

連続体シェル要素を用いたXFEMによる CFRTP積層板のCAI試験解析

CAI test analysis of CFRTP laminate by XFEM using continuum shell elements

長嶋 利夫¹⁾

Toshio Nagashima

1) 博(工) 上智大学理工学部 (〒102-8554 東京都千代田区紀尾井町7-1, E-mail: nagashim@sophia.ac.jp)

This study applies an extended finite element method (XFEM) using continuum-based shell elements to CAI (Compression After Impact) test analyses of CFRTP (Carbon Fiber Reinforced Thermo Plastics) laminate. An eight-node quadrilateral interface element and an eight-node hexahedral continuum shell element enriched with only the Heaviside function are used to model delamination and matrix cracks, respectively. In addition, the zig-zag cohesive zone model is employed for delamination, and matrix cracks are used to perform the implicit analysis successfully. The numerical results are compared with the experiment for validation and discussed

Key Words: XFEM, Continuum shell element, Cohesive zone model, Damage propagation, CFRTP, CAI

1. はじめに

有限要素と独立にき裂形状を定義できる拡張有限要素法 (the eXtended FEM, 以下XFEM) が、構造物のき裂解析やき裂進展解析に用いられるようになっていく。著者は、これまでXFEMに基づく解析プログラムを内製し、鋼構造の疲労き裂進展解析や炭素繊維強化プラスチック (Carbon Fiber Reinforced Plastic: 以下CFRP) 積層構造の損傷進展解析に適用している。これらの解析においては、通常のFEMで用いられる三次元ソリッド要素の形状関数に、き裂による変位の不連続性を考慮できる基底関数を拡充している。また、著者はCFRP積層平板の損傷進展解析に、二次元モデルを板厚方向に押し出すことによって得られる三次元モデルを用いた準三次元XFEM[1-4]を提案して用いているが、この方法では平面状の構造しか扱えないという制限がある。実機で用いられるような曲率を有する形状を含む構造を対象とする場合には完全な三次元XFEMが望ましいが、ソリッド要素を用いたXFEMにおいて、要素を切断するき裂面のパターンをすべて数え上げ、要素再分割 (パーティション) することはさほど簡単ではなく、著者はプログラム実装を完了できていない。

本研究では、曲率を有する薄肉構造のき裂解析に適用可能な三次元要素を用いたXFEMの開発を目的としている。そこで、8節点連続体シェル要素[5]にXFEMを適用することを検討する。提案方法においては8節点ソリッド要素とき裂面との切断面を直接扱うのではなく、薄肉構造を想定して連続体シェル要素の中立面とき裂面との切断線をき裂線として扱う。このような近似により、切断パターンの数を大幅に減らすことができる。本稿は、現在開発中の、連続体シェル要素を用いたレベルセットXFEMコー

ド(NLXSC8)の定式化の概要と、熱可塑性CFRP (CFRTP: Carbon Fiber Reinforced Thermo Plastic) 積層平板の衝撃後圧縮 (CAI: Compression After Impact) 問題に適用した結果を示す。

2. 解析手法

(1) 不連続面を含む8節点連続体シェル要素

8節点連続体シェル要素についての変位場は、8節点ソリッド要素と同じ次式を用いて近似する。

$$\mathbf{u}^h = \sum_{I=1}^8 N_I(r_1, r_2, r_3) \mathbf{u}_I + \sum_J N_J(r_1, r_2, r_3) \mathbf{a}_J (F(\mathbf{x}) - F(\mathbf{x}_J)) \quad (1)$$

ここに \mathbf{u}_I は節点 I における変位ベクトル、 N_I は内挿関数、 r_1, r_2, r_3 は六面体要素の自然座標、 $F(\mathbf{x})$ は変位場の不連続性を表す拡充関数で-1から1の間の値をとり、 \mathbf{a}_J は拡充関数についての自由度である。

これらの値は、要素中立面とレベルセット法により近似される不連続面との切断パターンから決定される。要素内に不連続面を含む場合には、6面体要素を複数の5面体領域に分割し、その領域毎に積分を実施する。

