

行政院國家科學委員會專題研究計畫 期中進度報告

三維水庫水理及水質數學模式之發展與應用(1/2)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC92-2211-E-002-053-

執行期間：92年08月01日至93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：郭振泰

共同主持人：柳文成

報告類型：精簡報告

報告附件：國際合作計畫研究心得報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 93 年 5 月 31 日

研究名稱：三維水庫水理及水質數學模式之發展與應用

一、 研究背景

台灣處於亞熱帶，雨量豐沛，平均年降雨量 2510 公厘，扣除蒸發所散失的水量，得水資源總量約為 707 億立方公尺。可是實際上台灣地區河水大部份逕流入海，人們實際用水量只佔水資源總量的 26%。每人每年實際可分配到的降雨量只及世界平均值的七分之一。五月至十月之雨量即佔全年之 78%，枯水期長達六個月，必須倚靠水庫儲蓄水源作為水資源調配之用。

台灣目前現有大小水庫約 40 座，水庫總容量約 22.43 億立方公尺，有效容量為 20.51 億立方公尺。台灣地區主要的水庫(20 座)有一半以上呈現優養化(卡爾森優養指數 >50)現象。優養化嚴重的水庫(卡爾森優養指數 >60)包括有澄清湖、鳳山水庫、白河水庫、南化水庫及鏡面水庫等。由九十一年度第二季台灣地區及離島水庫水質監測資料顯示(行政院環保署，民國 91 年)。在監測的 56 座水庫、湖泊中，其中有 40 個水庫與湖泊其水質達優養狀態，16 個水庫與湖泊其水質為中養狀態，可見台灣地區水庫水質污染之嚴重。

二、 研究目的

本研究之主要目的，為建立水庫之三維動態水理、水質(優養)數值模式，利用實測之水文、水理、水質資料，檢定、驗證模式，瞭解水質之變化機制，進而利用水質數值模式，探討水庫水質之變化，預測未來水質情況，研擬防治污染對策。

本研究所發展、建立的水質模式，將成為未來水庫水質規劃、管理及集水經營之優良工具。而且，水質採樣、監測工作，將可利用此

模式，作最有效、最適之設計與配合，以節省人力、物力與時間。總之，本研究之最終目的可協助水庫管理單位保障水庫水源之潔淨，提升台灣地區民眾的用水品質。

三、 研究之重要性

欲瞭解大自然流體及生物真實的現象、描述其真實的物理、化學變化，發展三維水理、水質模擬模式已成為目前國內、外研究之趨勢。以往受限於電腦的處理速度以及容量，簡化、將問題的維度降低在當時為勢在必行之手段，對於大自然的真實性難以深入探討、研析。近年來，隨著資訊技術、電腦科技不斷地進步，電腦的處理速度及容量大幅地提升，使得發展三維模擬模式成為可能。

一般的垂直二維模式，因為已對水庫剖面進行積分，所以在壩附近的模擬有時不能反映真實的情形，利用三維模式可以更深入的瞭解水庫中的機制。

一般而言，水理、水質模擬的模式所用的數值方法有兩大類：有限元素法與有限差分法。在 1970 年代，水理、水質模擬的模式主要使用的數值方法為有限元素法。在近二、三十年來，隨著有限差分法的發展及有限差分法在數值計算上的優勢，水理、水質模擬的模式逐漸不使用有限元素法而採用有限差分法。目前最廣泛被使用的水理、水質模擬模式：EFDC 與 CE-QUAL-ICM 也都是使用有限差分法。也就是說，有限差分法是當今的潮流、趨勢。因此，本研究將使用有限差分法來發展水庫三維水理、水質模擬模式。

四、 方程組推導

考慮一個三維動態的系統。考慮 Time-Average

$$u = \bar{u} + u', \text{ 而 } \bar{u} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} u dt, \text{ 其概念如圖 1 所示}$$

