

セミサブおよびTLP型浮体の最適形状設計に関する研究

朱, 洪忠
九州大学大学院応用力学研究所

胡, 長洪
九州大学大学院応用力学研究所

<https://hdl.handle.net/2324/7234606>

出版情報 : Conference Proceedings The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers.
37, pp.793-796, 2023-11-27. The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers
バージョン :
権利関係 : ©日本船舶海洋工学会



セミサブおよび TLP 型浮体の最適形状設計に関する研究

正会員 朱 洪忠*

正会員 胡 長洪*

A Study on Geometry Optimization for Semisubmersible and TLP

by Hongzhong Zhu, Member Changhong Hu, Member

Key Words: Optimal Design, Semisubmersible, Tension-Leg-Platform, Genetic Algorithm, Morison Equation,

1. 緒 言

浮体式洋上風車の大規模化及び商用化の進展に伴い、費用対効果の高い浮体が求められている。その設計に関しては、浮体運用中の性能を考慮するだけでなく、浮体基礎制作から、港湾で風車のアッセンブリと洋上でタグボートによる曳航、および洋上設置まで、施工サイクルの視点から行う必要もある。特に、日本の造船所のドックや港湾岸壁におけるその水深の浅いところが多い、水深制約を考慮しながら浮体の設計が課題となっている。

セミサブおよび TLP 型浮体は、その喫水および波浪中の動揺が比較的に小さく、海洋開発に広く利用されている。これらの浮体の最適設計に関して、いくつかの手法が文献に提案されている¹⁻³⁾。一般的に、浮体の変位を目的関数とし、浮体動揺特性を表す固有周波数の範囲や安定性を示す GM 値を制約条件とすることで、浮体形状設計問題を非線形最適化問題に帰着する。したがって、この最適化問題に対する最適解が得られることで、浮体形状の最適集合解が設計者に提供できる。しかしながら、浮体に加わる波浪荷重が複雑であるため、これまでの多くの研究では、単一の自由度のみを考慮して設計する^{1)や}、オフラインで流体力を計算し、データベースから設計を最適化する^{2)手法}が検討されてきた。

本研究では、ハルとコラムからなる一般的な半没水浮体に対し、施工サイクルの制約と与えられた海象条件下で浮体の性能を考慮しながらコスト最小になるように浮体寸法の設計法を開発する。以下では、まず浮体設計問題の概要及び最適化問題の定式化を述べ、力学的記述を行う。また、設計事例を通じてその有効性を検証する。

2. 設計問題の概要

設計の対象である浮体は、Fig. 1 に示す没水ポンツーンとコラムによる対称的な構造物となる。浮体の没水形状は、ポンツーンサイズ（四角形の場合は長さ $L_p \times$ 幅 $B_p \times$ 高さ H_p 、円筒の場合は長さ $L_p \times$ 外径 D_p ）、ポンツーンの喫水 h_p 、コラムの直径 D_c 、コラムの高さ H_c 、コラム間の距離 d などのパラメータにより定まる。本研究では、係

留の剛性行列と浮体形状との関係は既知であると仮定する。実際の設計では、係留解析ソフトウェア（例えば MAP++⁴⁾）によって剛性行列のルックアップテーブルを生成し、多項式近似手法により関係式を求める方法が使われる。また、ポンツーンとコラムの単位面積当たりの質

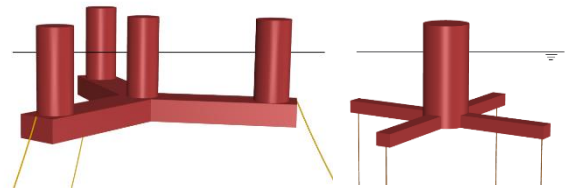


Fig. 1 Semisubmersible (left) and TLP (right)

