

專 論

街道及下水道之雙排水系統快速淹水模擬

**Rapid Flood Inundation Simulation of Dual
Drainage System between Streets and Sewers**

國立臺灣大學
氣候變遷與永續發展研究中心
助理研究員

王 嘉 和

Chia-Ho Wang

國立臺灣大學
生物環境系統工程學系
博士生

游 翔 麟

Hsiang-Lin Yu

國立臺灣大學
生物環境系統工程學系
碩士

梁 益 詮

Yi-Cyuan Liang

國立臺灣大學
生物環境系統工程學系
研究助理

王 嘉 瑜

Jia-Yu Wang

國立臺灣大學
生物環境系統工程學系
教授

張 倉 榮*

Tsang-Jung Chang

摘 要

近年來因極端降雨事件增加，使得淹水事件頻傳，快速、即時的評估淹水潛勢地區變得相當重要，因此，本研究發展雙排水系統淹水模式來快速評估淹水狀況，此模式結合降雨逕流、一維下水道及一維街道等三種模組，並藉由改變模組的演算順序，可提出兩種雨水收集方法，分別為下水道收集(方法 A)及街道收集(方法 B)，並比較兩者在下水道水位及街道淹水之差異。

本研究以臺北市文山區木柵次集水區為研究區域，並以兩場短延時事件進行模擬與分析，結果顯示，較符合真實雨水收集機制之方法 B，其下水道水位及街道淹水範圍之模擬結果皆較貼近實際調查狀況，則視其為本研究街道淹水模式的代表，並透過與二維淹水模式之比較，可發現街道淹水模式在計算時間上有較好的表現，未來結合觀測雨量與降雨預報可做為即時淹水災害評估之參考。

關鍵詞：雙排水系統，街道淹水模式，雨水下水道，快速淹水模擬。

*通訊作者，國立臺灣大學生物環境系統工程學系教授，10617 台北市羅斯福路四段 1 號，tjchang@ntu.edu.tw

ABSTRACT

In recent years, flooding in urban areas have been occurring more frequently due to the increasing of extreme rainfall events. Therefore, assessment of high inundation potential areas in metropolises becomes very important. This study attempts to develop a street flood inundation model for fast evaluation of street flooding. This model consists of three modules: (1) rainfall-runoff transformation, (2) 1D street flow routing, (3) 1D sewer flow routing. By changing the routing order of these three modules, two different rainfall collection methods including Method A: rainwater into storm sewers first and Method B: rainwater into street first, are proposed to evaluate potential flooding streets right after rainfall events occurred.

In this study, Muzha drainage basin in Wenshan District, Taipei, is selected as the study area. Two short duration rainfall events are used for simulation and analysis. Due to the closeness to real rainfall collection phenomena, the simulated results from Method B has a better agreement with the measured data of street inundation areas and sewer water levels than Method A. Thus, we take method B as a representation of street flood inundation model. Compared to 2D flood inundation models, street flood inundation model has a better performance on computation time and may be used to evaluate the flooding disaster immediately

Keywords: Dual Drainage System, Street flood inundation model, Storm sewer flow, Fast flood inundation modelling.

一、前 言

近年來因氣候變異、不透水鋪面增加以及都市熱島效應的緣故常有淹水事件發生，再加上經濟的快速發展，都市地區之建設密集地增加，淹水所造成的危害更是嚴重，因此快速的淹水評估顯得相當重要。都市地區之排水方式通常是由街道收集雨水，而後經由側溝快速排至下水道系統，最後再排出集水區至河川中。

Yen (1986)對於下水道之水理有十分完整之整理，如單一管流流況及管網流況之研究文獻回顧及理論，數值模式之穩定性及收斂分析等，同時比較各種不同下水道模式之差異，包含了 ILLUDAS (Illinois Urban Drainage Area Simulator)、SWMM (Storm Water Management Model)等；Yen and Akan (1999)亦針對都會區之漫地流與排水系統水理分析、下水道管線設計、調節池效應等主題進行研究；而 SWMM 於 1977

開放程式碼後(Version 2)開始被廣泛使用，至今有許多商業軟件亦以 SWMM 開放程式碼進行修開撰寫。

但下水道模式只能評估下水道的水量、流況以及人孔溢流情形，無法評估地表淹水。為了評估淹水可能影響的區域與範圍，常利用二維淹水模式進行淹水評估，包含了臺灣第一代淹水潛勢圖(1999~2001)等。同時為了規劃設計以及精確的評估可能淹水的範圍與深度，顏等(1989)結合了二維淹水模式、一維河川模式以及一維下水道模式來評估臺北捷運系統之防洪排水設計；Hsu *et al.* (2000)則將漫地流模式與下水道模式做初步之結合，模擬下水道人孔溢流所引致的地表淹水情形；Chang (2015)利用二維淹水模式結合一維雨水下水道並利用準確度及偵測率等指標評估淹水模擬的正確性；Chang (2018)利用二維淹水模式結合一維雨水下水道以及側溝系統精準的評估地表淹水以及下水道水位；但此類一、二維

耦合模式因為地表網格計算的關係，很難快速的完成淹水評估結果。

Iwata (2001)將都會區之排水系統分為地面道路、雨水下水道以及地下商店街三種系統，並分析地下商店街在洪水期間對淹水情況會產生何種影響；Djordjević *et al.* (2005)、Leandro *et al.* (2009、2011)及 Simões *et al.* (2010)等人一連串之研究成果提出了一個 1D/1D 模型(SIPSON)來模擬通過代表一組入口的節點連接的兩個並行網絡(街道和管道)中的雙排水；蔡(2008)人應用緩坡雨水下水道系統模擬模式以及地文性排水-淹水模式來演算暴雨時的人孔水位以及街道逕流；廖烜欣(2009)發展建立街道—雨水下水道流量交換率，以等效人孔的概念連接街道—雨水下水道間之流量交換現象，並將街道網路水流模式及街區擬似二維地表淹水模式加以整合統整，建立出街道(矩形)和雨水下水道淹排水模式；以此類方法可以快速評估下水道排水情況以及地表道路淹水情形。

綜合以上所蒐集的相關文獻之成果，本研究將以可演算降雨逕流模式、一維街道模式與一維下水道模式之 SWMM 軟體，評估都會區之街道淹水情形。

二、研究方法

本研究利用暴雨逕流管理模式(Storm Water Management Model, SWMM, Huber *et al.*, 1988)建置降雨逕流模組、一維下水道模組以及街道側溝模組；利用降雨逕流模組計算地表逕流量之歷線，並將其輸入一維街道側溝模組或一維下水道模組中而後進行演算，當水流經過路口之人孔時會以連接管導入下水道中，進行一維下水道模組演算，而人孔水位高於街道時，則溢流至街道中，模式之詳細說明如下章節。

2.1 降雨逕流模組

本研究使用 SWMM 之地表逕流模組(RUNOFF Module)，模擬降雨逕流之水文歷程。SWMM 將次集水區視為一具有寬度 W 、均勻坡度 S 且集流至單一出口之矩形表面，並使用非線

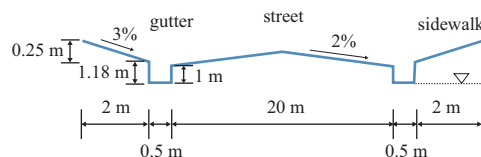


圖 1 包含側溝之街道斷面。

性水庫演算來模擬地表逕流過程。

2.2 一維下水道模組

本研究使用 SWMM 之幹線輸水模組(EXTRAN Module)，模擬水流在雨水下水道系統之流動情形。為因應各種雨水下水道之排列方式，EXTRAN 採用管線(link)—人孔節點(node)之概念進行演算，在管線(link)中假設流量不變且滿足動量方程式，以求解管線內之流量。

2.3 一維街道側溝模組

本研究亦使用 SWMM 之幹線輸水模組(EXTRAN Module)，模擬水流在街道上之流動情形。以往 EXTRAN 模組多半使用在下水道系統中，管線之斷面為封閉之形狀，而此處將封閉之斷面改為開放之街道斷面，用以模擬街道水流運行。

