國立成功大學

水利及海洋工程研究所

碩士論文

Department of Hydraulic and Ocean Engineering

National Cheng Kung University

Master Thesis

淺水波慣性力對都市淹水模擬之影響

Influence of Inertial Forces in Shallow Water Equation on Urban Flood Simulation

研究生:張天豪

Tien-Hao Chang

指導教授:張駿暉

Advisor: Jiun-Huei Jang

中華民國 108 年 6 月

國立成功大學

水利及海洋工程研究所

碩士論文

Department of Hydraulic and Ocean Engineering

National Cheng Kung University

Master Thesis

淺水波慣性力對都市淹水模擬之影響

Influence of Inertial Forces in Shallow Water Equation on Urban Flood



研究生:張天豪

Tien-Hao Chang

指導教授:張駿暉

Advisor: Jiun-Huei Jang

中華民國 108 年 6 月



碩士論文

淺水波慣性力對都市淹水模擬之影響 Influence of Inertial Forces in Shallow Water Equation on Urban Flood Simulation

研究生:張天豪

本論文業經審查及口試合格特此證明

法弱军

論文考試委員

指導教授: 活發平 系(所)主管: 新士版,

中華民國 108 年 6 月 25 日

中文摘要

淹水模擬對於都市地區的淹水風險評估非常重要,目前世界上常用的淹水模式,主要 採用淺水波方程式,同時模擬一維下水道水流和二維地表逕流,進行細緻化的都市淹 水模擬。本研究利用擴散波、局部慣性波和動力波三種不同動量方程式,分別探討淺 水波方程式中,慣性力對地表逕流模式和下水道模式的影響,以2012年6月12日和 2012年6月16日在臺北市文山區發生的豪雨事件,進行模擬與比較。

研究結果顯示,在淹水範圍的驗證當中,由於擴散波忽略了水體流動慣性,在流向與 坡向相反的管道中,基於擴散波的下水道模式容易高估下水道流量與地表交換量,導 致流量變化量發生劇烈震盪,產生不合理的下水道逆流和溢淹循環;而使用動力波和 局部慣性波的結果相似,同時顯示較擴散波更佳的結果,雖然無法從肉眼判斷兩者的 優劣,但是性能指標顯示動力波模式有較高的命中率,此乃因為當下水道洪水波在傳 遞的過程中,水體斷面積在空間上的變化與其在時間上的變化相互抵消,造成對流慣 性項顯得微不足道。

與下水道模式相比,忽略地表逕流模式的慣性項對淹水模擬結果的影響不明顯,這可 能是因為慣性力的影響主要來自下水道滿管時快速提高的水壓,而地表水體並不會發 生壓力快速提高的現象,所以導致地表逕流模式的差異不明顯。整體而言,簡化淺水 波動量方程式中的慣性力,對於都市地表逕流模擬影響不大,但對於下水道管流,則 容易造成逆流與震盪的現象,低估下水道的通洪能力,進而高估了淹水範圍。 關鍵字:慣性力、地表逕流、下水道管流、淺水波方程式

Ι

Abstract

Tien-Hao Chang

Jiun-Huei Jang

Department of Hydraulic and Ocean Engineering, National Cheng Kung University

SUMMARY

Flood simulation is an important reference for the disaster prevention in urban area. In this study, a coupled flood model based on shallow water equations is adopted to simulate the one-dimensional sewer flow and two-dimensional overland flow in urban areas simultaneously. Different momentum equations including diffusion wave, local inertial wave, and dynamic wave are employed to discover the influence of inertial forces in overland flow model and sewer flow model. The simulation results were compared with a high-intensity rainstorm event that occurred on June 12th in 2012 in Taipei City. In the verification of the maximum flood extent, the sewer flow models based on diffusion wave perform the worst due to the ignorance of sewer flow inertia in pipes with adverse slopes. The models using dynamic wave and local inertial wave show similar results whereas the former performs slightly better in predicting the depth and extent of flooding. The convective inertial term becomes trivial because the increase in flow cross-sections and the decrease in flow velocity canceling out each other. The influence of different momentum considerations in the overland flow model is insignificant on flood extents in comparison with those in the sewer flow model because . The results show that the simplification of momentum equations in sewer flow model has a negative influence on flood simulation accuracy.

Key words: inertial force, overland flow, sewer flow, shallow water equation

INTRODUCTION

Under global climate changing, typhoons and heavy rainfall occur more frequently in Taiwan. The simulation of flood scenarios for extreme rainfall is increasingly important as a basis for constructing flood warning systems and disaster prevention strategy in urban areas. Flood simulation in urban areas is more complicated because it needs to consider the overland flow under the influence of the drainage system. In the past, in order to reduce the computational cost while maintaining acceptable accuracy, many flood models are constructed based on simplified forms of shallow water equations by neglecting the inertial force terms. In order to understand the influence of inertial forces on urban flood simulation, this study adopted a coupled flood model which uses sewer flow model and overland flow model based on diffusion wave, local inertial wave and dynamic wave, respectively. The simulations were compared and verified with two historical flooding events in the Taipei City in 2012.

MATERIALS AND METHODS

A coupled flood model based on shallow water equations is adopted to simulate the one-dimensional (1D) sewer flow and two-dimensional (2D) overland flow simultaneously in this study. First, the coupled flood model estimates the rainfall excesses by input the rainfall and land use data. Second, the time step Δt is employed to initiate the 1D sewer flow model and the 2D overland flow model simultaneously for determining the velocity and flow depth, respectively. Third, the flow exchange rate between the sewer flow model and overland flow model is calculated and introduced into the sewer flow model and overland flow model for updating the flow depth. Finally, the whole process is repeated until the simulation time is over. The water exchange approach that simplifies the drainage system and infers that the surface water directly drains into the sewer system through

manholes and water inlets. Different momentum equations including diffusion wave, local inertial wave and dynamic wave are employed to discover the influence of inertial forces in sewer flow model and overland flow model, respectively. Diffusion wave ignores the local inertial term and convective inertial term of momentum equation; local inertial wave ignores the convective inertial term of momentum equation and dynamic wave model considers complete momentum equation.

RESULTS AND DISCUSSION

The model using diffusion wave show the worst performance in the verification of the maximum flood extent. The models using dynamic and local inertial wave equations show similar results whereas the latter performs slightly better in predicting the depth and extent of flooding. The performance of the flood models in simulating the flood extents are quantified by the performance indicators, as shown in Table 1. Under the same sewer flow models, the performance indicators for the cases with different overland flow models are similar. However, under the same overland flow models, the hit rates with dynamic wave sewer flow models are better than those with local inertial wave sewer flow models. The flow rate and local inertial term of dynamic wave sewer flow model show different patterns because the convective inertial term has a considerable influence on the flow momentum in sewer pipes. The results show that the dynamic wave model is more accurate than the local inertial model for flood simulation.

0612 Event	Overall	Uit roto	Falso alarm rata	
0012 Event	correctness rate	Intrate		
Diffusion wave OFM/ Diffusion wave SFM	0.88	0.66	0.11	
Local inertial wave OFM/ Diffusion wave SFM	0.89	0.48	0.10	
Dynamic wave OFM/ Diffusion wave SFM	0.88	0.59	0.11	
Diffusion wave OFM/ Local inertial wave SFM		0.19	0.05	
Local inertial wave OFM/ Local inertial wave SFM	0.94	0.15	0.05	
Dynamic wave OFM/ Local inertial wave SFM	0.93	0.16	0.06	
Diffusion wave OFM/ Dynamic wave SFM	0.94	0.28	0.05	
Local inertial wave OFM/ Dynamic wave SFM	0.93	0.24	0.06	
Dynamic wave OFM/ Dynamic wave SFM	0.94	0.23	0.05	

Table 1. Performance indicators

0616 Event	Overall correctness rate	Hit rate	False alarm rate	
Diffusion wave OFM/	0.83	0.76	0.17	
Diffusion wave SFM	0.82	0.76		
Local inertial wave OFM/	0.78	0.76	0.22	
Diffusion wave SFM	0.78	0.70	0.22	
Dynamic wave OFM/	0.77	0.81	0.22	
Diffusion wave SFM	0.77	0.81	0.23	
Diffusion wave OFM/	0.01	0.19	0.06	
Local inertial wave SFM	0.91	0.18	0.00	
Local inertial wave OFM/		0.20	0.08	
Local inertial wave SFM			0.00	
Dynamic wave OFM/		0.22	0.09	
Local inertial wave SFM		0.23	0.09	
Diffusion wave OFM/		0.35	0.08	
Dynamic wave SFM	0.90	0.55	0.08	
Local inertial wave OFM/	0.90	0.27	0.08	
Dynamic wave SFM	0.90	0.27	0.08	
Dynamic wave OFM/	0.80	0.20	0.00	
Dynamic wave SFM	0.09	0.50	0.09	

Note : OFM = Overland Flow Model, SFM = Sewer Flow Model.

