

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

擬三維感潮河口水流及質量傳輸計算(2/2) 研究成果報告(完整版)

計畫類別：個別型
計畫編號：NSC 95-2221-E-002-405-
執行期間：95年08月01日至96年07月31日
執行單位：國立臺灣大學土木工程學系暨研究所

計畫主持人：黃良雄

計畫參與人員：主持人：黃良雄
博士班研究生：郭遠錦

報告附件：出席國際會議研究心得報告及發表論文

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 96 年 09 月 05 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告
擬三維感潮河口水流及質量傳輸計算(2/2)
Computation of quasi-three-dimensional flow and mass transport
in tidal estuary(2/2)

計畫編號: NSC 95-2611-E-002-405

執行期限: 95 年 8 月 1 日至 96 年 7 月 31 日

主持人: 黃良雄教授 國立臺灣大學土木工程學系

摘要

感潮河口水流與質量傳輸於台灣，一來由於河口寬，水平方向變化需作考慮，再之由於重力作用，垂直方向變化自然產生。因此，此問題之三維特質總是存在。國內在水平二維及垂直二維的研究已曾被探討，但三維問題則因計算複雜而罕見可作大尺度實際應用的研究。本研究繼續吳仁友(1997)利用 Lardner and Cekirge (1988)的垂直/水平分離演算步驟，簡稱 VHS(vertical /horizontal splitting algorithm)，將三維的海岸水動力計算問題分成水平二維及垂直一維計算的方式所發展的擬似三維水動力模式，增加原始控制方程式中忽略的密度變化項，使能改善以往計算時將密度視為常數的限制，進而得以考慮密度梯度對整個水理特性的影響。此外在垂直一維水理模式方面也加入一紊流應力模式，使得在模擬淺水流時可以更貼近實際流場的情形。為了計算前述之密度變化項，本研究亦引入水平二維及垂直一維的質量傳輸模式，於是可以得到濃度傳輸的三維資訊，進而求得整個流場的密度分佈情形。本研究之擬似三維模式因為水平二維與垂直一維分開計算的方式，可以大大降低計算時間與容量需求，而水理模式加入質量傳輸模式共同計算的結果，可以得到整體流場的流域水位、流速與濃度傳輸等三維空間分佈之資訊，而具備了完整模擬感潮河段的能力。本研究已成功地在淡水河口作實際的應用，釐清淡水河口水理及質量傳輸在常態時的維度，此外，依據相同原理，此擬似三維模式將來也可沿用於 DO(溶氧量)、BOD(生物需氧量)等等化學物質的傳輸計算，進一步也可考慮溫度傳輸的影響，進而模擬更完整的流場與水質變化情形。

ABSTRACT

Because of the wide estuary, the horizontal variation of the flow and mass transport of tidal estuary in Taiwan should be considered in modeling; likewise, their vertical variation will occur due to gravity. Therefore, the three-dimensional characteristics of this issue always exists. Horizontal two-dimensional and vertical two-dimensional problems have been studied in Taiwan, but the three-dimensional problem has rarely been investigated to a larger scale due to complex calculation. This research follows Wu (1997) which divides the coastal hydrodynamic calculation of three-dimensional into horizontal two-dimensional and vertical one-dimensional by Lardner and Cekirge's (1988) VHS (vertical / horizontal splitting algorithm) to develop the quasi Cekirge's (1988) VHS (vertical / horizontal splitting algorithm) to develop the quasi three-dimensional hydrodynamic model, by adding the ignored density variational term in the original governing equation in order to get rid of the constraint of regarding the density as a constant and to consider the effect of density

gradient on the characteristics of the flow. Besides, a turbulence simulation is added into vertical one-dimensional hydrodynamic model to match the actual shallow water flow more reasonably. The mass transport models of horizontal two-dimensional and vertical one-dimensional are added to calculate density variational term, and thus the three-dimensional information of concentration transport and the density distribution of the whole flow field are obtained. This quasi three-dimensional model can effectively decrease the calculation time and space demands through dividing the calculation into horizontal two-dimensional and vertical one-dimensional. The combination of hydrodynamic model and mass transport model will provide the information of three-dimensional space distribution including tide, velocity and concentration transport. A practical application of the present study is successfully carried out in the estuary of Tansui River. In addition, according to the same theory, this quasi three-dimensional model can also be applied to the calculation of chemical substance transport such as DO (dissolve oxygen) and BOD (biological oxygen demand), and can monitor a more complete change of flow and water quality by considering the influence of temperature transport in future studies.

