

# 應用不同計算方法評估離岸風機基礎之波浪負荷

## P Evaluation of Wave Loads of the Offshore Wind Turbine Foundation Pile by Different Computational Methods

邱方伶<sup>1</sup>、曾郁安<sup>1\*</sup>、林宗岳<sup>2</sup>、范秉天<sup>2</sup>、辛敬業<sup>1</sup>

國立臺灣海洋大學系統工程暨造船學系<sup>1</sup>、財團法人中國驗船中心<sup>2</sup>

Fang-Ling Chiu<sup>1</sup>, Yu-An Tzeng<sup>1</sup>, Tsung-Yueh Lin<sup>2</sup>, Bryan Nelson<sup>2</sup>, Ching-Yeh Hsin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Systems Engineering and Naval Architecture, National Taiwan Ocean University

<sup>2</sup>CR Classification Society

[yuann.tzeng@gmail.com](mailto:yuann.tzeng@gmail.com), [hsin@mail.ntou.edu.tw](mailto:hsin@mail.ntou.edu.tw)

### 摘要

離岸風機的塔座基礎結構物，不論是單樁，三腳管式，套管式或是重力式等，其受力必須考慮到水深、海浪、洋流以及海床地質的影響，而塔座的受力自然影響到風機渦輪機的發電功率與穩定性。本文將應用不同的計算方法計算離岸風機基礎結構豎立於海中承受的波浪負荷，並進行比較與分析。對於沒入水中風機塔座的水動力學分析模擬上，我們將應用兩種方法進行計算，一是求解莫理森方程式 (Morison equation)，一是應用黏性流的 RANS 方法。離岸風機的塔座基礎結構豎立於海中，將承受波浪及洋流負荷，由於其塔座的特徵尺度相較於海洋波浪尺度微小，可假設結構體不影響波浪流場，並使用莫理森方程式求解波浪之作用力。文中並將應用黏性流 RANS 方法進行計算，黏性流方法由於接近真實的物理現象，因此可以完整模擬線性與非線性的現象與受力。本文將以六種不同的波浪情況進行計算，除了兩種方法計算結果的比較之外，並與文獻的結果進行比對。對於計算結果，我們將在計算效率與精準度之間進行評估與分析。

關鍵詞：離岸風機，風機基礎受力，波浪負荷，Morison 方程式，RANS

### Abstract

The wave loads of the offshore wind turbine foundation pile must take into account the effects of water depth, waves, ocean currents and seabed geology, whether it is a mono pile, a tripod, a jacket or a gravity foundation. The force of the foundation pile naturally affects the power and stability of the turbine. In this paper, different computational methods are used to compute the wave load of the offshore wind turbine foundation in the sea, and comparison and analysis are carried out. For the hydrodynamic analysis of the wind turbine foundation in the water, we use two methods to compute, one is to solve the Morison equation and the other is to apply the viscous flow RANS method. The foundation pile structure of the offshore wind turbine is erected in the sea and will withstand wave and ocean current loads. Since the characteristic scale of the foundation is much smaller than that of the ocean wave, it can be assumed that the structure does not affect the wave flow field. And the Morrison equation can be used to solve the force of the waves. The viscous flow RANS method is also applied for computation. Since the viscous flow method is closer to the real physical phenomenon, it is possible to completely

simulate linear and nonlinear phenomena and forces. Six different wave conditions are conduct in this paper. In addition to the comparison of the computation results of two methods, the results are also compared with the results of the reference. The computation efficiency and accuracy of computational results are also evaluated.

Keywords: offshore wind turbine, wind turbine foundation load, wave load, Morison equation, RANS

### I. 前言

隨著非再生能源即將用盡，以及近年國際上對於減碳公約的實行，世界各國不斷投入人才來解決能源議題，台灣同時也開始推動節能減碳政策以及非核家園來因應全球的能源問題，台灣一直以來便仰賴進口的石化能源來維持國內的發電需求，在非核家園的政策中計畫調整能源配比來減緩對於石化能源的依賴，大幅增加了再生能源的比重，包含了太陽光電、風電、水力、生質能等等，其中風電又分為陸域風電以及離岸風電，長期目標為在 114 年達成 4.2GW，分別為陸域風電 1.2GW，離岸風電 3GW，所佔的比例僅次於太陽光電。在台灣，冬季時會受到東北季風的影響，風力強勁，加上台灣與中國之間距離相對於其他地區更為狹小，台灣海峽出現狹管效應，以此兩個因素使台灣海峽成為非常優良的風場，提供台灣發展離岸風電的優勢條件。

