

波浪通過臺灣中部海域離岸風電場址之初步探討

傅怡釗 交通部運輸研究所港灣技術研究中心助理研究員
李俊穎 交通部運輸研究所港灣技術研究中心研究員
蘇青和 交通部運輸研究所港灣技術研究中心研究員兼科長
謝佳紘 國立成功大學水工試驗所工程師

摘要

目前國內規劃之離岸風電潛力場址均集中於臺灣中部海域(臺中及彰化外海),為了解風機群設置後對局部區域海域影響,本研究先對於近年現況風、波觀測資料作局部區域海域特性探討,接著使用丹麥水利研究所開發之 MIKE 21 Spectral Waves 第三代波譜模

型暨中央氣象局提供 WRF 預報風場 (Weather Research and Forecasting), 建置適用於臺灣中部海域波浪數值推算模式,最後藉由設定具有冬季及夏季特性之波浪條件環境下,模擬臺灣中部海域設置風機群前、後之改變情形並作初步探討。

一、前言

臺灣中部海域(臺中及彰化外海)位於臺灣海峽中段位置,而臺灣海峽處於臺灣與大陸之間致使傳遞至臺灣中部海域的風、浪及流均受限於兩岸陸地限制或受中央山脈地形影響,使得波浪狀況較其他直接面對大洋之海域更為複雜。此外,自 107 年度經濟部通過審核之離岸風場多位於臺灣中部海域,本區

域海氣象資訊掌握更顯重要。

本研究著重於應用 MIKE21 Spectral Waves 風浪模式並採用中央氣象局所提供 WRF 預報風場,建置適用於臺灣中部海域波浪數值推算模組,對於離岸風機群設置後對區域海域影響作初步探討。

二、數值模式理論分析

本研究採用丹麥水力研究所 (Danish Hydraulic Institute,DHI)發展之

MIKE21 SW(MIKE 21 Spectral Wave) 第三代波譜模型，其控制方程式為波浪守恆方程式 (wave action conservation equation)，包含風生浪過程、波浪非線性交互作用、波浪折「繞射、反射和淺化及底摩擦效應等現象。控制方程式如下：

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{v}N) = \frac{S}{\sigma} \quad (1)$$

式(1)中， $N(\bar{x}, \sigma, \theta, t)$ 為波浪作用密度函數(action density)， $E(\sigma, \theta)$ 為波能頻譜密度函數 (wave energy density function)，關係為 $N=E/\sigma$ ； $\bar{x} = (x, y)$ 為卡氏坐標； t 為時間； σ 為角頻率；而 θ 則為波向角。

$\bar{v} = (c_x, c_y, c_\sigma, c_\theta)$ 為一個 4 維空間的向量，

$(c_x, c_y) = d\bar{x}/dt = \bar{c}_g + \bar{U}$ ，代表群波在空間上的傳遞速度，其中 \bar{c}_g 為群波速度，而 \bar{U} 則為海流之流速，模式可考量波浪在海流流動狀況下之傳遞情形。 $c_\sigma = d\sigma/dt$ ，代表角頻率 σ 之變化速度。 $c_\theta = d\theta/dt$ ，代表波向角 θ 之變化速度。

$$\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial \sigma, \partial/\partial \theta)$$

為一個 4 維空間的向量運算子， S 則為源項(Source term)，代表波浪傳遞過程時可能發生之波浪能量成長、消散及非線性交互作用等物理現象，表示如下：

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{surf} \quad (2)$$

(2)式中 S_{in} 為風浪之成長項， S_{nl} 為波與波非線性交互作用項， S_{ds} 為白沫消散項， S_{bot} 為底床摩擦項，而 S_{surf} 則為碎波消耗項。

三、中部海域風、波特特性探討

本研究臺灣中部海域測站選用臺中港北防波堤波流觀測站(TC)、澎湖浮標(PH)、彰濱浮標(CH3)等 3 站之海象觀測資料作風、波特特性探討，位置詳圖 1 所示。以 2016 年 1 月、7 月海象觀測資料，分析臺灣中部海域測站之冬季、夏季波高及周期、風速及風向特性。

現況特性分析結果，3 測站波高及週期趨勢相近，如圖 2 所示。在風速風向部分，冬季風向多為 NNE 方向，TC 最大風速可達 26.8 cm/s，各站平均風速為 8.07~12.62 cm/s，夏季風向多為 SSW 方向，於 2016/07/06~07/09 尼伯特颱風

