスマット強化材, E1K, E1G および H1 材はマット/ロービングク

[†] 原稿受理 平成 3 年 5 月 29 日 Received May 29, 1991

* 東陶機器(株) 〒253 茅ヶ崎市本村, TOTO Ltd., Honson, Chigasaki, 253

** 正 会 員 東京大学工学部船舶海洋工学科 〒113 東京都文京区本郷, Dept. of Naval Arch. & Ocean Eng., The Univ. of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113

*** 東京大学工学部船舶海洋工学科 〒113 東京都文京区本郷, Dept. of Naval Arch. & Ocean Eng., The Univ. of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113

Table I. Specifications of laminates tested.⁶⁾

Type of reinforcement	Specimen	Laminates stacking	Thickness (mm)	V_f (%)
Roving-cloth	C	A×4 plies	3.42	37
	I	R×5 plies	3.16	36
	G	(A/G)×5 plies	3.37	41
Glass-mat	J	M×3 plies	3.17	17
Mat/roving-cloth	E1K	M/A/MM/A/M	5.72	23
	E1G	M/R/MM/R/M	5.18	22
	H1	M/(A/G)/MM/(A/G)/M	5.35	24

A: Kevlar 49 roving fabric 458 g/m².R: Glass roving fabric 580 g/m².M: Glass chopped mat 450 g/m².A/G: Kevlar 49/glass roving fabric 538 g/m².

ロス強化材いわゆる MR 構成強化材で、計 7 種類の積層板を用いた。同じく Table I 中の織物 A (ケブラーロービングクロス) と R (ガラスロービングクロス) は縦糸と横糸の密度がほぼ等しいが、A/G はケブラーとガラスの混織平織物で縦糸と横糸の密度は異なっている。これらの織物は縦糸方向 (0°) と横糸方向 (90°) を一致させて積層されたため試験板は直交異方性であり、しかも織物 A と R が構成材である試験板は 0° と 90° 方向の特性がほぼ等しい。またマット強化材は等方性と見なせる。また Table I には同時に試験板の厚さおよび体積含有率を示してある。

2・2 試験片

衝撃三点曲げ試験片は強化材 A, R, A/G および M の単層板を重ねた積層板、すなわちそれぞれ C, I, G および J 材の 4 種類の積層板を用い、幅 10 mm、長さ 90 mm の寸法で繊維方向に切り出し試験片とした。ただし G 材のみ方向性が有るので 0° と 90° を主軸とした 2 種類の試験片を用いた。

多軸衝撃試験板は繊維方向に平行に 150×150 mm に切り出し試験板とした。

3 実験方法

Fig. 1 に衝撃三点曲げ試験および多軸衝撃試験の概略図を示す。衝撃三点曲げ試験では試験片をスパン 60 mm の支持台に乗せ、質量 1 kg、先端半径 5 mm の落錘を高さ $H=900$ mm, 1500 mm から落下させ、曲げ試験荷重を試験片に負荷した。衝突直前の落錘の

初速度はそれぞれ約 4.2 と 5.4 m/sec であった。

また多軸衝撃試験では試験板を、中央に直径 127 mm の円孔をあけた鋼板で上下からボルトで締結し固定させた。質量 4 kg、先端半径 5 mm の落錘を試験板中央部に高さ $H=1250$ mm から落下させ、多軸衝撃荷重を試験板に負荷し貫通させた。衝突直前の落錘の初速度は約 4.6 m/sec であった。

Fig. 2 に示す計装化落錘衝撃試験システムを用い荷重-変位曲線を導出した。落錘に取り付けた加速度計で衝突の加速度を、また衝突直前の初速度を速度センサで計測した。計測された加速度波形を増幅し A/D 変換した後、初速度と共にマイクロコンピュータに保存した。加速度原波形はローパスフィルタを用い、不用な周波数成分を除去し再度保存した。ローパスフィルタのカットオフ周波数は衝撃三点曲げでは 5 kHz、多軸衝撃では 3 kHz に設定した。ローパスフィルタ

Fig. 1. Schematic figure of impact tests.

