

應用多重網格系統建置之三維數值波浪模式及其應用

張育誠¹ 黃清哲^{2*} 林俊遠³

關鍵詞：多重網格系統、數值波浪模式、大渦模擬、等位函數法。

摘要

本研究應用多重網格系統建置三維數值波浪模式，並模擬波浪通過海上結構物之流場演變及結構物受力特性。為適切模擬黏性流體之運動，本研究求解三維時變 Navier-Stokes 方程式，搭配大渦模擬之紊流模式。模式採用等位函數法，計算波浪複雜之液面變化。在流固耦合計算上，於卡氏座標系統中沿用自主研發之流固耦合技術 (Huang 等人 [1])，計算不規則固體邊界附近之流場。為確立本模式之準確性，本研究進行數值驗證，包括三維空穴流場 (3D lid-driven cavity flow) 及孤立波通過圓柱測試等，驗證結果皆令人滿意。在確立模式準確性後，本研究探討波浪通過風機基樁後之流場分布特性及基樁受力情形。

DEVELOPMENT AND APPLICATION OF A 3-D NUMERICAL WAVE MODEL BASED ON A MULTI-BLOCK GRID SYSTEM

Yu-Cheng Chang

*Department of Hydraulic and Ocean Engineering
National Cheng Kung University
Tainan, Taiwan 701, R.O.C.*

Ching-Jer Huang

*Department of Hydraulic and Ocean Engineering
National Cheng Kung University
Tainan, Taiwan 701, R.O.C.*

*Coastal Ocean Monitoring Center
National Cheng Kung University
Tainan, Taiwan 701, R.O.C.*

Chun-Yuan Lin

*Wind Energy Technology Department
Green Energy and Environment Lab.,
Industrial Technology Research Institute
Tainan, Taiwan 711, R.O.C.*

Key Words : multi-block grid system, numerical wave model, large-eddy simulation, level set method.

ABSTRACT

In this work, a three-dimensional (3D) numerical wave model based on a multi-block grid system was developed and applied to simulate the flow and pressure fields induced by water waves propagating over offshore structures. The unsteady, 3D Navier-Stokes equations were solved to simulate the viscous flow fields. The turbulence effects were modeled by large-eddy simulation (LES). The complex free surface configuration was captured by the level set method. The solid-fluid coupling method of Huang et al. [1] was employed to

¹ 國立成功大學水利及海洋工程學系博士班研究生

² *通訊作者，國立成功大學水利及海洋工程學系教授暨近海水文中心主任

³ 工業研究院綠能與環境研究所風力發電技術研究室研究員

treat the interface between the fluid and solid boundary of irregular shape based on Cartesian grids. The proposed numerical model was applied to simulate the 3D lid-driven cavity flow and the wave fields induced by a solitary wave past a vertical circular cylinder. The good agreement between the numerical results and experimental data verifies the accuracy of the proposed 3D numerical wave model. Finally, the developed wave model was applied to simulate the wave propagation over an offshore mono-pile structure. The vortices on the lee-side of the pile could be observed in the numerical wave tank.

一、前言

海工結構物(如:離岸風機)設計時,為了在有限時間及經費內達到一定的工程目標,工程師必須先蒐集風機設置場域的海氣象資料,進而推估在佈建、運轉及維護期間,波浪對離岸風機及其支撐結構的影響和破壞可能。為達此目的,一般採用數值模式模擬不同情境下,離岸風機周圍波浪流場演變特性。國際上廣泛使用之數值模式多為套裝軟件,然而依賴國外技術儘管短期內可以快速達到目的,但對於長期發展不具前瞻,更因研究區域不同,國外技術在臺灣附近海域的應用可能受限。因此,本研究發展三維數值波浪模式,探討波浪通過三維海上結構物之波流場演變特性,部分結果將與波浪通過圓柱的結果比較,除了驗證模式的準確度外,其結果也可作為實際工程應用時的參考。

波浪運動之數值模擬發展已有一段時間,流場控制方程式之選用主要分為有無考慮黏滯性流體兩種。在沒有考慮流體黏滯性方面,Ohyama and Nadaoka [2] 應用邊界元素法求解 Laplace equation,發展二維數值波浪水槽,探討不規則波及規則波浪場變化特性。在考慮流體黏滯性方面,Dong and Huang [3] 求解時變的(unsteady) Navier-Stokes 方程式,同時考慮完整的自由液面邊界條件及無滑移固體邊界條件,以活塞式造波板造波,發展出二維數值波浪水槽,並探討流體黏滯性對波高衰減的影響。為使流場更符合實際物理現象,考慮系流效應之數值模擬,逐漸成為近年來數值模式發展之重點。系流流場的模擬主要是解 RANS 方程式(Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations),並結合系流模式(如:k-ε model)。Lin 等人 [4] 應用有限差分法求解 RANS 方程式進行系流動能消散的模擬計算,並以流體體積法(Volume of Fluid, VOF)處理自由液面,探討孤立波在斜波上溯升時其波流場演變特性。Wu 等人 [5] 應用有限元素法(Finite element algorithm)於卡氏座標系統中求解 Navier-Stokes 方程式,同時結合 arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) 法和 hybrid Cartesian immersed boundary (HCIB) 法,分別描述自由液面變化及處理固體邊界附近之流速計算,發展出二維數值水槽。並應用於模擬複雜的波浪與結構物互作用之物理問題,如流體通過圓柱、水槽自由震盪、波浪通過潛水障礙物、波浪通過潛水圓柱與波浪作用於震動物體之運動特性等。Wu [6] 進一步應用修正型(modified) VOF 結合 HCIB 法,模擬底床變動引起之自由液面變化。

近年來,除波浪於海堤結構物附近之運動特性研究外,再生能源開發(如風力發電、潮流發電等)等相關議題日益

受到重視。由於在開闊水域中,需考慮更多波浪演變特性,包括折射、繞射、渦流強度等。前述三維之物理問題,若以二維數值模式進行模擬,將無法實際反應波浪通過三維海上結構物之演變情形。Lin and Li [7] 發展三維數值水槽,採用大渦模擬(Large-Eddy Simulation, LES)系流模式,模擬波浪通過方形柱之波流場演變,並探討系流之變化特性。Wang 等人 [8] 應用有限解析法(Finite-Analytic Method, FAM)求解時變之三維 Navier-Stokes 方程式搭配標記網格式法(Marker-And-Cell method, MAC)描述自由液面變化,模擬孤立波於數值水槽前進,並計算邊界層流速,以及模擬週期波通過半無限長海堤時的繞射現象。Wu 等人 [9] 提出改良(improved) VOF 法,追蹤不同密度流體接觸面的變化,能同時應用於求解二維及三維的物理問題。三維數值模式計算之工本相當多元,有包裝成商用軟體(Commercial Code),如 FLOW 3D 或 ANSYS Fluent 等,亦或開源軟體(Open Source),如 OpenFOAM 等。其中,OpenFOAM 更是近年來眾多研究人員投入運用的工具。此外,Chen 等人 [10] 應用質點網格式法(Particle-In-Cell, PIC)求解 Navier-Stokes 方程式,其中網格式儲存物理變量(壓力、速度),再藉由質點傳遞流體屬性(質量、動量),可用來追蹤流場及自由液面的演變。Chen 等人 [10] 應用此模式探討波浪通過圓柱後之波流場演變,並與實驗數據進行比對,確立其數值模式的準確性。

數值計算中,如何準確地描述自由液面變化,將影響整體模式計算的正確性。除上述以 VOF 處理自由液面的方法,Huang 等人 [1] 應用等位函數法(Level Set Method, LSM)模擬波浪通過潛堤時之波場演變。波浪由外海傳遞至近岸時,底床及結構物的形狀多為不規則的幾何形狀,因此應用數值模式模擬波浪通過結構物之變化時,除複雜自由液面的描述外,固體邊界附近流場計算之處理亦相當重要。本研究擬於矩形網格式系統中處理複雜固體邊界,常見的處理方法有:一、Peskin [11] 所提出的沉浸邊界法(Immersed Boundary Method, IBM);二、Ye 等人 [12] 所提出之切割網格式法(cut-cell method);三、Fedkiw 等人 [13] 提出之虛擬網格式法(ghost-cell method)。切割網格式法必須裁切網格式符合固體邊界的幾何形狀,並根據網格式切割後的形狀計算流體質點通率以滿足連續方程式。裁切網格式大小不易,三維計算則將大大增加其複雜程度,喪失模式在卡氏座標系統下的計算便利性。VOF 固液共存網格式需特別處理以滿足質量守恆條件,Kim 等人 [14] 指出此項工作即為沉浸邊界法模擬流場演變正確與否的關鍵步驟。本研究將應用虛擬網格式設定固體邊界網格式,並以團隊自主開發的流固耦合新興