都會區之街道通常較建成區為低，因此在降雨事件發生時，可做為集流之設施，而街道之縱向坡度及長度較側向為大，故忽略水流側向之流動，將街道水流視為一維之明渠流況。又因街道的水流集流至街道側溝之時間相當短，故本研究考慮將側溝之斷面合併之街道斷面中，如圖 1 所示，而街道側溝斷面之設計則依據下水道工程設施標準(營建署 98.11.27 修正)第四條規定：U 型溝寬度不得小於 30 公分，深度(含出水高，不含溝蓋厚度)為 40 公分以上，1 公尺以下。在本研究中，評估街道側溝的溢淹情況時，為了避免有高估的情況，採用最大之設計深度做為評估標準，街道側溝斷面的設計型式為矩形，設計深度為 1 公尺，設計寬度為 0.5 公尺。包含側溝之街道斷面在水流進入時，會先從側溝底部開始累積，而後當水深超過 1 公尺，也就是側溝之頂部

時，水流始在街道上流動。而包含側溝之街道斷面其曼寧 n 值需分段設定，街道部份取曼寧 n 值為 0.016，側溝部份則為 0.015。

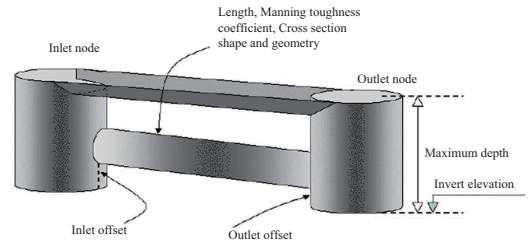
因本研究之一維街道側溝模組使用街道線(link)-街道點(node)之概念進行演算，故將每個街道點位之鄰近街道線的一半作為此街道點位之控制範圍，當某個街道點位淹水時，則將此控制範圍內之街道線皆視為淹水，深度為該街道點位的淹水深度。模式在演算結束後可得到各個街道點的最大水深，並扣除側溝的深度(1 公尺)，可得到街道點的最大淹水深度，考慮將街道最大淹水深度為 15 公分以上視作淹水；而街道斷面扣除側溝深度後的最大深度約在 25 公分左右，故將 25 公分視為街道淹水深度之上限，如圖 1 所示，並把街道淹水深度分為三個區間，即 15 公分到 20 公分、20 公分到 25 公分及 25 公分以上。

當街道點水深超過街道斷面最大深度時，則代表水流進入建築物或其他非街道區域內，因本研究不考慮街道外的淹水現象，故將這些水體積視為街道溢流量，無法重新回到街道中。

2.4 模組銜接

由於街道與下水道之流況均屬於複雜的非均勻變量流，其銜接方式通常以堰流、孔口流或是各種進水口之公式，來進行街道與下水道之流量交換，街道水流透過進水口利用堰流或孔口流方式進入下水道中，反之，人孔溢流量則是平均分配至連接人孔之進水口上，並且進入街道中；模擬街道與下水道連接之雙系統的方法，則為在人孔點位上建立上下兩條管線，分別為街道與下水道管線，街道斷面之最高點為人孔之頂部高程，如圖 2 所示，利用人孔點之水位來判定流量交換機制，當水位低於街道之底部高程時，街道之水流則全部進入下水道系統中，反之，若水位高於街道之底部高程時，則在求解街道水流之一維迪聖凡南(de Saint-Venant)變量流方程式時，會在水壓項反應出人孔水位效應，進而使街道上之流量和水位變大。

本研究因考慮包含側溝之街道斷面，故使用



(Gironás et al., 2015)

圖 2 SWMM 雙系統示意圖。

細長之連接管將街道上之水流導入下水道中，當街道上之人孔水位高於街道之高程時，再利用堰流或孔口流方式溢流至街道中。以下就連接管、人孔溢流之設定作詳細說明。

1. 連接管

連接管之設計參考下水道工程設施標準(營建署 98.11.27 修正)第十三條規定：(1)連接管應設置於道路內之道路側溝或 L 型溝匯流點；(2)坡度保持百分之一以上，與本管之連接處應在本管之上半部；(3)最小管徑為五百公厘。在本研究中，連接管設置於街道交會處之街道點，並以坡度百分之一點五、管徑五百公厘連接至人孔點上半部，長度則為街道寬度之一半，曼寧 n 值為 0.015。連接管內部並無設置閥門，因此水流為雙向流動，當人孔之水位高於連接管連接處時，會產生迴水之現象，使得連接管之水流無法順利收集至人孔中，進而回灌至側溝內，此種現象符合實際之情況。

2. 人孔溢流

本研究利用 SWMM 幹線輸水模組之 bottom orifice 選項，模擬街道人孔溢流現象。Bottom orifice 可利用閥門將其限制為單向流動，即由人孔溢流至街道，而依據街道與人孔水位差異，可將溢流現象分成三個部份，第一部份是當人孔水位低於街道點之水位時，此時並無溢流發生；第二部分是當人孔水位高於街道點之水位，但兩者之差異小於臨界水深 H_{cri} 時，此時以堰流方式計算溢流量，臨界水深 H_{cri} 及堰流計算方式如式(1)、式(2)所示；第三部分是當人孔水位高於街道之水

位，且兩者之差異大於臨界水深 H_{cri} 時，此時以孔口流方式計算溢流量，計算方式如式(3)所示。

$$H_{cri} = \frac{1}{\sqrt{2g}} \frac{C_d A}{C_w L} \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$Q = C_w L H^{\frac{3}{2}}, \quad H < H_{cri} \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$Q = C_d A \sqrt{2gH}, \quad H \geq H_{cri} \quad \dots\dots\dots(3)$$

式中，

- H_{cri} : 臨界水深(m)；
 C_d : 孔口流係數；
 C_w : 堰流係數；
 A : 人孔面積(m²)；
 L : 人孔周長(m)；
 Q : 人孔溢流量(m³/sec)；
 H : 人孔與街道水位差(m)。

2.5 淹水模式評估方法

本研究為了能有效地評估淹水模式的模擬結果，利用準確度、偵測率作為評估之方式，其中淹水模擬有而且淹水調查亦有即定義為“True positive, TP ”；淹水模擬有但淹水調查沒有為“False positive, FP ”；淹水模擬沒有但淹水調查有為“False negative, FN ”；淹水模擬沒有而且淹水調查亦沒有為“True negative, TN ”，準確度(Accuracy, ACC)，係描述預報模式對某事件預測正確的比例，其計算方法如式(4)所示：

$$ACC = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad \dots\dots\dots(4)$$

準確度的數值範圍為 0 至 1，越接近 1 代表模式預測越準確，而 1 即為達到完美的準確度。

偵測率(Probability of Detection, POD)，係描述在實際有發生的事件當中，有預測到的比例，其計算方法如式(5)所示：

$$POD = \frac{TP}{TP + FN} \quad \dots\dots\dots(5)$$

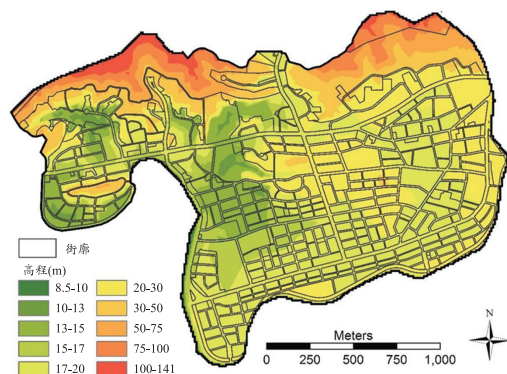


圖 3 研究區域之街廓圖。

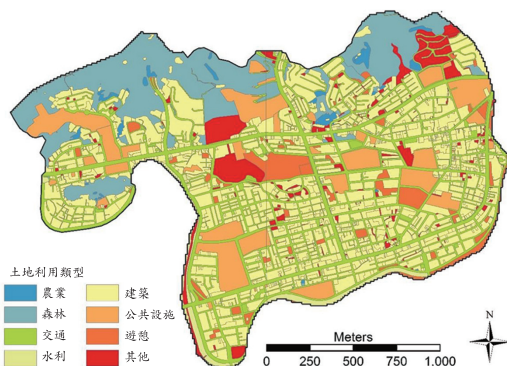


圖 4 研究區域土地利用類型圖。

偵測率的數值範圍為 0 至 1，越接近 1 代表模式預測有發生事件的能力越好，而 1 則達到完全的偵測率。

三、研究區域概述與資料蒐集

3.1 研究區域概述

本研究是以臺北市文山區內之木柵次集水分區為研究區域，透過相關資料蒐集以提供後續模式建置及參數設定來進行模擬。木柵次集水分區的東、南、西三方以景美溪堤防為界，景美堤防臺北市政府在景美溪(溪口至萬壽橋段)所興建的 200 年重現期洪水保護標準之堤防，而北面則以溪子口山(仙跡岩)及馬明潭山為界，因此木柵區域適合進行獨立之淹水模擬。而地勢大致上由東南向西北漸低其高程介於 7.8 至