Fig. 2. Block diagram of instrumented impact test system.

Table II. Mechanical properties of laminas.⁶⁾

Lamina	Moduli of elasticity (GPa) E_L E_T	Poisson's ratio ν_{LT}	Moduli of elasticity in shear (GPa)			Thickness (mm)	Density (g/cm ³)
			G_{LT}	G_{TZ}	G_{ZL}		
A	19.7	0.124	1.96*	1.23*	1.23*	0.855	1.29
R	19.1	0.050	4.81	3.04	3.04	0.632	1.69
A/G	25.2 20.6	0.099	4.81*	3.04*	3.04*	0.674	1.57
M	8.88	0.310	3.39	(3.39)	(3.39)	1.057	1.43

*: Estimated value.

を通した加速度波形を2回積分して変位が、また加速度波形に落錘の質量をかけて荷重が計算され、荷重-変位曲線が導かれる。

4 解析方法

多軸衝撃過程を汎用構造解析プログラム (MARC) を用いて解析した。すなわち試験板を四節点アイソパラメトリック厚肉シェル要素で近似し動的大変形解析を行った。シェル要素は厚さ方向に層を定義し各層の応力、ひずみを計算する。各層の材料特性には Table II の単層板の力学特性の実測値を用い、積層構成を与えて積層板とした。

4・1 解析モデル

原点を試験板中央に取り縦糸方向 (0°) と横糸方向 (90°) に一致させて x, y 軸を設定した。試験板の対称性より 1/4 モデルで Fig. 3 に示す要素分割を行い、

Fig. 3. Breakdown of a finite element model.

Fig. 4. Schematic figure of integration points.

円周上の節点は完全固定とした。落錘から試験板への力の伝達は接触問題として扱った。

落錘は先端が半円球 (半径 5 mm) である剛な円柱であるが、本解析では半径 5 mm の剛な球と仮定しギャップ距離 5 mm の定距離ギャップ要素でモデル化した。ここで接触時の摩擦は考慮しないものとする。

4・2 計算方法

破壊は原点から x, y 軸上を進展するき裂で近似する。すなわち x 軸または y 軸に接する要素について、対象とする層の周方向応力が衝撃三点曲げ強度に達した時破壊したと見なし節点の拘束を解除する方法で破壊の進展を取り扱った。

落錘モデルの中心に集中質量 4 kg を与え、初速度 4.6 m/sec で試験板に衝突後 2.5 msec まで 50 μsec の時間増分で動的大変形破壊シミュレーションを行った。破壊進展の記述には後述するユーザーサブルーチンを利用した。各時間増分ごとに球の中心の加速度、速度および変位が計算され、これから荷重-変位曲線を導出した。

4・3 拘束解除条件 (ユーザーサブルーチン)

各時間増分ごとに行われる節点拘束解除の判定について具体的に説明する。今回用いた厚肉シェル要素では 4 個の積分点で各層ごとの応力、ひずみが計算される。そこで Fig. 4 に示すようにロービング強化材およびマット強化材の場合は、図の黒丸で示す積分点すなわち落錘衝突面と反対側 (引張側) の最外層の周方向応力 σ_x , σ_y が、また MR 構成強化材では黒丸の引張側最外層 (マット層) の積分点または黒三角の積分点すなわち最外層より一つ内側の繊維層の周方向応力がそれぞれの単層板の衝撃三点曲げ強度に達した時破壊したとみなし、その積分点から最も近い節点の拘束を解除した。MR 構成強化材における 2 つの拘束解除条件を以下、マット層破壊、繊維層破壊と略記する。

5 実験および解析結果

5・1 衝撃三点曲げ試験

Fig. 5 に C, I, J および G 材の典型的な応力-変位曲線を示す。I, J 材すなわちガラス繊維強化プラスチック (GFRP) はぜい性的破壊の様相を呈しているのに対し、C 材すなわちアラミド繊維強化プラス

チック (AFRP) は最大荷重後も変形が進行し延性的破壊の様相を呈している。また G 材すなわちアラミドとガラスの混織平織材からなるハイブリッド積層板は両者の中間的な傾向を示している。

Fig. 5. Examples of stress versus deflection curves obtained by three-point flexural impact test

Fig. 6. Three-point flexural impact strength.

