

直立防波堤前海流造成之底床沖刷預測

劉景毅 黃煌輝
成功大學水工試驗所

摘 要

深水港防波堤大都延伸至水深較深處，其防波堤堤頭底床常發生沖刷問題，而本文應用數值模式模擬分析深水港防波堤堤頭附近之底床沖刷狀況，並以雲林縣麥寮港西防波堤為案例。模式模擬結果顯示，漲、退潮期間之海域漂砂輸送不平衡現象應是導致直立防波堤前發生底床沖刷之主因，此現象在大潮期間尤其明顯。最後本文應用驗證後之數值模式預測麥寮港西防波堤完工後，其堤頭前之可能沖刷狀況，此結果將提供工程設計單位作為研擬或設計堤頭沖刷防護措施之依據。

Current-induced erosion around the head of vertical-wall breakwater

Jiing-Yih Liou Hwung-Hweng Hwung

Tainan Hydraulics Laboratory National Cheng Kung University, Taiwan, ROC

Abstract

A two-dimensional numerical model was applied to study the erosion process around the west breakwater head of the Mailiau harbor. It is believed that the scour hole found around the head of the west breakwater is caused by an unbalance sediment transports occurred during the flood and ebb tides, especially in the spring tide period. Lastly, the model was applied to predict the possible erosion location and equilibrium scour depth after the west breakwater is completed. These results will provide useful information for engineers to modify their toe protection design at the head of the breakwater.

因此海流與波浪對漂砂之影響已與在碎波帶內時不同，惟此區域有關漂砂傳輸機制的研究甚少 [3]。

而雲林縣麥寮工業專用港西防波堤延伸入海至水深25m處，自民國84年開始興建，預計於民國89年完工。在建造期間，麥寮港附近海域每年進行兩次地形量測，結果顯示堤頭附近沖刷嚴重，底床地形之大幅度改變對護基拋石等工作造成相當之困擾。因此本文以麥寮港西防波堤為案例，應用數值模式進行施工期間西防波堤堤頭附近底床沖淤問題之研究。

一、前言

隨著船舶噸位逐年增加，深水港之興建漸多，港口防波堤常須延伸至水深較深處，此將改變原來之波流場，乃至造成海底地形大幅度改變，此對防波堤設計、施工以及完工後之維護等皆有重大影響。而有關海域底床沖刷問題之研究，雖已有數十年之歷史，但研究範圍大都局限在碎波帶內，在此區域內波浪與其所造成之沿岸流為導致海岸地形變遷的主要驅動力[6]。至於碎波帶以外至水深 20~30m 處之海域，由於海流具方向性且較強，而波浪受底床之影響又較小，

二、防波堤堤頭底床沖刷現象

雲林縣麥寮港西防波堤延伸入海至水深25m處(圖1)，在建造期間，麥寮港附近海域每年進行兩次地形量測。圖2至圖4所示為民國84~87年間相鄰兩次量測所得之地形水深資料相減而得之地形變化侵淤圖[1]，圖中正值表示淤積，負值表示侵蝕。

