

マクロ - ミクロ領域の力学的評価のための織物複合材料の設計・損傷挙動評価手法の開発

大阪大学・工・生産科学専攻 倉敷哲生, 座古 勝, 林 禎彦

1. 緒言

複合材料の利点の明確化に伴い注目度が増し、多くの分野で用いられている。熱硬化性あるいは熱可塑性樹脂をマトリックスとし、ガラス繊維等の各種繊維を混合・分散させた繊維強化プラスチック（FRP: fiber reinforced plastics）は、弾性率・強度が高く密度が小さいため、航空・宇宙用途のように重量が厳しく制限される分野には欠かせない材料である。強化繊維を織り構造とした織物繊維強化複合材料は、従来の積層型一方向繊維強化複合材料と比較して横方向強度や耐衝撃性に優れ、面外変形能が大きいいため可撓性構造体に成形できる利点を有している。このことは、成形工程上においても取り扱い易く、製造及び保全コストの低減をもたらすため経済性にも貢献する。さらに、近年、欧米において繊維束をより扁平化させ薄肉化を狙った新しい織り構造が調査されており、これを多層積層とすることにより従来材に比べて格段の層間強度の向上が期待されている。しかし、織物複合材料の適用阻害の一因として、信頼性のある設計・強度評価手法の欠如が挙げられる。FRPは異方性を有するため、繊維束間にはく離や繊維束内のき裂進展など、一方向性材と比べて複雑な損傷進展形態となる。このため、複合材料構造物の損傷許容設計手法が確立していないのが現状である。

また、織物複合材料は樹脂の含浸した積層織物から成っているが、製造工程中、積層時に各層の織構造の配置を制御し、織ピッチを揃えることは困難であり、積層材での相対的なピッチにはずれ、即ち積層ずれが生じる。このような積層ずれの発生はよく知られた現象であるが、複合材料の特性に及ぼす積層ずれの影響は明確にされていないのが現状である。

そこで本研究では、織物複合材料中の繊維束のようにスケール差を有する領域について、織物複合材料のマクロ変形と、繊維束のミクロな損傷状態を評価することを目的に、損傷力学に基づく損傷進展解析手法を構築する。本稿では、引張荷重下における織物複合材料の力学的特性に及ぼす積層ずれの影響を調査したので、その結果について記述する。

2. 損傷挙動評価手法

2-1 損傷モードの分類および定式化

織物複合材料に対して、繊維束は直交異方性体、繊維束まわりの樹脂を均質等方性体とみなし、繊維束の織構造を考慮した不均質異方性体としてモデル化を行う。織物複合材料内の繊維束は、一方向繊維強化複合材料単層材と強化機構が同じであることから微視的には損傷形態も同様と想定できるので、均質直交異方性体と仮定した異方損傷モデルを適用する。このような一方向に繊維強化された材料では、繊維破断支配型の損傷とマトリックス破断支配型の損傷が発生し、それぞれの損傷が力学的特性に及ぼす影響は大きく異なる。そこで、図1に示すいずれかの損傷モードにあると考える。いずれのモードも損傷に支配的な応力成分によって特徴付けられる。Mode Lは繊維破断であり、繊維方向応力 σ_L が支配的となり発生した損傷である。Mode T<, Mode Z&ZL, Mode TZは樹脂のき裂であり、 σ_T, τ_{LT} や、 $\sigma_Z, \tau_{ZL}, \tau_{TZ}$ が支配的となり発生し

た損傷である。各応力成分の大小関係が損傷モード識別の指標となるものと考え、各方向の強度に対する発生応力の比により、発生する損傷モードを予測する。具体的には、有限要素解析を行い、得られた応力状態から異方性材料の破壊則であるHoffman則を用いて各要素の損傷発生を判定する。ただし、これらの破壊則では層内破壊の巨視的な破壊強度を予測することはできても、上記の損傷形態の同定はできない。そこで、損傷要素がある場合、表1に示す発生応力と強度の二乗比を計算し、最大となる応力成分を損傷に支配的な応力と判定し、損傷モードを決定する。

