



國立臺灣大學生物資源暨農學院生物環境系統工程學研究所

博士論文

Graduate Institute of Bioenvironmental Systems Engineering

College of Bioresources and Agriculture

National Taiwan University

Doctoral Dissertation

整合建物效應與即時淹水模擬之研究

A Study on Integrating Building Effect and

Real-time Inundation Simulations

黃成甲

Chen-Jia Huang

指導教授：許銘熙 博士

Advisor : Ming-Hsi Hsu, Ph.D.

中華民國 103 年 6 月

June 2014



摘要

近年來台灣都會地區迅速發展，人口逐漸往都市集中，都會區人口密集，為滿足居民生活需求，都市內興建了大量且密集的建物，而增加之建物會阻隔地表逕流，並改變原本地表水流狀況。

本文主要目的在利用都市淹水模式，考慮建物阻隔及蓄水效應及其對地表水流產生的影響，以可反應細部地形變化但解析度較大之模擬網格，進行都市淹水之快速計算。同時將都市淹水模式結合多重尺度之平行計算，在尺度較大之全流域主網格中進行零慣性波方程式之求解，並在局部細化區域考慮建物效應，進一步求解局部高解析度之淹水分佈情形，並將不同尺度之全區及局部細化區域以平行計算的方式進行同步演算，提升都市淹水模式計算之整體效能，模擬局部細化地區之淹水過程。

本文於以理想案例進行都市淹水模式之檢定，檢定結果顯示都市淹水模式之合理性；同時以台北市中央區納莉颱風事件進行都市淹水模式之驗證，與調查淹水範圍比較，考慮建物效應之淹水模式更能反應實際流況，進一步將模式應用於曾文溪流域之莫拉克颱風事件，並劃分不同解析度之網格進行多重尺度之淹水模擬，其結果顯示局部細化地區之淹水模擬結果，具有良好之準確度，並在演算效率上有大幅度的提昇。

關鍵字：都市淹水模式、多重尺度、平行計算、建物效應

Abstract

Recently, the highly developed urban area in Taiwan caused the concentrated population and result in densely distributed buildings. Buildings often affect the propagation of overland flow in urban areas. Building walls change the direction and velocity of flow, and can exclude interior spaces from flooding.

The study aims to develop an urban inundation model to represent the resistance and the storage effects of buildings and reveal the rapid simulation in urban flood modeling by coarse grids. Meanwhile, the inundation model of local refinement solves the non-inertia overland flow hydraulic equations using the coarse main grids in global domain; whereas the building effect is applied to the fine grids to reflect the details of flood in high resolution. The computing of global domain and all the local regions were parallelized to different threads by parallel algorithm to improve the efficiency of the multi-scale inundation model

An ideal case was used for model calibration. The comparison of the simulation results demonstrated that urban inundation model has good accuracy. The model was applied on Typhoon Nari event in the central Taipei City for model verification. The results showed that the presented inundation model reproduces the inundation results more comparable with the observed flooding situation.

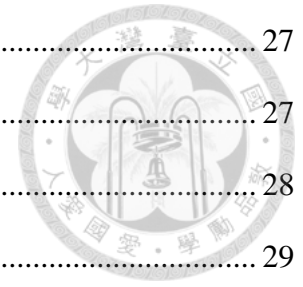
The model was further applied to the simulation of typhoon Morakot event in Zengwen river basin. The results of multi-scale simulation showed that the proposed model can maintain the accuracy in local refined area and has significant improvement in model efficiency.

Keyword : Urban inundation model, Multi-scale, Parallel algorithm, Building effect.

目錄



摘要	.....	i
Abstract	.....	ii
目錄	.....	iii
表目錄	.....	vi
圖目錄	.....	viii
符號說明	.....	vx
第一章 前言	.....	1
1-1 研究目的	.....	1
1-2 研究方法	.....	2
1-3 本文架構	.....	3
第二章 文獻回顧	.....	5
2-1 淹水模式	.....	5
2-2 建物效應	.....	7
2-3 局部細化網格	.....	8
2-4 平行計算	.....	9
第三章 研究方法	.....	11
3-1 都市淹水模式	.....	11
3-1-1 基本方程式	.....	11
3-1-2 數值方法	.....	14
3-1-3 地表曼寧糙度修正	.....	18
3-1-4 初始及邊界條件	.....	19
3-2 局部細化網格計算	.....	20
3-2-1 演算時距	.....	22
3-2-2 粗細網格間銜接	.....	22



3-2-3	乾河床處理.....	27
3-3	平行演算模式之建立.....	27
3-3-1	OpenMP (Open Multi-Processing)	28
3-3-2	平行演算法於多重尺度網格方法.....	29
第四章	模式之檢定與驗證	33
4-1	理想案例.....	33
4-1-1	遮蔽率檢定.....	33
4-1-2	粗細網格檢定.....	47
4-2	台北市中央區.....	54
4-2-1	輸入資料.....	57
4-2-2	模擬結果與討論.....	66
第五章	模式應用	79
5-1	研究區域.....	79
5-2	地文資料.....	82
5-3	雨量資料.....	86
5-4	模擬結果與討論.....	93
5-4-1	局部細化區域模擬結果評估方式.....	94
5-4-2	全區模擬結果比較.....	94
5-4-3	局部模擬區域精確度比較.....	101
5-4-4	平行演算效率比較.....	103
第六章	結論與建議	133
6-1	結論.....	133
6-2	建議.....	135
參考文獻	.....	137
附錄 A (3-4)式推導	.....	145
附錄 B (3-16)及(3-17)式差分式推導	.....	147

附錄 C (3-24)及(3-25)式差分式推導 149

附錄 D 河系溢堤洪水演算模式 151

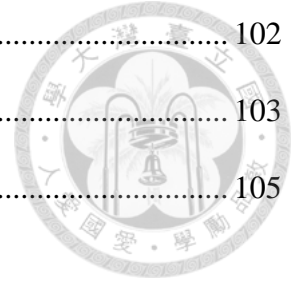


表目錄



表 3-1 流量分配法列表.....	24
表 4-1 理想案例二均方根誤差(單位:公尺).....	39
表 4-2 理想案例二相關係數平方值.....	39
表 4-3 理想案例三均方根誤差(單位:公尺).....	40
表 4-4 理想案例三相關係數平方值.....	40
表 4-5 理想案例粗細網格局部細化分區 1 均方根誤差(單位:公尺).....	48
表 4-6 理想案例粗細網格局部細化分區 1 相關係數平方值.....	49
表 4-7 理想案例粗細網格局部細化分區 2 均方根誤差(單位:公尺).....	49
表 4-8 理想案例粗細網格局部細化分區 2 相關係數平方值.....	50
表 4-9 台北市中央區抽水站容量.....	55
表 4-10 台北市中央區土地利用及曼寧糙度值.....	59
表 4-11 台北市中央區各行政區平均建蔽率.....	59
表 4-12 台北市中央區納莉颱風總雨量及尖峰降雨.....	59
表 4-13 台北市中央區納莉颱風抽水站故障停機時間.....	60
表 4-14 台北市中央區納莉颱風不同情境下淹水面積(單位:公頃).....	70
表 4-15 台北市中央區納莉颱風不同情境下淹水體積(單位:10 ⁶ m ³).....	71
表 4-16 台北市中央區納莉颱風各行政區淹水面積(單位:公頃).....	72
表 4-17 觀測點建蔽率及門檻值.....	74
表 5-1 曾文溪北岸局部細化模擬區域人口資料(照人口數排序).....	80
表 5-2 曾文溪北岸土地利用及曼寧糙度值.....	84
表 5-3 曾文溪北岸各行政區平均建蔽率.....	85
表 5-4 曾文溪北岸莫拉克颱風總雨量及尖峰降雨.....	87
表 5-5 曾文溪北岸莫拉克颱風不同網格大小之淹水面積(單位:公頃).....	95

表 5-6 曾文溪北岸局部細化模擬區均方根誤差(單位:公尺).....	102
表 5-7 曾文溪北岸局部細化模擬區相關係數平方值.....	103
表 5-8 曾文溪北岸模擬演算時間比較表.....	105



圖目錄



圖 3-1 建物網格示意圖.....	13
圖 3-2 建物進水體積之相對面積比 α' 示意圖.....	13
圖 3-3 粗細網格邊界關係示意圖.....	21
圖 3-4 網格邊界個別流量示意圖.....	24
圖 3-5 網格流量分配示意圖.....	24
圖 3-6 粗細網格邊界斷面示意圖.....	25
圖 3-7 平行處理架構示意圖.....	28
圖 3-8 多重尺度法局部細化架構示意圖.....	29
圖 3-9 平行處理修改研究流程圖.....	30
圖 3-10 局部細化網格平行演算架構示意圖.....	31
圖 3-11 粗細網格平行演算架構示意圖.....	31
圖 3-12 都市淹水模式演算流程圖.....	32
圖 4-1 理想案例地形.....	33
圖 4-2 理想案例一之網格設定.....	34
圖 4-3 理想案例一各建蔽率之地形.....	35
圖 4-4 理想案例二之建蔽率網格設定.....	36
圖 4-5 理想案例三地形.....	36
圖 4-6 理想案例三之建蔽率網格設定.....	37
圖 4-7 理想案例一第 24 小時淹水深(相對建蔽率 0.04).....	41
圖 4-8 理想案例二第 24 小時淹水深(建蔽率 0.04).....	41
圖 4-9 理想案例三第 24 小時淹水深(建蔽率 0.04).....	42
圖 4-10 理想案例一第 24 小時淹水深(相對建蔽率 0.16).....	42
圖 4-11 理想案例二第 24 小時淹水深(建蔽率 0.16).....	43

圖 4-12 理想案例三第 24 小時淹水深(建蔽率 0.16).....	43
圖 4-13 理想案例一第 24 小時淹水深(相對建蔽率 0.36).....	44
圖 4-14 理想案例二第 24 小時淹水深(建蔽率 0.36).....	44
圖 4-15 理想案例三第 24 小時淹水深(建蔽率 0.36).....	45
圖 4-16 理想案例一第 24 小時淹水深(相對建蔽率 0.64).....	45
圖 4-17 理想案例二第 24 小時淹水深(建蔽率 0.64).....	46
圖 4-18 理想案例三第 24 小時淹水深(建蔽率 0.64).....	46
圖 4-19 理想案例粗細網格地形.....	48
圖 4-20 理想案例全區細網格與局部細化第 24 小時淹水深比較圖(建蔽率 0.04).....	50
圖 4-21 理想案例全區細網格與局部細化第 24 小時淹水深比較圖(建蔽率 0.09).....	51
圖 4-22 理想案例全區細網格與局部細化第 24 小時淹水深比較圖(建蔽率 0.16).....	51
圖 4-23 理想案例全區細網格與局部細化第 24 小時淹水深比較圖(建蔽率 0.25).....	52
圖 4-24 理想案例全區細網格與局部細化第 24 小時淹水深比較圖(建蔽率 0.36).....	52
圖 4-25 理想案例全區細網格與局部細化第 24 小時淹水深比較圖(建蔽率 0.49).....	53
圖 4-26 理想案例全區細網格與局部細化第 24 小時淹水深比較圖(建蔽率 0.64).....	53
圖 4-27 台北市中央區數值地形高程及行政區域圖.....	56
圖 4-28 台北市中央區土地利用分區圖.....	56
圖 4-29 台北市中央區抽水站及下水道人孔圖.....	57
圖 4-30 台北市中央區士林雨量站納莉颱風降雨組體圖.....	60
圖 4-31 台北市中央區三重雨量站納莉颱風降雨組體圖.....	61
圖 4-32 台北市中央區台北雨量站納莉颱風降雨組體圖.....	61
圖 4-33 台北市中央區中正橋雨量站納莉颱風降雨組體圖.....	62
圖 4-34 台北市中央區永和雨量站納莉颱風降雨組體圖.....	62
圖 4-35 台北市中央區木柵雨量站納莉颱風降雨組體圖.....	63

圖 4-36 台北市中央區信義雨量站納莉颱風降雨組體圖.....	63
圖 4-37 台北市中央區南港雨量站納莉颱風降雨組體圖.....	64
圖 4-38 台北市中央區大直雨量站納莉颱風降雨組體圖.....	64
圖 4-39 台北市中央區內湖雨量站納莉颱風降雨組體圖.....	65
圖 4-40 台北市中央區雨量站及徐昇氏分區圖.....	65
圖 4-41 基隆河與大坑溪匯流處溢堤河川水位歷線.....	66
圖 4-42 台北市中央區建物樓層圖.....	67
圖 4-43 台北市中央區納莉颱風調查淹水範圍.....	68
圖 4-44 台北市中央區納莉颱風模擬最大淹水深(情境 A).....	68
圖 4-45 台北市中央區納莉颱風模擬最大淹水深(情境 B).....	69
圖 4-46 台北市中央區納莉颱風模擬最大淹水深(情境 C).....	69
圖 4-47 納莉颱風中山大同區模擬最大淹水深(情境 A).....	74
圖 4-48 納莉颱風中山大同區模擬最大淹水深(情境 B).....	75
圖 4-49 納莉颱風中山大同區模擬最大淹水深(情境 C).....	75
圖 4-50 觀測點逐時淹水深歷線.....	76
圖 4-51 觀測點建物進水面積比 α' 變化圖(情境 C).....	77
圖 5-1 曾文溪流域數值地形高程及局部細化分區.....	81
圖 5-2 曾文溪北岸水系圖.....	81
圖 5-3 曾文溪北岸局部細化分區數值地形.....	83
圖 5-4 曾文溪北岸土地利用分區圖.....	85
圖 5-5 曾文溪北岸雨量站及徐昇氏分區圖.....	88
圖 5-6 曾文溪流域北門雨量站莫拉克颱風降雨組體圖.....	88
圖 5-7 曾文溪流域七股雨量站莫拉克颱風降雨組體圖.....	89
圖 5-8 曾文溪流域佳里雨量站莫拉克颱風降雨組體圖.....	89

圖 5-9 曾文溪流域七股寮雨量站莫拉克颱風降雨組體圖.....	89
圖 5-10 曾文溪流域和順雨量站莫拉克颱風降雨組體圖.....	90
圖 5-11 曾文溪流域下營雨量站莫拉克颱風降雨組體圖.....	90
圖 5-12 曾文溪流域善化雨量站莫拉克颱風降雨組體圖.....	90
圖 5-13 曾文溪流域新營雨量站莫拉克颱風降雨組體圖.....	91
圖 5-14 曾文溪流域大內雨量站莫拉克颱風降雨組體圖.....	91
圖 5-15 曾文溪流域白河雨量站莫拉克颱風降雨組體圖.....	91
圖 5-16 曾文溪流域東河雨量站莫拉克颱風降雨組體圖.....	92
圖 5-17 曾文溪流域王爺宮雨量站莫拉克颱風降雨組體圖.....	92
圖 5-18 曾文溪流域環湖雨量站莫拉克颱風降雨組體圖.....	92
圖 5-19 莫拉克颱風期間曾文水庫入流量、排洪量及水位示意圖.....	93
圖 5-20 曾文溪北岸莫拉克颱風調查淹水範圍.....	93
圖 5-21 莫拉克颱風曾文溪北岸全區 40 公尺網格第 12 小時淹水深圖.....	96
圖 5-22 莫拉克颱風曾文溪北岸全區 200 公尺網格第 12 小時淹水深圖.....	96
圖 5-23 莫拉克颱風曾文溪北岸全區 40 公尺網格第 24 小時淹水深圖.....	97
圖 5-24 莫拉克颱風曾文溪北岸全區 200 公尺網格第 24 小時淹水深圖.....	97
圖 5-25 莫拉克颱風曾文溪北岸全區 40 公尺網格第 36 小時淹水深圖.....	98
圖 5-26 莫拉克颱風曾文溪北岸全區 200 公尺網格第 36 小時淹水深圖.....	98
圖 5-27 莫拉克颱風曾文溪北岸全區 40 公尺網格第 48 小時淹水深圖.....	99
圖 5-28 莫拉克颱風曾文溪北岸全區 200 公尺網格第 48 小時淹水深圖.....	99
圖 5-29 莫拉克颱風曾文溪北岸全區 40 公尺網格最大淹水深.....	100
圖 5-30 莫拉克颱風曾文溪北岸全區 200 公尺網格最大淹水深圖.....	100
圖 5-31 曾文溪流域佳里局部細化地區第 12 小時淹水深圖.....	106
圖 5-32 曾文溪流域佳里局部細化地區第 24 小時淹水深圖.....	106

圖 5-33 曾文溪流域佳里局部細化地區第 36 小時淹水深圖.....	107
圖 5-34 曾文溪流域佳里局部細化地區第 48 小時淹水深圖.....	107
圖 5-35 曾文溪流域麻豆局部細化地區第 12 小時淹水深圖.....	108
圖 5-36 曾文溪流域麻豆局部細化地區第 24 小時淹水深圖.....	108
圖 5-37 曾文溪流域麻豆局部細化地區第 36 小時淹水深圖.....	109
圖 5-38 曾文溪流域麻豆局部細化地區第 48 小時淹水深圖.....	109
圖 5-39 曾文溪流域下營局部細化地區第 12 小時淹水深圖.....	110
圖 5-40 曾文溪流域下營局部細化地區第 24 小時淹水深圖.....	110
圖 5-41 曾文溪流域下營局部細化地區第 36 小時淹水深圖.....	111
圖 5-42 曾文溪流域下營局部細化地區第 48 小時淹水深圖.....	111
圖 5-43 曾文溪流域西港局部細化地區第 12 小時淹水深圖.....	112
圖 5-44 曾文溪流域西港局部細化地區第 24 小時淹水深圖.....	112
圖 5-45 曾文溪流域西港局部細化地區第 36 小時淹水深圖.....	113
圖 5-46 曾文溪流域西港局部細化地區第 48 小時淹水深圖.....	113
圖 5-47 曾文溪流域學甲局部細化地區第 12 小時淹水深圖.....	114
圖 5-48 曾文溪流域學甲局部細化地區第 24 小時淹水深圖.....	114
圖 5-49 曾文溪流域學甲局部細化地區第 36 小時淹水深圖.....	115
圖 5-50 曾文溪流域學甲局部細化地區第 48 小時淹水深圖.....	115
圖 5-51 曾文溪流域七股局部細化地區第 12 小時淹水深圖.....	116
圖 5-52 曾文溪流域七股局部細化地區第 24 小時淹水深圖.....	116
圖 5-53 曾文溪流域七股局部細化地區第 36 小時淹水深圖.....	117
圖 5-54 曾文溪流域七股局部細化地區第 48 小時淹水深圖.....	117
圖 5-55 曾文溪流域佳里局部細化地區 12 小時淹水深比較圖.....	118
圖 5-56 曾文溪流域佳里局部細化地區 24 小時淹水深比較圖.....	118