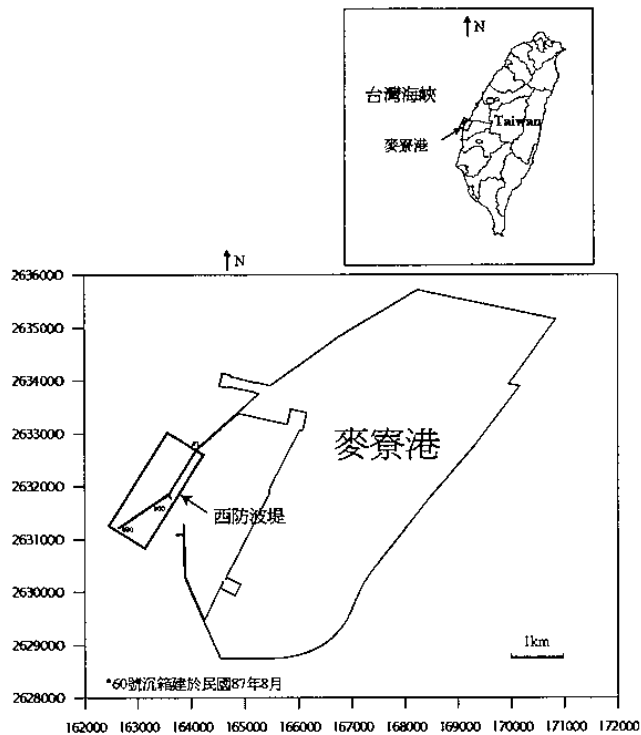


圖1 麥寮港西防波堤位置圖

圖2顯示在民國84年9月至民國85年3月間僅於民國84年9月施放一個沉箱(#17)，往後則停工約半年，在這段停工期間，#17沉箱前緣西北側約100m處發生明顯的底床沖刷現象，其侵蝕深度介於-5~-9m之區域的直徑約為140m。圖3所示為民國85年8月至民國86年3月間之地形變化狀況，在此期間西防波堤於9月施放至#35沉箱，於11月施放#36沉箱，而至86年3月#36沉箱前緣西北側約40m處又造成侵蝕，其侵蝕深度介於-5~-9m之之區域的直徑約為120m，而於國84年9月至民國85年3月間形成之#17沉箱前緣西北側侵蝕區在此期間已回淤。圖4為民國86年9月至民國87年4月間之地形變化侵淤圖，在此期間西防波堤已於11月份興建至#51沉箱位置，然後停工至隔年4月。由圖中結果可知，在民國86年11月至民國87年4月不到半年的時間內，#51沉箱位置西北側距沉箱前緣約100m處已呈嚴重侵蝕現象，侵蝕深度介於-5~-9m之區域的直徑約120m，而於

民國86年3月至民國86年9月在#45沉箱位置前緣形成之侵蝕區域已明顯回淤。

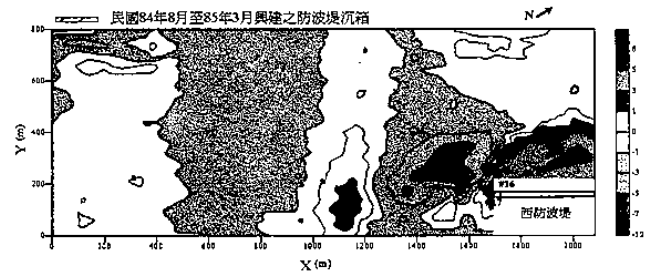


圖2 民國84年8月至民國85年3月間之海域地形變化

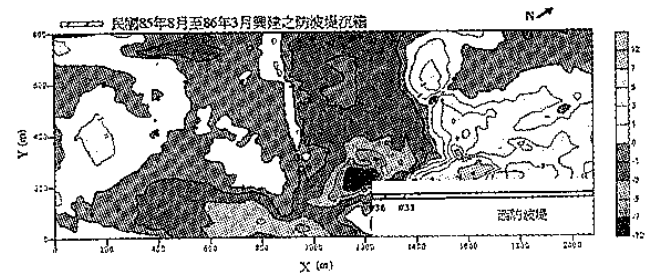


圖3 民國85年8月至民國86年3月間之海域地形變化

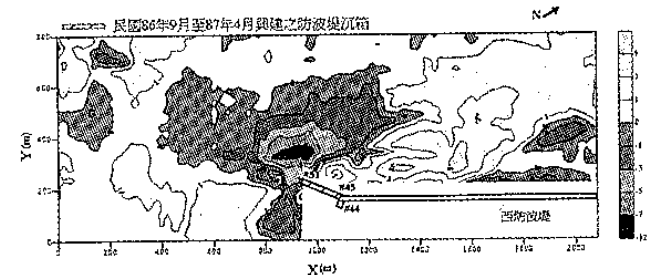


圖4 民國86年9月至民國87年4月間之海域地形變化

綜合上述地形變化特性與其他相關條件[1]，本文整理歸納成以下幾點推論：

1. 在民國84年西防波堤開始興築後，隨著沉箱堤逐建往外海延伸，最外海側沉箱前緣約20~100m處即發生嚴重之底床沖刷現象。侵蝕區主要只發生在沉箱前緣西北側，侵蝕深度介於-5~-9m之區域的直徑約在120~140m之間。
2. 在最外海側沉箱前緣西北側產生之侵蝕區會隨著西防波堤往外海延伸而外移，且其與最外海側沉箱處之相對位置亦約略維持在100m以內，惟在西防波堤往外海延伸後，原來之侵蝕區將於6~12個月回淤。

