

氣候變遷情境下臺中港波流場模擬

許弘莒¹ 蔡立宏² 李孟學¹ 許城榕¹
國立成功大學水工試驗所¹ 交通部運輸研究所港灣技術中心²

摘要

本研究主要應用NearCoM模式設置適用於臺中港海域的近岸波流場模式，再以臺中港實測之海流資料與浮標資料進行檢核，流場模擬結果與實測資料比對一致。最後應用IPCC AR5(2013)提出的四種氣候變遷情境(RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0、RCP8.5)進行臺中港域波流場變化情況擬模，討論氣候變遷臺中港區域波流場變化。

關鍵字：波流場、氣候變遷、NearCoM

一、前言

臺灣四周環海，航運貿易為其經濟發展之命脈，許多的貨物藉由各港灣來作運輸，港池之穩靜關係著船隻碇泊與貨物裝卸之作業安全，而港內穩靜則有賴港灣結構物作屏障保護，因此港灣結構物的安全穩定與港灣的營運密切相關。許多文獻顯示，世界各地的海象條件愈來愈嚴峻，如Allan和Komar (2001) 收集自1978至2001年美國臨太平洋西北岸地區的波浪浮標資料，發現波高以每年0.032m的速度增加。Sasaki等人(2007) 發現西北太平洋夏季月平均的波高以每年0.4m速度增加。依據中央氣象局統計資料顯示侵臺的颱風由一百年平均3.5次，於近十年(1999~2008年)增加為平均6.7次，颱風強度及路徑與現有模式預測的誤差值及誤差頻率均增加。黃(2011) 以SWAN模式建立臺灣四周海域60年(1948~2008年)的候候資料，以其資料分析極端海象發生頻率，顯示大波發生次數隨著時間越來越多。日本氣象廳的資料顯示，未來氣候變遷的影響之下，颱風的個數可能會減少，但是強度卻會增加；日本防災科學研究所進行未來颱風災害的模擬，結果顯示於颱風眼周邊的風速將增加20~30%，潮位也可能上升50公分左右(徐與王，2009)。在臺灣氣候變遷相關研究中，葉弘德(2012)發現全球溫室效應增強，氣候變遷現象風能潛勢，臺灣西部離岸未來整體風力可能因為氣候變遷影響造成東北季風減弱，趙紀翔(2012)發現由於氣候變遷下使全國水文循環系統遭到改變，臺灣因地理位置關係，洪水量增加、暴潮及海岸侵蝕等致災因子日益嚴重，上游集水區河川短促，陡坡急流及地質問題容易造

成坍塌、土石流等土砂災害。江等人(2014)針對近60年內侵襲花蓮港與蘇澳港颱風做相關統計與趨勢分析，發現只有中度颱風侵襲次數有隨著時間增加，輕度颱風與強烈颱風則沒有較明顯的增加或減少。許與黃(2012) 針對臺灣西北海域進行模擬研究，評估2020年至2039年海平面變遷量變動範圍約在4.02至11.82公分，颱風最大波高可能增加50.3%，颱風最大潮位(暴潮+天文潮)可能增加38%，Shun and Kuo (2011) 在近20年間，全球平均海平面上升速率約為每年3公釐，換算速率最大約每年1.9公釐。聯合國政府間氣候變遷專門委員會(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)集合全球頂尖氣候、海洋、經濟及各界專家，定期發表全球氣候變遷評估報告，是各國政府面對未來氣候變遷的衝擊，制定與推動相關政策的重要參考資訊。IPCC AR5(2013) 採用了一組新的情境“代表濃度途徑(Representative Concentration Pathways, RCPs)，RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0及RCP8.5表示在2100年時輻射作用力較工業化前分別增加+2.6 W/m²、+4.5 W/m²、+6.0 W/m² 及+8.5 W/m²。在二十一世紀，全球平均海平面將持續上升。在所有RCP情境，海平面上升的速度將非常可能超過觀測到的1971年至2010年的上升速率，原因是海洋暖化現象加劇，以及冰川和冰層質量的持續消失。與1986-2005年數據相比，2081-2100年全球平均海平面的上升可能落在以下範圍：RCP2.6情境為0.26-0.55公尺、RCP4.5情境為0.32-0.63公尺、RCP6.0情境為0.33-0.63公尺、RCP8.5情境則為0.45-0.82公尺，故氣候變遷的效應在21世紀仍會持續發酵，因此討論氣候變遷下的結波流場變化對於港灣的影響則本研究之目的。