在離岸風電的架設中，樁基礎的用途在於提供上部結構物如風機、塔架的支撐，在海事工程中樁基礎設計將考量場址之地層構造以及土壤特性，施工層面上考量對於設備與運輸船的調配，結構上則考量上部荷重包含波浪、風力或地震力的影響，由於台灣所預計建造的風機樁體多為單樁式基礎，本文將著重討論在不同波浪情況下單樁式基礎的受力情況，如同許多學者們在風機基礎的波浪受力研究([1]-[5])，本文中我們使用兩種計算方式來分析塔架受力情況，第一種為以莫理森方程式 (Morison equation) 為基礎撰寫程式求解，第二種為以黏性流(RANS)來分析問題，透過商用軟體 STAR-CCM+來進行黏性流的模擬，由於黏性流的計算更趨近於真實情況，除了相互比較兩種計算方式的結果，檢視計算精準度，同時也與文獻結果比較。

### II. 分析模型及定義計算結果

本文中欲分析當波浪經過一圓柱時，圓柱的受力情形，此研究中選擇六種波浪條件進行觀察以及與文獻比對，在此章節中分別介紹分析模型的基本尺寸，以及六種波浪條件。

表 1 為分析模型中圓柱尺寸、水深資料，在全尺寸中圓柱直徑為 6.4 公尺，圓柱全長為 30 公尺，水深為 18 公尺，分析模型縮尺比為 40，圓柱直徑為 0.16 公尺，圓柱的全長為 0.75 公尺，水深為 0.45 公尺。

表 1 圓柱尺寸表

	全尺寸	模型尺寸
圓柱直徑(公尺)	6.4	0.16
圓柱全長(公尺)	30	0.75
水深(公尺)	18	0.45

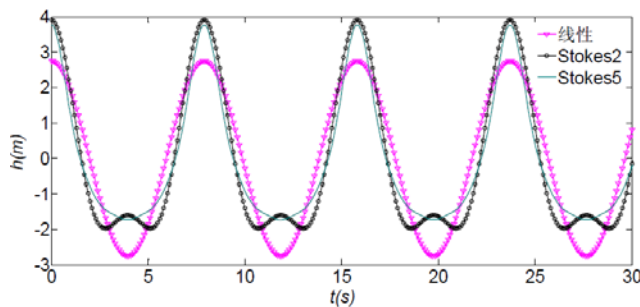


圖 1 Stokes 五階波示意圖

分析模型的波浪設定為 Stokes 五階波(如圖 1)，Stokes 五階波的特點在於當波高增加時可以被明顯發現波浪的波型不同於正弦波上下對稱的波型，當 Stokes 五階波的波高較高時波峰會較尖銳，而波谷會較圓滑，此特點將會影響網格配置的加密範圍，詳細設定將會在網格配置的章節中說明。

表 2 為本文所分析的六種波浪的波高與週期。從圖表可知垂直方向(如：Wave1 與 Wave4)為相同波高不同週期，水平方向(如：Wave1、Wave2、Wave3)為相同週期不同波高，希望透過波浪的設定觀察波高或是週期對於受力的影響情況。

表 2 波浪條件

Stokes 五階波	H=0.025	H=0.05	H=0.2
T=1.26	Wave 1	Wave 2	Wave 3
T=1.90	Wave 4	Wave 5	Wave 6

除了分析模型基本尺寸、波浪條件設定之外，本研究將以莫理森方程式(Morison equation)方法以及黏性流方法(RANS)求解此問題。為與參考文獻共同比對，定義一參數為單位波高的受力， $F_{unit}$ ，作為比較基準，如式(1)中所表示，透過上述兩種方式得到圓柱受力的週期以及波浪運動時波高變化的週期，以圓柱受力週期中最大值，即 $F_{max}$ ，與同一週期中波高變化的最大值的一半，即 $\frac{H}{2}$ ，相除，所得的單位波高受力 $F_{unit}$ 則為本文中欲比較的基準值。

$$F_{unit} = \frac{F_{max}}{\left(\frac{H}{2}\right)} \quad (1)$$

### III. 莫理森方程式方法

離岸風機的塔座基礎結構豎立於海中，將承受波浪及洋流負荷，基於單樁式基樁的特徵尺度相較於海洋波浪尺度為小，故假設結構體不會影響波浪的流場，因此能使用莫理森方程式(Morison equation)求解波浪之作用力，相較於黏性流 RANS 方法，以莫理森方程式求解相同問題，計算上相當有效率，非常適合於求解多種波浪條件，或是非規則波的情況。

