

第一篇

『生態入滲池』之實驗與法制化研究

第一章 緒論

第一節 研究計畫背景與目的

近來台灣每逢颱風季節，常造成土石流災難與都市淹水，到了令人怵目驚心地步。過去我們對於都市防洪的觀念，都希望把自家的雨水盡速往鄰地排出，並且認為政府必須設置足夠的公共排水設施，盡速把都市雨水排至河川大海。這種「以鄰為豁」的想法，造成了都市公共排水設施莫大的負擔，每到大雨，總有低窪住家匯集眾人之雨水而淹水。密集型並分散設置之濕地系統除了可以輔助都市污水處理廠之不足，亦可結合都市綠帶、藍帶系統成為都市親水、貯水空間，達到休憩、環保與蓄洪效果。

事實上這種不考慮土地保水、滲透、貯集的治水對策，是一種很不生態的防洪方式。我們常把水池埤塘填塞，把地面包覆不透水的水泥瀝青，讓大地透水與分洪的功能喪失，再耗費鉅資建設大型公共排水與抽水站來解決洪水之末端處理。這種巨型化、集中化的防洪設施常常伴隨很大的社會風險。歐美最新的生態防洪對策，均規定建築及社區基地必須保有貯集雨水的功能，以更經濟、更生態的小型分散系統進行源頭分洪管制，而達到軟性防洪的目的。有些美國都市甚至規定公共建築物之屋頂、車庫屋頂、都市廣場必須設置雨水貯集池，在大雨時緊急貯存雨水量，待雨後再慢慢釋出雨水。這種配合景觀、都市、建築基地的保水設計水法，就是以分散化、小型化、生態化來替代過去集中化、巨型化、水泥化的治水方式，不但能美化環境，又能達到都市生態防洪的目的。

生態入滲池設計，本研究群過去在「都市生態貯留水循環技術之研究」中，曾有廣範初步調查，為了進行「生態入滲池」之實驗必須設置儲水槽與動力馬達，藉助人造雨場設備，以模擬實際降雨情形，及模擬解析雨水入滲速率，測試地表逕流與入滲參數，作為後續治水、防洪及水資源再利用之基礎研究。

圖 1-1 巨型化、集中化的防洪設施常伴隨極大的危險性

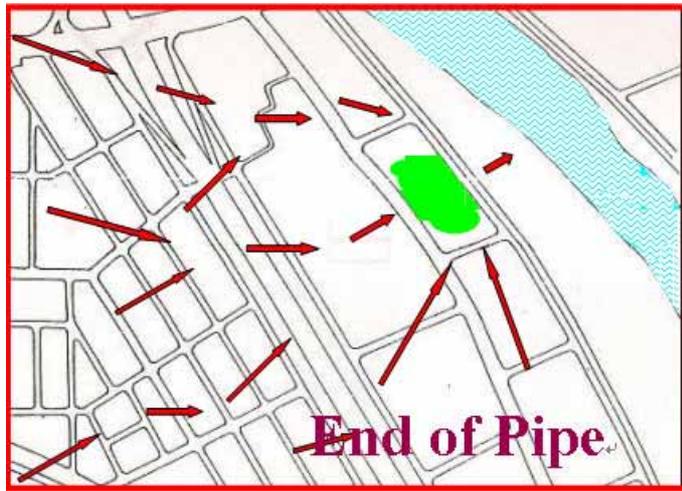
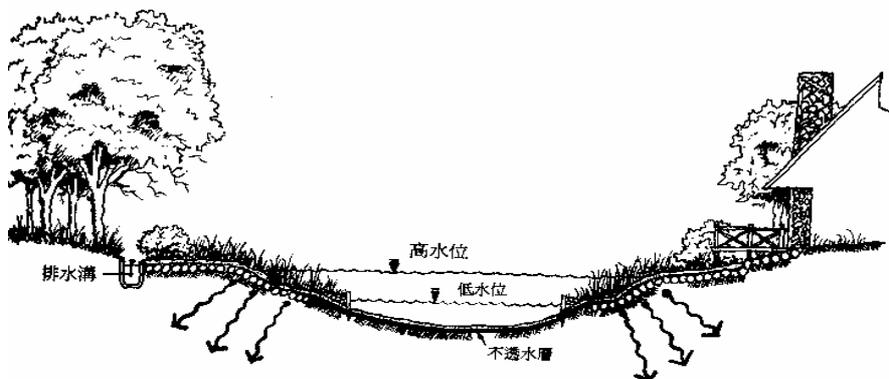


圖 1-2 分散化的雨水貯集池滲透是生態防洪的智慧



圖 1-3 生態滲透水池示意圖



第二節 研究計畫內容

生態入滲池

1. 生態入滲池實驗調查

建立本土性氣候與地質條件之生態滲透池貯集滲透性能之研究，探討影響入滲之各種變因，如：降雨強度，降雨延時、土壤滲透係數、地下水位...等變因。

2. 生態池入滲設置條件評估

以台灣各地降雨資料進行生態入滲池性能分析，並設有人工降雨器，模擬實際降雨情形；探討生態入滲池之地質影響因素及選址原則，如地下水位、土壤種類等因素，發展適於台灣之生態入滲池設置容量計算方法。

3. 生態入滲池實驗及相關參數獲取

以生態入滲池實驗所獲得的資料建立本土入甚實驗相關數據資料蒐集，過去以巨型化、集中化的防洪設施常常伴隨很大的社會風險，本計畫將建立生態入滲池保水性能等本土化數據，生態入滲池配合景觀、都市、建築基地的保水設計手法，即分散化、小型化、生態化來替代過去集中化、巨型化、水泥化的治水方式，不但能美化環境，又能達到都市生態防洪的目的。

4. 生態入滲池景觀化與維護管理課題

藉由生態入滲池實驗和人工降雨器設備，進行水循環模擬解析，由此解析將可分析、歸納出生態入滲池相關性能變數，可作為未來「生態入滲池」設計規範之本土化資料基礎，進一步研擬生態入滲池技術設計技術、施工與維護管理規範，並建議修改建築技術規則，推動生態入滲池設計法制化。

圖 1-4 路邊安全島綠地之生態入滲池



圖 1-5 相當於生態滲透池的校園貯留滲透



第三節 研究設備及進行步驟

1. 生態入滲池實驗解析

本實驗場建立「人造雨場設備」，於實驗場進行人工降雨模擬實驗，以模擬實際降雨情形，並模擬解析雨水入滲速率。經由實地模擬降雨實驗設計，並收集數據加以進行分析，以期提供未來相關保水政策擬訂之依據。

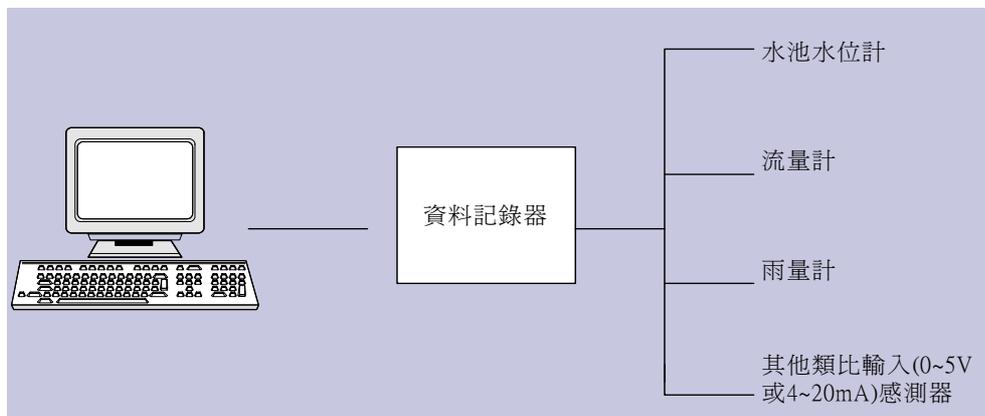
圖 1-6 以灌水實驗解析雨水入滲速率



圖 1-7 人工雨場模擬降雨實驗



圖 1-8 實驗記錄流程圖示



2. 生態入滲池規範建立

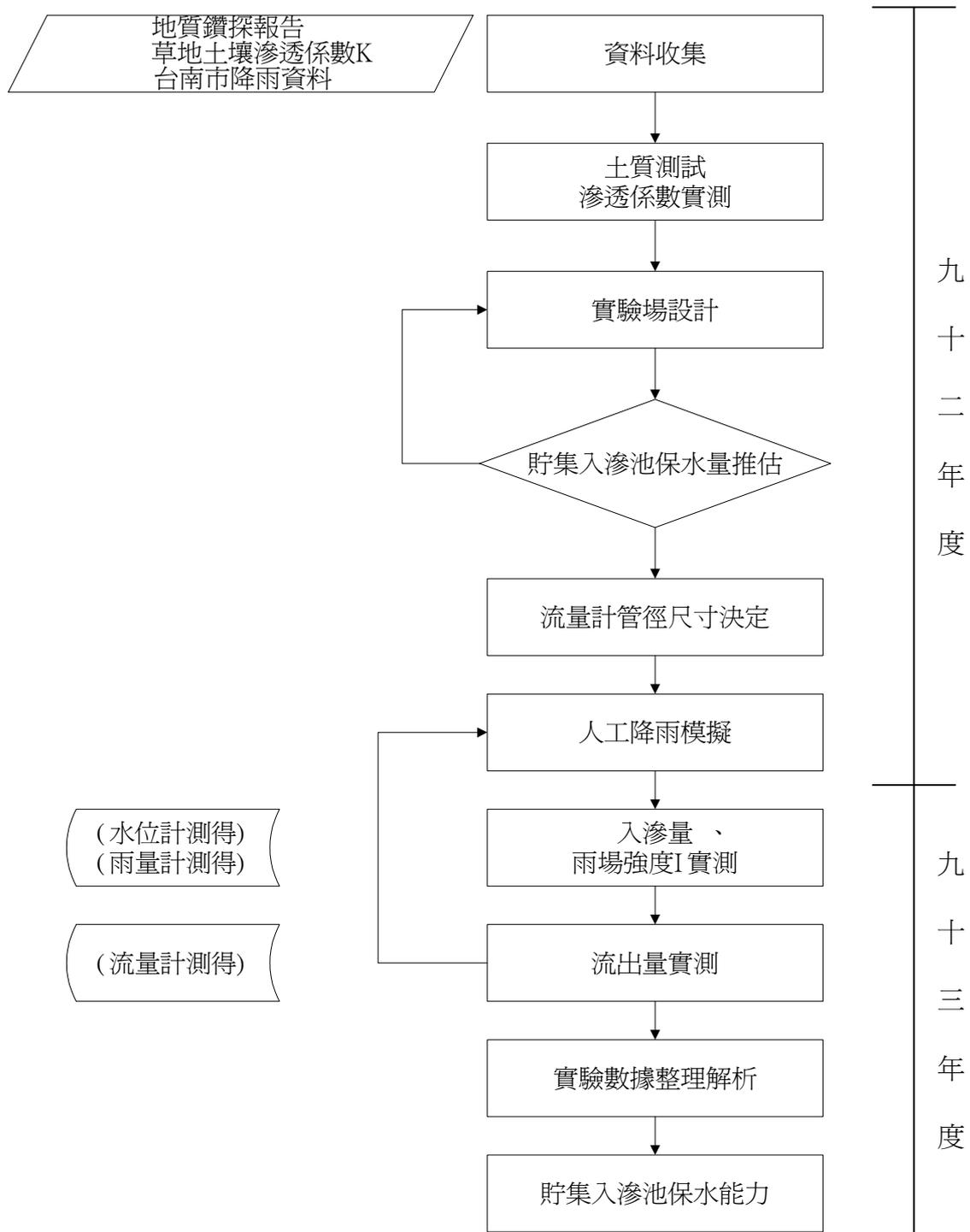
本研究蒐集貯集入滲池保水性能數據並分析，期望能以建築的觀點出發，探討降雨時在小型建築基地內以「貯集入滲池」的手法增加土地保水能力，並計算貯集滲透雨水量多寡，以期將雨水短暫貯集於基地內，減輕公共排水設施的負擔，建立台灣本土的生態入滲池管理規範。

目前台灣過多不透水設計，使大地喪失良好吸水、滲透、保水的能力，在土地使用集約的台灣，適合發展多目的使用的貯集入滲池，平時可做廣場、停車場、公園等用途使用，又可提供暴雨貯集滲透之用途，故建立本規範是勢在必行。

第四節 研究架構

生態入滲池

圖 1-9 生態入滲池研究架構圖



第二篇

『人工濕地污水處理系統』的性能
與公共衛生之研究

第一章 緒論

第一節 研究計畫背景與目的

建築及社區基地保有貯集雨水的能力，以更經濟、更生態的小型分散系統進行源頭分洪管制，是歐美最新生態防洪的作法。其具體方法是在基地內廣設雨水貯集水池，有些甚至作成兼顧美學的景觀花園水池，以便在大雨時貯集洪峰水量，而減少都市洪水發生。然而，由於基地所在位置之氣候條件不同，景觀生態水池完全仰賴雨水收集做為唯一水源，實行上有困難。在先進國家的作法，將生活污水淨化回收成為補充水源，挹注生態水池，避免為了維持生態水池基本水位而抽取地下水或補充自來水之違反生態作法。於是生活污水如何以生態淨化方法（人工濕地法）來達到去除污水當中的有機污染物，遂成為本研究之重點。

人工濕地之技術發展在國外有三十年以上之發展史，其處理效率與技術已達成熟階段，在先進國家並且廣泛應用於處理生活污水、社區污水、農牧業污水、垃圾掩埋場滲出水及重金屬污染等多樣屬性之污染源。人工濕地除了具有淨化水質之性能，在人文意義上，尚可進一步結合社區參與、凝聚居民意識，朝城鄉永續發展邁進；在生態意義上，可結合景觀資源、生態復育、教育學習、等促進生物多樣性（Biodiversity）之功能，朝景觀化人工濕地及水資源再利用發展。景觀化人工濕地可以解決國內都會型社區及鄉村型社區生活污水的污染問題，並且契合公私部門推動「城鄉風貌改造」、「生態工法」、「綠建築」、「水資源再利用」、等環保政策。人工濕地之設置與用途因地制宜，水資源再利用是明顯而立即之效果，然而卻也衍生環境風險及公共衛生議題，不得不正視。藉由本研究之實場操作探討人工濕地之去污性能，並且評估公共衛生議題，提出具體可行之對策，以作為水資源再利用基礎研究之一。

第二節 研究計畫內容

人工濕地

應用景觀化人工濕地系統處理生活污水與水資源再利用之研究，機能上探討濕地生態自然淨化處理能力及水資源再利用之法令限制；在公共衛生上採用指標性微生物（大腸桿菌）之濃度檢測，以及配合高雄醫學大學之細菌檢測，以保障國民健康、環境衛生品質。整體計畫內容朝整合建築學門、環境工程及公共衛生專門知識，以創造優質綠建築水循環系統。本研究之景觀化人工濕地研究計畫有以下內容：

1. 人工濕地淨化機制之探討

本土性氣候條件之人工濕地自然淨化之機制研究，對於各種污染物之去除能力數據收集。包括人工濕地污水水力負荷、水力停留時間之設計參數，以及不同季節之反應速率等數據。

2. 建構人工濕地系統（對照組）

藉由九十二年度內政部「綠色廳舍改造計畫」於成功大學建築系建構之人工濕地設施，在原有表面流動式濕地系統（Free water surface flow system, FWS）旁增設一組所謂表面下流動系統（Subsurface flow system, SSF）之實驗渠道，作為與原系統去污及景觀效益評估之用。人工濕地淨化生活污水必須符合國家相關法令標準後，可作為後續中水再利用，以降低自來水使用率。

3. 景觀化人工濕地之研究

探討人工濕地是否可結合景觀水池成為優質水域空間。本研究藉由事先周密的污水質量評估，提出淨化功能估算，據以實施設計與施工，並且透過實驗期間（日常使用階段），所面臨維護管理、水生植物採收、病蟲害及水媒致病菌等問題，作綜合性評估。本研究以人工濕地生態淨化污水效益及確認公共衛生無虞，提出實驗結果，可作為水資源再利用參考。生態污水處理觀念，一反過去將污水處理不欲人知、藏諸後院之弊病，化為景觀化、公園化、親和力強之多功能戶外空間。

4. 景觀化人工濕地公共衛生議題研究

本研究實測人工濕地系統淨化校園生活污水的效率，並以『水污染防治法』所訂的國家『放流水標準』、『地面水體分類及水質標準』及行政院農委會『灌溉用水水質標準』探討解析，同時並針對人工濕地微生物中的大腸菌類，及病媒蚊幼蟲孑孓等來探討濕地水域之公共衛生議題，以作為未來設置景觀化人工濕地及污水回收再利用參考。

圖 1-1 人工濕地實驗場



第三節 研究設備及進行步驟

1. 建構人工濕地實驗系統

本研究之人工濕地系統為九十二年度內政部建築研究所建置於成功大學建築系之水池，系統主要是自由水層系統（FWS）系統，區分為A池50 m²、B池50 m²。今年在A池旁另行設置表層下流動系統（Subsurface flow system, SSF），面積50 m²。設置目的在於比較兩種人工濕地系統之差異，包括淨化效率、反應數率、公共衛生及景觀分析。系統建構基本性能要求，以化糞池之污水BOD₅濃度降至環保署標準為原則。

圖 1-2 SSF 系統及 FWS 系統



圖 1-3 人工濕地淨化段



2. 人工濕地系統實測解析

本實驗場人工濕地建造完成，已開始陸續收集相關水質檢測數據，經由數據分析檢討，並針對淨化機制、效益評估、管理維護及相關公共衛生議題加以研究，以期對未來建立景觀化人工濕地操作技術規範有實質的助益。

3. 人工濕地公共衛生議題解析

在公共衛生問題，本研究針對人工濕地微生物中的大腸菌類濃度作檢測，包括總大腸桿菌群（Total Coliform Group, TC）及糞便型大腸桿菌（Fecal Coliform, FC），及病媒蚊幼蟲孑孓之控制，來探討濕地水域之公共衛生議題。此外配合內政部建築研究所委託高雄醫學大學所做細菌微生物檢測，作配合調查及比對實驗數據。

在水質檢測方面，根據水質檢測計畫，每週採集各檢測點水樣，送交嘉南藥理科技大學環境工程及衛生系作水質分析。另外不定期委託環保署認可之水質檢測單位，作數據交叉比對，以確保人工濕地的公共衛生安全無虞。

