

## 学 位 論 文 要 旨

(Summary of the Doctoral Dissertation)

学位論文題目 (Dissertation Title)	Numerical Simulations for Tensile Properties of Fiber-reinforced Polymer Rod Bonded in Anchorage (定着されたFRP ロッドの引張特性に関する数値シミュレーション)
氏 名(Name)	VO VAN NAM

Fiber-reinforced polymer (FRP) rods fabricated from unidirectional fibers and a polymer matrix strengthen effectively reinforced concrete (RC) members. The pultrusion is a production method of FRP rod. The FRP rods show various advantages, such as light and no-corrosion. Most FRP rods have higher tensile strength than standard steel bars. Therefore, the FRP rods can be used as an alternative reinforcement of steel bars in RC structures. In addition, FRP rods can be applied in near-surface mounted (NSM) systems for strengthening existing concrete structures. The tensile properties of FRP rods in adhesively bonded anchorages are expected to be studied in detail. Numerous experimental studies were conducted on FRP rods made of glass, carbon, aramid, or basalt fibers. The previous studies have reported that the tensile properties of FRP rods are affected by the shear-lag effect. However, these studies referred to the tensile failure, the shear-lag effect of FRP rods as a phenomenon without a mechanical explanation. Moreover, the effects of mechanical properties of fibers, matrix, fiber-matrix interface on FRP rod properties have not been investigated in detail.

To quantify factors affecting the tensile properties of FRP rods, this study performed a numerical investigation on aramid FRP rods to assess the shear-lag effect, tensile load-capacity, and tensile strength. In addition, the effects of fiber, matrix, and fiber-matrix interface on the behavior of FRP material in three dimensions were demonstrated by micro-models. Firstly, two representative volume element (RVE) models of fibers and matrix were proposed to predict engineering constants and strengths of the FRP material in three dimensions. Based on the predicted strength, the criteria were designed. Then, the main simulation, including the FRP rod, the filling material, and the steel tube, was carried out to analyze FRP rods under the variation of interfacial conditions between materials, including full-bonding strength and partially-bonding strength models. In the partially-bonding strength model, the interfaces between materials were simulated as cohesive zone models with the variation of bond strengths and fracture energy release rate.

A technique called submodeling was applied to enhance the simulation results. The submodel was cut from the main simulation model and only applied to simulate FRP rods with finer meshes. The study proposed a procedure for calculating the stress distribution in any cross-section of an FRP rod. The simulation results agreed well with the previous experimental study. The findings clearly indicated the position of the failure section in which the tensile stress distribution is unequal. The load-capacity, failure modes, shear-lag effect were predicted based on the maximum

stress criterion. The results revealed that the FRP material strengths enforce the failure in two modes associated with the transverse and longitudinal directions of FRP rods. In addition, diameter is a significant factor that increases the shear-lag effect and reduces the tensile strength of the FRP rods. The numerical simulation provided a new method to predict the load-capacity of FRP rods. The study consists of 6 chapters. Outline of the chapter was presented as follows:

Chapter 1 introduces about kinds of FRP rods and their application in civil engineering. The chapter shows the research objects, the gaps in composite studies, and the scopes of the present research.

Chapter 2 summarizes the review of previous studies related to the theoretical studies of the composite materials. The chapter reveals the gap of theory. In addition, the study compares the advantages and disadvantages of previous studies and proposes methods and models for the present study.

Chapter 3 presents the simulations of the representative volume element (RVE) models to determine the mechanical properties and strengths of composite materials. The study investigates the effects of the fiber properties and fiber-matrix interface on composite mechanical properties in detail. The RVE-1 model was employed to predict engineering constants of the FRP material. The RVE-2 was applied to predict the tensile and shear strengths in three dimensions.

Chapter 4 shows the numerical simulations of the FRP rod tensile tests with various cases of the materials in Chapter 3. The models are built in two cases of the interface between the FRP rod and filling material: full-bonding and partially-bonding strengths. In the case of the full-bonding strength, three models are built with three hypotheses of FRP rod material. Three models, A, B, and C, were proposed to demonstrate the effect of fiber properties on FRP properties. Model A was built based on the hypothesis that the FRP rod is made of transversely isotropic fibers. Model B was made to simulate with an FRP rod of isotropic fibers. Model C assumes the FRP rod as an isotropic material. In the case of the partially-bonding strength, the study models various interface cases between the FRP rod and the filling materials to investigate the bonding effects. The proposed models were applied to simulate FRP rods from D3 to D8 to analyze the diameter effect.

In Chapter 5, the difference between the proposed models was discussed to show the advantages and disadvantages of each model. Firstly, the study compared models (A, B, and C) to highlight the effect of fiber properties on FRP rods. Secondly, the study compared the partially-bonding strength and full-bonding strength models to investigate the bonding effects on the tensile properties of FRP rods. Moreover, the chapter illustrates the existence of the shear-lag effect and demonstrates the diameter effect on tensile strength in FRP rods.

Chapter 6 summarizes the novel findings and research significance of the study. In addition, recommendations for future works were also presented.