量が与えられると仮定する。セミサブ浮体運用中、ポンツーン内部はバラスト水に満たされ、コラムにバラスト水の高さ h_b は設計のパラメータになる。

本研究で検討する最適化方法は、半没水浮体に対し、極端な海況条件下の安全性と、施工サイクルの成立性を確保しながら建造コスト（浮体排水量の大きさで表す）を最小化するように、浮体形状寸法を定める方法である。初期の検討として、規則波のみを考慮する。浮体の設計問題は、下式に示す最適化問題になる。

$$\begin{aligned} & \underset{L_p, B_p, H_p, h_p, D_c, H_c, d, h_b}{\text{minimize}} && V(L_p, B_p, H_p, h_p, D_c, H_c, d, h_b), && (1) \\ & \text{subject to:} && \\ & \omega_l \leq \omega_n \leq \omega_u && \\ & \text{offset} \leq \eta_0 && \\ & |\text{RAO}| \leq \bar{\eta} && \\ & (L, h)_{\text{inst}} \leq (\bar{L}, \bar{h}) && \\ & p_l \leq L_p, B_p, H_p, h_p, D_c, H_c, d, h_b \leq p_u && \\ & T_t \geq T_0 && (\text{TLP のみ}) \end{aligned}$$

ただし、 V は浮体の排水量を表す。 ω_n は浮体の固有周波数、 ω_l と ω_u はそれぞれ固有周波数の上限と下限である。 offset と η_0 はそれぞれ設計風荷重下に浮体の静的な変位とその変位の制限値を表す。 RAO は浮体の運動の周波数応答関数である。 $\bar{\eta}$ は浮体動揺の制限値を表す。作用素 $|\cdot|$ はその成分の幅値を求めるものと定義する。また、 $(L, h)_{\text{inst}}$ と $(\bar{L}, \bar{h})$ はそれぞれ浮体施工サイクルに要求された浮体の幅と喫水、およびそれらの制限値を表す。第 5 番目の制約条件にある p_l と p_u は、設計変数の上限と下限を表す。 T_t は

* 九州大学応用力学研究所

原稿受付 令和 5 年 9 月 22 日

公開日 令和 5 年 11 月 20 日

秋季講演会において講演 令和 5 年 11 月 27, 28 日

©日本船舶海洋工学会

係留ラインの張力を表す. TLP の場合, スナップ荷重を避けるため, テンดอนの最低張力 $T_0 \geq 0$ も考慮する必要がある.

3. 力学的記述

浮体の動揺が小さいと仮定してその運動を次の 6 自由度の運動方程式で表される.

$$(M + M_a)\ddot{\eta} + B_l\dot{\eta} + B_q\eta|\dot{\eta}| + K\eta = F_{\text{exc}} + F_a \quad (2)$$

ここで η は変位を表す. M と M_a はそれぞれ浮体の慣性質量行列と付加質量行列を表す. さらに B_l と B_q はそれぞれ線形減衰係数と非線形減衰係数を表す. K は復元力係数で, 右辺の F_{exc} と F_a はそれぞれ波浪強制力と風荷重を表す.

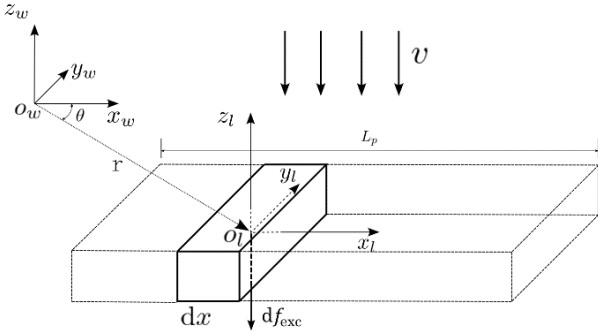


Fig. 2 Pontoon Morison element. $O_w - x_w y_w z_w$ is Global coordinate and $O_l - x_l y_l z_l$ is local coordinate.