在病媒蚊方面，相關文獻及本研究團對觀察得知，蚊子數量之控制方法為維持 BOD 負荷率在 110kg/ha/d 以下，以避免可能發生厭氧狀況的淤塞區（Ronald L. Droste），因為蜻蜓與水生甲蟲等孑孓的天敵必須在好氧的環境下生存。成大人工濕地 AB 池的 BOD 負荷率一直維持在 80kg/ha/d 以下，水生昆蟲存活情況良好，但為進一步保證不讓孑孓滋生，人工濕地中仍放養大肚魚及鬥魚等食蚊魚來控制孑孓。

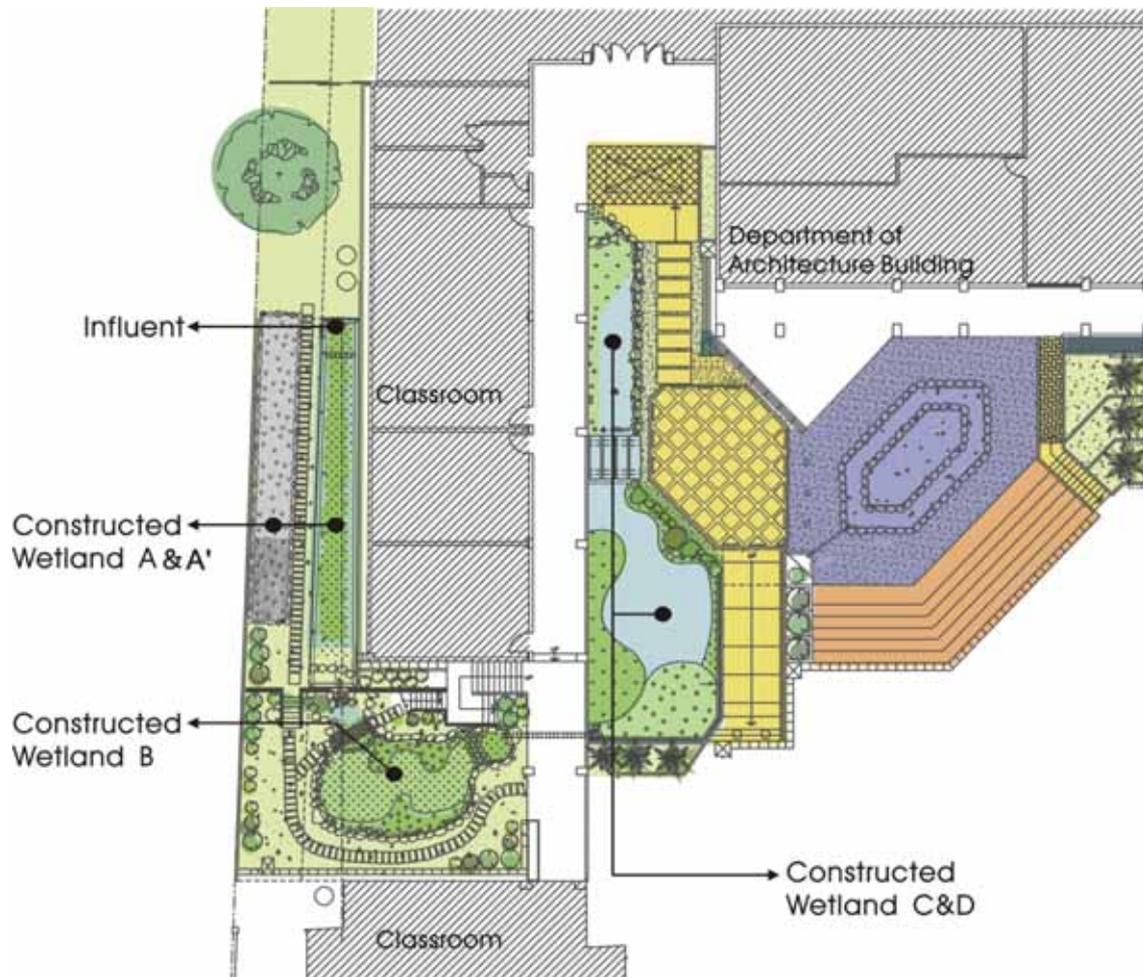
關於食蚊魚在人工濕地環境生存狀況，有賴於魚類耐受性的實驗來求證。大肚魚、三星鬥魚及蓋斑鬥魚三種魚是人工濕地常見魚類，未來後續研究可先針對此三種魚類對於溫度、溶氧及氨氮濃度等進行耐受實驗。

4. 人工濕地維護管理議題解析

一個優良的人工濕地並不是建立完成後即擱置在那置之不理的，人工濕地建設完成後必須要有相關的維護管理機制建立，才能使整個人工濕地系統的運作更加的完善。

目前成大人工濕地設置已經近一年，目前已收集相關基本資料，對於整個人工濕地系統的操作管理、維護管理及人工濕地相關緊急處置方法等，有初步的研究成果，可作為建立維護管理規範及濕地管理維護參考。

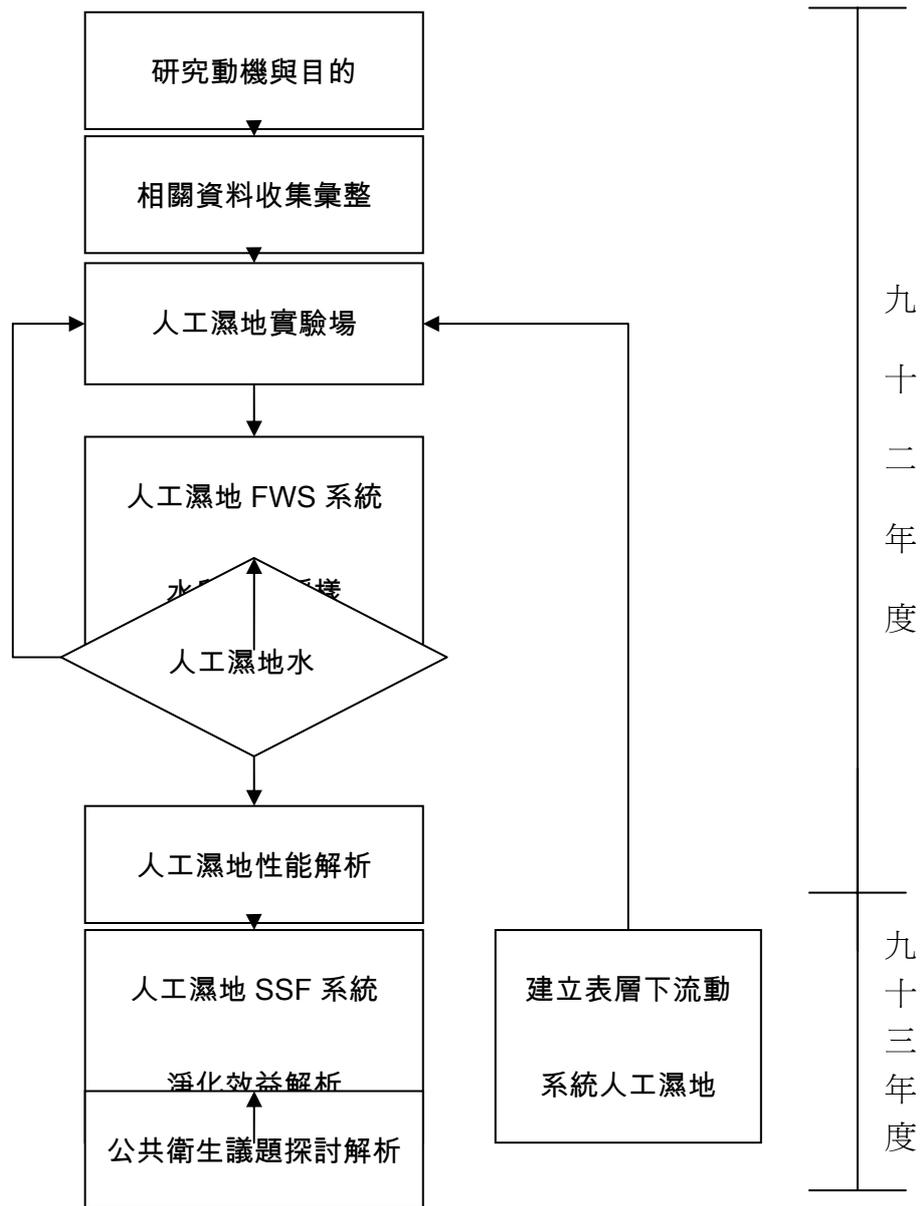
圖 1-4 成功大建築系人工濕地暨生態入滲池實驗場配置



第四節 研究架構

人工濕地

圖 1-5 人工濕地研究架構圖



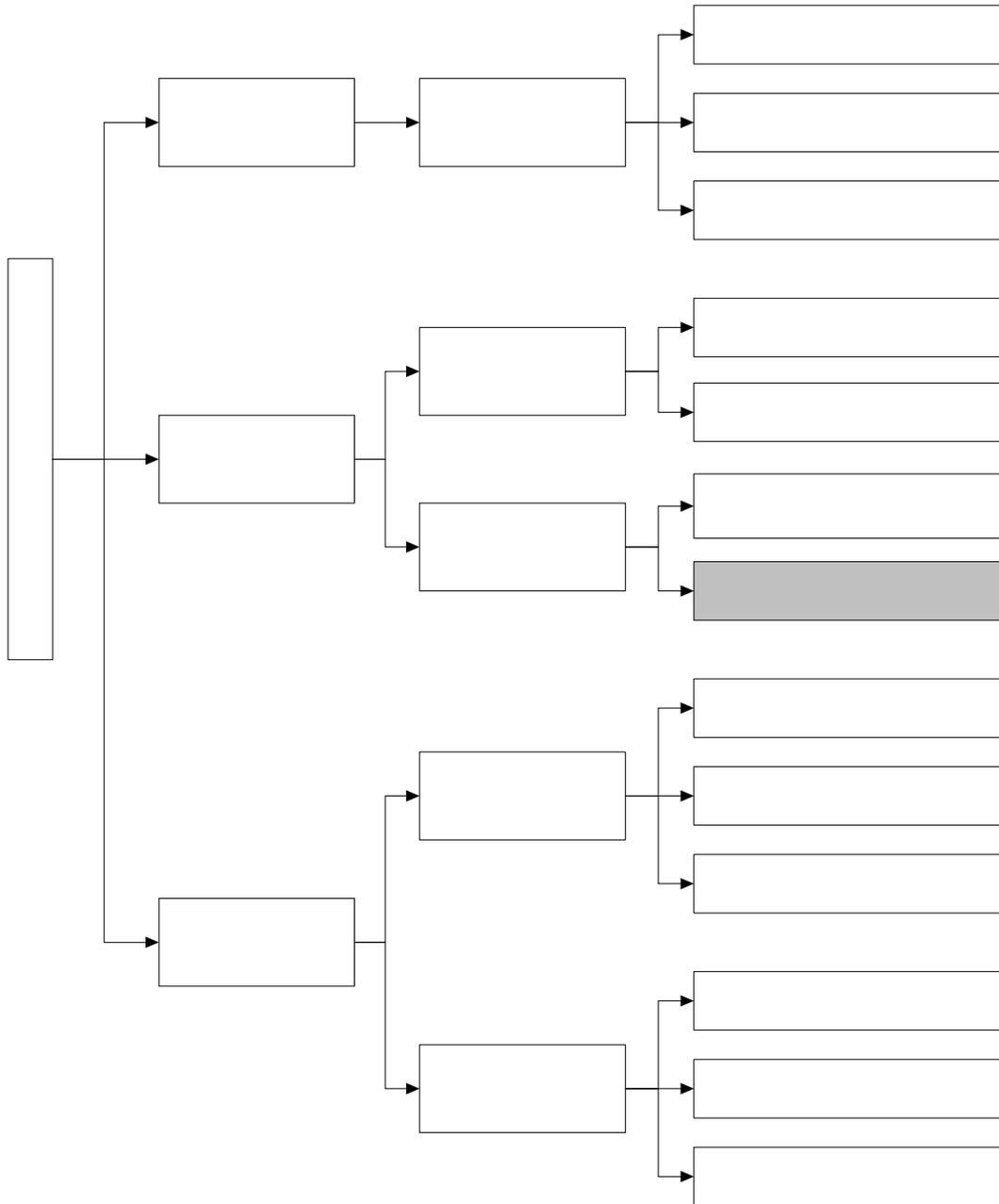
第二章 研究理論與方法

第一節 生態貯集入滲池文獻回顧

「地表和皮膚一樣，不能呼吸，就沒有生機！」學者對都市環境品質惡化提出警告，目前台灣地區大量不透水鋪面設計，增加地表逕流量，超出排水系統設計容量，造成淹水，政府與民間建設部門不能坐視不管；如果建設是必要的，具體的都市生態貯集水循環規劃設計手法，便成了當務之急，且應予以推廣的。

貯集滲透技術可以促進大地之水循環能力、改善生態環境、調節微氣候、緩和氣候高溫化現象，並進而降低公共排水設施、減少都市洪水發生率。且雨水滲入綠地土壤可直接供給植物成長，對土壤的微生物活動及綠化光合作用有最大的助益。植物的根部活動又可活化土壤、增加土壤孔隙率，對涵養生物環境有所貢獻。為了改善都市生態防洪的功能，透過生態滲透技術，可改善基地涵養雨水的功能，利用自然滲透、孔隙貯集的方式，將雨水短暫蓄留於自然土層中，達到軟性防洪的效果。

圖 2-1 生態入滲池分類整理自
『都市生態貯留水循環技術之研究』



滲透

第二節 『生態入滲池』人造雨場實驗

1. 隔水板設計

為確保集水面積範圍，與排除非人工降雨計製造的水分流入 貯集入滲池，在四周設計組合式隔水板，埋入地下深度 50 公分，與貯集入滲池底深度相同，突出地面 30 公分高，溢流孔位置，高出地平面 10 公分，故池底至溢流面的深度為 60 公分。

圖 2-2 組合式隔水板

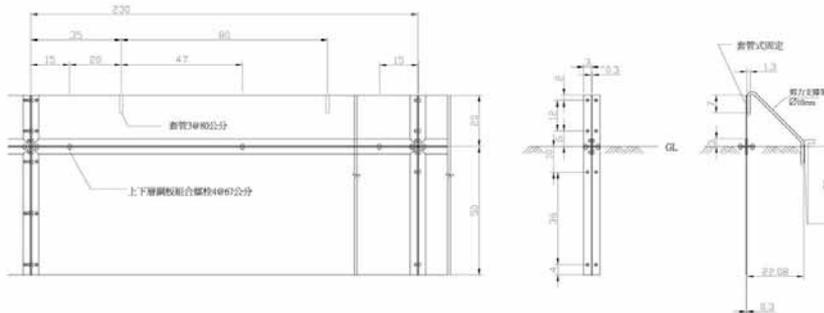
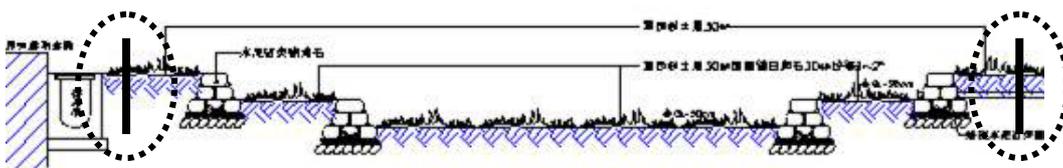


圖 2-3 貯集入滲池剖面圖

隔水板



2. 人工降雨器噴嘴、支架配置說明

本降雨器最大降雨強度 I 可達 100 公釐/小時，控制閥調整噴嘴壓力，改變降雨強度。支架需具輕量化、抗風化、以拆裝極易搬運之特性，方便使用者組裝拆卸與維修等需求。

圖 2-4 人工雨場噴嘴配置說明圖

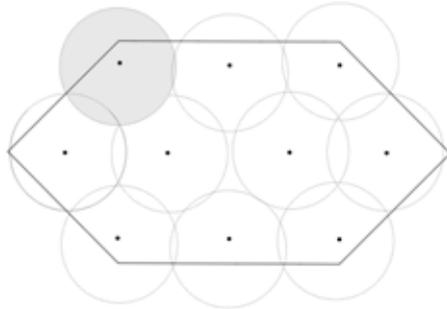
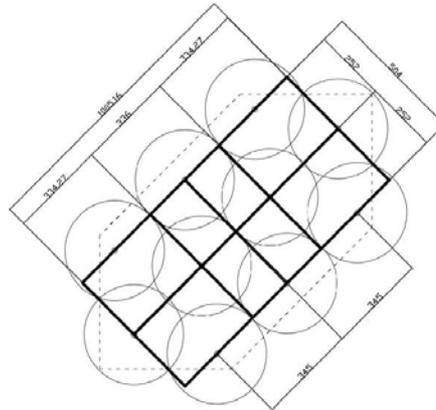


圖 2-5 人工降雨器支架平面圖



3. 試驗場配置說明

滲透池四周以隔水版圍起，溢流孔連接流量計紀錄流出量，池底放置雨量計監測流入水量，水位計量測水位變化推算初始入滲率，並埋入套管監測土壤水分含量。

4. 實驗步驟

實驗依據下列 1 到 5 個步驟逐一進行其步驟說明如下：

- (1) 首先依據水土保持法第 16 條，律
定人工降雨器強度 I 。
- (2) 啟動人工降雨器後，由雨量計測
得降雨強度 I 。
- (3) 當雨水開始入滲土壤後，埋設在
土壤裡的觀測套管，插入未飽和
土壤水分計探測桿，監測分層土
壤水分含量，推算得到出始入滲
率 f 。

圖 2-6 人工降雨器



圖 2-7 雨量筒



圖 2-8 量測土壤水分



圖 2-9 未飽和土壤水分計
主機、測桿

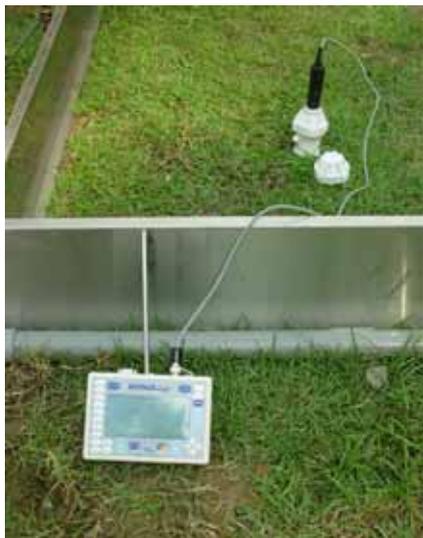


圖 2-10 水位計量測池底
水位變化



假設入滲率隨降雨持續時間而遞減，當土壤水分飽和，池底水位開始上升，由池底放置水位計測得水位變化，推算最終入滲率 $\langle f \rangle$ 。

- (4) 當水位高出溢留孔，由溢留孔流出，流經流量計，由流量計測得流量 $\langle Q \rangle$ 。
- (5) 由上述步驟可得實測之保水量，得到貯集入滲池保水能力。

