

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫 成果報告
 期中進度報告

擬似三維異重流及沉滓運移模式之發展與測試（一）

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC97-2221-E-009-083-MY3

執行期間：97年8月1日至100年7月31日

計畫主持人：楊錦釗教授

共同主持人：

計畫參與人員：

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告 完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- 赴國外出差或研習心得報告一份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、
列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權， 一年 二年後可公開查詢

執行單位：國立交通大學土木工程學系

中 華 民 國 98 年 5 月 31 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫期中進度報告

擬似三維異重流及沉滓運移模式之發展與測試 (一)

Development and Examination of A Pseudo-3D Model for Density Current and Sediment Movement (1)

計畫編號：NSC97-2211-E-009-083-MY3

執行期限：97年8月1日至100年7月31日

主持人：楊錦釗教授 國立交通大學土木工程學系

計畫參與人員：國立交通大學土木工程學系

一、摘要

水庫泥砂運移型態可分為三角洲堆積、異重流與渾水層型態，較粗的顆粒因流速減緩落淤形成三角洲，其餘渾水因清渾水比重之差異，在適當的條件下將潛入水面形成異重流，沿庫底向壩前運移。三角洲淤積型態，其理論較為成熟，已有許多輸砂模式可進行模擬分析；而泥砂異重流運移之模擬相對困難，目前異重流數值模式發展大致以垂直二維模式為主，但上游河道進入庫區後河寬與水深均向壩前方向持續擴張，其流場與泥砂運移實屬三維現象，對於異重流運移特性、動量交換與沿程落淤等現象，有必要藉助三維模式進行瞭解。本計畫將洪(2007)之簡化三維計算並增加模式穩定性，此一概念推廣至非結構網格(unstructured grid)，並於垂直方向導入 σ -座標，以適應不規則地形，同時以混合長度計算垂向紊流黏滯係數，並進一步建立渾水濃度與密度差之關係以反應異重流運移現象，與細顆粒沉滓沈降機制以反映異重流沿程落淤、能量耗散現象等機制；模式嘗試進行庫區流場與濃度分佈模擬，與前人相關試驗結果及石門水庫泥砂濃度量測結果作比較，期進一步瞭解異重流特性，提供水利單位排砂策略研擬參考。

關鍵詞：分層、三維、異重流、水庫、沉滓

Abstract

The sediment transport behavior in reservoirs can be classified into delta build-up, density current and turbidity layer. The sediment-laden flow entering into the reservoirs behaves like a jet shooting into a stilling basin, and the sediment deposits to form a delta at the entrance due to sudden deceleration. The numerical models for delta formation have been well developed and frequently used to simulate and analyze the flow phenomenon. In addition to the delta formation, the silt and clay plugging beneath the clear water due to

density difference and moving toward the dam, is recognized as density current. Most of the numerical models being developed for density current were vertical 2D. However, the behaviors of flow and density current in reservoirs are indeed three dimensional. Transport behaviors of density current and its characteristics including marching speed of head, momentum exchange, sediment deposition should be analyzed by using 3D models. Hung (2007) proposed a pseudo-3D layer-integrated model. This model will be extended to cover the properties including the unstructured grid and σ -coordinate, and therefore, to allow the numerical grid adapting to complex geometries and terrains. The mixing length concept predicting vertical turbulent viscosities will be embedded into the flow model. The state function for density variation and transport mechanisms including sediment deposition, momentum exchange will be also adopted in this model. In lieu of simulation study performed for some published laboratory data and measured data from Shi-Men Reservoir, the transport mechanism of density current will be intensively analyzed as the basis for planning sediment sluicing strategies.