期間 TC 最大風速可達 22.4 cm/s，各站平均風速為 4.12~6.56 cm/s，如圖 3 及表 1 所示。

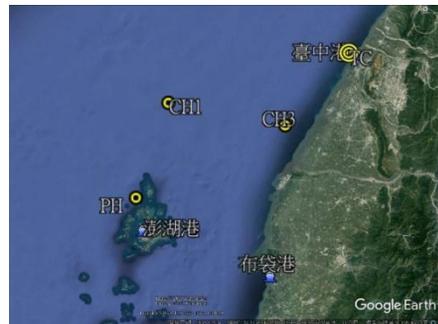


圖 1 臺灣中部海域波浪觀測位置示意圖

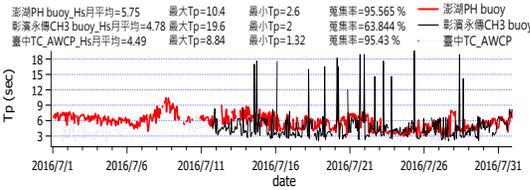
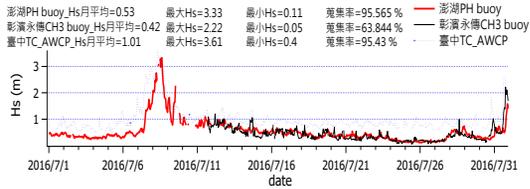
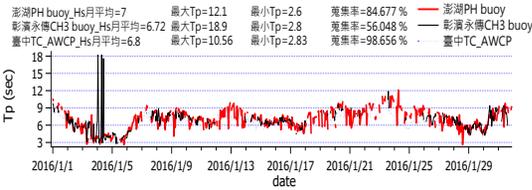


圖 2 2016 年臺灣中部海域冬、夏季波高周期歷線圖

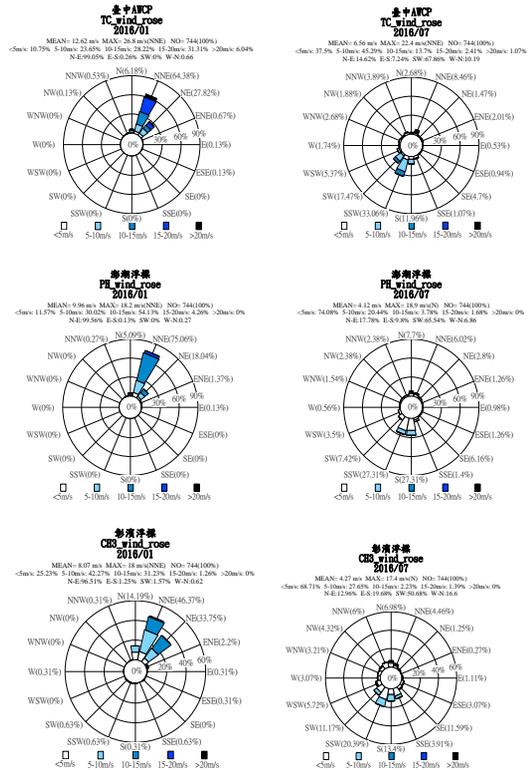


圖 3 2016 年臺灣中部海域冬季及夏季風速風向玫瑰圖

表 1 2016 年臺灣中部海域冬季及夏季風速、風向發生頻率分析表

| site | | 風速(cm/s) | | | | | 平均風速 (cm/s) | 最大風速 (cm/s) |
|----------|-----|----------|-------|-------|-------|------|----------------|----------------|
| | | <5 | 5~10 | 10~15 | 15~20 | >20 | | |
| 冬季 1月 | TC | 10.75 | 23.65 | 28.22 | 31.31 | 6.04 | 12.62 | 26.8 |
| | PH | 11.57 | 30.02 | 54.13 | 4.26 | - | 9.96 | 18.2 |
| | CH3 | 25.23 | 42.27 | 31.23 | 1.26 | - | 8.07 | 18.0 |
| 夏季 7月 | TC | 37.50 | 45.29 | 13.7 | 2.41 | 1.07 | 6.56 | 22.4 |
| | PH | 74.08 | 20.44 | 3.78 | 1.68 | - | 4.12 | 18.9 |
| | CH3 | 68.71 | 27.65 | 2.23 | 1.39 | - | 4.27 | 17.4 |