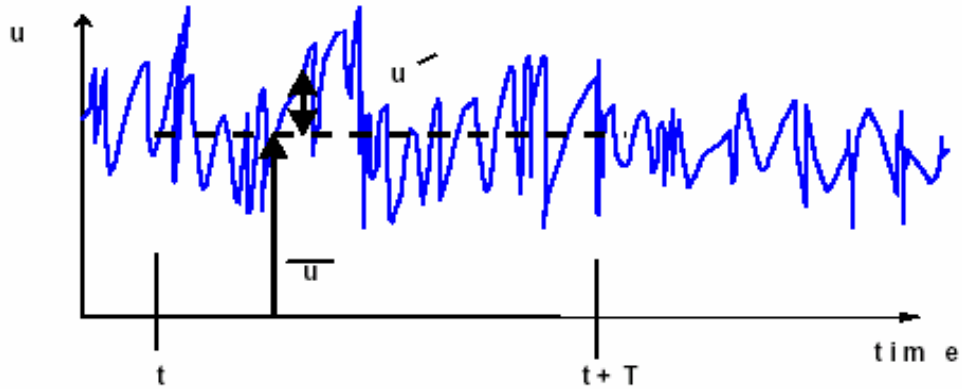


圖 1 Time-Average 的觀念

考慮一個如圖 2 的座標軸，其中 X 向東為正，Y 向北為正，Z 向上為正。

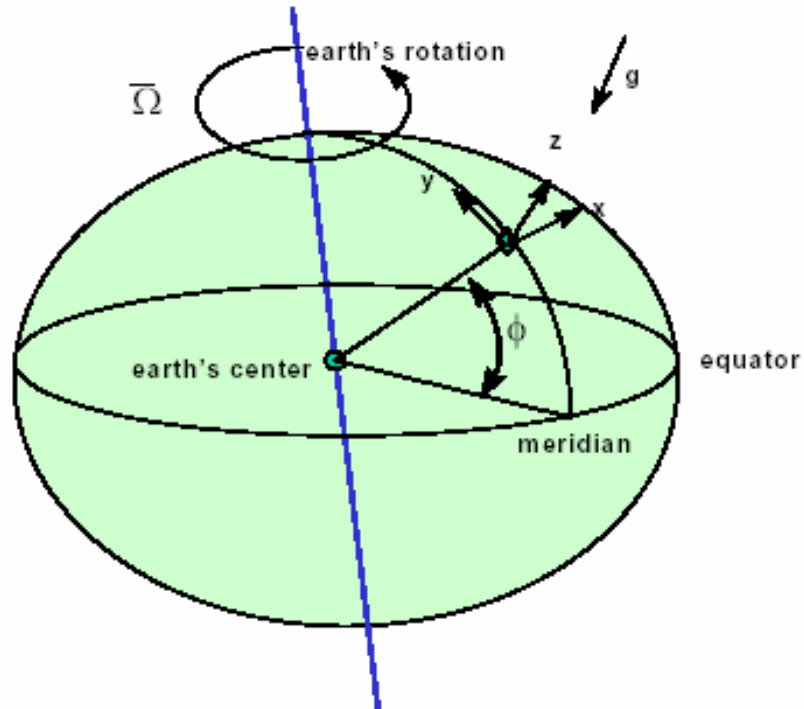


圖 2 模式所採用之座標系統

本模式於水理方面，將考慮下列基本方程組：

連續方程式

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0$$

動量方程式

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} \right) + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial z^2} \right) + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial z^2} \right) + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right)$$

經由整理動量與連續方程式可得

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right)$$

$$\underbrace{\hspace{1.5cm}}_{(1)} \quad \underbrace{\hspace{3.5cm}}_{(2)} \quad \underbrace{\hspace{1.5cm}}_{(3)} \quad \underbrace{\hspace{3.5cm}}_{(4)}$$

$$g = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial z}$$

在 X 與 Y 方向的」動量方程式中，第一項爲 unsteady acceleration 、第二項爲 convective acceleration 、第三項爲 pressure gradient 而第四項爲 turbulence shear stress 。

熱交換方面

考慮一個熱平衡的情況

$$H_n = H_s + H_a + H_e + H_c - (H_{sr} + H_{ar} + H_{br})$$

其中

H_n：交換淨率

H_s：入射短波

H_a：入射長波

H_{sr}：反射短波

H_{ar}：反射長波

H_{br}：水面輻射

H_e：蒸發損失

H_c：熱傳

密度方程式

考慮密度方程式如下的組合

$$\rho = \rho_T + \Delta\rho_s$$

其中

$$\rho_T = 999.8452594 + 6.793952 \times 10^{-2} T - 9.09529 \times 10^{-3} T^2 + 1.001685 \times 10^{-4} T^3 - 1.120083 \times 10^{-6} T^4 + 6.536332 \times 10^{-9} T^5$$

$$\Delta\rho_s = 0.00062 \Phi_s$$

ϕ_{ss} ：Suspend Solid 的濃度

物質傳輸方程式

考慮對流、擴散與反應項，可得一物質傳輸方程式如下

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}(uC) + \frac{\partial}{\partial y}(vC) + \frac{\partial}{\partial z}(wC) + \frac{\partial}{\partial x}(E_x \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(E_y \frac{\partial C}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(E_z \frac{\partial C}{\partial z}) \pm S_i$$