貯集入滲池實測保水量
為 $IAt - Q$

保水指標中，特殊保水
設計的地面貯集滲透設

施設計保水量 Q_4

$$Q_4 = V + kAt$$

V：貯集體積 (m^3)

k：飽和土壤滲透係數 (m/s)

A：集水面積 (m^2)

t：降雨時間 (t)

I：降雨強度 (m/s) -----量測值，由雨量計測得

Q：測得之流量 (m^3) -----量測值由流量計測得，水位計可測即時
水位，可換算成貯集量

圖 2-11 量計量測溢流之
水量



第二章 研究理論與方法

第一節 人工濕地文獻回顧

2-1-1 人工濕地系統

根據國際水資源協會資料，目前在國際上發展出來的人工濕地，主要有兩大系統，分別是表面流動式（自由水層系統）及表層下流動式（石頭床系統）人工濕地系統。

1. 1970 年代北美洲發展出自由水層系統（FWS, free water surface system）濕地技術
2. 1960-1980 德國發展出表層下流動系統（SSF, subsurface flow system）技術並推展全歐、澳洲、非洲及亞洲（印度及中國）。德國發展利用植物根系處理系統（根系區間法, reed-zoon method, RZM）；1985 英國研發蘆葦床處理系統（reed bed treatment system, RBTS），經過 30 年之推展應用，目前在歐洲及北美洲已分別有超過 500 及 600 個人工濕地系統成功地使用於水污染防治（IWA, 2000）

2-1-2 人工濕地系統簡介

人工濕地係應用天然濕地生態系統中的優點而建造成的處理系統，其具有自然淨化、自行設計（self-design）及永續利用的特性，更具備建造成本較低、營運簡單和操作容易等優點。濕地中的植物具有多孔隙的介質環境，可以提供細菌、生物膜生長所需之環境條件，也可以傳送氧氣於水中供給水中微生物及其他生物使用進而來處理污廢水當中的有機污染物。以下為人工濕地兩種主要系統介紹：

自由水層系統（FWS），此為模擬天然濕地的環境狀態，底部為土壤層約 20~30 公分，並高密度地種植挺水性植物（emergent plants；根生於水底，葉伸出水面，例如燈心草、蘆葦、香蒲等）使其約佔 50% 的表面積；水深約 20~30 公分，進流水則在濕地表層開放性地流動，當水流經植物的莖及根部可行淨化作用；美國大多採用此種系統。

表層下流動系統 (SSF)，為一窪地槽體，充填約 40~60 公分厚的可透水性砂土或碎石作為介質，以此支持挺水性植物的生長，進流水被迫在表層下的砂土間流動，以達到淨化作用；此種系統則是在歐洲、澳洲及南非較盛行。

圖 2-1 自由水層系統 (FWS)

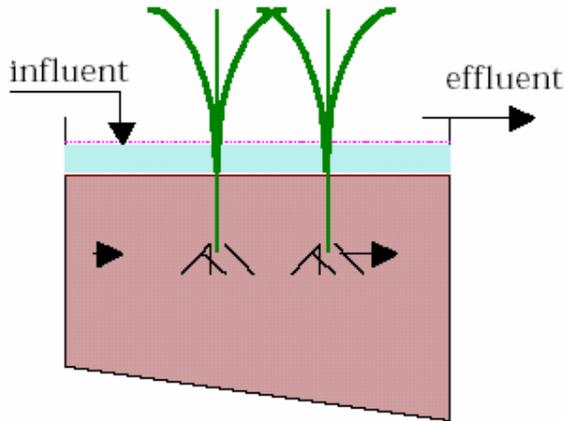
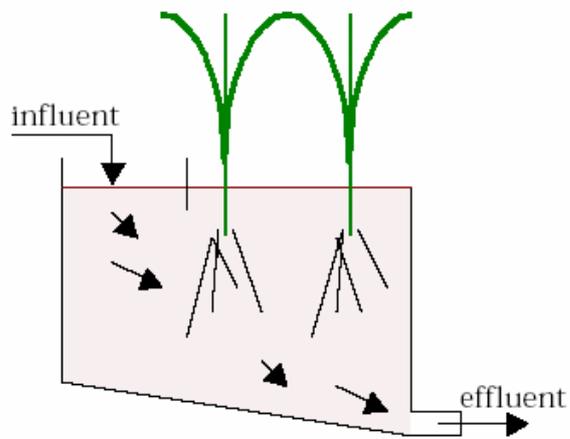


圖 2-2 表層下流動系統 (SSF)



2-1-3 水生植物的功能

1. 淨化污水功能

水生植物(如布袋蓮、水燭、空心菜)具有吸收污染源的效果，工業區設置適當面積的濕地作為淨化池，可以透過水生植物以及底泥物質的化學作用，吸收及分解污染物質，達到淨化水質的效果。建立一個新的人工濕地時，其在整個人工濕地生態環境尚未穩定時，常會發生植栽有明顯稀疏甚至會有死亡的現象產生。因此在選擇植栽種類方面應選擇以耐污性佳、生長快速的植物為先驅物種。

2. 調節氣候功能

水生植物具有降低局部氣溫與局部反光的功能，植物本身具有不同色素可吸收及反射日光中某些波長的能量，因此可以改善當地微氣候。

3. 生產者功能

水生植物在水中及濕地環境扮演生產者的功能，植物體可以提供人類或動物食用如空心菜，亦可提供草食性魚類或水棲昆蟲的食物，許多高等植物的落葉或死亡的植株，也都是水棲小動物的食物或棲所。

4. 生態庇護功能

不論浮水性或固著性水生植物，大部份的水生植物具有葉綠素，可行光合作用吸收 CO_2 並釋放出 O_2 ，供水中的魚類呼吸，枝葉可作為魚類以及其他水棲動物如水鳥庇護的場所。

5. 人為利用功能

水生植物典型的利用方式為插花材料如水燭、風車草，許多浮水性植物可作為人工飼料，漂浮性的布袋蓮由於生長快速而引進台灣，作為餵養鴨豬等家畜的飼料，其他諸如荷花、菱角等植物更是早經人為種植利用的水生植物。

6. 景觀美化功能

水生植物植物體可以減少水面反光，並增添水中景色。許多特殊的水生植物早為人工種植，做為庭園觀賞之用，例如野慈姑、風車草、荷花等植物。台灣原生植物亦有不少種類如台灣萍蓬草、水茄苳、鴨舌草、香蒲等，可進一步推廣為景觀美化植物。(黃朝慶、彭國棟)

建立一個新的人工濕地時，其在整個濕地環境尚未趨於穩定時，常會發生植栽有明顯稀疏甚至會有死亡的現象產生。有鑑於此，在選擇植栽種類方面應選擇以生長較快速、耐污性佳為主要先驅水生植物選種目標。以下為人工濕地耐物性極佳之植物：

布袋蓮 *Eichhornia crassipes*



科名	雨久花科 Pontederiaceae
原產地	台灣全島低海拔山區至平原，向陽沼澤、濕地、水池邊。
用途	庭園濕地、水池美化，可用於清除化學廢料。
特徵	多年生草本，浮水性水生植物。葉根生，葉成倒卵形或菱形，葉柄海綿質，生於泥地無膨大，浮於水面者有明顯膨大。總狀花序，花淡紫色，其中一枚中央有黃斑。

香蒲 *Typha latifolia*



科名	香蒲科 Typhaceae
原產地	中國大陸、日本、台灣水生沼澤地。
用途	公園、校園、庭園濕地、水池美化。
特徵	多年生挺水草本，植株可達2公尺。地下莖匍匐泥中，葉直立，線形，葉長50~100公分，寬2~3公分，基部成鞘狀抱莖。圓形穗狀花序似蠟燭。

大萍 *Pistia stratiotes*



- | | |
|-----|---|
| 科名 | 天南星科 Araceae |
| 原產地 | 熱帶美洲。 |
| 用途 | 公園、校園、庭園水池及濕地極佳的植栽。 |
| 特徵 | 水生，漂浮性，簇生形觀葉植物，葉薄肉質，葉片成倒卵形至扇形，葉全緣波狀，無柄，平行脈，葉背成淺灰綠色。 |

輪傘莎草 *Cyperus alternifolius*



- | | |
|-----|---|
| 科名 | 莎草科 Cyperaceae |
| 原產地 | 馬達加斯加。 |
| 用途 | 公園、校園、庭園水池及濕地極佳的植栽。 |
| 特徵 | 多年生草本植物，可種在水中或土內，株高 40~100 公分。單葉叢生，葉線形，葉長 10~20 公分，寬 0.5~1 公分，葉全緣，革質。 |

空心菜 *Ipomoea aquatica*



科名	旋花科 Convolvulaceae
別名	蕹菜
原產地	台灣全島。
用途	可供食用。
特徵	多年生草本浮水性植物。莖中空有節，葉互生，葉長6-11公分，寬2-4公分，有柄，花為紫色或白色。

2-1-4 人工濕地之去污機制

濕地的水流流速緩慢（水力停留時間較長），容易形成一個良好的沈澱池，對於可沈降的有機物與懸浮物固體具有極佳的去除效果。人工濕地為一水生植物、微生物及相關棲息之生物所構成的生態環境，當中的介質或植物的根、莖系布滿大量生物膜，同時會產生過濾性的去除，而生物可分解或可溶解的有機物亦可藉由生物作用得以處理。

人工濕地在操作上不需要曝氣、攪拌、加壓等人為的動力輸入，亦不需加入任何化學藥劑、介質單體等人造物質，且污染物在人工濕地系統之『生態反應器』中，被去除的機制為多功能的也是全面性的，而且可同時發生，但單靠自然淨化速率較慢、且較為複雜。去除機制除了結合各種物理性、化學性、微生物性等處理外，另外更包括濕地系統中各種植物的攝取作用。以下是CW系統之去污機制與碳及氮之循環模型。

表 2-1 人工濕地去污機制

	淨化機制	去除污染物
1.	沈降(sedimentation)	懸浮固體及微生物
2.	過濾(filtration)	懸浮固體及微生物
3.	吸附(adsorption) 離子交換(ion exchange) 化學沈澱沈積(precipitation)	磷酸鹽、重金屬
4.	微生物礦化作用 (mineralization)及轉化作用 (氨化、硝化及脫硝)	有機質、氨氮、亞硝酸氮 及硝酸氮
5.	同化作用(assimilation)及攝取 作用(uptake)	有機質、氮、磷及重金屬
6.	太陽輻射線作用(radiation)	病原菌
7.	掠食作用(predation)	病原菌

圖 2-3 人工濕地碳循環模型

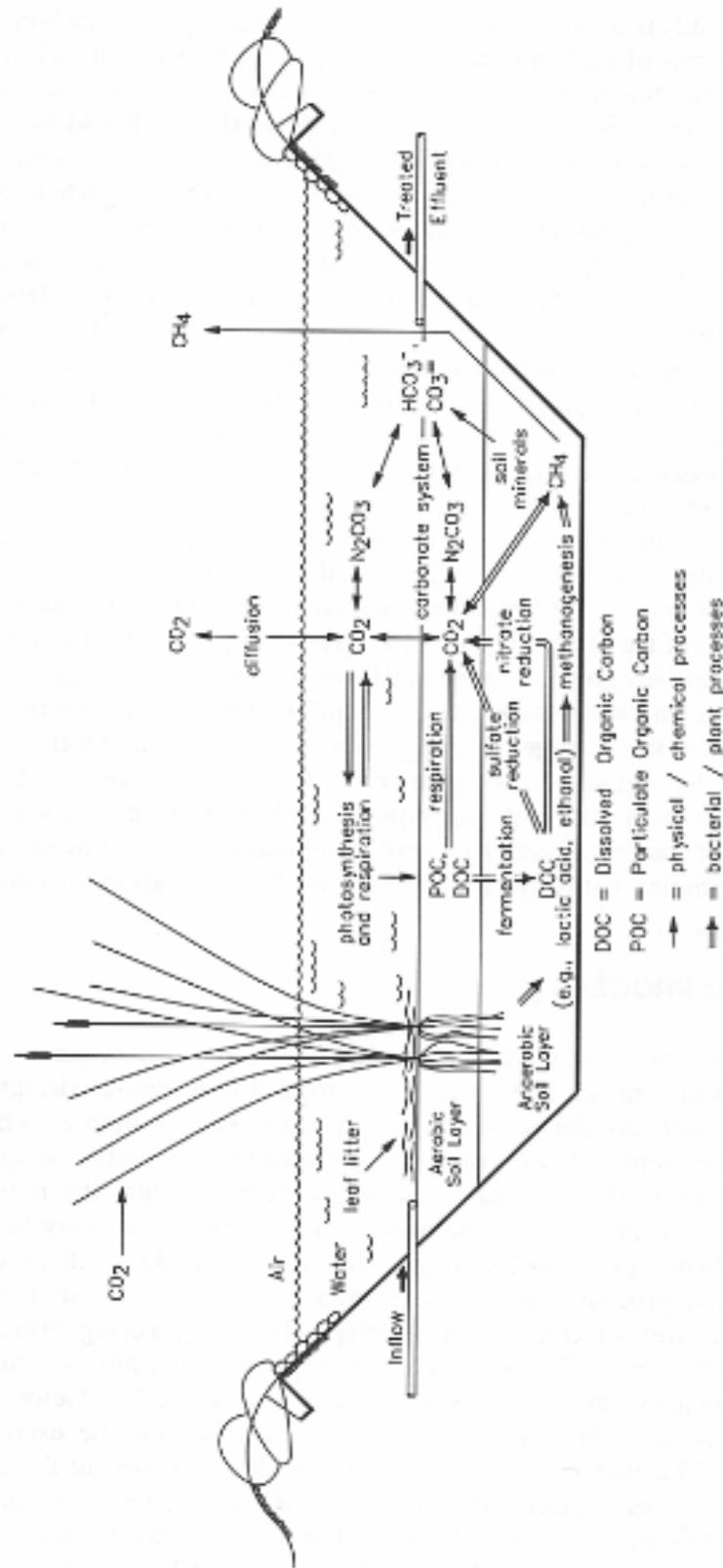
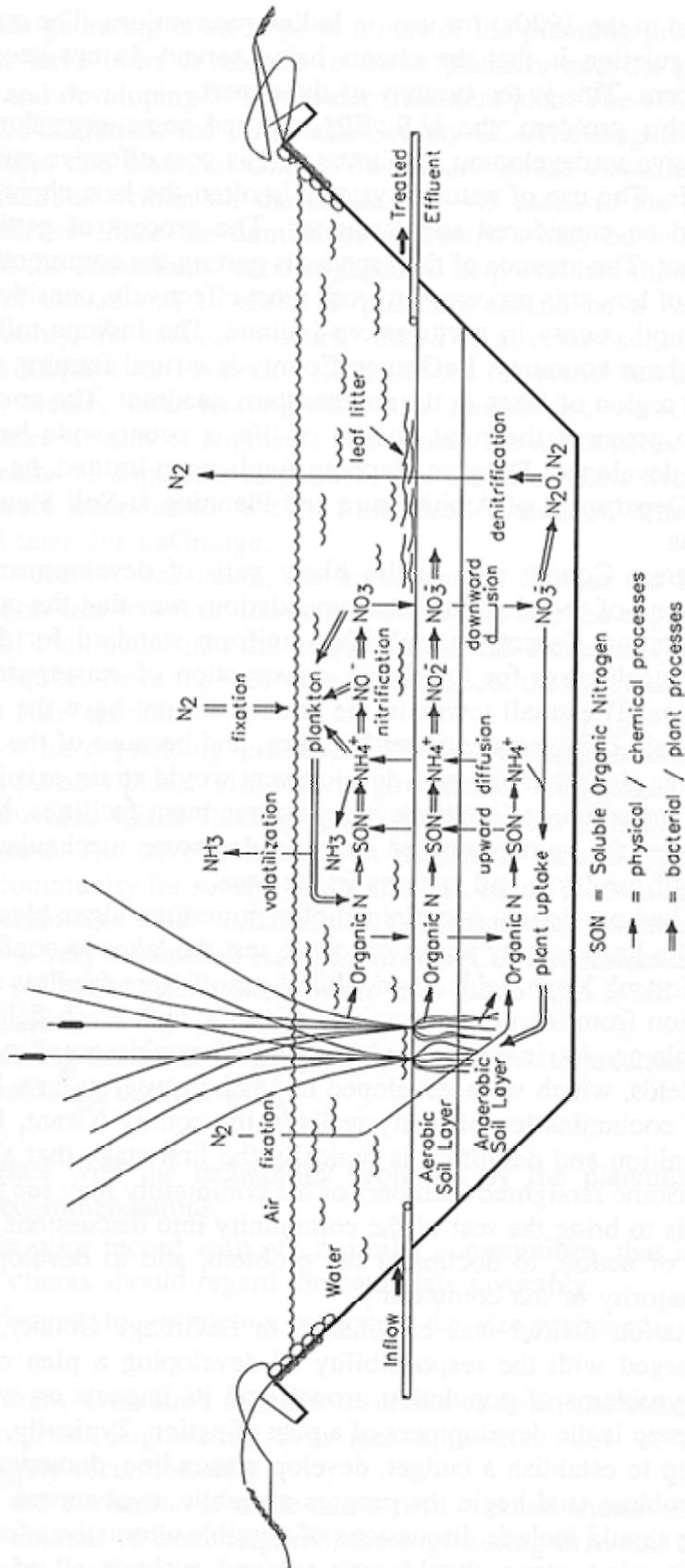


圖 2-4 人工濕地氮循環模型



第二節 人工濕地實驗系統設計

本研究以人工濕地(Constructed wetland, CW)系統來淨化校園污水。藉由內政部建築研究所九十二年度「綠色廳舍暨學校改善計畫」之經費，於成功大學建築系設置全國第一座校園人工濕地實場(Full scale)，並增設一座石頭床人工濕地渠道，以進行濕地不同系統在去污性能、反應速率的比較，並對於人工濕地環境生態作觀察記錄。

從地球環保觀點而言，以人工濕地來淨化污水，是省能源、省資源、無二次公害的生態工法，但也存在未知的環境衛生風險。本研究參考先進國家文獻資料及國內成功案例經驗，極度保守的評估濕地系統的設計參數，包括污染物負荷率、水力停留時間、水力負荷等設計因子，同時也設置了暴雨漫流、緊急排放等安全管理機制。在保障實驗安全的情況下進行淨化效益數據收集與解析。