| site | | 百分比(%) | | | | | | | | | | | | | | | 最多 風向 | |
|---------|-----|--------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|-------|----------|-------|
| | | N | NNE | NE | ENE | E | ESE | SE | SSE | S | SSW | SW | WSW | W | WNW | NW | | NNW |
| 冬 1月 | TC | 6.18 | 64.38 | 27.82 | 00.67 | 00.13 | 00.13 | - | - | - | - | - | - | - | - | 00.13 | 00.53 | NNE |
| | PH | 5.09 | 75.06 | 18.04 | 1.37 | 0.13 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0.27 | NNE |
| | CH3 | 14.19 | 46.37 | 33.75 | 2.20 | 0.31 | 0.31 | 0.63 | - | 0.31 | 0.63 | 0.63 | - | 0.31 | - | - | 0.31 | NNE |
| 夏 7月 | TC | 2.68 | 8.46 | 1.47 | 2.01 | 0.53 | 0.94 | 1.07 | 4.70 | 11.96 | 33.06 | 17.47 | 5.37 | 1.74 | 2.68 | 1.88 | 3.89 | SSW |
| | PH | 7.70 | 6.02 | 2.80 | 1.26 | 0.98 | 1.26 | 1.40 | 6.16 | 27.31 | 27.31 | 7.42 | 3.50 | 0.56 | 1.54 | 2.38 | 2.38 | S.SSW |
| | CH3 | 6.98 | 4.46 | 1.25 | 0.27 | 1.11 | 3.07 | 3.91 | 11.59 | 13.40 | 20.39 | 11.17 | 5.72 | 3.07 | 3.21 | 4.32 | 6.00 | SSW |

四、數值模式建置

4.1 模型建置

本研究建構之風浪模式，水深地形由遠域到近域除了蒐集美國國家海洋暨大氣總署(NOAA)之 ETOPO5 及 ETOPO1、台灣海洋科技研究中心彙編、發布之臺灣附近海域水深地形資料 200 m 網格，以及參考海軍大氣海洋局刊行之海軍水道圖(臺中港)資料，同時針對臺中、彰化沿海及臺中港區等海域，分別蒐集水利署第三及第四河川局海域測深資料、臺中港務公司之港域測深資料等，予以數化水深資料建立非結構性三角形元素網格提供 MIKE21 SW 數值模式計算使用，如表 2 所示。

表 2 模式水深資料彙整

| 項次 | 區域範圍 | 水深資料 | 資料來源 |
|----|-------------|---------------------------------|-------------|
| 1 | 梧棲漁港 | 92 年刊行之海軍水道圖(臺中港) | 海軍大氣海洋局 |
| 2 | 臺中港域 | 106 年港域測深資料 | 臺中港務公司 |
| 3 | 臺中沿岸 | 103 年 10 月海域測深資料 | 水利署第三河川局 |
| 4 | 彰化王功沿岸 8 km | 103 年 10 月海域測深資料 | 水利署第四河川局 |
| 5 | 臺灣周圍海域 | 21-26°N, 119-123°E 200m 網格水深 | 台灣海洋科技研究中心 |
| 6 | 臺灣外海海域 | ETOPO1 | 美國國家海洋暨大氣總署 |
| 7 | 上述地區以外之模式範圍 | ETOPO5 | |

以上述資料建置本研究西太平洋波浪模擬區域非結構性網格模式，模式範圍為東經 105°至 150°、北緯 5°至 40°，共有 6,111 個節點及 10,533 個三角形元素，模式邊界網格大小約 1°；另為了有較佳數值模擬結果，針對本研究重點探討區域(臺灣中部海域) 則以局部區域、網格加密方式處理，局部區域網格大小約 0.03°，本研究模式計算範圍、網格及數值水深如圖 4、圖 5 所示。

模式風場資料使用中央氣象局 WRF 預報風場之組合風場，透過資料解碼內插後產生 45 km 網格之風(壓)場資料，輸出範圍為西太平洋北緯 0°至 35°，東經 99°至 150°，分別於每日四次 0 時、6 時、12 時及 18 時之預報中，擷取每次預報前 6 小時所組合成 1 日(24 小時)之風場資料作為模式作用力。