Keywords: Layered-integrated, Three-dimensional, Density current, Reservoir、Sediment

二、緣由與目的

台灣地區水庫集水區週遭因地質條件不佳，且山坡地大量開發造成大量沖蝕崩塌，使水庫多面臨泥砂過度淤積而庫容減少，導致防洪能力降低、給水能力不足等問題。93年艾利颱風極限降雨造成石門水庫庫區 2300 萬立方公尺淤積，以及桃園地區停水廿餘天的窘境，為能維持庫容、穩定供水，水利署編列 250 億特別預算執行「石門水庫及其集水區整治計畫」針對現況進行緊急供水工程、水庫更

新改善與集水區保育治理與穩定供水設施改善等計畫，其中水庫更新改善部分包含庫區浚渫、排砂設施改善與新設排砂設施等項目，然排砂設施之更新改善，須先瞭解庫區泥砂運動型態與特性方能經濟有效地進行排砂。

泥砂進入水庫後產生之異重流與渾水層運移現象，其物理機制差異甚大。水庫上游集水區所產生之挾砂渾水進入水庫後，在入庫水流本身慣性，及其與庫區靜水密度差之作用下，流場會產生劇烈變化，而此流場形式(flow pattern)與水庫水深關係密切，其作用如射流(jet)進入靜水池(stilling basin)，劇烈的動量交換將使入庫渾水迅速與庫區靜水迅速摻混可能形成渾水水庫；另由於庫區靜水密度與水深(或溫度)有關，且庫前三角洲提供下潛空間，使入庫水流潛入庫底形成異重流，而異重流運移至彎道或是壩前等阻礙時，亦會因流場迴流形成渾水水庫。

高濃度泥砂水流進入深水庫後，其渾水流入水庫壅水區(即受壩址迴水影響區域)後，如前所述，較粗的顆粒因流速減緩落淤形成三角洲，如圖 1 所示，三角洲可分為頂坡段與前坡段，根據 Fan and Morris(1992)提到，大陸官廳水庫的三角洲粒徑分佈由 0.5mm~0.0005mm 不等，而更細的顆粒在越過三角洲頂點後揚起成懸浮質，這些懸浮質在往下游移動的過程仍會繼續淤積，由於渾水與清水比重上的差異且含有足夠的細砂濃度，在適當的條件下渾水將潛入水面以下而形成異重流，沿庫底向壩前運行。渾水由明渠流潛入清水而形成異重流的位置稱潛入點，潛入點附近水面常見大量漂浮物聚集，這是判斷是否發生異重流、並確定潛入點的明顯指標；當渾水入流量增加或底床淤高或水位降低，潛入點會向下游移動，反之，入流量減少或水位升高或濃度增加，均會造成潛入點向上游移動。然而細顆粒懸浮質越過三角洲後下潛形成異重流的機制未有成熟的研究發展，而異重流沿程落淤以致於排砂效率降低，以及洪峰流量與異重流兩者到達壩前的時間差亦是影響排砂策略的主因。目前異重流數值模式發展以垂直二維模式為主，如 Bournet et al(1999)發展寬度積分垂直二維模式探討水庫內異重流及其下沉點之特性，Fizoozabadi et al(2003)以有限體積垂直二維模式模擬水庫內細泥之沉降行為，並比較粒徑不同之濃度分布情形。

二維模式在計算時間上相對於三維模式節省許多，較適合作長時間之模擬；平面二維水深積分模式可提供流場與泥砂濃度之平面分布，但缺乏深度方向資訊，相對地，垂直二維雖可提供垂直面上之流場與濃度分布，但缺乏側向資訊，但由於水庫上游河道進入庫區後無論在河寬或水深方向均向壩前方向持續擴張，或是非直線性水庫，水庫之流場與泥砂運移在本質上乃三維現象，無論是垂直二