技術 (Huang 等人 [1]) 來耦合純水網格與虛擬固體邊界網格的計算。此法主要應用等位函數法捕捉動態或靜態的結構物邊界形狀，將完整的固體邊界條件以函數化的形式準確且快速地反應在固液交互作用等複雜流況的計算中，並修正沉浸邊界法中固液共存格網對不易守恆的缺點。

應用上述方法時，需搭配適合之網格系統進行計算，然而適切的網格系統的選取與布置將會大大影響數值疊代過程的收斂性、精確度以及計算效率，為模式建立相當重要的課題，尤其在三維計算中。為保有前述卡氏座標網格系統的優點，同時適切調節網格疏密，避免不必要的網格浪費，並兼顧方程式離散簡便、收斂穩定等問題等，因此發展出多重網格系統，又稱卡蜜拉網格系統 (Chimera grid system)。English 等人 [15] 應用卡蜜拉網格系統離散 Navier-Stokes 方程式，於同一計算域內布置多重網格系統，以適切地描述流體於局部固體邊界附近之運動特性。

本研究將綜合前述相關技術，自主研發三維數值波浪模式，模擬波浪通過三維結構物之波流場演變。本模式應用有限解析法 (FAM) 離散求解大渦模擬 (LES) 系流控制方程式。為了解析目標結構物附近詳細的流場特性，在卡氏座標系統下開發多重網格系統 (Multi-Block Grid) 技術，在結構物附近加密網格，提升整體模式之計算穩定性及收斂性。模式採用等位函數法 (LSM)，以 Eulerian 觀點描述並追蹤複雜自由液面的變化，如水體分離與結合等複雜物理現象。為適切反應實際底床變化及人工結構物幾何特性對於波流場之影響，本研究應用自主開發流固耦合新興技術 (Huang 等人 [1])，於矩形網格系統中計算流體與複雜固體邊界之流場變化。為加速三維模式的大量計算，本模式採用圖形處理器 (Graphics Processing Unit, GPU) 高速平行計算技術，達到低成本、高效率計算需求。文中並進行一系列數值模擬以驗證模式準確性，包括三維空穴黏性流場模擬、多重網格及自由表面演變測試等。在確立模式準確性後，本模式模擬不同波浪條件及基樁直徑下，波浪通過風力發電機單一基樁時的波流場及基樁受力情形。

二、研究方法

2.1 控制方程式

本研究應用多重網格系統，建置三維數值波浪模式，並應用此模式模擬波浪與三維離岸結構物之交互作用。模式求解黏性流體運動方程式，並採用大渦模擬 (Large-Eddy Simulation, LES) 之系流模式。大渦模擬之系流模式 (Leonard [16]) 主要是透過濾波函數及空間平均概念推導出大尺度渦流可經由 Navier-Stokes 方程式直接求解，主導平均流動。而相對較小尺度渦流則通過網格尺度模型，建立其與大尺度渦流的關係，以對其進行模擬，主導耗散作用。黏性流體運動方程式的張量型態可表示為：

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i + \frac{\partial (\tau_{ij})_\lambda}{\partial x_j} + \frac{\partial (\tau_{ij})_t}{\partial x_j} \quad (2)$$

式中 u_i 為流場中 x_i 方向的瞬時速度分量、 p 為流體壓力、 ρ 為流體密度、 g_i 為重力加速度、 $(\tau_{ij})_\lambda$ 為流體分子黏性應力 (molecular viscous stresses)、 $(\tau_{ij})_t$ 為次網格尺度雷諾應力 (subgrid-scale Reynolds stresses)。在次網格尺度模式 (subgrid-scale model, SGS) 中使用 Smagorinsky model [17] 來計算 $(\tau_{ij})_\lambda$ 及 $(\tau_{ij})_t$ ：

$$(\tau_{ij})_\lambda = \rho \nu \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (3)$$

$$(\tau_{ij})_t = \rho \nu_t \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (4)$$

式中 ν 與 ν_t 分別為流體運動黏滯係數及渦黏係數 (eddy viscosity)； $\nu_t = (c_s \Delta)^2 |S|$ ， c_s 為模式參數，其值須根據流場物理問題來決定，通常介於 0.1 至 0.2 間，本研究參考 Lin and Li [7]，採用 $c_s = 0.15$ ； $|S| = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$ ， $S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)$ ， $\Delta = (\Delta x_1 \cdot \Delta x_2 \cdot \Delta x_3)^{1/3}$ ，其中 Δx_i ($i = 1, 2, 3$) 為三維座標方向計算網格之大小。

2.2 數值方法

本模式於卡氏座標系統下，應用 Chen and Chen [18] 提出之有限解析法 (FAM) 離散控制方程式，並以二步投影法 (two-step projection method) (Chorin [19]) 求解壓力場及流場變化。根據二步投影法之精神，將控制方程式分為兩步階逐步求解，分別為預測式及修正式。利用有限解析法離散預測式後，可根據上一時刻計算結果求得虛擬速度。在修正式滿足連續方程式的條件下，可推導求解壓力之 Poisson's Equation。本研究採用 Jacobi and Gauss-Seidel iteration methods 疊代收斂至容許誤差後，獲得本時刻壓力值，再將其代回修正式後，即可獲得本時刻之流場速度值。如此便可根據上一時刻之速度壓力場疊代計算本時刻之速度及壓力耦合計算結果。

2.3 等位函數法

本研究模擬結構物固體邊界乃採用等位函數法 (LSM)，可於卡氏座標系統中描述矩形網格與複雜邊界之間的相對關係，此法可廣泛應用於移動界面追蹤以及影像判識邊界偵測等問題。Osher and Sethian [20] 定義網格中心至物理邊界之最短距離為等位函數 $\phi(x_i, t)$ 。依此定義可決定物體內 ($\phi < 0$) 與物體外 ($\phi > 0$) 相對於物體界面 ($\phi = 0$) 的等位函數值。倘若追蹤界面為自由液面，則等位函數於流場中隨時間演變可寫成：

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + U_i \frac{\partial \phi}{\partial x_i} = 0 \quad (5)$$

由於數值離散所造成的誤差，常使得等位函數於時間演變過程中喪失距離函數 ($|\nabla \phi| = 1$) 的特性，因此等位函數必須在不改變自由液面 ($\phi = 0$) 位置的前提下，於每個計算

時間重新佈置等位函數。Peng 等人 [21] 建議計算式 (6) 以達成此目的，過程中 $d(x_i, \tau)$ 之初始值設為等位函數，並計算至 d 不再隨 τ 而改變，此時所得 d 值即為重佈後等位函數之新值。

$$\frac{\partial d}{\partial \tau} + S(d)(|\nabla d| - 1.0) = 0 \quad (6)$$

其中， $S(d)$ 為平滑化之後的標記函數 (smoothed sign function)，定義為

$$S(d) = \frac{d}{\sqrt{d^2 + |\nabla d| \Delta^2}} \quad (7)$$

上式中， Δ 為數值網格的最小寬度， τ 為計算時間，一般選取 $\Delta \leq \Delta\tau/2$ 。經由上述之數值過程，重佈後之等位函數將滿足 $S(\varphi)(|\nabla\varphi| - 1.0) \approx 0$ 之條件，可寫作 $|\nabla\varphi| \approx 1$ 。亦即，可在不移動自由液面 ($\varphi = 0$) 位置的前提下，重新定義自由液面附近的等位函數，並使其保有距離函數的特性。詳細計算流程請參閱 Peng 等人 [21]。

2.4 流固耦合技術

以卡氏座標系統開發數值模式來解算流體運動特性，具有離散穩定、質量守恒明確、流固邊界條件給定容易等優勢。然隨該求解問題的複雜度提高，如何以矩形網格系統描述複雜流固耦合流場，正確給定流固邊界條件遂成為重要卻難以克服的問題。為此，Peskin 提出沉浸邊界法 [11-22]，在卡氏座標下處理複雜流固耦合問題。主要精神乃假設固體邊界內部存在虛擬流場，並在控制方程式中引進虛擬力，迫使流固邊界附近流速在滿足非穿透、無滑移的情況下，自然推演虛擬力。圖 1 展示流固耦合流場中，固體內部虛擬流場的流線示意圖。

然以單一 虛擬流場無法同時滿足非穿透、無滑移固體邊界條件，以及質量守恒條件，如圖 2 所示 (Kim 等人 [14])。Huang 等人 [1] 所發展的流固耦合技術於固體邊界附近同時給定固體邊界流速 (solid boundary velocity) 以及質量守恒流速 (mass-conserving velocity) 兩種邊界流速。此方法分別於流固邊界法線及切線方向上，同時滿足非穿透、無滑移的固體邊界條件，以及質量守恒條件，推導計算此二邊界流速所需之方程式。解決了前人研究中，固體邊界質量守恒無法適切滿足的情形。詳細演算流程參閱原稿 (Huang 等人 [1])。