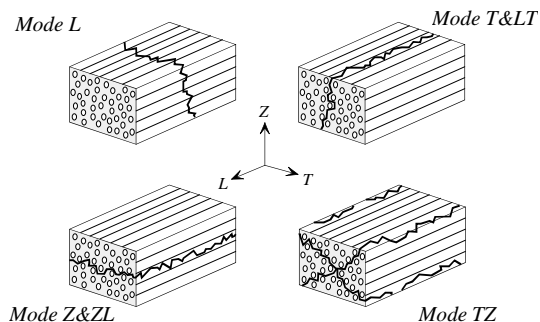


図1 損傷モードの分類

表1 損傷モードの定義

	Maximum stress-to-strength ratio	Damage tensor
		$\begin{bmatrix} D_L & 0 & 0 \\ 0 & D_T & 0 \\ 0 & 0 & D_Z \end{bmatrix}$
Mode L	$\frac{\sigma_L^2}{F_L^t F_L^c}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$
Mode T & LT	$\frac{\sigma_T^2}{F_T^t F_T^c}$ or $\left(\frac{\tau_{LT}}{F_{LT}^s}\right)^2$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$
Mode Z & ZL	$\frac{\sigma_Z^2}{F_Z^t F_Z^c}$ or $\left(\frac{\tau_{ZL}}{F_{ZL}^s}\right)^2$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
Mode TZ	$\left(\frac{\tau_{TZ}}{F_{TZ}^s}\right)^2$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
Isotropic damage model for matrix	—	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

なお、 F^t, F^c, F^s はそれぞれ引張強度、圧縮強度、せん断強度を表す。

各損傷モードに対応した剛性低下を損傷力学に基づいて表1に示す損傷テンソルにより表し、式(1)に示す構成則（応力 - ひずみ関係）の定式化を行うことにより、有限要素法を用いた数値シミュレーションが可能となる。

$$\begin{Bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_T \\ \sigma_Z \\ \tau_{TZ} \\ \tau_{ZL} \\ \tau_{LT} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_L^2 Q_{11} & \omega_L \omega_T Q_{12} & \omega_Z \omega_L Q_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & \omega_T^2 Q_{22} & \omega_T \omega_Z Q_{23} & 0 & 0 & 0 \\ & & \omega_Z^2 Q_{33} & 0 & 0 & 0 \\ & & & \omega_{TZ} Q_{44} & 0 & 0 \\ & sym. & & & \omega_{ZL} Q_{55} & 0 \\ & & & & & \omega_{LT} Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_T \\ \varepsilon_Z \\ \gamma_{TZ} \\ \gamma_{ZL} \\ \gamma_{LT} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

なお、 Q_{ij} は初期非損傷状態の応力 - ひずみマトリクス成分であり、 ω_i は次式より求まる。

$$\left. \begin{aligned} \omega_L &= 1 - D_1, \quad \omega_T = 1 - D_2, \quad \omega_Z = 1 - D_3, \\ \omega_{TZ} &= \frac{4\omega_T^2 \omega_Z^2}{(\omega_T + \omega_Z)^2}, \quad \omega_{ZL} = \frac{4\omega_Z^2 \omega_L^2}{(\omega_Z + \omega_L)^2}, \\ \omega_{LT} &= \frac{4\omega_L^2 \omega_T^2}{(\omega_L + \omega_T)^2} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

2-2 織り構造の有限要素化

複雑な織り構造を有する織物複合材料を簡易に有限要素モデル化を行うため、図2に示す手法を用いる。すなわち、直線上の繊維束が直交するモデルを作成し、面外方向に圧縮変形を与える。なお、繊維束の断面形状はSEMで観察したものの平均的な形状とし、変形後も測定した断面形状を保持するように、面内における広がりには維持したまま圧縮している。この単位構造モデルを規則的に配列し、織り構造としても有限要素モデルを作成する。

