

行政院國家科學委員會專題研究計畫 期中進度報告

河口與近海三維水理與鹽分分佈模式之發展與應用(1/2)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC91-2211-E-002-038-

執行期間：91年08月01日至92年07月31日

執行單位：國立臺灣大學水工試驗所

計畫主持人：柳文成

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 92 年 5 月 22 日

目 錄

	頁 次
第一章 導論	1
1-1 前言	1
1-2 研究目的	1
1-3 文獻回顧	2
第二章 淡水河系及其近海概述與水文、水理資料蒐集分析	4
2-1 淡水河系改概況	4
2-2 淡水河近海概述	4
2-3 水文與水理基本資料之蒐集與整理	5
2-4 數值網格的產生	5
2-5 實測潮位資料之分析	5
2-5-1 資料之篩選	6
2-5-2 潮位調和分析	6
2-6 全潮測量流速數據分析	7
第三章 數值模式之建立	16
3-1 控制方程式	16
3-2 數值解法	18
第四章 模式之檢定與驗證	23

4-1 模式之初步檢定	23
4-2 綜合潮之細部檢定	25
4-3 模式之驗證	25
4-4 河口環流分析	26
4-5 參數敏感度分析	26
第五章 初步結論	65

表目錄

	頁次
表 2-1 近海潮位資料調和分析之結果	8
表 2-2 淡水河系潮位資料調和分析之結果	9
表 4-1 淡水河系之平均潮位	27
表 4-2 以 M_2 分潮初步檢定結果	27
表 4-3 外海東、西邊界所使用之振幅與相位角	28
表 4-4 模式模擬與實測數據之分潮振幅與相位角之比較(淡水漁港 及石門麟山鼻)	28
表 4-5 模式模擬與實測數據之分潮振幅與相位角之比較(富岡漁港 及淡水河外海觀測樁)	29
表 4-6 模式模擬與實測數據之分潮振幅與相位角之比較(淡水河口 與土地公鼻)	29
表 4-7 模式模擬與實測數據之分潮振幅與相位角之比較(台北橋與 入口堰)	30
表 4-8 模式模擬與實測數據之分潮振幅與相位角之比較(新海橋)	30
表 4-9 模式模擬與實測數據之分潮振幅與相位角之比較(中正橋與 大直橋)	31

圖目錄

	頁次
圖 2-1 淡水河系之示意圖	10
圖 2-2 潮位站實測時序數據數例 - 河口站、中正橋、秀朗橋站 (近感潮段終點)	11
圖 2-3 淡水河近海潮流橢圓(左上)及平均流在上層(右上)、中層(左下)、底層(右下)的分佈	12
圖 2-4 TSNOW 模式模擬分析之台灣海峽 M_2 分潮之等振幅與等相位圖	13
圖 2-5 淡水河口至竹圍段內插斷面示意圖	14
圖 2-6 淡水河系與外海之水深圖	14
圖 2-7 淡水河與近海之數值網格	15
圖 3-1 垂直座標系統	22
圖 3-2 自由水面位移中心水平格網	23
圖 4-1 數值網格與外海之邊界	32
圖 4-2 淡水河 - 大漢溪模式模擬平均潮差與實測結果之比較	32
圖 4-3 新店溪模式模擬平均潮差與實測結果之比較	33
圖 4-4 基隆河模式模擬平均潮差與實測結果之比較	33

圖 4-5 模式模擬與實測數據之分潮振幅與相位角之比較(淡水漁港)	34
圖 4-6 模式模擬與實測數據之分潮振幅與相位角之比較 (石門麟山鼻)	35
圖 4-7 模式模擬與實測數據之分潮振幅與相位角之比較(富崗漁港)	36
圖 4-8 模式模擬與實測數據之分潮振幅與相位角之比較 (淡水河外海觀測樁)	37
圖 4-9 模式模擬與實測數據之分潮振幅與相位角之比較 (淡水河河口)	38
圖 4-10 模式模擬與實測數據之分潮振幅與相位角之比較 (土地公鼻)	39
圖 4-11 模式模擬與實測數據之分潮振幅與相位角之比較(台北橋)	40
圖 4-12 模式模擬與實測數據之分潮振幅與相位角之比較(入口堰)	41
圖 4-13 模式模擬與實測數據之分潮振幅與相位角之比較(新海橋)	42
圖 4-14 模式模擬與實測數據之分潮振幅與相位角之比較(中正橋)	43
圖 4-15 模式模擬與實測數據之分潮振幅與相位角之比較(大直橋)	44
圖 4-16 民國 89 年大漢溪、新店溪與基隆河上游邊界之日流量資料	45
圖 4-17 淡水漁港實測水位與模式模擬水位之比較	46
圖 4-18 石門鄉麟山鼻實測水位與模式模擬水位之比較	47
圖 4-19 淡水河河口實測水位與模式模擬水位之比較	48

圖 4-20 土地公鼻實測水位與模式模擬水位之比較	49
圖 4-21 台北橋實測水位與模式模擬水位之比較	50
圖 4-22 入口堰實測水位與模式模擬水位之比較	51
圖 4-23 新海橋實測水位與模式模擬水位之比較	52
圖 4-24 中正橋實測水位與模式模擬水位之比較	53
圖 4-25 大直橋實測水位與模式模擬水位之比較	54
圖4-26 全潮觀測流速與模式模擬結果之比較 (a)關渡橋 (b)台北橋 (民國 89 年 5 月 5 日)	55
圖4-27 全潮觀測流速與模式模擬結果之比較 (c)新海橋 (d)中正橋 (民國 89 年 5 月 5 日)	56
圖4-28 全潮觀測流速與模式模擬結果之比較 (e)百齡橋 (民國 89 年 5 月 5 日)	57
圖 4-29 河口環流示意圖	58
圖 4-30 淡水河河口殘餘流速之時序變化	59
圖 4-31 關渡橋殘餘流速之時序變化	60
圖 4-32 台北橋殘餘流速之時序變化	61
圖 4-33 糙率高度對水位之敏感度分析 (a)淡水漁港 (b)淡水河河口	62
圖 4-34 糙率高度對水位之敏感度分析 (c)土地公鼻 (d)台北橋	63
圖 4-35 糙率高度對水位之敏感度分析 (e)中正橋 (f)大直橋	64

第一章 導論

1-1 前言

河口(Estuaries)及感潮河川(Tidal River)因為水量充足、航運方便，水體利用價值高，往往成為人口集中之地域，很多著名之大港（如上海、巴爾提摩、漢堡等）及國家首都（如台北、華盛頓、，倫敦等）皆座落於河口或感潮河川上，在本世紀後半期，由於工商發達，人口大量集中，人類對於河川的高度利用，很多河口及感潮河川之水體已呈不勝負荷之狀態，不僅水生環境與水生資源遭受破壞，甚至有污染嚴重者，水質惡劣到影響人體健康、都市景觀。故近三、四十年來，各工業化國家對河口及感潮河川的研究及整治，皆不遺餘力，主要是在求瞭解河口及感潮河川之水理及水質狀況，掌握水體之污染物涵容能力，俾便對水體作最高度的有效利用，期能保持水體之健康。

感潮河段是連接河川與海洋此兩大具有其獨特性質體系的過渡區域。上游河川的主要特色為兩側具有固體邊界、流體為淡水、沿著流向有底床坡度、且洪水波具有傳播之性質；下游為海洋，其特色為沒有固體邊界、流體為鹽水、沒有固定之流向、潮水波組成成份複雜。由於此兩大系統的交會，造成此處豐富且多變與複雜的生態環境，可提供人類食物、水源，並可作為連接海洋、內陸間運輸之管道，因此自古以來人類文明的發源地多在河口。

河口區域是一個半封閉的沿海岸水體，與鄰近的海域自由流通，既具有內陸河流的特徵：如逕流流量的洪、中、枯水期等的季節變化，又有海洋的某些特徵：如潮汐的漲落，大、中、小潮的變化，而且還受風浪的作用，對流速會產生影響。同時，在河口區由於海水與淡水在此交會，兩者的密度不同，故會有鹽分入侵的問題，其水理特性亦特別複雜。

臺灣四面環島，對於河口資源利用頗多，相對地也對河口之環境造成影響。隨著都市人口之增長、工商業之發達、大型社區的開發等污染源之污染，河川水質不佳。繼而受感潮作用之影響，污染物於下游感潮河段內推移、沈積，使河川與海洋污染情形與日俱增。要防制污染必需先瞭解污染物在河川與海洋中對流及擴散之情形，才能有效提出防治對策。

河口與近海水動力程序於現今複雜地形及底床變化通常包括三維潮流的作用，河口之潮汐環流及質量傳輸主要仍受到複雜地形及底床的影響，局部的地形及底床變化可以影響不同河口及近海之流況及物質傳輸。因此，精確模擬因為潮汐、風及密度流所引致的河口及近海流況，數值模式必須能夠精確及有效地解決不同垂直邊界層的動力及複雜的地形及底床變化。

河口與感潮河段為河川流域及近海海洋水與物質交換必經之通道，淡水河系為台灣最大之感潮河川，其感潮河段包括三大支流：大漢溪、新店溪與基隆河，而淡水河近海因有八里污水處理與截流污水管線之海洋放流，排放之廢污水是否會隨著近岸潮流，將廢污水迴流入淡水河系是值得探討之問題。因此對於河口、感潮段與近海潮流動力之瞭解更為重要。

1-2 研究目的

感潮河川、河口及近岸之水理流況與鹽分分佈之模擬，對污染物在河、海間傳輸之瞭解為重要的關鍵所在，與河川水體生態保育及河口生態系統環境有著密切的關聯性。本研究將以三維水動力模式為理論基礎，發展 - 適用於淡水河系、河口及近海三維水理與鹽分分佈模式，以作為後續研究水質、細泥傳輸、生態及毒性物質的先驅工具。模式應用於探討淡水河河口及近海之水動力特性與鹽分分佈變化，模式建立後，將以實測之水理數據（水位、流速等）及鹽分分佈數據，作為三維模式檢定與驗證之依據。

1-3 文獻回顧

國外有關河口水理之研究 Pritchard (1952, 1954, 1956) 發表其在 James River 及 Chesapeake Bay 的研究成果後，河口感潮川之水理研究如雨後春筍般的發展，發表之文獻也日益增多，重要者有 Hansen and Rattray (1965, 1966, 1967) 對河口環流所作之理論解析，Ippen and Haleman (1966) 對潮流傳遞之探討，Ianuiello (1977) 推導潮流所引起之餘流(Residual Current)、Haas (1977) 首先闡述大潮、小潮週期之變化對鹽分垂直分佈之影響，Elliott (1978) 觀測河口環流隨氣象因子變化，Dyer (1973, 1977, 1989) 首先重視河道彎曲及斷面變化對側向環流(Transverse Circulation)之形成，以及 Pritchard (1989) 所作之綜合性討論及河口水理研究之展望。隨後 Kuo et al. (1990) 對河口環流之穩定性及其與淡水河流量之關係有更深入之研究。

由於電腦科技的快速發展，國外目前有許多的河口及近海三維數值模式，例如用於美國東岸 Chesapeake Bay 之 CH3D-WES (Curvilinear Hydrodynamics in Three-Dimensions-Waterways Experiment Station, Johnson et al., 1993)，邊界適用格網法之三維水理模式(Sheng, 1989)，三維邊界適合河口環流模式(Muin and Spaulding, 1997)，曲線三維多層河口及海岸模式(Wang, 1994)，HEM3D (Three-dimensional Hydrodynamic Eutrophication Model, Park et. al., 1995)，ECOM (Estuarine, Coastal and Ocean Model, Blumberg, 2001) POM (Princeton Ocean model, Mellor, 1996) 及目前最新的三維模式 UnTRIM(Unstructured Grid for Tidal, Residual, Intertidal Mudflat-3D, Casulli and Walters, 2000) 等不勝枚舉。

有關國內河口水理之研究，大都侷限於潮流與河川淡水流之觀測與分析，較少作河口環流與鹽分分層之觀測與研究，有鑑於淡水河流經台北都會區之重要性，台灣省水利局（現為台灣省水利處）於 1965 年開始設立觀測站，觀測河川水理狀況，復於 1969 年成立「淡水河水理觀測隊」對淡水河之水理作長期觀測，每年擇期觀測全潮潮水位及流速之變化並測量河道斷面，數十年來累積不少資料。又台北區衛生下水道規劃小組於 1969 年對淡水河系之河川水質作系統性之觀測。在數據分析方面有前經濟部水資會（現已併入經濟部水資源局，後更名為經濟部水利署）對土地公鼻及獅子頭的潮水位作調和分析，計算各主要分潮之振幅與相差，另有張瑞津、石再添(1989)對淡水河系感潮段作一系列的觀測與數據分析，描述潮波之傳播，並簡略歸納海水鹽分之分佈狀況，是國內對河口及感潮河川作較系統性的研究之一。

國內數值模式之發展，早期有許時雄(1969)採用河口與關渡兩個斷面，寫成方程式的差分式之初步研究，另歐陽嶠暉用 Camp(1963)之方程式和台北區衛生下水道規劃小組蒐集之數據，對淡水河溶氧分佈情形加以研究。對於淡水河感潮河段水理數值模式之廣泛利用，主要在 1980 年之後，包括顏清連與許銘熙(1982)，前經濟部水資會(1983)，郭振泰與陳樹群(1984)，溫清光(1988)，洪政豐(1988)，陳筱華(1989)，許銘熙、張尊國、柳文成與連上堯 (1989, 1990)，柳文成(1990)，李禎昌(1990)，王順明(1992)，陳建維(1994)、李鴻源(1994)，劉景毅(1999)等。

上述國內發展之河口與感潮河川之數值模式，無法模擬河口鹽分分層及河口環流現象，及至近期許銘熙、郭義雄、郭振泰及柳文成(1995, 1996, 1997)，柳文成(1998)才發展出淡水河系之感潮河川及河口垂直二維模式，可用以模擬淡水河系之水理狀況，鹽分分佈及河口環流現象。由於垂直二維模式無法模擬淡水河近海之水理及鹽分分佈，仍需要三維模式將河口邊界推展至近海，使得河與海聯成一系，一併予以模擬。

第二章 淡水河系及其近海概述與水文、水理資料蒐集分析

2-1 淡水河系概況

淡水河位於台灣北部，源於標高3,529公尺之品田山，主流自發源地至出海口之平均坡降約四十五分之一；整個河系流域面積2,726平方公里，就流域面積及河流長度而言，則次於高屏溪及濁水溪，為全省第三大河川。歷年平均逕流量則僅次於高屏溪，淡水河流域由三條主要支流匯流而成，為大漢溪、新店溪及基隆河(如圖2-1所示)，其中南北向之大漢溪及新店溪於江子翠匯流後構成淡水河本流，流至關渡再與東西向之基隆河匯流，最後在淡水鎮油車口附近流入台灣海峽。

淡水河系河道總長約計327.6公里，三條支流中以大漢溪為最長，全長約 135 公里，流域面積約 1163 平方公里，主要支流有三峽河與橫溪。新店溪全長約 84.6 公里，流域面積 916 平方公里，其主要支流為北勢溪與南勢溪，兩溪於龜山下游匯合後始稱為新店溪。基隆河發源於台北縣菁桐山，流經瑞芳鎮、基隆市之暖暖區、七堵、汐止，再沿著台北市內湖與南港交界，由內湖與台北市舊市區之邊界進入士林，最後沿著士林、北投交界，在關渡附近與淡水河匯流。主流全長 87 公里，流域面積 501 平方公里，為三條支流中流量最小者。大漢溪與新店溪在江子翠匯流後始稱淡水河，自匯流處至出海口長 21 公里，流域面積 146 平方公里。

就流域區之雨量而言，以基隆河流域年雨量3,969公厘為最高，其次為新店溪流域為3,251公厘，而以大漢溪流域2,430公厘最小。就流量而言，淡水河流域水位流量觀測始於民國25年，歷年來共設水位站27處，流量站(包括水位流量站

及流量站)48處，目前淡水河流域內有4處水位站及20處流量站仍在繼續觀測中。根據各觀測站的統計分析得知，淡水河流域三支流之流量以新店溪最大，大漢溪次之，而以基隆河最小；枯水期則略有不同，大漢溪與新店溪為每年十一月至翌年五月，而基隆河則為三月至八月。

淡水河本流全屬感潮河段，而大漢溪感潮範圍遠至城林橋附近，故淡水河至大漢溪主流感潮長度約 32 公里，其河床坡度於浮洲橋以上急劇變陡且河床漸高於海平面，平均潮差於浮洲橋以上逐漸變小。新店溪自新店溪口至秀朗橋上游 3 至 4 公里處均屬感潮河段，長約 13 公里，新店溪河床自秀朗橋以上逐漸增高且漸高於海平面。至於基隆河自基隆河口至汐止江北橋以上均屬感潮河段，感潮終點約為江北橋以上至五堵水文站間，感潮長度約 31 公里，平均潮差自江北橋以上逐漸減小。淡水河系之潮汐動力源自河口潮波由河口向上游傳播，圖 2-2 為淡水河河口、新店溪中正橋及秀朗橋水位站之時序水位紀錄，河口站接近外海，其水位之變動主要為主太陰半日潮(M_2 tide)，常年平均潮差 2.17 公尺，大潮潮差可高達 3 公尺，潮波向內傳播，因受河道收縮與潮波反射等因子之影響，潮差有增加之趨勢，在新店溪中正橋處，高潮水位比河口高潮水位高，低潮水位則比河口處低，而高低潮的時間比河口站晚，新店溪秀朗橋已接近感潮段之終點，其感潮現象相當微弱(柳文成等,2003)。

2-2 淡水河近海概述

淡水河近海的地形變化由近岸向外海處逐漸加深，潮波的傳遞於漲潮時是由北海岸向南傳遞，退潮時則反方向由中部以北向北海岸方向傳遞。根據王玉懷(2002)於淡水河近海之實測資料說明，以圖 2-3 解讀淡水河近海三度空間的流場，圖中為潮橢圓及平均流在上層、中層與底層的分佈，潮流基本上順著沿岸方向作往複運動，最大潮流振幅達 125 公分/秒。地形水深會影響潮流的大小，如台北港右側水淺，海底摩擦阻力較強，流速變弱，淡水河口外側深水處因流面增加流速也較緩和。沙崙北側轉角處流速最強，可能是潮流在此受到擠壓效應所

致。潮流於垂直方向的變化較少，平均流則有較大的垂直變化。上層海流 (圖 2-3 右上)以東北向為主(退潮流的方向)，沙崙北側深水(約 70 公尺)處流速達 50 公分/秒，流速向岸邊遞減，淡水河口外有 20 公分/秒向岸流，河口南側有微弱西南流。中層海流普遍流向東北，流速比上層海流弱，沙崙北側強流約 35 公分/秒，淡水河口南側也是東北向流，流速減至 10 公分/秒。底層海流較弱，降至 20 公分/秒的東北向流，台北港及河口水深均不到 40 公尺，僅沙崙外側有東北向流。

圖 2-4 為海科中心台灣海峽即時預報模式(Taiwan Strait Nowcast System, TSNOW)所模擬之結果經果分析所得之 M_2 分潮之等振幅與等相位角，由等相位角可知潮波由台灣東北角向南傳播，至台灣中部因北向南及南向北潮流交會，振幅高達 2 公尺，於本研究區域的 M_2 分潮振幅約為 0.5 公尺至 1.4 公尺間。

中央氣象局於淡水河沿岸近海之潮位觀測站有桃園竹圍、淡水漁港、石門麟山鼻，非中央氣象局的潮位測站則有台電核一廠站；另國科會海洋科學研究中心於富崗漁港及淡水河外海之觀測樁設有潮位觀測站。

2-3 水文與水理基本資料之蒐集與整理

三維數值模式所需資料包括幾何斷面形狀、潮位資料、上游流量記錄(包括有三鶯橋、三峽河、橫溪、秀朗橋、五堵站等非感潮段最下游之流量站)、全潮觀測流量、水位、流速及鹽分分佈等資料均取自經濟部水利署。本研究蒐集淡水河系民國89年之幾何斷面資料，由河川的大斷面資料再加以內差，形成較密的河川大斷面，以便於後續數值網格的產生，見圖2-5；至於近海之水深資料則由國

家海洋科學中心的網站下載後加以整理分析，淡水河系與其近海之水深圖見圖

2-6所示，由圖中顏色較深處即為水深較深的地方。

2-4 數值網格的產生

三維數值模式之計算很重要的步驟是數值格網的建立，因模式涵蓋淡水河系與外海，在產生正交性(Orthogonal)的網格並不容易，本研究使用ArcView GIS與Matlab兩種軟體，配合格網產生的程式，經過多次反覆的修改網格，最後建立淡水河系與其近海之數值網格見圖2-7所示，淡水河系之上游邊界位於大漢溪之城林橋、新店溪之秀朗橋與基隆河之五堵，外海延伸至距離淡水河口約 21公里，外海之東西向距離約為34公里。

2-5 實測潮位資料之分析

2-5-1 資料之篩選

由經濟部水利署第十河川局蒐集之民國9年(2000年)逐時潮位資料包括有河口、土地公鼻、獅子頭、台北橋、入口堰、新海橋、中正橋、大直橋等站，因潮位資料中偶有因淤砂或測站附近施工而短缺或有明顯不合理值，予以剔除不用；偶有部分時段無水位紀錄資料者均予以捨棄。另由中央氣象局蒐集淡水河近海沿岸民國89年之潮位逐時資料，包括有新竹、桃園竹圍、淡水漁港、石門鄉麟山鼻等測站，及富崗漁港及淡水河外海觀測樁之潮位觀測站。利用上述潮位站逐時觀測資料加以分析。

2-5-2 潮位調和分析

水面在高、低潮間之水位差稱為潮差(Tidal Range)，潮差會受到地形限制或大小潮之影響而有不同之變化。由於日、月、地球之相對位置亦有長則一年，短至半天的週期變化，故利用調和分析分離出不同之週期分潮對潮差之影響。

影響台灣外海之主要分潮為 M_2 、 S_2 、 N_2 、 K_1 及 O_1 分潮(Jan et al., 2001)，其分潮週期分別為12.42小時、12小時、12.66小時、23.93小時及25.82小時，其中 M_2 、 S_2 及 N_2 分潮屬於半日潮， K_1 及 O_1 分潮為全日潮。為了分析各種週期分潮之影響，本研究分別選用5個分潮作調和分析，其中調和分析的結果會得到殘餘水位差(Residual Water Surface Elevation Difference)是由調和分析所得綜合潮之水位與實測水位之差的均方根，即是；

$$RWSED = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\eta(t_i) - \eta_p(t_i)]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2-1)$$

式中， $\eta(t)$ 為實測水位； $\eta_p(t)$ 為綜合潮之水位， $\eta_p(t) = \bar{\eta} + \sum_{k=1}^m a_k \cos(w_k t - \theta_k)$ 。 $\bar{\eta}$ 為實測平均水位； w_k 為分潮之角速度(Angular Velocity)，即是 $\frac{2\pi}{T_k}$ ， T_k 為分潮週期； a_k, θ_k 為調和分析所得之分潮振幅及相位角； m 為使用之分潮數目。潮波

能量比(Energy Ratio)則代表綜合潮所代表之能量與實測水位波動能量之百分比，可表示為(Hsu et al. 1999)：

$$ER = \frac{\sum [\eta_p(t_i) - \bar{\eta}]^2}{\sum [\eta(t_i) - \bar{\eta}]^2} \times 100\% \quad (2-2)$$

若殘餘水位差愈小，潮波能量比愈趨近於1.0，意即綜合潮愈接近於實測水位高程。表 2-1與表2-2為調和分析後所得之結果，分別為近海與淡水河主流、大漢溪、新店溪及基隆河各潮位測站五個分潮之分潮振幅及相位角。

2-6 全潮測量流速數據分析

經濟部水利署第十河川局於民國9年5月5日於淡水河系不同之測站斷面 (Cross Section)進行全潮測量，每半小時量測一次，延續一個潮汐週期，在水深方向量測2個測點，分別是 $0.2h$ 與 $0.8h$ ，在寬度方向依河寬之大小，於每個斷面設置四至六艘測船，其全潮量測之測站有關渡橋、台北橋、新海橋、中正橋及百齡橋。本研究依據全潮量測資料作為模式對流速 (barotropic flow)檢定及驗證之數據。

表2-1 近海潮位資料調和分析之結果

分潮	桃園竹圍		淡水漁港		石門麟山鼻	
	振幅	相位角	振幅	相位角	振幅	相位角
	(公分)	(度)	(公分)	(度)	(公分)	(度)
M_2	123.59	178.98	104.41	177.52	75.74	177.18
S_2	34.52	-5.50	28.56	-9.99	20.10	-12.97
N_2	22.52	-80.13	20.19	-81.42	14.61	-87.21
K_1	21.20	-113.92	20.72	-118.98	20.11	-119.99
O_1	17.48	75.02	17.26	71.48	17.25	67.58

分潮	淡水河外海觀測樁		富崗漁港	
	振幅	相位角	振幅	相位角
	(公分)	(度)	(公分)	(度)
M_2	107.40	-166.18	68.84	170.18
S_2	30.51	-82.04	17.93	-17.04
N_2	22.04	-75.26	15.16	-102.76
K_1	22.05	-125.00	22.72	-119.00
O_1	17.35	68.47	17.54	68.25

表2-2 淡水河系潮位資料調和分析之結果

分潮	淡水河河口		土地公鼻		台北橋	
	振幅	相位角	振幅	相位角	振幅	相位角
	(公分)	(度)	(公分)	(度)	(公分)	(度)
M_2	105.68	179.34	104.83	-168.62	103.45	-166.20
S_2	29.02	-8.10	26.21	4.88	24.44	11.29
N_2	19.97	-81.79	17.98	-67.98	20.06	-63.02
K_1	20.76	-117.70	17.10	-113.65	14.10	-111.14
O_1	17.01	72.60	13.27	76.35	10.45	68.47

分潮	入口堰		新海橋		中正橋		大直橋	
	振幅	相位角	振幅	相位角	振幅	相位角	振幅	相位角
	(公分)	(度)	(公分)	(度)	(公分)	(度)	(公分)	(度)
M_2	104.44	-149.32	103.27	-154.36	102.22	-155.18	95.94	-143.95
S_2	26.22	31.32	26.14	27.10	28.15	24.56	22.36	39.43
N_2	17.68	-48.09	18.55	-53.66	19.86	-53.74	14.24	-41.62
K_1	14.68	-104.72	14.50	-106.86	16.15	-106.56	11.80	-92.19
O_1	11.15	84.08	11.75	80.50	12.61	84.38	11.32	85.83

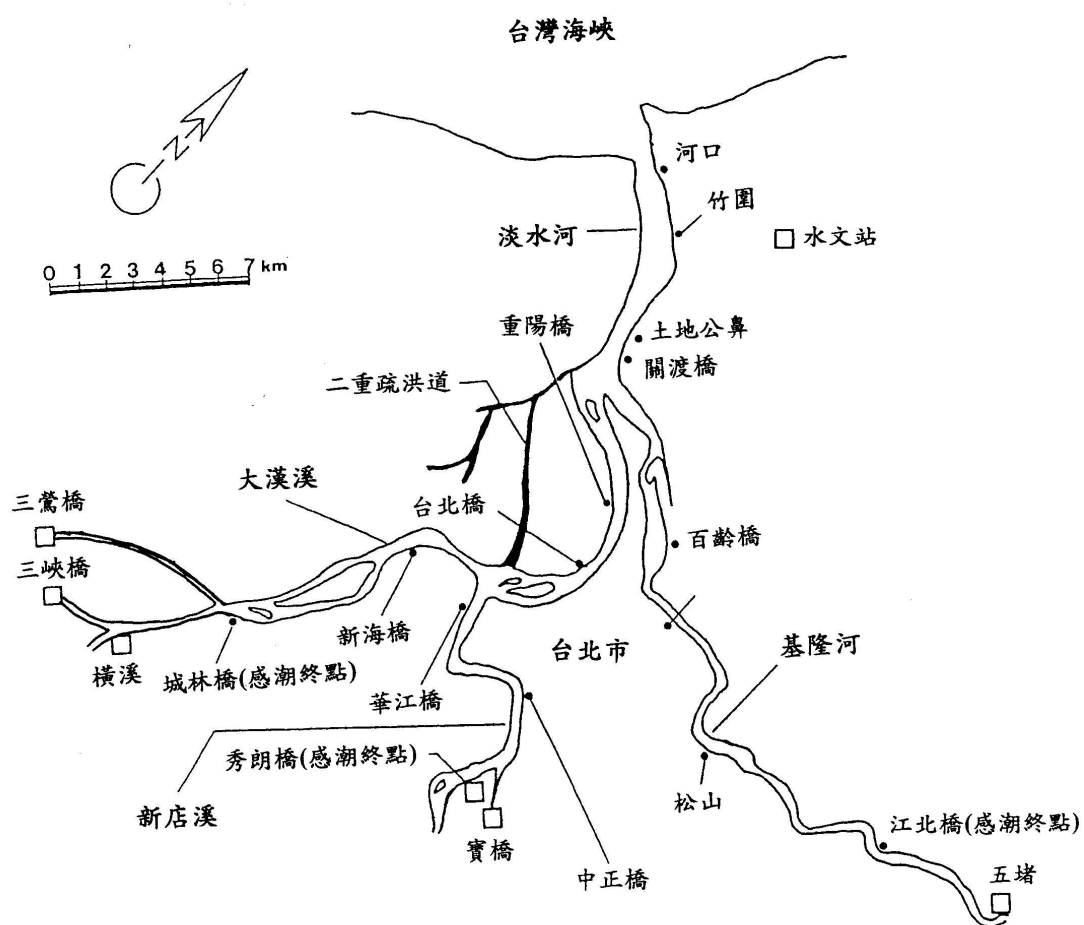


圖2-1 淡水河系之示意圖

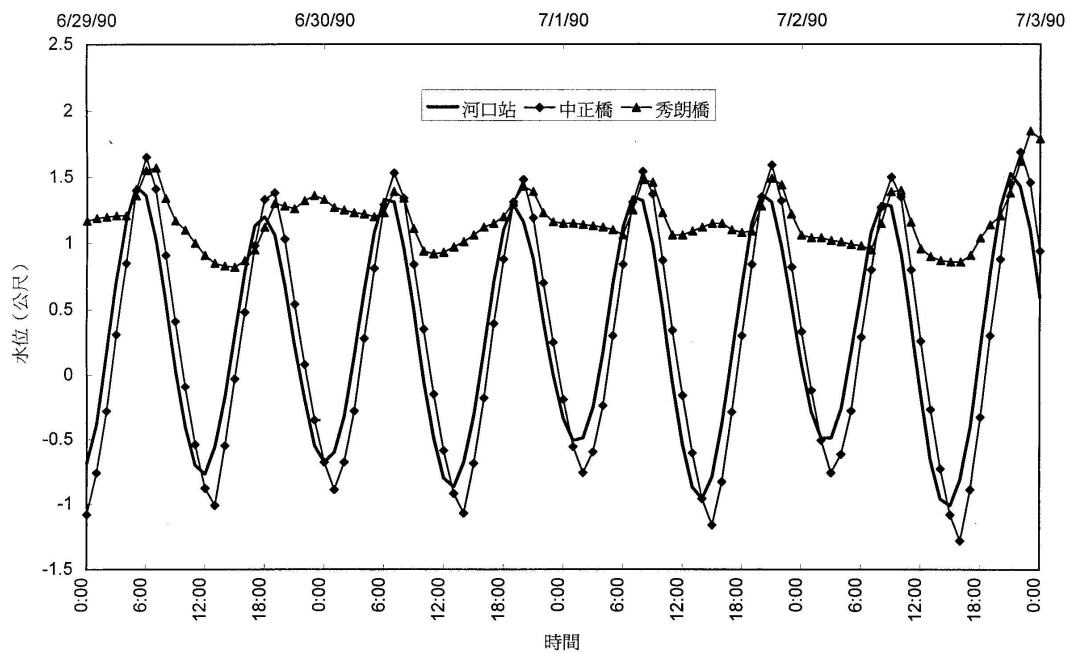


圖 2-2 潮位站實測時序數據數例 - 河口站、中正橋、秀朗橋站 (近感潮段終點)

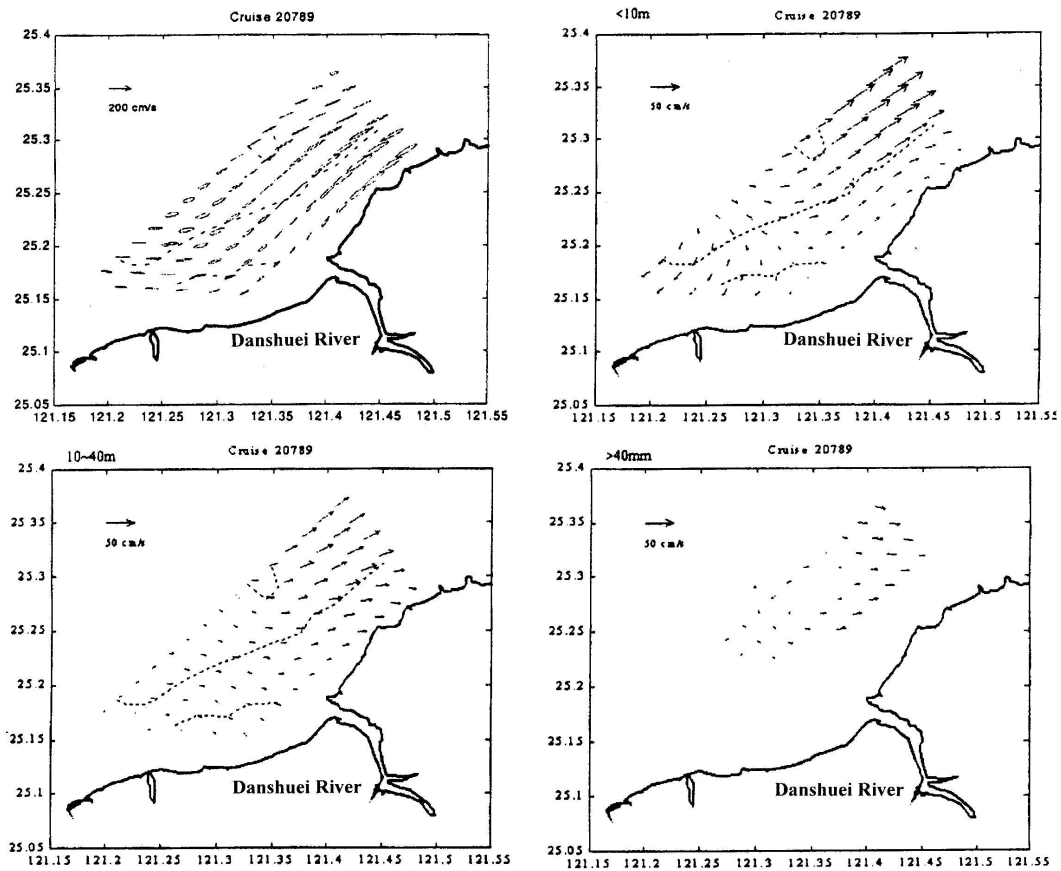


圖2-3 淡水河近海潮流橢圓(左上)及平均流在上層(右上)、中層(左下)、底層(右下)的分佈 (王玉懷，2002)