Fig. 7. Load-deflection curves of specimen C (Numerical and Experimental).

Fig. 6 に各積層板に対する衝撃三点曲げ強度の結果を示す。平均値も共に記しており、これを多軸衝撃試験解析における破壊判定条件に使用する。

5・2 多軸衝撃試験

5・2・1 ロービングクロス強化材およびマット強化材 C, I, G および J 材における荷重-変位曲線の解析結果を代表的な実験結果と共に Fig. 7~Fig. 10 に示す。また積層板別の最大荷重値について解析と実験結果を比較して Fig. 11 に示す。

荷重-変位曲線において、計算結果の最大変位および C, G 材での最大荷重値には実験値と差があるが、最大荷重値に至るまでの荷重履歴は実験と解析でよい一致を示している。I, J 材の最大荷重値については実験と解析の両者がよく一致している。

また計算値の黒丸は原点の拘束が解除された時点すなわち初期貫通き裂が発生した時点である。貫通き裂

Fig. 8. Load-deflection curves of specimen I (Numerical and Experimental).

Fig. 9. Load-deflection curves of specimen G (Numerical and Experimental).

Fig. 10. Load-deflection curves of specimen J (Numerical and Experimental).

Fig. 11. A comparison of maximum loads between computation and experiment (roving-cloth and mat reinforced composite).

発生後も荷重値が上昇していることがわかる。

5・2・2 MR 構成強化材 Fig. 12~Fig. 14 に E1K, E1G および H1 材における解析結果を代表的な実験結果と共に示す。図の(a)はマット層破壊, (b)は織物層破壊である。5・2・1 項と同様黒丸で貫通き裂が発生し, その後も荷重は上昇する。また Fig. 15 に積層板別最大荷重値の解析と実験結果を示す。E1K 材を除き(a)のマット層破壊判定とした場合, 最大荷重値および最大荷重に至るまでの荷重履歴が解析と実験でよい一致を示した。

6 考 察

6・1 計算方法の有効性

本解析において, 初期貫通き裂が発生しても荷重は上昇し, 最大荷重値が実験におけるそれに一致するか近づいている。衝撃三点曲げ強度を限界強度として最大応力説に基づく逐次破壊解析を行えば多軸衝撃挙動

(a) Mat layer fracture.

(b) Fabric layer fracture.

Fig. 12. Load-deflection curves of specimen E1K.

をよくシミュレーションできることがわかった。これに対し初期貫通き裂が発生した時点で破壊強度を見積ると, このような破壊進展の効果が考慮されないため最大荷重値を実際より低く評価することになる。

6・2 ロービングクロスおよびマット強化材

最大荷重値において, I, J 材すなわち GFRP に関しては解析と実験がよい一致を示すのに対し, C, G 材すなわち AFRP およびアラミド繊維が混入している FRP に関しては解析が実験よりも低い値を示している。この原因は本解析における拘束解除条件に起因するものと考えられる。すなわち本解析で用いた破壊モデルが限界応力に達すると即座に節点の拘束を解除するぜい性的破壊過程に対応するため, ぜい性的破壊挙動を示す GFRP について解析と実験がよい一致を示したものとする。AFRP の延性的破壊挙動を精度良くシミュレーションするためには拘束解除方法を改良する等の修正が必要となろう。

6・3 MR 構成強化材

Fig. 13. Load-deflection curves of specimen E1G.

Fig. 14. Load-deflection curves of specimen H1.

E1G と H1 材の実験および計算結果は内側の強度の高い織物層ではなく、最外層のガラスマット層の強度で全体の破壊が支配されることを示唆している。E1K 材のみ実験の最大荷重値が解析よりも低い値となっているが、E1K 材はアラミドとガラスの異種界面層間を有し本解析では取り扱わなかった層間はく離が顕著に発生したため、上述の結果になったものと思われる。

7 結 言

ハイブリッド積層板における多軸衝撃試験の評価法について、有限要素法を用いた解析と実験を行い以下の結論を得た。

(1) 厚肉シェル要素を用いた動的破壊解析手法を提案した。すなわち衝撃三点曲げ強度を限界応力として最大応力説を適用し、貫通き裂進展をシミュレーションすることにより、多軸衝撃荷重下の複合材料積層板の破壊強度を推定できることを示した。

(2) MR 構成強化材に関しては内部の強度の強い織

Fig. 15. A comparison of maximum loads between computation and experiment (mat/roving-cloth reinforced composite).