一、緒論

由於感潮段同時受到海洋與河川相互消長的動力因素作用，是河川及近岸海洋之水與物質交換之處，使得其水流特性相當複雜且不易掌握。感潮河口水流與質量傳輸於台灣，一來由於河口寬，水平方向變化需作考慮，再之由於重力作用，垂直方向變化自然產生。因此，此問題之三維特質總是存在。國內在水平二維及垂直二維的研究已被探討，但三維問題則因計算複雜而罕見可作大尺度實際應用的研究。

海域、港灣、河口及湖泊之水理變化應為三維空間上的變化，所謂水理變化即指水體內水流速和水位的變化，基本上模式的模擬分成三維模式和二維模式兩種選擇。原則上三維模式適用於深度變化較大的港灣與海域，但三維模式之應用需要龐大的計算容量和較長的計算時間，並且需要較多的邊界條件、參數值和水位、流速的觀測資料。欲改善三維模式計算過於龐大的缺點，可以使用擬似三維計算的概念，將三維模式經過處理，分成局部垂直一維模式和深度平均二維模式兩個部分再加以合成。

本文將以擬似三維模式進行淡水河口之計算，並根據模擬結果來決定在計算淡水河口之水理與質量傳輸現象時，應選擇何種維度之計算，才可得到準確且有效率之成果。

二、控制方程式

今定義 $\vec{V}(x,y,z,C,t) = u(x,y,z,C,t)\vec{e}_x + v(x,y,z,C,t)\vec{e}_y + w(x,y,z,C,t)\vec{e}_z$

為速度向量(m/sec)， $\rho(x,y,z,C,t)$ 表示密度(kg/m³)， t 為時間， C 為鹽度百分比。假設流體不可壓縮($D\rho/Dt=0$)，可以得到常見的連續方程式形態 $\nabla \cdot \vec{V} = 0$ ，即

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

以卡氏座標系統考慮地球自轉影響下，假設流體不可壓縮， f_c 是科氏力係數， $\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yx}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ 為剪應力(N/m²)， p 為壓力(N/m²)， ρ 為密度(kg/m³)。流體水平方向動量守恆之關係式如下：

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(uu)}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial y} + \frac{\partial(uw)}{\partial z} = f_c v - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial(vu)}{\partial x} + \frac{\partial(vv)}{\partial y} + \frac{\partial(vw)}{\partial z} = -f_c u - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right) \quad (3)$$

以上為水理模式所使用之三維控制方程式。而三維質量傳輸方程式可表示為：

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\epsilon_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - u_i \frac{\partial C}{\partial x_i} \quad i,j=x,y,z \quad (4)$$

其中， C 代表濃度(concentration)， ϵ_{ij} 為擴散係數張量(diffusion coefficient tensor)， u_i 為流速。(4)式等號右邊第一項表示由濃度梯度產生之分子擴散(molecular diffusion)，(4)式等號右邊第二項表示濃度由流體流速帶動所產生之對流(convection)現象。

三、數值方法

將(1)至(3)式作深度積分平均後可得水平二維水理模式之控制方程式，並將其與三維控制方程式作一相減可得垂直一維水理模式之控制方程式。在

水平二維水理模式方面，採用顯性蛙躍式有限差分法(explicit leap frog finite difference method)並配合交錯式格網(staggered grid)求解；而垂直一維水理模式乃是一兩點之邊界值問題(two-point boundary value problem)，在此以 shooting method 來求解，可求得從底床($z = -h$)至水面($z = \zeta$)之一維垂向速度分佈。