表 1 土地利用類型所佔之研究區域面積百分比

土地利用類型	總面積百分比
農業	1.1%
森林	16.3%
交通	20.3%
水利	1.6%
建築	40.0%
公共設施	11.3%
遊憩	4.0%
其他	5.5%

表 2 土地利用類型所採用曼寧 n 值及不透水係數

土地利用類型	曼寧 n 值	不透水係數
農業	0.15	2%
森林	0.25	1.9%
交通	0.03	100%
水利	0.02	0%
建築	0.05	95%
公共設施	0.03	95%
遊憩	0.15	8%
其他	0.15	50%

(經濟部, 2009; O'Brien, 2017)

141.3 公尺之間木柵次集水分區之街廓與高程如圖 3 所示。

土地利用如圖 4 所示，各分類所占研究區域面積的百分比如表 1 所示，其中建築、交通以及公共設施類型所占的比例加總起來，占了研究區域將近 71.6%，由此可知此區都市化程度相當高。本研究依據此土地利用資料，參考國內外文獻(經濟部, 2009; O'Brien, 2017)，給予地表曼寧 n 值及不透水係數，如表 2 所示，以供後續集水區參數設置使用。

本研究使用 2013 年臺北市政府工務局水利工程處所提供的雨水下水道基本建置資料，設置 4 條雨水下水道系統，分別埤腹、中港、實踐以及保儀，如圖 5 所示，研究區域內下水道總長為 16,507 公尺，人孔總數為 331 個。

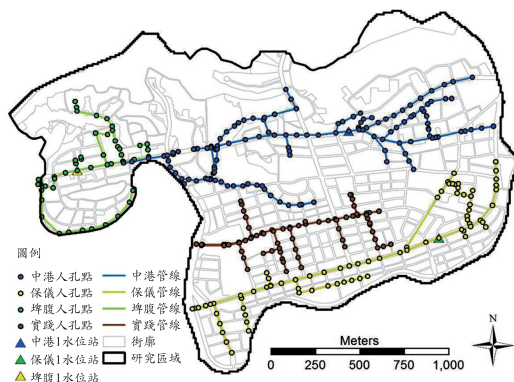


圖 5 研究區域雨水下水道系統及水位站分佈圖。

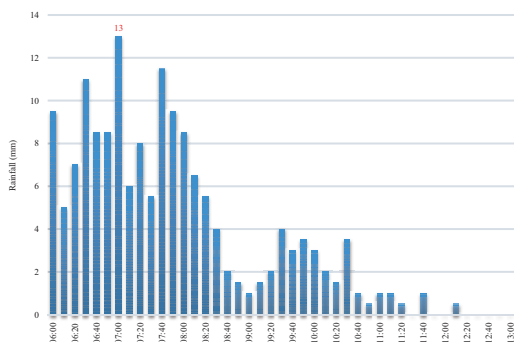


圖 6 2012/06/12 暴雨降雨組體圖。

3.2 豪雨事件淹水資料蒐集

本研究模擬的淹水事件共分二場，分別為 2012 年 6 月 12 日及 6 月 16 日兩場豪雨事件，雨量資料採用研究區域內埤腹雨量測站。6 月 12 日豪雨總降雨量達到 161.5 mm，降雨延時共達 7 小時，最大 10 分鐘降雨量達 13 mm，最大時雨量為 53.5 mm，如圖 6 所示。而 6 月 16 日豪雨總降雨量達到 160.5 mm，降雨延時共 4 小時，發生最大 10 分鐘降雨量達 27.5 mm，而最大時雨量為 66 mm，如圖 7 所示。

利用 2012 年 6 月 12 日及 6 月 16 日兩場豪雨事件之下水道水位資料來作探討。水位站在本研究中分別命名為埤腹 1、中港 1 及保儀 1，以便後續比較，位置如圖 5 所示，其中只有埤腹 1 水位站位於下水道系統出流口附近，其餘兩個水

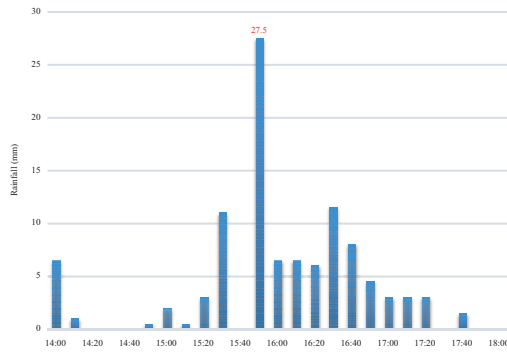


圖 7 2012/06/16 暴雨降雨組體圖。

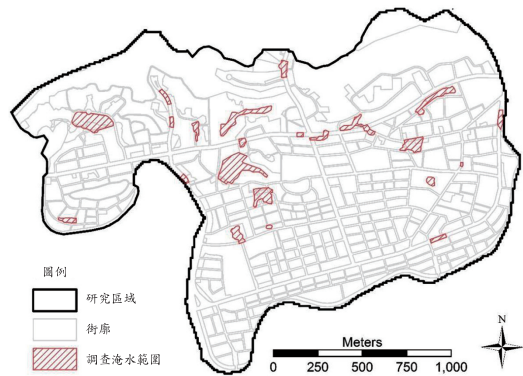


圖 9 2012/06/16 調查淹水範圍。

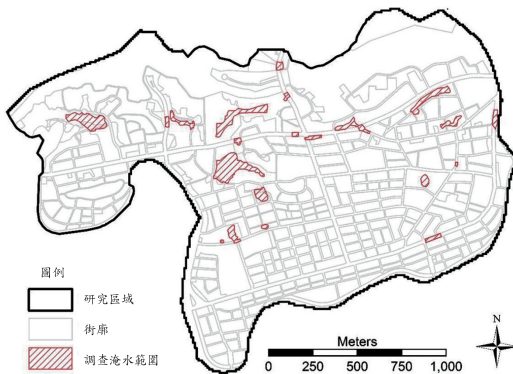


圖 8 2012/06/12 調查淹水範圍。

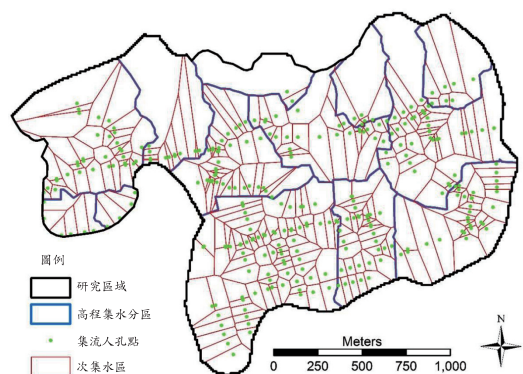


圖 10 下水道收集雨水之次集水區。

位站則位於下水道系統的中、上游。

2012 年 6 月 12 日暴雨事件之調查淹水範圍如圖 8 所示，較大淹水範圍紀錄的地區主要以世新大學校區、光輝公園附近道路、木柵路二段以及保儀路 13 巷附近區域為主。2012 年 6 月 16 日暴雨事件之調查淹水範圍如圖 9 所示，主要淹水範圍紀錄的地區大致上與 6 月 12 日暴雨事件相似；調查淹水範圍的資料來源包含了臺北市積水資訊網站以及媒體新聞報導等，藉由上述資料來源加以彙整進而整理出淹水地點及區域。