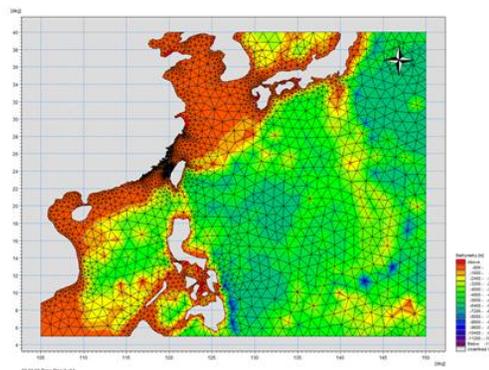


圖 4 西太平洋波浪模擬範圍、網格及數值水深圖

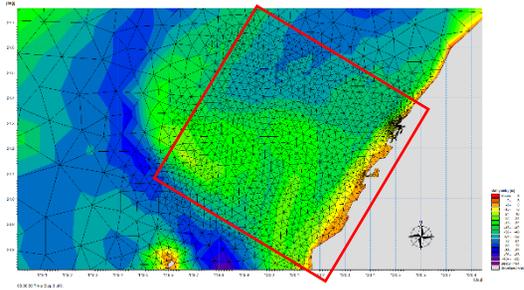


圖 5 中部海域局部區域加密網格及數值水深圖

4.2 數值模式驗證

模擬 2016 年冬季季風(1/6~2/6)、2017 年夏季季風期間(8/1~8/31)波浪，模擬結果如圖 6、圖 7 所示，季風模擬結果誤差如表 4 所示，其中 2017 年夏季季風期間彰濱浮標(CH3)無觀測資料，選用彰濱外海浮標(CH1)作驗證。

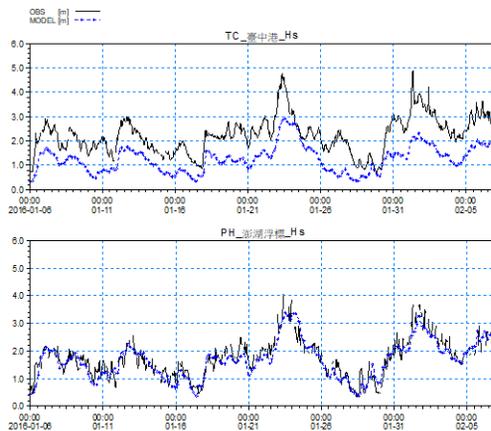


圖 6 2016 冬季季風期間波高驗證結果圖

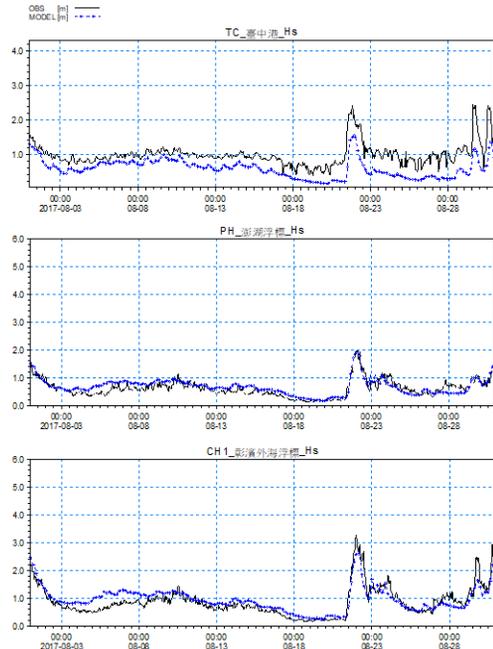


圖 7 2017 夏季季風期間波高驗證結果圖

表 4 季風期間示性波高模擬結果誤差情形表

| 年份 | 季風期間 | 測站 | 誤差值 | | | |
|------|----------------|------|---------|---------|----------|-------|
| | | | 最小值 (m) | 最大值 (m) | 平均誤差 (m) | 標準偏差 |
| 2016 | 冬季 1/6~2/6 | TC | 0.0017 | 2.691 | 0.896 | 0.416 |
| | | PH | 0.0002 | 1.258 | 0.246 | 0.216 |
| 2017 | 夏季 8/1~8/31 | TC | 0.0032 | 1.751 | 0.432 | 0.241 |
| | | PH | 0.0002 | 0.526 | 0.141 | 0.097 |
| | | CH1* | 0.0001 | 2.872 | 0.287 | 0.326 |

