

弾性係留システムの諸元変化に伴う運動応答関数の特性評価

Evaluation of Response Amplitude Operator Due to Parameter Variations in Elastic Mooring Systems

○関根彰良¹, 土上湧生¹, 鈴木渉², 恵藤浩朗³

*Akira Sekine¹, Yuki Donoue¹, Wataru Suzuki², Hiroaki Eto³

Abstract: Previous studies on elastic mooring systems clarified how the restoring force characteristics relate to floating structure motion and proposed a method to select mooring parameters. However, these approaches do not consider the response characteristics of floating structures, such as resonance with site-specific waves. This study focuses on the Response Amplitude Operator (RAO) to evaluate those response characteristics and aims to clarify the relationship between the RAO and the design parameters of elastic mooring systems.

1. はじめに

既存研究^[1]では、用途や運用方法から決定される許容動揺振幅を満足する弾性係留索の諸元を設計者が選定可能な弾性係留システム^[2]の設計に資する一連の手順を示した。しかし、弾性係留索諸元の選定において、浮体式構造物が設置海域の波浪特性と同調し、共振を引き起こすといった応答特性については考慮されていない。そこで本研究では、浮体式構造物の応答特性を捉える指標として、運動応答関数 (Response Amplitude Operator : 以下 RAO) に着目し、浮体式構造物の RAO と弾性係留システムの各種設定パラメータとの関係性を明らかにすることを目的として研究を行った。

2. 計算条件

2.1 弾性係留索を適用した浮体モデルの概要

今後、普及が予想される中規模の浮体式洋上風車を想定し、浮体モデルの規模については 50m×50m とした。ここで Figure 1 に浮体規模および係留索配置の例を示す。hは水深、 θ_w は波の入射角、 θ_h は係留索の配置角度、 θ_m は浮体側係留索取付け角度を表す。

2.2 自然環境条件

既存研究^[1]で扱われた東京湾の自然環境条件を参考として水深 21m, 有義波高 2.6m, 有義波周期 5.6s とした。そして波周波数の範囲は 0.00~0.45Hz とする。また、波入射角は 90deg とし、波が作用した際の運動モード (Sway, Heave, Roll) における RAO を確認する。

2.3 弾性係留索の設定パラメータ

弾性係留索は、複数のラバーロープを束ねた弾性体と、その上部に合成繊維ロープが繋がる形で構成される。Table 1 に本研究で扱う弾性係留システムの設定パラメータを示す。浮体の隅角部におけるラバーロープ連数 (N_r) を 300 本, 初期伸び率を 0.5 とし、その他の設定パラメータについては既存研究^[1]で扱ったモデルを参考に設定し

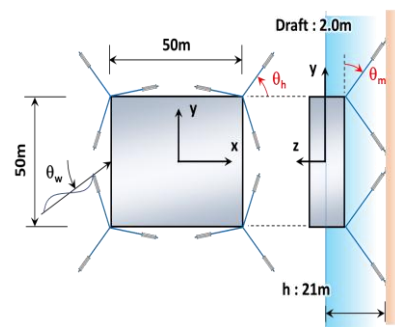


Figure 1 Scale of floating structure and layout of elastic mooring systems

Table 1 Design parameters of the elastic mooring line

Initial length of rubber rope (L_e)	5-20 [m]
Length of rope (L_r)	20-40 [m]
Number of rubber ropes connected to one corner (N_r)	300
Initial elongation	0.5
Weight per unit length of rubber	0.012 [kN/m]
Weight per unit length of rope	9.7×10^{-4} [kN/m]
Diameter of rubber rope	0.036 [m]
Nominal diameter of rope	0.185 [m]
Material of rubber rope	Kevla, Technora, Polyethylene, Multi-component rubber

た。設定パラメータと RAO および復元力特性 (C_r) の関係性を明らかにするため、既存研究^[1]より、ラバーロープ長さ (L_e) に対して C_r が最も効果を発揮する合成繊維ロープ長さ (L_r) が算出可能であることを利用し、 L_e を 5~20m の範囲で変化させた際に、それぞれの条件において C_r が最大となる L_r を用いて検討を行った。

3. 結果および考察

3.1 L_e, L_r の変化に伴う RAO の傾向

Table 2 には、各 Case における L_e, L_r および C_r を示した。そして Case 1~6 における運動モードごとの RAO を

1:日大理工・学部・海建 2:日大理工・院・(前)海建 3:日大理工・教員

Figure 2にまとめる. ここで Figure 2における縦軸の a は波振幅を示し, ζ_n ($n=1\sim 6$) は各自由度における応答変位を示す. Figure 2aは Sway 方向の RAO を示したものであり, L_e と L_r を変化させた場合, RAO は最大で 1.00~1.50を示すことが確認された. また, C_r の増加に伴い RAO のピーク値が抑制され, さらにピーク周波数が高周波数帯へ移動する結果を示した. 次に Figure 2b, 2cは Heave 方向, Roll 方向の RAO を示す. Heave 方向では, 低周波数帯から高周波数帯にかけて RAO が減少する傾向を示し, 特に 0.17~0.25Hz 付近でその特徴が顕著に現れた. さらに, 高周波数帯においては, RAO が 0 付近へ収束する傾向が確認された. 各 Case で差は見られるものの, 全体的には近似した応答を示した. そして Roll 方向においても, Heave 方向と類似の傾向が確認された. また, Heave 方向, Roll 方向について, 設定パラメータの変化に伴う RAO の傾向に大きな変化が見られなかった. このことから, 上下方向の運動応答に対する剛性と考えられる浮力ばねが, 設定パラメータよりも RAO の傾向に大きく影響すると考える. これにより, 浮力ばねに関する浮体規模や浮体重量を変えることで, RAO の傾向を調整可能だと予想できる.

