

浮式風力機平台結構強度分析之邊界條件設定探討

施囿丞*¹ 曾郁安* 楊淳宇* 詹育禎*

*財團法人驗船中心

關鍵詞:浮式風力機、懸鍊繫纜、有限元素法、結構分析、邊界條件

摘要

我國離岸固定式風力機裝置容量超過2.25GW，居亞太地區領先地位，經濟部能源署亦積極地規劃未來推動水深超過65公尺浮動式離岸風場推動辦法，國內各產學研界亦積極投入相關技術能量之建置，以第三方驗證機構而言，如何參照國際IEC 61400系列標準之要求，完整評估浮式風力機平台之結構強度為一重要議題。適切的邊界條件設定為執行浮式平台結構有限元素分析之重要步驟，然因目前全世界浮式平台多元化設計，且搭配不同類型繫纜系統，故仍無一普遍有效且可靠反映對應該浮式平台複雜環境下之邊界條件設定。為此本研究針對半潛式浮式風力機搭配懸鍊式(catenary)繫纜系統，先於海工分析軟體Orcaflex中，求取標準要求設計工況下之運動響應及繫纜受力，並根據浮式平台之不對稱性，彙整求取該繫纜系統非線性彈性係數曲線特性。本研究亦進一步執行商用有限元素軟體Femap with NASTRAN之浮式平台結構分析，運用軟體中邊界彈簧元素結合上述繫纜系統非線性彈性係數曲線特性，合理地模擬還原於Orcaflex中考量整體環境負載受力之浮式平台運動響應，進而求取浮式平台整體可靠之應力分析結果。

¹ 聯絡作者 施囿丞 (ycshih@crclass.org)

前言

目前國內離岸風力發電系統皆以在水深50 m以內的固定式基礎為主，但隨著較淺水深場址開發的飽和，擴展至水深50至200 m成為下一階段離岸風電開發重點，固定式基礎也逐漸走向採用浮式平台與繫泊系統的浮式基礎。在實際服役過程中，浮式平台要承受來自風力、波浪和海流等不間斷的動態負荷，因此確保浮式平台的結構安全性成為了一項研究的關鍵。這通常依賴於對整個浮式平台進行有限元素分析，以預測其在不同環境條件下的極限與疲勞強度。

在有限元素分析過程中，選定一適當的邊界條件能夠避免模型剛體位移，為一重要之設置。由於現今各式平台外型各異，目前國際上尚無一通用之邊界條件供分析使用，使得平台有限元素分析過程充滿挑戰，且因浮式平台在現實中並無一明確之位移限制，一般直接設置於平台結構之固定位移的邊界條件容易在各式負荷作用下造成不合理之應力集中，造成結構分析之盲點。文獻[1-2]提出以彈簧邊界條件模擬繫纜力可以有效避免平台結構上之應力集中，進而求取可靠之計算結果。然而文獻中提到之彈簧皆為固定剛性之線性彈簧，與實際情況中平台受懸鍊式錨鍊和底部加重塊的影響之非線性系統不盡相符。

因此，本研究進一步提出以非線性彈簧連接模擬懸鍊式繫纜對浮式平台之拘束能力。由繫纜分析軟體計算得到繫纜力與平台運動之非線性關係，可設定繫纜彈簧之非線性彈性係數。以期能在結構有限元素分析中，簡便的設置邊界條件、避免不合理的應力集中並且更真實的模擬平台受力的行為。

計算標的

本文以鍾等設計之偏心半潛式平台DeltaFloat[3]為計算標的，其主要尺寸表如表1和圖1所示。此浮台之繫泊系統由六組繫纜與拖曳錨構成，每根繫纜上有16塊加重塊，詳細繫泊系統規格如表2。DeltaFloat以丹麥科技大學DTU 10 MW風力機作為標的，進行浮式平台設計。此風力機設計在額定風速11.4 m/s時，達到額定功率10 MW；且依該機控制系統設定，風力機轉子在風速11 m/s時將產生最大之推力，約1507.4 kN。

