準三次元 XFEM を用いた CFRP 積層板の準静的押し込み試験解析

王 晨宇^{*1}, 長嶋 利夫^{*2}

Quasi-Static Indentation test Analyses of CFRP laminate using quasi three-dimensional XFEM

Chenyu WANG^{*1} and Toshio NAGASHIMA^{*2}^{*1} Graduate school of Sophia University
7-1 Kioicho, Chiyoda-ku, Tokyo 102-8554, Japan^{*2} Department of Engineering and Applied Sciences, Faculty of Science and Technology, Sophia University
7-1 Kioicho, Chiyoda-ku, Tokyo 102-8554, Japan

Received: 9 December 2020; Revised: 27 January 2021; Accepted: 16 February 2021

Abstract

CFRP laminates subjected to out-of-plane load may have complex damage such as delamination, matrix crack and fiber failure. In this study, damage propagation analyses for Quasi-Static Indentation (QSI) tests were performed by static implicit method using quasi-3D extended finite element method (XFEM) considering materially, geometrically and boundary nonlinear. In the numerical models, interface elements considering cohesive zone model (CZM) are introduced to model delamination. The accuracy of QSI test analysis was improved by quasi-3D XFEM using multiple matrix crack model, and ZECZM considering the dependence of shear strength on hydrostatic pressure. It was shown that the results including relation between load point displacement and applied load, and delamination obtained by the analyses are in good agreement with the experimental results.

Keywords : CFRP, Damage propagation, XFEM, Matrix crack, Delamination, Cohesive Zone Model

1. 緒 言

高比強度、高比剛性を持つ炭素繊維強化プラスチック (Carbon Fiber Reinforced Plastic: CFRP) 積層材料は、航空機などの軽量化構造で多用されており、近年では CFRP を主要材料とした民間航空機が開発されている。現状の航空機構造設計において、部材の寸法、配置の決定に用いられる強度設計データを取得するために、多数回の CFRP 積層試験片の製作および強度試験が必要とされている。たとえば、CFRP 積層構造の衝撃後圧縮 (Compression-After-Impact: CAI) 強度を評価するために、寸法や積層構成を変更した試験片に、低速衝撃を与えた後、圧縮強度試験が実施される。このような CAI 試験を数値シミュレーションで再現できれば、航空機の設計工程を大幅に短縮することができ、開発のためのコスト削減に貢献することができる (岡部, 大林, 2016)。

前述したような CFRP 材料を用いた構造設計において、CAI 試験の前工程として ASTM-D7136 に基づく衝撃付与試験が実施される。しかしながら、そのような衝撃試験では、試験片内部の損傷の発生や進展を直接確認できない。このため、低速衝撃と同様の力学挙動と損傷状態を与える準静的押し込み試験 (Quasi-static Indentation test: QSI test) が実施されている (Aoki et al., 2007)。QSI 試験においては様々な段階で荷重を中断し、X 線 CT スキャンなどを用いた非破壊検査方法により、試験片の内部損傷を観察できる。最近、Abisset ら (2016) は CFRP 積層平板の寸法や積層構成を変更した QSI 試験を実施し、CFRP 積層板の損傷形態を詳細に報告している。

一方、数値シミュレーションを用いて CFRP 積層構造の損傷進展過程を模擬するためには、FEM (Finite Element Method) モデルに CFRP の典型的な損傷形態である層間はく離、マトリクス割れ、繊維破断を表現できる損傷モデルを導入する必要がある。FEM を用いて、CFRP 積層構造の損傷進展解析を実施するために、これまで、き裂

を含む材料を剛性低下で表現する Smeared crack モデル (Borst et al., 2004)や連続体損傷力学モデル (Continuum Damage Mechanics: CDM) に基づく方法 (Lapczyk and Hurtado, 2007)や、き裂を結合力モデル (Cohesive Zone Model: CZM) を考慮したインターフェース要素でモデル化する方法 (Jiang et al., 2007; Harper and Hallett, 2008; Hallett et al., 2008, 2009)などが用いられてきた。インターフェース要素は、異なる二つの有限要素の境界に導入される厚みがない要素である。Hallett らの研究では、FEM モデルにおいて CFRP 積層板の層間およびマトリクス割れの生じる可能性がある箇所にインターフェース要素を設定した上で、バイリニア型の CZM を導入して、動的陽解法を用いて無孔引張試験 (No Hole Tension test: NHT test), 有孔引張試験 (Open Hole Tension test: OHT test) についての損傷進展解析を実施して、実験結果と整合する結果を得ている。しかしながら、このような方法においてはマトリクス割れに沿って要素を分割する必要があるため、FEM モデルの作成は容易ではない。

近年、き裂を要素分割と独立にモデル化できる拡張有限要素法 (eXtended Finite Element Method: XFEM) が Moës ら(1999)により提案され、き裂解析・き裂進展解析に適用されている。XFEM は均質材のみならず、異方性を有する CFRP 積層板の解析にも応用されている (長嶋他, 2004)。著者の一人は、CFRP 積層板の損傷をモデル化するために、層間はく離を通常の FEM で用いられるインターフェース要素で、マトリクス割れを XFEM による不連続な変位場の近似関数でモデル化する準三次元 XFEM 解析手法を提案している (Nagashima and Sawada, 2016)。提案手法においては、XFEM でメッシュと独立にマトリクス割れをモデル化することが可能である。

