

## 浮式風力機運動下平台表面水壓快速評估程序

曾郁安<sup>1</sup> 施囿丞 楊淳宇 詹育禎

財團法人驗船中心

關鍵詞:浮式風力機, 浮式平台, 負載運動分析, 水壓分布

### 摘要

依據IEC 61400系列標準, 浮式風力機設計需考量發電、啟動、緊急停機、待機、運輸安裝及浮式平台繫纜失效等相應環境條件下之設計負載工況, 並進一步執行極限強度或疲勞分析之結構安全評估, 然完整評估需進行超過上千個案例, 耗費大量時間成本, 故本研究旨在建立一套快速、可靠的浮式風力機平台表面水壓評估程序, 以提供後續結構強度分析所需之水動力負載, 以利降低浮式風力機設計與驗證審查所需之時間成本。

本研究先以海洋工程分析軟體OrcaFlex, 求取場址環境條件下浮式風力機與繫纜系統之負載及浮式平台運動響應, 再針對浮式平台整體負載最大狀態下, 輔以基於勢流理論之分析軟體HydroSTAR, 求取其相應姿態下的水壓分布值。另將OrcaFlex取得浮式平台之運動響應, 透過流體力學分析軟體Star-CCM+進行浮式平台流場模擬, 數值結果除與勢流理論HydroSTAR計算結果比對外, 亦進行兩分析軟體求取之水壓分布差異度修正, 以趨近實際狀況, 進而建立修正勢流理論分析之快速水壓分布評估程序。

---

<sup>1</sup> 聯絡作者 曾郁安 (yatzeng@crclass.org)

## 前言

目前離岸風力機的設計與執行規範，以國際電工委員會(IEC)發布的IEC 61400系列標準[1][2]為業界最廣泛使用的標準。標準中有一系列應考量的設計負載狀況(Design Load Case, DLC), 包括發電、啟動、緊急停機、待機、運輸安裝及浮式平台繫纜失效等情況。欲完整評估, 需分析風力機在各DLC情況下所受之負載, 並進一步將所得負載施加在結構模型上, 執行極限強度或疲勞分析之結構安全評估, 以確保在離岸風力機之壽命期間內達到適當之工程完整性和安全等級。

離岸風力機的負載包含自重、風力、海浪、潮汐和洋流及操作負載等;若為浮式風力機尚須考慮平台運動動態負載、平台運動和海洋環境交互作用之負載及繫纜系統負載等。透過海洋工程分析軟體OrcaFlex之計算可以考量上述各類負載, 唯獨OrcaFlex是以水動力係數求解運動方程式平衡, 而非直接計算流場, 故無法得到浮式平台表面水壓負載, 還需要借助其他流體力學分析方法, 例如勢流和黏性流計算軟體。雖然勢流方法的計算時間較快, 但理論限制較多, 較偏離真實;而黏性流的計算較接近真實, 但需要耗費大量時間成本。故本研究旨在建立一套快速、可靠的浮式平台表面水壓評估程序, 提供後續結構強度分析所需之水動力負載, 以利降低浮式風力機設計與驗證審查所需之時間。

為了建立快速水壓分布評估程序, 本文將以DeltaFloat浮式平台與繫泊系統[3]配合DTU 10 MW參考風力機[4]為標的, 先以OrcaFlex求取場址環境條件下浮式平台之運動響應, 再針對浮式平台整體負載最大狀態下, 以基於勢流理論之分析軟體HydroSTAR, 求取其相應姿態下的水壓分布值。另將OrcaFlex取得浮式平台之運動響應, 透過黏性流流體力學分析軟體Star-CCM+進行浮式平台流場模擬。數值結果除與HydroSTAR計算結果比對外, 亦進行兩分析軟體求取之水壓分布差異度修正, 以趨近實際狀況, 進而建立修正勢流理論分析之快速水壓分布評估程序。

