

離岸風機水下基礎具動態補償之抱樁扶正系統研究

江茂雄*,**1 徐嘉妤* 孫沛歆* 謝岳洲*

*國立台灣大學 工程科學及海洋工程學系
**國立台灣大學 能源研究中心

關鍵詞：離岸風機水下基礎、抱樁扶正系統、動態補償控制、動態模擬

國科會計畫編號：NSTC 111-2221-E-002-111-MY2

摘要

本研究針對目前市面上各廠商之離岸風機水下基礎具動態補償之抱樁扶正系統依據縮尺理論設計縮尺可動態補償之抱樁扶正系統的系統機構。此可動態補償之抱樁扶正系統用於補償樁柱在受波浪影響下產生的 x 方向位移和 y 方向位移，以確保樁柱在海上打樁時保持垂直度。離岸風機水下基礎之抱樁扶正系統機構的部分以 Solidworks 進行可動態補償之抱樁扶正系統設計，再匯入機構動態模擬軟體(Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems, ADAMS)進行機構動態建模及分析，而正逆向運動學、液壓伺服系統與控制器則透過 MATLAB/SIMULINK 建立其模型，最後結合 ADAMS 機構動態分析與 MATLAB/SIMULINK 進行系統整合模擬，並在台灣海峽的波浪條件下進行模擬，來驗證主動式補償機構的效能是否符合需求。

前言

面對氣候變遷挑戰，可再生能源逐漸興起，特別是風能。近年來，為實現更高效、穩定的發電，風場選址逐漸轉向離岸區域。應此趨勢，我國積極推動離岸風電政策，目標在 2035 年前建置 20.7GW 離岸風電能力，以促進離岸風電產業發展。在政策框架下，相關船機成為海事工程的重點。而相較於陸上風場，離岸風場海事工程更具挑戰性，尤其是水下基礎安裝，易受天氣和波浪影響。因此，抑制波浪對工作船舶的影響至關重要。

單樁式水下基礎通常使用抱樁扶正系統將樁柱翻正後放置於海床，確保垂直度符合規範後開始打樁。在整個打樁過程中，必須監測樁柱垂直度，如出現嚴重偏斜，需立即停止打樁並重新調整樁柱，確保正確垂直度後續行打樁。

根據我國離岸風場開發資料，曾因單樁式水下基礎相當大，安裝需要設計製造專用的抱樁扶正系統，而由國外採購之抱樁扶正系統因 COVID-19 疫情，導致交貨期程延遲數月，進而造成水下基礎安裝進度延宕以及增加數百億台幣之風場建造成本。而允能後來也因海床鑽探岩心分析不夠切實，造成多次滑樁的危險情況。由此可見，抱樁扶正系統在打樁過程中為不可或缺之重要機具。

可動態補償之抱樁系統架構

可動態補償之抱樁扶正系統設計主要分成三個部分，包含翻正子系統(upending)、開合子系統及夾持子系統。翻正子系統(upending)如所示，負責將樁柱翻正。開合子系統如所示，負責抱樁扶正系統的開合。夾持子系統的部分前端為滾輪結構，如所示，負責在打樁時補償樁柱受波浪力時產生的 x 方向位移及 y 方向位移。因本抱樁扶正系統安裝在自升式平台船(Jack Up Vessel)上，故波浪對系統本身的影響可以忽略，即抱樁扶正系統是不動的，但其所夾持之樁柱在打樁時會受到波浪力作用，故本文主要探討打樁時波浪力對樁柱的影響，即夾持子系統之研究。本研究採用之樁柱外徑為 500mm、內徑為 450mm、長度為 2000mm、重量為 585.7kg，

運動學分析

■ 正向運動學

為獲得正向運動學方程式，我們首先定義座標，然後用幾何分析方式描述各液壓缸與樁柱之間的關係。圖 1 為抱樁系統座標定義圖。第零座標是固定的海床座標，第一座標是夾持器座標，第二座標是液壓缸座標，其中 O 為海床座標原點， P 為樁柱座

¹ 聯絡作者 江茂雄 (mhchiang@ntu.edu.tw)