取水口或溢流口的邊界條件

利用模式可計算出在取水口或溢流的水位高度，並藉此可計算相對應的面積，且取水口與溢流口之入流可由水庫管理局的資料取得。

則取水口或溢流口的邊界條件可給定為

$$u = \frac{q}{A}$$

水庫中水體之紊流黏滯性(eddy viscosity)係數與紊流擴散性(eddy diffusivity)係數，受水庫溫度分層(thermal stratification)之影響。而水庫中分層現象之形成，主要是受氣象條件之影響所致。夏季時，由於太陽輻射強，表層水吸收之後溫度逐漸升高，比重減小而與水庫下層比重較大之水形成穩定現象，是為分層效應。然而在某一深度時其溫降劇烈，稱為變溫層(metalimnion)，此層所表現之特性十分穩定，紊流效應微乎其微，因而減少了物質在此層之傳遞，遂將水庫分成上下兩層，變溫層以上稱湖上層(epilimnion)，以下稱湖下層(hypolimnion)。於秋、冬季時，由於太陽輻射量減少，表水層受冷卻，遂與下層水形成對流混合(convective mixing)此現象稱之為翻滾(overtun)。翻滾現象之形成可使水庫上下層均勻混合，增加上下層物質之傳遞。

五、 研究區域概述

翡翠水庫位於新店溪上游北勢溪上，在龜山合流口上游 2.3 公里之翡翠谷，距臺北市約 30 公里，水庫淹沒區總面積約 10.24 平方公里，淹沒區中約 92% 屬於石碇鄉轄區，土地利用以造林地及果園地為主。水庫集水區總面積約 303 平方公里，包括臺北縣的雙溪鄉、坪林鄉、石碇鄉的大部分地區及新店市之小部分地區，除北勢溪主流外，主要支流包括逮魚堀溪、金瓜寮溪、後坑子溪及火燒樟溪等，其集水區之水系圖及水系主要河川圖如圖 3 與圖 4 所示；圖 5 為翡翠水庫的水質採樣地點。翡翠水庫最高常水位標高 170 公尺，總蓄水量 4.06×10^8 立方公尺，最大水深 113.5 公尺，平均水深 39.6 公尺，迴水長達 21 公里，庫底坡度 1/200，預計淤積 50 年後有效蓄水量為 3.27×10^8 立方公尺。

翡翠水庫是一個以供應自來水水源為單一目標之水庫，主要其功能在於調節新店溪之水量，以穩定大臺北地區之原水供應量，預計可滿足目標計畫年民國 119 年大臺北地區各用水標的之需水要求，由於供水範圍相當廣，除臺北市區外尚包括臺北縣三重、新店、中和、永和、淡水、三芝地區。因此水庫之水質管理直接影響到數百萬民眾之用水安全。水庫本身同時兼具發電的功能，並可增加下游河道枯旱期之流量，以稀釋河川污染物濃度，對改善大臺北都會區之環境品質具有深遠的影響。

