

平成 27 年 6 月 1 日現在

機関番号：32621

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560079

研究課題名(和文)XFEMによる複合材料構造の損傷進展解析手法の開発

研究課題名(英文)Development of damage propagation method for composite structures by XFEM

研究代表者

長嶋 利夫(NAGASHIMA, TOSHIO)

上智大学・理工学部・教授

研究者番号：10338436

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：拡張有限要素法(XFEM)を炭素繊維強化プラスチック(CFRP)積層板の損傷進展解析に適用した。提案手法においては、ヘビサイド関数だけを拡充した内挿関数が用いられる。き裂形状を二種類の符号付き距離関数(SDF)で近似し、き裂を含む要素をSDFの値にしたがっていくつかのパターンに分類し、拡充節点を決定する。XFEMによってメッシュ分割と独立にモデル化される不連続な変位場を含むき裂面に結合力モデル(CZM)が導入される。離散化方程式を解くために、陰解法および陽解法を用いる。このような手法に基づく解析プログラムを開発し、樹脂割れと層間はく離が連成したCFRPの破壊解析を実施し妥当な結果を得た。

研究成果の概要(英文)：The extended finite element method (XFEM) was applied to damage propagation analyses of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) laminates. The proposed method uses no asymptotic basis functions and uses only the Heaviside function. The crack geometry is approximated by two signed distance functions (SDFs). Elements that include a crack are then classified into several partitioned patterns according to nodal SDF values, and enriched nodes are determined. A cohesive zone model (CZM) is introduced to the crack line or the surface including a discontinuous displacement field modeled independently of finite elements by XFEM. In order to solve the discretized governing equations, the implicit method and the explicit dynamic method are used. Analysis codes were developed based on the proposed method and they were applied to the fracture analyses of CFRP laminates considering interaction between matrix cracks and delamination, and appropriate results were obtained.

研究分野：計算力学

キーワード：有限要素法 拡張有限要素法 損傷進展解析 CFRP 結合力モデル

1. 研究開始当初の背景

炭素繊維強化複合材料 CFRP は、その優れた比強度、比重特性ゆえに航空宇宙分野の構造材料として用いられている。CFRP 積層複合材料構造は、一方向に繊維強化されたマトリクスと呼ばれる樹脂の単層板からなる多層構造となっている。それゆえ、その損傷形態は、一般に樹脂割れ（マトリクス割れ）と接着層のはがれ（層間はく離）に分類され、実際の損傷はそれらが連成した複雑なものとなっている。このような積層複合材料構造の破壊現象を解明し航空宇宙構造物の設計に役立てることは非常に重要である。

実務における構造解析を実施するために有限要素法(Finite Element Method: FEM)が用いられている。積層複合材料構造の応力解析にも FEM が用いられ、もし損傷を考慮しないのであれば、設計用 CAD で構造物の形状を定義し、自動要素分割技術を用いて有限要素モデルを生成することによって容易に応力解析を行うことができるようになってきている。しかしながら、図 1 に示すようなマトリクス割れとはく離が組み合わさった複雑な損傷形状に対しては、CAD による形状定義は困難であり、損傷形状を考慮した FEM モデルの作成には多大な労力と時間を要しているのが実状である。また、積層複合材料構造の破壊現象は連続的に損傷領域が進展していくので、従来の FEM による応力解析の実施は非常に困難である。なぜなら、き裂やはく離形状は CAD データで直接表現されるものではなく、それらが進展するたびに自動要素分割プログラムを起動して要素分割する必要があるからである。このようなことが、既存の FEM 解析システムを用いた積層複合材料構造の損傷進展解析の実用化の妨げとなっている。



図1 超音波探傷により得られたCFRP積層平板の横衝撃による損傷形状と有限要素モデル

一方、最近、計算力学の研究において新たな成果が生まれ始めている FEM に基づく応力解析の枠組みを拡張し、損傷や欠陥などに起因する変位場の不連続性を有限要素メッシュと独立に内挿関数で直接表現できる拡張有限要素法 (the eXtended Finite Element Method: X-FEM) と称される解析手法が提案されている。XFEM を用いることにより、構造物内部の欠陥や損傷のモデル化を、従来の FEM と比較して容易に行うことが可能となる。