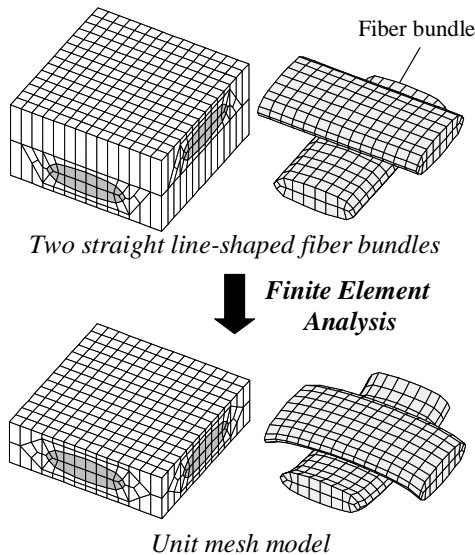


図2 織り構造単位モデルの作成

2-3 力学的物性値の算出

解析には繊維束および樹脂の力学的物性値の把握が必要となる。まず、繊維束について、その断面をCCDにより観察し、繊維束断面を画像処理により繊維含有率を調査した。その結果、繊維束内部で繊維含有率の分布があり、平均的に繊維束端部に比較して中央部の含有率が高いことが判明した。こうして観察した結果に基づき、図3に示す有限要素モデル

の繊維束内部の繊維含有率に反映した。これらの繊維含有率分布を用いて、繊維束を一方向繊維強化複合材料とみなした際の三次元力学的物性値を求めた結果を表2に示す⁽¹⁾。これらの結果より、繊維含有率 V_f が低い場合($V_f=53.6\%$)と高い場合($V_f=60.8\%$)とでは、繊維方向ヤング率(E_L)が約15%も異なっており、損傷進展解析においては、このような繊維含有率に起因する力学的物性値の差を考慮する必要があるものと考えられる。

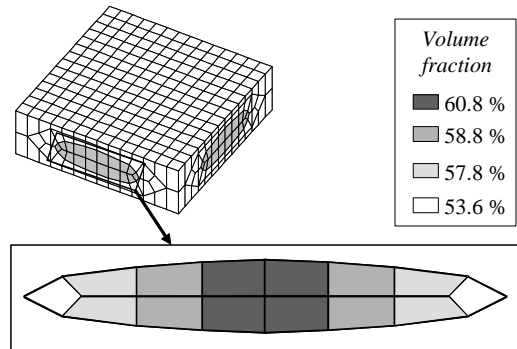


図3 繊維束内の繊維含有率分布

表2 繊維束および樹脂の力学的物性値

Material	Fiber bundle (E-glass/Vinyl ester)			Matrix resin (Vinyl ester)	
	V_f	53.6%	60.8%		
Young's modulus (GPa)	E_L	42.07	50.78	E	3.30
	E_T	11.23	14.43		
	E_Z	11.23	14.43		
Shear modulus (GPa)	G_{TZ}	4.44	5.75	G	1.28
	G_{ZL}	4.37	5.63		
	G_{LT}	4.37	5.63		
Poisson's ratio	ν_{TZ}	0.258	0.251	ν	0.30
	ν_{ZL}	0.065	0.068		
	ν_{LT}	0.236	0.231		
Tensile strength (MPa)	F_L^t	2119.87	2558.92	F^t	105.80
	F_T^t	236.51	160.63		
	F_Z^t	236.51	160.63		
Compressive strength (MPa)	F_L^c	3761.20	4688.35	F^c	141.12
	F_T^c	315.35	324.98		
	F_Z^c	315.35	324.98		
Shearing strength (MPa)	F_{TZ}^s	157.67	162.49	F^s	-
	F_{ZL}^s	157.67	162.49		
	F_{LT}^s	157.67	162.49		