由季風期間波浪驗證結果，臺中港於冬季(2016)、夏季(2017) 波高模擬結果大都均小於波高觀測值但波高變化趨勢相近，其餘測站在冬季、夏季期間波高模擬尖峰值及變化趨勢大都與觀

測值相近。推究臺中港於季風期間波高模擬值較實測觀測值偏小之原因，係本模式風場資料使用 WRF 預報風場，其

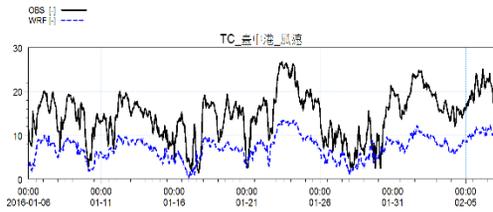


圖 8 2016 年冬季季風期間，臺中港實測風速與預報風場(WRF)風速比較情形圖

在臺中港預報風速值較實測風速偏小緣故，如圖 8、圖 9 所示。



圖 9 2017 年夏季季風期間，臺中港實測風速與預報風場(WRF)風速比較情形圖

五、情境模擬

近年發展綠能政策，經濟部於 104 年 7 月 2 日公告「離岸風力發電規劃場址申請作業要點」，公開 36 處潛力場址基本資料與既有海域資料供各顧問公司、離岸風電開發商進行相關規劃設計評估工作，再經 106 年行政院核定經濟部「風力發電 4 年推動計畫」，進一步闡明離岸風電規劃係採「示範獎勵計畫、潛力場址要點、區塊開發」三階段方式推動。爰此，經濟部於 107 年 1 月 18 日公告「離岸風力發電規劃場址容量分配作業要點」，採「先遴選、後競價」原則進行分配，4 月 30 日公開遴選結果，計有 7 家業者(10 個離岸風場)獲選，10 個離岸風場遴選容量分布區域位置如圖 10 所示，總分配容量達 3,836 MW，其中大彰化東南、大彰化西南、海龍二號、西島、彰芳、台電及中能等共 7 個離岸風場位屬本研究探討臺灣中

部海域範圍內。

為探討離岸風機群設置後對臺灣中部海域之影響，本研究先以通過遴選結果且位屬研究範圍內之 7 個離岸風電場址作情境模擬，初步探討 7 個離岸風電場址風機群設置前、後對於海域波浪影響情形。

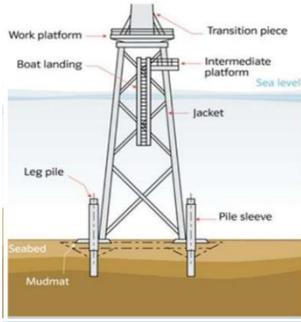


資料來源：經濟部能源局，2018

圖 10 離岸風場遴選容量分布區域

5.1 數值模式離岸風電場址配置

經參閱上述7個離岸風電場之風力發電計畫環境影響說明書後，選取各場址配置最多風機方案並依據其規劃風機群配置方案套用至模式內，此外，各離岸風場址目前規劃離岸風機下部基礎結構大都均以套筒(JACKET)形式為主，如圖 11 所示，每一風機具 4 個基樁，樁直徑約 3m 鋼管樁，分別打設於邊長約 20m 正方形頂點位置，爰本研究局部區域模式共配置 1,864 支風機群樁(466 座風機群)，風機樁位置示意圖及模擬樁數量表如圖 12 及表 5 所示。



