



大型抗颱風潛式離岸風力機平台開發

財團法人船舶暨海洋產業研發中心處長 / 鍾承憲
財團法人船舶暨海洋產業研發中心執行長 / 周顯光
財團法人船舶暨海洋產業研發中心副組長 / 黃政彰
財團法人船舶暨海洋產業研發中心工程師 / 吳彥威

關鍵字：離岸風電、浮動式風力機、繫泊系統、耦合分析

摘要

本文以搭載10 MW離岸風力機之浮動平台為設計目標，假設以臺灣西部海域水深50 m以上區域為場址，根據穩度要求設計平台幾何，並對繫泊配置進行擬靜態分析，以不同纜繩直徑與加重塊進行比較，先進行浮動平台與繫泊系統的非耦合分析，假設平台運動只受環境負荷影響，而不受繫纜張力影響；之後在動態時域下考慮相同的環境條件使用耦合系統執行3小時動態分析，整理系統的極端動態響應結果，如浮體運動和繫泊張力，並將非耦合和耦合分析的結果進行比較與探討，最後於國立成功大學水工試驗進行1/70水槽模型試驗以驗證設計之可行性，針對浮式平台結構的運動反應和自由運動衰減情況進行探討與實驗，其中藉由建立浮式

平台模型與相關儀器設備，進行自由運動衰減、規則波及非規則波的試驗，量測項目為浮式平台之運動行為與繫纜繩張力，並包含分析反應振幅運算子（Response Amplitude Operator, RAO）分析及非則波下之運動性能探討。

一、前言

根據全球風能協會（Global Wind Energy Council, GWEC）統計[1]，2019 年全球離岸風電新增裝置容量達 6.1 GW，佔總體新增裝置容量10%，創下歷史新高，離岸風電總裝置亦達到29 GW；2019年新增量前三名為中國（2.4GW，占比為 38.37%）、英國（1.8GW，占比為28.7%）及德國（1.1 GW，占比為 18.08%），全球離岸風力市場裝置

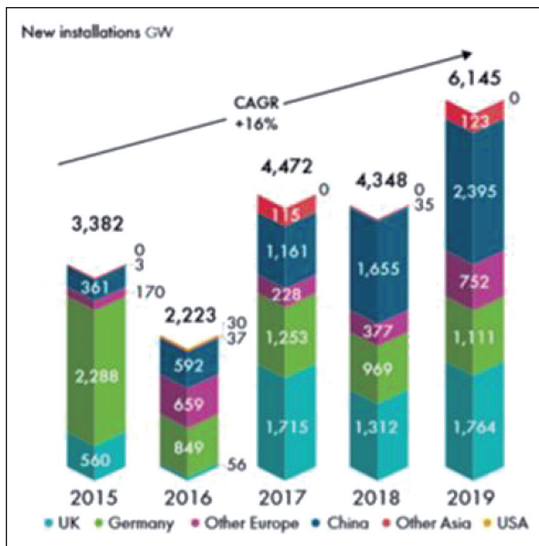


圖 1 2015~2019 全球離岸風力市場裝置容量分佈 [1]

容量分佈，如圖1所示。其中亞洲區域風能發展新增裝置容量為2.5 GW，佔全球新增量39%，東南亞將是未來發展重點區域，越南與泰國未來市場框架與政策發展頗值得關注。

目前離岸風力發電系統開發皆在50米內淺水區以底著式 (bottom founded) 的基礎結構，由於淺水區的離岸風電開發岸場容易與其他海洋開發用途相競合 (如漁業、航運等)，可開發的近岸淺水區域日益飽和，因此目標裝設範圍擴展至深水區域 (50米~200米) 成為各國下一階段離岸風電開發推動重點。

在美國、中國大陸、日本、挪威等國家，深水區域蘊藏相當豐富的風能潛能，隨著風場水深越深和離岸距離越大，對於風機

的功率與規格要求也越來越高，以目前固定式基礎結構技術，大於50米以上之水深區域，其水下基礎的成本以及施工難度將隨著水深增加，因此，浮式離岸風電概念隨之而生，浮式離岸風電係指安裝在浮動結構上之離岸風力發電系統，可在深水區域裝置離岸風力機，離岸風電先進國家紛紛開始積極投入深水區的浮式離岸風電相關技術研發，浮式風力發電系統有機會成為解決方案，擴大離岸風電的裝設範圍、提高風力發電量，GWEC預測至2030年[2]，浮式離岸風電將全面商業化，其全球裝置容量將達6.2 GW，且WIND Europe的報告中也評估[3]，依照目前的浮式離岸風電發展速度與進程，預估到2030年時，浮式離岸風電的均化成本將落於80-100歐元/MWh之間，已相當接近2017年度固定型離岸風電均化成本65歐元/MWh。可見浮式離岸風電在2030年前後將有機會成為大規模商業開發之標的，可預期浮式風電產業崛起，全球爭相進場卡位。

國內政府規劃離岸風電採「先示範、次潛力、後區塊」三階段開發政策；第一階段示範獎勵及第二階段潛力場址分別獲得初步成果，預計於2025年累計設置量達5.7 GW，並持續規劃第三階段區塊開發政策，自2026年至2035年間將年年釋出1GW容量，以10年10 GW規模廣續推動，在政府積極推動發展離岸風電下，開發區域勢必將涵蓋至50米水深以上區域。國際先進在浮式風電部署上亦尚在前期示範階段，國內與其技術差距尚



圖 2 假設目標場址與資料浮標位置示意圖

低，若能提前投入浮式風電之研發、設計、製造和安裝上之需求，將可使國內產業及早準備，為後續國內產業切入、提升國產化比例奠下良好基礎。因此，本計畫預計建立浮式平台設計分析技術，期能為2028年後示範風場設置目標貢獻一力。

二、場址條件選用

本研究考量臺灣海峽特性，假設目標場址位於新竹外海，離岸約3.5-4公里，位於西部海域之觀測浮標，如圖1所示。綜合參考1997-2018總共11年之中央氣象局新竹浮標

