

美國國家計算水科學及工程中心河道變遷模式之 引進及應用研究

葉克家¹ 陳弘由² 王書益³ 陳春宏⁴ 廖仲達⁵

摘要

位於美國密西西比大學之國家水科學及工程中心(National Center for Computational Hydroscience and Engineering, NCCHE)係由美國政府長期經費補助之國家級研究單位，該中心先後發展出 CCHE1D、CCHE2D 模式，在經嚴謹之檢定與驗證後，應用至美國及其他國家甚多的河川海岸問題上，成效顯著。本研究分三年進行，藉由合作研發方式引進 CCHE1D、CCHE2D 模式，透過水利署水規所、交通大學與 NCCHE 之分工，選取濁水溪為應用研究對象，進行數值分析研究。第一年以 CCHE1D 應用於濁水溪玉峰橋至河口段長期沖淤模擬；第二年以 CCHE2D 應用於濁水溪集集攔河堰上、下游河段之局部沖淤情形；第三年再以 CCHE2D 探討濁水溪中下游河段之河道側向變遷與岸壁沖刷問題。藉由不同議題之應用研究，可驗證 NCCHE 模式在台灣本土案例之適用性。

Implement and Application Study of NCCHE's River Migration Models

Yeh, K. C.¹, Chen, H. K.², Wang, S. S. Y.³, Chen, C. H.⁴, Liao, C. T.⁵

Abstract

Located in the University of Mississippi, the National Center for Computational Hydroscience and Engineering (NCCHE) is founded by several US federal agencies and the US Congressional Appropriation. The NCCHE developed the 1D (CCHE1D) and 2D (CCHE2D) sediment transport models, which were applied to river and coastal problems in the USA and abroad with successful achievements after rigorous tests and verifications of the models. This project will be carried out in a three-year term in collaboration with the NCCHE for the introduction of the 1D and 2D numerical sediment transport models. With Choshui River chosen as the study target, the work is shared among the NCCHE, Water Resources Planning Institute, Water Resources Agency, and the NCTU Hazard Mitigation Research Center. The first-year plan aims at the application of CCHE1D model to investigate Choshui River's bed change. The second-year plan aims at the local morphodynamics near the upstream and downstream channel of JiJi Weir using the CCHE2D model. The third-year plan aims at the lateral migration and bank erosion problems of middle and lower reach of Choshui River. Through these application studies, the applicability of the NCCHE models to Taiwan's rivers can be verified.

- 1 國立交通大學土木工程學系 教授兼系主任
- 2 水利署水利規劃試驗所 所長
- 3 美國國家計算水科學與工程中心 主任
- 4 水利署水利規劃試驗所 課長
- 5 國立交通大學土木工程學系 博士候選人

一、前言

台灣河川具有坡陡流急、枯水季與豐水季流量差異大、高含砂量與河床沖刷嚴重之題，引進一適用於台灣河川之先進數模，且能協助工程師準確分析問題，有其必要性。

位於美國密西西比大學之國家水科學及工程中心(National Center for Computational Hydroscience and Engineering, NCCHE)係由美國政府長期經費補助之國家級研究單位，從事河川及海岸先進數值模式之研發與應用。該中心先後發展出一維、二維等模式，分別以 CCHE1D、CCHE2D 稱之，在經嚴謹之檢定與驗證後，應用至美國及其他國家甚多的河川海岸問題上，其成效顯著。

美國國家水科學及工程中心所發展之數模可探討集水區及河道網路模擬、河川治理及復育、潰壩及其風險分析、水工建造物附近流場、岸壁沖刷、泥砂及污染物傳輸等水利工程常見問題。該中心之一維及二維數模藉由合作研發方式，透過該中心、水利署水規所與交大之分工，選取台灣較具代表性之河川(以濁水溪為例)，進行數值分析研究，並與國內數模成果比較，為本研究之主要目標。

挑選台灣代表河川-濁水溪為例，其具有上游坡陡流急、中下游沖淤劇烈、河道變遷明顯等之特性。本研究以濁水溪中下游河段為應用對象，整體研究範圍由玉峰橋至河口，全長約 64 公里，包含主要支流清水溪及沿程之集集攔河堰，整體研究範圍如圖 1 所示。第一年研究以 CCHE1D 動床模式針對濁水溪河道沖淤趨勢進行模擬研究，並與國內之一維動床模式比較評估；第二年以 CCHE2D 動床模式針對集集攔河堰上下游河段局部沖淤變化進行研究；第三年針對濁水溪名竹大橋至中沙大橋段河道之岸壁沖刷、河道變遷進行模擬研究。



