

令和 4 年 5 月 6 日現在

機関番号：50101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04586

研究課題名（和文）複合材料で補強された鋼およびコンクリート構造に効果的な剥離解析モデルの構築

研究課題名（英文）Development of effective delamination analysis model for steel and concrete structures reinforced with composite materials

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） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、剥離解析や複合材料と等方性材料からなるサンドイッチ構造へ改良ZIG-ZAG理論を適用するために、Layer-wise理論を融合させたRegion-wise ZIG-ZAG理論を開発した。このRegion-wise ZIG-ZAG理論では、積層構造を板厚方向に幾つかの領域に分け、その領域境界と領域内部に自由度を持たせる。領域内部のZIG-ZAG変位を効率的に表すために、高次の改良ZIG-ZAG理論を用いている。これにより、解析に必要な未知自由度数はLayer-wise理論に比べてかなり少なくなり、複合材料で補強された鋼・コンクリート構造の精密な構造解析が可能となる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、剥離解析や複合材料と等方性材料からなるサンドイッチ構造へ改良ZIG-ZAG理論を適用するために、Layer-wise理論を融合させたRegion-wise ZIG-ZAG理論を開発した。このRegion-wise ZIG-ZAG理論ではLayer-wise理論に比べて未知自由度数が少なくなり、複合材料で補強された鋼・コンクリート構造の精密な構造解析を効果的に計算できる。

研究成果の概要（英文）：In this study, a region-wise ZIG-ZAG theory was developed by integrating layer-wise theory in order to apply the improved ZIG-ZAG theory to delamination analysis and sandwich structures. In this region-wise ZIG-ZAG theory, the laminated structure is divided into several regions in the thickness direction, and the boundaries of the regions and the interior of the regions have degrees of freedom. To efficiently represent ZIG-ZAG displacements inside the regions, a higher-order improved ZIG-ZAG theory is used. As a result, the number of unknown degrees of freedom required for analysis is considerably less than that of layer-wise theory, and accurate structural analysis of steel and concrete structures reinforced with composite materials is possible.

研究分野：応用力学

キーワード：Region-wise ZIG-ZAG理論 改良ZIG-ZAG理論 Layer-wise理論 異方性積層板 サンドイッチ板 三次元応力 面外応力

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

近年、土木工学の分野でも複合材料の構造材料としての使用が増えており、繊維強化プラスチック (FRP) を用いてコンクリートや鋼構造の既設構造物を補強する接着工法や歩道橋などへの活用が見られる。従来の鋼やコンクリート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、土木工学分野に活用されることは間違いない。一方、FRP 部材の性能試験が盛んに行われ、土木学会により補修補強指針や FRP 歩道橋設計施工指針などのガイドラインもまとめられている。

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、土木工学分野で特有な複合材料による補強に対する解析的研究は少なく、有効な解析理論 (数学モデル) や構造解析法は未だ確立していない。また、鋼部材やコンクリート部材の補修・補強を目的とした FRP の接着接合の設計においては、剥離挙動の評価が極めて重要であり、剥離強度の評価方法や剥離対策を取り入れた設計法を確立することが近々の課題となっている。しかしながら、実験的な研究が盛んに行われているものの、剥離解析に有効な解析理論 (数学モデル) も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理論と構造解析法の開発に向けて、複合材料で接着補強された構造の剥離解析に有効な解析理論 (数学モデル) を構築することを目的としている。

本研究では、改良 ZIG-ZAG 理論を剥離解析や、複合材料と等方性材料からなるサンドイッチ構造へ適用するために、Layer-wise 理論を融合させた Region-wise ZIG-ZAG 理論を開発する。この Region-wise ZIG-ZAG 理論では、積層構造を板厚方向に幾つかの領域に分け、その領域境界と領域内部に自由度を持たせる。領域内部の ZIG-ZAG 変位を効率的に表すために、高次の改良 ZIG-ZAG 理論を用いる。これにより、改良 ZIG-ZAG 理論を剥離解析やサンドイッチ構造へ適用することが可能となり、解析に必要な未知自由度数は Layer-wise 理論に比べてかなり少なくなる。