## 浮式風力機系統技術規格

### 1. 浮式平台

DeltaFloat之平台構型為淺吃水的半潛式平台, 以三個浮箱連接三個圓柱, 俯視呈正三角形, 並採用偏心塔柱系統(Off-Center Tower Systems), 其風力機和塔架位置在三個圓柱的其中之一上, 而非位於平台中心, 如圖1所示。三個圓柱的尺寸相同, 為直徑12.5 m、高35 m, 圓柱至平台中心距離為40 m, 其中本文稱設置風力機和塔架的圓柱為主柱, 編號C1, 其他兩個圓柱分別編號C2和C3。主要規格如表1。

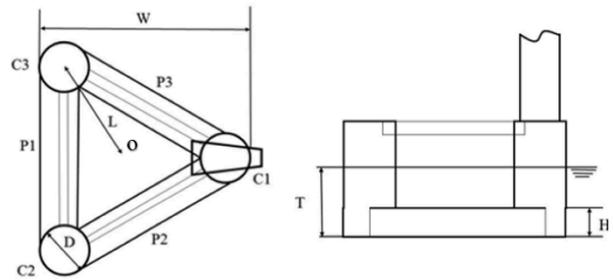


圖1 DeltaFloat構型佈置示意圖

表1 DeltaFloat平台規格

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
$GM_T/GM_L$	8.54 m

### 2. 繫泊系統

DeltaFloat之繫泊系統採用三個頂點各兩條繫纜, 共六條繫纜的配置, 繫纜錨鍊的公稱直徑為127 mm, 並配置加重塊(Clump), 從著地點(Touchdown Point)往後每2 m間隔設置一個, 每條錨鍊設有16個加重塊, 加重塊沒水重量為5000 kg, 繫泊系統的主要規格如表2。

表2 DeltaFloat繫泊系統規格

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

### 3. 參考風力機

DTU 10 MW參考風力機的主要技術規格如表3，此風力機設計之切入風速為4 m/s、額定風速為11.4 m/s、切出風速為25 m/s。

表3 DTU 10 MW參考風力機規格

型號	DTU 10 MW
風力機等級	IEC Class 1A
風力機轉向/型式	順時針, 上風式
額定功率	10 MW
葉片數量	3
葉片尺寸	178.3 m
切入/額定/切出風速	4, 11.4, 25 m/s
最大尖速比	90 m/s
輪轂尺寸	5.6 m
輪轂高度(陸域)	119 m
葉片重量	228.0 ton
機艙重量	446.0 ton
塔架重量	628.4 ton

### 環境條件

本文分析正常發電時，分別於切入、額定、切出風速之情況。環境條件以中央氣象署新竹浮標2011年1月1日至2016年12月31日期間之風、波量測資料，進行風、波聯合機率分析，獲得不同風速下之波高分布，以此計算求得相應風速下之示性波高及對應週期。各風速下之波浪及海流等環境條件如表4，其中 $V_{hub}$ 表示輪轂高度的風速、 $H_s$ 為示性波高、 $T_p$ 為對應之尖峰週期、 $V_{cur}$ 為流速。為了三個軟體可以在相同環境條件下分析，以比較得到差異度修正，且結構分析中通常以受力最大瞬間時之壓力作為負載，又波高與所受負載有正向關係，因此本文為確認結構會受最大波高之影響，將非規則波的示性波高 $H_s$ 依IEC 61400-3-1之公式[1]，

$$H_{max} = 1.86 \times H_s \quad (1)$$

轉換成最大波高 $H_{max}$ 下的規則波計算，如表4。

表4 計算條件列表

案例編號	$V_{hub}$ (m/s)	$H_s$ (m)	$H_{max}$ (m)	$T_p$ (s)	$V_{cur}$ (m/s)
1	4.0	0.5	0.93	4.25	1.59
2	11.4	2.0	3.72	6.5	1.59
3	24.5	4.75	8.84	8.25	1.59