二、研究方法

NearCoM模式為結合SHORECIRC擬三維近岸環流模式及SWAN(Simulating Waves Nearshore)的風浪模式，用於預測近岸及河口地區之波浪、海流、近岸流、漂沙和地形變遷的變化(Shi et al., 2012)。由於NearCoM是著重預測近岸波浪與潮流及其所引發的現象，故NearCoM系統主要是針對海岸線至水深大約10米處的近岸地區所開發的模式。最近，Shi et al. (2012) 整合SWAN波浪模式並且修改系統中的SHORECIRC模式版本，將其擴展應用至大尺度海灘系統。

最近NearCoM應用於各種沿岸系統的案例日益增加，例如河口的波流相互作用之系統、暴潮引起的沿岸溢淹、沙灘和沙丘侵蝕及潮灘過程等。在大尺度區域的應用上，潮汐、風和波浪扮演了重要的角色，而這些應用必需考慮到模式在長時間間隔 (time step) 模擬的效率及穩定性。雖然最近版本使用的CFL-free數值方法在長時間間隔應用很有效率的，但在極大的Courant數仍會引起所謂的“ADI效應”(Casulli and Cheng, 1992)。本研究預計使用的SHORECIRC模式為Dr. F.Y. Shi 所提供的新版模式，該模式使用結合有限體積及有限差分的TVD法 (Toro, 2009)。完全非線性Boussinesq模式以TVD法求解，在計算碎波與海岸線變遷問題上，已證明TVD是一個穩定及有效率的數值方法 (Shi et al., 2011a; 2011b; Tehranirad et al., 2011; Kirby et al., 2013)。使用TVD法求解Boussinesq方程及淺水方程式亦皆有很好的表現 (Tonelli and Petti, 2009; Roeber et al., 2010; Shiach and Mingham, 2009)。

2.1、SHORECIRC方程式

SHORECIRC是擬三維近岸環流模式，它是一個二維水平模式，但包含水流的垂直結構影響，Putrevu and Svendsen (1999) 將瞬時水平速度設為為紊流項 $u^{w\alpha}$ 、波浪項 u_w^α 、水深及短波平均速度項 u^α 、以及短波平均速度的垂直變化 u_1^α 所組成，如下式：

$$u_{ins}^\alpha = u^{w\alpha} + u_w^\alpha + u^\alpha + u_1^\alpha \quad (1)$$

在廣義曲線座標， $(\)^\alpha$ 代表向量的逆變分量 (contravariant component)，我們使用上標代表逆變分量，用下標代表笛卡爾分量(下同)，而水深及短波平均速度 u^α 依Lagrangian平均定義如下：

$$u^\alpha = \frac{1}{h} \overline{\int_h^\xi u_{ins}^\alpha dz} \quad (2)$$

此處 ξ 代表瞬時自由表面高程，這種分解方式不同於Haas et al. (2003) 依Eulerian觀點來分解。Lagrangian平均法假設：

$$\int_h^\eta u_1^\alpha dz = -Q_w^\alpha \quad (3)$$

上式中 Q_w^α 或 $Q_{w\alpha}$ (Cartesian expression) 是短波通量， η 是波浪平均自由表面水位。

SHORECIRC方程式在逆變形式下可寫成：

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial x_\alpha} [Ju^\alpha H] = 0 \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u^\alpha H}{\partial t} + (u^\alpha u^\beta)_{,\beta} + f^\alpha + \frac{1}{\rho} (S^{\alpha\beta})_{,\beta} + gHg^{\alpha\beta} \frac{\partial \eta}{\partial x_\beta} \\ + \frac{\tau_b^\alpha}{\rho} - \frac{\tau_s^\alpha}{\rho} - (H\tau^{\alpha\beta})_{,\beta} + ROT = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