CONCLUSION

The results of flooding simulation using diffusion wave, local inertial wave and dynamic wave are different. The diffuse wave sewer flow model tends to overestimate the water

exchange between sewer and surface because the neglect of inertial forces. As large amount of water flows into the downstream sewer pipes, the downstearm water level raises quickly.. Because the sewer flow is determined only by hydraulic heads in diffusion wave sewer flow models, the backwater occurs when the downstearm water level becomes higher than the upstearm one. This rapid transition of flow directions results in underestimation of overall flow discharges in sewer pipes. The simulations between local inertial wave and dynamic wave sewer flow model are similar. The importance of the convective inertial term increases when the flow cross-sectional area of the sewer increases.



誌謝

我能夠完成這篇論文首先要感謝指導教授 張駿暉老師的悉心指導,當研究碰到難題 或迷失方向時,老師總是耐心地與我討論並給予建議,幫助我能繼續將論文完成。在 論文口試期間,也非常感謝逢甲大學 陳憲宗老師及本系 孫建平老師對本論文的指導 與建議,讓本論文更加完善。

在撰寫論文過程中,感謝黃智聰學長協助我解決學業以及生活上的問題,並且經常關 心我的研究進度與身心狀況,對我而言是非常好的榜樣。謝謝賴威宇與我互相勉勵, 也和我分享做研究的心得以及生活中的趣事,讓我在做研究的日子裡,可以有歡笑和 溫暖。

感謝我的父母親、妹妹及家人們的鼓勵和支持,讓我能夠不用煩惱經濟上的問題,可 以專心地完成論文,也時常與我討論未來的規劃並鼓勵我繼續精進,讓我感受到了愛 與關懷,在此致上萬分的感謝。能夠完成這篇論文需要感謝非常多的人,再次至上由 衷的感謝,祝你們身體健康,萬事如意。

張天豪

2019年8月

目錄

中文摘要I					
Abstract II					
志謝 VIII					
目錄IX					
圖目錄XI					
表目錄XIV					
第一章 緒論1					
1-1 研究動機1					
1-2 文獻回顧					
1-3 本文架構					
第二章 研究方法					
2-1 研究地區與豪雨事件5					
2-2 模擬流程11					
2-3 2D OFM					
2-4 1D SFM					
2-5 SFM 和 OFM 的水流交换16					
2-6 模式驗證指標17					
第三章 结果與討論19					
3-1 最大淹水範圍比較19					
3-2 下水道流況比較					
3-3 地表與下水道水體交換46					
第四章 結論與建議50					
參考文獻					



圖目錄

圖 2-1 研究地區示意圖	6
圖 2-2 研究地區地表高程示意圖	7
圖 2-3 研究地區排水系統示意圖	
圖 2-4 研究地區土地利用示意圖	9
圖 2-5 0612 事件文山雨量站降雨組體圖	10
圖 2-6 0616 事件文山雨量站降雨組體圖	11
圖 2-7 模擬流程圖	12
圖 2-8 地表水和下水道交換示意圖	16
圖 3-1 0612 事件 O1/S1 最大淹水深度圖	21
圖 3-2 0612 事件 O2/S1 最大淹水深度圖	21
圖 3-3 0612 事件 O3/S1 最大淹水深度圖	
圖 3-4 0612 事件 O1/S2 最大淹水深度圖	
圖 3-5 0612 事件 O2/S2 最大淹水深度圖	
圖 3-6 0612 事件 O3/S2 最大淹水深度圖	23
圖 3-7 0612 事件 O1/S3 最大淹水深度圖	24
圖 3-8 0612 事件 O2/S3 最大淹水深度圖	24
圖 3-9 0612 事件 O3/S3 最大淹水深度圖	25
圖 3-10 0616 事件 O1/S1 最大淹水深度圖	25
圖 3-11 0616 事件 O2/S1 最大淹水深度圖	
圖 3-12 0616 事件 O3/S1 最大淹水深度圖	
圖 3-13 0616 事件 O1/S2 最大淹水深度圖	27
圖 3-14 0616 事件 O2/S2 最大淹水深度圖	27
圖 3-15 0616 事件 O3/S2 最大淹水深度圖	

圖 3-16 0616 事件 O1/S3 最大淹水深度圖	
圖 3-17 0616 事件 O2/S3 最大淹水深度圖	
圖 3-18 0616 事件 O3/S3 最大淹水深度圖	
圖 3-20 0612 事件 O3/S3 最大淹水深度與 O2/S0 地表水流向示意圖	
圖 3-21 0612 事件 O3/S3 最大淹水深度與 O3/S0 地表水流向示意圖	
圖 3-22 0616 事件 O3/S3 最大淹水深度與 O1/S0 地表水流向示意圖	
圖 3-23 0616 事件 O3/S3 最大淹水深度與 O2/S0 地表水流向示意圖	
圖 3-24 0616 事件 O3/S3 最大淹水深度與 O3/S0 地表水流向示意圖	
圖 3-25 上下游點位與下水道剖面位置示意圖	
圖 3-26 0612 事件上游點位流量變化圖	
圖 3-27 0612 事件下游點位流量變化圖	
圖 3-28 0616 事件上游點位流量變化圖	
圖 3-29 0616 事件下游點位流量變化圖	
圖 3-30 0612 事件 O3/S3 上游點位方程式各項時變圖	
圖 3-31 0612 事件 O3/S2 上游點位方程式各項時變圖	
圖 3-32 0612 事件 O3/S1 上游點位方程式各項時變圖	
圖 3-33 0616 事件 O3/S3 上游點位方程式各項時變圖	
圖 3-34 0616 事件 O3/S2 上游點位方程式各項時變圖	
圖 3-35 0616 事件 O3/S1 上游點位方程式各項時變圖	
圖 3-36 0612 事件 O3/S3 下游點位方程式各項時變圖	41
圖 3-37 0612 事件 O3/S2 下游點位方程式各項時變圖	41
圖 3-38 0612 事件 O3/S1 下游點位方程式各項時變圖	
圖 3-39 0616 事件 O3/S3 下游點位方程式各項時變圖	
圖 3-40 0616 事件 O3/S2 下游點位方程式各項時變圖	
圖 3-41 0616 事件 O3/S1 下游點位方程式各項時變圖	

圖	3-42	0612	事件	O3/S3	下水道剖面圖4	5
圖	3-43	0616	事件	O3/S3	下水道剖面圖4	5
圖	3-44	0612	事件	O3/S3	地表與下水道水交換示意圖 4	6
圖	3-45	0612	事件	O3/S2	地表與下水道水交換示意圖	7
圖	3-46	0612	事件	O3/S1	地表與下水道水交換示意圖	7
圖	3-47	0616	事件	O3/S3	地表與下水道水交換示意圖 4	8
圖	3-48	0616	事件	O3/S2	地表與下水道水交換示意圖 4	8
圖	3-49	0616	事件	O3/S1	地表與下水道水交換示意圖	9