前述した CZM を用いた損傷進展解析においては、バイリニア型の CZM が用いられるが、陰解法を用いた場合に、しばしば収束解が得られないことがある。その問題を解決するために、Higuchi ら (2017)は、CDM を用いた Ridha ら (2014)の研究を参考にして Zig-zag CZM (以下 ZCZM と記す)を導入した。Higuchi ら (2017)、島崎ら (2017)は内製準三次元 XFEM システムで CFRP 積層板の NHT や OHT 試験解析を ZCZM を用いた陰解法で実施し、妥当な結果を得ている。それらの研究では破壊エネルギー、面内荷重問題を扱っており微小変形理論および通常の CZM で十分であった。また、著者ら (王, 長嶋, 2020)は内製 FEM システムを用いて、CFRP 積層板の QSI 試験解析を ZCZM を用いた陰解法で実施し、通常の CZM を用いた陽解法とほぼ一致する結果が得られることを示した。

本研究は、CFRP 積層板の面外衝撃による損傷の発生から、圧縮による荷重低下までを評価できる数値解析手法の確立を目的としている。本稿では、その一環として、積層平板の多数本のマトリクス割れを容易にモデル化できる準三次元 XFEM を用いて QSI 試験解析を実施し、Abbiset らによる試験結果と比較することにより、解析手法の妥当性を検証する。本稿に示す XFEM 解析においては、CZM による材料非線形性、圧子と積層板の接触による境界非線形性、および大変形による幾何学非線形性を考慮している。さらに解析精度を向上させるために、CZM の改良と XFEM の特長を利用し多数本のマトリクス割れを導入することを検討する。以下、第 2 節で解析手法、第 3 節で数値解析結果、第 4 節で結言を示す。

2. 解析手法

2・1 準三次元 XFEM (Nagashima and Sawada, 2016; 島崎, 長嶋, 2017)

本稿では CFRP 積層板のマトリクス割れを二次元平面におけるき裂としてモデル化する。き裂形状を複数の線分でモデル化し、レベルセット法を用いてき裂を陰的にモデル化する。図 1 に示すように、き裂線 Γ に関する符号付き距離関数 (Signed Distance Function: SDF) $\phi(\mathbf{x})$ と Γ に垂直な線 Γ' に関する $\psi(\mathbf{x})$ を次式のように定義する。

$$\phi(\mathbf{x}) = \min_{\bar{\mathbf{x}} \in \Gamma} \|\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}}\| \operatorname{sign}(\mathbf{n}^+ \cdot (\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}})) \quad (1.1)$$

$$\psi(\mathbf{x}) = \min_{\bar{\mathbf{x}} \in \Gamma'} \|\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}}\| \operatorname{sign}(\mathbf{n}' \cdot (\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}})) \quad (1.2)$$

また、図 2 に示すように二次元三角形要素の 3 節点における ϕ および ψ の値によって、通常要素 (Normal)、切断要素 (Cut)、き裂先端要素 (Tip) に分類し、積層板の板厚方向に押し出すことにより、三次元 6 節点五面体要素で作成される準三次元モデルを使用する。二次元要素内の位置 $\mathbf{x}$ 、板厚方向の位置 r_3 における変位場 $\mathbf{u}^h$ を次式で近似する。

$$\mathbf{u}^h(\mathbf{x}, r_3) = \sum_{I=1}^3 L_I(\mathbf{x}) \{N_B(r_3)\mathbf{u}_I + N_T(r_3)\mathbf{u}_{I+3}\} \quad (2.1)$$

$$+ \sum_{I=1}^3 L_I(\mathbf{x}) \times \left\{ H\left(\bar{\phi}(\mathbf{x})\right) - H\left(\bar{\phi}(\mathbf{x}_I)\right) \right\} \{N_B(r_3)\mathbf{a}_I + N_T(r_3)\mathbf{a}_{I+3}\}$$

$$\bar{\phi}(\mathbf{x}) = \sum_{I=1}^3 L_I \phi_I \quad (2.2)$$

$$N_B(r_3) = (1 - r_3)/2 \quad (2.3)$$

$$N_T(r_3) = (1 + r_3)/2 \quad (2.4)$$

$$H(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ -1, & x < 0 \end{cases} \quad (2.5)$$

ここに、 L_I は三角形の面積座標、 $\mathbf{u}_I$ と $\mathbf{a}_I$ は節点自由度ベクトル、 N_B と N_T は板厚方向の内挿関数、 H はき裂近傍での変位の不連続性を表すヘビサイド関数である。き裂先端要素の詳細な定式化について、文献(長嶋, 澤田, 2012; Nagashima and Sawada, 2016; Nagashima, 2020)を参照されたい。

この手法では、CFRP 積層板の垂直なマトリクス割れしかモデル化できないものの、マトリクス割れの本数の変更および積層構成や板厚の調整が容易になる。例えば、CFRP 積層板の OHT 試験解析に適用する場合、図 3(a)に示すような二次元モデルを厚さ方向に押し出し、図 3(b)に示す三次元モデルを作成する。また、図 3(c)に示すように二次元モデルにおいて設定したき裂線でマトリクス割れをモデル化し、層間にインターフェース要素を定義する。

Fig. 1 Crack modeling by the level set XFEM in 2D space.