2-4 損傷を考慮した非線形解析手法

本研究では、式(1)の応力 - ひずみ関係式を各有限要素に適用し、図4の区間線形近似に基づく変位増分法により損傷進展に起因する非線形挙動を模擬する。重要な点は、損傷発生後の応力再配分にある。すなわち、図4に示す荷重(P) - 変位(d)線図において、Aで損傷が発生した場合、表1により損傷モードを決定し剛性を低下させる。図中の荷重が低下する区間ABは、損傷進展に伴う応力再配分過程であり、静的な損傷進展を対象としてこの過程での変位は増分しない。Bにおいて、新たな損傷が現れない場合、変位を増分してCでの解析に進むこととなる。同様の処理を図中DEにおいても繰り返せば、損傷進展に起因する非線形解析が可能となる。

3. 解析例

3-1 解析モデル

積層織物複合材料では各層の織目がずれて重ねられる可能性がある。こうした積層時のずれにより積層材の剛性係数や強度などの力学的特性にばらつきが生じるものと考えられる。

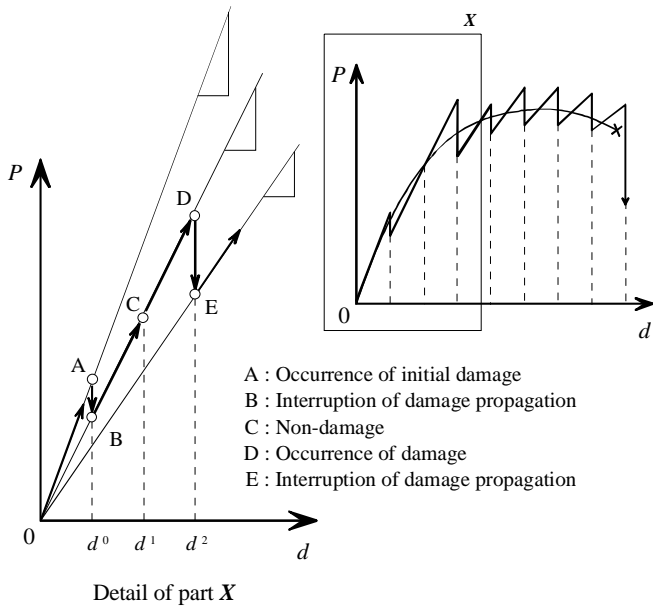
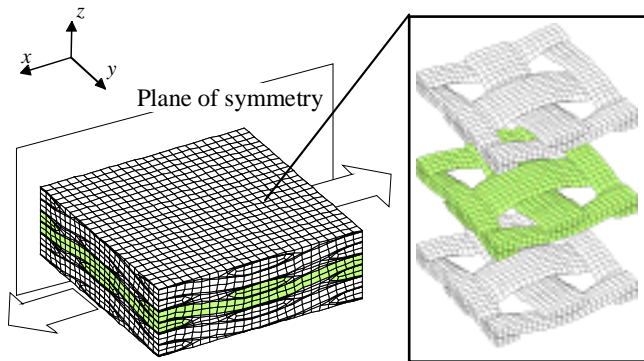
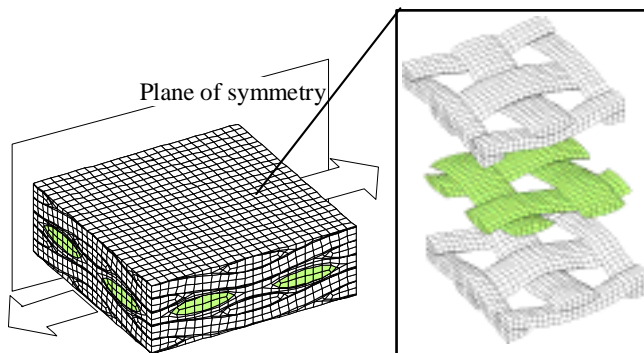


