

乾燥亀裂のパターン形成に関する数理モデルと
数値解析手法の開発

2017 年度

廣部 紗也子

主 論 文 要 旨

報告番号	○甲乙第	号	氏名	廣部 紗也子
主論文題名： 乾燥亀裂のパターン形成に関する数理モデルと数値解析手法の開発				
(内容の要旨) 乾燥破壊現象は、乾燥に伴う材料の不均一な体積収縮によって応力が発生し、亀裂が形成される現象である。乾燥亀裂は網目状構造をもち、材料表面を特徴的な長さスケールをもった多角形セルに分割する。乾燥亀裂のセルのサイズや形状は材料や条件によって大きく異なるが、「階層的に形成される網目状の亀裂パターン構造が、特徴的な長さスケールをもった多角形セルを自発的に形成する」という基本的性質は保たれている。本論文の主な目的は、乾燥破壊現象をモデル化し、数値解析によって亀裂パターンの特徴的な長さスケールとその形成過程を再現し、乾燥破壊現象における亀裂パターン形成の支配法則を明らかにすることである。本論文は7章から構成される。 第1章では、本研究の背景と目的について述べた。現在までの実験的研究および数値解析的研究における問題点を明らかにし、「乾燥亀裂パターンの特徴的な長さスケールは、複数の物理現象の連成によって決定される」という本研究の仮説を提示した。 第2章では、乾燥破壊現象の数理モデルを提案した。乾燥破壊現象を3つの物理現象(水分拡散・材料の変形・破壊)の連成によってモデル化し、拡散に関する初期値境界値問題と変形に関する境界値問題の連成による解析的な定式化を行った。また、粒子離散化有限要素法(PDS-FEM)の、乾燥収縮による非弾性ひずみを伴う場への拡張を行い、離散的な定式化を行った。 第3章では、第2章で提案した乾燥破壊現象の連成モデルの構造を分析し、その分析に基づいて、拡散の有限要素解析と変形/破壊のPDS-FEM解析を弱連成させた数値解析手法を提案した。 第4章では、一次元的な平行亀裂パターンとその形成過程を再現した数値解析について述べた。 第5章では、二次元的な網目状亀裂パターンとその形成過程を再現した数値解析について述べた。また、炭酸カルシウム懸濁液を用いた乾燥破壊実験の結果を示し、実験結果と数値解析結果を比較・検証することで、解析結果の妥当性を示した。 第6章では、亀裂パターン形成のメカニズムに関する考察を示した。水分拡散と材料の変形との連成にのみ着目した数値解析結果の分析により、乾燥に伴う応力発現のメカニズムとセルの分割に伴う応力減少のメカニズムを明らかにした。さらに、第5章の二次元的な網目状亀裂パターンとその形成過程を再現する数値解析における、亀裂面からの水分蒸発の影響を詳細に分析することにより、セル分割の際に見られる、セルの周縁部から中心部に向かっての亀裂成長の理由を明らかにした。 第7章では本論文全体をまとめ、結論を述べた。本論文で提案した仮説の妥当性が、その長さスケールが創発する過程も含めて示されたことを踏まえ、「スケール不変性をもつ支配方程式の相互作用によって均質な場から特徴的な長さスケールを決定できる」という結論とともに、本論文で行なったPDS-FEMの乾燥収縮を伴う場への拡張の意義について述べた。また、乾燥破壊現象における亀裂パターン形成の支配法則を、他のマルチフィジックスおよびパターン形成の問題にも適用できる一般的な方法論へと拡張することを、今後の課題としてあげた。				

Thesis Abstract

Registration Number	<input checked="" type="checkbox"/> “KOU” <input type="checkbox"/> “OTSU” No. *Office use only	Name	Sayako Hirobe
Thesis Title			
Mathematical model and numerical analysis method for pattern formation in desiccation cracking			
Thesis Summary			
<p>The inhomogeneous volume shrinkage of materials due to desiccation results in the formation of the desiccation cracks. The desiccation cracks have a net-like structure and tessellate the dry-out surface of materials into polygonal cells with typical length scale. While some varieties can be observed in size, shape, and net-like structure of the cracks depending on the choice of materials and conditions, the basic features of the desiccation crack pattern are conserved. The main goal of this research is to show the governing mechanism behind the pattern formation in desiccation cracking through the numerical analysis. This thesis is organized into seven chapters.</p> <p>Chapter 1 presents the introduction of this research. The problems of the previous experimental and numerical researches are summarized. The assumption of this research that the typical length scale of the desiccation crack pattern is determined from the coupling among multi-physics is proposed.</p> <p>Chapter 2 proposes the mathematical model for the desiccation crack phenomenon. The desiccation crack phenomenon is modeled by the coupling of three physical processes: the water diffusion, the deformation of the materials, and the fracture. The analytical formulation and the discretized formulation based on PDS-FEM (Particle Discretization Scheme Finite Element Method) are proposed.</p> <p>Chapter 3 proposes the numerical analysis method. The FEM analysis for diffusion and the PDS-FEM analysis for deformation and fracture are weakly coupled.</p> <p>Chapter 4 presents the numerical analysis results for the one-dimensional parallel crack pattern.</p> <p>Chapter 5 presents the numerical analysis results for the two-dimensional net-like crack pattern. Also, the results from the drying experiment of calcium carbonate slurry are presented. The validity of the proposed model and numerical analysis method is verified through the comparison of the numerical analysis results and the experimental results.</p> <p>Chapter 6 presents the supplemental numerical analysis under simplified problem setting with emphasis on the coupling between desiccation and deformation. This simplified problem setting provides some insights on the physical causes for the dependence of the stress intensity on the size of the domain. Also, the role of the evaporation from the crack surfaces is discussed.</p> <p>Chapter 7 concludes this thesis. According to the numerical analysis results, it can be safely concluded that the coupling of the equations without length scale can determine the typical length scale with typical geometry emerging out of the completely homogeneous field. In addition to the conclusion, the significance of the application of PDS-FEM to the drying shrinkage field is mentioned.</p>			