Fig. 2 Semi-structured 3D pentahedral elements.

(a) 2D triangular elements and cracks

(b) 3D pentahedral elements

(c) Modeling for matrix cracks

Fig. 3 Modeling for OHT test analysis by using quasi-3D XFEM.

2・2 結合力モデル

2・2・1 Zig-zag 型結合力モデル(ZCZM)

CFRP 積層板の層間はく離およびマトリクス割れをモデル化するために, Camanho ら (2003)により, 損傷界面における結合力と等価相対変位の関係を二直線で近似する CZM が提案されている. この方法では開口モードの相対変位 $\tilde{u}_1$, セン断モードの相対変位をそれぞれ $\tilde{u}_2$, $\tilde{u}_3$ と表すとき, 混合モード下での等価相対変位 δ_m を次式のように定義する. ここに, $\langle \cdot \rangle$ は Macauley の演算子である.

$$\delta_m = \sqrt{\langle \tilde{u}_1 \rangle^2 + \tilde{u}_2^2 + \tilde{u}_3^2} \quad (3)$$

界面におけるバイリニア CZM の等価相対変位と結合力の関係を図 4(a)に示す. 図 4(a)に示されるように, 等価相対変位 δ_m^O が損傷条件 δ_m^O を満たすと損傷が発生し, 以降結合力が低下し軟化過程をたどる. さらに, δ_m^F を達すると, 結合力が喪失し損傷進展が開始するとみなす. 本論文では, 損傷進展条件としてべき乗則を仮定し, δ_m^O と δ_m^F を次式で与える.

$$\delta_m^O = \frac{1}{k} \left\{ \left(\frac{m_I}{\sigma_{I\max}} \right)^2 + \left(\frac{m_{shear}}{\sigma_{II\max}} \right)^2 \right\}^{-\frac{1}{2}} \quad (4.1)$$

$$\delta_m^F = \frac{2}{k\delta_m^O} \left\{ \left(\frac{m_I^2}{G_{IC}} \right)^\alpha + \left(\frac{m_{shear}^2}{G_{IIC}} \right)^\alpha \right\}^{-\frac{1}{\alpha}} \quad (4.2)$$

$$m_I = \frac{\langle \tilde{u}_1 \rangle}{\delta_m}, \quad m_{shear} = \frac{\tilde{u}_{shear}}{\delta_m}, \quad \tilde{u}_{shear} = \sqrt{\tilde{u}_2^2 + \tilde{u}_3^2} \quad (4.3)$$

ここに k は, 損傷発生点までの相対変位と結合力の関係を与えるペナルティ剛性, $\sigma_{I\max}$, $\sigma_{II\max}$ は引張強度およびせん断強度, G_{IC} , G_{IIC} はそれぞれの破壊エネルギー, α はべき乗則に関するパラメータである.

このようなバイリニア型 CZM を用いた損傷進展解析においては, 結合力の軟化過程における負の接線剛性のために, ニュートン・ラフソン法に基づく静的陰解法では収束が困難になる場合がある. Ridha ら (2014)は CDM に基づく損傷モデルにおいて負の接線剛性を持たない Zig-zag 型軟化則を用いる方法を提案している. そこで, 図 4(b)に示すような Zig-zag 型軟化則を CZM に導入することにより, 収束性を改善する (Higuchi et al., 2017; 島崎, 長嶋, 2017; 王, 長嶋, 2020). ZCZM の破壊エネルギーを通常のバイリニア CZM と等価に保つために, 面積 G_L と G_R が等しくなるように設定する. また, δ_m を次式のように与える.

$$\delta_m^C = (1+c)\delta_m^B = (1+c)^2\delta_m^A \quad (5)$$

ここに, c は軟化過程における Zig-zag 形状の振幅についての調整パラメータである.

Fig. 4 Relation between traction and equivalent displacement of CZM.

2・2・2 Zig-zag 型 Enhanced 結合力モデル (ZECZM)

CFRP 積層材の層間はく離やマトリクス割れに対して、せん断強度がき裂面外方向の圧縮応力によって上昇することは実験により報告されている (Collings, 1974; De Teresa et al., 2004). また, Li ら (2008)は Mohr-Coulomb モデルに基づき, 上記の現象を考慮した静水圧依存型の CZM を提案しており, Sun ら (2016)は Abisset ら (2016)が実施した QSI 試験を対象とした解析にこのような CZM を導入している. 本稿での解析においてもこのような静水圧依存性の CZM を用いる. すなわち, 静水圧依存型の CZM において, このような CZM を損傷発生点の相対変位 δ_m^O , 損傷進展開始点の相対変位 δ_m^F を次式のように修正する.