圖 5-57 曾文溪流域佳里局部細化地區 36 小時淹水深比較圖.....	119
圖 5-58 曾文溪流域佳里局部細化地區 48 小時淹水深比較圖.....	119
圖 5-59 曾文溪流域麻豆局部細化地區 12 小時淹水深比較圖.....	120
圖 5-60 曾文溪流域麻豆局部細化地區 24 小時淹水深比較圖.....	120
圖 5-61 曾文溪流域麻豆局部細化地區 36 小時淹水深比較圖.....	121
圖 5-62 曾文溪流域麻豆局部細化地區 48 小時淹水深比較圖.....	121
圖 5-63 曾文溪流域下營局部細化地區 12 小時淹水深比較圖.....	122
圖 5-64 曾文溪流域下營局部細化地區 24 小時淹水深比較圖.....	122
圖 5-65 曾文溪流域下營局部細化地區 36 小時淹水深比較圖.....	123
圖 5-66 曾文溪流域下營局部細化地區 48 小時淹水深比較圖.....	123
圖 5-67 曾文溪流域西港局部細化地區 12 小時淹水深比較圖.....	124
圖 5-68 曾文溪流域西港局部細化地區 24 小時淹水深比較圖.....	124
圖 5-69 曾文溪流域西港局部細化地區 36 小時淹水深比較圖.....	125
圖 5-70 曾文溪流域西港局部細化地區 48 小時淹水深比較圖.....	125
圖 5-71 曾文溪流域學甲局部細化地區 12 小時淹水深比較圖.....	126
圖 5-72 曾文溪流域學甲局部細化地區 24 小時淹水深比較圖.....	126
圖 5-73 曾文溪流域學甲局部細化地區 36 小時淹水深比較圖.....	127
圖 5-74 曾文溪流域學甲局部細化地區 48 小時淹水深比較圖.....	127
圖 5-75 曾文溪流域七股局部細化地區 12 小時淹水深比較圖.....	128
圖 5-76 曾文溪流域七股局部細化地區 24 小時淹水深比較圖.....	128
圖 5-77 曾文溪流域七股局部細化地區 36 小時淹水深比較圖.....	129
圖 5-78 曾文溪流域七股局部細化地區 48 小時淹水深比較圖.....	129
圖 5-79 演算時間比較圖.....	130
圖 5-80 細化區數目-系統加速比比較圖.....	130

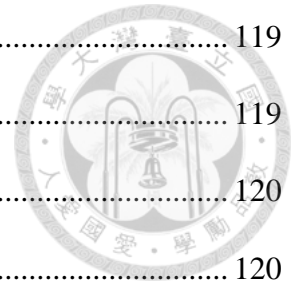


圖 5-81 與全區細網格演算時間比較圖.....131



符號說明



- a : 粗網格解析度[m] ;
- A : 通水面積[m²] ;
- A_{inv} : 調查淹水範圍[m²] ;
- A_{sim} : 模擬淹水範圍[m²] ;
- α_0 : 建蔽率 ;
- α' : 建物進水體積之相對面積比 ;
- B : 門檻入口寬度[m] ;
- b : 局部細化網格解析度[m] ;
- C_n : 可蘭數(Courant number) ;
- C_r : 尺度修正係數[m^{3/4}] ;
- d : 水深[m] ;
- d_0 : 建物入口門檻高度[m] ;
- d_1 : 理想案例一網格點淹水深[m] ;
- d_f : 理想案例二及理想案例三網格點淹水深[m] ;
- Δt : 演算時距[s] ;
- Δx : 沿 x 方向之網格間距[m] ;
- Δy : 沿 y 方向之網格間距[m] ;
- Δt_c : 粗網格演算時距[s] ;
- Δt_f : 局部細化網格演算時距[s] ;
- F : 總阻力[N] ;
- F' : 通水區表面阻力[N] ;
- F'' : 建物形狀阻力[N] ;
- g : 重力加速度[m/s²] ;
- γ : 水的比重 ;
- h : 地表水位[m] ;
- H : 細網格之水位高[m] ;
- i : 沿 x 方向之空間指標 ;
- j : 沿 y 方向之空間指標 ;
- K_i : 分配權重係數 ;
- m : 演算時階指標 ;
- μ : 堰流係數 ;
- n : 曼寧糙度值[s/m^{1/3}] ;

- n_0 : 尚未考慮地表建物之原始曼寧糙度值[s/m^{1/3}] ;
 n' : 受通水表面阻力影響之曼寧糙度值[s/m^{1/3}] ;
 n'' : 受建物阻力影響之曼寧糙度值[s/m^{1/3}] ;
 N : 網格點數目 ;
 P : 模式精度 ;
 q : 單位表面積之進流量[m/s] ;
 q_t : 單位面積之建物入流量[m/s] ;
 q_i : 分配予細網格之流量[m³/s] ;
 Q : 單一粗網格之流量[m³/s] ;
 $RMSE$: 均方根誤差(Root-Mean-Squared Error)[m] ;
 R^2 : 相關係數平方值 ;
 S_f : 摩擦坡降 ;
 S_r : 系統加速比 ;
 $step_c$: 粗網格之演算次數 ;
 $step_f$: 局部細化網格之演算次數 ;
 t : 時間座標[s] ;
 T_0 : 未平行-多重網格法演算總執行時間[s] ;
 T_h : 平行化-多重網格法演算總執行時間[s] ;
 τ_w : 摩擦剪應力[Pa] ;
 u : 沿 x 方向之平均流速[m/s] ;
 U : 粗細網格斷面之粗網格流速[m/s] ;
 v : 沿 y 方向之平均流速[m/s] ;
 V : 平均流速[m/s] ;
 w : 分配權重係數 K_i 之水深次方數 ;
 x, y : 卡氏空間座標[m] ;
 z : 地表高程[m] ;
 z_i : 細網格之地表高程[m] ;





第一章 前言

1-1 研究目的

臺灣受到自然環境因素的影響，每年 5~6 月間有梅雨，7~10 月間則有颱風，全年之平均降雨量約 2,510 毫米，但降雨之時間與空間分布極不均勻，加上集水區上游山區之坡度極為陡峻及水土保持不良。因此，每逢颱風挾帶豪雨來襲，常引發山區匯集而下之洪流，造成下游坡度平緩地區嚴重水患；此外，都會區之局部地區，亦可能因豪雨之雨量超過排水設施之設計標準而有淹水情形，導致人民生命財產之嚴重損失。故若能事前瞭解及掌握颱風氣象預報以及洪水動態，即在颱風侵襲臺灣之前，經由精密之觀測颱風資料配合數值預報模式，即時分析及預測未來中、小尺度的時間與空間的降雨量，並進一步推估逕流量、河川洪水位及可能淹水地區並發出警報，使地方防災應變單位及居民能預作警戒及防護準備，將可以減少洪災損失。

近年來台灣都會地區迅速發展，人口逐漸往都市集中，都會區人口密集，為滿足居民生活需求，都市內興建了大量且密集的建物，而增加之建物會改變原本地表水流狀況，產生束縮水流及增加額外形狀阻力的現象。

綜觀國內現行之淹水潛勢模擬乃是使用淹水模式進行水理演算，以計算地表淹水情況，近年遙測技術的迅速發展，提升了地形資料的解析度和準確性，大幅改善數值地形資料的精度，然數值地形資料精度的提高卻也同時大幅提高計算機的計算量，為了減輕水理演算使用的計算機資源，運用兩種不同解析度之網格同步模擬，能達到較佳之演算效率並兼顧模擬精度。

本文主要目的在利用都市淹水模式，考慮建物阻隔效應及其對地表水流產生的影響，以可反應細部地形變化但解析度較大之模擬網格，進行都市淹水之快速計算，進一步結合即時觀測雨量，考慮都會區下水道系統及河川潰堤條件下進行水理演算。同時將都市淹水模式結合多重尺度之平行計算，在尺度較大之全流域

主網格中進行局部細化演算，在局部細化區域考慮建物效應進行求解，並將不同尺度之全區及局部細化區域以平行計算的方式交由不同執行緒進行同步演算，提升二維淹水模式計算之整體效能，模擬局部細化地區之淹水過程。



1-2 研究方法

由於高解析度數值地形資料已被廣泛應用於淹水模擬，網格越小雖能表現出局部地貌，但所需要的龐大電腦計算時間，無法應付應變期間隨氣象環境變化所需之淹水警戒需求，如何在網格解析度與模擬精度中取得平衡也是現在淹水應變作業的挑戰，為加強淹水模式之演算效能，除採用更快速之硬體計算設備外，降低網格解析度亦為可行方法之一。然而，降低網格解析度將使模式無法適當描述細部流況，尤其於都會地區，林立之建築物經常對於洪水流況造成明顯的影響，故若僅採用大型計算網格，將無法模擬洪水於都市中之傳播過程，故於都會地區的淹水模擬，必須同時考慮地表建物對淹水的影響。

為了能更準確的模擬淹水情形，本文將淹水模式加入建物因子以反應建物效應之淹水計算，建物所產生的阻水與蓄水因子加入原本的二維漫地流模式裡，並設定到達一定淹水深度時，水開始由建物外部流入內部，當雨量減小積水開始消退時，會有一部分的水量儲存在建物內部無法排出，以反應更真實的淹水深度，而流況的部份則依建物所束縮之通水區表面阻抗與建物形狀阻抗之影響來調整曼寧糙度值，以期能改善都會地區的淹水模擬結果。

在二維淹水演算中，維持大量網格之計算效率並反映高解析度的流況細節，局部細化網格的概念近來已逐漸受到採用，所謂局部細化網格模式，乃採用不同之網格解析度進行模式運算，在全域(Global Domain)是以解析度較大的粗網格進行淹水模擬計算，而在人口密集或重要設施地區，本文則劃分網格解析度較高之局部細化模擬區(Local Region)進行淹水模擬，首先利用尺度較大之粗網格進行全域之水理演算後，在進行內部局部地區解析度較高之細網格水深及流況計算時，先以粗網格求得之流況做為解析度較高之細網格的初始條件及邊界條件，再求解局

部細網格之水深等流況，如此可避免全域採用高解析度網格進行完整水理控制方程式之複雜求解過程，提昇模式之計算效率。

同時，本文擬以多核心處理器進行粗細網格之平行計算工作，若模擬區內受到高度開發，根據不同目的要求模擬區內許多處需要高解析度之淹水模擬結果，在整個模擬區中可能有數個局部細化區域，因此在進行二維淹水模擬時，須同時模擬全區的粗網格及兩處以上的局部細化網格區域，本文將以多核心之處理器之平行計算功能，進行都市淹水模式粗細網格之平行計算處理，提昇粗細網格淹水演算之效能。

1-3 本文架構

本文之內容包括前言、文獻回顧、研究方法、模式檢定及驗證以及模式應用等五部份，各章涵蓋之內容如下：

第一章為本文之導論，主要就本文之研究目的、研究方法及本文之架構進行簡要之介紹。

第二章為國內外相關研究之文獻回顧，包括淹水模式、建物效應、局部細化網格以及平行計算。

第三章闡述本文中模式之理論基礎及相關之方程式，與模式中局部細化網格計算及平行演算之建置方法。

第四章係以假想之案例及台北市中央區之實際案例進行淹水模式之檢定及驗證。

第五章則將本文建置之模式應用於曾文溪北岸地區，並探討其模擬精度及計算效率之提昇。

第六章為本文之綜合結論與建議。




第二章 文獻回顧

本文以二維零慣性漫地流淹水模式，結合建物因子，考慮建物阻水及蓄水效應，模擬降雨逕流於地表流動情形，同時利用粗細網格之概念，結合平行計算技術，建構都市淹水模式，可模擬都會區之真實流況，並可於大範圍流域中針對其中人口集中之地區進行細化演算，提昇運算效率並兼顧細化區域之模擬精度。

2-1 淹水模式


長久以來，對於渠道洪水及沿岸淹水情形之評估，一直都是水利工程師及管理人員的主要任務，然而，往往由於觀測資料不足，導致不易掌握淹水範圍以擬訂改善對策，因此必須建立各種數值模式進行淹水模擬。

國外淹水模式方面的相關研究，Gustafss. B (1971)利用交替方向隱式法求解淺水波方程式，比較不同演算時距之模擬結果與演算效率。Xanthopoulos and Koutitas (1976)曾建立二維數值模式以模擬潰壩後河川或洪氾平原區水流之流況。Cunge et al. (1980)曾依地形與地貌將洪氾區劃分網格，配合所發展之理想渠道、堰等概念模式，再利用一維水流理論求解各網格中心的淹水深度，並將此模式應用於湄公河三角洲低窪之洪氾平原；後來 Vongvisessomjai et al. (1985)亦將此模式推廣應用於在曼谷地區。Akanbi and Katopodes (1988)利用有限元素法並搭配非固定計算網格求解二維淺水波方程式，模擬在初始無水陸地洪水波傳遞之情況。O'Brien et al. (1988)發展 FLO-2D 模式針對科羅拉多州進行 FEMA 都會區洪災保險的研究，採用一維變量流與二維漫地流模式，計算溢堤時堤外管道與堤內地表間水流互動機制。Horritt and Bates (2002)藉由衛星遙測資料進行河域參數修正，提高一維與二維數值模式模擬該區淹水情況之準確度。Mark et al. (2004)以一維水文模式結合地下管路與街道之關係模擬淹水，並應用於孟加拉首都，考慮地形及排水系統作為網格劃分。



近年隨著資料量的增大，考慮各種參數的淹水模式也需要更多的演算時間才能得到模擬結果，在進行洪水與淹水預報所需之前置時間的考量下，如何提昇模式理論與數值方法，以縮短模式模擬時間，為目前國際間各種淹水模式發展的一個趨勢。Bates and De Roo (2000)以二維網格結合一維渠道觀念建立 LISFLOOD-FP 模式，針對模式穩定性及不同演算時距作進一步分析，其以高解析不同大小之三角型網格探討模式模擬結果。Wilson and Atkinson (2005)應用 LISFLOOD 淹水模式討論三種不同來源之高程資料對淹水模擬結果之影響。Sanders (2007)評估不同測量方式所測得之數值地形資料適用於地表淹水模式之分析。Gouldby et al. (2008)將地表以高程劃分成不同區域，建立各區域間之水位與淹水體積之關係，以河川溢流量配合水位體積曲線算出各區域之淹水深，並應用於泰晤士河。

在國內淹水模式的相關研究，顏清連等人(1986)利用簡單顯式法與交替方向顯式法兩種差分式，建立二維零慣性數值模式模擬三重、蘆洲地區堤防潰決後洪流之流況。吳啟瑞(1993)建立二維漫地流淹水模式模擬八掌溪流域淹水情況。楊昌儒及蔡長泰(1998)討論數值高程模型解析度對於淹水模式分區代表高程之影響，將原始網格以雙線性內插與選取最近點法產生兩種不同解析度之數值高程，比較模擬淹水深度之差異。黃成甲(1997)結合一維河系變量流模式與二維核胞淹水模式，針對河川洪水及地表淹水進行模擬，並完成八掌溪流域不同重現期降雨之淹水區域。許銘熙等人(1998)年結合一維河川變量流動力波模式與二維零慣性漫地流淹水模式，考慮水流在地表漫地流出口與河川匯流情況及抽水站與閘門操作等之交互作用。盧重任(1997)銜接一維河系變量流模式及二維漫地流淹水模式，模擬賀伯颱風時期市區之淹水情況。賴進松及林孟郁(2000)利用一維變量流模式計算潰堤點入流歷線，銜接二維漫地流模式模擬潰堤後淹水情況。陳欣怡(2001)建立考量調節池效應之二維漫地流淹水模式，並應用於台南科學園區。陳昌榮(2002)考慮鹽水溪流域的地表逕流及排水路流量，以模擬台南科學工業園區颱風期間可能發生淹水的程度。江明晃(2006)分析不同數值地形解析度對淹水模擬之影響。蘇郁惠(2008)建立簡易空間分佈之淹水計算模式，並銜接中央氣象局定量降水預報系統



(QPESUMS system)，利用雷達回波資訊推估之雨量整合地面雨量站觀測之雨量，進行即時演算淹水模擬，並以納莉颱風事件評估不同網格尺度及演算時距對模式運算時間及模擬精度之影響。陳彥宏(2008)以多重網格概念建立局部細化網格淹水模式，劃分重要區域進行細化網格模擬，能在短時間內取得局部區域之高解析度淹水資訊。鄒亞達(2009)進一步探討粗細網格邊界之不同銜接方式，比較模擬結果之精確性，找出較佳之邊界處理方法以增進局部細化網格淹水模式之準確度。邱建勛(2011)在二維漫地流模式中加入建蔽率並考慮建物進水效應，以模擬台北地區納莉颱風時之淹水情況。王彥翔(2012)以水工試驗結果分析建物對地表曼寧糙度之影響，依不同建蔽率進行曼寧糙度值之調整，並將其應用於台中都會區之淹水模擬。李懿軒(2013)將粗細網格之二維淹水模式進行平行化計算，大幅提昇二維粗細網格式之演算效率。