爲了在模擬淺水流時可以更貼近實際流場的情形，乃引入一紊流應力模式。本文選用之紊流應力模式爲廣受紊流邊界層分析使用之 Prandtl 混合長度理論 (mixing length)。

而在質量傳輸模式方面，計算垂直一維部份則參考使用 Taylor(1954)之方法，直接積分計算濃度垂直變化量：

$$C'(z) = \int_{-h_0}^{\zeta} \frac{1}{\varepsilon_z} \int_{-h_0}^{\zeta} \left(u' \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} + v' \frac{\partial \bar{C}}{\partial y} \right) dz dz \quad (5)$$

在水平二維方面，因爲有垂直流速分佈，可使用 Taylor(1954)之推廣應用的方法，直接計算質量傳輸參數 K ，其中，

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + U \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} + V \frac{\partial \bar{C}}{\partial y} \\ &= \frac{1}{H} \left[\frac{\partial}{\partial x} (HK_{xx} \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} + HK_{xy} \frac{\partial \bar{C}}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial y} (HK_{yx} \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} + HK_{yy} \frac{\partial \bar{C}}{\partial y}) \right] \end{aligned} \quad (6)$$

$$K_{xx} = -\frac{1}{H} \int_{-h_0}^{\zeta} u' \int_{-h_0}^{\zeta} \frac{1}{\varepsilon_z} \int_{-h_0}^{\zeta} u' dz dz dz$$

$$K_{xy} = -\frac{1}{H} \int_{-h_0}^{\zeta} u' \int_{-h_0}^{\zeta} \frac{1}{\varepsilon_z} \int_{-h_0}^{\zeta} v' dz dz dz$$

$$K_{yx} = -\frac{1}{H} \int_{-h_0}^{\zeta} v' \int_{-h_0}^{\zeta} \frac{1}{\varepsilon_z} \int_{-h_0}^{\zeta} u' dz dz dz$$

$$K_{yy} = -\frac{1}{H} \int_{-h_0}^{\zeta} v' \int_{-h_0}^{\zeta} \frac{1}{\varepsilon_z} \int_{-h_0}^{\zeta} v' dz dz dz$$

數值方法則使用有限解析法來求解。

根據以上質量傳輸計算，最後可以求解以下水體含鹽百分比關係式：

$$\rho_{HO}(x, y, z, t) = (1 - C(x, y, z, t)) \cdot \rho_H + C(x, y, z, t) \cdot \rho_O \quad (7)$$

其中， ρ_{HO} 爲海水與淡水混合後之密度； ρ_H 爲淡水之密度； ρ_O 爲海水之密度，可以得出完整之密度分佈情形。

各個模式部份均經過與解析解之比較驗證，並得到不錯之準確性，也證明模式的可信度。

四、淡水河口之計算

4.1 模擬基地概述

本研究選用淡水河口感潮段作爲現場模擬的區域，此研究範圍北起約林口發電廠，東至關渡，由沿岸向西至水深約二十五公尺處，爲南北長約十九公里之帶狀區域。根據港灣技術研究中心所作之『港灣海氣地象觀測資料年報(潮汐部分)』以及『台北港海氣地象觀測資料專刊(潮汐部分)』，本研究選取 M_2 、 S_2 、 K_1 、 O_1 等四個分潮合成模擬區域中所需之潮位資料。

4-1.1 模擬範圍之基本資料

本研究採用之淡水河系各河段之河道斷面資料由水利署第十河川局所提供；鄰近海域之地形資料則由港灣技術研究中心所提供。模式演算所輸入之參數整理於表 1 中。

表 1 模式輸入參數與資料

模式	變因	使用條件
水平二維水理模式	潮汐	以分潮合成後內差求出邊界上之潮位
	風速	夏季 4.6 m/sec
	風向	夏季 SE 方向
	科氏力	考慮，以北緯 21.1789 度(淡水河口)爲基準
	底床摩擦阻力	考慮，Chezy's $C_b=40$
	洋流流速	夏季 0.337 m/s
	洋流流向	夏季流向 NE
	動量交換參數	$\gamma=150\text{kg/m}^3$
	計算間隔	每 1.0 s 跑一次
	網格大小	200 m×200 m
垂直一維水理模式	地形	淡水河系河道斷面地形由第十河川局提供；河口海域地形由港灣技術研究中心提供
	動黏滯係數	0.001 m^2/s
	計算間隔	每 1 hr 跑一次
	網格大小	200 m×200 m

