

六面体要素を用いた準三次元XFEMによる CFRTP積層板のQSI試験解析

QSI test analysis of CFRTP laminate
by quasi three-dimensional XFEM using hexahedral elements

長嶋利夫¹⁾, 王晨宇²⁾

Chenyu Wang and 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)

2) 博(工) 元上智大学大学院 (〒102-8554 東京都千代田区紀尾井町7-1, E-mail: wangchenyu@eagle.sophia.ac.jp)

Recently, Carbon Fiber Reinforced Thermoplastics (CFRTP) have been studied as an alternative to CFRP due to its high fracture toughness, short manufacturing time, and recyclability. In this study, a quasi-static indentation (QSI) test analysis of CFRTP laminate were performed by quasi three-dimensional XFEM using hexahedron elements. In XFEM, cracks can be modeled independently of finite elements through approximation functions. In the numerical models, interface elements considering cohesive zone model (CZM) are introduced to model delamination. The results including relation between load point displacement and applied load, and total delamination area obtained by analysis are shown and compared with the results of a CFRP laminate.

Key Words : CFRTP, QSI test, Cohesive zone model, Damage propagation, XFEM, Implicit method

1. はじめに

炭素繊維強化プラスチック (Carbon Fiber Reinforced Plastics: CFRP) は、高比剛性・高比強度を有しているため、航空機の軽量化構造に多用されている。しかしながら、CFRP積層板は面外方向からの荷重に弱く、積層板の内部に複雑な損傷が発生する可能性がある。このような損傷を有する積層構造の圧縮強度は低下する。そのため衝撃による損傷メカニズムを解明することは重要になる。しかしながら、衝撃試験では試験片内部の損傷の発生や進展を観察することはできないので、多くの研究者が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: QSI) に注目している。また、このような試験を数値シミュレーションで再現できれば、コスト削減に資することができる[1]。

一方、従来の熱硬化性樹脂を用いたCFRP材料は、優れた材料特性を持つ一方で、製造コストが高く、補修が複雑であるという欠点がある。近年、炭素繊維強化熱可塑性プラスチック (Carbon Fiber Reinforced Thermoplastics: CFRTP) は、高い破壊靱性、短い成形時間、およびリサイクル性により、熱硬化性CFRPの代替材料として注目されている[2]。

本稿では、CFRTP積層板を対象として、六面体要素を用いた準三次元拡張有限要素法 (XFEM) を用いて、QSI試験解析を実施し、得られる結果をCFRP積層板の結果と比較し、損傷特性を評価する。

2. 解析手法

(1) 損傷のモデル化

CFRTP積層板とCFRP積層板に生じる層間はく離、マト

リクス割れ、繊維破断などの複雑な損傷進展を模擬するには、損傷モデルを用いる必要がある。層間はく離が生じる領域は、プライ層間に限定される。したがって、連続体要素でモデル化された積層板の層間に結合力モデル (Cohesive Zone Model: CZM) を考慮したインターフェース要素を挿入し、層間はく離をモデル化する。一方、各層の繊維方向にマトリクス割れが発生すると想定される位置で、XFEMを用いて有限要素とは独立にマトリクス割れをモデル化する。なお、本稿で示す解析では、繊維破断を考慮しない。

(2) Zig-zag型Enhanced結合力モデル (ZECZM)

積層板の層間はく離およびマトリクス割れを模擬するために、Zig-zag型Enhanced結合力モデル (ZECZM) を用いる。静的陰解法における収束性を改善するために、Zig-zag型軟化則を導入する。また、解析精度を向上させるために、せん断強度の静水圧依存性を考慮する。

(3) 解析システム

本研究では内製準三次元XFEMプログラムNLXQ3Dを用いる。NLXQ3Dでは、二次元四角形要素を板厚方向に押し出して得られる三次元8節点6面体要素によるFEMモデルを用いる。CFRP積層板のマトリクス割れは、XFEMの内挿関数で表現され、各層間には自動的に板厚を持たないインターフェース要素が挿入される。マトリクス割れと層間はく離の界面にはCZMが導入される。内製コードでは、通常のバイリニア型CZMに加え、Zig-zag CZMも実装され、静的陰解法を用いた損傷進展解析が可能である。

3. 数値解析

(1) 解析対象

本稿では厚さ3.312 mmのCFRTP積層平板（T700G/LM-PAEK）と厚さ4.560 mmの熱硬化性CFRP積層平板（T800S/#3900-2B）の6.7 J/mmの落錘試験に相当するQSI試験を対象とする。各試験片の面内寸法は150 mm × 100 mmであり、積層構成は[45/0/−45/90]_{3S}である。図1に示すようにASTM-D7136試験で用いる装置を用い、中央部に剛体球面圧子を面外方向から準静的な押し込みを与えた場合の試験を対象とする。