整個人工濕地系統承接成功大學建築系三棟大樓化糞池排放水作二級處理（污水先經由建築物化糞池作初級處理再引入集水井）。人工濕地系統容量以處理建築系師生 300 人，每日生活污水量約為 3~10 公噸（以最大量設計）設計；並以生化需氧量（Biochemical Oxygen Demand, BOD₅）降到 30ppm 以下（環保署標準）為目標（建築系化糞池初始檢測 BOD 濃度高達 120ppm），採用公式(Craig S. Campbell & Michael H. Ogden, p-101) 如下：

$$As = \frac{Q \times (\ln Co - \ln Ce)}{K_t \times d \times n}$$

As = 濕地面積 (m²)

Q = 流量 (m³/day)

Co = 進流 BOD 濃度 (mg/L)

Ce = 排放 BOD 濃度 (mg/L)

K_t = 溫度修正係數

d = 水深 (0.4 公尺深)

n = 孔隙比 (FWS 濕地水體扣除植物，以 0.9 計算)

；水力負荷率 (hydraulic loading rate, HLR) 是濕地系統中最主要的控制變數，公式如下：

$$HLR = Q / A_s$$

；水力停留時間 (hydraulic residence time, HRT)，公式如下：

$$HRT = volume / Q = (A_s \times d \times n) / Q$$

綜合上述評估，本研究設置之人工濕地用地面積約需 100 m²、HLR = 0.1m/day、HRT = 3.6day。由於建築系戶外空間零星侷促，因此分為兩段濕地串聯，全屬表面自由流動式 (free water surface, FWS) 溼地。第一池直線渠道形，設計上純粹以淨化性能考量，面積 50 m²，為一長 20 m、寬 2.5 m、水深 0.4 m (適合挺水植物生長條件) 的濕地，底部覆土 30 cm，並種植水生植物；第二池橢圓迂迴形，採取性能與美觀兼顧設計，面積 50 m²，為一迂迴渠道，長 10 m、寬 5 m、水深 0.2~0.6 m (適合挺水、浮水及浮葉植物生長條件) 的濕地，底部覆土 30 cm，並種植多樣水生植物。由於現地高程變動，兩段間設計成石磨落水，避免水流飛濺。

目前於第一池旁增設表層下流動系統 (SSF)，面積 50m²，為一長 20 m、寬 2.0 m、深 1.2m 的濕地，底部基質主要為牡蠣殼，牡蠣殼為一良好的人工濕地基質，且其為廢棄材料再利用，對於目前工程上推動使用現地材料或廢棄回收再利用及環保建材而言，具有實質之效果，並在其上種植培地茅。

經過兩段溼地淨化後，排放水引入景觀水池成為補充水源。景觀水池面積 120m²、水深 0.2~0.7m，池中種植三十餘種水生植物，主要以創造生物多樣化 (Biodiversity) 環境為設計重點。景觀水池中水生植物亦需仰賴水中之營養鹽作為生長的依據，因此水質具有持續淨化的效果。

圖 2-5 基質主要鋪設牡蠣殼，並種植培地茅



圖 2-6 於入水口處部份鋪設卵石



圖 2-7 表層下流動系統
施工現況



圖 2-8 表層下流動系統完工



圖 2-9 人工濕地剖面圖 A

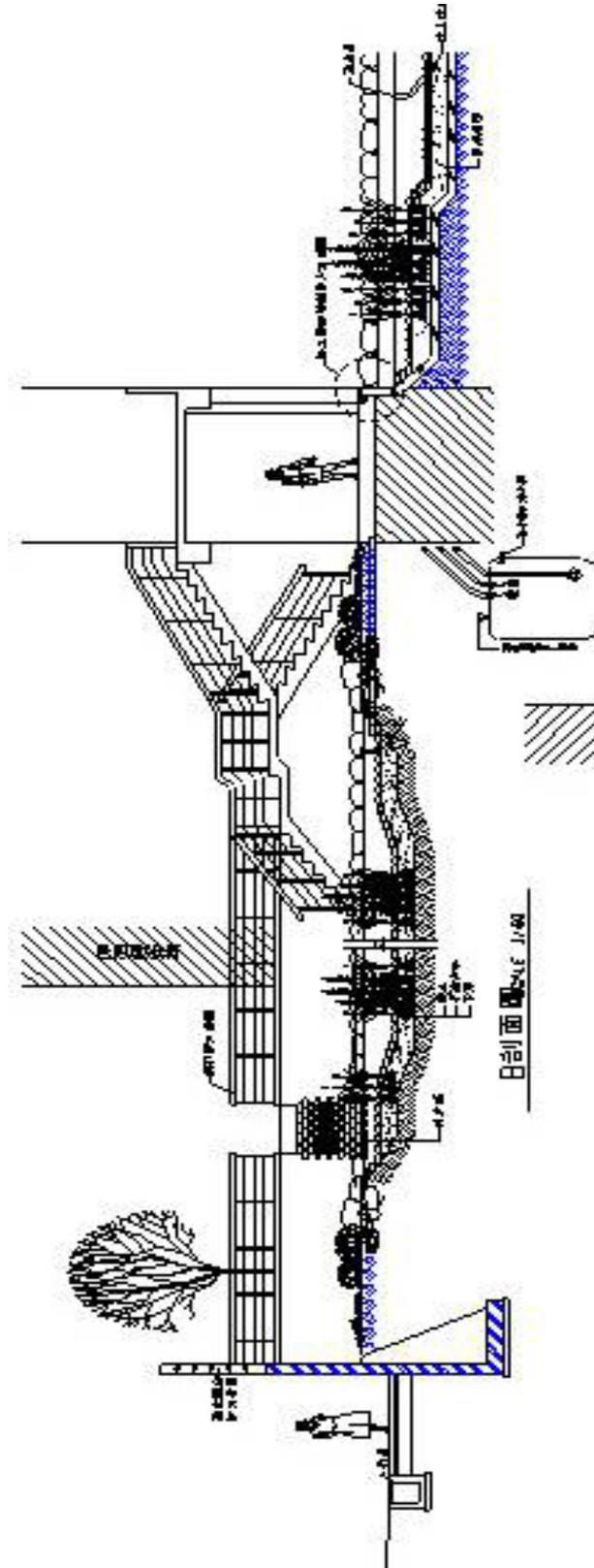
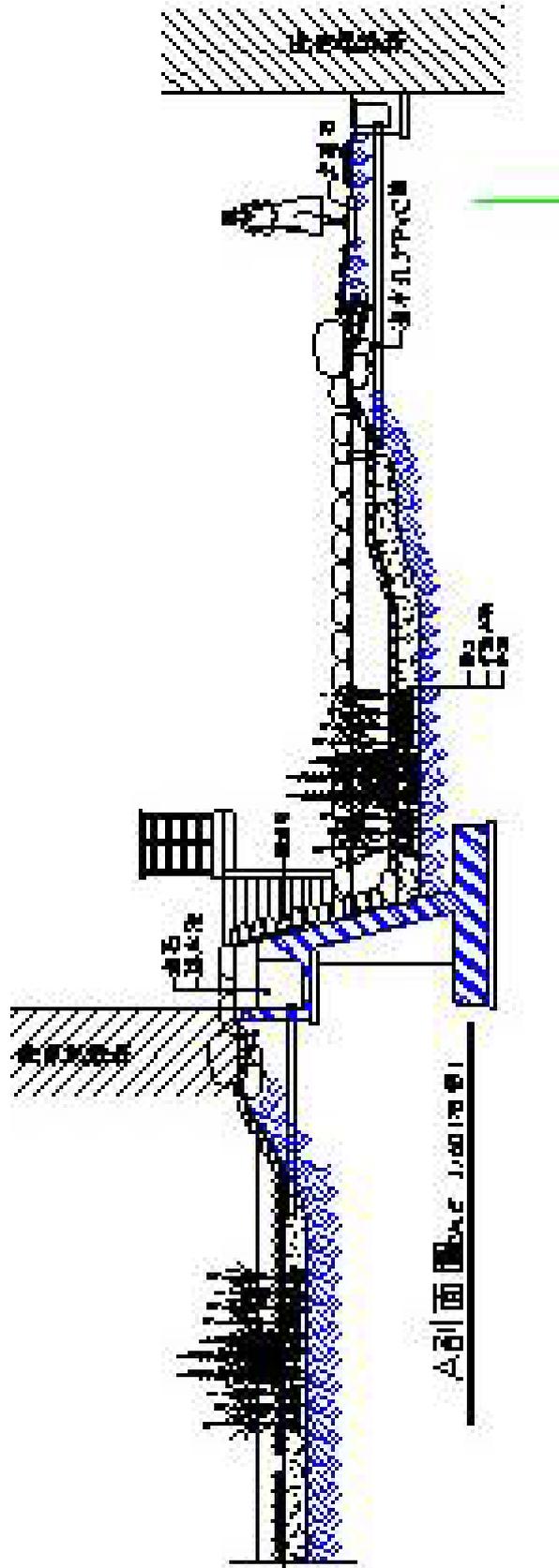


圖 2-10 人工濕地剖面圖 B



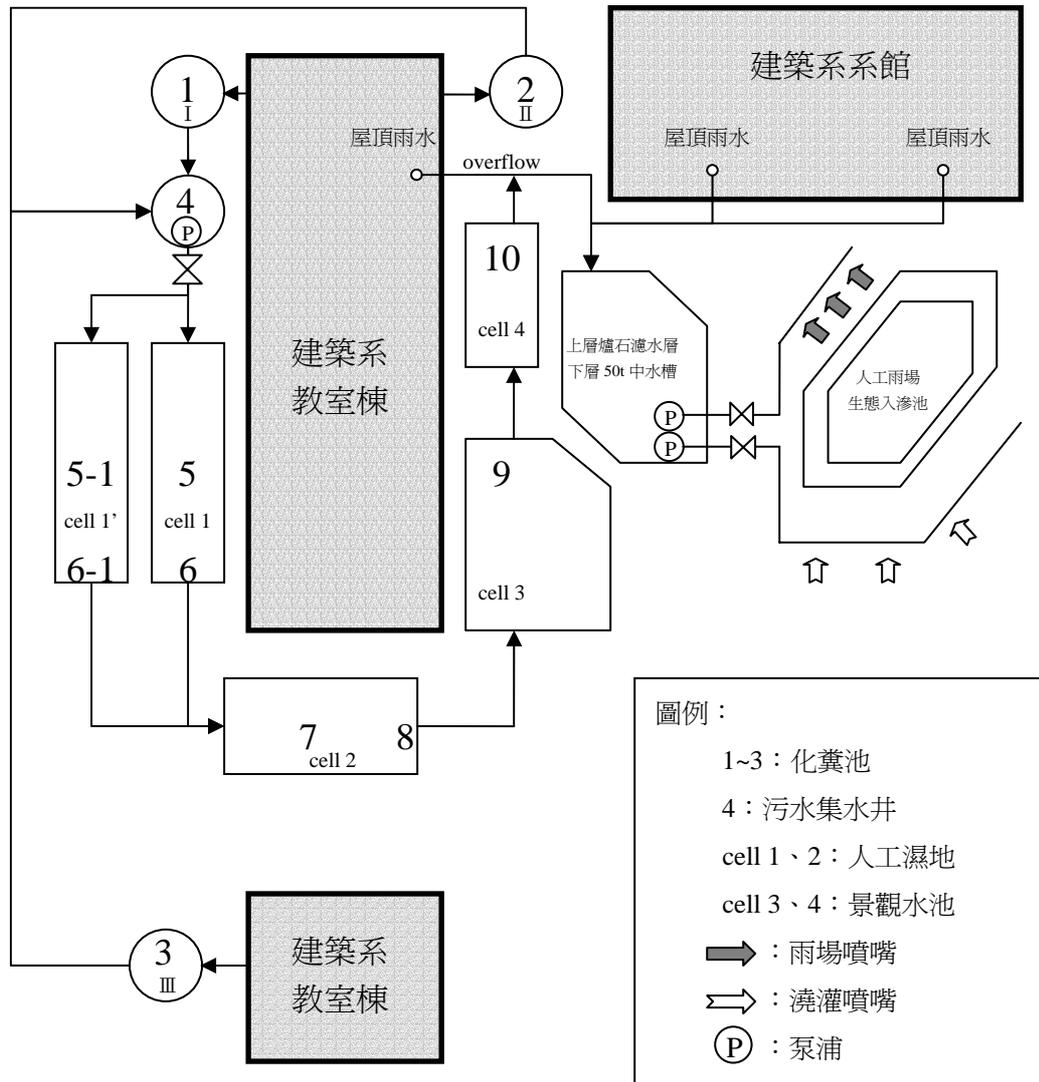
第三節 人工濕地水質檢測計畫

人工濕地水質檢測工作，是證明淨化系統成功與否的關鍵，也是環境品質、公共衛生的保證。本研究除了由計畫經費所贊助每週一次的水質檢測外，也進行委外環檢單位檢測（環保署認證檢測公司）。此外也應內政部建築研究所要求，配合另一個研究案，由高雄醫學大學每月一次針對水域水質的微生物及細菌作採樣檢測，分別在高醫大及行政院環檢所實驗室作同步分析。整個檢測計畫，綜合以上檢測網之數據，作資料交叉比對分析，以周全整個檢測作業。

2-3-1 現場採樣作業

事實上本研究早於 2003 年 11 月起進行各項水質採樣、監測及分析工作，檢測費用由林憲德教授自行負擔。水質採樣位置如圖所示，其中 1 號及 3 號測點為老舊化糞池，2 號為新設污水處理設施，4 號為污水混合井，5~8 號為人工濕地（HRT 分別是 2.4 天、4.8 天、6.7 天、8.5 天）9 及 10 號為為景觀水池測點（HRT 分別是 23.5 天、28.5 天）。而整個人工濕地、景觀水池及新設污水處理設施部分（即檢測點 2、4、6、8、9），水質採樣檢測頻率為每週一次；而在舊有的化糞池及其他次要監測點則檢測頻率為每月一次。本研究於 2004 年三、四月在 A 池旁增設 SSF 系統，水質檢測亦於六月開始進行檢測與數據收集（測點位置增加 5-1、5-2 兩個），藉由此新增系統，我們可以比較兩種人工濕地類型之淨化效益。

圖 2-11 人工濕地檢測點分布圖



現場檢測部分，採樣時間為一個星期的星期三當天 10~12 點，同時進行現場檢測，於計畫之採樣點測其水面下 10~20 公分處之溫度 (Temperature)、pH (pH value)、溶氧、氧化還原電位 (ORP)、電導度 (Electrical conductivity) 及濁度 (Turbidity) 等。

2-3-2 實驗室檢測

而實驗室檢測部分為於現場檢測同時每次以 500mlPVC 瓶採集水樣，再帶回研究室進行各項水質分析，分析項目包括總懸浮固體 (SS)、生化需氧量 (BOD)、化學需氧量 (COD)、氨氮 (Ammonia Nitrogen, $\text{NH}_3\text{-N}$)、硝酸鹽氮 (Total Phosphate, TP)、正磷酸鹽 ($\text{PO}_4\text{-P}$)、大腸菌類 (CNitrate, $\text{NO}_3^- \text{-N}$)、亞硝酸鹽氮 (Nitrite, $\text{NO}_2^- \text{-N}$)、總磷 (Total phosphorus group) 等。分析方法依據行政院環境保護署公告之標準分析方法進行。

表 2-2 分析方法表

檢測項目	標準檢測方法
BOD	NIEA W501.50A
COD	NIEA W510.50A
TSS	5310B、5310C、5310D
大腸桿菌群	NIEA E203.50T
糞便型大腸桿菌數	NIEA E201.50S

第三章 基地保水滲透技術

第一節 生態入滲池性能解析

3-1-1 入滲率分析

為測試入滲池之保水性能，分別針對不同的變因、條件作為實驗的變數，或不同的進水方式：分別為直接灌水與以人工雨場噴灑及人工雨場噴灑加上直接灌水等三種方式，前三次實驗以不同進水方式作為操作實驗變因，後三次實驗以入滲池形狀作為操作變因，分別為灌滿三階、兩階、一階作為操作變因，整理如表一所示。

表 3-1 各次實驗入滲時間與入滲率比較

		實驗一	實驗二	實驗三	實驗四	實驗五	實驗六	實驗七
方式		降雨+灌水	灌水	降雨	降雨	灌水	降雨	降雨
第一階到第二階	所需時間		02:27	02:13	03:52	02:34		
	平均入滲速率 f_1		1.47E-05	1.13E-05	1.02E-05	1.77E-05		
第二階到第三階	所需時間	02:50	03:55	05:49	05:11	03:42		04:15
	平均入滲速率 f_2	2.39E-05	1.83E-05	1.43E-05	1.34E-05	1.94E-05		1.72E-05
第三階到消退完畢	所需時間	02:30	02:17	02:33	03:48	02:28	02:00	02:34
	平均入滲速率 f_3	2.84E-05	3.13E-05	2.18E-05	1.94E-05	2.51E-05	3.38E-05	2.57E-05
平均入滲速率 f		2.51E-05	2.15E-05	1.48E-05	1.36E-05	2.05E-05	3.38E-05	2.04E-05
入滲所需總時間		05:20	08:39	10:35	12:51	08:44	02:00	06:49

入滲率成階梯狀變化，其原因推測為側向滲透造成：第一階入滲率 f_1 最小，由於貯集入滲池周圍埋入五十公分深的隔水版，所以在第一階段的入滲並無側向滲透發生；當第一階入滲完畢，水位消退到第二階時，增加了部份側向入滲，故第二階入滲率 f_2 較 f_1 略為提升；當入滲進入第三階段，第二階水位已消退完畢，無水頭壓力，故側向入滲率增大，造成第三階入滲率 f_3 較 f_2 高，由歷線圖可以清楚的看出入滲率變化成階梯狀增加。

3-1-2 入滲率與實驗總時間回歸分析

表 3-2 各實驗入滲率比較表

	f1	f2	f3	平均f	停水後平均f	總實驗時間(S)	備註
實驗七		1.720E-05	2.574E-05	1.626E-05	2.036E-05	56340	降雨
實驗六			3.383E-05	2.108E-05	3.383E-05	20100	降雨
實驗五	1.774E-05	1.944E-05	2.513E-05	2.316E-05	2.054E-05	38460	灌水
實驗四	1.023E-05	1.341E-05	1.941E-05	1.299E-05	1.356E-05	104340	降雨
實驗三	1.130E-05	1.433E-05	2.179E-05	1.450E-05	1.479E-05	92100	降雨
實驗二	1.470E-05	1.833E-05	3.129E-05	2.325E-05	2.154E-05	41160	灌水
實驗一		2.196E-05	3.031E-05	2.114E-05	2.509E-05	36300	灌+降雨

1. $f1/f2$ 與 $f2/f3$ 有一定比例。在降雨的試驗中；而在灌水試驗中比例較不穩定，推測為土壤尚未飽和的緣故。
2. 實驗方式不同所得到的結果不同
在降雨的試驗中，所得到之入滲率可預測性高；而在灌水試驗中較不穩定，推測為土壤尚未飽和的緣故。
3. 溢流發生時所得到之入滲率較小
推測可能由溢流孔排出快速，故向下滲透的量減少。