### 分析方法及軟體

本文分析流程圖如圖2。先以OrcaFlex計算特定環境條件下浮式風力機之整體負載及浮式平台運動響應。接著，分別將浮式平台整體負載最大狀態下的運動姿態輸入至HydroSTAR，以得到浮台固定時、基於勢流理論之水壓分布值；以及將浮式平台運動響應輸入至Star-CCM+，以得到浮台運動時、基於黏性流理論之水壓分布值。透過兩分析軟體之水壓分布差異修正，以趨近實際狀況，進而建立修正勢流理論分析之快速水壓分布評估程序，爾後便可透過勢流計算配合壓力修正，快速評估和求取壓力，而不須再長時間計算黏性流分析。

為了進行壓力比較和修正，本文擷取浮式平台不同水深截面之壓力，分別為水深2.5、9.5及16.5 m，如圖3。在水深2.5和9.5 m時，分別可得到圓柱C1、C2和C3的表面壓力；而在水深16.5 m時，截面位於浮箱中間，則分別可得到浮箱內側和外側的表面壓力。接著，將擷取之壓力以不同角度表示。在水深2.5和9.5 m時，角度座標以各圓柱為圓心，由-180°逆時針至180°，如圖4左；而在水深16.5 m時，角度座標以浮式平台中心為圓心，同樣由-180°逆時針至180°，如圖4右。本文假設之環境條件皆以+X方向為入流方向，亦即-180和180°為迎波面、0°為背波面。

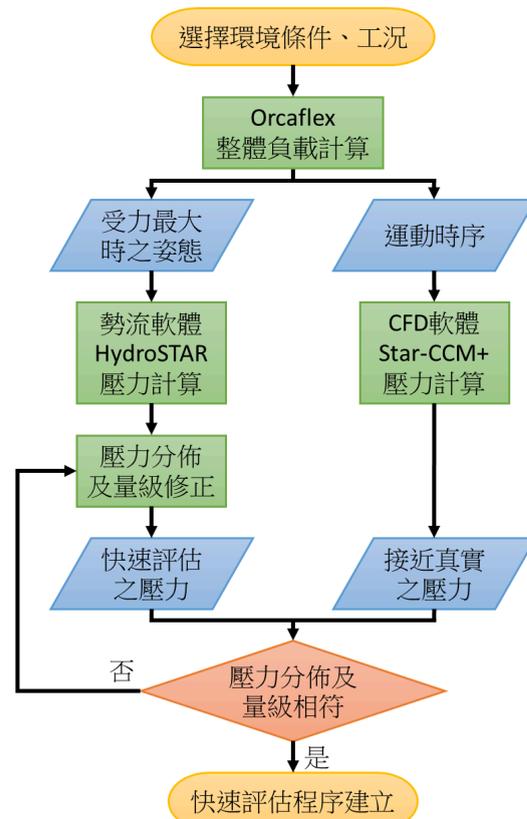


圖2 分析流程圖

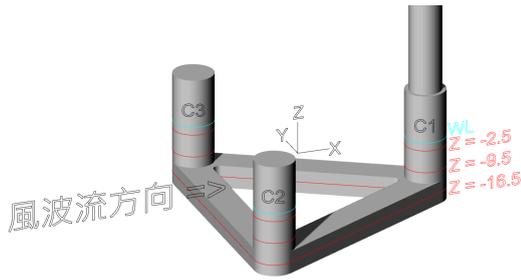


圖3 浮式平台壓力擷取截面示意圖

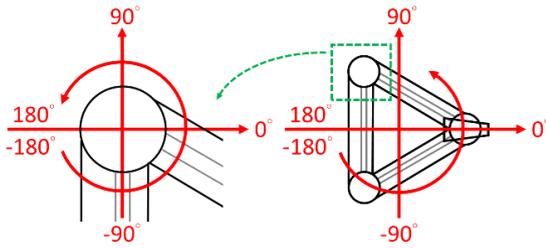


圖4 角度座標定義

### 1. 風力機系統整體負載計算

本文採用的海洋工程分析軟體OrcaFlex，可以分別以葉片元素動量理論求解風力機葉片的受力、以水動力係數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，如式(2)，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。

$$(M + A) \ddot{X} + B\dot{X} + CX = F \quad (2)$$

式中， $F$ 為外力，包括風、波、流和其他負載， $M$ 和 $A$ 分別為浮式風力機系統質量和附加質量、 $B$ 為系統阻尼、 $C$ 為系統回復勁度，而 $X$ 、 $\dot{X}$ 、 $\ddot{X}$ 分別為浮式風力機系統位置、速度、加速度。

