研究論文

ガラスマット強化複合材料の 引張り破壊シミュレーション

清水 利弘*, 中島 正貴**, 村上 澄男***, 金川 靖****

(1993年5月27日受付)

Stochastic Simulation of Tensile Damage Process of Glass Mat Reinforced Plastics

T. SHIMIZU,* M. NAKAJIMA,** S. MURAKAMI *** and Y. KANAGAWA****

(Received May 27, 1993)

A method of stochastic simulation of damage and failure process of glass mat reinforced plastics is developed, and applies to examine the relation between the strength dispersion and the damage process. A stochastic model for composites having nonuniform distribution of fracture strength is first developed by the use of finite element method. The fracture strength of each element is specified randomly to follow the normal distribution. Then, the global damage process of the material is analyzed by incorporating this model into a finite element code of anisotropic nonlinear elasticity. The damage and failure process of glass mat reinforced plastics in uniaxial tension is analyzed, and the effects of strength dispersion on inelastic behavior and fracture modes are discussed in detail.

1. 緒 言

複合材料の損傷や破壊は、マトリクスき裂、繊維の切断、マトリクスと繊維のはく離などの欠陥から発生し、成長する。

また、複合材料は一般に繊維とマトリクスとして的高分子材料からなっている。このような材料は高い温度での処理を経ており、これらの状況は場所による破壊強度に顕著な不均一性をもたらすと考えられる。

これらのことに起因する複合材料の破壊の複雑さは、疲労過程においてよくみられる。例えば、疲労寿命の著しいばらつきは、ほとんどの実験においてみられる現象である。また、筆者らの実験ではチョップドストランド

ガラスマット試験片の疲労試験の場合、まったく同じ負荷条件の下で、異なったモードの破壊がみられた¹⁾。

一方、静試験においても、繊維方向に引張り荷重を受ける同一の組成の一方方向強化 CFRP 積層板が、二つの異なった破壊モードを示すことが報告されている²⁾。これらの結果は、材料定数の場所によるばらつきが破壊の様子の違いに重要な役割を担っていることを示唆している。

一方方向強化複合材料における繊維強度のばらつきを考慮した破壊解析は、Rosen³⁾, Zweben⁴⁾ らによってモデルが提唱され、その後、多くの研究者によって理論の改良、展開が行われてきている⁵⁻⁷⁾。しかしながら、これらの解析は、繊維方向に荷重を受ける一方方向強化材についてのもので、材料定数のばらつきは、主に繊維強度に限定されている。複合材料での損傷の進展は損傷力学の枠組みの下でも議論されてきた^{8,9)}。しかしながら、材料定数にばらつきのある短繊維強化複合材料についてのものはほとんどみられない。

この研究では、破壊強度の場所によるばらつきを考慮したガラスマット強化複合材料の破壊シミュレーションを行った。最初に統計的な手法を用いてモデルを開発し、異方性と非線形弾性を考慮した有限要素法に組み入

*,** 豊田工業高等専門学校 (471 豊田市栄生町 2-1)
Toyota College of Technology, 2-1 Eisei-cho, Toyota 471

* 助手 Research Associate, ** 助教授 Assistant Professor

,* 名古屋大学 (464-01 名古屋市中区千種区不老町)

Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-01

*** 教授 Professor, **** 助教授 Assistant Professor

れることによって短冊型試験片の引張り破壊シミュレーションを行った。

2. モデルの構成

2.1 短繊維強化複合材料のモデル

さまざまな種類の欠陥、例えば、繊維とマトリクスの接着不完全、繊維の分布の片寄り、マトリクスの密度の片寄り、あるいは介在物の存在などは、材料の強度の場所によるばらつきを引き起こす。

これらの欠陥を含んだ直方体の要素を Fig.1 に示す。ここで、図に示すように座標系 (x, y, z) をとる。さらに、この要素はガラスマット強化複合材料を想定しているので、 xz 平面内で横等方性を示すとして、 x, y 方向の引張り強度および、 xy 平面内でのせん断強度をそれぞれ、 S_x, S_y, S_{xy} とする。

局所強度 S_x, S_y, S_{xy} は、材料全体で、ランダムな分布をもつと考えられる。例えば、一様でない繊維の強度や繊維の分布、欠陥などは、各要素の強度 S_x, S_y, S_{xy} に影響を与える。ここでは、一つひとつの要素の強度 S_x, S_y, S_{xy} は、正規分布に従うばらつきを持つと仮定した。これらの欠陥は、弾性定数にも影響を与えると考えられるが、ここでは、弾性定数への影響は小さいと見なした。

2.2 不均一な強度をもった複合材料の統計的モデル

構造物全体としての複合材料は、上で議論した Fig.1 で示される要素へと分解することができると考えられる。ここで、この局所要素を、Fig.2 に示す8節点のアイソパラメトリック要素で同一化する。

2.3 複合材料の応力-ひずみ関係

材料全体の有限要素法解析を、式(1)のような応力-ひずみ関係を用いて行った。この研究は、ガラスマット強化複合材料積層板を扱う関係上、平面ひずみ状態を仮定している。

Fig.1 Model of glass mat reinforced plastic.

