

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

都市雨水下水道即時控制系統之研究

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC92-2211-E-002-044-

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：謝尚賢

共同主持人：郭振泰

計畫參與人員：林旭信、汪立本、廖英博

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 93 年 11 月 1 日

(一) 中文摘要

都市下水道系統乃是現代化都市基礎建設之一環。下水道系統可分為合流式與分流式等不同形式，合流式下水道系統乃是將污水與雨水以單一管路排除，分流式下水道系統則將污水與雨水分別由不同之管路排除。有研究指出，異常暴雨發生時下水道系統之效能常未能充分發揮，所以容易造成都市內水積淹。因此，一些先進國家對於都市下水道系統乃開始採即時控制(real time control)方式，以期在暴雨來襲時使得下水道系統之效能得以充分發揮。

本研究以台北市第一分區六館抽水站系統為研究案例，評估都市雨水下水道實施即時控制的效能。為了達到雨水下水道即時控制之模擬，本研究應用多執行緒技術(multi-thread technology)將美國環保署所發展的暴雨管理模式(Storm Water Management Model, 簡稱 SWMM)與 GALib 的基因演算法模式整合在一起，進行即時控制之模擬。模擬結果顯示，於研究案例區實施即時控制確實能使抽水站下游人孔的溢流歷線有降低的趨勢，同時使得人孔水位保持在滿水位的狀態。

關鍵字：都市下水道系統、即時控制、SWMM、基因演算法

(二) 英文摘要

Urban drainage systems are the most fundamental facilities in modern developed cities. There are two types of sewer systems in urban drainage systems: combined and separated. The waste water and the runoff caused by rain are drained in a single tunnel or pipe in the combined sewer systems; while the separated sewer systems use two separate systems of tunnels or pipes to drain waste water and runoff respectively. It has been indicated by many researchers that the performance of the sewer systems often can not reach its designed capacity when rainfall with larger return periods occurs. In the developed nations, real time control sewer systems are therefore applied to make the sewer systems more efficient for inundation caused by heavy rainfalls.

This research uses the Liu-Kang drainage system of the 1st drainage area of Taipei City in the case study to demonstrate the effectiveness of applying real-time control (RTC) in Taiwan's urban drainage systems. For the purpose of RTC simulation, the multi-thread technology is employed to integrate the Storm Water Management Model (SWMM), developed by US EPA, and a genetic algorithm library, called GALib, to simulate RTC in the Liu-Kang system. The simulated results show that the overflow hydrograph with reductive tendency at manhole near the pumping station under RTC and the water depth is kept at nearly to maximum.

Keywords: urban drainage systems; real-time control; SWMM; genetic algorithms

(三) 報告內容

3.1 前言與研究目的

都市下水道系統為現代化都市發展重要基礎建設之一環。英國倫敦是最早建造近代化下水道系統的都市，陸陸續續歐洲各國也紛紛跟進，重要的城市也規劃興建都市下水道系統。早期下水道系統乃為合流式(combined system)，亦即污水與雨水一起流入下水道系統再加以排除，爾後英國倫敦爆發傳染病的流行，歐洲地區的國家遂將合流制下水道加以改進，將污水與雨水分離，分別由不同的系統加以排除，此即為分流式(separated system)的下水道系統。所以目前歐洲地區主要為合流式與分流式聯合運用，平時為分流制，污水與雨水分別由不同的系統處理。當暴雨來臨時無法排除之雨水，則將其導入污水管路形成 CSO(combined sewer overflow)直接排入河流或海洋。

台灣地區主要都市也於第二次世界大戰前建有局部的明溝排水系統，以排除雨水為主要目的。以台北市為例，台北市為配合民生社區之開發，於 1970 年完成分流式下水道系統，即污水與雨水分別由不同的管渠排除。近來由於都市化造成人口過度集中於都市，土地利用的情形大幅度地改變。一般而言，人口成長、道路面積、住宅開發之擴大、森林與農地之減少以及土地利用等地文因子之改變，均會造成集水區入滲量減少，逕流係數增加，導致逕流量增大。加上地球暖化，全球氣溫上升，海面溫度亦隨之提高，平均海水面亦逐年升高。海面溫度高，形成颱風之機率亦相對地增加，此等颱風皆夾帶大量的水汽，造成強度極高之降雨。此外，部分地區因土地開發而改變原來設計之排水系統，加上氣候條件的變遷與都市化導致環境的改變，抽水站當機或超過抽水站之設計容量，遇到颱風期間暴雨來襲，都市內水積淹的情況極易發生。