2-2 建物效應

都會地區進行淹水模擬時需要高精度的地表資料以呈現實際地貌及複雜流況，近年應用高解析數值地形資料於二維淹水模式，讓淹水模擬的精度大幅提昇(Erpicum et al., 2010; Tsubaki and Fujita, 2010; Yu and Lane, 2006a)。Alcrudo (2004)於 IMPACT 計畫中提出在數值模式中如何考慮建物的機制，包括在建物所在網格修改地表糙度值，增加地表高程或在高解析度網格中以垂直不透水牆的設定來呈現建物。近年來許多研究使用孔隙率(porosity)的概念，進行次網格模式中主網格的參數設定，讓二維淹水模式能在較大網格中以高解析度之原始地形反應出網格間的阻隔效應。Yu and Lane (2006b)在次網格中以細部地形的變化來考慮主網格間的流量阻隔效應，其結果呈現比傳統單純修改曼寧糙度值的方法更高的精度。Sanders et al. (2008)以均勻阻力係數來考慮次網格中建物對水流的影響，並以不規則建物的建物形狀及分佈情形導出兩種孔隙率參數，利用其求解都會地區淹水流況。Chen et al. (2012a)假設建物外牆可阻隔水流，以建物並探討建物形狀及排列對都市水流的影響。Chen et al. (2012b)更進一步利用多重網格之理論，探討在建物阻

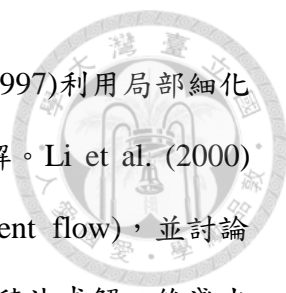


隔下相鄰兩網格間的水流流況，藉以修正因建物阻隔所導致的水流流向。Velickovic (2010)製作水工模型實驗求出建物阻力，用能量損失反映建物對水流所產生的阻力問題並以不規則的網格進行淹水模擬。

而在建物對水流阻力及地表曼寧糙度的影響，Neelz and Pender (2007)曾針對都市地區漫地流模式之曼寧糙度係數與網格尺度之關係進行探討，比較粗細網格間不同曼寧糙度值其最大水深出現之時間，作為粗網格的曼寧糙度係數如何修正之依據。Green (2005)將草生植物在水中的阻力反應至曼寧公式中的地表糙度值上，並依照植物占通水面積比計算成孔隙率的概念以修正地表糙度。Liang et al. (2007)提出在高度不穩定流況下，可將建物對水流的阻力效應直接反應在地表曼寧糙度值上。Sanders et al. (2008)進一步確定阻礙物具有阻礙通水效應，因此在模式中不單需考慮原底床剪力還需加入建物阻力，才能反應實際水流流動情形。Neelz and Pender (2007)調整尺度較大之粗網格曼寧糙度值以反應地表上阻礙物對流況的影響，再以尺度較小之細網格模擬實際建物在都市地區之淹水情形作為驗證。Soares-Frazaio et al. (2008)製作大型的水工試驗模型，以分析規則與交錯排列的建物對水流所造成能量損失之影響，並在解析度較低的不規則網格中加入孔隙率以調動地表糙度，其實驗結果與有限體積法之數值模擬結果作比較，發現調整地表糙度值能夠有效的反應出建物對水流的阻礙效應。

2-3 局部細化網格

在二維淹水演算中，利用尺度較大之主網格進行全域之水理演算，以節省演算時間，並以局部細化網格進行人口密集之都會區之淹水演算，亦可反應局部地區之真實流況(Bradford and Sanders, 2002; McMillan and Brasington, 2007; Shige-Eda and Akiyama, 2003)。局部細化網格應用於水理演算方面的相關研究中，Ghia et al. (1982)應用多重網格模擬二維不可壓縮流在高雷諾數條件下之紊流流況。Mavriplis (1991)利用能適應流場地地形特性之非結構化網格模擬二維可壓縮紊流之流況。Ruge et al. (1995)將局部細化網格演算法用在球體網格計算上，透過數值

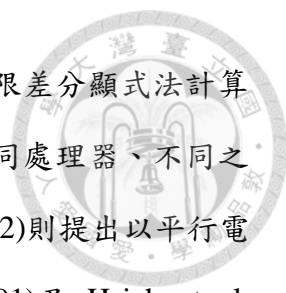


模式模擬，證明能提高結果之精確度。Spitaleri and Corinaldesi (1997)利用局部細化網格法模擬封閉集水區內之流況，獲得與實際相同之近似數值解。Li et al. (2000)運用適應性局部細化網格法模擬三維密度依存流(density-dependent flow)，並討論地下水傳輸問題。Lamby et al. (2005)運用適當多重尺度有限體積法求解二維淺水波方程式，進而模擬潰壩、水躍等水理現象，證明能提高數值模式演算效率。Liang et al. (2008)以四分樹網格數值地形解法(quadtree grid based)為基礎，專注於大尺度區域內重要局部小尺度區域，增進了演算效率及模擬準確性。Wang et al. (2005)以無網格(meshless)方法，利用加權殘值定理(Weight residual method)，以粗網格之流況作為邊界條件進行細網格水深之求解。

局部細化網格邊界處理方面，Brandt (1977)提出局部細化網格的基本架構，包括粗細網格邊界之間的轉換，邊界分配關係可用多項式表示，其中非共通項即為分配權重，而權重分配參數的次方數不應低於其在數值模式中之次方數，又在殘值(residual)足夠的情況下權重分配參數可以考慮較高次方數，當權重參數次方數更高時，會耗費更高之演算資源但不會有顯著之改善。Hemker (1990)討論粗細網格在不同頻率下之傅立葉轉換時，邊界權重分配參數之次方數與頻率高低之關聯性。Chan et al. (1999)討論非結構化粗細網格之邊界轉換，需透過邊界處理方可減少誤差，其中有相近邊緣法與相近距離法，即以接觸邊緣比例與相對距離作為分配權重之參數。van Brummelen et al. (2008)透過勘誤程序發展一有效之修正參數處理黏性流通過局部細化網格邊界產生流體結構交互作用產生之影響。

2-4 平行計算

近年來，電腦科技進步快速，擁有多核心多執行緒之個人電腦讓平行計算之應用性更加廣泛，舉凡硬體設計、程式語言發展、演算法及平行技術的應用，均有許多相關的研究，有關平行計算的發展及觀念，Codonotti and Leoncini (1992)及 Hillis (1992)曾有詳盡的介紹。而在土木水利工程方面，平行演算法也廣泛應用於計算流體力學及高計算量之水理模式之中，Dawson et al. (1991)開發有限差分法之



計算網格切割流程，將整個計算平面切割成數個子網格，以有限差分顯式法計算出子網格交接界面上網格點之數值，將各個子網格可分配於不同處理器、不同之演算時距同步進行平行演算，大幅提昇演算效率。Rodrigue (1992)則提出以平行電腦求解不同流力問題時所應採取的問題切割策略。Simon (1991)及 Hsieh et al. (1997)採用平行子結構法，將原始的有限網格分割成數個子網格，分別交給不同的處理器負責運算。Paglieri et al. (1997)採用有限元素法，透過網格切割之方式進行二維淺水波方程式模擬之平行演算。Hervouet (2000)在高解析二維潰壩模式中 (dam-break model)，加入平行計算以增加演算效率。Hluchy et al. (2002)針對二維淹水模式數值演算資料最繁複計算的部份進行平行化，隨著電腦執行緒數目增加，模擬效率也隨之增進，大幅減少了演算時間。Pau and Sanders (2006)模擬有限體積法之二維淺水波方程式，並將模擬網格切割至不同執行緒以進行平行計算，使模式演算達到最佳化，有效減少計算時間。Kalyanapu et al. (2011) 利用圖形處理器 (Graphic Processing Unit, GPU)的 CUDA (Compute Unified Device Architecture)架構，進行二維洪水波方程式之求解，並比較不同顯示卡組合下之提昇效率。Neal et al. (2009)使用 openMP 語法於二維漫地流模式進行平行化之修改，將二維 x、y 方向之演算平行處理，求解流速及淹水深，並探討不同核心數目、不同網格數量之演算效率。Neal et al. (2010)更進一步探討比較 LISMIN、openMP、MPI 三種平行演算法於淹水模式之效率。Sanders et al. (2010)結合平行演算法於二維淹水模式中，以多台多核心電腦串結合高達 512 個執行緒之叢集電腦進行平行演算，以此演算高解析數值地形(10 公尺)模擬區，有效地提供精密且即時之淹水資訊。

第三章 研究方法



3-1 都市淹水模式

3-1-1 基本方程式

對於坡度平緩的洪氾平原而言，變量流方程式中加速項之大小級次（order of magnitude）通常遠小於重力項與摩擦項，則加速項可以忽略不考慮。假設洪水歷線上升平緩，且忽略科氏力、風力及加速項之影響，地表漫地流流況可用二維零慣性模式予以描述，其控制方程式可簡化如下：

$$\frac{\partial d}{\partial t} + \frac{\partial(ud)}{\partial x} + \frac{\partial(vd)}{\partial y} = q \quad (3-1)$$

$$-\frac{\partial h}{\partial x} = u \left[\frac{n^2 |u|}{d^{4/3}} + \frac{q}{dg} \right] \quad (3-2)$$

$$-\frac{\partial h}{\partial y} = v \left[\frac{n^2 |v|}{d^{4/3}} + \frac{q}{dg} \right] \quad (3-3)$$

(3-1)式為二維連續方程式；(3-2)式、(3-3)式分別為沿 x, y 方向之二維運動方程式。式中， x, y 為模擬地區標示之卡氏座標[m]； t 為時間座標[s]； d 為模擬區地表水深[m]； u, v 分別為沿 x, y 方向之平均流速[m/s]； n 為曼寧糙度值[s/m^{1/3}]； $h = d + z$ 為地表水位[m]； z 為地表高程[m]； g 為重力加速度[m/s²]； q 為單位表面積之進流量[m/s]，包括有效降雨強度、河川潰堤流量及雨水下水道人孔溢流量之總和。

都會地區地表有建物覆蓋時，應考慮建物之水流阻抗及蓄水效應。若建物所遮蔽之面積佔地表面積比例為 α_0 ，則 α_0 為建蔽率，此時可蓄水面積比為 $1 - \alpha_0$ ，如圖 3-1 所示，此時(3-1)式應改寫為下式，其推導及假設詳見附錄 A：

$$\frac{\partial(1 - \alpha_0)d}{\partial t} + \frac{\partial(ud)}{\partial x} + \frac{\partial(vd)}{\partial y} = q \quad (3-4)$$



因建物外牆的阻擋，地表漫地流會被阻隔於建物外，當建物外部水位超過建物進水門檻值 d_0 後，積水將流入建物中，其單位面積之流量 q_i 可利用堰流公式進行計算。

$$q_i = \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot B \cdot (2g)^{1/2} \cdot \frac{(d - d_0)^{3/2}}{\Delta x \cdot \Delta y} \quad (3-5)$$

式中， μ 為堰流係數； B 為門檻入口寬度[m]； d_0 為建物入口門檻高度[m]； q_i 為單位面積之建物入流量[m/s]。

因 q_i 可考慮為連續方程式之點匯(sink)，故(3-4)式可改寫為

$$\frac{\partial(1 - \alpha_0)d}{\partial t} + \frac{\partial(ud)}{\partial x} + \frac{\partial(vd)}{\partial y} = q - q_i \quad (3-6)$$

建物總進水體積為入流量對時間之積分，即 $\int_{t_0}^t q_i \cdot dt$ ， t_0 為建物開始入流之時間。因建物入流量為網格內部流況，故此時可將 q_i 以 $\partial\left(\int_{t_0}^t q_i \cdot dt\right)/\partial t$ 取代，代入(3-6)式中，並其移至左項：

$$\frac{\partial(1 - \alpha_0)d}{\partial t} + \frac{\partial\left(\int_{t_0}^t q_i \cdot dt\right)}{\partial t} + \frac{\partial(ud)}{\partial x} + \frac{\partial(vd)}{\partial y} = q \quad (3-7)$$

假設 α' 為建物進水體積之相對面積比，即 $\alpha' = \int_{t_0}^t q_i \cdot dt / d$ ，且令 $\alpha = \alpha_0 - \alpha'$ ，表示建物目前可蓄水之面積比，此時式(3-7)可改寫為

$$\frac{\partial(1 - \alpha)d}{\partial t} + \frac{\partial(ud)}{\partial x} + \frac{\partial(vd)}{\partial y} = q \quad (3-8)$$

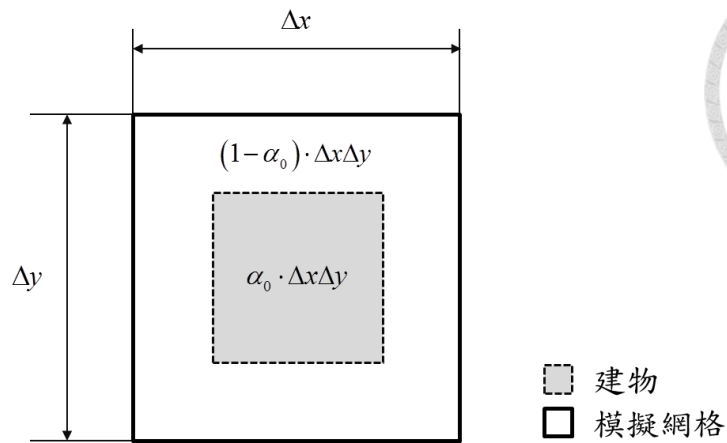


圖 3-1 建物網格式示意圖

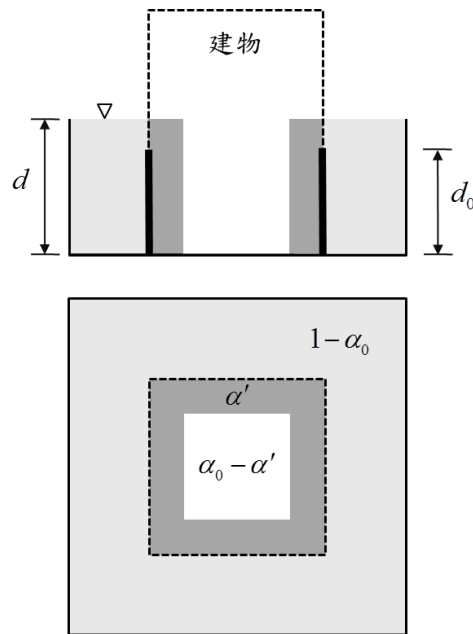


圖 3-2 建物進水體積之相對面積比 α' 示意圖

建物進水面積比 α' 之示意如圖 3-2，若忽略建物外牆厚度及建物高程下的蓄水空間， α' 之值介於 0 到 α_0 之間，若建物外淹水高度尚未超過建物門檻值時，建物進水面積比為 0，建物若全部進水時，建物進水面積比為 α_0 。

若地形高程 z 、曼寧糙度值 n 和進流量 q 已知，則(3-8)、(3-2) 及 (3-3) 式含有三個因變數 d 、 u 及 v 。此含三因變數的偏微分聯立方程式，須利用數值方法求解之。



3-1-2 數值方法

假若地表於初始時刻為無水狀態，洪流傳遞之前緣與乾地表接觸之交界鋒線將隨時間向下游推進，為簡易處理這種移動邊界水流流況，本文採用交替方向顯式差分法(Alternating Direction Explicit Method, ADE)建立數值模式。依標示網格(Marker And Cell, MAC)差分觀念，若將(3-8)、(3-2)及(3-3)式中任意變量以差分式 f 表示，其中 f 可代表 d 、 q 、 u 或 v 等變量，採用之差分型式如(3-9)式所示：

$$\begin{aligned}
 f_{i+1/2,j} &= \frac{1}{2}(f_{i,j} + f_{i+1,j}) \\
 f_{i,j+1/2} &= \frac{1}{2}(f_{i,j} + f_{i,j+1}) \\
 \frac{\partial f}{\partial t} &= \frac{f_{i,j}^{m+1} - f_{i,j}^m}{\Delta t} \\
 \frac{\partial f_{i,j}^m}{\partial x} &= \frac{f_{i+1/2,j}^m - f_{i-1/2,j}^m}{\Delta x} \\
 \frac{\partial f_{i,j}^m}{\partial y} &= \frac{f_{i,j+1/2}^m - f_{i,j-1/2}^m}{\Delta y}
 \end{aligned} \tag{3-9}$$

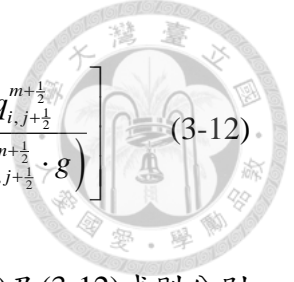
式中， $\Delta x, \Delta y$ 為沿 x 、 y 方向之網格間距[m]； Δt 為演算時距[s]； m 為演算時階指標； i 、 j 為沿 x 、 y 方向之空間指標。

交替方向顯式法之演算方式為，將演算時距 Δt 等分為兩個時階，且每前進一個時階即分別交替求解流速 u 及 v 。(3-8)、(3-2)及(3-3)式之差分方程式可依第一、二時階，分別列出如下：