表 3-3 各實驗中各階入滲率之比值

	f1/f2	f2/f3
實驗七		0.67
實驗五	0.91	0.77
實驗四	0.76	0.69
實驗三	0.79	0.66
實驗二	0.80	0.59
實驗一		0.72

3-1-3 入滲率與水頭高度回歸分析

綜合入滲率與水頭高度回歸分析迴歸結果，整理表格如下，在實驗一、四、七中，入滲率 f 與水頭高度 H 關係之圖形斜率漸漸減緩，實驗二、五中，入滲率 f 與水頭高度 H 關係之圖形斜率漸增，推測可能結果為不同實驗方式造成不同結果，以灌水方式進行試驗，結果顯示 $\frac{\partial f}{\partial H}$ 漸小，即在第一階入滲率 $f1$ 隨水頭高度變化率最大，第二階次之，消退到第三階時，入滲率 $f3$ 隨水頭高度變化率最小。以降雨方式進行的實驗，結果則相反，結果顯示 $\frac{\partial f}{\partial H}$ 漸增，即在第一階入滲率 $f1$ 隨水頭高度變化率最小，第二階漸

增，消退到第三階時，入滲率 f_3 隨水頭高度變化率最大。在實驗二中，由於其相關係數 R 只有 0.01，相關性小，顯示在第三階的消退過程中，入滲率以不隨水頭高度改變而減慢，而是達到一穩定的數值。

表 3-4 各實驗之 $\frac{\partial f}{\partial H}$ 與入滲率之比較

	實驗一	實驗二	實驗四	實驗五	實驗六	實驗七
實驗方式	灌水+降雨	灌水	降雨	灌水	降雨	降雨
$\frac{\partial f_1}{\partial H}$		3.37×10^{-5}	1.17×10^{-5}	6.12×10^{-5}		
$\frac{\partial f_2}{\partial H}$	3.16×10^{-5}	1.52×10^{-5}	1.29×10^{-5}	2.64×10^{-5}		1.69×10^{-5}
$\frac{\partial f_3}{\partial H}$	3.48×10^{-5}	-4.6×10^{-7}	1.72×10^{-5}	1.66×10^{-5}	4.92×10^{-5}	2.03×10^{-5}
f_1		1.47×10^{-5}	1.02×10^{-5}	1.77×10^{-5}		
f_2	2.20×10^{-5}	1.83×10^{-5}	1.33×10^{-5}	1.94×10^{-5}		1.72×10^{-5}
f_3	3.03×10^{-5}	3.13×10^{-5}	1.94×10^{-5}	2.51×10^{-5}	3.383×10^{-5}	2.57×10^{-5}

3-1-4 貯集入滲池實驗解析結果

1. 貯集入滲池形狀影響入滲率

各階段入滲率與水頭高度相關性不同證明水池的形狀對入滲率有極大的影響。

2. 入滲率歷線圖成階梯狀變化

階梯狀貯集入滲池造成入滲率呈階梯狀增加變化，為側向滲透所造成。

3. 階梯式的貯集入滲池有利於雨水滲透

由入滲率歷線圖證明，採用階梯式貯集入滲池，可以有效讓入滲率越來越大，有利於長時間降雨時之入滲。

第二節 生態入滲池維護管理

本研究探討貯集入滲池保水性能，期望能以建築的觀點出發，探討降雨時在小型建築基地內以「貯集入滲池」的手法增加土地保水能力，並計算貯集滲透雨水量多寡，以期將雨水短暫貯集於基地內，減輕公共排水設施的負擔。

目前台灣過多不透水設計，使大地喪失良好吸水、滲透、保水的能力，在土地使用集約的台灣，適合發展多目的使用的貯集入滲池，平時可做廣場、停車場、公園等用途使用，又可提供暴雨貯集滲透之用途。本研究所得之結論如下：

1. 貯集入滲池實測保水量與基地保水指標比較

實驗實測之保水量講求精確，故可在現地進行灌水實驗，測試該貯集入滲池的保水性能，以實驗實測結果比對保水指標中的地面貯集設計保水量，除了發現因降雨延時過長造成保水量遠大於實測值，在考慮可施行性與誤差上的容許後，原評估式仍然具有其合理性，但建議應將降雨延時 44 小時縮短為 24 小時。

2. 土壤滲透係數

本研究採用三種方式獲得土壤滲透係數，比較三者之精確度，現地進行滲透實驗最佳，經驗公式評估次之，誤差最大為以地質鑽探報告土質分類對照土壤滲透係數 k 簡易對照表；但在就現有的法規的規定仍是以地質鑽探報告土質分類對照土壤滲透係數 k 簡易對照表所得的概略土壤滲透係數，雖有誤差存在，但仍為現行體制下最為可行與簡易之方式。

3. 入滲率之選擇

入滲率之選擇主要是以實驗實測之保水量作為比較基準，檢驗入滲率計算是否有誤，以停水前、停水後與平均之入滲率分別代入公式，與實測之保水量比較，結果為停水前之入滲率計算結果與實測保水量最為接近。

第三節 生態貯集入滲池規範

土壤滲透係數 k 為粉土以上之土壤，適合設置滲透設施，砂土滲透性能良好，只須限制設計深度上限，粉土則須以池蓄時間最為設計之考量，來調整設計深度，以達到 24 小時內滲透完畢之要求。

由於土壤滲透係數與現場實測相差倍數往往是以 10^x 為單位，故結果差距甚大，故要求準確之評估，有執行上的困難，僅能以設計深度之範圍作為建議值。

第三章 人工濕地淨化機制

第一節 人工濕地實驗解析

3-1-1 傳統化糞池淨化性能解析

成大人工濕地系統完工後，經過一個月的植物培植、微生物自然生成後，於 2003 年 11 月開始進行各項水質採樣、監測及分析工作。由於人工濕地承接建築系舊有化糞池及污水處理設施的初級處理排放水作水源。所以對於進流至人工濕地的水質亦需進行源頭監測。

根據本研究監測建築系傳統化糞池及污水處理設施結果，很明顯大多無法符合法令標準，如表 3-1、圖 3-1 所示。其中尤以 BOD 濃度高出標準最多（高出標準 2.1 倍）。這些未經完全淨化處理之生活污水，逕自排放至都市雨水道，沿路極易成為水媒致病菌溫床，成為環境衛生隱憂。這也彰顯出舊有化糞池之淨化性能不佳，即使依據民國 88 年 1 月環保署新標準設置之污水處理設施，也因使用單位忽視管理維護，淨化性能低落，這些衛生隱憂正逐漸吞噬國人健康。

圖 3-1 建築系化糞池及污水處理設施水質檢測濃度圖

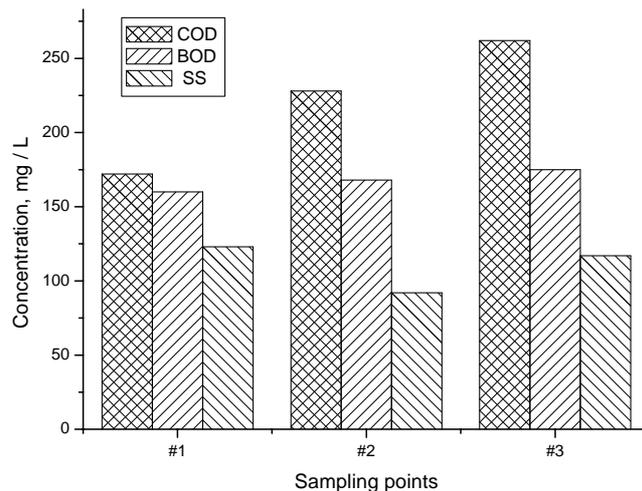


表 3-1 建築系化糞池及污水處理設施水質檢測表

適用範圍	水質項目 (單位)	法定限值	實際檢測值
流量低於 50m ³ /天	生化需氧量 (mg/L)	80	168
	化學需氧量 (mg/L)	250	221
	懸浮固體 (mg/L)	80	111

3-1-2 人工濕地淨化性能解析

人工濕地系統在完工後進行污水定量操作 (HLR = 0.03 m³/m²/d)，並區分淨化段及景觀段兩部分討論。其中針對測點 4 (進流端, Influent, Inf.)、6 (淨化段中間, Cell Mid.)、8 (淨化段排放端, Effluent, Eff.) 及 9 (景觀水池中間, Pond) 等四個測點作重點比較與解析。

各項污染物在濕地部分之淨化效能，如表 3-2 所示。

表 3-2 各項污染物在淨化段之去除率

項目	進流 mg/L Mean±S.D. (n=39)	排放 mg/L Mean±S.D. (n=39)	去除率 (%)
BOD	100.5±31.1	20.0±16.3	80.1
COD	171.8±67.7	60.1±22.9	65.0
NH ₃ -N	35.4±27.1	13.7±12.8	61.3
T-N	32.2±25.1	22.4±11.7	37.9
TP	10.5±4.0	4.5±2.1	57.3
SS	45.6±31.1	10.5±10.7	76.9

關於 BOD 之淨化效能，進流水平均濃度為 100.5±31.1 mg/L，放流水平均濃度為 20.0±16.3 mg/L，去除率為 80.1%。監測記錄顯示，生活污水進流

濃度變化很大(圖 3-2)，若以 BOD₅ 濃度降低至 80mg/L 以下為標準值(流量低於 50m³/天之「放流水標準」)，約需 1.5 天 HRT；若以 BOD₅ 濃度降低至 30mg/L 以下為標準值(流量介於 50~250m³/天之「放流水標準」)，約需 4.8 天 HRT(圖 3-3)；若以 BOD₅ 濃度降低至 20mg/L 以下為標準值(流量大於 250m³/天之「放流水標準」)，約需 8.5 天 HRT。由於 BOD 去除率與 HRT 成正比，本研究導出預測公式 $Y=1.82494-0.04808X$ 來描述 BOD 去除率與 HRT 關係，其相關係數 R 值高達 0.957(圖 3-4)。

圖 3-2 建築系生活污水 BOD 進流與排放濃度變化圖

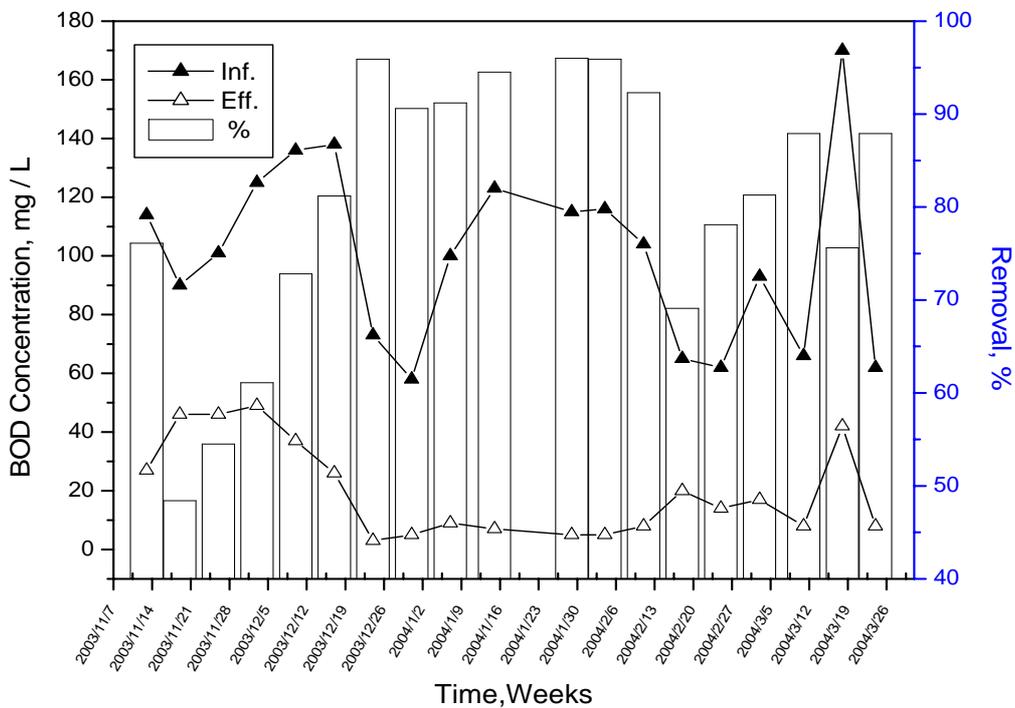


圖 3-3 BOD 平均濃度與 HRT 及法定值之關係圖

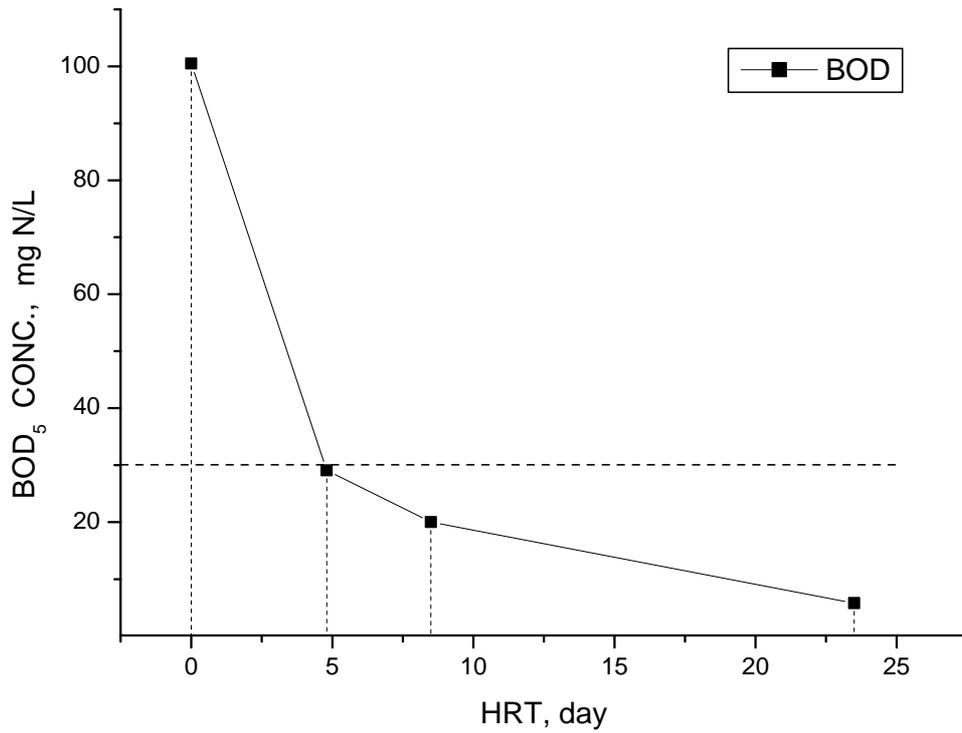
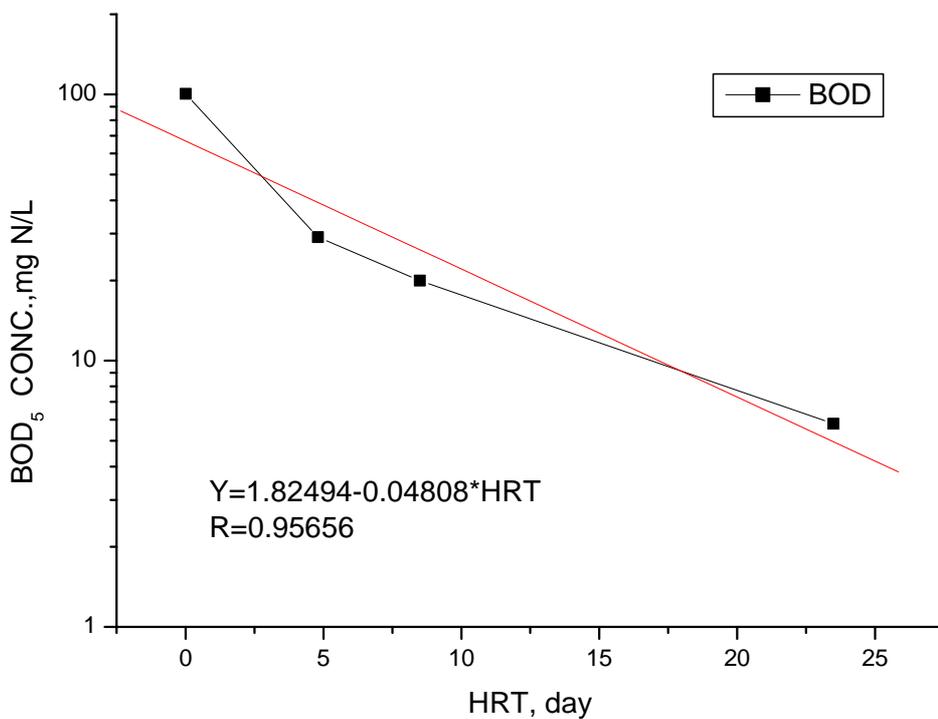


圖 3-4 BOD 平均濃度與 HRT 關係預測圖



關於 COD 之淨化效能，進流水平均濃度為 171.8 ± 67.7 mg/L，放流水平均濃度為 60.1 ± 22.9 mg/L，去除率為 65.0%（圖 3-5）。關於 SS 淨化性能，進流水平均濃度為 45.6 ± 31.1 mg/L，放流水平均濃度為 10.5 ± 10.7 mg/L，去除率為 76.9%（圖 3-6）。上述結果顯示各項污染物經人工濕地處理後，其排放水質多能符合行政院環境保護署公告「放流水標準」，環境衛生上安全無虞。