三、防波堤堤頭底床沖刷原因探討

根據本文收集之海氣象與文獻資料[1,5]，

影響麥寮港西防波堤堤頭底床沖刷之因素包括：

(一)海流：西防波堤堤頭所在之水深達20多公尺，流速在大潮期間最大可達1.7m/s，而西防波堤之興建將使得堤頭附近發生許多不同尺度之渦流，此應是造成西防波堤最外側沉箱西北側底床遭到嚴重侵蝕之主因之一。

(二)波浪：入射波浪與反射波浪交會形成之短峰波，常是造成直立堤前底床沖刷之主因[7]，惟西防波堤堤頭所在水深達20多公尺，短峰波對地形變化的影響是否減弱，須要進一步資料之確認。而根據世界各國港口防波堤發生短峰波所導致的侵蝕案例[7]顯示，短峰波造成之堤前底床沖刷主要發生在沿著堤線的面海側，此與麥寮港西防波堤之沖刷位置(位於堤頭附近海域)明顯不同，故研判波浪應不是引起麥寮港西防波堤堤頭附近海域底床嚴重侵蝕的主要因素。

(三)堤頭保護層之厚度：設計沉箱堤時一般亦會在堤腳處做保護層，保護層越厚，堤頭地形受侵蝕之程度越低。

(四)堤頭之形狀與糙度：海流遇到防波堤後所產生之渦流常為造成堤頭地形遭侵蝕之主因，而渦流之形成與堤頭之形狀、糙度均有關係，一般來說圓形堤頭所產生之渦流遠比方形堤頭為低，因此其所導致之堤頭底床侵蝕亦較小。

由以上西防波堤堤頭底床沖刷原因分析結果推測，海流應是造成西防波堤最外側沉箱西北側底床遭到嚴重侵蝕的主因，因此本文進一步應用海域地形變化數值模擬來驗證此一推論。由於西防波堤堤頭處之水深達20多公尺，流速在大潮期間可達1.7m/s，因此本文之海域地形變化數值模式主要考慮海潮流對海底底床沖刷之影響，至於波浪因素則予以忽略。

四、防波堤堤頭底床沖刷數值模擬

本文之海域地形變化數值模式主要分為兩部份，一為海流模式，一為地形變化模式，分述如下：

(一)海流模式

本文使用運算效率較高之平面二維TW2DI水動力模式[2]進行麥寮港海域之海流數值模擬。

(二)地形變化模式

決定底床高程變化之連續方程式可以表示如下：

$$\frac{\partial z}{\partial t} = \frac{1}{1-\lambda} \left(\frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} \right) \quad (1)$$