圖片資料來源:離岸風場基礎設計關鍵技術之探討，2016

圖 11 套筒(JACKET)形式示意圖

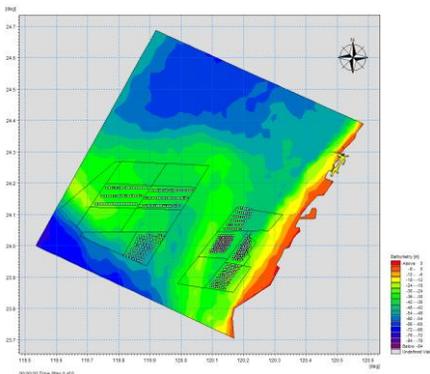


圖 12 局部區域模式內 7 場區離岸風電場址及風機群機樁位置示意圖

表 5 7 個離岸風場機樁數量彙整及機樁形式表

| 項次 | 風場名稱 | 風場編號 | 模擬風機(座) | 模擬機樁數量(支) |
|----|-------|--------|---------|-----------|
| 1 | 大彰化西南 | 14 | 80 | 320 |
| 2 | 大彰化東南 | 15 | 76 | 304 |
| 3 | 海龍二號 | 19 | 63 | 252 |
| 4 | 台電 | 26 | 50 | 200 |
| 5 | 彰芳 | 27 | 72 | 288 |
| 6 | 中能 | 29 | 72 | 288 |
| 7 | 西島 | 非屬潛力場址 | 53 | 212 |
| 合計 | | | 466 | 1864 |

5.2 季風期間風機群設置後波浪情形

本節波浪模式係以局部區域範圍、模式邊界給定單一方向波浪條件方式，模擬冬季、夏季及颱風期間風機群設置前、設置後之波浪運動情形，並計算設置前、後示性波高差異及輸出 3 段波浪空間剖面圖，以此評估風機群設置完成後對海域環境、臺中港區影響，輸出空間剖面位置如圖 13 所示。

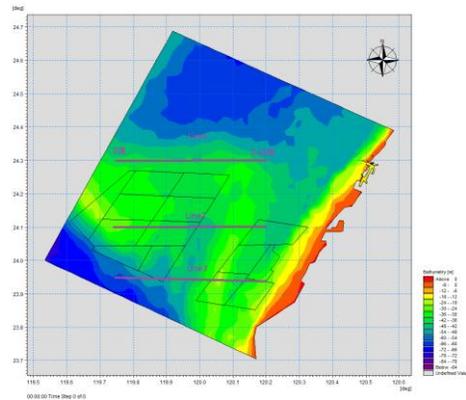


圖 13 波浪模式輸出 3 剖面波浪空間運動情形位置示意圖

5.2.1 冬季季風期間風機群設置後波浪模擬計算成果

依本中心「2016年港灣海氣象觀測資料統計年報(臺中港域觀測海氣象資料)」之歷年臺中港域主要測站示性波高週期及波向統計量統計表及波向分佈百分率表，臺中港域主要測站歷年冬季波浪統計結果為平均示性波高 2.15m、尖峰周期為 6.9sec，波向係以 NNE 為主，以此統計分析結果作為局部區域模式邊界輸入之波浪特性條件，模擬冬季季風期間波浪運動情形如圖 14 所示。

模擬 7 個離岸風電場址風機群設置後，局部區域波浪運動情形如圖 15、波高改變情形如圖 16 及 3 剖面波浪運動情形如圖 17 所示，計算風機群設置後之示性波高改變量整體平均下降 0.002 m，且由圖 16、圖 17 可知，波浪僅於風機群周圍發生改變但不明顯，波高傳遞至臺中港域時改變量近乎為 0 m，表示風機群設置後對整體海域影響範圍有限。