實測海況，併與美國國家海洋暨大氣總署模擬數據（National Oceanic and Atmospheric Administration，NOAA）全球海況資料庫之環境數據[4]進行統計回歸分析，推估水深約50-100 m之新竹外海目標場址，作為研究浮動平台設計及性能評估之依據。期望建立10 MW級以上之浮式風機平台，故選擇平台場址水深為60 m，海氣象條件則參考表1、表2、表3。風速、波浪及海流等環境條件回歸值。並取95%信心度之50年回歸統計極值作為代表依據，亦即，最大示性波高 $HS = 12.72\text{ m}$ ，對應之尖峰週期 $T_p = 11.8\text{ s}$ ；海流極值取 1.59 m/s ，至於風速極值依信度95%回歸計

表 1 目標場址風速極值回歸值

回歸期 (年)	1	10	50
V_{130} (m/s)	36.94	44.96	49.64
195% (m/s)	35.91	42.48	45.81
u95% (m/s)	37.97	47.44	53.47 (57.0)

表 2 目標場址浪高、週期極值統計回歸值

回歸期 (年)	1	10	50
$H_{1/3}$ (m)	5.48	9.01	11.02
195% (m/s)	5.02	7.91	9.32
u95% (m/s)	5.94	10.11	12.72
$H_{1/3}$ (u95%) 對應 T_p (s)	8.89	10.77	11.80

表 3 目標場址海流極值統計回歸值

回歸期 (年)	1	10	50
海流流速 (m/s)	1.37	1.46	1.53
195% (m/s)	1.35	1.42	1.47
u95% (m/s)	1.39	1.50	1.59

算應為 53.47 m/s，但考量臺灣特殊之颱風條件，故而本研究擬參照 IEC-61400 規範 Class T 之 57 m/s 作為風速極值[5]。

三、浮式平台構型設計與性能評估

現行市面上商轉風機詳細規格在商業機密考量下並不易取得，部份研究機構如美國國家可再生能源實驗室 (National Renewable Energy Laboratory, NREL) 及 IEA 國際能源署 (International Energy Agency, IEA) 等嘗試參考商轉風機開發研究用風機規格，並公

表 4 DTU 10MW 參考風機規格 [6]

型號	DTU 10MW
風機等級	IEC Class 1A
風機轉向 / 型式	順時轉, 上風式
額定功率	10 MW
葉片數量	3
葉片尺寸	178.3
啟動風速 / 額定風速 / 停機風速	4 m/s, 11.4 m/s, 25 m/s
最大尖速比	90 m/s
輪轂尺寸	5.6 m
輪轂高度	119 m
葉片重量	228,962 kg
機艙重量	446,036 kg
塔架重量	628,422 kg

開其資訊作為開發研究之用，本研究使用丹麥技術大學提供之 DTU 10 MW 風機作為設計平台之參考風機[6]，如表 4 所示。

平台構型設計以半潛式為主，透過環境條件、初始設計限制及性能評估，訂定設計標準。初始設計平台吃水為 20 m，乾舷設定為 15 米，亦即平台總深度 (Depth) 為 35 米，配合臺灣製造施工場址條件，平台全寬以不超過 85 m 為原則。圖 2 概念構型以環狀箱型浮筒 (P1, P2, P3) 應具備一定高度，並提昇其對平台三個頂點垂直圓柱 (C1, C2, C3) 之支撐力，以求盡量降減小型支撐柱 (brace) 之數量甚或完全避免，吃水 (T) 為 20 m 固定，分別調整浮筒平台高度 (H)、垂直圓柱直徑 (D) 以及圓柱至平台中心 (o) 的距離 (L) 之尺寸。

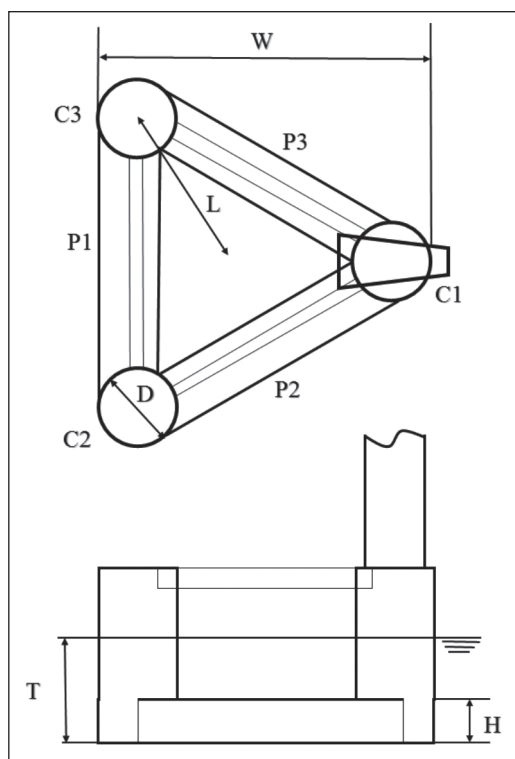


圖 3 概念浮動平台構型佈置示意圖

表5透過計算浮力穩度分析，得出定傾高 GMT、GML需大於1.0 m，而風機引致最大靜傾角（運轉最大推力下的傾角）需控制在10度以下。為了滿足設計吃水之需求，平台整體含風機、塔柱的重量必須等於平台設計吃水下之總排水量，總排水量扣除預估平台鋼構重量以及風機、塔架重量之外的差值，則需透過適當的壓艙水配置來完成，其中三個箱型浮筒（P1, P2, P3）除了預留10%予內部結構佔用之外，剩餘空間全數填充壓艙水；另為了平衡風機、塔柱安裝於圓柱C1所造成的平台整體重心偏移，故而C2, C3二圓

表 5 浮動平台主要尺寸與壓艙重量配置

名稱	尺寸	單位
圓柱至平台中心距離 (L)	40	m
圓柱直徑 (D)	12.5	m
浮筒平台高度 (H)	7	m
圓柱高度 (C1-C3)	35	m
吃水 (T)	20	m
排水量	19403	Tons
鋼材重	3831.7	Tons
浮筒壓載	10641.3	Tons
圓柱壓載 (C1)	338.3	Tons
圓柱壓載 (C2)	1643.3	Tons
圓柱壓載 (C3)	1643.3	Tons
GMT/GML	8.62	m
靜傾角	8.09	deg

