

空気圧を制御するエアクッション型浮体の応答に関する研究

A Study on Response of Aircushion Type Floating Structure

学籍番号 47-096656 當金 末由妃

指導教員 林 昌奎 教授

(平成 23 年 3 月 24 日修了予定)

Keywords: エアクッション型浮体, 空気圧制御, 三次元特異点分布法

Keywords: Aircushion Type Floating Structure, pressure control, Three-dimensional by Source Distribution Method

1. 序論

近年, 洋上風力発電や海洋資源開発など, 海洋空間利用に関する研究が盛んに行われており, それらの基盤として, 浮体式海洋構造物が利用されている. 浮体式海洋構造物は, 平面規模に比べ, 深さ方向が極めて浅く, 波浪中に複雑な応答をしてしまう. そのため, 波浪中の応答低減が重要課題であり, これを解決するために多くの研究 [1] が行われている. その 1 つに底辺を空気室で支持されたエアクッション型浮体がある. これは, 空気層を介することにより入射波による圧力分布が平面方向に一定となり, 弾性応答が低減され, さらに, 入射波が浮体底部を透過することにより波漂流力が同時に低減される浮体である. 先行研究 [2] により, エアクッション型浮体の応答低減は確認されている.

しかし, これらの先行研究は, 浮体形状の最適化による応答低減や, エアクッション内空気圧の圧縮性による応答低減に留まっており, エアクッション内空気圧制御による応答低減については検討されていない. よって本研究では, 理論解析と模型実験により, 空気圧制御がエアクッション型浮体の応答に及ぼす影響を検証し, 低減効果を評価・検討することを目的とする.

2. 理論解析

解析理論には, 線形ポテンシャル理論の範囲で, 三次元流体力解析手法である三次元特異点分布法を用いた. この手法は, 接続境界を設けエアクッション内部領域と外部領域を仮想接続面で接続する手法を用い, 空気室のような壁厚が非常に薄い構造物にも適応できる解法であり, 空気室を有する浮体の流体力解析に有効な手法である. この手法を用いて, 空気圧を一定制御する条件を加え, 境界積分方程式及びエアクッション内圧力方程式の再定式化を行い, 空気圧の一定制御による理論解析手法を確立すると同時に, 一定制御以外の制御方法を行う場合には, 空気圧の伝達関数が得られるように再定式化した. 以下に再定式化した連立方程式及び運動方程式を示す.

2.1 空気室を制御する三次元特異点分布法を用いた流体力解析

空気室を制御する流体解析では, Radiation 問題における連立方程式のエアクッション内空気圧 p_a について未知数の項から, 既知の項へと再定式化した. 以下に再定式化した Radiation 問題における連立方程式を示す.

< Radiation 問題 >

$$\bullet \text{境界積分方程式} \quad - \iint_{S_H} n_r G ds - \frac{P_r}{\rho g} \iint_{S_{FA}} G \cdot n_z ds = \frac{1}{2} \phi_r(P) + \iint_{S_H} \phi_r \frac{\partial G}{\partial n} ds + \sum_{n=1}^{N_{AC}} \kappa \frac{P_n}{\rho g} \iint_{S_{FA_n}} G \cdot n_z ds \quad (1)$$

- エアクッション内自由表面条件

空気圧を制御する空気室の場合, 次式となる.

$$\iint_{S_H} n_r G ds - \frac{P_{rm}}{K \rho g} - \frac{P_r}{\rho g} \iint_{S_{FA}} G \cdot n_z ds = \iint_{S_H} \phi_r \frac{\partial G}{\partial n} ds + \frac{\eta_r}{K} + \sum_{n=1}^{N_{AC}} \kappa \frac{P_n}{\rho g} \iint_{S_{FA_n}} G \cdot n_z ds \quad (2)$$

ただし, κ は, $i=n$ の時 $\kappa=0$, $i \neq n$ の時 $\kappa=1$ とする.

その他の空気室の場合, 次式となる.

$$\iint_{S_H} n_r G ds - \frac{P_r}{\rho g} \iint_{S_{FA}} G \cdot n_z ds = \iint_{S_H} \phi_r \frac{\partial G}{\partial n} ds + \frac{\eta_r}{K} + \frac{P_{rm}}{K \rho g} + \sum_{n=1}^{N_{AC}} \kappa \frac{P_n}{\rho g} \iint_{S_{FA_n}} G \cdot n_z ds \quad (3)$$

- 圧力方程式

空気圧一定の空気室の場合, 次式となる.

$$\alpha_0 \iint_{S_{FA}} \zeta_r ds - p_r = \alpha_0 \iint_{S_{FA}} \eta_r ds \quad (4)$$