莫理森方程式為一半經驗公式，其將受力分為與流體加速度相關的慣性力項 $\vec{F}_I(\vec{a})$ 和與瞬時流體速度相關的阻力項 $\vec{F}_D(\vec{u})$ ，如式(2)。

$$\begin{aligned} \vec{F} &= \vec{F}_I(\vec{a}) + \vec{F}_D(\vec{u}) \\ &= \rho C_m \frac{\pi D^2}{4} \left(\frac{d\vec{u}}{dt}\right)_{\perp} + \rho C_d \frac{D}{2} (\vec{u})_{\perp} |\vec{u}|_{\perp} \end{aligned} \quad (2)$$

其中 $\rho$ 為海水密度

$D$ 為圓管直徑

$C_m$ 和 $C_d$ 為流體動力係數，參照 DNV-OS-J101 計算

$\vec{u}$ 為流體速度向量

$\vec{a} = \frac{d\vec{u}}{dt}$ 為流體加速度向量

下標 $\perp$ 表示垂直於管軸向的分量

根據 Stokes 五階波，即能計算整個波浪場任意位置於任意時間的流體速度 $\vec{u}$ 與加速度 $\vec{a}$ ，再代回莫理森方程式求解出基樁波浪負荷時序。

我們所應用的莫理森方程式求解程式，是由 CR 所開發的 HydroCRest，該程式透過給予波高、週期、水深、流速以及圓柱的高度和直徑等參數，可以得到一個波浪週期中每個時間的波高和受力，按照式(1)將一個週期中最大的受力 $F_{max}$ 除以最大的波高的一半(即為 $\frac{H}{2}$ )，得到單位波高的受力 $F_{unit}$ ，同時也是本文中比較的基礎。

### IV. 黏性流 RANS 方法

除了利用以莫理森方程式所撰寫的程式 HydroCRest 來進行波浪經過一圓柱受力的求解之外，我們也透過黏性流(RANS)進行計算，本計算是透過商用計算流體軟體 STAR-CCM+來進行黏性流的計算，雖然相比於使用莫理森方程式的程式需要花費較長的計算時間，但更為接近真實物理情況。

在黏性流 RANS 計算中，欲得到式(1)所定義的單位波高受力 $F_{unit}$ ，我們透過兩組計算來獲得。對於每個波浪條件的個案，第一種模式為計算域中無擺放圓柱，給予波浪條件後輸出位於圓柱中心與水線交點，即為(0,0,0)的波高時序圖；第二種模式為放入圓柱後，給予相同的波浪條件後輸出圓柱受力的時序圖，將所獲得的受力除

以第一種模式所得結果的相對應波高則可以獲得 $F_{unit}$ 。下方章節 A 和 B 將會依序介紹在 STAR-CCM+ 中對於計算域的設定以及網格配置的邏輯。

#### A. 計算域大小設定及邊界條件設定

由於模型分析個案含有六種波浪條件，每種波浪條件皆有不同的波長，為了避免因波長不同卻受到計算域限制而無法消散，因此計算域大小是以波長作為設定基礎。

圖 2 為在計算軟體 STAR-CCM+ 中設定的計算域示意圖，X 方向為波浪傳遞方向，Y 方向為垂直波浪傳遞方向，Z 方向則為波高方向，由於此分析模型對稱 X-Z 平面，為了節省計算時間，因此僅計算一半模型，並以對稱顯示結果。計算域在 Y 方向長度為 4 倍圓柱直徑，亦即 0.64 公尺，X 方向長度則為 3 個波長長度，並且圓柱前為 1 個波長，圓柱後為兩個波長，圓柱中心位置與水線交點定為(0,0,0)。圖 3 為邊界條件設定，圓柱前方設定速度入流(Velocity inlet)，波浪將以此方向進入，圓柱本身設定為非滑移邊界條件(no-slip wall)，最末端以及上端天空設定為壓力出口(Pressure outlet)，模型下端土壤地面設為滑移邊界條件(Slip wall)，計算域兩側則設為對稱面(Symmetry)。在計算模型的末端設定壓力出口(Pressure outlet)之外，為了防止波浪的消散不完全，進而造成向前堆疊誤差，必須在後方設定減幅區(亦即 Damping zone 或稱 Numerical beach)，在 STAR-CCM+ 中在後方給予一個波長的減幅區。