1. 第一時階($m + \frac{1}{2}$)：

$$\begin{aligned}
 d_{i,j}^{m+\frac{1}{2}} &= d_{i,j}^m - \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta t}{(1-\alpha)} \cdot \\
 &\left[\frac{\left(u_{i+\frac{1}{2},j}^{m+\frac{1}{2}} \cdot d_{i+\frac{1}{2},j}^m - u_{i-\frac{1}{2},j}^{m+\frac{1}{2}} \cdot d_{i-\frac{1}{2},j}^m \right)}{\Delta x} + \frac{\left(v_{i,j+\frac{1}{2}}^m \cdot d_{i,j+\frac{1}{2}}^m - v_{i,j-\frac{1}{2}}^m \cdot d_{i,j-\frac{1}{2}}^m \right)}{\Delta y} - q_{i,j}^{m+\frac{1}{2}} \right]
 \end{aligned} \tag{3-10}$$

$$\left[\frac{\left(d_{i,j}^{m+\frac{1}{2}} + z_{i,j}^{m+\frac{1}{2}} \right) - \left(d_{i+1,j}^{m+\frac{1}{2}} + z_{i+1,j}^{m+\frac{1}{2}} \right)}{\Delta x} \right] = u_{i+\frac{1}{2},j}^{m+\frac{1}{2}} \left[\frac{\left(n_{i+\frac{1}{2},j} \right)^2 \left| u_{i+\frac{1}{2},j}^{m+\frac{1}{2}} \right|}{\left(d_{i+\frac{1}{2},j}^m \right)^{4/3}} + \frac{q_{i+\frac{1}{2},j}^{m+\frac{1}{2}}}{\left(d_{i+\frac{1}{2},j}^m \cdot g \right)} \right] \tag{3-11}$$



$$\frac{\left[\left(d_{i,j}^{m+\frac{1}{2}} + z_{i,j}^{m+\frac{1}{2}} \right) - \left(d_{i,j+1}^{m+\frac{1}{2}} + z_{i,j+1}^{m+\frac{1}{2}} \right) \right]}{\Delta y} = v_{i,j+\frac{1}{2}}^{m+\frac{1}{2}} \left[\frac{\left(n_{i,j+\frac{1}{2}} \right)^2 \left| v_{i,j+\frac{1}{2}}^{m+\frac{1}{2}} \right|}{\left(d_{i,j+\frac{1}{2}}^{m+\frac{1}{2}} \right)^{4/3}} + \frac{q_{i,j+\frac{1}{2}}^{m+\frac{1}{2}}}{\left(d_{i,j+\frac{1}{2}}^{m+\frac{1}{2}} \cdot g \right)} \right] \quad (3-12)$$

式中，(3-10)式為 $(i, j, m+1/2)$ 座標點之連續方程式，(3-11)及(3-12)式則分別為 $(i+1/2, j, m+1/2)$ 座標點沿 x 方向運動方程式與 $(i, j+1/2, m+1/2)$ 座標點沿 y 方向運動方程式。

求解時在空間座標上沿著 x 方向前進計算，(3-10)及(3-11)式分別以隱函數關係表示

$$F_1 \left(d_{i,j}^{m+\frac{1}{2}}, u_{i\pm\frac{1}{2},j}^{m+\frac{1}{2}} \right) = 0 \quad (3-13)$$

$$F_2 \left(d_{i,j}^{m+\frac{1}{2}}, d_{i+1,j}^{m+\frac{1}{2}}, u_{i+\frac{1}{2},j}^{m+\frac{1}{2}} \right) = 0 \quad (3-14)$$

由上兩式可知，對第一時階， $(m+\frac{1}{2})\Delta t$ 時刻而言，共包含 $d_{i,j}^{m+\frac{1}{2}}$ 、 $d_{i+1,j}^{m+\frac{1}{2}}$ 、 $u_{i-\frac{1}{2},j}^{m+\frac{1}{2}}$ 及 $u_{i+\frac{1}{2},j}^{m+\frac{1}{2}}$ 四個未知數，僅以此二方程式不足以求解 $d_{i,j}^{m+\frac{1}{2}}$ 及 $u_{i+\frac{1}{2},j}^{m+\frac{1}{2}}$ ，欲求解網格 (i, j) 中心之水深 $d_{i,j}^{m+\frac{1}{2}}$ 及 x 方向流速分量 $u_{i+\frac{1}{2},j}^{m+\frac{1}{2}}$ ，可根據(3-10)式將 $d_{i,j}^{m+\frac{1}{2}}$ 及(3-11)式中之 $d_{i+1,j}^{m+\frac{1}{2}}$ 表示為

$$d_{i,j}^{m+\frac{1}{2}} = f_1 \left(u_{i\pm\frac{1}{2},j}^{m+\frac{1}{2}}, d_{i,j}^m, d_{i\pm\frac{1}{2},j}^m, d_{i,j\pm\frac{1}{2}}^m, v_{i,j\pm\frac{1}{2}}^m \right) \quad (3-15)$$

$$d_{i+1,j}^{m+\frac{1}{2}} = f_2 \left(u_{(i+1)\pm\frac{1}{2},j}^{m+\frac{1}{2}}, d_{i+1,j}^m, d_{(i+1)\pm\frac{1}{2},j}^m, d_{i+1,j\pm\frac{1}{2}}^m, v_{i+1,j\pm\frac{1}{2}}^m \right) \quad (3-16)$$

(3-16)之推導詳見附錄 B。其中(3-15)式可於邊界處引入適當的邊界條件使 $u_{i-\frac{1}{2},j}^{m+\frac{1}{2}}$ 為已知值；並將(3-16)式中 $u_{i+\frac{3}{2},j}^{m+\frac{1}{2}}$ 線性化，即假設 $\Delta u_{i+\frac{3}{2},j} = u_{i+\frac{3}{2},j}^{m+\frac{1}{2}} - u_{i+\frac{3}{2},j}^m$ 在 $\frac{1}{2}\Delta t$ 時距內變化甚微，則 $u_{i+\frac{3}{2},j}^{m+\frac{1}{2}} = u_{i+\frac{3}{2},j}^m$ (顏清連 et al., 1986)，如此在(3-15)及(3-16)式中只剩 $u_{i+\frac{1}{2},j}^{m+\frac{1}{2}}$ 及 $d_{i,j}^{m+\frac{1}{2}}$ 兩未知數，代入(3-11)式中可導出 $u_{i+\frac{1}{2},j}^{m+\frac{1}{2}}$ 之顯函數關係：



$$f_3\left(u_{i+\frac{1}{2},j}^{m+\frac{1}{2}}\right)=0 \quad (3-17)$$

(3-17)之詳細推導見附錄 B。利用(3-17)式可單獨求解 $u_{i+\frac{1}{2},j}^{m+\frac{1}{2}}$ ，再將 $u_{i+\frac{1}{2},j}^{m+\frac{1}{2}}$ 代入(3-10)

式中即可求得 $d_{i,j}^{m+\frac{1}{2}}$ 。先沿著 x 方向逐步計算，即可求解出垂直通過各網格 (i, j) 右側

邊界之流速分量 $u_{i+\frac{1}{2},j}^{m+\frac{1}{2}}$ 及各網格 (i, j) 中心點之水深 $d_{i,j}^{m+\frac{1}{2}}$ ，之後再沿著 y 方向逐步計

算，將所有網格已求解出的 $u_{i+\frac{1}{2},j}^{m+\frac{1}{2}}$ 及 $d_{i,j}^{m+\frac{1}{2}}$ 代入(3-12)式，即可求出通過網格上方邊界

之流速分量 $v_{i,j+\frac{1}{2}}^{m+\frac{1}{2}}$ ，如此第一時階之 u 、 v 及 d 已可全部解出。

2. 第二時階 $(m+1)$

將(3-10)式待求流速分量 u 更替為 v ，並將(3-11)、(3-12)式之 u 、 v 互換，則(3-8)、

(3-2)及(3-3)式之差分方程式可表示如下：

$$d_{i,j}^{m+1} = d_{i,j}^{m+\frac{1}{2}} - \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta t}{(1-\alpha)} \cdot \left[\frac{\left(u_{i+\frac{1}{2},j}^{m+\frac{1}{2}} \cdot d_{i+\frac{1}{2},j}^{m+\frac{1}{2}} - u_{i-\frac{1}{2},j}^{m+\frac{1}{2}} \cdot d_{i-\frac{1}{2},j}^{m+\frac{1}{2}}\right)}{\Delta x} + \frac{\left(v_{i,j+\frac{1}{2}}^{m+\frac{1}{2}} \cdot d_{i,j+\frac{1}{2}}^{m+\frac{1}{2}} - v_{i,j-\frac{1}{2}}^{m+\frac{1}{2}} \cdot d_{i,j-\frac{1}{2}}^{m+\frac{1}{2}}\right)}{\Delta y} - q_{i,j}^{m+1} \right] \quad (3-18)$$

$$\frac{\left[\left(d_{i,j}^{m+1} + z_{i,j}^{m+1}\right) - \left(d_{i+1,j}^{m+1} + z_{i+1,j}^{m+1}\right)\right]}{\Delta y} = u_{i+\frac{1}{2},j}^{m+1} \left[\frac{\left(n_{i+\frac{1}{2},j}\right)^2 \left|u_{i+\frac{1}{2},j}^{m+1}\right|}{\left(d_{i+\frac{1}{2},j}^{m+1}\right)^{4/3}} + \frac{q_{i+\frac{1}{2},j}^{m+1}}{\left(d_{i+\frac{1}{2},j}^{m+1} \cdot g\right)} \right] \quad (3-19)$$

$$\frac{\left[\left(d_{i,j}^{m+1} + z_{i,j}^{m+1}\right) - \left(d_{i,j+1}^{m+1} + z_{i,j+1}^{m+1}\right)\right]}{\Delta y} = v_{i,j+\frac{1}{2}}^{m+1} \left[\frac{\left(n_{i,j+\frac{1}{2}}\right)^2 \left|v_{i,j+\frac{1}{2}}^{m+1}\right|}{\left(d_{i,j+\frac{1}{2}}^{m+1}\right)^{4/3}} + \frac{q_{i,j+\frac{1}{2}}^{m+1}}{\left(d_{i,j+\frac{1}{2}}^{m+1} \cdot g\right)} \right] \quad (3-20)$$

(3-18)式為 $(i, j, m+1)$ 連續方程式，(3-19)及(3-20)式則分別為 $(i+1/2, j, m+1)$

座標點沿 x 方向運動方程式與 $(i, j+1/2, m+1)$ 座標點沿 y 方向運動方程式。

求解時在空間座標上沿著 y 方向前進計算，(3-18)及(3-20)式分別以隱函數關係

表示



$$G_1(d_{i,j}^{m+1}, v_{i,j\pm\frac{1}{2}}^{m+1}) = 0 \quad (3-21)$$

$$G_2(d_{i,j}^{m+1}, d_{i,j+1}^{m+1}, v_{i,j+\frac{1}{2}}^{m+1}) = 0 \quad (3-22)$$

由上兩式可知，對第二時階， $(m+1)\Delta t$ 時刻而言，共包含 $d_{i,j}^{m+1}$ 、 $d_{i,j+1}^{m+\frac{1}{2}}$ 、 $v_{i,j-\frac{1}{2}}^{m+1}$ 及 $v_{i,j+\frac{1}{2}}^{m+1}$ 四個未知數，僅以此二方程式不足以求解 $d_{i,j}^{m+1}$ 及 $v_{i,j+\frac{1}{2}}^{m+1}$ ，欲求解網格 (i, j) 中心之水深 $d_{i,j}^{m+1}$ 及 y 方向流速分量 $v_{i,j+\frac{1}{2}}^{m+1}$ ，可根據(3-18)式將 $d_{i,j}^{m+1}$ 及(3-20)式中之 $d_{i,j+1}^{m+\frac{1}{2}}$ 表示為

$$d_{i,j}^{m+1} = g_1(v_{i,j\pm\frac{1}{2}}^m, d_{i,j}^{m+\frac{1}{2}}, d_{i\pm\frac{1}{2},j}^{m+\frac{1}{2}}, d_{i,j\pm\frac{1}{2}}^{m+\frac{1}{2}}, u_{i\pm\frac{1}{2},j}^{m+\frac{1}{2}}) \quad (3-23)$$

$$d_{i,j+1}^{m+1} = g_2(v_{i,(j+1)\pm\frac{1}{2}}^m, d_{i,j+1}^{m+\frac{1}{2}}, d_{i\pm\frac{1}{2},j+1}^{m+\frac{1}{2}}, d_{i,(j+1)\pm\frac{1}{2}}^{m+\frac{1}{2}}, u_{i\pm\frac{1}{2},j+1}^{m+\frac{1}{2}}) \quad (3-24)$$

(3-24)之推導詳見附錄 C。其中(3-23)式可於邊界處引入適當的邊界條件使 $v_{i,j-\frac{1}{2}}^{m+1}$ 為已知值；並將(3-24)式中 $v_{i,j+\frac{3}{2}}^{m+1}$ 線性化，即假設 $\Delta v_{i,j+\frac{3}{2}} = v_{i,j+\frac{3}{2}}^{m+1} - v_{i,j+\frac{1}{2}}^{m+\frac{1}{2}}$ 在 $\frac{1}{2}\Delta t$ 時距內變化甚微，則 $v_{i,j+\frac{3}{2}}^{m+1} = v_{i,j+\frac{1}{2}}^{m+\frac{1}{2}}$ (顏清連 et al., 1986)，如此在(3-23)及(3-24)式中只剩 $v_{i,j+\frac{1}{2}}^{m+1}$ 及 $d_{i,j}^{m+1}$ 兩未知數，代入(3-20)式可導出 $v_{i,j+\frac{1}{2}}^{m+1}$ 之顯函數關係：

$$g_3(v_{i,j+\frac{1}{2}}^{m+1}) = 0 \quad (3-25)$$

(3-25)之詳細推導見附錄 C。利用(3-25)式可單獨求解 $v_{i,j+\frac{1}{2}}^{m+1}$ ，再將 $v_{i,j+\frac{1}{2}}^{m+1}$ 代入(3-18)式中即可求得 $d_{i,j}^{m+1}$ 。先沿著 y 方向逐步計算，即可求解出垂直通過各網格 (i, j) 上方邊界之流速分量 $v_{i,j+\frac{1}{2}}^{m+1}$ 及各網格 (i, j) 中心點之水深 $d_{i,j}^{m+1}$ ，之後再沿著 x 方向逐步計算，將所有網格已求解出的 $v_{i,j+\frac{1}{2}}^{m+1}$ 及 $d_{i,j}^{m+1}$ 代入(3-19)式，即可求出通過網格右側邊界之流速分量 $u_{i+\frac{1}{2},j}^{m+1}$ ，如此第二時階之 u 、 v 及 d 已可全部解出。



3-1-3 地表曼寧糙度修正

都市淹水模式主要參數為曼寧糙度係數，用以表示地貌對於水理流況之影響，漫地流在都市地區受到地表建築物影響，水流撞擊建物所產生的阻力，造成能量損失及產生迴水效應，並造成地表曼寧糙度的改變。考慮建物建蔽效應後水流阻力可以分為通水區表面阻力和建物形狀阻力兩項阻力，令考慮建物後水流所受到的總阻力稱為 F ，則可得下式：

$$F = F' + F'' \quad (3-26)$$

式中， F' 為通水區表面阻力， F'' 為建物形狀阻力。

通水表面阻力為摩擦剪應力 τ_w 於地表上所產生之阻力，若原通水面積 A 之地表上有建蔽率 α_0 之建物，但因建物覆蓋部分地表面積造成地表通水面積下降為 $(1-\alpha_0) \cdot A$ ，則水流因通水面積變化所受到的摩擦阻力下降為：

$$F' = \tau_w \cdot (1-\alpha_0) \cdot A \quad (3-27)$$

式中， $\tau_w = \gamma \cdot d \cdot S_f$ 為摩擦剪應力， γ 為水的比重， $S_f = (n_0^2 \cdot V^2) / d^{4/3}$ ，其中 $V = \sqrt{u^2 + v^2}$ ，且 n_0 為尚未考慮地表建物之原始曼寧糙度值，通水表面阻力可表示為：

$$F' = \gamma \cdot d \cdot \frac{n_0^2 \cdot V^2}{d^{4/3}} \cdot (1-\alpha_0) \cdot A = \gamma \cdot d \cdot \frac{(n')^2 \cdot V^2}{d^{4/3}} \cdot A \quad (3-28)$$

式中， n' 為受通水表面阻力影響之曼寧糙度值，建物阻力也可以同樣型式表示為摩擦剪應力作用於原通水面積 A 上：

$$F'' = \gamma \cdot d \cdot \frac{(n'')^2 \cdot V^2}{d^{4/3}} \cdot A \quad (3-29)$$

式中， n'' 為受建物阻力影響之曼寧糙度值，將(3-28)式及(3-29)式代入(3-26)式中可得

$$\gamma \cdot d \cdot \frac{n^2 \cdot V^2}{d^{4/3}} \cdot A = \gamma \cdot d \cdot \frac{n_0^2 \cdot V^2}{d^{4/3}} \cdot (1 - \alpha_0) \cdot A + \gamma \cdot d \cdot \frac{(n'')^2 \cdot V^2}{d^{4/3}} \cdot A \quad (3-30)$$

進一步可得到因通水表面阻力和建物形狀阻力影響，地表曼寧糙度值 n 應以下式修正為

$$n = \sqrt{(n')^2 + (n'')^2} = \sqrt{(1 - \alpha_0) \cdot n_0^2 + (n'')^2} \quad (3-31)$$