其中 $H = h + \eta$ ， h 是靜止水深， ρ 是水的密度， f^α 是科氏力， $(\)_{,\alpha}$ 代表共變導數，而 $g^{\alpha\beta}$ 是逆變度量張量， $S^{\alpha\beta}$ 是輻射應力 (Longuet-Higgins and Stewart, 1962; 1964)，其逆變形式在Shi et al. (2003)中曾提及說明。 τ_s^α 、 τ_b^α 和 $\tau^{\alpha\beta}$ 分別為風應力、底床應力及等水深情況下的紊流剪力。

SHORECIRC方程式的守恆形式如下：

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{J} \frac{\partial JP^\alpha}{\partial \xi^\alpha} = 0 \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Hu^\alpha}{\partial t} + \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \xi^\beta} [JP^\beta u^\alpha + \frac{1}{2} g(\eta^2 + 2\eta h) JL_\alpha^\beta] + f_\alpha \\ - g\eta \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \xi^\beta} (hJL_\alpha^\beta) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \xi^\gamma} (S_{\alpha\beta} JL_\beta^\gamma) \end{aligned}$$

$$+ \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \xi^\gamma} (\tau_{\alpha\beta} JHL_\beta^\gamma) + \frac{\tau_\alpha^b}{\rho} - \frac{\tau_\alpha^s}{\rho} + ROT = 0 \quad (7)$$

其中 $P^\alpha = Hu^\alpha$ ，表示體積通量的逆變項； f_α 代表科氏力的笛卡爾項，如 $(-fHv, fHu)$ ，其中 (u, v) 代表直角坐標中的速度； $S_{\alpha\gamma}$ 代表輻射應力的笛卡爾項； τ_α^b 和 τ_α^s 是底床應力和風應力的笛卡爾項。

2.2、SWAN方程式

SWAN(Simulating Waves Nearshore)，是由荷蘭的Delft大學統合以往學者的研究並加以改良而成風浪模式 (Booij et al., 1999)，為求解波浪作用力之平衡方程式，在廣義曲線坐標下，其控制方程式如下：

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{1}{J} \frac{\partial (JC_g^\alpha)}{\partial \zeta_\alpha} + \frac{\partial (C_{g\sigma} N)}{\partial \sigma} + \frac{\partial (C_{g\theta} N)}{\partial \theta} = \frac{S}{\sigma} \quad (8)$$

其中 ζ_α 為曲線坐標，其定義與曲線型 SHORECIRC 模式相

同； σ 是相對角頻率； θ 是每個波的前進方向； C_g^α 代表能量傳遞速度的逆變項，可利用坐標轉換求得：

$$C_g^\alpha = C_{g\beta} I_\beta^\alpha \quad (9)$$

其中，在矩形直角坐標 $C_{g\beta} = (C_{gx}, C_{gy})$ ，為了使其符合環流方程式，(3.1.22)式是張量不變形式，如 Booij et al. (1997) 中擴展的數值形式。 $C_{g\sigma}$ 和 $C_{g\theta}$ 分別代表在 σ 和 θ 能量傳遞速度， S 表示波浪傳遞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之源函數， N 是波浪作用力，其定義如下：

$$N = E(\xi^\alpha, \sigma, \theta, t) / \sigma \quad (10)$$

式中 E 是波浪能量密度。至於流對波變形的影響詳述如下：

1. 群波速度(包含流的項)

$$C_{g\alpha} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right) \frac{\sigma k_\alpha}{|\mathbf{k}|^2} + u_{E\alpha} \quad (11)$$

其中 k_α 或 \mathbf{k} 代表波速， d 是短波平均下之水深，而 $d = h + \eta$ 。 $u_{E\alpha} = u_\alpha - Q_{w\alpha} / H$ 為回流項，或 Eulerian 平均速度。

2. 相對頻率的改變

$$C_\sigma = \frac{\partial \sigma}{\partial d} \left(\frac{\partial d}{\partial t} + \mathbf{u}_E \cdot \nabla d \right) - C_g \mathbf{k} \cdot \frac{\partial \mathbf{u}_E}{\partial s} \quad (12)$$