由於這種種的因素使得原先設計之都市下水道系統，當暴雨來襲時可能無法順利將暴雨排除造成淹水，造成居民的財產損失。然而有研究指出：當異常暴雨事件發生時，下水道系統的效能通常並未充分發揮(Linaza *et al.*, 2002)。因此為了能更有效的利用下水道的效能，本研究的主要目的為研發一都市雨水下水道即時控制系統(real time control system)，模擬下水道系統設置控制裝置進行即時控制操作，評估雨水下水道實施即時控制的效益，藉以提升雨水下水道系統的效能。並以實際台北市雨水下水道系統第一分區六館抽水站系統為研究案例，探討研究案例區域實施即時控制的效益。

3.2 文獻探討

由於國外下水道系統完成之時間很早，因此對於下水道即時控制之相關研究不少。早期研究包括將研究區域加以理想化或簡化，並假設系統的輸出輸入為線性關係，如 Neugebauer *et al.* (1991)以數學模型簡化下水道即時控制系統，將此即時控制問題轉成一最佳化問題，且由於此控制系統的目標函數為線性，故可以線性規劃法求解此一簡化之系統。Nelen(1993)假想一個理想的網路系統，分析降雨量的時間序列，來模擬降雨事件作用於此假想之網路系統，以出流體積作為控制變數控制與操作此一網路系統，將 RTC 應用於此網路系統其所降低之溢流體積，與以蓄水池儲存等量之溢流體積相比較，從該研究可以瞭解到即時控制應用的潛能。Weyand(1993)則提出了一個簡單的操作策略來控制水流與蓄水體積，並與德國 Ense-Bremen 地區，減低 CSO 連續四年的操作策略做一比較。模式計算的結果與實際控制策略所減低之 CSO 有不同的結果，而其研究指出此等差異主要是因為實際操作上的限制。

有關求解下水道即時控制系統的即時操作策略研究方面，有不少研究者嘗試使用基因演算法(genetic algorithm, GA)與類神經網路(artificial neural network, ANN)等人工

智慧(artificial intelligence, AI)方法, 配合模式模擬工具, 進行即時控制, 如 Hajda *et al.*(1998) 使用基因演算法和類神經網路做為下水道即時控制之工具。該研究主要是以馬斯金更法(Muskingum method)作為模式模擬工具, 控制器選用混合 DLD(delay-loop diversion)控制演算法, 並以基因演算法找出一適當之控制策略, 將多次以 GA 所得到之控制策略利用類神經網路建立系統的輸入與控制策略之關係。經研究發現若改以此模式取代現存之即時控制模式可以降低抽水量達 50-80%。不同於傳統降雨逕流模式都是以離線 (off-lines) 的方式單獨進行計算模擬。Cassar *et al.* (1999)為了達到即時控制的目的, 結合了著名的降雨逕流模式 HYSTREM/EXTRAN 和決策搜尋模式 (decision finding model) INTL, 進行即時操作。Cluck *et al.* (1999) 則提出了一個即時控制的模型, 用來控制逕流與都市排水系統交互影響的問題。此模型包含即時流量預測、一套驗證模式參數的演算法、與系統輸出有關的下水道操作策略和轉換函數, 此轉換函數是一個概念式參數化的轉換函數(conceptually parameterized transfer function, CPTF), 主要的作用為描述系統的輸入與輸出之關係。Parker *et al.* (2000) 引進 SewerNet 應用程式, 該應用程式使用基因演算法作為在給定限制條件下, 下水道設計與復原最佳化的分析工具。SewerNet 為一物件導向(object-oriented)的 framework, 包含了 OpenNet network 模式、基因演算法函式庫、水力模式模組。Linaza *et al.* (2002) 提出一全域管理工具整合下水道水力與生物模式。Schütze *et al.* (2002) 使用模擬工具 (SYNOPSIS) 提出了評估都市污水系統執行 RTC 的潛能的法則。Rauch *et al.* (1999) 藉由基因演算法應用在非線性模式預測控制 (nonlinear model predictive control) 分析一些假設性的問題, 有良好的預測效果。