Fig.2 An isoparametric finite element with dispersed S_x, S_y and S_{xy} as a model in Fig.1.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E_x}{(1+\nu_x) \left(1 - \nu_x - 2 \frac{E_x}{E_y} \nu_y^2 \right)} \times \begin{bmatrix} 1 - \frac{E_x}{E_y} \nu_y^2 & \nu_y(1+\nu_x) & 0 \\ \nu_y(1+\nu_x) & \frac{E_y}{E_x} (1-\nu_y^2) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} + \frac{G}{E_x} (1+\nu_x) \left(1 - \nu_x - 2 \frac{E_x}{E_y} \nu_y^2 \right) \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

ここに、

$$\frac{1}{G} = \frac{3}{E_y} - \frac{1}{E_x} + 2 \frac{\nu_x}{E_x} \quad (2)$$

2.4 非線形性

複合材料は、一般に応力-ひずみ関係に大きな非線形性を伴う。ここでは、座古らによって導かれた方法により、材料定数の非線形性は、応力依存性を持つとし、局所的に線形の応力-ひずみ曲線の集合としてこれを表現した¹⁰⁾。

$$\begin{aligned} E &= E_0 + \alpha \exp(-n\sigma_E) \\ \nu &= \nu_0 + \phi \exp(-m\sigma_E) \end{aligned} \quad (3)$$

このシミュレーションでは、各段階での弾性定数は、その一つ前の段階の有効応力から区間線形解析によって求められる。それぞれの要素での応力状態を評価するのに Mises の有効応力を用いた。

$$\sigma_E = \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6\tau_{xy}^2}{2}} \quad (4)$$

2.5 破損プロセスのシミュレーション

計算の各段階では、次の Tsai の破損基準¹¹⁾を、各要

Fig.3 Finite element mesh for strip specimen of composite material.

Table 1 Material properties.

Properties	Value	unit
E_x	$4900+3900 \exp(-0.1 \sigma_E)$	MPa
E_y	$2000+2000 \exp(-0.5 \sigma_E)$	MPa
ν_{xy}	$0.2+0.2 \exp(-0.1 \sigma_E)$	—
ν_{yz}	$0.2+0.2 \exp(-0.1 \sigma_E)$	—
$\bar{S}_x$	171.5	MPa
$\bar{S}_y$	53.9	MPa
$\bar{S}_{xy}$	39.2	MPa

素に対して用いた。

$$F = \left(\frac{\sigma_x}{S_x} \right)^2 - \left(\frac{\sigma_x}{S_x} \right) \left(\frac{\sigma_y}{S_y} \right) + \left(\frac{\tau_{xy}}{S_{xy}} \right)^2 \quad (5)$$

もし F が 1.0 より大きかったら、その要素は破損したと見なし、弾性定数は $1/100$ とした。

2.6 引張り試験における損傷発展シミュレーション

上の手法を、実際に短冊型試験片（ガラスマット強化プラスチック）の引張り破壊シミュレーションに適用してみた。観察されたこの材料の損傷形態と、この材料の異方性を考慮して、Fig.3 に示す有限要素モデルを用いた。問題の対称性のため、試験片の片側のみ解析した。

この解析で用いた材料定数を Table 1 に示す。ここで、 S_x , S_y , S_{xy} は、正規分布に従うと仮定する。正規分布において分散 Σ は、次式で与えられる。

$$\Sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2} \quad (6)$$

この値は、試験片のモデルにおいて不均一性の程度を表すと考えられる。

分散と損傷の発展の関係を評価するために、Table 1 の特性と、次に示す 7 種類の分散を持つ試験片を考えた。Table 1 における強度の平均値は固定され、式(7)で示される 7 種類の試験片は、7 つの違った分散を持つことを表している。

$$\Sigma = 0.0, 0.2, 1.0, 3.0, 6.0, 12.0, 24.0\% \quad (7)$$

Table 2 Value of F and the increment of displacement.

Value of F	Increment of displacement
$F < 0.30$	defined step
$0.30 \leq F < 0.50$	5.0%
$0.50 \leq F < 0.70$	3.0%
$0.70 \leq F < 0.90$	2.0%
$0.90 \leq F < 0.95$	1.0%
$0.95 \leq F < 1.00$	0.5%
$1.00 \leq F$	1.0%

なお、個々の要素の大きさと分散の値には密接な関係がある。つまり、要素の大きさが個々の繊維や欠陥など微細構造の大きさに近づけば近づくほど、分散は大きくなり、要素が大きくなれば大きくなるほど（内部の微細構造の影響が平均化されるため）分散は小さくなる。したがって、同じ材料で同じ要素分割を行った場合、要素の大きさによって分散の大きさが変動することが考えられる。ここでは、同一の要素分割において、ばらつきの程度が複合材料の損傷進展挙動に与える影響を調べる目的のため、具体的な要素の大きさは与えていない。

ここで、上で述べた手法をこれらの試験片に適用するために、短冊型試験片の自由端の変位を最初の負荷のない状態から増加させることとする。式(5)の F の値を、変位の増分を決定する際に用いた。このシミュレーションにおいて、直前の F の値と次の増分との関係を Table 2 に示す。