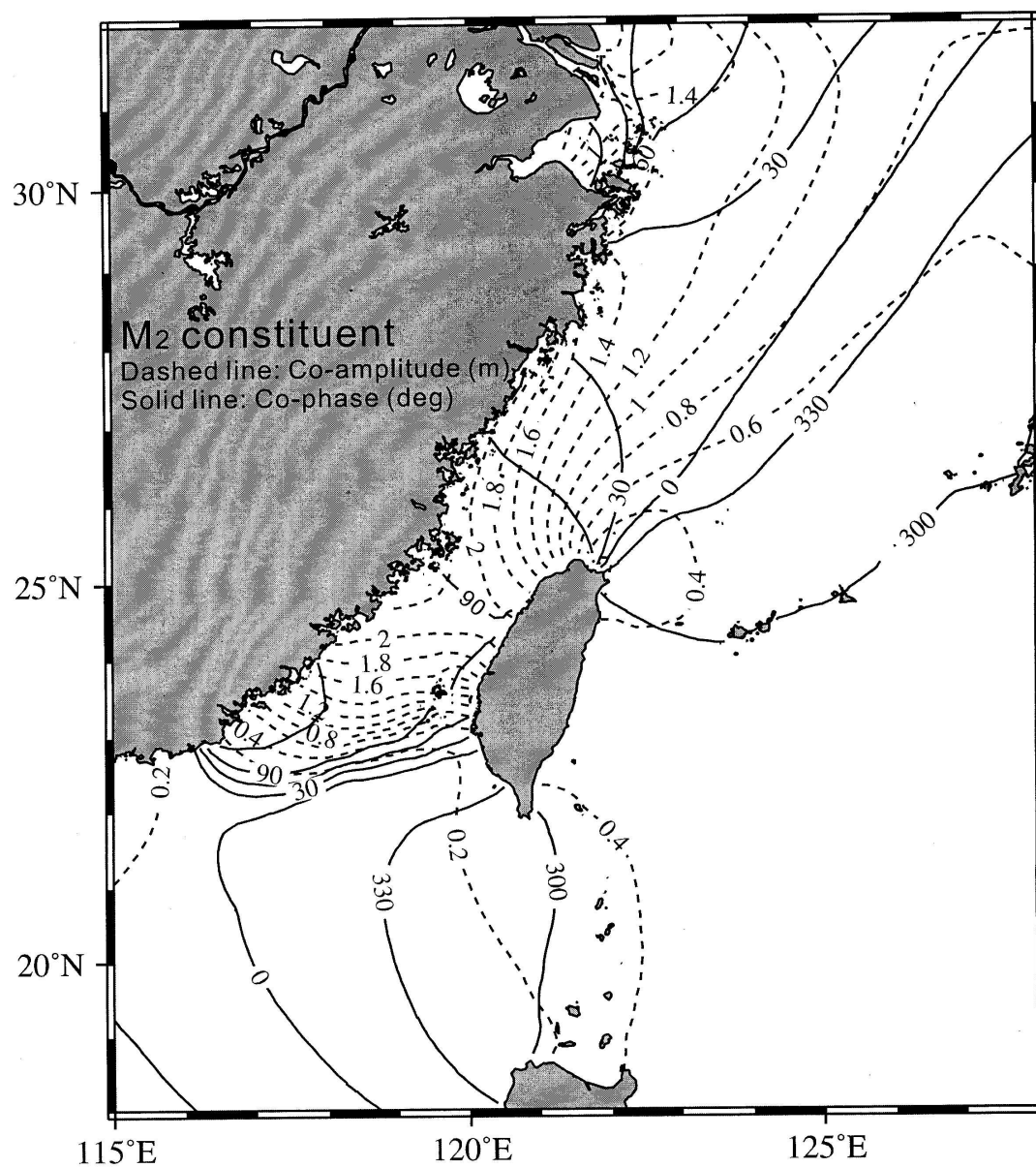


圖2-4 TSNOW模式模擬分析之台灣海峽 M_2 分潮之等振幅與等相位圖

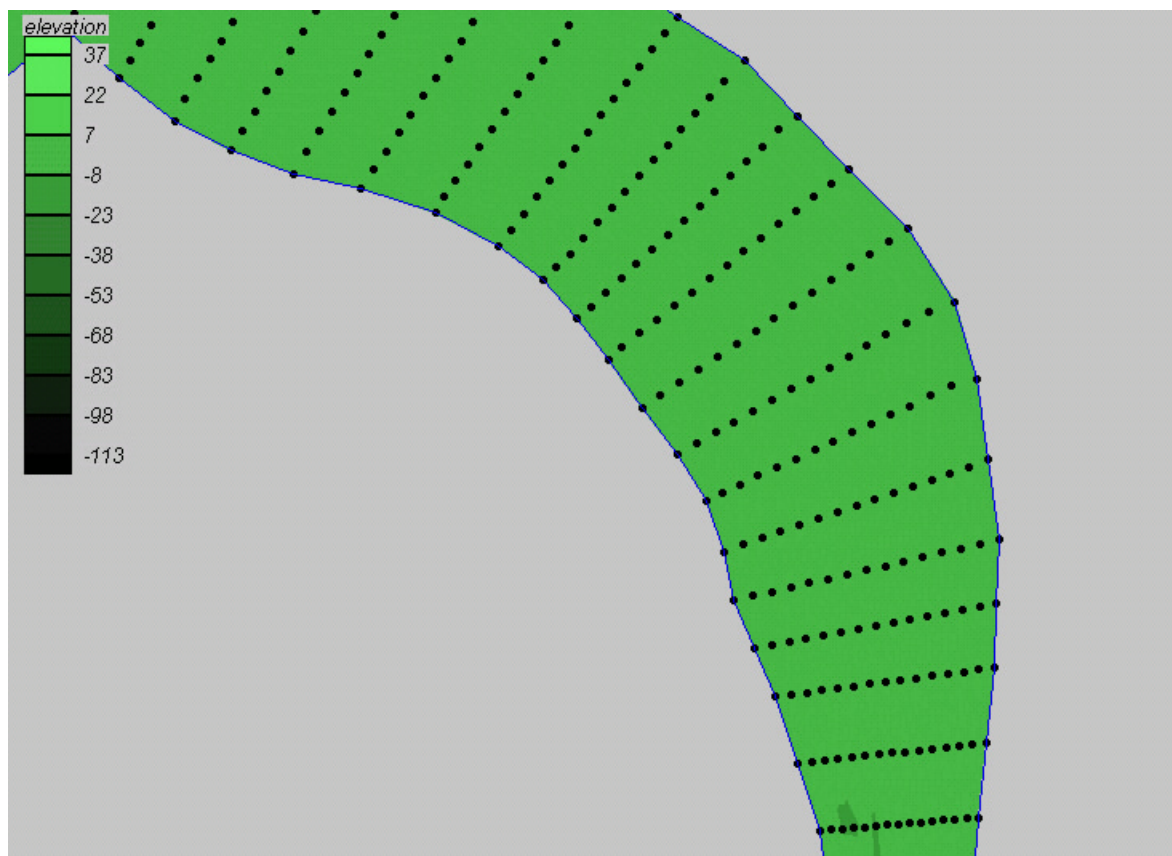


圖2-5 淡水河口至竹圍段內插斷面示意圖

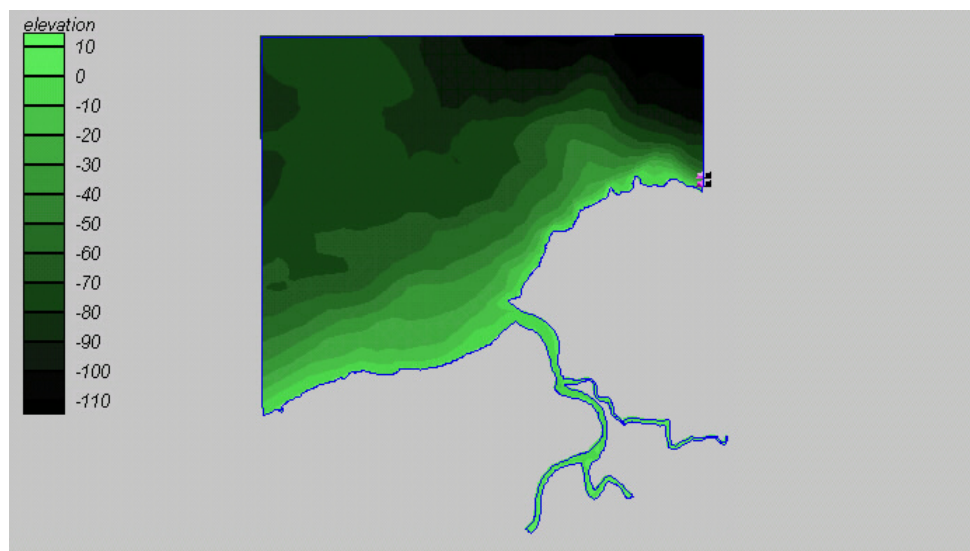


圖2-6 淡水河系與外海之水深圖

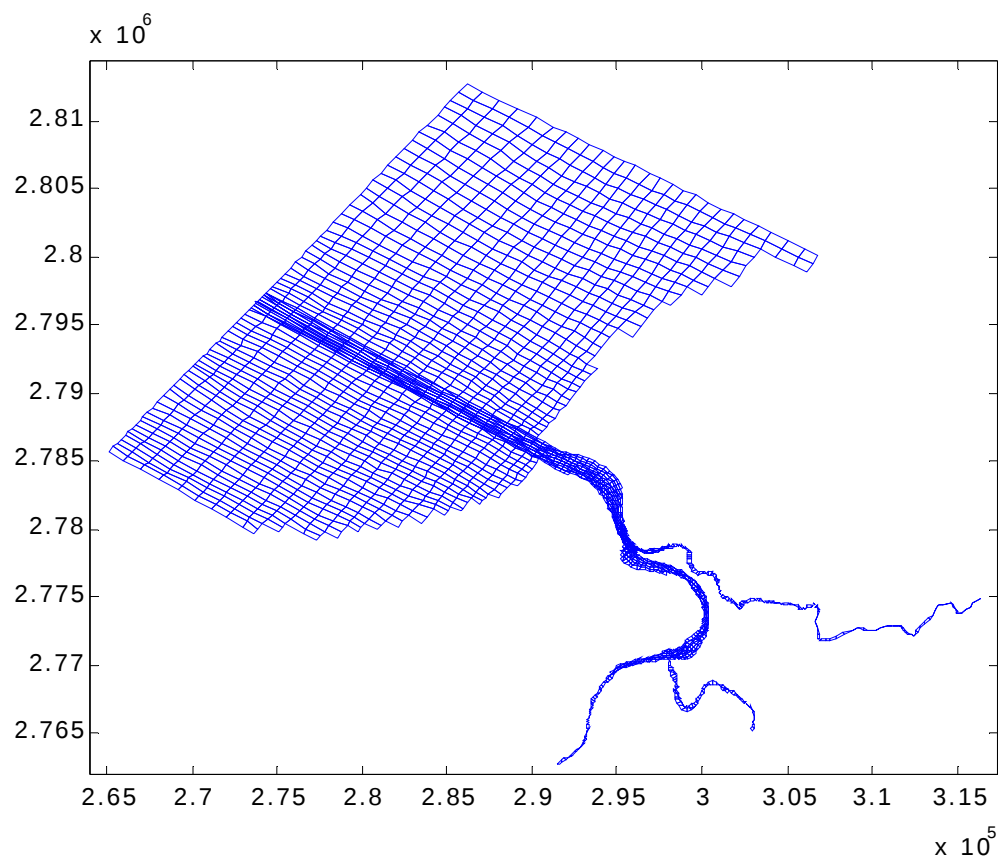


圖2-7 淡水河與近海之數值網格

第三章 數值模式之建立

3-1 控制方程式

對於任意環境流體特性其控制方程式可以垂直向靜水壓力及不可壓縮且變密度的紊流運動方程式之邊界層形成來表示。為適合於真實的水平邊界層，以便利形成控制方程式，水平座標， x 及 y 為曲線且正交。為了提供均一的垂直方向精度解析，以重力方向為垂直向座標，底床地形及自由水面分別為下部及上部之邊界，並允許長波運動之作用，時變性的座標轉換是有其必要性，套疊及轉換可以下式表示之：

$$z = (z^* + h) / (\zeta + h) \quad (1)$$

式中， $*$ 表示原先的物理垂直向座標； $-h$ 及 ζ 分別為底床及自由水面之物理垂直向座標，如圖 3-1 所示。詳細的轉換程序見 Vinokur (1974), Blumberg and Mellor (1987)或 Hamrick (1986)，轉換紊流運動方程之垂直向靜壓邊界層形成及利用變密度之 Boussinesq 趨近法所形成之動量、連續方程式與鹽度及溫度之質量守衡方程式，如下所示：

$$\begin{aligned} & \partial_t(mHu) + \partial_x(m_y Huu) + \partial_y(m_x Hvu) + \partial_x(mwu) - (mf + v\partial_x m_y - u\partial_y m_x)Hv \\ & = -m_y H\partial_x(g\zeta + p) - m_y(\partial_x h - z\partial_x H)\partial_z p + \partial_z(mH^{-1}A_v\partial_z u) + Q_u \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \partial_t(mHv) + \partial_x(m_y Huv) + \partial_y(m_x Hv v) + \partial_z(mwv) + (mf + v\partial_x m_y - u\partial_y m_x)Hu \\ & = -m_x H\partial_y(g\zeta + p) - m_x(\partial_y h - z\partial_y H)\partial_z p + \partial_z(mH^{-1}A_v\partial_z v) + Q_v \end{aligned} \quad (3)$$

$$\partial_z p = -gH(\rho - \rho_0)\rho_0^{-1} = -gHb \quad (4)$$

$$\partial_t(m\zeta) + \partial_x(m_y Hu) + \partial_y(m_x Hv) + \partial_z(mw) = 0 \quad (5)$$

$$\partial_t(m\zeta) + \partial_x\left(m_y H \int_0^1 u dz\right) + \partial_y\left(m_x H \int_0^1 v dz\right) = 0 \quad (6)$$

$$\rho = \rho(p, S, T) \quad (7)$$

$$\partial_t(mHS) + \partial_x(m_y HuS) + \partial_y(m_x HvS) + \partial_z(mwS) = \partial_z(mH^{-1}A_b\partial_z S) + Q_S \quad (8)$$

$$\partial_t(mHT) + \partial_x(m_y HuT) + \partial_y(m_x HvT) + \partial_z(mwT) = \partial_z(mH^{-1}A_b\partial_z T) + Q_T \quad (9)$$

式中， u 及 v 為水平向速度分量，分別位於曲線正交座標 x 及 y 方向； m_x 及 m_y 為

尺度張度的對角線分量之平方根； $m = m_x m_y$ 為Jacobian或尺度張量主分量之平方

根。垂直向速度為物理單位，以無因次的垂直座標表示，為 w ，有關於物理的垂直向速度 w^* 可表示為

$$w = w^* - z \left(\partial_t \zeta + u m_x^{-1} \partial_x \zeta + v m_y^{-1} \partial_y \zeta \right) + (1-z) \left(u m_x^{-1} \partial_x h + v m_y^{-1} \partial_y h \right) \quad (10)$$

其總深度為 $H = h + \zeta$ ，即水深在非擾動物理的垂直座標原點， $z^* = 0$ ，以下及自由水面位置之和；壓力 p 為超過參考密度靜水壓力之物理壓力，即 $\rho_o g H (1-z)$ ，除以參考密度， ρ_o ；於動量方程式(2)式及(3)式中， f 為科氏力； A_v

為垂直向紊流成渦度黏滯係數； Q_u 及 Q_v 為動量生成一消失項；密度 ρ 為溫度 T 和鹽度 S 之函數，壓力之弱函數，於非彈性趨近法下與非壓縮流連續方程式一致，(Mellor, 1991, Clark and Hall, 1991)；方程式(4)中之 b 為浮昇力，由參考值作為正規化之偏微分；連續方程式(5)已由 z 方向積分，介於(0,1)之間，以產生深度積分之連續方程式(6)，使用垂直邊界條件， $w=0$ ，於 $z=(0,1)$ 時，依據運動條件及方程式(10)；鹽度及溫度之質量守衡傳輸方程式，(8)式及(9)式中，其生成或消失項， Q_s 及 Q_T 包括次網格尺度之水平擴散及溫度生成與消失；(8)及(9)式中

A_b 為垂直之紊流擴散。

當紊流黏滯及擴散係數與生成及消失項已知時，方程式(2)-(9)對變數 $u, v, w, p, \zeta, \rho, S$ 及 T ，提供一閉合系統。為了提供垂直向紊流黏滯及擴散，採用Mellor and Yamnda (1982)所發展之二階紊流閉合模式及Galperin et al. (1988)修正之紊流閉合模式，模式中有關於垂直紊流黏滯及擴散項，其中 q 為紊流強度， ℓ 為紊流長度尺度及 R_q 為理查森數(Richardson number)，可由下式表示之：

$$A_v = \varphi_v q \ell = 0.4 (1 + 36 R_q)^{-1} (1 + 6 R_q)^{-1} (1 + 8 R_q) q \ell \quad (11a)$$

$$A_b = \varphi_b q \ell = 0.5 (1 + 36 R_q)^{-1} q \ell \quad (11b)$$

$$R_q = \frac{g H \partial_z b}{q^2} \frac{\ell^2}{H^2} \quad (12)$$

式中， φ_v 及 φ_b 為穩定函數，即在穩定及非穩定垂直密度分層環境中，分別為減少或增加垂直混合或傳輸作用。紊流強度及紊流長度尺度由一對傳輸方程式所決定，如下式所示：

$$\partial_t(mHq^2) + \partial_x(m_yHuq^2) + \partial_y(m_xHvq^2) + \partial_z(mwq^2) = \partial_z(mH^{-1}A_q\partial_zq^2) + Q_q \quad (13)$$

$$+ 2mH^{-1}A_v((\partial_zu)^2 + (\partial_zv)^2) + 2mgA_b\partial_zb - 2mH(B_1l)^{-1}q^3$$

$$\partial_t(mHq^2l) + \partial_x(m_yHuq^2l) + \partial_y(m_xHvq^2l) + \partial_z(mwq^2l) = \partial_z(mH^{-1}A_q\partial_zq^2l) + Q_l \quad (14)$$

$$+ mH^{-1}E_{1v}lA_v((\partial_xu)^2 + (\partial_xv)^2) + mgE_1E_3lA_b\partial_zb - mHB_1^{-1}q^3(1 + E_2(kL)^{-2}l^2)$$

$$L^{-1} = H^{-1}(z^{-1} + (1-z)^{-1}) \quad (15)$$

式中， B_1, E_1, E_2 及 E_3 為經驗常數； Q_q 及 Q_l 為外來的生成—消失項，如次網格式度之水平擴散；垂直擴散係數等於垂直紊流黏滯係數，即 $A_q = A_v$ 。

3-2 數值解法

運動方程式(2)-(6)可以分解六個面的網格，垂直網格邊界可以投影到水平面，因而形成曲線、正交的座標系統於 (x, y) 平面上，於垂直面 (x, z) 或 (y, z) 平面上，因為在相同 z 平面上，網格範圍將可參考網格之層化。方程式可用有限體積及有限差分技巧處理之，其變數之位置如圖3-2所示，變數於交錯網格之位置可參考C網格 (Arakawa and Lamb, 1977) 或 MAC網格 (Peyret and Taylor, 1983)。為方便修改方程式(2), (3)，可藉由(4)式消除垂直向之壓力梯度，則水平動量方程式可改寫成：

$$\partial_t(mHu) + \partial_x(m_yHuu) + \partial_y(m_xHvu) + \partial_z(mwu) - (mf + v\partial_xm_y - u\partial_y m_x)Hv \quad (16)$$

$$= -m_yH\partial_xp - m_yHg\partial_x\zeta + m_yHgb\partial_xh - m_yHgbz\partial_xH + \partial_z(mH^{-1}A_v\partial_zu) + Q_u$$

$$\partial_t(mHv) + \partial_x(m_yHuv) + \partial_y(m_xHvv) + \partial_z(mwv) - (mf + v\partial_xm_y - u\partial_y m_x)Hv \quad (17)$$

$$= -m_xH\partial_y p - m_xHg\partial_y\zeta + m_xHgb\partial_yh - m_xHgbz\partial_yH + \partial_z(mH^{-1}A_v\partial_zv) + Q_v$$

方程式(16)與(17)之垂直方向之離散首先與予以考慮，方程式沿垂直向 z 積分，假設變數於垂向網格或層之中間為定值，故可以表示成下式：

$$\partial_t(mH\Delta_k u_k) + \partial_x(m_yH\Delta_k u_k u_k) + \partial_y(m_xH\Delta_k v_k u_k) + (mwu)_k - (mwu)_{k-1} \quad (18)$$

$$- (mf + v_k\partial_xm_y - u_k\partial_y m_x)\Delta_k Hv_k = -0.5m_yH\Delta_k\partial_x(p_k + p_{k-1}) - m_yH\Delta_k g\partial_x\zeta$$

$$+ m_yH\Delta_k gb\partial_xh - 0.5m_yH\Delta_k gb_k(z_k + z_{k-1})\partial_xH + m(\tau_{xz})_k - m(\tau_{xz})_{k-1} + (\Delta Q_u)_k$$

$$\begin{aligned}
& \partial_t(mH\Delta_k v_k) + \partial_x(m_y H\Delta_k u_k v_k) + \partial_y(m_x H\Delta_k v_k u_k) + (mwv)_k - (mwv)_{k-1} \\
& + (mf + v_k \partial_x m_y - u_k \partial_y m_x) \Delta_k H u_k = -0.5m_x H\Delta_k \partial_y (p_k + p_{k-1}) - m_x H\Delta_k g \partial_y \zeta \\
& + m_x H\Delta_k g b_k \partial_y h - 0.5m_x H\Delta_k g b_k (z_k + z_{k-1}) \partial_y H + m(\tau_{yz})_k - m(\tau_{yz})_{k-1} + (\Delta Q_v)_k
\end{aligned} \quad (19)$$

式中 Δ_k 為垂直向之厚度，於層與層間之紊流剪應力為：

$$(\tau_{xz})_k = 2H^{-1}(A_v)_k (\Delta_{k+1} + \Delta_k)^{-1} (u_{k+1} - u_k) \quad (20)$$

$$(\tau_{yz})_k = 2H^{-1}(A_v)_k (\Delta_{k+1} + \Delta_k)^{-1} (v_{k+1} - v_k) \quad (21)$$

如於垂直方向有 K 層，則靜水壓方程式可以積分成：

$$p_k = gH \left(\sum_{j=k}^K \Delta_j b_j - \Delta_k b_k \right) + p_s \quad (22)$$

式中 p_s 為表層之物理壓力。連續方程式(5)亦可沿垂直方向積分：

$$\partial_t(m\Delta_k \zeta) + \partial_x(m_y H\Delta_k u_k) + \partial_y(m_x H\Delta_k v_k) + m(w_k - w_{k-1}) = 0 \quad (23)$$

垂直離散之動量方程式現在分解成外在深度積分項與來自內在及垂直速度結構之外在長重力波，外在項之方程式可結合方程式(18)與(19)及(22)，得到下式：

$$\begin{aligned}
& \partial_t(mH\bar{u}) + \sum_{k=1}^K (\partial_x(m_y H\Delta_k u_k u_k) + \partial_y(m_x H\Delta_k v_k u_k) - H(mf + v_k \partial_x m_y - u_k \partial_y m_x) \Delta_k v_k) \\
& = -m_y Hg \partial_x \zeta - m_y H \partial_x p_s + m_y Hg \bar{b} \partial_x h - m_y Hg \left(\sum_{k=1}^K (\Delta_k \beta_k + 0.5\Delta_k (z_k + z_{k-1}) b_k) \right) \partial_x H \\
& - m_y H^2 \partial_x \left(\sum_{k=1}^K \Delta_k \beta_k \right) + m(\tau_{xz})_k - m(\tau_{xz})_0 + \overline{Q_u}
\end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned}
& \partial_t(mH\bar{v}) + \sum_{k=1}^K (\partial_x(m_y H\Delta_k u_k v_k) + \partial_y(m_x H\Delta_k v_k v_k) - H(mf + v_k \partial_x m_y - u_k \partial_y m_x) \Delta_k u_k) \\
& = -m_x Hg \partial_y \zeta - m_x H \partial_y p_s + m_x Hg \bar{b} \partial_y h - m_x Hg \left(\sum_{k=1}^K (\Delta_k \beta_k + 0.5\Delta_k (z_k + z_{k-1}) b_k) \right) \partial_y H \\
& - m_x H^2 \partial_y \left(\sum_{k=1}^K \Delta_k \beta_k \right) + m(\tau_{yz})_k - m(\tau_{yz})_0 + \overline{Q_v}
\end{aligned} \quad (25)$$

$$\partial_t(m\zeta) + \partial_x(m_y H\bar{u}) + \partial_y(m_x H\bar{v}) = 0 \quad (26)$$

$$\beta_k = \sum_{j=k}^K \Delta_j b_j - 0.5\Delta_k b_k \quad (27)$$

式中 $\bar{\cdot}$ 為深度平均，深度積分之連續方程式 (26) 來自 (6) 式並且提供外在項之連續

限制。與 (26) 一致，外在項變數將選擇自由水面位移， ζ ，與體積傳輸 $m_y Hu$ 與

$m_x Hv$ 。

K 方向積分方程式之總合以形成外在方程式 (24)、(25) 可因為以下的限制式有效率的移除自由度：

$$\sum_{k=1}^K \Delta_k u_k = \bar{u} \quad (28)$$

$$\sum_{k=1}^K \Delta_k v_k = \bar{v} \quad (29)$$

內在方程式的形成是由 (18)、(19) 式予以分層， Δ_k ，從 $k+1$ 層的方程式減

掉 k 層的方程式，然後除以層與層間之厚度，可得：

$$\begin{aligned} & \partial_t (mH\Delta_{k+1,k}^{-1}(u_{k+1} - u_k)) + \partial_x (m_y H\Delta_{k+1,k}^{-1}(u_{k+1}u_{k+1} - u_k u_k) + \\ & \partial_y (m_x H\Delta_{k+1,k}^{-1}(v_{k+1}u_{k+1} - v_k u_k)) + m\Delta_{k+1,k}^{-1}(\Delta_{k+1}^{-1}((wu)_{k+1} - (wu)_k) - \\ & \Delta_k^{-1}((wu)_k - (wu)_{k-1})) - \Delta_{k+1,k}^{-1}((mf + v_{k+1}\partial_x m_y - u_{k+1}\partial_y m_x)Hv_{k+1} - \\ & (mf + v_k\partial_x m_y - u_k\partial_y m_x)Hv_k) = m_y H\Delta_{k+1,k}^{-1}g(b_{k+1} - b_k)(\partial_x h - z_k\partial_x H) - \end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} & 0.5m_y H^2 \Delta_{k+1,k}^{-1}g(\Delta_{k+1}\partial_x b_{k+1} + \Delta_k\partial_x b_k) + m\Delta_{k+1,k}^{-1}(\Delta_{k+1}^{-1}((\tau_{xz})_k - (\tau_{xz})_{k-1})) + \\ & \Delta_{k+1,k}^{-1}((Q_u)_{k+1} - (Q_u)_k) \\ & \partial_t (mH\Delta_{k+1,k}^{-1}(v_{k+1} - v_k)) + \partial_x (m_y H\Delta_{k+1,k}^{-1}(u_{k+1}v_{k+1} - u_k v_k) + \\ & \partial_y (m_x H\Delta_{k+1,k}^{-1}(v_{k+1}v_{k+1} - v_k v_k)) + m\Delta_{k+1,k}^{-1}(\Delta_{k+1}^{-1}((wv)_{k+1} - (wv)_k) - \\ & \Delta_k^{-1}((wv)_k - (wv)_{k-1})) - \Delta_{k+1,k}^{-1}((mf + v_{k+1}\partial_x m_y - u_{k+1}\partial_y m_x)Hu_{k+1} - \\ & (mf + v_k\partial_x m_y - u_k\partial_y m_x)Hu_k) = m_x H\Delta_{k+1,k}^{-1}g(b_{k+1} - b_k)(\partial_y h - z_k\partial_y H) - \end{aligned} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} & 0.5m_x H^2 \Delta_{k+1,k}^{-1}g(\Delta_{k+1}\partial_y b_{k+1} + \Delta_k\partial_y b_k) + m\Delta_{k+1,k}^{-1}(\Delta_{k+1}^{-1}((\tau_{xz})_k - (\tau_{xz})_{k-1})) + \\ & \Delta_{k+1,k}^{-1}((Q_v)_{k+1} - (Q_v)_k) \\ & \Delta_{k+1,k} = 0.5(\Delta_{k+1} + \Delta_k) \end{aligned} \quad (32)$$

求解垂直向速度 w ，可利用連續方程式，將 (23) 式除以 Δ_k 並減去 (26) 式，

可得：

$$w_k = w_{k-1} - m^{-1}\Delta_k(\partial_x(m_y H(u_k - \bar{u})) + \partial_y(m_x H(v_k - \bar{v}))) \quad (33)$$

因為 $w_o = 0$ ，求解時從第一層至表面層，表面層為 $k = K$ 。

模式可以用 σ 垂直座標及卡氏或曲線直角水平座標系統，因此，可以便於處理不規則河岸底床及地形，模式採用二階精度，三時間段(tree-time-level)有限差分法，以內部及外部模組分開計算方式，將外部模組之水面高程重力波與內部模組之剪力或斜壓(baroclinic)項分開處理，外部模組解法是使用半隱式法且允許較大時間間距，時間間距僅受限於顯式中央差分或上風對流法，使用於非線性加速項之穩定條件。