圖 3-5 BOD 及 COD 平均濃度變化圖

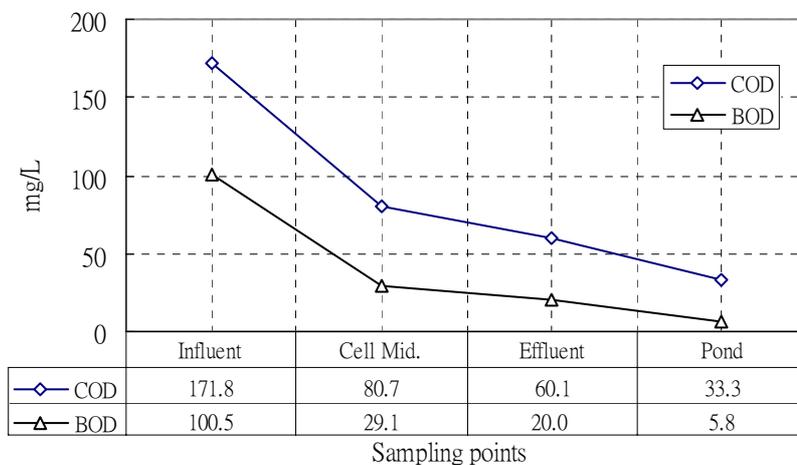
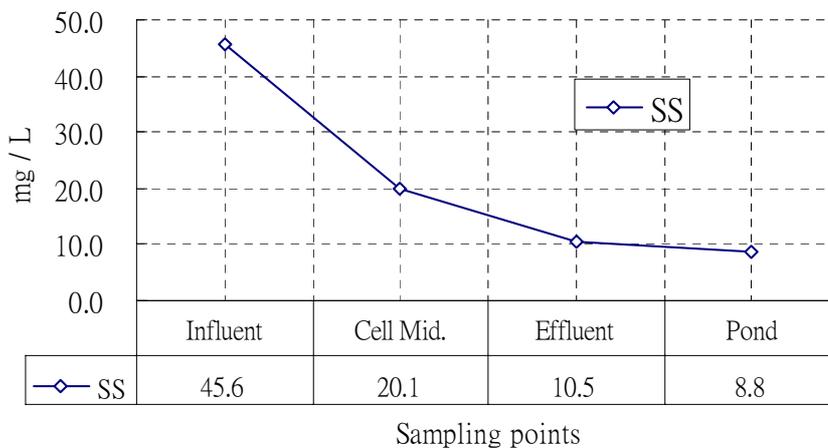


圖 3-6 SS 平均濃度變化圖



3-1-3 景觀水池淨化性能

各項污染物自人工濕地處理後排放進入景觀水池(以 9 號測點作為景觀水池之平均水質)，其淨化效果，區分為化學性檢測與物理性檢測兩部分討論。化學性檢測項目有 BOD、COD、SS、NH₃-N 及 T-N，其效率如表 3-3 所示。

表 3-3 化學性檢測項目效率表

項目	濕地排放 mg/L Mean±S.D. (n=39)	景觀水池 mg/L Mean±S.D. (n=39)	去除率 (%)
BOD	20.0±16.3	5.8±4.5	71.2
COD	60.1±22.9	33.3±18.1	44.5
NH ₃ -N	13.7±12.8	2.8±2.2	79.5
T-N	22.4±11.7	2.2±1.8	90.0
TP	4.5±2.1	1.5±1.8	67.1
SS	10.5±10.7	8.8±8.1	16.0

關於 BOD 淨化效率，進流水平均濃度為 20.0±16.3mg/L，景觀水池平均濃度為 5.8±4.5 mg/L，去除率為 71.2%。進流水 COD 平均濃度為 60.1±22.9 mg/L，景觀水池平均濃度為 33.3±18.1mg/L，去除率為 44.5% (表 3-3、圖 3-5)。

NH₃-N 的去除率是人工濕地重視項目之一，建築系生活污水進流濃度變化很大 (圖 3-7)。在淨化段已大幅削減濃度，排放進入景觀水池時，濃度平均為 13.7±12.8mg/L，隨著 HRT 延長，景觀水池平均濃度更降為 2.8±2.2mg/L，去除率高達 79.5%，顯示 NH₃-N 從污水集水井進入淨化段濕地一直到景觀水池，均呈現穩定且大幅之去除效果 (表 3-3、圖 3-8)，因此本研究導出預測公式 $Y=1.54462-0.04683X$ 來描述 NH₃-N 去除率與 HRT 關係，其相關係數 R 值達 0.999 (圖 3-9)。以此公式預測，若欲將 NH₃-N 濃度降至 0.3ppm (「地面水體分類及水質標準」之丙類水質)，則 HRT 約需 26.5 天 (景觀水池 10 號測點 HRT 為 28.5 天，足以達成限值)。在 T-N 方面，進

流水平均濃度為 $22.4 \pm 11.7 \text{mg/L}$ ，景觀水池平均濃度降為 $2.2 \pm 1.8 \text{mg/L}$ ，去除率為 90.0% (表 3-3、圖 3-10)。進流水 SS 平均濃度為 $10.5 \pm 10.7 \text{mg/L}$ ，景觀水池平均濃度為 $8.8 \pm 8.1 \text{mg/L}$ ，去除率為 16.0% (表 3-3、圖 3-6)。

圖 3-7 氮氮進流與排放濃度變化圖

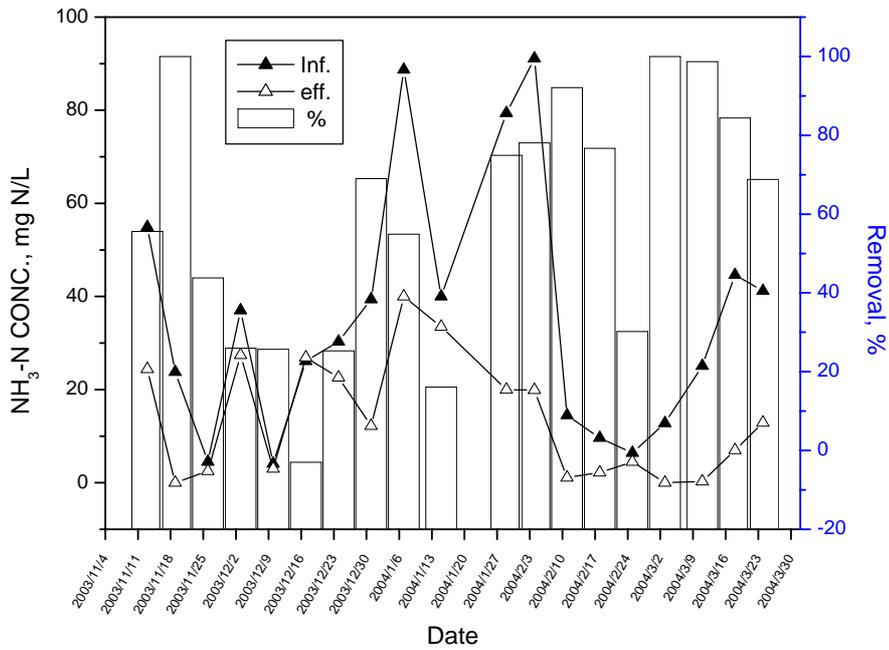


圖 3-8 氨氮平均濃度變化圖

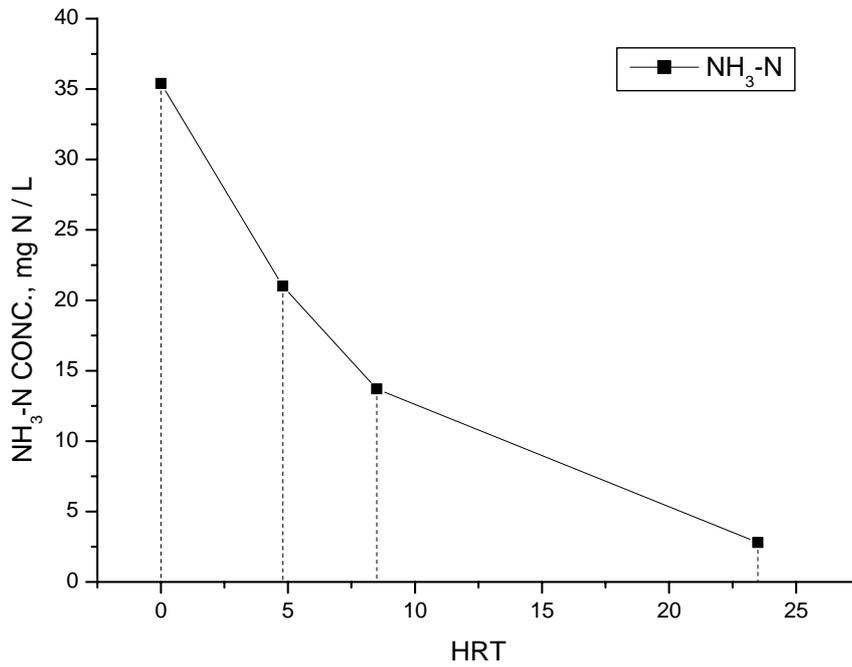


圖 3-9 氨氮平均濃度與 HRT 關係圖

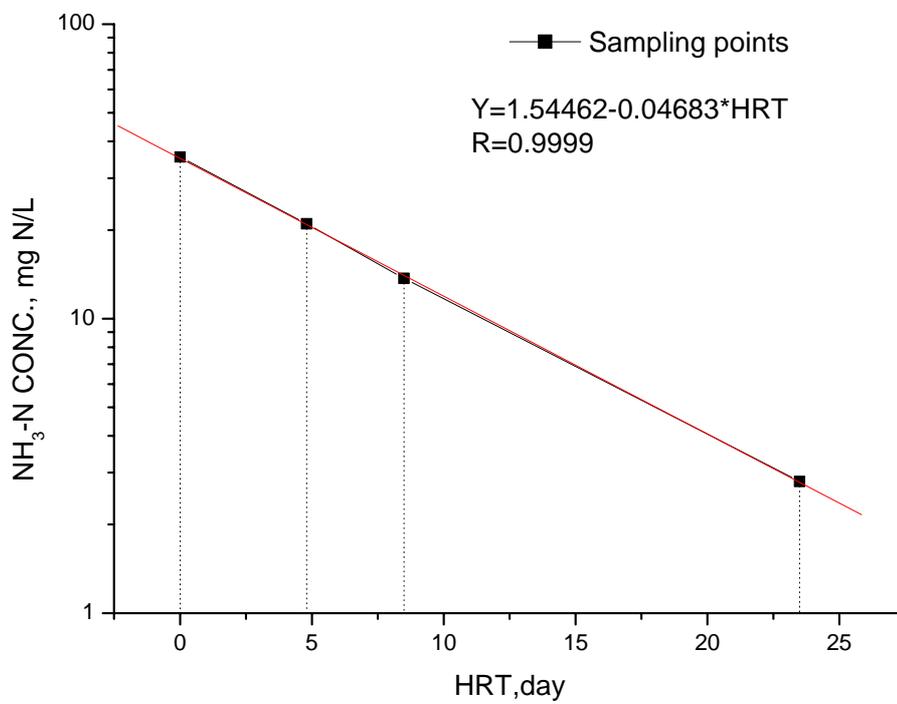
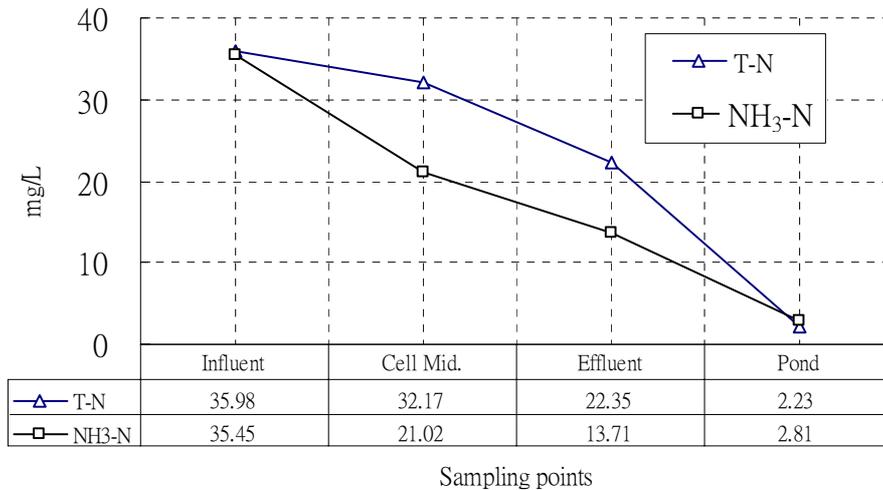


圖 3-10 TN 及 NH₃-N 平均濃度變化圖

上述結果顯示淨化段濕地排放水進入景觀水池，由於 HLR 減輕、HRT 延長，水質有持續淨化效果。其中以 T-N 效果最好達到九成，NH₃-N 大致有八成，BOD 則有七成以上之表現，效果顯著（圖 3-5、圖 3-10）；至於 SS 在景觀水池去除效果則明顯偏低（圖 3-6），此乃 SS 於景觀水池開放水域環境中，不若上一階段（淨化段）稠密的生物膜（microfilm）過濾吸附，因而減緩去除率。

關於物理性檢測項目有水溫、pH、溶氧及電導度等項目，其變化如表 3-4 所示。水溫部分，依據「灌溉水水質標準」要求水溫應低於 35°C，監測期間，景觀水池水溫尚無高於 25°C 的紀錄（圖 3-11），未來將持續監測再作討論。pH 及溶氧方面，由於景觀水池以開放水域居多，利於藻類行光合作用，使得水中溶氧大幅增加（圖 3-12）。也由於藻類吸收水中二氧化碳之故，造成景觀水池 pH 值偏高達到 9.0（圖 3-13）。但此 pH 值偏高現象為水中碳酸大量被植物吸收所致，尤其是採樣時間多接近正午時分，pH 值應為全日高峰。在電導度方面，由於水質淨化，水中離子態污染物含量下降，電導度降為 657 $\mu\text{mho/cm}$ 左右，已低於「灌溉水水質標準」之 750 $\mu\text{mho/cm}$ 限值（圖 3-14）。

表 3-4 物理性檢測項目效率表

項 目	Inf. Mean±S.D. (n=19)	Cell Mid. Mean±S.D. (n=19)	Eff. Mean±S.D. (n=19)	Pond Mean±S.D. (n=19)
溫度 (°C)	20.7±2.0	19.7±2.5	19.0±2.8	20.2±2.7
pH (無單位)	8.2±0.3	7.89±0.3	7.7±0.2	9.0±0.6
DO (mg/L)	0.4±0.7	1.0±0.5	1.7±1.1	5.4±1.9
E.C. (μ mho/cm)	1537±442	1176±261	1020±230	657±309

圖 3-11 溫度變化圖

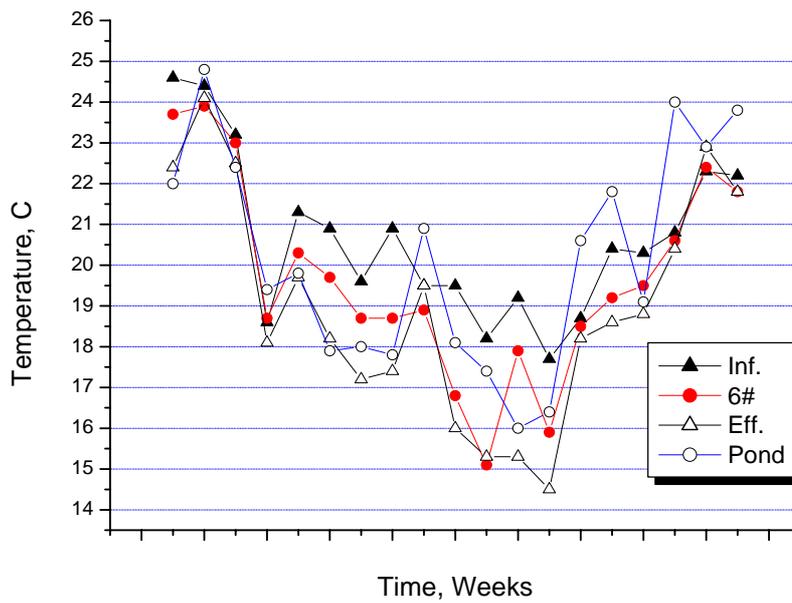


圖 3-12 溶氧平均濃度變化圖

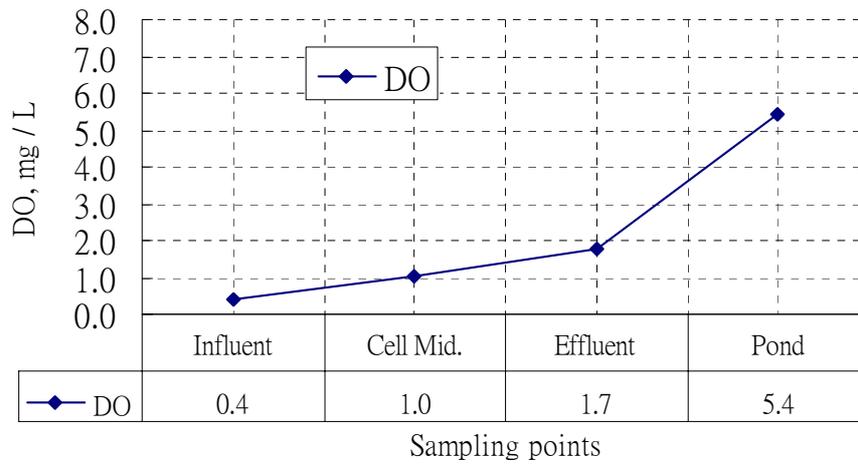


圖 3-13 pH 平均濃度指數變化圖

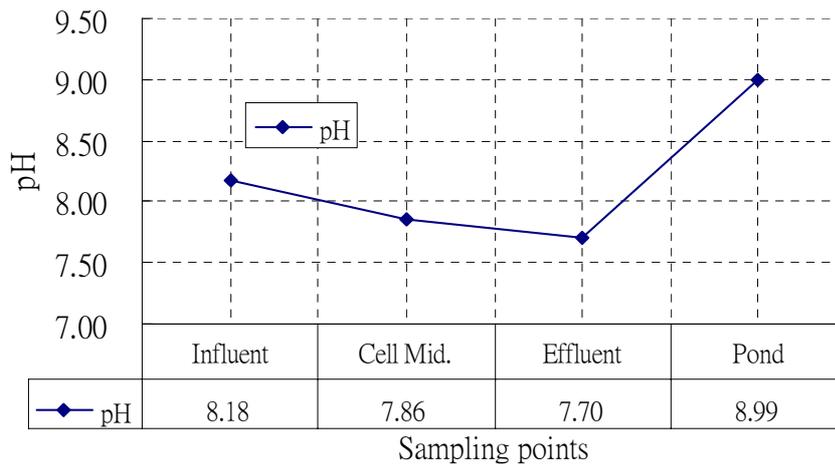
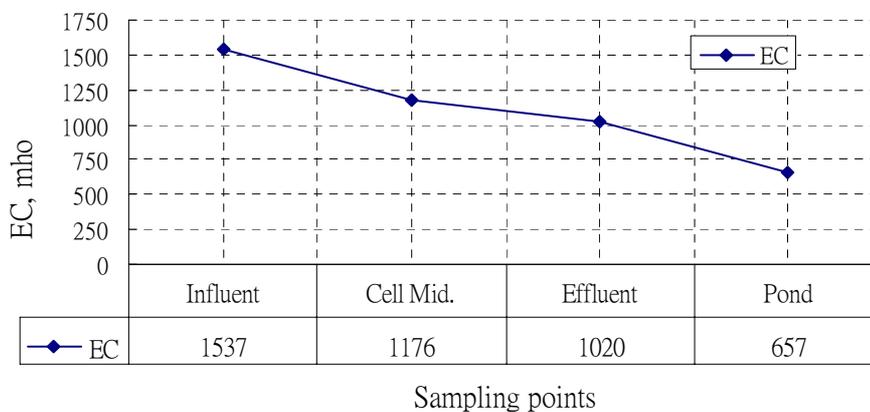