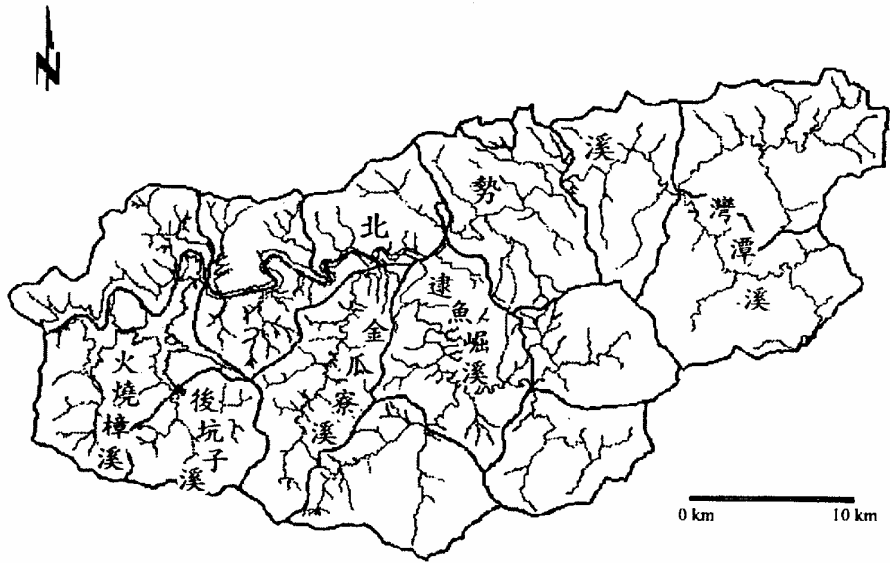


圖 3 翡翠水庫集水區水系圖

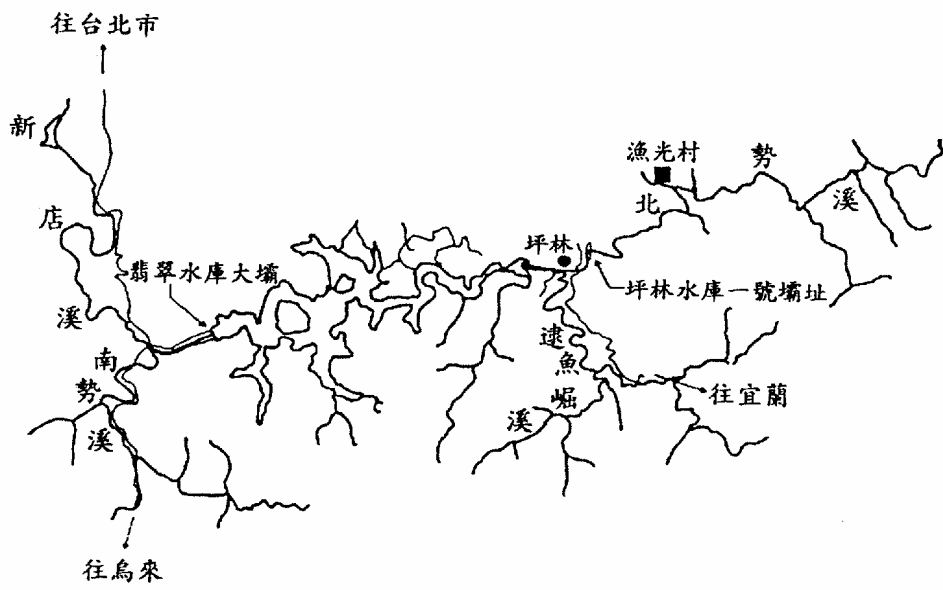


圖 4 翡翠水庫集水區水系主要河川圖

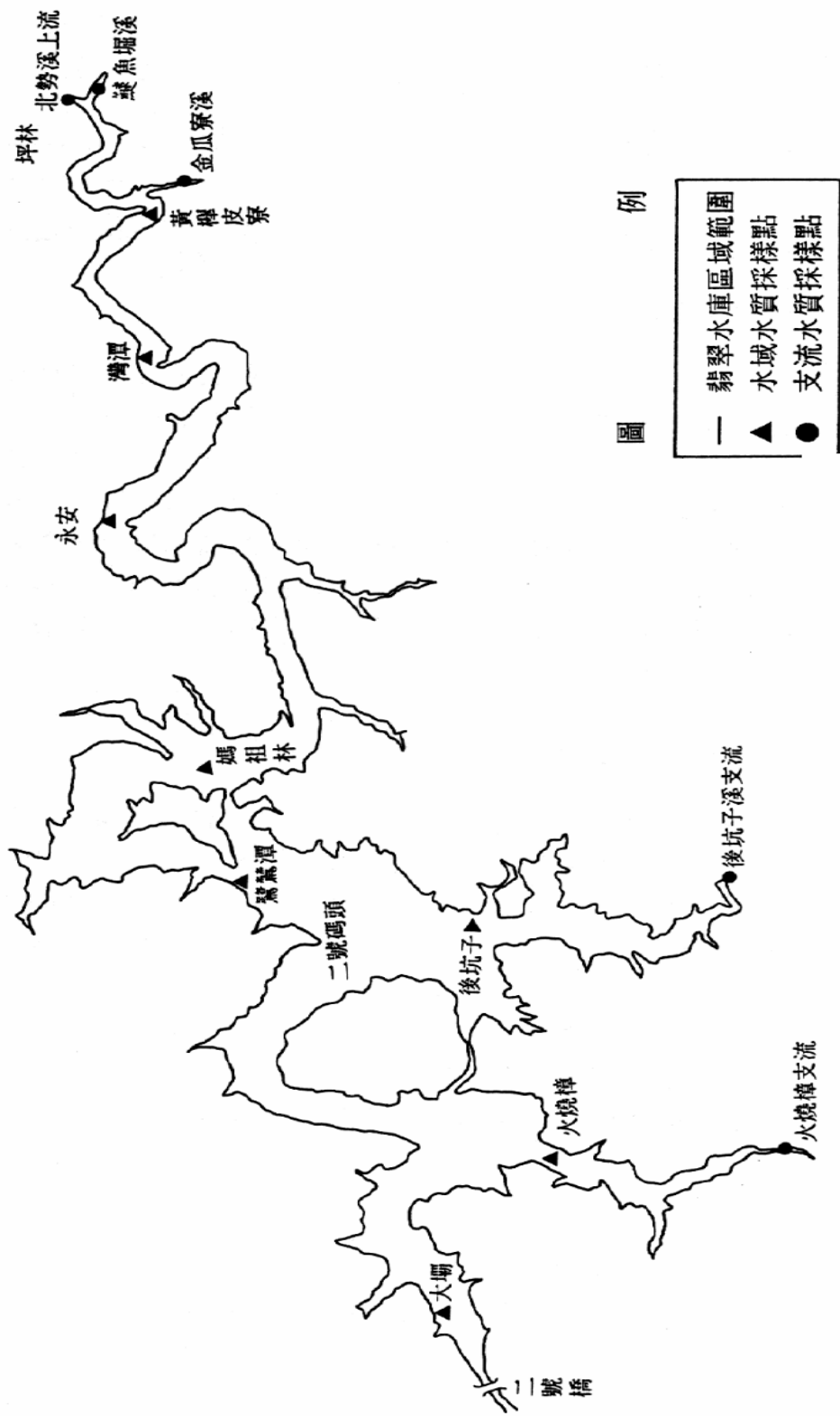


圖 例

—	翡翠水庫區域範圍
▲	水域水質採樣點
●	支流水質採樣點

圖 5 翡翠水庫水質採樣點位置圖

因為數值模式首先必須進行網格的切割，為了方便網格切割，利用 GIS 協助進行網格分割的工作。圖 6 為包含翡翠水庫集水區、大壩與支流之 GIS 圖層。

圖 7 為翡翠水庫淹沒區淹沒區域分割圖，各小格為 300 公尺見方的網格。由上游到下游為 42 格；由左岸到右岸最寬處為 22 格。以 2m 作為水深分隔的限制，在 Z 方向每 2 公尺一格。因此整個翡翠水庫約由 10,000 個 300m×300m×2m 的網格所構成。

圖 8 為各網格的頂點部分，這些點包含 x、y、z 三個方向的座標，用來作為模式輸入用的。x、y 座標是利用二度分帶的 GIS 座標。而 Z 方向這部分是利用數值高程(DTM)與翡翠水庫淤積報告進行修正。