図 2 に、三次元半楕円形状のはく離を有する CFRP 補強板の応力解析のための FEM と

XFEM モデルを示す。比較的単純なはく離形状に対しても FEM では複雑なメッシュ分割が必要となるのに対して、XFEM でははく離前縁形状を有限要素メッシュと独立に表現できるのでモデル化が容易である。

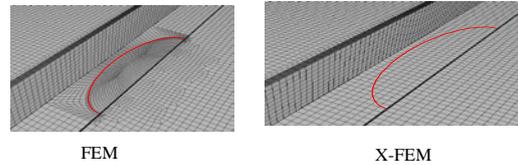


図 2 有限要素法(FEM)と拡張有限要素法(XFEM)による補強平板の接着部のはく離形状のモデル化

XFEM においては連続体内部における変位場 \mathbf{u}^h は次式のように近似される。

$$\mathbf{u}^h(\mathbf{x}) = \sum_I \phi_I(\mathbf{x})(\mathbf{u}_I + \mathbf{a}_I f(\mathbf{x}))$$

ここに、 ϕ_I は通常の FEM で用いられる節点 I に関する内挿関数、 $f(\mathbf{x})$ は局所的に導入される関数であり拡充関数と呼ばれる。また、 \mathbf{u}_I , \mathbf{a}_I はそれぞれ通常の内挿関数および拡充された内挿関数についての節点自由度である。事前に解の特性を表す関数が既知であれば、その関数を拡充関数として用いることができる。

とくにき裂問題において、き裂先端近傍の変位場の漸近解と、変位場の不連続性を表現できるヘビサイド関数を拡充関数として用いることにより複雑なき裂形状を有限要素メッシュ分割と独立に近似表現することが可能となる。

このような特長を有する XFEM は、前述したような損傷を有する積層複合材料構造の応力解析を効率的に実施するために極めて有効な方法であると考えられる。これまで XFEM によるき裂解析についての研究論文は多数発表されているが、XFEM を実務での利用に耐える方法とするためには解析の信頼性を向上させる必要がある。そのため、研究代表者らは拡充節点の分布、種類、エネルギー解放率の評価方法、レベルセット法によるき裂形状のモデル化方法などについての検討を実施してきた。最近、汎用 FEM コードにも XFEM 解析機能が組み込まれているが、現段階では積層板構造の損傷進展解析に直接適用できる機能を有しているとは言いがたい。

XFEM を用いた積層複合材料構造の損傷進展解析は、欧米における計算破壊力学分野の研究において急速に普及しつつあり、汎用コードの機能に組み込み始められており、産業界でも用いられるようになってきている。実機構造のマトリクス割れと層間はく離の連成を考慮した損傷進展解析が高精度にかつ安定的に実施できるようになれば、実機構造物の構造設計において非常に有効な手法となるものと期待される。

2. 研究の目的

本研究は、はく離やき裂形状を有限要素メッシュと独立にモデル化することができる拡張有限要素法 (XFEM) を、CFRP 積層複合材料構造の損傷進展解析に適用し、設計解析の高度化を図ることを目的とする。

そこで本研究では、XFEM 解析技術に関する最先端の公知の知見を用いて、積層複合材料構造におけるマトリクス割れと層間はく離の連成を考慮した損傷解析および損傷進展解析を実施することを試みる。本研究で新たに開発する手法は、これまで研究開発を行ってきた内製 XFEM 解析プログラムを基盤としてプログラム実装する。解析手法の妥当性は、その結果を従来の FEM 解析結果や実験結果と比較することによって検証される。

3. 研究の方法

XFEM による CFRP 積層板のマトリクス割れのモデル化、結合力モデルについての最新の文献調査を実施するとともに、二次元、三次元 XFEM 解析のプログラムを開発し、検証解析を実施した後、CFRP 積層板の層間はく離とマトリクス割れの連成を考慮した損傷進展解析を実施する。