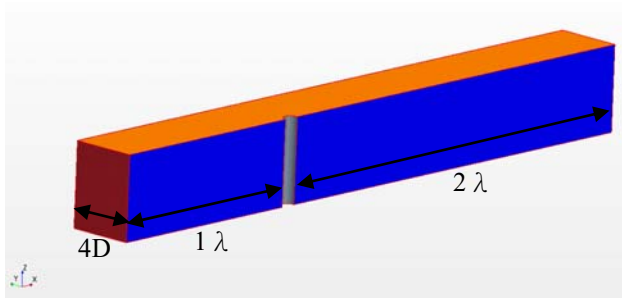


圖 2 計算域設定示意圖

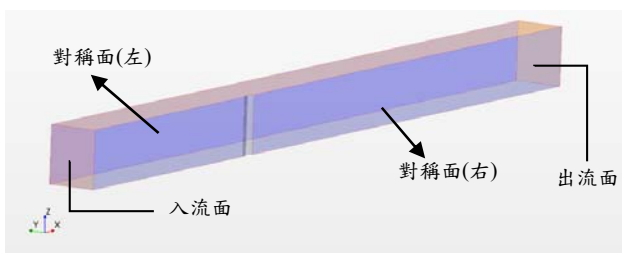
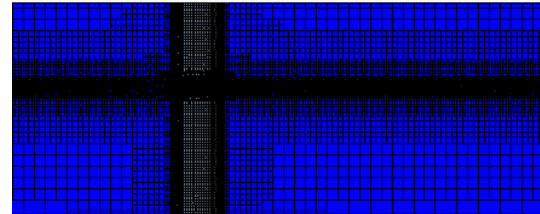


圖 3 邊界條件設定

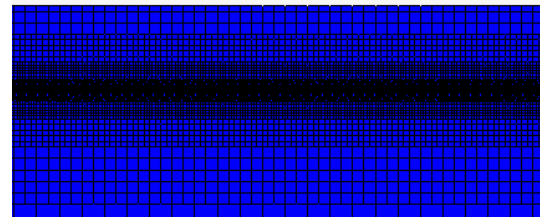
#### B. 網格配置邏輯

由於本文風機塔座的水動力學分析著重在波浪的效應，所以將網格在水線附近進行加密，且由於 Stokes 五階波的特性為波谷較緩但波峰較陡，加密區範圍的設定在波谷為振幅的 1 倍，在波峰則為振幅的 1.2 到 1.5 倍。加密區的網格設定在 Y 方向為圓柱半徑的十分之一、z 方向為波高的十分之一，但由於 Wave3 和 6 的波高較

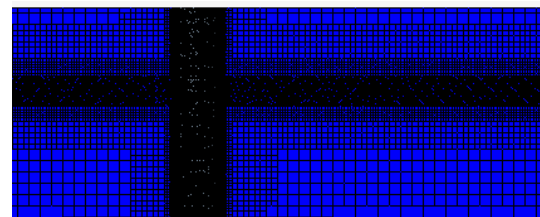
大，在 z 方向為波高的二十分之一，而在 x 方向則維持與其他兩個方向的網格長度不超過 1:4，來避免因為網格過長或過扁導致波浪消散的問題。因網格在波高方向較為敏感，圖 4 分別表示 Wave1 至 Wave3 網格配置圖來表示波高影響而加密網格，至於 Wave4 至 Wave6 則是 Wave1 至 Wave3 不同週期的變化，其網格配置邏輯與 Wave1 至 Wave3 相同。