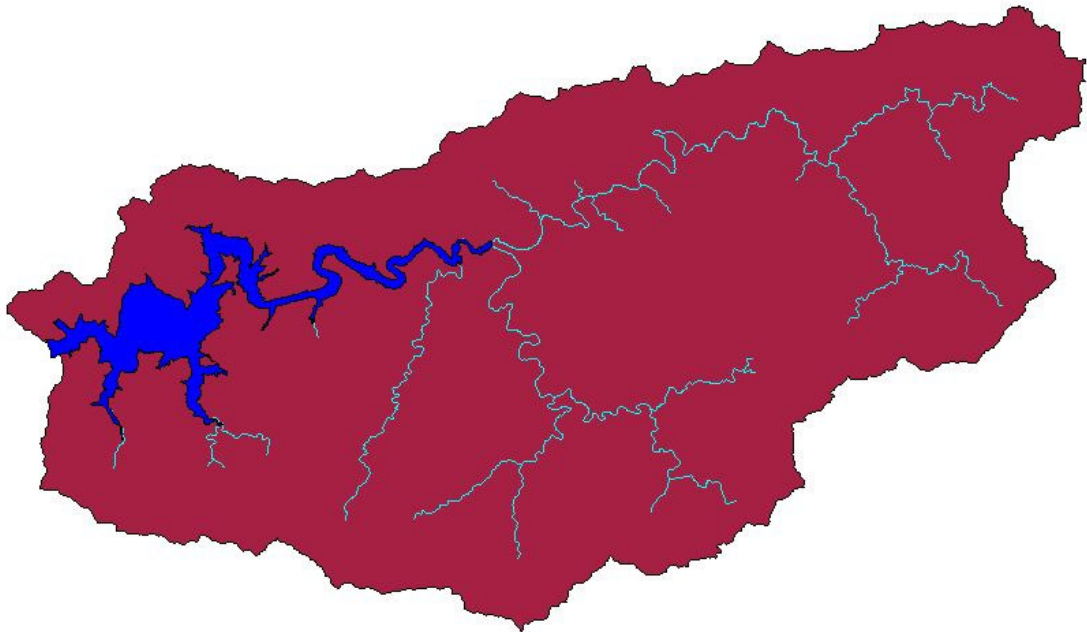


圖 6 翡翠水庫 GIS 圖層

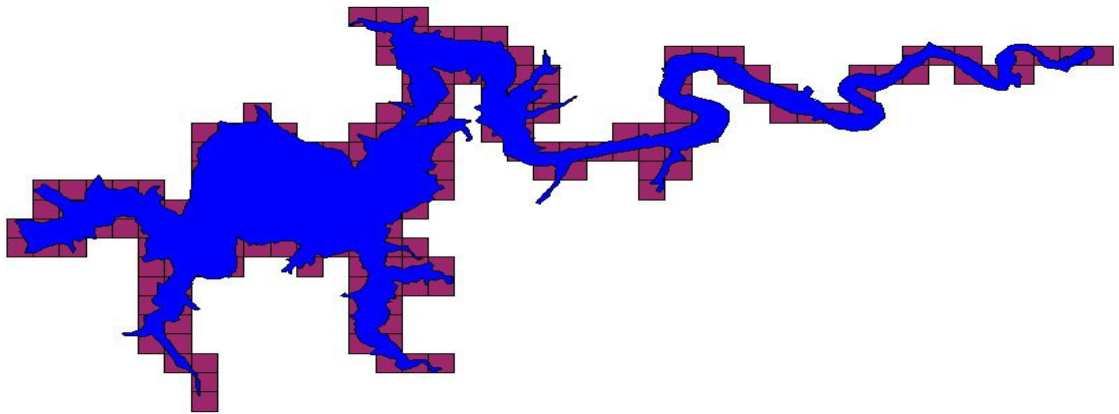


圖 7 翡翠水庫網格與水庫淹沒區域對照圖

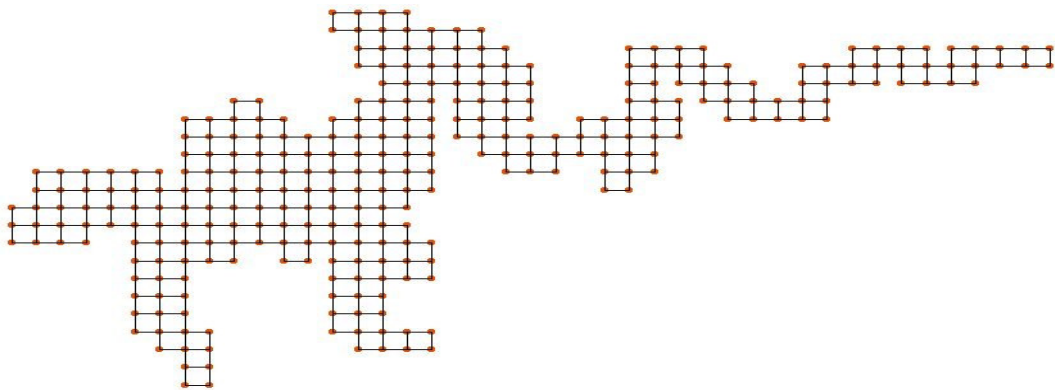


圖 8 翡翠水庫格點相關圖

六、 目前進度與未來方向

目前以大致上完成所需方程組的建立與水位變動的測試。有關相對應的邊界條件的檢定與資料收集正在進行。此外，因為台灣地區的乾濕季明顯，所以必須採用可進行乾濕網格計算，因此，在水位變動時，河川相對於水庫的入流位置也會改變，如何確認入流位置也是今

後的問題。

模式所需資料(如入流量、出流量及水質資料)將向翡翠水庫管理局索取。並利用水理實測資料(如水溫、懸浮固體等)與水質資料(如氮、磷、葉綠素 a、溶氧等)進行模式的驗證。等到模式整理完成，便可利用此水理水質模式模擬翡翠水庫的變化情形，進一步提供放流時間，放流頻率等之方案，以改善水庫中之水質。