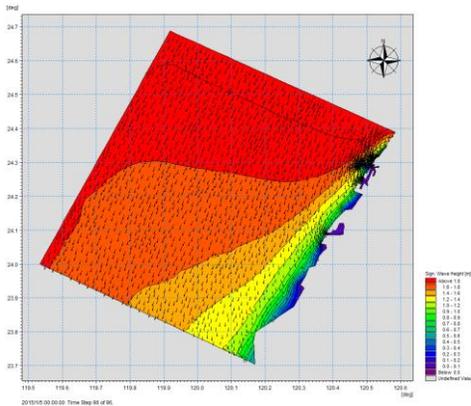


圖 14 模擬冬季季風期間局部區域波浪運動情形

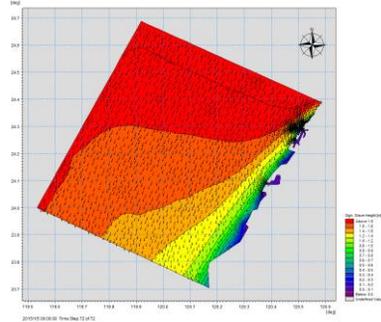


圖 15 冬季季風期間風機群設置後局部區域波浪運動情形

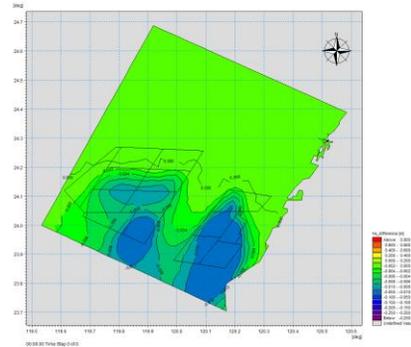


圖 16 冬季季風期間風機群設置後之示性波高改變情形

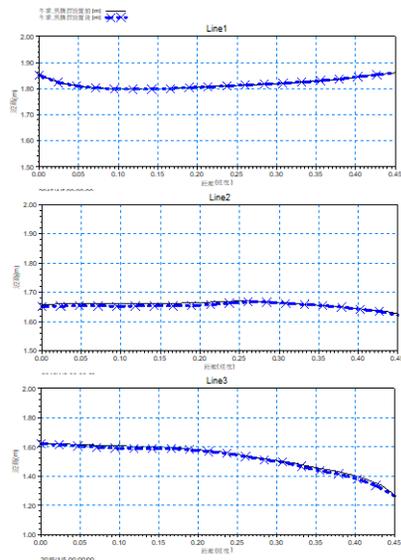


圖 17 冬季季風期間風機群設置前、後局部區域模式 3 剖面波浪空間運動情形

5.2.2 夏季風期間風機群設置後波浪情形

依本中心「2016年港灣海氣象觀測資料統計年報(臺中港域觀測海氣象資料)」之歷年臺中港域主要測站示性波高週期及波向統計量統計表及波向分佈百分率表，臺中港域主要測站歷年夏季波浪統計結果為平均示性波高 0.87m、尖峰周期為 5.7sec 及波向係以 W 為主，以此結果作為局部區域模式邊界輸入之波浪特性條件，模擬夏季季風期間波浪運動情形如圖 18 所示。

模擬 7 個離岸風電場址風機群設置後，局部區域波浪運動情形如圖 19、波高改變情形如圖 20 及 3 剖面波浪運動情形如圖 21 所示，計算風機群設置後之示性波高改變量整體平均下降 0.002 m，且由圖 20、圖 21 可知，波浪僅於風機群周圍發生改變但不明顯，波高傳遞至臺中港域時改變量近乎為 0 m，表示風機群設置後對整體海域影響範圍有限。