實際都市雨水下水道系統龐大且複雜, 不易進行即時控制之研究。一般先採用理想化或簡化之區域進行研究, 且將目標函數加以簡化為線性(Neugebauer *et al.*; Nelen) 以利求解。模擬下水道系統輸入與輸出之關係, 則採用較為簡單之方法(Hajda *et al.*), 或不同的模式(Cassar *et al.*)。然而決定控制策略的效率也將影響是否可進行即時控制, 因此近來的研究採取基因演算法決定最佳控制策略(Hajda *et al.*; Rauch *et al.*; Parker *et al.*)。

3.3 研究方法

欲進行雨水下水道即時控制之模擬系統必須包含三個模組：水理與水力模擬核心模組、最佳化模組與即時展示模組。水理與水力模組用來模擬雨水下水道系統在暴雨來襲時管路流量、人孔溢流量與水深等動態特性，最佳化模組則在需要控制時，將目前的雨水下水道的狀態求解出一組最佳化操作策略以達到控制目標。控制目標函數在本研究中訂為排水區域內人孔的總溢流量為最小，並可由即時展示模組將雨水下水道的特定人孔水位與溢流量做即時展示，整個即時控制的進行可以圖 1 表示。

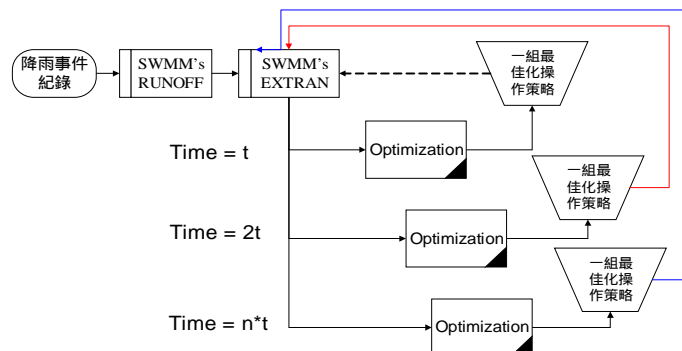


圖 1 雨水下水道即時控制模擬示意圖

本研究選用美國環保署所開發之暴雨管理模式 4.4 版(Huber *et al.*, 1988)作為水理與水力模擬之核心模組。其自從 1969-1971 年發展以來即受到廣泛的應用(Liong *et al.*, 1995; Zaghoul, 1997,1998; Park *et al.*, 1998; Zhong, 1998; Noto *et al.*, 2001; Campbell *et al.*, 2002)。SWMM 包含許多模式，本研究採用其降雨逕流模式 RUNOFF 與管線輸水模式 EXTRAN。EXTRAN 模式主要是利用顯示差分法配合修正式歐拉法(modified Euler's Method)求解一維淺水波方程式(one-dimensional shallow water equation)又稱為 de Saint Venant 方程式(Abbot, 1979; Chow *et al.*, 1988; Chaudhry, 1993)，此方程式用來描述河道或下水道的流況。SWMM 由 Fortran 77 語言撰寫而成，其原始程式可以免費取得，因此，採用 SWMM-EXTRAN 可以視研究之需要做適度的修改。

