OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	Nonlinear Hydroelastic/Hydroelastoplastic Responses of Ships and Floating Structures by Two-way CFD-FEA Technique with Enhanced Performance
Author(s)	Xie, Binyang
Citation	大阪大学, 2026, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/105482
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

様式３

論　文　内　容　の　要　旨

氏　名　（　XIE BINYANG　）	
論文題名	Nonlinear Hydroelastic/Hydroelastoplastic Responses of Ships and Floating Structures by Two-way CFD-FEA Technique with Enhanced Performance (高性能化CFD-FEA双方向連成手法による船舶および浮体構造物の非線形流力弾性/弾塑性応答に関する研究)

論文内容の要旨

This thesis develops and systematically validates a high-fidelity, strongly coupled Computational Fluid Dynamics-Finite Element Analysis (CFD-FEA) framework for predicting linear and nonlinear hydroelastic and hydroelastoplastic responses of marine structures, including springing, slamming, and hydroelastic wave propagation. Particular emphasis is placed on improving the efficiency and robustness of fluid-structure coupling. The background, motivation and problem statement of the problem are discussed in Chapter 1.

In Chapter 2, the methodology underlying the proposed coupled CFD-FEA frameworks is presented. Within a strong partitioned interaction-resolution scheme, the fluid and structural fields are iteratively coupled until interface convergence is achieved, yielding solutions equivalent to those obtained from monolithic formulations. Techniques to accelerate convergence and enhance numerical stability, such as a predictor-based coupling strategy, are introduced, which constitutes the core methodological contribution of the thesis.

In Chapter 3, a standard coupled CFD-FEA framework is first applied to the hydroelastic response of a segmented Barge(A) model and a segmented KVLCC2 model in regular waves. Towing-tank experiments are conducted over a range of wave conditions, and the response amplitude operators for motions obtained from the CFD-FEA simulations are shown to agree well with measurements. The results confirm that, in the investigated conditions, the ship structures respond predominantly in the 2-node vertical bending mode.

In Chapter 4, higher-order springing, in which the encounter frequency or its higher harmonics excite structural natural frequencies, is then investigated using a segmented Barge(B) model using the proposed coupled CFD-FEA framework with a predictor. Combined tank tests and two-way coupled simulations demonstrate that the predictor-enhanced framework accurately reproduces the measured heave, pitch, and flexible vertical bending responses, and resolves springing vibrations up to the 14th harmonic of the wave load- a phenomenon rarely documented in the literature. This provides new physical insight into the mechanisms and spectral characteristics of high-order springing.

In Chapter 5, slamming-induced hydroelastic and hydroelastoplastic responses are studied for a wedge section model based on a coupled CFD-FEA framework. Comparisons between elastic and elastoplastic simulations reveal that material plasticity can significantly modify the transient hydrodynamic and structural response, indicating that hydro-elastoplastic effects should be carefully considered at the design stage.

In Chapter 6, the interaction between nonlinear waves and a highly flexible VLFS (Very Large Floating Structure) -like plate is investigated using a coupled CFD-FEA framework with a Laplace matrix, which stabilizes the coupling at the Fluid-Structure Interaction (FSI) interface when the added-mass effect is significant. The simulations reproduce key nonlinear features of the wave profile, including crest flattening, trough sharpening, and subsequent profile inversion during propagation. The degree of nonlinearity, quantified by the ratio of positive to negative peak amplitudes, is in good agreement with predictions by analytical solutions derived in literature. These results demonstrate that the CFD-FEA framework with Laplace matrix provides a unified and reliable tool for studying a wide range of hydroelastic phenomena in large flexible floating structures, and they form the basis for recommendations on future developments in numerical modelling and experimental validation.

Finally, the main findings are summarized, and suggestions for future work are presented in Chapter 7.