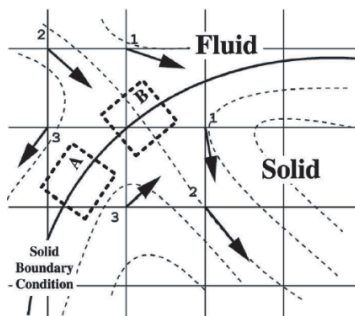


圖 1 沉浸邊界法加設固體內部存在虛擬流場之流線示意圖 (摘錄自 Huang 等人 [1])

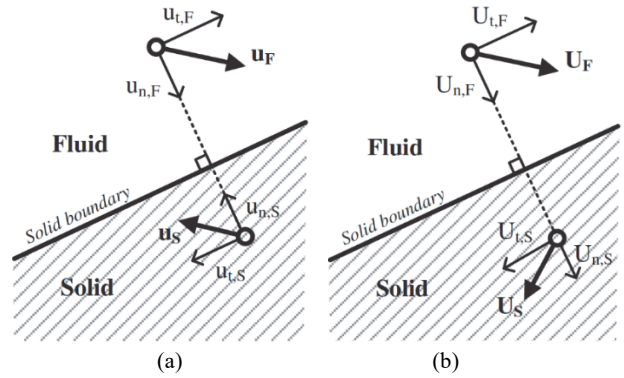


圖 2 (a) 固體內部虛擬流場滿足固體邊界條件的固體邊界流速；(b) 滿足質量守恒的質量守恒流速 (摘錄自 Huang 等人 [1])

2.5 多重網格系統

本研究採用之多重網格系統可稱作卡蜜拉網格系統 (Chimera grid system, English 等人 [15])，乃將多個網格系統重疊在同一計算域內，可在重點模擬區域任意調整網格疏密條件，以達到最佳化網格分布。計算網格根據演算方法不同，可劃分為三種計算格點，分別為：內部格點 (internal cell) 為控制方程式計算格點；重疊格點 (overlap cell) 分布於不同網格間的重疊區域，由相對較密的網格系統提供計算結果；邊界格點 (boundary cell) 則是負責不同網格系統間計算資訊的傳值。

圖 3 (左圖) 顯示藍、紅、綠三個由疏而密交疊的多重網格系統，符號點代表「邊界格點」，其顏色代表可由各對應顏色的網格系統內插獲得；圖 3 (右圖) 中陰影代表「重疊格點」，其餘以外便為「內部格點」，符號點顏色代表可由各對應顏色的網格系統內插獲得。根據上述網格的分類技術，部分網格上的物理量係經由控制方程式疊代計算求得，而有些則透過各層網格系統間計算結果進行內插傳值，直至各層待求物理量達到收斂條件，始進行下一時刻計算。本研究方法將於 3.1、3.2 節透過數值試驗以確立各物理純量及向量在各層網格系統間座標轉換後的正確性。

2.6 平行計算

由於三維數值模式的計算量龐大，本研究擬應用圖形處理器 (Graphics Processing Unit, GPU) 高速平行計算技術，並搭配單機多核 (Dual Core) 之平行計算技術 (OpenMP)，

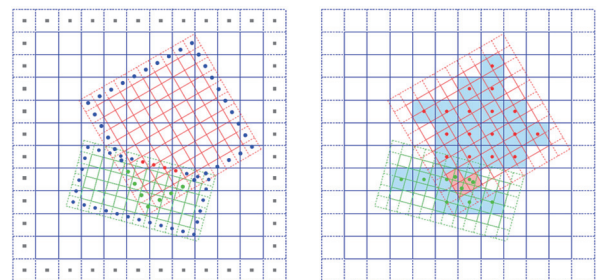


圖 3 多重網格系統示意圖 (摘錄自 English 等人 [15])

將模式建置於上述平行計算環境中，以提升整體計算效益。本研究採用之電腦硬體設備，使用之核心處理器 (CPU) 為 INTEL i7 4790 (3.3 GHz) 及圖形處理器 (GPU) 為 NVIDIA GeoForce GTX TITAN X (7.0 Gbps)。使用之計算平台軟體為 PGI Visual Fortran，搭配 Visual Studio 2013 之版本，進行編譯本模式之程式碼。

三、模式驗證

3.1 驗證黏性流場計算

為確保本模式模擬不可壓縮黏性流場之正確性，本節將三維數值水槽建置於多重網格系統中，選用經典的三維空穴流場 (lid-driven cavity flow) 數值試驗，模擬拖曳邊界造成的流場演變，並與前人研究 (Yang 等人 [23]) 結果比對，檢視模擬流場斷面流速之正確性。如圖 4(a) 所示，本數值試驗計算區域為 $1 \times 1 \times 1$ 大小，計算域除了上邊界 ($z=1$) 給定拖曳均勻流場 ($u=1$) 之外，其餘各邊界皆給定無滑移、非穿透固體邊界。圖 4(a) 所示為模擬三維空穴流場時所採用的多重網格系統，及在雷諾數 (Reynolds number, $Re = VD/\nu$) 為 100 時模式計算所得流場。第一層至第三層之計算範圍分別為 $1.0 \times 1.0 \times 1.0$ 、 $0.6 \times 0.6 \times 0.6$ 以及 $0.4 \times 0.4 \times 0.4$ ；各方向給定等間距網格，各層網格數分別為 $30 \times 30 \times 30$ 格、 $31 \times 31 \times 31$ 格以及 $37 \times 37 \times 37$ 格。另外，為確認多重網格系統間之獨立性與適用性，設定第二層及第三層有角度變化，同時也能檢視網格分類的正確性。圖 4(b) 所示為 $y=0.5$ 處之 U (x 方向) 和 W (Z 方向) 速度變化之剖面圖。圖中「+」、「-」為 Yang 等人 [23] 之模擬結果；「●」、「○」為本研究所發展之三維數值模式模擬結果。由圖 4(b) 之比對結果，可知本研究之模擬結果與 Yang 等人 [23] 的結果幾近相同，顯示本模式以多重網格系統技術模擬特定區域流場，即使各層網格系統有角度的變化，亦不影響其最後計算結果，佐證其正確性。本模式即採用此技術，可於部分區域調整網格疏密，適切地模擬大範圍波流場，以及局部小區域波浪通過結構物所造成的演變特性。

3.2 驗證等位函數演算

為確保本模式應用等位函數法追蹤流固邊界或自由表面的正確性，本節數值試驗乃測試一已知自由表面 ($\phi=0$)，在等角速度 ($\omega = 2\pi/8$) 旋轉流場內移動一段時間後的結果，如圖 5 所示。在計算初始 ($t=0$)，自由表面為一球體，球心位於 $(0.5, 0.5, 0.75)$ 座標位置，半徑為 0.15。此試驗亦採用多重網格系統進行計算，其網格配置自第一層至第三層之計算範圍分別為 $1.0 \times 1.0 \times 1.0$ 、 $0.6 \times 0.6 \times 0.6$ 以及 $0.4 \times 0.4 \times 0.4$ ；各方向給定等間距網格，各層網格數分別為 $70 \times 70 \times 70$ 格、 $60 \times 60 \times 60$ 格以及 $40 \times 40 \times 40$ 格。第一層不旋轉，第二層及第三層給定任意角度的變化。比對移動一個週期時間 ($t=8$) 後與計算初始 ($t=0$) 之自由表面形狀可知，球體表面正確地重回初始位置，顯示本數值模式解算 2.3 節等位函數方程式及重佈等位函數過程之正確性。於此同時，本研究建置之多重網格系統亦正確地引進至追蹤自由表面的計算中，方便流固耦合計算過程定義固體幾何形狀，以及水體自由表面隨時間演變的模擬計算，俾利未來本模式實際應用至波流模式，情境模擬波浪通過近岸結構物之流場演變計算。