もし、一つの要素が損傷したら、その要素の弾性定数を $1/100$ とし、その後の変位の増分は、Table 2 により全要素中で最も大きい F の値を用いて求める。この手続きを、材料全体が破損するまで続けた。

このシミュレーションにおいて、損傷が発展すると、ひずみ場が不安定になり、 y 方向の変位が著しく増加する。試験片の破壊は、このときをもって定義した。このシミュレーションの流れ図を Fig.4 に示す。

3. 計算結果と考察

3.1 応力-ひずみ関係

それぞれの分散について試験片全体の応力-平均ひずみ関係を Fig.5 に示す。この図より、強度の分散が大きくなるにつれて、応力-ひずみ関係は次第に変化していることがわかる。強度が分散しない場合、応力-ひずみ曲線は直接式(3)より決定される。しかしながら、強度

Fig.4 Flow chart of simulation process.

が分散を持つようになると、局所的に弱い要素があることによって、高い非線形性を持つようになる。

3.2 破断時の材料全体の伸び

破断時の伸びと、強度の分散との関係を Fig.6 に示す。破断時の伸びは、分散が 0.0% の時の値で正規化し

Fig.5 Relation between mean stress and mean strain for each dispersion.

Fig.6 Relation between dispersion and normalized total elongation.

Fig.7 Damage development for $\Sigma=0.0\%$.

たものである。強度の平均値は同じであっても、全体の強度は、分散がある場合には低下した。分散が約 10.0% までは、破断時の伸びは線形的に減少したが、この大きさは強度が分散しない場合の約 3/10 より小さくはならなかった。

3.3 損傷発展プロセス

分散が 0.0% の場合の損傷発展プロセスを Fig.7 に示す。この場合、強度の分散はなく、損傷域は、試験片を横切る形で、試験片の中央部に発生している。

分散が、0.2%, 1.0%, 3.0%, 6.0%, 12.0% のそれぞれの場合についての損傷域の発展プロセスの様子を Fig.8-12 に示す。損傷モードは分散が大きくなるにしたがって、次第に変化する様子がわかる。また、分散が大きくなるに従って、損傷域は、長手方向に広がる傾向にあることが示されている。分散が 3.0% の場合、損傷域は長手方向の約半分までに成長している。強度の分散が大きくなると、数個の損傷がランダムな場所に発生するようになる。さらに、分散が 12.0% になると、損傷

Fig. 8 Damage development for $\Sigma = 0.2\%$.

Fig. 9 Damage development for $\Sigma = 1.0\%$.

Fig. 10 Damage development for $\Sigma = 3.0\%$.

Fig. 11 Damage development for $\Sigma = 6.0\%$.

Fig. 12 Damage development for $\Sigma = 12.0\%$.

域は材料全体に成長し、破壊した試験片は複雑になっている。このときの試験片は、最初の強度の分散が小さかったときの場合と比べて、破損モードの違いが示唆されている。

4. 結 言

統計的手法を用いて様々な欠陥を含んだガラスマット強化複合材料のモデルを考案した。引張り荷重を受ける短冊型試験片のシミュレーションを、統計的損傷モデルを異方性と非線形性を考慮した有限要素法と組み合わせることによって行った。その結果は以下のようにまとめられる。

1) ガラスマットで強化された複合材料の場合、局所的な強度の分散が大きくなると破壊モードが次第に変化する傾向がみられた。

2) 強さの平均値はまったく同じでも、モデルの強度は、分散のない場合と比較して減少した。

3) 破断時のモデル全体の伸びは、強度の分散が大きくなるに従って小さくなったが、これには、下限界値が観察された。

4) 応力-ひずみ曲線も強度のばらつきの影響を強く受け、分散の大きい場合には非線形性が強くなった。

参 考 文 献

- 1) 清水利弘, 中島正貴, 村上澄男: 日本機械学会東海支部岐阜地方講演会講演論文集, 893, 2(1989), 16-17.
- 2) Z. Maekawa, H. Hamada, A. Yokoyama & S. Ishibashi: *Proc. 1st Japan International SAMPE* (1989), 1274-1279.
- 3) B.W. Rosen: *AIAA Journal*, 2, 11 (1964), 1985-1991.
- 4) C. Zweben: *AIAA Journal*, 6, 12 (1968), 2325-2331.
- 5) 福田 博: 材料システム, 4 (1985), 13-25.
- 6) 中易秀敏, 前川善一郎: 日本機械学会論文集 (A編), 57, 535 (1991), 70-77.
- 7) 会田公一, 魯 云, 福永秀春: 日本機械学会論文集 (A編), 57, 543 (1991), 94-100.
- 8) Talreja, R.: *Fatigue of Composite Materials*, Technomic Publishing (1987), pp. 25-38.
- 9) D.H. Allen, C.E. Hallis, & S.E. Groves: *Int. J. Solids Structures*.
- 10) 座古 勝: 数値複合材料力学, 養賢堂 (1989), pp. 8-14.
- 11) S.W. Tsai & E.M. Wu: *J. Composite Materials*, 5 (1970), 58-80.