浮体のポンツーンとコラムを Fig. 2 に示すように複数のエレメントに分割することで, 流体力の計算がモリソン式⁵⁾で計算可能になる. 流速方向にエレメントに加わる波浪強制力 df_{exc} は, 次の方程式で表される.

$$df_{\text{exc}} = \left(\rho(1 + C_a)A\dot{v} + \frac{1}{2}\rho C_d D v |v| \right) dx \quad (3)$$

ただし, dx はエレメントの長さ, ρ は流体の密度, v は流体速度を表す. C_a と C_d はそれぞれ付加質量と抗力係数を表す. さらに A と D はそれぞれ断面の面積とその代表的な長さを表す. 浮体に作用する波浪強制力 F_{exc} は各エレメントの荷重を積算することによって求められる. その入射波との位相差は信号相関推定手法により計算される.

浮体の周波数応答関数 (RAO) を求めるため, 式(2)の左辺を線形化する必要がある. エネルギー保存則により, 非線形部分は次式で近似できる⁶⁾.

$$\dot{\eta}|\dot{\eta}| = \frac{8}{3\pi} \omega_s \eta_A \dot{\eta} = \bar{B}_l \dot{\eta} \quad (4)$$

ここで ω_s と η_A は浮体の運動周波数と振幅を表す. 規則波中の応答を検討するため, ω_s が入射波の周波数に設定することができる. また, 簡単にするために, 動揺の幅 η_A はその制限値 $\bar{\eta}$ に設定する.

規則的な構造物に関する付加質量係数 C_a と抗力係数 C_d の経験値は, 既に文献⁷⁾に整えられた. M_a と B_q については, 設計変数および C_a と C_d で表現される. したがって, 浮体の静的なオフセット, 固有周波数, 波浪中の応答は, 次式で表現される.

$$\text{offset} = K^{-1} F_a \quad (5)$$

$$\omega_n = \sqrt{(M + M_a)^{-1} K} \quad (6)$$

$$\text{RAO} = (-\omega_s^2 (M + M_a) + j\omega_s (B_l + \bar{B}_l) + K)^{-1} F_{\text{exc}}(j\omega_s) \quad (7)$$

TLP 型浮体の場合, テンドン長さの変位の最小値 δ は次式で表される.

$$\delta \approx \frac{T_{\text{init}}}{k_t} - |(\text{RAO} + \text{offset})_3 + (\text{RAO} + \text{offset})_5 R_t| \quad (8)$$

ここで k_t はテンดอนの弾性係数を表し, $T_{\text{init}} = (\rho V - M)g/N$ は TLP の初期張力である. N は TLP の脚数を表す. さらに R_t は係留点の半径を表す. 式(8)を用いてテンドン張力に関する拘束条件 (式(1)の 6 番目の条件) は次式で表される.

$$k_t \delta \geq T_0 \quad (9)$$

上記の式(2)~(9)により, 最適化問題(1)を変数 $L_p, B_p, H_p, h_p, D_c, h_c, d, h_b$ により表され, 進化的アルゴリズムによりその解を求められる.

4. 設計例

4.1 設計対象

以上の設計手法を Fig. 3 に示す TLP 型洋上風況マストの浮体設計に適用する. 日本近海での設置を想定し, その海況については, 水深を 100 m, 設計瞬間風速を 80 m/s, 最大波高を 20 m, 波周期を 15.6 s に設定する. また, 浮体デッキの高さを 15 m, ポンツートップスラブの喫水を 10 m に設定する. 中央コラムとアウターコラムの直径

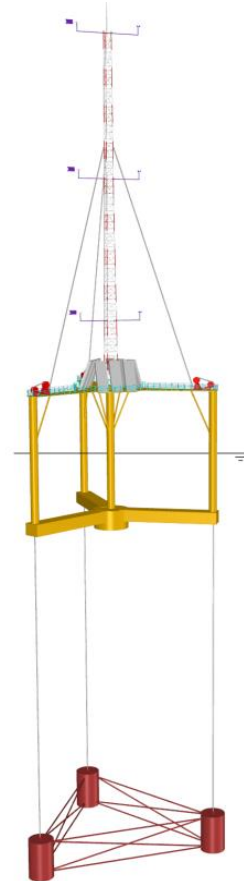


Fig. 3 TLP mast.

