

令和元年5月27日現在

機関番号：50101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06480

研究課題名(和文)ハイアラキ連続体要素を用いた階層型複合構造モデルの開発

研究課題名(英文) Development of composite structure model by using hierarchal continuum-based shell elements

研究代表者

渡辺 力 (Watanabe, Chikara)

函館工業高等専門学校・社会基盤工学科・教授

研究者番号：90249714

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、繊維強化プラスチック(FRP)などの複合材料に対して有効な構造解析法を構築するために、改良ZIG-ZAG理論を開発した。この改良ZIG-ZAG理論では、薄板から厚板までの異方性積層板に対して高精度なZIG-ZAG変位が得られるとともに、等方性平板に適用しても高精度の変位と応力が計算できる。この改良ZIG-ZAG理論を用いたハイアラキ連続体要素(階層型モデル)により、鋼・コンクリート部材や複合材料部材をも含めた構造全体を三次元連続体として精密にモデル化した構造解析法の構築が可能となる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の改良ZIG-ZAG理論では、薄板から厚板までの異方性積層板に対して高精度なZIG-ZAG変位が得られるとともに、等方性平板に適用しても高精度の変位と応力が計算できる。すなわち、従来のZIG-ZAG理論の適用性を大幅に拡張し、複合材料部材のみならず、鋼部材やコンクリート部材にも適用可能であり、土木構造特有の厚板領域でも精度の良い変位と応力を計算できる理論モデルを開発した。

研究成果の概要(英文)： In this study, an improved ZIG-ZAG theory was developed to construct an effective structural analysis method for composite materials such as fiber reinforced plastic (FRP). In this improved ZIG-ZAG theory, highly accurate ZIG-ZAG displacements can be obtained for anisotropic laminates. Furthermore, even if it is applied to an isotropic plate, displacements and stresses can be calculated with high accuracy. Using hierarchical continuum elements (hierarchical model) based on this improved ZIG-ZAG theory, structural analysis precisely modeled as a three-dimensional continuum has become possible.

研究分野：応用力学

キーワード：複合材料 異方性積層板 zig-zag理論 zig-zag変位 厚板理論

1. 研究開始当初の背景

近年、土木分野でも複合材料の構造材料としての利用が増えており、繊維強化プラスチック（FRP）を用いて鋼構造やコンクリート構造の既設構造物を補修・補強する接着工法や歩道橋などに活用されている。従来の鋼やコンクリート材料では得られなかった耐食性、維持管理の省力化、施工の簡素化などの可能性が期待される複合材料は、今後も益々、土木分野に活用されることは間違いない。

しかしながら、航空工学や機械工学の分野では異方性積層シェルや傾斜機能性材料の解析的な基礎研究が盛んに行われているが、土木分野に特有な複合材料による補強に関する解析的研究は少ない。さらに、強化方向の異なる単層板（ラミナ）を複数枚重ねた FRP（異方性積層板）では、土木構造部材のように板厚比が大きくなると ZIG-ZAG 変位の影響が顕著に現れて、高次理論を用いても解析精度が悪くなる。以上のように、複合材料に対する有効な解析理論と構造解析法は未だ確立していない。

2. 研究の目的

本研究では、鋼・コンクリート部材や複合材料部材をも含めた構造全体を三次元連続体として精密にモデル化することにより、接着された複合材料部材の剥離挙動も正確に評価できる効果的な構造解析法を構築することを目指している。

そこで、ハイアラキ連続体要素（階層型モデル）を用いて、繊維強化プラスチック（FRP）などの複合材料に対して有効な構造解析法を構築するために、ZIG-ZAG 変位を考慮した新たな理論モデルを開発することを目的としている。従来の等価単層理論についての問題点を明らかにするとともに、土木構造特有の厚板に対しても精度が良く、等方性平板にも適用可能な改良 ZIG-ZAG 理論を開発する。

3. 研究の方法

(1) 等価単層理論の解析精度

複合材料は、繊維で補強した方向に対して直角方向の強度を補うために強化方向の異なるラミナを何枚か重ねた積層板として使用されるため、異方性積層板としての取り扱いが必要となる。この異方性積層板に対して、三次元弾性理論に基づく厳密な級数解が求められており、直交積層板（cross-ply laminate）については 6 次方程式の固有値問題を解いて、斜交積層板（angle-ply laminate）については 12 次方程式の複素固有値問題を解いて、ラミナの板厚方向の変位を規定する固有関数が求められている。このように、等方性平板に比べて、異方性積層板では板厚方向の高次成分の影響が顕著になるので、異方性積層板の解析には三次せん断変形理論などの高次理論に基づく等価単層理論が多く用いられている。しかしながら、三次せん断変形理論では、種々の変位場を用いる理論が存在しており、厳密解に対しての解の精度や変位場の採り方が解の精度に与える影響については明らかにされていない。