雖然OrcaFlex所使用的理論是以水動力係數求解運動方程式平衡，並非直接計算流體的運動和受力，因此無法得到浮式平台表面壓力，但是其整體負載計算可以快速考量包含風機氣動力和繫纜張力等各類負載，得到運動響應。而這是無法計算風力機氣動力的HydroSTAR，以及需要耗費大量計算時間的Star-CCM+所難以做到的。

### 2. 黏性流壓力計算

本文採用的黏性流計算軟體Star-CCM+，應用有限體積法求解不可壓縮流的雷諾平均連續方程式，如式(3)；以及動量方程式，又稱為雷諾平均納維斯托克斯方程(Reynolds-averaged Navier-Stokes Equations, RANS Equations)，如式(4)。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{\tau_{ij}} - \overline{\rho u_i u_j} + f_i) \quad (4)$$

而在自由液面的模擬上是採用流體體積法(Volume of Fluid, VOF)，並配合OrcaFlex得到之運動響應做為浮式平台之運動，以得到浮式平台在該環境和負載條件下實際的表面水壓力。雖然黏性流計算需要花費較長的計算時間，但更為接近真實物理情況，因此本文以此計算結果，作為壓力修正的比較依據。

### 3. 勢流壓力計算

本文採用的頻率域勢流計算軟體HydroSTAR，利用輻射和繞射速度勢來線性分析表面波與各種浮動結構的相互作用，可以得到結構物之靜水係數、附加質量與阻尼係數、波浪激振力與力矩、流場速度與壓力等等。然而HydroSTAR假設的波浪僅可為線性波，並假設流體為不可壓縮、無黏性、無旋性的勢流流場，不會有流線剝離及升力等效應。

此外HydroSTAR可以加入額外的系統阻尼和回復勁度來模擬繫纜系統，但無法加入風機的效應，因此計算出的運動響應無法跟OrcaFlex的運動響應相符。為此本文僅輸入OrcaFlex計算結果中受力最大瞬間的姿態( $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 方向的位移和角度)，並在HydroSTAR中設定浮式平台的質量和轉動慣量極大，便可以分析浮式平台維持該姿態下的壓力分布。爾後便須針對勢流假設和未包含運動等簡化進行修正，以得到可靠的浮式風力機平台表面水壓。

#### 壓力修正

如同前述方法以及軟體理論和設定的限制，本文可以分別以HydroSTAR得到浮台固定時、基於勢流理論之水壓分布值，以及以Star-CCM+得到浮台運動時、基於黏性流理論之水壓分布值。兩者最主要差異為勢流與黏性流的理論假設，也就是流體無黏性，不會有流線剝離的效應，故本文目前主要針對邊界層流線剝離對壓力分布的影響進行修正。

#### 1. 邊界層流線剝離

在勢流假設中，最著名的效應便是達朗貝爾悖論(d'Alembert's Paradox)。達朗貝爾提出於不可壓縮和無黏性的勢流，當物體在恆定速度流場中，物體將不會受到任何阻力，這跟實際觀測在流場中物體都可以觀測到的阻力矛盾，這便是由於忽略了黏性效應。流體的黏性會產生邊界層，對於流線型物體，會產生摩擦阻力；對於鈍體，還會導致流線剝離(Separation)以及物體背後的低壓尾流，進而造成形狀阻力(Form Drag)。

