



Nonlinear Seismic Response Analysis Method of Corroded Pile-Supported Wharves

Refani, Afif Navir

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2024-03-25

(Date of Publication)

2027-03-25

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第8931号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/0100490156>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



(Attachment: Form 3)

Dissertation Abstract

Name: AFIF NAVIR REFANI

Department: Civil Engineering

Dissertation Title (If written in a foreign language, provide a Japanese translation as well.)

Nonlinear Seismic Response Analysis Method of Corroded Pile-Supported Wharves

(腐食した杭支持棧橋の非線形地震応答解析法)

Academic Supervisor: Takashi Nagao

Pile-supported wharves (PSWs), commonly used as port structures in Indonesia, are vulnerable to earthquakes and susceptible to corrosion owing to sea salt deposition and repeated wetting and drying cycles during their lifetime. Typical small feeder ports in Indonesia use spun piles as the foundation. Nonlinear time-history analysis (NLTHA) is considered the most accurate method for analyzing the nonlinear seismic response of corroded PSWs under different types of earthquakes. However, due to the complexity and substantial computational effort required, this is not a preferred option for design practice. This study introduces a new method for investigating the nonlinear seismic response of corroded PSW in Indonesia using frame analysis (FA). The proposed FA method includes a novel approach for configuring the hinge properties, predicting the material properties, and calculating the reduction factor of the bending stiffness of corroded spun piles. This study also proposed site-specific earthquake ground motions (EGMs) and spectral accelerations (SA) for the seismic design of port facilities in Indonesia. A comparison was conducted between the nonlinear static analysis (NLSA) using the proposed FA method and NLTHA using fiber-based finite element analysis (FB-FEA) under the considered waveforms, which were subsequently modified to align with the proposed SA, to evaluate the applicability of the proposed FA method.

EGMs records and soil data in Indonesia were used in the seismic response analysis, incorporating nonlinear soil properties to develop 114 site-specific EGMs and SAs at port sites. Deconvolution and convolution analyses were applied to develop EGMs and SAs for the seismic design of port facilities in Indonesia. The comparison between the proposed EGMs and those in the Seismic Design Code for Indonesia (SNI) results in considerable deviation, especially in the period range of PSWs. The proposed SAs were greater than those in the SNI during the period between 0.2 and 2.0 seconds for site class SD and above 1.0 seconds for site class SE.

In a marine environment, corrosion typically degrades the performance of spun piles by reducing the rebar area, concrete compressive strength, yield strength of PC bars, and bond strength between PC bars and concrete. In this study, a three-dimensional finite element analysis (FEA) model was utilized to simulate the effect of non-uniformly distributed corrosion products on spun pile materials over a period of 0–75 years. The model incorporated volumetric strain expansion to determine the stress-strain relationship of the corroded spun pile materials and the bond-slip relationship between the corroded PC bar and concrete. This study presented equations for predicting the degree of deterioration in corroded spun pile materials, which were in good agreement

with the FEA results.

FA is often used in design practice due to its ease of implementation, whereas FB-FEA has gained widespread recognition for its ability to reproduce experimental results and is a reliable method for evaluating the nonlinear seismic response of PSWs. For accurate reproduction of the nonlinear seismic response of a PSWs using FA, a proper configuration of the mechanical properties, such as the hinge property, is essential. The validity of the hinge properties suggested in previous studies for PSWs with spun piles is uncertain. In this study, a new FA method was introduced to investigate the nonlinear seismic response of corroded PSWs, which was evaluated via pushover analysis using three methods: FA following the approach of a previous study (FA-1), the proposed FA method (FA-2), and FB-FEA. Both vertical pile and batter pile configurations were considered for the PSW foundations. The pushover analysis results were compared in terms of the natural period, plastic hinge formation, and load capacity of the corroded PSWs. The findings suggest an appropriate definition of the bending stiffness reduction factor, the moment-curvature relationship, and the axial load-bending moment (P–M) capacity of corroded spun piles. The FA-2 results demonstrated excellent matches with the FB-FEA results, whereas the FA-1 results were less accurate in terms of the natural periods and load capacities of the corroded PSWs.

The comparative assessment between NLSA and NLTHA for the seismic response of corroded PSWs demonstrates the effectiveness of the proposed FA method in NLSA to accurately estimate the maximum horizontal displacement and acceleration of corroded PSWs, as compared to the results obtained from NLTHA using FB-FEA. Nevertheless, the nonlinear seismic response of corroded PSWs utilizing the proposed FA method in NLSA typically yields a larger response compared to NLTHA because the responses generated by NLSA are based on SA, which represents the maximum responses of the corroded PSW structure under the considered earthquake. On the other hand, the NLTHA provides the actual response of corroded PSWs under the considered seismic waveform. In addition, different waveforms resulted in different maximum corroded PSW displacements, accelerations, and inertial forces. Therefore, various waveforms should be considered when conducting seismic response analysis of corroded PSWs.