王彥翔(2012)以水工試驗結果得到其與地表建蔽率之關係並導出下式：

$$n = \sqrt{(1 - \alpha_0) \cdot n_0^2 + (n_r'')^2 \cdot (2.835\alpha_0^3 - 2.629\alpha_0^2 + 0.969\alpha_0)^2} \quad (3-32)$$

式中，曼寧糙度值比 n_r'' 為實際建物與水工試驗之尺度修正因子，計算如下：

$$n_r'' = C_r \cdot \frac{d^{2/3}}{\Delta x^{1/2}} \quad (3-33)$$

式中， C_r 為尺度修正係數，其值 = $2.97(m^{3/4})$ 。由上式可知尺度修正因子會隨水深和網格大小變化，本文在各時階的計算中，利用(3-32)式進行地表曼寧糙度值之修正。

3-1-4 初始及邊界條件

都市淹水模式之初始條件係依臨前水文情況而定，假設模擬區域內為沒有任何淹水情況之無水狀態，亦即水深及流速均為零，故初始條件如(3-16)式所示：

$$d_{i,j} = u_{i+\frac{1}{2},j} = v_{i,j+\frac{1}{2}} = 0 \quad (3-34)$$

利用數值方法求解二維性變量流方程式時，對於如何給予邊界條件之問題應多加注意，因為不適當或錯誤之邊界條件，將隨演算時間及空間的增展而使誤差擴大。目前模式之邊界分為閉合邊界及開放邊界兩種形式，分別說明如下：



1. 閉合邊界

任何阻擋水流穿越之障礙物，如堤防線、擋水牆或模擬區域之周圍高地等皆可視為閉合邊界。因水流無法穿越堤防，故垂直於堤防線之流速可令其為零，即為模式之閉合邊界條件。

2. 開放邊界

此為模擬區域內水流進出之邊界處，如山區逕流之入流點、河川溢流處、河川下游出口或抽水站位置等，開放邊界條件可給予流量歷線、水位歷線、流速歷線等。

山區逕流之計算，採用美國陸軍工兵團所發展之 HEC-1 模式(U.S. Army Corps of Engineers, 1998)，依降雨量及集水區之面積、形狀、坡度等特性計算出逕流歷線後，提供為都市淹水模式中山區逕流入流點之邊界條件。

河川溢流處或河川下游出口，其出口邊界條件可能為潮位或河川水位，若出口無設置防水閘門，則此出口之流量將受河川外水位之影響，若出口之河川水位高於地表淹水位則外水將由此出口流入地表；若出口之河川水位低於地表淹水位則地表漫地流可經由此出口排入河川，本文使用堰流公式計算模擬區邊界流量，其中河川外水位採用一維河系變量流模式進行計算(許銘熙 等人, 1990)，詳見附錄 D。

若下游出口為抽水站，則當地表淹水位高過抽水站之起抽水位時，抽水站則開始將地表淹水抽排至河川中，其出流量為抽水站之設計容量。

3-2 局部細化網格計算

進行淹水模擬時，所劃分的模擬區邊界需為不透水邊界，如堤防或集水區邊界，故整體集水區往往涵蓋相當大的範圍，以台灣為例，通常為整個流域範圍或兩中央管河川間之區域，當颱風或豪雨事件發生時，人口集中的都會區往往才是

防災應變的重點，使用都市淹水模式進行淹水模擬時，可將全模擬區粗網格內部結合局部區域細網格進行模擬，加速計算時間並維持局部細化區域之模擬精度。

局部細化網格淹水模式是採用兩種不同尺度的模擬網格，分別為全模擬區使用之間距較大之粗網格，與局部模擬區所使用之間距較小之細網格，粗網格之大小及高程是由細網格平均而得，即粗、細網格間距有一定比例關係，且局部細化區包含於全模擬區之內，如圖 3-3 所示。細網格具較高之解析度，能夠有較精確之淹水模擬資料，針對人口密集或重要機關之地區，將所涵蓋之粗網格區域進行網格細化，針對此一細網格區域進行淹水模擬，其邊界條件由周邊之粗網格模擬結果提供，則可縮短演算時間便取得高解析度之淹水資訊。

若模擬區內受到高度開發，根據不同目的要求模擬區內許多處需要高解析度之淹水模擬結果，都市淹水模式能針對全模擬區內複數局部細化地區進行同步模擬的工作。

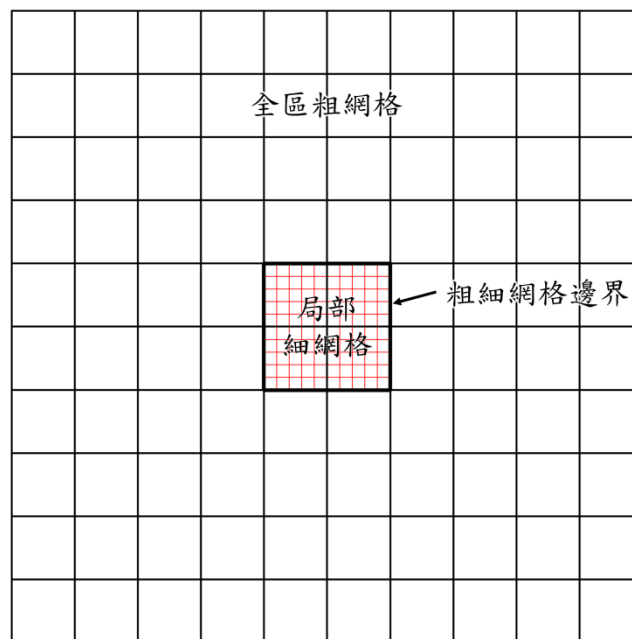


圖 3-3 粗細網格邊界關係示意圖



3-2-1 演算時距

一個不穩定的數值模式會產生隨時間增加之擾動(perturbation)，此一擾動來自於數值解之誤差。不穩定的數值模式其誤差擾動多呈指數增加，並導致數值模式演算結果隨時間逐漸發散，因此不穩定的數值模式在演算過程中容易出現極大誤差而發生錯誤。而對於數值模式的穩定性常取決一重要參數，即可蘭數 C_n (Courant number)，如下式所示：

$$C_n = \frac{u \cdot \Delta t}{\Delta x} \quad (3-35)$$

在使用顯式差分法數值模式時，若要得到穩定的情形，需要使可蘭數小於 1，此即所謂的可蘭條件(Courant-Friedrichs-Lewy, CFL)。由於可蘭數的選取不當會造成計算的誤差，因此數值解之穩定條件要求為 $0 < C_n \leq 1$ ，根據(3-35)式這個條件限制了網格間距 Δx 和演算時距 Δt 的範圍，若模式中網格間距的尺度變小，則演算時距也必須隨之縮短，最後模擬出的數值解才會容易達到收斂。

若模式中使用之粗網格為解析度 $a \times a$ 的計算網格，且局部細化網格採用解析度 $b \times b$ 的淹水計算網格(即粗網格的 b/a 倍)，則細網格演算時距的設定為粗網格演算時距的 b/a 倍，以符合可蘭條件。首先，粗網格的演算時距為 Δt_c 秒、細網格的演算時距為 Δt_f 秒，則 $\Delta t_c = (a/b) \cdot \Delta t_f$ ，若模擬時間設定為 24 小時(即 86,400 秒)，因此粗網格之演算次數 $step_c$ 為 $86,400 / \Delta t_c$ ，細網格之演算次數 $step_f$ 為 $86,400 / \Delta t_f$ ，則可知 $step_f = (a/b) \cdot step_c$ 。粗細網格的個別演算次數在模式中必須互相配合，所以在模式中設定，當粗網格進行 t 時刻至 $t + \Delta t_c$ 時刻的一次演算後，隨即進行 t 時刻細網格連續 (a/b) 次的演算，待細網格完成至 $t + \Delta t_c$ 時刻的演算，再回到粗網格演算步驟中，進行粗網格 $t + \Delta t_c$ 時刻的 $t + 2\Delta t_c$ 時刻之演算，以此類推達到同步演算之效果至模擬結束。

3-2-2 粗細網格間銜接

粗細網格在模式進行模擬時，細網格之局部細化模擬區域包含於粗網格之整體區域範圍中，故細網格之模擬區域邊界乃屬於粗網格模擬區域之內部邊界；因

此，細網格模擬區域之邊界條件須由粗網格模擬結果提供，在細網格的邊界條件上，選擇使用流量歷線，本文將細網格邊界所交疊之粗網格內部邊界流量作為細網格模擬區之開放邊界條件。首先將粗網格淹水深度 d 乘上粗網格寬度 a 則可獲得通水斷面積；再將通水斷面積乘上通過此斷面之速度 U ，則可求得每一粗網格邊界上個別之流量 Q ，示意圖參見圖 3-4，粗細邊界流量可表示為：

$$Q = d \times a \times U \quad (3-36)$$

式中， Q 為單一粗網格之流量 [m^3/s]； d 為粗網格水深 [m]； a 為粗網格間距 [m]； U 為粗網格速度 [m/s]，即代表流動速度 u 或 v 。

細網格邊界之流量，是粗網格流量分配而得，若粗細網格解析度分別為 a 及 b ，一個粗網格的邊界上會涵蓋 (a/b) 個細網格邊界，示意圖如圖 3-5，以此圖為例 $(a/b)=5$ ，故將邊界單一粗網格之流量分配至 (a/b) 個細網格作為細網格計算之邊界條件，其分配權重關係為：

$$q_i = K_i \cdot Q \quad (i=1 \sim a/b) \quad (3-37)$$

式中， q_i 為分配予細網格之流量 [m^3/s]； K_i 為分配權重係數， $\sum K_i = 1$ ； a/b 為細網格之數目。

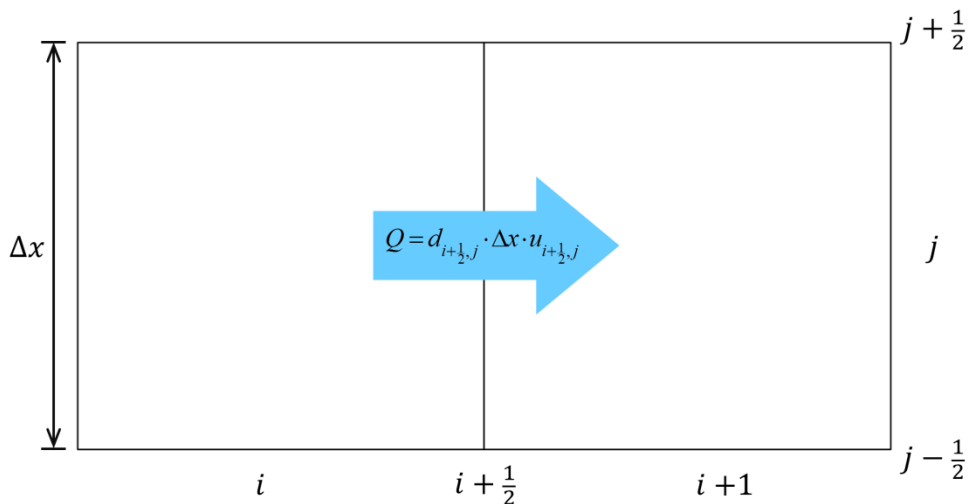




圖 3-4 網格邊界個別流量示意圖

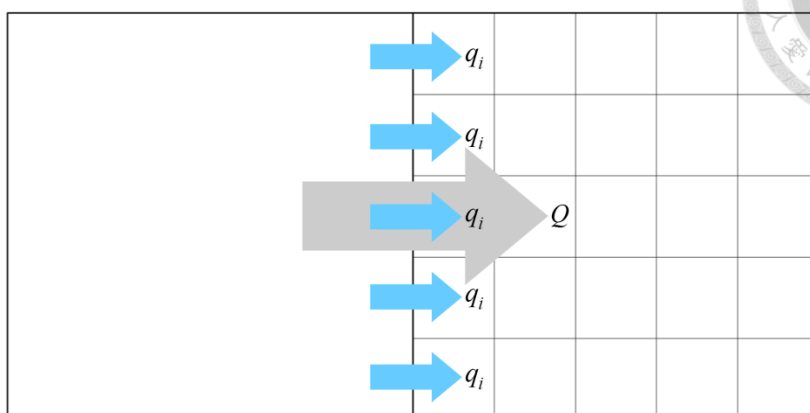


圖 3-5 網格流量分配示意圖

由於在粗網網格邊界上，單一粗網格對應之各細網格之地表高程不一致，通水斷面可能會不一致，如圖 3-6 所示，根據 Chan et al. (1999)提出之邊界處理方法，將粗細網格交界之二維通水斷面以接觸邊緣各細網格之間距比例和水深來處理邊界流量分配，因細網格間距為定值，故以水深作為分配權重參數，並考慮不同權重參數次方數之影響，共有四種流量分配法，如表 3-1 所列，分述如下：

表 3-1 流量分配法列表

分配權重係數 $K_i = \frac{d_i^w}{\sum_{i=1}^{(a/b)} d_i^w}$	w
等流量分配法	0
等流速分配法	1
Chezy 流速分配法	3/2
曼寧流速分配法	5/3

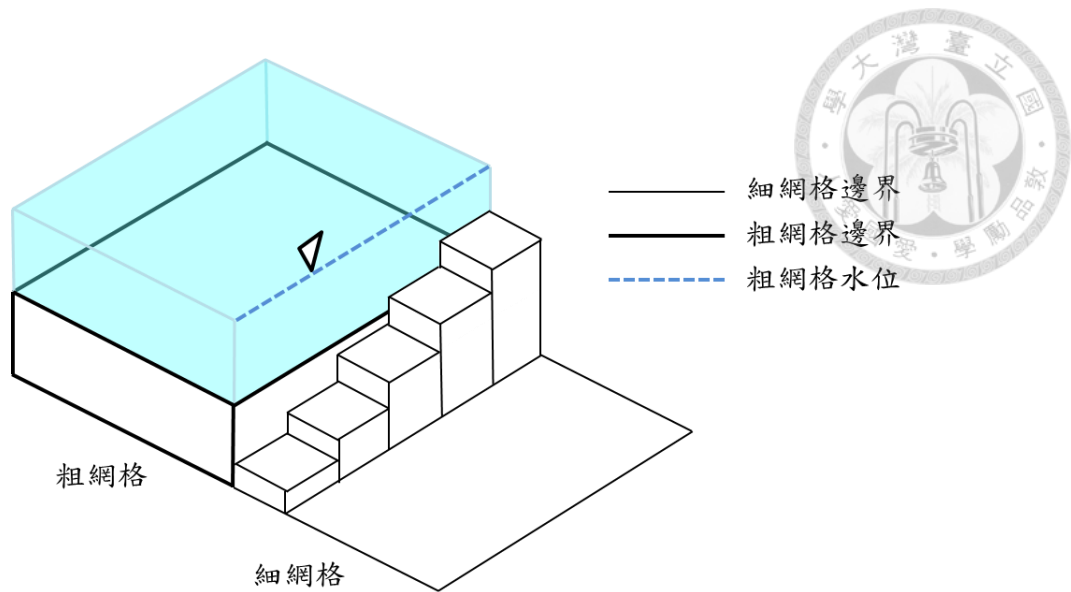


圖 3-6 粗細網格邊界斷面示意圖

1. 等流量分配法：

等流量分配法不考慮細網格間之特性，即細網格高程的差異，故進行流量分配時各細網格水深為相同水深，代表粗網格之通水斷面對應到細網格之通水斷面為相同流通斷面，故在邊界上流量對應關係為等分配，平均分配粗網格給予之入流量，故總入流量除上粗細網格之對應比例即為單一細網格所接受之邊界入流量，對應之各細網格之入流量加總後等於粗網格之入流量，分配權重係數為：

$$K_i = \frac{1}{(a/b)} \quad (3-38)$$

2. 等流速分配法

假設流通邊界前後之流速為定值，則流量與流通斷面積成正比關係，又因細網格間距為固定，故流量與細網格之水深成一次方正比關係，細網格水深為細網格水位高度減去細網格地表高程，細網格之地表高程為已知的地文資料，唯一未知數為細網格水位高度，因此可以求出細網格水位高程並推算出各個細網格的分配權重，再乘上粗網格給予的總流量即為單一細網格之分配流量，其分配權重係數為：



$$K_i = \frac{d_i}{\sum_{i=1}^{(a/b)} d_i} \quad (3-39)$$

式中， d_i 為細網格之水深[m]。

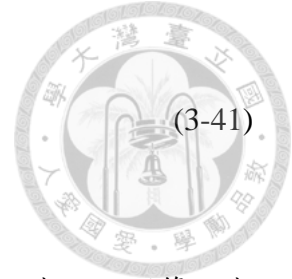
3. Chezy 流速分配法

假設流通邊界之流況為紊流，流動速度通過邊界時會改變，則流速假設可以用 Chezy 公式表示，其中速度與水深二分之一一次方成正比關係。流通斷面積又與水深成一次方正比關係，故流量與水深可以推算為二分之三次方正比關係，唯一未知數為細網格水位高度，由於關係式為非線性方程式無法直接求解，因此使用迭代法逼近求得近似解，求解後可以得到各個細網格的水深，水深的二分之三次方為分配權重，再乘上粗網格給予的總流量即為單一細網格之分配流量，其分配權重係數為：

$$K_i = \frac{d_i^{\frac{3}{2}}}{\sum_{i=1}^{(a/b)} d_i^{\frac{3}{2}}} \quad (3-40)$$