維或平面二維模式均無法描述水庫內之流場與含砂濃度分布，因此，三維模式之應用有其必要。

目前發展中之三維模式如 Neary(1995)發展完全三維分流模式，假設水面變化不大採固定水面網格，考慮紊流流場特性，探討取水工流場分布特性。Gessler et al(1999)發展三維動床模式探討彎道流場特性與底床變動現象，考慮紊流效應與懸浮載分布，並探討底床變動與河床沖蝕、懸浮載沉降、河床載傳輸等機制。Ahsan and Blumberg(1999)發展三維水理模式探討湖泊內水質問題與溫度分布，假設水庫內靜水壓分布，由水平方向動量方程式求解水平方向流場，代入連續方程式得到垂直方向速度，並考慮紊流擴散之效應。Gross et al(1999)以三維水理模式 TRIM3D(Casulli and Cattani, 1994)為基礎，加入污染質傳輸與狀態方程式發展一半隱式(semi-implicit)有限差分鹽度模式，模擬南舊金山灣鹽度之長期變化。Cesare et al(2001)以二相流(two-phase flow)之商業計算流體力學(CFD)模式 CFX-4 植入輸砂連續方程式，藉以模擬異重流(density current)在水庫內的運動行為與底床淤積狀況。另外，以積分平均概念發展之擬似三維分層水理模式有 Choi(1998)採消散 Galerkin 有限元素法發展分層平均泥石流模式，採用移動與固定格網並行方式探討泥石流進入水庫之前進速度與淤積現象。Umeda et al. (2006)發展一結合 k- ϵ 紊流模式的異重流三維數值模式，同樣採用濃度與密度差之關係，藉以反應異重流的受重力運移的現象，但尚未考慮泥砂沉降對濃度之影響，並且在濃度劇變層(metalimnion)的流速剖面上產生誤差，導致濃度模擬有高估的結果。楊等(2006)應用三維 HOU 模式(Wang 1994)進行石門水庫庫區之渾水濃度分析，結果發現渾水運行時遇庫區渠道轉向時產生明顯混和現象，而由於未具泥砂運移、沉降機制及泥砂濃度與流體密度之關係，無法模擬因密度差所形成之異重流現象。

本研究主要是發展擬似三維的異重流模式，並延續 Hung et al.(2008)，其提出層內部二次形狀函數與層介面速度與剪力連續條件，發展結構網格之擬似三維分層積分水理模式，簡化三維計算並增加模式穩定性。本計畫將此一概念推廣至非結構網格(unstructured grid)，並於垂直方向導入 σ -座標，以適應不規則地形，垂直方向的黏滯係數採用零方程式的紊流模式以增進垂向流速模擬之正確性；並進一步建立水庫沉澱及異重流模式之功能，探討深水庫之細粒沉澱與異重流在水庫中的運移行為，期能對水庫中泥砂運動與淤積特性有更進一步之了解。本計畫為三年之連續計畫，目的乃是為水庫泥砂運移行為進行分析，提供排砂策略研擬參考。第一年主要發展水平非結構網格，垂向 σ -座標與靜水壓之分層水理模式。第二年建立零方程式之紊流模

式以求得垂向黏滯係數分佈；建立壁函數改善流速剖面正確性；建立異重流運移模式並分析壩前渾水迴流現象對濃度分佈之影響。第三年建立異重流底床交換機制對庫區底床變化之影響。

三、研究方法與結果討論

(一)理論基礎

1.水理模式

對三維不可壓縮黏性流體之 Navier-Stokes 方程與傳輸方程式取時取雷諾平均，可得雷諾平均方程如下列各式：

連續方程

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0$$

動量方程

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (U_j U_i) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (v \frac{\partial U_i}{\partial x_j}) + g_i$$

假設靜水壓分佈

$$P = \rho g (H + z_b - z)$$

其中， $\mathbf{u}_i = \{\mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{w}\}^T$ 為流體在 x、y、z 方向之速度， ρ 、 ν 分別為流體之密度與運動黏滯係數， g 為重力加速度。

