

表 3 長期入流量預報系統與以歷年平均值為預報值之預報結果比較

預報旬	全部 預報點數	圖 9 統計結果		圖 10 統計結果	
		長期入流量預報系 統較佳之點數 (利用預報資料)	歷年平均值為預報 值較佳之點數	長期入流量預報系 統較佳之點數 (利用實測資料)	歷年平均值為預報 值較佳之點數
第一旬	94	65(69%)	29(31%)	68(72%)	26(28%)
第二旬	94	60(64%)	34(36%)	62(66%)	32(34%)
第三旬	94	62(66%)	32(34%)	71(76%)	23(24%)

氣象局月長期天氣展望之預報結果，建構水庫長期入流量預報系統，分別進行未來三旬之入流量預報，以提供水庫管理單位進行操作管理之參考。本文提出長期入流量預報系統係結合水文學與大氣科學兩大領域之分析工具，期以此方式之結合延長逕流量預報前置時間與提高預報精度。

本文採用之連續型降雨-逕流模式原以日為模擬時間單位，為配合水庫操作，嘗試改以旬為模擬時間單位來進行模式之率定與驗證。分析結果顯示：本文採用之連續型降雨-逕流模式對於以旬為時間單位具有一定程度之流量模擬精度，且由長期入流量預報系統預報水庫入流量之能力亦較直接採歷年旬流量平均值為預報值佳。

由於整個長期入流量預報系統之預報過程中仍有部份旬別產生相當之誤差量，此部分誤差同時包含了天氣預報及水文模式模擬之誤差，未來仍需進一步探討如何降低氣象預報與水文模式模擬之不確定性，以提升逕流量預報之精度。

誌 謝

本研究承蒙農委會農業科技研究計畫九一農科—一·三·三—林—R—之經費補助及中央氣象局之長期天氣展望電子版資料於此敬表由衷感激。另外亦對中央氣象局盧孟明博士提供寶貴意見，致上萬分的謝意。

參考文獻

Bergström, S., 1976, "Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments," Report RHO 7, Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Norrköping, Sweden.
Duan, Q., S. Sorooshian, and V. K. Gupta, 1992,

"Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models", *Water Resources Research*, 28(4), pp1015-1031.
Duan, Q., V. K. Gupta, and S. Sorooshian, 1993, "A shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization", *J. Optimization Theory Appl.*, 76(3), pp501-521.
Duan, Q., S. Sorooshian, and V. K. Gupta, 1994, "Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models", *J. of Hydrology*, 158, pp265-284.
Hamon, W. R., 1961, "Estimating potential evapotranspiration", *Journal of Hydraulics Division*, 87(3), pp107-120.
Irvine, K.N. and A.J. Eberhardt, 1992, "Multiplicative, Season ARIMA models for lake Erie and lake Ontario water levels", *Water Resources Bulletin*, Vol. 28, No2, pp 385.
Mimikou, M. and Rao, A. R., 1983, "Regional Monthly Rainfall-Runoff Model", *J. Wat. Resour. Plan. Manag. ASCE* 109(1), pp. 75-93.
Singh, V.P., 1995, "Computer models of watershed hydrology", *Water Resources Publications*, Highlands Ranch, Colorado, U.S.A.
Smith J. A., 1991, "Long-range streamflow forecasting using non-parametric regression", *Water Resources Bulletin*, Vol. 27, No 1, pp 39.
楊道昌、游保杉, 1997, 「目標函數對連續型降雨-逕流模式率定之影響」, 台灣水利季刊, 第四十五卷, 第四期, 第 66-73 頁。
楊道昌, 1999, 「區域連續型降雨-逕流模式之研究」, 國立成功大學水利及海洋工程研究所, 博士論文。

收稿日期：民國 92 年 1 月 8 日
修正日期：民國 92 年 3 月 12 日
接受日期：民國 92 年 3 月 17 日

大甲溪下游蓄水池容量設計與風險分析之研究

Study on Capacity Design and Risk Analysis of the Storage Pond in the Downstream of TaChia Creek

國立台灣大學生物
環境系統工程學系
副教授

童慶斌
Ching-Pin Tung

國立台灣大學生物
環境系統工程學系
研究生

陳韻如
Yun-Ru Chen

中國技術學院
土木工程系
教授

陳主惠
Chu-Hui Chen

國立台灣大學生物
環境系統工程學系
教授

譚義績
Yih-Chi Tan

摘要

台灣許多農田灌溉多是引用川流式的灌溉方式，但因河川的水量不穩定，且經常在大雨過後取水口遭沖刷而崩塌，使得取水口無法順利取得河川水量供應農田所需，造成缺水之問題，農田用水不足可興建小型的蓄水池供應以降低衝擊。本研究分析大甲溪下游虎眼圳的農業用水情形，並根據過去的計畫灌溉需水量、實際引水量與故障發生的時間評估蓄水池之容量。以滿足不同供水之機率分佈，決定不同信賴度下所需之蓄水池容量。並以模擬方式擬定最佳的操作規則與最佳蓄水池體積。研究分析結果得知新闢一取水口並興建 84 萬噸之調蓄水池為較佳之方案。因 921 大地震後，石岡壩損壞喪失調蓄功能，對下游取水口損壞次數可能造成影響，故本研究藉由模擬大甲溪水資源系統利用情形，評估石岡壩的破壞對下游農業用水取水的影響，結果顯示下游農業取水口遭破壞的機會將可能增加約 25%。

關鍵詞：容量設計，風險評估。

ABSTRACT

Many farmlands withdraw irrigation water from the stream directly in Taiwan. Available irrigation water is not stable due to the high variation of streamflows and the intakes usually damaged after heavy rain, by which may cause water shortage. Water deficits can be mitigated by building storage ponds. This study analyzed the water uses of the Hu-Yan canal located in the downstream of the TaChia creek. Furthermore, the capacity of a storage pond was designed for the canal, based on irrigation requirements, actual record of applying irrigation water, the timing and duration of malfunction of

intakes. The capacity was determined to satisfy certain reliability. Operation rules were also optimized based on a simulation study. The results suggest building a storage pond with the capacity of 840,000 m³ and a new intake. The storage function of the Shi Kan Dam is badly forfeited after the 921 earthquake. It is possibility of the damage to the downstream agriculture field's water-gate is up to 25% through stimulating the usages of Ta Chia Creek water system.

Keywords: Capacity design, Risk analysis.

一、前言

大甲溪為中部地區水力資源最豐富之河川，主要功能除了沿線水力發電外亦提供民生與灌溉用水。台中水利會轄區的灌溉型態都是引河川水之型態，主要灌溉水源為大安溪、大甲溪等，虎眼一圳、二圳則是引大甲溪之水，以供應大安工作站灌溉區域之用水，但近年來大甲溪遭受盜採砂石情形嚴重，導致河道沖刷，且虎眼一圳與二圳為了使河川水能藉由重力順利引進渠道中，採用築高土堤方式作為臨時性之攔河設施以提高水位，這些臨時性攔河堰常因上游放水而崩塌，致使原有渠首工屢遭損壞，造成取水不易，無法按時因應農民灌溉需水量，使農作物無足夠水分滋潤，而影響產量。且在 921 大地震之後，台中地區之民生用水，因石岡壩之損毀而經常發生短缺的情形。近年來由於經濟快速發展及人口增加，導致用水需求逐年增加，若以興建大型水庫解決農業與民生用水不足之問題，其所需耗費的人力、資源、時間與成本都相當龐大。因此興建小型的蓄水池以取代大型水庫供應民生與農田用水，將是另一種減低缺水可考慮的方案。

為解決臨時攔河堰修復期間無水可供應之問題，台中水利會規劃基於不需要徵收土地之問題情況下，於虎眼一圳附近之浮覆地，設置一調蓄水池，以供應虎眼一圳、二圳下游各灌區缺水時之水量，但於浮覆地設置調蓄水池之安全性與可行性，目前尚未進一步分析，其運轉尚須進一步分析其洪水、淤積等問題。本研究著重於若有足夠之土地可設置調蓄水池，最佳之調蓄水池容

量及操作方式。藉由評估大甲溪水資源運用情形，設計適當大小之蓄水池，攔蓄大甲溪平時流入大海的水量，調蓄水池除了提供修復期間之需水量外，亦提供平時引水量不足之情況下之灌溉需水量，與民生用水需求。

本研究以進水口引水量、灌溉需水量與取水工修復天數等相關資料，推估在承受不同風險下調蓄水池之設計容量。進而藉由模擬演算大甲溪水資源系統的利用情況，以獲得大甲溪下游石岡壩的放水量，作為評估調蓄水池是否能引進穩定且足夠的水源的依據。研究中並根據設計的調蓄水池容量訂定調蓄水池之操作規則，以模擬調蓄水池的放水量，評定操作規則之優劣，是依據缺水指數的大小作為評斷標準。此外，本研究亦評估調蓄水池在供應給虎眼一、二圳的農業用水外，評估將多餘的水量供應民生用水之可行性，未來可於石岡壩上游以交換用水之方式，將多餘的水量以原水的方式提供給民生用水使用，其技術與經濟上之相關問題，目前尚未進一步探討。

二、研究試區

大甲溪自上游至下游一路有許多水利設施包括一系列的水壩、電廠、發電水路農業引水設施及自來水引水設施等。其中大甲溪上游至下游之重要水利設施如下所述，而各水利設施在大甲溪相關位置，如圖 1。

- (1)德基水庫及電廠：為一多目標水庫，具有發電、灌溉及公共給水等功能。
- (2)青山電廠由青山壩引水發電。
- (3)谷關電廠由谷關壩引水發電。
- (4)天輪、新天輪由天輪壩引水發電。