4. 曼寧流速分配法

假設流通邊界之流況為紊流，漫地流通過粗細網格邊界時，受到斷面積改變影響，流動速度會改變，則流速假設可以用曼寧公式表示，其中速度與水深三分之二次方成正比關係。流通斷面積又與水深成一次方正比關係，故流量與水深可以推算為三分之五次方正比關係，相同地流量公式中唯一未知數為細網格水位高度，由於關係式為非線性方程式無法直接求解，因此使用迭代法逼近求得近似解，求解後可以得到各個細網格的水深，以水深的三分之五次方除上所有細網格水深三分之五次方的總和為分配權重，再乘上粗網格給予的總流量即為單一細網格之分配流量，其分配權重係數為：



$$K_i = \frac{d_i^{\frac{5}{3}}}{\sum_{i=1}^{(a/b)} d_i^{\frac{5}{3}}} \quad (3-41)$$

依鄒亞達 (2009)之研究結果，等流速分配法在誤差的改善效率上及運算效率均為最佳之流量分配方式，故本文之粗細網格模擬皆以等流速分配法進行模擬分析。

3-2-3 乾河床處理

在分配網格邊界流量條件時，細網格的水深為分配權重的指標，其水深為粗網格水位減去細網格地表高程，流量分配方式中利用已知的地形高程資料去推算水位高度，再求得各個細網格的分配权重，但是當粗網格給予的流量過少以致於推算出之水位高度低於任一細網格之地表高程時，則該細網格的水深為零，即邊界條件之流量為零，為求得其他細網格之分配流量，須排除水深為零之細網格，並重新推算流量分配方式中的水位高度，以推算其他細網格之水深，上述關係如下：

$$\left. \begin{matrix} q_i = 0 \\ d_i = 0 \end{matrix} \right\} \text{ for } H < z_i \quad (3-42)$$

式中， H 為細網格之水位高[m]； z_i 為細網格之地表高程[m]。

3-3 平行演算模式之建立

平行演算法(parallel algorithm)為一種同步處理之數值演算方法，平行演算法將原程式計算架構切分成不同的計算程序，並將計算程序之任務分配交給不同的運算裝置(中央處理器或執行緒)同步進行運算。各處理器同時處理計算任務，待演算完畢後將運算結果合併，並透過同一平台傳遞結果，合作平行處理達到縮減演算時間增進演算效率之目的，以執行緒(thread)之平行計算方法為例，其方法如圖 3-7 所示。

平行演算法早期受限於電腦技術發展，需大型高速電腦或串接多台個人電腦才能進行，而隨著科技日新月異，近年電腦處理器普遍朝向多核心(multi-core)及多執行緒(multi-thread)發展，平行計算之研究也廣泛普及應用於各領域發展，舉凡硬體設計、程式語言發展、演算法及平行技術的應用，均有許多相關的研究發展。

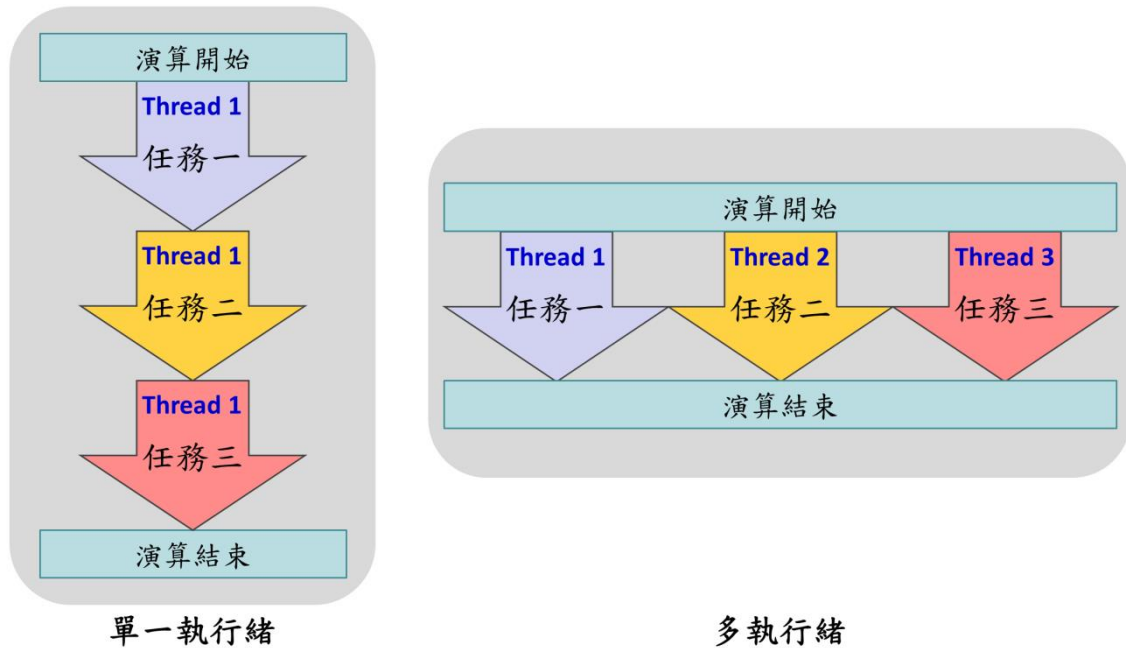


圖 3-7 平行處理架構示意圖

3-3-1 OpenMP (Open Multi-Processing)

目前平行演算法之訊息傳輸語言平台眾多，諸如 MPI、OpenMP、CUDA 等，各種平行演算平台各有其優勢，如 MPI 主要用於撰寫多電腦架構之平行程式，OpenMP 方便用於撰寫多核心處理器架構之平行程式等。都市淹水模式中主網格與多個細化網格之計算為 Fortran 程式不同迴圈下之計算流程，故本文使用 OpenMP 語法進行平行化演算架構之撰寫，以多核心多執行緒進行模擬計算。OpenMP 目前官方支援的程式語言包括 C 語言、C++ 以及 Fortran 語言，其提供了平行演算法高層之抽象敘述，並在各平行演算銜接之處加入通信以及同步互斥。在進行平行化之程式撰寫時，可在原始程式中加入原始程式是否進行平行化計算編譯之定向資料，若在設定中選擇忽略定向資料或當編譯器不支持 openMP 語法時，程式又可讀

取為通常之程序，程式碼仍可以正常非平行化之序列方式執行，僅不能利用多執行緒平行化加速程序演算。也就是 OpenMP 使用了特殊之敘述或註解來引導編譯器將程式特定之區塊轉為平行處理，不須重新撰寫程式本身之架構即可修改建置出平行化之程式。

3-3-2 平行演算法於多重尺度網格方法

在局部細化淹水模擬當中，模式中粗、細網格演算流程必須互相配合，如圖 3-8，模式在每一時距的計算中，必須等待粗網格與所有局部細化模擬區域循序演算完畢後才能進行下一時距之演算，因此當局部細化網格區域越多，則需更多之等待時間，累積下來將會耗費更多之演算時間。本文以平行演算法進行粗網格及不同局部細化網格之同時計算，如此模式不會因局部細化區域增加而耗費更多演算時間，降低運算效率。

本文將都市淹水模式之程式碼，利用 OpenMP 語法修改成平行化，以多核心處理器進行粗細網格之平行同步演算，其平行化流程如圖 3-9 所示。



圖 3-8 多重尺度法局部細化架構示意圖

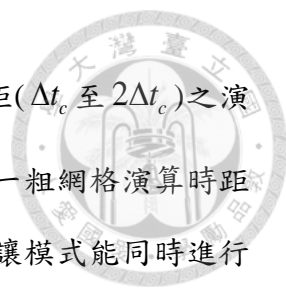


圖 3-9 平行處理修改研究流程圖

首先，在平行演算架構中，要將所有平行化之計算分配到不同記憶體及處理器，因此需先針對程式本身進行獨立化修正，將程式中之變數獨立化，讓程式變數符合平行演算之需求。

完成變數之平行化架構後，再以 openMP 語法進行局部細化網格平行化之修改，如圖 3-10 所示。程式架構以粗網格先獨立進行第一時距演算後，將演算結果輸出給局部細化網格作為邊界條件，再讓多區局部細化網格進行同步之平行演算。待局部細化網格第一時距平行演算完畢後，粗網格再獨立進行第二時距之演算，演算結果再交由局部細化網格平行演算，以此類推至模擬演算結束。

完成局部細化網格區域平行演算後，再進一步建置不同尺度粗、細網格演算之平行化。因局部細化網格之邊界條件須由粗網格所提供，因此要建立粗、細網格之間之平行演算，粗網格與局部細化網格需以不同演算時距(time step)進行同步化，如圖 3-11 所示，也就是在模式的架構中，當粗網格先進行第一時距 Δt_c 之演算後，局部細化網格可由粗網格之計算結果得到銜接之邊界條件，在細化網格進行



第一時距(0 至 Δt_c)演算的同時，粗網格也能繼續進行第二時距(Δt_c 至 $2\Delta t_c$)之演算。即兩種尺度演算相差一個粗網格時距，細網格皆為進行前一粗網格演算時距之演算。利用粗網格與局部細化網格之一個粗網格時距差，可讓模式能同時進行粗、細網格之平行演算，都市淹水模式整體計算流程如圖 3-12。

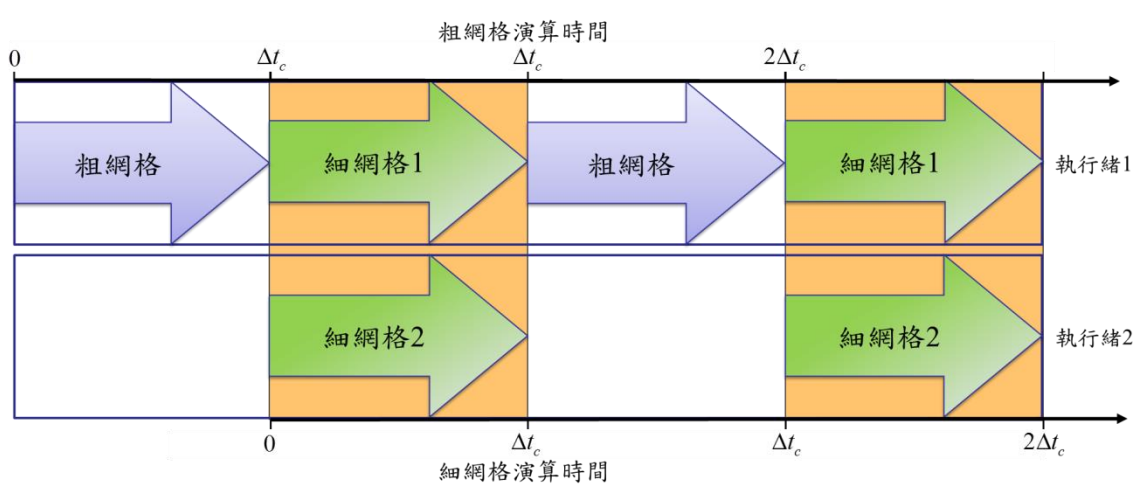


圖 3-10 局部細化網格平行演算架構示意圖

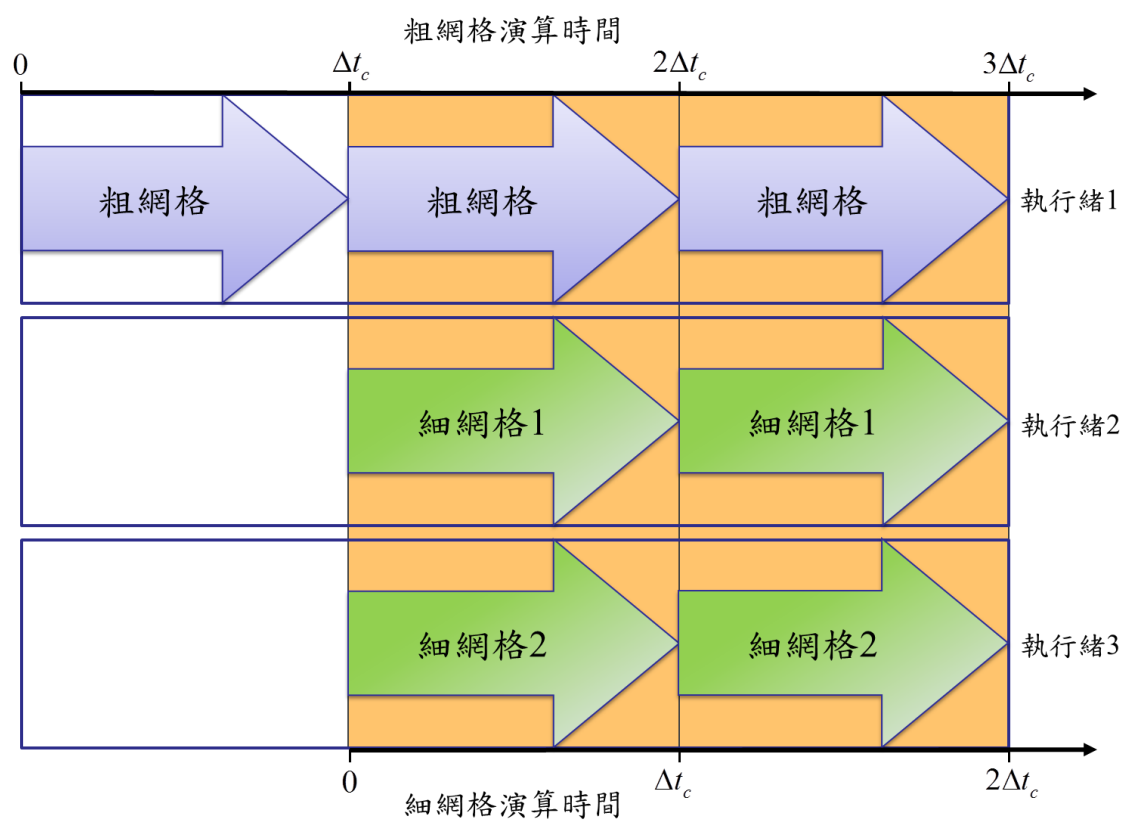


圖 3-11 粗細網格平行演算架構示意圖

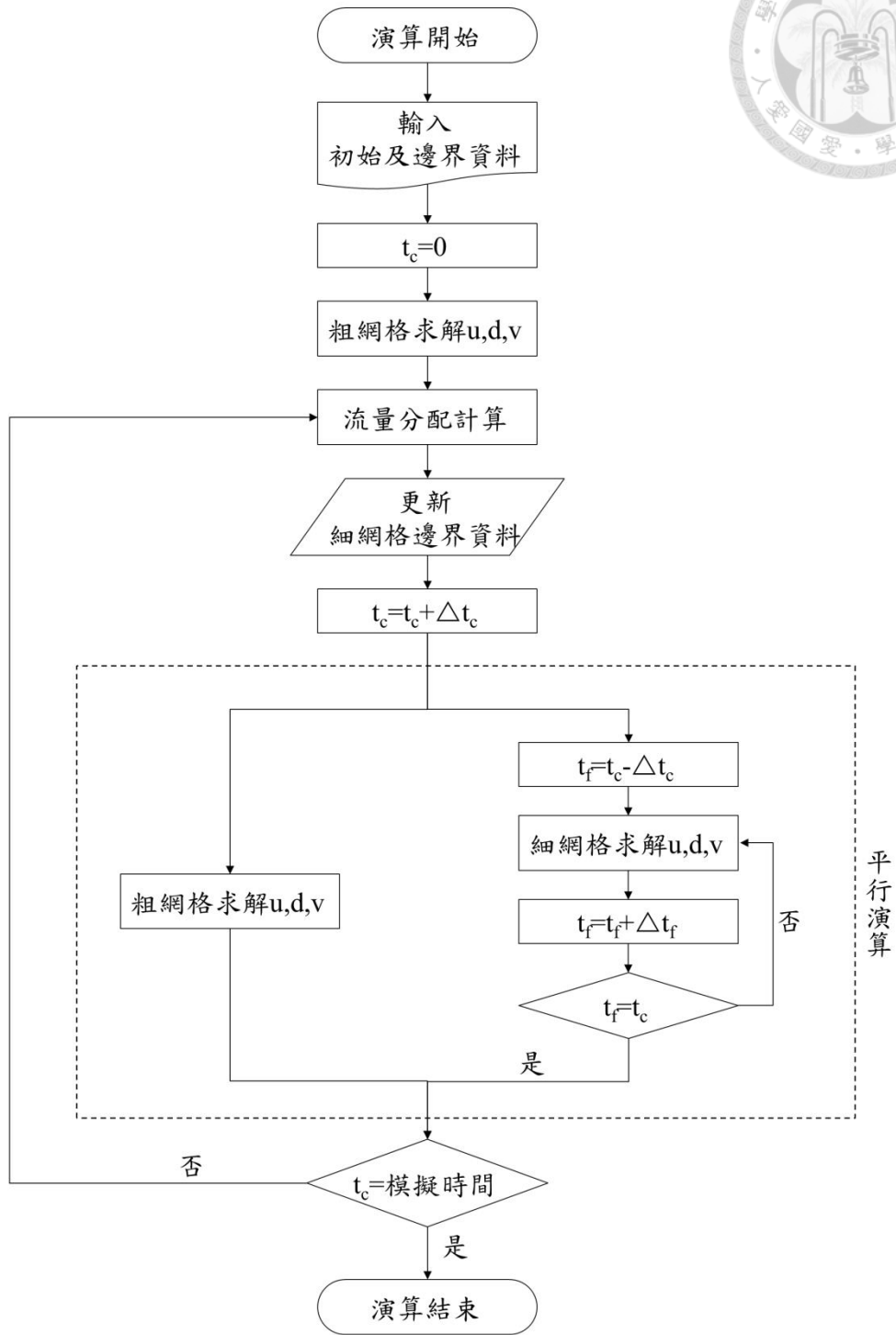


圖 3-12 都市淹水模式演算流程圖

第四章 模式之檢定與驗證



4-1 理想案例

本文建立一個正方型理想流場，理想流場為一個寬度 10 公里的正方形區域，切割為 40 公尺×40 公尺的網格共 62,500 個網格，最左上角及最左下角網格高程設定為 5 公尺，其高程自該格起算以坡度 0.001 往向右遞增至高程 14.96 公尺，並以同樣坡度往中央遞減，左方中央最低處高程為 0.04 公尺，其地形高程圖如圖 3-1 所示，可看出左半部有一塊三角形低地居中，右半部的上方與下方為地勢較高的地區，為一上下對稱之地形。所使用之雨量資料為 24 小時均勻降雨之設計雨型，其每小時降雨強度均為 10mm/hr，地表曼寧糙度值則統一設定為 0.13。