上式中， z 為底床高程， λ 為底床底質孔隙率， Q_x 與 Q_y 分別為 x 軸向與 y 軸向的輸砂率。

由於潮流之輸砂行為至今仍然沒有合適之經驗式可資應用，本文將以van Rijn[8,9]建議之下列輸砂公式來計算海域輸砂：

$$Q_x = Q_b \frac{U}{\sqrt{U^2 + V^2}} + C_a F U h \quad (2)$$

$$Q_y = Q_b \frac{V}{\sqrt{U^2 + V^2}} + C_a F V h \quad (3)$$

上式中 Q_b 是推移質輸砂率， C_a 是懸浮質最大濃度， F 是懸浮質垂直剖面形狀係數，依下列經驗式計算之。

$$Q_b = 0.053 [(s-1)g]^{0.5} D_{50}^{1.5} D_*^{-0.3} T^{2.1} \quad (4)$$

$$C_a = 0.015 \frac{D_{50}}{a} \frac{T^{1.5}}{D_*^{0.3}} \quad (5)$$

$$D_* = [(s-1)g\nu^{-2}]^{1/3} D_{50} \quad (6)$$

式中， s 係砂粒比重， D_* 是無因次砂粒粒徑， D_{50} 是50%底質粒徑， T 是無因次剪應力， a 是底床砂丘高度。

(2)式至(6)式主要由van Rijn[8,9]依據實驗室實測數據與推移質理論推導而得之推移質與懸移質輸砂率公式，其對水流之輸砂行為有相當仔細之描述，而Garcia and Parker[4]亦證明此一公式在模擬推移質與懸移質輸砂之準確性。惟由於此公式之推導係基於穩態與均勻之假設，因此若將此公式應用於地形多變且流速流向隨時間明顯變化之海域地形模擬，其模擬結果須經實測地形資料校驗，以確保模擬結果的準確性。

(三)海流模擬之校驗

由於西防波堤沉箱的長度與寬度分別約為25m與20m，因此模式使用之網格大小為20m，時間間距為1秒，圖5所示則為模式之模擬區域與等水深線圖。

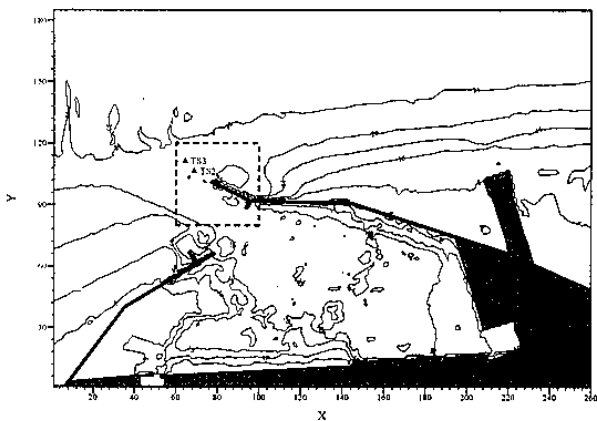


圖5 模式模擬區域圖(格網間距20m)

本文先以民國87年9月於麥寮港量測之潮汐資料作為模式的外海開放邊界條件，而以同一時間於麥寮港西防波堤外量測之海流資料來率定水動力模式，最後選取 $30\text{m}^2/\text{s}$ 、 $10\text{m}^2/\text{s}$ 作為模式之渦動黏滯係數值[2]。在底床磨擦係數方面，本文模式係以Chezy係數來表示[2]，其值將依水深而變，本文使用之Chezy係數值為27。

圖6所示為本文模式模擬所得之海流與測站TS3的上層實測海流之比較。結果顯示本文模式計算所得之流速在大部份時段與實測流速相當吻合，但在有些時刻最大流速值略小於實測流速。至於在海流方向的比較方面，模擬結果顯示模式計算所得之海流流向與實測流向相當一致。

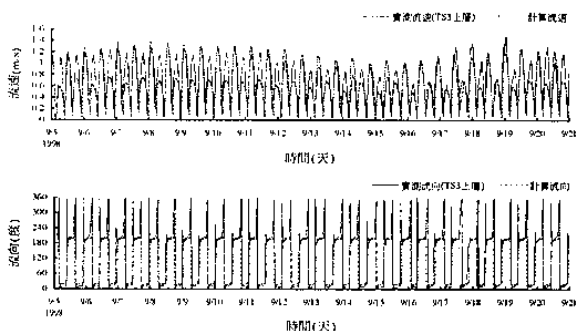


圖6 模式模擬結果與測點之實測值比較

本文再以民國87年10月30日起至民國87年11月15日止在麥寮港海域量測之海流資料進行模式驗證，模式計算所需之水深資料及使用之參數值則選與模式率定時相同。圖7所示為模式模擬所

得海流與測站TS2與TS3之上層實測海流的比較。TS2站的比較結果顯示本文模式計算所得之流速與實測流速相當吻合，但在TS3站的比較結果則顯示在大潮時模式模擬所得之流速略小於實測流速。至於在海流方向的比較方面，模擬結果顯示模式計算所得之海流流向與實測流向相當一致。