表目錄

表)	2-1 SFM 方程式各項代號	14
表	2-2 耦合淹水模式組合表	16
表.	3-1 0612 事件性能指標	19
表:	3-2 0616 事件指標	20



第一章 緒論

1-1 研究動機

臺灣地處熱帶與亞熱帶地帶之間,在夏秋雨季常有強勁的熱帶氣旋侵襲,每每都為臺 灣帶來充沛的雨量,卻也造成了部分地區的淹水發生。隨著社會經濟發展與全球氣候 變異,颱風與強降雨侵襲的次數愈來愈頻繁,都市地區由於地勢平緩,地面透水性不 佳,地表水必須經由都市下水道系統排除,現有的排水系統恐難以負荷。為了因應這 種情況,針對極端降雨進行淹水情境的模擬日益重要,可以做為建構淹水預警系統的 基礎,以及都市防災規劃的參考。

為了瞭解極端降雨造成的淹水深度及影響範圍,經濟部水利署自民國 88 年開始製作 淹水潛勢圖作為防災參考,透過不同重現期下之設計降雨條件,考量地形地貌、入滲 條件、區域排水、以及水工設施等等因素,進行高精度的水理模式演算。水利署淹水 潛勢圖目前已經發展到第三代,第一代採用台大零慣性波二維淹水模式,未考慮淺水 波方程式中的慣性項以及下水道系統;第二代以後,採用荷蘭發展的 SOBEK 模式, 以求解完整的動力波模式、納入下水道、區域排水等水工設施等更精密的環境數據來 進行模擬。然而, SOBEK 模式在二維漫地流的模擬速度不佳,為了縮短模擬時間, 現行的做法乃先將降雨藉由人孔輸入下水道系統,待人孔溢淹後才模擬地表水的流況, 雖然可以加快模擬速度,但對於下水道系統不夠完善的地區,容易低估地表逕流的情 況(Chang et al., 2018)。此外,由於 SOBEK 為商用模式,不開放原始程式碼給使用者 進行編修,因此無法針對許多在地問題進行調整。

為了克服目前淹水模擬的問題,張駿暉等(Jang et al., 2018)以擴散波方程式為基礎, 透過合理的水流交換機制,開發二維漫地流與一維下水道耦合淹水模式(COS-Flow model, Coupled Overland Sewer Flow model),得出良好的模擬結果。然而,該模式忽 略了水流的慣性力,在坡度較大的地表路段或是幾何條件較複雜的下水道管段,可能 會造成較大的誤差。因此,本研究改進原本的擴散波模式,以動力波求解完整的淺水 波動量方程式,並進一步探討慣性力考量與否對淹水模擬結果的影響。希冀所研發完 成的淹水模式,可以更加精確地描述都市地表淹水與下水道的流動情形,作為災因分 析、水工設計、以及即時預警之用。

1-2 文獻回顧

都市地區的淹水模擬需要考量排水系統的影響,因此都市地區的淹水模式較為複雜 (Schmitt et al., 2004; Smith, 2006)。由於過去計算機能力有限,便將都市的排水路網分 為兩個系統,其中河道與地表逕流的流路為主要系統,下水道與人孔則為次要系統, 分別建構出一維(1D)或二維(2D)主要系統模式和 1D 次要系統模式,這種模擬方法被 稱為雙排水系統模式(Djordjević et al., 1999; Maksimović et al., 2009; Leandro et al., 2009; Morales-Hernández et al., 2013; 蔡世瑛, 1998), 但主要系統過度簡化了地表逕 流的運動狀況,導致雙排水系統模式無法模擬地表逕流受障礙物的影響,或人孔發生 溢淹時地表逕流的變化,應開發一維下水道模式(1D Sewer Flow Models, SFMs)以及二 維地表逕流模式(2D Overland Flow Models, OFMs)進行都市淹水模擬(Mark et al., 2004)。近年來,隨著計算機能力和數據品質提升,推動了1D SFMs和 2D OFMs的 進步和普及(Bates et al., 2010; Chen et al., 2012; Halcrow, 2012; Leandro et al., 2014; 簡 名毅,1999),這也使得運用 1D SFM 和 2D OFM 的耦合模式模擬都市淹水的方法備 受重視 (Hunter et al., 2007; Kuiry et al., 2010; Seyoum et al., 2012; Jahanbazi and Egger, 2014; Russo et al., 2015; Leandro and Martins, 2016; 陳欣怡, 2001; 謝宗霖, 2013)。 基於對降兩演變至逕流過程的不同考量,Chang et al. (2018)歸納出 SFM/OFM 和 OFM/SFM 兩種耦合方法。SFM/OFM 首先將超滲降雨量直接輸入 SFM,以進行下水 道流動的模擬。當人孔發生溢淹時,會啟動 OFM 並開始進行地表逕流的模擬 (Djordević et al., 2005; Chen et al., 2007; Leandro et al., 2009), 但是這種方法因為沒有

考慮地表逕流的動力狀況,將導致錯估淹水深度(Change et al., 2018)。而 OFM / SFM 的耦合方法,是先將雨量資料輸入 OFM,計算出進入排水系統前的地表逕流,再使用 SFM 模擬下水道的流況,較符合實際洪水集流情形。

大多數淹水模式使用淺水波方程式作為控制方程式(Reza et al., 2012),過去為了降低 運算成本且同時維持可接受的準確度,開發了許多簡化的形式,包括使用忽略了對流 慣性項的局部慣性波(Local Inertial Wave)以及同時忽略局部慣性項與對流慣性項的擴 散波模式(Diffussion Wave)。許多學者指出,局部慣性波模式的表現與使用完整動量 方程式的動力波模式(Dynamic Wave)接近,而且相較擴散波模式有更好的效能(Bates et al., 2010);而擴散波模式(Cea et al., 2010),通常會使用速度係數(celerity coefficient) 和擴散係數(diffusion coefficient)來提升模擬結果的準確度,並且使用不同的數值方法 來進行模擬(Al-Maliki et al., 2016)。但這些過去所使用的簡化模式,多半應用於地表 與下水道坡度較平緩的地區,因為當坡度小時慣性力的影響較小可以忽略。地表逕流 模式也可以通過結合美國環保署開發的SWMM模式(Storm Water Management Model) 來建構耦合模式(Martins et al., 2018),由於SWMM支援下水道動力波模式,因此在 下水道密集的都市地區可以有更好的表現。對於都市地區,由於模擬尺度小,可能無 法保持其應有的計算精度與效率(Hunter et al., 2007)。

為了解不同的動量方程式對淹水模擬結果有何差異,本研究採用 OFM/SFM 耦合淹水 模式,分別基於擴散波、局部慣性波和動力波來開發 SFM 和 OFM,總共配對出9組 不同的組合分別進行模擬,並以 2012 年發生在臺北市文山區的兩場歷史淹水事件, 進行結果比較與驗證。

1-3 本文架構

本篇論文主要分為四個章節,各章節大綱如下: 第一章 緒論:說明研究動機,針對相關文獻進行探討和回顧,最後介紹本文的結構 大綱;

第二章 研究方法:介紹本研究的研究地區,說明模式的模擬流程以及理論基礎,還 有模式驗證的性能指標;

第三章 結果與討論:依照第二章研究方法做出來的結果進行討論,分析 0612 和 0616 事件的性能指標表現,比較不同模式的最大淹水範圍,繪製下水道流況並分析方程式 各項的變化,以及了解不同模式之間的表現;

第四章 結論與建議:總結以上結果並給予模式使用與未來研究方向的建議;

最後附上參考文獻,條列本文所引用的文獻出處。



第二章 研究方法

本文藉由簡化淺水波方程式(shallow water equations)中的動量方程式,可以得到3種 不同的控制方程式,再依據控制方程式建構出不同的1D SFM和2D OFM後,便可 將1D SFM和2D OFM 配對出9種組合來進行模擬,詳述如下。