最佳化模組則選用基因演算法作為求解最佳化問題的演算法。基因演算法的基本概念(Holland, 1975; Goldberg, 1989)為「優勝劣敗，適者生存，不適者淘汰」，藉由一開始選擇的樣本解(population)進行演算，最終生存下來者即為最佳解。整個搜尋最佳解的演算流程包含：將推估的解與相關之參數表示成二進位字串(string)形式的樣本，並且將目前的樣本根據演化的法則(包括突變，交換與選擇等)決定下一個世代的樣本。演化則為決定目前何者為最適宜的推估解，以作為新一代的推估值，如此一直重複下去直到達到終止條件。基因演算法可以避免掉進局部的最佳解，適用於求解非線性目標函數之最佳解，求解速度則因不同的突變(mutation)機率和不同的基因演算法形式，有不同的收斂速度。目前已有許多 GA 套裝程式或程式庫，本研究採用 GALib(Wall, 1996)程式庫，此程式庫以 C++ 語言實作。該程式庫最大的特色即是將基因演算法與基因組加以分離，容易使用、彈性大、效能高且免費取得，目前的版本是 2.4，可以在多種平台上執行，例如：MS Windows、MacOS、UNIX 等。

為了達到即時控制的模擬，必須整合水理與水力模擬核心模組(SWMM-EXTRAN)與最佳化模組(GALib)並做即時展示。本研究使用多執行緒的技術(multithread technology)，一個執行緒執行 SWMM-EXTRAN，而另一個執行緒等待 SWMM-EXTRAN 所模擬的結果，當需要進行即時控制模擬時，便令 SWMM-EXTRAN 先暫停執行，由另一個執行緒取得 SWMM-EXTRAN 的模擬結果(排水區域內人孔溢流量等資訊)，進行最佳化演算，再將最佳化控制策略回饋給 SWMM-EXTRAN，以進行下一時刻的演算。本研究整合軟體所使用的程式語言分別為 Fortran 90(Adams *et al.*, 1997)與 C++(Stroustrup, 2000)，開發工具則選用 Compaq Visual Fortran 6.5(Etzel *et al.*, 1999)與 Borland C++ Builder 6(Holling *et al.*, 2003)。

3.4 結果與討論

研究案例區域選用台北市雨水下水道系統第一分區六館抽水站系統，如圖 2 所示。此區域人孔總數為 45 個，管線總數為 45 跟，區域內抽水站的最大抽水量為 20cms。一場三小時的暴雨首先由 SWMM 的降雨降流模組 RUNOFF 計算區域內人孔入流歷線，接著進行即時控制模擬。圖 2 中橢圓區域為控制裝置設置區，即時控制的目標在使全區人孔的溢流量為最小，決策變數為管路斷面積，GA 所使用的參數分別為：每代樣本數 30，演化 100 個世代，交配機率 0.6，突變機率 0.05。圖 3 與圖 4 分別展示人孔 8203 在有無控制下的溢流歷線與水位歷線。由圖 4 可以發現進行即時控制時人孔 8203 的溢流歷線持續震盪；圖 4 左半部顯示人孔 8203 的水位歷線，由水位歷線可以看出，人孔 8203 的水位在即時控制下也保持在滿水位的狀態，模擬結果顯示即時控制確實能有效降低人孔溢流量，並將水位保持在滿水位的狀態。