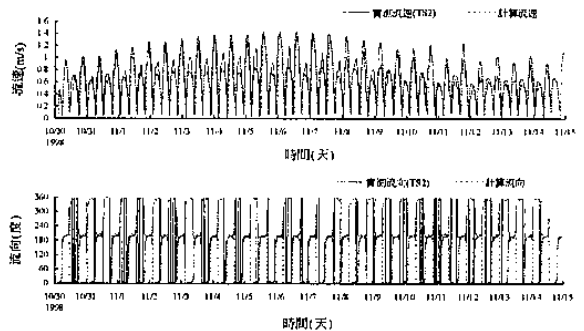


圖7a 模式模擬結果與測點之實測值比較

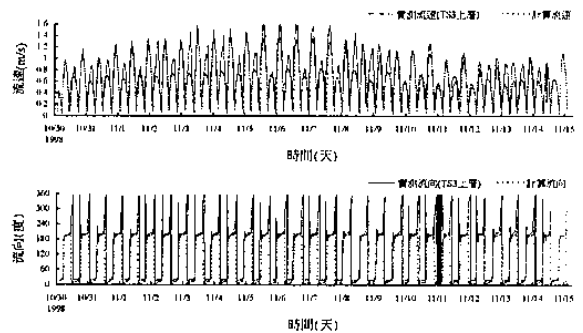


圖7b 模式模擬結果與測點之實測值比較

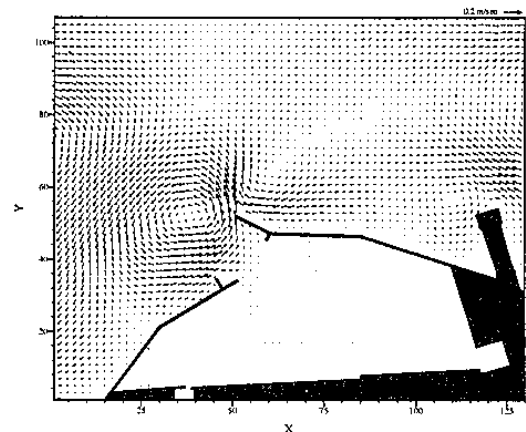


圖8 模式模擬所得之殘差流場圖

由於麥寮海域之海流以潮流為主要成份，潮流具往返流動之週期特性，為瞭解麥寮海域流場較長週期之特性，本文將模擬所得之海流進行時間平均以得到殘差流場，如圖8所示。圖中結果顯示西防波堤最外側沉箱處明顯產生一較大尺度之渦流，尤其在其西北側有較強之流速發生，此

應是漲、退潮期間之海流強度與方向不同所致，因此長期而言，將使得此處底床容易遭到沖刷而造成較嚴重之侵蝕，此與地形水深之實測結果相當吻合。

(四)西防波堤堤頭地形變化模擬之校驗與應用

本文以西防波堤堤頭前之實測地形資料進行地形變化數值模擬定性結果之校驗，模擬之案例為西防波堤已施放至#51沉箱處時之侵蝕狀況。

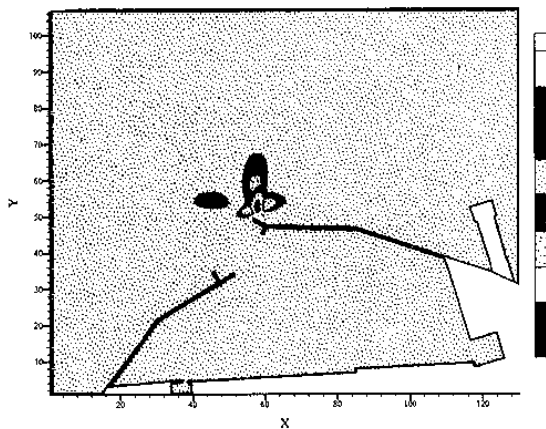


圖9 方案b配置下之西防堤堤頭附近地形沖淤圖

圖9所示為模式模擬所得防波堤已施放至#51沉箱處時麥寮港附近海域之地形變化情形，模擬時間為16天，圖中之正值表示淤積，負值表示侵蝕，模擬結果顯示西防波堤堤頭附近因強烈海流造成明顯之局部沖刷，其發生位置與圖4的侵蝕位置相吻合，而其沖刷之最大深度約為0.4m。若欲將模擬結果與實測地形變化資料進行定量上之比較，由於圖4為8個月期間之地形變化量，因此當假設在8個月的期間內的底床沖刷仍未達到平衡沖刷深度，則可以線性疊加推估8個月後之沖刷深度約為6.4m，此與圖4顯示堤頭附近之侵蝕深度相差不遠。