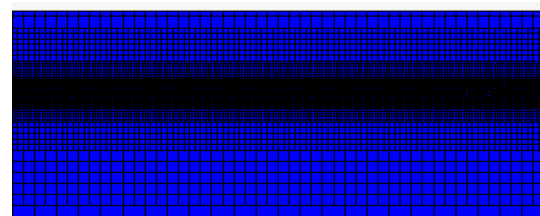
Wave1 有基樁網格配置圖



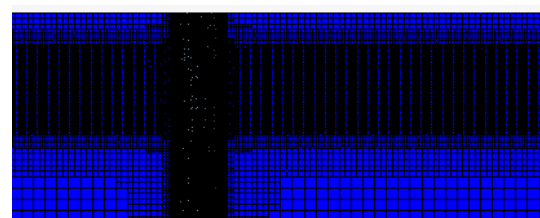
Wave1 無基樁網格配置圖



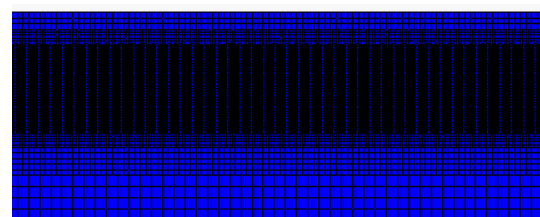
Wave2 有基樁網格配置圖



Wave2 無基樁網格配置圖



Wave3 有基樁網格配置圖



Wave3 無基樁網格配置圖

圖 4 不同波浪的計算網格配置圖

### V. 分析結果

我們在此以 wave2 為代表，說明如何由莫理森方程式方法的計算結果求得  $F_{unit}$ ，圖 5 為一週期之波高變化時序圖，求取其最高點的值为 0.026m，圖 6 為一週期圓柱受力時序圖，其最高點值为 8.738N，因此可得  $F_{unit}$  為 328.56N/m。我們將依照此程序所求得 Wave1 至 Wave6 的結果列於表 3。

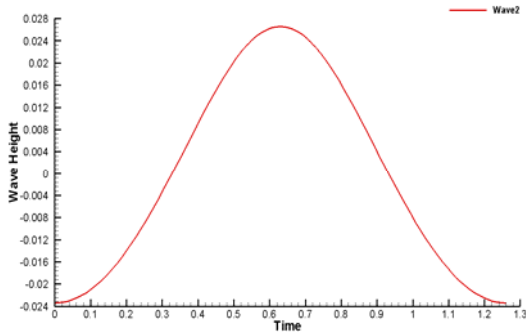


圖 5 莫理森方程式波高變化時序圖

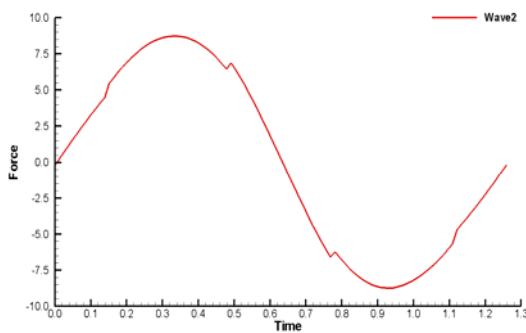


圖 6 莫理森方程式圓柱受力時序圖

表 3 莫理森方程式計算所得之單位波高受力

	$F_{max}$ (N)	$\frac{H}{2}$ (m)	$F_{unit}$ (N/m)
Wave1	4.374	0.013	339.148
Wave2	8.738	0.026	328.558
Wave3	40.804	0.126	323.371
Wave4	3.294	0.013	250.818
Wave5	6.673	0.027	242.460
Wave6	37.534	0.136	275.135

同樣也以 Wave2 為例，說明如何由 RANS 計算結果求得  $F_{unit}$ 。為避免前面尚未完全收斂穩定，我們以計算所得之第四個週期作為取值的週期，圖 7 為 RANS 輸出之波高變化時序圖，求取第四個週期最高點的值为 0.027m，圖 8 則為輸出圓柱受力時序圖，第四週期最高點值为 8.784N，因此可得  $F_{unit}$  為 319.429N/m，Wave1 至 Wave6 結果整合於表 4。圖 9 為 RANS 方法計算所得 Wave6 造成之波浪變化時序中的擷取圖，可以大致看出 Wave6 經過風機塔做的波浪變化。