3. 研究の方法

薄板から厚板までの異方性積層板に有効な改良 ZIG-ZAG 理論の ZIG-ZAG 関数を、実構造への適用を考慮して改良を加える。等方性平板と異方性積層板の接着面の変位と面外応力の適合条件を満足させるために Layer-wise 理論と改良 ZIG-ZAG 理論を融合した Region-wise ZIG-ZAG 理論を開発する。さらに、この理論の適用性と効率性をさらに高めるために、仮想ラミナを用いる方法を適用する。

この改良 ZIG-ZAG 理論と Region-wise ZIG-ZAG 理論を、異方性積層板とサンドイッチ板の三次元応力解析に用いて、精度と適用性を検証する。

4. 研究成果

(1) Region-wise ZIG-ZAG 理論の開発

改良 ZIG-ZAG 理論と Layer-wise 理論を融合した Region-wise ZIG-ZAG 理論を開発した。この理論では、積層構造を板厚方向に幾つかの領域に分け、その領域境界と領域内部に自由度を持たせる。領域内部の ZIG-ZAG 変位を効率的に表すために、高次の改良 ZIG-ZAG 理論を用いている。この理論による直交積層板の三次元応力解析を級数解法により定式化し、異方性積層板とサンドイッチ板の数値計算例を用いて精度と適用性を調べた結果より、次の知見が得られた[1]。

- 1) Region-wise ZIG-ZAG 理論では、領域の採り方に依らず展開次数を高めることで精度の良い変位と応力を計算できる。また、領域数を増やすと変位と応力の収束性が改善されるが、領域数を少なくした方が未知自由度数が少なくなって効率的である (図-1)。
- 2) 解析に必要な未知自由度数は、Layer-wise 理論に比べてかなり少なくなる。この未知自由度数の違いは層数が多くなるほど大きくなり、Region-wise ZIG-ZAG 理論では Layer-wise 理論に比べて効率的に高精度な解を計算できる。
- 3) Region-wise ZIG-ZAG 理論においても、構成方程式を用いずに、面外応力を三次元弾性理論の応力の平衡方程式から計算することで、境界条件、領域境界と層境界での連続性を満足する面外応力の 3 成分を計算できる。
- 4) Region-wise ZIG-ZAG 理論による複合材料と等方性材料からなるサンドイッチ構造の計算には仮想ラミナを用いる方法が有効で、pvc コアのサンドイッチ板においても少ない自由度で精度の良い変位と応力を計算できる (図-2)。

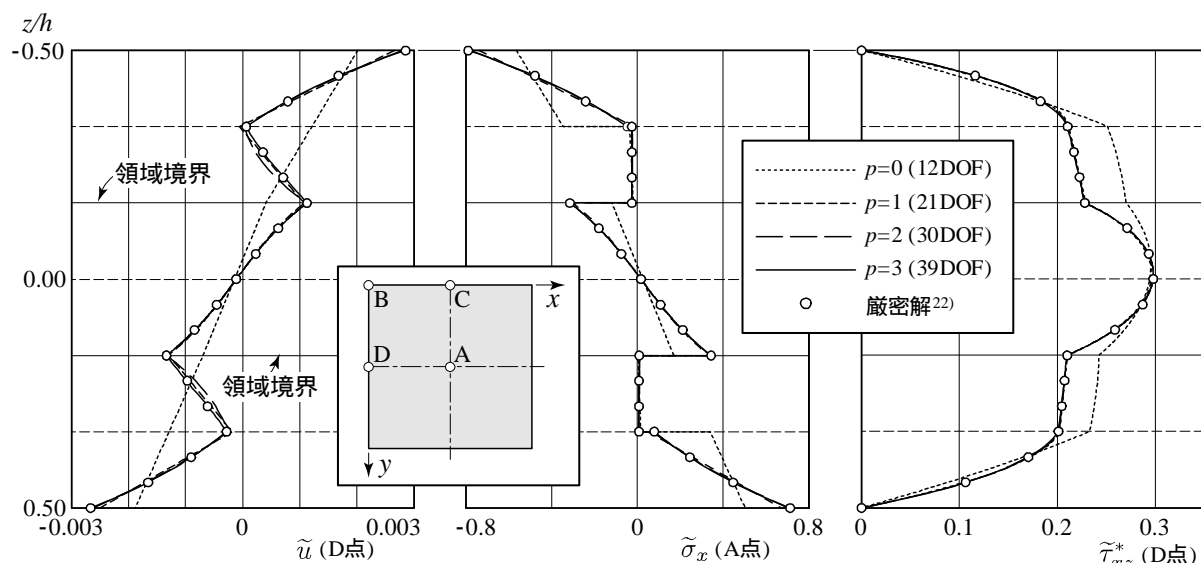


図-1 異方性積層板の変位と応力の板厚方向の分布 (対称6層積層板)

