

京都大学工学部

学生会員 ○五井 良直

京都大学大学院工学研究科

正 会 員 宇都宮 智昭

1. 序論

浮体式洋上風力発電施設は、風、波、流れなどを受けて動揺する。スパー型浮体においてはその振動特性のために動揺量が過大になる可能性があり、波浪中における浮体基礎の動的安定性について検討する必要がある。

運動方程式の係数が周期的に変化するような力学系はパラメータ励振系と呼ばれており、パラメータ励振系ではパラメータ共振と呼ばれる動的応答の発散が生じる可能性がある。また、系に十分な減衰を与えることでパラメータ共振の発生を抑制できる場合があることがわかっている。浮体の運動は各成分が連成した多自由度のパラメータ励振系として考えることができるが、既往の研究では多自由度の連成を直接評価するような安定性の評価法が十分に検討されていない。

本研究では、規則波中における二段円筒型浮体の運動を多自由度のパラメータ励振系として定式化し、Hsu(1963)による摂動法の結果[1]を用いた浮体の安定性の評価法を提示する。さらに、数値解析、模型実験のそれぞれによる結果の比較を行い、理論との整合性について考察する。

2. 基礎理論

入射波は水深を無限とみなした場合の Airy 波として、動水圧、水粒子速度および加速度を評価する。波力については、浮体の軸方向、軸直交方向にそれぞれモリソン式を適用する。さらに、係留力の総和を波の進行方向に対する線形ばねとしてモデル化する。以上の仮定に基づき適当な近似と変形を施すと、定常周期解周りの微小動揺に関するベクトル $\mathbf{x}$ についての方程式

$$\ddot{\mathbf{x}} = -(B + \zeta_a(D \cos(\omega t) + E \sin(\omega t)))\mathbf{x} - \zeta_a F \dot{\mathbf{x}}$$

が得られる。ここで、 B 、 D 、 E 、 F は 3 次の定数行列であり、 B は対角行列である。また、 ζ_a は入射波の振幅、 ω は入射波の角振動数である。

この系には Hsu(1963)の結果[1]による安定性の評価を適用することができる。

3. 数値解析手法

以下の方法で運動方程式の外力を評価し、これを微分方程式の初期値問題として解くことで浮体の動揺の時系列を評価する。

(1) 波力の評価法について

波力は、浮体の軸方向、軸直交方向にそれぞれモリソン式を適用して評価する。入射波については有限水深における単周期の Airy 波として評価する。

水槽端からの反射波を考慮する場合については、実験時における反射率および、入射波と反射波の位相差の測定値を適用し、入射波と反射波の重ね合わせとして評価する。

(2) 係留力の評価法について

係留索の抗力による効果を考慮しない場合の係留力は、カテナリー理論に基づいて評価する。

係留索の抗力による効果を考慮する場合は、係留力増分を次のように評価する。係留索の運動は近似的に平面内の運動についてのみ考慮し、係留索の形状はカテナリー理論によるものとする。このとき、係留索上のある点の移動速度は浮体側の係留取り付け点の位置と速度についての関数として表される。この速度からモリソン式に基づいて係留索の各微小要素が受ける抗力を評価できる。抗力の係留索に対してなす仕事、係留力増分の浮体に対してなす仕事に等しいとみなして、係留力増分を評価する。

4. 実験方法

2MW 級の風力発電施設に対して 100 分の 1 スケールの 2 段円筒型浮体模型を用いて、2 次元造波水路（幅 0.8m、高さ 1.0m、水路長 30m）での波浪動揺実験を行った。浮体模型形状の概略を図 1 に示す。また、浮体模型の諸元を表 1 に示す。