垂直方向採的 σ -座標轉換

$$\sigma = \frac{z - z_b}{z_s - z_b}$$

控制方程式經 σ -座標轉換後如下：

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial Hu}{\partial x} + \frac{\partial Hv}{\partial y} + \frac{\partial H\omega}{\partial \sigma} = 0$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial uu}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial u\omega}{\partial \sigma} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{g}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} \int \rho' d\sigma' + \frac{g}{\rho} \sigma_x H \rho' \\ &+ \frac{\partial}{\partial x} (v^h \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (v^h \frac{\partial u}{\partial y}) + \frac{1}{H^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} (v^h \frac{\partial u}{\partial \sigma}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial vv}{\partial y} + \frac{\partial v\omega}{\partial \sigma} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{g}{\rho} \frac{\partial}{\partial y} \int \rho' d\sigma' + \frac{g}{\rho} \sigma_y H \rho' \\ &+ \frac{\partial}{\partial x} (v^h \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (v^h \frac{\partial v}{\partial y}) + \frac{1}{H^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} (v^h \frac{\partial v}{\partial \sigma}) \end{aligned}$$

$$P = \rho g (1 - \sigma) H$$

其中， u 、 v 、 ω 為 x、y、 σ 方向上之速度， g 為重力加速度， P 為壓力， ρ 為水之密度、 ρ' 為水與異重流體之密度差， H 為水深， z_s 為水面高程， z_b 為底床高程。

Boussinesq 紊流渦流黏性觀念

$$\tau = \tau' + \tau''$$

$$\tau' = \mu \frac{\partial U_i}{\partial x_j}$$

$$\tau'' = -\overline{\rho u_i u_j} = \mu_t \frac{\partial U_i}{\partial x_j}$$

垂向紊流黏滯係數使用 mixing length 觀念

$$v^v = \frac{l^2}{H} \frac{\partial U}{\partial \sigma}$$

其中 l 為水深

將求解區域分為 K 層，並各變數層積分定義如下：

$$\Phi_{k+1/2} = \frac{1}{h} \int_{\sigma(k)}^{\sigma(k+1)} \Phi(x, y, \sigma, t) d\sigma$$

σ_{k+1} 與 σ_k 分別為層之上下邊界，如圖 2 所示。

可得層平均連續方程式

$$\frac{\partial (h_k)}{\partial t} + \frac{\partial (hu_{k+1/2})}{\partial x} + \frac{\partial (hv_{k+1/2})}{\partial y} + F_{\sigma(k-1)} - F_{\sigma(k)} = 0$$

層平均動量方程式

$$\begin{aligned} &\frac{\partial (hu_{k+1/2})}{\partial t} + \frac{\partial (hu_{k+1/2} u_{k+1/2})}{\partial x} + \frac{\partial (hv_{k+1/2} u_{k+1/2})}{\partial y} + FH u_{k+1} - FH u_k \\ &= -\frac{1}{\rho} [\rho g H_x - \rho g H \sigma_x] \Big|_{k+1/2} + \frac{g}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} \int_{k+1/2} \rho' d\sigma' + \frac{g}{\rho} \sigma_x H \rho' \Big|_{k+1/2} + \\ &H \frac{\partial}{\partial x} (\frac{h}{\rho} T_{xx}) + H \frac{\partial}{\partial y} (\frac{h}{\rho} T_{yx}) + \frac{1}{H} (\frac{\tau_{zx}}{\rho})_{k+1} - \frac{1}{H} (\frac{\tau_{zx}}{\rho})_k \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\frac{\partial (hv_{k+1/2})}{\partial t} + \frac{\partial (hv_{k+1/2} u_{k+1/2})}{\partial x} + \frac{\partial (hv_{k+1/2} v_{k+1/2})}{\partial y} + FH v_{k+1} - FH v_k \\ &= -\frac{1}{\rho} [\rho g H_y - \rho g H \sigma_y] \Big|_{k+1/2} + \frac{g}{\rho} \frac{\partial}{\partial y} \int_{k+1/2} \rho' d\sigma' + \frac{g}{\rho} \sigma_y H \rho' \Big|_{k+1/2} \\ &+ H \frac{\partial}{\partial x} (\frac{h}{\rho} T_{xy}) + H \frac{\partial}{\partial y} (\frac{h}{\rho} T_{yy}) + \frac{1}{H} (\frac{\tau_{zy}}{\rho})_{k+1} - \frac{1}{H} (\frac{\tau_{zy}}{\rho})_k \end{aligned}$$