(1) 文献調査

FEM による CFRP 積層板の損傷進展解析の実施事例を記載した文献を調査し整理する。

(2) XFEM プログラムの開発

研究代表者らがこれまで開発した二次元、三次元 XFEM 解析の基本プログラムをもとにして、結合力モデルや接触を考慮したき裂を考慮できるようにプログラムを改良する。開発言語は C 言語とする。

(3) 開発プログラムの検証

参照解が既知である問題 (DCB 試験片, ENF 試験片, FRMM 試験片, TCT 試験片) を設定し、開発プログラムの検証を行う。

(4) XFEM 解析結果の後処理機能の開発

開発整備する XFEM 解析プログラムの解析結果のポスト処理 (解析結果の可視化) を実施するための手法を開発する。

(5) CFRP 積層板の損傷進展解析への適用

開発プログラムを用いて、CFRP 積層板の層間はく離とマトリクス割れの連成を考慮した損傷進展解析を実施する。得られた結果を公表された実験結果や他手法による結果と比較する。

4. 研究成果

(1) XFEM 解析手法の定式化

① 二次元問題 (図 3(a))

二次元解析においては、二次元 3 節点三角形一次要素を用いる。き裂形状を線分でモデル化し、レベルセット法を用いてき裂形状を陰的にモデル化する。すなわち、き裂線に関する符号付き距離関数 ϕ とき裂先端に関する符号付き距離関数 ψ を用いて、要素を通常要素、き裂線が要素を完全に切断する要素 (切

断要素) およびき裂先端を含む要素 (き裂先端要素) に分類する。切断要素およびき裂先端要素は、さらに小三角形に分割され、要素剛性マトリクスや内力ベクトルを評価する。切断要素内の位置 \mathbf{x} における変位場 \mathbf{u}^h を次式のように近似する。

$$\mathbf{u}^h(\mathbf{x}) = \sum_{I=1}^3 L_I \mathbf{u}_I + \sum_{I=1}^3 L_I (H(\bar{\phi}(\mathbf{x})) - H(\bar{\phi}(\mathbf{x}_I))) \mathbf{a}_I$$

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

ここに、 L_I は三角形の面積座標、 \mathbf{u}_I 、 \mathbf{a}_I は節点に割りつけられる節点自由度ベクトルであり、 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。

要素内部に含まれる切断線上で変位場は不連続となり、切断線上に評価点を配置することにより、結合力モデルの構成式を考慮し、接線剛性マトリクスや内力ベクトルを計算する。

② 準三次元問題 (図 3(b))

板厚が均一な積層板については、二次元モデルを板厚方向に押し出したモデルを用いることにより準三次元解析を行うことができる。このような場合には、有限要素として三次元 6 節点五面体要素を用いる。ただし、モデル化されるき裂は、平板に垂直な貫通き裂に限定される。三次元空間における切断要素内の位置 \mathbf{x} 、 r_3 における変位場 \mathbf{u}^h を次式のように近似する。

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

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

$$N_B(r_3) = (1-r_3)/2, \quad N_T(r_3) = (1+r_3)/2$$

ここに、 r_3 ($-1 \leq r_3 \leq 1$) は要素の板厚方向の正規座標で、 N_B 、 N_T は板厚方向の補間関数である。

要素内部に含まれる長方形の切断面上で変位場は不連続となり、切断面上に評価点を配置することにより、結合力モデルの構成式を考慮し、接線剛性マトリクスや内力ベクトルを計算する。この方法では、前述した二次元き裂先端要素を利用して三次元き裂先端要素を容易に得ることができる。

③ 三次元問題 (図 3(c))