3. 流導致之波浪折射

$$C_\theta = -\frac{1}{k} \left(\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + \mathbf{k} \cdot \frac{\partial \mathbf{u}_E}{\partial m} \right) \quad (13)$$

其中 s 是在方向 θ 的空間坐標， m 是 s 的法線坐標。

2.3、模式範圍與流程

本研究模擬區域(如圖1方框所示) 由北涵蓋臺中港海域至彰濱工業區崙尾區海域，其沿岸長度約為41 公里，向離岸範圍則延伸至水深-50公尺處，長度約為15公里。圖2則為經座標轉換後之海潮流模擬範圍及地形水深分佈圖，模式領域在水平方向劃分為408×148個正方網格，每一網格之邊長為100公尺。模式開放邊界資料，採用臺灣近岸海象預報系統(TaiCOM Model) 所提供的逐時預測水位，並以調合分析取得邊界上M2、S2、N2、K1、O1、Q1、P1、K2分潮係數之用。模式水位邊界以8個分潮計算。透過資料收集所得的海氣象資料包含IPCC AR5架構下，依照代表濃度途徑情境(RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0、RCP8.5)下所推估的海氣象資料，作為NearCoM模式的輸入條件其中包含50年、100年、200年與250年迴歸週期颱風波浪及氣候變遷條件，以進行臺中港海域之波流場模擬。模式流程如圖3所示。

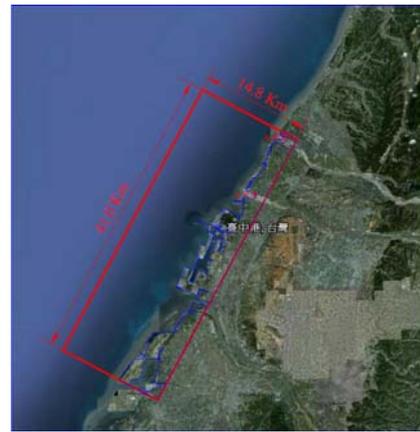


圖 1 模擬範圍

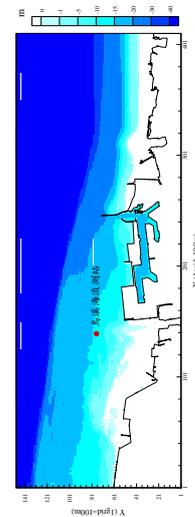


圖 2 海潮流模式模擬範圍及地形水深分佈圖

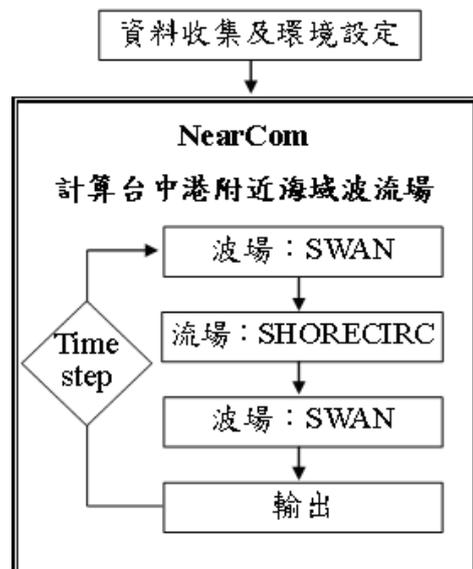


圖 3 模式流程圖

三、結果與討論

3.1、模式驗證

水動力模式之主要參數包括渦動粘性係數及底床磨擦係數，這些參數值的選取將影響模式的穩定性及計算結果的準確性。一般來說，模式使用之參數值必須經由模式之率定來決定。本研究在流場模式之率定方面，則利用設置於北防波堤堤頭外側 600m 水深 25m 處以 AWCP 儀器量測海流資料(24°18'04"N 120°28'59"E)，以及港灣技術研究中心在 2011 年於臺中港南側，烏溪 (又稱大肚溪) 外海 (24°13'6.8"N 120°25'30.3"E) 之海流測站實測海流資料來進行模式檢核與驗證。並與臺中港內 (24°17'16"N, 120°31'57"E) 及北防波堤外 AWCP 測站的水位資料進行比對，測站位置如圖 4。

