

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	渦電流技術を用いた鋼製デッキの表面下亀裂検出に関する研究
Title(English)	A study on subsurface crack detection in steel decks using eddy current techniques
著者(和文)	PRAPHAPHANKULNitipong
Author(English)	Praphaphankul
出典(和文)	学位:博士(学術), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第12929号, 授与年月日:2024年9月20日, 学位の種別:課程博士, 審査員:佐々木 栄一,岩波 光保,千々和 伸浩,丸山 泰蔵,松崎 裕,阿久津 絢子
Citation(English)	Degree:Doctor (Academic), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12929号, Conferred date:2024/9/20, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	論文要旨
Type(English)	Summary

(博士課程)
Doctoral Program

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース：	土木・環境工学	系	申請学位(専攻分野)：	博士	(学術)
Department of, Graduate major in	土木工学	コース	Academic Degree Requested	Doctor of	(philosophy)
学生氏名：	PRAPHAPHANKUL Nitipong		審査員主査：	佐々木 栄一	
Student's Name			Chief Examiner		

要旨(和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters)

本論文は、「A study on subsurface crack detection in steel decks using eddy current techniques」と題し、英文により、全 6 章で構成されている。

鋼床版構造は、デッキプレート縦リブや横リブ等により補剛した鋼製の床版構造で、比較的軽量であることから長大橋等に多く適用されている。しかしながら、鋼床版構造では、舗装上に輪荷重が作用した際、局部的な変形とそれに伴う応力集中が生じ、交通荷重による疲労き裂の発生が問題となってきた。鋼床版構造には、様々なタイプのき裂が発生し得るが、特に、デッキプレートと縦リブとの溶接ルート部から発生したき裂は検出が難しく、また、デッキプレートの板厚貫通に至った場合に、路面陥没などの恐れがあるため、より早く確実に検出する非破壊検査手法の確立が求められている。本研究は、デッキプレート上面からの計測によりデッキプレート裏側ルート部から発生するき裂(subsurface crack)を早期に検出する手法の提案を目指し、鋼板内部の情報を取得するため、パルス波を用いた渦電流(Pulsed Eddy Current Technique, PECT)およびスイープ波を用いた渦電流(Swept Frequency Eddy Current Technique, SFECT)による手法に着目し検討したものである。

第 1 章「Introduction」では、本研究の背景、関連した既往の研究について述べ、本研究の目的を示すとともに、本論文の構成について述べている。

第 2 章「ECT Feature Extraction and Probe Development」では、subsurface crack 検出のため、渦電流計測(Eddy Current Technique, ECT)における検出信号から特徴量を抽出する手法について動磁場シミュレーションにより解析的に検討している。検討の結果、き裂検出には、PECT では時間領域分析による電圧変化、SFECT では周波数領域による位相角変化に着目することが有効であるとし、これらの特徴量抽出に適したプローブの構造および寸法について、磁場強度および検出感度の観点から検討している。

第 3 章「Features Fusion and Coupled Effects of Crack Geometries」では、PECT および SFECT からそれぞれ抽出された電圧変化のピーク値および位相角変化のピーク値という特徴量を調和平均により組み合わせた指標を提案し、き裂検出性能の向上を図るとともに、き裂の傾き、幅、長さ等の形状による計測結果への影響について分析を行っている。

第 4 章「Numerical Study on Phase Space Analysis in ECT Signal Processing」では、PECT および SFECT で取得される出力信号に対する位相空間分析の適用性について解析的な検討を行っている。ここでは、位相空間分析により得られる様々な評価指標について、き裂検出の面から比較検討を行い、位相空間上の軌跡形状の変化(Change of Phase Space Topology, CPST)という評価指標が、き裂検出に適していることを明らかにしている。またここでは、検出データに含まれるノイズレベルの影響について、Wavelet 変換によるノイズ除去方法の効果とともにシミュレーションにより確認を行っている。

第 5 章「Experimental Study on Phase Space Analysis in ECT Signal Processing」では、渦電流計測に対する位相空間分析の適用性について、模擬き裂を導入した供試体に対する渦電流計測を行い、実験的に検討している。その結果、PECT の出力信号を用いた位相空間分析では、き裂の成長に伴い CPST が変化し、板厚方向長さが 2mm 程度の模擬き裂から、検出が可能であることを確認している。一方、SFECT に位相空間分析を適用した場合には、き裂検出のためには、スイープ波の設定条件等に課題があることが示されている。

第 6 章「Conclusions and Future Works」では、本研究の結論を示すとともに、今後の課題について述べている。

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	土木・環境工学 土木工学	系 コース	申請学位（専攻分野）： Academic Degree Requested	博士 Doctor of	（学術） （philosophy）
学生氏名： Student's Name	PRAPHAPHANKUL Nitipong		審査員主査： Chief Examiner	佐々木 栄一	

要旨（英文 300 語程度）

Thesis Summary (approx.300 English Words)

This dissertation addresses the critical issue of detecting subsurface cracks in orthotropic steel decks using advanced Eddy Current Testing (ECT) methodologies, specifically PECT and SFECT. Integrating phase space analysis with the CPST index enhances the detection and characterization of subsurface defects.

Chapter 1 outlines the prevalence of fatigue cracks in steel decks and the challenges of early-stage detection. The research aims to develop and optimize ECT probe configurations and feature extraction methods to effectively detect deep subsurface cracks.

Chapter 2 presents novel feature extraction methods for PECT and SFECT signals. The time-domain approach for PECT normalizes the peak of the change in induced voltage, while the frequency-domain method for SFECT normalizes the change in phase angle. The chapter also highlights the superior performance of a cup-core ferrite probe in balancing magnetic field intensity and detection sensitivity.