以上資料來源爲黃良雄等(2005)“淡水河系感潮段全潮量測之輔助計算(2/2)(期中報告)”。

在河川流量輸入方面，雖然感潮段會隨著河水流量增加而縮短，但由於發生暴雨的時間甚少，河中多是處於流量較低的常流量情況，由圖 1 與圖 2 可看出，全潮量測各測點之流量—水位曲線皆呈現近似封閉的狀態，且一個半日潮量測時間內之流量淨值大抵皆趨近於 0。由此可知，將本研究所採取之頻率年設計流量取爲 0 應爲合理之設定。

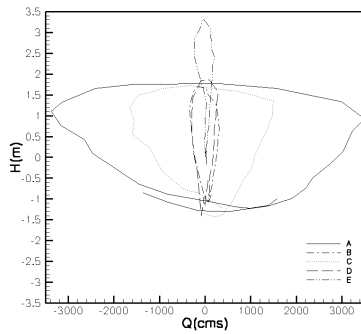


圖 1 不同量測點之流量—水位曲線（民國 88 年）

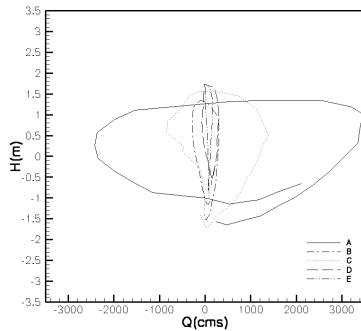


圖 2 不同量測點之流量—水位曲線（民國 89 年）

4.2 水理與質量傳輸邊界條件之處理

在水理模式方面，邊界條件的考慮可分為兩方面，一為封閉式邊界條件(close boundary condition)，一為開放式邊界條件(open boundary condition)。封閉式邊界條件(海岸與河堤)中，我們假定邊界上的水平與垂直方向流速均為零，此即為無滑移條件。開放式邊界條件(海洋)中，水位是由合成潮內差之潮位值所給入(鄰近潮位站潮位調合分析之結果)，流速則假設垂直及水平此邊界方向的流速梯度為零。另外在河川的開放式邊界條件方面，則假設垂直此邊界方向之水位變化為零，且流速由流量歷線得到。模式在實際應用上，除了配合現場觀測的資料外，尚需考慮應用邊界附近流場與水位變化情形是否與上述假設條件接近。

本研究在此現場實例中，外海邊界及河川上游邊界水理輸入值乃採用黃良雄等(2004)“淡水河系感潮段全潮量測之輔助計算(期末報告)(1/2)”已經過驗證之邊界潮位及河川邊界流速直接輸入計算，雖然此邊界條件在計算時並無考慮密度變化，但因影響不大故仍可使用。

在質量傳輸模式方面，在外海部分給入 $\bar{C}=1$ ，即表示外海區域無淡水與海水的交互作用，水體成

份為 100% 的海水，在河岸部分則假設濃度垂直邊界方向變化為零($\partial \bar{C} / \partial n = 0$)，而河川上游部分，以時間觀點來看，其邊界值將會隨著潮汐漲退而變化，若以空間觀點來看，其邊界點與附近的值差異應不至於太劇烈，於是河川上游的邊界條件在此也假設為濃度垂直邊界方向變化為零($\partial \bar{C} / \partial n = 0$)。

4.3 計算時距之說明

本研究在水平二維水理模式方面，採取的計算時距為 1 秒，而垂直一維水理模式方面，則是 1 個小時計算一次，於是每個小時可以輸出一速度剖面。而在質量傳輸方面，經過測試後將計算時距設定在每 4 小時計算一次，使其可同時掌握計算成果之穩定與計算效率。