對於圓柱而言，會影響流場和流線剝離角度的主要參數便是雷諾數(Reynolds Number)。依據Babanin的假設[5]，波浪的雷諾數 $Re$ 如下式：

$$Re = \frac{aV}{\nu} = \frac{a^2 \omega}{\nu} \quad (5)$$

其中 $a$ 為波浪振幅、 $\omega$ 為波浪頻率、 $V$ 為波浪水分子的軌道速度，而海水的動黏度 $\nu$ 約為 $1.17 \times 10^{-6}$ 。當 $1 \times 10^3 \leq Re \leq 2 \times 10^5$ 時，為層流(Laminar)邊界層，流線剝離角度自停滯點算起約為80度；而當 $2 \times 10^5 \leq Re$ 時，為紊流(Turbulent)邊界層，流線剝離角度自停滯點算起約為120度，如圖5及圖6。而流線剝離對於圓柱周圍壓力分布的影響如圖7。圖7中左圖是勢流理論的壓力分布，兩側的壓力對稱，因此阻力為0，導致了達朗貝爾悖論；中圖為小雷諾數時的層流邊界層，壓力自流線剝離角度80度之後便變化較小；而右圖為高雷諾數時的紊流邊界層，壓力自流線剝離角度120度之後便變化較小。

根據式(5)可以得到本文所計算環境條件的雷諾數，分別為 $2.73 \times 10^5$ 、 $2.86 \times 10^6$ 、 $1.27 \times 10^7$ ，皆屬於紊流範圍。因此本文將邊界層流線剝離對於壓力變化的修正設定為在圓柱上的壓力，以自停滯點算起120度，也就是本文座標角度 $\pm 60$ 度作為分界，將 $\pm 60$ 度以內的壓力以 $+60$ 和 $-60$ 度的壓力值線性內差。

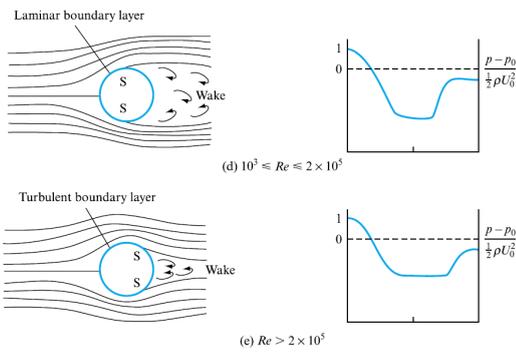


圖5 圓柱在不同雷諾數下的流線[6]

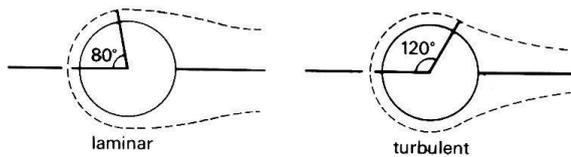


圖6 層流和紊流邊界層的剝離角度[7]

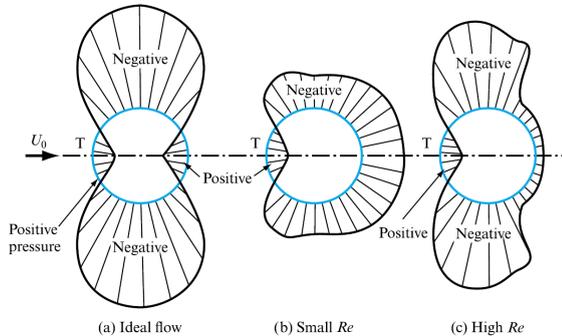


圖7 圓柱在恆定速度流場中的壓力分布 [6]

# STOCHASTIC VARIABLES IN MODEL LING OF T HE WAVE L LOADS ON OFFSHORE WIND TURBI NE STRUCTURE S

## 計算與修正結果

計算結果按照前述，擷取浮式平台不同水深截面之壓力，在水深16.5 m時，可得到圓柱內側和外側的表面壓力、在水深2.5和9.5 m時，可得到圓柱C1、C2和C3的表面壓力。圖表表示方式皆以勢流結果為綠色實線、經修正之勢流結果為淺藍色虛線、黏性流結果為深藍色實線，橫軸為本文定義之角度座標，縱軸為動壓壓力。