(2) 層間はく離と樹脂損傷のモデル化

結合力モデル (Cohesive Zone Model: CZM) は、応力に基づく損傷の発生とエネルギーに基づく損傷の進展を模擬することができる。層間はく離や樹脂損傷が生じる可能性がある部分にインターフェース要素や不連続面を設定した上でCZMを導入する。FEMについてはインターフェース要素の積分点において、XFEMについては要素内の不連続面に設けられた積分点において、き裂面に作用する結合力とき裂面の相対変位の関係を与える。本研究では、混合モードにも対応できるバイリニア型のCZMを

用いる．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ので、Zig-zag 型軟化則をCZMに導入することにより収束性を改善している[2-4]．

(3) 衝撃損傷の導入

面外押し込み試験解析の実施後、インターフェース要素や不連続面における積分点での損傷変数を出力して保存し、圧縮試験解析モデルに初期損傷として入力することで衝撃損傷を模擬する．

(4) 開発コード

本研究では前述のような手順に基づき、8節点連続体シェル要素を用いた内製XFEMコードNLXSC8を開発した．

3. CFRTP積層板のCAI試験解析

(1) 解析対象

幅100 mm、長さ150 mm、板厚3.312 mm、積層構成[45/0/-45/90]_{3S} を有する24層のCFRTP積層板の衝撃損傷付与試験とそれに続く圧縮試験(図1)を解析対象[6]とする．CFRTP積層板の材料はT700G/LM-PAEKであり、その材料物性値(弾性率、結合力モデルパラメータ、強度)[7]をまとめて表1に示す．

(2) 有限要素モデルおよび境界条件

8節点連続体シェル要素でモデル化された積層板の層間にインターフェース要素を挿入して層間はく離をモデル化する．また、XFEMの機能を用いて各層において繊維方向に多数の樹脂割れをモデル化する．

a) 面外押し込み試験解析

図2に面外押し込み試験解析に用いる有限要素モデル(節点数：約55万、要素数：約54万)を示す．平板表面上部中央に直径16 mmの球面圧子を接触させ、鉛直下方へ強制変位を与えて、静的陰解法で損傷進展解析を実施する．

b) 衝撃後圧縮試験解析

図3に衝撃後圧縮試験解析に用いる有限要素モデルを示す．衝撃付与試験後、平板中央に発生した深さ0.358 mmのへこみ(デント)[6]を考慮している．面外押し込み試験解析で得られた損傷を初期損傷として考慮し、面内圧縮方向へ強制変位を与えて、静的陰解法で損傷進展解析を実施する．

(3) 解析結果

a) 面外押し込み試験解析

面外押し込み試験解析結果から得られる荷重点変位(LPD)と荷重との関係を実験結果と比較して図4に示す．

図4には、積層板に与える単位厚さ当たりの衝撃エネルギー C_e が、3.0J/mm、6.7J/mm、8.0J/mm の場合に対応するLPDにおける円形状損傷を載せている．LPDと荷重の関係は、 C_e が3.0J/mm以下の場合には、実験結果と解析結果との整合は良好であるが、それ以上の場合には荷重を過大評価している．

b) 衝撃後圧縮試験解析

圧縮試験解析結果から得られる圧縮ひずみと圧縮応力との関係を実験結果[6]と比較して図5に示す．積層平板の層間にはく離と樹脂割れをCZMでモデル化した場合を記号w/o CDMで示す．この場合、収束計算が破綻し解析が停止する応力は380 MPa程度となり実験結果(280 MPa)よりもかなり高い結果となった．そこで、繊維の圧縮破壊に関して、連続体損傷モデル(CDM)[8]を導入した．荷重低下点(CAI強度)は310 MPaとなり、実験結果に近づいた．最大荷重点における0度層の繊維の圧縮破断に関するCDMの損傷変数 d_{ic} 分布を図6に示す．

そこで、図7に示すように、CDMを用いない解析モデル(w/o CDM)による増分計算において、繊維方向の圧縮応力が強度(928.2 MPa)を越える領域の体積をモニターし、その値が急激に増加するひずみを定め、そのときの応力をCAI強度として評価することを試みた(SVR法)．この方法により評価したCAI強度は281 MPaとなり、実験結果と良く整合する結果が得られた．