そこで、等価単層理論の解析精度を明らかにするとともに、面外応力の改良手法を提案する。

(2) 改良 ZIG-ZAG 理論の開発

異方性積層板では、板厚比が大きくなると ZIG-ZAG 変位が顕著に表れて、高次理論に基づく等価単層理論を用いても ZIG-ZAG 変位を正確に表現できない。そのため、異方性積層板において ZIG-ZAG 変位の影響を考慮するための ZIG-ZAG 理論の研究が古くから行われている。

最近の ZIG-ZAG 理論に関する研究では、Murakami 理論あるいは Refined ZIG-ZAG 理論を用いるのが主流となっている。しかしながら、Murakami 理論では、隣接する層の ZIG-ZAG 関数の勾配を異符号となるように強制しているので、外側弱層など繊維配向によっては精度が悪くなる。また、Refined ZIG-ZAG 理論では、この ZIG-ZAG 関数は等方性平板に用いると関数値がゼロとなって適用できないことに加え、面外変位に対する ZIG-ZAG 関数が開発されていない。さらに、これらの ZIG-ZAG 理論は Reissner の混合変分原理に基づいて定式化がなされており、面外応力成分も未知数とすることから、変位法型の有限要素に適用すると面外応力の精度が悪くなる。

そこで、本研究では、ハイアラキ連続体要素（階層型モデル）のために新たな ZIG-ZAG 理論（改良 ZIG-ZAG 理論）を開発する。

4. 研究成果

(1) 等価単層理論の解析精度（引用文献）

等価単層理論を用いた異方性積層板の曲げ解析において、変位仮定に基づく各種の厚板理論による級数解を統一的に計算する方法を開発し、異方性積層板の曲げ解析における等価単層理論の解析精度を明らかにした。さらに、三次元弾性理論の応力の平衡方程式を用いて、応力の境界条件と層境界での連続性を満足する面外応力を求める手法を開発した。数値計算例により、次の知見が得られた。

- 1) 直交積層板であっても逆対称に積層された場合には、板厚方向の高次成分の影響が顕著となる。等価単層理論による逆対称積層板の厚板解析では、三次せん断変形理論よりもさらに高次の変位場を用いる必要がある。

- 2) 精度の良い面外応力を求めるために、構成方程式を用いずに、三次元弾性理論の応力の平衡方程式を用いて、応力の境界条件と層境界の連続性を満足する面外応力の3成分を計算できる(図-1)。
- 3) 三次せん断変形理論においては、面外変位 w の変位場をどのように採っても板厚比 h/b が 0.2 程度までであれば厳密解に対する誤差はほぼ同程度となるが、等価単層理論を用いた三次せん断変形理論の異方性積層板への適用は、中等厚板に限定すべきである。

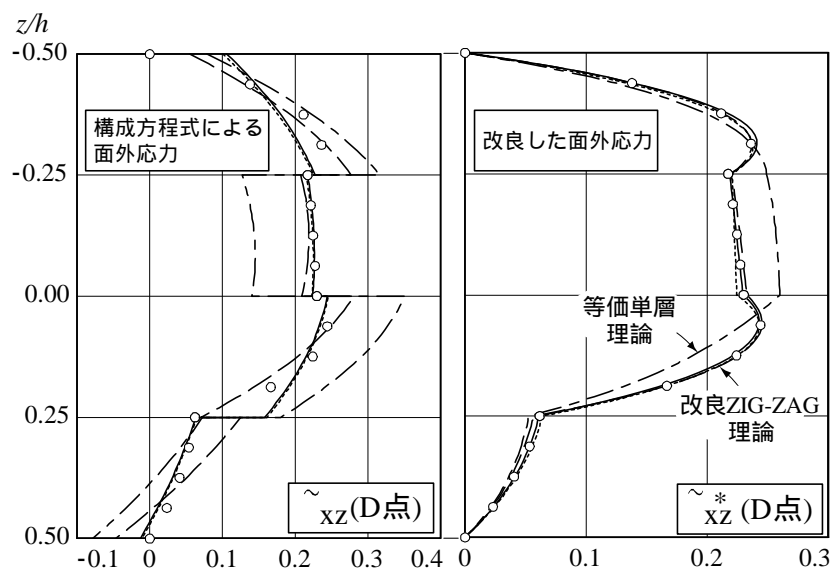


図-1 面外応力の改良

(2) 改良 ZIG-ZAG 理論の開発 (引用文献)