標原點，1、2、3、4 分別為液壓缸 3-1 至 3-4 之座標。

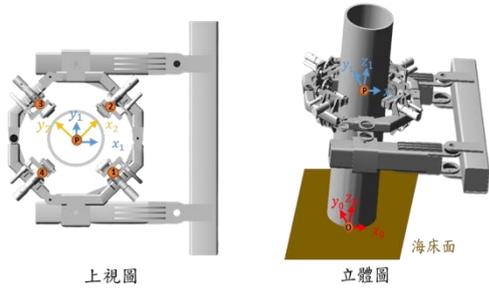


圖 1 坐標軸定義

■ 逆向運動學

本文採用幾何分析法推導逆向運動學，透過樁柱位移與各液壓缸之位置，計算出液壓缸所需補償之長度，如式 (1) 所示。

$$\begin{cases} a_1' = \left| \frac{-\Delta x}{\sqrt{2}} + \frac{\Delta y}{\sqrt{2}} \right| + 0.05 & \Delta b < 0 \\ a_3' = -\left| \frac{-\Delta x}{\sqrt{2}} + \frac{\Delta y}{\sqrt{2}} \right| + 0.05 & \Delta b < 0 \\ a_2' = \frac{\Delta x}{\sqrt{2}} + \frac{\Delta y}{\sqrt{2}} + 0.05 & \Delta a > 0 \\ a_4' = -\left(\frac{\Delta x}{\sqrt{2}} + \frac{\Delta y}{\sqrt{2}} \right) + 0.05 & \Delta a > 0 \\ a_3' = \frac{-\Delta x}{\sqrt{2}} + \frac{\Delta y}{\sqrt{2}} + 0.05 & \Delta b > 0 \\ a_1' = -\left(\frac{-\Delta x}{\sqrt{2}} + \frac{\Delta y}{\sqrt{2}} \right) + 0.05 & \Delta b > 0 \\ a_4' = \left| \frac{\Delta x}{\sqrt{2}} + \frac{\Delta y}{\sqrt{2}} \right| + 0.05 & \Delta a < 0 \\ a_2' = -\left| \frac{-\Delta x}{\sqrt{2}} + \frac{\Delta y}{\sqrt{2}} \right| + 0.05 & \Delta a < 0 \end{cases} \quad (1)$$

動力學分析

為了操作液壓伺服系統，控制電壓信號會改變伺服閥軸的位置，引起不同的體積流率，進而改變每個腔室中的壓力。最終，兩個腔室之間的壓力差將驅動致動器運動。高階非線性的閥軸動態方程式可以簡化為二階方程式。而圖 2 中每個流速都可以由節流口方程式得到。最後，連續方程式透過有效流速和液壓容積係數推導每個腔室中的壓力變化率。

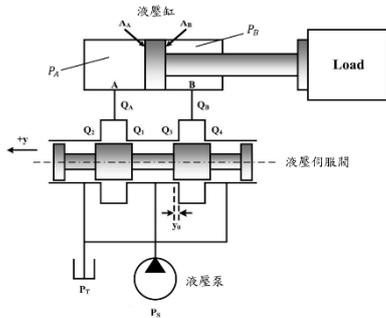


圖 2 液壓閥控系統

機構動態建模使用機構動態模擬軟體(ADAMS)建立可動態補償之抱樁系統之動態模型，如圖 3，根據多剛體系統理論，自動將模型轉換為拉格朗日動力學方程式並使用數值方法求解該方程式。