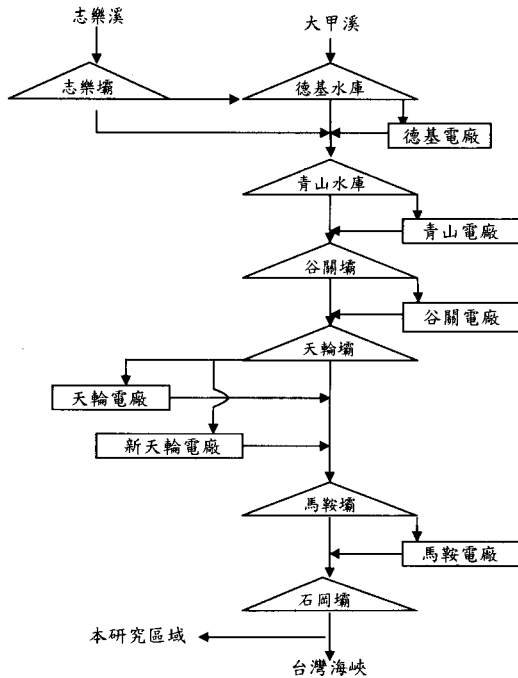


圖 1 大甲溪水庫與電廠之系統圖

(5)馬鞍電廠由馬鞍壩引水發電。

(6)石岡壩：為於大甲溪下游，主要攔蓄上游發電廠之尾水，以供應台中縣市之灌溉用水與公共給水，但在 921 地震後，喪失調蓄水量之功能。

大甲溪上游德基水庫至天輪後池間各水力電廠為發電系統中主要可靠尖峰電力來源，集中時間發電放水，每日連續放水 6 小時，造成尖峰與離峰時段之流量差距甚大，位於下游之灌溉引水渠道及自來水淨水廠的取水屬 24 小時定量取水，此種上游水力發電集中時間放水，下游連續均勻取水，在過去則必需仰賴石岡壩調節大甲溪水量，適時適量放流。另外台電公司在志樂溪流設有引水設施導入德基水庫內，而志樂壩的溢洪量會在谷關壩之前流入大甲溪。

2.1 大甲溪用水情形

大甲溪在供應公共用水的設施中，主要由豐原淨水廠供應大台中地區公共用水需求。在 921 大地震之後，由於石岡壩損壞及取水渠道受損，豐原淨水場最大處理容量由一百三十萬噸降為

九十萬噸。使得大台中地區的自來水供應常有不足的情形發生。因此本研究中增加了評估蓄水池供應民生需水的供水能力與可行性評估。

大台中地區農業用水需求依據鄉鎮別與灌溉水系蓋分為二十個灌區，引水自大甲溪的圳道為：新社灌區的山頂圳、白冷圳與新社圳；東勢灌區的大茅埔圳、東勢本圳、老圳灌渠、埤頭山圳；台中灌區的八寶圳、葫蘆墩圳；后里灌區的內埔圳；清水灌區的五福圳與高美圳；大甲灌區的虎眼一圳與虎眼二圳等灌溉渠道。因山頂圳與新社圳的引水不影響石岡壩入流量，本研究中忽略此兩圳的農業需求。根據農業灌溉用水登記之水權量與計劃取水量記錄作比較，水權量遠大於計劃取水量，因此本研究為反應實際農業用水情形，進行水資源模擬時，是以實際取水量為計算基準。

本研究將根據上述各項蓄水及供水設施的水資源單元，進行模擬大甲溪水資源運用情形，以評估石岡壩破壞前後的放水量，進而與調蓄水池的操作做聯合應用。

三、研究方法

本研究為解決臨時攔河堰工程修復期間無足夠水量可供應灌區水量之問題，以興建調蓄水池做為解決的方案。在評估建造之調蓄水池容量時，必須根據取水口的故障紀錄與當時所需的灌溉水量作為分析調蓄水池容量的依據。研究中主要根據水利會提供之計劃灌溉需水量與歷史修復紀錄設計調蓄水池容量，進而以累積機率之觀念作為評估調蓄水池在承擔不同風險下所需之容量。取水口損壞大多是因為大甲溪的水量過大而造成，故取水口發生故障發生的次數及調蓄水池的操作等都與大甲溪的水量息息相關，因此本研究以模擬大甲溪水資源系統利用情形，評估石岡壩下游農業可獲得的水量與使取水口被沖毀石岡壩的最小放水量，以訂定調蓄水池之操作規則，其分析方法之流程如圖 2。

3.1 取水口之可用度

取水口的正常可用的時間直接影響調蓄水

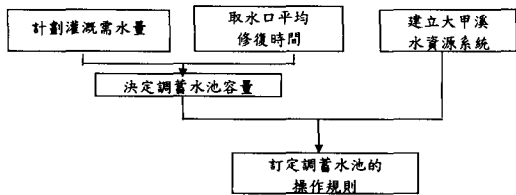


圖 2 研究方法之流程圖

池蓄水與供水，可用的時間越短，其缺水的機率則越高[2]，本研究藉由可用度評估圳頭取水口過去故障的情形，以瞭解目前的農業供水系統可正常引進水量的機率。根據歷年取水口修復時間，計算每次損壞平均修復與正常可使用的時間，當進水口處損壞，可正常供水的期間，稱為平均故障間隔時間(Mean Time to Failure, MTTF)，此段時間亦代表供水系統在故障時間結束後，在下次故障發生的時間。供水系統發生故障至修復完成所需時間，則稱為平均修復時間(Mean Time to Repair, MTTR)，即是取水口損壞無法供應灌溉水的時間，根據 MTTF 與 MTTR 可推求目前供水系統之可用度(availability)。可用度表示進水口在需要時可供使用的機率或在全部時間中可正常運作供應灌溉用水的比率[13,14,15]，表示為

$$\text{可用度} = \frac{MTTF_t}{MTTF_t + MTTR_t} \dots\dots\dots(1)$$

式中第 t 時期，本研究可用度以天為單位，MTTR 為平均修復時間，MTTF 為平均故障間隔時間。

3.2 調蓄水池容量設計

本研究所需的調蓄水池容量較一般的水庫容量小許多，且取水口連續發生故障的機率低，所以調蓄水池不需考慮提供跨年的調節功能，因此本研究並無採用過去常用的線性規劃方法推估調蓄水池容量[7]，而是根據連續缺水天數與灌溉需水量決定調蓄水池容量。本研究設計調蓄水池的容量依據三種方法，(i)一為根據河川浮覆地之面積，並考慮一定的蓄水深度；(ii)一是根據歷史平均故障天數作為設計調蓄水池容量的依據；(iii)另一種是將歷史平均故障天數增加一天的情況下，所需的調蓄水池容量。

(i) 根據浮覆地面積作為調蓄水池容量設計依據

虎眼一圳附近未來可用來興建調蓄水池的浮覆地面積大約為 28 公頃，水利規劃試驗所在評估調蓄水池的的容量時，是假設調蓄水池平均深度為 3 公尺，面積為 28 公頃，故調蓄水池容量為 840000 立方公尺。因此本研究進而依此容量評估其適用之操作規則。

(ii) 根據歷史故障紀錄所需的水量作為調蓄水池容量設計依據

當圳頭故障時，進水口的水量將會明顯減少，灌區便可能發生缺水的情形。興建調蓄水池主要是供應圳頭損壞期間，所欠缺農業的灌溉用水量。故設計調蓄水池容量時，主要根據歷史計劃灌溉需水量資料及故障資料作為設計的依據。計算故障時的計劃灌溉需水量，進而將每次故障發生所需之計劃灌溉需水量，依據其大小，由大到小加以排序，並計算其以累積機率。其計算方式如下：

$$IR_{fi} = T_{fi} \times IR_{pi} \times 86400(\text{s/day}) \dots\dots\dots(2)$$

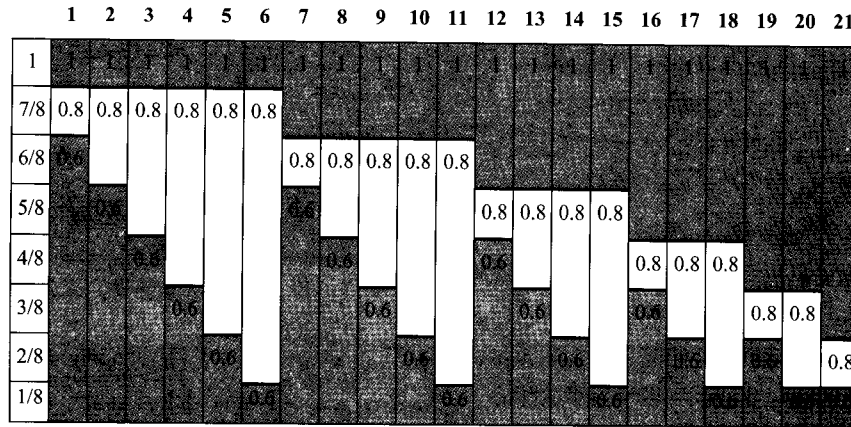
$$P = \frac{n}{N + 1} \dots\dots\dots(3)$$

式中 IR_{fi} 為第 i 次故障時的計劃灌溉需水量 (m^3)， T_{fi} 為第 i 次故障時之故障延時(day)， IR_{pi} 為第 i 次當旬平均一天計劃灌溉需水量(cms)，P 為每次故障時所需的灌溉水量所對應到的累積機率值，N 為發生故障的總次數，n 為排序編號 1,2,3,.....N，其故障時所需的計劃灌溉需水量最小值對應到的排序編號值為 N。

將每次取水口故障所需灌溉水量之大小加以排序視為 X 軸之資料，並將每次故障所對應到之的累積機率值視為 Y 軸之資料，繪出故障時所需灌溉計劃灌溉需水量之累積機率分佈圖，不同的累積機率值對應的 X 軸的值，代表著有多少的機率，可能在故障時所需的水量，如此一來，便可得知在滿足不同的信賴度下，所應興建調蓄水池之容量。