任意形状のき裂を扱う三次元解析において、三次元 4 節点四面体一次要素を用いる。き裂面形状を三角形形状でモデル化し、き裂面に関する符号付き距離関数 ϕ とき裂前縁に関する符号付き距離関数 ψ を算出し、二次元の場合と同様に ϕ と ψ を用いて要素を三種類に分類する。三次元空間における切断要素内の位置 \mathbf{x} における変位場 \mathbf{u}^h を次式のように近似する。

$$\mathbf{u}^h(\mathbf{x}) = \sum_{l=1}^4 L_l \mathbf{u}_l + \sum_{l=1}^4 L_l (H(\bar{\phi}(\mathbf{x})) - H(\bar{\phi}(\mathbf{x}_l))) \mathbf{a}_l$$

$$\bar{\phi}(\mathbf{x}) = \sum_{l=1}^4 L_l \phi_l$$

ここに、 L_l は四面体の体積座標である。

三次元四面体要素について、ヘビサイド関数だけを拡充させたき裂先端要素を定式化する手順は複雑であり、現段階ではその処理は完了していない。したがって、き裂先端要素の定式化においては従来の XFEM で用いられている四つの漸近解基底関数を用いる。この方法によれば、き裂前縁を含む要素の要素再分割は必要となるものの、局所的な補間関数の設定は不要となる。要素内部における切断面は四角形または三角形となり、四角形を二つの三角形に分割することにより、最終的にはすべての切断面は三角形で表される。三角形上に評価点を配置することにより、結合力構成式を考慮し、接線剛性マトリクスや内力ベクトルを計算する。

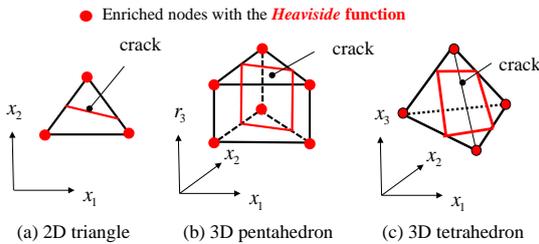


図3 XFEM解析で用いられる切断要素

(2) 結合力モデル

結合力モデル(Cohesive Zone Model: CZM)は、き裂面における相対変位と結合力との関係を与えることにより、応力に基づいたき裂の発生と、エネルギーに基づいたき裂の進展を考慮できるので、実際のなき裂進展解析を実施できる。

本研究においては、CFRP積層板のはく離、マトリクス割れをモデル化するためにCamanhoらにより提案された混合モードを考慮できるバイリニア型の結合力モデルを用いる。すなわちき裂面の開口方向、せん断方向の相対変位と表面力との関係を図4のように与える。

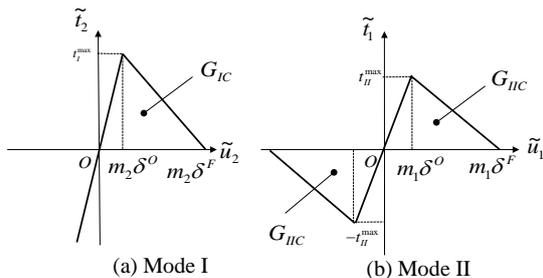


図4 バイリニア型結合力モデル (Camanhoモデル)

(3) 開発プログラム

前述した解析手法に基づき、二次元、準三次元および三次元問題を対象としたき裂進展解析プログラム NLXT2D, NLXP3D, および NLXT3D を開発した。これらのプログラムによれば、二次元三角形要素、三次元五面体要素および三次元四面体要素を用いた XFEM による陰解法と陽解法によるき裂進展解析が実施可能である。開発システムの概要を図5に示す。XFEM解析においては、き裂線やき裂面を有限要素と独立に定義するための拡充節点は、プログラム処理で自動的に定義されるので、利用者は既存のメッシュ生成プログラムで作成されたき裂を含まない有限要素モデルファイル(*.dat)と、有限要素モデルと独立にき裂定義情報(*.crk)を準備すればよい。実行結果として、解析結果ファイル(*.out)、ログファイル(*.log)、可視化ファイル(*.vtf)が得られる。