柱內必須先配置與風機、塔架同等重量之壓艙水，若有剩餘再平均分配至平台三角形頂點之三個直立圓柱（C1, C2, C3）內。而浮動平台本身具有的抵抗傾側（Heeling）、翻覆（Moment）與外力，並回復到原來正浮位置之傾側能力，考慮平台受轉子推力作用產生之傾斜伴隨著角速度之變化，透過動穩度計算，求得平台受風作用下完整動穩度曲線，平台傾角下扶正力矩的面積，參照DNVGL規範建議至少需等於或大於風傾側力矩曲線下的1.4倍。

四、浮式平台繫泊系統設計與擬靜態評估

浮動式風力機之繫泊系統的目的是將浮動平台依設計位置保持在規定的範圍內，以

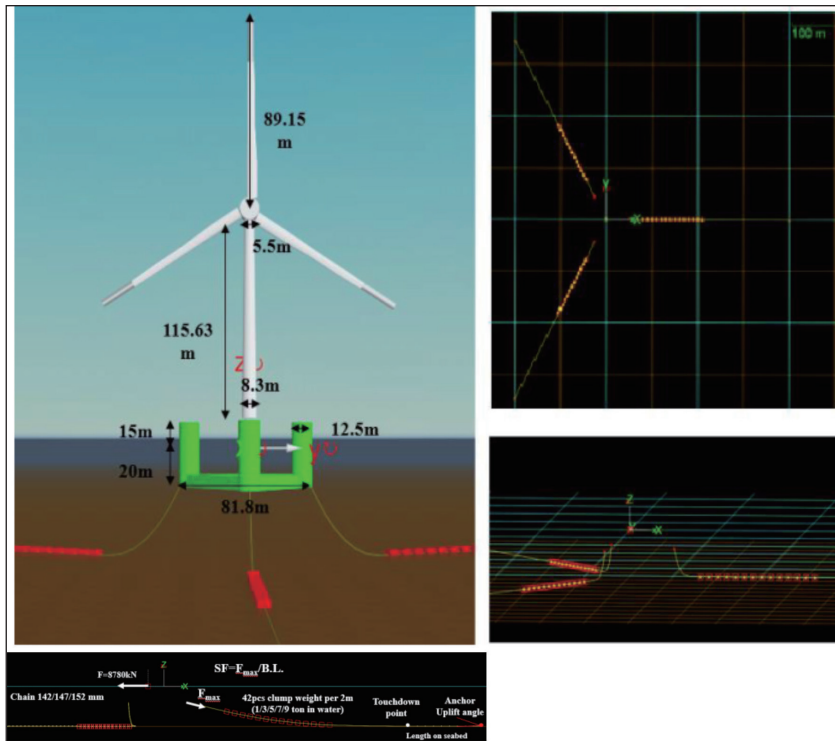


圖 4 Orcaflex 繫泊系統建模示意圖

使電纜或鄰近的風機不受損壞，並為浮動平台提供一定的穩定性。

浮動式風力機之繫泊系統選定以Orcina OrcaFlex[7]進行參數分析，見圖4為該軟體為海事工程與繫纜專業設計軟體。參考國際浮動式風力機安裝範例，繫纜資料選用國際繫纜廠商Vryhof型錄，錨鍊公稱直徑為142/147/152 mm，加重塊（clump）從繫纜著地點（touchdown point）往後每2 m間隔設置，每條錨鍊共有42個加重塊，加重塊重量為1~9 ton的沒水重量，以經驗公式計算50年回歸週期之風波流負荷下並檢核繫纜受力狀況。

分析結果主要比較係數如表6及表7所列，首先為繫纜張力之安全係數，以ABS所用之1.67為基準[8]，則需使用公稱直徑147 mm以上的錨鍊；在錨碇抬升角條件，以使用最常見之拖錨（drag anchor）情形，應不可

表 6 安全係數分析結果

加重塊 (ton)	直徑		
	142 (mm)	147 (mm)	152 (mm)
1	1.63	1.71	1.80
3	1.62	1.71	1.80
5	1.62	1.71	1.80
7	1.62	1.71	1.79
9	1.62	1.70	1.79



表 7 位移量

加重塊 (ton)	直徑		
	142 (mm)	147 (mm)	152 (mm)
1	20.88	20.25	19.56
3	17.12	16.58	15.72
5	13.05	12.31	11.60
7	12.13	11.52	11.01
9	11.65	11.12	10.31

表 8 浮動式風力機繫纜系統初步選定資料

參數	單位	值
繫纜型式	-	懸鍊
繫纜材料	-	R3 Studless Chain
斷裂強度	KN	15536
錨鍊數	-	3
水深	m	60
公稱直徑	mm	147
單位重量	Kg/m	432
錨碇點距浮體中心水平距離	m	534
繫纜長度	m	550
繫纜預張力	KN	1537
繫纜初始剛性	KN/m	1179

產生錨碇抬升角 (zero uplift angle)，並衡量錨鍊與加重塊剩餘海床上的部分，盡可能不過度設計，加重塊較佳規格為5 ton，最後為浮動平台位移量，與後續海纜設計選定進行評估；最後整理浮動式風力機初步選定資料見表 8所列。

浮動平台與繫泊系統非耦合分析假設平台運動只受環境負荷影響，而不受繫纜張力影響，此時繫纜也只隨著平台運動改變張

表 9 環境條件計算列表

	風速 (m/s)	Hs (m)	流速 (m/s)
Case1	57.0	11.8	1.59
Case2	47.44	10.77	1.50
Case3	37.97	8.89	1.39

表 10 繫纜最大張力分析結果

	非耦合 (KN)	耦合 (KN)	誤差
Case1	9384	11080	15.3%
Case2	8010	9113	12.1%
Case3	5719	6299	9.2%

表 11 平台最大水平位移分析結果

	非耦合 (m)	耦合 (m)	誤差
Case1	12.20	13.60	10.50%
Case2	10.33	11.33	8.86%
Case3	7.17	7.65	6.21%

力。對於此時平台可使用頻域分析，節省大量計算時間，可在初步設計時使用。但在頻域分析中，運動方程式被線性化，意味著在阻力負荷、時變繫纜形狀、波浪表面高程和繫纜恢復力等非線性影響方面存在不準確性。考慮完整之動態效應，本研究使用 OrcaFlex 進行分析，可使用非耦合分析與時域耦合分析方法模擬繫纜系統張力與平台運動並進行比較，如表9所列；分別依回歸週期 50/10/1年計算。分別為繫纜張力和平台位移分析結果，顯示非耦合分析會低估受力與運動響應，且當環境條件越嚴苛，非線性效應越顯著，最大誤差達15.3%。