(iii) 將每次故障紀錄延長一天所需的水量作為調蓄水池容量設計依據

表 1 21 種不同調蓄水池的操作規則



由於台中水利會所提供的圳頭修復工程之歷史記錄，其資料上的記錄為工程修理期間的時間，但實際上，故障發生時，可能需一至兩天的時間請工程人員去修復，所以極有可能在開工前一天，圳頭的取水口便已經損壞，而使得歷史的發生故障的日期，可能與實際取水口修復日期，有些許出入。例如在颱風來臨時，取水工損壞，工作站則必須在颱風過後才可請示上級派請工程人員修復圳頭之臨時攔河堰或土堤。因此本研究假設圳頭取水工在故障記錄的前一天就已經無法取水，將歷史的每次故障資料都增加一天。故障天數增加，就如增加安全係數般，使得調蓄水池容量可提供更多的水量，因此容量也相對的增加。其設計調蓄水池容量的方法如前述以累積機率的觀念，其計算式如下：

$$IR_n = (T_n + 1) \times IR_{pi} \times 86400(s/day) \dots\dots\dots(4)$$

最後再繪製圳頭故障時所需灌溉水量之累積機率分佈圖，以推求滿足不同信賴度下所需的調蓄水池容積。

3.3 調蓄水池操作規則之訂定

調蓄水池之容量與操作規則訂定後，則必須決定其下限與嚴重下限之位置，本研究應用試誤法優選最佳操作規則，模擬的過程中將調蓄水池容量分成八等分，作為下限與嚴重下限的可能的位位置，因嚴重下限的位置只能在下限的下方，所

以下限與嚴重下限的可能的位位置組合共有 21 種，如表 1。表 1 中分別表示 21 種操作規則，第一種操作規則是將下限訂於蓄水池容量的八分之七的位置，亦是第一種規則的第一條黑線位置處，而在蓄水池容量的八分之六處有第二條黑線，此黑線便是嚴重下限的位置。因第一期作之第一種操作規則可搭配第二期作 21 種可能之操作規則，所以模擬之操作規則共有 421 種。

調蓄水池主要是供應農田缺水時期之水量，其目的是盡可能供應農田所需，因此當調蓄水池之蓄水量不足以完全供應農田欠需之水量時，則以折扣之方式供應所需。為避免折扣數過低，無減輕原本之缺水問題，故以試誤法模擬調蓄水池操作規則時，折扣數固定以八折與六折供水，並無嘗試其他折扣數。因此當蓄水池的容量在下限上方（第一條黑線，表 1）則完全供應所需的水量，若蓄水池的容量在下限與嚴重下限之間（第一條黑線與第二條黑線之間，表 1）則皆以打八折供應，在嚴重下限以下（第二條黑線以下，表 1）則以打六折供應，其他 20 種操作規則以此類推，定義下限與嚴重下限之位置。

過去之相關研究多是分析水庫之操作規則，且操作時間多以月為單位[5,8]，調蓄水池主要是供應農業缺水時之需求，因虎眼圳之農田耕作分為二期作，其灌溉計劃用水量與調配之水量並不完全相同，為配合農業耕作時間且有效利用水量，因此將調蓄水池之操作規則分成第一期作

與第二期作兩個部分，以下限與嚴重下限兩條規線作為調蓄水池之操作運用規則，第一期作之規線以 middle rule_1 與 low rule_1 表示，而第二期作則以 middle rule_2 與 low rule_2 表示。當調蓄水池的容積在下限以上，則完全供應所需的缺水量；當調蓄水池的容積在下限與嚴重下限之間則是將缺少的灌溉水量以打八折供應；若調蓄水池容積在嚴重下限以下，則是以六折折扣供應其缺水量，如圖 3 所示。

過去的研究曾依據不同的缺水特性作為評估缺水現象[10,13]，有些定義較不明確，且無法確實的反應缺水情形，本研究中根據缺水指數作為訂定原則，由這 421 種操作規則選取最佳的操作規則。缺水指數是另一種其缺水指數(Shortage Index, SI)定義如下：

$$\text{日缺水指數} = \frac{100}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} \left[\frac{\text{日缺水量}}{\text{日需水量}} \right]^2$$

n_1 為分析的總日數.....(5)

$$\text{旬缺水指數} = \frac{100}{n_2} \sum_{i=1}^{n_2} \left[\frac{\text{旬缺水量}}{\text{旬需水量}} \right]^2$$

n_2 為分析的總旬數.....(6)

$$\text{年缺水指數} = \frac{100}{n_3} \sum_{i=1}^{n_3} \left[\frac{\text{年缺水量}}{\text{年需水量}} \right]^2$$

n_3 為分析的總年數.....(7)

此三種缺水指數，數值越大表示缺水越嚴重，若三個缺水指數相互比較時，其中又以日缺水指數的數值為最大，旬缺水指數次之，年缺水指數最小，但日缺水指數是以日為單位作為評估缺水的情形，所以較適合反應實際缺水的情況。

3.4 模擬調蓄水池之水平衡演算公式

模擬調蓄水池放水操作，主要是根據調蓄水池之入流量、灌區需求量、前一日之蓄水量等，作為當日調蓄水池可放水量，進而再藉由缺水指數評估灌區經由調蓄水池供應不足之水量後，其發生缺水之情形。其模擬時所應用之水平衡公式如下所示。

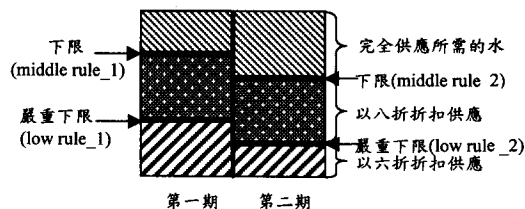


圖 3 調蓄水池之規線示意圖

調蓄水池建造位置在虎眼一圳與虎眼二圳之間，主要水源來自於虎眼一圳灌區多餘的水量，故當虎眼一圳灌區發生缺水時，調蓄水池則無入流量，虎眼一、二圳灌區之間有連接管道，可將虎眼一圳多餘的水量供應虎眼二圳灌區使用。因此當虎眼一圳不缺水時，虎眼一圳多引進之水量再扣除虎眼二圳之缺水量便是調蓄水池可引進之水量，其數學式如(10)式，而虎眼一、二圳之缺水量如(8)及(9)式。

虎眼一圳缺水量 (S_{hi1})

$$S_{hi1} = D_{hi1} - Q_{hi1} \quad , \quad \text{if } Q_{hi1} < D_{hi1} \dots\dots\dots(8)$$

虎眼二圳缺水量 (S_{hi2})

$$S_{hi2} = D_{hi2} - Q_{hi2} \quad , \quad \text{if } Q_{hi2} < D_{hi2} \dots\dots\dots(9)$$

可引進調蓄水池之水量 (Q_i)

$$Q_i = \text{Max} [(Q_{hi1} - D_{hi1} - S_{hi2}) , 0] \dots\dots\dots(10)$$

式中 Q_{hi1} 為虎眼一圳每日實際引水量， D_{hi1} 為虎眼一圳每日計劃引水量， S_{hi1} 為虎眼一圳每日缺水量， Q_{hi2} 為虎眼二圳每日實際引水量， D_{hi2} 為虎眼二圳每日計劃引水量， S_{hi2} 為虎眼二圳每日缺水量。

調蓄水池之主要是供應虎眼一、二圳灌區缺水時所需之水量，因此當虎眼一圳實際引水量大於計劃引水量時，其調蓄水池需供應之水量如式(11)，反之，虎眼一圳亦缺水時，則調蓄水池必須由之前積蓄之水量供應一圳與二圳之農業缺水量。本研究更進一步分析調蓄水池若每日供應民生用水之可行性，因此模擬時，分別假設每日供應 5、10、15、20、25、30 萬立方公尺等六種不同水量，其虎眼一、二圳灌區與民生發生缺水情形。

調蓄水池所應供應之農業水量 (D_{ac}) 與民生需水量 (D_p)

$$D_{ac} = Q_{hi1} - D_{hi1} - S_{hi2}, \quad \text{if } Q_{hi1} > D_{hi1} \dots\dots\dots(11)$$

$$D_{ac} = S_{hi1} + S_{hi2}, \quad \text{if } Q_{hi1} < D_{hi1} \dots\dots\dots(12)$$

民生需水量每日供應 5、10、15、20、25、30 萬立方公尺等六種不同水量

$$D_p = 5、10 \dots\dots\dots 30$$

D_p : 民生用水

由上述式子得知調蓄水池之可引進水量與所應供應農業與民生的水量，便可進一步計算調蓄水池每日初、每日末之容量及溢流量，其式子如(13)至(16)調蓄水池之供水量則由每日初之調蓄水池容量及訂定之操作規則決定。調蓄水池之供水量則有三種可能，如式(17)。

調蓄水池之每個時期之容量 (S_t)

第 t 時期調蓄水池容量 = Max[第-1 t 時期蓄水量-每日蒸發量,0]

$$S_t = \text{Max}[S_{t-1} - E, 0] \dots\dots\dots(13)$$

(13)式中蒸發散量 (E) 因虎眼圳附近並無設置氣象站，是由台中氣象站所觀測之蒸發量紀錄乘上當日調蓄水池蓄水之斷面積，假設調蓄水池興建前會先行整地，故調蓄水池蓄水斷面積不會隨蓄水深度而有所改變，在此都以 280000 m^2 計算。