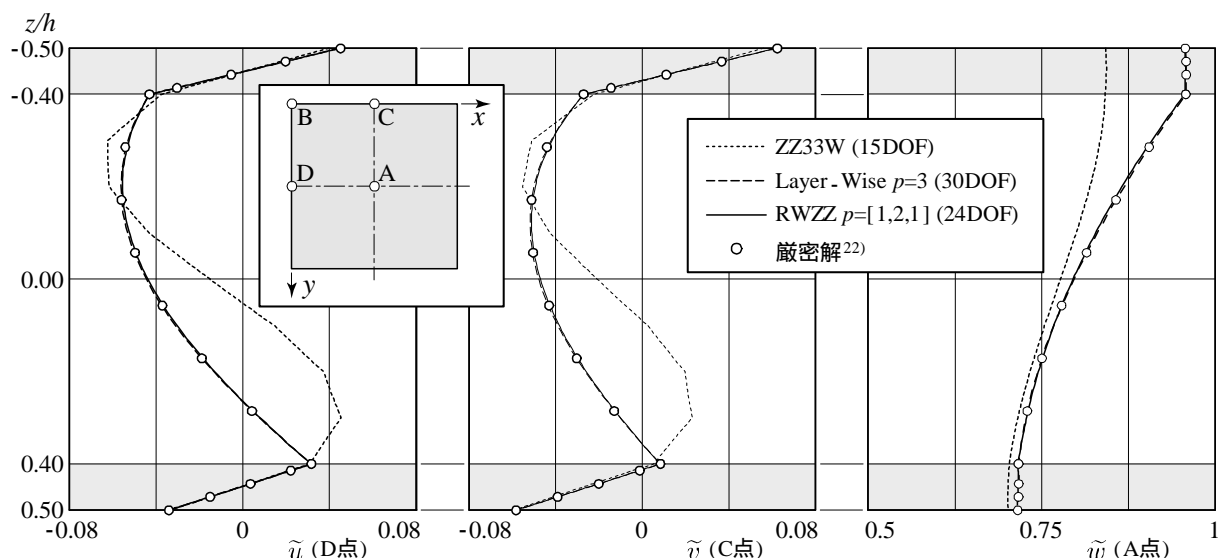


図-2 サンドイッチ板の変位の板厚方向の分布 (PVC コアサンドイッチ板)

(2) Region-wise ZIG-ZAG 理論への仮想ラミナの適用

仮想ラミナに用いる領域 ZIG-ZAG 関数のために、異方性積層板にも効果的な領域 ZIG-ZAG 関数の勾配を導出した。この仮想ラミナを用いた Region-wise ZIG-ZAG 理論を、等方性平板と異方性積層板の厚板解析に用いて精度と変位場の採り方の影響を調べた結果より、次の知見が得られた[2]。

- 1) Region-wise ZIG-ZAG 理論において、仮想ラミナを用いる方法は、等方性平板のみならず異方性積層板に対しても解の精度を改善する効果がある。仮想ラミナ数を増加させることで変位と応力の精度が改善され、変位場の次数を低次で採ったときに変位と応力の精度改善の効果が大きい。
- 2) 等方性平板に対しては、面外変位 w の変位場に ZIG-ZAG 項を付加した変位場を用いるのが改善効果が大きい。
- 3) 異方性積層板に対しては、面外変位 w の変位場に ZIG-ZAG 項を付加しなくても精度を改善する効果があり、ZIG-ZAG 項を付加した場合と同程度の精度が得られる。
- 4) 領域の層数が1つとなるように各層を1つの領域として設定した場合に、変位と応力の誤差を1%以下とするための未知自由度数を Layer-wise 理論と比較すると、層数が少ない場合には Layer-wise 理論と同程度の未知自由度数であるが、層数が増加すると未知自由度数は Layer-wise 理論よりも少なくなる。