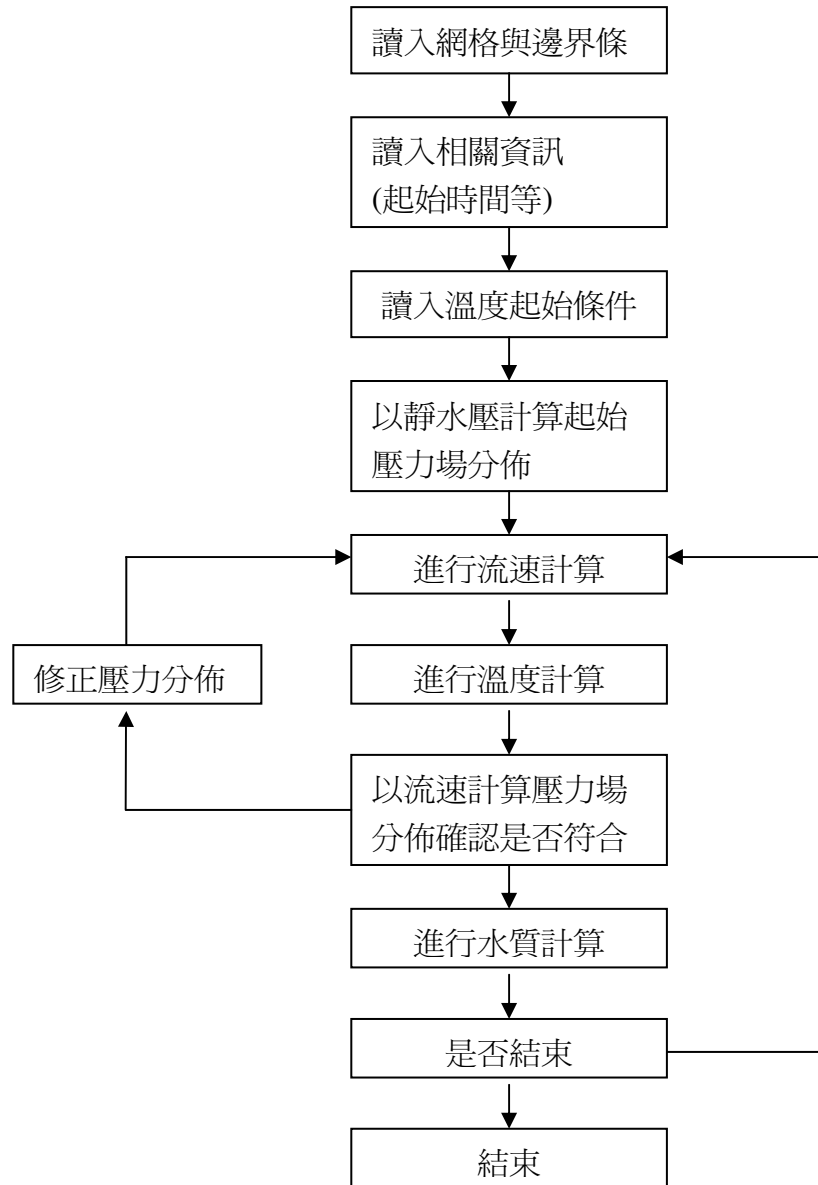


圖 9 計算流程圖

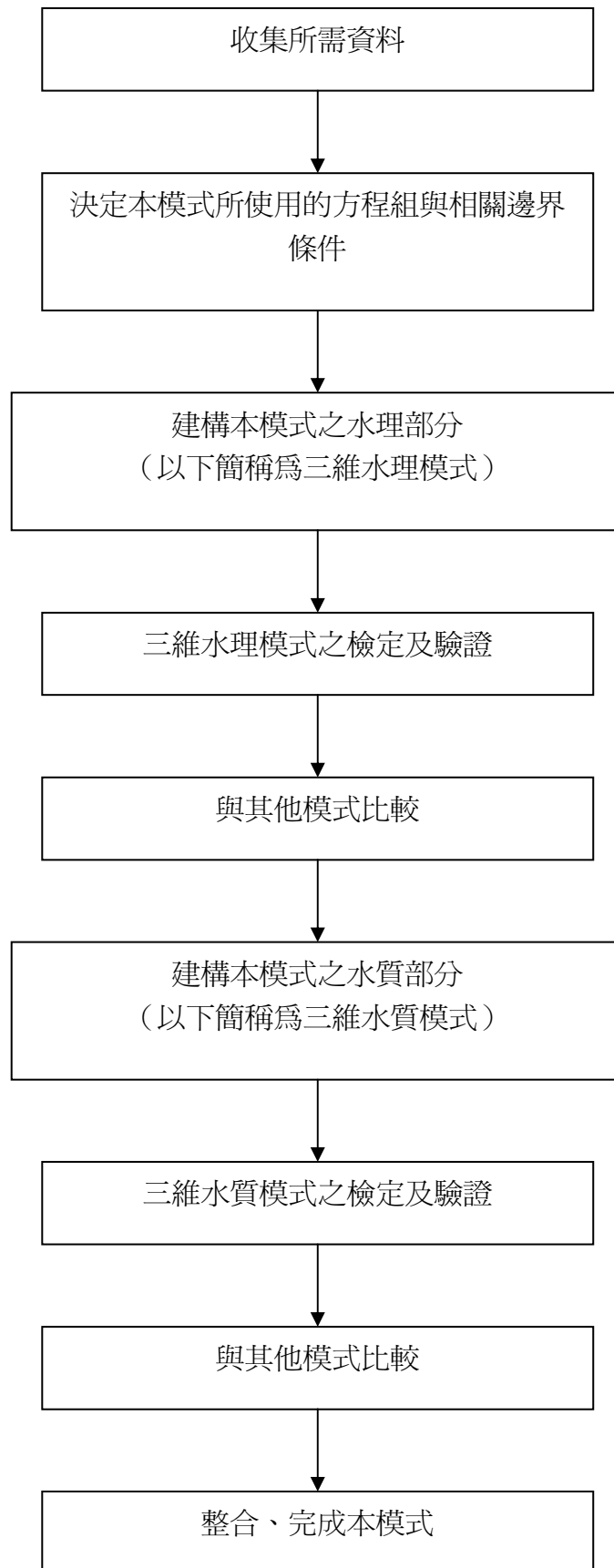


圖 10 研究流程圖

參考文獻

1. Simons, T. J., 1973: Development of three-dimensional numerical models of the Great Lakes. Canada Centre for Inland Waters, *Scientific Series 12*, 26 pp.
2. Oey, L.-Y., Mellor, G. L., and Hires, R. I. (1985). "A three dimensional simulation of the Hudson-Raritan Estuary. Part I: Description of the model and model simulations." *J. Phys. Oceanography*, 15, 1676 - 1692.
3. A. F. Blumberg, and G. L. Mellor, 1987: A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. *Three-dimensional coastal ocean models*, Editor: N. S. Heaps, American Geophysical Union, 1-16.
4. Nihoul, J. C. J., and B. M. Jamart, Editors, 1987: *Three-dimensional models of marine and estuarine dynamics*, Elsevier, 629 pp.
5. Galperin, B. and G.L. Mellor, "A Time-Dependent, Three-Dimensional Model of the Delaware Bay and River System," *Estuarine, Coastal Shelf Sci.*, 31, 231-281, 1990a.
6. Johnson, B. H., Kim, K. W., Heath, R. E., Hsieh, B. B., and Butler, H. L. (1993). "Validation of three-dimensional hydrodynamic model of Chesapeake Bay." *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, 119(1), 2 - 20. [CEDB] Shrestha, P.L., A.F. Blumberg, D.M. Di
7. Ouillon, S., and Dartus, D. (1997). "Three-dimensional computation of flow around Groyne." *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, 123(11), 962 - 70. [CEDB]
8. Sinha, S. K., Sotiropoulos, F., and Odgaard, J. (1998). "Three-dimensional numerical model for flow through natural rivers." *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, 124(1), 13 - 23. [CEDB]
9. Toro and F. Hellweger , 2000. A three-dimensional model for cohesive sediment transport in shallow bays, Invited Paper, *ASCE Joint Conference on Water Resources Engineering and Water Resources Planning and Management*, July 30-august 2, 2000, Minneapolis, MN.
10. Reckhow, K. H. and S. C. Chapra, *Engineering Approaches for Lake Management, Vol.1: Data Analysis and Empirical Modeling*, Butterworth Publishers, Woburn, MA., 1983.