其中， $u_{k+1/2}$ 、 $v_{k+1/2}$ 為 x、y 方向上之層平均速度， h 為層厚度， ρ 為水之密度、 ρ' 為水與異重流體之密度差， τ_{zx} 、 τ_{zy} 為層介面之剪應力， $k+1/2$ 下標為層平均值， $k+1$ 、 k 下標為層之上、下介面， F 為層介面通量

$$F_{\sigma(k)} = H \omega \Big|_{\sigma(k)} - Hu \frac{\partial \sigma}{\partial x} \Big|_{\sigma(k)} - H v \frac{\partial \sigma}{\partial y} \Big|_{\sigma(k)}$$

於 z 方向分別求解 u 、 v 方程組，可得水平方向速度於垂直方向之分布，代入非自由液面層平均連續方程式可得垂直方向速度 ω

$$\omega_{k+1} = \frac{u_{k+1}}{H} \frac{\partial \sigma_{k+1}}{\partial x} + \frac{v_{k+1}}{H} \frac{\partial \sigma_{k+1}}{\partial y} - \frac{1}{H} \sum_{m=1}^k \left[\frac{1}{H} \frac{\partial h_m}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (h_m u_{m+1/2}) + \frac{\partial}{\partial y} (h_m v_{m+1/2}) \right]$$

自由液面層水位變化可表示為

$$\sum_{m=1}^k \left[\frac{1}{H} \frac{\partial (h_m)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (hu_{m+1/2}) + \frac{\partial}{\partial y} (hv_{m+1/2}) \right] = 0$$

， m 為啞指標。

2.模式假設與限制條件

當模式應用於水庫現場案例模擬時，必須藉由若干假設與簡化，方能進行關模擬工作，模式之假設與限制條件敘述如下：

- 無法考慮幾何邊界之變動，且假設模擬區域之斷面底床形狀在側邊界處均為垂直的形態，以避免漲退水所造成的岸壁乾濕交替問題；
- 模式可考慮自由液面之變化，但過大之液面變化

仍會影響數值解之收斂；

3. 邊界條件

(1). 層介面邊界條件

對一般化傳輸方程式，層內部可導入形狀函數(shape function)，則變數層平均值可表示為

$$\bar{\Phi}_{k+1/2} = \frac{1}{\Delta\sigma} \int_0^{\Delta\sigma} (a+b\sigma+c\sigma^2)d\sigma$$

由邊界值 $\Phi(0) = \Phi_k$ 、 $\Phi(\Delta\sigma/2) = \bar{\Phi}_{k+1/2}$ 、 $\Phi(\Delta\sigma) = \Phi_{k+1}$ 整理可得層介面速度梯度

$$\left. \frac{\partial\Phi}{\partial\sigma} \right|_{\sigma_{k+1}} = \frac{1}{\Delta\sigma} (4\Phi_{k+1} + 2\Phi_k - 6\bar{\Phi}_{k+1/2})$$

$$\left. \frac{\partial\Phi}{\partial\sigma} \right|_{\sigma_k} = \frac{1}{\Delta\sigma} (-2\Phi_{k+1} - 4\Phi_k + 6\bar{\Phi}_{k+1/2})$$

使層介面之剪力與速度連續，u與v動量方程式分別在z方向可得K條層平均方程式與k+1條層邊界連續式，而形成(2k-1)條方程組。

(2). 底床與自由液面邊界條件

水流底床邊界條件採不滑移邊界條件

$$u_B = 0, v_B = 0, w_B = 0$$

自由液面邊界條件:自由液面運動邊界條件與風剪力邊界條件。

(3). 上下游邊界條件

水庫上游邊界條件通常採單位寬度流量 q_i 上游流速邊界條件可改寫為

$$u_k = q_i / H$$

下游邊界條件若為溢洪道，則單位寬度流量 q_o

$$q_o = C_w (H - z_w)^{3/2}$$

若為排洪隧道單位寬度流量 q_o

$$q_o = C_t \sqrt{2g(H + z_b - z_t)}$$

其中， C_w 、 C_t 分別為溢洪道與排洪隧道之流量係數， z_w 、 z_t 分別為溢洪道頂高與排洪隧道入口高度。

(二) 數值方法架構

本研究採用有限體積法，因此需先將層平均方程式以保守形式進行積分後離散，

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} = S$$

其中 Q 為守恆性物理量之向量， $Q = \begin{Bmatrix} H \\ (hu_{k+1/2}) \\ (hv_{k+1/2}) \end{Bmatrix}$;