様式 7

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　名　（　XIE　BINYANG　）		
	（職）	氏　名
論文審査担当者	主 査　教 授	飯島　一博
	副 査　教 授	大沢　直樹
	副 査　准教授	辰巳　晃

論文審査の結果の要旨

船体や海洋構造物に見られる非線形流力弾性・弾塑性応答を精度よく推定する際、数値流体力学（CFD)と有限要素解析（FEA）を双方向に連成させた CFD-FEA 双方向連成解析が用いられる。このような例として、波浪中船体の振動現象であるスプリンギング応答、スラミング衝撃荷重下の構造応答、超大型浮体上の流力弾性波動などの問題がある。双方向連成解析には結果が収束せず、不安定化する困難さや計算の高コストの課題がある。本論文は、CFD-FEA 双方向連成解析の効率化・安定化のための手法を提案し、上に挙げた各問題に適用し、その系統的検証を行うことを目的とする。

本論文は、研究背景と目的を論じた第 1 章を含め、全 7 章で構成されている。

第２章では、CFD-FEA 双方向連成解析の効率化と安定化を検討している。双方向連成解析では、ひとつの時刻ステップの中で界面の圧力と変形が収束し釣り合うまで、予測子(Predictor)-修正子（Corrector）スキームにより、CFD-FEA 解析を双方向に反復させる。効率化・安定化の手法として解析初期に、より良い予測を与えることを提案している。

第３章では、規則波中のバージ型の分割模型(A)ならびに KVLCC2 の分割模型の流力弾性応答に関する水槽試験結果を対象に手法の検証を行っている。水槽試験に取得された応答関数と CFD-FEA 双方向連成解析による応答関数がよく一致すること、また、二節縦曲げ振動モードが卓越する点でも水槽試験と解析結果が一致することを示している。

第４章では、バージ型の分割模型(B)を用いた規則波中での水槽試験結果に見られた、非線形かつ高次の波浪中弾性振動（高次スプリンギング）応答を対象に、CFD-FEA 双方向連成解析を行っている。改良した予測子を用いることで計算の効率化・安定化が図られ、提案手法は水槽試験で計測された運動応答や弾性振動応答を精度よく再現できることを示している。高次スプリンギング応答は、波浪周波数成分に対して 14 次にも達していることを解明し、これは高次スプリンギング応答についてのこれまでの物理的解釈や知見を更新するものとなっている。

第５章では、スラミング衝撃荷重下の防撓板の流力弾性・弾塑性応答に CFD-FEA 双方向連成解析を適用している。ここで防撓板は楔形模型の斜板を構成する。流体・構造の連成効果により、材料の塑性力学的特性が過渡的な流体力学的挙動や構造変形応答に影響しうることを見出し、構造設計の際の連成効果の考慮の必要性を指摘している。

第６章では、大水深に設置された高可撓性の超大型浮体上を伝播する流力弾性波動の問題を取り扱っている。同問題は非線形流力弾性変形の下、付加質量効果による不安定化が生じる例として知られているが、CFD-FEA 双方向連成解析の安定化を図るため、流体と構造の界面に Laplace 行列を導入することでこの解決を図っている。提案手法による結果を、先行して発表された非線形流力弾性理論による理論値と比較したところ、長波長域で、たわみ波の山の先鋭化と谷の平坦化に代表される非線形流力弾性効果の特徴を定性的・定量的によく捉えること、短波長域では、たわみ波形状が上下反転することも捉え、提案手法は非線形流力弾性理論による理論予測を裏付けることに成功している。

第７章では、本研究で得られた研究成果を総括し、将来の研究の展望について纏めて結論としている。

以上のように、本論文は船体ならびに海洋構造物の各種流力弾性・弾塑性応答解析に用いられる、CFD-FEA 双方向連成解析の効率化・安定化のための手法の提案を行い、同手法を多様な問題に適用し、系統的検証を行い、その有効性・汎用性を確かめたものであり、成果は船舶海洋工学全般に裨益するところが大である。よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。