様式 7 号（第 12 条，第 31 条関係）
（様式 7 号）(Format No.7)　日本語版

学　位　論　文　要　旨
(Summary of the Doctoral Dissertation)

学位論文題目 (Dissertation Title)	メタヒューリスティクス最適化を用いたマスコンクリート温度応力解析入力パラメータの同定
氏　名(Name)	松浦　好宏

マスコンクリート構造物において、温度ひび割れの発生は耐久性の低下や維持管理費の増大を招く重要な問題であり、設計・施工段階における適切な予測と対策が求められている。温度ひび割れの予測には、温度解析、湿気移動解析および応力解析を組み合わせた温度応力解析が広く用いられているが、解析結果は断熱温度上昇特性や湿気移動特性値、外部拘束係数などの入力パラメータに強く依存する。しかしながら、これらの入力値は現状では文献値や経験則に基づいて設定されることが多く、実測データとの整合性が十分に確保されているとは言い難い。そのため、解析結果の信頼性や実務への適用性に課題が残されている。

このような背景のもと、本研究では、マスコンクリートの温度ひび割れ解析における入力パラメータの不確実性に着目し、温度解析、湿気移動解析および応力解析に必要な入力値を対象として、計測データとの整合性に基づき合理的に同定する手法の構築を目的とした。特に、複数の物理場にまたがる入力パラメータを統一的に扱うため、「温度→湿度→応力」という物理的因果構造に基づく同定フレームワークを提案するとともに、非線形かつ多峰性を有する逆解析問題に適したメタヒューリスティクス最適化手法である粒子群最適化（PSO）を適用し、その有効性を検証した。

本論文は全 7 章の構成であり、各章の内容は以下のとおりである。

第 1 章「序論」では、本研究の背景および目的を明確にするとともに、本論文の構成を示した。

第 2 章「マスコンクリートの温度ひび割れと温度応力解析の理論と体系」では、マスコンクリートにおける温度ひび割れの発生メカニズムやその影響について整理するとともに、温度解析、湿気移動解析および応力解析からなる温度ひび割れ解析の体系を整理した。さらに、解析に用いられる入力パラメータの種類と役割を整理し、その設定における課題を明確にした。

第 3 章「メタヒューリスティクス最適化手法と逆解析への適用」では、逆解析の基本概念および最適化問題としての定式化について整理したうえで、メタヒューリスティクス最適化手法の特徴と工学問題への適用性について検討した。特に、本研究で用いる粒子群最適化（PSO）について、アルゴリズムの構成やパラメータ設定、収束特性などを整理し、温度ひび割れ解析における入力パラメータ同定問題への適用方法を示した。

第 4 章「温度解析のための入力値の同定」では、断熱温度上昇特性や熱伝達率などの温度解析入力値を対象として、温度履歴の再現性に基づく逆解析を実施し、実測温度との高い整合性を有する入力値を同定できることを示した。

第 5 章「湿気移動解析入力値の同定」では、透湿率や湿気容量などの湿気移動特性値を対象として、温度解析結果を踏まえた段階的な逆解析を実施し、内部湿度分布の再現精度を向上できることを示した。

(和文 2,000 字程度 / 英文 800 語程度)
(about 800 words)

第 6 章「温度応力解析のための外部拘束係数の同定」では、外部拘束係数を対象として、温度応力およびひび割れ指数の再現性に基づく逆解析を実施し、温度ひび割れ予測精度の向上に有効であることを示した。また、温度→湿度→応力の物理的因果構造に基づく統一的な同定フレームワークの有効性を明らかにした。

第 7 章「結論」では、本研究で得られた成果を総括するとともに、今後の課題について整理した。本研究により、マスコンクリートの温度ひび割れ解析における入力パラメータを複数の物理場にわたり統一的に同定する手法を提示し、解析の信頼性向上および温度ひび割れ予測精度の向上に寄与することを示した。また、今後の課題として、温湿度連成解析の高度化、観測データに基づく計測計画の最適化、計算効率の向上および他構造物への適用展開などを示した。

様式 7 号（第 12 条，第 31 条関係）
（様式 7 号）(Format No.7) 英語版

学 位 論 文 要 旨
(Summary of the Doctoral Dissertation)

学位論文題目 (Dissertation Title)	Parameter Identification for Thermal Stress Analysis of Mass Concrete Using Metaheuristic Optimization
氏　名(Name)	MATSUURA Yoshihiro

In mass concrete structures, thermal cracking is a critical issue that may lead to a reduction in durability and an increase in maintenance costs. Therefore, accurate prediction and appropriate countermeasures at the design and construction stages are required. Thermal stress analysis, which combines thermal analysis, moisture transfer analysis, and stress analysis, is widely used for predicting thermal cracking. However, the results of such analyses strongly depend on input parameters, such as adiabatic temperature rise characteristics, moisture transfer properties, and external restraint coefficients. In practice, these parameters are often determined based on empirical values or standard references, and their consistency with measured data is not always ensured. As a result, the reliability and practical applicability of the analysis remain limited.