$$x \text{ 方向通量 } E = \begin{Bmatrix} \sum_{m=1}^k (hu_{m+1/2}) \\ hu_{k+1/2}u_{k+1/2} - \frac{Hh}{\rho} T_{xx} \\ hv_{k+1/2}u_{k+1/2} - \frac{Hh}{\rho} T_{xy} \end{Bmatrix};$$

$$y \text{ 方向通量 } G = \begin{Bmatrix} \sum_{m=1}^k (hv_{m+1/2}) \\ hv_{k+1/2}u_{k+1/2} - \frac{Hh}{\rho} T_{yx} \\ hv_{k+1/2}v_{k+1/2} - \frac{Hh}{\rho} T_{yy} \end{Bmatrix};$$

同理，S 為水理源項。

對守恆控制方程式進行體積分：

$$\int_{\square V} \frac{\partial Q}{\partial t} dV + \int_{\square V} \left(\frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} \right) dV = \int_{\square V} S dV$$

利用 Green's 定理對第 2 項處理

$$\int_V \left(\frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} \right) dV = \int_V \nabla F dV = \sum_m F \cdot \vec{n} ds$$

m 為格網總邊數，n 為格網邊界法向量，以三角形格網為例，如圖 3，可進一步將上式最後一項表示為

$$\sum_3 F \square \vec{n} ds = \int_1^2 F(U, \vec{n}_{AB}) ds + \int_2^3 F(U, \vec{n}_{AC}) ds + \int_3^1 F(U, \vec{n}_{AD}) ds$$

採取上風法

$$F(U, \vec{n}_{AB}) =$$

$$\square F(U_A, U_B, \vec{n}_{AB}) = \frac{1}{2} \bar{u}_{AB} \square \vec{n}_{AB} (U_A + U_B) - \frac{1}{2} \left[\bar{u}_{AB} \square \vec{n}_{AB} \right] (U_B - U_A)$$

四、成果自評

本研究今年度為水庫擬似三維異重流水理模式之建置與測試，截至目前為止，模式仍處於建置與除錯階段，尚未有完整成果可以呈現，進度些微落後。

五、參考文獻

1. 俞維昇，水庫沉滓運動特性之研究，國立台灣大學土木工程學研究所博士論文，1991。
2. 洪夢祺，擬似三維分層積分淺水波模式之發展，國立交通大學土木工程學系博士論文，2007。
3. 韓其為，水庫淤積，科學出版社(北京)，2003。
4. 范家驊，異重流，水力電力出版社，1959。
5. Bournet, P.E., Dartus, D., Tassin, B. and Vincon-Leite, "Numerical investigation of plunging density current", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 125, No.6, pp.584-594, 1999.
6. Casulli, V., Cattani, E., "Stability, accuracy and efficiency of a semi-implicit method for three-dimensional shallow water flow", Comp. and Math. with Applications, Vol. 27, No.4, pp. 99-112, 1994.
7. Cesare, G.D., Schleiss, A., and Hermann, F., "Impact of Turbidity Currents on Reservoir Sedimentation", J. Hydraulic Eng., Vol. 127, No.1, pp. 6-16, 2001.