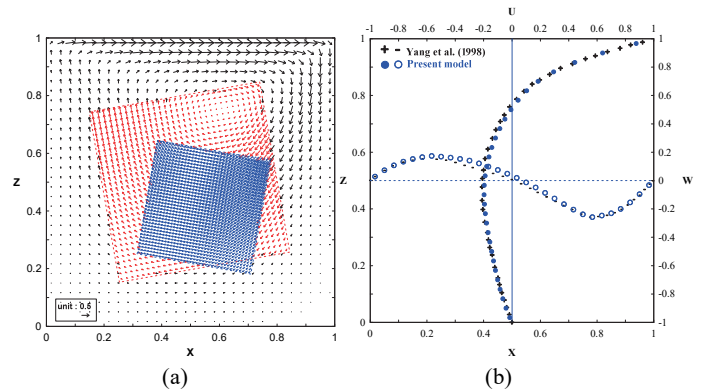


圖 4 (a) 模擬三維空穴流場時所採用的多重網格系統及模式所得流場；(b) 斷面 $y=0.5$ 處，多重網格系統計算所得流速結果

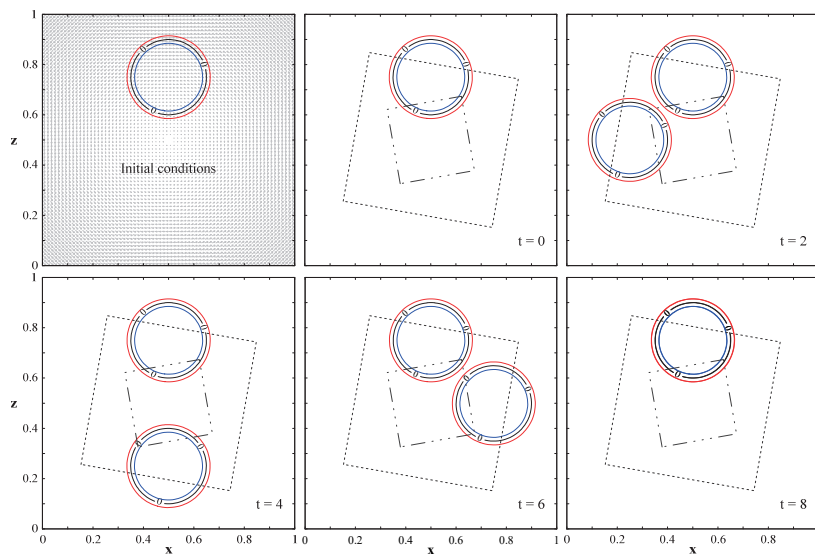


圖 5 自由表面 (球體) 在等角速度旋轉流場中移動時的變化

3.3 孤立波通過圓柱之模擬試驗

為確立本研究開發之三維數值波浪模式，能適切地模擬波浪通過結構物的流場變化特性，本節整合各項技術，模擬孤立波通過圓柱後的波流場演變情形，並與 Mo [24] 的計測資料比對，佐證各項數值技術整合後之正確性。數值模型的配置如圖 6(a) 所示，水槽寬度 (x 方向) 6.095 公尺、長度 (y 方向) 23.7 公尺。圓柱直徑為 1.219 公尺，直立於水槽中線位置，軸心位在 (x, y) = (3.0475, 15.8) 公尺處。水槽中設置有 10 支波高計以紀錄水位變化、5 台聲學都普勒測速儀 (acoustic Doppler Velocimetries, ADVs) 量測質點流速變化。水槽中之圓柱上佈有數個波壓計，其分布位置如圖 6(b) 所示。在初始波流場條件部分，水槽靜水深 (still water level) 為 0.75 公尺，孤立波之波高 (H) 為 0.3 公尺。初始波峰 (wave crest) 位於水槽上游 y = 7.9 公尺處。模式利用孤立波理論解 (Grimshaw [25]) 給予初始波形及流場，朝下游方向 (y 方向) 傳遞並通過圓柱。

此外，為分析數值方法的收斂性及計算效率，本研究曾以改變網格布置範圍、尺寸，探討模式收斂性及計算效率，得知網格系統布置最佳化，以提升整體計算效益 (Chang 等人 [26])，為節省篇幅於此不再贅述。在數值網格配置部分，為模擬全域波場演變及圓柱附近詳細的流場變化，採用三層網格系統，局部加密圓柱附近網格，網格布置如圖 7 所示。第一層網格較粗，涵蓋水槽所有計算範圍，主要模擬全域波流場變化，x 方向為 5 倍圓柱直徑、y 方向為 3 倍有效波長 (effective wave length)、z 方向為 2 倍靜水深，網格大小 Δx 、 Δy 及 Δz 皆為 0.1 公尺，分別約莫是圓柱直徑的 1/12、孤立波有效波長的 1/80、靜水深的 1/15；第二層網格較細，

分布在圓柱附近，x 及 y 方向皆約莫為 5 倍直徑範圍內，網格大小 Δx 、 Δy 及 Δz 皆為 0.07 公尺；第三層網格最細並更接近圓柱，在 x 及 y 方向分別為 3 倍及 2 倍直徑大小，網格大小 Δx 、 Δy 及 Δz 皆為 0.03 公尺，x 及 y 方向分別約莫是圓柱直徑的 1/40，z 方向靜水深的 1/25。本數值試驗所應用之多層網格系統，全計算域共用了約 120 萬個網格，在 2.6 節所述平行計算條件下，電腦模擬計算時間 (CPU time) 約 4.5 小時，計算域相關資訊列於表 1 中。

與實驗室計測資料比對部分，數值水槽分別於 G4 ~ G10 設置數值波高計，如圖 6(a) 所示，藉以擷取孤立波前進過程中，因圓柱阻礙而產生的水位時序列 (η) 變化情形。圖 8 所示為孤立波通過圓柱前後，六支數值波高計所記錄之水位時序列資料，其縱軸和橫軸分別為水位波高比 (η/H) 及無因次化時間，後者定義為 $t/\sqrt{h_0/g}$ ，式中 h_0 為靜水深，而 g 為重力加速度。由圖 8 可知當孤立波波峰通過第 4 支波高計時，設定時間為零。圖 8 中也比對本模式模擬結果與試驗室波高計計測結果及另一數值模式 Truchas 之模擬結果 (Mo [24])，圖 8 顯示三個結果相當吻合。

表 1 模擬孤立波通過直立圓柱時計算域內網格的配置與電腦模擬計算時間 (CPU time)

網格系統數目	層	網格數目			網格大小 (公尺)	網格總數	CPU time (分鐘)
		x	y	z			
3	1 st	61	237	15	0.1	1,188,304	260
	2 nd	87	79	21	0.07		
	3 rd	121	83	50	0.03		

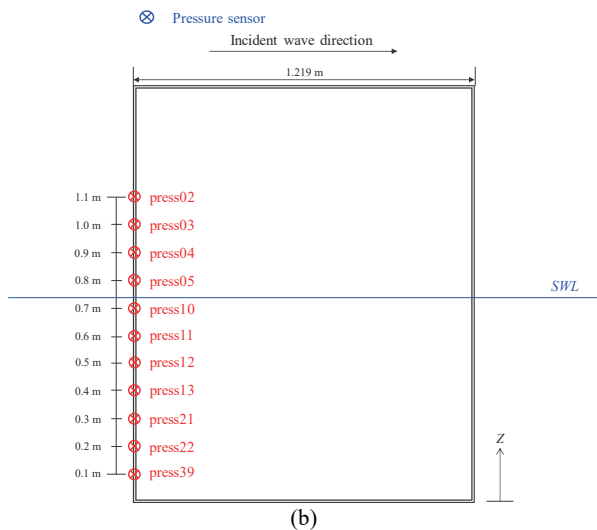
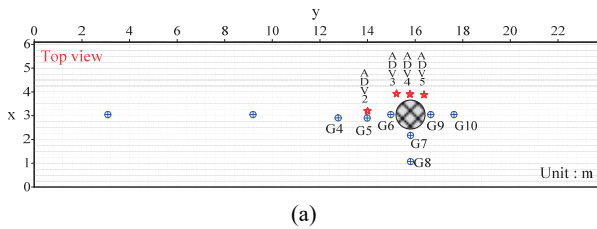


圖 6 (a) 實驗水槽配置圖(俯視圖)及 (b) 圓柱上波壓計位置示意圖 (SWL : Still Water Level) (Mo [24])

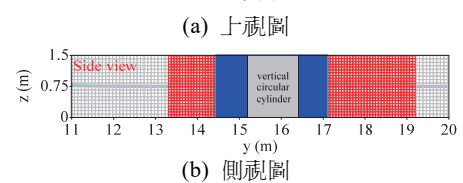
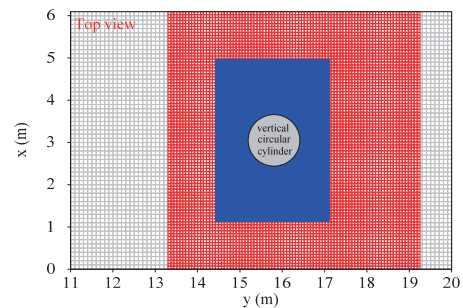


圖 7 模擬孤立波通過直立圓柱時三維數值網格配置圖

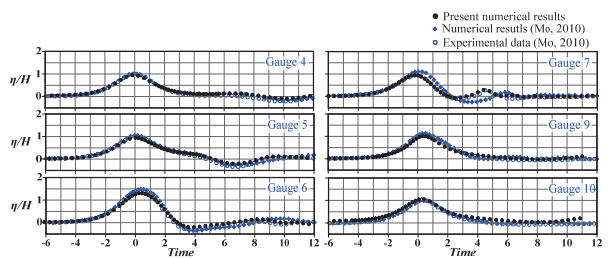


圖 8 孤立波通過直立圓柱時，本模式所得水位時序列與計測結果及另一數值模式 (Truchas) 模擬結果之比較圖

波浪前進過程中，離圓柱較遠處如 4、5 號波高計位置 (見圖 6(a))，受結構物阻礙而產生之繞射及反射影響甚小，觀察所記錄之時序列比對資料，得知本模式模擬結果與量測結果及另一數值模式模擬結果相當一致。當波浪傳遞至圓柱附近時，受波浪與結構物互作用之影響，流場及自由液面變化相對較為複雜。由圖 8 中，6、7 及 9 號波高計之水位時序列比對，可觀察到相較於另一數值模式 Truchas 之模擬結果，本研究數值模擬之結果與量測結果更為接近，能準確地捕捉到圓柱附近自由液面的變化情形。說明本研究應用多重網格系統，並於圓柱附近局部加密網格疏密程度，能更準確地模擬流場變化。