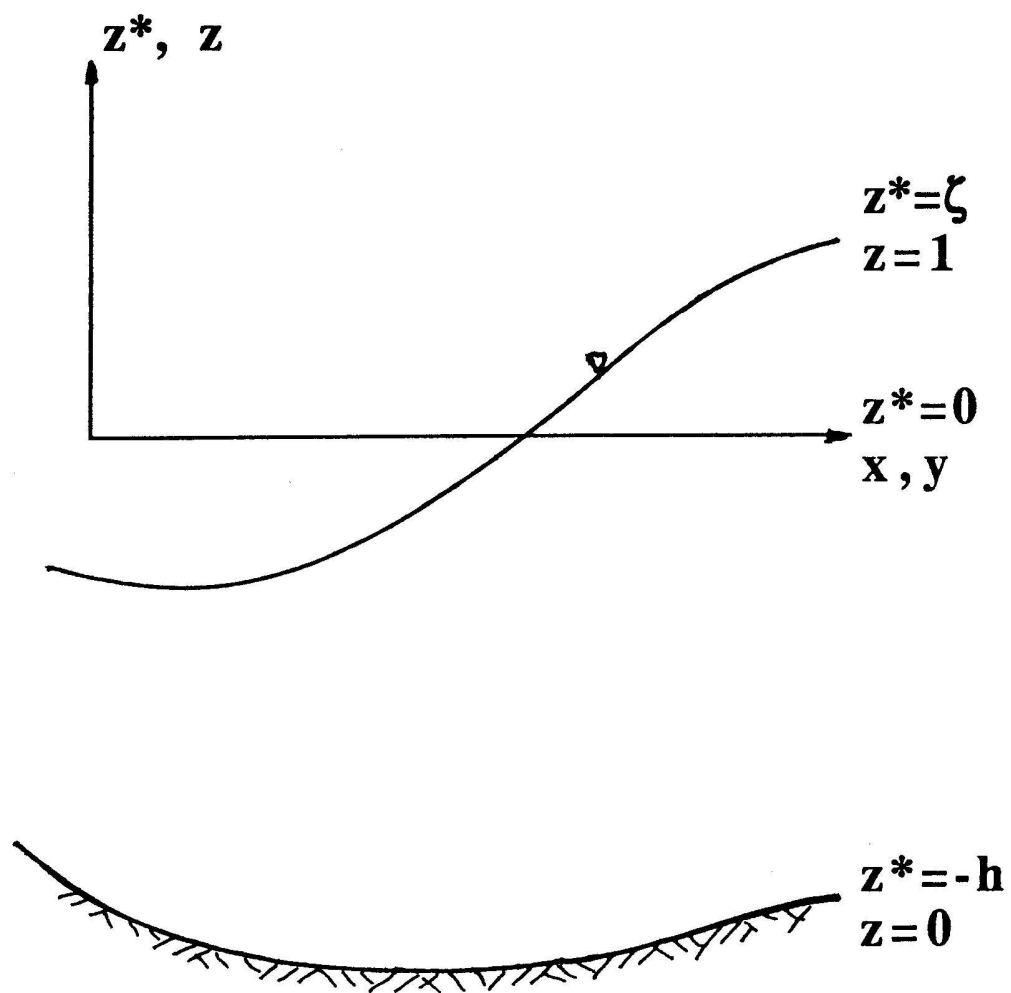


圖3-1 垂直座標系統

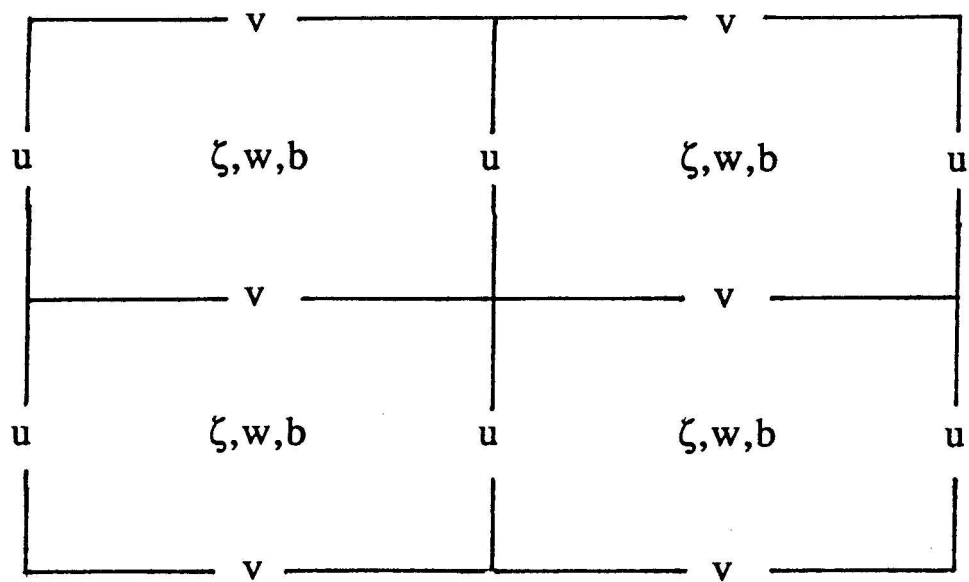


圖3-2 自由水面位移中心水平格網

第四章 模式之檢定與驗證

模式建立後，其適用性必須經過適當的參數檢定(calibration)與驗證(verification)後方可確定；任何一種模式都有其特定之參數，須要對應用之水體加以檢定。檢定後之模式用於預測，並以預測值與另一組實驗值相比較，倘若結果相符，誤差不大，即完成模式之驗證工作。本研究之參數檢定與驗證，將針對水理模式之糙率高度(z_o , roughness height)，因為糙率高度是影響潮波傳遞、潮時、潮流及潮位之主要參數。

4-1 模式之初步檢定

本模式演算之邊界條件為上游邊界位於五堵水文站(基隆河)、城林橋(大漢溪)及秀朗橋(新店溪)，上游邊界給定流量，下游邊界因位於外海，故有東、西與北邊界，外海邊界給定潮位(見圖4-1)，網格數共為2642個，每一網格均需要給予 x 、 y 之二度分帶座標與 z 水深，數值模式於垂直方向係採用 σ 座標系統，本研究於垂直方向分成十層。

潮汐現象主要是受到地球、月球與太陽等天體之吸引力及相對運動作用而產生水面波動，其振幅與相位角因地點及地形之影響而異。外海潮位受潮汐影響，其水位除颱風暴潮之影響除外，呈現規則的簡諧運動，於常潮狀況下其水位受潮波傳遞之影響，往淡水河口及上游傳播，亦作規則性之漲落變動。故潮汐為外海與淡水河系感潮段水流動之主要動力，於本模式中以糙率高度(z_o)來表示底床之粗糙程度，亦為水動力模式之檢定參數。

潮波由外海向內陸傳遞時，因為摩擦阻力作用而使潮波能量損失，當外海之數值高程及潮差已知，則糙率高程與地形的變化可決定沿外海與河道縱長方向之潮差變化，因此本文使用外海與沿河道縱長方向之潮差分佈情形來檢定糙率高

度。主太陰半日潮(M_2 潮)為影響潮汐一天兩次漲落之主要因子，故先以 M_2 潮進行參數之檢定。本研究根據經濟部水利署第十河川局於大漢溪淡水河，新店溪和基隆河實測之潮位資料，計算民國89年間河口(淡水河)、土地公鼻(淡水河)、台北橋(淡水河)、入口堰(大漢溪)、新海橋(大漢溪)、中正橋(新店溪)與大直橋(基隆河)之平均潮差，因89年之潮位實測資料偶有缺少數日，偶有發現土地公鼻與台北橋因測站淤砂於低潮位時有持續3至4小時不合理數據，大直橋潮位資料甚至有缺少達一個月以上，故由調和分析之結果再衍生填補潮位後，再計算其平均潮差，其結果見表4-1所示。

在模式檢定過程中，模式演算以外海之平均潮差為 M_2 潮之振幅，作為下游之邊界條件；上游邊界之河川流量則採用民國89年之平均流量，大漢溪為 $59.2 \text{ m}^3/\text{s}$ ，新店溪為 $87.1 \text{ m}^3/\text{s}$ ，基隆河(五堵站)為 $32.8 \text{ m}^3/\text{s}$ 。在平均潮差檢定中，鹽分濃度之影響可以予以忽略(即密度為一定值)，模式執行25個潮週期後，即可達到穩定狀態(equilibrium state)。模式檢定時，以試誤法重複調整糙率高度與適當調整地形變化，以達模式演算結果之平均潮差與實測值相符為止。模式模擬結果，如圖4-2至圖4-4所示，並整理如表4-2。圖中分別為大漢溪-淡水河、新店溪及基隆河實測數據平均潮差及模式模擬之潮差比較，兩者之比較結果相當吻合。根據Green's Law (Ippen, 1966)的敘述潮差與河寬的平方根成反比，並與水深的四分之一次方成反比，圖中可見由於淡水河系的三大支流大漢溪、新店溪及基隆河愈往上游河寬變窄、水深變淺與底床坡降較陡，故潮差變化較大，以至接近上游

邊界因底床漸高於低潮位，潮差已趨近於零。根據各潮位測站實測數據平均潮差與模擬潮差計算得平均絕對誤差(mean absolute difference)為3.1公分，均方根(root-mean-square difference)為3.88公分。

4-2 綜合潮之細部檢定

利用外海(東、西與北邊界)五個分潮之振幅及相位角為外海邊界條件，五個分潮分別為 M_2 (12.42小時)、 S_2 (12小時)、 N_2 (12.9小時)、 K_1 (23.93小時)及 O_1 (25.82小時)，外海東、西邊界所使用之五個分潮振幅與相位角見表4-3所示，表中有西邊界核一廠網格編號(92,277)、(94,302)、西邊界竹圍(17,294)、(17,302)；上游邊界大漢溪，新店溪及基隆河五堵站之河川流量採用民國89年之平均流量，模式計算一個月之水理狀況，將模擬結果輸出後再進行調和分析，其結果列於表4-4至表4-9所示，並將其繪製成圖4-5至圖4-15，圖及表所示為實測數據與模擬結果五個分潮之分潮振幅及相位角之比較，包括有近海之淡水漁港、石門麟山鼻、富崗漁港、淡水河外海觀測樁、淡水河口、大漢溪-淡水河之土地公鼻、台北橋、入口堰及新海橋，新店溪之中正橋，基隆河之大直橋，顯示實測與模擬結果綜合潮之分潮振幅及相位角誤差尚稱吻合。

4-3 模式之驗證

三維水動力模式經過檢定後，再以實測資料進行模式之驗證。本研究於外海邊界仍採用五個分潮之合成潮，外海邊界所使用之五個分潮振幅與相位角見表4-2所示；於上游邊界則採用每日之實測流量，包括大漢溪、新店溪及基隆河，

其民國89年之日流量資料見圖4-16所示，模式模擬時間自民國89年1月1日起，經過長時間的演算，與實測資料進行比對。模式模擬之各潮位與外海潮位站及淡水河系之潮位歷線之比較詳如圖4-17至圖4-25所示，圖中顯示為第50天至60天與第120天至130天之潮位歷線，係因該時大漢溪、新店溪與基隆河上游有較大的淡水流量產生，圖中可見新海橋、中正橋與大直橋受到淡水流量下注之影響水位有明顯的抬升現象，但於台北橋、土地公鼻、淡水河河口與近海受到淡水流量下注之影響則逐漸減低。於圖中顯示模式模擬之水位與實測水位大致吻合。

三維水動力模式模擬結果可得不同網格位置(cell)的時序北向分量速度與東向分量速度，此分量速度無法與水利署第十河川局全潮量測之速度進行比較，故需要將模式模擬的分量速度經過程式轉換計算，以求得該位置的主軸方向(principal axis)，再計算沿河道方向之速度與沿橫向斷面(cross section)的速度，由計算所得之沿河道方向的速度即可與水利署第十河川局全潮量測之速度進行比較，其結果如圖4-26至圖4-28所示，圖中分別為模式模擬之縱向(沿河道方向)速度與全潮測量實測速度之比較，包括關渡橋、台北橋、新海橋、中正橋與百齡橋等站。圖中顯示頂層之速度較大，而底層速度因受底床剪應力作用，故速度較小，且由退潮轉為進潮的時間較早，退潮的時段較多，漲潮的時段較少，模式模擬與實測結果均呈現相同的現象，於下游之關渡橋縱向速度比其他各站速度大很多，整體而言，模式模擬結果與實測狀況相當吻合。

4-4 河口環流之分析

影響河口水理之因素，包括有河道淡水流、潮流、密度流、地形流與氣象流等，交互作用，錯綜複雜。因海水與淡水之交互作用，導致鹽分分層現象，又因為密度差而產生密度流，為一斜壓流(roclinic flow)，河口環流(estuarine circulation)是淡水流與密度流綜合而成，水面淨流向外海，深處淨流向內陸。其主要動力是平均水面坡度與鹽分梯度(或密度梯度)，前者使淡水往外海流，淡水得以宣洩，後者使海水往內陸流，鹽分得以入侵，兩者互相抗衡，視兩者之相對力量(見圖4-29所示)，河口環流之存在與否及其強弱，隨時地而異。

本研究以數值模擬結果作為探討淡水河系河口環流之依據，即將模式模擬之時序流速，經過36小時之低頻過濾器(low pass filter)，將高振幅之頻率濾除，剩下的低頻率流速即可代表殘餘流速(residual current)。圖4-30至圖4-32分別為淡水河河口、關渡橋與台北橋之縱向殘餘流速，其中顯示關渡橋之底層有明顯的河口環流作用，大部分時間殘餘流速為負值，表示速度往上游前進，僅有第 52天左右殘餘流速為正值，表示速度往下游傳播，此時段係因為大漢溪、新店溪與基隆河上游有高流量產生之故，導致淨向流速往下游；至於淡水河河口底層有微弱的殘餘流速向上游傳播，底層大部分時間殘餘流速是指向下游；對台北橋而言，無論表層或底層殘餘流速幾乎是指向下游，顯示無河口環流作用。由上述可知，關渡橋之底床深度較深，鹽分分層現象明顯(由實測數據可以得知)，河口環流顯著，越往上游水深變淺，鹽分分層現象較小，故無河口環流作用。

4-5 參數敏感度分析

於水動力模式中糙率高度為影響水面高程與潮流之重要參數，故對於糙率高度進行參數敏感度分析，以確定此參數對水動力模式之影響程度。以模式驗證之模擬結果作為基準(base line)，另考慮糙率高度增加80%後之情形(即糙率高度由0.0125公尺提高至0.0225公尺)，以增加糙率高度後之模式模擬結果與基準進行比較，其結果見圖4-33至圖4-35所示，顯示兩者的模擬的水面高程幾乎重疊在一起，即糙率高度對模擬水位之影響並不大大，此結果與其他參考文獻所得之結論是一致的(Ji et al., 2001)。

表 4-1 淡水河系之平均潮差

測站	淡水河 河口	土地公鼻	台北橋	入口堰	新海橋	中正橋	大直橋
原實測數據計算之潮差	221.14	211.47	211.10	221.15	226.68	234.10	190.85
實測數據經調和分解後計算之潮差	216.34	213.53	219.83	218.05	212.84	219.35	221.40*

註：* 大直橋之實測潮差根據民國 83 年資料經調整

單位:公分

表 4-2 以 M_2 分潮初步檢定結果

測站	淡水河	土地公鼻	台北橋	入口堰	新海橋	中正橋	大直橋
----	-----	------	-----	-----	-----	-----	-----

	河口						
實測數據 經調和分 析後計算 之潮差	216.34	213.53	219.83	218.05	212.84	219.35	221.40*
以 M_2 潮 經模式初 步檢定	216.34	215.81	224.79	225.07	215.65	219.30	223.33
絕對差值	0	2.28	4.96	7.02	2.81	0.05	1.93

單位:公分

表4-3 外海東、西邊界所使用之振幅與相位角

分潮	東邊界 (94,277)-核一廠		東邊界 (94,302)		西邊界 (17,294)-竹圍		西邊界 (17,302)	
	振幅 (公分)	相位角 (秒)	振幅 (公分)	相位角 (秒)	振幅 (公分)	相位角 (秒)	振幅 (公分)	相位角 (秒)

M_2	47.0	21406.0	67.11	21279.5	123.6	22484.0	137.16	22408.0
S_2	12.0	-3390.0	18.66	-3330.0	34.52	-660.0	39.87	-585.0
N_2	10.0	-12566.0	13.70	-12616.0	22.52	-10143.0	25.26	-10203
K_1	21.0	-30552.0	22.23	-30105.0	21.21	-27265.0	22.75	-27115.0
O_1	17.0	17443.0	17.0	17313.0	17.48	19371.0	18.66	19209.0

表4-4 模式模擬與實測數據之分潮振幅與相位角之比較(淡水漁港及石門麟山鼻)

分潮 名稱	淡水漁港				石門麟山鼻			
	實測數據		模式模擬		實測數據		模式模擬	
	振幅	相位角	振幅	相位角	振幅	相位角	振幅	相位角
	(公分)	(度)	(公分)	(度)	(公分)	(度)	(公分)	(度)
M_2	104.41	177.52	102.22	178.09	75.74	177.18	77.96	182.76
S_2	28.56	-9.99	27.13	-9.87	20.10	-12.97	20.12	-17.09
N_2	20.19	-81.42	19.61	-68.72	14.61	-87.21	15.80	-74.84
K_1	20.72	-118.98	19.94	-120.57	20.11	-119.99	20.20	-124.73
O_1	17.26	71.48	17.21	69.33	17.25	67.58	17.45	66.76

表4-5 模式模擬與實測數據之分潮振幅與相位角之比較
(富崗漁港及淡水河外海觀測樁)

分潮 名稱	富崗漁港				淡水河外海觀測樁			
	實測數據		模式模擬		實測數據		模式模擬	
	振幅	相位角	振幅	相位角	振幅	相位角	振幅	相位角
	(公分)	(度)	(公分)	(度)	(公分)	(度)	(公分)	(度)
M_2	68.84	170.18	67.31	174.53	107.40	-166.18	108.03	-170.28
S_2	17.93	-17.04	17.00	-24.93	30.51	-82.04	28.94	-88.24
N_2	15.16	-102.76	14.33	-80.72	22.04	-75.26	20.87	-67.36
K_1	22.72	-119.00	20.54	-126.19	22.05	-125.00	20.06	-119.24
O_1	17.54	68.25	17.40	66.02	17.35	68.47	17.36	69.74

表4-6 模式模擬與實測數據之分潮振幅與相位角之比較(淡水河口與土地公鼻)

分潮 名稱	淡水河河口				土地公鼻			
	實測數據		模式模擬		實測數據		模式模擬	
	振幅	相位角	振幅	相位角	振幅	相位角	振幅	相位角
	(公分)	(度)	(公分)	(度)	(公分)	(度)	(公分)	(度)
M_2	105.68	179.34	107.20	176.31	104.83	-168.62	109.38	-168.85
S_2	29.02	-8.10	28.68	-7.24	26.21	4.88	26.77	7.15
N_2	19.97	-81.79	20.67	-65.76	17.99	-67.98	19.96	-53.71
K_1	20.76	-117.70	20.01	-118.50	17.10	-113.65	18.22	-112.52

O_1	17.01	72.60	17.16	71.21	13.27	76.35	16.34	81.39
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

表4-7 模式模擬與實測數據之分潮振幅與相位角之比較(台北橋與入口堰)

分潮 名稱	台北橋				入口堰			
	實測數據		模式模擬		實測數據		模式模擬	
	振幅	相位角	振幅	相位角	振幅	相位角	振幅	相位角
	(公分)	(度)	(公分)	(度)	(公分)	(度)	(公分)	(度)
M_2	103.45	-166.20	106.31	-163.32	104.44	-149.32	102.75	-155.92
S_2	24.44	11.29	26.98	15.35	26.22	31.32	22.87	25.48
N_2	20.07	-63.02	21.08	-46.41	17.68	-48.09	18.47	-39.84
K_1	14.10	-111.14	18.14	-115.34	14.68	-104.72	14.03	-110.51
O_1	10.45	68.47	16.59	84.12	11.15	84.08	12.65	83.79

表4-8 模式模擬與實測數據之分潮振幅與相位角之比較(新海橋)

分潮 名稱	新海橋			
	實測數據		模式模擬	
	振幅	相位角	振幅	相位角
	(公分)	(度)	(公分)	(度)
M_2	103.27	-154.36	101.84	-154.96
S_2	26.14	27.1	22.59	26.52
N_2	18.55	-53.66	18.30	-39.03
K_1	14.49	-106.86	13.84	-110.39

O_1	11.75	80.50	12.42	84.04
-------	-------	-------	-------	-------

表4-9 模式模擬與實測數據之分潮振幅與相位角之比較(中正橋與大直橋)

分潮 名稱	中正橋				大直橋			
	實測數據		模式模擬		實測數據		模式模擬	
	振幅	相位角	振幅	相位角	振幅	相位角	振幅	相位角
	(公分)	(度)	(公分)	(度)	(公分)	(度)	(公分)	(度)
M_2	106.22	-155.18	103.38	-153.17	95.94	-143.95	97.78	-149.84
S_2	28.14	24.56	22.58	28.47	22.36	39.43	21.25	33.48
N_2	19.86	-53.74	18.25	-37.17	14.24	-41.62	16.96	-32.66
K_1	16.15	-106.56	13.62	-109.43	11.81	-93.19	14.11	-102.10
O_1	12.61	84.38	12.31	84.21	11.32	85.83	13.05	92.36

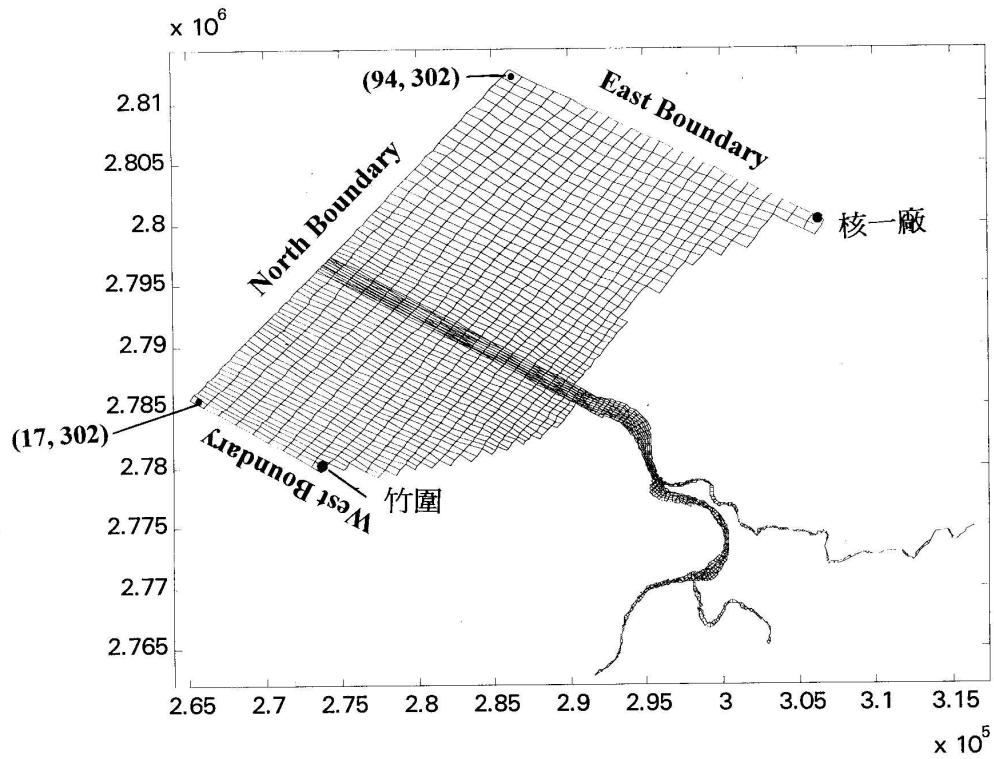


圖 4-1 數值網格與外海之邊界

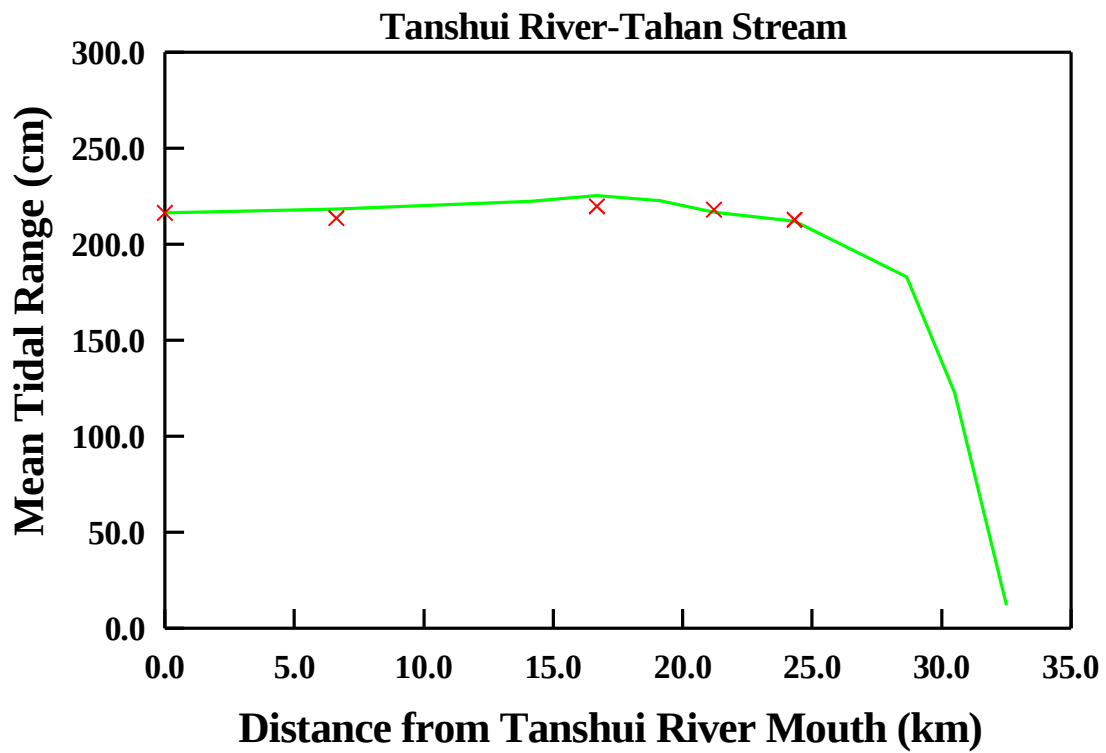


圖4-2 淡水河 - 大漢溪模式模擬平均潮差與實測結果之比較

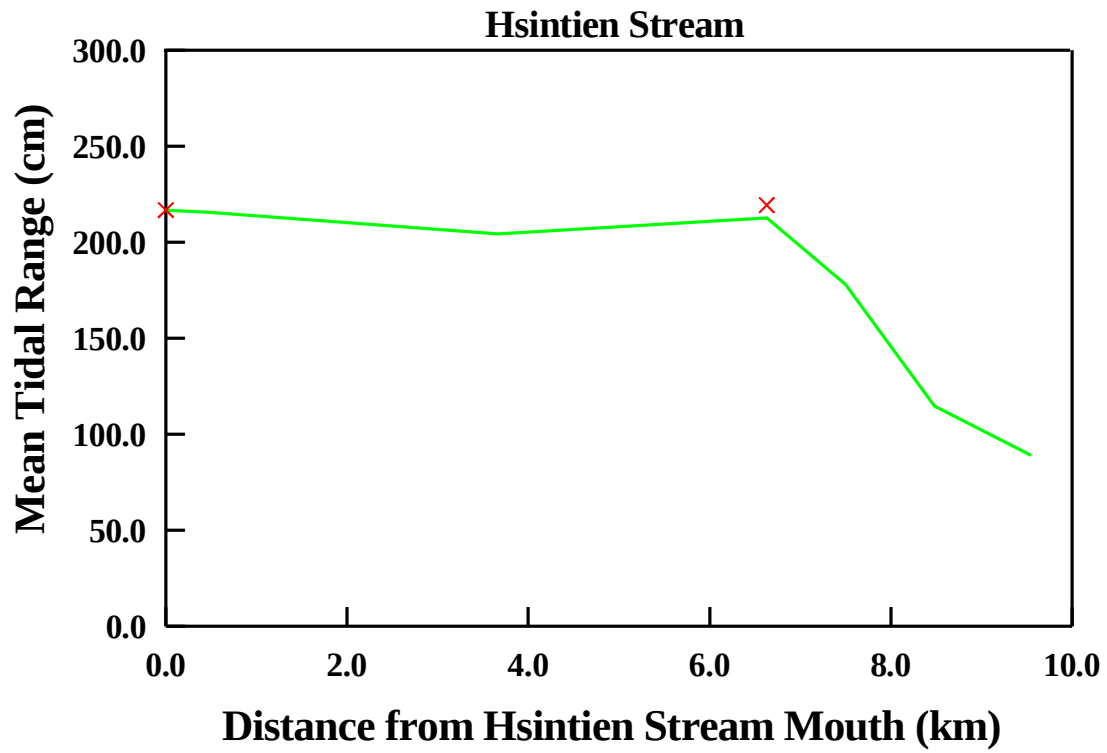


圖4-3 新店溪模式模擬平均潮差與實測結果之比較

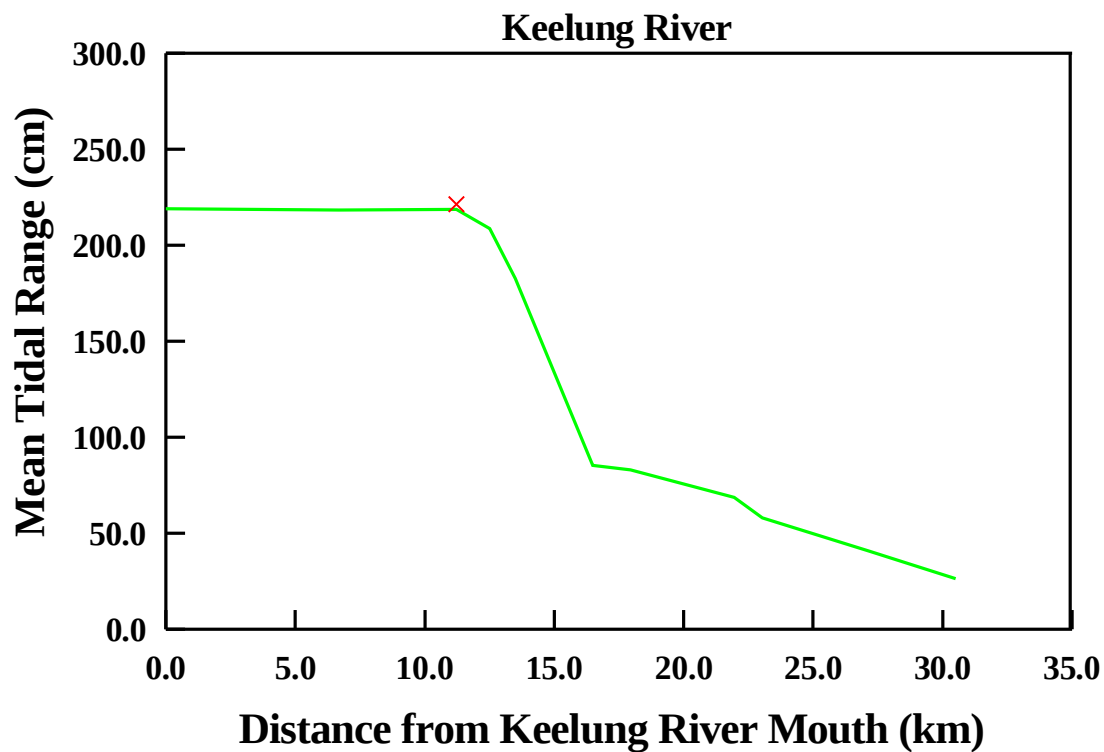
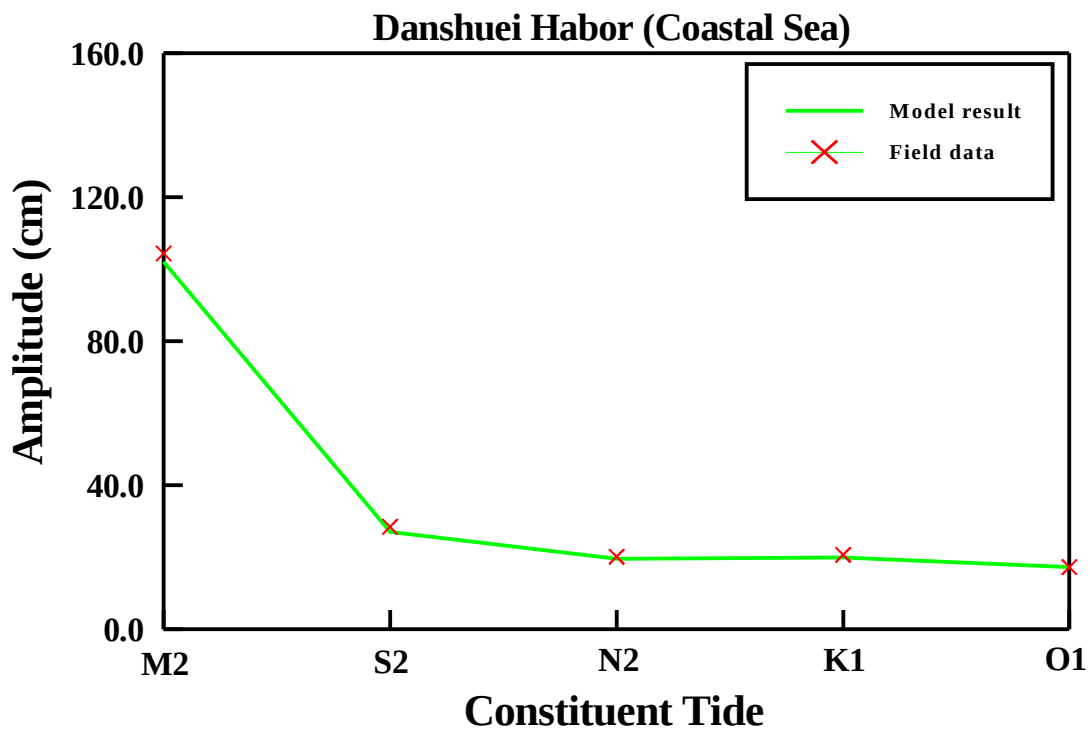