本研究では、Refined ZIG-ZAG 理論の ZIG-ZAG 関数を等方性平板にも適用できるように改良するとともに、厚板解析に有効な面外変位 w に対する ZIG-ZAG 関数を開発した。さらに、この新たな ZIG-ZAG 関数を用いた改良 ZIG-ZAG 理論による直交積層板の曲げ解析において各種の ZIG-ZAG 理論と等価単層理論による級数解を統一的に計算する方法と、三次元弾性理論の応力の平衡方程式を用いて応力の境界条件と層境界での連続性を満足する面外応力の計算手法を開発した。これらを周辺単純支持された異方性積層板と等方性平板の数値計算例に用いて、次の知見が得られた。

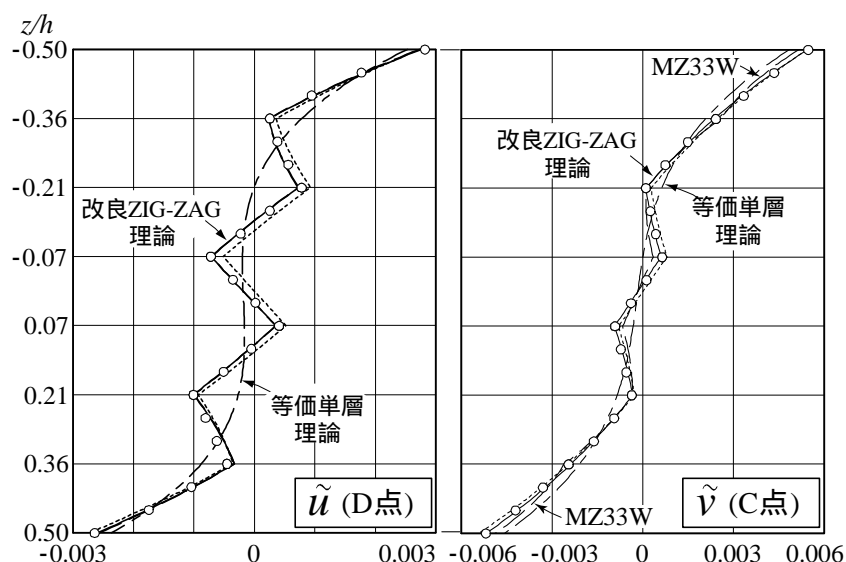


図-2 積層板の ZIG-ZAG 変位

- 1) 面内変位 u, v の ZIG-ZAG 関数の勾配を面外せん断弾性定数から定め、各層の繊維配向に応じて外側弱層の補正を行う。これにより、薄板から厚板までの異方性積層板に対して、高精度な ZIG-ZAG 変位が得られる(図-2)。
- 2) 面外変位 w の ZIG-ZAG 関数の勾配は、面外せん断応力が三次元弾性理論の応力の平衡方程式を満足するように定める。この際、面外せん断弾性定数の値が板厚方向に全層同じとなる場合には、等価単層理論と整合を保つための補正を行う。これにより、等方性平板に

も適用が可能となる。

- 3) 改良 ZIG-ZAG 理論を等方性平板に適用する場合には、層数を仮想ラミナ数と考えて、仮想ラミナ数を増加させると、解は等方性平板の厳密解に収束する。したがって、仮想ラミナ数を増加させることで、精度の良い解を求めることができる。
- 4) ハイアラキ連続体要素への適用を考えて、変位法により定式化を行う。精度の良い面外応力を求めるために、構成方程式を用いずに、三次元弾性理論の応力の平衡方程式を用いて応力の境界条件と層境界での連続性を満足する面外応力をより一般的な形で定式化した。
- 5) 本研究の改良 ZIG-ZAG 理論は、複合材料部材のみならず、鋼部材やコンクリート部材にも適用可能であり、土木構造特有の厚板領域でも精度の良い変位と応力を計算できる。