### 1. 案例1

圖8到圖10是案例1的計算結果，可以看到勢流跟黏性流擷取到相似的壓力分布趨勢，尤其在水深越深的地方，壓力分布趨勢和量級越接近。也可以看到流場受到三個圓柱排列方式的影響，圓柱C2和C3的壓力會偏移，也就是圓柱壓力在座標角度為正跟負時不會對稱，並些微影響到流線剝離的角度。除此之外，並可以看到黏性流結果的確有流線剝離的現象，而勢流並不會有，但透過修正方法亦可以大致接近。也可以看到案例1的雷諾數接近層流和紊流邊界層的分界，因此流線剝離的角度大約在 $\pm 80$ 至 $90$ 度，而不是 $\pm 60$ 度。

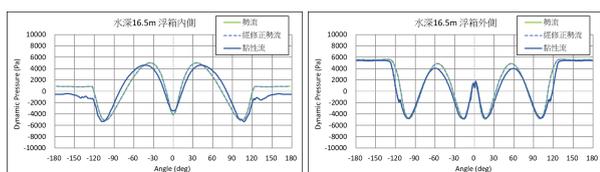


圖8 水深16.5 m處浮箱內側(左)及外側(右)壓力分布

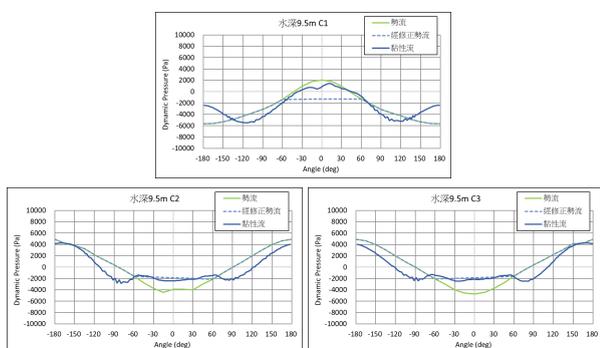


圖9 水深9.5 m處C1(上)、C2(左)及C3(右)壓力分布

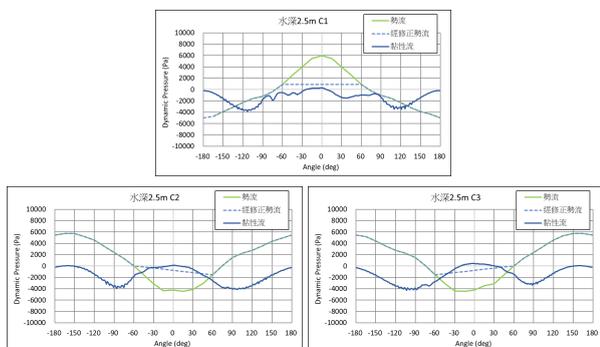


圖10 水深2.5 m處C1(上)、C2(左)及C3(右)壓力分布

### 2. 案例2

圖11到圖13是案例2的計算結果，同樣可以看到勢流跟黏性流擷取到相似的壓力分布趨勢，且在水深越深的地方，結果越接近。但在靠近水面處的壓力量級略有差異，尤其是圓柱C1在 $\pm 60$ 度以外的壓力差距較明顯。這可能是由於在黏性流中是以時域分析，波浪的時序是連續的，也就是上一個波浪受到浮式平台的影響後，流場的改變也會影響到後續的波浪。但勢流中沒有考量波浪序列的相互影響，這會導致波浪的波型和波高沒辦法完全對應，也會影響壓力的分布和大小。