圖 1 濁水溪研究範圍(玉峰橋至河口)

特性，然而目前常見之商用動床模式皆存在不同程度之適用性問

二、CCHE1D 模式概述

CCHE1D 一維水理與輸砂模式研發至今，曾採用許多實驗室與現場案例進行模式檢定驗證，且針對各種類型之水理與輸砂運移行為進行模擬，細節與案例可參考 CCHE1D 技術使用手冊(Wu and Vieira, 2002)與其他 NCCHE 相關之出版刊物。

模式水理模組求解聖凡南(Saint-Venant)方程式，滿足流體為不可壓縮、靜水壓分佈、忽略風力、科氏力之假設，採用普利司蒙(Preissmann)四點隱式有限差分法離散控制方程式，並針對離散之控制方程式發展一套線性疊代法，利用雙掃法求解之。

CCHE1D 一維水理與輸砂模式是以一般化為目標，同時可考慮短期與長期河川網路沖淤過程之模式(Wu and Vieira, 2002)，可計算變量流情況下之複式斷面河川網路，對於水工結構物之影響方面，諸如箱涵、橋樑、跌水工等皆可考慮。此外，CCHE1D 模式還可整合地貌分析工具 TOPAZ 與水文模式 AGNPS，並且搭配視窗化使用者介面，其功能包含自動於 DEM 高程上定義出集水區網路、計算格網點之繪製、資料庫之管理等，此整合河川與集水區系統模式能夠用來分析土地使用改變及農業管理之泥砂淤積問題。模式執行與相關模組應用皆需外掛於 ArcView GIS 3.x 版本。

為了使模式能更具有現況案例模擬之實用性，CCHE1D 提供了多元輸砂參數之設定，如四組輸砂公式、推移載調適長度、懸浮載調適係數、沖洗載粒徑大小、河床質孔隙率、混合層厚度等，所有設定可由使用者透過使用者介面給定，CCHE1D 模式功能如表 1 所示。

表 1 CCHE1D 模式功能

- 亞臨界、混合流、超臨界變量流於辮狀河川之模擬
- 總載形式之非均勻質、非平衡輸砂
- 考慮如箱涵、跌水工、橋樑等
- 考慮岸壁沖刷與破壞之增額輸砂通量
- 多元之輸砂參數設定
- AGNPS水文模式之整合
- 圖形化之使用者介面

三、CCHE2D 模式概述

CCHE2D 水理輸砂模式於美國 NCCHE 發展多年來，其功能持續被擴充增加。模式可模擬如複雜天然環境之自由液面流、輸砂、水質、污染傳輸等機制，同時模式可應用於實驗室或天然河川之定量流、變量流、紊流流場等分析。

CCHE2D 模式採用隱式時間推進有效元素法(efficient element method)，水理模組採用交錯格網求解連續方程式之水位，特別之速度校正法來求解系統方程式；乾濕點問題之處理採用移動邊界法；紊流模式部分，除了兩種零方程渦黏滯模式，還可考慮 $k-\epsilon$ 紊流模式；懸浮載傳輸為求解對流傳輸方程式，河床載傳輸採用非平衡輸砂方程式，且考慮底床坡度與彎道二次流效應。

模式可模擬穩態及非穩態明渠流、亞臨界、超臨界、混合流、複雜主支流交匯等，大尺度之天然河川與小尺度之實驗渠道同樣經過檢定驗證程序。總結來說，模擬之底床改變與河道變遷可相較傳統水深積分模式來得合理，CCHE2D 模式功能如表 2 所示。

此外，美國國家計算水科學及工程中心為了配合台灣河川之特性，針對台灣常見之軟岩模組納入 Sklar and Dietrich (2004)之泥砂磨蝕機制，並進行適當修正；岸壁沖刷模組則引用 Osman and Thorne (1988)之理論，並採用移動格網技巧使外部邊界格網可隨著岸

壁沖刷過程移動。整體來說，CCHE2D 模式功能具有應用於台灣河川之一般化特性。

表 2 CCHE2D 模式功能

- 穩態、非穩態之自由液面流於複雜天然環境模擬
- 隱式時間推進有效元素法(Efficient element method)
- 亞臨界、混合流、超臨界流模擬
- 非平衡、非均勻輸砂模擬
- 考慮凝聚性沈澱
- 考慮水工結構物：壩、堰、閘門
- 考慮泥砂磨蝕效應之岩盤沖刷
- 考慮河川彎道影響與岸壁沖刷
- 圖形化使用者介面