$$\delta_m^O = \frac{1}{k} \left\{ \left(\frac{m_I}{\sigma_{I\max}} \right)^2 + \left(\frac{m_{shear}}{\sigma_{II\max}^*} \right)^2 \right\}^{-\frac{1}{2}} \quad (6.1)$$

$$\delta_m^F = \frac{2}{k\delta^O} \left\{ \left(\frac{m_I^2}{G_{IC}} \right)^\alpha + \left(\frac{m_{shear}^2}{G_{IIC}^*} \right)^\alpha \right\}^{-\frac{1}{\alpha}} \quad (6.2)$$

$$\sigma_{II\max}^* = \sigma_{II\max} + \eta \langle -t_I \rangle \quad (6.3)$$

$$G_{IIC}^* = G_{IIC} \left(\frac{\sigma_{II\max}^*}{\sigma_{II\max}} \right)^2 \quad (6.4)$$

ここに, $\sigma_{II\max}^*$ と G_{IIC}^* は静水圧依存性を考慮したモード II の強度および破壊エネルギーで, η は面外垂直応力に関連する摩擦係数である.

式(6.3)において, き裂面に垂直なモード I の結合力 σ_I が負の場合, すなわちき裂面が圧縮力を受けると, モード II の強度 $\sigma_{II\max}^*$ が線形に上昇すると仮定している. また, Li ら (2008)の研究を参考にして, 静水圧を考慮した CZM の軟化過程を図 5 に示すように静水圧依存性を考慮しない場合と平行であると仮定し, 破壊エネルギー G_{IIC}^* を式(6.4)に示すよう増加させる. さらに, 本稿の解析では, 静水圧依存型の結合力モデルを静的陰解法 XFEM に適用するために, Zig-zag 軟化則を導入し, Zig-zag Enhanced Cohesive Zone Model (ZECZM)と呼ぶことにする.

Fig. 5 Relation between traction and equivalent displacement of ZECZM.

3. 数値解析

3・1 解析対象

Abisset ら (2016)は, 表 1 に示す 4 種類の擬似等方性積層板を対象とし, 図 6 に示すように ASTM-D7136 試験で用いる装置を用い, 積層板の中央部に直径 d の剛体球面圧子を面外方向から変位制御で準静的な押し込みを与える試験を実施した. Is ケースは, Ref ケースの長さ a と幅 b を 2 倍した試験片である. Ps ケースは, Is ケース

と同じ積層構成で各層厚を2倍にしたことで、試験片の板厚を変換する。Ss ケースは、Is ケースの積層構成を2回反復することで、Ps ケースと同じ板厚にする。ここでは、Ref と Ps の2 ケースを対象とし、静的陰解法による準三次元 XFEM 解析の妥当性を検証する。実験では、図7に示すようなマトリクス割れと層間はく離によって発生する第1荷重低下および繊維破断と層間はく離によって第2荷重低下が確認されているが、本解析では第1荷重低下点前後の損傷形態に注目する。

Table 1 Characteristics of CFRP laminates in QSI tests.

Test case	$a \times b/\text{mm}$	$h_{\text{plate}}/\text{mm}$	$\phi d/\text{mm}$	Stack sequence
Reference (Ref)	75×50	2	8	$[45/0/90/-45]_{2s}$
In-plane scaling (Is)	150×100	2	16	$\uparrow$
Ply-blocking scaling (Ps)	$\uparrow$	4	$\uparrow$	$\uparrow$
Sublamine scaling (Ss)	$\uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$	$[45/0/90/-45]_{4s}$

Fig. 6 Experimental configuration of QSI test.

Fig. 7 Load-displacement curves from experiment.

3・2 解析モデル

本稿では、準三次元 XFEM プログラム NLXP3D (Nagashima and Sawada, 2016; Higuchi et al., 2017; 島崎, 長嶋, 2017)を用いて、静的陰解法による損傷進展解析を実施する。解析で用いられる FEM と XFEM モデルを図8に示す。FEM モデルにおいては、積層板を8節点および6節点ソリッド要素でモデル化し、層間に8節点および6節点インターフェース要素を設定する。さらに、各層の繊維方向のマトリクス割れを想定した要素分割に対して二重節点を用いることにより、インターフェース要素を設定する。一方、XFEM モデルでは、二次元三角形要素を板厚方向に押し出すことによって得られる6節点ソリッド要素でモデル化し、層間に6節点インターフェース要素を設定する。各層の繊維方向のマトリクス割れは、XFEM の内挿関数を用いることにより要素分割と独立に設定可能である。また、いずれのモデルも圧子と積層板表面との接触を、2節点ギャップ要素を用いてモデル化する。

FEM によるマトリクス割れのモデル化は簡単ではないので、図9(a)に示すように各層に平板の中心点を通る位置に1本だけのマトリクス割れをモデル化する。一方、XFEM モデルにおいては、FEM と同様な1本のマトリクス割れモデルに加えて、Sun ら (2016)の解析モデルを参考にして、図9(b)(c)に示すように積層板の各層に、2または6本の複数本のマトリクス割れをモデル化する。その多数本のマトリクス割れの間隔は、損傷した試験片のX線CTスキャン画像 (Hallett and Sun, 2015)に基づいて図10に示すように設定する。2本のマトリクス割れモデルの各層では、中心点(荷重点)の両側に2つの平行な割れがあり、6本のマトリクス割れモデルの各層ではより広い帯域に6つの割れが均等に設定される。

Number of	Model	FEM	XFEM
Nodes		468,152	450,771
Hexahedral elements		225,600	0
Pentahedral elements		6,400	457,600
Quadrilateral interface elements		212,588	0
Triangular interface elements		6,000	429,000
Gap elements		632	609

(a) FEM model

(b) XFEM model

Fig. 8 Analysis models of Ref case.