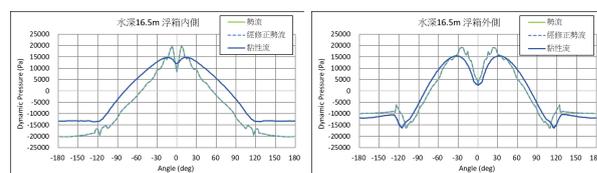


圖11 水深16.5 m處浮箱內側(左)及外側(右)壓力分布

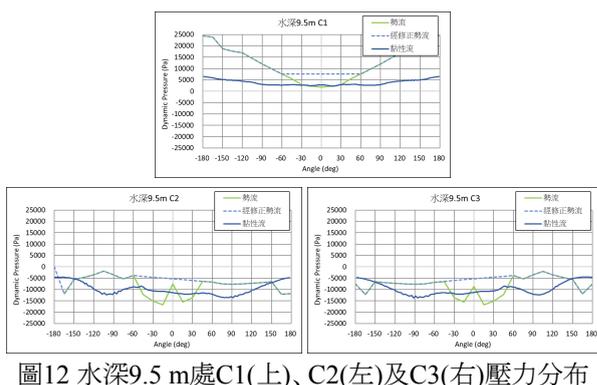


圖12 水深9.5 m處C1(上)、C2(左)及C3(右)壓力分布

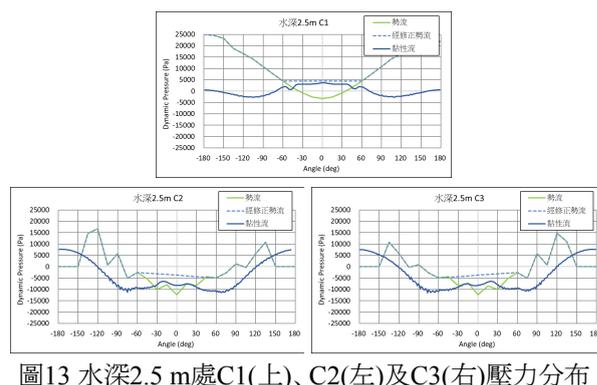


圖13 水深2.5 m處C1(上)、C2(左)及C3(右)壓力分布

### 3. 案例3

圖14到圖16是案例3的計算結果，可以看到在水深16.5 m處仍有擷取到相似的壓力分布趨勢，只是壓力量級有所差異，這可能是由於波高越高越偏離勢流軟體HydroSTAR的線性波假設，壓力分布的差距便會

越大;也可能是因為勢流計算的水線不會隨波浪改變,所以需要修正至波浪高度,然而本文尚未加入此修正,又因為波高越高,便有越多壓力沒有被修正而差距較大。而在水深9.5和2.5 m處,勢流和黏性流結果之壓力分布趨勢則不盡相同,尤其是在迎波面-180至-90度及90至180度,這可能同樣是由於波浪序列的波型和波高變化的影響,也可能是由於波擊壓力的影響。另外,也可以看到案例3的雷諾數屬於高雷諾數的紊流邊界層,因此流線剝離的角度接近60度。