その他の空気室の場合、次式となる。

$$\alpha_0 \iint_{S_{FA}} \zeta_r ds = \alpha_0 \iint_{S_{FA}} \eta_r ds + p_r \quad (5)$$

ここで、一定制御の場合は、 $p_a=0$ とする。

2.2 弾性運動方程式

運動方程式は、周波数領域で、以下の式となる。

$$\sum_{s=1}^N \left[\left(\delta_{rs} D_{rs} - \omega^2 (\delta_{rs} M_{rs} + A_{m,rs}) - i\omega D_{m,rs} + \delta_{rs} C_{rs} \right) q_s \right] = f_{e,r} \quad r=1, N_{DOF} \quad (6)$$

ただし、 δ_{rs} は、 M_{rs} は質量、 $A_{m,rs}$ は付加質量、 $D_{m,rs}$ は造波減衰係数、 C_{rs} は水平面の復原力係数、 D_{rs} は剛性条件で、次式となる。

$$D_{rs} = \delta_{rs} \cdot D \iint_{S_H} \left\{ \left(\frac{\partial^2 \zeta_r}{\partial x^2} \cdot \frac{\partial^2 \zeta_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \zeta_r}{\partial y^2} \cdot \frac{\partial^2 \zeta_s}{\partial y^2} \right) + \nu \left(\frac{\partial^2 \zeta_r}{\partial x^2} \cdot \frac{\partial^2 \zeta_s}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \zeta_r}{\partial y^2} \cdot \frac{\partial^2 \zeta_s}{\partial x^2} \right) + 2(1-\nu) \frac{\partial^2 \zeta_r}{\partial x \partial y} \cdot \frac{\partial^2 \zeta_s}{\partial x \partial y} \right\} ds \quad (7)$$

ここで、 ν はポアソン比で、0.3 とし、 D は単位幅剛性で、 $D = E \frac{d_h^3}{12(1-\nu)}$ となり、これは、等方性平板の場合であり、 E はヤング係数、 d_h は平板の厚さである。

3. 模型実験

本実験は、エアクッション内空気圧の一定制御による浮体応答への影響を確認し、理論計算との比較データの収集を目的とし、東京大学生産技術研究所 海洋工学水槽で行った。

諸条件は Table 1 に示す。実験模型配置図（エアクッション区画が1つの場合）を Fig.1 に示す。

Table 1 experiment condition

Number of aircushion	1	2
Date	2010.10.25-2010.11.23	
Model	0.55×0.55×0.3m	1.1×0.55×0.3m
Incident wave	T=4.55~2.56sec,H=1.5~0.5cm	
Condition	static	
Measurement	air pressure,force,wave height	
Wall thickness	0.015m	0.015m
Weight	6.5kgf	13kgf
Draft	0.17m	0.17m
Air pressure	1.37,1.49,0.61kpa	1.37kpa

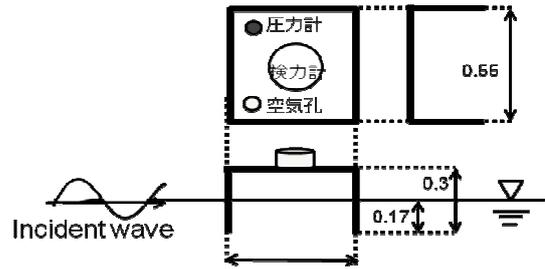


Fig.1 arrangement plan

3.1 エアクッション型浮体模型の応答特性

この実験は、使用するエアクッション型浮体模型の応答特性を確認する実験である。上部を検力計にて固定した浮体に規則波を入射させ、エアクッション内空気圧力、及び浮体にかかる力を計測し、周波数応答関数、位相などの応答特性を求め、入射波と浮体模型の関係性を確認する。

3.2 空気圧力制御装置の特性

制御装置の特性と、一定制御の実現性を検証する実験である。応答特性を確認した浮体模型の上部に空気口を設け、制御装置を設置し、強制動揺させた。圧力の一定制御の実現性では制御方法、制御システムの整備を行い、特性については制御装置の固有周期、制御可能範囲などの特性を確認する実験を行った。

3.3 エアクッション内空気圧一定制御による浮体の波浪中応答特性

上記で確認した浮体模型と制御装置の基礎的特性を踏まえて、エアクッション内空気圧一定制御による浮体の波浪中応答特性を確認し、応答低減効果について検証する。実験はエアクッション型模型浮体に制御装置を取り付け、エアクッション内空気圧を一定制御させた浮体に規則波を入射させ、浮体応答、浮体変位を計測する。実験は、浮体にかかる力を計測する上部固定実験と、浮体変位を計測する係留実験の2ケース行い、それぞれエアクッション区画数1,2の2ケースについて実験を行った。