4.4 模擬結果

4-4.1 流速剖面

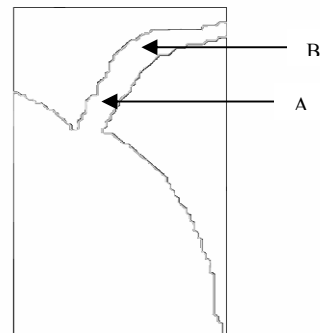


圖 3 剖面輸出點位置

針對圖 3 上的 A、B 兩個流速剖面輸出點，而圖 4 為潮汐水位隨時間變化之示意圖。

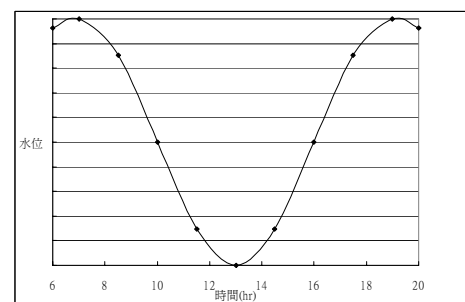


圖 4 潮汐水位隨時間變化之示意圖

為了表示出流速在水平方向之變化情形，針對 A、B 兩個點附近的河川截面(A1、A2 為 A 點左右兩邊之點，B1、B2 為 B 點左右兩邊之點)，繪出圖

5 至圖 8 兩個截面隨時間變化之流速剖面圖。由圖 5 至圖 8 可以顯示出流速在垂直方向與水平方向均有所變化。

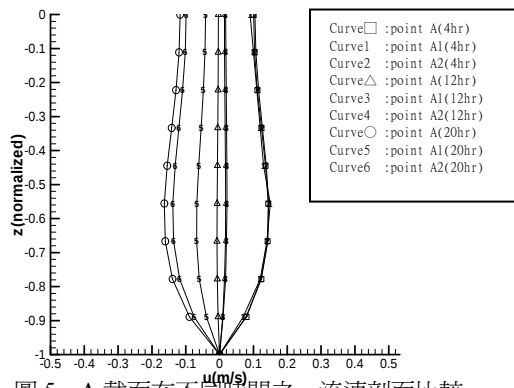


圖 5 A 截面在不同時間之 u 流速剖面比較

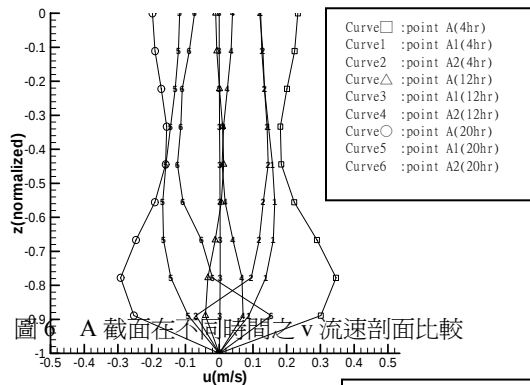


圖 6 A 截面在不同時間之 v 流速剖面比較

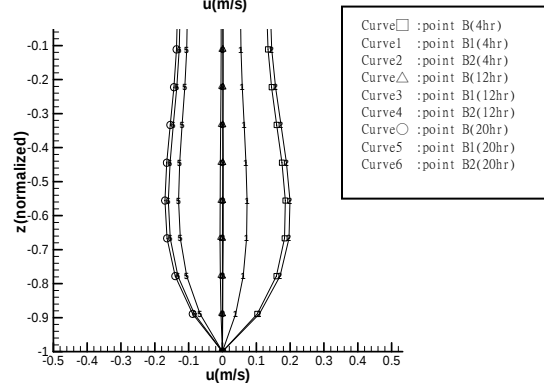


圖 7 B 截面在不同時間之 u 流速剖面比較

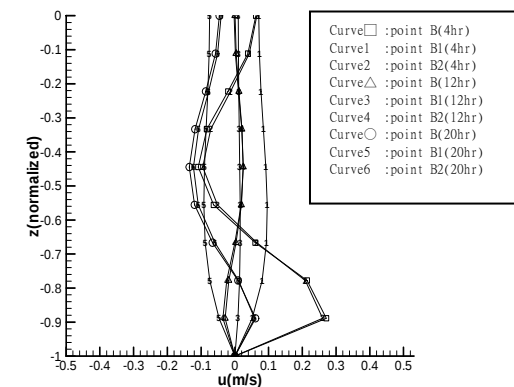


圖 8 B 截面在不同時間之 v 流速剖面比較

4-4.2 水體含鹽百分比剖面