流場模式計算結果，其沿岸方向之流速分量以往北為正，離岸方向流速分量則以離岸方向(往西方向)為正。模式計算結果與實測值之比較分析如下：

圖 5 與圖 6 分別為臺中港內以及北防波堤外 AWCP 的潮位及水位記錄與海潮流模式模擬結果，時間為 2011/05/14 零時起，逐時模擬比較 8 天資料。由圖中可發現此二處水位變化差異不大，模式計算結果略小於實測記錄，但大致相符。本模式開放邊界潮位資料係採用大區域模式計算所得資料，可預期會有誤差存在，但結果尚可接受。



圖 4 臺中港海象測站示意圖

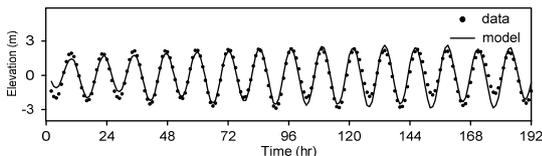


圖 5 臺中港內實測潮位與模式計算比較圖 (起始時間：2011/05/14 00:00:00)

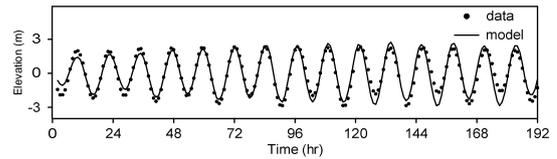


圖 6 臺中港北防波堤外(AWCP)實測水位與模式計算比較圖 (起始時間：2011/05/14 00:00:00)

SHORECIRC 模式之主要參數為底床磨擦係數與渦動粘性係數，其值將影響模式的穩定性及計算結果的準確性。本研究利用測站資料進行參數值率定，測站實測資料與模擬結果的均方根誤差 (RMSE) 如圖 7 所示，率定所得到底床磨擦係數之最佳參數為 0.0035，渦動粘性係數為 0.001。

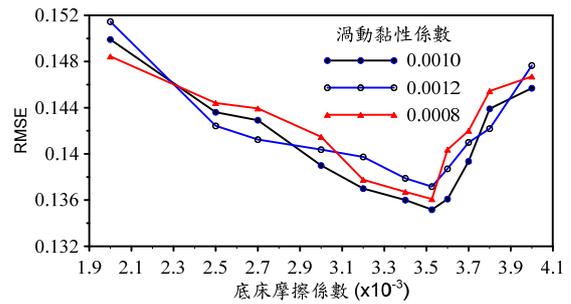


圖 7 NearCom 模式參數率定圖

3.2、氣候變遷情境下臺中港區受颱風影響之波流場模擬

氣候變遷情境下臺中港附近海域受颱風波浪作用之影響，分別取其 50、100、200 與 250 年迴歸週期之颱風波浪作為 NearCoM 模式波浪資料輸入條件，模擬之波浪條件如表 1 所示。以 IPCC AR5 報告中不同氣候變遷情境(RCP2.6、RCP4.5/RCP6.0 與 RCP8.5)下所預估 2100 年海平面上升高度如表 2 所示，作為 NearCoM 模式輸入條件。模式模擬之北防波堤各斷面處之最大示性波高如表 3。

表 1 各迴歸期之颱風波浪條件

迴歸期 波向	250		200		100		50	
	H(m)	T(s)	H(m)	T(s)	H(m)	T(s)	H(m)	T(s)
N	8.6	12.3	8.4	12.2	7.8	11.7	7.2	11.3
W	6.7	10.9	6.6	10.8	6.1	10.4	5.7	10.0
SW	5.6	9.9	5.4	9.8	5.1	9.5	4.7	9.1

表 2 四種氣候變遷情境下海平面上升高度(2081-2100 年)

RCP2.6	0.55m
RCP4.5/RCP6.0	0.63m
RCP8.5	0.82m

圖 8~圖 10 為不同波向下 50 年迴歸期颱風波浪之波流場圖，圖中示性波高值以色階表示，流速以箭頭表示。圖 8 為北向之颱風波浪，圖 9 為西向之颱風波浪，圖 10 為西南向之