圖4-4 基隆河模式模擬平均潮差與實測結果之比較



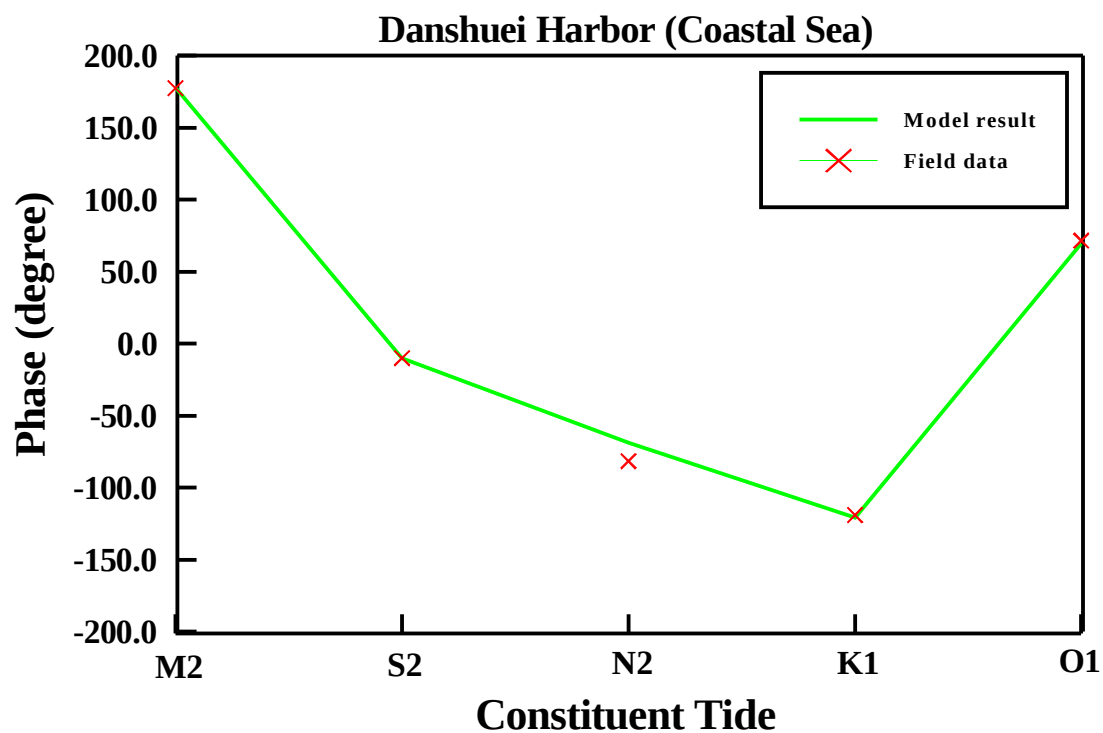
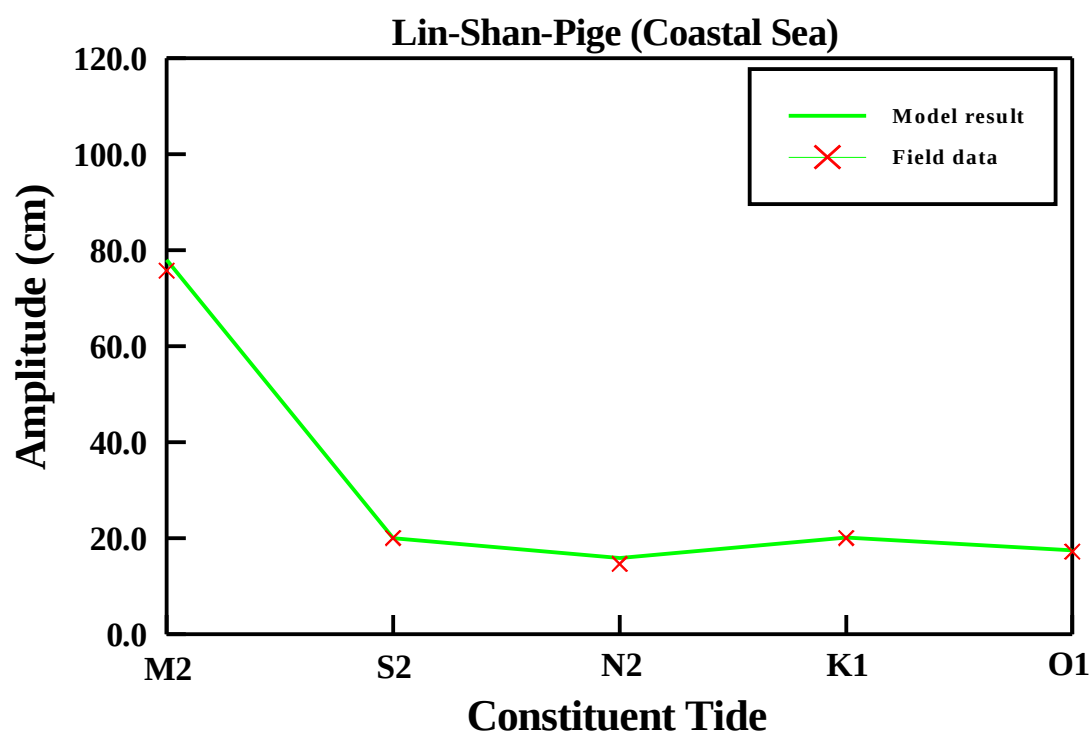


圖4-5 模式模擬與實測數據之分潮振幅與相位角之比較 (淡水漁港)



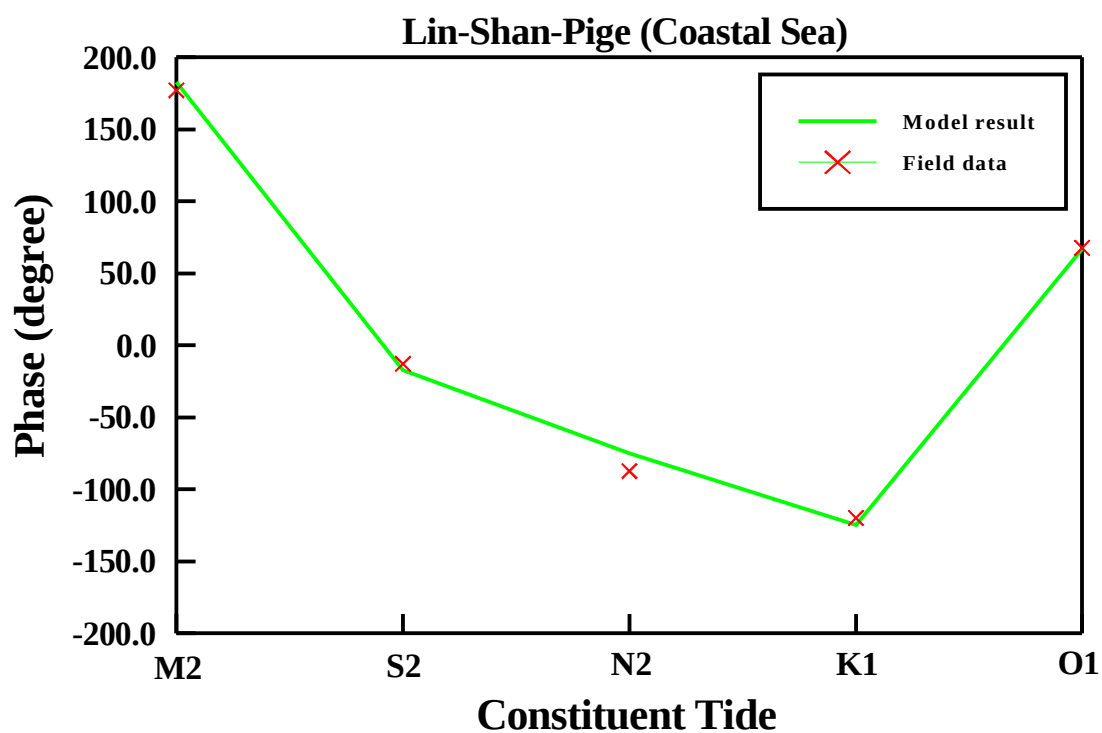
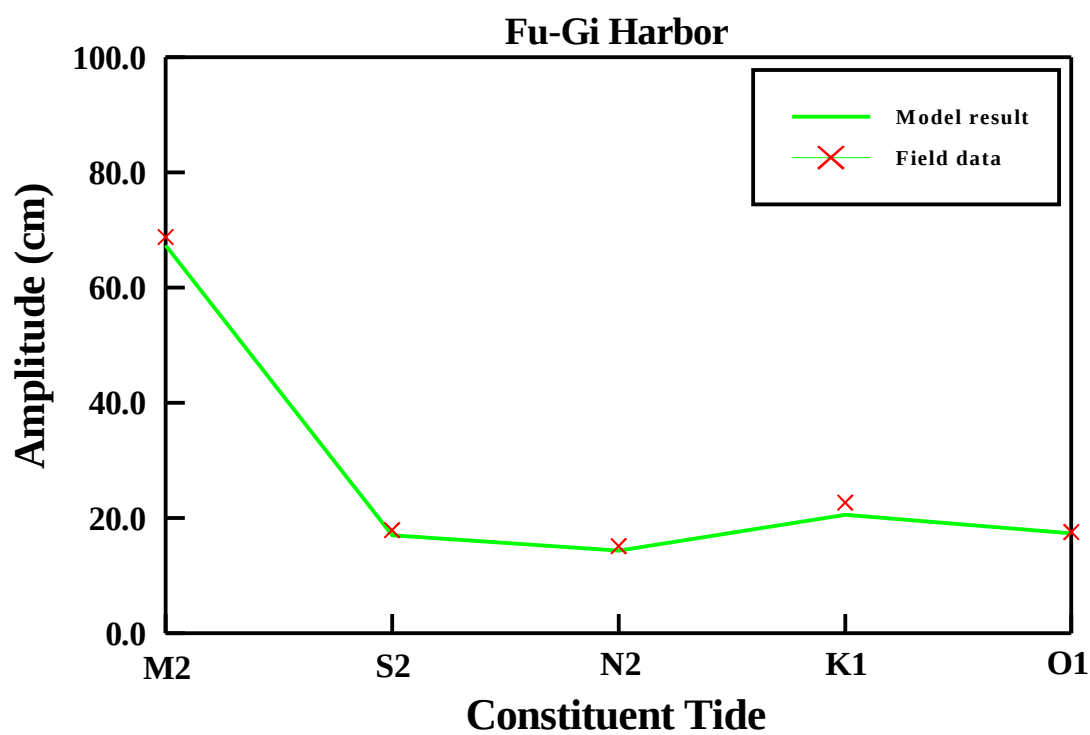


圖4-6 模式模擬與實測數據之分潮振幅與相位角之比較 (石門麟山鼻)



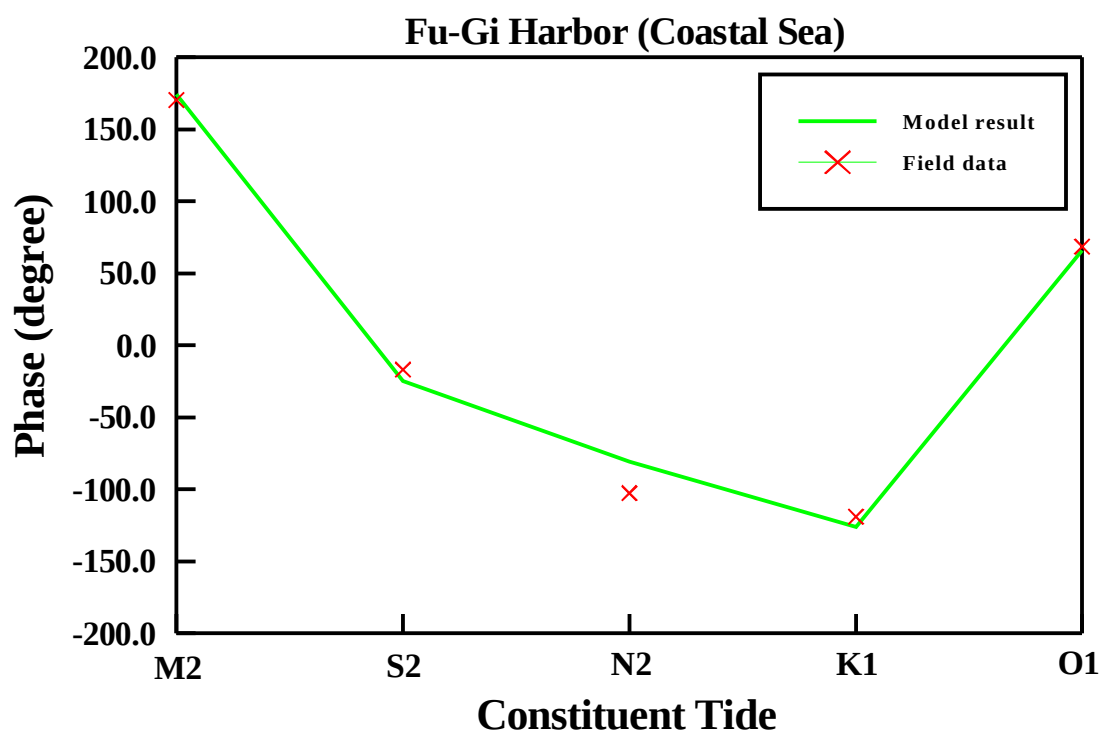
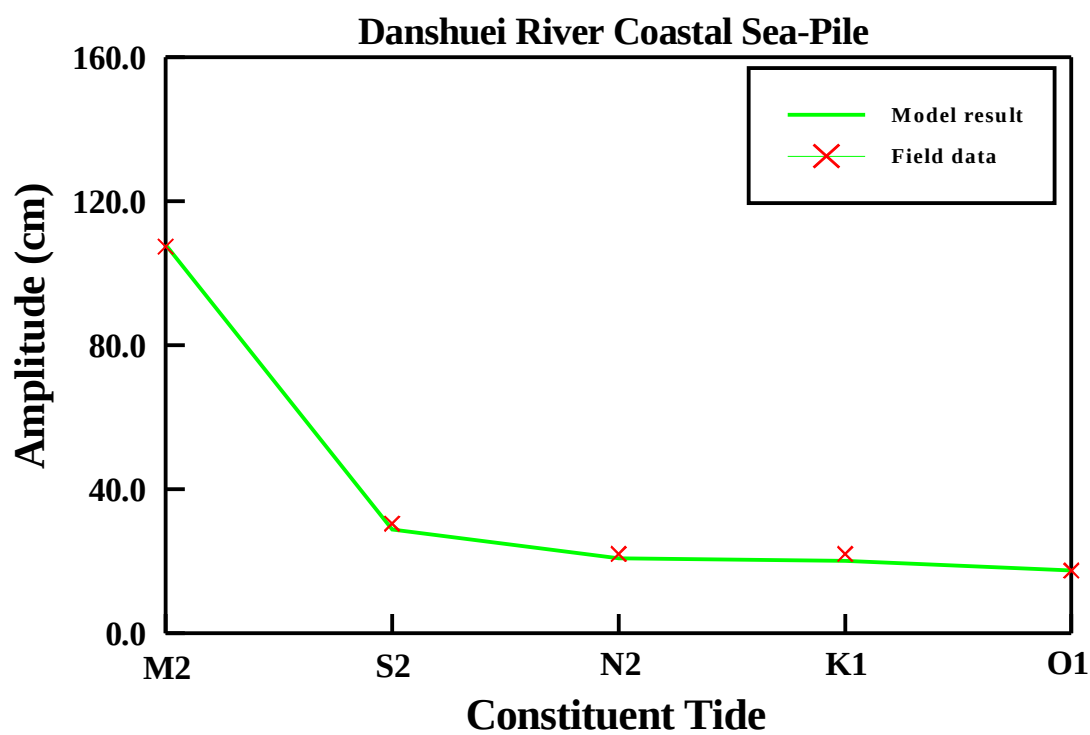


圖4-7 模式模擬與實測數據之分潮振幅與相位角之比較 (富崗漁港)



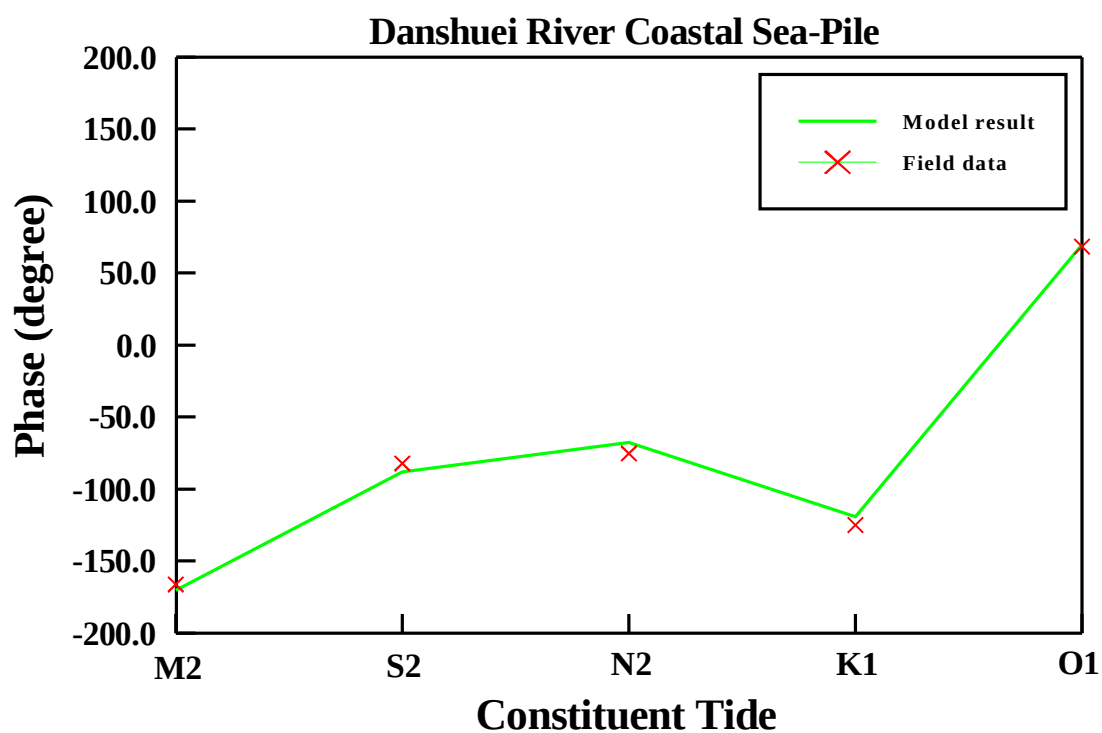
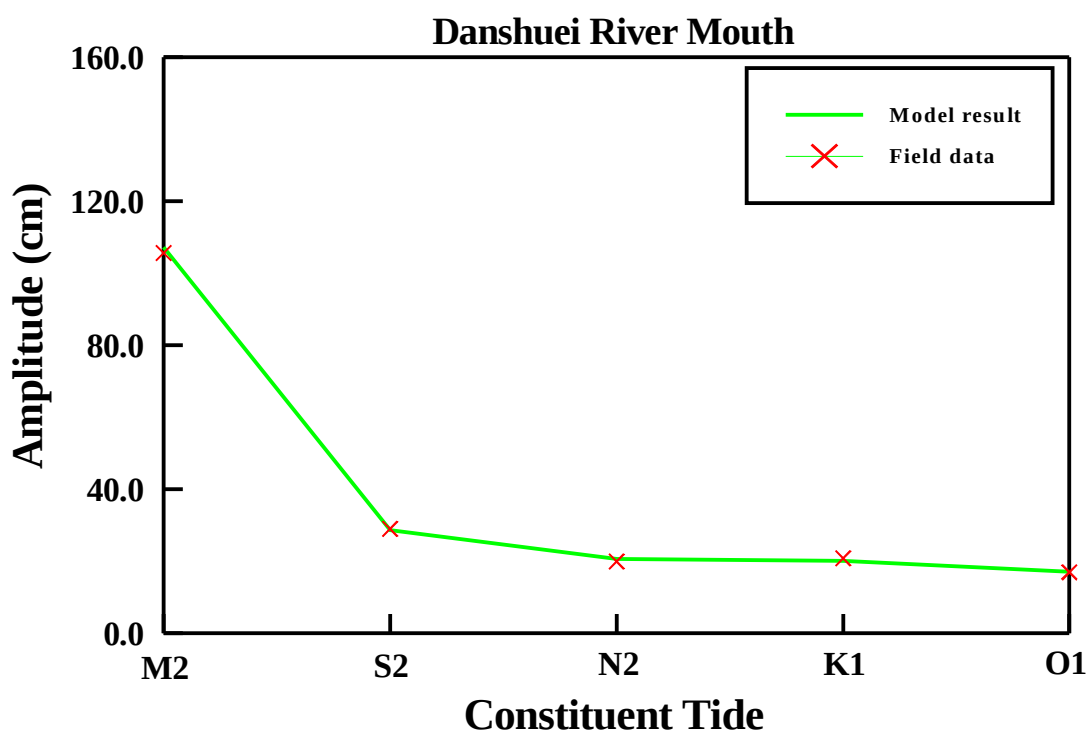


圖4-8 模式模擬與實測數據之分潮振幅與相位角之比較 (淡水河外海觀測樁)



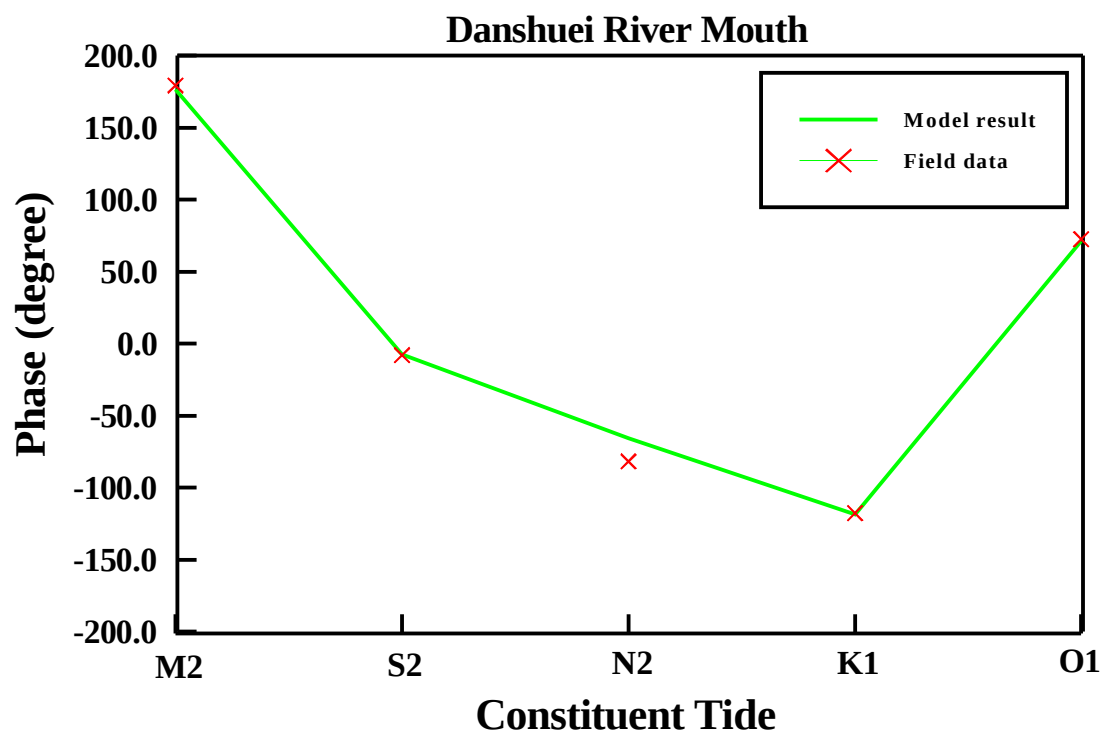
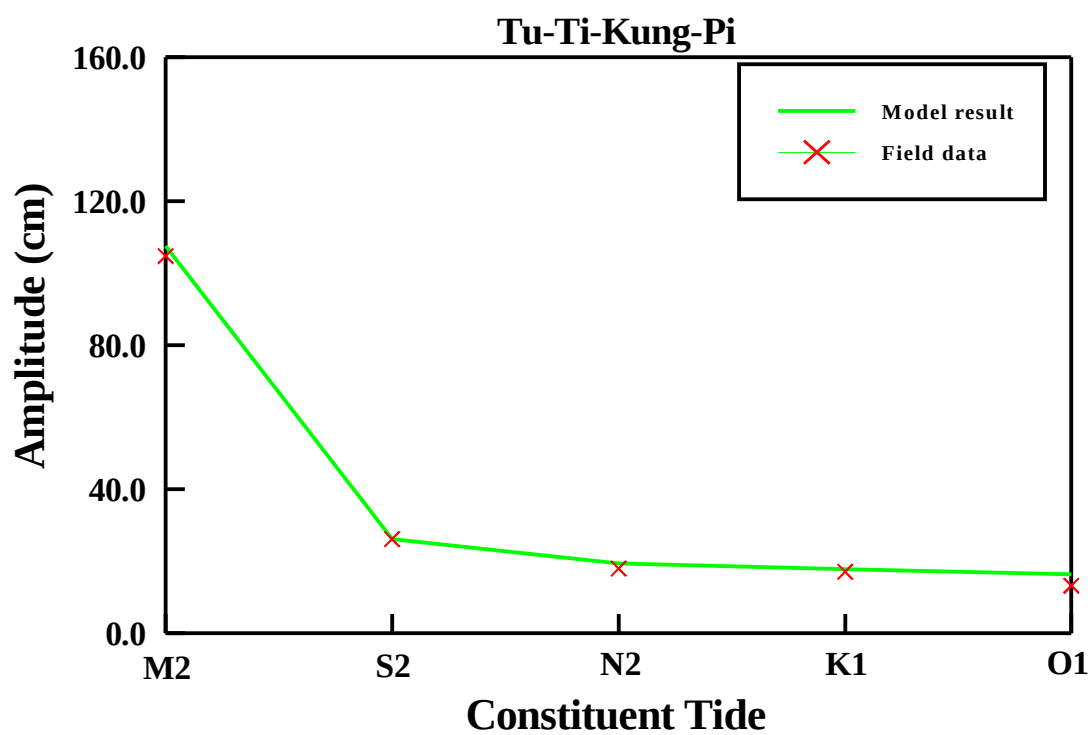


圖4-9 模式模擬與實測數據之分潮振幅與相位角之比較 (淡水河河口)



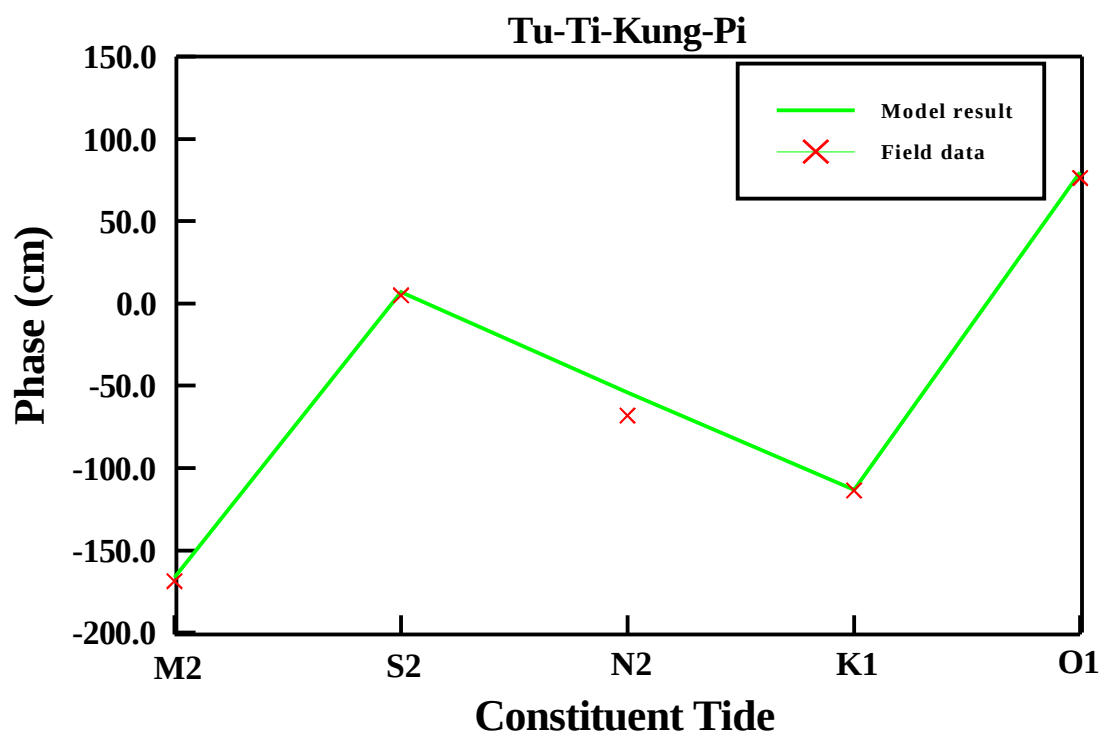
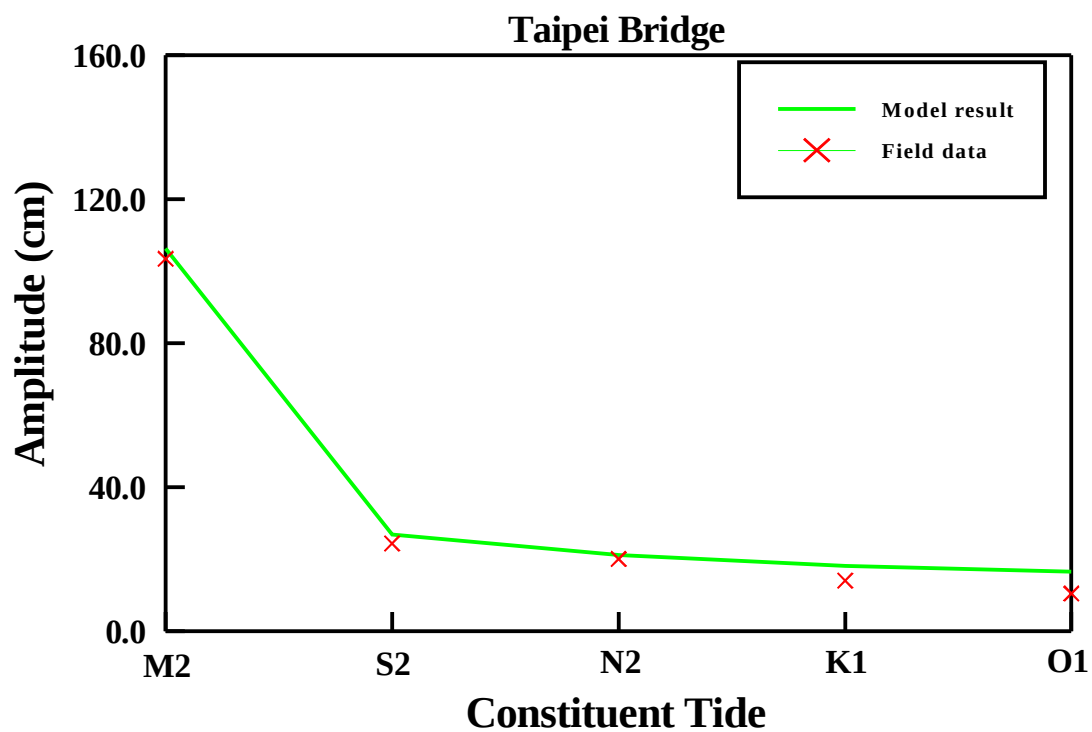


圖4-10 模式模擬與實測數據之分潮振幅與相位角之比較 (土地公鼻)



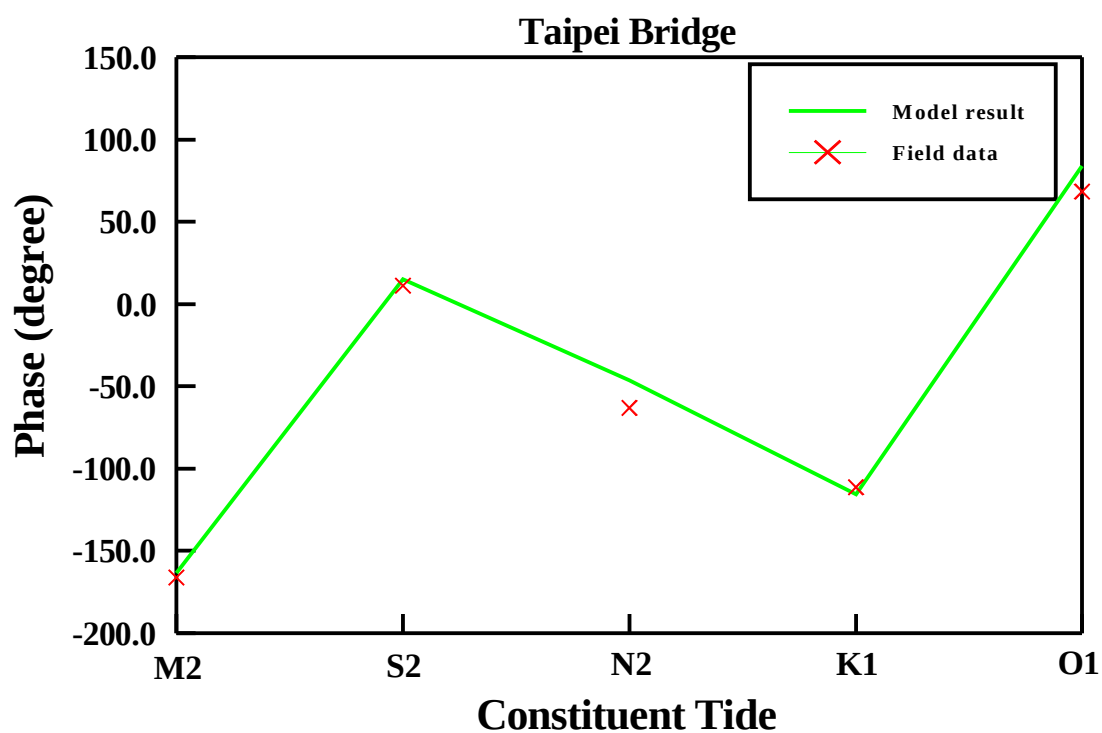
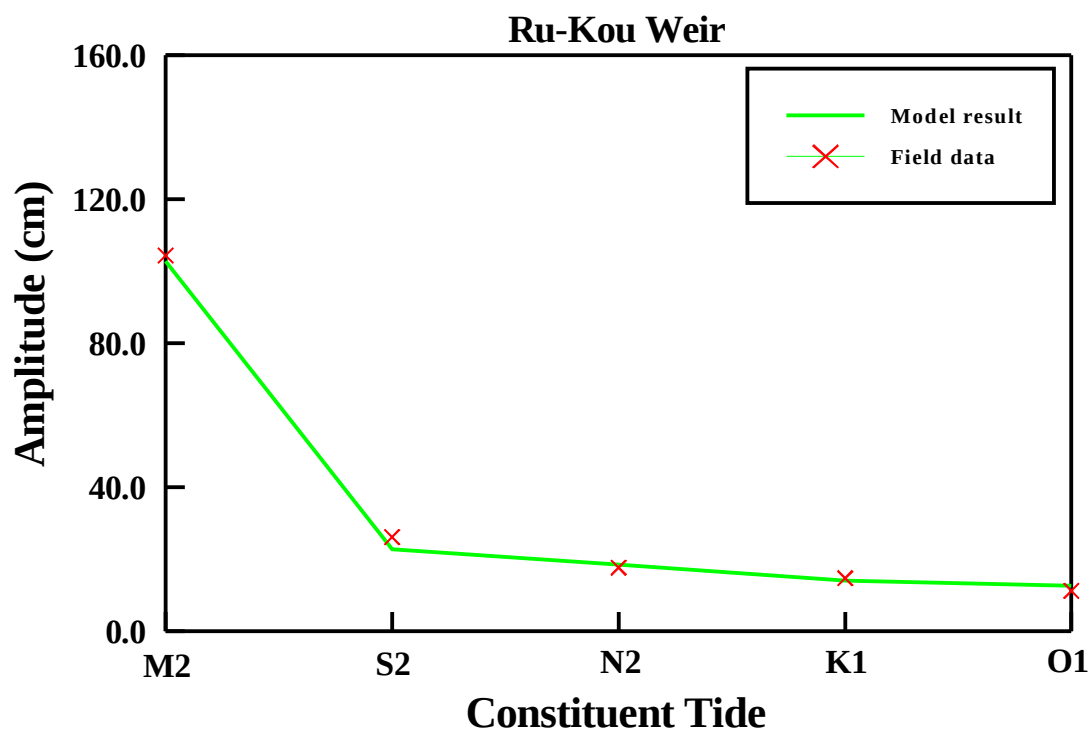