4. 結果及び考察

4.1 理論解析結果

Fig.5 は、10 (m) × 10 (m) の空気室が3つ入射波に対して並んでいるモデルで理論解析を行った結果である。Y 軸に鉛直変位 Z を a で除して無次元化した値、X 軸に λ/L とした時の結果である。Non は制御しない場合、front は入射波側を制御させた場合である。理論解析結果より、すべての空気室を制御する場合は比較的応答が低減している。また、 $\lambda/L=2$ 周辺でピークを取っている。これは、浮体と共振してしまい、最大値を取っていると考察できる。

4.2 実験結果

4.2-1 エアクッション型浮体模型の応答特性

Fig.2 は圧力 (P) と浮体応答 (Heave) の周波数応答関数が示している。 L/λ が大きくなると P, heave 共に反比例して小さな値を取っていることが見られる。 Fig.3 の位相においては L/λ が大きくなると位相が大きくなっている。このことから、 L/λ が小さい時、浮体は波に乗っているように運動するため、入射波との位相が一致していると考察できる。また、参考文献^[6]と同じ系統の結果が得られた。

4.2-2 空気圧制御装置の特性

立ち上がり時にオーバーシュートが起こり、安定するまでに少し時間がかかることがわかった。つまり、実験は、制御装置が安定してから行うようにしなければならない。また、制御装置からでる振動が、内部圧力に影響してしまうこともわかった。この振動成分は制御装置稼働時に常に出ているため、この制御装置の特性とした。

4.2-3 エアクッション型浮体模型の応答特性

Fig.6, 7 及びその他の結果から、上部固定、係留ともに、応答低減効果が得られていることがわかる。エアクッション区画1つの場合、Heave 方向にかかる力の周波数応答関数（無次元）について空気圧を制御した場合と制御していない場合では、制御した場合の方が約 70%の応答低減が確認された。

Fig.7 から、エアクッション区画2つ連結させ、全体の Heave 方向の力の周波数応答関数は前後一方を制御させた場合、約 60%応答低減し、区画すべてを制御させた場合、約 60%の応答低減が確認された。特に、 $L/\lambda=0.04\sim 1.0$ の区間に応答低減が見られる。この領域より外、特に長周期では、制御しない場合においても応答が下がるため、空気圧制御の影響が浮体応答に表れないことがわかった。

また、Fig.4 より、低減効果が得られたケースのパワースペクトルは、圧力、Heave 方向の力ともにピークが入射波の周波数でないことがわかる。よって、入射波の周波数で圧力、力 (Heave 方向) のパワースペクトルのピークが一致しない場合、鉛直方向の応答低減が得られることが考察できる。

4.3 理論解析結果と実験値の比較

以下に実験・理論計算の結果及び考察を示す。

Fig.6,7 から、エアクッション区画1つの場合、2つの場合共に理論結果との相互性も確認できた。

エアクッション区画が1つの場合は、 $L/\lambda=0.02$ あたり、エアクッション区画が2つの場合は $L/\lambda=0.07$ 以下の域で、実験値が大きな値を示しているところがある。これは、エアクッション区画が波に乗るような形で応答をしてしまっているため、理論解析ではその現象は起こらないため、大きな値を取ることもなくならば曲線となっていると考察することができる。以上により、理論解析の妥当性が示された。

5. 結言

本研究では、理論解析と模型実験により、以下の知見を得た。

- ・理論解析による空気圧を制御させたエアクッション型浮体の流体力理論解析手法を確立し、空気室が製制御されるエアクッション型浮体の理論計算が可能となった。
- ・弾性応答解析により、実機スケールでの空気室を制御したエアクッション型浮体の理論解析を可能とした。
- ・空気室制御によるエアクッション型浮体の弾性応答低減効果が得られる範囲が確認できた。
- ・空気圧制御したエアクッション型浮体の実現性が得られたと同時に浮体の応答低減も確認できた。
- ・エアクッションの一定制御以外の制御における理論解析の基礎が本研究によって確立された。
- ・空気圧制御だけでは応答低減が得られる範囲が限定されるため、他の要素の制御と組み合わせて、浮体応答の低減の検証を行うべきである。