をそれぞれ 3 m と 2 m に設定される。テンドンは、軽量化のために合成繊維を使用する。TLP 片脚の剛性を 1.03 MN/m に設定する。最大瞬間風速を用いて風荷重の計算を行うことで、その抗力は 500 kN、水面中心に対する転倒モーメントは 9.32 MNm となる。風況観測マストは洋上に 1 年間設置されることを考慮して浮体の板厚を 20 mm に設定し、円筒部と平板の単位面積当たりの質量はそれぞれ 160 kg/m² と 200 kg/m² と与える。

設計の拘束条件については、まず浮体が波との共振を避けるため、サージ、スウェイ、ヨー方向の固有周期を 25 s 以上、ヒープ、ロール、ピッチ方向の固有周期を 2 s から 5 s の間に設定する。最大風荷重の下にサージの変位を 14 m (テンドンのオフセットアングルがおおよそ 8°)、浮体のピッチを 0.5° と制限値として与える。また、テンドン張力の最小値 T_0 を $0.03T_{init}$ に設定する。広めの視点から浮体形状の最適集合解を確認するため、浮体動揺幅に関する拘束条件を考慮しない。

設計変数としては、四角形ポンツーンの長さ L_p 、幅 B_p 、高さ H_p 、中央のローコラムの直径 D_c とその高さ H_c である。変数の制約値は次の式で設定される。

$$\begin{bmatrix} 15.0 \\ 2.5 \\ 2.5 \\ 4.0 \\ 3.0 \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} L_p \\ B_p \\ H_p \\ D_c \\ H_c \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} 30.0 \\ 4.0 \\ 4.0 \\ 8.0 \\ 6.0 \end{bmatrix}$$

4.2 設計結果

MATLAB Global Optimization Toolbox⁹⁾の遺伝的アルゴリズムを使用して、式(1)の解を求める。500 世代数で演算により、最適解は次式となる。

$$\begin{bmatrix} L_p \\ B_p \\ H_p \\ D_c \\ H_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 27.6 \\ 2.5 \\ 2.5 \\ 6.9 \\ 3.0 \end{bmatrix}$$

設計となった浮体の固有周期については、サージ(スウェイ)の方向が 33.4 s、ヒープが 3.9 s、ロール(ピッチ)が 4.0 s、ヨーが 32.1 s になる。風速 80 m/s 場合の offset が 8.9 m となる。また、テンドン張力の最小値がちょうど制約値 $T_0 = 0.03T_{init}$ となるため、テンドン張力に関する制約条件は設計のクリティカル条件になることがわかる。

第 3 章に説明したモリソン手法で計算した流体力係数と WAMIT⁷⁸⁾との比較は Figs. 4~7 に示されている。図の

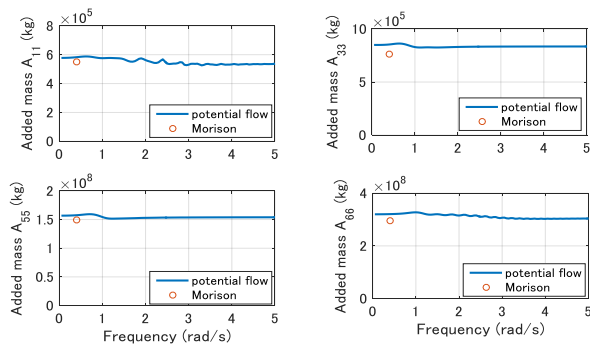


Fig. 4 Comparison of added mass between potential flow program and Morison method.

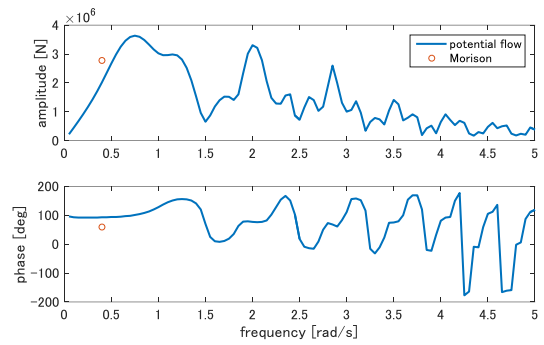


Fig. 5 Wave excitation force RAO in Surge.