第 $t+1$ 時期調蓄水池之容量 = 第 t 時期調蓄水池容量 + 每日可引進水量 - 每日農業缺水量 - 每日民生需水量 - 每日溢流

$$S_{t+1} = S_t + Q_t - D_{ac} - D_p - Q_{over} \dots\dots\dots(14)$$

調蓄水池之溢流 (Q_{over})

$$Q_{over} = S_{t+1} - S_{max}, \quad \text{if } S_t > S_{max} \dots\dots\dots(15)$$

$$Q_{over} = 0, \quad \text{if } S_t < S_{max} \dots\dots\dots(16)$$

式中： S_{max} 為調蓄水池最大容量， S_t 為第 t 時期之調蓄水池容量， S_{t+1} 為第 $t+1$ 調蓄水池容量， Q_{over} 為調蓄水池之溢流。

調蓄水池供水 (R_t)

$R_t = D_{ac}$, if $S_t >$ 下限，則完全供應農業缺水量

$R_t = 0.8 \times D_{ac}$, if 嚴重下限 $< S_t <$ 下限，則以打折方式供應農業缺水量，折扣數為八折 $\dots\dots\dots(17)$

$R_t = 0.6 \times D_{ac}$, if $S_t <$ 嚴重下限，則以更低之折扣供應農業缺水量，折扣數為六折

式中 R_t 為第 t 時期調蓄水池供應之水量

3.5 大甲溪水資源模式建立

由於虎眼圳取水口損壞大多是因颱風豪雨時，水庫洩洪量過大，造成臨時攔河堰或土石堤遭沖毀，使得進水口無法引水以供應農業灌溉所需。因此本研究藉由建立大甲溪水資源模式，以推估每日石岡壩放至下游的水量。水資源系統所研究對象大多是在決定水庫設計容量大小及制訂水庫操作規線等，主要採用模擬與優選兩種方法[3,4]。本研究採用模擬方法進行水資源調配的研究，本研究依據大甲河流域中水資源系統之單元，建立模擬程式，模擬大甲溪的水文情況。進一步模擬 921 地震後，未來在石岡壩沒有調蓄功用的情況下，大甲溪水資源系統的利用情形與對下游取水口故障次數之影響。

大甲河流域目前設有五座大壩並設有大甲溪發電廠統一管理系列電廠運作[6]，因本研究模擬大甲溪水資源系統時，主要是要推估石岡壩放水量大小對於下游取水口破壞的次數影響，大甲溪水資源系統一系列的水庫，如青山、谷關、天輪等其主要功能為水力發電，這些水庫與德基水庫相比，其蓄水容量相當小，大甲溪的水資源流入的水量幾乎等於流出的水量，所以在本文中將不考慮其蓄水功能，主要考量德基水庫、馬鞍壩與石岡壩等的蓄水與運作功能，作為水資源系統的主要蓄水控制點。目前只有德基水庫有運轉規線，其餘各水庫皆盡量維持滿庫運轉而沒有訂定運轉規線[9]。馬鞍壩與石岡壩在模擬水資源利用情況時，只分析水壩的有效容量、溢流量與放水量。整個大甲溪水資源系統的放水量由德基水庫

控制，德基水庫根據發電需求與下游需水量放水。將串聯式之水資源利用系統簡化成只有德基水庫與石岡壩兩個蓄水控制點，若包含志樂壩的蓄水功能則共有三個蓄水控制點。水資源系統中忽略馬鞍壩的原因是演算的時間是自民國 74 年至民國 86 年共 13 年，因馬鞍壩在民國 86 年才開始營運蓄水與發電，因此進行水資源系統演算推估過去石岡壩放水量時，並無加入馬鞍壩蓄水控制點。

因大甲溪上取水點相當多，為方便計算建立水資源系統時，將馬鞍壩下游的大茅埔圳、東勢本圳、老圳、八寶圳上游、埤頭山圳等農業灌渠視為同一取水點。而石岡壩下游的內埔圳、五福圳、虎眼一圳、高美圳及虎眼二圳等農業灌渠視為同一取水點。所以供水的控制點，包含上述的兩個取水點外，尚有馬鞍壩上游的白冷圳農業灌渠取水點、南幹渠取水點與民生用水共有五個。其簡化後的大甲溪水資源利用系統圖，如圖 4。

根據簡化後的大甲溪水資源利用系統圖進行水資源模擬，各蓄水點以水量平衡公式與容量限制式推求入流量、放水量與蓄水量，而下游所需水量包括發電、農業與民生用水。模式中根據青山壩之每日集中於六小時放水量之計劃發電水量 174.8cms 作為下游所需的發電水量。農業與民生用水則依據各個供水控制點之計劃灌溉水量及民生用水水權作為下游所需的水量。

模擬大甲溪水資源系統利用情形時，所採用的水文資料包括志樂溪流量站及松茂站自 1985 至 1997 年之日流量記錄，志樂溪流量站紀錄視為志樂壩之入流量，因松茂站之集水區面積與德基水庫不同，所以德基水庫之入流量是根據松茂站之流量再以比面積法推估而得。而德基水庫之蒸發量亦是根據松茂氣象站民國 59 年至 86 年月蒸發量平均值之蒸發量資料所推估。德基水庫之出流量與其他水庫之出入流量則以水平衡與下游需水量所推估。

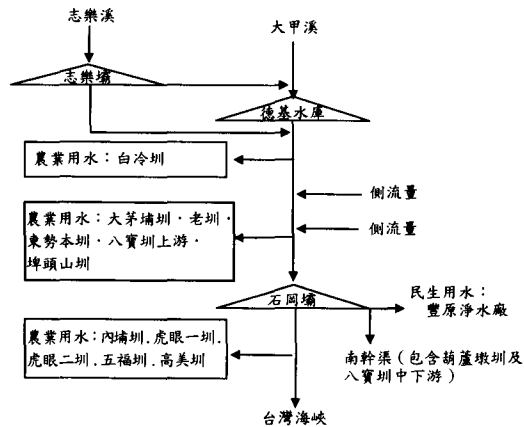


圖 4 簡化後大甲溪水資源利用系統圖

3.6 大甲溪水資源系統模擬演算之公式

建立水資源系統時應注意，控制點的界定（如蓄水點、放水點及損失點等）與運用的合理公式（如連續方程式），及系統的限制（如水庫容量限制及可引水量限制等），控制點的描述如上述說明，本節將說明進行水資源系統模擬時，所採用的水量平衡公式、容量限制的相關式及各控制點需水量計算式，在此模擬計算式是以萬噸為單位。

志樂壩：

志樂壩入流量 = 德基水庫志樂壩引水量 + 溢流至馬鞍壩的水量

$$Q_{gli} = Q_{gltco} + Q_{glmao} \dots\dots\dots(18)$$

式中 Q_{gli} 為志樂溪流量站資料，因志樂壩引水到德基受到其引水渠道的容量限制，其引水渠道最大可引水量為 10cms，所以至志樂到德基的水量受下式限制。

$$Q_{gltco} = \text{Min} [10 * 86400 / 10000, Q_{gli}] \dots\dots\dots(19)$$

$$Q_{glmao} = Q_{gli} - Q_{gltco} \dots\dots\dots(20)$$

式中： Q_{gli} 為志樂溪自然入流量， Q_{gltco} 為志樂壩至德基水庫之流量， Q_{glmao} 為志樂壩至馬鞍壩之流量

德基水庫：

德基入流量 (Q_{tci})

$$Q_{tci} = Q_{tci} + Q_{gltci} \dots\dots\dots(21)$$

德基次日蓄水量=本日蓄水量+德基入流量+志樂至德基之引水量-蒸發量-放水量-溢流量

$$V_{t+1} = V_{t+1} + Q_{tci} + Q_{gl\ tci} - Q_{tco} - E_{tc} - Q_{tcover} \dots\dots\dots(22)$$

本研究進行大甲溪水資源水量平衡計算時，水量損失只考慮蒸發量損失，不考慮滲漏或其他操作損失。

蒸發量損失部分只考慮德基水庫的蒸發量，因馬鞍壩與石岡壩容量庫容小，與整個水資源系統的水量相比之下約只有千分之三，故忽略不計。台電公司在德基水庫集水區上游之松茂設有氣象站，因缺乏德基水庫之蒸發量紀錄，因此由研究中假設德基水庫月蒸發量為定值且與松茂氣象站相同。因此德基水庫之蒸發量計算是依據松茂氣象站所量測的蒸發量乘上各時期水庫面積而獲得。

德基放水量 (Q_{tco})

德基水庫必需依據可放水量與下游總需水量以供應下游所需水量。首先分別判斷德基的可放水量與下游的總需水量，德基的可放水量是依據水庫的容量是否在德基水庫的運轉規線的容量以上，當水庫的容量大於運轉規線的容量，其可放水量，便是兩者之差值，反之，若小於運轉規線的容量則不放水。而下游的總需水量則是依據發電所需的水量與下游的農業與民生用水之和，兩者取最大值，便是下游的總需水量。進而將可放水量與下游總需水量比較，取小值，才是德基之放水量。其關係式如下(23)式。

$$Q_{tco} = \text{Min} \{ \text{max} [0, (V_{(tc)t} - V_{(tc)T})], \text{Max} [D_e, (D_{tca} + D_p)] \} \dots\dots\dots(23)$$

德基溢流量 (Q_{tcover})

$$Q_{tcover} = V_{(tc)t+1} - V_{(tc)\text{max}} \quad \text{if } V_{(tc)t+1} > V_{(tc)\text{max}} \dots\dots\dots(24)$$

$$Q_{tcover} = 0 \quad \text{if } V_{(tc)t+1} < V_{(tc)\text{max}} \dots\dots\dots(25)$$