なお、開発システムにおいては、き裂が要素境界と整合している場合には XFEM による拡充節点をいらずにモデル化ができるように、通常の FEM で用いられるインターフェース要素も利用可能となっている。現段階で、結合力モデルとして、CFRP積層板のはく離やマトリクス割れをモデル化するために Camanho モデルが実装されているが、相対変位と表面力が関連づけられる結合力モデルであれば、容易プログラムに組み込むことができる。三種類の開発プログラムの概要をまとめて、表1に示す。また、CFRP積層板に対応できるように等方性だけでなく直交異方性材料も扱える。開発プログラムはC言語で記述されており、陰解法においてニュートンラプソン法による求解処理における連立一次方程式を解くために内製のスカイライン法だけでなく、インテル社が開発した数値計算ライブラリ MKL に組み込まれている直接法スパースソルバー PARDISO も用いられる。

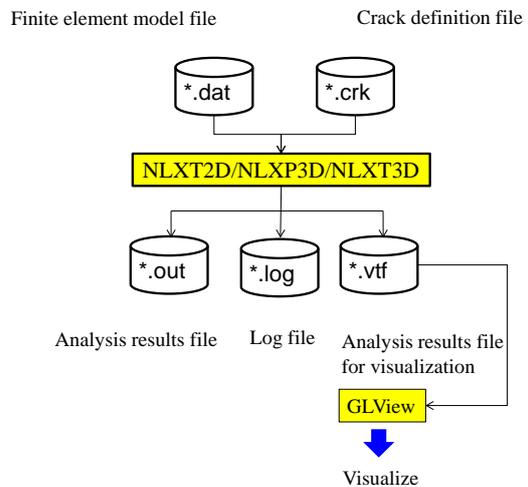


図5 開発した XFEM 解析システム

表 1 開発プログラムの概要

Code	NLXT2D	NLXP3D	NLXT3D
Development language	ANSI-C		
Discretization method	eXtended Finite Element Method		
Analysis type(s)	Static, Implicit Dynamic, Explicit Dynamic		
Element type(s)	Three-node triangle element (Constant Strain Triangle) Four-node interface element considering CZM	Six-node pentahedral element Six-node interface element considering CZM	Four-node tetrahedral element Six-node interface element considering CZM
Material type(s)	Isotropic, Orthotropic		
Enrichment type(s)	Heaviside	Heaviside	Heaviside, Asymptotic basis
Method use to solve the system equation	Direct method: ●Skyline method ●PARDISO (Intel Math Kernel Library)		

(4) 解析事例

以下、開発プログラムを用いて実施した代表的な解析例を示す。

① DCB 試験片

図 6(a)に示すような CFRP 単層板の DCB 試験片のはく離進展解析を NLXP3D を用いて実施した。単層板の物性値は図 6 に記入した通りである。解析によって得られた開口変位と荷重との関係をはり理論解と比較して図 7 に示す。理論解と整合した結果が得られている。

② ENF 試験片

図 6(b)に示すような CFRP 単層板の ENF 試験片のはく離進展解析を NLXP3D を用いて実施した。解析によって得られた荷重点変位と荷重との関係をはり理論解と比較して図 8 に示す。理論解と整合した結果が得られている。

③ FRMM 試験片

図 6(c)に示すような CFRP 単層板の FRMM 試験片のはく離進展解析を NLXP3D を用いて実施した。解析によって得られた荷重点変位と荷重との関係をはり理論解と比較して図 9 に示す。理論解と整合した結果が得られている。