表 12 耦合動態時域分析之風波流條件

		Hs (m)	Vw (m/s)	Vc (m/s)	錯位
	50 年	12.72	57.0	1.59	0
Case1	風	12.08	57.0	1.27	+ -15
Case2	波	12.72	54.2	1.27	+ -15
Case3	流	9.54	42.8	1.57	0,45

表 13 3×2 繫纜直徑 117 mm 耦合動態時域分析結果

	最大張力 (KN)	安全係數	錨仰角度 (deg)	躺海床長度 (m)	預張力 (KN)	橫搖 (m)
完整	6302	1.95	0.35	195.4	1750	12.8
斷一條	11180	1.06	0.24	170.0	2701	14.9

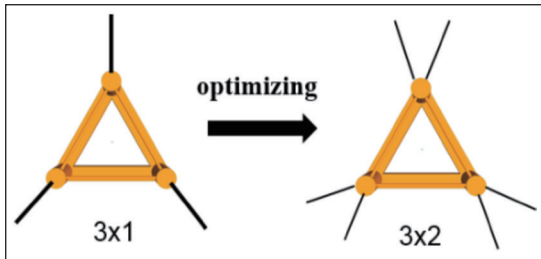


圖 5 繫纜系統優化設計

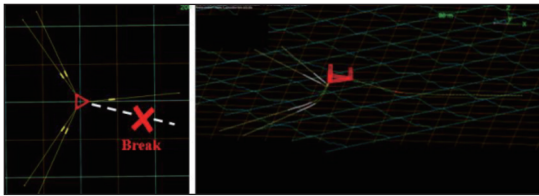


圖 6 Orcaflex 斷纜分析示意圖

接著以初步選定設計資料進行極限環境條件下耦合動態時域分析，環境條件以50年回歸週期為主，但考慮風波流不會同時發生50年狀況，參考 API-RP-2MET Annex H TableH.7[9]，設定表12作為分析條件。

以3小時進行耦合動態分析錨鍊直徑設計評估，因市面上錨鍊直徑較大的規格較少，只有特定廠家可以訂製，因此可改用錨鍊並聯來分擔負荷，如以3×2繫纜配置的方式，如圖5所示。3×2配置除了分擔負荷以外，也包

表 14 浮動式風力機繫纜系統選定資料

參數	單位	3×2 117 mm
繫纜型式		懸鍊 (Catenary)
繫纜材料		R3 Studless Chain
錨鍊數		3
水深	m	60
公稱直徑	mm	117
斷裂強度	KN	10547
單位重量	kg/m	274
錨碇點距浮體中心水平距離	m	534
繫纜長度	m	565
繫纜預張力	KN	1750
繫纜初始剛性	KN/m	651

含了繫纜冗餘度。對3×1的配置方式而言，任何一條繫纜斷裂皆會使系統失效，因此安全係數需為 2.0；在有繫纜冗餘度的配置下，完整系統的安全係數規範只需達 1.67，但必須多計算任一條繫纜斷裂下，安全係數仍有 1.05。3×2繫纜配置之耦合動態分析，如圖6及表13所列，ABS可滿足繫纜強度要求。最後整理浮動式風力機初步選定資料見表14所列。



五、縮尺模型規格

為了確保此設計之可行性及適用性，透過水槽試驗針對開發場址之海氣象條件測試。將對浮式平台進行縮尺模型試驗，模型試驗中，需致力於建構精確縮尺模型，以確保原尺寸於時頻域的力學反應，減少縮尺過程中失真現象，並利用數值分析交叉比對驗證，作為後續導引業界投入實海域驗證機組和測試機化之基礎。參考Maine大學在2015年發佈 VoltturnUS 1:8實海域模型試驗，與其他文獻皆以福祿數 (Fr) 原理為縮尺依據，確認幾何形狀、尺寸規格與實體構型相似，藉以確保物理參數之準確性。因考量風、波、流項目及成大實驗場域之限制，故本計畫縮尺比例為 1/70之模型進行水槽實驗。

模型重心量測方式採用重量量測法，以磅秤量測模型三處之重量，再以靜力平衡計算重心位置，其中垂直方向 (Z) 之重心量測方式採用傾角量測法，將模型傾斜至某角度，並且量測重量之變化進一步計算垂直方向 (Z) 之重心位置，如圖 7所示。

以Bifilar pendulum方法求得慣性矩，首先需知L懸掛長度，r懸掛點與重心之距離，以及M為懸掛物之質量，藉由量測g重力加速度與擺動之週期T得知模型慣性矩量測。而量測結果之懸掛長度L為530 mm，懸掛點與重心距離r為300 mm，分別量測三個方向之擺動週期進一步計算慣性矩，量測結果分別為

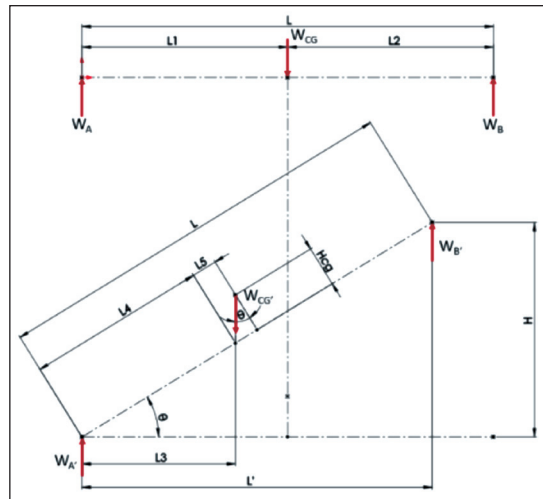


圖 7 重心計算示意圖 [10]



圖 8 模型製作完成品

$I_{xx} = 5.92 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 、 $I_{yy} = 4.84 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 以及 $I_{zz} = 10.54 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 。故本計畫縮尺比與福祿數推估相同，詳細參數及模型製作，如圖8及表15所示。在實驗前會對平台調整平台進行壓載調配和量測其重量、重心與空氣中轉動慣量。