四、模式建置

本研究之降雨逕流模組以 SWMM 5.1 之地表逕流模組(RUNOFF Module)進行演算，並利用

SWMM 5.1 之幹線輸水模組(EXTRAN Module)進行一維下水道模組及一維街道模組演算，並利用 2 種雨水蒐集方式來探討對都會區淹水之影響。

4.1 降雨逕流模組建置

降雨逕流模組先將研究區域劃分為多個次集水區，傳統都會區之劃分方式為利用人孔點劃分徐昇(Thiessen)分區，但本研究區域之坡度較一般都會區大，分水嶺現象較為明顯，故先利用 GIS 軟體分析，將概略之集水分區劃分出來，再依據不同之雨水收集方法，利用人孔點(下水道收集雨水)以及街道點(街道收集雨水)來劃分徐昇分區。而後再設定次集水區之參數，如不透水係數、曼寧 n 值、窪蓄水深等，降雨逕流模擬結束後之流量歷線則作為各個人孔點或街道點之輸

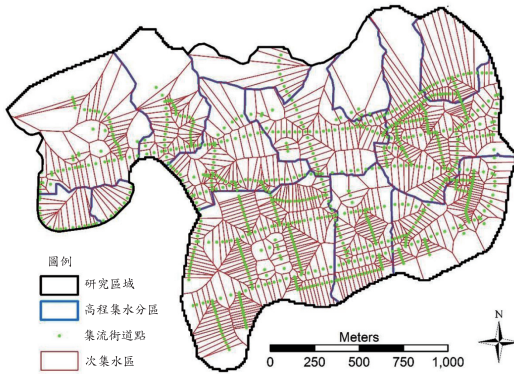


圖 11 街道收集雨水之次集水區。

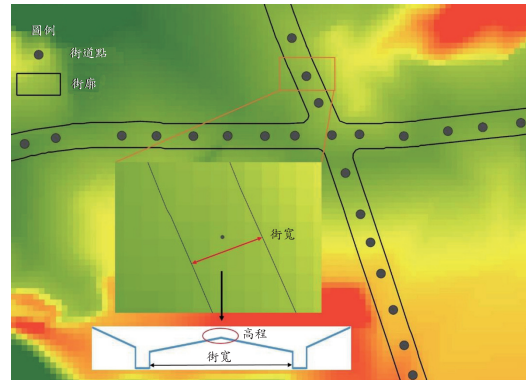


圖 12 街道設置示意圖。

入條件，其下水道收集雨水之次集水區以及街道收集雨水之次集水區如圖 10 及圖 11 所示。

4.2 一維下水道模組建置

一維下水道模組先設定下水道人孔資料、管線資料及抽水站資料，人孔資料如人孔座標、人孔底部高程、人孔深度、出流人孔座標、出流人孔底部高程、出流人孔之形式；管線資料如管線長度、管線相對高程、管徑型式、管線曼寧 n 值等；抽水站資料如前池尺寸、前池高程、抽水站操作規則等。一維下水道模組利用人孔點接收降雨逕流模組及一維街道模組之入流量並進行演算，演算過程中，當人孔水位高於街道點底部高程時，則將人孔溢流量經由連接管及人孔輸出至街道點上，而其餘未溢流之流量則流至出流人孔點。

4.3 一維街道模組

一維街道模組需設定之資料和一維下水道模組相似，但取而代之的是街道點和街道管線。街道點資料如街道點座標、街道點底部高程、街道點深度等，因下水道出流人孔才是整個排水系統之出口，故此處並不需要設定出流街道點；街道管線資料如管線長度、管線斷面、管線曼寧 n 值等。以上資料可由 GIS 軟體分析而得，其中街道點底部高程及街道管線寬度是利用分析 DEM 及街廓資料來得到，如圖 12 所示，街道點所在

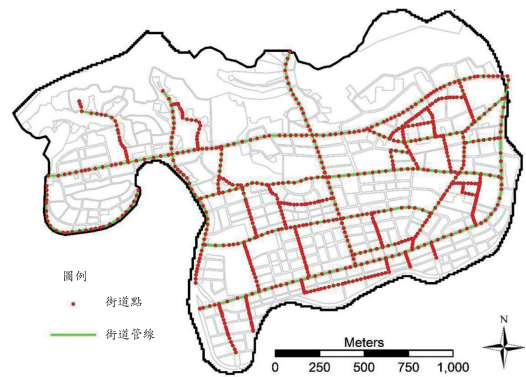


圖 13 街道系統建置結果。

之網格的高程為街道中心處高程，街道管線寬度為側溝間的寬度。

因研究區域內街道相當地密集，而多數寬度較小之街道對於雨水集流效應影響甚小，故本研究考慮建置街道寬度 6 公尺以上及臺北市降雨淹水模擬圖(臺北市政府資料開放平台)內之易淹水街道，而街道點間的距離並無固定，約略在 5~20 公尺範圍內，但在鄰近十字路口處或是易淹水之街道處則會有較密集之街道點，街道系統建置結果如圖 13 所示。一維街道模組利用街道點接收降雨逕流之入流量及人孔溢流量，並進行演算，演算過程中，街道側溝內的水流會利用水壓來分流，一部分流量透過連接管進入人孔中，而另一部分則在街道側溝內繼續往前流動。

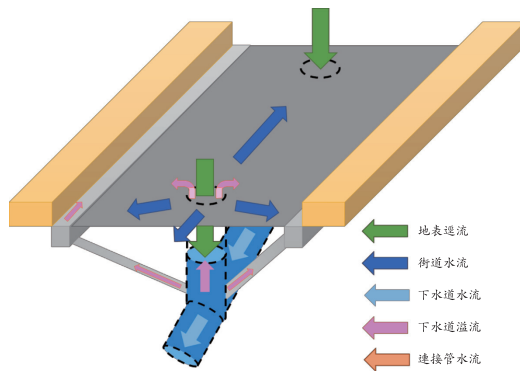


圖 14 方法 A 示意圖。

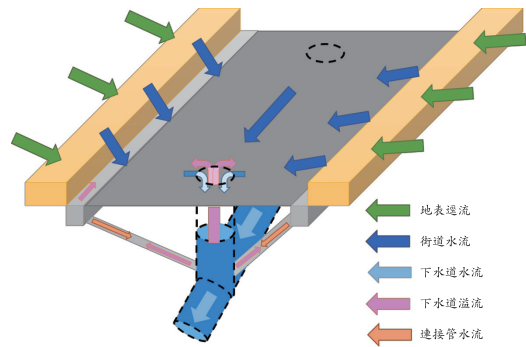


圖 15 方法 B 示意圖。

4.4 雨水收集方法

本研究利用兩種雨水收集方法，分別為下水道收集(方法 A)以及街道收集(方法 B)，探討對都會區下水道水位及街道淹水之影響。

方法 A 是將降雨逕流模組之流量輸入雨水下水道系統中，先進行一維下水道模組演算，下水道系統出口依實際狀況採自由出流或使用抽水站排水，當雨水下水道系統之水量超出雨水下水道可負荷之狀況時，其過多之水量會由人孔產生溢流並進入街道中，進行一維街道模組演算，並且於此同時，街道上之水流又可透過連接管重新進入雨水下水道系統中，如圖 14 所示。

方法 B 是將降雨逕流模組之流量輸入街道系統中，先進行一維街道模組演算，街道上的水流透過連接管進入雨水下水道系統中，進行一維下水道模組演算，下水道系統出口依實際狀況採自由出流或使用抽水站排水。然而，進入雨水下水道系統之水量超出雨水下水道可負荷之狀況時，其過多之水量會由人孔產生溢流並重新進入街道中，同時街道水流又可透過連接管進入雨水下水道系統中，如圖 15 所示。

五、模式檢定驗證與結果比較分析

本研究首先進行模式的檢定，再進行模式的驗證，並分析模擬的結果，有關模式的檢定、驗證與模擬結果的比較分析，詳細說明如下。

5.1 模式檢定

本研究利用 2012 年 6 月 12 日暴雨事件的實測下水道水位及調查街道淹水範圍作為模式檢定之依據，待檢定之參數包含次集水區內之曼寧 n 值、不透水係數、坡度、窪蓄水深及入滲係數等。