一樣針對圖 3 上的 A 與 B 兩個點，垂直一維與水平二維之濃度傳輸合成剖面如圖 9 與圖 10，每個圖皆以間隔四小時之含鹽百分比變化作為輸出。由圖 9 與圖 10 可以看出濃度傳輸在垂直方向的變化極小，幾乎可忽略其變化。

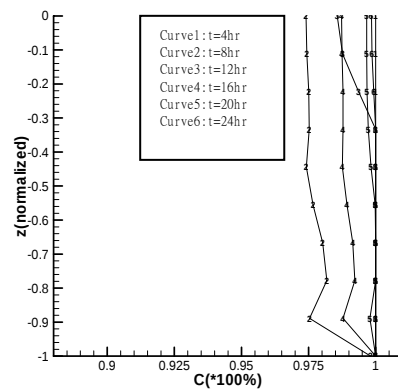


圖 9 輸出點 A 之水體含鹽百分比剖面

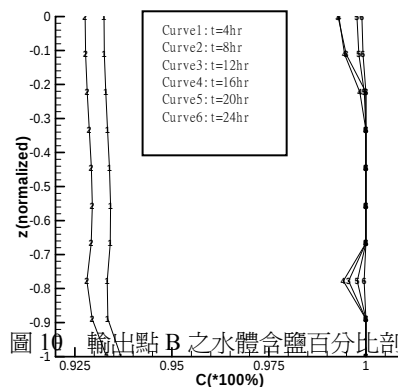
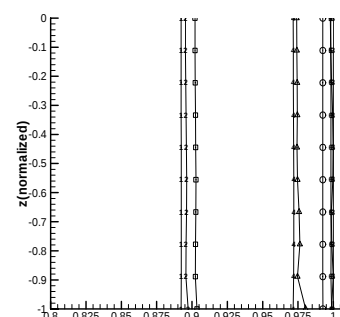


圖 10 輸出點 B 之水體含鹽百分比剖面

另外為了顯示濃度傳輸在水平方向之變化，同樣針對 A、B 兩個點附近的河川截面(A1、A2 為 A 點左右兩邊之點，B1、B2 為 B 點左右兩邊之點)，繪出圖 11 與圖 12 三個截面隨時間變化之濃度傳輸合成剖面圖。由圖 11 與圖 12 可以看出，濃度傳輸在水平方向的變化較垂直方向來得明顯，可知濃度傳輸在水平方向的變化情形較具參考價值。



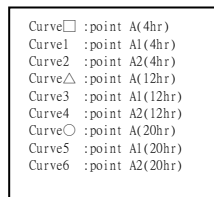


圖 11 A 截面在不同時間之水體含鹽百分比剖面比較

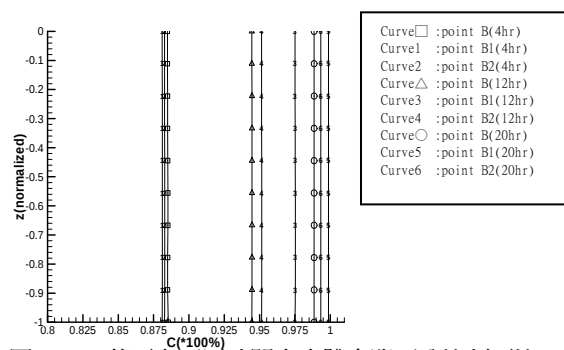


圖 12 B 截面在不同時間之水體含鹽百分比剖面比較

五、結論

在水理方面，由圖 7 至圖 10 可以清楚看出，流速剖面在水平方向與垂直方向均有顯著的變化，也符合之前所提到，由於河口寬與重力之作用而產生水平與垂直方向的變化，也顯示出水理問題的三維特質。