表 15 平台實體與模型尺寸

	全尺寸	1/70 縮尺
重量 (kg)	18097000	51.67
吃水 (m)	20	0.2875
X 方向重心位置 (m)	-2.9	-0.0384
Y 方向重心位置 (m)	0	0
Z 方向重心位置 (m)	5.43	0.073
慣性 $I_{xx}(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	1.03e10	5.92
慣性 $I_{yy}(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	8.01e9	4.84
慣性 $I_{zz}(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	1.69e10	10.54



圖 9 縮尺風機及塔架

風機部分選擇DTU 10 MW參考風機模型之規格，建立質量塊的方式計算重量與質心進行縮尺與設計製作，其模型包含4顆馬達 (Motor)、陀螺儀 (Gyro)、荷重元 (Load cell) 與鋁合金骨架，如所示。為了實現DTU 10 MW參考風機之動態響應於縮尺浮動平台，產生對應於風機氣動力載重之推力與彎矩，根據陀螺儀回授風機的速度、加速度與姿態，即時更新受水動力影響後的的氣動力載重，實現氣動力與水動力耦合之水槽縮尺試驗平台，縮尺模型比例，如表 16所示。

表 16 縮尺風機比例與物理參數關係

項目	比例	全尺寸	1/70 縮尺
功率	$\lambda^{3.5}$	10 MW	3.48 W
機艙重量	λ^3	446,036 kg	1.30 kg
塔架長度	λ	115.63 m	1.65 m
塔架重量	λ^3	628,400 kg	1.83 kg

表 17 試驗水槽繫纜系統尺寸

參數	單位	Line 1	Line 2 & 3
水深	cm	85.7	
公稱直徑	mm	3.0	3.5
單位重量	kg/m	0.127	0.158
繫纜長度	m	7.2	3.6
加重塊重量	kg/pcs	0.146	0.62

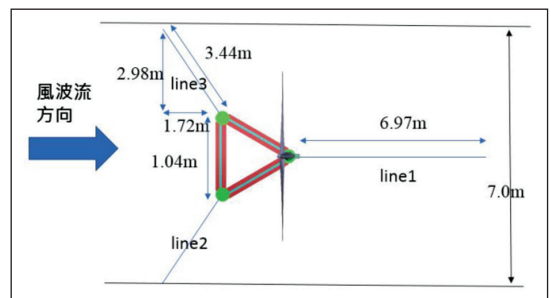


圖 10 試驗水槽繫纜配置平面圖

因受限於試驗水槽寬度7 m，在兩個側柱的繫纜長度會縮短，相對調整繫纜重量，使錨繫系統的回復力仍符合模型定律，錨繫系統縮尺模型見圖10及表17所示。

六、實驗規劃與量測項目

本計畫Delta Float 10 MW浮式平台水槽縮尺模型試驗於國立成功大學水工試驗所執



行[11]，針對浮式平台的運動及繫纜張力試驗進行探討與實驗，藉由浮式平台模型、縮尺繫纜系統與相關儀器設備，進行回復力、自由運動衰減、規則波試驗與不規則波試驗，進而量測浮式平台之運動行為與繫纜繩張力。圖11為水槽長60 m、寬7 m、深1.2 m可同時造風、造波與造流，水槽長度方向為造波與造流方向，造風機方向則可依照實驗需求進行調整。

試驗將量測浮式平台之運動行為與繫纜繩張力進行探討與分析，為量測平台運動狀態於試驗平台上方架設陀螺儀，同時觀察不同試驗條件下之姿態變化，並搭配影像處理來分析平台之動態軌跡運動情形；繫纜繩張力則透過於繫纜繩中架設張力計進行量測。量測項目依試次內容不同分為以下四個部分：

(一) 平台靜態強制位移

為確認縮尺模型繫纜回復力與全尺寸平

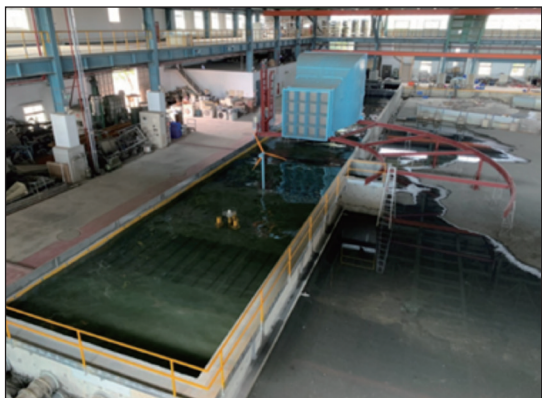


圖 11 先進新型風波流水槽

表 18 強制位移試次表

靜態強制位移測試	
靜態強制縱移 (m)	靜態強制橫移 (m)
-10	-10
-5	-5
-2.5	-2.5
2.5	2.5
5	5
10	10

台設計需求一致，將對縱移 (surge) 與橫移 (sway) 兩個方向各進行6組的強制位移，量測平台在單一自由度的強制位移下之繫纜回復力 (Restoring Force)，表18為模擬實尺寸之強制位移試次表。

(二) 自由運動衰減試驗

對平台施加一個自由度方向初始位移後，使其自由擺動至穩定狀態，平台分為有無繫纜狀態，無繫纜平台進行起伏 (heave)、橫搖 (roll)、俯仰 (pitch) 三個自由度，有繫纜平台進行六個自由度試驗，試次如表19所試，記錄其時序列變化去推估實尺寸平台之運動自然週期與阻尼比。

(三) 規則波中平台運動反應量測

有繫纜狀態之平台進行2組浪向、7組規則波的造波試驗 (表20)，波高固定3.5公尺、週期由7秒至20秒變化，量測平台六自由度運動時序列及繫纜張力，並透過時序列計算平台RAO。

表 19 自由衰減試次

	自由衰減測試初始位移	
	Free Hull	Moored Hull
縱移	-	7.5 m
橫移	-	7.5 m
起伏	2.5 m	2.5 m
縱搖	5°	5°
橫搖	5°	5°
偏轉	-	5°

表 20 規則波試次表

規則波測試	
Moored Hull	
波浪方向 (°)	180
	90
波浪振幅 (m)	3.5
週期 (s)	7
	10
	12
	14
	16
	18
	20