図4 損傷を考慮した非線形解析手法

解析モデルとして多層積層型を用いるのが好ましいが、計算機の容量制限から3層モデルを使用した。力学的特性のばらつきを考慮する際には3層積層が必要最小限の積層数である。解析に用いたE-ガラス平織材/ビニルエステル樹脂の3層積層材(幅、長さともに2.4mm、板厚0.75mm)の有限要素モデルを図5に示す。積層構成が同位相であり積層ずれが無い有限要素モデルをType Aとし、中央層のみをx,y方向に半周期移動したモデルをType Bとした2種類のモデルを作成した。解析ではxz平面を対称面とし、x方向に強制変位を与えている。



(i) Type A (積層ずれが無い場合)

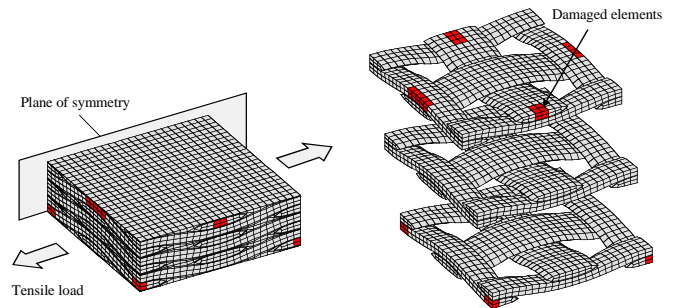


(ii) Type B (x,y方向に積層ずれが有る場合)

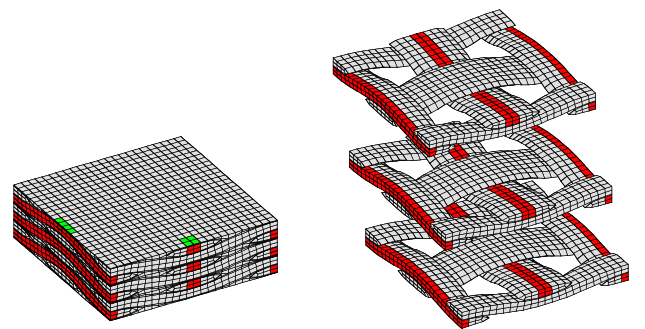
図5 解析モデル

3-2 積層ずれの有無が損傷進展に及ぼす影響

損傷進展解析により得られた損傷状態を図6,7に示す。なお、損傷状態を分かり易くするため、繊維束のみを表示した図も併せて示す。図中の薄墨部は損傷と判定された要素である。図6(i)および図7(i)は、初期損傷の発生状態を示しており、負荷直角方向(以下では横方向と記述)の繊維束においてTable 1のMode T<が主因である繊維束内マトリックス