In this study, focusing on the uncertainty of input parameters in thermal cracking analysis of mass concrete, a method for rationally identifying input parameters based on consistency with measured data is proposed. The target parameters include those used in thermal analysis, moisture transfer analysis, and stress analysis. In particular, to handle multiple physical fields in a unified manner, a parameter identification framework based on the causal structure of “temperature → moisture → stress” is proposed. Furthermore, Particle Swarm Optimization (PSO), a metaheuristic optimization method suitable for nonlinear and multimodal inverse problems, is applied to verify the effectiveness of the proposed approach.

This thesis consists of seven chapters, and the contents of each chapter are as follows:

Chapter 1: Introduction
This chapter presents the background and objectives of this study and outlines the structure of the thesis.

Chapter 2: Theory and Framework of Thermal Cracking and Thermal Stress Analysis of Mass Concrete
This chapter reviews the mechanisms of thermal cracking in mass concrete and its effects on structural performance. It also summarizes the framework of thermal cracking analysis consisting of thermal analysis, moisture transfer analysis, and stress analysis. In addition, the types and roles of input parameters used in these analyses are organized, and the issues in their determination are

clarified.

Chapter 3: Metaheuristic Optimization Methods and Their Application to Inverse Analysis

This chapter describes the fundamental concept of inverse analysis and its formulation as an optimization problem. The characteristics of metaheuristic optimization methods and their applicability to engineering problems are discussed. In particular, the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm, including its structure, parameter settings, and convergence properties, is explained, and its application to parameter identification problems in thermal cracking analysis is presented.

Chapter 4: Identification of Input Parameters in Thermal Analysis

This chapter focuses on the identification of input parameters for thermal analysis, including adiabatic temperature rise characteristics and heat transfer coefficients. Inverse analysis based on the reproducibility of temperature histories is performed, demonstrating that input parameters highly consistent with measured temperature data can be successfully identified.

Chapter 5: Identification of Input Parameters for Moisture Transfer Analysis

This chapter deals with the identification of moisture transfer properties, including moisture permeability coefficients and moisture capacity parameters. A stepwise inverse analysis procedure based on the results of thermal analysis is applied, and its effectiveness in improving the accuracy of internal humidity distribution is verified.

Chapter 6: Identification of External Restraint Coefficients for Thermal Stress Analysis

This chapter focuses on the identification of external restraint coefficients. Inverse analysis based on the reproducibility of thermal stresses and cracking indices is conducted, demonstrating its effectiveness in improving the prediction accuracy of thermal cracking. Furthermore, the effectiveness of the unified parameter identification framework based on the causal structure of “temperature → moisture → stress” is demonstrated.

Chapter 7: Conclusions

This chapter summarizes the findings of this study and discusses future challenges. The proposed method enables the unified identification of input parameters across multiple physical fields involved in thermal cracking analysis of mass concrete, thereby improving the reliability of the analysis and the accuracy of thermal cracking prediction. Future work includes the advancement of coupled thermo-hygro analysis, optimization of measurement planning based on observational data, improvement of computational efficiency, and extension of the proposed method to other structures.

（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	松浦　好宏
審査委員	主　　査：中村　秀明
	副　　査：麻生　稔彦
	副　　査：河村　圭
	副　　査：吉武　勇
	副　　査：山田　悠二
論文題目	メタヒューリスティクス最適化を用いたマスコンクリート温度応力解析入力パラメータの同定 （Parameter Identification for Thermal Stress Analysis of Mass Concrete Using Metaheuristic Optimization）

【論文審査の結果及び最終試験の結果】

マスコンクリート構造物において，温度ひび割れの発生は耐久性の低下や維持管理費の増大を招く重要な問題であり，設計・施工段階における適切な予測と対策が求められている．