(五)西防波堤完工後堤頭地形變化之數值模擬

本文將經實測資料驗證後之模式進一步模擬預估西防波堤興建至#90沉箱後(西防坡堤完工後)，堤頭附近地形之變化狀況。

圖10所示為模式模擬所得西防波堤興建至#90沉箱後16天之地形變化狀況，圖中結果顯示西防波堤完成後，堤頭正前方約80~200m處將產生較明顯之沖刷狀況。圖11所示為堤頭前三個檢驗點的地形變化歷線圖，其中檢驗點1、檢驗點2與檢驗點3的位置分別距離堤頭約為80m、160m

與240m，圖中結果顯示地形變化較劇烈的時間主要發生在海流流速較強的大潮期間，而檢驗點3的沖刷深度約可達0.79m。

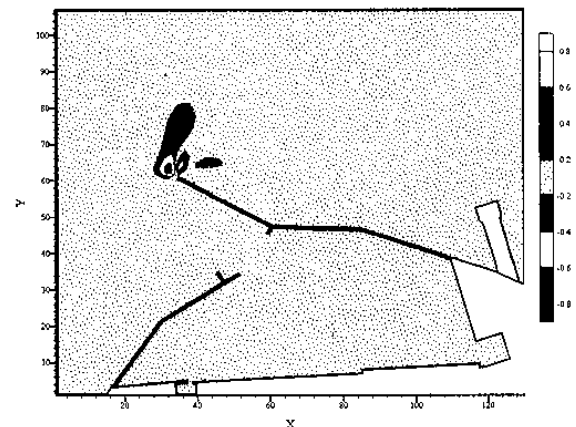


圖10 西防波堤完工後堤頭附近地形沖淤圖

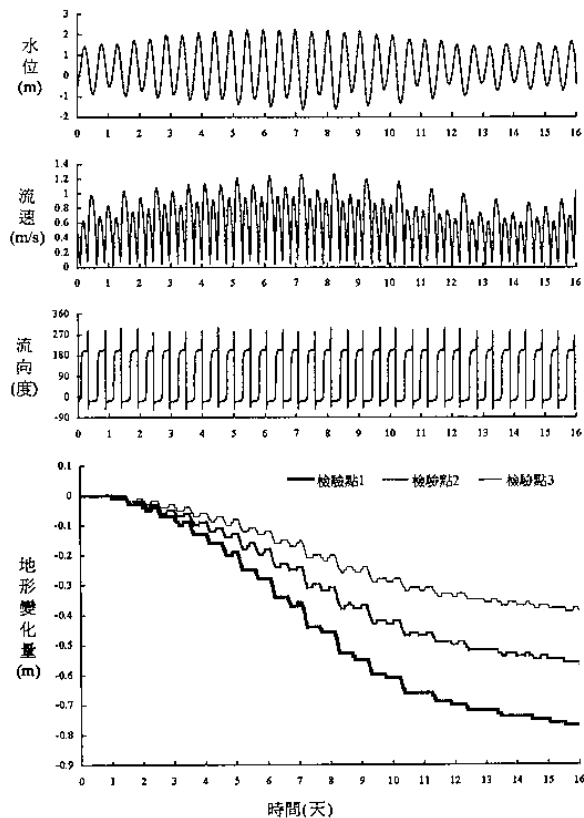


圖11 檢驗點之水位、流速、流向與地形變化歷線圖

以工程規劃設計的需求而言，當然是希望能夠事先預估防波堤完工後堤頭附近底床的可能沖刷位置與最大沖刷深度，以作為防波堤規劃設計之依據。一般而言，海域地形之侵淤變化在海岸結構物興建完成後的初期會發生較明顯之變化，然後侵蝕深度逐漸趨近於平衡沖刷深度，乃至最後達到所謂的動態平衡。但在實際執行上，由於影響平衡沖刷深度的許多因子仍無法掌握，因此