圖4-11 模式模擬與實測數據之分潮振幅與相位角之比較 (台北橋)



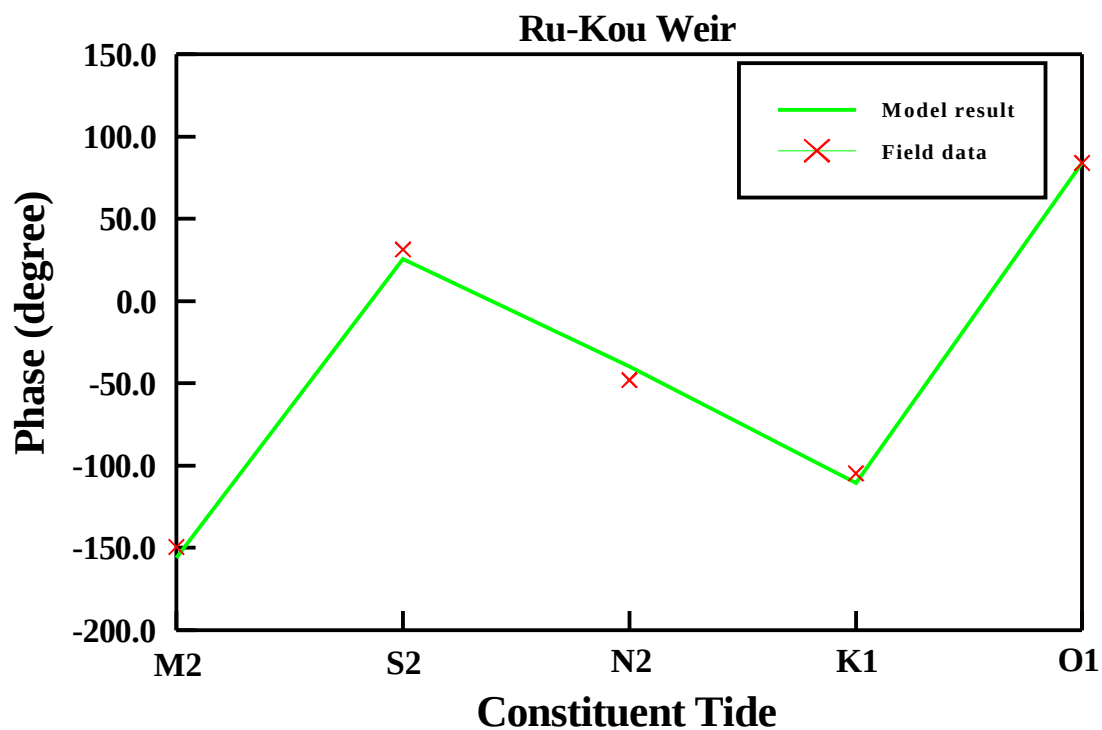
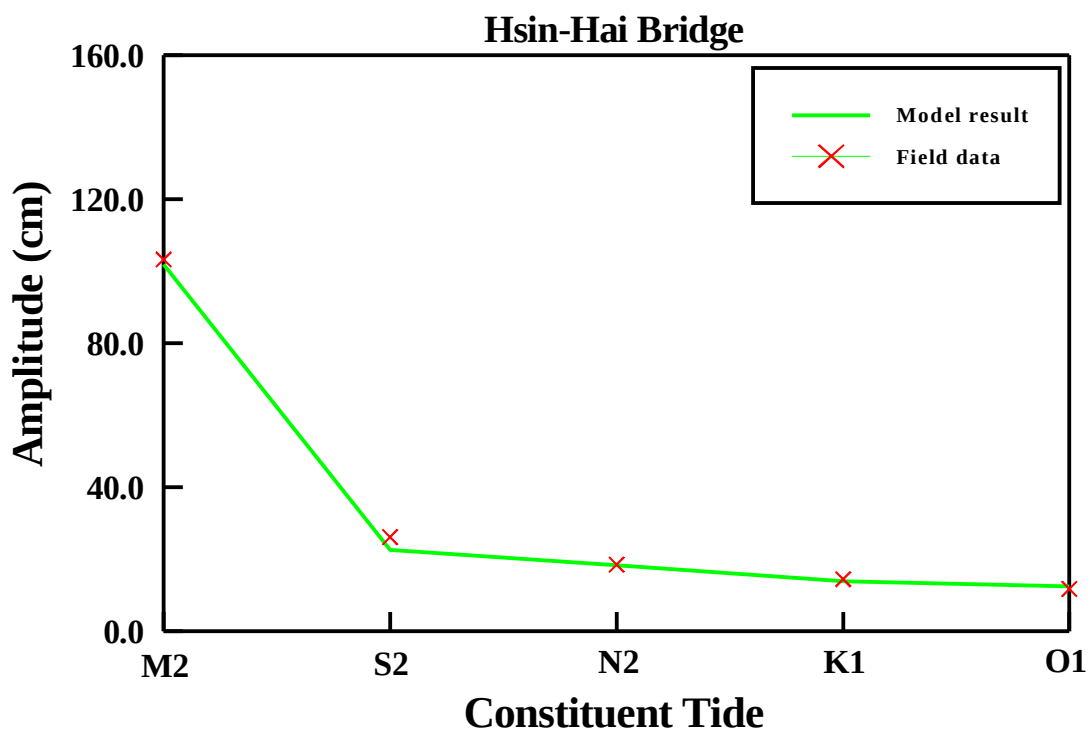


圖4-12 模式模擬與實測數據之分潮振幅與相位角之比較 (入口堰)



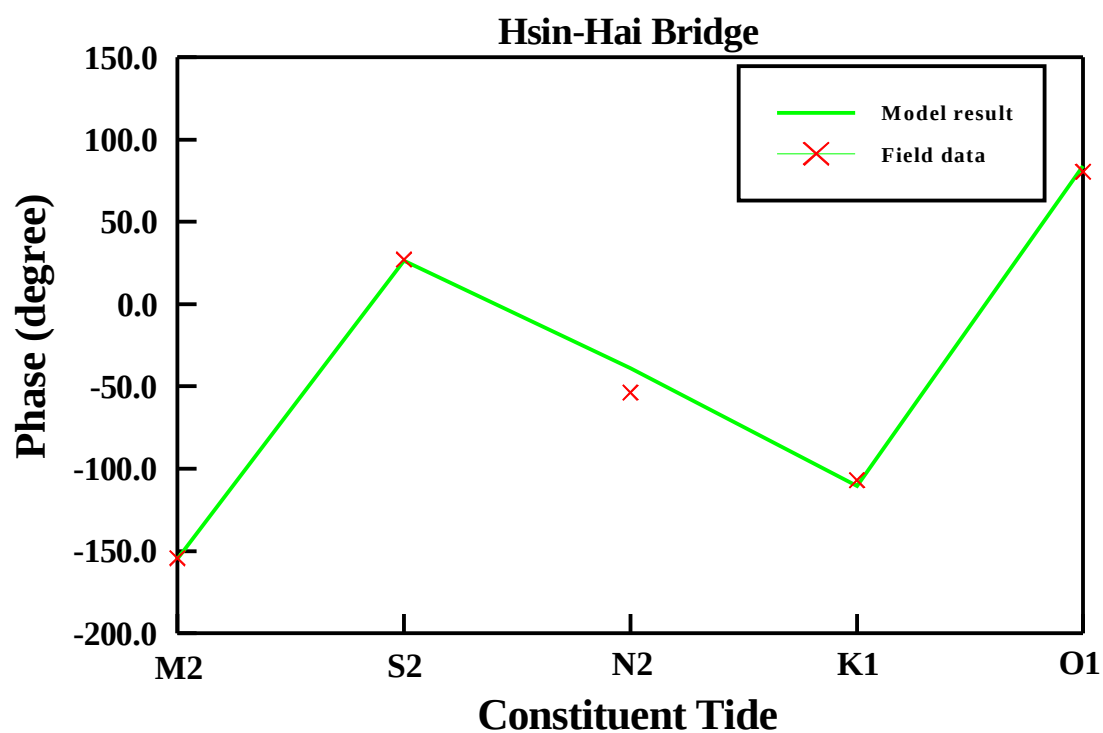
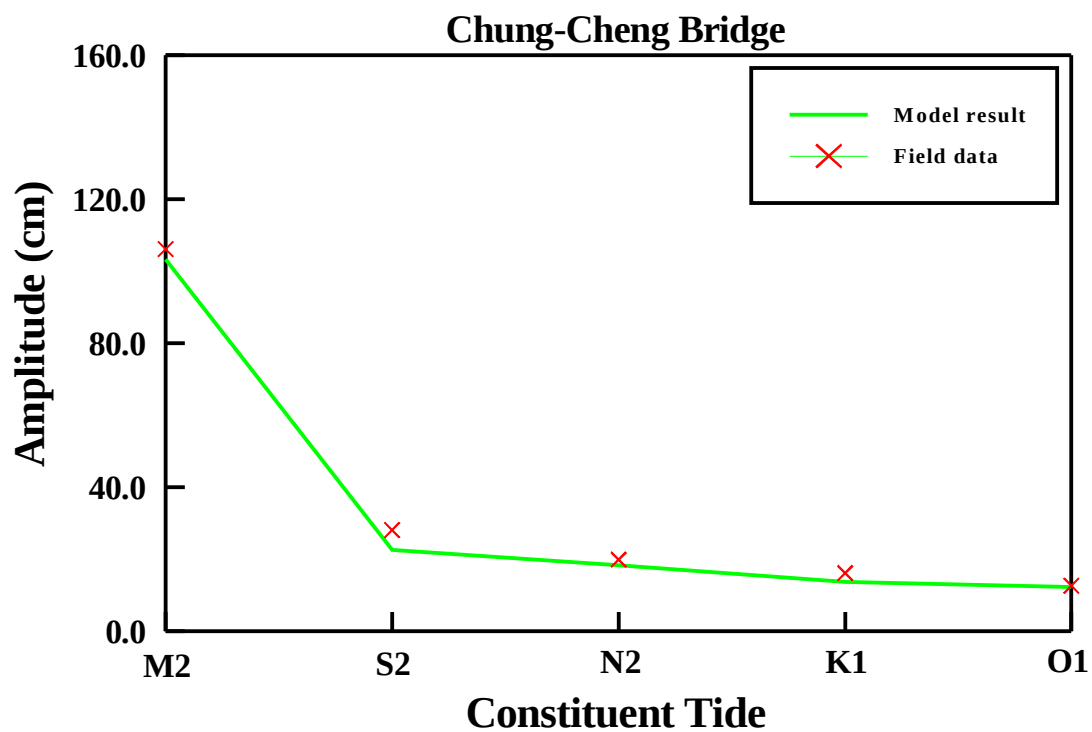


圖4-13 模式模擬與實測數據之分潮振幅與相位角之比較 (新海橋)



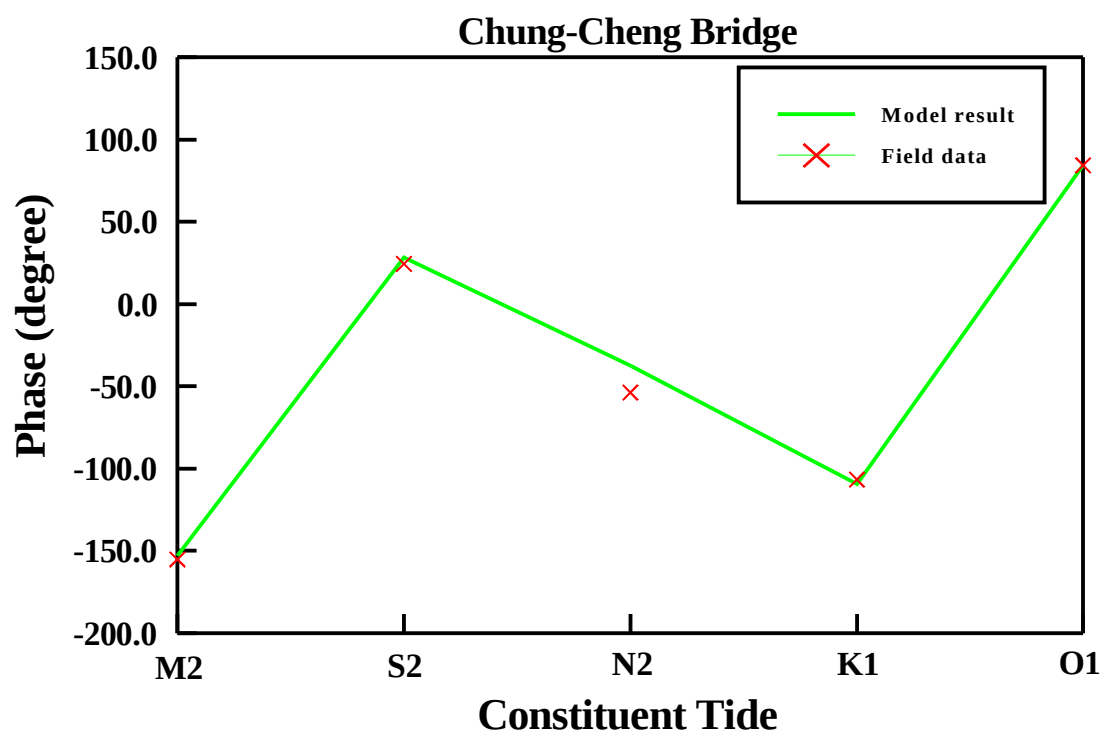
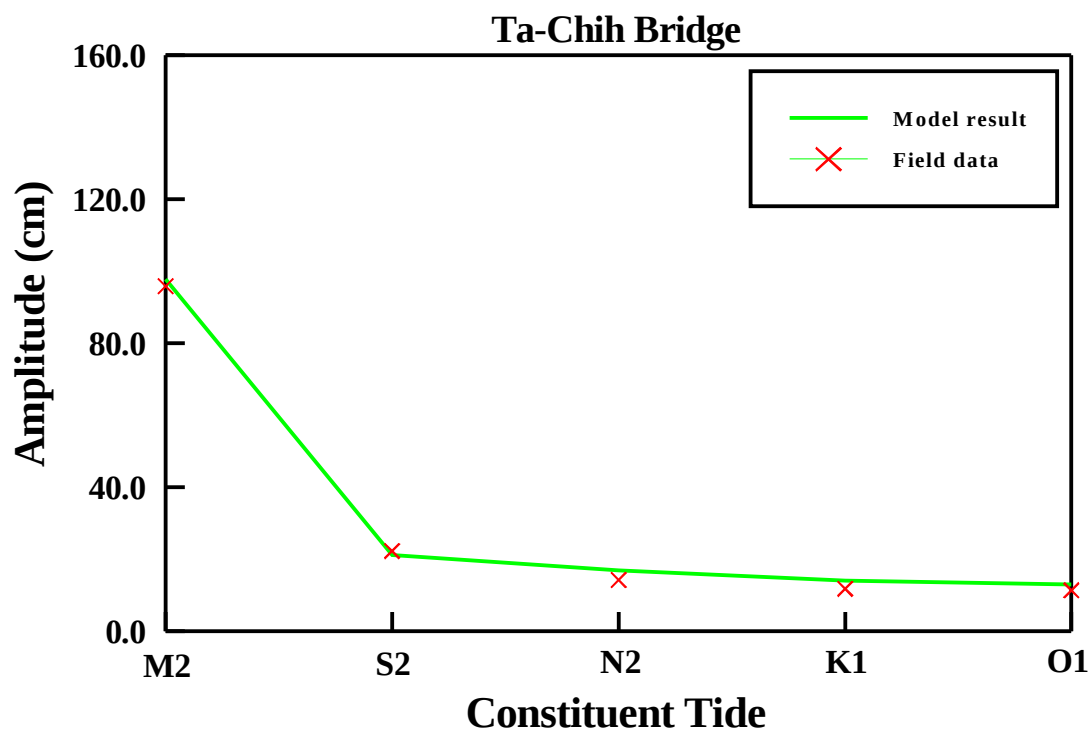


圖4-14 模式模擬與實測數據之分潮振幅與相位角之比較 (中正橋)



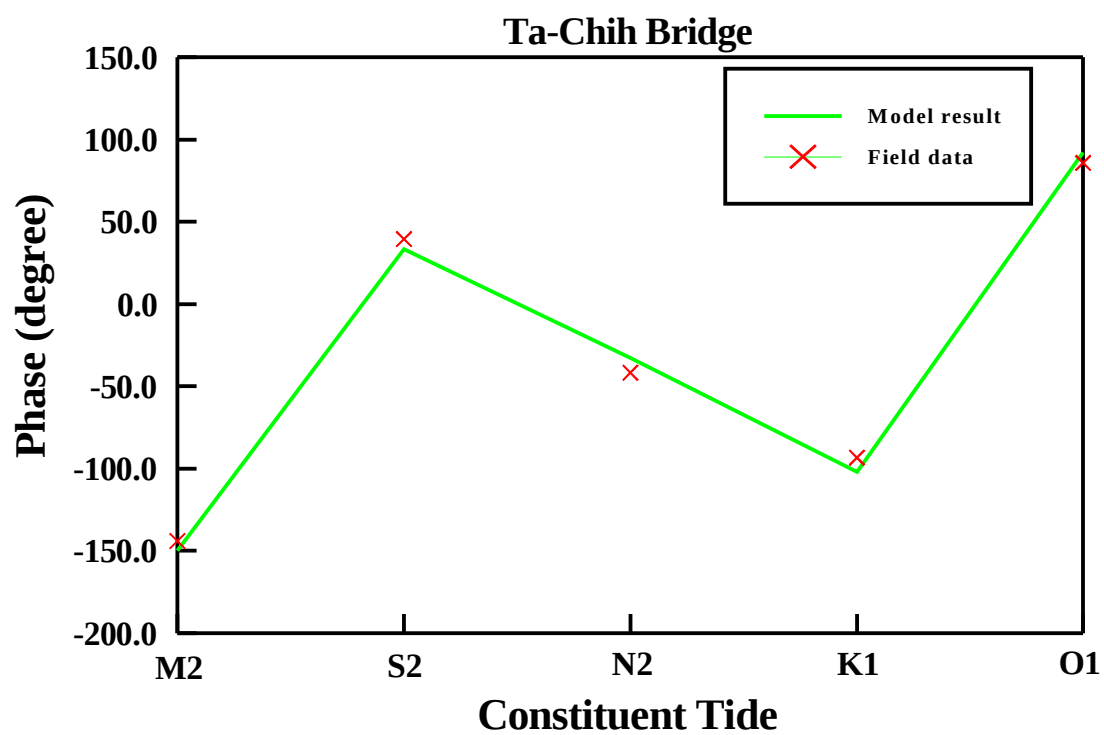


圖4-15 模式模擬與實測數據之分潮振幅與相位角之比較 (大直橋)

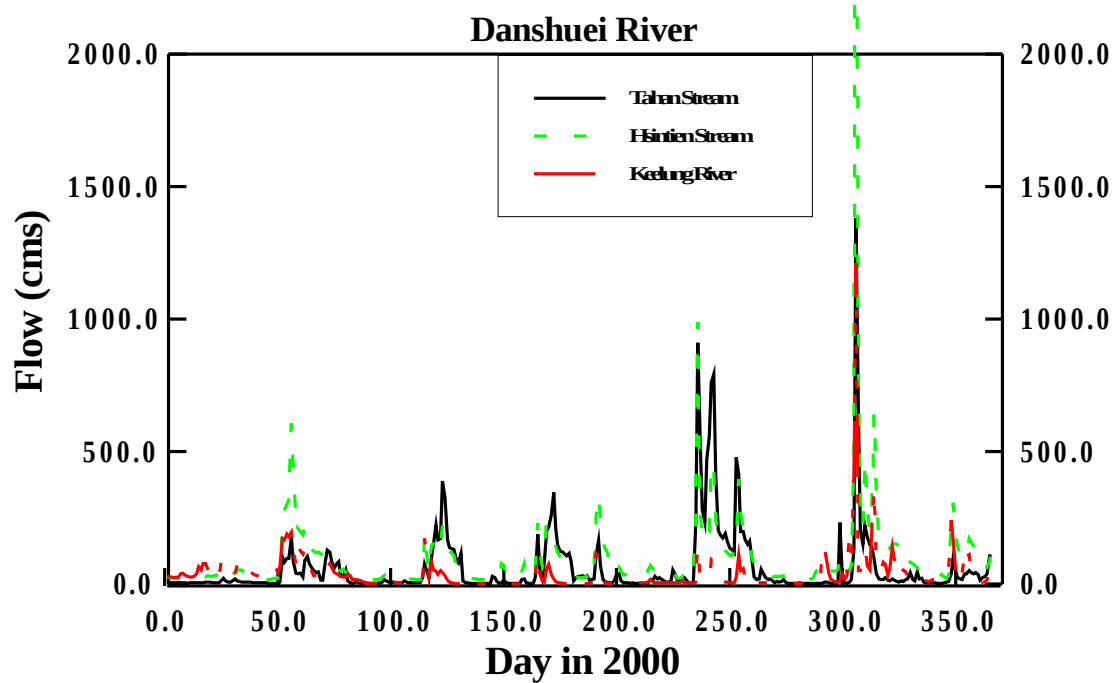


圖4-16 民國89年大漢溪、新店溪與基隆河上游邊界之日流量資料

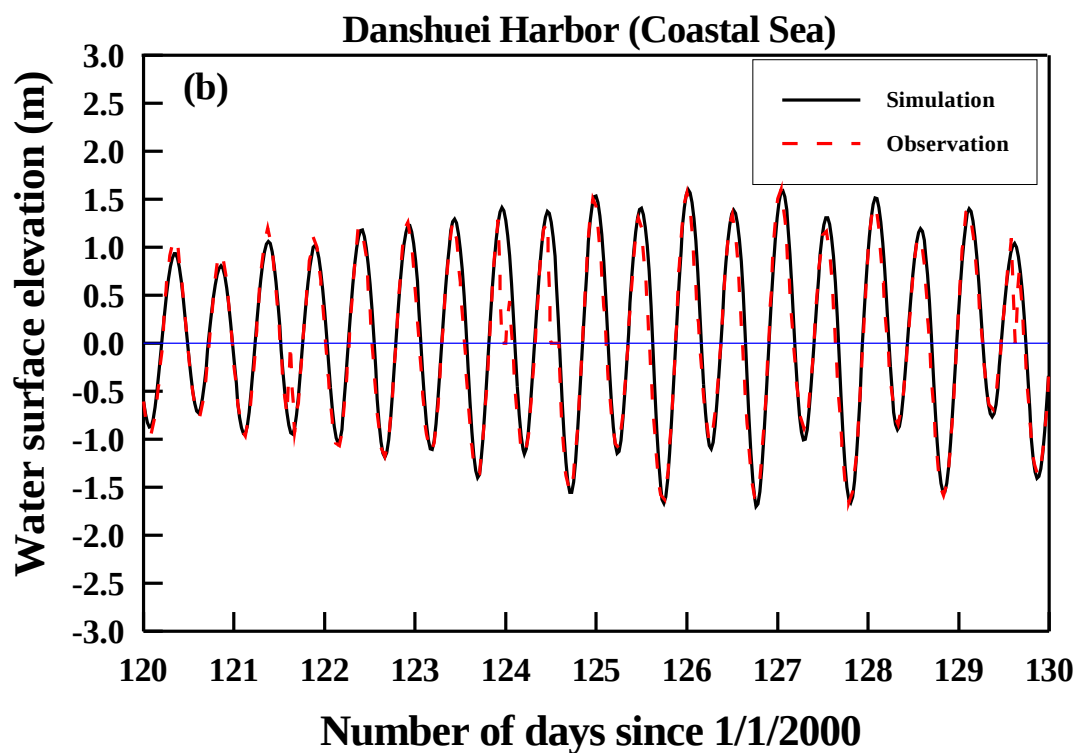
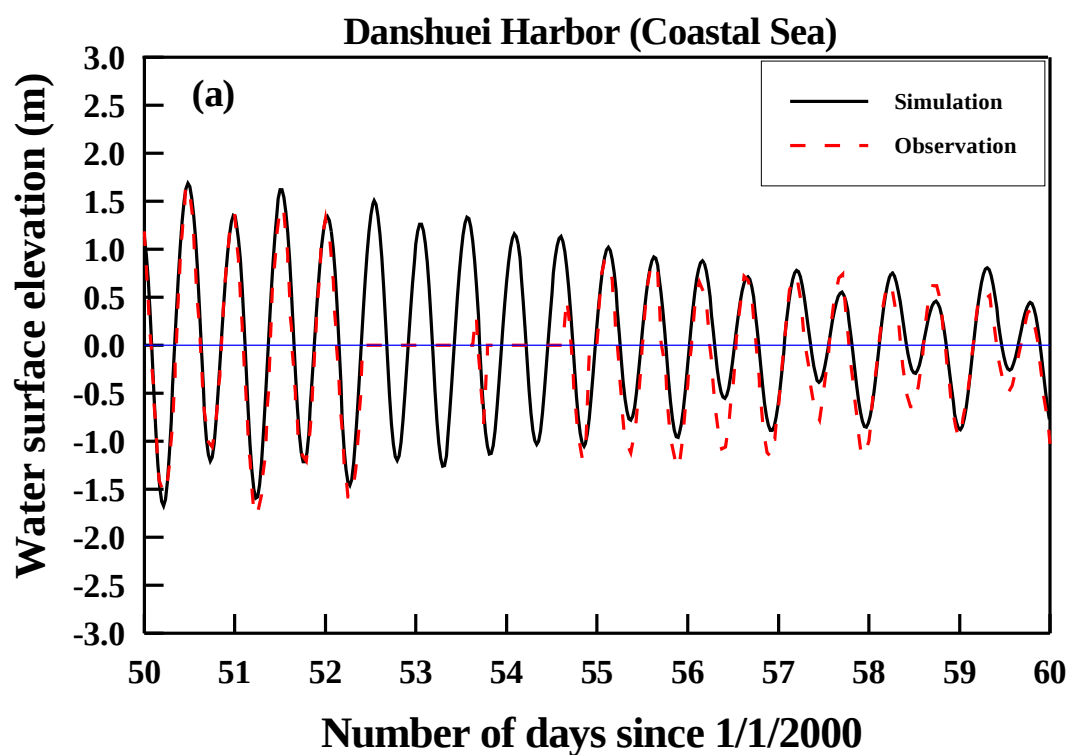


圖4-17 淡水漁港實測水位與模式模擬水位之比較

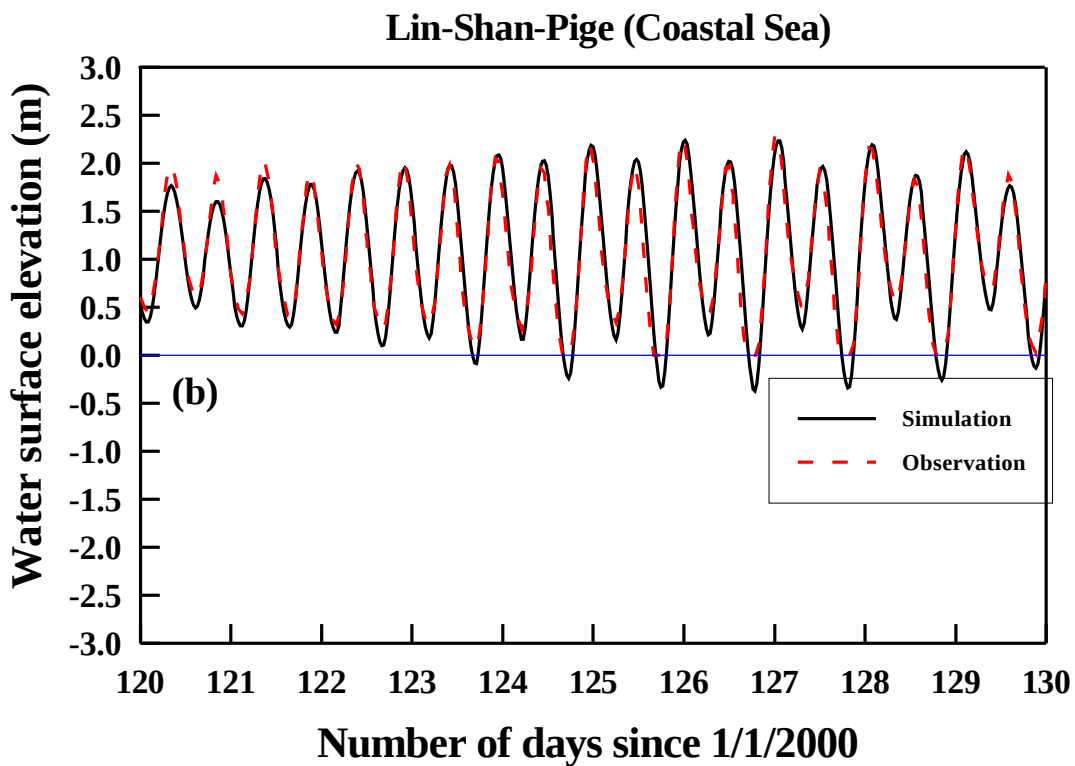
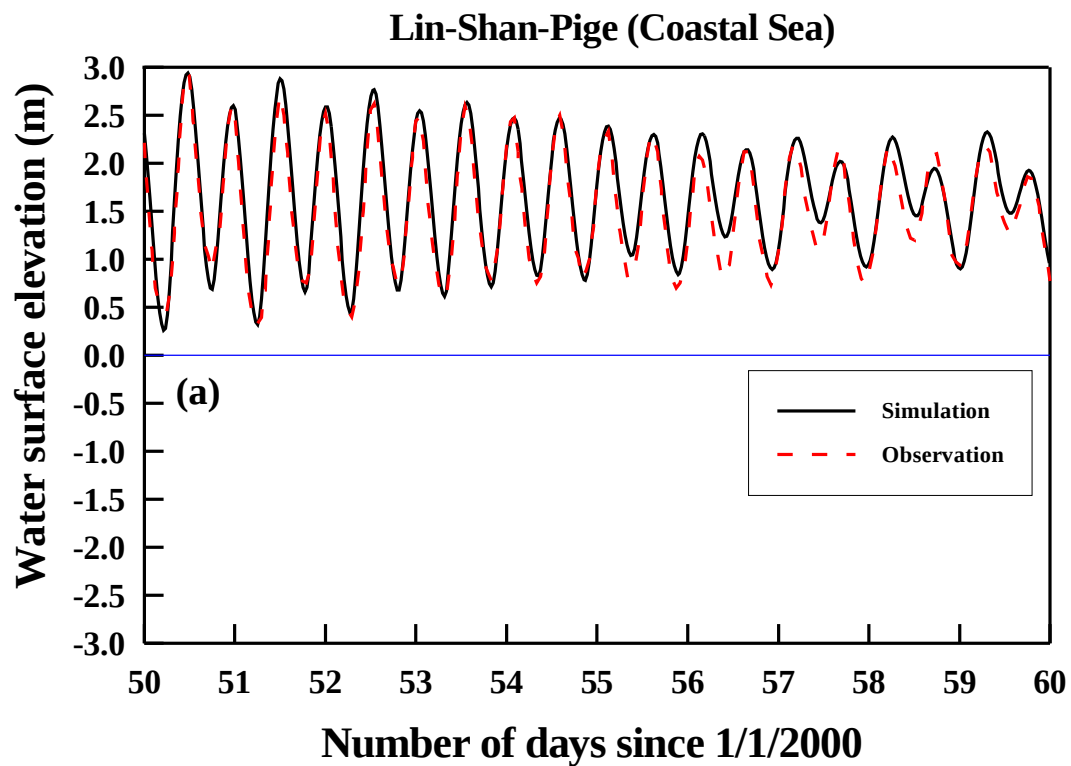