(四) 不規則波中平台運動反應量測

有繫纜狀態之平台進行2組浪向（180°、90°）、5組海況試驗（表21），環境條件組合分為純波、風+波、風+波+流，不規則波採用Jonswap波譜， $\gamma = 3.3$ ，其中sea state 2, 3之波高、週期為本研究目標海域一年回歸週期之極限波高與週期，sea state 4, 5之波高、週期為本研究目標海域五十年回歸週期之極限波高與週期特徵波高 $H_s = 12.72$ 公尺，尖峰

波週期 $T_p = 11.8$ 秒，極限風速 $V_w = 11.5$ 公尺/秒，與目標海域之回歸縮尺之極限海流流速 $V_c = 1.59$ 公尺/秒，將量測非規則環境下平台六個自由度運動、繫纜張力，並透過運動時序列計算計算平台運動時序列推算平台在不規則海況環境下之運動與繫纜張力反應之統計值。

七、實驗結果探討與數值比對

(一) 自由運動衰減試驗

以實驗整機組平台各別一組初始位置進行6個自由度之自由運動衰減試驗，分析並計算6個自由度之自然週期。其中，無繫纜繩試驗包含：Heave、Roll、Pitch之測量；有繫纜繩試驗包含：Surge、Sway、Heave、Roll、Pitch、Yaw。透過分析軟體 OrcaFlex 及 ANSYS AQWA，比對整體平台自由衰減時序列結果，由Ocrflex的結果來看，起伏實驗遞減速率一致，振幅較慢於數值結果，反之橫搖速率較快；其振幅大小與數值差不多，如圖12所示。為了求得整機組平台運動之自然頻率，將自由運動衰減時序列進一步

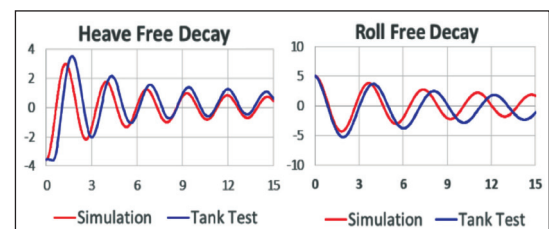


圖 12 自由衰減時序列實驗及分析比對結果



表 21 非規則波試次表

不規則波測試				
Sea State	Hs (m)	Tp (s)	Wind (m/s)	Current (m/s)
1	4	7.3	-	-
2	5.94	8.89	-	-
3	5.94	8.89	11.5	-
4	12.72	11.8	11.5	1.59
5	12.72	11.8	5.70	1.59

表 22 無繫纜之整體自然週期誤差

	Heave	Roll	Pitch
1/70 Model	2.63	4.12	4.32
Full Model	22	34.51	36.2
數值計算	21.70	33.80	34.30
誤差	1.3%	2.0%	5.2%

表 23 有繫纜之整體自然週期誤差

	Surge	Sway	Heave	Roll	Pitch	Yaw
1/70 Model	20.9	19.39	2.567	3.88	4.066	16.22
Full Model	174.86	162.23	31.48	32.46	34.02	135.71
數值計算	182.04	176.12	21.8	33.7	34.2	142.47
誤差	4.1%	8.75%	1.4%	3.8%	0.4%	4.98%

作快速傅立葉轉換 (Fast Fourier transform, FFT) 分析, 可求得該自由度在頻率域上的振幅, 一般定義振幅峰值所對應的頻率極為自然頻率/自然週期, 比對無繫纜之整體自週週期結果, 誤差在 5.2% 以內, 而有繫纜之整體自週週期之最大為 8.75%, 從實驗及數值比對結果, 排除模型公差問題, 兩者誤差都在合理的範圍之內, 如表 22 及表 23 所示。

(二) 平台靜態強制位移

該試驗透過給予整機平台設計之 Surge 與 Sway 初始位移距離, 進行各 6 組實驗強制位移, 分別在 180 度及 90 度方向波浪下配置, 測量相對應之 3 條繫纜繩張力值, 以呈現平台在強制位移下之繫纜繩回復力、分析回復力曲線之特性。首先初始實際配置長度為 500 m, 因場地限制 line 2 及 line 3 之場度回推實際長度為 255.5 m, OrcaFlex 模擬靜態強制最大移動之情況, 如圖 13 所示。由模擬結果與實際情況來看明顯有所誤差, 進而尋找原因, 發現試驗場地限制及繫纜配重塊配重無法拉緊, 經有計算得知繫纜長度誤差 1%, 藉由模擬分析, 將原設計 500 m 修正至 505 m, 從 Surge 方向看 line 1 及 line 2 更為貼切實際狀況, 而 Sway 方向偏移正負 10 m 時, 長度為 505 m 之 line 1 及 line 2 模擬的結果更貼切實際現象, 如圖 14 及圖 15 所示。