Fig. 9 Matrix cracks model of Ref case.

Fig. 10 Spacing dimensions of splits of Ref case.

3・3 解析条件

解析に用いる積層板 (IM7/8552) の単層板および結合力モデルの物性値 (Sun et al., 2016) をまとめて表 2 に示す. 結合力モデルとして ZECZM を用いるが, 式(7)(8)で定義するパラメータ c , η をそれぞれ 0.001, 0.3 とする. 前報 (王, 長嶋, 2020) の結果により, c の値を変化させても, 解析結果に変化はほとんどなかった. また, η の値は Sun ら(2016)の解析を参考にして 0.3 に設定する. ASTM-D7136 の試験装置における平板の周辺部 4 箇所のゴム製のクリップによる支持を模擬するために, 図 11 に示すようなクリップの位置の節点を完全拘束する. 圧子と積層板表面との接触を模擬するギャップ要素のばね剛性 k_c を 10^8 N/mm とする. また, 積層板の大変形を模擬するための幾何学非線形性を考慮し, 圧子に鉛直下方へ強制変位 (1.5 mm: Ref ケース, 2.0 mm: Ps ケース) を与えて, 静的陰解法で増分解析を実施する.

Table 2 Material properties (IM7/8552).

Laminate		CZM	
E_L [GPa]	161	G_{IC} [N/mm]	0.2
E_T [GPa]	11.38	G_{IIC} [N/mm]	0.8
G_{LT} [GPa]	5.17	$\sigma_{I_{max}}$ [MPa]	60
G_{TT} [GPa]	3.98	$\sigma_{II_{max}}$ [MPa]	90
ν_{LT}	0.3	k [N/mm ²]	1.0×10^6
ν_{TT}	0.436	α	1
ρ [Ns ² /mm ⁴]	1.6×10^{-9}

Fig. 11 Constrained conditions of the CFRP laminate.

3・4 解析結果

3・4・1 解析手法の検証

Ref ケースについて, 1 本のマトリクス割れをモデル化する場合, ZCZM と ZECZM を考慮した FEM および XFEM モデルによって得られる荷重-荷重点変位 (LPD) の関係を図 12(a) に示す. ZCZM を用いた解析の結果において, 明らかな荷重低下点が得られなかったが, 荷重増加率が小さくなる点を荷重低下点と定義した. ZECZM の結果では, 明らかな低下が見られており, 低下点の荷重は上昇した. 同じ解析条件を用いた XFEM は FEM とほ

ば同じ挙動を与えている。一方, Ref ケースの荷重低下点直後において, 層内損傷の大きさおよび形状を可視化して図 12(b)に示す。XFEM は FEM と同様な形状や大きさの内部損傷を与えている。また, XFEM と FEM の損傷進展挙動を詳細に比較するために, ZECZM を考慮した解析結果の損傷進展様子を図 13 に比較して示す。二つのモデルに 0.84 mm の押し込みを与えると, 積層板の下面からマトリクス割れが生じ始める。続けて押し込み量 1.00 mm において, マトリクス割れが進展するとともに, 荷重点の周辺に層間はく離が発生する。さらに 1.40 mm まで押し込むと, 層間はく離が円形に進展する。XFEM と FEM の損傷進展形状はほとんど同じ結果となっている。

Fig. 12 Analysis results of the Ref case. To verify analysis methods, Four kinds of analysis considering only 1 split of matrix crack per ply using FEM/XFEM and ZCZM/ZECZM are performed. (a) shows relations between the load and the displacement, and (b) shows the damage distribution after 1st-drop-point. Those results show that FEM and XFEM give almost the same results for both CZM and ZECZM.

Fig. 13 Damage propagation of Ref case by using FEM and XFEM (1 split / ZECZM). Damage distribution including delamination and matrix cracks obtained by the FEM and XFEM considering only 1 split of matrix crack per ply are shown for 0.84 mm, 1.00, 1.20mm and 1.40 mm of LPD. XFEM gives almost the same results as FEM.

3・4・2 実験結果 (Hallett and Sun, 2015; Abisset et al., 2016) との比較

QSI 試験解析においては, 多数本のマトリクス割れを考慮する必要がある。FEM でも多数本のマトリクス割れをモデル化できるが, 容易ではなく, XFEM を利用する。本稿は Ref ケースを対象として, 準三次元 XFEM で CZM の種類およびマトリクス割れの本数を変更した解析によって得られる荷重-変位関係を, 実験結果と比較し図 14(a)に示す。いずれのケースも実験結果を概ね再現しているが, 詳細に比較するために各ケースの荷重低下点を図 14(b)にまとめる。1本のマトリクス割れモデルで, ZCZM および ZECZM を用いた解析結果の荷重低下点は, 実験結果と-20.75%および 10.23%の差異がある。ZECZM を考慮した場合の荷重低下点は ZCZM を用いた場合よ