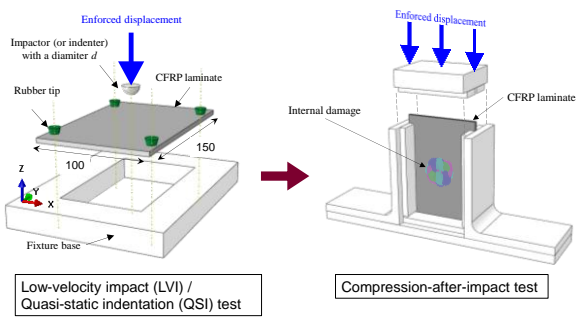


Fig.1 LVI/QSI and CAI tests.

Table 1. Material properties of T700G/LM-PAEK.

Elastic modulus		Cohesive zone model		Strength	
E_L [GPa]	127.5	G_{IC} [N/mm]	1.5	Longitudinal [MPa]	
tension		G_{IIC} [N/mm]	2.35	tension	3106.7
compression	102.1	σ_{IMAX} [MPa]	77.8	compression	928.2
E_T [GPa]	8.4	σ_{IIMAX} [MPa]	100.4	Transverse [MPa]	
tension	7.6	k [N/mm ²]	1.0×10^5	tension	77.8
compression		α	1.0	compression	175.5
G_{LT} [GPa]	4.5				
G_{TT} [GPa]	3.0				
ν_{LT}	0.32				
ν_{TT}	0.4				

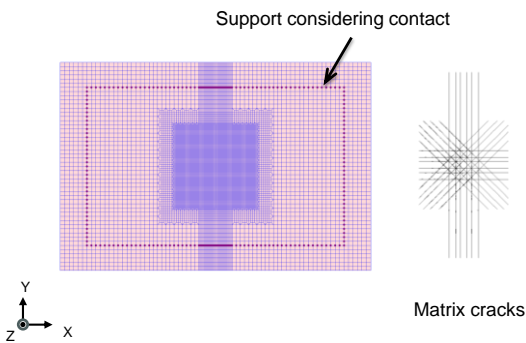


Fig.2 FE model with matrix cracks for QSI test analysis.

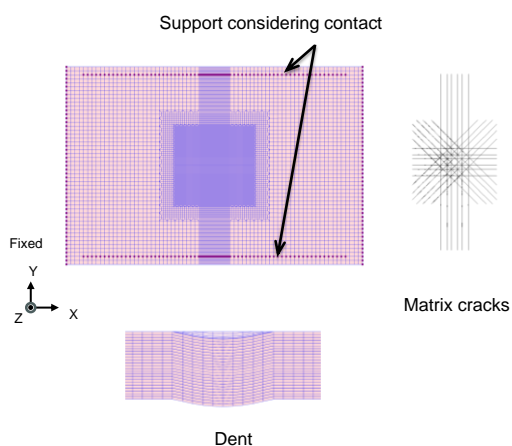


Fig.3 FE model with matrix cracks for CAI test analysis.

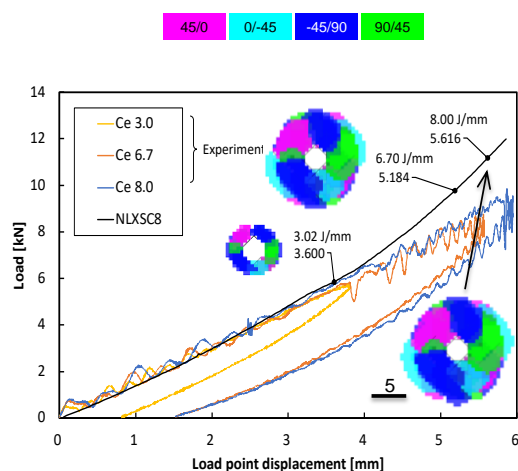


Fig.4 Results of QSI test analysis.