如 2.3 節所述，本研究應用等位函數法描述自由液面，是依據流場速度進行波浪液面的推算，故本數值模式能否準確地計算流體速度亦相當重要。在此，數值水槽分別於 ADV2-ADV5 質點測速儀擺放處，如圖 6(a) 所示，紀錄孤立波通過圓柱前後速度分量之時序列。圖 9 所示為孤立波通過直立圓柱時，本模式所得 ADV2-ADV5 處速度分量之時序列與量測結果及另一數值模式 (Truchas) 模擬結果之比較圖。圖 9 中縱軸有三個維度之速度分量 (U 、 V 、 W)，橫軸亦為無因次化時間。

由圖 9 可發現由於 ADV2 測速儀位置在圓柱前方，受波浪與結構物的互作用影響較小，本研究數值模擬結果與其他兩者比對都相當吻合；而 ADV3-ADV5 緊鄰圓柱，流場變化較為複雜，Truchas 之模擬結果與量測結果有明顯的落差，尤以孤立波傳遞方向 (y 方向) 的速度分量 (V) 差異相當明顯。由圖 9 可知本研究數值模擬速度分量之時序列與量測結果相當一致，尤其是本模式也能正確地計算出圓柱旁的流場速度分量。再次證明本研究採用流固耦合技術，在不規則固體邊界附近，解算流場速度之準確性良好。圖 9 中有些實驗數據明顯不合理，原作者沒有將它們排除，本中也完整呈現這些結果。

為檢視本模式計算作用於結構物上波壓的準確性，本中將比對孤立波作用於圓柱上之壓力之數值計算與量測結果。圓柱上數值波壓值之位置如圖 6(b) 所示，其編號與引

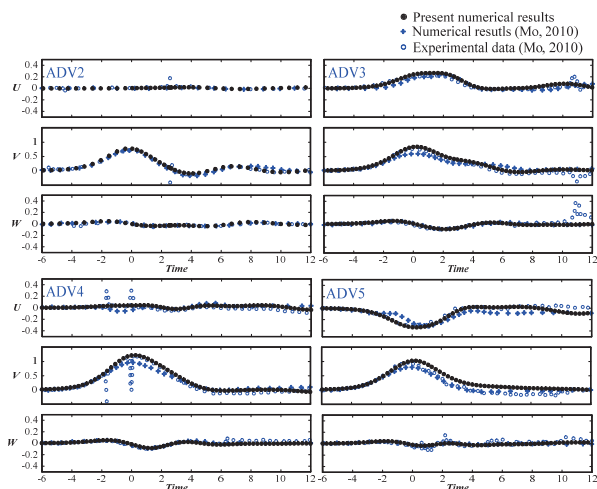


圖 9 孤立波通過直立圓柱時，本模式所得速度分量時序列與量測結果及另一數值模式 (Truchas) 模擬結果之比較圖

用文章內容 (Mo [24]) 一致。圖 10 所示為孤立波通過圓柱時，作用於圓柱上不同深度之波壓時序列的數值計算與量測結果，及另一數值模式 Truchas 模擬結果。圖中，縱軸為無因次化之動壓值 ($P/\rho gH$)，橫軸為無因次化時間。觀察圖 10，本模式所得部分結果與實驗數據有些許誤差，特別是靠近靜水位 (SWL) 的波壓計記錄落差甚大，但和數值模式 Truchas 之模擬結果卻相似。實驗室量測數據顯示 10、12 號 (press 10 和 press 12) 的波壓計量測到負壓值，顯示有某幾個波壓計沒有正常運作。由於本模式所得水位及速度分量與量測結果及數值模式 Truchas 的模擬結果相當吻合，且本模式模擬波壓結果與數值模式 Truchas 的結果相似，由此可說明相較於量測結果本模式所得波壓值較為可信。

在工程應用中，結構物受波浪作用力的影響評估非常重要，本中也模擬圓柱受力的時序列。圖 11 所示為孤立波通過圓柱時，圓柱水平受力本模式的模擬結果與量測結果和 Truchas 模式模擬結果的比較。縱軸為無因次化之水平受力值 ($F/\rho gD^3$)，橫軸為無因次化時間。由圖 11 可知，三個結果相當一致，除了孤立波所造成的最大正反方向的受力的量測值明顯不同外。如圖 10 所示，波壓量測有時出現不合理的數據，可能因此造成水平受力計算上的誤差。

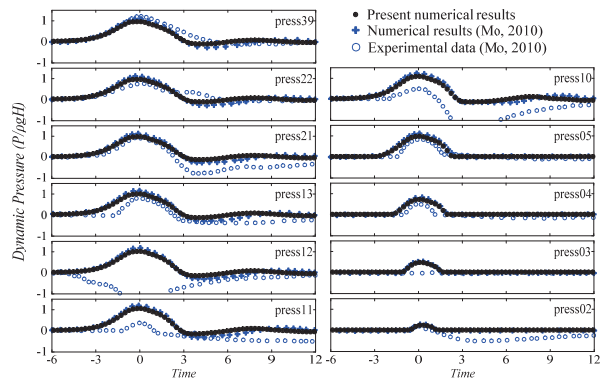


圖 10 孤立波通過直立圓柱時，本模式所得不同圓柱位置上動壓時序列與量測結果及另一數值模式 (Truchas) 模擬結果之比較圖

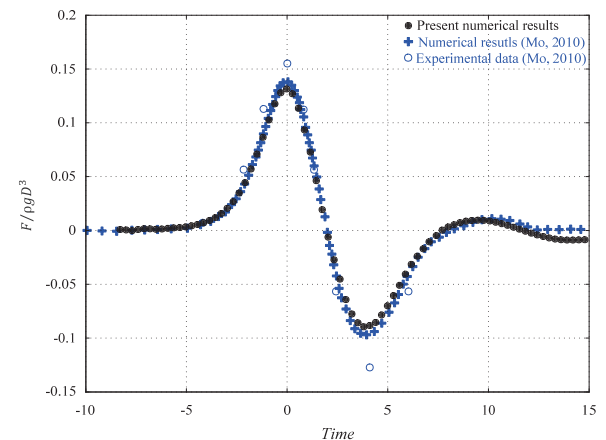


圖 11 孤立波通過直立圓柱時，本模式所得圓柱之水平受力時序列與量測結果及另一數值模式 (Truchas) 模擬結果之比較圖

總結上述模擬結果，本模式整合前述各項數值方法，包括流場替代計算、流固耦合技術、等位函數法，及多重網格系統技術等，可適切地模擬流固邊界附近的波流場變化及波浪作用於結構物之作用力。本研究即以該模式為基礎，探討波浪通過離岸風機單一基樁後之流場分布特性及基樁受力情形。

四、模式應用

近年來，離岸風電工程逐漸受重視，各國陸續於海上興建離岸風田，臺灣亦於 2019 年開始於臺灣西部海域興建風場。臺灣地處西太平洋颱風路徑之要衝，每臨夏秋之際，常遭颱風或熱帶低氣壓侵襲。颱風長浪對於海岸或海上結構物的影響甚大。因此，設計離岸風機時，須考慮颱風長浪對離岸風機的影響。工程應用上，多數探討結構物受力、基樁附近流場演變特性及基樁底部掏刷問題等。由於掏刷與結構物附近流場相關，本節將著重在基樁附近流場之演變特性與基樁受波浪作用力之影響。

為了解長浪通過基樁附近之流場演變情形，本節模擬孤立波通過離岸風機基樁，並探討其流場分布與受力特性。在波浪條件的設定上，主要是參考過去颱風期間臺灣西部海域的海象，如中央氣象局的九股浮標在 2015 年 8 月 8 日蘇迪勒颱風期間曾測得 13 公尺的波高。另大彰化西北離岸風力發電計畫，選擇彰化縣外海第 12 號潛力場址為離岸風電開發場址，該場址離岸約 50 公里，水深範圍介於 31.7 ~ 44.1 公尺（大彰化西北離岸風力發電股份有限公司籌備處 [27]）。依據上述波浪及水深條件，取情境波高 (H) 為 10 公尺，水深 (h_0) 為 50 公尺，則入射孤立波之波高水深比 (H/h_0) 為 0.2。此外，考慮相同波浪情境若發生於今年興建示範風場之彰化縣外海，水深約 15 ~ 26 公尺（經濟部能源局 [28]），則波高水深比 (H/h_0) 約為 0.4。本節數值模式所選用的孤立波條件，波高水深比 (H/h_0) 分別有 0.2、0.3 及 0.4 三種情境，其中水深 (h_0) 皆設定為 25 公尺（參考現今示範風場之位址）。