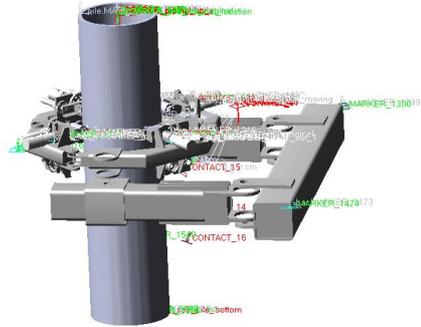


圖 3 ADAMS 可動態補償之抱樁系統動態模型

樁柱在打樁時所受到的力可分為打樁力、波浪力[1]及海床土壤作用力[2]，如圖 4 所示。

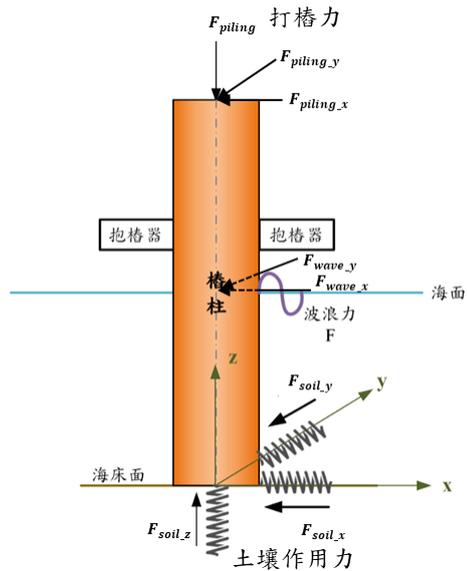


圖 4 樁柱在打樁時受力

控制架構與控制器設計

可動態補償之抱樁系統控制架構圖如圖 5 所示。抱樁器的 ADAMS 動態模型之輸入包含打樁力 F_p 、土壤作用力 F_s 、波浪力 F ，以及各液壓缸的力，輸出為樁柱在第一座標上的 X、Y 方向之位移 Δx 與 Δy 以及四根液壓缸的瞬時伸長量，將 Δx 與 Δy 使用逆向運動學計算出四根液壓缸應伸長之長度後與回授的四根液壓缸瞬時伸長量相減得液壓缸應補償之長度，透過具動態補償之控制器，得到液壓缸之輸入訊號 u ，控制液壓缸施力扶正樁柱。

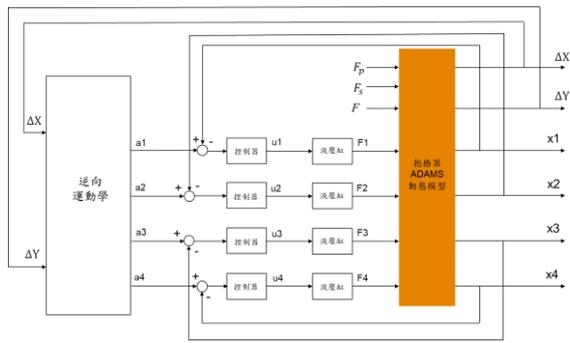


圖 5 抱樁系統控制架構圖

模擬結果與分析

波浪條件設定為波高 0.15 公尺、平均週期 2.69 秒、波浪方向 45° 如圖 6，為對應台灣近風場之波浪條件的 $\frac{1}{10}$ 縮尺。

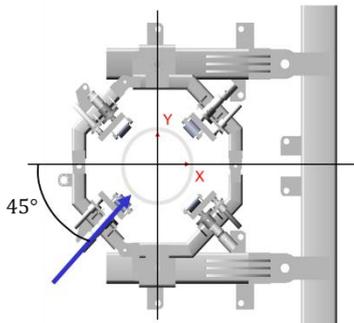


圖 6 樁柱所受到的波浪力方向

在樁基施工中，常使用漸進式工法，即從低力道逐漸增加至全力道的打樁。而打樁力道參考 IQIP 液壓打樁槌錯誤! 找不到參照來源。，對應其打樁槌的 $\frac{1}{10}$ 縮尺進行設計。除此之外加入打樁時樁柱在第一座標 X、Y 方向的側向分力，來模擬樁柱非完全垂直時打樁之情況。

海床土壤作用力如圖 4 所示，採用彈簧模型進行模擬，其中彈簧係數值之設定參考海床土壤彈簧係數[5]，將垂直彈簧係數設為 20000 (N/m) 及水平彈簧係數設為 50000 (N/m)。

根據動力學分析的模型進行 ADAMS 與 MATLAB/SIMULINK 的系統整合，進行 30 秒之模擬，其模擬條件為波高 0.15 公尺、平均週期 2.69 秒、波浪方向 45°、有打樁側向力。圖 7、圖 11 為樁柱受力圖，包含(a)打樁合力；(b)z 方向垂直打樁力；(c) x 方向打樁側向力；(d) y 方向打樁側向力；(e)波浪力；(f)z 方向土壤作用力；(g)x 方向土壤作用力；(h)y 方向土壤作用力，其中波浪力之參數為波高 0.15 公尺、平均週期 2.69 秒、波浪方向。