8. Gessler, D., Hall, B., Spasojevic, M., Holly, F., Pourtaheri, H. and Raphelt, N., "Application of 3D mobile bed, Hydrodynamic model", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 125, No.7, pp.737-749, 1999.
9. Hung, M.C., Hsieh, T.Y., Tsai, T.L., and Yang, J.C., "A Layer-Integrated Approach for Shallow Water Free Surface Flow Computation", Communications in Numerical Methods in Engineering, 2008. (to appear, available online)
10. Jia, Y., Affiliate, and Wang, S.Y., "Numerical model for channel flow and morphological change studies", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 125, No.9, pp.924-933, 1999.
11. Toniolo, H., Parker, G, and Voller, V. "Role of ponded turbidity currents in reservoir trap efficiency", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 133, No. 6, pp579, 2007
12. Neary, V.S., Sotiropoulos, F. and Odgaard, A.J., "Three-dimensional numerical model of lateral-intake inflows ", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 125, No.2, pp.126-140, 1999.
13. Wang, K. H. 1994. Characterization of circulation and salinity change in Galveston Bay. J. Hydr. Eng. ,ASCE, Vol. 120(3), pp. 557-579.

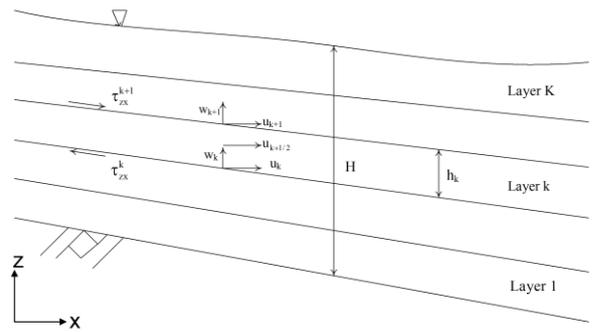


圖 2 水深方向分層示意圖

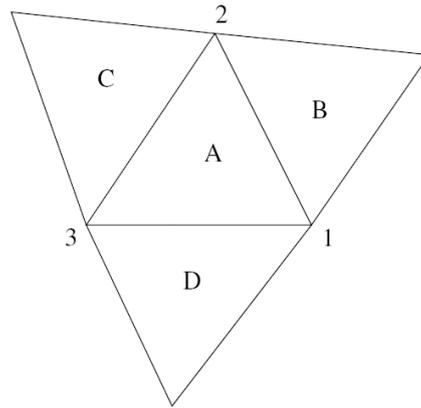
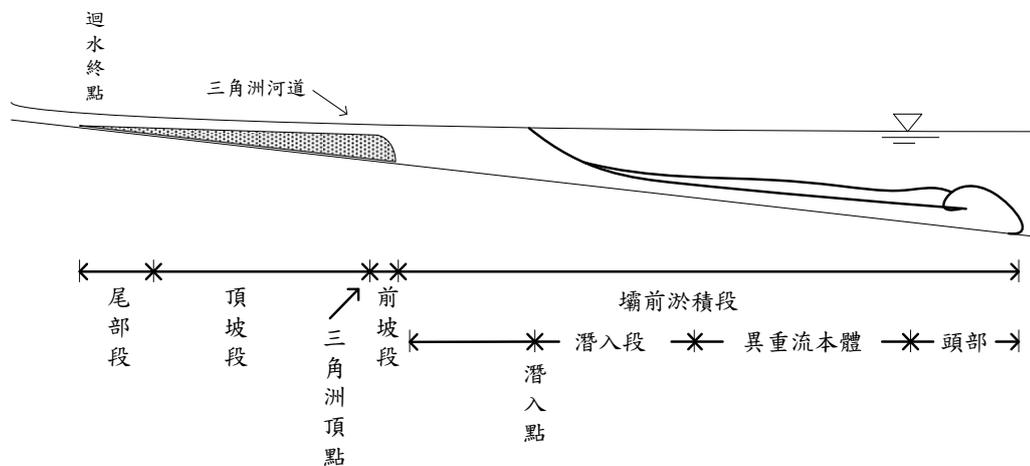


圖 3 三角形格網示意圖



< 異重流入庫區時速剖面及濃度剖面在水庫中沿程變化之示意 >

圖 1 水庫異重流與泥砂運移型態示意