依據歐洲離岸風電產業經驗，在水深 30 公尺範圍內，一般採用單樁式基樁，加上參考彰化地區環境之研究報告，大型風機所需之基樁直徑可能達 9 公尺以上（徐和蘇 [29]）。數值模式試驗中，設定風機基樁之直徑有 6、8 及 9 公尺。將上述各案例之試驗條件、網格總數、模擬的時間間距及電腦模擬計算時間 (CPU time)，整理列於表 2 中。

數值試驗亦應用多重網格系統技術，模擬全域波場演變及基樁附近流場的變化。類似圖 7 所示的網格系統，將採用三層網格系統，局部加密圓柱附近網格。Case 1 ~ 4 數值

表 2 數值模式模擬孤立波通過風機基樁時，各案例之造波條件、網格總數、模擬的時間間距及電腦模擬計算總時間 (CPU time)

Case	基樁直徑 D (m)	靜水深 h_0 (m)	H/h_0	網格總數 (百萬)	時間間距 d_t (秒)	CPU time (分鐘)
1	8	25	0.2	390	0.016	1304
2			0.3	320	0.011	1134
3			0.4	280	0.0093	748
4	6	25	0.2	300	0.016	597
5	9		0.2	400	0.016	1392

水槽網格佈置方式相同，第一層網格系統涵蓋整體計算域 (Block 1 區域)， x 、 y 、 z 方向範圍分別為 5 倍直徑 (D)、4 倍有效波長 (WL)、2 倍水深 (h_0)；局部加密第二層網格系統 (Block 2 區域)， x 、 y 、 z 方向範圍分別為 5 倍直徑 (D)、1 倍有效波長 (WL)、2 倍水深 (h_0)；而基樁附近再局部加密第三層網格 (Block 3 區域)， x 、 y 、 z 方向範圍分別為 3 倍直徑 (D)、0.5 倍有效波長 (WL)、2 倍水深 (h_0)。僅 Case 5 之網格佈置方式較前四者不同，主要差別是第一層及第二層網格之 x 方向，其範圍設定為 4 倍直徑 (D)。上述五組數值試驗之網格大小皆一致，第一層至第三層網格大小 (Δx , Δy , Δz) 分別為 (2.0, 2.0, 2.0) 公尺、(1.0, 1.0, 1.0) 公尺及 (0.5, 0.5, 0.5) 公尺。數值試驗 Case 1 ~ Case 5 所運用之多重網格系統，全計算域網格總數分別約為 390 萬、320 萬、280 萬、300 萬及 400 萬。數值模式中，將波峰設定於 1 倍有效波長位置，給一孤立波向基樁方向傳遞；基樁位置皆設定於 x 方向正中間， y 方向則有些差異，Case 1、4、5 基樁位於 2 倍有效波長處，Case 2、3 位於 2.5 倍有效波長處。

為了解孤立波波峰通過基樁前後之時間，基樁附近設置有三支數值波高計紀錄水位變化，波高計的位置如圖 12(i) 所示；基樁前方 1 號波高計 (Gauge 1) 所紀錄的水位時序列示於圖 12(ii)，圖中 (a) ~ (f) 的時間所對應的流場示於圖 13。圖 13 所示為孤立波 ($H/h_0 = 0.2$) 通過 Case 1 的基樁，高程接近自由表面 ($z = 24.0$ 公尺) 時，基樁附近水平流場 (u, v) 隨時間的演變。孤立波通過基樁時，會有入射、反射及繞射現象，使得基樁附近之波流場變得較為複雜。在孤立波波峰通過基樁前 (圖 13(a)、圖 13(b))，其水平流速分布相對較為單純，僅波浪接觸結構物發生之反射及繞射現象。當波峰通過基樁後 (圖 13(c) ~ 圖 13(f))，於基樁後側 (波浪傳遞下游側)，可觀察到有一對渦流 (vortex) 形成，且有變強的趨勢。Sumer and Fredsøe [30] 曾探討波浪通過單一基樁時，基樁周圍流場分布的情形，其結果也顯示基樁後側有渦流生成。為了解解基樁基腳附近流場的變化，圖 14

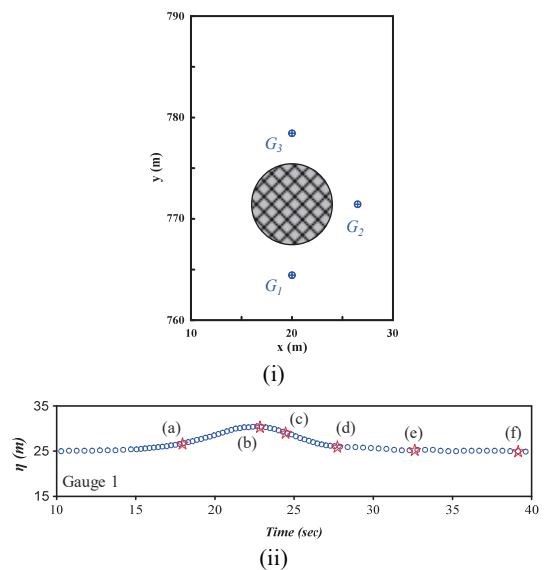


圖 12 孤立波 ($H/h_0 = 0.2$) 通過基樁之數值模擬，(i) 波高計設置位置圖；(ii) 第一支波高計所紀錄之水位時序列，(a) ~ (f) 的水位所對應的流場示於圖 11 中

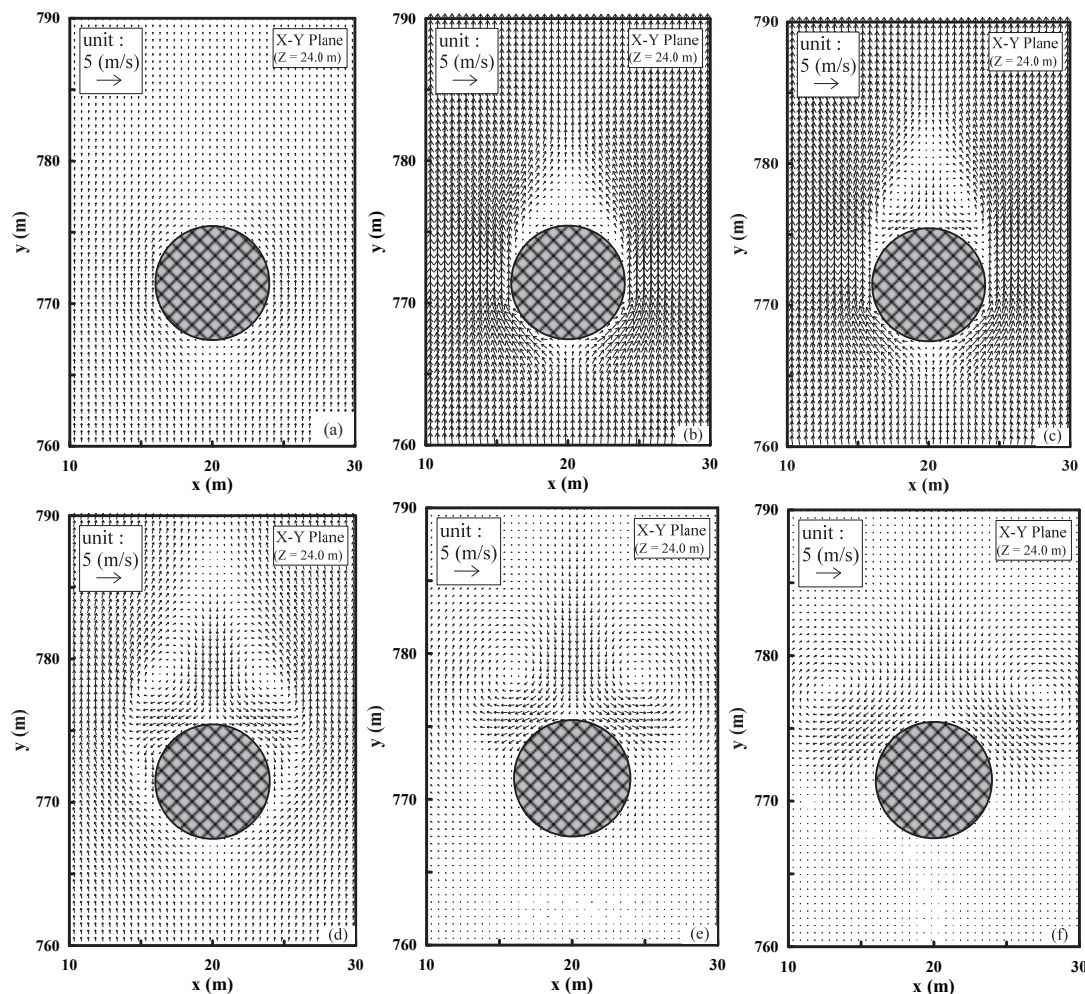


圖 13 孤立波 ($H/h_o = 0.2$) 通過 Case 1 的基樁時，數值模式所得基樁附近水平方向 ($x-y$ cross-section) 流場分布情形；圖中 (a)~(f) 的時間分別為 17.95 秒、22.84 秒、24.46 秒、27.73 秒、32.62 秒及 39.15 秒