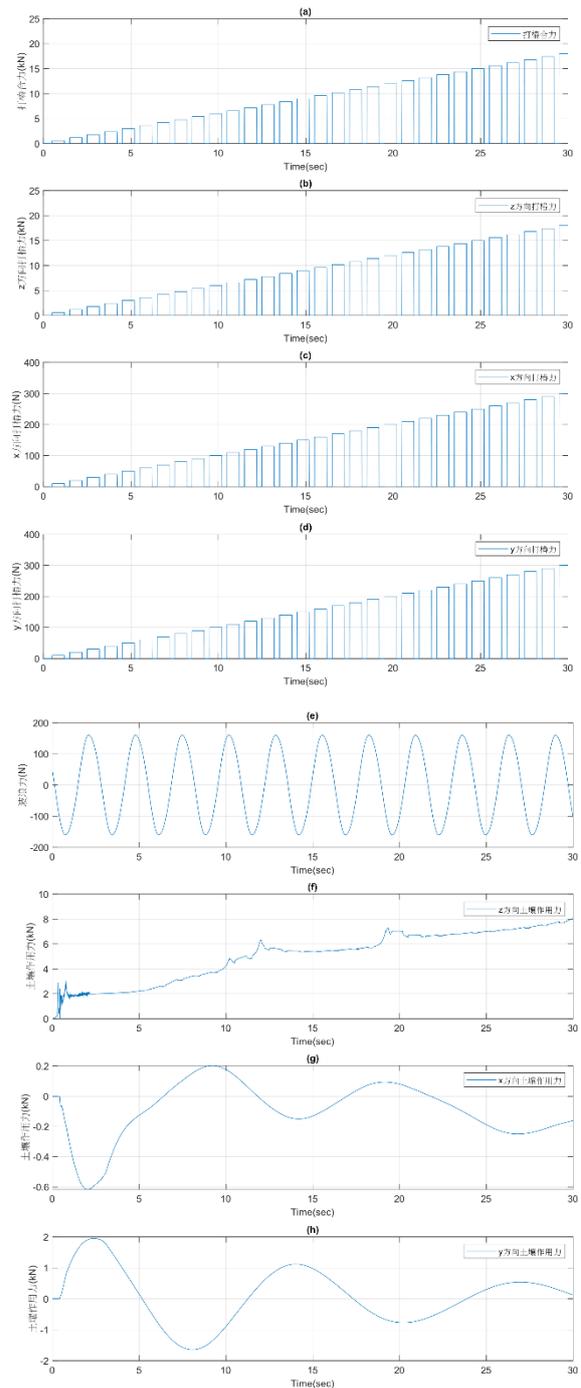


圖 7 (a)打樁合力；(b)z 方向垂直打樁力；(c) x 方向打樁側向力；(d) y 方向打樁側向力；(e)波浪力；(f)z 方向土壤作用力；(g)x 方向土壤作用力；(h)y 方向土壤作用力

在模擬中我們使用了 PID 控制器和自組織模糊滑動控制器(SOFSMC)來評估可動態補償之抱樁系統對樁柱的補償誤差，如圖 8 所示，包含(a)X 方向偏斜度；(b)Y 方向偏斜度；(c)X 方向位移；(d)Y 方向位移；(e)打樁深度。為了更進一步比較 PID 控制器

和自組織模糊滑動控制器(SOFSMC)的性能，我們使用了絕對誤差的積分(IAE)指標，如圖 9 所示，包括(a)X 方向偏斜度 IAE; (b)Y 方向偏斜度 IAE ;(c)X 方向位移 IAE; (d)Y 方向位移 IAE 。