3.2 C_r が一致した場合の Sway 方向における RAO の評価

Figure 3は異なる設定パラメータで, C_r が実質的に一致した場合の Sway 方向の RAO を比較したものである. C_r が近似した 2組の Case から, どちらも RAO の傾向が一致していることが確認でき, 他の自由度でも同様の傾向が見られた. この結果から, C_r が一致すれば RAO も一致することが確認でき, RAO は C_r に依存していると考えられる.

3.3 共振リスクが高い周波数帯の RAO の評価

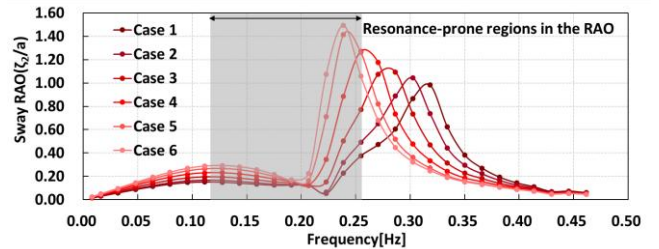
設置海域の海象条件を考慮して各 Case における RAO を評価した. ここでは, 修正ブレッグシュナイダー・光易スペクトル式を用いて有義波周期前後で得られる周波数帯を確認し, 当該海域で発生する波の範囲を 0.11~0.26Hz とした. この周波数帯は Figure 2 にグレーアウトして表示している. これは共振リスクが高い領域であり, Sway 方向において Case 6 では, 0.24 Hz における RAO が 1.49 に達し, 波高以上の応答が確認された. 一方で, C_r が増加するように設定パラメータを調整し, ピーク周波数を高周波数帯へ移動させることで, Case 1 のように同調範囲でも RAO を最大 0.38 に抑制できる. このように, C_r を考慮して弾性係留索諸元を調整することで, 水平方向の運動については RAO のピークを制御でき, 設置海域の海象条件に応じて運動応答を調整可能であることが示された.

4. おわりに

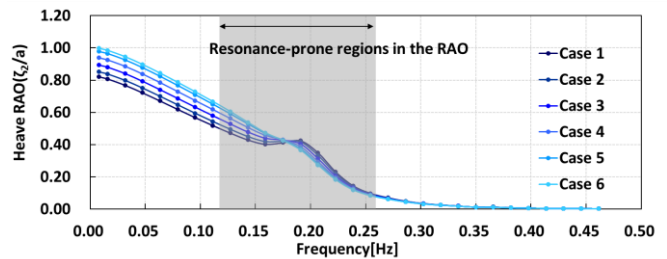
本研究では, 弾性係留システムにおける設定パラメー

Table 2 The numerical values of L_e , L_r and C_r for Case

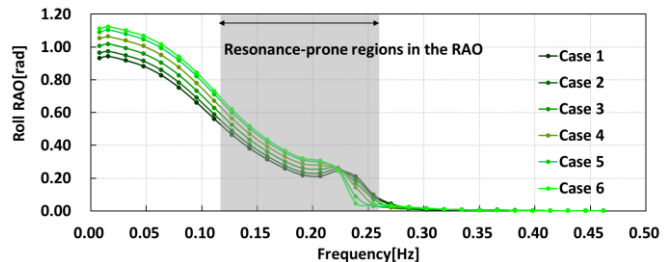
Case	L_e [m]	L_r [m]	C_r [kN/m]
Case 1	5	30	2171
Case 2	7	27	2000
Case 2'	5	20	1999
Case 3	10	20	1782
Case 4	14	16	1571
Case 5	18	10	1405
Case 5'	10	60	1401
Case 6	20	5	1324



a) Sway RAO for regular wave conditions



b) Heave RAO for regular wave conditions



c) Roll RAO for regular wave conditions

Figure 2 RAO for each motion mode

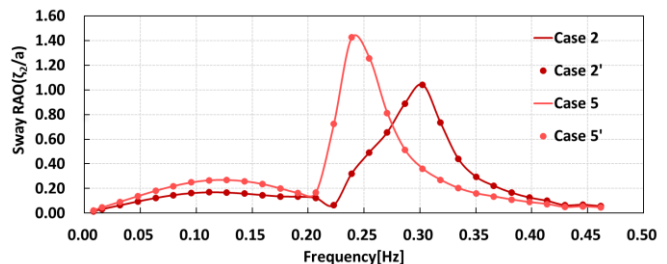


Figure 3 Sway RAO for similar C_r

タと RAO の関係性を検討した. これにより, 設定パラメータの変化に伴う特に水平方向の RAO の傾向の変動は, C_r に依存していることを改めて確認した.

参考文献

[1] 惠藤浩朗, 鹿島瞳, 菅原幹将, 鈴木湧大, 岡崎雄一: 弾性係留システムを適用した超大型浮体式構造物の係留索諸元選定に関する基礎的研究, 土木学会論文集 B3 (海洋開発) Vol. 78, No. 2, pp.271-276, 2022.
 [2] Superflex Mooring System : <http://supflex.com/>, 2025.4 参照