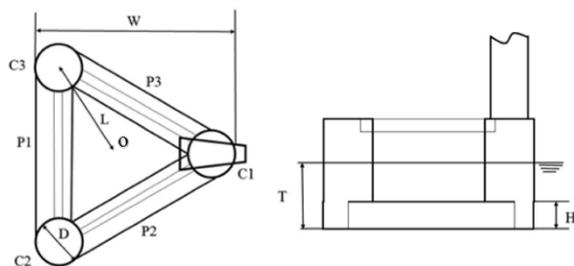


圖1 DeltaFloat主要尺寸圖

表1 DeltaFloat主要尺寸表

圓柱至平台中心距離(L)	40 m
圓柱直徑(D)	12.5 m
浮箱平台高度(H)	7 m
圓柱高度(C1-C3)	35 m

吃水(T)	20 m
排水量	19000 ton
鋼材重	3600 ton
GMT/GML	8.54 m

表2 DeltaFloat繫泊系統規格表

繫纜型式	懸鍊式
繫纜材料	R3 Studless Chain
錨鍊數	6
水深	60 m
公稱直徑	127 mm
斷裂強度	12171 kN
單位重量	348 kg/m
錨定點距圓柱中心水平距離	494 m
繫纜長度	500 m
加重塊位置	從繫纜著地點往後每2m間隔
加重塊數	16 pcs/mooring
加重塊重量	5000 kg/pc

評估方法與結果

本文採用的商用海洋工程分析軟體Orcaflex，可以分別以葉片元素動量理論求解風力機葉片的受力、以頻域勢流輻射-繞射理論求解浮式平台的運動、以莫里森方程式求解塔架受風和繫纜受海洋的阻力、以有限元素法求解繫泊系統各繫纜的張力等，還可加入風力機控制系統，最後求解運動方程式，在時域整合水動力、空氣動力、風力機控制系統和繫泊系統響應進行全系統動態模擬。因此，本文以Orcaflex軟體之計算結果作為繫纜非線性彈簧設定與驗證的依據。

由國際標準IEC TS 61400-3-2[4] 設計負載條件DLC 1.6中，如表3，考慮入流方向為180度與0度時之繫纜力與平台運動響應，分別以案例1與案例2代表，如表4。繫纜布置與座標定義如圖2。本論文研究案例1中繫纜1(Line 1)與繫纜3(Line 3)代表之力與位移關係，套用至有限元素之彈簧元素模型，並在驗證結果與討論時以案例2之計算結果驗證。

表3 設計負載狀況表

設計負載狀況	DLC 1.6
設計工況	正常發電
波浪	嚴苛海況
風與波浪方向	同向
其他條件	無
分析種類	極限強度

表4 計算案例表

輪穀風速 (m/s)	示性波高 (m)	尖峰週期 (s)	流速 (m/s)	入流方向 (deg)
---------------	-------------	-------------	-------------	---------------