温度ひび割れの予測には，温度解析，湿気移動解析および応力解析を組み合わせた温度応力解析が広く用いられているが，解析結果は断熱温度上昇特性や湿気移動特性値，外部拘束係数などの入力パラメータに強く依存する．しかしながら，これらの入力値は現状では文献値や経験則に基づいて設定されることが多く，実測データとの整合性が十分に確保されているとは言い難い．そのため，解析結果の信頼性や実務への適用性に課題が残されている．

このような背景のもと，本研究では，マスコンクリートの温度ひび割れ解析における入力パラメータの不確実性に着目し，温度解析，湿気移動解析および応力解析に必要な入力値を対象として，計測データとの整合性に基づき合理的に同定する手法の構築を目的とした．特に，複数の物理場にまたがる入力パラメータを統一的に扱うため，「温度場→湿度場→応力場」という物理的因果構造に基づく同定フレームワークを提案するとともに，非線形かつ多峰性を有する逆解析問題に適したメタヒューリスティクス最適化手法である粒子群最適化（PSO）を適用し，その有効性を検証した．

本論文は全7章の構成であり，各章の内容は以下のとおりである．

第1章「序論」では，本研究の背景および目的を明確にするとともに，本論文の構成を示した．

第2章「マスコンクリートの温度ひび割れと温度応力解析の理論と体系」では，マスコンクリートにおける温度ひび割れの発生メカニズムやその影響について整理するとともに，温度解析，湿気移動解析および応力解析からなる温度ひび割れ解析の体系を整理した．さらに，解析に用いられる入力パラメータの種類と役割を整理し，その設定における課題を明確にした．

（様式 9 号）

第 3 章「メタヒューリスティクス最適化手法と逆解析への適用」では，逆解析の基本概念および最適化問題としての定式化について整理したうえで，メタヒューリスティクス最適化手法の特徴と工学問題への適用性について検討した．特に，本研究で用いる粒子群最適化（PSO）について，アルゴリズムの構成やパラメータ設定，収束特性などを整理し，温度ひび割れ解析における入力パラメータ同定問題への適用方法を示した．

第 4 章「温度解析のための入力値の同定」では，断熱温度上昇特性や熱伝達率などの温度解析入力値を対象として，温度履歴の再現性に基づく逆解析を実施し，実測温度との高い整合性を有する入力値を同定できることを示した．

第 5 章「湿気移動解析入力値の同定」では，透湿率や湿気容量などの湿気移動特性値を対象として，温度解析結果を踏まえた段階的な逆解析を実施し，内部湿度分布の再現精度を向上できることを示した．

第 6 章「温度応力解析のための外部拘束係数の同定」では，外部拘束係数を対象として，温度応力およびひび割れ指数の再現性に基づく逆解析を実施し，温度ひび割れ予測精度の向上に有効であることを示した．また，温度場→湿度場→応力場の物理的因果構造に基づく統一的な同定フレームワークの有効性を明らかにした．

第 7 章「結論」では，本研究で得られた成果を総括するとともに，今後の課題について整理した．本研究により，マスコンクリートの温度ひび割れ解析における入力パラメータを複数の物理場にわたり統一的に同定する手法を提示し，解析の信頼性向上および温度ひび割れ予測精度の向上に寄与することを示した．また，今後の課題として，温湿度連成解析の高度化，観測データに基づく計測計画の最適化，計算効率の向上および他構造物への適用展開などを示した．

公聴会には，学内外から 12 名の聴講者があった．公聴会における主な質問内容は，①観測点数が 9 点の場合よりも 6 点の場合の方が同定精度が高くなった理由，②外部拘束係数の近似においてγは必要か．また，α，β，γ，δの近似式はどのように決定したのか，③AI によるパラメータ同定との違いについて，④本手法は，新設構造物と既設構造物のいずれへの適用を想定しているのか，などであった．いずれの質問に対しても，発表者から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）の学位論文に十分に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) 松浦好宏，中村秀明：粒子群最適化による温度応力解析のための外部拘束係数の同定，土木学会論文集，Vol. 81, No. 1, 24-00218，pp.1-14，2025.1.
2) 松浦好宏，中村秀明：粒子群最適化による湿気移動解析のための特性値の同定，コンクリート工学年次論文集，Vol.47, No.1, pp.1122-1127，2025.6.
3) 中村秀明，松浦好宏，三谷裕二，宮澤伸吾：メタヒューリスティックス最適化手法を用いたマスコンクリートの断熱温度上昇特性の逆解析，コンクリート工学年次論文集，Vol.48, No.1, pp.810-815，2026.6.