(三) 規則波中平台運動反應 (RAO) 量測

反應振幅運算子 (response amplitude operator, RAO) 為一工程統計值, 常用於評

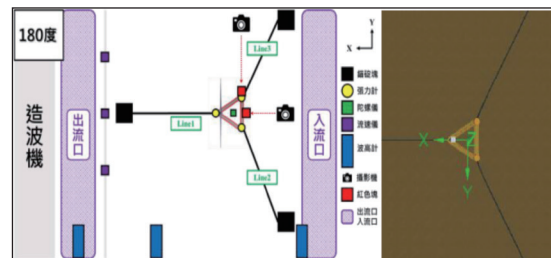


圖 13 水槽測試及 OrcaFlex 模擬配置

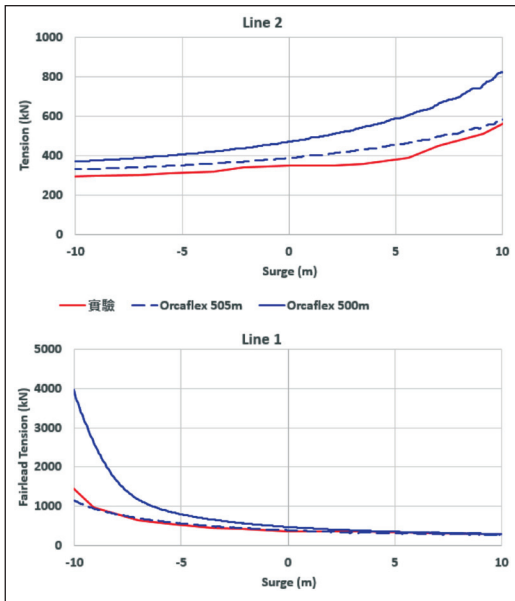


圖 14 Surge 方向 line 1 與 line 2 之強制位移

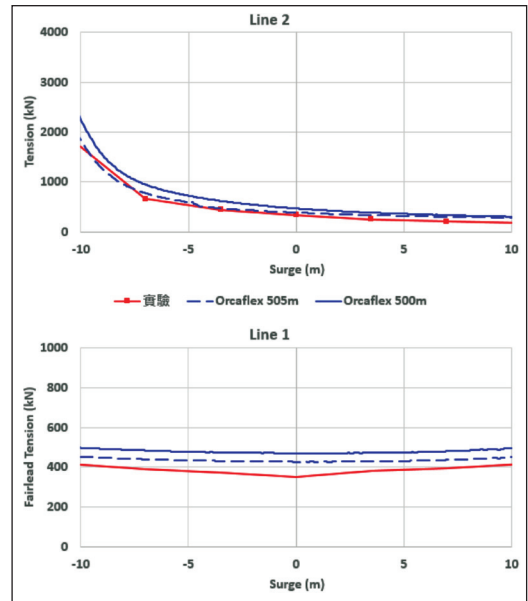


圖 15 Sway 方向 line 1 與 line 2 之強制位移

估船體或浮式結構物於海上的動態反應。在入射波浪為規則波時，RAO可定義為其與入射波的振幅比值[12]

$$RAO = \frac{Z_a}{\delta_a}$$

圖16及圖17分別為Heave和Pitch在180度方向不同週期規則波作用下RAO試驗結果與模擬比對。Heave RAO隨週期提高而漸增，主要是平台Heave時候，自然週期大約接近20秒的位置，接近共振點而提高振幅。然而Pitch自然週期大約在36秒，因實驗量測平台搖晃角度偏小不明顯，故運動變化不大。而90度方向平台擺設位置不是對稱則有Roll變化，其數值模擬分析與實驗結果趨勢大至相同，像Pitch隨週期提高而漸增，大約34秒位

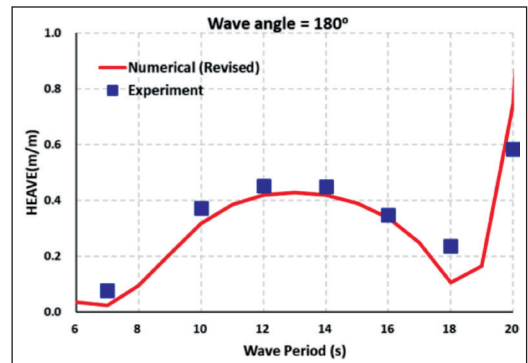


圖 16 波向 180 度 Heave 運動 RAO 比對

置產生共振點，如圖18~圖20所示。綜合2組數值分析及實驗比對結果，得知Roll和Pitch量測範圍遠低於自然週期，運動反應不明顯，量測數據較小，但平台運動反應RAO趨勢兩者都一致，符合設計目標。

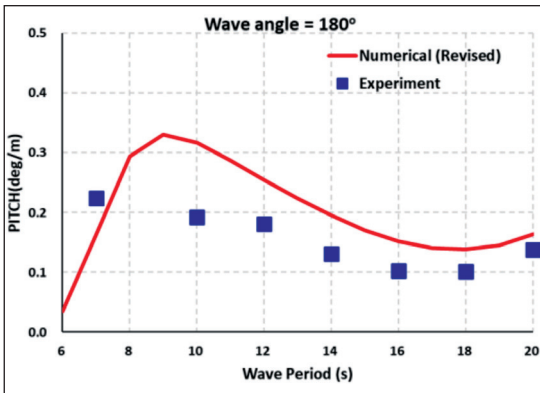


圖 17 波向 180 度 Pitch 運動 RAO 比對

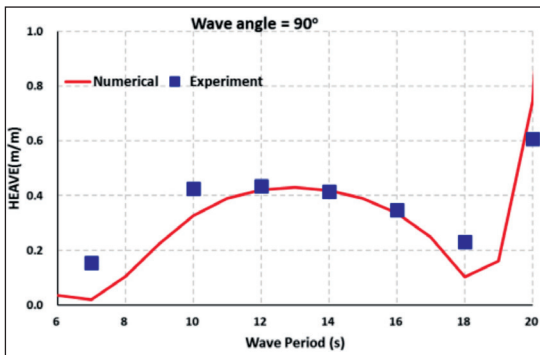


圖 18 波向 90 度 Heave 運動 RAO 比對

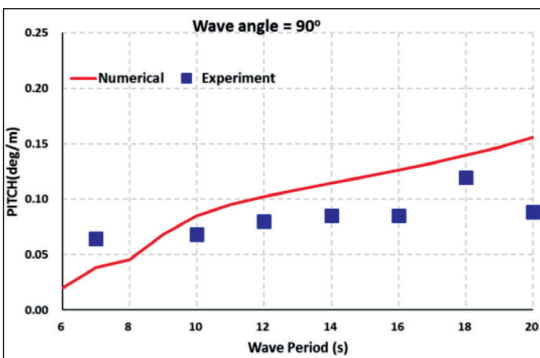


圖 19 波向 90 度 Pitch 運動 RAO 比對

(四) 非規則波中平台運動反應量測

實際波並非單一特性波浪，其海洋波浪變化極為不規則，而頻率、振幅、波長、方向皆不斷變化，不同時間所觀察之情況也不相同。假設浮動平台對波浪之反應為線性，且海洋波與浮動平台之反應可視為穩定且平均值為零之正規隨機過程 (stationary normal random process with zero mean)，則在實海域受不規則波作用之浮動平台，其運動之頻率反應頻譜 $SR(\omega)$ ，其中 $HR(\omega)$ 為船體在單位規則波中的轉換函數 (transfer function)，或稱為反應振幅運算子 (Response Amplitude Operator, RAO)； $S(\omega)$ 為波浪頻譜。

$$(\omega) = |(\omega)|^2 \cdot S(\omega)$$

以 Sea State 5 極端條件狀況五十年回歸期之示性波 $HS = 12.72 \text{ m}$ ，對應之尖峰週期 $T_p = 11.8 \text{ s}$ ；分別考量風速 57 m/s 下之平台運動反應，一般而言，規則波中之運動反應 RAO 在接近自然週期附近可以看到相當明顯的運動反應，但計算極限海況之尖峰週期 T_p 與平台之自然週期有一定的距離，故非規則波下之運動反應除起伏 (heave) 稍為明顯變化，如圖 21 所示。然而橫搖 (roll) 與縱搖 (pitch) 之反應特徵值在 180 與 90 度波向下均不到 2 度，且同樣因為計算海況之主要波浪週期 (11.8 秒) 與平台之自然週期較遠，從數值及實驗趨勢比對來看大致相同，如圖 22 及圖 23 所示。