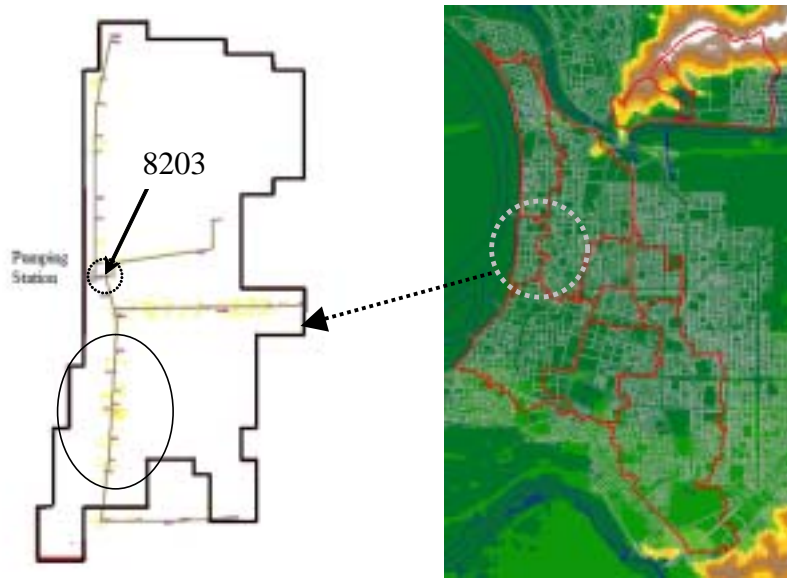


圖 2 研究案例：六館抽水站系統

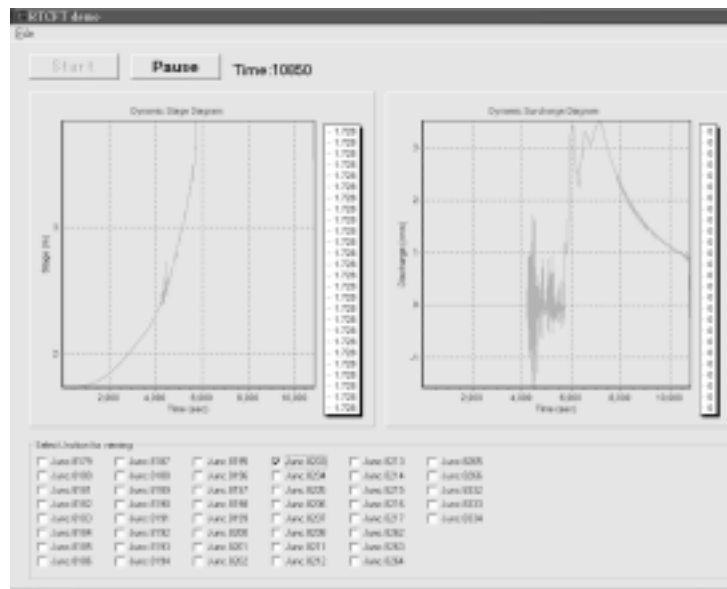


圖 3 人孔 8203 無控制的水位與溢流歷線

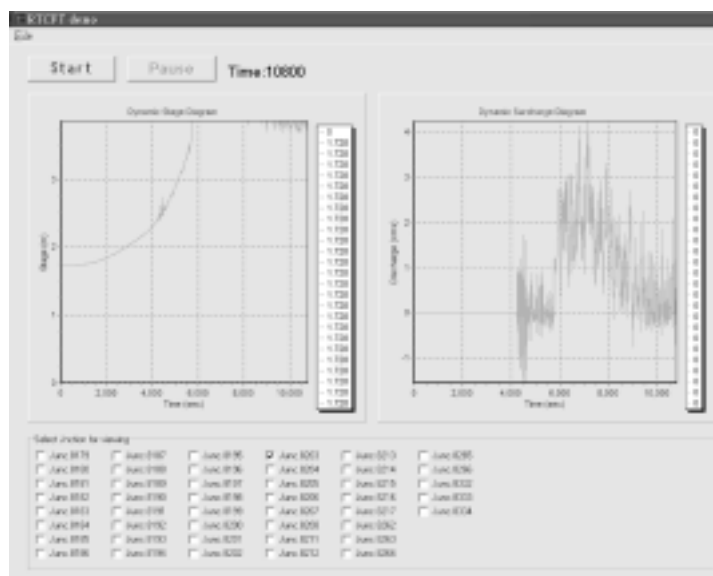


圖 4 人孔 8203 實施即時控制的水位與溢流歷線

(四) 參考文獻

- Abbot, M. B. (1979). *Computational Hydraulics. Elements of the Theory of Free Surface Flows*, Pitman Publishing, Ltd., London.
- Adams, J. C., Brainerd, W. S., Martin, J. T., Smith B. T., and Wagener, J. L. (1997). *Fortran 95 Handbook : Complete ISO/ANSI Reference*, MIT Press, U.S.A.
- Åstrom, K. J., Wittenmark, B. (1990). *Computer-Controlled Systems: Theory and Design, 2nd Edition*. Englewood Cliffs, Prentice-Hall, New Jersey, USA.
- Campbell, C. W., and Sullivan, S. M. (2002). "Simulating Time-Varying Cave Flow and Water Levels Using the Storm Water Management Model," *Engineering Geology*, Vol. 65, pp. 133-139.
- Cassar, A. and Verworn, H. R. (1999). "Modifications of Rainfall Runoff and Decision Finding Models for On-Line Simulation in Real Time Control," *Water Science and Technology*, Vol. 39, No. 9, pp. 201-207.
- Chaudhry, M. H. (1993). *Open-Channel Flow*, Prentice-Hall, New Jersey, U. S. A.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., Mays, L. W. (1988). *Applied Hydrology*, Mc Graw Hill, New York, U.S.A.
- Cluckie, I. D., Lane, A. and Yuan, J. (1999). "Modelling Large Urban Drainage System in Real Time," *Water Science and Technology*, Vol. 39, No. 4, pp.21-28.
- Duchesne, S., Mailhot, A., and Villeneuve, J. P. (2004). "Global Predictive Real-Time Control of Sewers Allowing Surcharged Flows," *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 130, No. 5, pp. 526-534.