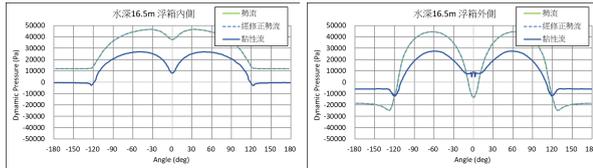


圖14 水深16.5 m處浮箱內側(左)及外側(右)壓力分布

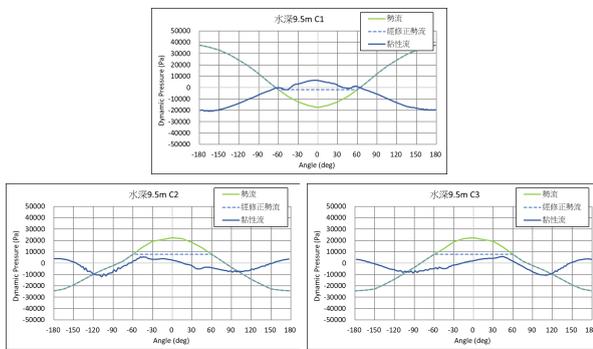


圖15 水深9.5 m處C1(上)、C2(左)及C3(右)壓力分布

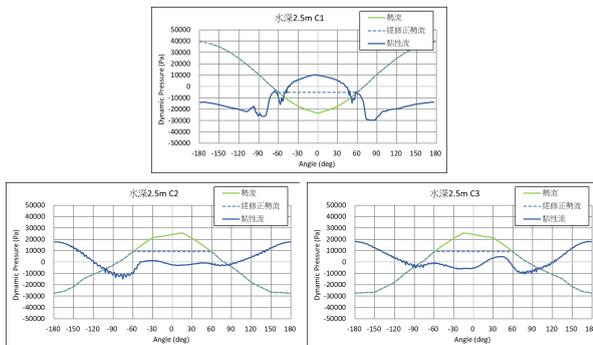


圖16 水深2.5 m處C1(上)、C2(左)及C3(右)壓力分布

### 結論

本文採用勢流軟體HydroSTAR跟黏性流軟體Star-CCM+比較和建立勢流修正方法,以建立一套快速、可靠的浮式平台表面水壓評估程序。結果發現經修正的勢流可以擷取到相似黏性流的壓力分布趨勢,尤其是在小波高且水深較深處。但在接近水面和波高越高時,壓力分布趨勢可能偏離且壓力的差距可能較大。接近水面處的壓力偏離可能是由於在黏性流中的波浪序列會互相影響,但勢流中不會,這會導致波浪

的波型沒辦法完全對應,也會影響壓力的分布和大小。而波高越高時的壓力偏離可能是由於波高越高則越偏離勢流軟體HydroSTAR微小振幅線性波的假設,也就是勢流理論忽略掉越多非線性的影響,壓力分布的差距即會越大。

除此之外,目前勢流修正僅包含邊界層流線剝離,尚有許多會影響壓力的因素未考量,未來還須進一步研究,並加入更多物理現象的修正,例如:

- (1) 勢流理論僅在水線下的範圍內有效,並不描述水線以上的波浪運動學。然而水面以上至波浪高度的波浪運動亦是重要的,以正確擷取水動力負荷。為考慮水面高度變化,可使用波浪延伸技巧,例如惠勒延伸(Wheeler-Stretching)[8]。
- (2) 本文的勢流結果是假設浮式平台不運動,而黏性流結果則是有包含完整負載計算的運動響應。浮式平台的動態運動會改變平台表面上水流的動態特性,進而影響水壓的分布,如何修正運動造成的壓力變化仍需探討。
- (3) 勢流軟體HydroSTAR假設的波浪皆為一階的線性波,但隨著波高越高越偏離線性波,需要以更高階的波浪理論來模擬,才能更接近真實情況。而波型的不同對於壓力分布更有一定的影響,如何比較和修正兩種不同波型理論的壓力仍需探討。
- (4) 隨著波高越高更有波擊壓力的產生,目前已有莫里森(Morison's Equation)等方法[1],可以計算圓柱整體波擊受力的修正,但對於壓力分布的修正仍需探討。流體的效應難以估計,且本文目標並非要完全又準確的取得所有流體效應造成的壓力變化,而是快速、可靠的得到浮式風力機平台表面水壓分布和量級。對於影響浮式平台表面壓力分布且影響結構負載之重要因素,需後續持續研究及探討相應修正方式,以利實際應用。

### 參考文獻

1. International Electrotechnical Commission, "IEC 61400-3-1, Wind energy generation systems – Part 3-1: Design requirements for fixed offshore wind turbines", Geneva, Switzerland, 2019.
2. 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.
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, Sep 2023 pp. 26-42.
4. Christian Bak, Frederik Zahle, Robert Bitsche, Taeseong Kim, Anders Yde, Lars Christian Henriksen, Anand Natarajan, Morten Hartvig Hansen, "Description of the DTU 10 MW Reference Wind Turbine", DTU Wind Energy, Denmark, Jul 2013.
5. Babanin, A. V., "On a wave-induced turbulence and a wave-mixed upper ocean layer", Geophys. Res. Lett., 33, L20605, 2006

6. Douglas, J.F., Gasiorek, J.M., Swaffield, J.A., Jack, L.B., "Fluid mechanics 5th ed.", Pearson, 2005
7. C. G. Caro, T. J. Pedley, R. C. Schroter, W. A. Seed, "The Mechanics of the Circulation", Cambridge University Press, 2012
8. Madjid Karimirad, "Offshore energy structures: For wind power, wave energy and hybrid marine platforms", Springer, 2014