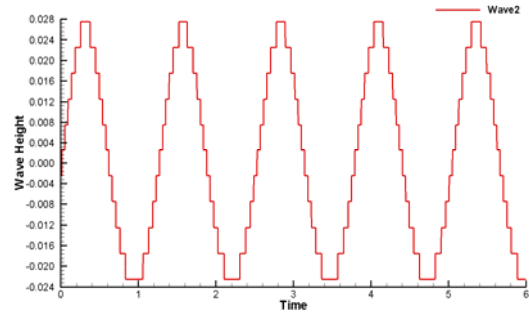


圖 7 RANS 波高變化時序圖

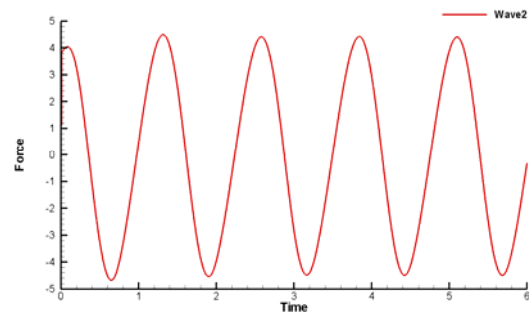


圖 8 RANS 圓柱受力時序圖

表 4 RANS 方法計算所得之單位波高受力

	$F_{max}$ (N)	$\frac{H}{2}$ (m)	$F_{unit}$ (N/m)
Wave1	4.365	0.013	317.512
Wave2	8.784	0.027	319.429
Wave3	39.529	0.135	292.811
Wave4	3.518	0.013	255.874
Wave5	7.271	0.027	264.435
Wave6	40.620	0.145	280.140

表 5 莫理森方程式與 RANS 方法計算所得單位波高受力的差異值

	Morison	RANS	Diff.
Wave1	339.148	317.512	-6.38%
Wave2	328.558	319.429	-2.78%
Wave3	323.371	292.811	-9.45%
Wave4	250.818	255.874	2.02%
Wave5	242.460	264.435	9.06%
Wave6	275.135	280.140	1.82%

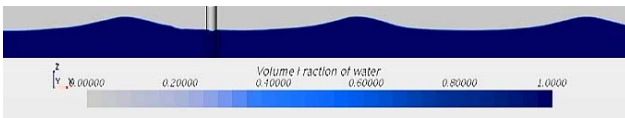
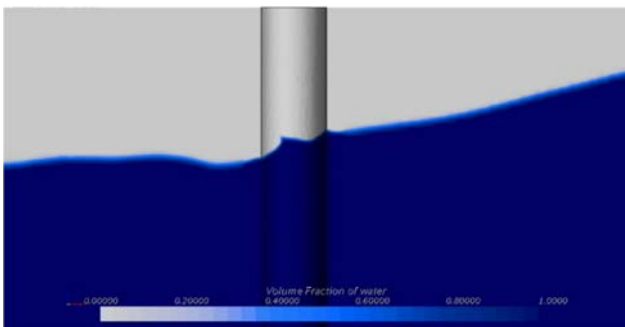
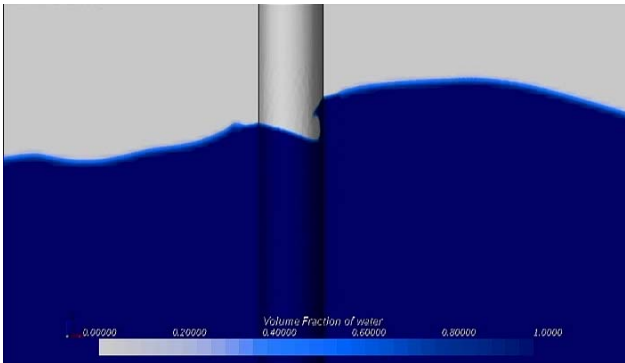
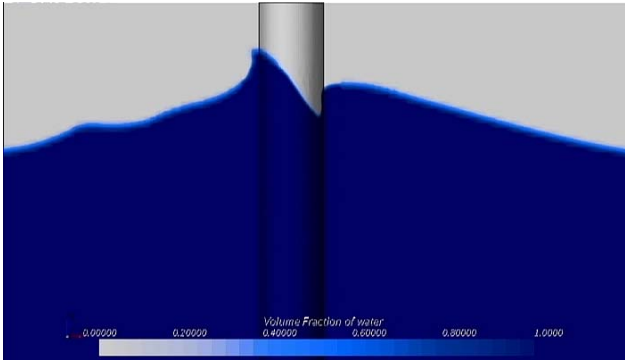
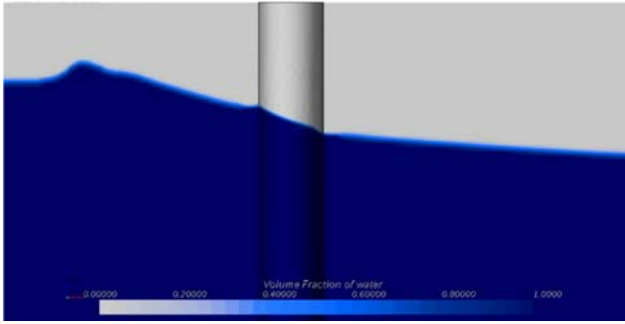