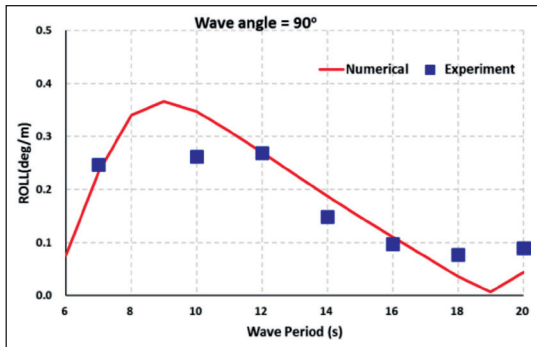


圖 20 波向 90 度 Roll 運動 RAO 比對

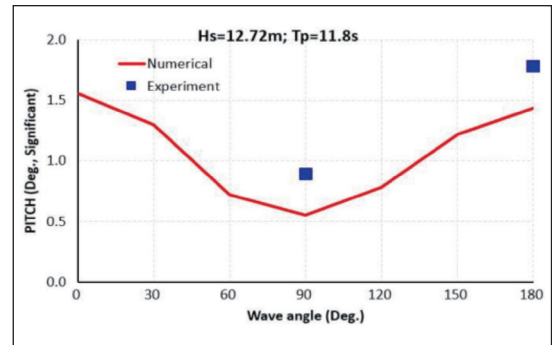


圖 23 極端條件下之平台縱搖運動特徵值

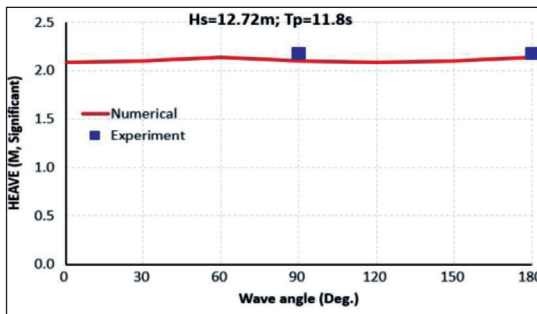


圖 21 極端條件下之平台起伏運動特徵值

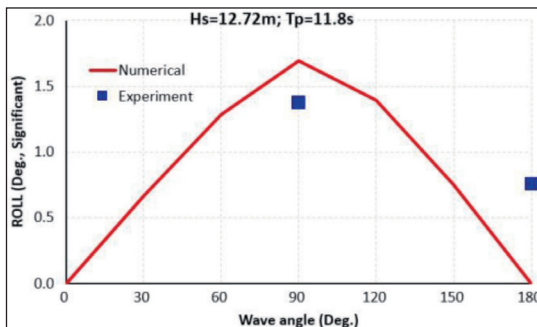


圖 22 極端條件下之平台橫搖運動特徵值

八、結論

本研究設計搭載 10 MW 離岸風力機之浮動式平台與繫泊系統，假設以臺灣西部海

域水深 50 m 以上區域為場址，依新竹浮標資料與國際海況資料庫 NOAA 進行統計回歸分析，計算風波流條件作為繫纜分析之設計值。平台構型設計考量環境條件、初始設計限制、穩度與運動性能評估，設計為浮筒和圓柱組成之半潛式平台。在繫纜設計方面，首先以擬靜態分析，比較不同錨鍊直徑與加重塊，依國際規範之安全係數與成本考量選定繫纜系統參數，便進行浮動平台與繫泊系統的非耦合與耦合分析，在非耦合分析下，非線性效應被忽略，耦合分析會低估繫纜張力與浮動式平台位移量，且當環境條件越嚴苛，非線性效應越顯著，最後規劃水槽模型試驗以驗證設計之可行性，透過自由運動衰減、規則波與不規則波之試驗，並量測浮式平台之運動行為進行驗證比對，計算海況之主要波浪週期與平台 Roll 與 Pitch 之自然週期較遠，因此搖晃的運動反應較小，並從實驗數據與模擬的結果可得知平台運動反應符合設計趨勢，完成大型抗颱風半潛式離岸風力機平台開發設計。



參考文獻

1. Global Wind Energy Council(GWEC), Global Wind Report 2019.
2. Global Wind Energy Council(GWEC), 'Offshore wind will surge to over 234 GW by 2030, led by Asia-Pacific' , August, 2020
3. WIND Europe, 'FLOATING OFFSHORE WIND ENERGY A POLICY BLUEPRINT FOR EUROPE' , October 2018.
4. BUCHMAN, Michael F. NOAA screening quick reference tables. 1999.
5. IEC, IEC 61400-1, Wind Energy Generation Systems. 20190.
6. BAK, Christian, et al. The DTU 10-MW reference wind turbine. In: Danish wind power research 2013. 2013.
7. Orcina Ltd, 'OrcaFlex user manual: OrcaFlex version 11.0f'. Daltongate Ulverston Cumbria, UK, 2020.
8. ABS, Guide for building and classing floating offshore wind turbine, 2020.
9. SANTALA, Markku J. API RP-2MET Metocean 2nd edition; Updates to the Gulf of Mexico regional annex. In: Offshore Technology Conference. OTC, 2018.
10. E. Kassarian, F. Sanfedino, D. Alazard, H. Evain, J. Montel, "Modeling and stability of balloon-borne gondolas with coupled endulum-torsion dynamics", Preprint submitted to Aerospace Science and Technology, 2021.
11. 財團法人船舶暨海洋產業研發中心,「新及再生能源前瞻技術掃描評估及研發推動—12MW級風機抗颱風式平台與錨繫設計及評估創新前瞻計畫」,中華民國111年。
12. J Journée, J. M. J., and J. A. Pinkster. Ship Hydro-mechanics. Delft University of Technology, 2001, 70.