四、各家模式比較

對台灣河川及流域特性而言，一般之商用動床模式都有其適用性與不同優缺點，工程師在使用上常面臨如何選擇模式與案例參數檢定複雜之問題。以下針對常見之商用動床模式，如美國工兵團之 HEC-6、美國墾務局之 GSTARS、台大李鴻源教授等之 NETSTARS、美國國家計算水科學及工程中心之 CCHE1D 及交大葉克家教授等之 EFA1D，比較模式功能與限制，包含模式維度、水理與輸砂計算假設、相關機制等，以瞭解不同模式之適用性，模式比較表彙整於表 3 所示。

二維動床模式部分，常見者多為自行研發之校園學術版模式，因此挑選交大葉克家教授等之 EFA2D 模式進行比較，比較包含水理與輸砂計算假設、模式功能、展示與使用介面、計算效率等，以瞭解不同模式之適用性，模式比較表彙整於表 4 所示。由模式功能比較表可看出，CCHE1D、CCHE2D 模式相較於其他商用動床模式有其功能獨特與先進之特點。

表 3 一維動床模式功能比較

		CCHE1D	EFA1D	HEC-6	GSTARS	NETSTARS
維度	一維	○	○	○		
	擬似二維				○	○
水理	亞臨界流	○	○	○	○	○
	超臨界流	○	○		○	○
	定量流	○	○	○	○	○
	變量流	○	○			○
		CCHE1D	EFA1D	HEC-6	GSTARS	NETSTARS
	迴水演算	○	○	○	○	○
	主支合流	○	○	○	○	○
	主支分流					○
輸砂	懸浮載與推移載分離	○	○			○
	床質級配	○	○	○	○	○
	護甲作用	○	○	○	○	○
	非均勻沈澱	○	○	○	○	○
	凝聚性沈澱	○	○	○	○	○
	岸壁沖刷輸砂量	○				

表 3 二維動床模式功能比較

比較項目	CCHE2D	EFA2D
水理數值方法	隱式有效元素法	顯式有限解析法
水流演算	可處理河中島、格網挖空、二維主支流複雜河系問題	僅能處理單一河道問題(具乾濕點處理技巧)
泥砂演算	懸浮載、推移載個別計算處理，利用調適長度描述非平衡輸砂過程	懸浮載以濃度剖面描述泥砂之非平衡過程，推移載考慮為平衡輸砂
格網處理	CCHE_MESH、格網延展	CCHE_MESH、格網固定
近岸輸砂機制	推移載側向渠坡修正	近岸推移載輸砂平衡機制
岸壁沖刷機制	Osman & Thorne (1988)	Osman & Thorne (1988)
軟岩沖刷機制	泥砂磨蝕機制	泥砂磨蝕、水力沖蝕機制
成果展示介面	本身具有 GUI 展示介面可繪圖	需藉助 tecplot 或 excel 軟體繪圖
操作介面	GUI 使用介面	工作站與 dos 指令輸入介面
計算速度	洪水時間/real time=81.5/1	洪水時間/real time=4.2/1
版權	免費會員制申請下載軟體	校園版研發軟體

五、濁水溪應用案例成果

5.1 濁水溪中下游河道沖淤趨勢

以玉峰橋至河口為模擬範圍，模擬 1999~2004 年之主要颱風事件，利用不同年份之實測斷面資料進行模式檢定驗證，選取 EFA1D 模式進行比較。

溪洲大橋至河口之模擬底床變化成果如圖 2 所示，包含 CCHE1D 之三種輸砂公式與 EFA1D 之 van Rijn(1984)公式底床最低點縱剖面，EFA1D 與 Wu et al. (2000)公式之比較中，兩者模擬底床驗證在溪洲大橋上游以 EFA1D 較為良好，進入溪洲大橋下游段後，兩者亦皆呈現沖刷趨勢。CCHE1D 採用 Wu et

al. (2000)公式時，除了溪洲大橋附近之劇烈沖刷無法展現，其餘區段都能與 2004 年實測底床相近；而 EFA1D 之 van Rijn(1984)公式除了在溪洲大橋下游河心距 23,000m 處有沖刷量高估之現象，其餘河段皆有良好成果。

模擬與實測高程差縱剖面比較中，正值代表淤積、負值代表沖刷。由圖可清楚看出兩者模擬與實測底床資料比較之差異，大體上兩模式模擬之趨勢相近，各有其低估與高估之處。由上述分析可知，CCHE1D 與 EFA1D 模式在相同模擬案例條件下，兩者皆有良好之底床變化模擬結果。