案例1	11.4	12.72	11.8	1.59	180
案例2	11.4	12.72	11.8	1.59	0

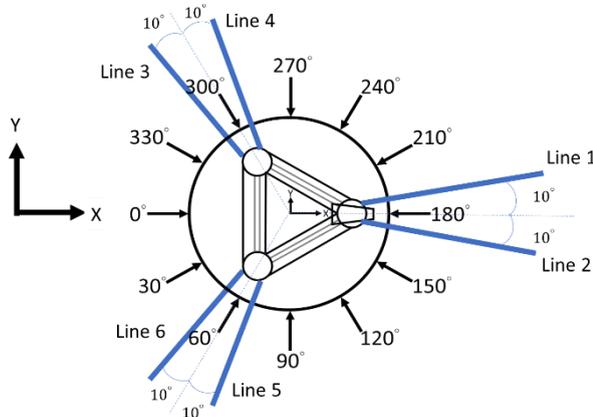


圖2 DeltaFloat繫纜布置與座標定義圖

Orcaflex軟體可求出在案例1中的繫纜1之X方向分力與平台X方向位移之關係，由於案例1之負荷方向為180度，平台X方向位移大多數為負值，此時對繫纜1為拉伸、對繫纜3為壓縮。因此本論文研究案例1下繫纜1拉伸時的彈性係數以及繫纜3壓縮時的彈性係數，並以此設定在各繫纜軸方向的彈性係數。在討論平台X位移小於0、繫纜1拉伸時，我們可以進一步根據平台X位移分成兩組，X位移小於0且大於-3和X位移小於-3，將兩組數據分別進行線性回歸，得出之斜率即為繫纜在不同階段之水平彈性係數。在平台X方向位移大於0，繫纜1壓縮時的彈性係數應與繫纜3壓縮時的彈性行為相同，因此本文以繫纜3之壓縮彈性係數設定於繫纜1在平台位移大於0時的行為。由於計算案例1是考慮非規則波負荷，一些極端離群值推估為不規則波所造成，需要未來後續研究。案例1繫纜1拉伸時的X方向位移與X分力圖如圖3。分段討論如圖4、5。繫纜3壓縮時的X方向位移與X分力關係如圖6。最終之水平分段彈性係數如圖7。