(2) 解析モデル

積層板の層間にインターフェース要素を挿入して層間にはく離をモデル化する。また、各層において、XFEMを用いて、図2に示すように6本のマトリクス割れをモデル化する。解析に用いるCFRTPとCFRP材料としてT700G/LM-PAEKとT800S/#3900-2Bを想定し、弾性特性とCZMに用いる物性値をまとめて表1[2 - 4]に示す。

(3) 解析結果

解析結果の荷重点変位と荷重との関係を図3に示す。CFRP積層板の剛性は、CFRTPの剛性より高い。これは、CFRP積層板がCFRTPよりも厚いこと、CFRP積層板の繊維がCFRTPの繊維と異なることに起因する。また、解析における圧子の仕事-変位の関係を図4に示す。CFRTPとCFRPの解析では、圧子が6.7 J/mmの仕事をするのに必要な変位は5.088 mmと3.696 mmである。そこで、CFRTPとCFRPのQSI試験解析では、圧子変位がそれぞれ5.088mmと3.696mmに達したときの損傷分布を図5に示す。損傷面積の比較では、CFRTPでより小さな損傷面積が発生していることから、CFRTPはCFRPよりも衝撃荷重に強いという結果が得られた。

4. おわりに

本稿では、CFRTP積層板を対象として、六面体要素を用いた準三次元拡張有限要素法（XFEM）を用いて、QSI試験解析を実施し、得られた変位－荷重関係と損傷様子をCFRP積層板の結果と比較した。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。

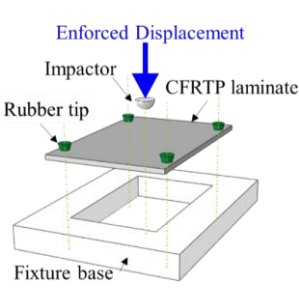


Fig.1 QSI test.

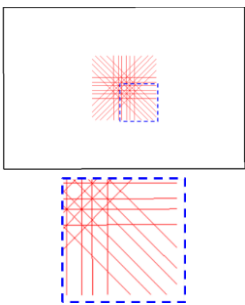


Fig.2 Modeling matrix crack.

Table.1 Material properties of CFRTP and CFRP [2 - 4].

Laminate (CFRTP/CFRP)		Cohesive zone (CFRTP/CFRP)	
E_L [GPa]	127.0 / 153.0	G_{Ic} [N/mm]	1.50 / 0.54
E_T [GPa]	8.36 / 8.0	G_{IIc} [N/mm]	2.35 / 1.64
G_{LT} [GPa]	4.46 / 4.03	σ_{lmax} [MPa]	77.8 / 47
G_{TT} [GPa]	2.98 / 2.75	σ_{llmax} [MPa]	100.4 / 100
ν_{LT}	0.32 / 0.34	k [N/mm ²]	1.0×10 ⁵
ν_{TT}	0.40 / 0.45	α	1

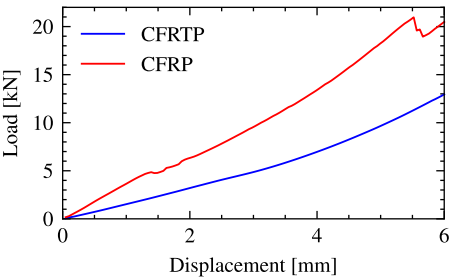


Fig.3 The relationship between displacement and load.

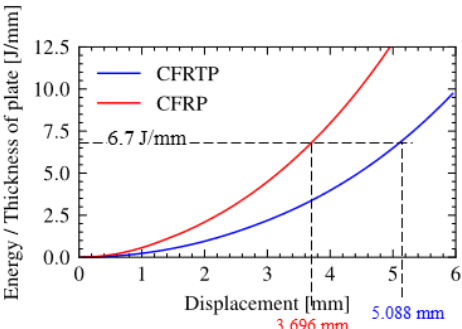


Fig.4 The relationship between displacement and work of indenter in numerical simulation.

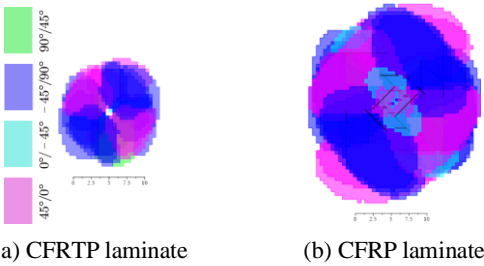


Fig.5 Damage distribution.

参考文献

[1] NEDO: 2015 年度~2019 年度成果報告書: 「次世代構造部材創製・加工技術開発」研究開発項目⑤, No. 20210000000093, 2020.

[2] Shirasu, K. et al.: Experimental and numerical study on open-hole tension/compression properties of carbon-fiber-reinforced thermoplastic laminates, *J. Compos. Mater.*, Vol.56, pp. 2211-2225, 2022.

[3] 森本ら: JAXA先進複合材料力学特性データベース: 改訂版, JAXA-RM-17-004, pp.1-230, 2018.

[4] 浜中ら: 熱可塑性CFRPの低速衝撃損傷特性評価, 第13回日本複合材料会議, 2022.