颱風波浪。圖中顯示，在北向之颱風波浪作用下，北防波堤中段至堤頭附近的示性波高最大，50年迴歸期最大值約為4.3公尺。在西向之颱風波浪作用下，北防波堤最大示性波高，50年迴歸期約3.2公尺。在西南向之颱風波浪作用下，北防波堤最大示性波高1.1公尺。因此，在研究北防波堤的受力分析與安定性分析時，應以北向波浪做為主要波浪條件。另外，西向之颱風波浪於港內之示性波高較另兩個波向大，表示西向颱風波會傳遞至港內較其他波向明顯。西南向之颱風波浪作用下，臺中港北側波浪則受到北防波堤遮蔽，示性波高較小。

圖11~圖13為滿潮時不同迴歸期下北向颱風波浪之波流場圖，分別為100年、200年與250年迴歸期之颱風波浪。比較圖8 3.6與圖11~圖13可以發現北防波堤之最大波高發生位置並不會隨著起始波浪條件改變，由表3-4可發現相同結果，北向颱風波浪最大示性波高發生於斷面I的位置，西向及西南向颱風波浪最大示性波高則發生於斷面IV的位置。

整體上，50年、100年、200年及250年迴歸期北向的颱風波浪示性波高最大，滿潮時在不同的氣候變遷情境下，臺中港北堤北側波高皆有增加的趨勢，故臺中港北堤的受力將有可能增加。因此，北向的颱風波對於北堤的安定影響較其他波向重要。不同的氣候變遷情境下，北向颱風波浪對於北堤的受力及安定性於第四章分析討論。雖然西向的颱風波浪示性波高較北向的小，但西向的波會有傳播入港的情況產生，對於港內的靜穩則需考慮南向波浪的影響。至於西南向之波浪對於臺中港的影響較小。

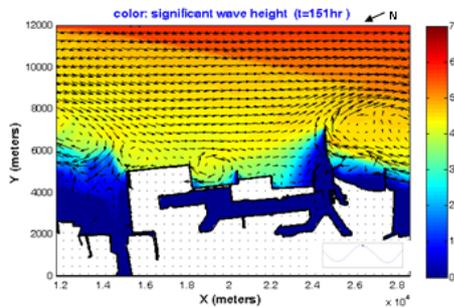


圖8 臺中港附近海域50年迴歸期颱風波浪波流場模擬圖 (模擬條件： $H_s = 7.2\text{m}$ ， $T_s = 11.3\text{s}$ ，波向N)

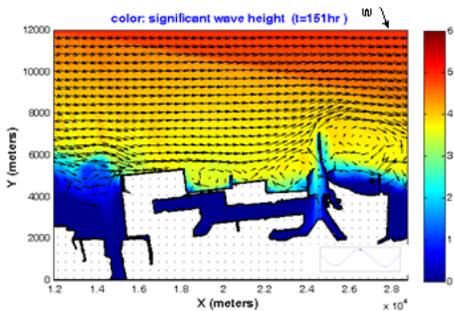


圖9 臺中港附近海域50年迴歸期颱風波浪波流場模擬圖 (模擬條件： $H_s = 5.7\text{m}$ ， $T_s = 10.0\text{s}$ ，波向W)

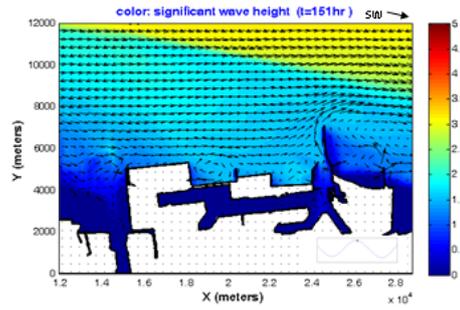


圖10 臺中港附近海域50年迴歸期颱風波浪波流場模擬圖 (模擬條件： $H_s = 4.7\text{m}$ ， $T_s = 9.1\text{s}$ ，波向SW)