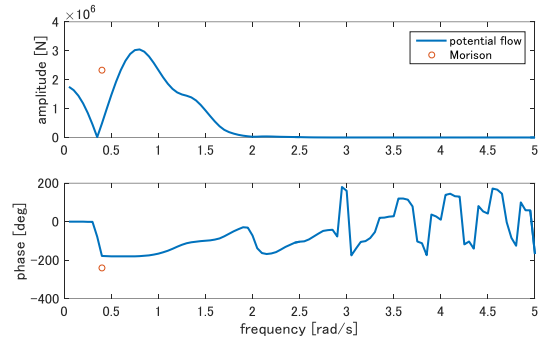


Fig. 6 Wave excitation force RAO in Heave.

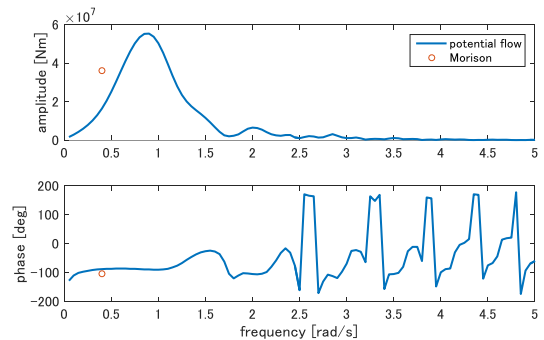


Fig. 7 Wave excitation force RAO in Pitch.

結果から、付加質量がほぼ一致していることがわかる。また、浮体が比較的に小さく、流体の粘性が無視できないため、モリソン手法によって得る波浪強制力がポテンシャル理論の結果より大きくなる。

4.3 浮体の性能

以下では、設計した TLP 浮体の安定性を検討する。極端な海況 (10 分間平均風速 57 m/s、乱流強度 0.11、有義波高 10 m、波周期 15.6 s) 下に浮体の応答とテンドン張力を確認する。風と入射波が同方向に作用すると設定する。風と波の時系列データは Fig. 8 に示されている。高さ 60 m での最大瞬間風速は 81.1 m/s である。鉛直方向の風速分布はベキ法則 (指数 0.11) で計算される。また、波は Modified Pierson-Moskowitz (PM) モデルで生成される。10 分間に最大波高は 15.5 m である。

Simulink⁹⁾で時間領域解析モデルを構築する。流体力荷重の計算には、1 次波浪強制力と変動漂流力 (Newman 近似法を用いて計算) を考慮する。浮体、風況マスト、およびその連結機構は剛体とする。10 min 間のシミュレーションを行い、浮体の動揺とテンドン張力の応答は Figs. 9~10 に示されている。図の結果から、風荷重および漂流

力の影響で浮体がサージ方向の平均変位がおおよそ 7 m であることがわかる。最大オフセットは 32 m になる。また、ヒープとサージと強く連動するため、サージが大きくなる場合はヒープの変位も大きくなる。ヒープとピッチの最大変位はそれぞれ 6 m と 1.6 deg となり、いずれも最大波の時に発生された。また、Fig. 10 のテンドン張力の結果から、ダウンウインド側テンドン張力の最小値がおおよそ 268 kN になる。テンドンがスラック状態に陥らな

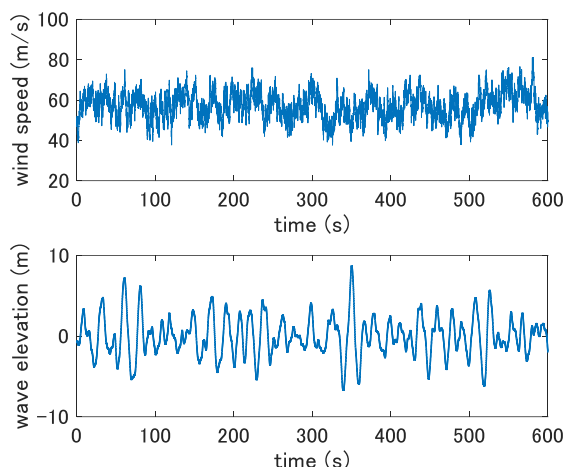


Fig. 8 Wind speed and wave elevation.