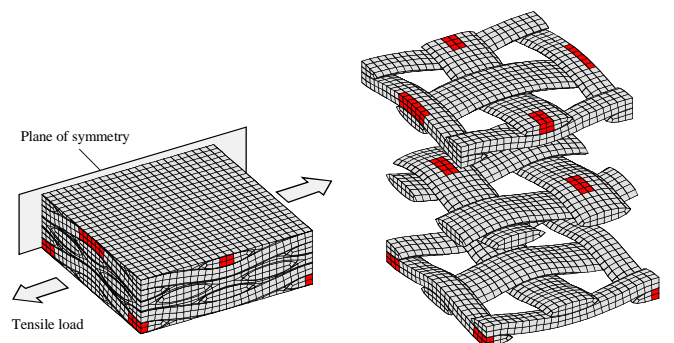


(i) $\epsilon = 0.833\%$

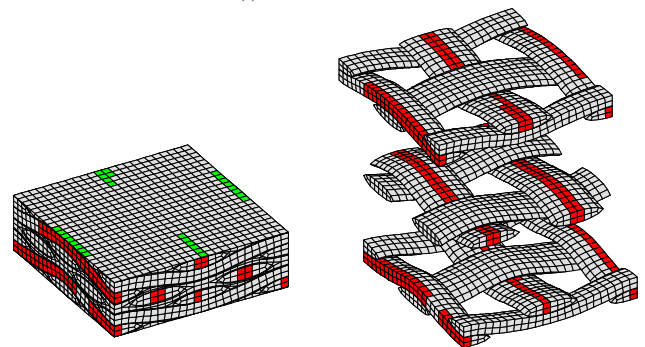


(ii) $\epsilon = 1.416\%$

図6 Type Aの場合



(i) $\epsilon = 0.958\%$



(ii) $\epsilon = 1.416\%$

図7 Type Bの場合

き裂が発生している。また、解析により得られた応力 - ひずみ曲線を図 8 に示す。図には実験結果も併せて示している。解析では樹脂の材料非線形性を考慮していないため、実験結果よりもやや高応力側となるが、両者は良い傾向を示している。初期損傷が発生するまでは積層ずれの有無に関わらずほぼ同様の挙動を示し、弾性率などに積層ずれの影響は現れない。しかし、損傷の発生位置は積層ずれの有無により異なる。積層構成が同位相の場合 (Type A) には、負荷増大に伴い延伸化する負荷方向 (以下では縦方向と記述) の繊維束によって、横方向繊維束は面外方向へ曲げ変形を被ることとなる。そのため、最外層の横方向繊維束において高応力となり、その箇所から損傷が発生することとなる。さらに、負荷の増大に伴い、中央層の横方向繊維束内部への損傷に進展する。

一方、初期損傷が発生する引張ひずみ量は位相が異なる場合 (Type B) の方が大きい。これは、縦方向繊維束の延伸に起因する横方向繊維束の変形を最外層の繊維束のみならず中央部の繊維束でも分担するためと考えられる。そのため、損傷は最外層と中央層で同時に発生する。このような損傷進展の結果は、実験によるその場観察結果とも良い傾向を示していることも確認している⁽²⁾。このような解析手法により、積層ずれの有無により損傷進展挙動が評価でき、実験では評価困難な初期損傷発生の予測に有用であるものと考えられる。