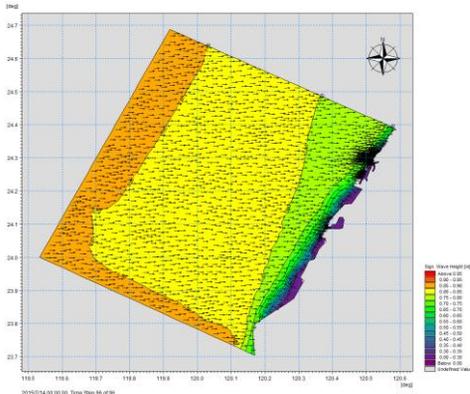


圖 18 模擬冬季季風期間局部區域波浪運動情形

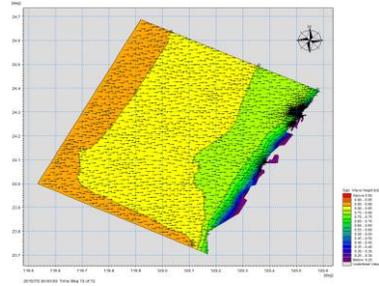


圖 19 夏季季風期間風機群設置後局部區域波浪運動情形

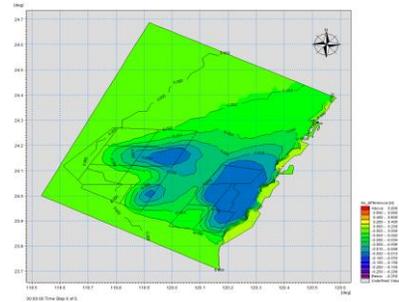


圖 20 夏季季風期間風機群設置後之示性波高改變情形

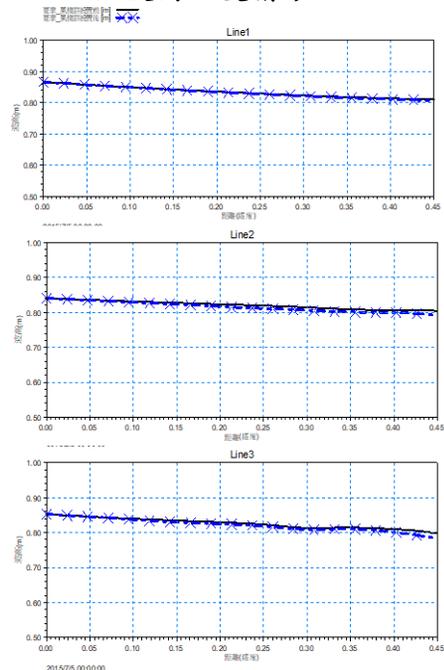


圖 21 夏季季風期間風機群設置前、後局部區域模式 3 剖面波浪空間運動情形

六、結論

經比對各測站波高觀測值可知觀測資料均有良好相關性，本研究波高模擬值較觀測值平均誤差均小於 1m、標準偏差小於 0.5，模擬波高變化趨勢與觀測波高值趨勢相近，表示本研究建置之波浪數值模式可描述臺灣中部海域波高變化特性。但由臺中港測站模擬結果均較實際觀測值小，將預報風場及實測風場繪出比較結果，反應出 WRF 預報風場在臺中港預報風速值較實測風速偏小。此外，臺中測站因受中央山脈

影響或其近內陸等因素均易影響預報風場準確度，後續於模擬評估作業應留意臺中港外海風速差異所導致之風浪差異。

經模擬 7 個離岸風電場址設置風機群樁後於冬季、夏季期間對整體海域影響結果可知，設置風機群後僅對海域圓柱結構體周圍有局部反射及遮蔽效應，但波浪通過後變形效應衰減，海域環境僅局部受設置風機群影響。

參考文獻

1. 許朝敏、林銘崇、楊文榮、曾瓊蓉 (2010)「波浪通過離岸風田之變形研究」，第 32 屆海洋工程研討會論文集，第 375-456 頁。
2. 劉勁成、張憲國(2012)「輸入逐時波浪及水位對數值模擬海岸地形變遷之影響」，第 34 屆海洋工程研討會論文集，第 405-410 頁。
3. 范揚泓、陳家銘、許顯騰、周顯光、劉愛慈(2014)「波浪模擬與預測於離岸風場址之應用」，第 36 屆海洋工程研討會論文集，第 721-726 頁。
4. 張君名 (2016)「基隆外海不同點位波浪設計條件之探討」，第 38 屆水利工程研討會論文集，第 17-22 頁。
5. 張君名、錢樺 (2017)「西北太平洋颱風波浪波高推算」，第 39 屆水利工程研討會論文集，第 25-30 頁。
6. 宋芷萱(1993)颱風侵襲下東沙島海岸地形變遷之研究，私立弘光科技大學環境工程研究所碩士論文。
7. 許弘莒、蔡立宏、楊炳達、郭平巧、李孟學(2016)「臺中港鄰近海域之波流場模擬」，港灣技術季刊，第 1 卷，第 103 期，第 42-63 頁。
8. 交通部運輸研究所，2014，”臺灣主要港口附近海域混合波浪統計特性及推算模式建置研究(2/4)””，報告。
9. 交通部運輸研究所，2017，” 2016 年港灣海氣象觀測資料統計年報(臺中港域觀測海氣象資料)””，報告。
10. 大彰化西南離岸風力發電股份有限

公司籌備處(2018)，”大彰化西南離岸風力發電計畫環境影響說明書”，報告。

11. 大彰化東南離岸風力發電股份有限公司籌備處(2018)，”大彰化東南離岸風力發電計畫環境影響說明書”，報告。
12. 西島風力發電股份有限公司籌備處(2018)，”彰化西島離岸風力發電計畫環境影響說明書”，報告。
13. 彰芳風力發電股份有限公司籌備處(2018)，”彰化彰芳離岸風力發電計畫環境影響說明書”，報告。
14. 中能發電股份有限公司籌備處(2018)，”中能離岸風力發電計畫環境影響說明書”，報告。
15. 海龍二號風電股份有限公司籌備處(2018)，”海龍二號離岸風力發電計畫環境影響說明書”，報告。