【引用文献（研究成果）】

- [1] 渡辺 力：複合材料ならびに等方性材料からなる積層構造のための Region-wise ZIG-ZAG 理論の開発，土木学会論文集 A2（応用力学），Vol.76，No.1，pp.58-74，2020.
- [2] 渡辺 力，佐野凌希：Region-wise ZIG-ZAG 理論による異方性積層板の厚板解析への仮想ラミナの適用，土木学会論文集 A2（応用力学），Vol.77，No.2（応用力学論文集 Vol.24），pp.1_251-1_262，2021.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 渡辺 力, 佐野凌希	4. 巻 Vol.77, No.2 (応用力学論文集 Vol.24)
2. 論文標題 Region-wise ZIG-ZAG理論による異方性積層板の厚板解析への仮想ラミナの適用	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 土木学会論文集A2 (応用力学)	6. 最初と最後の頁 I_251-I_262
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejam.77.2_I_251	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 佐野凌希, 渡辺 力	4. 巻 第78号
2. 論文標題 異方性積層板の厚板解析におけるRegion-wise ZIG-ZAG理論の計算効率について	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 土木学会北海道支部論文報告集	6. 最初と最後の頁 A-20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 渡辺 力, 佐野凌希	4. 巻 第78号
2. 論文標題 仮想ラミナを用いるRegion-wise ZIG-ZAG理論の計算効率について	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 土木学会北海道支部論文報告集	6. 最初と最後の頁 A-21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 渡辺 力	4. 巻 Vol.76, No.1
2. 論文標題 複合材料ならびに等方性材料からなる積層構造のためのRegion-wise ZIG-ZAG理論の開発	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 土木学会論文集A2 (応用力学)	6. 最初と最後の頁 58-74
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejam.76.1_58	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 佐野凌希, 渡辺 力	4. 巻 第77号
2. 論文標題 Region-wise ZIG-ZAG 理論による異方性積層板の曲げ解析	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 土木学会北海道支部論文報告集	6. 最初と最後の頁 A-25
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 渡辺 力, 工藤匡司, 萬壽英敏, 齊藤翔太	4. 巻 第77号
2. 論文標題 Region-wise ZIG-ZAGにおける面外応力の改良	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 土木学会北海道支部論文報告集	6. 最初と最後の頁 A-26
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 渡辺 力, 関 桃絵, Elbegsaikhan PUREVOCHIR	4. 巻 76
2. 論文標題 異方性積層板ならびに等方性平板の自由振動解析への改良ZIG-ZAG理論の適用	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 土木学会北海道支部論文報告集	6. 最初と最後の頁 A-41
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 渡辺 力, 佐野 凌希	4. 巻 76
2. 論文標題 Layer-wise理論ならびに改良ZIG-ZAG理論による異方性積層板の曲げ解析	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 土木学会北海道支部論文報告集	6. 最初と最後の頁 A-42
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 渡辺力, 金浜瞳也, 佐々木恵一	4. 巻 66A
2. 論文標題 異方性積層板の自由振動解析における厳密解の導出と改良ZIG-ZAG理論の精度検証	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 構造工学論文集	6. 最初と最後の頁 187-200
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11532/structcivil.66A.187	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 渡辺 力, 佐野凌希
2. 発表標題 Region-wise ZIG-ZAG理論による異方性積層板の厚板解析への仮想ラミナの適用
3. 学会等名 土木学会 第24回応用力学シンポジウム講演概要集
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	金浜 瞳也 (KANAHAMA Tohya)	函館工業高等専門学校・社会基盤工学専攻・学生	
研究協力者	佐野 凌希 (SANO Ryoki)	函館工業高等専門学校・社会基盤工学専攻・学生	
研究協力者	工藤 匡司 (KUDO Takashi)	函館工業高等専門学校・社会基盤工学科・学生	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	萬壽 英敏 (BANJYU Hidetoshi)	函館工業高等専門学校・社会基盤工学科・学生	
研究協力者	齊藤 翔太 (SAITOH Shyota)	函館工業高等専門学校・社会基盤工学科・学生	
研究協力者	関 桃絵 (SEKI Momoe)	函館工業高等専門学校・社会基盤工学科・学生	
研究協力者	エギー (PUREVOCHIR Elbegsaikhan)	函館工業高等専門学校・社会基盤工学科・学生	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関