圖 3-14 電導度變化圖



綜合上述化學性檢測與物理性檢測結果顯示，景觀水池水質多能符合行政院環境保護署公告「地面水體分類及水質標準」之「丙類」水體水質及農委會「灌溉水標準」，對於放流水再利用的價值已大為提升，可確保安全與衛生。

3-1-4 人工濕地公共衛生議題解析

成大人工濕地目前是少數建立完成的人工濕地存在於都市區位並接近建築物的案例，所以公共衛生議題更是極為重要且在未來人工濕地建立應當注意的。

表 3-5 公共衛生標準相關列表

權屬單位	各項用途水質標準	分類	大腸桿菌群 (Total Coliform group) MPN/100ml	備註
環保署	放流水標準	水量大於 250t ³ /d	200,000	(90)放流水標準
		水量介於 50~250 t ³ /d	300,000	
		水量低於 50t ³ /d	無	
	澆灌花木、抑制揚塵	無	200	(93)土壤處理法
	陸域水體	甲類用途	50	(82)地面水體分類及水質標準
		乙類用途	5,000	
		丙類用途	10,000	
		丁類用途	無	
	飲用水	具備消毒單元者	20,000	(86)飲用水水源水質標準
		未具備消毒單元者	50	
地下水	無	無	(90)地下水污染管制標準	
農委會	灌溉用水	無	無	(92)灌溉用水水質標準
建築系	人工濕地	無	8,900	景觀水池平均濃度

3-1-5 大腸桿菌的去除效果

國人對於生活污水處理觀念，常以為將污水接管至污水處理設施即可，殊不知缺乏維護管理的污水處理設施，反成為致病菌溫床。人工濕地的水源來自生活污水，同樣承受水媒致病菌風險，其中大腸菌類(Coliform bacteria)是公認評估致病風險指標項目之一，所以本研究特別列為監測重點並提出討論。

3-1-5-1 大腸菌類數與病原微生物的比例關係

總大腸桿菌群 (Total coliform group, TC) 包括：大腸桿菌 (*Escherichia coli*, 簡稱 *E. coli*)、腸桿菌屬 (*Enterobacter aerogenes*)、克雷伯桿菌屬 (*Klebsiella*)、沙雷氏桿菌屬 (*Serratia*) 等腸道菌屬。在地面水中，“大腸菌類：大腸菌類噬菌體：腸道病毒”，三者比例一般約為 100,000：100：1，...，通過水質處理，如果水中的大腸菌類數能減少至符合水質標準，理論上水中的病毒也應被除去(環境微生物, 1997)。總大腸桿菌群包括糞便型大腸菌(fecal coliform group, FC)，為了區別自然環境(土壤與水體等)中原本存在的大腸菌類，以及來自人類糞便中的大腸菌類，可以透過不同培養溫度的方法區別。目前我國法令僅對總大腸桿菌群作規範，本研究則進一步再細分糞便型大腸菌類，一併作探討。Mr. Geldreich 指出由許多案例發現受污染水中存有大量糞便大腸菌，且與傷寒、副傷寒群有顯著關係，故選定糞便大腸菌類尤其是 *E. coli* 作為糞便污染之重要指標，藉以判斷水是否受到人類或其他溫血動物之糞便污染(Ronald L. Droste)。當檢測不出水中的糞便大腸菌成分，意謂著生活污水已完全被淨化為陸域地面水體一般。

3-1-5-2 總大腸桿菌群

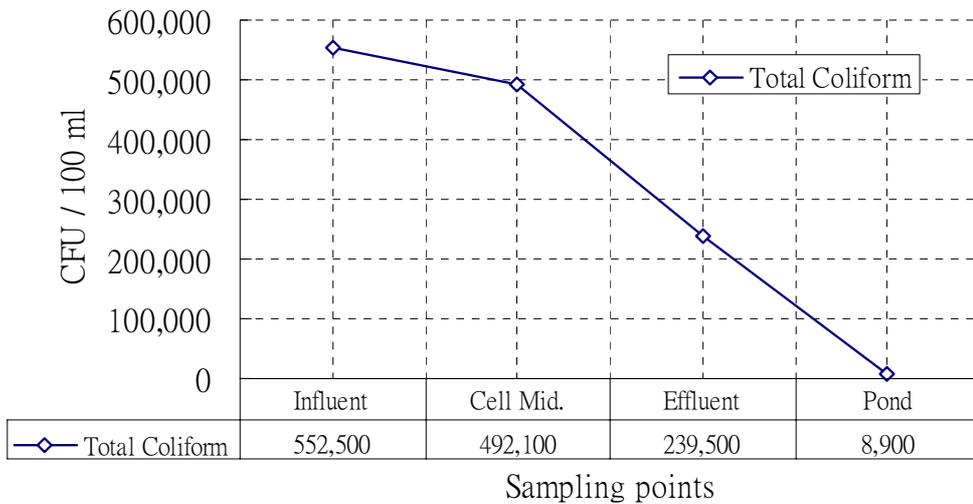
人工濕地大腸桿菌數平均進流濃度為 $5.53 \times 10^5 \text{CFU}/100\text{ml} \pm 14.03 \times 10^5 \text{CFU}/100\text{ml}$ ，淨化段末端平均濃度為 $2.40 \times 10^5 \text{CFU}/100\text{ml} \pm 3.74 \times 10^5 \text{CFU}/100\text{ml}$ ，去除率為 56.7%，大致已符合放流水標準（流量小於 250m³/天之建築物）。景觀水池平均濃度為 $8.9 \times 10^3 \text{CFU}/100\text{ml} \pm 16.6 \times 10^3 \text{CFU}/100\text{ml}$ ，累計去除率為 97.1%（表 3-6），已符合丙類水體大腸桿菌標準，可作為三級公共給水、工業製造用水、工業冷卻用水、灌溉用水及環境保育水源，大幅提升水資源再利用價值。

從水力停留時間而言，本研究發現大腸桿菌濃度隨 HRT 延長而下降，若要符合放流水標準 300,000 CFU/100ml，HRT 約需 8 天；若要符合放流水標準 200,000 CFU/100ml，HRT 約需 11 天（圖 3-16）。本研究導出預測公式 $Y=5.94003-0.08144X$ 來描述大腸桿菌去除率與 HRT 關係，其相關係數 R 值達 0.98（圖 3-17）。

表 3-6 大腸菌類在人工濕地、景觀水池中變化關係

項目	Total Coliform (cfu/100ml) Mean±S.D. (n=39)	去除率 (%)	Fecal Coliform (cfu/100ml) Mean±S.D. (n=39)	去除率 (%)
Influent	$5.5 \times 10^5 \pm 14.0 \times 10^5$	-	$9.3 \times 10^4 \pm 7.7 \times 10^4$	-
Cell Mid.	$4.9 \times 10^5 \pm 8.7 \times 10^5$	10.9	$8.9 \times 10^3 \pm 2.2 \times 10^4$	90.4
Effluent	$2.3 \times 10^5 \pm 3.7 \times 10^5$	56.7	$1.6 \times 10^3 \pm 5.0 \times 10^3$	98.3
Pond	$1.6 \times 10^4 \pm 3.2 \times 10^4$	97.1	-	100

圖 3-15 大腸桿菌群平均數量在濕地中變化關係圖



3-1-5-3 糞便型大腸菌群

人工濕地糞便型大腸菌，平均進流濃度為 $9.3 \times 10^4 \text{CFU}/100\text{ml} \pm 7.7 \times 10^4 \text{CFU}/100\text{ml}$ ，淨化段末端平均濃度為 $1.2 \times 10^3 \text{CFU}/100\text{ml} \pm 5.0 \times 10^3 \text{CFU}/100\text{ml}$ ，去除率為 98.3%。景觀水池幾乎已測不到糞便型大腸菌存在，去除率為 100%（表 3-6、圖 3-18），這可說明生活污水已完全被淨化為陸域地面水體一般，公共衛生上安全無虞。

圖 3-16 大腸桿菌群平均數量在濕地中變化關係圖

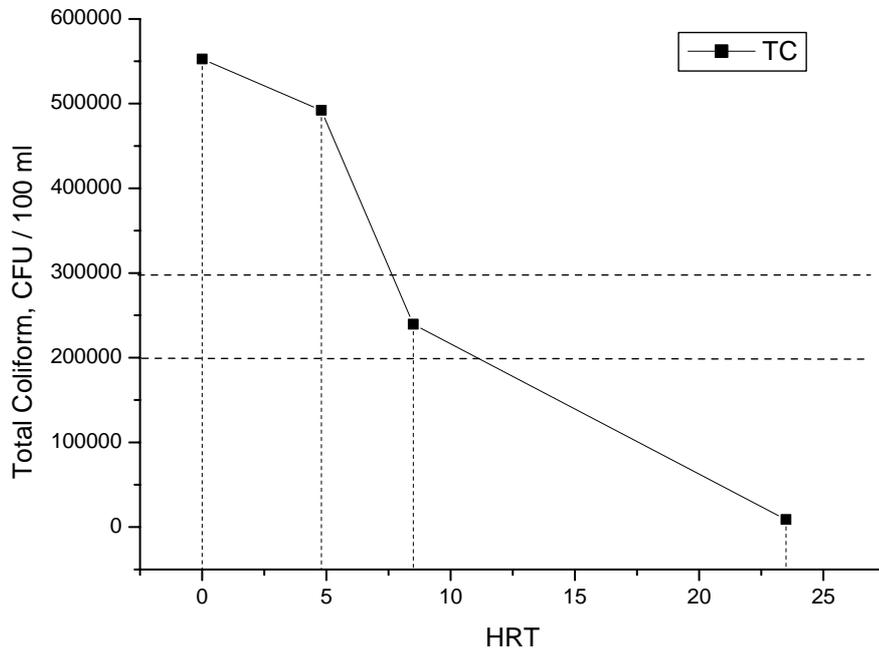


圖 3-17 大腸桿菌群平均數量在濕地中變化關係圖

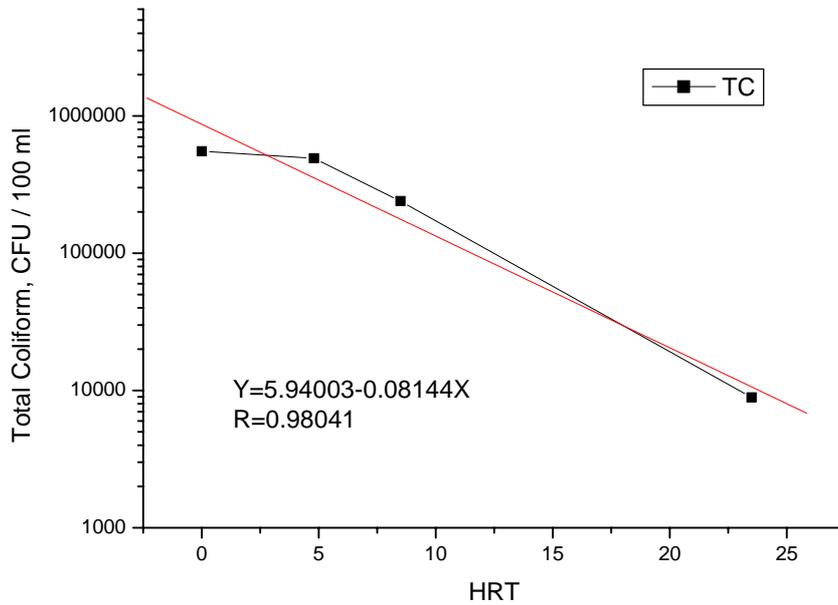


圖 3-18 糞便型大腸桿菌平均數量在濕地中變化關係圖

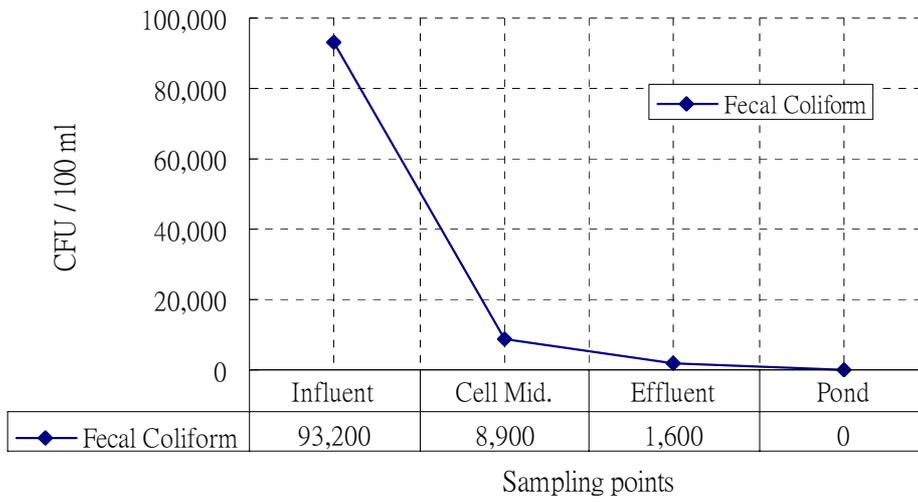
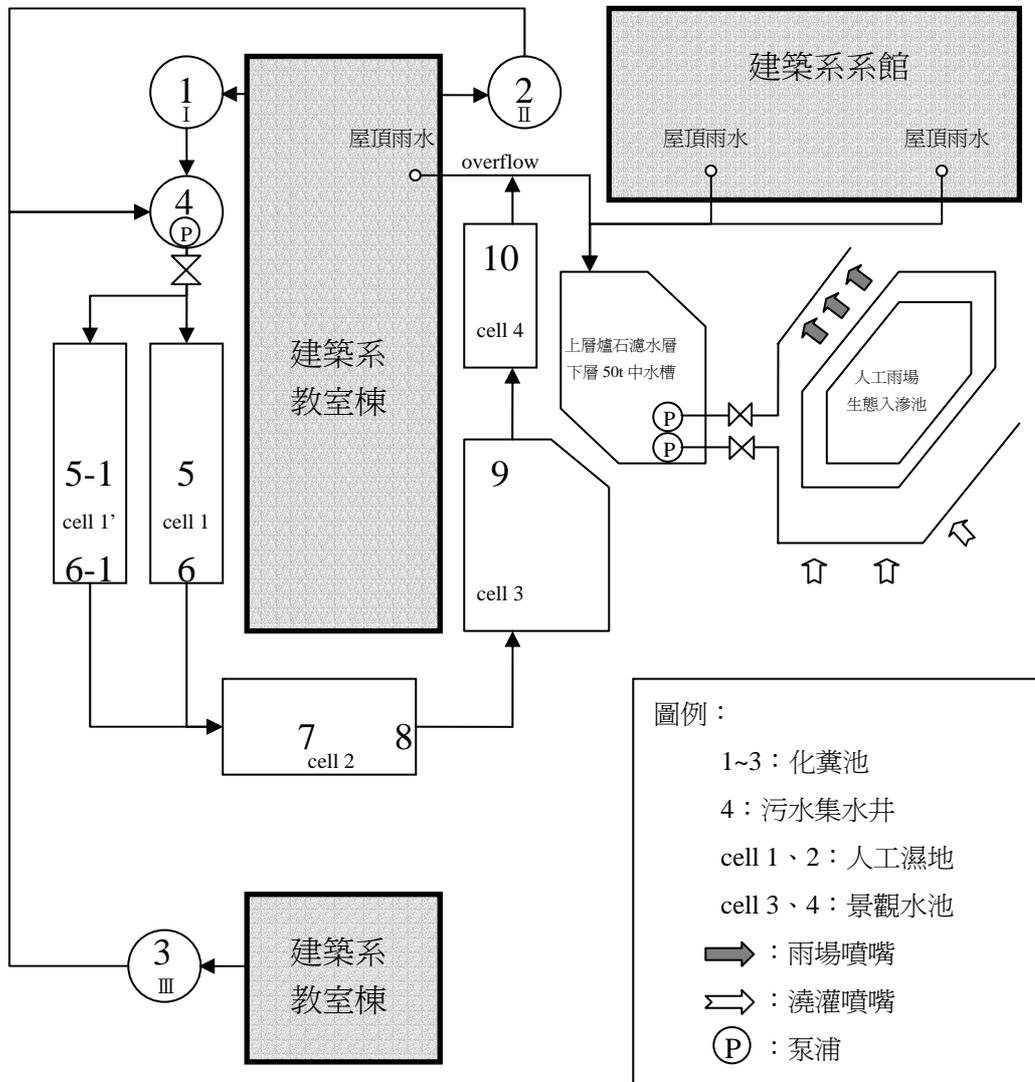


圖 3-19 人工濕地水質採樣點位置



第二節 人工濕地生態觀察

由於本研究案人工濕地建構於建築系周邊空地，深受建築物陰影及大樓風影響，濕地生態出現一些困擾。經三個月（2003 年 10~12 月）的觀察記錄，發現溼地中水生植物的生長狀況及季節溫度變化會影響昆蟲、節肢動物以及溼地水中藻類與原生動物等微生物之生態平衡。

圖 3-20 人工濕地實驗場全景



圖 3-21 濕地植物受大樓風影響



圖 3-22 濕地植物風害傾倒



3-2-1 植物觀察

1. 香蒲與布袋蓮

植物因冬季日照量較少及大樓強風摧殘，生長出現障礙；又因濕地完工於秋末，植物及微生物生成速度趨緩。況且濕地自然淨化系統尚未穩定，造成第一池進流端的植物（香蒲及布袋蓮）明顯稀疏，甚至死亡。隨後因進流的 BOD 濃度降低之故，水生植物由濕地中段往末段逐漸蓬勃生長。

圖 3-23 植物因冬季日照量較少及大樓強風摧殘，生長出現障礙



圖 3-24 水生植物逐漸蓬勃生長



2. 藻類

水中藻類及水中生物亦隨著季節而有所變化，其中藻類於十一月份發現有藍綠藻、矽藻、綠藻等，其中以綠藻及矽藻較多；進入元月份由於寒流影響，氣溫偏低，藻類明顯減少，顯示藻類之生長分佈與氣溫之變化有極大的關連。