- Etzel, M., Dickinson, K. (1999). *Digital Visual Fortran Programmer's Guide*, Digital Press, M.A., U.S.A.
- Gamma, E., Helm, R., Johnson, R. and Vlissides, J. (1995). *Design Pattern: Elements of Reusable Object-Oriented Software*, Andison-Wesley., U. S. A.
- Goldberg, D. E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Reading, Mass.: Addison-Wesley, U. S. A.
- Hajda, P., Novotny, V., Feng, X., and Yang, R. (1998). "Simple Feedback Logic, Genetic Algorithms and Artificial Neural Networks for Real-Time Control of A Collection System," *Water Science and Technology*, Vol. 38, No. 3, pp. 187-195.
- Holland, J. (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Ann Arbor: University of Michigan Press
- Holling, J., Swart, B., Cashman, M., and Gustavson, P. (2003). *Borland C++ Builder 6 Developer's Guide*, Sams, U.S.A.
- Huber, W. C. and Dickinson, R. E., *Storm Water Management Model. User's Manual Ver. IV* (1988). U. S. Environmental Protection Agency.
- Li, J., and McCorquodale, A. (1999). "Modeling Mixed Flow in Storm Sewers," *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 125, No. 11, pp.1170-1180.
- Linaza, M. T., Salterain, A., and Ayesa, E. (2002). "Real Time Control Modules for Sewer Simulations," *Water Intelligence Online* (<http://www.iwapublishing.com/>).
- Liong, S. Y., Chan, W. T., and ShreeRam, J. (1995). "Peak-Flow Forecasting with Genetic Algorithm and SWMM," *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 121, No. 4, pp.613-617.