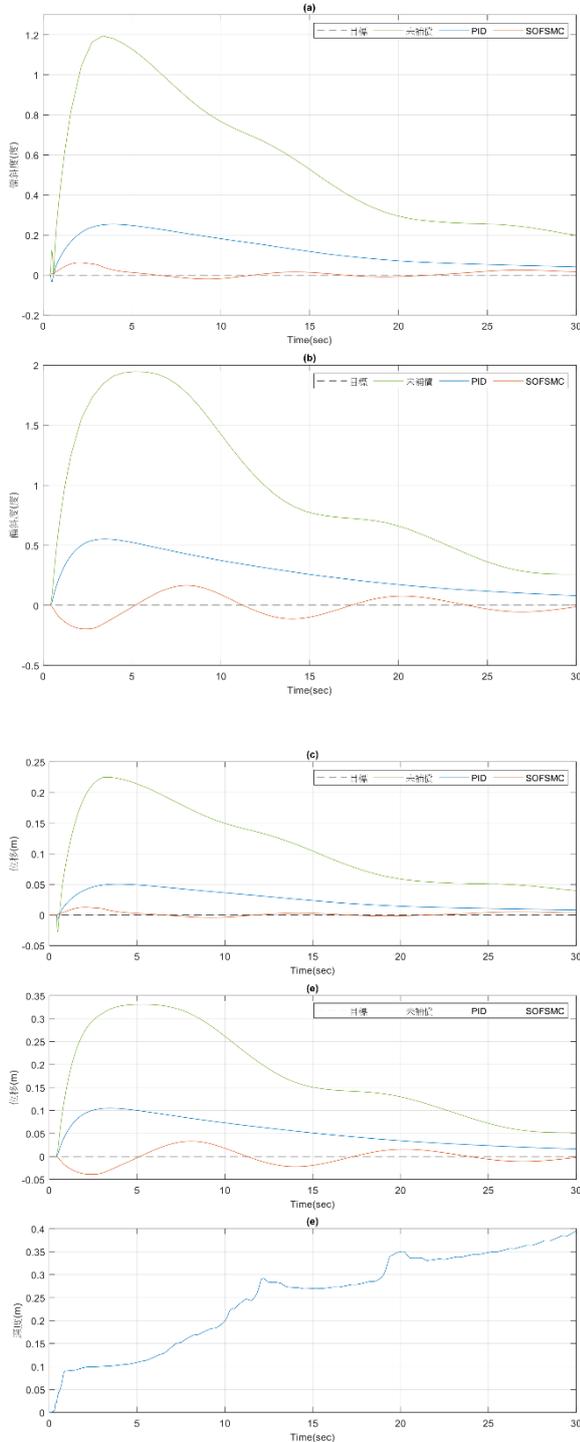


圖 8 波高 0.15 公尺、平均週期 2.69 秒、波浪方向 45°、有打樁側向力的樁柱補償誤差，(a)X 方向偏斜度; (b)Y 方向偏斜度(c)X 方向位移; (d)Y 方向位移; (e)打樁深度。

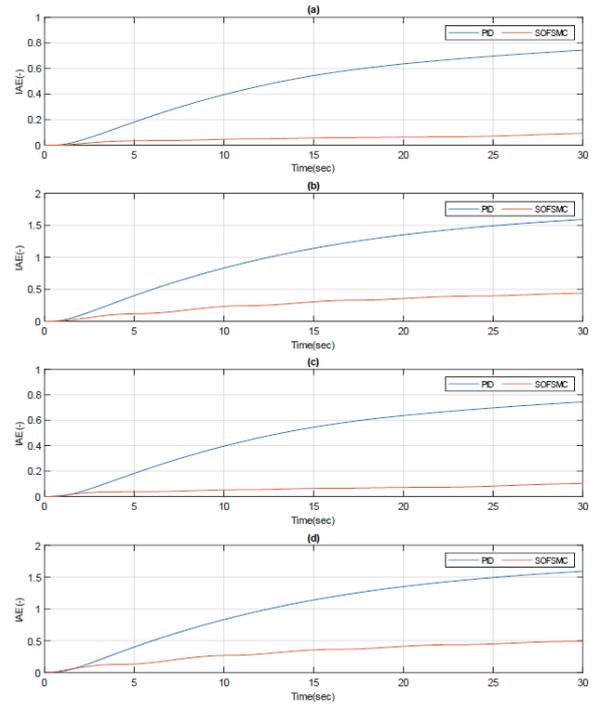


圖 9 (a)X 方向偏斜度 IAE; (b)Y 方向偏斜度 IAE; (c)X 方向位移 IAE; (d)Y 方向位移 IAE 。

由圖 8 可以得到，未補償之樁柱誤差在 X 方向位移範圍為-0.03m 至 0.23m、偏斜度範圍為-0.01°至 1.195°，Y 方向位移範圍為-0.01m 至 0.34m、偏斜度範圍為-0.01°至1.95°，而使用 PID 控制器，樁柱的補償誤差在 X 方向位移範圍為-0.007m 至 0.05m、偏斜度範圍為-0.033°至 0.25°，Y 方向位移範圍為-0.001m 至 0.11m、偏斜度範圍為-0.001°至0.11°，而使用自組織模糊滑動控制器(SOFSMC)，樁柱的補償誤差在 X 方向位移範圍為-0.004m 至 0.012m、偏斜度範圍為-0.02°至0.06°，Y 方向位移範圍為-0.04m 至 0.03m、偏斜度範圍為-0.2°至0.17°，由此結果可知，使用自組織模糊滑動控制器誤差相較使用 PID 控制器減小許多，但兩者皆比未補償時之誤差小，此結果也證實了可動態補償之抱樁系統對於補償樁柱運動的有效性。