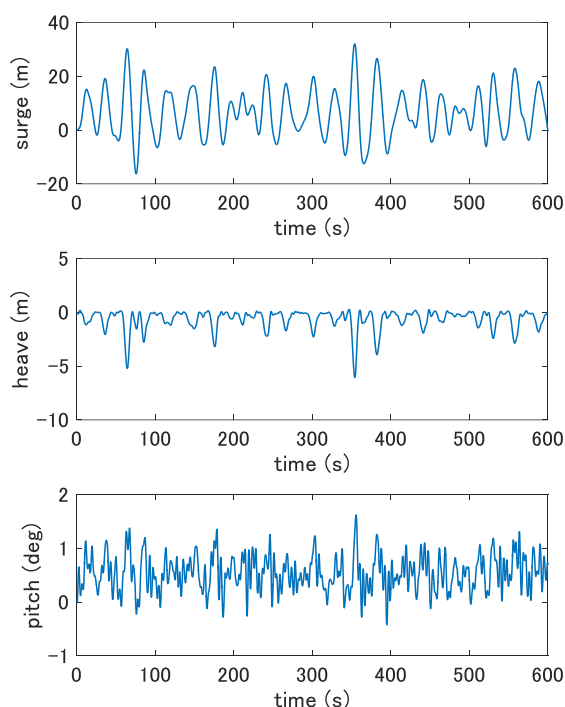


Fig. 9 floater motion: surge (upper), heave (mid) and pitch (lower).

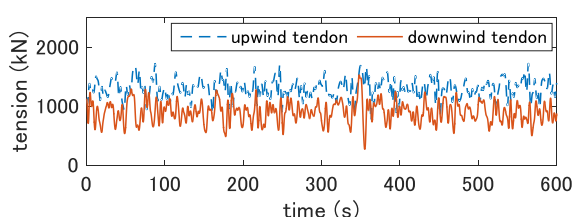


Fig. 10 Tendon tension.

く、スナップ荷重が避けられることを示している。

5. 結 言

セミサブおよび TLP 型浮体の基本設計における形状最適化に関する設計問題は、非線形最適化問題に定式化する手法を提案し、同時に提案手法の有効性を検証するために TLP 型風況マストの設計計算を実施した。今後の課題として浮体強度設計を含めた最適設計への拡張が考えられる。

参 考 文 献

- 1) 赤木新介, 横山良平, 伊東弘一: システム分析手法に基づく半没水浮体の形状最適設計, 日本機械学会論文集中 C 編, 51 巻第 464 号, pp.875-882, 1985.
- 2) G. Ferri *et.al.*: Platform and mooring system optimization of a 10 MW semisubmersible offshore wind turbine, *Renewable Energy*, Vol. 182, pp. 1152-1170, 2022.
- 3) H. Zhu and C. Hu: A study on floating overhead power transmission system for offshore energy development: Design and modeling approach, *Ocean Engineering*, Vol.236, pp. 109528, 2021.
- 4) NREL: MAP++: Mooring Analysis Program, <https://www.nrel.gov/wind/nwtc/map-plus-plus.html>, (参照 2023-9-20)
- 5) O.M. Faltinsen: Sea loads on ships and offshore structures, Cambridge University Press, 1998.
- 6) S.K. Chakrabarti: Offshore structure modeling, Vol. 9, pp. 445-451, 1994.
- 7) DNV: Environmental conditions and environmental loads, DNV-RP-C205, 2014.
- 8) WAMIT, Inc.: The state of the art in wave interaction analysis, <https://www.wamit.com/> (参照 2023-9-20).
- 9) MathWorks: MATLAB/Simulink, <https://jp.mathworks.com/> (参照 2023-9-20).