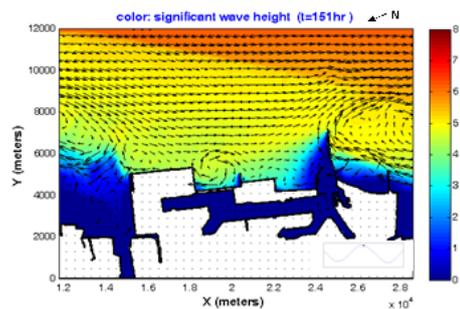


圖11 臺中港附近海域100年迴歸期颱風波浪波流場模擬圖 (模擬條件： $H_s = 7.8\text{m}$ ， $T_s = 11.7\text{s}$ ，波向N)

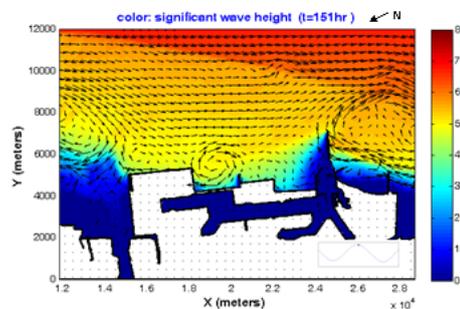


圖12 臺中港附近海域200年迴歸期颱風波浪波流場模擬圖 (模擬條件： $H_s = 8.4\text{m}$ ， $T_s = 12.2\text{s}$ ，波向N)

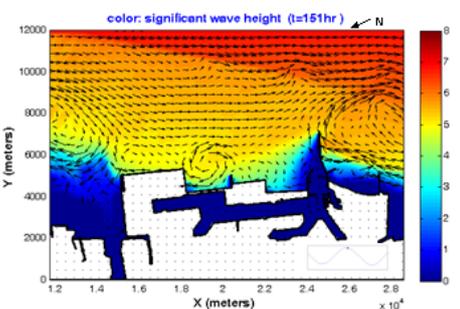


圖13 臺中港附近海域250年迴歸期颱風波浪波流場模擬圖 (模擬條件： $H_s = 8.6\text{m}$ ， $T_s = 12.3\text{s}$ ，波向N)

表3 模式模擬在不同颱風波浪迴歸期下在各波向的最大示性波高表

波向 最大示性波高 (m)	N				W				SW			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
50年RCP0.0	4.32	4.20	4.19	4.20	2.77	2.62	2.87	3.22	0.51	0.60	0.78	1.06
50年RCP2.6	4.32	4.20	4.19	4.20	2.76	2.62	2.87	3.22	0.51	0.60	0.78	1.06
50年RCP4.5	4.32	4.20	4.19	4.20	2.77	2.62	2.87	3.22	0.51	0.60	0.78	1.06
50年RCP8.5	4.32	4.20	4.19	4.20	2.77	2.62	2.86	3.22	0.51	0.60	0.78	1.06
100年RCP0.0	4.70	4.55	4.54	4.55	3.06	2.87	3.12	3.48	0.58	0.68	0.86	1.16
100年RCP2.6	4.70	4.56	4.54	4.55	3.06	2.87	3.11	3.48	0.58	0.68	0.86	1.16
100年RCP4.5	4.70	4.55	4.54	4.55	3.06	2.87	3.12	3.48	0.58	0.68	0.86	1.16
100年RCP8.5	4.70	4.56	4.54	4.55	3.06	2.87	3.12	3.48	0.58	0.68	0.86	1.16
200年RCP0.0	5.13	4.95	4.93	4.95	3.40	3.15	3.41	3.79	0.64	0.73	0.92	1.23
200年RCP2.6	5.13	4.96	4.94	4.95	3.40	3.15	3.41	3.79	0.64	0.73	0.92	1.23
200年RCP4.5	5.13	4.96	4.94	4.95	3.40	3.15	3.41	3.79	0.64	0.73	0.92	1.23
200年RCP8.5	5.13	4.95	4.94	4.95	3.40	3.15	3.41	3.79	0.64	0.73	0.92	1.23
250年RCP0.0	5.25	5.06	5.04	5.05	3.48	3.22	3.48	3.86	0.67	0.76	0.95	1.27
250年RCP2.6	5.25	5.06	5.04	5.05	3.48	3.22	3.48	3.86	0.66	0.76	0.95	1.27
250年RCP4.5	5.25	5.06	5.04	5.05	3.47	3.22	3.48	3.86	0.67	0.76	0.95	1.27
250年RCP8.5	5.24	5.06	5.04	5.05	3.48	3.21	3.48	3.86	0.67	0.76	0.95	1.27