詳細之模式測試與相關應用成果可參考經濟部水利署水利規劃試驗所(2007)之「美國國家計算水科學及工程中心河道變遷模式之引進及應用研究(1/3)」報告。

5.2 集集堰上下游局部沖淤模擬

集鹿大橋至名竹大橋為模擬範圍，以集集堰分成上下游段模擬，模擬 2004~2007 年之主要颱風事件，利用不同年份之實測 DEM 資料進行模式檢定驗證，選取 EFA2D 模式進行比較。將集集堰上下游之底床高程差繪出，如圖 3~圖 6 所示，正值代表淤積、負值為沖刷，單位為公尺(m)。

上游段檢定案例中，可見兩模式都呈現淤積趨勢，而 EFA2D 靠近堰址 200~600m 處模擬之淤積程度較高，與實測淤積行為較為相近，但堰前之劇烈沖刷坑同樣無法模擬，其餘區段與 CCHE2D 模擬成果相近。驗證案例中，兩模式有相同沖淤行為，堰址前同樣有一明顯淤積丘產生，但與實測淤積程度相比有高估趨勢，評估應為低水時間閘門操作等因素未考慮所致，但堰前左右向上游產生兩道沖刷溝則有相同趨勢。

下游段檢定案例中，CCHE2D 與 EFA2D

整體深槽之沖刷趨勢得以顯現，與實測底床高程差相比相當接近，斷面剖面比較如圖 7、圖 8 所示，右岸高灘地同樣亦有局部淤積產生。驗證案例中，深槽同樣為沖刷趨勢，沖淤變化以 CCHE2D 較為劇烈。

由上述比較結果得知，雖 CCHE2D 與 EFA2D 兩模式理論與基本架構有些許差異，但採用相同模擬條件進行模擬，無論是淤積或沖刷行為，皆能有相近之模擬趨勢，並合乎現場觀測數據或物理現象。

詳細之模式測試與相關應用成果可參考經濟部水利署水利規劃試驗所(2008)之「美國國家計算水科學及工程中心河道變遷模式之引進及應用研究(2/3)」報告。

5.3 濁水溪中下游岸壁沖刷模擬

名竹大橋至中沙大橋為模擬範圍，分三個河段進行模擬，河段一為名竹大橋至彰雲大橋、河段二為彰雲大橋至斷面 70、河段三為斷面 70 至中沙大橋，模擬 1999~2007 年之主要颱風事件，考慮岸壁沖刷模組，利用不同年份之實測斷面資料進行模式檢定驗證。

岸壁沖刷之相關研究分析目前仍持續進行中，以下針對現階段研究成果進行概述。圖 9、圖 10 為河段一岸壁向外延展之模擬結果，由於 CCHE2D 模式採用移動格網技巧，因此將模式左右邊界位置設定為初始岸壁位置，若模擬流況滿足岸壁沖刷發生條件，左右邊界則發生岸壁沖刷，岸壁格網即向河道外進行延展，河段一延展距離最大約有 152m。