圖4-18 石門鄉麟山鼻實測水位與模式模擬水位之比較

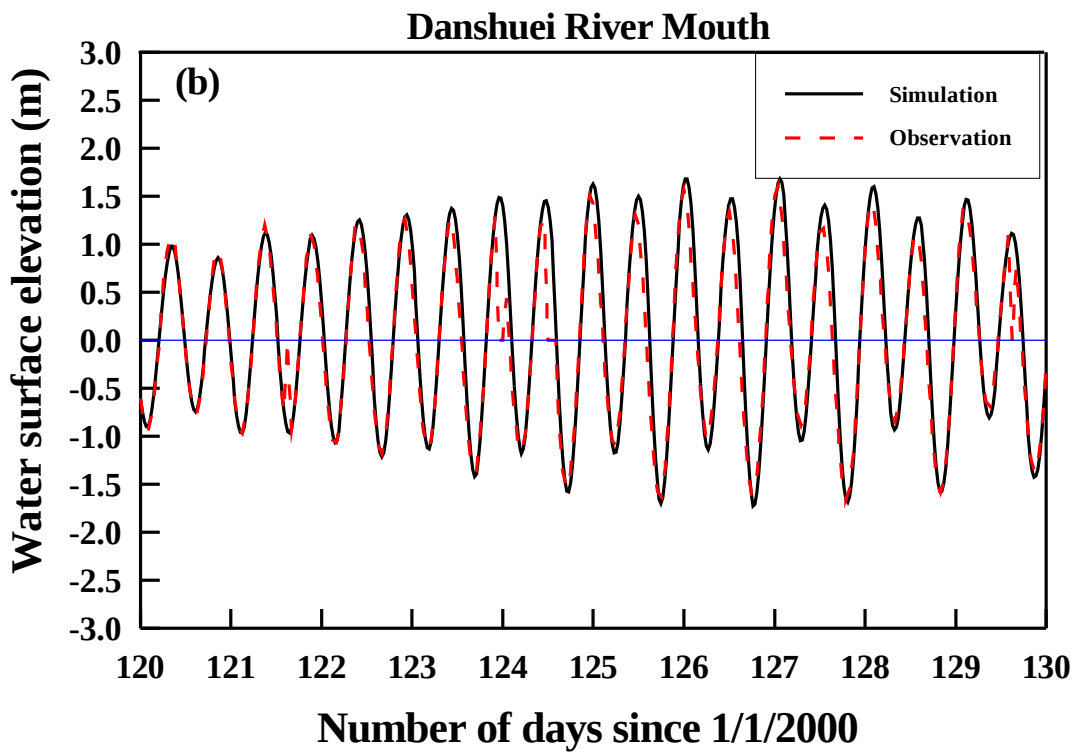
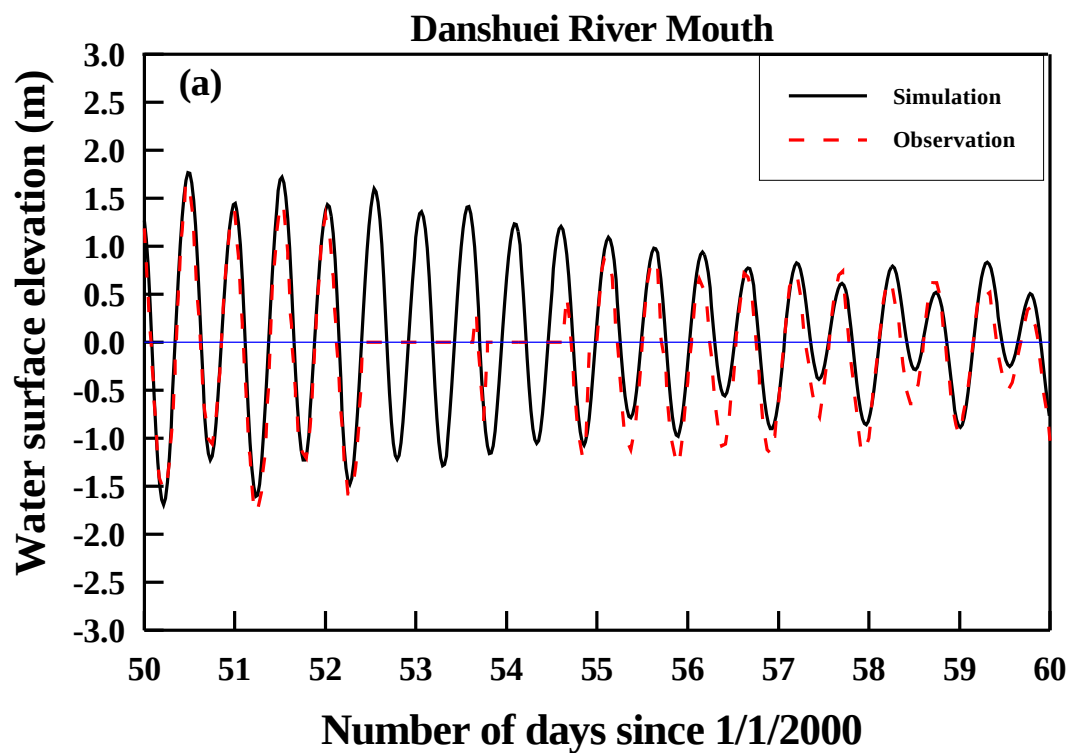


圖4-19 淡水河河口實測水位與模式模擬水位之比較

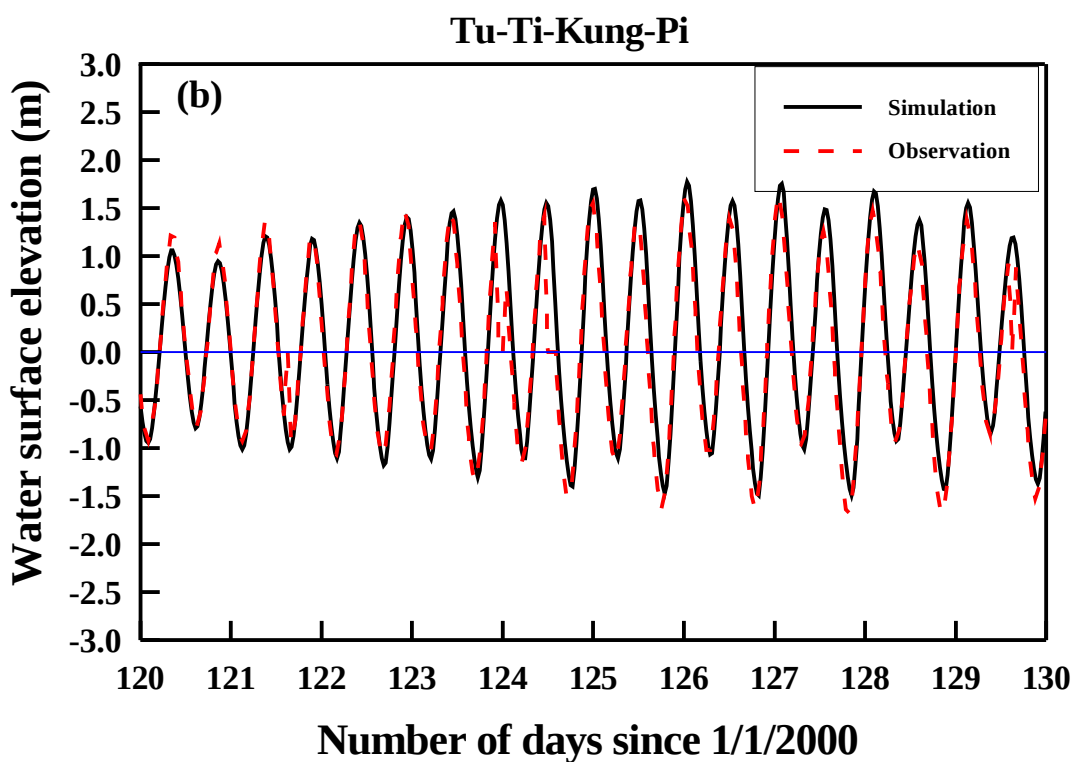
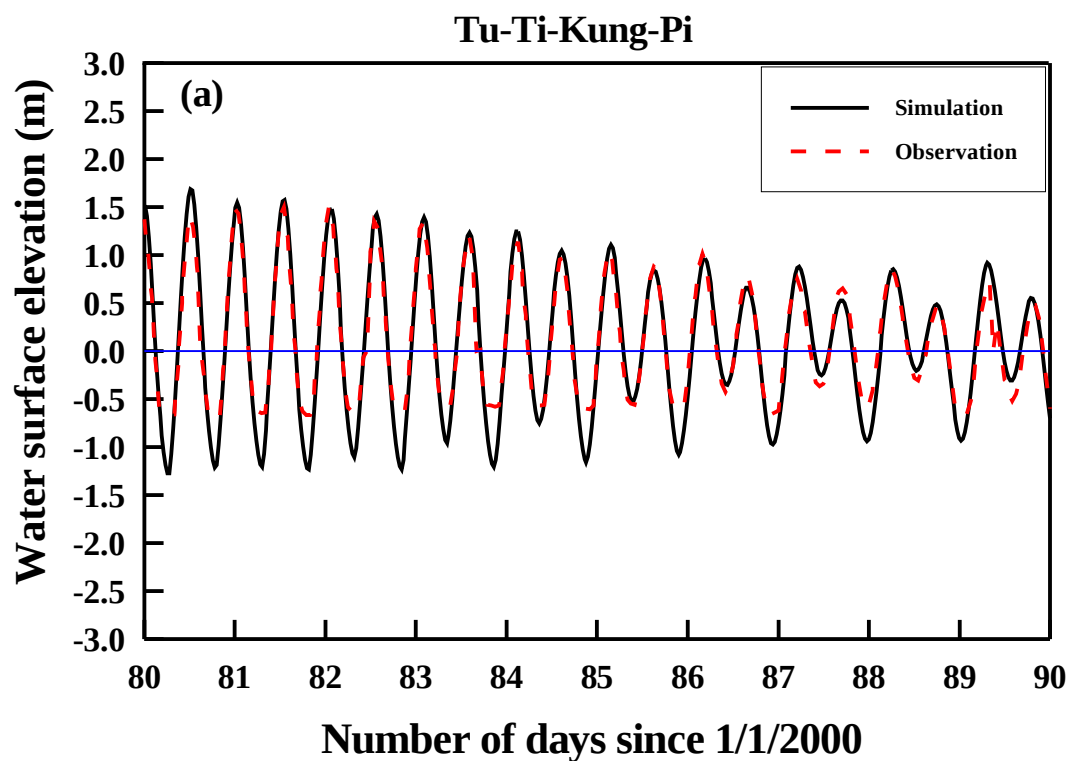


圖4-20 土地公鼻實測水位與模式模擬水位之比較

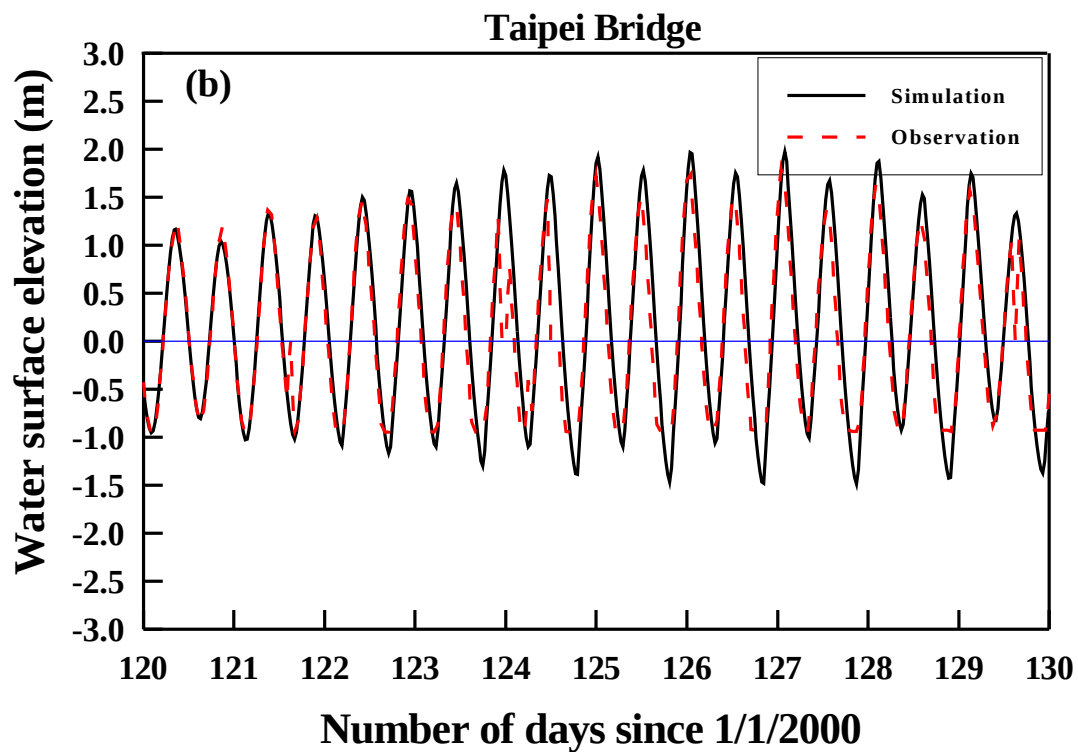
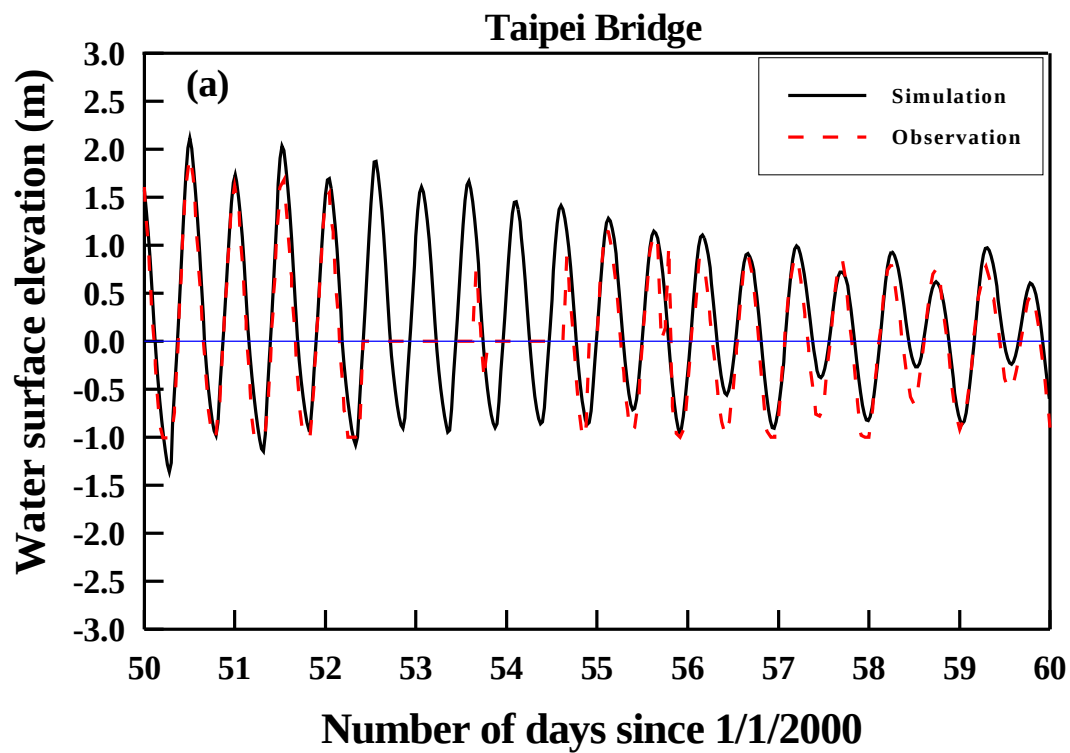


圖4-21 台北橋實測水位與模式模擬水位之比較

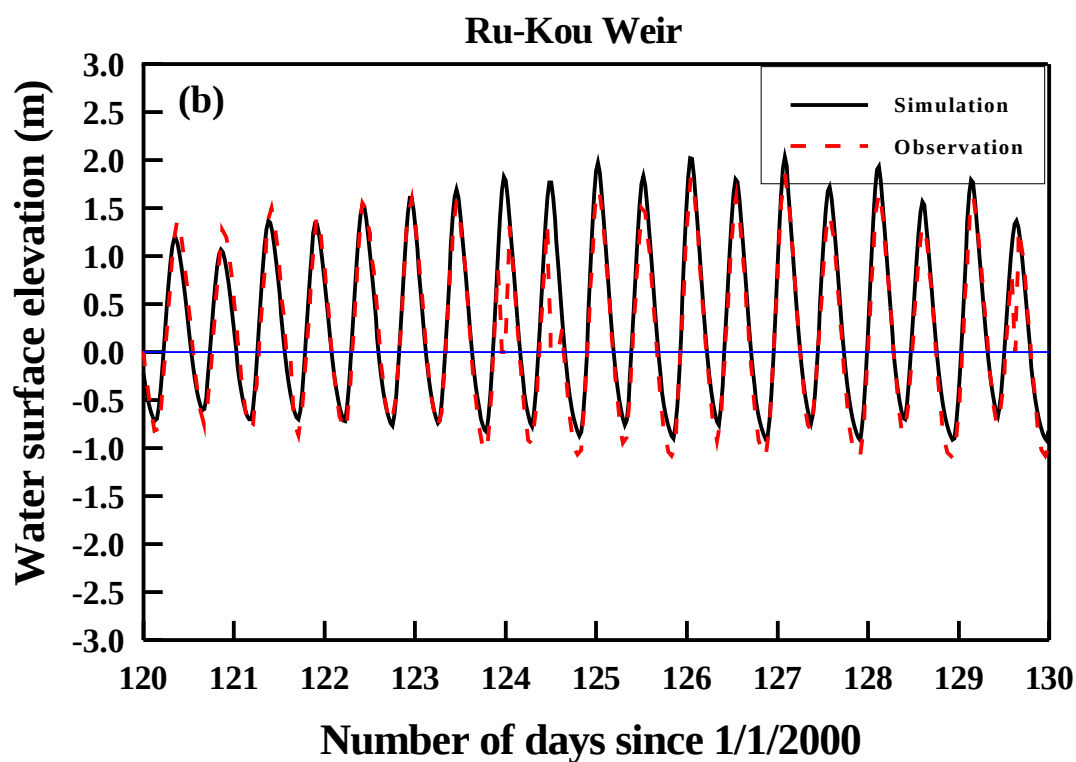
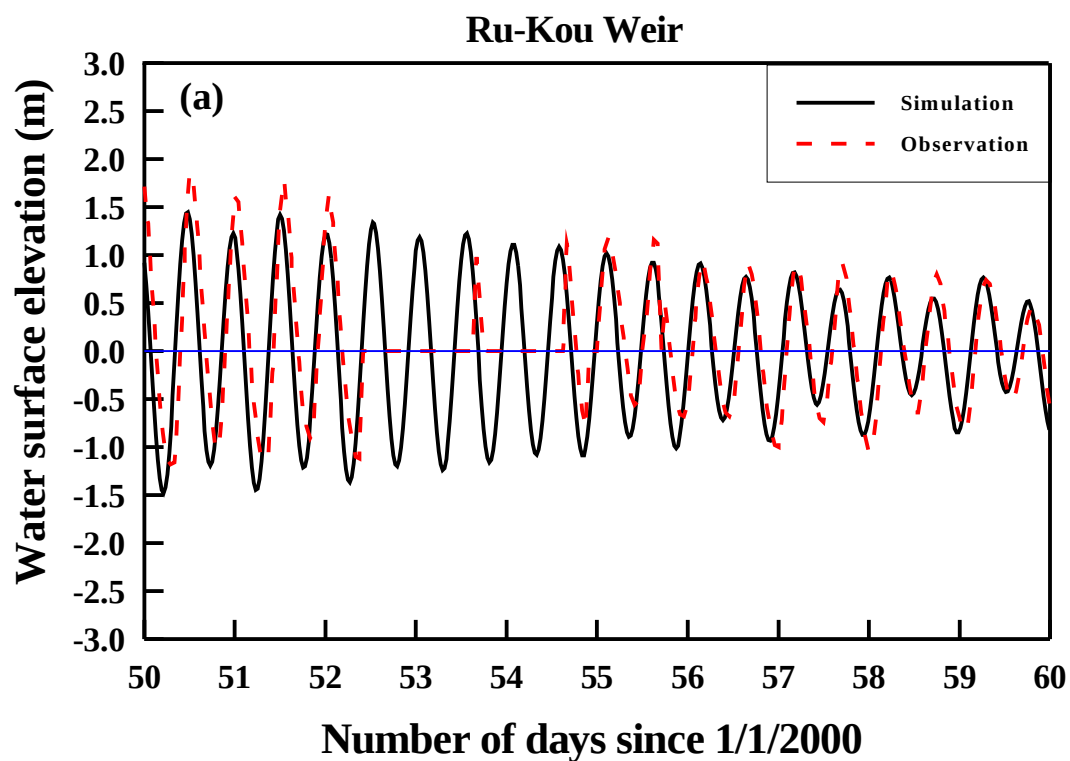


圖4-22 入口堰實測水位與模式模擬水位之比較

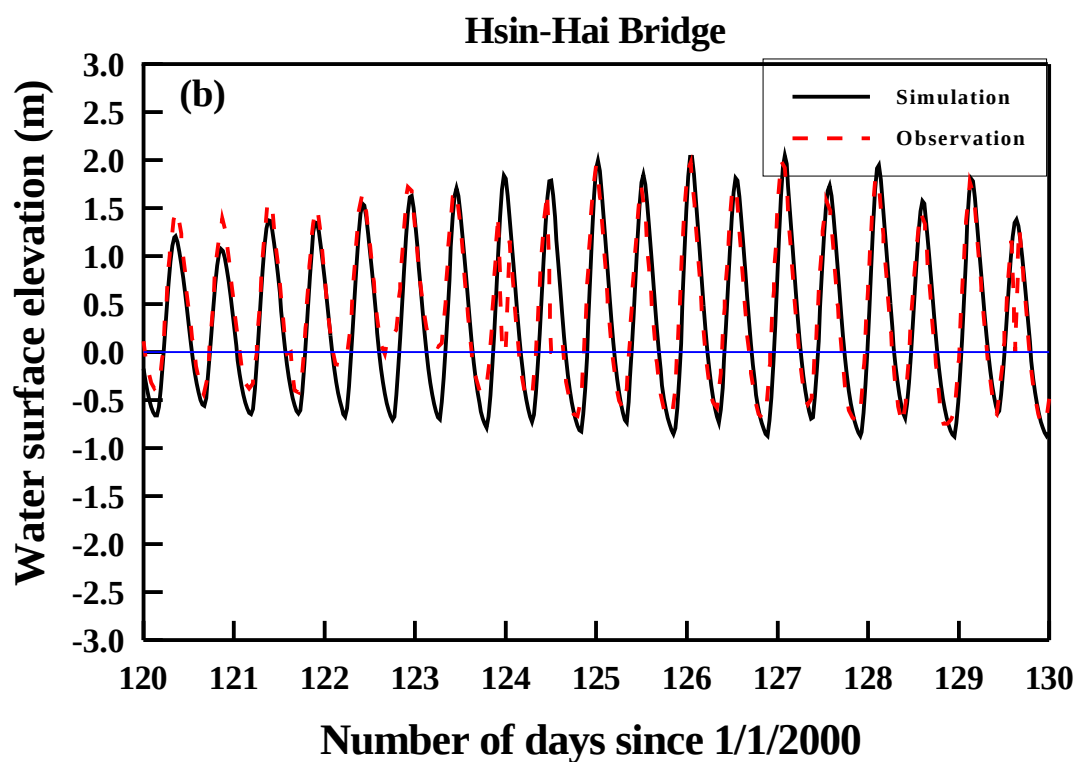
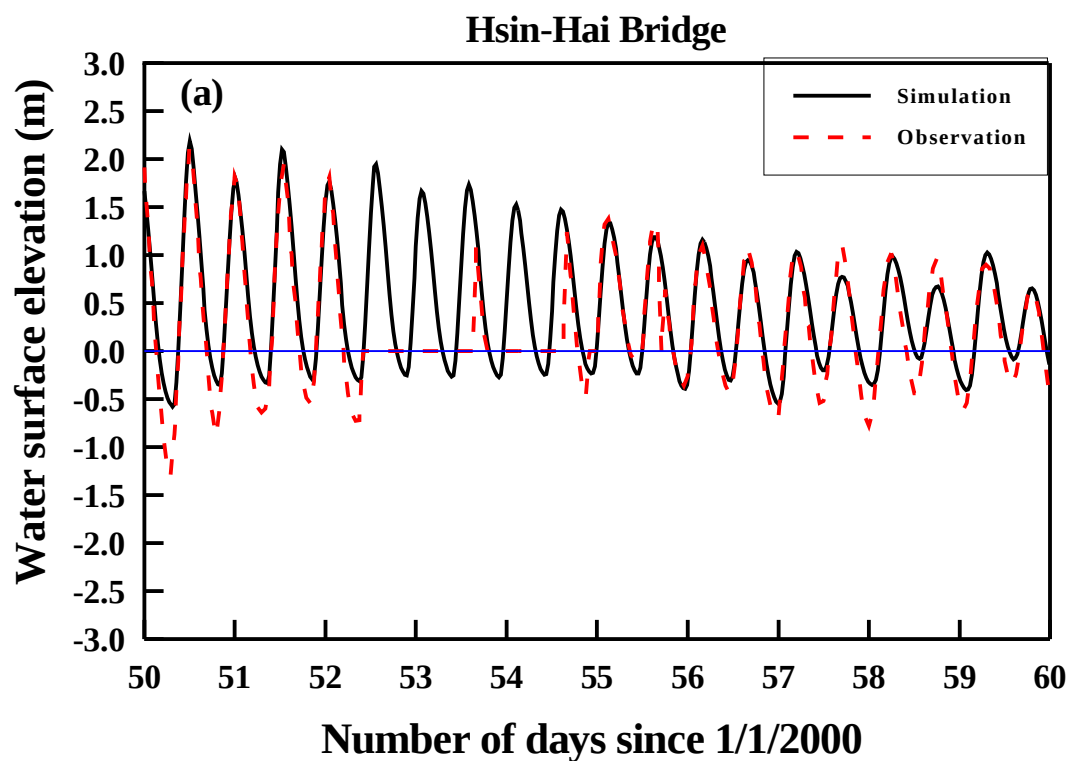


圖4-23 新海橋實測水位與模式模擬水位之比較

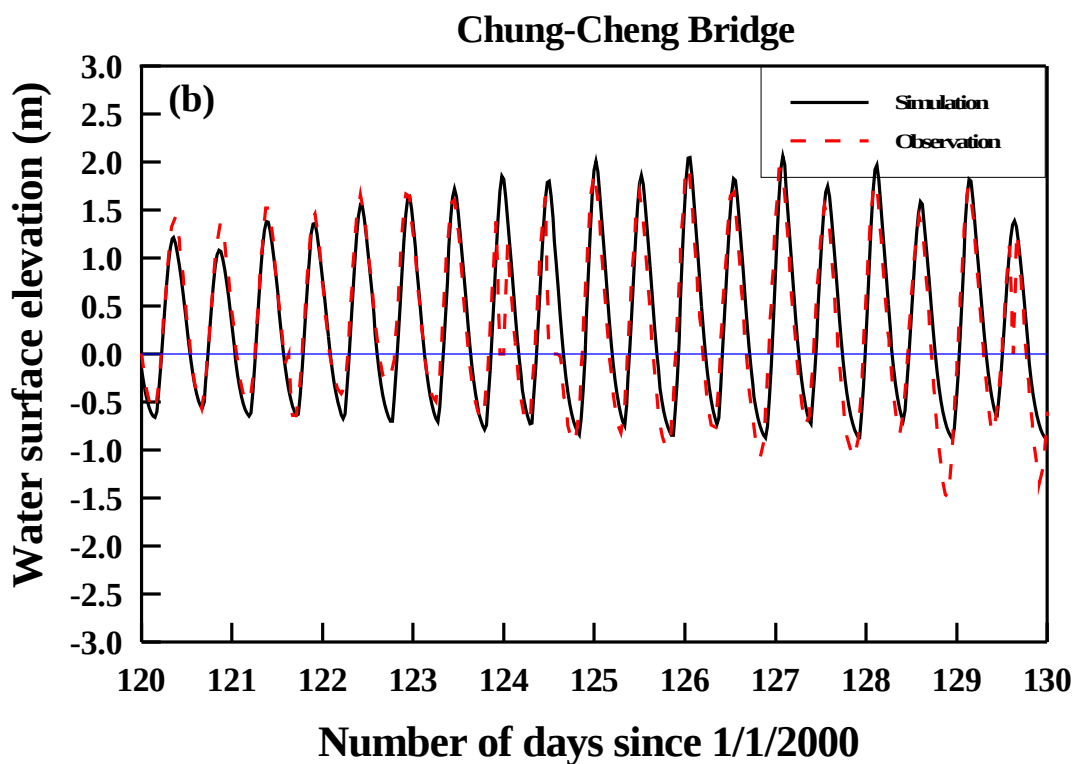
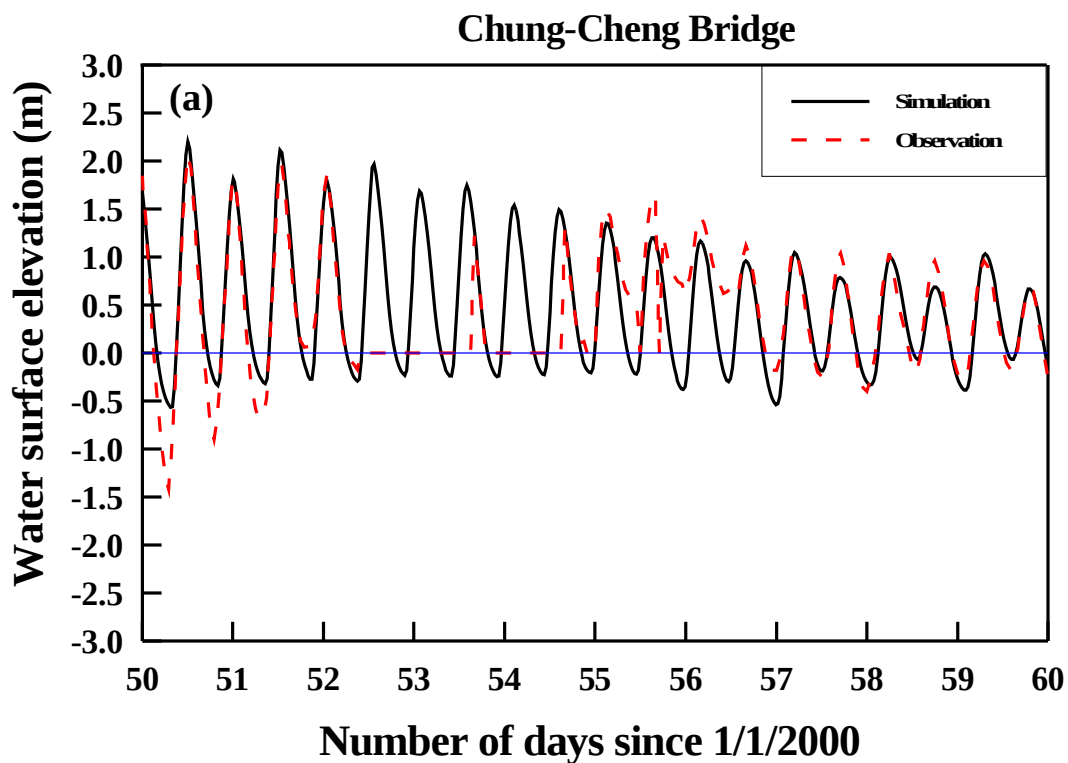


圖4-24 中正橋實測水位與模式模擬水位之比較

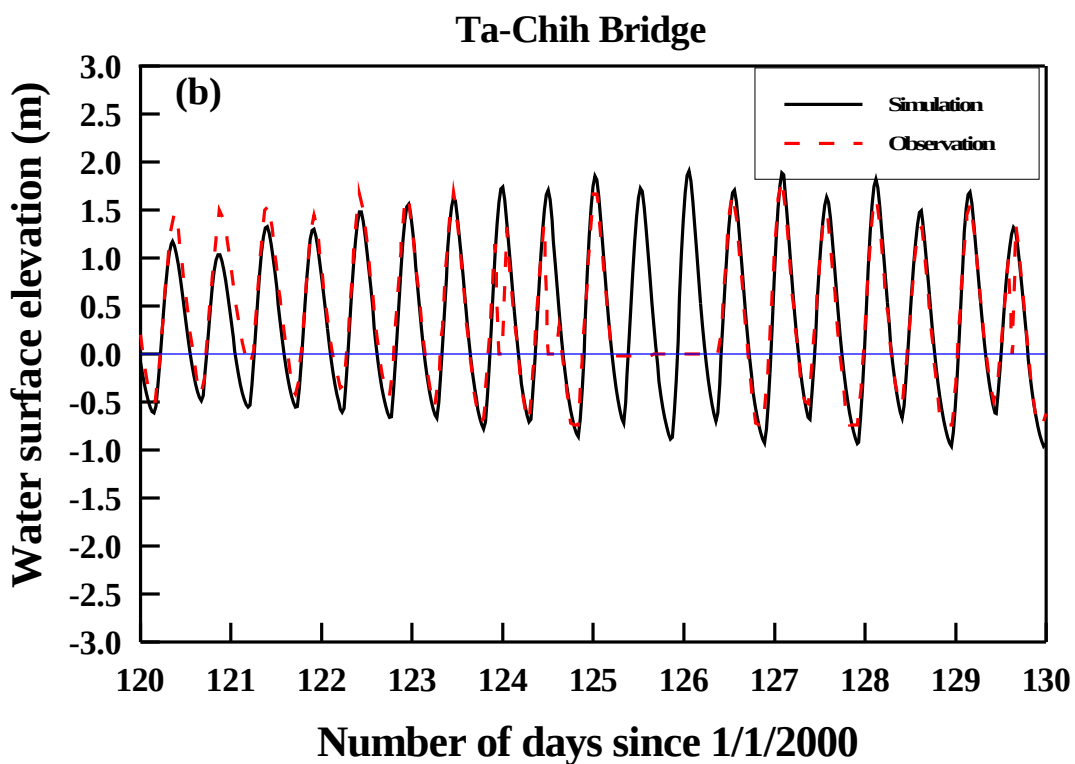
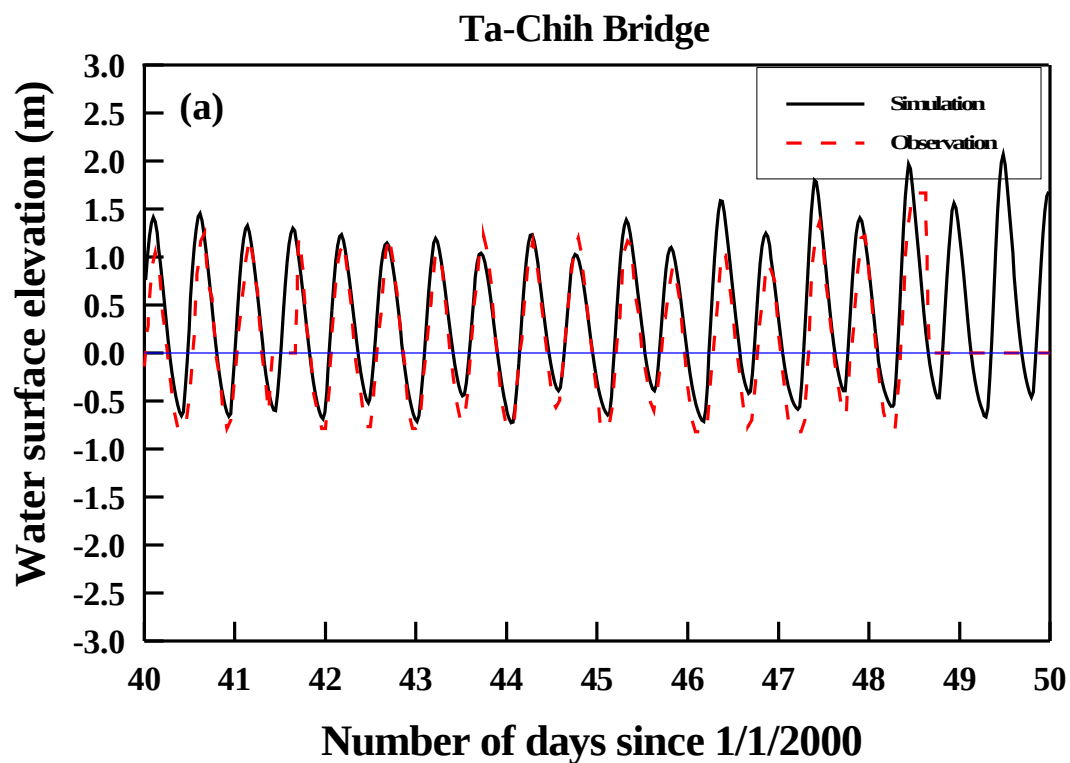