式中 Q_{tci} 為德基水庫之入流量，Q_{gl tci} = Q_{gl tco} 為志樂壩至德基水庫之引水量，Q_{tco} 為德基水庫之放水量，E_{tc} 為德基水庫之蒸發量，Q_{tcover} 為德基水庫之溢流量，D_{tca} 為農業計劃用水量總計，D_e 為發電水量，D_p 為民生用水，V_{(tc)t} 為 t 時期德基水庫之蓄水量容量，V_{(tc)t+1} 為 t+1 時期德基水庫之

蓄水量容量，V_{(tc)T} 為德基水庫之運轉規線容量，V_{(tc)max} 為德基水庫最大庫容。

德基水庫下游所需的水量：包含農業、發電、民生用水

(1) 農業用水 (D_{tca}) :

$$D_{tca} = [D_{apl} + D_{admp} + D_{asouth} + D_{adhi}] \dots\dots\dots(26)$$

式中 D_{apl} 為白冷圳農業計劃灌溉水量，D_{admp} 為大茅埔圳等農業計劃灌溉水量，D_{asouth} 為南幹渠農業計劃灌溉水量，D_{adhi} 為虎眼一、二圳等農業計劃灌溉水量。

(2) 發電水量 (D_e) :

青山壩之計劃發電水量為德基水庫下游發電廠中最大值，故發電水量則是根據青山壩之每日集中於六小時放水之每日計劃發電水量 174.8cms 作為下游所需的發電水量。

$$\text{發電用水量(萬噸/day)} = \text{發電計劃灌溉水量(cms)} \times \text{發電時間(hr)} \times 0.36$$

$$D_e = 174.8 \times 6 \times 0.36 \dots\dots\dots(27)$$

(27)式中之 0.36 為單位換算值，一小時為 3600 秒，一噸為 1m³，因以萬噸為單位，因此將 3600 除以 10000，便可得單位換算值為 0.36。

(3) 民生用水量 (D_p) :

根據豐原淨水廠每日最多可處理 90 萬噸之水量，作為德基水庫下游民生用水需求。(資料來源：諮詢石岡壩管理中心所得知)

$$D_p = 90 \text{ 萬噸}$$

馬鞍壩 :

馬鞍壩入流量 (Q_{mai}) = 德基放水量 + 志樂壩溢流量 + 側流量 - 白冷圳引水量

$$Q_{mai} = Q_{tco} + Q_{gl\ mao} + U_{t\ mao} - D_{apl} \dots\dots\dots(28)$$

馬鞍壩放水量 (Q_{mao})

$$Q_{mao} = \text{Min} \{ Q_{mai}, \text{Max} [D_e, (D_{maa} + D_p)] \} \dots\dots(29)$$

馬鞍壩溢流量 (Q_{maover})

$$Q_{maover} = V_{(ma)t+1} - V_{(ma)\text{max}} \quad \text{if } V_{(ma)t+1} > V_{(ma)\text{max}} \dots\dots(30)$$

$$Q_{maover} = 0 \quad \text{if } V_{(ma)t+1} < V_{(ma)\text{max}} \dots\dots\dots(31)$$

Q_{mai} 為馬鞍壩之入流量，Q_{mao} 為馬鞍壩之放水

量, E_{ma} 為馬鞍壩蒸發量, Q_{maover} 為馬鞍壩溢流量, D_{maa} 為馬鞍壩下游農業計劃用水量總計, $V_{(ma)t}$ 為 t 時期馬鞍壩之蓄水量容量, $V_{(ma)t+1}$ 為 $t+1$ 時期馬鞍壩之蓄水量容量, $V_{(ma)max}$ 為馬鞍壩最大庫容。

石岡壩：

入海量+石岡壩下游引水量+南幹渠引水量+淨水廠引水量=馬鞍放水量+側流量-大茅埔圳等農業引水量

石岡壩入流量 (Q_{ski})

$$Q_{ski} = Q_{mao} + Q_{glmao} + U_{mask} - D_{admp} \dots\dots\dots(32)$$

入海量 (Q_{sea})

$$Q_{sea} = Q_{mao} + U_{mask} - D_{admp} - D_p - D_{south} \dots\dots\dots(33)$$

石岡壩溢流量 (Q_{skover})

$$Q_{skover} = V_{(sk)t+1} - V_{(sk)max}, \text{ if } V_{(sk)t+1} > V_{(sk)max} \quad (34)$$

$$Q_{skover} = 0, \text{ if } V_{(sk)t+1} < V_{(sk)max} \quad (35)$$

式中 Q_{ski} 為石岡壩之入流量, Q_{sea} 為入海量, Q_{skover} 為石岡壩之溢流量, D_{ska} 為石岡壩下游農業計劃用水量總計, $V_{(sk)t}$ 為 t 時期石岡壩的蓄水量容量, $V_{(sk)t+1}$ 為 $t+1$ 時期石岡壩的蓄水量容量, $V_{(sk)max}$ 為石岡壩最大庫容。

未控制流流量資料

石岡壩供水之水量來源有三, 一是上游德基水庫至石岡壩之間未受控制流量, 二是上游德基水庫依照台電公司發電計劃而發電之尾水量, 三是德基水庫配合石岡壩供水計劃而發電之尾水量。未受控制流量因無設置水文站觀測流量, 無法得知側流量, 故本研究假設德基水庫上游與下游的水文情況相同, 根據松茂站的流量資料, 以比面積法推估各水文控制點之間的側流量。其推估式如下: (依據經濟部水利處, 88 年 8 月)[11]

德基水庫與馬鞍壩之間之側流量(U_{tcma})

$$U_{tcma} = Q_{松茂} \times \frac{A_{tcma}}{A_{松茂}}$$

馬鞍壩與石岡壩之間之側流量(U_{mask})

$$U_{mask} = Q_{松茂} \times \frac{A_{mask}}{A_{松茂}}$$

式中 U_{tcma} 為德基水庫與馬鞍壩之間未控制之側流量, U_{mask} 為馬鞍壩與石岡壩之間未控制之側流量, $Q_{松茂}$ 為松茂站之流量, A_{tcma} 為德基水庫與馬鞍壩之間的集水面積 (402Km²), $A_{松茂}$ 為松茂流量站集水面積 (417.9Km²), A_{mask} 為馬鞍壩與石岡壩之間的集水面積 (89 Km²)。

3.7 模擬未來大甲溪水資源系統水源利用情形

在 921 大地震後, 石岡壩是否能恢復其原有之功能, 相關單位目前還在評估中, 因此本研究進一步根據歷史資料模擬未來的大甲溪可能的供水情形。並模擬未來石岡壩無法恢復至原蓄水功能及在石岡壩上游興建一與石岡壩相同容量的水庫, 此兩種情況下, 大甲溪水資源供應變動情形。本研究假設大甲溪未來的水文情況與過去相同, 所以除了水資源系統的單元不同外, 所採用的流量資料是以歷史資料作分析。

因石岡壩在整個大甲溪的水資源系統中, 所扮演的角色為調節一天當中德基水庫集中在六小時發電所釋放出的水量, 藉由石岡壩的調節使民生與農業能適時適量獲得水源, 本研究模擬以日為期距, 所以無法得知石岡壩在一日每小時的操作時, 其放水量對民生與農業用水的影響, 因德基水庫是根據下游的計劃需水量而放水, 再加上側流量, 在流入石岡壩前, 其平均水量約有 74cms, 如此大的水量對石岡壩而言, 大部分都溢流到海中, 所以由模擬結果得知石岡壩一天所釋放的總水量, 在有石岡壩時, 溢流量加上可放水量, 與石岡壩無蓄水功能時, 所釋放到下游的水量在平均值上相差不多, 對下游一天的農業用水影響不大, 因目前以天為單位, 以一天的總量而言是影響不大, 但對於每日必須定時定量的取水單位影響較顯著, 對於無法一次接受較大水量的供水單位, 便可能發生缺水的影響。未來可更進一步以小時為單位, 模擬大甲溪水資源系統運用情形, 以瞭解石岡壩的調節對下游可引水量的

影響。

下游取水口及自來水場皆是以定時定量的方式取水，未來無石岡壩調節可能導致農業灌區取水口在尖峰放水量時無法引進所需水量，而導致灌區缺水，且由模擬結果亦發現取水口的故障次數若與過去比較，其故障次數約增加 25%，故興建調蓄水池供應故障期間的缺水量是必要的，且平均每天約有 80% 的水量流入大海，因此必須藉由蓄水設施，將這些由德基水庫放出的水量以供應發電使用的水資源，在流入大海前做有效的利用與蓄存，積蓄這些發電時所釋放出之水量，以供水量不足時使用，使大甲溪的水資源能更有效的利用。

四、結果與討論

4.1 各圳取水口可用度

根據過去 1985 年到 1998 年虎眼圳的修復紀錄，計算一年中每旬的可用度，其結果表示在圖 5。圖中可看出其可用度大多都集中在 0.8 至 1 間，且虎眼圳約在第 19 旬到 25 旬時，可用度較低，虎眼圳甚至還低於 0.8，因此在七、八月颱風季節，圳頭取水口損壞的機率較高，且取水口平均一旬中約只有七天可正常取用水，所以故障延時大多集中在 2 至 4 天。

4.2 大甲溪水資源系統模擬之結果

本研究根據模擬石岡壩每日放水量的結果與虎眼圳歷年的修復取水口之工程記錄，得知當取水口發生損壞需修復時，石岡壩的平均放水量約 58cms，而前一天石岡壩的平均放水量則為 65cms，此結果是根據民國 74 年至 86 年期間取水口修復 88 次的工程紀錄中所獲得。由修復日期前一天石岡壩的平均放水量，可推估在修復工程開工的前一天可能取水口已經損壞，因此歷史修復記錄往前延時一天可能才是故障發生的時間。

本研究模擬以日為期距，所以無法得知石岡壩在一日每小時的操作時，其放水量對民生與農業用水的影響，但由模擬結果得知石岡壩的存在與否，其目前大甲溪的水資源量，是足以供應農