結論

本文提出可動態補償之抱樁系統，用於補償樁柱在波浪影響下產生的 x 方向位移和 y 方向位移，以確保樁柱在海上打樁時保持垂直度。為了評估可動態補償之抱樁系統的補償性能，本文使用 ADAMS 和 MATLAB/SIMULINK 界面進行整合模擬，並在台灣海峽的波浪條件下進行模擬。首先，抱樁系統的正向運動學和逆向運動學使用幾何投影法進行分析，推導出抱樁系統中各液壓缸所需之的補償

目標。接著推導液壓伺服系統的數學模型和抱樁系統動態模型，以結合 ADAMS 和 MATLAB/SIMULINK 進行模擬，並加入自組織模糊滑動控制器(SOFSMC)，用以提升系統補償性能，最後整合所有系統模型，模擬可動態補償之抱樁系統在受到波浪影響時之運動，並驗證其補償性能是否符合需求。

由模擬結果可知，抱樁器啟動動態補償前與啟動補償後，樁柱的補償誤差在 X 方向位移範圍最大從 縮減到、偏斜度範圍最大從 縮減到，Y 方向位移範圍最大從 縮減到、偏斜度範圍最大從 縮減到。因此，基於此結果，我們可以得出結論：可動態補償之抱樁系統有效減小樁柱的 x 和 y 方向的位移以及偏斜度，使樁柱在打樁時維持一定之垂直度，以及自組織模糊滑動控制器在可動態補償之抱樁系統有足夠的穩健性。

綜上所述，本研究所提出之可動態補償之抱樁系統可以有效補償補償樁柱運動，若將此系統應用

於台灣海峽的離岸風場打樁工程，可有望提升離岸風場的開發速度，同時有效降低施工風險和成本。

參考文獻

1. 周龍, 劉潤, 張金鳳, 郭紹曾. 考慮波流聯合作用的大直徑鋼管樁自由站立穩定性分析. 岩土工程學報, 2015, 37(11): 1992-1999.
2. Deeks, A.J.; Randolph, M.F. Axisymmetric time-domain transmitting boundaries. J. Eng. Mech. 1994, 120, 25–42.
3. 陳識傑. 自組織模糊滑動控制應用於液壓主動式垂向吊裝補償系統之研究. 國立台灣大學碩士論文, 2022.
4. IQIP:<https://iqip.com/products/handling-equipment/upending-frame/>
5. Deeks, A.J.; Randolph, M.F. Axisymmetric time-domain transmitting boundaries. J. Eng. Mech. 1994, 120, 25–42.

DYNAMIC COMPENSATED PILE HOLDING AND CENTRALIZER FOR FOUNDATION OF OFFSHORE WIND TURBINES

*M. H. Chiang*¹ C. Y. Hsu* P. H. Sun Y. Z. Xie*

*Department of Engineering Science and Ocean Engineering, National Taiwan University

Keywords: Offshore wind turbine subsea foundation, Pile-holding system, Dynamic compensation control

ABSTRACT

This study focuses on designing a scaled dynamic compensation pile-holding system for the underwater foundations of offshore wind turbines, based on the scale theory. The dynamic compensation pile-holding system is designed to compensate for the x-direction and y-direction displacements of the pile caused by wave action, ensuring the verticality of the pile during offshore piling operations. The mechanism of the underwater foundation's pile-holding system is designed using Solidworks to incorporate dynamic compensation. The design is then imported into the Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems (ADAMS) software for dynamic modeling and analysis. The forward and inverse kinematics, hydraulic servo system, and controllers are modeled using MATLAB/SIMULINK. Finally, the integrated simulation of the system is conducted by combining ADAMS for dynamic analysis and MATLAB/SIMULINK. The performance of the active compensation mechanism is verified under wave conditions in the Taiwan Strait to ensure compliance with requirements.