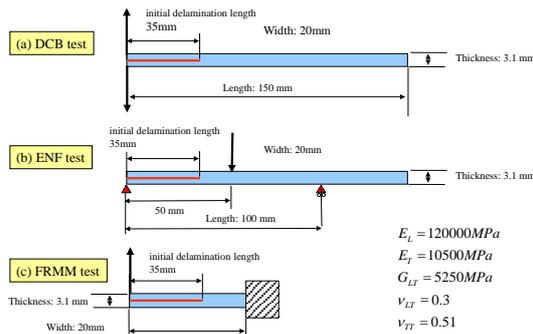


図 6 CFRP 試験片のはく離進展解析

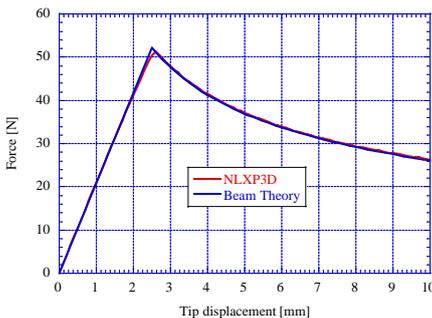


図 7 DCB 試験片のはく離進展解析結果

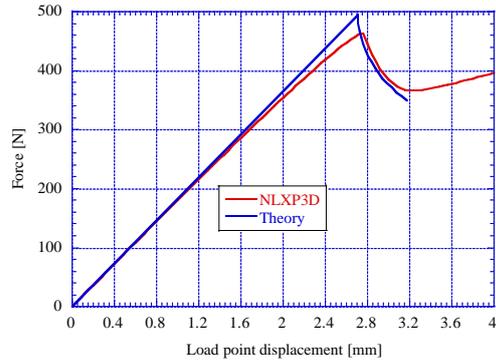


図 8 ENF 試験片のはく離進展解析結果

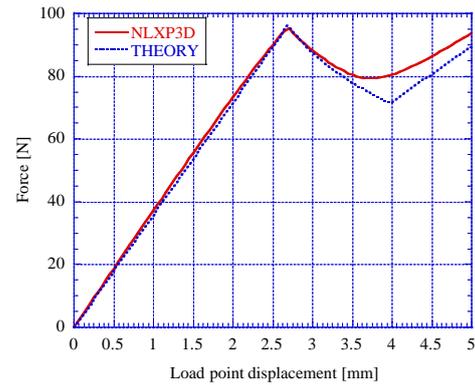


図 9 FRMM 試験片のはく離進展解析結果

④ OHT 試験片

図 10 に示すような引張り荷重を受ける長さ 63.5 mm、幅 15.875 mm、厚さ 4 mm の中央に直径 3.175 mm を円孔を有する、8 層の擬似等方性 CFRP 積層板 [45/90/-90/0]_s について、樹脂割れと層間はく離を考慮した損傷進展解析を実施した。層間には結合力モデルを考慮したインターフェース要素を、45°、90°、-45°層の円孔の応力集中部近傍には図 10 に示すように XFEM 解析機能を用いて有限要素と独立に、層に垂直で繊維方向の樹脂割れを模擬できる結合力き裂をあらかじめ設定しておく。三次元五面体要素による三次元モデルを用いて、NLXP3D による損傷進展解析を実施する。

積層板の一端を完全固定し、積層板の一端を完全固定し、他端に強制変位を 0.01 mm ずつ与えて陰解法による静解析を実施したところ、0.38 mm 程度より大きな強制変位に対して収束解が得られなかった。そこで、マススケール係数を 10⁴ とし、強制変位速度 63.5 mm/sec を与え、時間増分 10⁻⁸ sec として、0.02 sec 間だけ 2x10⁶ ステップの陽解法による動的解析を実施した。陰解法による静解析、陽解法による動解析により得られる強制変位と平均応力との関係をまとめて図 11 に示す。破壊応力として 275 MPa が得られた。この結果は他の解析手法による結果や実験結果ともほぼ整合したものとなっている。

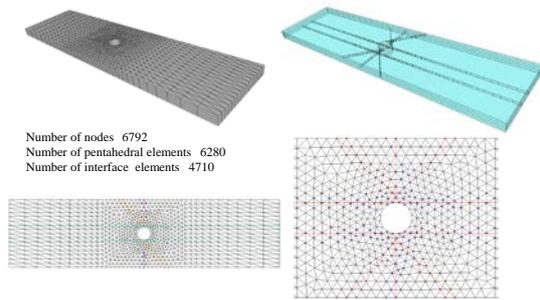


図 10 OHT 試験片の損傷進展解析

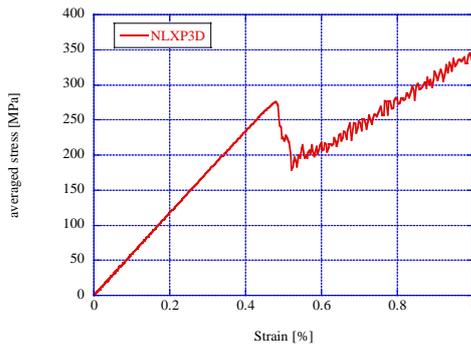


図 11 OHT 試験片の荷重点変位と平均応力との関係

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1 件)