2-1 研究地區與豪雨事件

臺北市位於臺灣北部,面積約 272km²,人口約 260 萬,具有完好的排水系統。臺北 市的排水系統的設計防洪降雨強度為 78.8mm/h,由下水道管路和抽水站組成,能夠 在流量尖峰時以 2,152cms 的流量為下水道排水。本文採用臺北市文山區的歷史淹水 區域進行研究,如圖 2-1 所示。文山區是中華民國臺北市轄下的市轄區,位於臺北市 南方,與新北市深坑區、新店區接壤。文山區的面積約 31.5 km²,人口數量約 27 萬, 國立政治大學、臺北市立萬芳醫院與考試院等行政、醫療和教育機構皆設於此本區, 臺北捷運文湖線與松山新店線皆有於本區設站。研究地區內之雨水下水道主要屬於興 隆排水系統,降雨容受度為 59.1mm/h,研究地區內的下水道總長度約 15.6km。

5



圖 2-1 研究地區示意圖

研究地區位於文山區西北方且三面環山,東邊與北邊屬於文山區內之山區,南邊為景 美山,西邊則為景美溪,地表高程如圖 2-2 所示。由於淹水地點位於下水道上游,因 此將下水道下游地區從研究地區中排除,縮短模擬花費的時間。



研究地區的下水道系統如圖 2-3,屬於興隆排水系統,其中由東南方至西南方的下水 道幹線為興隆幹線,地表水入流後由東南方與東北方的上游流至西南方的下游,經過 模擬後發現忽略下游排水系統並不影響模擬範圍的淹水模擬結果。圖 2-4 顯示了研究 地區的九種基本土地利用:農業、森林、交通、水利、建築、公共、遊憩、礦鹽和其 他土地利用。這些數據將依照 SCS 曲線值法進行入滲計算。





臺北市於民國 101 年 6 月 11 日受西南氣流及滯留鋒面接近影響,當日 22 時起開始出 現較強之降雨,氣象局文山雨量站於 6 月 11 日至 6 月 12 日之累積雨量為 401.5mm。 本文採用了 6 月 12 日發生在臺北市文山區的淹水事件數據(以下簡稱 0612 事件),該 淹水事件是由受西南氣流及鋒面影響的豪雨所造成,將自臺北 55 個雨量站取得的 10 分鐘降雨數據,以反距離加權法(inverse distance weighted, IDW)進行插值計算,並於 5m*5m 的二維網格單元中生成降雨圖。圖 2-5 顯示了文山雨量站觀測到的 0612 事件 降雨組體圖。該降雨發生自 00:00,結束於 10:30,10 分鐘最大降雨量 12.5mm 約發生 於 06:30,最大 1 小時降雨量為 57mm,總降雨量為 330mm。本次豪雨事件文山區積 淹水狀況嚴重,主要淹水地區位於研究地區內福興路、興德路一帶,該處的下水道處 於興隆幹線與興隆排水系統,其降雨容受度為 59.1mm/hr,但由於該處排水系統的集 水區局地處低窪,導致該處匯集了大量的雨水流入下水道,造成興隆幹線水位過高並 發生滿管現象,致使福興路、興德路等區域之地表水無法順利排入興隆幹線,進而發 生災情。另一場於101年6月16日的淹水事件(以下簡稱0616事件)與0612事件不 同,圖2-6為文山雨量站觀測到的0616事件降雨組體圖,該降雨發生自13:10,結束 於17:30,10分鐘最大降雨量20mm約發生於15:30,最大1小時降雨量為81.5mm, 3小時累積雨量高達160mm,總降雨量為163.5mm。由於降雨時間過於集中,造成文 山區多處低窪地區側溝排水不及,出現短暫淹水現象。0616事件將用於模式驗證, 以判斷不同降雨事件和不同耦合模式間的表現差異。



圖 2-5 0612 事件文山雨量站降雨組體圖



本研究之 SFM 和 OFM 的耦合流程如圖 2-7 所示。首先依照淹水預警的操作流程(吳 書韓,2007; B玟潔,2018),先輸入模擬地區的地表高程、土地利用,評估入滲狀 況,將雨量站每 10 分鐘一筆的降雨資料內插後轉換至劇烈天氣監測系統(Quantitative Precipitation Estimation and Segregation UsingMultiple Sensor, QPESUMS)雷達降雨觀 察資料的格式,然後讀取降雨量和土壤入滲率的資料來決定超滲降雨量,接著利用 Courant-Friedrich-Lewy 條件得到時間間隔 Δt (Courant et al., 1967),再分別以 1D SFM 和 2D OFM 計算下水道流速 V;下水道水深 H;地表 x 方向的流速 u;地表 y 方向的 流速 v 和地表水深 h,並進一步估算出 1D SFM 和 2D OFM 之間的交換流量 Q 後,將 其代入連續方程式中,更新每個網格單元的地表水深 h 和下水道的水深 H,最後重複

整個流程,直到模擬時間達到設定的最終模擬時間t_{final}。



2-3 2D OFM

本研究之 2D OFM使用 Hsu et al. (2000)的二維水工模型,採用交替方向隱式法求解, 而為了將 1D SFM 估算的溢淹納入其中,因此在連續方程式中添加一項來進行修正。 控制方程式可以表示為:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial (uh)}{\partial x} + \frac{\partial (vh)}{\partial y} = q + \frac{Q}{A_o}$$
(1)

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} + g\frac{\partial(h+z)}{\partial x} = -ug\left[\frac{n_x^2\sqrt{u^2+v^2}}{h^{4/3}} + \frac{q}{hg}\right]$$
(2)

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial y} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + g\frac{\partial(h+z)}{\partial y} = -vg\left[\frac{n_y^2\sqrt{u^2+v^2}}{h^{4/3}} + \frac{q}{hg}\right]$$
(3)

其中,(1)式為連續方程式;(2)式和(3)式分別為 x 和 y 方向的動量方程式;u 和 v 分 別為 x 和 y 方向的流速;q 為有效降雨;h 為地表水深;z 為地表高程;g 為重力加 速度;nx 和 ny 分別為 x 和 y 方向的曼寧係數;A。為二維網格單元面積;Q 為下水 道溢流量。本文依據擴散波、局部慣性波和動力波方程式的差異,通過忽略動量方程 式中的慣性項,來建構擴散波、局部慣性波和動力波 OFM,(2)式和(3)式即為動力波 OFM 所使用的動量方程式,擴散波與局部慣性波的動量方程式如下:

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + g \frac{\partial(h+z)}{\partial x} = -ug \left[\frac{n_x^2 \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} + \frac{q}{hg} \right]$$
(4)

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + g \frac{\partial(h+z)}{\partial y} = -vg \left[\frac{n_y^2 \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} + \frac{q}{hg} \right]$$
(5)

其中,(4)-(5)式為局部慣性波 OFM 使用的動量方程式,其中忽略了對流慣性項,保 留局部慣性項、重力與壓力項與摩擦項。

$$g\frac{\partial(h+z)}{\partial x} = -ug\left[\frac{n_x^2\sqrt{u^2+v^2}}{h^{4/3}} + \frac{q}{hg}\right]$$
(6)

$$g\frac{\partial(h+z)}{\partial y} = -vg\left[\frac{n_y^2\sqrt{u^2+v^2}}{h^{4/3}} + \frac{q}{hg}\right]$$
(7)

其中,(6)-(7)式為擴散波 OFM 使用的動量方程式,其中忽略了所有的慣性項,僅考 量重力項和摩擦項。

本文採用有限差分交替方向顯式法(alternate direction explicit, ADE)的方案,將每個時 步(Δt)分成兩個相同的時間間隔($\Delta t/2$),並依據(1)-(7)式交替更新 x 和 y 方向上的水