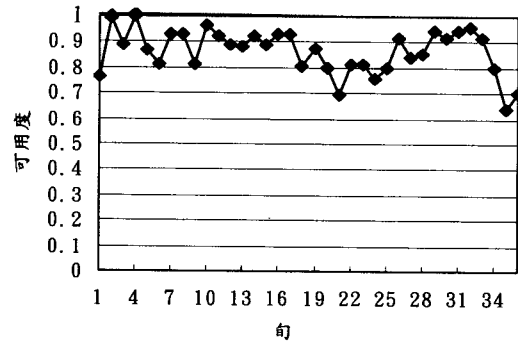


圖 5 虎眼圳歷年紀錄各旬之可用度

業需求，但因石岡壩喪失調節的功能，將造成固定時定量取水的單位，無法適時適量獲得足夠的水量。

模擬未來大甲溪水資源系統若無石岡壩調蓄，其下游的取水口可能發生損壞的次數時，結果顯示當大甲溪的水通過石岡壩的水量若大於 65cms 時，模擬 13 年總故障次數為 110 次，較過去的故障次數多了 22 次。

4.3 調蓄水池容量設計

根據歷史故障記錄所需的水量設計調蓄水池容量，若單只供應給一圳或二圳使用時，以及兩個圳的缺水量一起考量時，在不同信賴度下所需之調蓄水池容量表示於表 1。在 95% 信賴度下，則需要約 157 萬噸之調蓄水池容積。表 2 是將歷史的每次故障資料都增加一天所設計之調蓄水池容量，因可故障延時增加所需水量亦較多，故設計的容量也相對的增加，因此必須興建 187 萬噸之容量才可滿足 95% 之信賴度。未來工程人員可依據表 1 及表 2 作為興建調蓄水池容量的決策參考。虎眼圳附近可興建調蓄水池的面積約為 28 公頃，若假設調蓄水池平均深度為 3 公尺，面積為 28 公頃時，調蓄水池容量為 84 萬噸。圖 6 則是分別將上述所設計虎眼一圳、二圳等各圳在不同信賴度下所需之調蓄水池容積之關係以圖形繪出。

4.4 模擬調蓄水池之操作

興建調蓄水池最主要是改善農業缺水情

表 1 虎眼一、二圳不同信賴度下所需調蓄水池容量

圳頭名稱	調蓄水池	95%	90%	85%	80%	75%
虎眼一圳	調蓄水池容量(萬噸)	77.3	60.2	51.6	47.8	39.8
	調蓄水池深度(m)	2.8	2.2	1.8	1.7	1.4
虎眼二圳	調蓄水池容量(萬噸)	80.0	62.6	53.8	48.8	40.9
	調蓄水池深度(m)	2.9	2.2	1.9	1.7	1.5
一圳與二圳	調蓄水池容量(萬噸)	157.4	122.7	105.4	96.6	80.7
	調蓄水池深度(m)	5.6	4.4	3.8	3.5	2.9

表 2 虎眼一圳與虎眼二圳不同信賴度下所需之調蓄水池容量 (故障延時增加一天的情況)

圳頭名稱	調蓄水池	95%	90%	85%	80%	75%
虎眼一圳	調蓄水池容量(萬噸)	91.6	72.2	64.5	59.7	53.0
	調蓄水池深度(m)	3.3	2.6	2.3	2.1	1.9
虎眼二圳	調蓄水池容量(萬噸)	95.0	75.1	67.3	61.0	54.6
	調蓄水池深度(m)	3.4	2.7	2.4	2.2	2.0
一圳與二圳	調蓄水池容量(萬噸)	186.5	147.1	131.8	120.6	107.6
	調蓄水池深度(m)	6.7	5.3	4.7	4.3	3.8

表 3 各種調蓄水池容量之最佳操作規則與 SI 值 (進水量來自虎眼一圳)

設計容量之假設		平均深度為 3m	故障延時			故障延時加一天		
信賴度		-	95%	90%	85%	95%	90%	85%
調蓄水池容量 (萬噸)		84	157	123	105	187	147	132
第一期作之操作規則	下限位置 (萬噸)	63	137	108	78	117	110	116
	嚴重下限位置 (萬噸)	21	39	62	13	94	18	66
第二期作之操作規則	下限位置 (萬噸)	74	98	62	53	94	74	66
	嚴重下限位置 (萬噸)	21	20	15	26	23	55	17
缺水指數	日	4.53	3.78	3.93	4.21	3.64	3.83	3.93
	旬	3.54	3	3.09	3.31	2.92	3.06	3.09
	年	0	0	0	0	0	0	0

形，因此模擬調蓄水池之操作規則時，則是以盡量滿足灌區缺水量，以日缺水指數降至 1 為目標，以推求最佳之操作規則。表 3 為當調蓄水池之蓄存量來自虎眼一圳灌溉後剩餘之水量時，各種容量在模擬 421 種操作規則後，所獲得之最佳操作規則與缺水指數，年缺水指數小於小數第三位者，以 0 表示，由表中可看出 187 萬噸的容量搭配最佳之操作規則，也無法使日缺水指數降至 1，因無足夠進水量，容量再大也無法使缺水率降至 10% 以下。因此調蓄水池之進水量來源對調蓄水池之供水與蓄水池容量有明顯之影響，故本研究另外假設虎眼一圳增加 0.5cms 之引水量供蓄水池蓄存時，各種容量改善農業之缺水情形，其分析結果如表 4，由表中可看出容量為 84 萬

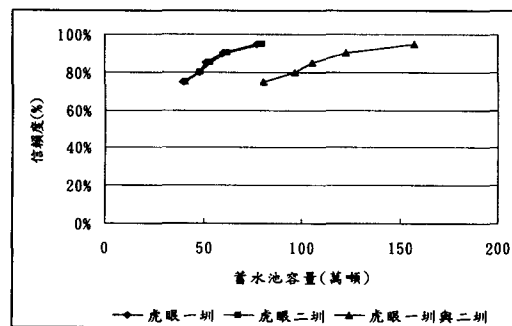


圖 6 虎眼一、二圳不同信賴度下所需之調蓄水池容量

噸時，便可使日缺水指數降至 0.95，此容量最佳之操作規則如圖 7，容量越大其缺水風險越低，

表 4 各種調蓄水池容量之最佳操作規則與 SI 值（虎眼一圳增加 0.5cms 進水量）

設計容量之假設		平均深度為 3m	故障延時			故障延時加一天		
信賴度		-	95%	90%	85%	95%	90%	85%
調蓄水池容量 (萬噸)		84	157	123	105	187	147	132
第一期作之 操作規則	下限位置 (萬噸)	74	118	77	92	117	92	83
	嚴重下限位置 (萬噸)	21	20	15	13	23	18	17
第二期作之 操作規則	下限位置 (萬噸)	42	79	62	53	94	92	83
	嚴重下限位置 (萬噸)	11	59	15	13	70	18	17
缺水指數	日	0.95	0.68	0.78	0.85	0.62	0.71	0.75
	旬	0.68	0.5	0.57	0.61	0.47	0.52	0.55
	年	0	0	0	0	0	0	0

表 5 各種調蓄水池容量之最佳操作規則與 SI 值（新關一取水口）

設計容量之假設		平均深度為 3m	故障延時			故障延時加一天		
信賴度		-	95%	90%	85%	95%	90%	85%
調蓄水池容量 (萬噸)		84	157	123	105	187	147	132
第一期作之 操作規則	下限位置 (萬噸)	42	79	61	52	94	74	66
	嚴重下限位置 (萬噸)	21	20	15	13	70	18	16.5
第二期作之 操作規則	下限位置 (萬噸)	32	39	30	26	70	37	33
	嚴重下限位置 (萬噸)	11	20	15	13	23	18	16.5
缺水指數	日	0.05	0.02	0.03	0.04	0.02	0.02	0.03
	旬	0.04	0.02	0.02	0.03	0.01	0.02	0.02
	年	0	0	0	0	0	0	0

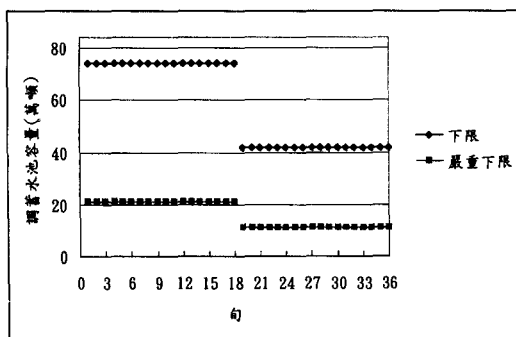


圖 7 容量為 84 萬噸時之最佳操作規則（增加 0.5cms 進水量）

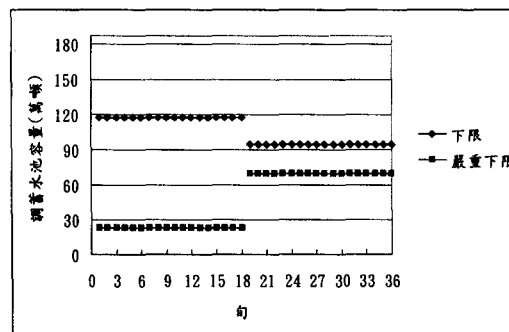


圖 8 容量為 157 萬噸時之最佳操作規則（增加 0.5cms 進水量）

故當容量為 187 萬噸時日缺水指數只有 0.75。當調蓄水池容量為 157 或 187 萬噸時，可依據圖 8 與圖 9 之操作規則，供水給農業與民生使用。

調蓄水池若單只解決農業缺水問題其經濟效益較低，且在 921 地震後，大台中地區民生用水經常面臨缺水的情形，因此希望能再增加調蓄

水池之進水量以蓄存更多的水量發揮更多的效益，但基於虎眼一圳之引水渠道可能受限於最大容量限制，無法多引進高於 0.5cms 的水量，故本研究假設可再新關取水口每日引進約 2cms 的水量供調蓄水池使用，使調蓄水池有穩定的進水量足以供應灌區的農業缺水情形。表 5 則是假設