圖 11、圖 12 為河段二岸壁向外延展之模擬結果，局部放大圖中不同線段代表每一時間間距岸壁向河道外側向沖刷之距離，說明模式可模擬岸壁沖刷變動過程。

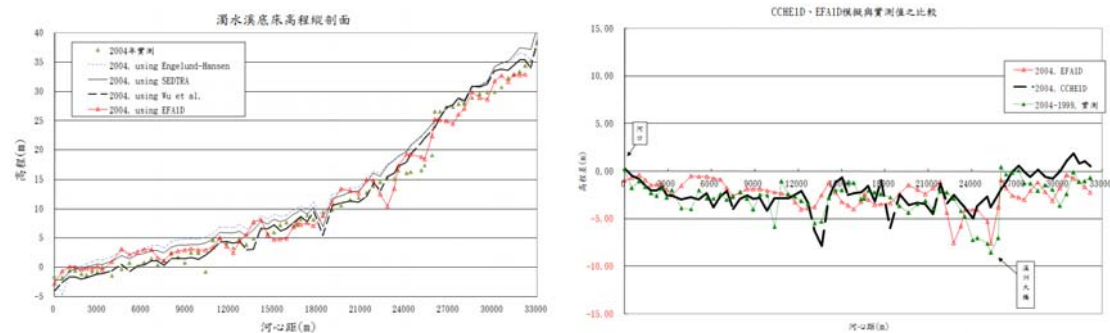


圖 2 CCHE1D 與 EFA1D 模擬底床縱剖面、高程差

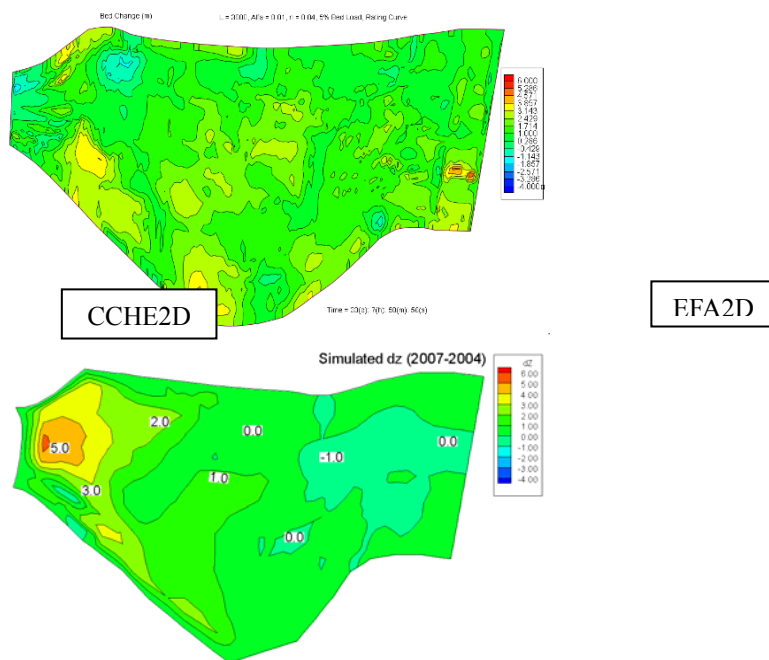


圖 3 集集堰上游段模擬底床高程差比較_檢定案例

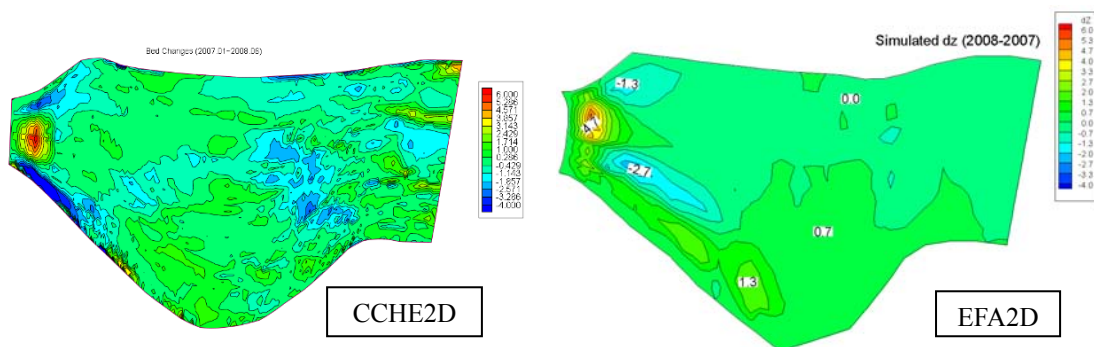