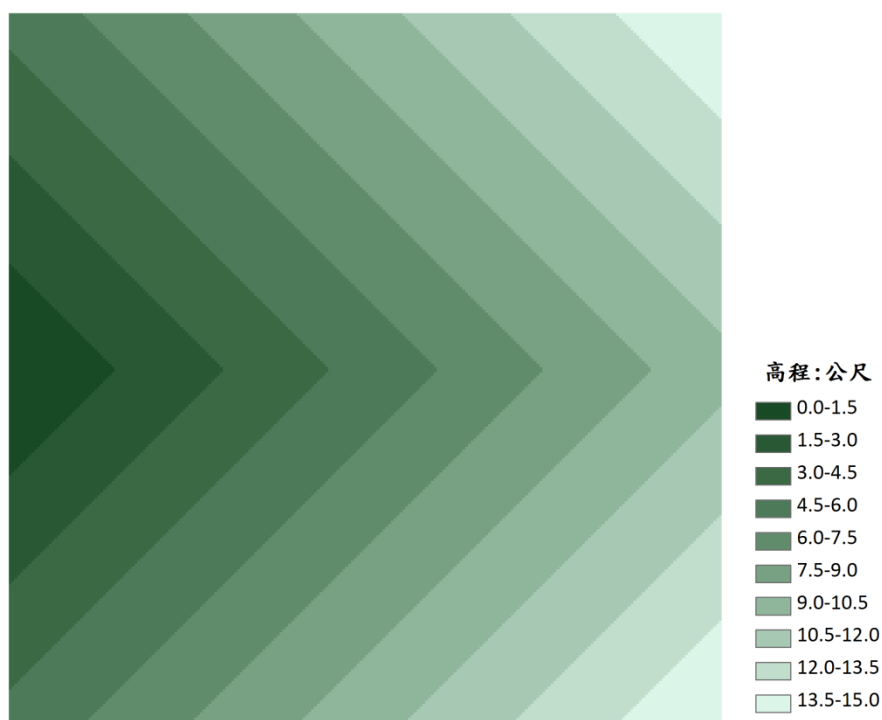


圖 4-1 理想案例地形

4-1-1 建蔽率檢定

本文為探討建物對都市水流之影響，於理想流場中分別以實際建物之地形與模式中設定建蔽率之概念進行模擬，其中實際建物之地形乃利用設定網格高程來表示建物，如於一方型 5×5 之 25 個 40 公尺網格中將其中 1、4、9 及 16 個網格設

定為 30 公尺來代表建物，其網格設定如圖 4-2，則 200 公尺網格之相對建蔽率為 0.04、0.16、0.36 及 0.64，以此設定所建置之理想案例一，地表高程如圖 4-3 所示。

為進行都市淹水模式中建蔽率設定之檢定工作，理想案例二將理想案例之每個 40 公尺網格建蔽率設定為 0.04、0.16、0.36 及 0.64，與案例一實際建物地形之模擬結果進行比對，但以建蔽率設定之網格建物為每一個 40 公尺網格中均有同樣之建蔽率，其示意如圖 4-4，由圖中可看出此設定為各個 40 公尺網格中有獨立之建蔽率，雖與案例一之建蔽率為一致，但其建物分布不盡相同。

理想案例三則以 200 公尺網格進行建蔽率之設定，並同樣與案例一之模擬結果進行比對分析，本文將理想流場之 40 公尺間距之高程資料統計平均後，得到 200 公尺之高程資料，其中 200 公尺網格之高程資料為 25 個 40 公尺網格之算數平均值，其地形如圖 4-5，理想案例三中模擬區共包含 2,500 個計算網格，其 200 公尺網格於模式中各設定建蔽率 0.04、0.16、0.36 及 0.64，如圖 4-6，由圖中可看出 200 公尺網格建蔽率之設定與案例一之設定較接近，但因網格解析度而無法呈現較精細的地表高程變化。

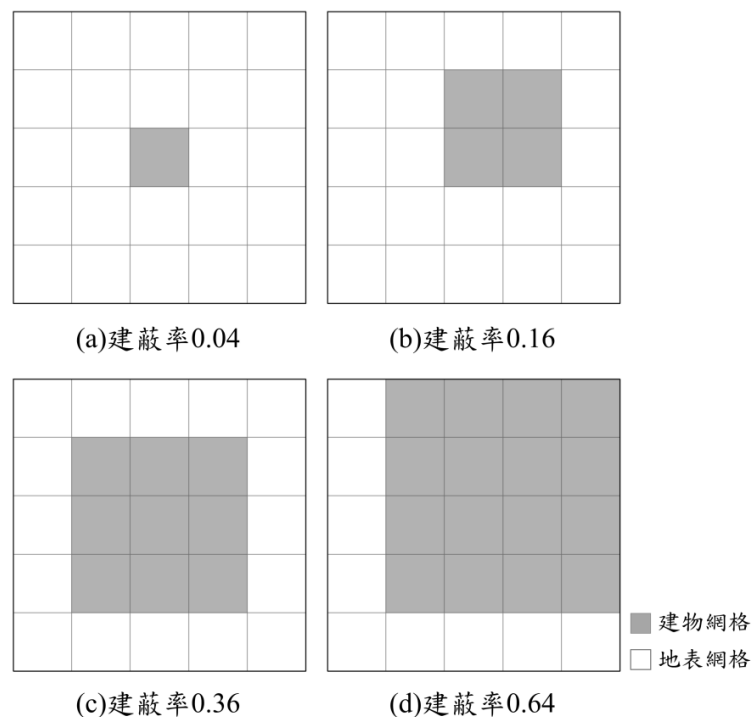
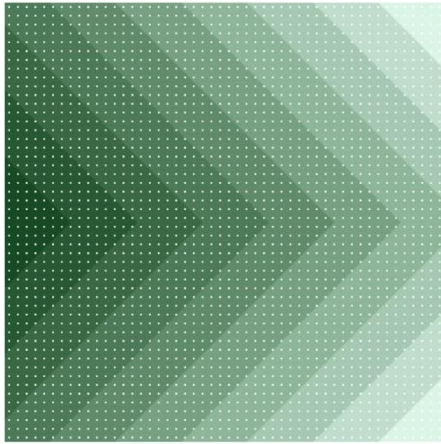
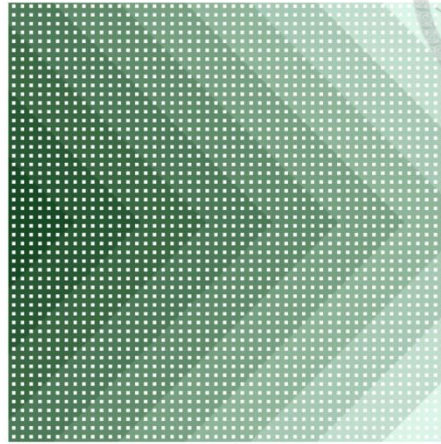


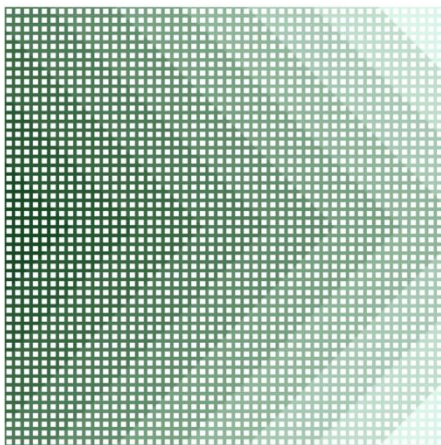
圖 4-2 理想案例一之網格設定



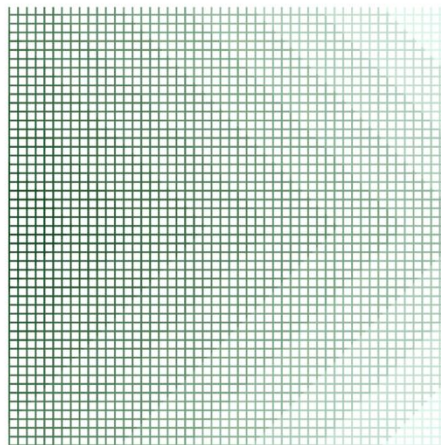
(a)建蔽率0.04



(b)建蔽率0.16



(c)建蔽率0.36



(d)建蔽率0.64

高程:公尺

- 0.0-1.5
- 1.5-3.0
- 3.0-4.5
- 4.5-6.0
- 6.0-7.5
- 7.5-9.0
- 9.0-10.5
- 10.5-12.0
- 12.0-13.5
- 13.5-15.0

圖 4-3 理想案例一各建蔽率之地形



圖 4-4 理想案例二之建蔽率網格設定

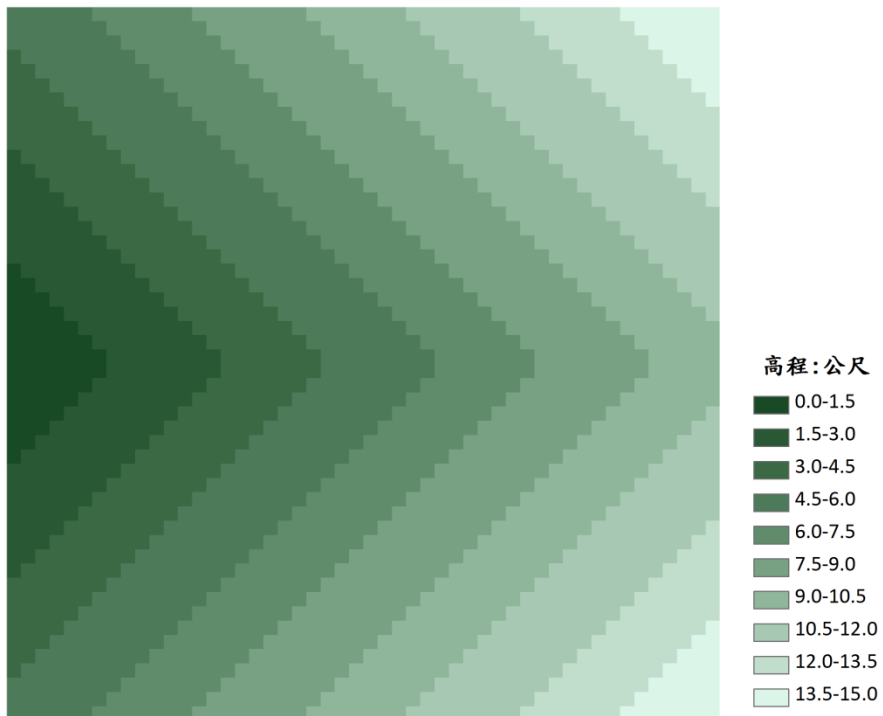


圖 4-5 理想案例三地形

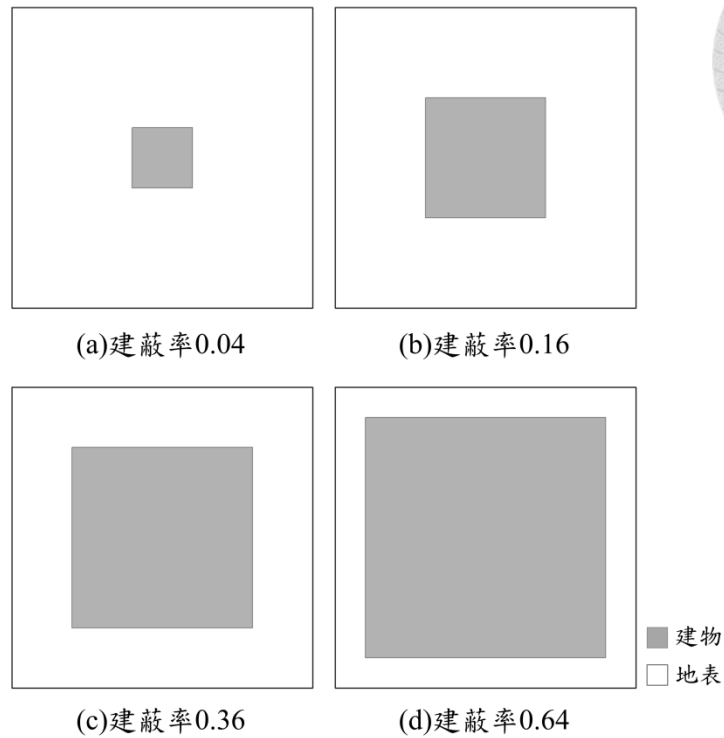


圖 4-6 理想案例三之建蔽率網格設定

模擬結果如圖 4-7 至圖 4-18 所示，可看出在理想案例一之模擬結果中，降雨造成之地表逕流於非建物之網格間流動，故水深只出現在非建物之網格上，而以建蔽率設定進行模擬之結果，理想案例二之各建蔽率模擬結果也同樣能呈現建物對地表水流的影响，其模擬結果與理想案例一，在整體淹水深及範圍均相當一致，而理想案例三由於網格解析度較大，其呈現之淹水模擬結果與理想案例一雖有些微差異，但整體來說仍能反應模式中建蔽率設定對地表淹水的影响。

為進一步進行模式準確度之檢定分析，本文以三個不同案例之模擬結果，採用均方根誤差 $RMSE$ (Root-Mean-Squared Error) 與 R^2 (相關係數平方值) 做為評比指標，藉由各案例網格互相重合之位置，經由統計方法，以理想案例一之模擬淹水深當作基準，分析理想案例二及理想案例三於同一網格點淹水深之差異，探討局部細化網格之準確性，其公式如下：

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (d_1 - d_f)^2}{N}} \quad (4-1)$$



$$R^2 = \frac{\left[N \cdot \sum_1^N (d_1 \cdot d_f) - \sum_1^N d_1 \cdot \sum_1^N d_f \right]^2}{\left[N \cdot \sum_1^N d_1^2 - \left(\sum_1^N d_1 \right)^2 \right] \cdot \left[N \cdot \sum_1^N d_f^2 - \left(\sum_1^N d_f \right)^2 \right]} \quad (4-2)$$

式中， d_1 為理想案例一網格點淹水深[m]； d_f 為理想案例二及理想案例三網格點淹水深[m]； N 為網格點數目。

一般而言，可藉由 *RMSE* 之數值進而瞭解不同案例間相同網格點淹水深值之離散程度。*RMSE* 值愈小代表局部細化網格模擬結果之離散程度愈小，也愈接近理想案例一之演算結果，其結果亦較佳。而 R^2 之數值顯示上述兩個變數之間線性關係的強度和方向，在統計學中，相關係數的意義是用來衡量兩個變數相對於其相互獨立的距離，若定義相關係數為以一變數預測另一變數之能力，則 R^2 可定義為預測能力之測度值，介於 0 與 1 之間，若 R^2 愈接近 1 時，表示預測能力愈可信。

在進行 *RMSE* 及 R^2 之統計分析時，理想案例二與理想案例一之網格完全一致，但因理想案例一中部份網格為建物，故只進行針對非建物網格點進行計算；而理想案例三之網格為 200 公尺網格解析度，其中包含 25 個 40 公尺網格，故進行分析時，是以理想案例三之 200 公尺網格單一水深值與理想案例一之多個非建物網格進行計算，以建蔽率 0.64 為例，理想案例三之某一網格水深，是與其完全重合之 25 個理想案例一的網格中，其中 9 個非建物網格之水深進行計算。

理想案例二各建蔽率之均方根誤差分析如表 4-1，由結果可看出在建蔽率 0.04 時，隨著模擬時間有增大的趨勢，各小時之均方根誤差最大只有 0.042 公尺，而建蔽率逐漸增大後，可看出誤差有增加的現象，其中建蔽率 0.64 在第 24 小時之均方根誤差 0.187 為整體之最大值；理想案例二之各建蔽率相關係數平方值如表 4-2，由表中可看出，只有建蔽率 0.16 及 0.36 在第 6 小時的 R^2 稍低，其餘各時間及各建蔽率的模擬結果，均與理想案例一呈現相當高的相關性，表示以 40 公尺的網格程現建物，其模擬結果與實際流況趨勢相當吻合。

理想案例三之均方根誤差分析及相關係數平方值如表 4-3 及表 4-4 所示，整體而言與理想案例二有同樣的趨勢，均方根誤差隨模擬時間增大，因網格解析度的影響，整體誤差均較理想案例二稍大，但仍維持一定的準確度，在相關性分析結果上，除第 6 小時相關係數較低，整體相關性亦相當良好，可見以較大的網格設定建蔽率進行模擬，都市淹水模式亦能反應出建物對地表淹水的影響。

表 4-1 理想案例二均方根誤差(單位:公尺)

建蔽率	6hr	12hr	18hr	24hr	各建蔽率 平均
0.04	0.011	0.027	0.042	0.036	0.029
0.16	0.028	0.093	0.129	0.108	0.090
0.36	0.057	0.153	0.160	0.134	0.126
0.64	0.084	0.125	0.124	0.187	0.130
小時平均	0.024	0.084	0.134	0.137	總平均 0.094