圖 3-25 濕地水中藻類異常繁殖



3-2-2 動物觀察

1. 蚻蟲與蛾類幼蟲

蟲害在季節變換期明顯加劇。第一池於十一月初開始有蚻蟲出現，十二月份出現以蚻蟲為食物的瓢蟲，蚻蟲數量稍降。隨後人力介入適度噴灑菸鹼 (Nicotine) 後，蟲害受到控制。此外蛾類的出現及產卵，卵孵化成幼蟲，大量啃噬植物葉片，往往在幾天之內啃光某類植物 (夜蛾嗜食多花鴨舌草)。植物受害後，殘株落入水中成為 BOD 負荷，水質益形惡化。這些昆蟲與季節變化有食物鏈的生態關係，相信在陸續的觀察紀錄中，能夠得知昆蟲與此溼地系統的榮枯關係。

圖 3-26



蚜蟲主要出現在香蒲的葉子上，蚜蟲族群數量龐大，通常會佈滿整片香蒲葉子。

出現以蚜蟲為食物的瓢蟲，蚜蟲數量稍降，並於人力介入適度噴灑菸鹼（Nicotine）後，蟲害受到控制。

圖 3-27



夜蛾類的出現並大量產卵於葉子表面。

圖 3-28



卵孵化成幼蟲，大量啃噬植物葉片，在幾天之內啃光某類植物。

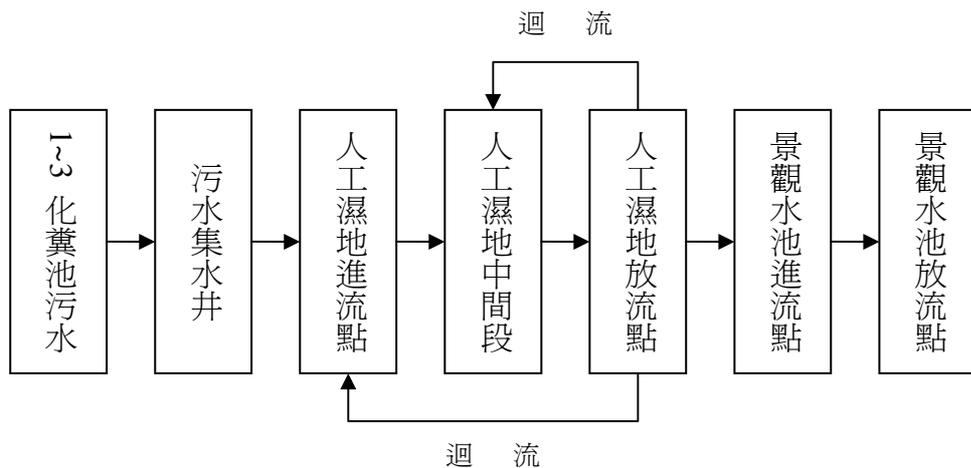
2. 水生動物與孑孓

水生動物包括原生動物及水棲昆蟲，原生動物從十至十二月份一直分佈於水中，種類隨季節變換而有不同，包括紅蟲、管尾蟲；水棲昆蟲以污水蠅、水蠶最為常見。其中污水蠅隨著有機污染物下降，數量明顯減少。蚊子數量之控制方法為維持 BOD 負荷率在 110kg/ha/d 以下，以避免可能發生厭氧狀況的淤塞區 (Ronald L. Droste)，因為蜻蜓與水生甲蟲等孑孓的天敵必須在好氧的環境下生存。此外，濕地當中放養大肚魚補食孑孓是有效的控制蚊子數量的方式，但池水 BOD 濃度須控制在 30ppm 以下、DO 在 1 以上；若是放養三星萬隆，則 BOD 濃度尚可忍受到 60ppm、DO 接近零的環境條件。

第三節 人工濕地操作管理維護規範建立

完善的人工濕地操作管理維護是一個成功的人工濕地所不可或缺的，人工濕地其建立成本及管理維護成本皆較傳統的污水處理方式低廉，但並不代表可以忽略其操作管理維護問題。

圖 3-29 人工濕地水循環流程



一個人工濕地基本的操作管理維護可以有以下幾項：

1. 進流水流量控制

人工濕地進流水流量管制為控制人工濕地系統水質及處理效能的方法之一。進流水流量可以影響水力停留時間、污染物負荷及水力負荷，以決定整個人工濕地的放流水水質及處理效能。

表 3-7 濕地採樣點及採樣頻率

建議參數	採樣點	最少之採樣頻率
水質：溫度、溶氧、pH、導電度、 氧化還原電位	進流口及出流口	每週
水質：BOD ₅ 、TSS、NO ₂ ⁻ +NO ₃ ⁻ 、 NH ₄ ⁺ 、TKN、TP	進流口及出流口	每月
水質：重金屬、有機物、毒性物質	進流口及出流口	每季
水的流量	進流口及出流口	每天
水深（水位）	進流口及出流口	每天
優勢植物種類	進流口及出流口	每週

2. 濕地整體監測系統建立

本系統建立包括進行各項水質採樣、監測及分析工作：

現場檢測部分，採樣時間為一週一次，於當天上午 10~12 點進行現場檢測，在採樣點測其水面下 10~20 公分處之溫度、pH、溶氧、氧化還原電位、電導度及濁度。

實驗室檢測部分為現場檢測同時以 500mIPVC 瓶採集水樣，再帶回研究室進行各項水質分析，分析項目包括總懸浮固體、生化需氧量、化學需氧量、氨氮、硝酸鹽氮、亞硝酸鹽氮、總磷、正磷酸鹽、大腸菌類等。分析方法依據行政院環境保護署公告之標準分析方法進行。

3. 人工濕地維護管理工作

人工濕地維護管理工作包含動物植物維護管理、管路配件維護管理、進流排放水管制等問題。目前由成大人工濕地所收集的相關資料可以得到下表人工濕地維護管理常見問題：

表 3-8 人工濕地維護管理常見問題

人工濕地 A 池	人工濕地 B 池	景觀水池 C 池	景觀水池 D 池
進流水性質	進流水源是否正常	進流水性質	進流水源是否正常
進流水源是否正常	植物維護管理	進流水源是否正常	植物維護管理
植物維護管理	病媒蚊問題	植物維護管理	致病菌問題
污水生物管理	致病菌問題	致病菌問題	外來動植物危害問題
病媒蚊問題	監測水質不合格處置	外來動植物危害問題	
致病菌問題	溢流到景觀池落水頭高度控制	人為餵食問題	人為餵食問題
監測水質不合格處置			

表 3-9 人工濕地維護管理週期性

人工濕地	週期
進流水源是否正常	每天
植物維護管理	每週
污水生物管理	每月
病媒蚊問題	每月
致病菌問題	每月
監測水質安全性	每週
外來動植物危害問題	每週
人為餵食問題	每天

4. 公共衛生問題

成大人工濕地目前是少數建立完成的人工濕地存在於都市區位並接近建築物的案例，所以公共衛生議題更是極為重要且在未來人工濕地建立應當注意的。

目前人工濕地公共衛生議題方面主要為緊急防制、病媒蚊及致病菌抑制：

(1) 緊急防治措施

當人工濕地於每週或每月的檢測數據未能達到相關單位訂定的標準水質檢測時，相關研究人員應該要有緊急應變措施，以維持該地區人員的公共衛生安全，例如在人工濕地周圍能夠迅速的圍起一道緊急封鎖線，避免人員誤入而發生危險，此外也應該要建立通報系統在發生問題時能夠有效率的通知該地區人員。

(2) 病媒蚊

病媒蚊問題一直是建立水域環境時所常被人誤解的問題之一，人工濕地亦會碰到許多人問此問題，因此如何解決病媒蚊問題一般的處理方是就是放養食蚊魚。食蚊魚部分目前已經確定能夠有效的吞食病媒蚊並存活於人工濕地之中，在食蚊魚無法存活的其他人工濕地水域中，本研究團為也放置三星鬥魚及蓋斑鬥魚來抑制病媒蚊產生。

(3) 致病菌抑制

人工濕地的水源是來自生活污水，因此有受水媒致病菌風險之疑慮，其中大腸菌類是公認的評估致病菌風險指標項目之一。所以，當檢測不出濕地水中有糞便型大腸菌，則意味著生活污水已被完全淨化為陸域地面水體一般。

第四章 研究成果與建議

第一節 生態入滲池成果

4-1-1 最大設計深度

基於衛生上考量，池蓄時間應小於 24 小時，本研究建議滲透能力在粉土以上的土質可設置貯集入滲設施，基於安全上考量，建議一般設計深度應小於 0.5 公尺，小學設置標準則應更嚴格，建議小於 0.2 公尺，國中設置標準應小於 0.3 公尺。

表 4-1 實驗實測與保水指標研議之比較

	實驗實測	「基地保水指標」建議		
貯集入滲池評估式	$F=V+fAT$ f：實驗實測	$Q4=V+kAT$ ，t 建議減小為 24 小時 k：依據地質鑽探資料土壤分類對照土壤滲透係數 k 簡易對照表		
最大設計深度 $d_{max}=f \times T_p$ $T_p=24$ 小時	砂 ≥ 9.1 公尺	一般設計上限：0.5 公尺		
	壤土質砂 ≥ 1.68 公尺	國民小學設計上限：0.2 公尺		
	砂質壤土 ≥ 0.66 公尺	國民中學設計上限：0.3 公尺		
	粉質壤土 ≥ 0.4 公尺			
土壤滲透係數 k	葛洛夫入滲儀現地實測	◎	依據地質鑽探資料土壤分類對照土壤滲透係數 k 簡易對照表	
	Hazen Method	○		
	入滲率實測	△		
入滲率 f	停水前入滲率	◎	不易施行現地實驗	
	停水後入滲率	△		
	平均入滲率	○		
土質	礫石	◎	砂土	◎
	砂土	○	粉土	△
	粉土	△	黏土	×

優：◎、佳：○、普通：△、劣：×

4-1-2 不同土質貯集入滲池建議設計形式

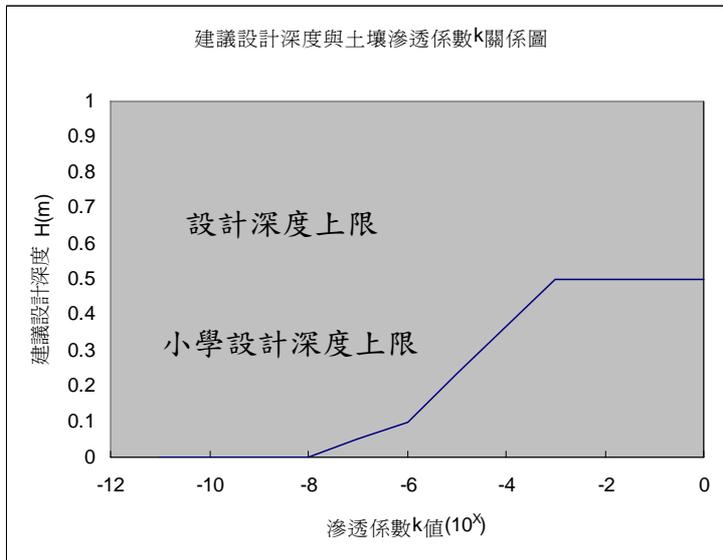
不同土質之貯集入滲池會有不同的設計形式，本研究針對各種不同土質設計貯集入滲池，對其池蓄時間、設計深度、設計形式及形式考量予以建議，提供未來設計貯集滲透池的設計建議。

表 4-2 不同土質之貯集入滲池建議設計形式

土 質	礫石	砂土	粉土	黏土	高塑性黏土
土壤滲透係數 K(m/s)	10^{-3}	10^{-5}	10^{-7}	10^{-9}	10^{-11}
最大設計深度 (m)	≥ 15.69	≥ 0.4	0.1		
池蓄時間 Tp(hr)	24	24	24	24	24
建議設置深度 (m)	≤ 0.5	≤ 0.5	< 0.1	不適合設置	不適合設置
建議設計形式	主要以滲透形式為主：地面貯集滲透設施如學校操場、遊戲場、廣場等)、乾式景觀水池	主要以滲透形式為主：地面貯集滲透設施如學校操場、遊戲場、廣場等)、乾式景觀水池、	滲透形式輔以貯集形式： 地下礫石貯集設施地面貯集滲透設施(如學校操場、遊戲場、廣場等)、濕式景觀水池	暫時貯集形式： (如：花圃、屋頂花園、分隔島、道路基底暫時貯集)	暫時貯集形式： (如：花圃、屋頂花園、分隔島、道路基底暫時集留)
建議形式考量	深度以安全、衛生作為考量。學校內的設施，請設計者以國小、中學、大專院校等差異予以調整考量。	深度以安全、衛生作為考量。學校內的設施，請設計者以國小、中學、大專院校等差異予以調整考量。	此一土質滲透性能較差，輔以貯集形式，增加滲透設施之入滲量。	滲透性能差，以暫時貯集設施為主要設計考量。	滲透性能差，以暫時貯集設施為主要設計考量。

貯集入滲池建議設計深度 H 與土壤滲透係數 k 對應簡圖，一般建議設計深度小於 50 公分，在國小考量兒童之身高，以 20 公分作為設計上限，國中 以 30 公分為設計上限。

圖 4-1 貯集入滲池建議設計深度 H 與土壤滲透係數



對於「基地保水指標」相關建議

1. 貯集入滲池評估式： $Q_4=V+kAt$ ，t 建議減小為 24 小時。
2. 最大設計深度：一般設計上限為 0.5 公尺，國民小學設計上限為 0.2 公尺，國民中學設計上限為 0.3 公尺。
3. 土壤滲透係數，雖以現地進行滲透試驗較為準確，然實行不易，故仍以地質鑽探資料土壤分類對照土壤滲透係數 k 簡易對照表為主。
4. 適合設置的土質：粉土質滲透能力以上的土壤適合設置，黏土不宜設置。

第二節 後續研究與建議

本研究蒐集貯集入滲池保水性能數據並分析，期望能以建築的觀點出發，探討降雨時以「貯集入滲池」的手法增加土地保水能力，減輕公共排水設施的負擔，建立台灣本土的生態入滲池管理規範。

目前台灣過多不透水設計，使大地喪失良好吸水、滲透、保水的能力，在土地使用集約的台灣，適合發展多目的使用的貯集入滲池，平時可做廣場、停車場、公園等用途使用，又可提供暴雨貯集滲透之用途，故建立本規範是勢在必行。

第四章 研究成果與建議

第一節 人工濕地成果

4-1-1 人工濕地檢測紀錄

濕地系統在完工後進行實場操作與監測。第一季針對 4 號點（污水進流端）、6 號點（濕地中段）、8 號點（排放端）及 9 號點（景觀水池）進行各項水質監測分析。各項污染物在濕地（進流端及排放端）之淨化效能為 BOD₅ 進流水平均濃度為 115.5±43.4 mg/L，放流水平均濃度為 30.1±16.9 mg/L，去除率為 73.6%；COD 進流水平均濃度為 143.9±75.5 mg/L，放流水平均濃度為 48.1±22.9mg/L，去除率為 66.6%；NH₃-N 進流水平均濃度為 32.1±21.1 mg/L，放流水平均濃度為 13.7±11.6 mg/L，去除率為 57.2%；TKN 進流水平均濃度為 67.5±45.9 mg/L，放流水平均濃度為 25.5±13.5. mg/L，去除率為 62.2%；TP 進流水平均濃度為 9.0±4.2mg/L，放流水平均濃度為 5.02±2.5 mg/L，去除率為 44.4%；SS 進流水平均濃度為 31.3±25.6 mg/L，放流水平均濃度為 8.4±10.5 mg/L，去除率為 73.1%；大腸桿菌群平均進流濃度為 10033±20002 CFU/ml，平均放流濃度為 3189±5232CFU/ml，去除率為 68.2%；糞便型大腸桿菌數平均進流濃度為 889±1657CFU/ml，平均放流濃度為 33±71 CFU/ml，去除率達到 96.3%。上述結果顯示各項污染物經人工濕地處理後，在排放端採樣（8 號檢測點）測得水質，檢測項目多能符合行政院環境保護署公告「放流水標準」。

表 4-1 建築物污水處理設施之放流水標準 (90 年環保署)

適用範圍	水質項目 (單位)	最大限值
流量大於 250m ³ /天	生化需氧量 (mg/L)	30
	化學需氧量 (mg/L)	100
	懸浮固體 (mg/L)	30
	總大腸桿菌群 (CFU/100ml)	200,000
流量介於 50-250m ³ /天	生化需氧量 (mg/L)	50
	化學需氧量 (mg/L)	150
	懸浮固體 (mg/L)	50
	總大腸桿菌群 (CFU/100ml)	300,000
流量低於 50m ³ /天	生化需氧量 (mg/L)	80
	化學需氧量 (mg/L)	250
	懸浮固體 (mg/L)	80
	總大腸桿菌群 (CFU/100ml)	-

4-1-2 人工濕地操作技術

本研究經由實場操作得知人工濕地淨化校園生活污水之效益，在生化需氧量 (BOD₅) 去除率為 73.6%、化學需氧量 (COD) 去除率為 66.6%、懸浮固體 (SS) 去除率為 73.1%、氨氮 (NH₃-N) 去除率為 57.2%、總凱氏氮 (TKN) 去除率為 62.2%、總磷 (TP) 去除率為 44.4%、大腸桿菌群去除率為 68.2%、糞便型大腸菌 (E-Coli) 去除率達到 96.3%。在設置濕地場址選擇，應選擇日照充足、避開大樓風的位置較為恰當，以利植物成長。在子子數量的控制，放養大肚魚是有效的方式，但池水 BOD 濃度須控制在 30ppm 以下、DO 在 1 以上；若放養三星萬隆，則 BOD 濃度尚可忍受到 60ppm、DO 接近零的條件。

第二節 後續研究與建議

4-2-1 繼續監測記錄人工濕地參數

結果顯示各項污染物經人工濕地處理後，檢測項目多能符合行政院環境保護署公告「放流水標準」。其中氨氮的去除效果較差，尚待後續操作與監測再做判斷。濕地排放水注入景觀水池，由於磷及其他營養鹽的緣故，引起池水優氧化效應，有礙觀瞻。基於美學 (Scenic) 考量，尤其是改善濁度及色度 (Color) 之景觀需求，目前操作上，採取流量管制 (每三天進流一次)、加強植物密度 (吸收營養鹽) 及放養食藻生物 (台灣黑殼蝦) 等方式來改善水質，池水優氧化獲得控制。人工濕地於台灣仍處於剛起步的階段，所以必須透過長期的監測記錄以累積更多的經驗，未來人工濕地也將繼續監測記錄人工濕地參數，提供後續研究之利用。

4-2-2 建立景觀化人工濕地操作技術規範

從地球環保觀點而言，以人工濕地來淨化污水，是省能源、省資源、無二次公害的生態工法。人工濕地系統的設計參數、系統整體淨化性能、操作管理及衍生議題，猶待後續相關研究，故本研究目的為建立景觀化人工濕地操作技術規範，以作為我國發展永續水資源政策之參考。