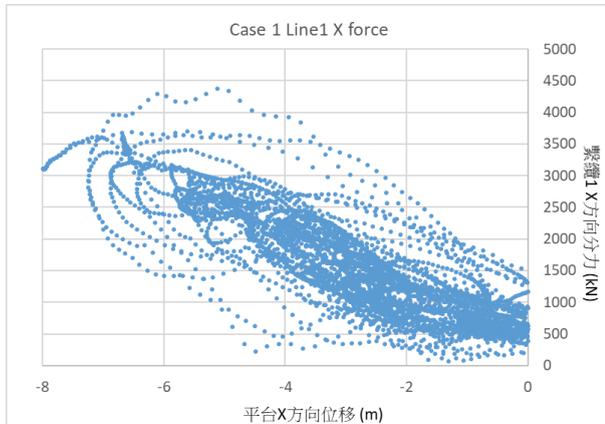


圖3 案例1繫纜1X方向分力對平台X位移($X < 0$)之關係

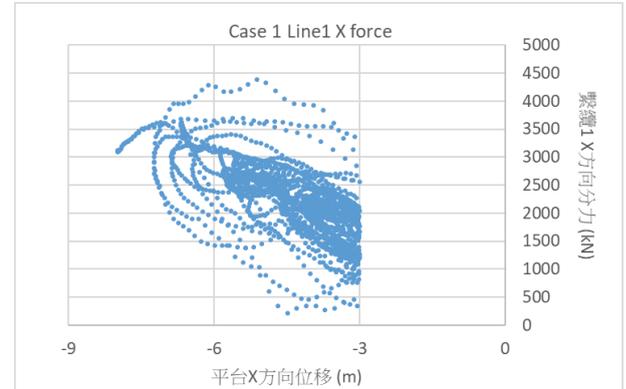


圖4 案例1繫纜1X方向分力對平台X位移($X < -3$)之關係

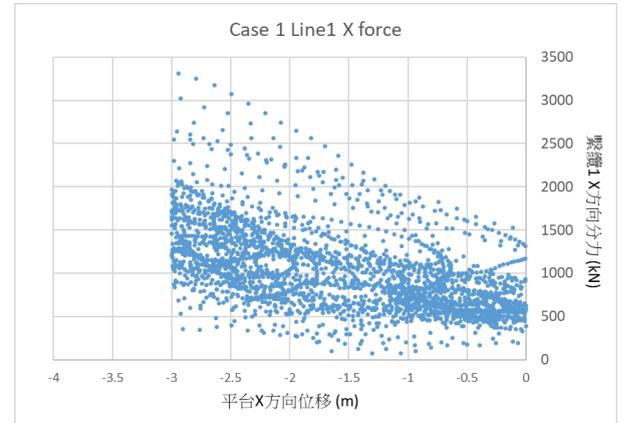


圖5 案例1繫纜1X方向分力對平台X位移($-3 < X < 0$)之關係

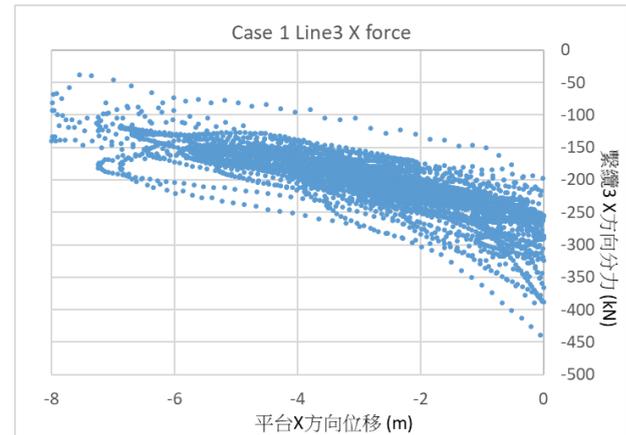


圖6 案例1繫纜3X方向分力對平台X位移($X < 0$)之關係

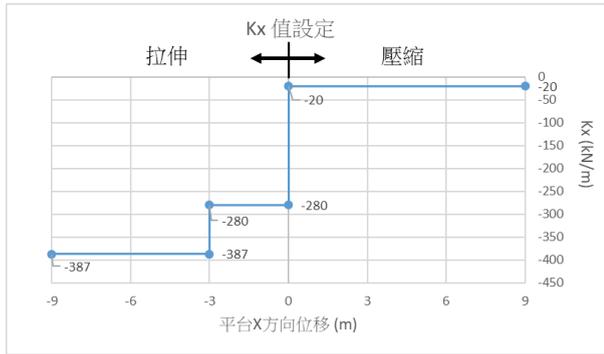


圖7 案例1中繫纜1之X方向彈性係數對平台X位移之關係

垂直方向之彈性係數則以案例1中 繫纜1之Z方向分力與平台Z方向位移關係，如圖8，加以線性回歸可得。由於Z方向之力與位移關係相對單純，本研究以一彈性係數代表，如圖9所示。

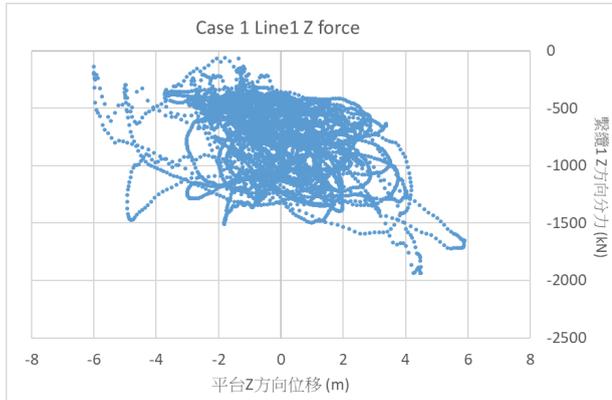


圖8 案例1繫纜1Z方向分力對平台Z位移之關係

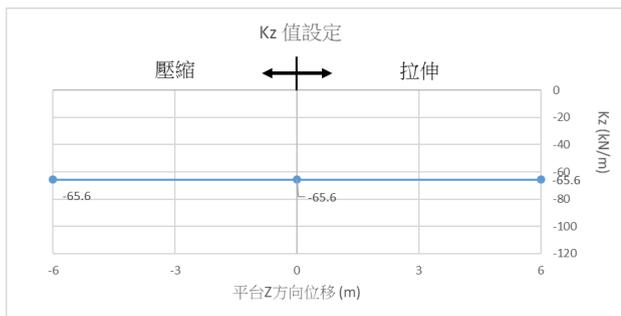


圖9 案例1中繫纜X方向彈性係數對平台X位移之關係

驗證結果與討論

接著本研究使用有限元素軟體模擬浮式風機平台結構，使用梁元素與板元素模擬結構體，並以質量元素模擬其他非結構之重量。為簡便起見，本研究將繫纜1、2合成一組，繫纜3、4合成一組，繫纜5、6合成一組後，分別在三個column底部設置水平與垂直方向的非線性彈簧元素以模擬錨鍊對平台的拘束，布置圖如圖10與圖11。由於繫纜1、2X方向受力對於X方向位