圖4-25 大直橋實測水位與模式模擬水位之比較

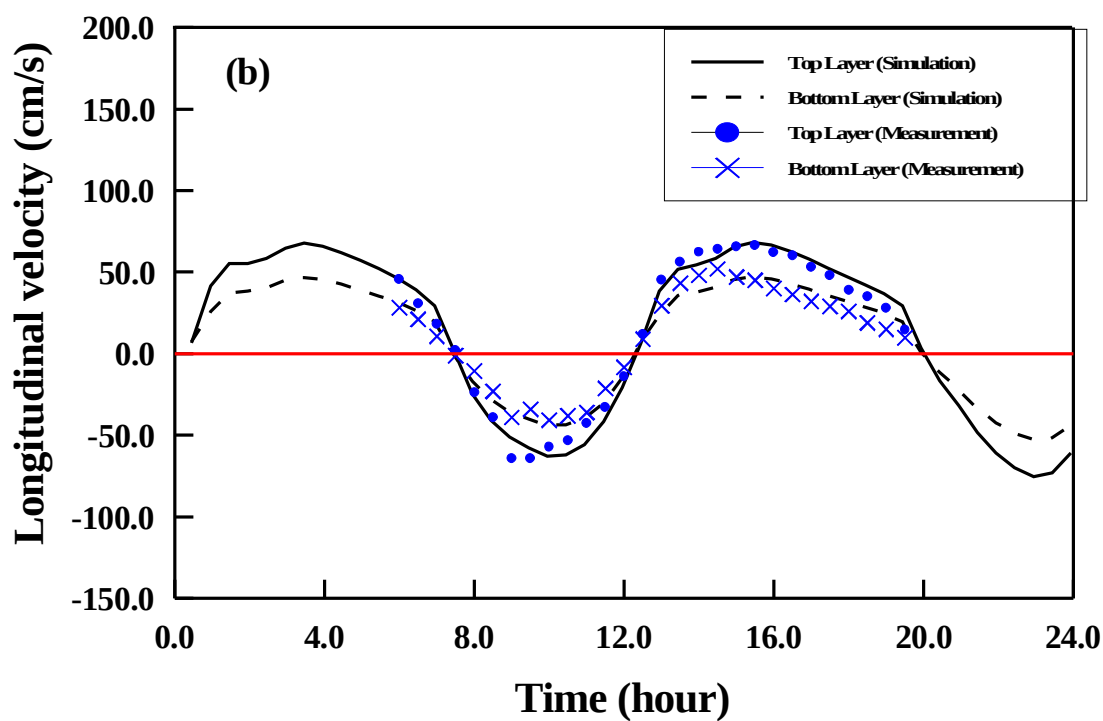
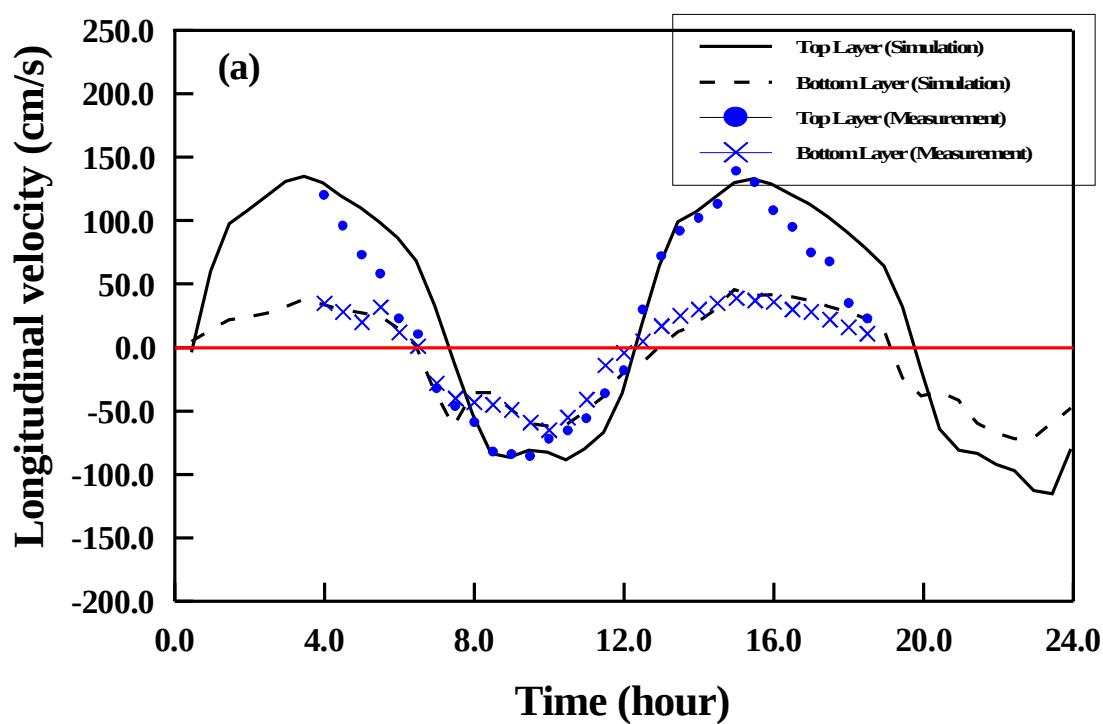


圖4-26 全潮觀測流速與模式模擬結果之比較 (a)關渡橋 (b)台北橋
(民國89年5月5日)

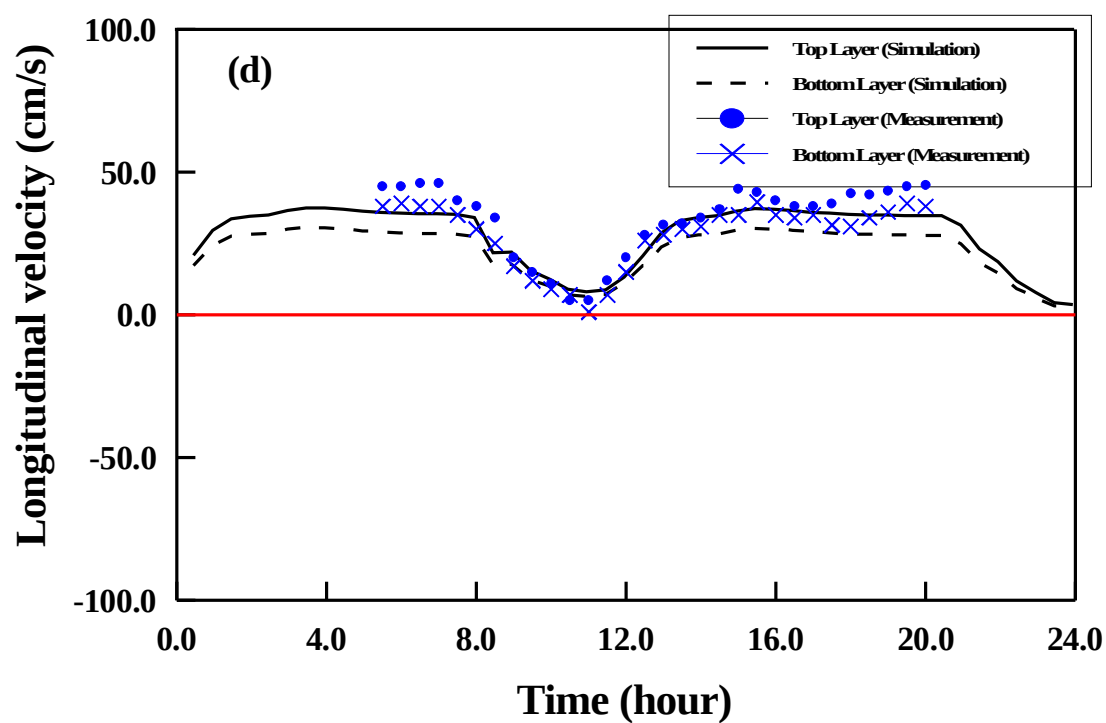
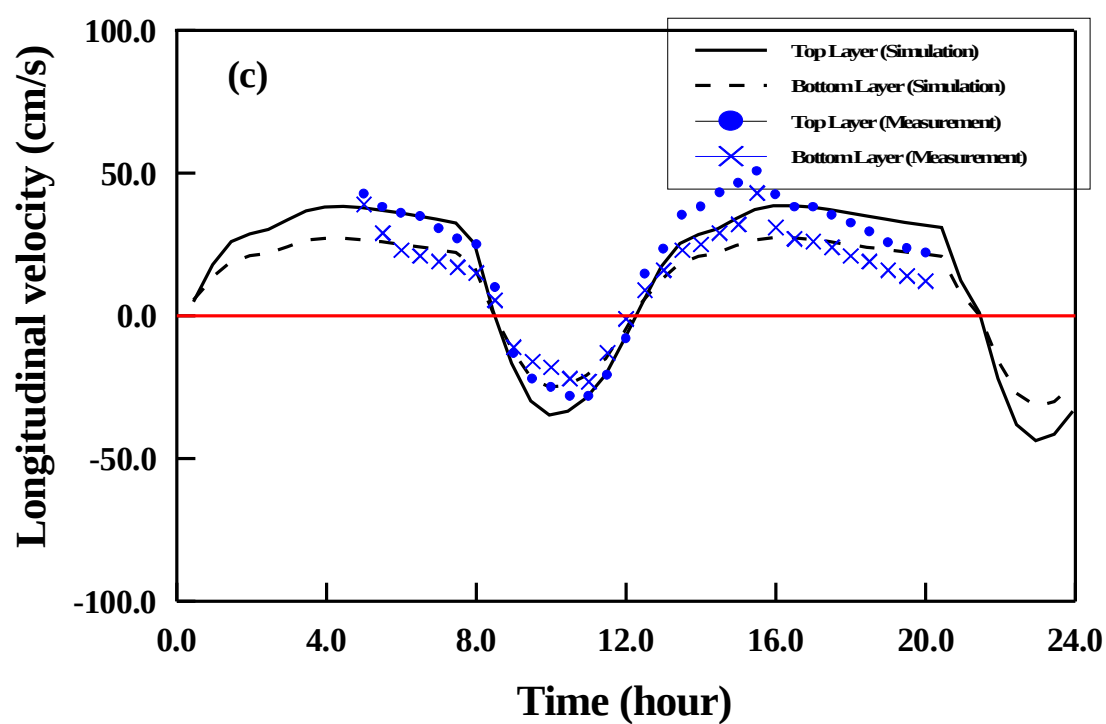


圖4-27 全潮觀測流速與模式模擬結果之比較 (c)新海橋 (d)中正橋
(民國89年5月5日)

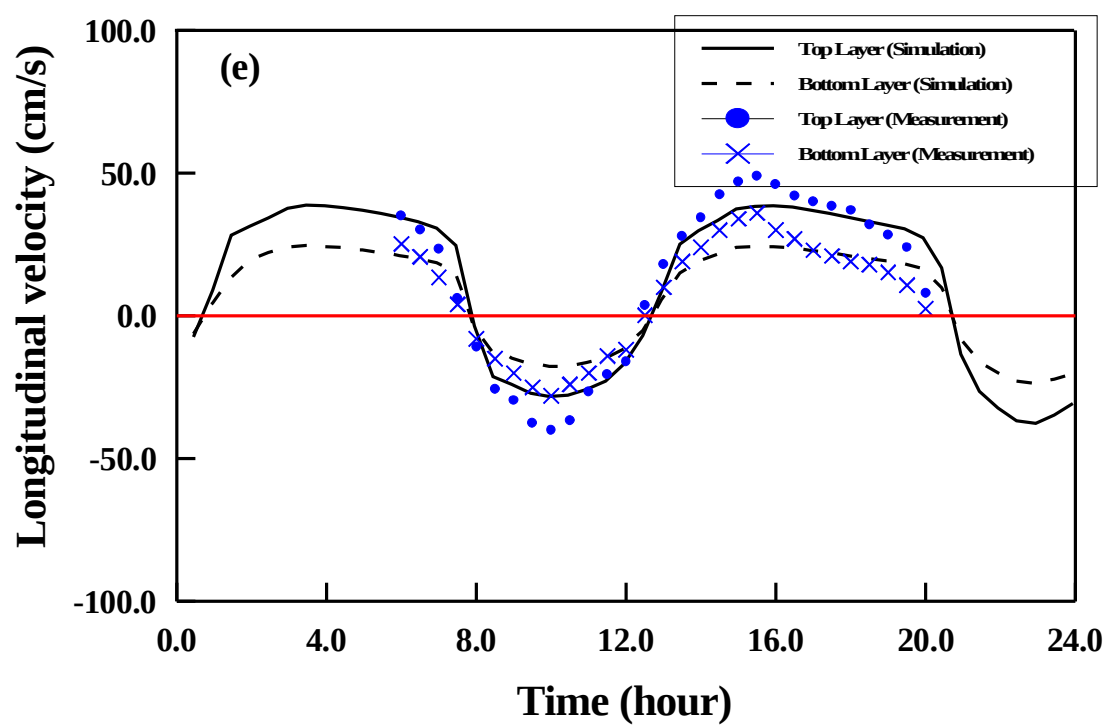


圖4-28 全潮觀測流速與模式模擬結果之比較 (e)百齡橋
(民國89年5月5日)

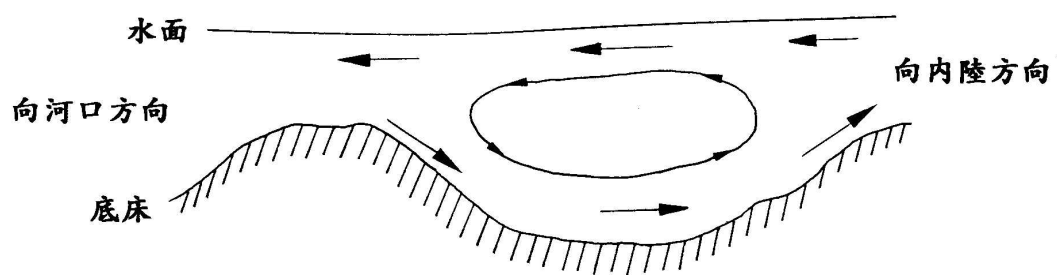


圖4-29 河口環流示意圖

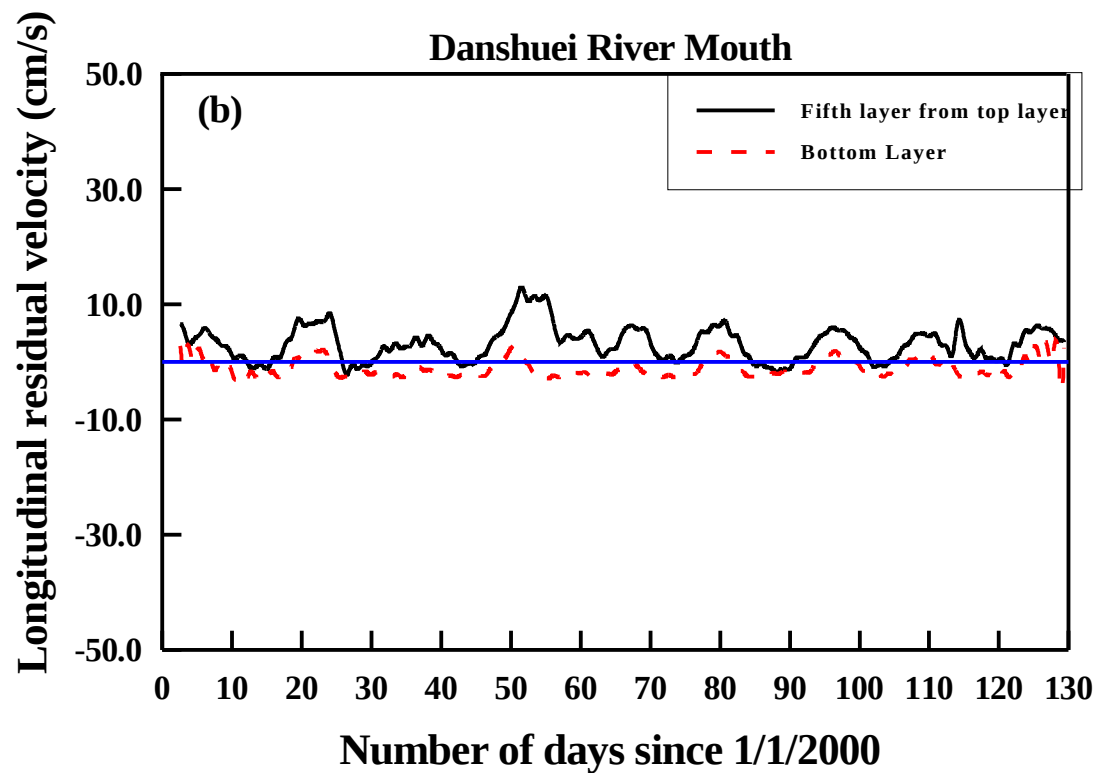
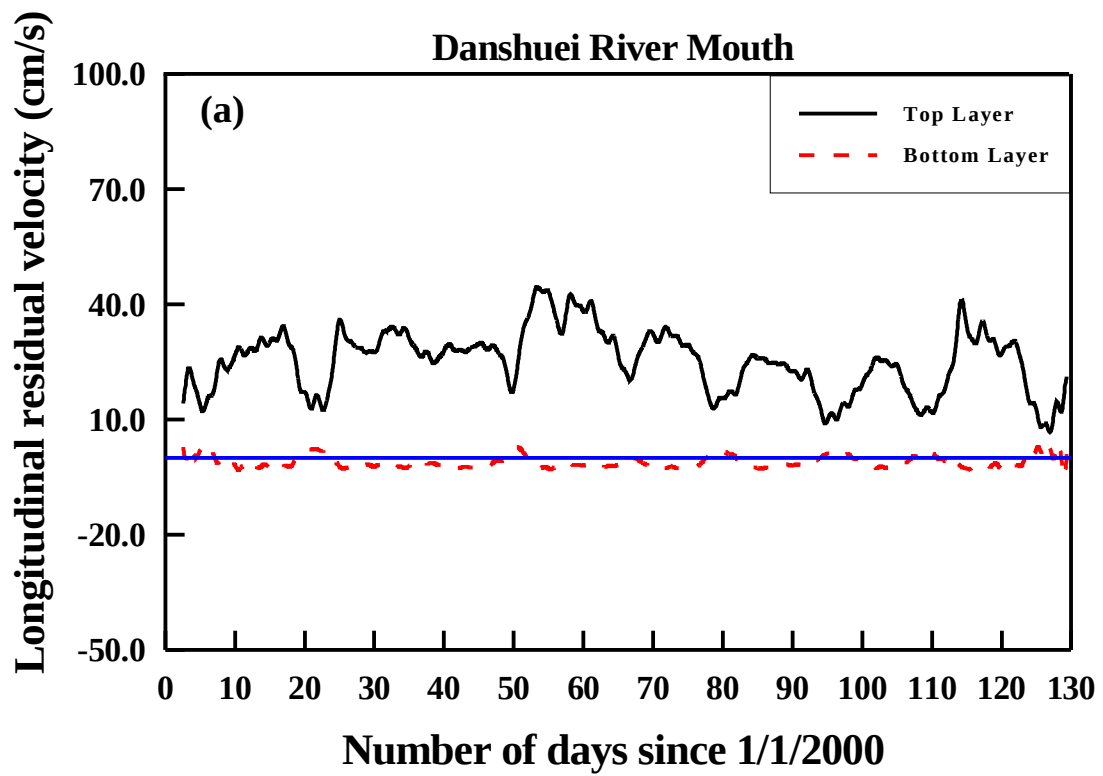


圖4-30 淡水河河口殘餘流速之時序變化

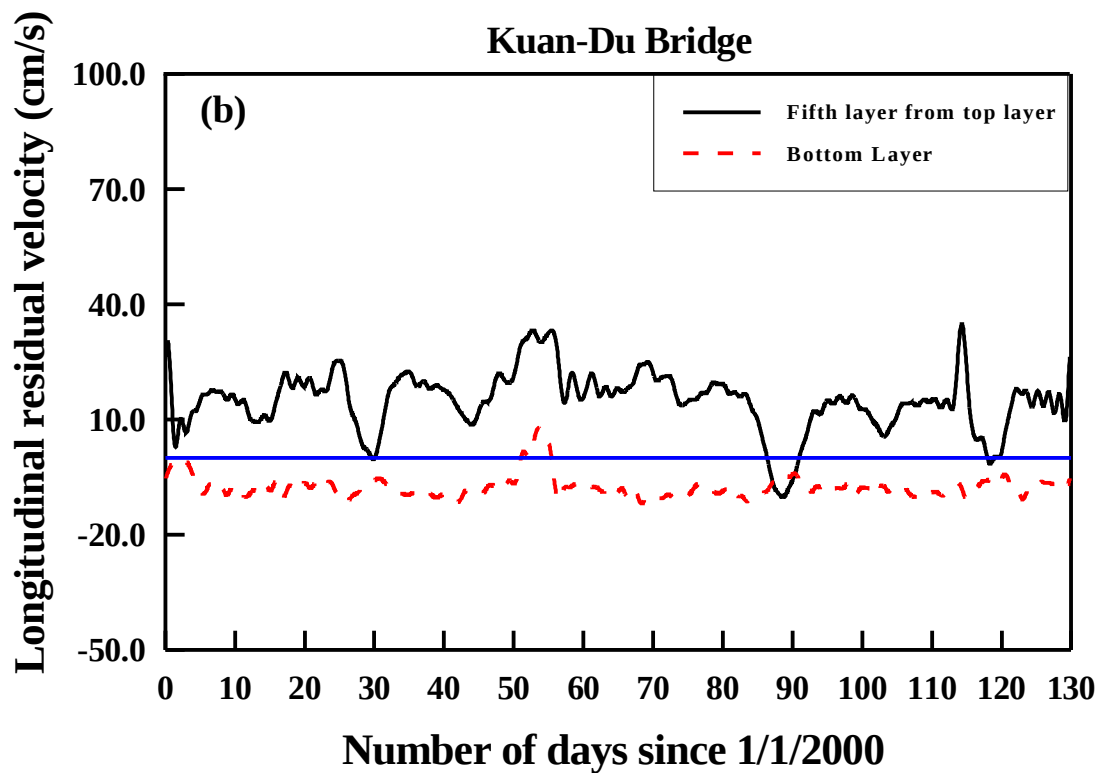
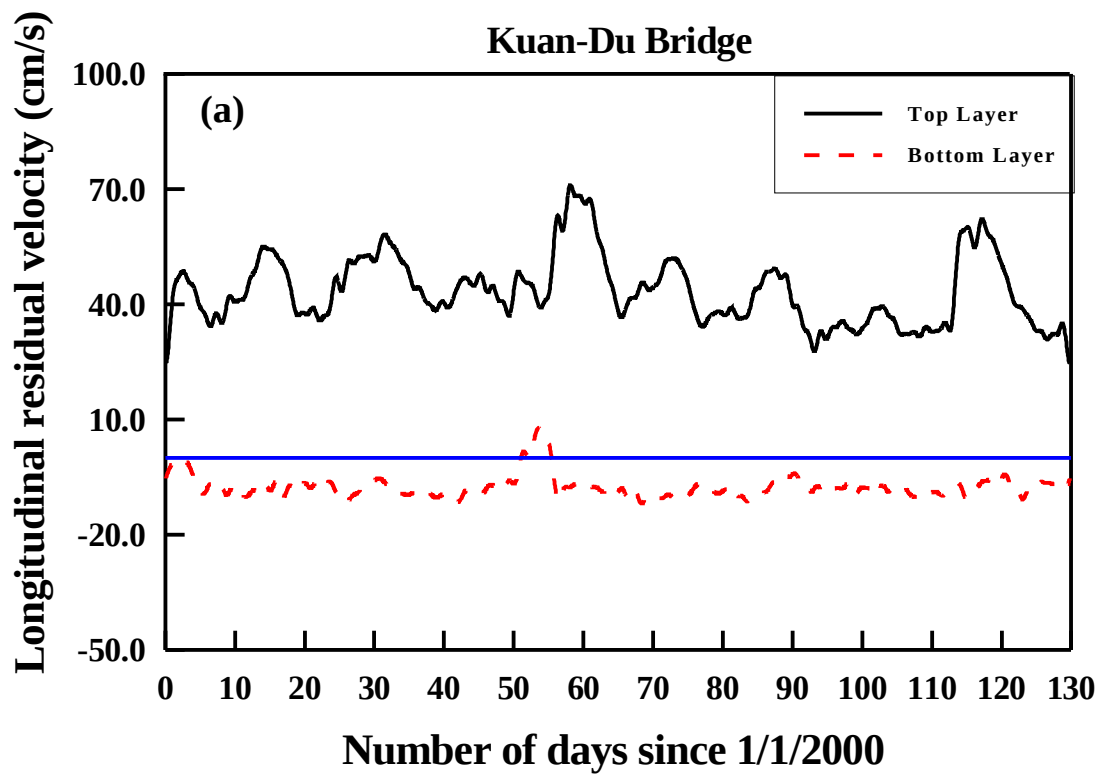


圖4-31 關渡橋殘餘流速之時序變化

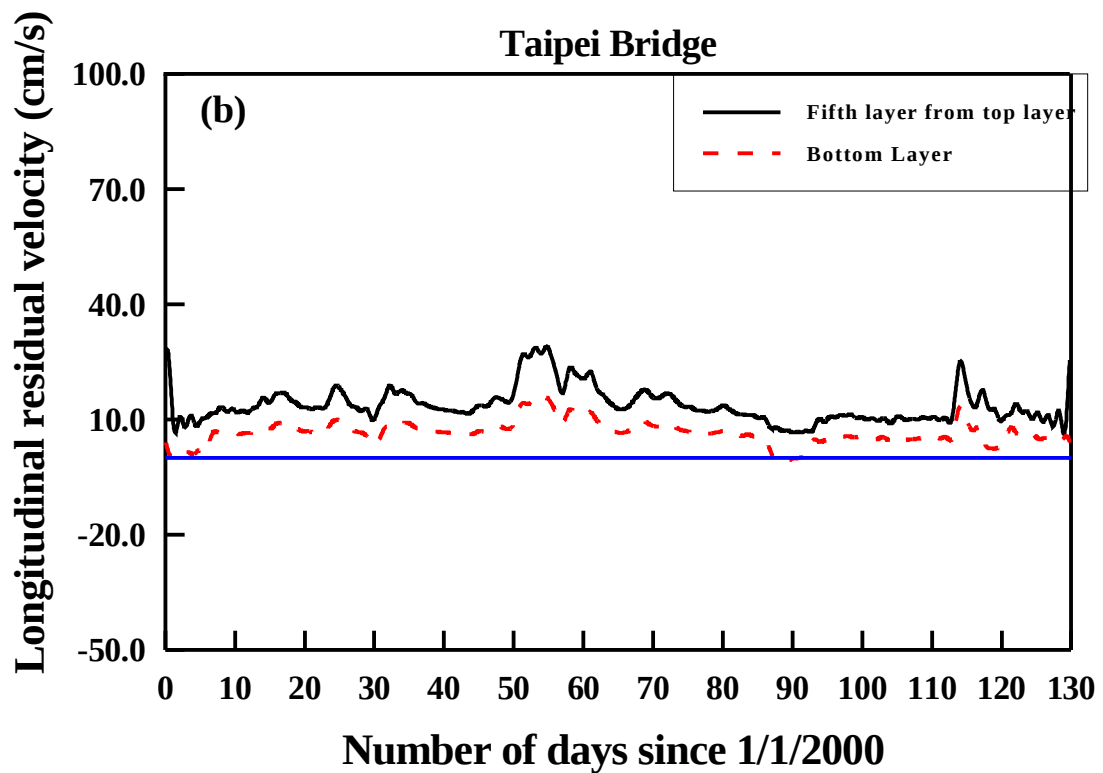
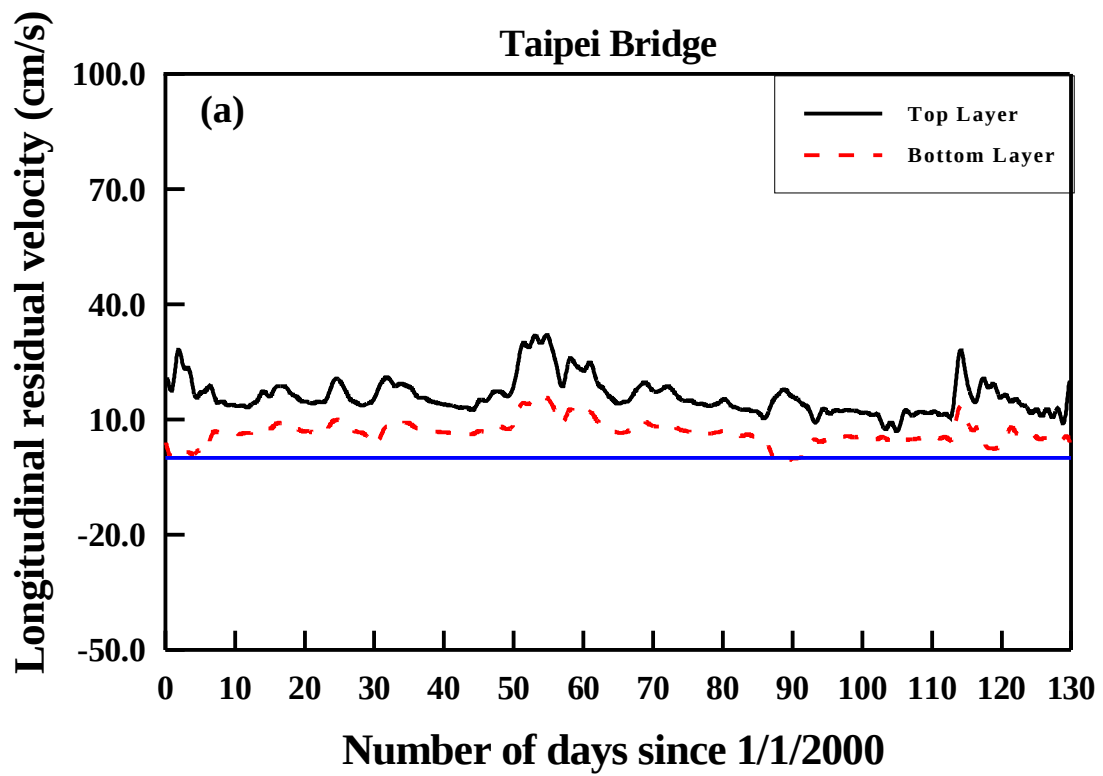