Chapter 3 introduces a fusion of PECT and SFECT features to enhance detection and create a comprehensive damage index. It also examines the effects of various crack geometries on ECT performance.

Chapter 4 explores phase space analysis for ECT signal processing, investigating several damage indices to enhance subsurface crack detection. The numerical analysis shows that phase space analysis with CPST effectively identifies subtle damage patterns even in noisy conditions.

Chapter 5 validates numerical findings through experimental studies on steel deck plates with artificially induced subsurface cracks. While PECT shows high efficacy, SFECT faces limitations related to frequency sweep and sampling rate.

Chapter 6 concludes with key findings: innovative signal processing methods, optimized probe dimensions, and the robust integration of phase space analysis with ECT. The dissertation suggests future research in refining SFECT, enhancing probe configurations, integrating machine learning, implementing long-term monitoring, and exploring cross-disciplinary applications.

This research significantly advances structural health monitoring by providing a robust methodological framework for detecting subsurface fatigue cracks.

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース:	土木・環境工学	系	申請学位 (専攻分野):	博士	(学術)
Department of, Graduate major in	土木工学	コース	Academic Degree Requested	Doctor of	(philosophy)
学生氏名:	PRAPHAPHANKUL Nitipong		審査員主査:	佐々木 栄一	
Student's Name			Chief Examiner		

要旨 (英文 800 語程度)

Thesis Summary (approx.800 English Words)

This dissertation addresses the critical issue of detecting subsurface cracks in orthotropic steel decks, primarily using advanced Eddy Current Testing (ECT) methodologies. The primary techniques explored include Pulsed Eddy Current Testing (PECT) and Swept Frequency Eddy Current Testing (SFECT). The study also integrates phase space analysis with the Change of Phase Space Trajectory (CPST) index to enhance the detection and characterization of subsurface defects.

Chapter 1: Background and Objectives
The initial chapter sets the stage by discussing the prevalence of fatigue cracks in steel decks, introducing PECT and SFECT, and the challenges for detecting sensitivity at the early state of fatigue cracks in steel decks associated with feature extraction in ECT and ECT probe development. The chapter outlines the purpose of the research: to develop and optimize ECT probe configurations and feature extraction methods that can effectively detect deep subsurface cracks.

Chapter 2: ECT Feature Extraction and Probe Development
This chapter delves into the development of novel feature extraction methods for PECT and SFECT signals. For PECT, a time-domain approach normalizes the peak of the change in induced voltage, enhancing sensitivity by mitigating noise and current variations. For SFECT, a frequency-domain method normalizes the change in phase angle, improving clarity and defect detection accuracy. The chapter also details the optimization of ECT probe configurations, highlighting the superior performance of a cup-core ferrite probe, which balances magnetic field intensity and detection sensitivity.

Chapter 3: Features Fusion and Coupled Effects of Crack Geometries
Chapter three introduces a fusion of PECT and SFECT features to enhance subsurface crack detection. This approach leverages the strengths of both methodologies, PECT and SFECT, creating a comprehensive damage index that improves assessment reliability. The chapter also examines how various crack geometries, such as inclination, width, length, sharp tip, non-uniform weld penetration, and rib, affect ECT performance. It emphasizes the importance of considering these factors in both modeling and practical applications to improve detection accuracy.

Chapter 4: Numerical Study on Phase Space Analysis in ECT Signal Processing
This chapter explores the application of phase space analysis to ECT response signal for subsurface crack detection. It investigates several damage indices, including the RMSE, MAE, DTW, CPST, and CS index, to enhance the detection of subsurface cracks. The numerical analysis demonstrates that phase space analysis, combined with CPST, can effectively identify subtle damage patterns even under noisy conditions. This method proves to be a reliable tool for practical subsurface damage detection.

Chapter 5: Experimental Study on Phase Space Analysis in ECT Signal Processing
Chapter five validates the numerical findings through experimental studies on steel deck plates with artificially induced damage, subsurface cracks with 3 types of cracks: square notched, inclined square notched, and semi-elliptical crack. The experiments confirm the robustness and precision of combining PECT with phase space analysis and CPST. While PECT shows high efficacy in detecting and characterizing subsurface cracks, SFECT faces limitations related to its frequency sweep and sampling rate, which affect its resolution and effectiveness.

Chapter 6: Conclusions and Future Work

The dissertation concludes by summarizing the key findings:

- Innovative Signal Processing: The development of new feature extraction methods for PECT and SFECT significantly enhances subsurface crack detection.
- Probe Optimization: The optimal dimensions for the ECT probe were identified as the most effective for detecting subsurface defects in steel plates.
- Phase Space Analysis: The integration of phase space analysis with ECT and the CPST index provides a robust framework for detecting and characterizing subsurface damage, even in noisy environments.
- Experimental Validation: Experimental studies validate the effectiveness of PECT and phase space analysis in practical applications, though SFECT requires further refinement to improve its performance.

The dissertation also suggests areas for future research, including:

- Refining SFECT to overcome current limitations.
- Enhancing ECT probe configurations to prevent overheating and improve detection sensitivity.
- Integrating machine learning algorithms with phase space analysis for automated defect classification.
- Implementing in the long-term monitoring and field inspection
- Exploring cross-disciplinary applications of the developed methodologies.

Overall, this research contributes significantly to the field of structural health monitoring by providing advanced diagnostic techniques and a methodological framework that enhances the accuracy and reliability of existing NDT&E methods to detect subsurface fatigue crack.

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note: Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).