移之關係應為相近且為並聯之關係，在有限元素模型中，兩者合而為一的彈性係數即為兩倍之繫纜1X方向K值，如圖12與式(1)。繫纜3、4與繫纜5、6之設置亦同上述。

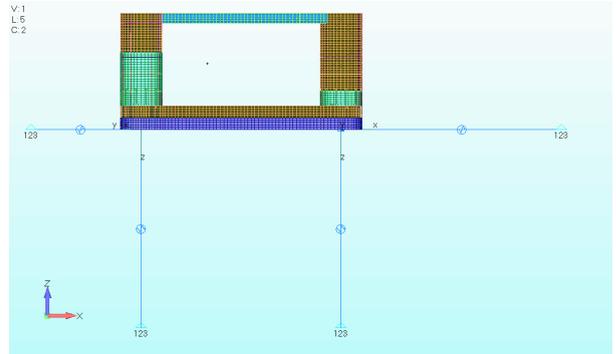


圖10 DeltaFloat有限元素模型與彈簧設定側視圖

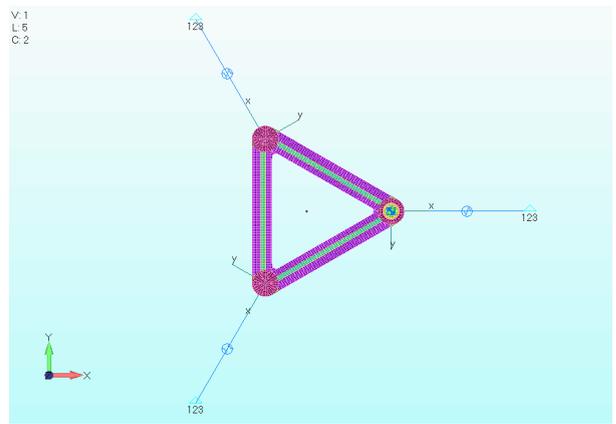


圖11 DeltaFloat有限元素模型與彈簧設定上視圖

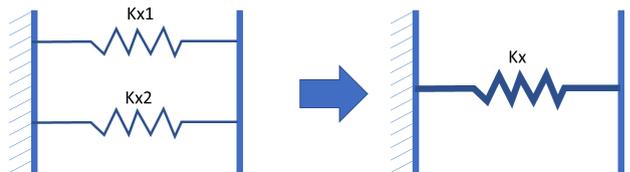


圖12 將兩相近繫纜合併之示意圖

$$Kx = Kx1 + Kx2 \quad (1)$$

將前述分段之軸向彈性係數設定於有限元素軟體之彈簧元素後，以計算案例2之位移結果加載至此簡化模型上。並檢視有限元素計算值與Orcaflex計算之繫纜力是否相近，以驗證此方法之可靠性，比較結果如表5。

表5 計算案例與結果比較表

		有限元素計算值	Orcaflex計算值	差異
案例2	繫纜1 X分力(kN)	163.0	176.4	-8%

X位移+5m

	繫纜3 X分力(kN)	944.0	948.6	0%
案例2 X位移+2m	繫纜1 X分力(kN)	310.0	279.2	11%
	繫纜3 X分力(kN)	426.0	447.3	-5%
案例2 Z位移-3m	繫纜1 Z分力(kN)	588.2	239.0	146%
	繫纜3 Z分力(kN)	588.2	475.0	24%

比較案例2(負荷入流方向為0度)中X方向分力的有限元素計算值與Orcaflex計算值，兩者差異在11%以內，顯示此簡便的彈簧元素設定能大致有效的模擬懸鍊式繫纜的運動行為。進一步分析此時主要受力的繫纜3 X方向分力兩者差異明顯較繫纜1小，這是因為當繫纜1不是主要受力，受到壓縮時，其位移與受力的關係較不明顯。而若比較Z方向之分力，此時不受力之繫纜1 Z方向位移分力結果，有限元素計算值與Orcaflex計算值差距較大，也可歸咎於繫纜1不受力之結果。