曼寧 n 值及不透水係數的初步設定值是利用 GIS 功能將次集水區內不同土地利用類型的建議值(表 2)使用面積加權平均來得到，坡度之初步設定值則是利用 GIS 功能將整個次集水區內的坡度網格平均求得，因此上述三個參數在各個次集水區內不盡相同。在檢定的過程中，因為劃分的次集水區個數相當多，無法將所有次集水區的設定值逐一調整，故考慮將具有空間變異性的參數在不同次集水區內的設定值同時增加或減少若干比例(Dongquan, 2009)，直到模擬結果與實測紀錄相當接近為止。

窪蓄水深及入滲係數之初步設定則是參考 SWMM Reference Manual (Rossman, 2015)，因窪蓄水深及入滲係數並無空間分佈資料，難以使用 GIS 功能去分析，故此處使用集總參數(lumped parameter)的概念，即每一個次集水區皆使用相同的設定值，並調整此值來達到檢定的目的(Temprano, 2006)。

檢定的結果可由下水道水位及街道淹水兩部份來探討，詳細說明如下。

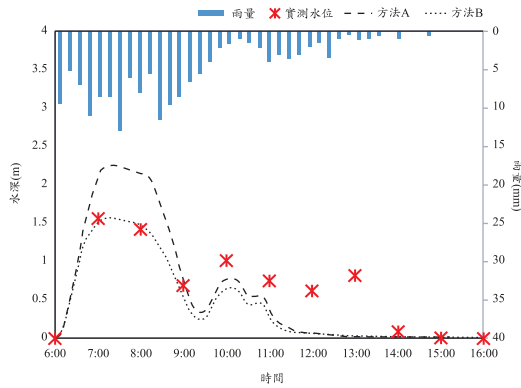


圖 16 埤腹 1 水位歷線(06/12)。

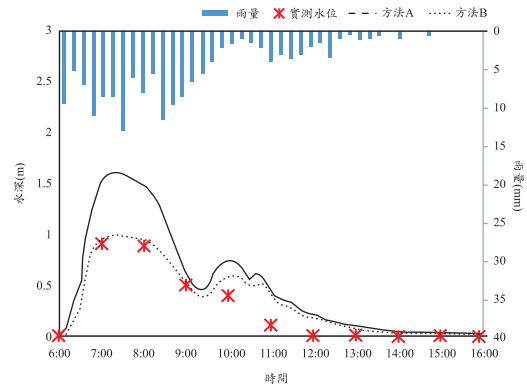


圖 17 中港 1 水位歷線(06/12)。

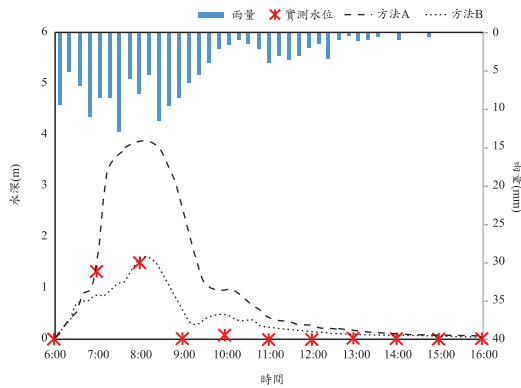


圖 18 保儀 1 水位歷線(06/12)。

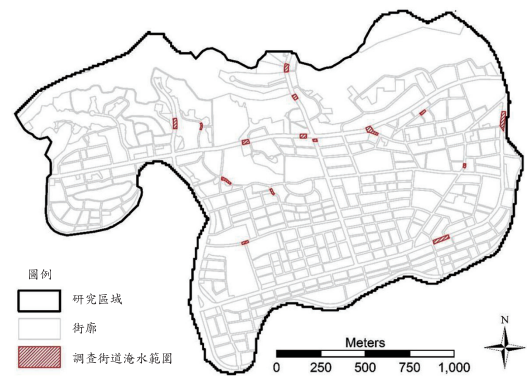


圖 19 2012/06/12 調查街道淹水範圍。

1. 下水道水位

2012 年 6 月 12 日暴雨事件的降雨延時為 7 個小時，為了掌握退水段的水位變化，總模擬時間設定為 11 個小時，下水道系統出口採自由出流，而下水道水位之實測值為每一小時一筆資料，模擬值為每十分鐘一筆資料。

埤腹 1 實測水位尖峰值為 1.56 m、洪峰抵達時間為 7:00，方法 A 水位尖峰值為 2.25 m、洪峰抵達時間為 7:10，方法 B 水位尖峰值為 1.57 m、洪峰抵達時間為 7:10；中港 1 實測水位尖峰值為 0.90 m、洪峰抵達時間為 7:00，方法 A 水位尖峰值為 1.6 m、洪峰抵達時間為 7:10，方法 B 水位尖峰值為 0.98 m、洪峰抵達時間為 7:10；保儀 1 實測水位尖峰值為 1.50 m、洪峰抵達時間為 8:00，

方法 A 水位尖峰值為 3.89 m、洪峰抵達時間為 8:00，方法 B 水位尖峰值為 1.61 m、洪峰抵達時間為 8:10。以上結果如圖 16 至圖 18 所示。

由模擬的結果來看，無論是方法 A 或方法 B，模擬水位尖峰值皆較實測值高估，而兩方法洪峰抵達時間相當接近實測值。埤腹 1 水位站的模擬值在退水段較實測值明顯低估，其中無降雨發生之退水段的實測值仍有上升的現象，因埤腹 1 水位站位於下水道系統出口附近，故合理推測是受到外水位迴水的影響，使得實測值較模擬值來得大。

2. 街道淹水

將 2012/06/12 暴雨事件的調查街道淹水範圍獨立出來，如圖 19 所示，主要淹水之街道包

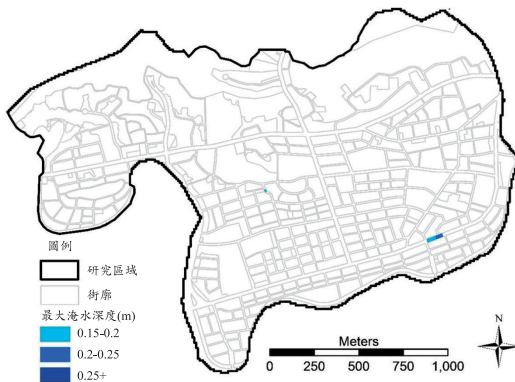


圖 20 2012/06/12 模擬街道淹水範圍(方法 A)。

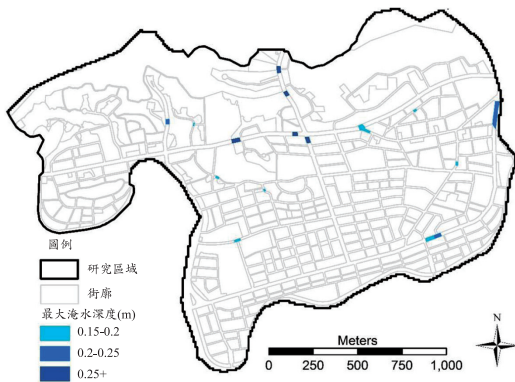


圖 21 2012/06/12 模擬街道淹水範圍(方法 B)。

含了辛亥路六段、富山路、下崙路、忠順街一段、木柵路、興隆路、木新路、保儀路及久康街等，其調查街道淹水範圍約為 1.26 公頃，約占研究區域面積的 0.4%。

方法 A 模擬出之街道淹水範圍如圖 20 所示，淹水之街道包含了下崙路一處及木新路一處，街道淹水面積約為 0.2 公頃，約占研究區域面積的 0.06%。方法 B 模擬出之街道淹水範圍如圖 21 所示，淹水之街道包含了辛亥路六段、富山路、下崙路、忠順街一段、木柵路、興隆路、木新路、保儀路及久康街等，街道淹水面積約為 1.26 公頃，約占研究區域面積的 0.4%。