圖 4 集集堰上游段模擬底床高程差比較_驗證案例

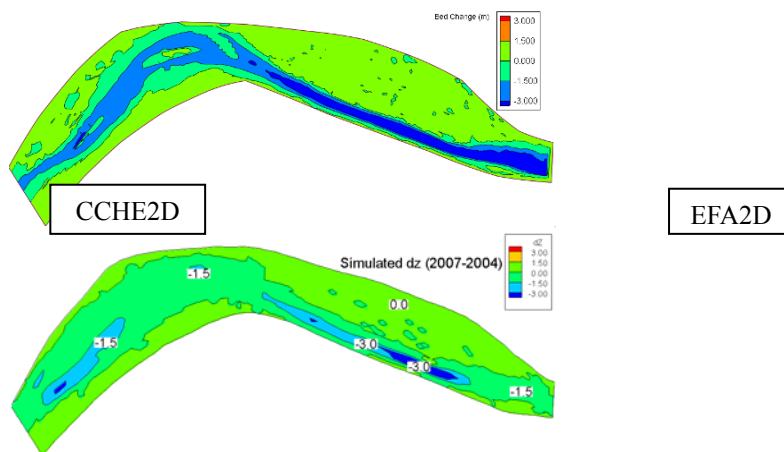


圖 5 集集堰下游段模擬底床高程差比較_檢定案例

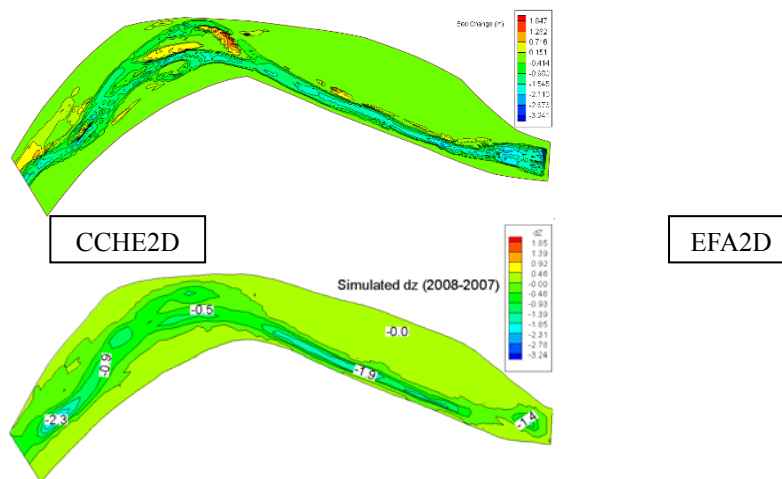


圖 6 集集堰下游段模擬底床高程差比較_驗證案例

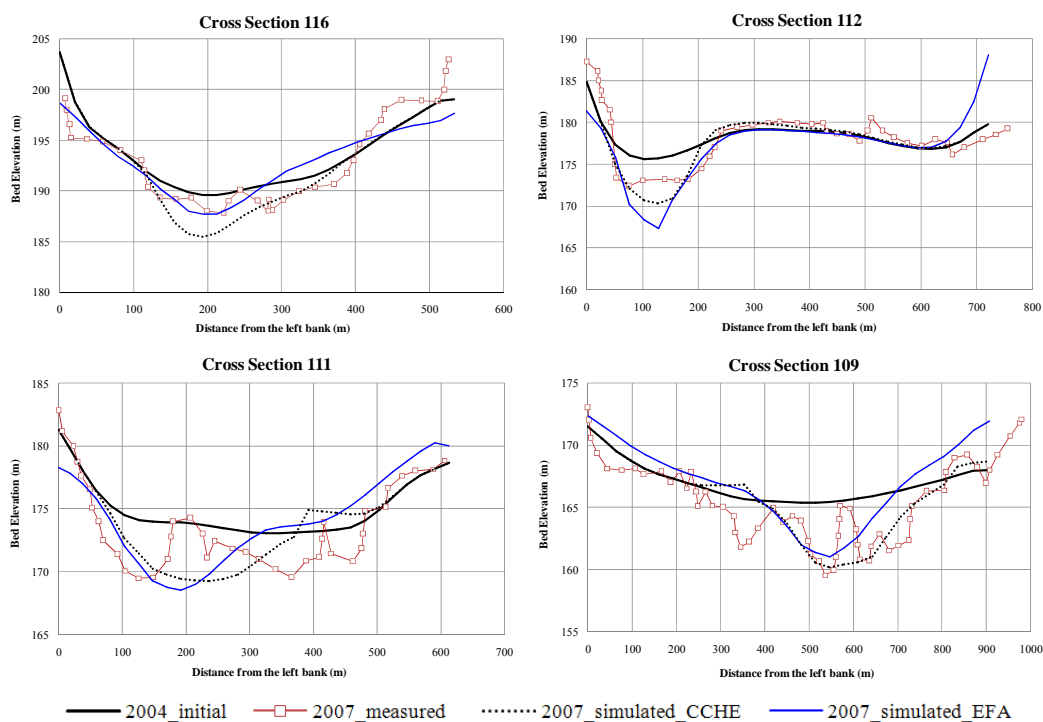
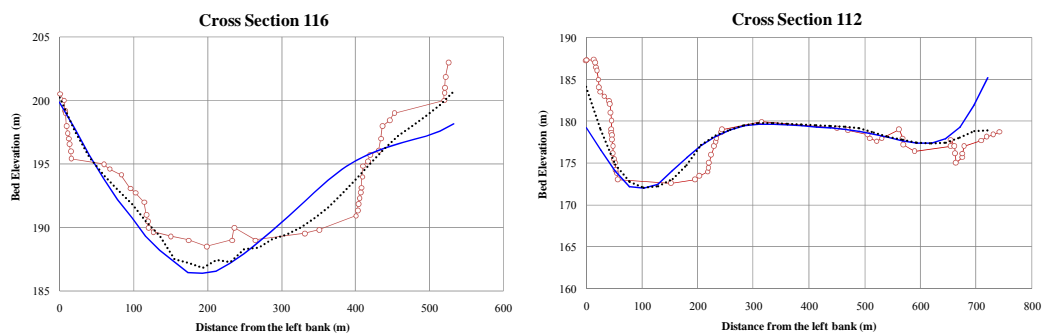