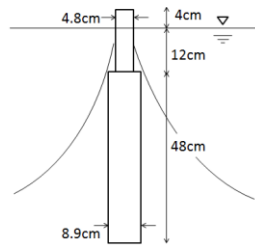


図 1:浮体模型形状の概略

表 1:浮体模型の諸元

全高	64 cm
上部円筒高さ	16.0 cm
下部円筒高さ	48.0 cm
喫水	60.0 cm
上部円筒直径	4.8 cm
下部円筒直径	8.9 cm
重心高さ (底面から)	19.8 cm
慣動半径	26.0 cm
係留索取り付け位置 (底面から)	56.0 cm
Heave 方向動揺の固有角振動数	2.36 rad/sec
Pitch 方向動揺の固有角振動数	1.73 rad/sec
Surge 方向動揺の固有角振動数	0.36 rad/sec

浮体模型はアルミチェーンで 4 点係留し水路幅 80cm の中央に設置した。係留索の 1 本あたりの長さは 190cm とし、係留アンカーは水路の長さ方向に 150cm、幅方向に 40cm とした。

入射波は単周期の規則波とし、入射波高は模型を設置しない状態で 5cm となるようにした。入射波周期は 0.6sec から 1.2sec まで 0.2sec ごと、1.4sec から 2.1sec まで 0.05sec ごと、2.2sec から 2.6sec まで 0.2sec ごとの各条件について実験を行った。

5. 結果

図 2、図 3 は、それぞれ Heave 方向、Pitch 方向について波浪動揺試験における波浪応答倍率（入射波の単位振幅あたりの応答振幅）の実験結果と数値解析結果を示したものである。数値解析については以下の 3 通りの場合の計算を行った。

Case1:反射波と係留索の抗力の影響を評価しない。

Case2:反射波の影響を評価し係留索の抗力を評価しない。

Case3:反射波と係留索の抗力を評価する。

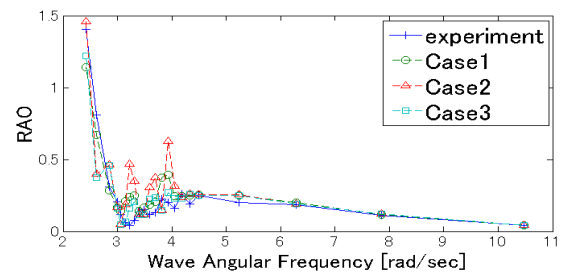


図 2: Heave 方向波浪応答倍率

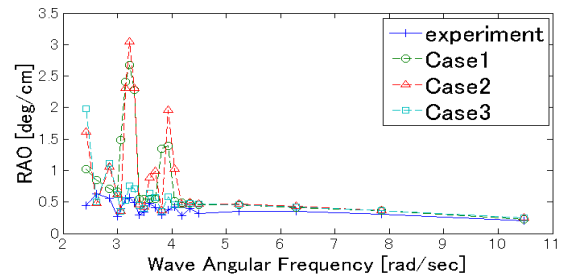


図 3: Pitch 方向波浪応答倍率

実験に用いた浮体模型について 2 節の安定判別手法を適用した結果、入射波の角振動数が 3.41 rad/sec、3.89 rad/sec となる近傍においてパラメータ共振が発生することが予想される。この角振動数は、Case1、Case2 において応答が大きくなっている部分と概ね一致する。

Case3 においては実験結果と同様に、パラメータ共振と考えられる応答は見られない。このことは、浮体におけるパラメータ共振の抑制に関して、係留索の抗力の効果が寄与していることを示唆している。

6. 結論

- 規則波中における二段円筒型浮体の平面運動について多自由度パラメータ励振系の運動方程式が定式化された。
- 安定性の評価手法が得られた。これによりパラメータ共振の発生する入射波周期を予想することができる。
- 係留索が水中を移動することによって受ける抗力が、浮体の共振の抑制に対して寄与している可能性があることが示された。

参考文献

[1] Hsu, C.S.: On the Parametric Excitation of a Dynamic System Having Multiple Degrees of Freedom, *Trans. ASME, Aser. E*, 30-3, pp.367-370, 1963.