由以上結果可發現方法 B 在下水道水位及

表 3 參數檢定之結果

待檢定之參數	初始設定值	檢定結果
曼寧 n 值	---	+20%
坡度(%)	---	+10%
不透水係數(%)	---	+5%
窪蓄水深(mm)	2.5	7.5
最大入滲率(mm/h)	76.2	25.4
最小入滲率(mm/h)	3.2	4.8
入滲常數(1/h)	4.14	6.69
---代表初始設定值並非為單一值		

街道淹水都與實際紀錄接近，而方法 A 基於物理機制的問題，較難調整到與實際紀錄接近。參數初始設定值及檢定後之值則如表 3 所示，爾後進行的 2012/06/16 暴雨事件，都將以此檢定完成之參數進行模擬。

5.2 模式驗證

本研究使用前一節檢定完成之參數，來模擬 2012/06/16 暴雨事件作為模式之驗證，驗證之結果一樣可從下水道水位及街道淹水兩部份來探討，詳細說明如下。

1. 下水道水位

2012 年 6 月 16 日暴雨事件的降雨延時為 4 個小時，為了掌握退水段的水位變化，總模擬時間設定為 8 個小時，下水道系統出口採自由出流，而下水道水位之實測值為每一小時一筆資料，模擬值為每十分鐘一筆資料。

埤腹 1 實測水位尖峰值為 0.67m、洪峰抵達時間為 16:00，方法 A 水位尖峰值為 1.39m、洪峰抵達時間為 16:00，方法 B 水位尖峰值為 0.75m、洪峰抵達時間為 16:00；中港 1 實測水位尖峰值為 0.85m、洪峰抵達時間為 17:00，方法 A 水位尖峰值為 1.91m、洪峰抵達時間為 16:00，方法 B 水位尖峰值為 1.01m、洪峰抵達時間為 16:00；保儀 1 實測水位尖峰值為 0.64m、洪峰抵達時間為 17:00，方法 A 水位尖峰值為 3.83m、洪峰抵達時間為 16:50，方法 B 水位尖峰值為 0.75m、洪峰抵達時間為 16:50。以上結果如圖 22

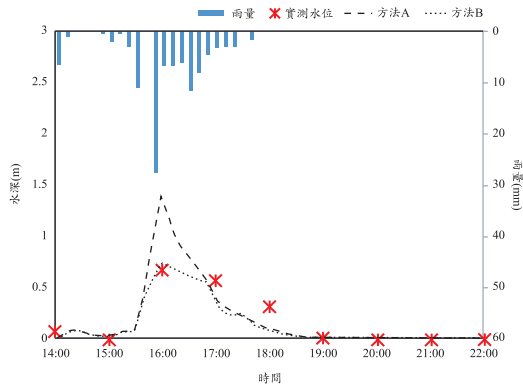


圖 22 埤腹 1 水位歷線(06/16)。

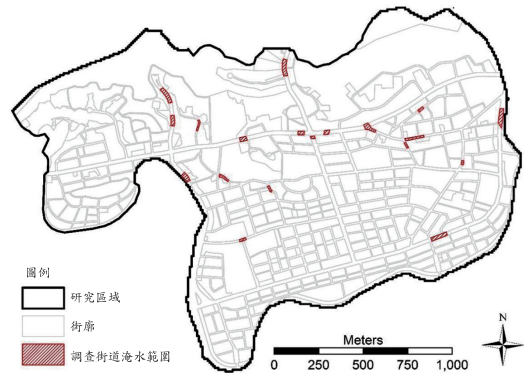


圖 25 2012/06/16 調查街道淹水範圍。

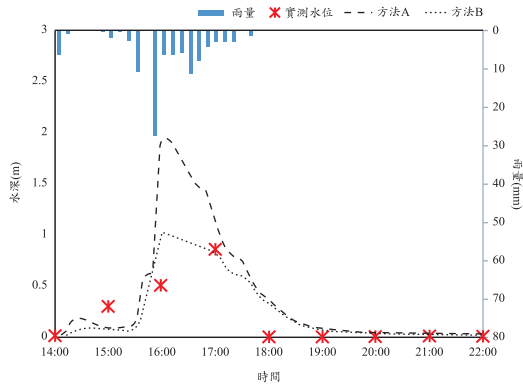


圖 23 中港 1 水位歷線(06/16)。

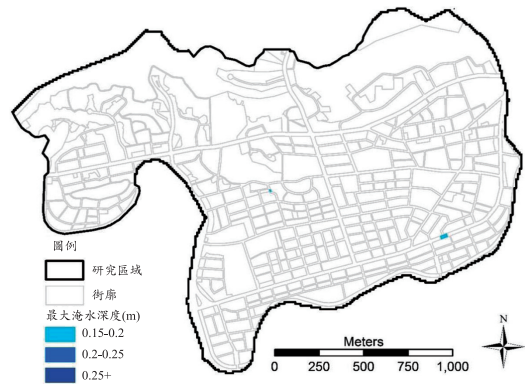


圖 26 2012/06/16 模擬街道淹水範圍(方法 A)。

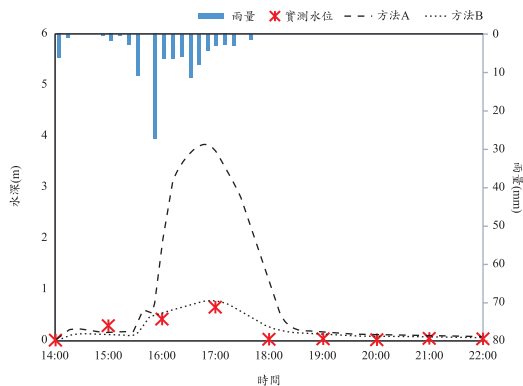


圖 24 保儀 1 水位歷線(06/16)。

至圖 24 所示。

由模擬的結果來看，無論是方法 A 或方法 B，模擬水位尖峰值皆較實測值高估，而兩方法洪峰

抵達時間相當接近實測值，但中港系統之洪峰抵達時間卻與實測值差異甚大。

2.街道淹水

將 2012/06/16 暴雨事件的調查街道淹水範圍獨立出來，如圖 25 所示，主要淹水之街道包含了辛亥路六段及七段、富山路、下崙路、忠順街一段、木柵路及木柵路三段 48 巷、興隆路、木新路、保儀路及久康街等，與 6 月 12 日暴雨事件調查範圍相當接近，其調查街道淹水範圍約為 1.87 公頃，約占研究區域面積的 0.6%。

方法 A 模擬出之街道淹水範圍如圖 26 所示，淹水之街道包含了下崙路一處及木新路一處，街道淹水面積約為 0.1 公頃，約占研究區域面積的 0.03%。

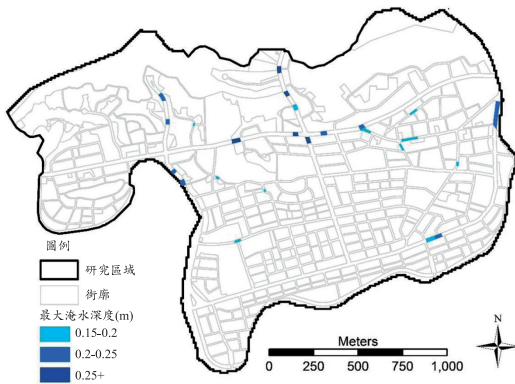


圖 27 2012/06/16 模擬街道淹水範圍(方法 B)。

方法 B 模擬出之街道淹水範圍如圖 27 所示，淹水之街道包含了辛亥路六段及七段、富山路、下崙路、忠順街一段、木柵路、興隆路、木新路、保儀路及久康街等，街道淹水面積約為 1.82 公頃，約占研究區域面積的 0.6%。

由以上結果可發現方法 B 在下水道水位及街道淹水都與實際紀錄接近，而方法 A 基於物理機制的問題，與實際紀錄差異較大，有關方法 A 及方法 B 的比較分析，將於下一節討論。由驗證的結果可知，模式檢定所選用的參數具有代表性。

5.3 模擬結果比較與分析

本節比較兩種雨水收集方法在下水道水位及街道淹水的差異，其中街道淹水是利用 2.5 節所描述之準確度及偵測率來評估，最後再將表現較佳的雨水收集方法與二維淹水模式作比較。