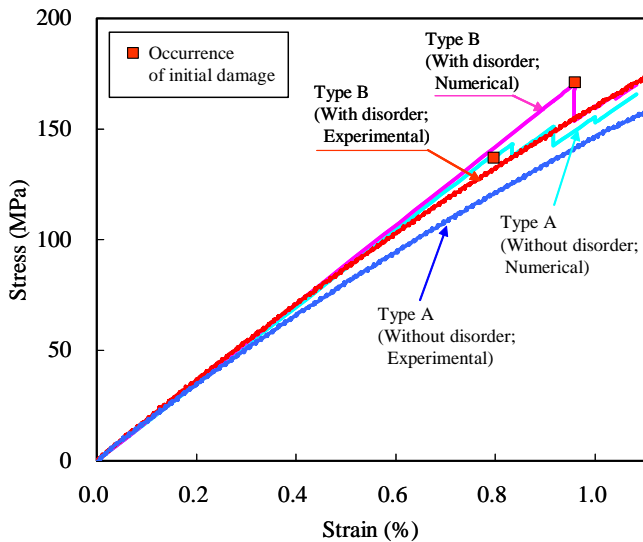


図 8 積層ずれの有無による応力 - ひずみ関係

3-3 積層ずれの方向による影響

積層ずれの方向による損傷進展の影響を調査する目的で、図 9 に示す 2 種類のモデルを作成し解析を行った。図中の

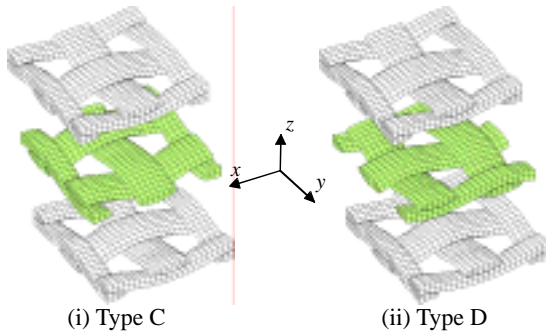


図 9 積層ずれの方向を考慮した解析モデル

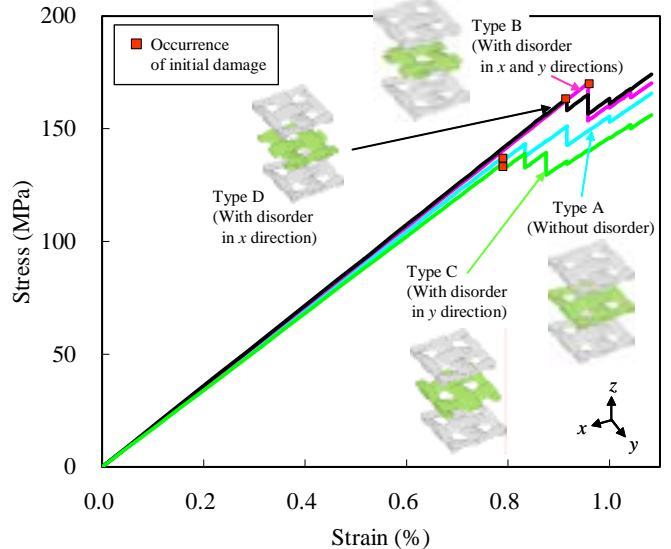


図 10 積層ずれの方向を考慮した場合の応力 - ひずみ関係

Type C は中央層を横方向 (y 方向) のみに半周期移動したモデルであり、Type D は縦方向 (x 方向) のみに移動したモデルである。解析結果として応力 - ひずみ関係を図 10 に示す。Type B および D が、また Type A および C がそれぞれ同様の傾向にあり、図は割愛するが初期損傷の発生位置も同様であることを確認している。これらの結果より、縦方向ではなく横方向における積層ずれが初期損傷発生に影響を及ぼすことが判り、このような解析手法が積層ずれの方向を考慮した織り構造の設計に寄与するものと考えられる。

4. 結言

損傷力学に基づく損傷進展解析手法を構築し、引張荷重下における織物複合材料の力学的特性に及ぼす積層形態の影響の解析を行った。本手法は、実験観察が困難な内部繊維束の損傷状態が把握可能であるほか、織り構造の形態による損傷発生・進展機構も解明できることから、材料評価や新たな強化機構の材料開発に重要な役割を果たすと考える。

また、織物複合材料中の繊維束のマイクロ損傷状態を損傷力学により考慮し、3 層積層材料のマクロ変形を FEM 解析により評価したが、更なる多層積層状態や複雑な織り構造のモデル化への適用を考慮した場合、領域全体の要素数や解析コストが増大する問題点が考えられる。このような点に対して、構成則に巨視的および微視的影響を同時に考慮する重合メッシュ法により、解析精度の向上と解析モデリング手法の容易化を図るべく、マルチスケール解析手法の定式化ならびにプログラム開発も行っている。これらの手法と、複雑な構造を有する織物複合材料の有限要素メッシュを簡易に自動作成する手法、ならびに解析に使用する強化材や樹脂の強度等の物性値を算出する材料設計 選択システムを用いることにより、織物複合材料のマクロ - ミクロ領域の設計・損傷挙動評価に繋がるものと考えられる。

5. 参考文献

- (1) T. Kurashiki, M. Zako, and I. Verpoest, Proc. of 13th International Conference on Composite Materials, CD-ROM (2001).
- (2) T. Kurashiki, M. Zako, and I. Verpoest, Proc. of 13th International Conference on Textile Composites, CD-ROM (2002).