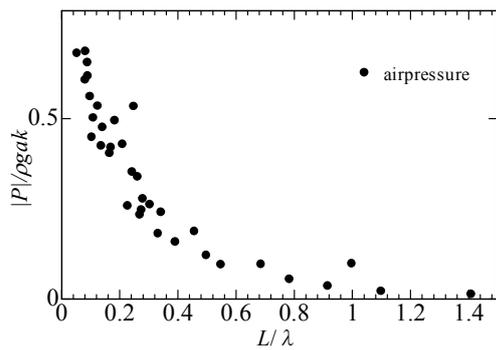


Fig. 2 frequency response function of air pressure

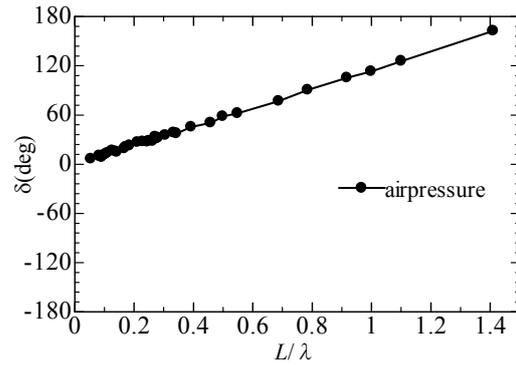


Fig. 3 phase of air pressure

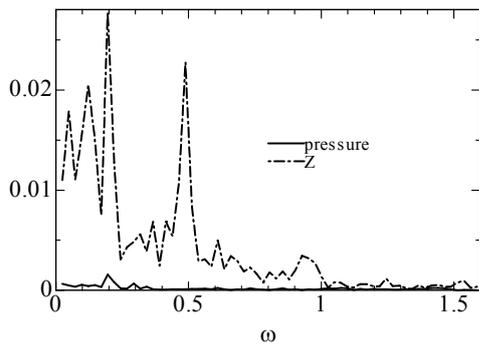


Fig. 4 Power spectral $L/\lambda = 0.17$

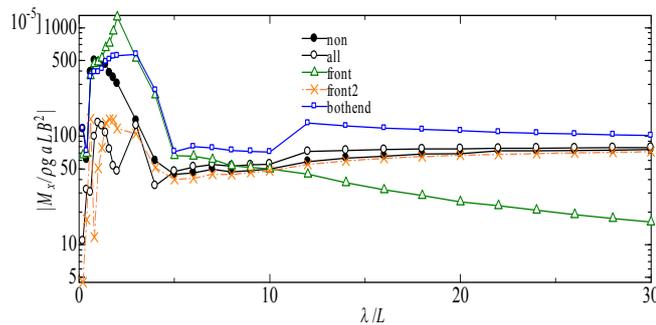


Fig. 5 Distributions of vertical displacement

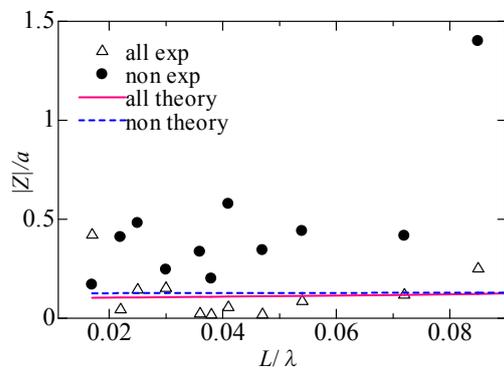


Fig.6 Distributions of vertical Displacements of vertical displacement-x of 1 aircushion case

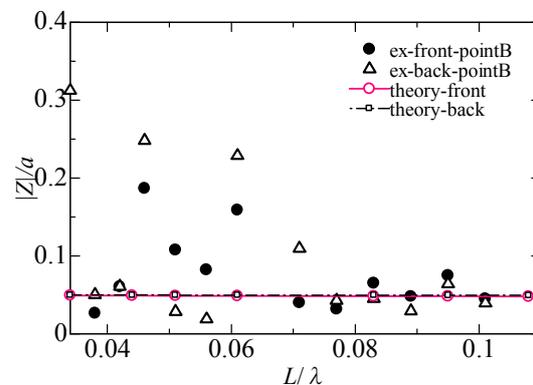


Fig.7 Distributions of vertical Displacements of vertical displacement-x of 2 aircushion case

参考文献

- [1] Literature Review of Methods for Mitigating Hydroelastic Response of VLFS Under Wave Action.: C.M.Wang, K.takagi,, T.Utsunomiya.
- [2] Ikoma T., Togane M., Masuda K. et.al.:Hydroelastic Motion Of Aircushion Type Large Floating Structures With Several Aircushions Using A Three-Dimensional Theory, OMAE2009.
- [3] 小林正人, 居駒知樹, 増田光一, 他: 喫影響を考慮したエアクッション支持浮体の運動応答特性に関する基礎的研究, 海洋工学シンポジウム論文集, 日本船舶海洋工学会・日本海洋工学会 CD-ROM, 2008.
- [5] 「実践浮体の流体力学 前編-動揺問題の数値計算法」(社)日本造船学会, 海洋工学委員会性能部会編.
- [6] 「実践浮体の流体力学 後編-実験と解析」(社)日本造船学会, 海洋工学委員会性能部会編.
- [7] 清水功一, 平山次晴, 高山武彦, 他: クレーンバージ空気圧姿勢制御による釣り荷動揺の制御 (第2報), 日本造船学会論文集 第192号, p147-155.