1. 下水道水位

本研究利用兩種雨水收集方法來將雨水導入排水系統中，為了探討兩種方法對下水道水位的影響，則利用模擬之水位尖峰值及洪峰抵達時間與實測值的差異來比較。故利用 2012 年 6 月 12 日以及 6 月 16 日兩場暴雨事件之下水道水位資料來作探討，其結果如表 4 及表 5 所示。

方法 A 為直接將降雨逕流模式之流量收集至下水道中，忽略了地表收集系統如街道、側溝及連接管等之集流與蓄留效應，即假設所有的雨

表 4 水位尖峰及洪峰抵達時間之差值(06/12)

埤腹一	水位尖峰差值(m)	洪峰抵達時間差值
方法 A	0.69	10min
方法 B	0.01	10min
中港一	水位尖峰差值(m)	洪峰抵達時間差值
方法 A	0.70	10min
方法 B	0.08	10min
保儀一	水位尖峰差值(m)	洪峰抵達時間差值
方法 A	2.39	0min
方法 B	0.11	10min

表 5 水位尖峰及洪峰抵達時間之差值(06/16)

埤腹一	水位尖峰差值(m)	洪峰抵達時間差值
方法 A	0.72	0min
方法 B	0.08	0min
中港一	水位尖峰差值(m)	洪峰抵達時間差值
方法 A	1.06	1hr
方法 B	0.16	1hr
保儀一	水位尖峰差值(m)	洪峰抵達時間差值
方法 A	3.19	10min
方法 B	0.11	10min

水都能順利且快速地進入雨水下水道中；方法 B 則是將降雨逕流模式之流量先收集至街道斷面中，並在側溝內流動，再透過連接管進入下水道中，此種方式較符合實際雨水收集機制，因此較方法 A 來得合理，故方法 B 之水位尖峰值較方法 A 更接近實測值。而 SWMM 之降雨逕流模式是將次集水區視作均勻坡度的矩形表面，忽略了次集水區內真實的地形起伏現象，因此雨水相當有效率地集流至次水區出口，造成排水系統接收過多的雨水，這可能是方法 A 及方法 B 之水位尖峰值皆較實測值來得高的原因。

模擬之洪峰抵達時間大致上與實測值接近，但在 2012 年 6 月 16 日暴雨事件的中港 1 水位站，方法 A 及方法 B 模擬之洪峰抵達時間卻快了一小時，推論可能的原因為實測值為一小時一筆，而模擬值為每十分鐘一筆，由於實測值之記

表 6 準確度與偵測率

方法編號		06/12 暴雨	06/16 暴雨
方法 A	準確度	0.96	0.94
	偵測率	0.16	0.05
方法 B	準確度	0.98	0.96
	偵測率	0.79	0.70

錄時間間距太長，因此可能無法紀錄到實際水位尖峰值及洪峰抵達時間。

2.街道淹水

本研究利用兩種雨水收集方法來將雨水導入排水系統中，為了能有系統地比較兩方法之模擬結果，則利用準確度及偵測率來評估，因本研究提出之模式只能模擬街道淹水範圍，故此處以街道總面積取代研究區域面積，而街道淹水面積取代地表淹水面積。

2012 年 6 月 12 日暴雨事件之準確度及偵測率在方法 A 為 0.96、0.16，而方法 B 為 0.98、0.79；2012 年 6 月 16 日暴雨事件之準確度及偵測率在方法 A 為 0.94、0.05，而方法 B 為 0.96、0.70，如表 6 所示。

在準確度部份，兩種方法在兩場短延時暴雨事件下皆達到 0.9 以上，主要是因短延時暴雨下，雨水下水道尚能發揮排水功能，故 *TP* 值(觀測有淹水且模擬有淹水之範圍)相當地小，*TN* 值(觀測無淹水且模擬無淹水之範圍)偏大，使得準確度較高，而方法 B 之準確度則略高於方法 A。

在偵測率部份，因方法 A 是由下水道先收集雨水，忽略了瞬間降雨強度過大或街道窪蓄處所造成之積淹水現象，故其 *FN* 值(觀測有淹水但模擬無淹水之範圍)較高導致偵測率較低，且因下水道系統收集雨水過度有效率，高估了人孔溢流量，所模擬出之街道淹水範圍大多為溢流人孔所造成；而方法 B 所模擬出的結果，除了溢流人孔處外，尚可反應出街道之高低起伏及降雨強度超過側溝排水能力所造成之淹水，較符合實際之情況，*TP* 值(觀測有淹水且模擬有淹水之範圍)較高，故方法 B 之偵測率在降雨事件下皆較方法 A 為高。

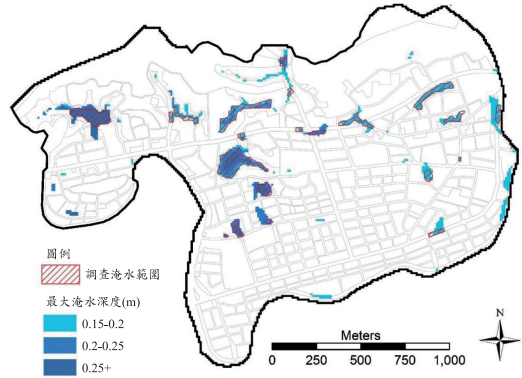


圖 28 2012/06/12 模擬淹水範圍(二維模式)。

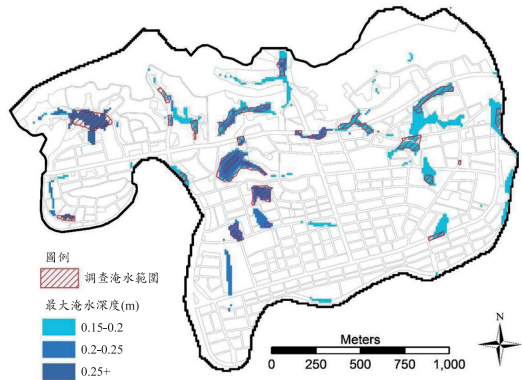


圖 29 2012/06/16 模擬淹水範圍(二維模式)。

由模擬結果可知，在短延時事件下，兩方法之淹水範圍差異甚大，如圖 20、圖 21 及圖 26、圖 27 所示，方法 A 只有零星幾處人孔溢流造成之淹水，方法 B 則有較多連續淹水範圍，並且與調查淹水範圍較為相似。

3.二維淹水模式之比較

本研究使用兩種雨水收集方法來模擬街道淹水範圍，由上一小節之結果可發現，方法 B 因較符合實際雨水收集機制，故其在下水道水位及街道淹水的表現較方法 A 為佳，則將方法 B 視為本研究街道淹水模式的代表，以便後續與二維淹水模式比較。

二維淹水模式於二場事件之模擬結果如圖 28、圖 29 所示，其中二維淹水模式之結果則是引用謝宗霖(2013)之研究，採用二維地表淹水結

表 7 準確度與偵測率(地表淹水)

淹水模式		06/12 暴雨	06/16 暴雨
街道淹水模式	準確度	0.98	0.97
	偵測率	0.12	0.13
二維淹水模式	準確度	0.98	0.96
	偵測率	0.75	0.78

表 8 準確度與偵測率(街道淹水)

淹水模式		06/12 暴雨	06/16 暴雨
街道淹水模式	準確度	0.98	0.96
	偵測率	0.79	0.70
二維淹水模式	準確度	0.97	0.94
	偵測率	0.80	0.76

合一維雨水下水道之交互演算模式，此模式先使用地表網格來收集雨水，地表網格可分為兩部份，非人孔集流網格及人孔集流網格。當降雨下在非人孔集流網格時，則進行二維漫地流模擬；當降雨或地表逕流進入人孔集流網格時，則依照網格水深使用堰流或孔口流公式進入下水道中，當下水道系統滿管且人孔水位高於地表高程時，人孔溢流至地表網格中，進行二維漫地流模擬，並可透過人孔集流網格進入其他尚有排水能力的雨水下水道中。上述過程中，二維漫地流與一維下水道為同時進行演算。