り大幅に上昇して、実験結果にも近くなっている。また、マトリクス割れの本数が増加すると、解析結果の荷重低下点が下がり、実験結果との差異が小さくなる傾向がみられ、6本のマトリクス割れモデルの結果は5%以内に収まっている。したがって、面外荷重を受ける QSI 試験解析に対して、静水圧依存性を考慮した CZM および多数本のマトリクス割れモデルは不可欠であると考えられる。

また、各ケースの荷重低下点直後の損傷形状を図 14(c)にまとめる。図 14(c)に示す解析結果を実験から得られた損傷と比較すると、解析結果の損傷の大きさは実験と概ね一致していることを確認できる。XFEM 解析による多数本のマトリクス割れモデルの優位性を議論するために、ここでは、1本と6本のマトリクス割れモデルをとり、荷重低下点直後の点において、14箇所の層間における損傷を可視化して、図 15(b)(c)にまとめる。また、公開されている X 線 CT 画像 Hallet ら (2015)に示される実験結果における各層の損傷に図 15(a)に示すように色を付け、解析結果と比較する。実験の損傷形状をよく再現できる結果を“○”で、概ね再現できる結果を“△”で、実験との差異が大きな結果を“×”で記す。6本のマトリクス割れモデルは、1本のマトリクス割れモデルと比較してよく整合する結果を与えている。例えば、3rd 0/90 interface, 2nd -/+ interface, 4th 90/-45 interface と 4th 0/90 interface の 4 箇所の層間において、6本マトリクス割れモデルの方が、損傷をよく再現している。したがって、ZECZM を考慮した XFEM を用い、CFRP 積層板に 6本マトリクス割れをモデル化することで、QSI 試験の Ref ケースの力学挙動や損傷を概ね再現できることが確認できる。

つぎに、Ps ケースを対象として、準三次元 XFEM を用い、ZECZM で 6本と 10本のマトリクス割れをモデル化し損傷進展解析を実施する。その解析結果から得られる荷重-変位関係を図 16 に示す。6本と 10本のマトリクス割れモデルによる解析結果を実験結果と比較すると概ね一致しており、荷重低下点の差異は1%以内である。また、6本のマトリクス割れモデルの荷重低下点直後の損傷分布を実験と比較し図 17 に示す。解析において、いずれの層間においても、解析と実験結果は概ね整合している。

(a) Relation between load and LPD

(b) Critical load

(c) Delamination area after 1st-drop-point.

Fig. 14 Analysis results obtained by XFEM models compared to those by the experiment. (a) shows relations between the load and the displacement, (b) shows the critical load, and (c) shows the damage distribution after 1st-drop-point. The model with 6 splits of matrix cracks per ply gives the most consistent results with experiment.

(a) Experiment (Hallett and Sun, 2015)

(b) XFEM / 1 split / ZECZM

(c) XFEM / 6 splits / ZECZM

Fig. 15 Damage distributions for each interface obtained by XFEM model considering 1-split and 6-splits model are compared with those by the experiment. The correlations between the numerical result and the experiment are evaluated through the symbols including $\bigcirc$ (good), Δ (fair), and $\times$ (not good). Those results show that modeling 6 splits of matrix cracks per ply by XFEM give the most consistent results with experiment.

Fig. 16 Relations between load and LPD of Ps case obtained by XFEM modeling 6 and 10 splits of matrix cracks per ply are shown. The difference between 6- and 10-splits model is small, and both results are consistent with the experimental results.

Fig. 17 Damage distributions for each interface obtained by XFEM model considering 6-splits model are compared with those by the experiment. The correlations between the numerical result and the experiment are evaluated through the symbols including ○ (good), △ (fair), and × (not good). Those results show that modeling 6 splits of matrix cracks per ply by XFEM give the most consistent results with experiment.

4. 結 言

本稿では、CFRP 積層板の QSI 試験を対象とし、準三次元 XFEM による静的陰解法を用いて材料非線形性、幾何学非線形性、および境界非線形性を考慮した損傷進展解析を実施した。層あたり 1 本のマトリクス割れをモデル化した場合について、XFEM は FEM とほとんど同じ荷重-変位関係と損傷分布を与えることを示した。XFEM を用いることにより、積層板における多数本のマトリクス割れのモデル化が容易になる。層あたり 6 本以上のマトリクス割れをモデル化した XFEM 解析において、せん断強度の静水圧依存性を考慮した ZECZM を用いることによって、QSI 試験解析の精度が向上し、FEM と ZECZM を用いた前報 (王, 長嶋, 2020) と比較し、実験結果とよく一致する結果が得られた。今後は、本稿で示した方法を用いて複数の部材から構成される補強板構造へ適用し損傷を有する積層構造の CAI 試験解析を試みる。