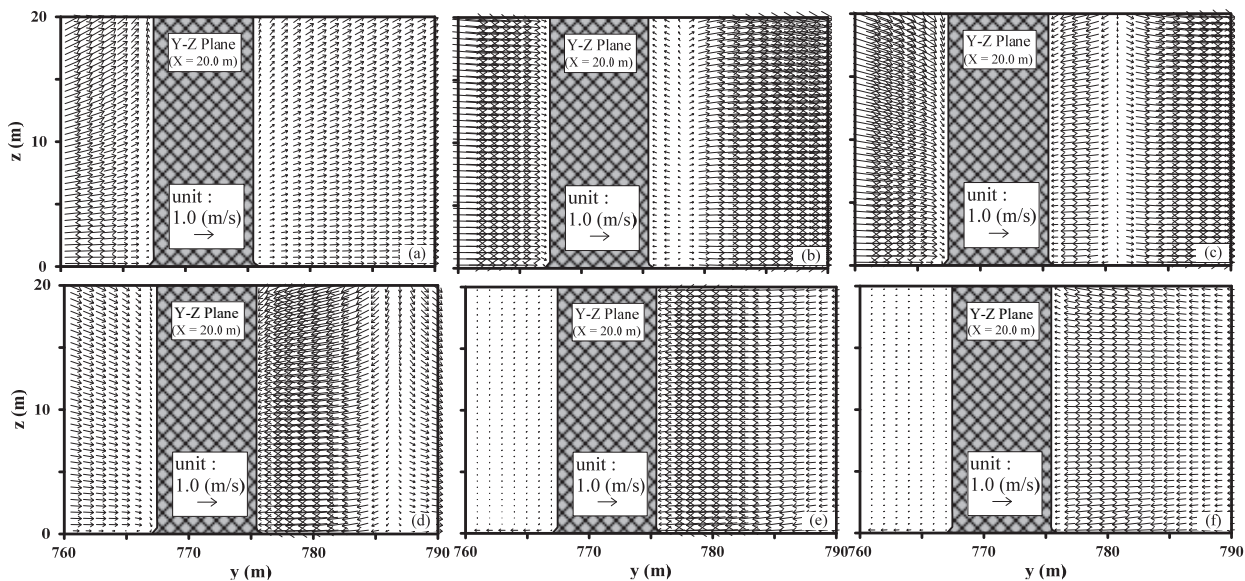


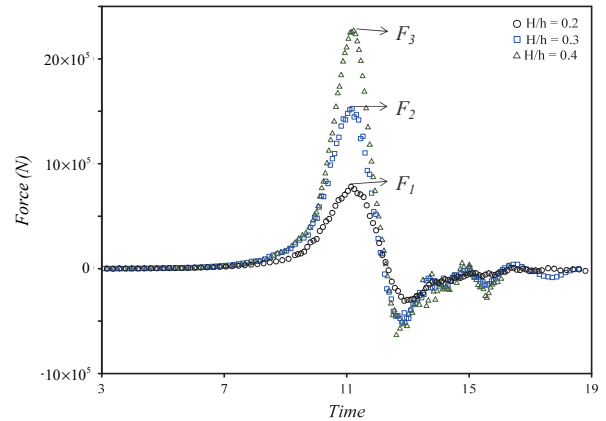
圖 14 孤立波 ($H/h_o = 0.2$) 通過 Case 1 的基樁時，數值模式所得基樁附近斷面方向 ($y-z$ cross-section) 流場分布情形；圖中 (a)~(f) 的時間分別為 17.95 秒、22.84 秒、24.46 秒、27.73 秒、32.62 秒及 39.15 秒

展示孤立波 ($H/h_0 = 0.2$) 通過 Case 1 的基樁時，基樁附近斷面流場 (v, w) 隨時間的演變情形，圖中 (a)~(f) 的時間與圖 13 相同。Sumer and Fredsøe [30] 探討流體通過基樁之流場分布情形，觀察其底部後側有回流 (adverse flow) 現象，與馬蹄形 (horseshoe) 渦流生成相關。在本研究中當波峰通過基樁後 (圖 14(c)~圖 14(f))，於基樁後側 ($763 < y < 768$; $0 < z < 1$ 公尺)，亦可觀察到一渦流生成。由此可說明，本研究發展之數值模式應用於模擬孤立波通過結構物前後，能捕捉得複雜之波流場演變特性。渦流的產生常會造成基腳掏刷 (scour)，若能藉由數值模擬了解波浪通過風機基樁時的流場變化，評估流場對於結構物穩定性的影響，進而作出最佳保護工法，將能延長風機使用壽命。

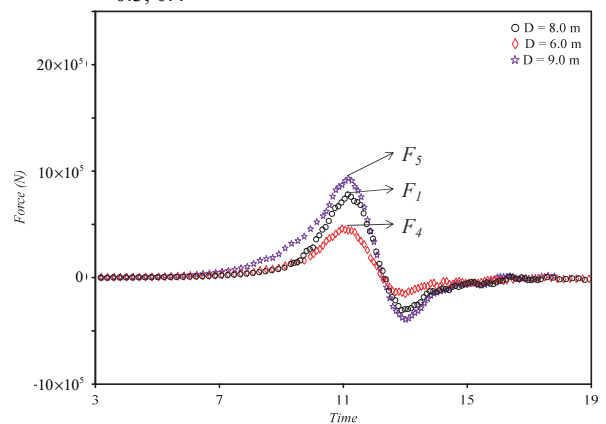
基樁受孤立波作用力之測試分為兩種類型：一、基樁直徑相同 ($D = 8$ 公尺)，改變入射波的波高為 $H/h_0 = 0.2, 0.3, 0.4$ ；二、入射波高相同 ($H/h_0 = 0.2$)，改變基樁的直徑為 6、8 及 9 公尺。本數值試驗計算基樁受力的方法如下：選取基樁周圍之網格點，將計算所得之壓力值 (Δp) 與每一網格點投影在基樁上之面積 (dA) 相乘，可得基樁上一區塊之受力值 ($\Delta F = \Delta p \cdot dA$)，最後再將每一區塊之受力值進行積分 ($F = \int_0^{h_0+\eta} \int_0^{\pi D} \Delta F \cdot dl \cdot dz$)，即可得到基樁的受力；式中 h_0 為靜水深、 η 為液面高度。圖 15 所示為利用本模式計算所得孤立波通過基樁之水平受力變化，縱軸為基樁水平受力值 Force (N)。由於不同條件下孤立波波峰通過基樁的時間點不同，為比較基樁受最大波浪作用力之差異，橫軸以無因次化時間 ($t/\sqrt{h_0/g}$) 表示。模式開始進行計算時，設定時間為零。

由圖 15(a) 可知，相同基樁直徑 ($D = 8$ 公尺) 在不同波浪條件作用下，水平受力變化差異相當大。圖 15 中，將基樁之最大受力設定為 F_i ，下標 i 表示不同計算範例，分別為 1 到 5。圖 15(a) 的結果顯示 $F_3/F_1 \cong 3$ 、 $F_2/F_1 \cong 2$ ，可知當波高水深比增加為 2 倍時，孤立波作用於基樁之最大受力增加為 3 倍，呈非線性增加。由圖 15(b) 的結果得知 $F_5/F_1 \cong 1.3$ 、 $F_1/F_4 \cong 1.8$ ，顯示當直徑愈大最大受力就愈大；此外，由 $D_5^2/D_1^2 \cong 1.3$ 、 $D_1^2/D_4^2 \cong 1.7$ ，可發現孤立波作用於不同基樁之最大受力比值與其直徑平方成正比 ($F \propto D^2$)。

如文中所述，本研究計算圓柱受力時，是將其附近網格點壓力值藉由投影面積的方式積分計算而得。然本模式之網格系統為矩形網格，網格中心點 (壓力值儲存處) 未必恰位於圓柱體上，本研究乃選取最靠近圓柱的網格點為其受壓值。當波浪通過結構物後，流場變化相對較為紊亂，基樁後側有類似馬蹄形 (horseshoe) 渦流的現象出現，使得自由液面變化亦較為複雜。V 壓力計算與流速、水位變化相關，導致模式在計算基樁受到波浪的作用力較不易，如圖 15 線條後端資料不平滑的情形。於 Mo 等人 [31] 亦可發現有類似情形，其數值計算受力結果線條並非很平滑。