深和流速。

2-4 1D SFM

在本文中,已經發展出基於有限差分隱式法,用於下水道流動模擬的1DSFM。其中為了同時計算全部和部分的整體管道流量,採用了普里斯曼細縫法(Preissmann slot method; Cunge and Wegner, 1964),在下水道管路上創造一個狹窄的細縫,並藉由細縫中的水位來計算下水道滿管時的水壓。經由在連續方程式中加入一個匯集項,來描述OFM的溢流,所以連續和動量方程式可以表示為:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial (VA)}{\partial s} = -\frac{Q}{l}$$
(8)

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial V^2}{\partial s} + g \frac{\partial (H+Z)}{\partial s} = -g \frac{n_s^2 |V| V}{R^{\frac{4}{3}}}$$
(9)
$$H = \begin{cases} f(A) &, \text{ if } A \le A_p \\ D + \frac{(A-A_p)}{B_s} &, \text{ if } A \le A_p \end{cases}$$
(10)

其中,D為管徑;A為水流的截面積;Ap為管路截面積;1為相交於網格單元內的管長;H 為管內水深;Z為管底高程;s為流動方向;R為水力半徑;g為重力加速度;ns為s方向 上的曼寧係數;Bs為細縫寬度且 Bs=gAp/a²;a為壓力波波速。其中(8)式為連續方程 式,(9)式為動量方程式,經由展開(9)式的對流慣性項後將(8)式代入,可以將(8)式和 (9)式整理為控制方程式如下:

$$\frac{\partial Q_{P}}{\partial t} = 2V \frac{\partial A}{\partial t} + V^{2} \frac{\partial A}{\partial s} - gA \frac{\partial (H+Z)}{\partial s} - gA \frac{n_{s}^{2} |V| V}{R^{4/3}}$$
(11)

其中,Qp為下水道的流量,本文為了方便進行 SFM 控制方程式中各項的分析,分別 對各項給予代號,如下表所示:

表 2-1 SFM 方程式各項代號

模式	局部	對流	對流	重力與壓力項	摩擦項
	慣性項	慣性項1	慣性項2	±115/±117	
SFM	∂Q ∂t	$2V \frac{\partial A}{\partial t}$	$V^2 \frac{\partial A}{\partial s}$	$-gA\frac{\partial(H+Z)}{\partial s}$	$-gA\frac{n_s^2 V V}{R^{4/3}}$
OFM (x 方向)	$\frac{\partial(hu)}{\partial t}$	$\frac{\partial(hu^2)}{\partial x}$	$\frac{\partial(huv)}{\partial y}$	$g \frac{\partial(h+z)}{\partial x}$	$-ug\left[\frac{n_x^2\sqrt{u^2+v^2}}{h^{4/3}}\right]$
OFM (y 方向)	$\frac{\partial(hv)}{\partial t}$	$\frac{\partial(hv^2)}{\partial y}$	$\frac{\partial(huv)}{\partial x}$	$g \frac{\partial(h+z)}{\partial y}$	$-vg\left[\frac{n_y^2\sqrt{u^2+v^2}}{h^{4/3}}\right]$
代號	L	C1	C2	G	F

其中 SFM 的對流慣性項 C1 和 C2 分別代表水體斷面積在空間與時間上的變化,而 OFM 的對流慣性項 C1 和 C2 則代表水體在 x 與 y 方向上的變化。

本文依據擴散波、局部慣性波和動力波方程式的差異,改變控制方程式的組成,(11) 式即為動力波 SFM 的控制方程式,局部慣性波的控制方程式如下:

$$\frac{\partial Q_{P}}{\partial t} = -gA \frac{\partial (H+Z)}{\partial s} - gA \frac{n_{s}^{2}|V|V}{R^{4/3}}$$
(12)

其中忽略了對流慣性項 C1 和 C2,保留局部慣性項 L、重力與壓力項 G 與摩擦項 F。 擴散波的控制方程式如下:

$$0 = -gA \frac{\partial(H+Z)}{\partial s} - gA \frac{n_s^2 |V| V}{R^{4/3}}$$
(13)

其中僅保留重力與壓力項G和摩擦項F。1DSFM與使用交替方向顯式法(ADE)的二 維模型不同,一維模型採用隱式向後歐拉方法(Ascher and Petzold, 1998),此方法通過 函數迭代(Piscard, 1890)來求解,以提高其穩定性。

本研究為了瞭解不同模式的耦合模擬表現,將基於擴散波、局部慣性波和動力波方程 式開發的 OFM 記為 O1、O2 和 O3,SFM 同樣記為 S1、S2 和 S3,分別配對成 9 組 來進行耦合淹水模擬,並將不同的耦合模式記為 O1 / S1、O1 / S2、O1 / S3 等等以此 類推。

	擴散波 OFM	局部慣性波 OFM	動力波 OFM		
擴散波 SFM	O1 / S1	O2 / S1	O3 / S1		
局部慣性波 SFM	O1 / S2	O2 / S2	O3 / S2		
動力波 SFM	O1 / S3	O2 / S3	O3 / S3		

表 2-2 耦合淹水模式組合表

2-5 SFM 和 OFM 的水流交换

本研究採用 Jang et al. (2018)所建議的方法,如圖 2-8 所示,該方法經由單個路面排水 口,將地表水排入與 2D 網格單元相交的管段中心對應的下水道節點。當下水道的水 頭超過地表水時,下水道將通過人孔溢淹到最近的二維網格單元中心。



圖 2-8 地表水和下水道交換示意圖

下水道和地表水之間的交換率是根據地表水的水頭 $z_h = z + h$ 和下水道的水頭 $z_H = Z + H$ 來確定(Lee et al., 2013; Noh et al., 2016)。當 $z_h \leq z_H$ 時,下水道通過人孔 產生溢淹。溢淹可以藉由使用如下的堰流公式或孔口公式來估算:

$$Q_{s} = \frac{2}{3} C_{w} w_{m} \sqrt{2g} (z_{H} - z_{h})^{3/2} \text{ for } (z_{H} - z_{h}) / w \le 0.5$$
(14)

$$Q_s = C_o A_m \sqrt{2g(z_H - z_h)}$$
 for $(z_H - z_h)/w > 0.5$ (15)

其中 w_m 和 A_m 分別為人孔的周長和面積; C_w 為堰係數; C_o 為孔口係數。當 $z_h > Z_H$ 時,地表水通過路面排水口排入下水道。排入流量可以使用以下公式確定:

$$Q_{i} = \frac{2}{3} C_{w} w_{i} \sqrt{2g} (z_{h} - z_{H})^{3/2} \text{ for } (z_{h} - z_{H}) / w \le 0.5$$
(16)

$$Q_i = C_o A_i \sqrt{2g(z_h - z_H)} \text{ for } (z_h - z_H)/w > 0.5$$
 (17)

其中w_i和 A_i分別為路面排水口的寬度和面積。 基於(14)-(17)式可以得到(1)式和(6)式的 Q = MQ_s - nQ_i,其中 M 為網格單元中的人 孔數量; n 為網格單元中的路面排水口數量, M = 0 和 N = 0 表示網格單元內沒有 人孔。

2-6 模式驗證指標

為了評估淹水模式的性能,將使用以下性能指標(Mason, 1982; Jang et al., 2012; Jang, 2015)比較模擬結果的最大淹水深度和洪後調查的最大淹水範圍:

$$OCR = \frac{r+c}{r+m+f+c}$$
(18)

$$HTR = \frac{r}{r+m}$$
(19)

$$FAR = \frac{f}{f+c}$$
(20)

其中 r (hit) 代表有淹水且預測有淹水的區域; m (miss alarm) 代表有淹水但預測未 淹水的區域; f (false alarm) 代表未淹水但預測有淹水的區域; c (correct rejections) 表示未淹水且預測未淹水的區域。OCR, HTR 和 FAR 分別表示整體正確率(overall correctness rate)、命中率(hit rate)和誤警率(false alarm rate)。為了增加模式的可信度, 本文使用 O3/S3 對民國 101 年 6 月 16 日同樣在研究地區發生的淹水事件(以下簡稱 0616 事件)進行模擬,並以性能指標檢驗 O3/S3 在不同淹水事件的表現。