謝 辞

本研究は NEDO 委託事業「複合材時代の理想機体構造を実現する機体設計技術の開発」の一部として行われた。記して感謝する。

文 献

- Abisset, E., Daghia, F., Sun, X.C., Wisnom, M.R. and Hallett, S.R., Interaction of inter- and intralaminar damage in scaled quasi-static indentation tests: Part 1 – Experiments, *Composite Structures*, Vol.136 (2016), pp. 712–726.
- Aoki, Y., Suemasu, H. and Ishikawa, T., Damage propagation in CFRP laminates subjected to low velocity impact and static indentation, *Advanced Composite Materials*, Vol.16 (2007), pp. 45–61.
- Borst, R. de, Remmers, J.J.C., Needleman, A. and Abellan, M.-A., Discrete vs smeared crack models for concrete fracture: bridging the gap, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.28 (2004), pp. 583–607.
- Camanho, P.P., Davila, C.G. and de Moura, M.F., Numerical simulation of mixed-mode progressive delamination in composite materials, *Journal of Composite Materials*, Vol.37 (2003), pp. 1415–1438.
- Collings, T.A., Transverse compressive behaviour of unidirectional carbon fibre reinforced plastics, *Composites*, Vol.5 (1974),

pp. 108–116.

- De Teresa, S.J., Freeman, D.C. and Groves, S.E., The effects of through-thickness compression on the interlaminar shear response of laminated fiber composites, *Journal of Composite Materials*, Vol.38 (2004), pp. 681–697.
- Hallett, S.R., Green, B.G., Jiang, W.G. and Wisnom, M.R., An experimental and numerical investigation into the damage mechanisms in notched composites, *Composites Part A*, Vol.40 (2009), pp. 613–624.
- Hallett, S.R., Jiang, W.-G., Khan, B. and Wisnom, M.R., Modelling the interaction between matrix cracks and delamination damage in scaled quasi-isotropic specimens, *Composites Science and Technology*, Vol.68 (2008), pp. 80–89.
- Hallett, S.R. and Sun, X.C., Interaction of inter- and intralaminar damage in scaled quasistatic indentation tests: X-ray CT-scan Images, University of Bristol (2015), available from <<https://doi.org/10.5523/bris.12gx6827n337u1dxy6iilf3t1f>>, (参照日 2020 年 11 月 14 日).
- Harper, P.W. and Hallett, S.R., Cohesive zone length in numerical simulations of composite delamination, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.75 (2008), pp. 4774–4792.
- Higuchi, R., Okabe, T. and Nagashima, T., Numerical simulation of progressive damage and failure in composite laminates using XFEM/CZM coupled approach, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol.95 (2017), pp. 197–207.
- Jiang, W.-G., Hallett, S.R., Green, B.G. and Wisnom, M.R., A concise interface constitutive law for analysis of delamination and splitting in composite materials and its application to scaled notched tensile specimens, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol.69 (2007), pp. 1982–1995.
- Lapczyk, I. and Hurtado, J.A., Progressive damage modeling in fiber-reinforced materials, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *CompTest 2006*, Vol.38 (2007), pp. 2333–2341.
- Li, X., Hallett, S.R. and Wisnom, M.R., Predicting the effect of through-thickness compressive stress on delamination using interface elements, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol.39 (2008), pp. 218–230.
- Moës, N., Dolbow, J. and Belytschko, T., A finite element method for crack growth without remeshing, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol.46 (1999), pp. 131–150.
- Nagashima, T., Three-dimensional crack analyses under thermal stress field by XFEM using only the Heaviside step function, *Mechanical Engineering Journal*, Vol. 7, No. 4 (2020), DOI: 10.1299/mej.20-00098.
- 長嶋利夫, 近藤幸弘, 末益博志, X-FEM による複合材料積層板の応力解析, *日本機械学会論文集 A 編*, Vol. 70, No. 691 (2004), pp. 391–398.
- 長嶋利夫, 澤田昌孝, き裂先端要素を用いた XFEM による二次元き裂解析, *日本機械学会論文集 A 編*, Vol. 78, No. 796 (2012), pp. 1642–1655.
- Nagashima, T. and Sawada, M., Development of a damage propagation analysis system based on level set XFEM using the cohesive zone model, *Computers & Structures*, Vol.174 (2016), pp. 42–53.
- 岡部朋永, 大林茂, 低コスト機体開発を実現するための数値シミュレーション技術開発, 第 54 回飛行機シンポジウム, JSASS-2016-5114 (2016).
- Ridha, M., Wang, C.H., Chen, B.Y. and Tay, T.E., Modelling complex progressive failure in notched composite laminates with varying sizes and stacking sequences, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol.58 (2014), pp. 16–23.
- 島崎紗緒里, 長嶋利夫, 結合力モデルを用いた準三次元 XFEM による CFRP 積層板の損傷進展解析, *日本計算工学会論文集*, Vol.2017 (2017), Paper No. 20170008.
- Sun, X.C., Wisnom, M.R. and Hallett, S.R., Interaction of inter- and intralaminar damage in scaled quasi-static indentation tests: Part 2 – Numerical simulation, *Composite Structures*, Vol.136 (2016), pp. 727–742.
- 王晨宇, 長嶋利夫, Zig-zag 型結合力モデルを用いた FEM による CFRP 積層板の準静的押し込み試験解析, *日本計算工学会論文集*, Vol.2020 (2020), Paper No. 20200009.