圖4-32 台北橋殘餘流速之時序變化

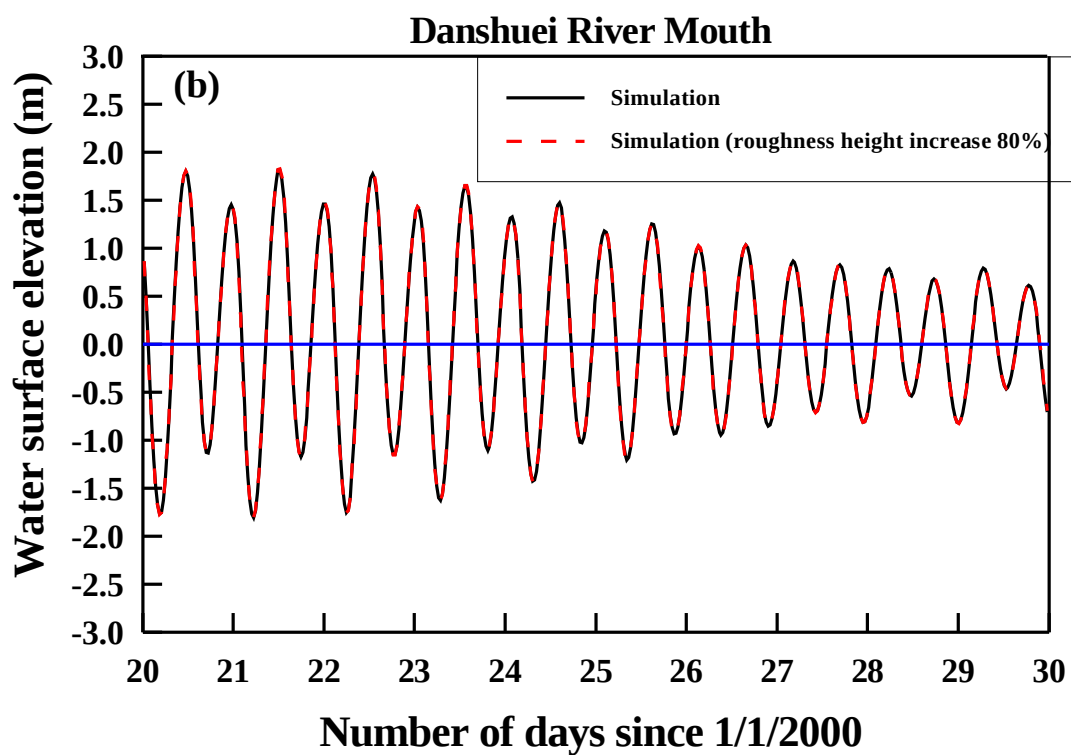
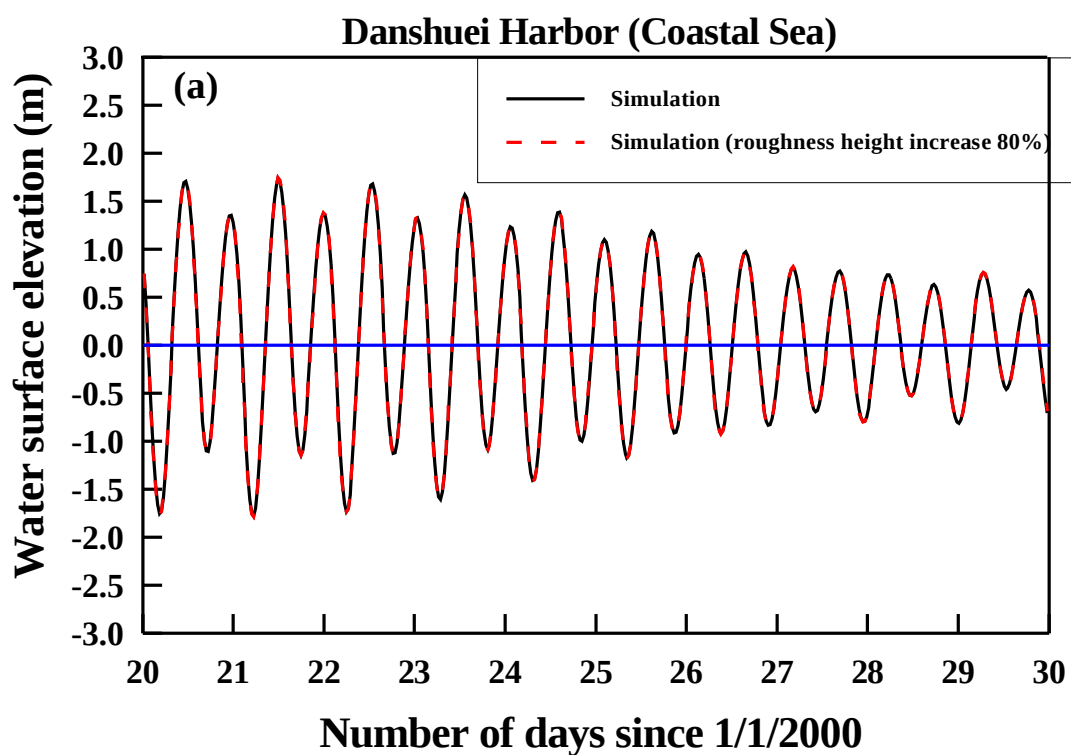


圖4-33 糙率高度對水位之敏感度分析 (a)淡水漁港 (b)淡水河河口

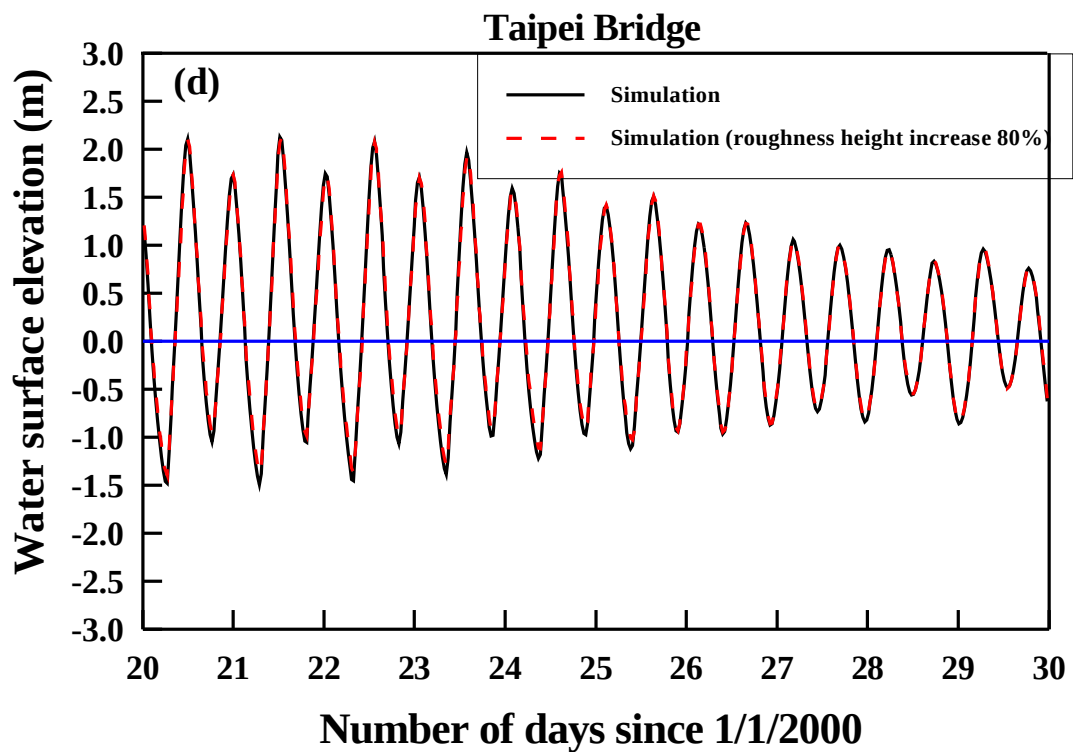
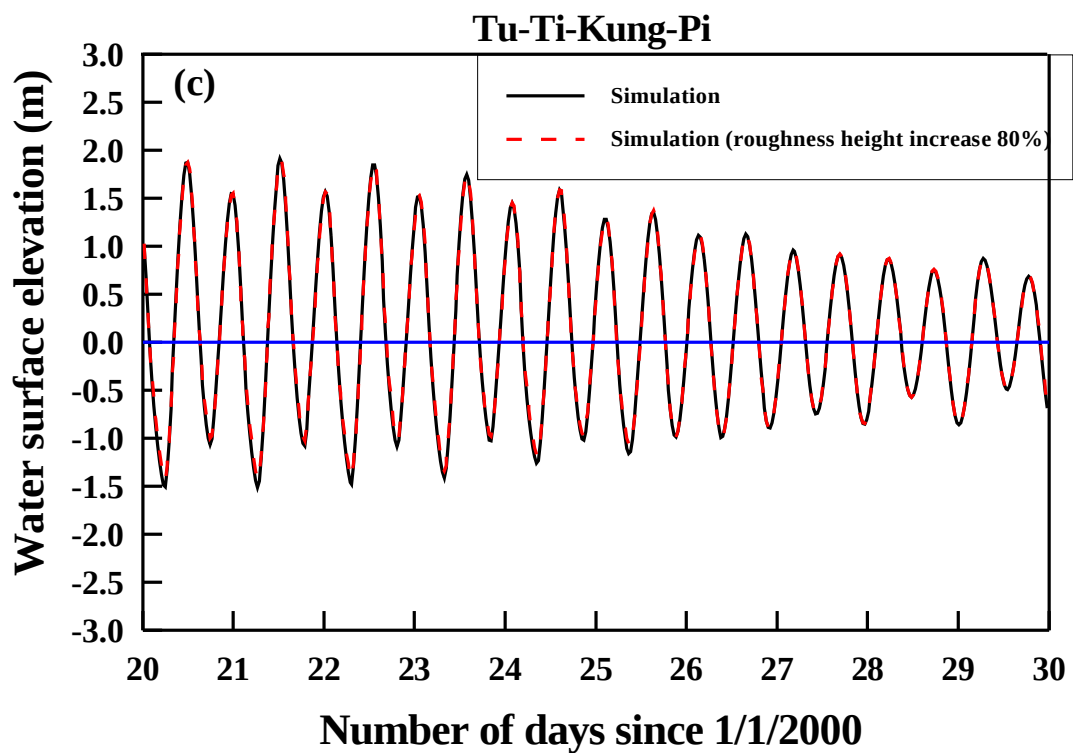


圖4-34 糙率高度對水位之敏感度分析 (c)土地公鼻 (d)台北橋

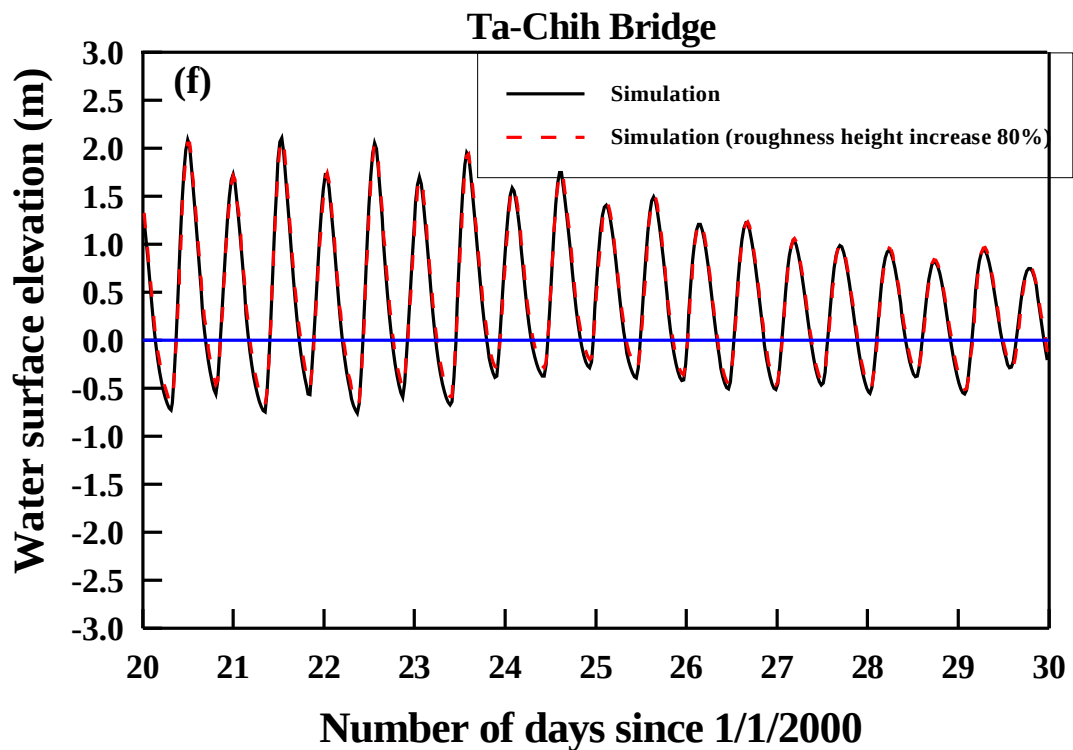
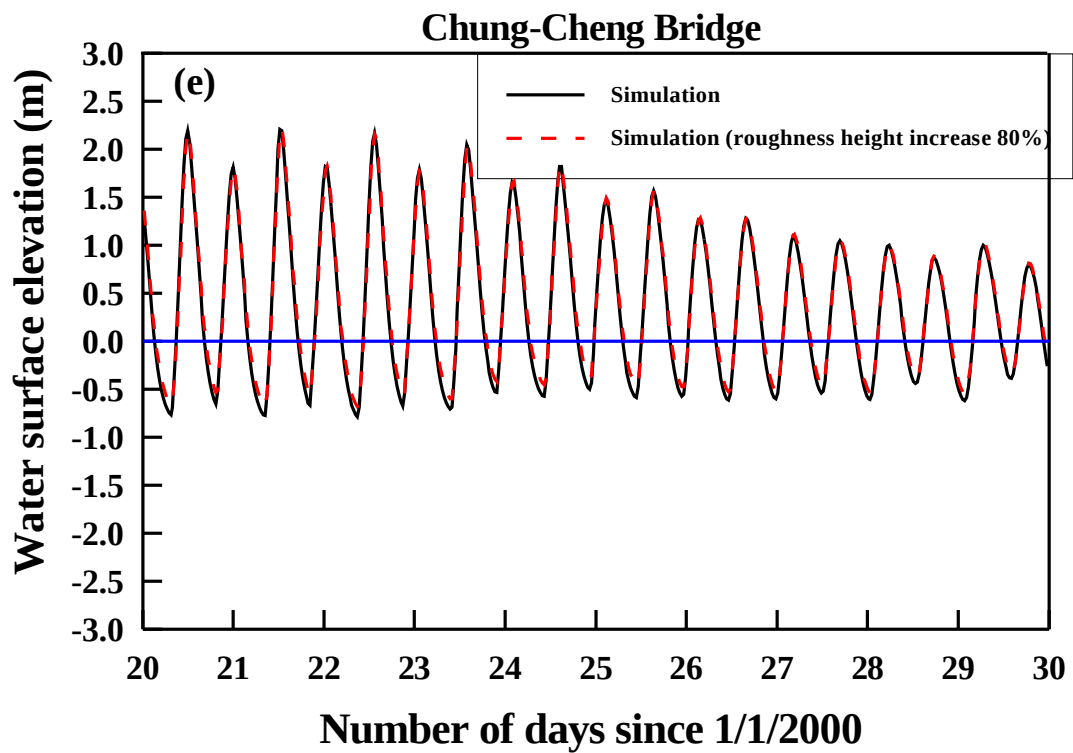


圖4-35 糙率高度對水位之敏感度分析 (e)中正橋 (f)大直橋

第五章 初步結論

本研究計畫為兩年期計畫的第一年，本年度計畫之工作有三維河口與近海水理模式之建立、模式檢定與驗證與模式之應用等，就目前完成之研究工作所獲致的主要結果簡述如下：

1. 已完成河口與近海三維數值模式之建立，並應用於淡水河系及其近海之數值模擬。
2. 就中央氣象局與國科會海洋科學研究中心所蒐集的潮位資料，及經濟部水利署第十河川局的淡水河系潮位自計量測資料，進行調和分析，以求取主要的分潮振幅及相位角。
3. 以ArcView GIS、Matlab軟體及數值高程內差程式建立模擬區域的數值網格，提供三維數值模擬使用。
4. 模式以 M_2 分潮初步檢定糙率高度，再於外海使用五個分潮之綜合潮對糙率高度進行細部調整，模式模擬結果經調和分析之潮差與相位角與實測數據經調和分析之潮差與相位角相當吻合，再以實測的淡水流量與外海使用五個分潮之綜合潮進行模式驗證，顯示本三維模式之適用與正確性。
5. 以經濟部水利署第十河川局於民國89年5月5日於淡水河系各測站之全潮觀測流速資料與三維模式模擬結果經求主軸模式的轉換所得的流速進行比較，兩者的趨勢大致相同。

6. 由河口環流分析結果顯示，淡水河關渡站因底床較深，於底層大部分的時間殘餘流速是往上游流，表層之殘餘流速是向下游流動，形成顯著的河口環流。
7. 由參數敏感度分析結果顯示，糙率高度對潮水位的影響很小。

中文參考文獻

- (1)台灣省水利局，「淡水河系長期水理觀測計畫各年度工作報告」，水利局第十工程處淡水河水理觀測隊。
- (2)許時雄，「淡水河下游感潮變量流之研究」，水利復刊第七期，(1969)
- (3)行政院經濟合作委員會台北區衛生下水道規劃小組，「淡水河水系水污染及河川涵容能力」，(1971)。
- (4)台北地區衛生下水道工程處，「河川污染調查」，(1971)
- (5)歐陽嶠暉，「淡水河水系水污染調查及河川自淨能力之研究」，台灣水利，第19卷3期，(1971)
- (6)經濟部水資會，「淡水河水污染整治規劃報告及其附錄」，(1980)。
- (7)顏清連、許銘熙，「河川體系變量流之數值模擬」，台大土木工程學研究報告，水利7105，(1982)
- (8)經濟部水資會，「淡水河流域河川水質數學模式之研究」，(1983)
- (9)顏清連、王如意、朱紹鎔、許銘熙、呂建華、張守陽，「基隆河水理特性之研究」，水利 7203，國立台灣大學土木工程學研究所，(1984)
- (10)陳樹群，「河川動態水質數學模式之建立與應用」，碩士論文，國立台灣大學土木工程學研究所，(1984)
- (11)連上堯，「枯水期基隆河水理與水質模式之研究」，碩士論文，國立台灣大學農業工程學研究所，(1988)

- (12)洪政豐，「潮流對河川污染質影響之研究」，碩士論文，國立成功大學水利及海洋工程研究所，(1988)
- (13)許銘熙、張尊國、柳文成、連上堯，「基隆河水理暨水質特性之研究 (一) 截流系統對河川水理之影響」，行政院國科會專題研究計畫報告，(1989)
- (14)許銘熙、張尊國、柳文成、連上堯，「基隆河水理暨水質特性之研究 (二) 截流系統對河川水質之影響」，行政院國科會專題研究計畫報告，(1990)
- (15)張瑞津、石再添，「淡水河下游感潮的研究」，地理學研究第 13期，(1989)
- (16)陳筱華，「河川污染特性及水質數學模式之探討—以基隆河為例」，碩士論文，國立台灣大學環境工程學研究所，(1989)
- (17)柳文成，「截流系統對基隆河水質影響之研究」，碩士論文，國立台灣大學農業工程學研究所，(1990)
- (18)陳建維，「基隆河截彎取直 對鹽分分佈影響之模擬」，碩士論文，國立台灣大學環境工程學研究所，(1994)
- (19)李鴻源，「淡水河感潮特性之探討(二)」，國立台灣大學水工試驗所，(1995)
- (20)許銘熙、郭振泰、郭義雄、柳文成，「淡水河系潮流、河口環流與鹽分佈之研究(一)、(二)」，國立台灣大學水工試驗所研究報告239及273號，(1996, 1997)
- (21)許銘熙、郭義雄、郭振泰、柳文成，「淡水河感潮段垂直二維水理與水質動態傳輸模式(一)、(二)」，行政院國科會專題計畫研究成果報告，(1998, 1999)
- (22)柳文成、許銘熙、郭義雄、郭振泰，「淡水河河口環流特性之研究」，台灣水利，第46卷第一期，pp. 33-42，(1998)。

- (23)柳文成、許銘熙、「河川水理、水質與生態模式—整治工程對生態環境之探討(一)、(二)」,行政院國科會專題計畫精簡報告,(2000, 2001)。
- (24)柳文成、許銘熙、郭義雄,「垂直二維模式應用於感潮河口環流與垂直混合之數值實驗」,中國土木水利工程學刊,第 13卷,第一期, pp. 111-122 (2001)。
- (25)柳文成、郭義雄、許銘熙、吳啟瑞、王琪芳,「利用數值模式探討淡水河系感潮段之水理特性」台灣水利,第51卷第一期, pp.1-8 ,(2003)。
- (26)劉景毅,「二維與三維水理數值模式在淡水河海域之應用與比較」,中國土木水利工程學刊,第11卷,第三期, pp. 579-587 ,(1999)。
- (27)工業技術研究院能源與資源研究所,「多功能河口水文站之建置與最適化系統之建立(1/2)」,經濟部水資源局報告,(2000)。
- (28)王玉懷,「應用拖曳式 ADCP探測臺灣近岸流場」,第 24屆海洋工程研討會, pp.485-490 ,(2002)。

REFERENCES

- (1) Ahsan, Q. and A. F. Blumberg, 1999. A three-dimensional hydrothermal model of Onondaga Lake, New York. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 125(9).
- (2) Arakawa, A. and V. R. Lamb, 1977. Computational design of the basic dynamical processes of the UCLA general circulation model. *Methods in Computational Physics*, 17, 174-265.
- (3) Blumberg, A. F., 1975. A numerical investigation into the dynamics of estuarine circulation. Technical Report No. 91, Chesapeake Bay Institute, The Johns Hopkins Univ., 110 pp.
- (4) Blumberg, A. F., L. A. Khan and J. St. John, 1999. A three-dimensional hydrodynamic model of New York harbor region. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 125(8), 799-816.
- (5) Blumberg, A. F. and G. L. Mellor, 1987. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. *Threedimensional coastal ocean Models*, N. S. Heaps, ed., American Geophysical Union, 1-16.
- (6) Blumberg, A. F., Q. Ahsan, H. Li, I. D. Kaluarachchi and J. K. Lewis, 2001. Circulation, sediment and water quality modeling in the northern Gulf of Mexico. *Proceedings of the World Water and Environmental Resources Congress*, Orlando, Florida.
- (7) Blumberg, A. F. and G. L. Mellor, 1980. A coastal ocean numerical model, In *Mathematical Modeling of Estuarine Physics. Proceedings of an International Symposium*.
- (8) Casulli, V. and R. A. Walters, 2000. An unstructured grid, three-dimensional model based on the shallow water equations. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 32, 331-348.

- (9) Cerco, C. and T. Cole, 1993. ~~Three~~Dimensional eutrophication model of Chesapeake Bay. Journal of Environmental Engineering, ASCE, 119, 1006-1025.
- (10) Cerco, C. and M. Meyer. 2001. Tributary refinement to the Chesapeake Bay Model. Journal of Environmental Engineering, ASCE, 126(2), 164-174.
- (11) Clark, T. L., and W. D. Hall, 1991. ~~Mohain~~ simulations of the time dependent NavierStokes equations: benchmark error analysis of some nesting procedures. J. Comp. Phys, 92, 456-481.
- (12) Dyer, K. R., 1973. Estuaries: a physical introduction. Wiley & Sons, New York, NY, U.S.A.
- (13) Dyer, K. R., 1977. ~~teral~~ circulation effects in estuaries. In Estuaries, Geophysics and the Environment, National Academic of Sciences, Washington.
- (14) Dyer, K. R., 1989. Estuarine flow interaction with topography: lateral and longitudinal effects. p. 3960. In: B. J. Neilson, A Y. Kuo, and J. Brubaker (eds.) Estuarine Circulation, Humana Press, Clifton, N.J.
- (15) Elliott, A. J., 1978. Observations of the meteorological induced circulation in the Potomac Estuary. Estuarine and Coastal Marine Science, 6, 285-299.
- (16) Fletcher, C. J. A., 1988. Computational techniques for fluid dynamics 1 & 2, Springer-Verlag, 409 & 484 pp.
- (17) Galperin, B. L. H. Kantha, S. Hassid, and A. Rosati, 1988: A ~~quasi~~equilibrium turbulent energy model for geophysical flows: J. Atmos. Sci., 45, 55-62.
- (18) Hamrick, J. M., 1986. Long-term dispersion in unsteady skewed free surface flow. Estuar. Coast. Shelf Sci., 23, 807-845.
- (19) Hamrick, J. M., 1992a. A ~~three~~dimensional environmental fluid dynamics computer code: theoretical and computational aspects. The College of William and Mary, Virginia Institute of Marine Science. Special Report 317, 63pp.
- (20) Hamrick, J. M., 1992b. Estuarine environmental impact assessment using a three-dimensional circulation and transport model. Estuarine and Coastal Modeling, Proceedings of the 2nd International Conference, M. L. Spaulding et al., eds. ASCE, 292-303.
- (21) Hamrick, J. M., 1996. User manual for the environmental fluid dynamics computer code. Special Report in Applied Marine Science and Ocean Engineering, No. 331, The College of William and Mary, VIMS, 223pp.
- (22) Hansen, D. V. and M. Rattray, Jr., 1965. Gravitational circulation in straits and estuaries. J. Mar. Res. 23, 104-122.
- (23) Hansen, D. V. and M. Rattray, Jr. 1966. New dimensions in estuarine classification. Limnol. and Oceanogr., 11, 319-326.
- (24) Hasen, D. V., 1967. Salt balance and circulation in partially mixed estuaries. in Estuaries (ed. Lauff, G. H.) American Associate Advance Science.

- (25)Haas, L.W., 1977. The effect of the neap-spring tidal cycle of the vertical salinity structure of the James, York, and Rappahannock Rivers, Virginia, USA. *Estuarine and Coastal Marine Science*, 5, 485-496.
- (26)Heaps, N. S., (editor) 1987. *Threedimensional coastal ocean models*. American Geophysical Union, 208pp.
- (27)Horiguchi, F., J. Yamamoto and K. Nakata, 2001. A numerical simulation of the seasonal cycle of temperature, salinity and velocity fields in Tokyo Bay. *Marine Pollution Bulletin*, 43(7-12), 145-153.
- (28)Hsu, M. H., A. Y. Kuo, J. T. Kuo, and W. C. Liu, 1996. Modeling tidal hydraulic in a branched estuarine system. Tenth Congress of APD-IAHR.
- (29)Hsu, M. H., A. Y. Kuo, J. T. Kuo, and W. C. Liu, 1998a. Modeling estuarine hydrodynamics and salinity for wetland restoration. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, A33(5), 891-921.
- (30)Hsu, M. H., A. Y. Kuo, W. C. Liu, and J. T. Kuo, 1998b. The salinity distribution in the Tanshui river system and its response to river discharge. *Proceedings of Abstract and Papers (on ROM) of the 3rd International Conference on Hydro-Science and -Engineering*, Cottbus/Berlin, Germany.
- (31)Hsu, M. H., A. Y. Kuo, J. T. Kuo, and W. C. Liu, 1999a. Procedure to calibrate and verify numerical models of estuarine hydrodynamics. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 125(2), 166-182.
- (32)Hsu, M. H., A. Y. Kuo, W. C. Liu, and A. Y. Kuo, 1999b. Numerical simulation of circulation and salinity distribution in the Tanshui estuary. *Proceedings of the National Science Council, Part A: Physical Science and Engineering*, 23(2), 259-273.
- (33)Ippen, A. T. and D. R. F. Harleman, 1966. Tidal dynamics in estuaries. p. 493-545. In: Ippen, A.T.(ed.), *Estuary and Coastline Hydrodynamics*, McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, NY.
- (34)Ianuiello, J. P., 1977. Tidally induced residual currents in estuaries of constant breadth and depth. *J. of Marine Research*, 35, 735-786.
- (35)Jan, S., Y. H. Wang, S. Y. Chao, and D. Y. Wang, 2001. Development of a nowcast system for the Taiwan Strait (TSNOW): numerical simulation of barotropic tides. *Ocean and Polar Research*, 23(2), 195-203.
- (36)Ji, Z. G., M. R. Morton, and J. M. Hamrick, 2001. Wetling and drying simulation of estuarine processes. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 53, 683-700.
- (37)Johnson, B. H., K. W. Kim, R. E. Heath, B. B. Hsieh, and H. L. Butler, 1993. Validation of three-dimensional hydrodynamic model of Chesapeake Bay. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 119(1), 2-20.

- (38)Kim, S. C., J. Shen, C. S. Kim, and A. Y. Kuo, 2000. Application of VIMS HEM-3D to a macrotidal environment. *Estuarine and Coastal Modeling, Proceedings of the 6th International Conference*, M. L. Spaulding et al., eds. ASCE, 238-249.
- (39)Kuo, A. Y., R. J. Byrne, J. M. Brubaker, and J. H. Posenau, 1988. Vertical transport across and estuary front. In J. Dronkers and W. van Leussen (eds.), *Physical Processes in Estuaries*. Springer-Verlag, Berlin, 93-109.
- (40)Kuo, A. Y., R. J. Byrne, P. V. Hyer, E. P. Ruzecki, and J. M. Burbaker, 1990a. Practical application of theory for tidal intrusion fronts. *ASCE J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng.* 116(3), 341-361.
- (41)Kuo, A. Y., J. M. Hamrick, and G. M. Sisson, 1990b. Persistence of residual currents in the James Estuary and its implication to mass transport. p. 398-401. In: R. Cheng (ed.), *Residual Currents and Long-term Transport*. Coastal and Estuarine Studies, 38. Springer-Verlag, Berlin.
- (42)Kuo, A. Y., K. Park, and M. Z. Moustafa, 1991. Spatial and temporal variabilities of hypoxia in the Rappahannock River, Virginia. *Estuaries*, 14(2), 113-121.
- (43)Lewis, J. K., I. Shulman and A. F. Blumberg. 1998. Assimilation of doppler radar current data into numerical ocean models. *Continental Shelf Research*, 18, 541-559.
- (44)Liu, W. C., M. H. Hsu, and A. Y. Kuo. 2001a. An investigation of long transport in Tanshui Estuary, Taiwan, *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, 127(2), 61-71.
- (45)Liu, W. C., M. H. Hsu, A. Y. Kuo, and J. T. Kuo 2001b. The influence of river discharge on salinity intrusion in Tanshui Estuary, Taiwan, *Journal of Coastal Research*, 17(3), 544-552.
- (46)Liu, W. C., M. H. Hsu, A. Y. Kuo, and M. H. Li. 2001c. Influence of bathymetric changes on hydrodynamics and salt intrusion in estuarine system. *Journal of the American Water Resources Association*, 37(5), 1405-1416.
- (47)Li, J. C. and J. Matsumoto. 1999. A heterogeneous level method for three-dimensional hydrodynamics and salinity bay modeling. *Mathematics and Computers in Simulation*, 49, 27-39.
- (48)Mellor, G. L., 1991. An equation of state for numerical models of oceans and estuaries. *J. Atmos. Oceanic Tech.*, 8, 609-611.
- (49)Mellor, G. L. and T. Yamada. 1982. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Rev. Geophys. Space phys.*, 20, 851-875.
- (50)Mellor, G. L. and A. F. Blumberg, 1985. Modeling vertical and horizontal viscosity and the sigma coordinate system. *Monthly Weather Review*, 113, 1379-1383.

- (51) Mellor, G. L. 1996. User's guide for a three-dimensional, primitive equation, numerical ocean model. Princeton University, Princeton, N. J.
- (52) Moustafa, M. Z. and J. M. Hamrick, 1994. Modeling circulation and salinity transport in the Indian River Lagoon. Estuarine and Coastal Modeling, Proceedings of the 3rd International Conference, M. L. Spaulding et al., eds. ASCE, 381-395.
- (53) Muin, M. and M. Spaulding, 1997. Application of a three-dimensional boundary-fitted circulation model to Providence River. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 123(1), 13-20.
- (54) Nihoul, J. C. J., and B.M. Jamart, (editors) 1987. Three-dimensional models of marine and estuarine dynamics. Elsevier, 629 pp.
- (55) Park, K., A. Y. Kuo, J. Shen, and J. M. Hamrick, 1995. A three-dimensional hydrodynamic-eutrophication model (HEM3D) description of water quality and sediment process submodels. Special Report in Applied Marine Science and Ocean Engineering No. 327.
- (56) Peyret, R. and T. D. Taylor, 1983. Computational methods for fluid flow. Springer-Verlag, 358 pp.
- (57) Pritchard, D. W., 1952. Estuarine hydrography. pp. 248-280. In: Advances in Geophysics, Vol. 1, Academic Press Inc. New York, NY.
- (58) Pritchard, D. W., 1954. A study of the salt balance in a coast plain estuary. Journal of Marine Research, 13(1), 133-144.
- (59) Pritchard, D. W., 1956. The dynamic structure of a coastal plain estuary. Journal of Marine Research, 15(1), 33-42.
- (60) Pritchard, D. W., 1989. Estuarine classification a help or a hindrance. pp. 1-38. In: Neilson, Kuo, and Brubaker (eds.), Humana Press, Clifton, NJ.
- (61) Shen, J., M. Sisson, A. Y. Kuo, J. Boon and S. Kim, 1989. Three-dimensional numerical modeling of the tidal York River system, Virginia. Estuarine and Coastal Modeling, Proceedings of the 5th International Conference, M. L. Spaulding et al. (eds.), ASCE, 495-510.
- (62) Sheng, Y. P., 1986. A three-dimensional numerical model system of coastal, estuarine and lake currents using boundary-fitted grid. Report No. 585, A.R.A.P. Group Titan System, New Jersey, Princeton, NJ.
- (63) Sheng, Y. P., 1989. On modeling three-dimensional estuarine and marine hydrodynamics. J. C. J. Nihoul, ed. Elsevier Oceanography Series, 45, 35-54.
- (64) Smith, L. H., and R. T. Cheng, 1987. Tidal and tidally averaged circulation characteristics of Suisun Bay, California. Water Resources Research, 23, 143-155.
- (65) Smolarkiewicz, P. K., 1984. A fully multidimensional positive definite advection transport algorithm with small implicit diffusion. J. Comp. Phys, 54, 325-362.

- (66) Vinokur, M., 1974. Conservation equations of gas dynamics in curvilinear coordinate systems. *J. Comp. Phys.*, 50, 71-100.
- (67) Wang, K. H. 1994. Characterization of circulation and salinity change in Galveston Bay. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 120(3), 557-579.