四、結論

本研究擬探討結港灣構物未來可能因氣候變遷而發生的極端波浪(extreme waves)下的受力狀況。主要蒐集並分析臺中港港區未來受氣候變遷可能發生的海氣象特性。並利用目標港區附近現場調查資料校驗港灣結構物附近波、流場數值模式。

謝誌

本論文係交通部運輸研究所港灣技術研究中心專題研究計畫「港灣結構物受異常波影響分析(3/3)」(編號MOTC-IOT-105-H2DB004a)之研究成果，承蒙交通部運輸研究所港灣技術研究中心經費之補助使本研究得以順利完成，謹致謝忱。

參考文獻

- 徐肇晞、王明輝，2009，日本氣候變遷調適策略參訪心得。
- 黃清和，2011，台灣海域波候長期變遷趨勢研究，國立中興大學土木工程研究所博士論文。
- 葉弘德，2012，氣候變遷對臺灣西部離岸風能潛勢與發電量之影響評估，臺灣大學生物環境系統工程學研究所碩士論文。
- 趙紀翔，2012，氣候變遷對蘭陽溪流域影響評估，國立台北科技大學環境工程與管理研究所碩士論文。
- 許泰文、黃清哲，2012，強化臺灣西北及東北地區因應氣候變遷海岸災害調適能力研究計畫(1/2)，經濟部水利署。
- 江玟德、張憲國、劉勁成、陳蔚瑋、何良勝，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(1/4)，交通部運輸研究所。
- Allan, J. and Komar, P., 2001, "Wave climate change and coastal erosion in the US Pacific Northwest",

In Proceedings, WAVES2001 Conference, San Francisco, ASCE.

- Casulli, V. and Cheng, R. T. (1992) "Semi-implicit finite difference methods for three-dimensional shallow water flow", International Journal for Numerical Methods in Fluids, 15 (6), 629-648.
- IPCC, 2013: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Kirby, J. T., Shi, F., Tehranirad, B., Harris, J. C., Grilli, S. T. (2013) "Dispersive tsunami waves in the ocean: Model equations and sensitivity to dispersion and Coriolis effects", Ocean Modeling, 62, 39-55.
- Sasaki, W. and Hibiya, T., 2007, "Interannual variability and predictability of summertime significant wave heights in the western North Pacific", Journal of Oceanography, 63, 203-213.
- Shi, F., Kirby, J. T., Tehranirad, B. and Harris, J. C. (2011a) "FUNWAVE-TVD, users' manual and benchmark tests", Center for Applied Coastal Research Report, CACR 2011-04, University of Delaware, Newark, Delaware
- Shi, F., Kirby, J. T., Harris, J. C., Geiman, J. D. and Grilli, S. T. (2011b) "A high-order adaptive time-stepping TVD solver for Boussinesq modeling of breaking waves and coastal inundation", Ocean Modelling, 43, 36-51.
- Shi, F., Kirby, J. T., Hsu, T. J. and Chen J. L. (2012) "NearCoM-TVD, documentation and users' manual", Research Report, CACR, University of Delaware, Newark, Delaware.
- Tehranirad, B., Shi, F., Kirby, J. T., Harris, J. C. and Grilli, S. (2011) Tsunami benchmark results for fully nonlinear Boussinesq wave model FUNWAVE-TVD, Version 1.0, Research Report No. CACR-11-02, Center for Applied Coastal Research, University of Delaware.
- Tonelli, M. and Petti, M. (2009) "Hybrid finite volume - finite difference scheme for 2DH improved Boussinesq equations", Coastal Engineering, 56, 609-620
- Toro, E. F. (2009) Riemann solvers and numerical methods for fluid dynamics: a practical introduction, Third edition, Springer, New York.