11. Chapra, S. C. and K. H. Reckhow, *Engineering Approaches for Lake Management, Vol.2 : Mechanistic Modeling*, Butterworth Publishers, Woburn, MA., 1983.
12. Chen, C. W., "Concepts and Utilities of Ecologic Model," *J. Sanitary Eng. Div.*, ASCE, pp.1085-1097, Oct., 1970.
13. Di Toro, D. M., D. J. O' Connor and R. V. Thomann, "A Dynamic Model of the Phytoplankton Population in the Sacramento-San Jaquin Delta," *Adv. in Chemistry Series, No. 106*, Amer. Chem. Soc., pp.131-180, 1971.

14. Kuo, J. T. and R. V. Thomann, "Phytoplankton Modeling in the Embayments of Lakes", *Journal of Environmental Engineering, ASCE*, Vol. 109, No.6, 1983, pp.1311-1332.
15. Steel, J. H., Primary Production in Aquatic Environments, "Notes on Some Theoretical Problem in Production Ecology", C.R. Goldmen (ed.), *Mem. Inst. Idrobiol.*, pp.383-398, 18 suppl., Univ. of California Press. Berkeley, California, 1965.
16. Markofsky, M. and D. R. P. Harlemln, "Prediction of Water Quality in a Stratified Reservoir", *J. Hydr. Div., ASCE*, May, 1973.
17. Chapra, S.C., "Total Phosphorous Model for Great Lakes", *J. Envir. Eng. Div., ASCE*, Vol. 103, April 1977.
18. Larsen, D. P., J. V. Sickle, K.W. Malueng, and P.D. Smith, "The Effect of Wastewater Phosphorous Removal on Shagawa Lake, Minnesoda : Phosphorous Supplies, Lake Phosphrous and Chlorophyll-a", *Water Research*, Vol. 13, May, 1979.
19. Orlob, G. T., *Model for Stratified Impoundment*, Chap.8, in *Models for Water Quality Management*, A.K. Biswas (ed) McGraw-Hill Bock Company, Inc. New Youk, 1981.
20. 郭振泰、楊德良、何政儒，德基水庫水質模擬與探討，第一年研究報告，水資會/臺大土木工程研究所，民國 73 年 12 月。
21. 郭振泰、楊德良、何政儒，德基水庫水質模擬與探討，第二年研究報告，水資會/臺大土木工程研究所，民國 74 年 12 月。
22. 郭振泰、楊德良、何政儒，德基水庫水質模擬與探討，第三年研究報告，水資會/臺大土木工程研究所，民國 76 年。
23. 吳建鋹，德基水庫二維水理與水質模式之模擬，國立台灣大學土木工程研究所碩士論文，民國 76 年。
24. Kuo, J. T., J. H. Wu, and W. S. Chu, "Water Quality Simulation of Te-chi Reservoir Using Two-Dimensional Models", *Water Science and Technology*, Vol. 30, No.2, pp.63-72, 1994.
25. 郭振泰、龍梧生等，翡翠水庫水質模擬與應用（一），台北翡翠管理局委託，台大土木工程研究所執行，民國 87 年。
26. 郭振泰、龍梧生等，翡翠水庫水質模擬與應用（二），台北翡翠管理局委託，台大土木工程研究所執行，民國 88 年。
27. 郭振泰、龍梧生等，翡翠水庫水質模擬與應用（三），台北翡翠管理局委託，台大土木工程研究所執行，民國 89 年。
28. 郭振泰等，鳳山水庫優養之探討與模擬(一)、(二)，共二年，省環保處及環保署委託，臺大土木工程研究所執行，民國 78 年 4 月、11 月。