- ① 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(2012), 78-796, 1642-1655. (査読有)

〔学会発表〕(計 18 件)

- ① 長嶋利夫, XFEM 解析システムと複合材料積層板の応力解析への応用, 第 27 回計算力学講演会, 2014/11/23, 岩手大(盛岡市).
- ② Nagashima, T., Sawada, M., Development of a damage propagation analysis system based on the extended finite element method using the cohesive zone model, CST2014, 2014/9/3, Naples (Italy).
- ③ Nagashima, T., Application of XFEM using CZM to damage propagation analyses of CFRP composite laminate, ICCM2014, 2014/7/29, Cambridge (UK).
- ④ Nagashima, T., Sawada, M., Damage propagation analyses by XFEM using the Cohesive Zone Model, 11th World Congress on Computational Mechanics, 2014/7/23, Barcelona (Spain).
- ⑤ 長嶋利夫, 澤田昌孝, 結合力モデルを用いた XFEM に基づくき裂進展解析システムの開発, 第 19 回計算工学講演会, 2014/6/12, 広島国際会議場(広島市).
- ⑥ Nagashima, T., Application of XFEM with CZM to fracture analysis of CFRP

composite laminate, COMPSAFE, 2014/4/15, Sendai.

- ⑦ Nagashima, T., Damage propagation analyses of CFRP composite laminate by XFEM using CZM, APCOM & ISCM 2013, 2013/12/12, Singapore.
- ⑧ 長嶋利夫, 結合力モデルを用いた XFEM による CFRP 積層板の損傷進展解析, 第 26 回計算力学講演会, 2013/11/4, 佐賀大(佐賀市).
- ⑨ Nagashima, T., Modeling of interaction between delamination and matrix cracks of CFRP composite laminate by XFEM using the Cohesive Zone Model, XFEM2013, 2013/9/13, Lyon (France).
- ⑩ 長嶋利夫, 陽解法 XFEM による CFRP 積層板のき裂進展解析, 第 55 回構造強度に関する講演会, 2013/8/8, 室蘭工大(室蘭市).
- ⑪ Nagashima, T., Fracture analyses of CFRP composite laminate by XFEM using the Cohesive Zone Model, USNCCM12, 2013/7/24, Raleigh, NC (USA).
- ⑫ 長嶋利夫, 二瓶雅之, 結合力モデルを用いた XFEM の陽解法に関する検討, 第 18 回計算工学講演会, 2013/6/20, 東大生研(東京都).
- ⑬ Nagashima, T., Crack analysis by XFEM using tip elements, ICCM2012, 2012/11/28, Gold Coast (Australia).
- ⑭ Nagashima, T., Ebina W., Crack Propagation Analysis of Composite Structures by XFEM using the Cohesive Zone Model, ICMS2012, 2012/10/10, Kobe
- ⑮ 長嶋利夫, 結合力モデルを用いた XFEM 解析, 第 25 回計算力学講演会, 2012/10/8, ポートアイランド南地区(神戸市).
- ⑯ 長嶋利夫, TIP 要素を用いた二次元 XFEM 解析, 第 54 回構造強度に関する講演会, 2012/8/2, 熊本市国際交流会館(熊本市).
- ⑰ Nagashima, T., XFEM analysis by using crack tip elements, 10th World Congress on Computational Mechanics, 2012/7/10, Sao Paulo (Brazil).
- ⑱ 長嶋利夫, TIP 要素を用いた XFEM によるき裂進展解析, 第 17 回計算工学講演会, 2012/5/30, 京都教育文化センター(京都市).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長嶋 利夫 (NAGASHIMA TOSHIO)
上智大学・理工学部・教授
研究者番号: 10338436

(2) 研究分担者

末益 博志 (SUEMASU HIROSHI)
上智大学・理工学部・教授
研究者番号: 20134661