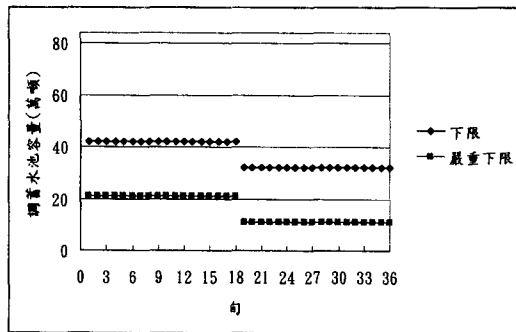


圖 9 容量為 187 萬噸時之最佳操作規則 (增加 0.5cms 進水量)

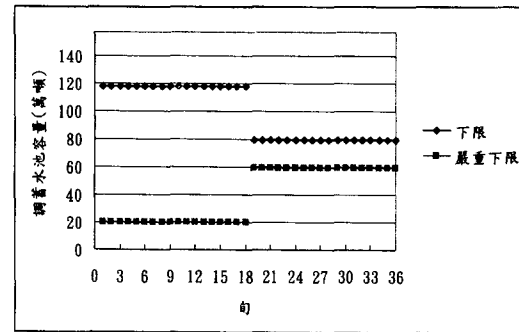


圖 10 容量為 84 萬噸時之最佳操作規則 (新關一取水口)

表 6 不同調水池容量供應民生 5 萬噸後之 SI 值 (增加虎眼一圳 0.5cms 之進水量)

蓄水池容量		84	157	187
		(萬噸)	(萬噸)	(萬噸)
農業	日缺水指數	2.98	2.57	2.47
	旬缺水指數	2.09	1.79	1.71
	年缺水指數	0.00	0.00	0.00
民生	年缺水指數	47.13	45.97	45.56

表 7 不同調水池容量供應民生 13 萬噸後之 SI 值 (新關一取水口)

蓄水池容量		84	157	187
		(萬噸)	(萬噸)	(萬噸)
農業	日缺水指數	0.52	0.40	0.36
	旬缺水指數	0.31	0.27	0.25
	年缺水指數	0.00	0.00	0.00
民生	年缺水指數	0.99	0.89	0.79

在新關一取水口後，模擬各種容量所獲得最佳操作規則與缺水指數之結果。表中 84 萬噸與 187 萬噸的調蓄水池容量，依據表中之最佳操作規則放水，其農業日缺水指數都是小數點第二位才有值，因 SI 值相當小對於缺水情形影響性微乎其微。

新關一取水口供調蓄水池引水，幾乎可完全解決農業缺水情形，因此本研究進一步分析，未來調蓄水池在供應農業用水後，再供應民生用水之可行性。表 6 是在虎眼一圳進水口多引 0.5cms 水量情況下，調蓄水池的容量分別為 84、157 與 187 萬噸時，假設每日供應 5 萬噸之水量給民生用水後，虎眼一、二圳農業的缺水指數與民生缺水指數，表中兩個指數都過高，且農業缺水指數也都大於 1，所以連 5 萬噸的水都無法供應。表 7 則是假設新關一取水口供調蓄水池引水的情況下，84、157 與 187 萬噸此三種調蓄水池的容量，每日供應約 13 萬噸的水量給民生使用後，其農

業的缺水指數與民生缺水指數，表中農業與民生日缺水指數都是在 1 以下。未來可新關一取水口並興建 84 萬噸之調蓄水池時，可依據圖 10 之操作規則供應農業與民生用水。

4.5 缺水指數與調蓄水池容量之關係

藉由缺水指數與容量之關係圖，分析其缺水指數之變化情形。由虎眼一圳灌溉後剩餘水量作為調蓄水池之引水量時，其調蓄水池容量與日缺水指數之關係表示於圖 11。圖中可看出若不興建調蓄水池，將虎眼一圳多餘的水量供應給二圳使用時，虎眼一、二圳農業之日缺水指數約為 10.8，相當於虎眼一、二圳需承擔 32% 之缺水率，而當容量增加至 150 萬噸時，日缺水指數約為 3.9，此時虎眼一、二圳尚需承擔約 20% 之缺水率，且若再繼續增加調蓄水池容量也無法使日缺水指數降至 3 以下，可見，若調蓄水池單只依據虎眼一圳剩餘水量作為進水量，無法使缺水情

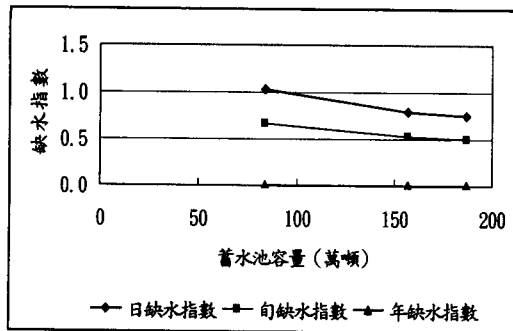


圖 11 調蓄水池容量與各種缺水指數之關係 (增加 0.5cms 進水量)

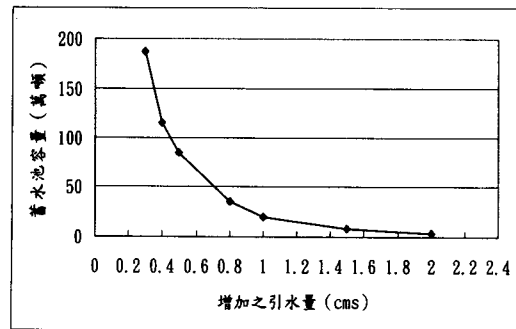


圖 12 增加虎眼一圳進水口水量與調蓄水池容量之關係

形降至 10% 以下。建議蓄水池容量至少增加至 84 萬噸，並增加虎眼一圳之引水量，使日缺水指數降至 1，如此虎眼一、二圳便只需承擔 10% 之缺水風險。

圖 11 是將虎眼一圳多引 0.5cms 供調蓄水池引水的情形。由圖中可得知當調蓄水池容量由 84 萬噸增加至 157 萬噸時，其缺水情形明顯改善，但當調蓄水池容量大於 157 萬噸時，其改善缺水情形趨於穩定，因此再加大容量至 187 萬噸時，雖缺水情形有改善，但其效果並不顯著，所以未來在虎眼一圳多引 0.5cms 供調蓄水池引水時，使缺水風險降至最低，其容量最大興建至 157 萬噸即可。

圖 12 是假設虎眼一圳可引進不同引水量時，其所應興建之調蓄水池容量，由圖中可發現若虎眼一圳只多引進 0.3cms 的水量時，必須要有 187 萬噸之調蓄水池容量，才可使缺水情形降至本研究訂定之標準以下，而進水量增加至 2cms 時，則只需興建約 4 萬噸之容量，便可使日缺水指數降至 1 以下，但此容量過小，只能滿足農業的缺水情形，因此增加 0.5cms 之引水量較為適當，其所興建調蓄水池容量為 84 萬噸。

4.6 調蓄水池各個方案之優劣比較

調蓄水池的進水量若單靠虎眼一圳灌溉後剩餘的水量才引進蓄存，容量再大也無法使缺水程度降至本研究定的標準以下。表 8 中分別列出各個方案在不同假設下所對應興建調蓄水池容

量與其優缺點，表中當調蓄水池之蓄水量來自虎眼一圳灌溉後剩餘之水量時，在滿足 80% 的缺水量的情況下，則只需興建 49 萬噸之調蓄水池，但此容量必須承擔 20% 的缺水風險與未建調蓄水池前的缺水情況比較，其改善效果並不明顯，若容量增加至 84 萬噸則可使日缺水指數降至 4.53，但因調蓄水池無足夠之進水量可蓄存，所以無法使缺水情形降至 10% 以下。增加虎眼一圳引水量 0.5cms 與新闢一取水口時，84 萬噸之調蓄水池便可使農業日缺水指數降至 1 以下，容量越大風險越低，容量增加至 157 萬噸只是將缺水風險降至更低，若考量經濟效益時，興建調蓄水池容量為 84 萬噸即可。

4.7 調蓄水池經濟效益評估

解決虎眼圳取水口常損壞的方案有二，一為興建固床工，另一方案為興建調蓄水池。興建固床工雖可減少臨時攔河堰損壞的次數，但無法蓄水解決農業缺水的問題，而興建調蓄水池雖不能減少取水口破壞的次數，但可解決灌區農業缺水之苦，而且可將多餘的水供應民生用水，因此這兩種方案各有其優缺點，故本節將評估其經濟效益，以供未來工程人員在選擇工程方案之參考。

根據台中水利會所提供的虎眼一、二圳自民國 80 年至 86 年所需的圳頭修復工程總費用，大約為 5 百 70 萬元 (不包含每年歲修之工程費)。因此若解決虎眼一、二圳取水口損壞，將可省下每年約 80 萬元的修復兩個圳頭的工程費用，將

表 8 各個方案之優劣比較

調蓄水池 蓄水量來源	需興建調蓄水池 容量(萬噸)	日缺水指數	優缺點
虎眼一圳灌溉後剩餘 之水量	49	5.82	農業在承擔 20%之缺水率下,可興建較小之蓄水池容量,但只比原先之缺水率,減少 10%,此容量過小無法將多餘的水量可供其他灌區或民生使用。
虎眼一圳灌溉後剩餘 之水量	84	4.53	農業尚須承受 20%之缺水率。因無足夠水量供調蓄水池蓄存,再加大容量也無法再改善其缺水情形。
增加虎眼一圳引水量 0.5cms	84	在 1 以下	改善農業缺水問題達到可容忍之程度,但無法供應多餘的水量移作他用,而無經濟效益可言。
新闢一取水口引進 2cms	84	在 0.01 以下	農業缺水率降至 0.01%,幾乎可滿足其缺水量,並每日可供應約 13 萬噸之水量供應民生使用或未來五福圳等灌區使用。