圖 7 檢定案例模擬終了之斷面變化



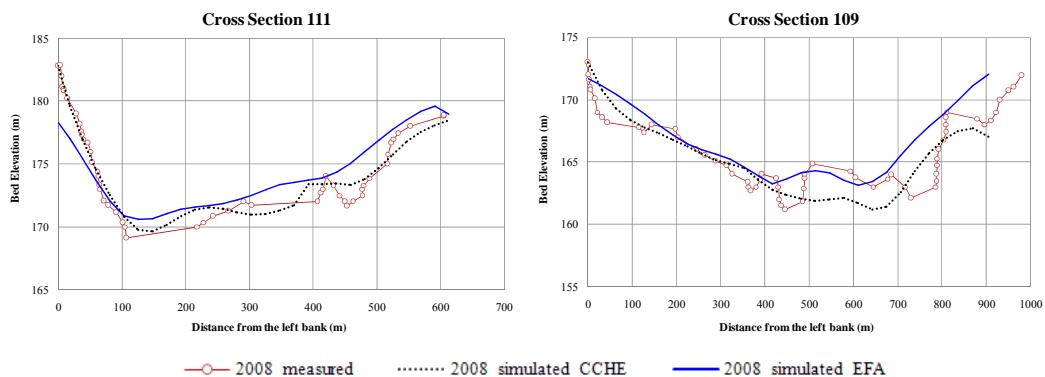


圖 8 驗證案例模擬終了之斷面變化

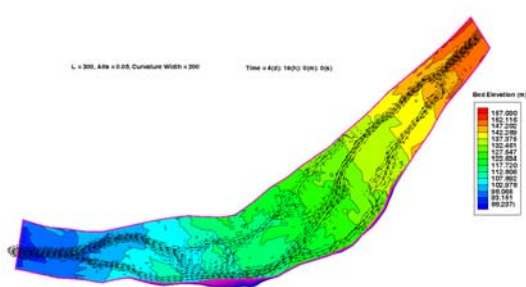


圖 9 名竹大橋至彰雲大橋模擬岸壁沖刷情形 (紫色區塊)

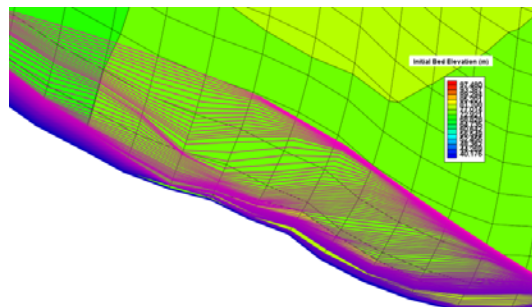


圖 12 彰雲大橋至斷面 70 模擬岸壁沖刷情形局部放大

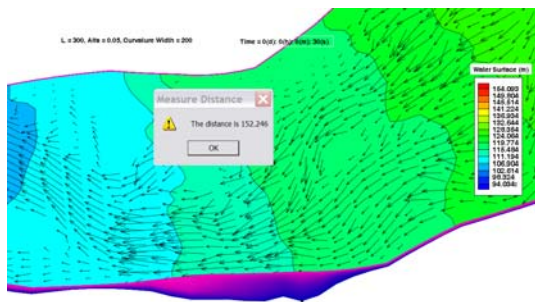


圖 10 名竹大橋至彰雲大橋模擬岸壁沖刷情形局部放大

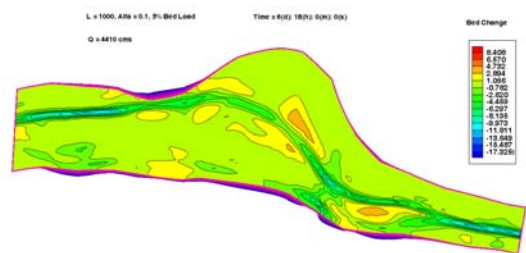


圖 11 彰雲大橋至斷面 70 模擬岸壁沖刷情形 (紫色區塊)