總體而言，討論主要受力的繫纜，其有限元素法算出之繫纜力與海工軟體求出之位移與繫纜力關係非常接近，因此此彈性係數設定應為合理。非主要受力的繫纜力差異較大者，是由於本研究以簡便的彈簧元素模擬複雜的懸鍊式系統，可能有其他複雜的系統參數尚未考慮，仍有待未來持續研究討論。

結論

本文提出在有限元素結構模型中以非線性彈簧元素模擬繫纜力對結構之拘束。本研究先以海工軟體Orcaflex求取目標平台運動與繫纜力之關係，並將此關係整理成非線性之彈性係數運用於有限元素模型中。最後再將有限元素模型求出之繫纜力與海工軟體計算之繫纜力比較。結果顯示這兩者求出之繫纜力十分接近，因此此彈性係數與彈簧設定應為合理。惟本研究為簡便起見，以彈簧元素模擬懸鍊式繫纜系統之運動行為，可能有其他影響運動之複雜參數尚未考慮，在案例中非主要受力繫纜之位移與受力關係仍需待更多研究統整。

參考文獻

1. Vasconcelos, D. "Structural Analysis of a Floating Foundation for Offshore Wind Power under Service Conditions" Master's thesis, University of Lisbon (2019).
2. Park, S. and Choung, J. "Structural Design of the Substructure of a 10 MW Floating Offshore Wind Turbine System Using Dominant Load Parameters." J. Mar. Sci. Eng. 2023, 11, 1048. <https://doi.org/10.3390/jmse11051048> (2023)
3. 鍾承憲、周顯光、黃政彰、吳彥威，「大型抗颱風潛式離岸風力機平台開發」，中國工程師學會會刊工程，Vol. 96, No. 3, pp. 26-42. (2023)
4. International Electrotechnical Commission, "IEC TS 61400-3-2, Wind energy generation systems – Part 3-2: Design requirements for floating offshore wind turbines", Geneva, Switzerland (2019).

BOUNDARY CONDITIONS OF FLOATING WIND TURBINE PLATFORM STRUCTURAL STRENGTH ANALYSIS

You-Chen Shih, Yu-An Tzeng, Chun-Yu Yang, Yu-Ti Jhan

CR Classification Society

Keywords: Floating wind turbines, catenary mooring lines, finite element method, structural analysis, boundary conditions

ABSTRACT

In Taiwan, the capacity of fixed offshore wind turbine installations exceeds 2.25 GW. The government is actively planning future measures to promote floating offshore wind farms in water depths exceeding 65 meters. Various domestic industry, academia, and research sectors are also actively contributing to the development of relevant technical capabilities. For third-party verification organizations, assessing the structural strength of floating wind turbine platforms comprehensively according to the requirements of the international verification standard IEC TS 61400-3-2 is an important issue.

Appropriate boundary condition settings are a crucial step in performing finite element analysis of floating platform structures. However, due to the diversified designs of floating platforms worldwide and their use of different types of mooring systems, there is still no universally effective and reliable method for defining boundary conditions that accurately reflect the complex environment of these floating platforms.

To address this, our research focuses on semi-submersible floating wind turbines equipped with catenary mooring system. First, we use the marine engineering analysis software Orcaflex to obtain the motion response and mooring line forces under IEC 61400-3-2 specified design conditions. Considering the asymmetry of the floating platform, we compile the nonlinear elastic coefficient curve characteristics of the mooring system. Subsequently, we perform structural analysis of the floating platform using the commercial finite element software Femap with NASTRAN. By combining boundary spring elements in the software with the aforementioned nonlinear elastic coefficient curve characteristics of the mooring system, we reasonably simulate and replicate the dynamic response of the floating platform under overall environmental loading considered in Orcaflex. This allows us to obtain reliable stress analysis results for the entire floating platform.