(3) 研究成果の学術的意義

本研究では、繊維強化プラスチック (FRP) などの複合材料に対して有効な構造解析法を構築するために、改良 ZIG-ZAG 理論を開発した。

この改良 ZIG-ZAG 理論では、薄板から厚板までの異方性積層板に対して高精度な ZIG-ZAG 変位が得られるとともに、等方性平板に適用しても高精度の変位と応力が計算できる。すなわち、従来の ZIG-ZAG 理論の適用性を大幅に拡張し、複合材料部材のみならず、鋼部材やコンクリート部材にも適用可能であり、土木構造特有の厚板領域でも精度の良い変位と応力を計算できる理論モデルを開発した。

この改良 ZIG-ZAG 理論を用いたハイアラキ連続体要素 (階層型モデル) により、鋼・コンクリート部材や複合材料部材をも含めた構造全体を三次元連続体として精密にモデル化した構造解析法の構築が可能となる。

<引用文献>

渡辺 力：等価単層理論に基づく各種の厚板理論による異方性積層板の級数解ならびに面外応力の改良, 構造工学論文集, 査読有, Vol.63A, pp.14-27, 2017.

渡辺 力：効果的な ZIG-ZAG 関数の開発と異方性積層板ならびに等方性平板の厚板解析への適用, 土木学会論文集 A2 (応用力学), 査読有, Vol.74, No.1, pp.75-91, 2018.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 7 件)

渡辺 力, 金浜瞳也: 三次元弾性理論に基づく周辺単純支持異方性積層板の自由振動解析, 土木学会北海道支部論文報告集, 査読無, 第 75 号, A-01 (CD-ROM), 2019.

渡辺 力, 今淵 達, 木寅海斗, 松本悠生: 改良 ZIG-ZAG 理論による周辺単純支持異方性積層板の自由振動解析, 土木学会北海道支部論文報告集, 査読無, 第 75 号, A-02 (CD-ROM), 2019.

渡辺 力: 効果的な ZIG-ZAG 関数の開発と異方性積層板ならびに等方性平板の厚板解析への適用, 土木学会論文集 A2 (応用力学), 査読有, Vol.74, No.1, pp.75-91, 2018.

渡辺 力, 堀 桜花, 成田勇介, Otgonbat Munkhsukh: 異方性積層板の厚板解析における ZIG-ZAG 関数の改良, 土木学会北海道支部論文報告集, 査読無, 第 74 号, A-50 (CD-ROM), 2018.

渡辺 力, 金浜瞳也: Global-Local 重合理論による異方性積層板の厚板解析, 土木学会北海道支部論文報告集, 査読無, 第 74 号, A-51 (CD-ROM), 2018.

渡辺 力: 等価単層理論に基づく各種の厚板理論による異方性積層板の級数解ならびに面外応力の改良, 構造工学論文集, 査読有, Vol.63A, pp.14-27, 2017.

渡辺 力, 長内亮賀, 金澤雄大, 米谷悠敬: 異方性積層板の曲げ解析における面外応力の改良, 土木学会北海道支部論文報告集, 査読無, 第 73 号, A-51 (CD-ROM), 2017.

[その他]

渡辺 力: 外部資金研究成果報告 【科研費】ハイアラキ連続体要素を用いた階層型複合構造モデルの開発, 函館工業高等専門学校地域共同テクノセンター年報, 第 14 号, 2019.
<http://www.hakodate-ct.ac.jp/technologycenter/annual>

6. 研究組織

研究協力者

研究協力者氏名: 長内亮賀

ローマ字氏名: Ryouga OSANAI

研究協力者氏名: 金澤雄大

ローマ字氏名: Yudai KANAZAWA

研究協力者氏名: 米谷悠敬

ローマ字氏名: Yutaka YONEYA

研究協力者氏名: 金浜瞳也

ローマ字氏名: Tohya KANAHAMA

研究協力者氏名：堀 桜花
ローマ字氏名：Ohka HORI
研究協力者氏名：成田勇介
ローマ字氏名：Yusuke NARITA
研究協力者氏名：ムギ
ローマ字氏名：Otgonbat Munkhsukh
研究協力者氏名：今淵 達
ローマ字氏名：Tohru IMABUCHI
研究協力者氏名：木寅海斗
ローマ字氏名：Kaito KITORA
研究協力者氏名：松本悠生
ローマ字氏名：Yuui MATSUMOTO