(a) 基樁直徑 ($D = 8$ 公尺)，波高分別為 $H/h_0 = 0.2, 0.3, 0.4$



(b) 波高 ($H/h_0 = 0.2$)，基樁直徑 (D) 分別為 6、8、9 公尺

圖 15 孤立波 ($H/h_0 = 0.2$) 通過基樁時，數值模式所得基樁受波浪作用力的變化情形

五、結論與建議

本研究之目的為在多重網格系統下發展三維數值波浪模式，並應用於模擬波浪與三維近岸結構物之交互作用。模式整合多項數值技術，包括沿用自研的流固耦合技術 (Huang 等人 [1]) 於三維數值模式，並結合多重網格系統局部加密網格，模擬固體邊界附近複雜的流場。為加速三維模式之大量計算，有別於過去叢集電腦運算 (PC Cluster) 多機多核平行化，本模式採用圖形處理器 (GPU) 高速平行計算技術，相對於前者硬體成本較為低廉，達到低成本、高效率的計算需求。

本文首先藉由模擬三維空穴黏性流場及追蹤等位函數變化，驗證本數值模式可準確模擬黏性流場及自由界面；此外，利用模式模擬孤立波通過圓柱，並將水位、速度分量、液壓、受力時序列之計算結果與量測結果和另一數值模式 Truchas (Mo [24]) 模擬結果比對，皆獲得不錯的成果，證明本文所發展的三維波浪數值模式可準確地模擬水位、流場、及結構物受力等。於數值模式中加入了吸波邊界，並未能完全消滅波浪再次反射到計算區域，影響模擬結果。因此本研究以增加數值試驗水槽長度之方式，使孤立波通過圓柱後繼

續往水槽下游傳遞，而不會有波浪反射的現象。模擬結果則能了解長浪通過基樁後，其流場分布特性及受力情形等。最後，考慮臺灣西部海域波浪特性及水深環境，應用本模式模擬孤立波通過離岸風機基樁時所衍生的流場及基樁受力情形。數值結果顯示，基樁附近會有渦流產生，與前人研究結果相同。當波高水深比增加為 2 倍時，孤立波作用於基樁之最大受力增加為 3 倍，呈非線性增加；此外，不同基樁之最大受力比值與其直徑平方成正比。

本模式採用等位函數法捕捉波浪之自由表面變化，尤其擅於描述碎波現象之自由表面變化。雖可選取案例之波浪條件無碎波現象，無法完全呈現採用等位函數法描述波浪自由表面變化的優勢性。然若在未來的應用中，有碎波的現象發生，則本模式仍完全適用。本研究主要以孤立波進行模擬分析，未來可引進週期波或不規則波，模擬波浪與結構物之互作用，探討其流場演變特性及波壓分佈情形。

誌謝

本論文係科技部專題研究計畫 104-107 年度 (編號：104-2221-E-006-183、105-2221-E-006-132、106-2221-E-006-102) 之研究成果，承蒙科技部經費之補助使本研究得以順利完成，謹致謝忱。

參考文獻

- Huang, C. J., Lin, C. Y., and Chen, C. H., "Numerical simulations of fluid-structure interaction based on Cartesian grids with two boundary velocities," *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 79, No. 3, pp. 138-161 (2015).
- Ohyama, T. and Nadaoka, K., "Development of a numerical wave tank for analysis of nonlinear and irregular wave field," *Fluid Dynamics Research*, Vol. 8, No. 5, pp. 231-251 (1991).
- Dong, C. M. and Huang, C. J., "Generation and propagation of water waves in a two-dimensional numerical viscous wave flume," *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Vol. 130, No. 3, pp. 143-153 (2004).
- Lin, P., Chang, K. A., and Liu, P. L. F., "Runup and rundown of solitary waves on sloping beaches," *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Vol. 125, No. 5, pp. 247-255 (1999).
- Wu, C. S., Young, D. L., and Chiu, C. L., "Simulation of wave-structure interaction by hybrid Cartesian/immersed boundary and arbitrary Lagrangian-Eulerian finite-element method," *Journal of Computational Physics*, Vol. 254, pp. 155-183 (2013).
- Wu, C. S., "A modified volume-of-fluid/hybrid Cartesian immersed boundary method for simulating free-surface undulation over moving topographies," *Computers and Fluids*, Vol. 179, pp. 91-111 (2019).
- Lin, P. and Li, C. W., "Wave-current interaction with a vertical square cylinder," *Ocean Engineering*, Vol. 30, pp. 855-876 (2003).
- Wang, H. W., Huang, C. J., and Wu, J., "Simulation of a 3D Numerical Viscous Wave Tank," *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 133, No. 7, pp. 761-772 (2007).
- Wu, C. S., Young, D. L., and Wu, H. C., "Simulations of multidimensional interfacial flows by an improved volume-of-fluid method," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 60, pp. 739-755 (2013).
- Chen, Q., Zhang, J., Kelly, D. M., and Dimakopoulos, A. S., "A 3D parallel Particle-In-Cell solver for wave interaction with vertical cylinders," *Ocean Engineering*, Vol. 147, pp. 165-180 (2018).
- Peskin, C. S., "Flow patterns around heart valves: A numerical method," *Journal of Computational Physics*, Vol. 10, No. 2, pp. 252-271 (1972).
- Ye, T., Mittal, R., Udaykumar, H. S., and Shyy, W., "An accurate Cartesian grid method for viscous incompressible flows with complex immersed boundaries," *Journal of Computational Physics*, Vol. 156, No. 2, pp. 209-240 (1999).
- Fedkiw, R., Aslam, T., and Xu, S., "The ghost fluid method for deflagration and detonation discontinuities," *Journal of Computational Physics*, Vol. 154, No. 2, pp. 393-427 (1999).
- Kim, J., Kim, D., and Choi, H., "An immersed-boundary finite-volume method for simulations of flow in complex geometries," *Journal of Computational Physics*, Vol. 171, No. 1, pp. 132-150 (2001).
- English, R. E., Qiu, L., Yu, Y., and Fedkiw, R., "An adaptive discretization of incompressible flow using a multitude of moving Cartesian grids," *Journal of Computational Physics*, Vol. 254, pp. 107-154 (2013).
- Leonard, A., "Energy cascade in large-eddy simulations of turbulent fluid flows," *Advances in Geophysics*, Vol. 18, Part A, pp. 237-248 (1975).
- Smagorinsky, J., "General circulation experiments with primitive equations," *Monthly Weather Review*, Vol. 9, No. 3, pp. 99-164 (1963).
- Chen, C. J. and Chen, H. C., "The finite-analytic method," IHR Report, Iowa Institute of Hydraulic Research, The University of Iowa, Iowa City, U.S.A., 232-IV (1982).
- Chorin, A. J., "Numerical solution of the Navier-Stokes equations," *Mathematics of Computation*, Vol. 22, pp. 745-762 (1968).
- Osher, S. and Sethian, J., "Front propagation with curvature-dependent speed: Algorithms based on Hamilton-Jacobi formulations," *Journal of Computational Physics*, Vol. 79, No. 1, pp. 12-49 (1988).
- Peng, D., Merriman, B., Osher, S., Zhao, H., and Kang, M., "A PDE-based fast local level set method," *Journal of Computational Physics*, Vol. 155, No. 2, pp. 410-438 (1999).
- Mittal, R. and Iaccarino, G., "Immersed boundary methods," *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 37, pp. 239-261 (2005).
- Yang, J. Y., Yang, S. C., Chen, Y. N., and Hsu, C. A., "Implicit weighted ENO schemes for the three-dimensional incompressible Navier-Stokes equations," *Journal of Computational Physics*, Vol. 146, No. 1, pp. 464-487 (1998).
- Mo, W. H., "Numerical investigation of solitary wave interaction with group of cylinders," Ph.D. Dissertation, Department of Civil and Environmental Engineering, Cornell University, Ithaca, New York (2010).
- Grimshaw, R., "The solitary wave in water of variable depth," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 42, No. 3, pp. 639-656 (1970).
- Chang, Y. C., Huang, C. J., and Lin, C. Y., "Development

- of a 3-D Numerical Model for Simulating Interaction of Water Waves and Offshore Structures,” *Proceedings of the Twenty-seventh International Ocean and Polar Engineering Conference*, San Francisco, USA, pp. 114-119 (2017).
27. 大彰化西北離岸風力發電股份有限公司籌備處，「大彰化西北離岸風力發電計畫海岸利用管理說明書」(2019)。
28. 經濟部能源局，「離岸風電推動現況與展望」(2019)。
29. 徐偉朝、蘇曉琳，「離岸風電工程設計之實務挑戰」，*大地技師期刊*，第 18 期，第 34-43 頁 (2019)。
30. Sumer, B. M. and Fredsøe, J., “The mechanics of scour in the marine environment,” *Advanced Series on Ocean Engineering*, World Scientific, River Edge, N.J., p. 536 (2002).
31. Mo, W.H., Irschik, K., Oumeraci, H., and Liu, Philip L.F., “A 3D numerical model for computing non-breaking wave forces on slender piles,” *Journal of Engineering Mathematics*, Vol. 58, pp. 19-30 (2007).

109 年 2 月 10 日	收稿
109 年 5 月 5 日	修改
109 年 5 月 8 日	接受