氏名	AFIF NAVIR REFANI		
論文 題目	Nonlinear Seismic Response Analysis Method of Corroded Pile-Supported Wharves (腐食した杭支持栈橋の非線形地震応答解析法)		
審査 委員	区 分	職 名	氏 名
	主 査	教授	長尾 毅
	副 査	教授	鋤田 泰子
	副 査	准教授	三木 朋広
	副 査		印
	副 査		印
要 旨			
インドネシアでは、地震による社会基盤施設の被害が繰り返されてきた。栈橋は地震被害に対して最も脆弱な港湾構造物の一つであり、今後の港湾構造物の地震被害を低減するために、栈橋の耐震性能は注意深く評価されなければならない。インドネシアにおいては、PC 杭基礎の栈橋が用いられることが多いが、現在インドネシアで採用されている栈橋の耐震設計法には様々な問題がある。まず、設計地震動については、諸外国の設計コードを参照しているため、必ずしもインドネシアの地震動の特性を考慮して定められたものとは言えない。次に、栈橋は臨海部に建設されるために杭基礎は腐食の影響を受けやすいが、腐食の影響を適切に考慮する手法が確立されていない。さらに、腐食した栈橋の耐震性を簡易かつ精度よく照査する手法も確立されていない。本研究は、腐食した杭基礎を有する栈橋の耐震性能を評価するための合理的な方法を提案することを目的としている。論文は第1章～第7章で構成されている。 第1章「序論」では、研究の背景と目的を示している。 第2章「既往の研究」では、本研究に関連する既往の研究のレビュー結果をしている。特に、腐食のモデル化と栈橋の耐震性評価手法について、詳細に述べている。 第3章「インドネシアにおける地点依存の設計地震動」では、耐震設計に必要となる地点依存の地震動を提案している。まず、インドネシアにおける地震観測記録を収集し、これを基盤に引き戻したうえで、インドネシアの耐震設計コードに示されたインドネシア臨海部の加速度最大値に振幅調整している。次に、インドネシア臨海部の表層地盤データを収集整理してモデル化を行い、これらを組み合わせることで地盤の非線形性を考慮した地震応答解析を数多く実施している。得られた地表の地震動のデータの統計処理を通して、インドネシアにおける港湾構造物の耐震設計のための地震動を提案している。さらに、提案地震動を現行の設計コードにおけるものと比較検討し、両者の間には、耐震設計において重要な周期帯において無視できない差があることを明らかにしている。 第4章「PC 杭の力学特性に対する腐食の影響」においては、3次元の有限要素解析を用いて、腐食の進行に伴うコンクリートの応力特性の変化、コンクリートのひずみ分布の変化、付着強度の低下、PC 鋼材の降伏強度の低下等の特性を明らかにしている。さらに、得られた結果をもとに、それらパラメータの低下度合いを腐食度に応じた推定する手法を提案している。 第5章「腐食した栈橋の非線形地震応答の簡易照査法」では、一般に設計実務で用いられるフレーム解析を用いて、有限要素解析による栈橋の地震応答解析結果を再現可能な簡易耐震性能照査法について検討している。本章では、地震時の慣性力を静的に漸増して与えるプッシュオーバー解析を用いている。簡易耐震性能照査法においては、フレーム解析に用いる杭のモーメントー曲率関係については、既往の手法によるモデル化と、より合理的と考えられるモデル化（提案法）の2種類を適用している。腐食度の進行に応じた杭の曲げ剛性低下度を各種の方法で比較することで提案法の優位性を示し、荷重ー変位の関係を簡易手法によって精度よく評価できることを示している。 第6章「非線形静的解析法と非線形動的解析法の比較」においては、簡易耐震性能照査法と動的有限要素解析法の結果を比較することによって、腐食度合いに応じた栈橋の耐震性能を簡易法によって照査する方法を検討している。			

氏名	AFIF NAVIR REFANI
第7章「結論」では、以上の検討結果を総括し、本研究で得られた結論を示している。 以上、本論文は、腐食の影響を受けた栈橋の新しい耐震性能照査法を提案するものであり、栈橋の耐震設計法の高度化に寄与するものである。提出された論文は工学研究科学位論文評価基準を満たしており、学位申請者のAFIF NAVIR REFANI氏は、博士（工学）の学位を得る資格があると認める。	