第三章 結果與討論

3-1 最大淹水範圍比較

依據性能指標(11)-(13)式將0612事件的9組模擬結果進行分析,可以得到表3-1的結果:

	OCR	HTR	FAR			
	(整體正確率)	(命中率)	(誤警率)			
O1/S1	0.88	0.66	0.11			
O2/S1	0.89	0.48	0.10			
O3/S1	0.88	0.59	0.11			
O1/S2	0.94	0.19	0.05			
O2/S2	0.94	0.15	0.05			
O3/S2	0.93	0.16	0.06			
O1/S3	0.94	0.28	0.05			
O2/S3	0.93	0.24	0.06			
O3/S3	0.94	0.23	0.05			

表 3-1 0612 事件性能指標

從性能指標中可以發現, 在同樣的 SFM 條件下, OFM 對 OCR 與 FAR 的結果影響 不大, 擴散波 OFM 雖然有較高的 HTR, 但差別不大。相較之下,當 OFM 相同時, SFM 的影響明顯超過 OFM。使用擴散波 SFM 的 3 組結果雖然命中率最高, 但在 整體正確率以及誤報率的表現, 都比使用局部慣性波 SFM 與動力波 SFM 差,這 是因為擴散波 OFM 明顯高估了淹水的範圍所導致。局部慣性波 SFM 的結果相比, 與 S3 擁有相近的 OCR 與 HTR 相近, 但在 HTR 上有更好的表現。顯示當控制方 程式愈完整, 模擬結果也愈貼近現實狀況。值得一提的是在 9 組結果中, 命中率 最高僅有 0.66, 說明洪後調查的最大淹水範圍有被高估的可能。0616 事件的性能 指標如下表:

	OCR	HTR	FAR
	(整體正確率)	(命中率)	(誤警率)
O1/S1	0.82	0.76	0.17
O2/S1	0.78	0.76	0.22
O3/S1	0.77	0.81	0.23
O1/S2	0.91	0.18	0.06
O2/S2	0.90	0.20	0.08
O3/S2	0.89	0.23	0.09
O1/S3	0.90	0.35	0.08
O2/S3	0.90	0.27	0.08
O3/S3	0.89	0.30	0.09

表 3-2 0616 事件指標

本研究將OFM和SFM依照擴散波、局部慣性波和動力波配對出 9組耦合模式後, 分別模擬 0612 事件和 0616 事件的最大淹水深度圖,如圖 3-1 至與圖 3-18 所。從 最大淹水深度圖中可以發現,使用擴散波 SFM 的模擬結果皆發生嚴重淹水,其他 組耦合模式則無此現象,不論是使用局部慣性波或動力波,模擬結果差異不大, 無法以肉眼判斷優劣。在最大淹水深度圖中,有許多不同結果中共有的淹水地點, 其中位於東北角的嚴重淹水地點靠近臺北捷運辛亥站,現已設置滯洪池應無淹水 之疑慮,但由於本文未蒐集到詳細數據,因此無法進行模擬。位在其他地點的零 星淹水狀況,則是受限於網格的精度,使得部分積水蓄積於小巷弄當中,被建築 物環繞無法排出。另一個誤差的來源則可能是該地點確實發生淹水,但淹水地點 周遭沒有建築物或遠離人群,不會影響當地居民,因此在淹水調查中被忽略,比 如公園、學校或未開發土地等等。



圖 3-1 0612 事件 O1/S1 最大淹水深度圖



圖 3-2 0612 事件 O2/S1 最大淹水深度圖



圖 3-3 0612 事件 O3/S1 最大淹水深度圖



圖 3-4 0612 事件 O1/S2 最大淹水深度圖



圖 3-5 0612 事件 O2/S2 最大淹水深度圖



圖 3-6 0612 事件 O3/S2 最大淹水深度圖



圖 3-7 0612 事件 O1/S3 最大淹水深度圖



圖 3-8 0612 事件 O2/S3 最大淹水深度圖



圖 3-9 0612 事件 O3/S3 最大淹水深度圖



圖 3-10 0616 事件 O1/S1 最大淹水深度圖



圖 3-11 0616 事件 O2/S1 最大淹水深度圖



圖 3-12 0616 事件 O3/S1 最大淹水深度圖



圖 3-13 0616 事件 O1/S2 最大淹水深度圖



圖 3-14 0616 事件 O2/S2 最大淹水深度圖



圖 3-15 0616 事件 O3/S2 最大淹水深度圖



圖 3-16 0616 事件 O1/S3 最大淹水深度圖



圖 3-17 0616 事件 O2/S3 最大淹水深度圖



圖 3-18 0616 事件 O3/S3 最大淹水深度圖

為了瞭解使用不同動量方程式的 OFM 在淹水結果的差異,本文使用忽略下水道的 方式進行模擬,並繪製地表水流向進行比較,發現當忽略排水系統時不論使用何 種 OFM,都會發生嚴重淹水,且難以根據地表水的流向或流量區分其中的差異, 但有助於判斷模擬範圍中易淹水的地區,以及淹水的原因,比如地勢低漥或排水 能力不足,如圖 3-19 至圖 3-24 所示:



圖 3-19 0612 事件 O3/S3 最大淹水深度與 O1/S0 地表水流向示意圖



圖 3-20 0612 事件 O3/S3 最大淹水深度與 O2/S0 地表水流向示意圖



圖 3-21 0612 事件 O3/S3 最大淹水深度與 O3/S0 地表水流向示意圖



圖 3-22 0616 事件 O3/S3 最大淹水深度與 O1/S0 地表水流向示意圖



圖 3-23 0616 事件 O3/S3 最大淹水深度與 O2/S0 地表水流向示意圖



圖 3-24 0616 事件 O3/S3 最大淹水深度與 O3/S0 地表水流向示意圖

地表逕流的流向即為圖 3-19 至圖 3-24 中的箭頭方向,可以發現藉由箭頭的分佈, 能夠判斷模擬結果淹水的原因,在箭頭分布密集的地區,代表地勢較低且容易積 水,所以在沒有排水系統通過的淹水地區,通常都有密集的箭頭分布,而在排水 系統的上游發生的淹水,也可以通過箭頭的分布,判斷出該淹水是由於降雨事件 中,排水能力不足導致上游淹水,而排水系統下游則順利的將匯集的地表水排除, 因此未發生淹水現象。位於住宅區內的淹水狀況可能是模式高估的結果,因為本 研究未考量雨水側溝的影響,本應經由雨水側溝排入下水道的地表水可能減少不 同地表逕流模式間的差異,因此未來應將雨水側溝納入考量,進一步分析不同地 表逕流模式的表現與優劣。地表水流向

3-2 下水道流況比較

為了探討使用擴散波 SFM 時嚴重高估淹水的原因,本文整理了 O3/S1、O3/S2 和 O3/S3 的方程式各項數值,繪製下水道幹管的上游點與下游點各項數值空間上的差 異與其隨時間的變化,並繪製興隆國小至興隆路一二段交點的下水道剖面圖,藉 此了解下水道的模擬狀況,上下游點位與下水道位置如圖 3-25 所示。



圖 3-25 上下游點位與下水道剖面位置示意圖

從圖 3-26 和圖 3-29 的流量變化中,可以發現的 O3/S1 的流量變化非常劇烈,而且 有震盪的現象,在流量大小的方面,相較於 O3/S2 與 O3/S3 的結果有明顯的高估。 從(13)式中可以得知擴散波 SFM 計算出來的流量,是先計算重力與壓力項 G 與摩 擦項 F 相等時的流量,然後根據地表和下水道水頭計算交換流量並更新下水道水 深,再以更新的水深計算下水道流量,按此流程迭代計算出下水道的流況,因此 造成流量發生震盪的狀況,且容易高估下水道流量與交換流量。O3/S3 和 O3/S2 位於上游點位的流量變化相近,但下游點位的最大流浪卻發生在不同時間,這或 許是受到控制方程式中對流慣性的影響,導致 O3/S3 和 O3/S2 的流量變化在水流 匯集的下游點位有所不同。