物層ではなく最外層のマット層の破壊が全体の破壊を支配することを示唆する知見を得た。

(3) ガラス繊維強化材では計算結果と実験結果は良

い一致を示したが、アラミド繊維強化材およびこれらのハイブリッド強化材では、ガラス強化材と比較して両者の一致は必ずしも十分ではなかった。この問題に関しては、破壊条件、材料の動的変形挙動、破壊過程モデル等に関するより詳細な解析的、実験的検討が今後必要と考える。

(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) 野口祐成, 関岡一信, 第13回複合材料シンポジウム講演要旨集, p. 77 (1988).
- 2) C. W. Knakai and D. R. Ireland, ASTM STP 936, 44 (1987).
- 3) P. J. Cain, ASTM STP 936, 81 (1987).
- 4) M. W. Wardle and G. E. Zahr, ASTM STP 936, 219 (1987).
- 5) L. W. Gause and L. J. Buckley, ASTM STP 936, 248 (1987).
- 6) “舟艇用ケブラー® アラミド/ガラス繊維ハイブリッド積層板の力学的特性と材料設計—静的特性—”, 東京大学, 東レ(株), 日本板硝子(株), 日本硝子繊維(株)共同研究報告 (1988).

書 評

“21世紀への化学”

バイオテクノロジーとマテリアルサイエンス

M. L. ゲッド (監修)

足立吟也, 杉浦幸雄 (共訳)

(1991年, (株)化学同人発行, B 6 判, 194ページ, 2000円)

本書は1987年6月に米国化学会においてバイオテクノロジーとマテリアルサイエンスの進歩に関する特別会議が開催されたことがきっかけで米国化学会より刊行されたものを頭記両氏が完訳したものである。

バイオテクノロジーは、農産物や家畜、医薬品といった人間の生活に欠かせないものを改良していくための遺伝子工学の研究と応用であり、より付加価値の高い物質やプロセスを生み出すことのできる生体系を利用する技術である。また、マテリアルサイエンスは、さまざまな物質の性質、設計、表面の研究を包含する科学である。中でも金属の腐食に関する研究や医薬品および新物質の設計などは経済的にもその関心が特に高い重要な研究対象である。

本書は11章より構成されており、序章を含む各章は米国化学会に籍を置き、それぞれ専門の分野で活躍している科学者らが独立的に執筆されている。

1章から6章まではバイオテクノロジーに関するもので、バイオテクノロジーとは何か、化学と生物学の新しい結びつき、分子生物学のための合成手段、ドラッグデザイン(薬物の創製)、タンパク質を創り出す化学、タンパク工学などがそれぞれ解説されている。

7章から11章まではマテリアルサイエンスに関するもので、マテリアルサイエンスに化学はどのように関わっているか、原子と分子のシミュレーション、先端電子材料、エネルギーと材料(製造、変換、貯蔵)、高強度複合材料などについて、ものを作る化学に関して、化学はどこまでできるのか、今後どこまでできそうかなどが例を挙げてわかりやすく解説されている。

本書の中でとりあげられているトピックスだけが化学ではない。しかしアメリカ経済の危機的状況打開のために化学が何かなしうとすれば、まずこれだという方向が強く反映されている。

本書のもうひとつの特徴は、バイオテクノロジーの分野でもマテリアルサイエンスのフロンティアでもコンピュータが駆使され、研究法においても革命が起きつつあることを指摘している点であろう。たとえば、本書の始めにはDNAほか数種の物質構造のコンピュータグラフィックスが示されているが、きわめて興味深いものである。

(奈良工業高等専門学校 有間 淳一)