目前仍無合適之理論公式可用以推估海潮流引起結構物附近之平衡冲刷深度。而在本研究，圖2至圖4之實測地形比較顯示，隨著西防波堤沉箱之施放，堤頭前的冲刷坑洞雖然隨之移動，但冲刷面積與深度並未明顯增大，推測此係因為在此期間西防波堤沉箱施放進度較緩，且堤頭水深變化不大所致。但當西防波堤興建至#90沉箱後(西防坡堤完工後)，西防波堤明顯突向外海側，其對附近流場之影響將加大，而模式模擬結果亦顯示，16天模擬期間之堤頭底床最大冲刷量，由西防波堤施放至#51沉箱處(圖9)時之0.4m增加為0.79m。當假設在6~8個月後堤頭底床冲刷將達到平衡冲刷深度時，則以線性疊加方式保守估算之最大底床冲刷深度可達9.5~12.5m。當然如若8個月後，平衡冲刷深度仍未達到，則冲刷深度可能繼續擴大。

最後必須強調的是，以海域地形變化數值模式預測深海堤頭附近地形之冲刷深度目前仍不成熟，其間存在太多的變化機制，以目前的科技水平仍無法掌握。而本文基於工程規劃需要，遂以現場量測資料配合數值模擬，冀以較嚴謹之態度依海工學理推估深海堤頭附近之地形冲刷狀況，惟在採用本文結果時，宜先瞭解各項結果的前題假設與適用性為佳。

五、結論

本文之結論綜整如下：

1. 地形監測結果顯示，當西防波堤延伸工程因為冬季惡劣天候而停止作業後，在隔年春天復工時，往往發現防波堤前已產生直徑約120~140m，深5~9m之坑洞，當西防波堤延伸工程往前推進後，此一刷深坑洞亦如影隨行，惟在西防波堤往外海延伸後，原來之侵蝕區將於6~12個月回淤。
2. 本文以西防波堤施放至#51沉箱處時之地形資料進行海域地形變化數值模式之驗證，模擬結果顯示西防波堤堤頭附近底床因強勁海流造成明顯冲刷，其發生位置與實測結果相吻合，而冲刷深度亦與實測資料相差不多。而模式驗證成果亦進一步證

實強勁海潮流應為導致西防波堤堤頭附近底床冲刷之主因，尤其在大潮期間。

3. 本文應用校驗後之海域地形模式模擬預測西防波堤全部完工後之海域地形變化情形，模擬結果顯示西防波堤完成後，強勁海流作用將使得堤頭正前方約80~200m處產生明顯之冲刷狀況，在假設6~8個月後堤頭底床冲刷將達到平衡冲刷深度狀況下，則以線性疊加方式保守估算之最大底床冲刷深度約可達9.5~12.5m。

參考文獻

1. 劉景毅等，1999: 麥寮工業專用港西防波堤III流況預測與地形變化原因探討分析，國立成功大學水工試驗所研究試驗報告第224號。
2. 劉景毅，1999: “二維與三維水理數值模式在淡水河口海域之應用與比較”，中國土木水利工程學刊，11卷，3期，579-587。
3. Burkhardt R.W., 1998: Coastal Engineering Manual, Part III, U.S. Army Corps of Engineers, EC1110-2-292.
4. Garcia M. and Gary Parker, 1991: “Entrainment of Bed Sediment into Suspension”, Journal of Hydraulic Engineering, 117(4).
5. Hoffmans G.J.C.M. and H.J. Verheij, 1997: Scour Manual, A.A. Balkema, Rotterdam.
6. Horikawa, K., 1988: Nearshore dynamics and coastal process, part III, University of Tokyo Press.
7. Silvester, R. and John R. C. Hsu, 1993: Coastal Stabilization: Innovative concepts, Englewood Cliff, NJ: Prentice Hall Inc.
8. Van Rijn, L. C., 1984a: “Sediment Transport, partI: Bed Load Transport”, Journal of Hydraulic Engineering, 110(10), 1431-1456.
9. Van Rijn, L. C., 1984b: “Sediment Transport, partII: Suspended Load Transport”, Journal of Hydraulic Engineering, 110(11), 1613-1641.