此工程費視為可獲得之效益。由水利規劃試驗所評估結果得知虎眼一圳取水口附近較不適合興建固床工,因該取水口處的河道較寬且若興建固床工在大雨來時反而可能會因水量大增,而增加取水口損壞的次數,故水利規劃試驗所提議將只在虎眼二圳取水口處興建固床工,其費用大約需 2 千 5 百萬元(經濟部水利處, 2000)[12]。故興建固床工可獲得之利益,便是虎眼二圳取水口每年修復取水口的工程費約 40 萬元,所固床工的壽命必須能維持 60 年,才有淨收益可言。

水利規劃試驗所評估興建調蓄水池需工程費約 1 億元,但因開挖可獲得標售土方約 5 千萬元的利潤,因此若興建調蓄水池可獲得的利益包含標售土方的利潤以及若供應給民生用水所獲得之利潤,而負擔的成本則為興建調蓄水池的成本與每年取水口修復的工程費。依分析結果得知調蓄水池最少可供應給民生的水量為 13 萬噸/日,以 1 元/噸視為供應民生用水所獲得之利潤,因此一年中供應每日 13 萬噸,將可獲得約 4 千 7 百萬元。將興建固床工與興建調蓄水池兩種工程方案,假設 10 年期間其可獲得之利益於表 9,在此未考慮興建淨水廠與管線維修之費用,以及新闢取水口的工程費,且也不考慮時間因素之影響。

興建調蓄水池後將多餘的水量供應給民生用水,將在一至兩年便可回收其成本,於 10 年後可獲得的淨收益約為 4 億 2 千萬元。但興建固

表 9 興建固床工與調蓄水池所需之成本與效益
(10 年總計之現值) (單位:千萬元)

方案		興建 固床 工	興建調蓄 水池不供 應民生	興建調蓄 水池並供 應民生
效 益	1. 節省取水工 損壞之工程 費	0.4	-	-
	2. 標售土方	-	5.0	5.0
	3. 供應民生用 水之所得	-	-	47.5*
成 本	1. 工程費	-2.5	-10.0	-10
	2. 取水工損壞 之工程費	-	-0.8	-0.8
淨收益		-2.1	-5.8	41.7

*: 未考慮興建淨水廠及管線之費用

資料來源: 經濟部水利處水利規劃試驗所提供相關資料與自行整理

床工除了可節省取水工的修復費並無法獲得更多的收益。雖興建調蓄水池的其工程費較高,對於現今水資源不足情況,能積蓄平常流入大海的水量,以獲得多餘的水源供給民生與農業用水,便可獲得較多的收益,使興建調蓄水池更具有經濟價值,對人民可獲得的利益亦是相當大的。

五、結論與建議

1. 本研究提供決策者在滿足不同風險下所應興建的調蓄水池容量,其中最佳的方案是

在台中水利會目前規劃的虎眼一圳附近浮覆地，興建一容量為 84 萬噸之調蓄水池，並在虎眼一圳上游新闢一取水口，供應調蓄水池引水，以積蓄平常多於的水量，便可解決虎眼圳灌區缺水的問題，如此調蓄水池可獲得穩定的進水量，使興建的調蓄水池發揮其最大的效益，除了可使虎眼一、二圳灌區的農業幾乎不缺水，又可供應其他灌區或民生用水約 13~15 萬噸水量。將多餘的水量供應民生用水，在技術與經濟上尚須進一步評估與考量，未來可能需要跟石岡壩上游以交換用水的方式取得水源，以將多餘的水源供應其他灌區或民生用水使用。

2. 由於興建水池成本相當高，若單只供應農業用水，其經濟效益相當低。本研究依據水利規劃試驗所提供之相關資料，假設調蓄水池之水權未來為農田水利會所有，且未來若在虎眼圳附近興建自來水廠，農田水利會可將平日蓄存多餘之水量，提供給自來水廠處理。調蓄水池每日約可供應 13 萬噸水給民生用水，若以 1 元/噸之價格提供原水。簡單的經濟評估後，每年可多 4 千多萬元的收入，如此一來，便可藉由提供原水所獲得之收入，而可在二至三年回收建造調蓄水池之成本。
3. 921 大地震之後，石岡壩損壞無法調蓄當天德基水庫集中在六小時發電所釋放出的發電尾水量。本研究模擬未來石岡壩若能無法恢復蓄水功能，上游台電水庫發電尾水量無石岡壩調節放水，流量直接流往下游，將造成農業用水無法適時適量取得水量，且將增加下游圳頭取水口發生故障的次數，模擬結果得知當流經石岡壩的水量大於 69cms，下游的取水口極可能遭沖毀而損壞，其發生故障的次數約增加百分之二十五。
4. 評估石岡壩下游農業取水口可引進水量的情形時，由模擬結果得知石岡壩一日的總放水量，可得知下游取水口多引 2cms 之水

量，是可行之方案，但目前因無法取得取水口處之大甲溪流量相關資料，因此取水口處是否會因地形或河道過寬的影響，而無法多引進水量供調蓄水池使用，未來可進一步取得取水口可正常引進之水量分佈情形，帶入目前建立之調蓄水池模擬模式中，使增加取水口引水量之假設條件更加完整。

5. 本研究評估調蓄水池的蓄水量除了供應農業用水外，只評估調蓄水池供應給民生用水之可行性與可獲得之利益，未來可進一步評估調蓄水池若做他用的可行性。例如未來評估調蓄水池若以跨河的方式供應五福圳故障時的水量，對改善五福圳缺水情形的幫助。
6. 於虎眼一圳浮覆地附近規劃調蓄水池，實際應用上尚須進一步考量洪水對位於浮覆地調蓄水池的影響，且 921 地震後大甲溪的含砂量明顯增加。因在虎眼一圳附近並無設置量測含砂量的觀測站，後續可分析目前大甲溪含砂量對調蓄水池壽命等影響，未來若有更佳可興建調蓄水池的位置，可應用此評估流程與方法再模擬更合適的操作規則與容量。本研究目前以日為模擬期距，作為大甲溪水資源模擬的單位，以一天總供水量而言，對於下游的需水要求尚可滿足，因石岡壩損壞若以定時定量的需水要求，可能造成缺水之情形。

誌謝

本文係取材自台中水利發展基金會委託辦理之「大甲溪下游調蓄水池與石岡壩聯合應用營運操作規則之研究」計劃成果（2000）。研究期間承蒙台中農田水利會、水利規劃試驗所相關主管及承辦人員，與各評審委員提供寶貴意見及資料，在此一並誌謝。

參考文獻

1. Buchberger, S.G. and Maidment, D. R., Design of wastewater storage ponds at land treatment

- sites. I. Parallels with applied reservoir theory. Journal of Environmental Engineering v 115, n 4, (Aug, 1989), p. 689-703.
2. Hashimoto, Tsuyoshi, Jery R Stedinger, and Daniel P. Loucks, Reliability, Resiliency, and Vulnerability Criteria for Water Resources System Performance Evaluation, Water Resources Research, 18(1), pp.14-20, 1982.
 3. Hufschmidt, M. M., and M. B. Fiering, Simulation Techniques for Design of Water Resources Systems, Harvard University Press, Cambridge, Mass., 1966.
 4. Maass, A., M. M. Hufschmidt, R. Dorfman, H. A. Thomas, Jr., S. A. Marglin, and G. M. Fair, Design of Water-Resource Systems, Harvard University Press, Cambridge, Mass., 1970.
 5. Su, Ming-Daw, Rangesan Narayanan, Trevor C. Hughes and A. Bruce Bishop, Evaluation of Municipal Water Supply Operating Rules Using Stochastic Dominance, Water Resources Research, 27(7), pp. 1519-1527, 1991.
 6. 台灣電力公司, “大甲溪發電廠水路操作規則”, 大甲溪發電廠, 民國 88 年 10 月。
 7. 胡文章, “線性規劃在水庫規劃及操作上之應用”, 台灣水利二十五卷一期, 1977。
 8. 陳維英, “水庫即時操作運用方法推導及評估之研討”, 台灣大學農業工程研究所碩士論文, 1994 年六月。
 9. 張王黎方, “水庫系統最佳營運及風險分析”: 大甲溪水資源應用之研究, 國立台灣大學環境工程學研究所碩士論文, 民國八十九年六月。
 10. 黃金山, “台灣水庫規劃缺水忍耐標準之探討”, 第三屆水利工程研討會, 淡江大學, 1986 年, pp.51-64。
 11. 經濟部水利處, “鯉魚潭水庫與石岡壩水源運用檢討報告”, 經濟部水利處中區水資源局, 1999 年。
 12. 經濟部水利處水利規劃試驗所, “大甲溪虎眼圳取水改善規劃報告”, 經濟部水利處, 2001 年 1 月。
 13. 趙淳霖, “可靠度工程導論”, 科技圖書股份有限公司, 1989 年。
 14. 顏本琦、徐享崑、郭振泰, “水資源風險與可靠度分析之簡介”, 台灣水利第四十卷第四期, 1992 年 12 月, p1-11。
 15. 蕭政宗, “單一水庫系統缺水特性之探討”, 台灣水利第四七卷第二期, 1999 年 6 月, p.72-91。

收稿日期：民國 91 年 11 月 22 日

修正日期：民國 92 年 1 月 28 日

接受日期：民國 92 年 2 月 17 日