圖 3-26 0612 事件上游點位流量變化圖



圖 3-28 0616 事件上游點位流量變化圖



為了證實擴散波 SFM 與流量高估的關係,本研究將上下游點位的 O3/S3、O3/S2 和 O3/S1 中控制方程式各項隨時間的變化分別進行繪圖,結果如圖 3-30 至圖 3-41 所示。



圖 3-31 0612 事件 O3/S2 上游點位方程式各項時變圖



-G — F 1 20 15 10 流量時變率(m³/s²) 5 0 -5 -10 -15 -20 15:30 18:00 16:00 16:30 18:30 19:30 20:30 21:30 17:00 17:30 19:00 20:00 21:00 22:00 22:30 23:00 23:30 00:00 時間(hh:mm) 圖 3-34 0616 事件 O3/S2 上游點位方程式各項時變圖 G •••••F - L 500 15000 400 10000 300 ·流量時變率(m3/s2 流量時變率(m³/s²) 200 5000 100 0 0 -100 -5000 -200 -300 -10000 -400 -500 -15000 15:30 16:30 17:30 18:00 19:30 20:00 20:30 21:00 21:30 22:00 22:30 23:00 23:30 00:00 16:00 17:00 18:30 19:00

圖 3-33 0616 事件 O3/S3 上游點位方程式各項時變圖

時間(hh:mm)

圖 3-35 0616 事件 O3/S1 上游點位方程式各項時變圖

由圖 3-30 至圖 3-35 可知, 重力與壓力項對流量有很大的影響, 圖 3-30 和圖 3-33 中 O3/S3 的對流慣性項 C1 與 C2 之間有互相抵銷的現象,這可能是造成局部慣性 波 SFM 與動力波 SFM 的上游點位模擬結果表現相近的原因,但從 O3/S3 與 O3/S2 之間的比較可以發現,對流慣性對流量變化率有明顯的影響,這可能導致 O3/S2 的淹水結果發生比動力波 SFM 低估的現象。從(13)式中可知擴散波 SFM 並未考量 局部慣性力的影響,因此擴散波 SFM 中局部慣性項是藉由 Δt 時刻與 $\Delta t+1$ 時刻之間 的流量變化量來計算。O3/S1 中的重力與壓力項 G、摩擦項 F 和流量變化率 L 的 數值是 O3/S3 的 10 倍以上,可以推測其原因是因為擴散波 SFM 高估流量後,使 下水道的水過快流入下管,導致上管水壓迅速下降且下管水壓迅速上升,當下管 的水壓大於上管水壓或因此發生滿管現象時,就會使下水道的水逆流至上管或透 過人孔溢淹至地表,所以圖中的流量才會出現正負交替的現象,而局部慣性波和 動力波 SFM 則有慣性項可以減少重力與壓力項的影響,雖然局部慣性項同樣發生 震盪,但相較擴散波 SFM 穩定且震幅有減小的趨勢。從圖 3-33 至圖 3-35 的震盪 中可以發現當降雨集中時,局部慣性波 SFM 的震盪最快穩定,可能代表局部慣性 波 SFM 的排水能力最高,但震幅變化劇烈,需要分析地表與下水道的交換流量, 確認震幅的變化是否會導致的溢淹。

為了探討下游點位中 O3/S3 與 O3/S2 的流量變化差異,如同上游點位將 O3/S3 和 O3/S2 中控制方程式各項隨時間的變化分別繪製比較,如圖 3-36 至圖 3-41 所示。

40



圖 3-37 0612 事件 O3/S2 下游點位方程式各項時變圖



圖 3-39 0616 事件 O3/S3 下游點位方程式各項時變圖



圖 3-41 0616 事件 O3/S1 下游點位方程式各項時變圖

從圖 3-37 和圖 3-40 可以發現,當忽略對流慣性時,由於摩擦項較小,流量時變率 皆由重力與壓力項 G 決定,若考量對流慣性的影響,就有可能出現影響流量時變 率的狀況,如圖 3-36 和圖 3-39 的對流慣性項 C2 便在短時間內出現極大的變化, 對隨後的各項變化有巨大的影響。由於 0616 事件降雨較集中,無法從上下游的方 程式各項變化了解對流慣性劇烈變化的原因;而 0612 事件的降雨量和降雨延時較 大,圖 3-27 顯示動力波 SFM 在 5:30 時流量有突然增加的狀況,從圖 2-5 可知自 4:10 開始降雨量逐漸增加,藉由圖 3-30 至圖 3-38 證實在 4:10 後上下游點位的重 力與壓力項 G 逐漸增加且發生震盪的現象,因此圖 3-36 中發生在 5:30 的劇烈變化 可能是因為研究地區逐漸增加的降雨量流入下水道後,使下水道的水量不斷增加, 同時位在下游點位下游的下水道斷面積大幅增加,導致對流慣性項 C2 受到下水道 斷面積的影響出現極大的數值,因此流入下游點位的流量增加且水位下降,產生 重力與壓力項急遽下降的現象,水量排入下游後重力與壓力項與對流慣性項也趨 於穩定,這也可以解釋 0616 事件在其他圖上雖然沒有特殊的狀況,但對流慣性項

為了證實上述對上下游點位表現的推測,分別對 0612 和 0616 事件的上游至下游 點位之下水道繪製剖面圖如圖 3-42 和圖 3-43 所示。圖中的正方形標記與三角形標 記分別為上游與下游點位為上游點位,由於下游點位的下游同時連接兩條下水道, 因此不易繪圖表示兩條下水道的水頭,但可以從下游點位的水頭變化發現,0612 與 0616 事件中靠近下游點位的下水道水頭急遽降低,但圖 3-27 和圖 3-29 卻顯示 流量增加, 說明下水道水位變低但斷面積增加,證明對流慣性項的急遽增大符合 現實狀況。

44



圖 3-43 0616 事件 O3/S3 下水道剖面圖

3-3 地表與下水道水體交換

除了該管段的剖面外,本文也繪製了研究地區內所有網格上地表水與下水道水體 的總交換量與地表總水量。圖 3-44 至圖 3-49 顯示了排水系統整體的狀況,首先可 以發現圖 3-46 和圖 3-49 的出入流同樣發生震盪的現象,證實下水道與地表發生循 環的水流交換,顯示水從下水道溢淹後,將再度流入下水道,然後又再度發生溢 淹,這樣的不斷循環的水流交換導致下水道無法順利將雨水排除,因此在擴散波 SFM 的淹水範圍極大。從 O3/S3 和 O3/S2 的出入流中,可以發現 O3/S2 的入流量 比 O3/S3 稍大,說明忽略空間慣性的影響,可能高估下水道的排水效率,因此局 部慣性波 SFM 可能導致模擬結果對淹水的低估。



圖 3-44 0612 事件 O3/S3 地表與下水道水交換示意圖



圖 3-46 0612 事件 O3/S1 地表與下水道水交換示意圖



圖 3-48 0616 事件 O3/S2 地表與下水道水交換示意圖



圖 3-49 0616 事件 O3/S1 地表與下水道水交換示意圖



第四章 結論與建議

使用擴散波、局部慣性波和動力波進行淹水模擬得到的結果各有不同,其中擴散 波下水道模式由於忽略了慣性的影響,容易受到下水道與地表水交換的影響,導 致模式高估下水道流量,使大量的水過快流入下游,進而產生下水道逆流和溢淹, 因此擴散波下水道模式的誤差最大。