- Nelen, F. (1993), "On The Potential of Real Time Control of Urban Drainage Systems," *Water Science and Technology*, Vol. 27, No. 5-6, pp. 111-122.
- Neugebauer, K., Schilling, W., and Weiss, J. (1991). "A Network Algorithm for the Optimum Operation of Urban Drainage Systems," *Water Science and Technology*, Vol. 24, No. 6, pp. 209-216.
- Noto, L., and Tucciarelli, T. (2001). "DORA Algorithm for Network Flow Models with Improved Stability and Convergence Properties," *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 127, No. 5, pp. 380-391.
- Park, H., and Johnson, T. J. (1998). "Hydrodynamic Modeling in Solving Combined Sewer Problems: A Case Study," *Water Research*, Vol. 32, No. 6, pp.1948-1956.
- Parker, M. A., Savic, D. A., Walters, G. A., and Kappelan, Z. (2000). "SewerNet: A Genetic Algorithm Application for Optimizing Urban Drainage Systems," *Proceedings of the 1st International Conference on Urban Drainage in Internet*.
- Rauch, W. and Harremoës, P. (1999). "Genetic Algorithms in Real Time Control Applied to Minimize Transient Pollution from Urban Wastewater Systems," *Water Research*, Vol. 33, No. 5, pp. 1265-1277.
- Schütze, M., Butler, D., Beck, M. B., and Verworn, H. R. (2002). "Criteria for assessment of the Operational Potential of the Urban Wastewater System," *Water Science and Technology*, Vol. 45, No. 3, pp. 141-148.
- Stroustrup, B. (2000). *The C++ Programming Language special ed.*, Addison-Wesley, Massachusetts, U.S.A.
- Tanenbaum, A. S. (2001). *Modern Operating System 2/e*, Prentice-Hall, NJ, U.S.A.
- Weyand, M. (1993). "Real Time Control Within A Combined Sewer System : Comparison of Practical and Theoretical Results," *Water Science and Technology*, Vol. 27, No. 5-6, pp. 123-132.
- Wall, M. (1996). <http://lancet.mit.edu/ga/>.
- Zaghloul, N. A. (1997). "Unsteady Gradually Varied Flow in Circular Pipes with Variable Roughness," *Advances in Engineering Software*, Vol. 28, pp.115-131.
- Zhong, J. (1998). "General Hydrodynamic Model for Sewer/Channel Network Systems," *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 124, No. 3, pp.307-315.
- 台北市政府工務局養護工程處,「台北市排水系統調查檢討及資料建檔(第一分區:文山區、內湖區、南港區、信義區、松山區、中山區)」, 2002年6月。
- 台北市政府工務局養護工程處,「台北市排水系統調查檢討及資料建檔(第四分區:中正區、中山區、大同區、萬華區、大安區、士林區)」, 2002年8月。
- 台北市政府工務局養護工程處,「台北市排水系統檢討規劃-後續工作(士林、北投區)」, 2003年2月。

(五) 計畫成果自評

本計畫的研究成果已寫成兩篇國際會議論文、一篇 EI 的論文即將出版, 與一篇 SCI 論文已投稿, 目前正在審查中。

國際會議論文:

1. Lin, S.-S., Chang, H.-K., Hsieh, S.-H., Kuo, J.-T., Lai, J.-S., "An Integrated Approach for Inundation Simulation in an Urban Area," International Conference of GIS and Remote

Sensing in Hydrology, Water Resources and Environment, Three Gorges Dam Site, China, September 16-19, 2003 (p143, 7 pages, CD-ROM).

- Lin, S.-S., Hsieh, S.-H., Kuo, J.-T., Chen, Y.-C., and Liao, Y.-P., "Integrating SWMM with Optimization Module for Feasibility of Real Time Control in Urban Drainage Systems," *Proceedings of the 6th International Conference on Hydroinformatics*, Vol. 2, pp. 1899-1906, Singapore, June 21-24, 2004

EI 論文：

Lin, S.-S., Chang, H.-K., Hsieh, S.-H., Kuo, J.-T., Lai, J.-S., "An Integrated Approach for Inundation Simulation in an Urban Area," *IAHS Red Book*, accepted for publication.

已投稿 SCI 論文：

Lin, S.-S., Hsieh, S.-H., Kuo, J.-T., Liao, Y.-P., and Chen, Y.-C., "Integrating Legacy Components into a Software System for Storm Sewer Simulation," *Environmental Modeling and Software*, submitted for publication.

由於目前國內關於都市雨水下水道實施即時控制的相關研究非常少見，雖然國外，尤其是歐洲地區的國家，在過去 20 年間很多學者致力於都市下水道系統即時控制的相關研究，同時也有很多研究成果發表在期刊中。這些相關的科研成果涵蓋了計算水力學、最佳化控制理論、軟體技術與決策支援系統等方面。然而，國內的雨水下水道系統與歐洲國家的下水道系統不一樣，且水文條件也不相同，整個即時控制的目標也和歐洲國家不同。本研究的成果已發表在國際會議論文與 EI 期刊論文，並已投稿 SCI 論文，這些研發成果涵蓋了計算水力學與資訊整合技術，對於日後國內這些方面的研究，應具有參考價值，同時對於雨水下水道即時控制的相關研究，也應有所貢獻。