References

- Abisset, E., Daghia, F., Sun, X.C., Wisnom, M.R. and Hallett, S.R., Interaction of inter- and intralaminar damage in scaled quasi-static indentation tests: Part 1 – Experiments, *Composite Structures*, Vol.136 (2016), pp. 712–726.
- Aoki, Y., Suemasu, H. and Ishikawa, T., Damage propagation in CFRP laminates subjected to low velocity impact and static indentation, *Advanced Composite Materials*, Vol.16 (2007), pp. 45–61.
- Borst, R. de, Remmers, J.J.C., Needleman, A. and Abellan, M.-A., Discrete vs smeared crack models for concrete fracture: bridging the gap, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.28 (2004), pp.

583–607.

- Camanho, P.P., Davila, C.G. and de Moura, M.F., Numerical simulation of mixed-mode progressive delamination in composite materials, *Journal of Composite Materials*, Vol.37 (2003), pp. 1415–1438.
- Collings, T.A., Transverse compressive behaviour of unidirectional carbon fibre reinforced plastics, *Composites*, Vol.5 (1974), pp. 108–116.
- De Teresa, S.J., Freeman, D.C. and Groves, S.E., The effects of through-thickness compression on the interlaminar shear response of laminated fiber composites, *Journal of Composite Materials*, Vol.38 (2004), pp. 681–697.
- Hallett, S.R., Green, B.G., Jiang, W.G. and Wisnom, M.R., An experimental and numerical investigation into the damage mechanisms in notched composites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol.40 (2009), pp. 613–624.
- Hallett, S.R., Jiang, W.-G., Khan, B. and Wisnom, M.R., Modelling the interaction between matrix cracks and delamination damage in scaled quasi-isotropic specimens, *Composites Science and Technology*, Vol.68 (2008), pp. 80–89.
- Hallett, S.R. and Sun, X.C., Interaction of inter- and intralaminar damage in scaled quasistatic indentation tests: X-ray CT-scan Images, University of Bristol (2015), available from <<https://doi.org/10.5523/bris.12gx6827n337u1dxy6iilf3t1f>>, (accessed on 14 November, 2020).
- Harper, P.W. and Hallett, S.R., Cohesive zone length in numerical simulations of composite delamination, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.75 (2008), pp. 4774–4792.
- Higuchi, R., Okabe, T. and Nagashima, T., Numerical simulation of progressive damage and failure in composite laminates using XFEM/CZM coupled approach, *Composites Part A*, Vol.95 (2017), pp. 197–207.
- Jiang, W.-G., Hallett, S.R., Green, B.G. and Wisnom, M.R., A concise interface constitutive law for analysis of delamination and splitting in composite materials and its application to scaled notched tensile specimens, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol.69 (2007), pp. 1982–1995.
- Lapczyk, I. and Hurtado, J.A., Progressive damage modeling in fiber-reinforced materials, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *CompTest* 2006, Vol.38 (2007), pp. 2333–2341.
- Li, X., Hallett, S.R. and Wisnom, M.R., Predicting the effect of through-thickness compressive stress on delamination using interface elements, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol.39 (2008), pp. 218–230.
- Moës, N., Dolbow, J. and Belytschko, T., A finite element method for crack growth without remeshing, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol.46 (1999), pp. 131–150.
- Nagashima, T., Three-dimensional crack analyses under thermal stress field by XFEM using only the Heaviside step function, *Mechanical Engineering Journal*, Vol. 7, No. 4 (2020), DOI: 10.1299/mej.20-00098.
- Nagashima, T., Kondo, Y. and Suemasu, H., Stress analysis of composite laminate using X-FEM, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol. 70, No. 691 (2004), pp. 391–398 (in Japanese).
- Nagashima, T. and Sawada, M., Two-Dimensional crack analyses by XFEM using crack tip elements, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol. 78, No. 796 (2012), pp. 1642–1655 (in Japanese).
- Nagashima, T. and Sawada, M., Development of a damage propagation analysis system based on level set XFEM using the cohesive zone model, *Computers & Structures*, Vol.174 (2016), pp. 42–53.
- Okabe, T. and Obayashi, S., Development of numerical simulation methods for cost-effective aircraft design, *Proceedings of the 54th Aircraft Symposium, JSASS-2016-5114* (2016) (in Japanese).
- Ridha, M., Wang, C.H., Chen, B.Y. and Tay, T.E., Modelling complex progressive failure in notched composite laminates with varying sizes and stacking sequences, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol.58 (2014), pp. 16–23.
- Shimazaki, S. and Nagashima, T., Damage propagation analysis of CFRP laminate by quasi-3D XFEM using cohesive zone models, *Transactions of the Japan Society for Computational Engineering and Science*, Vol.2017 (2017), Paper No. 20170008 (in Japanese).
- Sun, X.C., Wisnom, M.R. and Hallett, S.R., Interaction of inter- and intralaminar damage in scaled quasi-static indentation tests: Part 2 – Numerical simulation, *Composite Structures*, Vol.136 (2016), pp. 727–742.
- Wang, C. and Nagashima, T., Quasi-Static indentation test analyses of CFRP laminate by FEM using zig-zag type cohesive zone models, *Transactions of the Japan Society for Computational Engineering and Science*, Vol.2020 (2020), Paper No. 20200009 (in Japanese).