圖 9 RANS 方法計算所得 Wave 6 造成之波浪變化時序的擷取圖

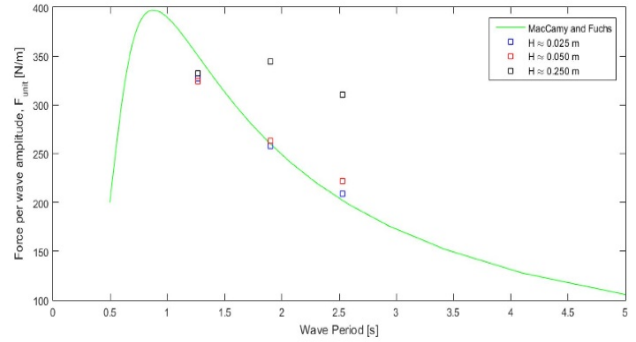


圖 10 參考文獻[1]之計算結果

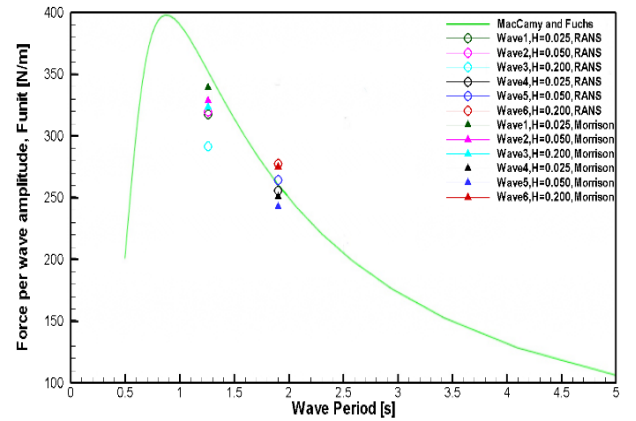


圖 11 本研究莫理森方程式與 RANS 方法計算所得單位波高受力結果之比較

綜合莫理森方程式方法和黏性流的計算方法 RANS，兩者結果列於表 5 中，其中誤差(Diff.)的計算是以莫理森方程式作為基準。我們引用參考文獻[1]之計算結果(圖 10)進行比較，圖 10 中綠線為 MacCamy and Fuchs 理論所得結果，方形記號為其作者以 CFD 計算結果。圖 11 為將本研究莫理森方程式與 RANS 方法計算結果之比較，其中綠線仍為 MacCamy and Fuchs 理論所得結果，空心圓形記號分別為 Wave1 至 Wave6 以 RANS 計算之結果，實心的三角形記號則為 Wave1 至 Wave6 以莫理森方程式計算結果，可以看出兩種方法的計算結果在週期變化時展現的趨勢差異不大，在週期增加時單位波高受力( $F_{unit}$ )會下降，然而由於 MacCamy and Fuchs 的理論建立於繞射理論中，適用於尺度較大的模型，並且在波浪的假設為線性波理論，此假設將波以餘弦波來進行計算，適用在波高較小的情況中，因此除了本研究所分析的尺度較小之外，同時也分析了較高的波高情況，因此分析結果與 MacCamy and Fuchs 理論的結果有差距是合理的，但因為不確定其中影響的程度範圍，因此仍然將理論結果與計算結果繪於同張圖中比較。圖 12 為 Wave 1 至 Wave 6 在最大受力時，基座所受的壓力等高線圖。