而在濃度傳輸方面，雖然於模擬計算時在地形方面作了部份的簡化，可能造成濃度傳輸剖面有些微的誤差，但是整體的剖面趨勢應不至於影響太大。經由圖 11 與圖 12 的結果來看，濃度傳輸在垂向的變化極小，而從圖 13 與圖 14 可以看出濃度傳輸在水平方向的些微變化。由此結果可以得知在模擬淡水河口濃度傳輸問題時，若不使用本文之三維模式，則似乎一維模式或已可勝任，但若要做到比一維模式略佳的計算，則水平二維的計算應該比垂直二維的計算更值得被考慮。

因為本研究的模擬只從淡水河口上溯到關渡附近，若是能更往上游模擬，預期濃度傳輸的三維現象將愈明顯，故感潮河段的三維計算應有其必要

性。此外，由於本研究之質量傳輸計算乃是先利用三維的水理模擬計算出流速分佈，再進而求得濃度傳輸的三維分佈，所以即使目前的現場模擬結果其濃度傳輸的三維現象並不顯著，但是其三維特質仍是存在，以致此問題仍需考量三維的模擬計算。

謝誌

本研究承蒙行政院國家科學委員會補助，帳號為 NSC94-2611-E-002-006；NSC95-2221-E-002-405，謹此誌謝。

參考文獻

1. 吳仁友, 1997, “擬似三維海岸水動力計算模式之發展”, 國立台灣大學土木工程研究所碩士論文
2. 黃良雄等, 2004, “淡水河系感潮段全潮量測之輔助計算(1/2)(期末報告)”, 經濟部水利署第十河川局
3. 黃良雄等, 2005, “淡水河系感潮段全潮量測之輔助計算(2/2)(期中報告)”, 經濟部水利署第十河川局
4. Lardner, W. and Cekirge, H. M., 1988, “A new algorithm for three-dimensional tidal and storm surge computation”, Appl. Math. Modelling, Vol.12, 471-481
5. Taylor, 1954, “The dispersion of matter in turbulent flow through a pipe”, Proceedings of the Royal Society, A, vol. CCXXIII(1954), 446-468

ISOPE-2007 與會心得

第十七屆國際近海(海洋)及極地工程研討會(ISOPE-2007)，自七月一日至七月六日，在葡萄牙首都里斯本的柯林西亞旅館(Corinthia Liosboa Hotel)舉行。

總計有 120 場 608 篇論文，及 6 場綜合演講論文發表。從地質、管線到波浪、地震，可謂包羅萬象。參加人員計來自 48 個國家，約 900 人。

里斯本是個港都，景色優美，七月的氣候相當宜人。但拉丁民族的瀟灑個性及浪漫習慣，使其硬體設備及軟體管理皆顯得遠不如台北多矣。整個都市似乎只有觀光產業發達而已。從各方面看，葡萄牙都不像個值得學習的進步國家。

由於這項研討會規模大，除了學術界，也有大量的工業界參與，因此論文品質平均而言難免廣而不精。不過，能多了解工業界的語言及需求，也是一項不錯的經驗。

台灣這次去的人規模不小。我個人發表了篇地震前兆的文章；與其他大會文章相比，自詡品質應該不錯。議程中聽到最有啟發性之論文一是發現美國及韓國學者波浪夾氣計算已複雜到以三維，兼顧水及空氣二相流體處理的程度，不由自問這麼複雜到底還能掌握到多少物理的核心？其次是海洋地質液化及質量傳輸的文章，發現我們的研究有外國人仍抓不到的重點，故頗能自勵也。