六、結論與建議

本研究以濁水溪為例，進行 CCHE1D、CCHE2D 模式之引進與應用研究，針對模式功能等進行概述與回顧比較，分年進行如大範圍河道沖淤變化、水工建造物上下游局部沖淤變化、河道岸壁沖刷及側向變遷等之數模研究，獲得以下結論與建議：

1. 由 CCHE1D、CCHE2D 模式基本理論、功能限制等回顧可知，模式特點如超亞混合流處理技巧、輸砂公式等，皆經過美國及其他各國河川案例應用，並將其成果多次發表於國際期刊，相較目前台灣常見之商用動床模式先進且精準。
2. 在濁水溪大範圍河道沖淤變化、集集堰上下游局部沖淤模擬中，CCHE1D、CCHE2D 模式有良好之模擬結果，檢定驗證與實測大斷面相比趨勢相近，且具有使用迅速、介面友善、易上手之特性，說明模式頗有實用價值。
3. 在中下游河道岸壁沖刷模擬中，目前國內外常見之二維動床模式此功能尚未完善，而 CCHE2D 模式在濁水溪案例之逐步測試下，藉由相關資料之測試與檢定驗證，此功能日趨成熟。

4. 在動床數模模擬中，上游入砂之粒徑級配給定相當重要，河床質資料亦相當重要。但目前濁水溪此二種類型之資料皆相當缺乏，必須透過適當假設或簡化以進行模擬，使得模擬成果或未來數模案例應用、預測上存在不確定。因此，建議能對各測站之入砂量粒徑級配進行分析研究，並增加取樣次數、頻率，同時在河床質調查過程中，進行垂向分層之取樣等，以利後續濁水溪相關研究之推動。

謝誌

本研究由水利署水利規劃試驗所經費資助與相關資料之提供，美國國家計算水科學及工程中心協同研究，同時感謝國家高速網路與計算中心提供軟硬體資源(IBM P690 主機)，使本研究得以順利進行。

參考文獻

1. 經濟部水利署水利規劃試驗所 (2007)，「美國國家計算水科學及工程中心河道變遷模式之引進及應用研究(1/3)」。
2. 經濟部水利署水利規劃試驗所 (2008)，「美國國家計算水科學及工程中心河道變遷模式之引進及應用研究(2/3)」。
3. Hsu, C.T. and Yeh, K.C. (2002), "Iterative explicit simulation of 1-D surges and dam-break flows." *Int. J. for Numerical Methods in Fluids*, 38, 647-675.
4. Sklar, L.S., and Dietrich, W.R. (2004), "A mechanistic model for river incision into bedrock by saltating bed load." *Water Resources Research*, 40:W06301, doi:10.1029/2003WE002496.
5. van Rijn, L.C. (1984a), "Sediment Transport, Part I: Bed Load Transport", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 110, No. 11, 1431-1456.
6. van Rijn, L.C. (1984b), "Sediment Transport, Part II: Suspended Load Transport", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 110, No. 11, 1613-1641.
7. van Rijn, L.C. (1993), "Principles of Sediment Transport in Rivers Estuaries and Coastal Seas.", Aqua Publications, The Netherlands.
8. Wu, W., and Wang, S. S.Y. (1999), "Movable bed roughness in alluvial rivers." *J. Hydr. Eng.*, ASCE, 125(12), 1309-1312.
9. Wu, W., Wang, S.S.Y., and Jia, Y. (2000), "Nonuniform sediment transport in alluvial rivers." *J. Hydr. Res.*, IAHR, 38(6), 427-434.
10. Wu, W. and Vieira, D. A. (2002), "One-dimensional channel network model CCHE1D 3.0 -- Technical manual," Technical Report No. NCCHE-TR-2002-1, National Center for Computational Hydroscience and Engineering, University of Mississippi, USA.
11. Wu, W. and Wang, S.S.Y. (2003), "Selection and evaluation of nonuniform sediment transport formulas for river modeling." *Proc. XXXth IAHR Congress*, Thessaloniki, Greece.
12. Wu, W. and Wang, S. S. Y. (2004a), "Depth-averaged 2-D calculation of flow and sediment transport in curved channels," *Int. J. Sediment Res.*, 19(4), 241-257.
13. Wu, W. and Wang, S. S. Y. (2004b), "Depth-averaged 2-D calculation of tidal flow, salinity and cohesive sediment transport in estuaries," *Int. J. Sediment Res.*, 19(3), 172-190.