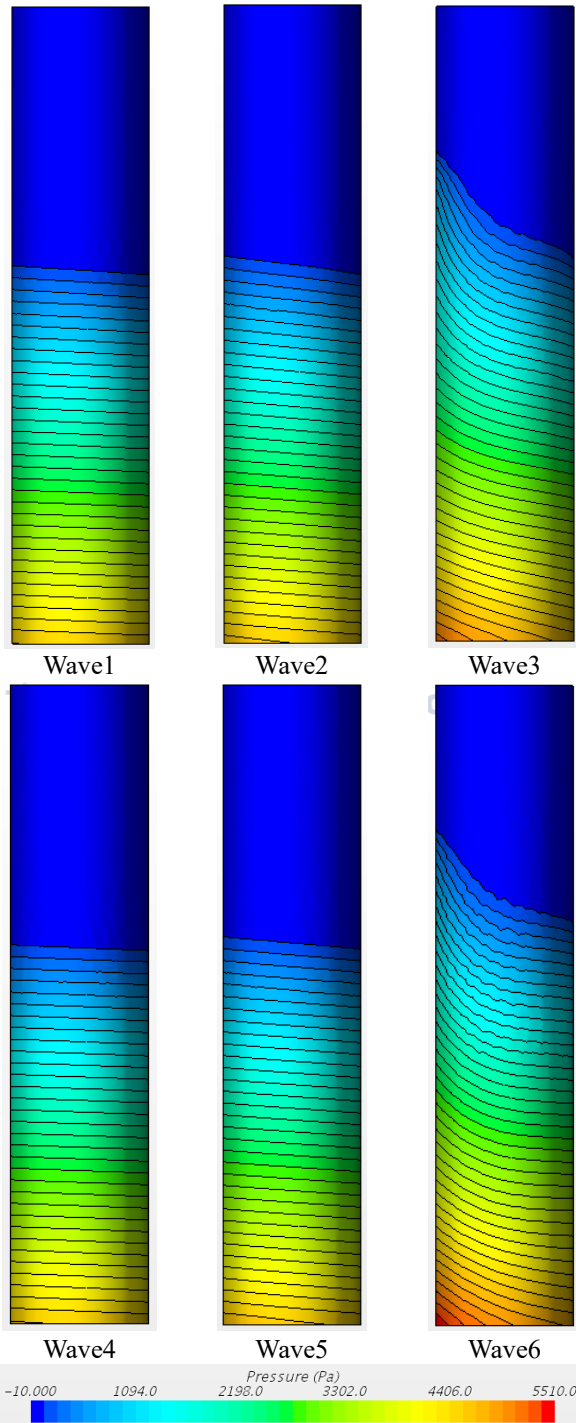


圖 12 不同波浪在最大受力時，基座所受的壓力等高線圖

## VI. 結論

在本文中分別透過莫理森方程式以及黏性流 RANS 方式進行分析圓柱受到六種不同波浪條件後的受力情形分析與比較，並且與文獻相互比對，可以得到下列結論：

- 波高和單位波高受力( $F_{unit}$ )並未有絕對關係
- 莫理森方程式和 RANS 計算結果皆符合文獻中的理論解，當週期越大時單位波高受力( $F_{unit}$ )會隨之下降

在未來的研究中，我們將精進黏性流的計算，在波高方向增加網格，更準確得到波高時序圖，同時，進行更長週期在波高為 0.025、0.05 及 0.2 公尺波浪的計算，必以單一基座計算的經驗，進行多於一個樁柱的受力計算與分析。

## VII. 誌謝

本論文為科技部計畫編號 MOST107-3113-E-002-010 之計畫，由於科技部的支持，使本計畫得以順利進行，特此致上感謝之意。

## 參考文獻

- [1] Michael Nygaard, "Hydrodynamic forces on monopoles with secondary structures," Aalborg University Civil and Structural Engineering Master Thesis, June 2016
- [2] Zhou Jing, "Numerical Simulation and Experimental Study on Hydrodynamic Characteristic of Offshore Wind Turbine System." Harbin Engineering University, March 2012
- [3] DeAnna M. Sewell, "Wave Loads on Multi-Member Offshore Wind Turbine Sub-Structures" Faculty of the University of Delaware, 2012
- [4] Taufik Roni Sahroni, "Modeling and Simulation of Offshore Wind Power Platform for 5MW Baseline NREL Turbine." Bina Nusantara University, August 2015
- [5] Wenchao Zhao, Ping Cheng, Decheng Wan, "Numerical Computation of Aerodynamic Performances of NREL Offshore 5-MW Baseline Wind Turbine." Shanghai Jiao Tong University, October 2014