兩模式之準確度與偵測率的結果如表 7 所示，準確度部份，兩模式於兩場短延時事件中皆有不錯之準確度，主要是因 TN 值(觀測無淹水且模擬無淹水之範圍)之貢獻。偵測率部份，因街道淹水模式只能模擬出街道淹水範圍，於非街道之區域如綠地、廣場及建築物則無法模擬，故在二場事件中，其偵測率皆大幅落後二維淹水模式。

若將非街道區域之淹水範圍扣除，只考慮街道淹水範圍的部份，並用街道總面積取代研究區域面積，則兩模式之準確度及偵測率之結果如表 8 所示。在準確度部份，於兩場短延時事件中，街道淹水模式因考慮街廓形狀，較能反應街道排

表 9 模擬時間比較

降雨事件	街道淹水模式	二維淹水模式	倍數差異
0612 暴雨	2	25	12.5
0616 暴雨	2	24	12

單位：分鐘

水效應， TN 值(觀測無淹水且模擬無淹水之範圍)較大，故準確度略高於二維淹水模式。在偵測率部份，因只考慮街道淹水範圍，故兩模式偵測率之差異較小，而又因街道淹水模式街道點距離大於二維網格大小(5m)，較難捕捉細微地形起伏情形，則其偵測率略低於二維淹水模式。

街道淹水模式與二維淹水模式之模擬時間如表 9 所示，使用 Intel Core i7-4790 3.60GHz 處理器及 4.00G 記憶體之電腦進行演算，街道淹水模式時間皆在 5 分鐘內可完成，二維淹水模式則隨模擬之事件不同，模擬時間之範圍可從 24 分鐘至 25 分鐘。

現行之自記式雨量站為每 10 分鐘回傳一筆降雨資料，而本研究在短延時降雨事件的模擬時間皆可在 5 分鐘內完成(約 2 分鐘)，因此，若只考慮街道淹水範圍，並綜合準確度、偵測率及模擬時間之表現，本研究所提出之街道淹水模式或許可作為快速評估街道淹水之參考。

六、結 論

本研究發展一結合降雨逕流、一維下水道及一維街道等三種模組之街道淹水模式，藉由改變模組演算順序，可提出兩種雨水收集方法，再透過三場淹水事件之實測下水道水位及調查街道淹水範圍來進行比較分析，並將表現較佳之雨水收集方法與二維地表淹水結合一維雨水下水道之交互演算模式比較。有關本研究之結論與後續研究之建議可歸納如下。

將兩種雨水收集方法之下水道水位歷線與實測值比較，由結果可得知，方法 B 相對於方法 A，其在水位尖峰值有較準確的呈現，主要是因方法 B 考慮街道、側溝及連接管之集流與蓄留效

應，較符合實際雨水收集之情況。

本研究利用兩項指標來分析淹水模擬範圍之正確程度，在短延時事件中，因雨水下水道尚能發揮排水能力， TN 值(觀測無淹水且模擬無淹水之範圍)偏大，故兩雨水收集方法皆有不錯之準確度。本研究亦利用偵測率來進行淹水模擬範圍之分析，因偵測率已排除了 TN 值，故有助於區分模擬淹水之正確程度。由結果可知，偵測率在方法 B 中有較好的表現，因方法 B 可反應出街道之高低起伏及降雨強度超過側溝排水能力所造成之淹水，較符合真實情況。

將準確度及偵測率表現較佳之方法 B 視為本研究街道淹水模式的代表，並與二維淹水模式比較。在地表淹水部份，二維淹水模式之偵測率遠大於街道淹水模式，主要是因街道淹水模式無法模擬非街道區域之淹水。若只考慮街道淹水範圍，兩模式在準確度及偵測率皆有不錯的表現，但街道淹水模式所需之模擬時間則遠較二維淹水模式來得少，因此，若需快速評估都會區街道淹水情況，本研究所提出之街道淹水模式或許可作為參考。

參考文獻

1. Chang, T. J., Wang, C. H., Chen, A. S. and Djordjević, S., "The effect of inclusion of inlets in dual drainage modeling," *Journal of Hydrology*, 559, pp. 541-555, 2018.
2. Chang, T. J., Wang, C. H. and Chen, A. S., "A novel approach to model dynamic flow interactions between storm sewer system and overland surface for different land covers in urban areas," *Journal of Hydrology*, 524, pp. 662-679, 2015.
3. Djordjević, S., Prodanović, D., Maksimović, Č., Ivetić, M. and Savić, D., "SIPSON-Simulation of Interaction between Pipe flow and Surface Overland flow in Networks," *Water Science and Technology*, 52(5), pp. 275-283, 2005.
4. Dongquan, Z., Jining, C., Haozheng, W., Qingyuan, T., Shangbing, C. and Zheng, S., "GIS-based urban rainfall-runoff modeling using an automatic catchment-discretization approach: a case study in Macau," *Environmental Earth Sciences*, 59(2), pp. 465-472, 2009.
5. Gironás, J., Roesner, L.A. and Davis, J., *Storm water management model application manual*, Department of Civil and Environmental Engineering Colorado State University, 2015.
6. Hsu, M. H., Chen, S. H. and Chang, T. J., "Inundation simulation for urban drainage basin with storm sewer system," *Journal of Hydrology*, 234(1), pp. 21-37, 2000.
7. Huber, W. C., Dickinson, R. E., Barnwell Jr, T. O. and Branch, A., *Storm water management model*, Version 4, Environmental Protection Agency, United States, 1988.
8. Iwata, M., Fujiwara, N., Morikawa, H. and Yoo, A., "Flood Simulation of highly Urbanized Areas in Japan Using MOUSE," *Proceeding of DHI software*, DHI Software, 2001.
9. Leandro, J., Chen, A. S., Djordjević, S. and Savić, D. A., "Comparison of 1D/1D and 1D/2D coupled (sewer/surface) hydraulic models for urban flood simulation," *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(6), pp. 495-504, 2009.
10. Leandro, J., Djordjević, S., Chen, A. S., Savić, D. A. and Stanić, M., "Calibration of a 1D/1D urban flood model using 1D/2D model results in the absence of field data," *Water Science and Technology*, 64(5), pp. 1016-1024, 2011.
11. O'Brien, J. S., *FLO-2D Reference Manual Version 2017*, 2017.
12. Rossman, L.A., *Storm Water Management Model Reference Manual Volume I – Hydrology*, Nation Risk Management Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency, 2015.
13. Simões, N. E., Leitão, J. P., Maksimović, Č., Marques, A. S. and Pina, R., "Sensitivity analysis of surface runoff generation in urban

- flood forecasting,” *Water Science and Technology*, 61(10), pp. 2595-2601, 2010.
14. Temprano, J., Arango, Ó., Cagiao, J., Suárez, J. and Tejero, I., “Stormwater quality calibration by SWMM: A case study in Northern Spain,” *Water SA*, 32(1), pp. 55-63, 2006.
 15. Yen, B. C., “Hydraulics of Sewers,” *Advances in Hydroscience*, 14, pp. 1-122, 1986.
 16. Yen, B.C. and Akan, A.O. “Hydraulic design of urban drainage systems. In: Mays, L.W. (Ed.),” *Hydraulic Design Handbook*, McGraw-Hill, New York, 1999.
 17. 經濟部水利署，淡水河流域及臺北市、臺北縣、桃園縣與基隆市淹水潛勢圖更新計畫，2009。
 18. 臺北市政府資料開放平台。(http://data.taipei/) 臺北市積水資訊網站。
 - (https://heovcenter.gov.taipei/TpeFloodRecord/Default.aspx)
 19. 蔡長泰，都市雨水下水道功能與改善措施之評估研究，國科會研究報告，國立成功大學，2008。
 20. 謝宗霖，都會區淹水模式之比較與應用，國立臺灣大學生物環境系統工程學系碩士論文，2013。
 21. 顏清連，台北都會區大眾捷運系統防洪排水設計之研究，國立臺灣大學水工試驗所研究報告第 100 號，1989。

收稿日期：民國 107 年 8 月 30 日

修正日期：民國 107 年 9 月 26 日

接受日期：民國 107 年 10 月 8 日