(様式 9 号)

## 学位論文審査の結果及び最終試験の結果報告書

山口大学大学院創成科学研究科

氏 名	VO VAN NAM
審査委員	主 査：吉武 勇
	副 査：中村 秀明
	副 査：大木 順司
	副 査：中島 伸一郎
	副 査：M. Azizul Moqsud
論文題目	Numerical Simulations for Tensile Properties of Fiber-reinforced Polymer Rod Bonded in Anchorage (定着された FRP ロッドの引張特性に関する数値シミュレーション)
<p>【論文審査の結果及び最終試験の結果】</p> <p>一方向繊維とポリマーマトリックスから製造される繊維強化ポリマー (FRP) ロッドは、効果的に鉄筋コンクリート (RC) 部材を補強できる。軽量で耐腐食性に優れる FRP ロッドは、一般的な鋼棒よりも高い引張強度を示すことから、RC 構造の鉄筋の代替補強材として使用でき、既存のコンクリート構造物を補強する Near-Surface-Mounted (NSM) 工法などにも適用できる。FRP ロッドの引張特性はせん断遅れ効果の影響を受けることが知られているが、既往の研究では、FRP ロッドの引張破壊に対するせん断遅れ効果について十分な検討がなされていない。特に繊維、マトリックス、繊維-マトリックス界面の力学的特性が及ぼす影響については詳細に調査されていない。</p> <p>本研究では、FRP ロッドの引張特性に影響を与える要因を定量評価するため、数値シミュレーションを通じて、せん断遅れ効果や引張耐力を評価した。さらに、3次元解析において、FRP 材料の引張挙動に対する繊維、マトリックスおよび繊維-マトリックス界面の影響について解析モデルを用いて評価した。本研究では、繊維とマトリックスの2つの代表的な体積要素 (RVE) モデルを提案し、FRP 材料の諸係数と強度を予測した。さらに、FRP ロッド、充填材、鋼管を含むモデルの数値シミュレーションを実行した。完全接着・不完全接着を含むモデルを用いて FRP ロッドの引張特性を解析した。</p> <p>本研究で提案した FRP ロッドの任意断面の応力分布を求めたシミュレーション結果は、既往の実験結果とよく一致することを報告している。解析結果は、引張応力分布が等しくない破損位置を明らかにし、最大応力基準に基づいて、耐荷重、破壊モード、せん断遅れ効果を予測している。FRP の材料強度によって、FRP ロッドの横方向と縦方向に関連する2つの破損モードが生じることを明らかにしている。さらに FRP ロッドの直径は、せん断遅れ効果を増加させ、引張強度を低下させる主要因となることを報告している。本論文は計 6 章で構成されており、各章の概要は以下の通りである。</p>	

(様式 9 号)

第 1 章では、FRP ロッドの種類と土木構造への応用について紹介している。この章では、本研究対象と課題を明らかにし、本研究の目的を示している。

第 2 章では、複合材料の理論的研究を中心にレビューし、当該分野における研究課題を明らかにしている。これらの知見と課題を整理しながら、解析方法とモデルを提案している。

第 3 章では、FRP 材料の力学特性を決定するための RVE モデルについて説明している。FRP 材料の工学的諸係数を求め、引張強度とせん断強度を予測するモデルを説明している。

第 4 章では、第 3 章で示した各ケースの数値シミュレーションを示している。FRP ロッドと充填材の界面の 2 つのケース（完全接着・不完全接着）について検討し、FRP 特性に対する繊維特性の影響を調べている。これらの解析モデルにより、FRP の直径の影響を調べるため、D3～D8 までの FRP ロッドの引張挙動を解析している。

第 5 章では、提案したモデルを用いた解析結果について考察している。ここでは、FRP ロッドの引張特性に対する繊維特性の影響、完全接着・不完全接着モデルの比較、定着効果を評価した。また、FRP ロッドのせん断遅れ効果を示しながら、引張強度に対するロッド径の影響について考察している。

第 6 章では、本研究を通じて得られた知見を示しながら結論を要約した。さらに、本研究分野における今後の研究課題についても言及している。

公聴会はオンラインのみで実施し、学内外から 38 名の聴講者があった。公聴会における主な質問内容は、主に本研究における主要な知見について、本研究成果の構造設計への活用方法について、FRP ロッドの破壊基準の相違について、FRP ロッドの効果的活用方法について、プレストレストコンクリートの緊張材としての利用可能性について、FRP ロッドをコンクリート構造に使用する場合のコストパフォーマンスについて、などであった。いずれの質問に対しても発表者からの的確な回答がなされた。

以上より本研究は独創性、信頼性、有効性、実用性ともに優れ、博士（工学）の論文に十分値するものと判断した。

論文内容及び審査会、公聴会での質問に対する応答などから、最終試験は合格とした。

なお、主要な関連論文の発表状況は下記のとおりである。（関連論文 計 3 編、参考論文 0 編）

- 1) Nam Van Vo and Isamu Yoshitake: ASSESSING SHEAR-LAG EFFECT ON PULTRUDED FRP RODS BASED ON A NUMERICAL SIMULATION, *International Journal of GEOMATE*, Vol.21, Issue 84, pp.167-176, 2021.
- 2) Van Nam Vo, Sy-Ngoc Nguyen, and Isamu Yoshitake: Predicting failure modes and load-capacity of fiber-reinforced polymer rods in adhesively bonded anchorages based on numerical modeling, *Construction and Building Materials*, No.318, 126135, 2022.

ほか 1 編