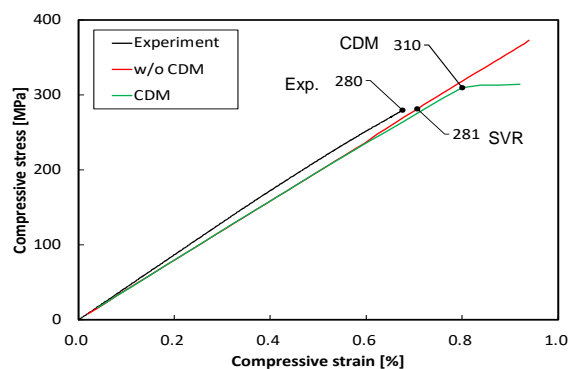


Fig.5 Results of CAI test analyses.

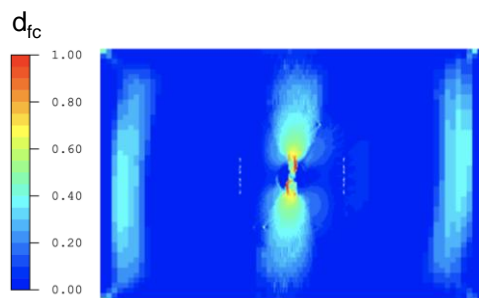
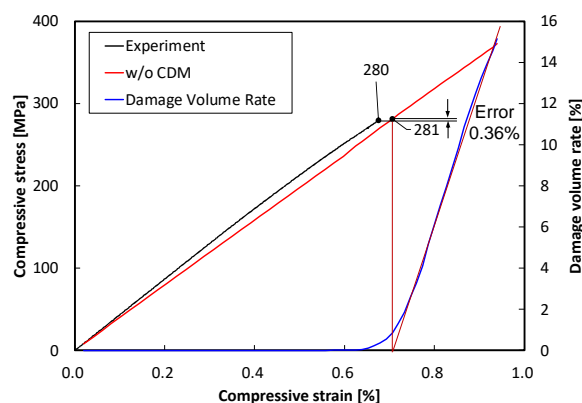
Fig.6 Distribution of damage parameter (d_{fc}) obtained by CAI test analysis using CDM.

Fig.7 Evaluation of CAI strength by SVR method.

4. おわりに

本稿では、CFRTP 積層平板を対象として、連続体シェル要素を用いた静的陰解法 XFEM による、低速衝撃試験と等価な QSI 試験解析とそれに続く CAI 試験解析を実施し、得られた圧縮強度 (CAI 強度) を実験結果と比較した。CAI 試験解析においては、繊維の圧縮破壊に関する CDM や、SVR 法により CAI 強度を評価した。

本研究は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務 (JPNP20010) の成果として得られたものである。記して感謝する。

参考文献

- [1] Nagashima, T., Sawada, M., Development of a damage propagation analysis system based on level set XFEM using the cohesive zone model, Computers and Structures, 174 (2016) 42-53.
- [2] 島崎, 長嶋: 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 (2017) Paper No.20170008.
- [3] Higuchi, R., Okabe, T., Nagashima, T., Numerical simulation of progressive damage and failure in composite laminates using XFEM/CZM coupled approach, Composites Part A, 95 (2017) 197-207.
- [4] Wang, C., Nagashima, T., Damage propagation analysis of CFRP laminate by quasi-3D XFEM using hexahedral elements, Composite Structures, 316 (2023) 117024.
- [5] Klinkel, S., Gruttmann, F., Wagner, W., A continuum based three-dimensional shell element for laminated structures, Computers and Structures, 71 (1999) 43-62.
- [6] Nagumo, Y., Hamanaka, M., Shirasu, K., Ryuzono, K., Yoshimura, A., Tohmyoh, H., Okabe, T., Fracture mechanism of carbon fiber-reinforced thermoplastic composite laminates under compression after impact, Journal of Composite Materials, 58-11(2024) 1377-1390.
- [7] Shirasu, K., Tsuyuki, J., Higuchi, R., Onodera, S., Okabe, T., Experimental and numerical study on open-hole tension/compression properties of carbon-fiber-reinforced thermoplastic laminates, Journal of Composite Materials, 56-14 (2022) 2211-2225.
- [8] Lapczyk, I., Hurtado, J.A., Progressive damage modeling in fiber-reinforced materials, Composites Part A, 38 (2007) 2333-2341.