局部慣性波與動力波模式間的模擬表現相近,但本研究發現當下水道水量大時, 下水道斷面積大幅增加,將導致對流慣性項的重要性增加,局部慣性波因為忽略 了對流慣性力,無法顯示出此現象。從研究地區的下水道與地表水的總交換量可 以發現局部慣性波有高估下水道排水效率的現象,同樣可以在性能指標中發現動 力波下水道模式的命中率比局部慣性波高,顯示局部慣性波有低估淹水的狀況。 本研究模擬的 0612 事件與 0616 事件之降雨雨型不同,使模擬結果的各項表現皆 有不同,其中 0612 事件降雨延時較長且總降雨量較大,因此下水道的各項數據呈 現隨時間增加的狀況;0616 事件的降雨較集中且瞬時降雨強度較大,所以除了擴 散波下水道模式外,各項數據呈現出短時間內劇烈震盪後逐漸穩定並減小。

本研究發現不同地表逕流模式間的指標差異太小,無法比較地表逕流模式間的優 劣,這可能是忽略雨水側溝所造成的影響,未來可能選擇不同種類的降雨事件來 進行淹水模擬,並將雨水側溝納入考量,比較不同地表逕流模式在不同的降雨事 件下,是否會有不同的表現。

参考文獻

 只書韓。「即時降雨資料應用於淹水預報之研究」。碩士論文,國立臺灣大學 生物環境系統工程學研究所,2007。

 B玟潔。「雷達降雨應用於農業災害預警之可行性研究」。碩士論文,淡江大 學水資源及環境工程學系碩士班,2018。

 陳欣怡。「台南科學工業園區暴雨排水之動態模擬」。碩士論文,國立臺灣大 學農業工程學研究所,2001。

 蔡世瑛。「市區街道系統淹排水模式之研究」。碩士論文,國立成功大學水利 及海洋工程學系,1998。

 謝宗霖。「都會區淹水模式之比較與應用」。碩士論文,國立臺灣大學生物環 境系統工程學研究所,2013。

 簡名毅。「鹽水溪流域洪水與淹水演算模式」。碩士論文,國立臺灣大學農業 工程學研究所,1999。

7. Al-Maliki, A., EZZELDIN M., Al-Ghamdi, A. (2014). Numerical Solution for Diffusion Waves equation using Coupled Finite Difference and Differential Quadrature Methods. International Journal of Civil & Environmental Engineering IJCEE-IJENS, 14, 03.

8. Bates, P.D., Horritt, M.S., Fewtrell, T.J., (2010). A simple inertial formulation of the shallow water equations for efficient two-dimensional flood inundation modelling. Journal of Hydrology, 387, 33–45.

9. Cea, L., Garrido, M., Puertas, J. (2010). Experimental validation of two-dimensional depth-averaged models for forecasting rainfall–runoff from precipitation data in urban areas. Journal of Hydrology, 382, 1-4, 88-102.

10. Chang, T.J., Wang, C.H., Chen, A.S., Djordjević, S., 2018. The influence of inlet

drainage in modelling flow interactions between storm sewer system and overland surface. J. Hydro. http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.01.066.

11. Chen, A.S., Djordjević, S., Leandro, J., Savić, D. (2007). The urban inundation model with bidirectional flow interaction between 2D overland surface and 1D sewer networks. NOVATECH 2007, Lyon, France, 465–472.

12. Chen, A.S., Evans, B., Djordjević, S., Savić, D.A. (2012). A coarse-grid approach to representing building blockage effects in 2D urban flood modelling. J. Hydrol, 426–427, 1–16.

13. Courant, R., Friedrichs, K., Lewy, H., (1967). On the partial difference equations of mathematical physics. IBM J. Res. Dev. 11 (2), 215–234.

14. Cunge, J.A., Wegner, M., (1964). Numerical Integration of Bane de Saint Venant's Flow Equations by Means of an Implicit Scheme of Finite Differences. Applications in the Case of Alternately free and Pressurized Flow in a Tunnel. La Houille Blanche, No. 1, 33–39.

15. Djordjević, S., Prodanović, D., Makismović, C. (1999). An approach to stimulation of dual drainage. Water Sci. Technol., 39, 95–103.

16. Halcrow, (2012). ISIS 2D User Manual.

17. Hsu, M.H., Chen, S.H., Chang, T.J., (2000). Inundation simulation for urban drainage basin with storm sewer system. J. Hydrol., 234, 21–37.

18. Hunter, N.M., Bates, P.D., Horritt, M.S., Wilson, M.D. (2007). Simple spatially-distributed models for predicting flood inundation: a review. Geomorphology, 90, 3–4, 208–225.

19. Jahanbazi, M., Egger, U. (2014). Application and comparison of two different dual drainage models to assess urban flooding. Urban Water J., 11, 584–595.

20. Jang, J.H., Yu, P.S., Yeh, S.H., Fu, J.C., Huang, C.J. (2012). A probabilistic

model for realtime flood warning based on deterministic flood inundation mapping. Hydrol. Process., 26, 7, 1079–1089.

21. Jang, J.H. (2015). An advanced method to apply multiple rainfall thresholds for urban flood warnings. Water, 7, 6056–6078.

22. Jang, J.H., Chang, T.H., Chen, W.B. (2018). Effect of inlet modelling on surface drainage in coupled urban flood simulation. Journal of Hydrology., 562, 168-180

23. Kuiry, S.N., Sen, D., Bates, P.D. (2010). A coupled 1D-quasi 2D flood inundation model with unstructured grids. J. Hydraul. Eng., 136, 8, 493–506.

24. Leandro, J., Martins, R. (2016) A methodology for linking 2D overland flow models with the sewer network model SWMM 5.1 based on dynamic link libraries. Water Sci. Technol., 73, 3017.

25. Leandro, J., Chen, A.S., Djordjević, S., Savić, D.A. (2009). Comparison of 1D/1D and 1D/2D coupled (sewer/surface) hydraulic models for urban flood simulation. J. Hydraul. Eng., 135, 495–504.

26. Leandro, J., Chen, A.S., Schumann, A. (2014). A 2D parallel diffusive wave model for floodplain inundation with variable time step (P-DWave). J. Hydrol., 517, 250–259.

Maksimović, C., Prodanović, D., Boonya-Aroonnet, S., Leitao, J.P., Djordjević,
 S., Allitt, R., (2009). Overland flow and pathway analysis for modelling of urban pluvial flooding. J. Hydraul. Res., 47, 512–523.

Mark, O., Weesakul, S., Apirumanekul, C., Aroonnet, S.B., Djordjević, S. (2004).
 Potential and limitations of 1D modelling of urban flooding. J. Hydrol., 299, 284–299.
 Mason, S.J., (1982). A model for assessment of weather forecasts. Aust. Meteorol.
 Mag. 30, 291–303.

30. Martins, R., J.L., s.D. (2018). Influence of sewer network models on urban flood

damage assessment based on coupled 1D/2D models, J. Flood Risk Management, 11, S717–S728.

31. Morales-Hernández, M., García-Navarro, P., Burguete, J., Brufau, P. (2013). A conservative strategy to couple 1D and 2D models for shallow water flow simulation. Computers & Fluids, 81, 26-44.

32. Reza, B., Rahimi, S., Akbari, G. H. (2012). Analysis of dynamic wave model for flood routing in natural rivers. Water Science and Engineering, 5, 3, 243-258.

33. Russo, B., Sunyer, D., Velasco, M., Djordjević, S. (2015). Analysis of extreme flooding events through a calibrated 1D/2D coupled model: the case of Barcelona (Spain). J. Hydroinformatics, 17, 473.

34. Schmitt, T.G., Thomas, M., Ettrich, N. (2004). Analysis and modelling of flooding in urban drainage systems. J. Hydrol., 299, 300–311.

35. Seyoum, S.D., Vojinovic, Z., Price, R.K., Weesakul, S. (2012). Coupled 1D and Noninertia 2D flood inundation model for simulation of urban flooding. J. Hydraul. Eng., 138, 23–34.

36. Smith, M.B. (2006). Comment on 'analysis and modelling of flooding in urban drainage systems'. J. Hydrol., 317, 355–363.