表 4-2 理想案例二相關係數平方值

建蔽率	6hr	12hr	18hr	24hr	各建蔽率 平均
0.04	0.89	0.98	0.99	0.99	0.96
0.16	0.68	0.89	0.95	0.98	0.87
0.36	0.67	0.87	0.96	0.98	0.87
0.64	0.85	0.97	0.97	0.96	0.94
小時平均	0.77	0.93	0.97	0.98	總平均 0.91

表 4-3 理想案例三均方根誤差(單位:公尺)

建蔽率	6hr	12hr	18hr	24hr	各建蔽率 平均
0.04	0.022	0.035	0.051	0.051	0.040
0.16	0.034	0.104	0.145	0.126	0.102
0.36	0.079	0.231	0.256	0.222	0.197
0.64	0.191	0.342	0.307	0.265	0.276
小時平均	0.082	0.176	0.185	0.169	總平均 0.154

表 4-4 理想案例三相關係數平方值

建蔽率	6hr	12hr	18hr	24hr	各建蔽率 平均
0.04	0.65	0.96	0.98	0.99	0.90
0.16	0.56	0.85	0.93	0.97	0.83
0.36	0.52	0.74	0.88	0.94	0.77
0.64	0.56	0.83	0.94	0.96	0.82
小時平均	0.57	0.84	0.93	0.97	總平均 0.83

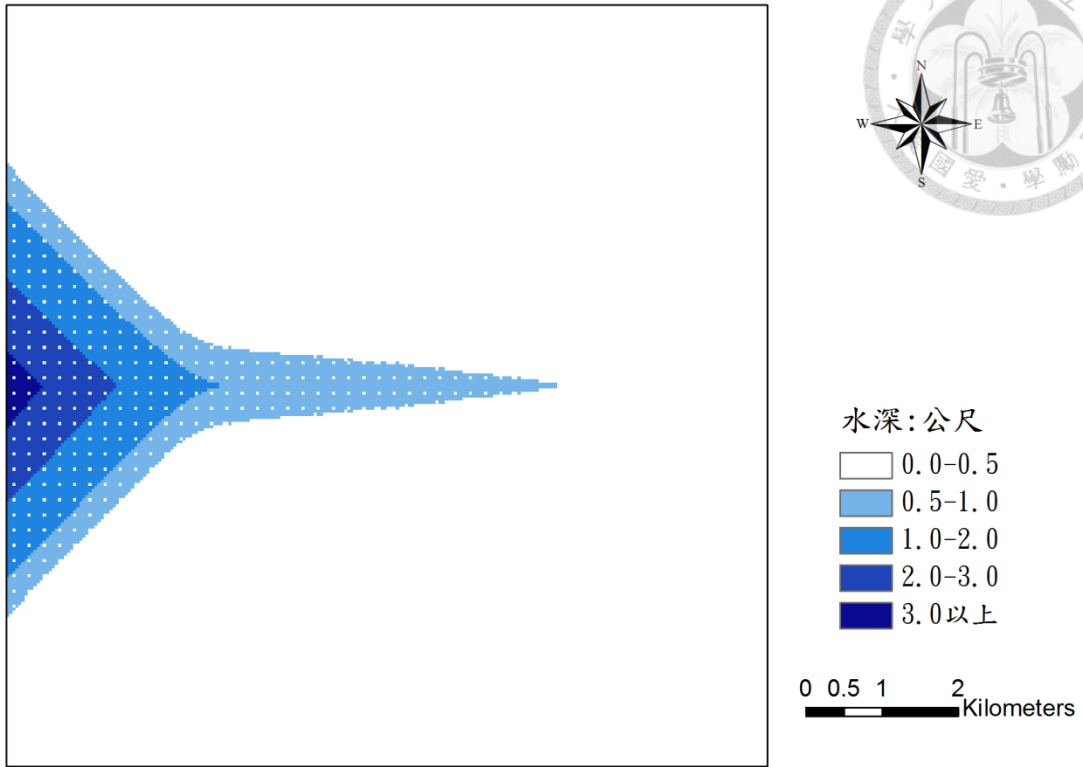


圖 4-7 理想案例一第 24 小時淹水深(相對建蔽率 0.04)

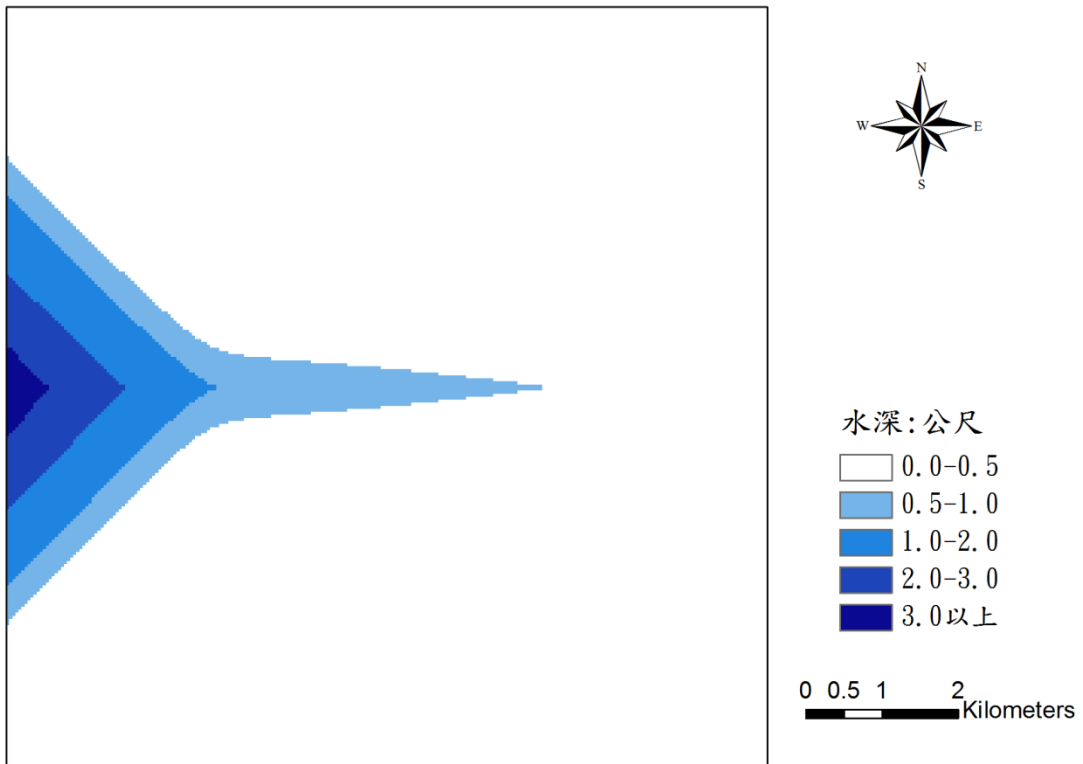


圖 4-8 理想案例二第 24 小時淹水深(建蔽率 0.04)

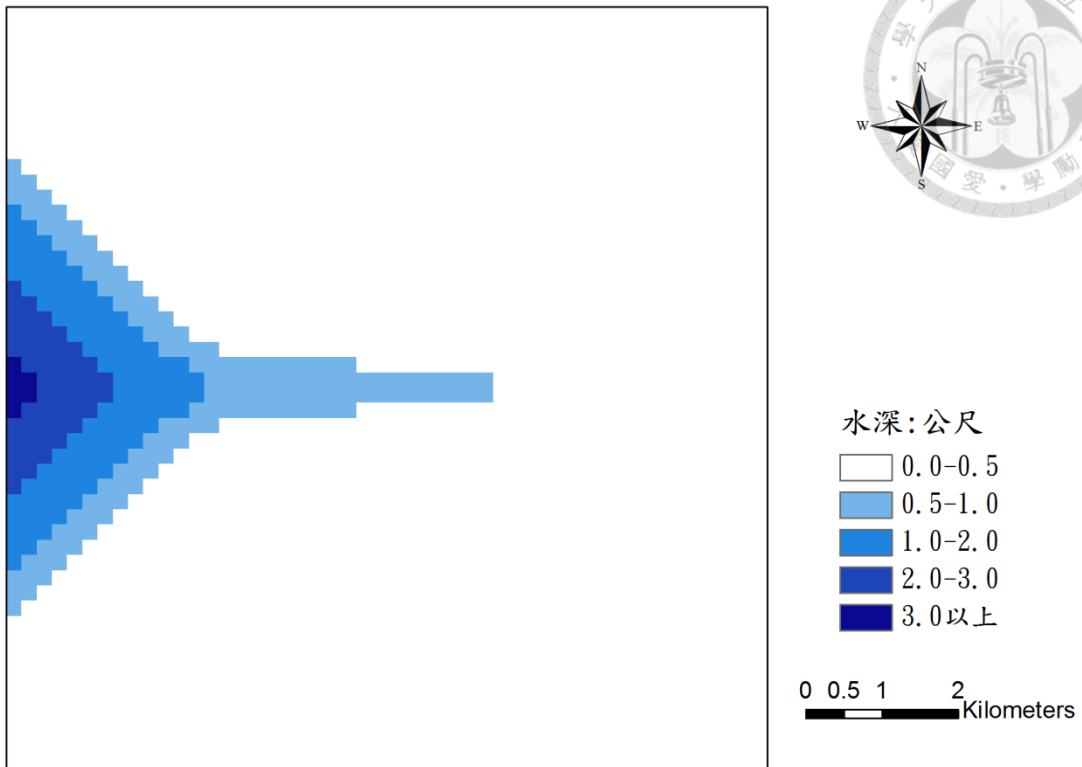


圖 4-9 理想案例三第 24 小時淹水深(建蔽率 0.04)

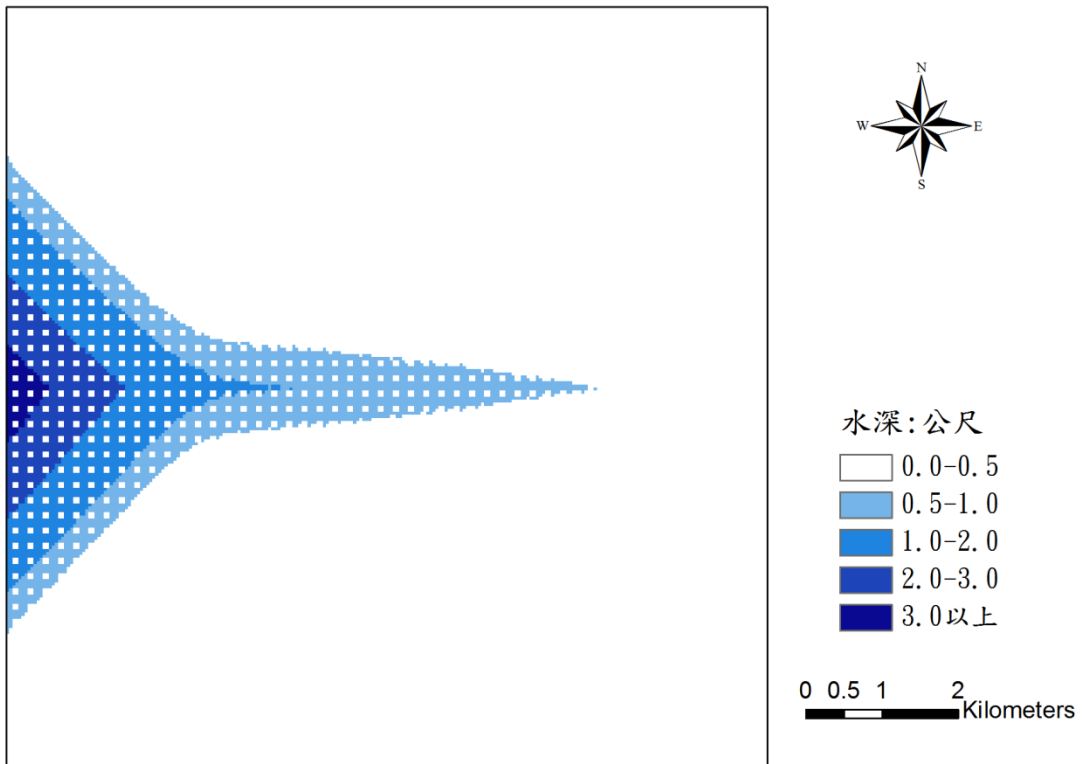


圖 4-10 理想案例一第 24 小時淹水深(相對建蔽率 0.16)

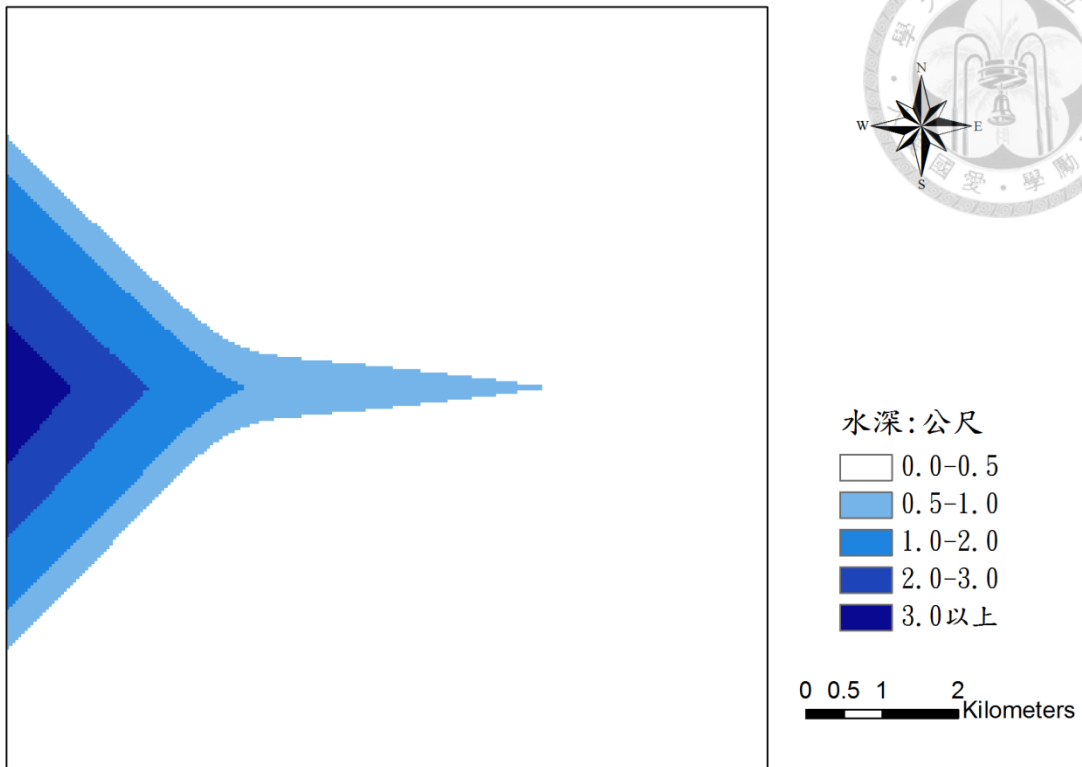


圖 4-11 理想案例二第 24 小時淹水深(建蔽率 0.16)

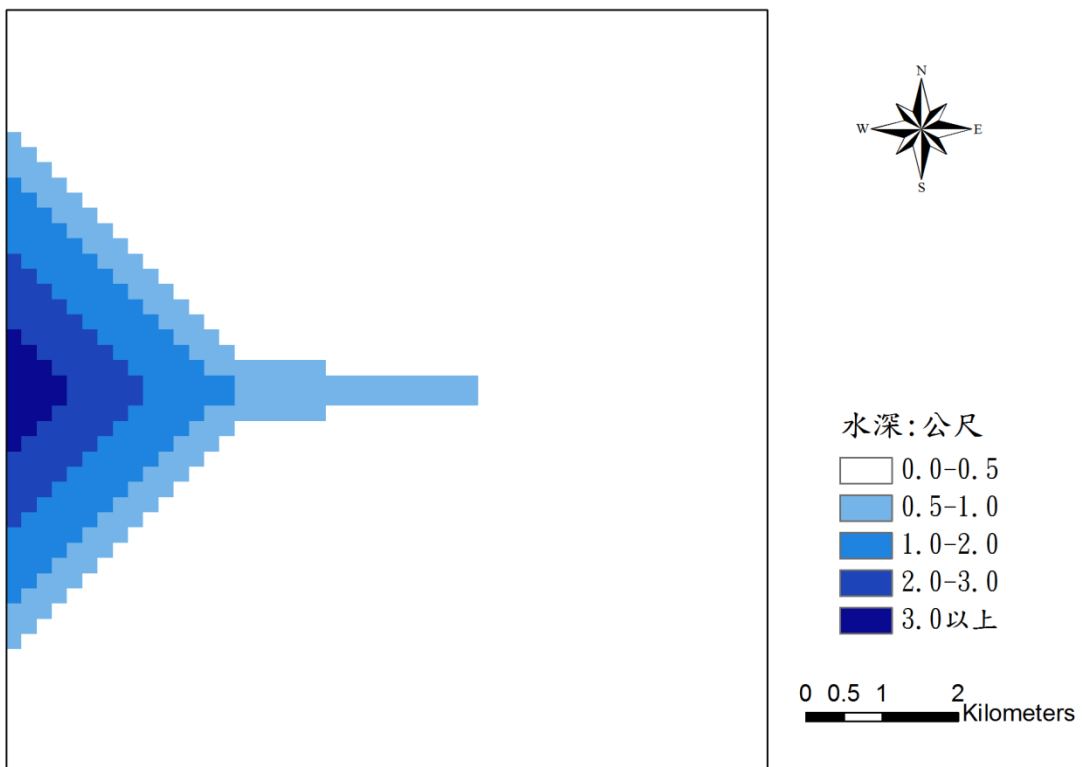


圖 4-12 理想案例三第 24 小時淹水深(建蔽率 0.16)

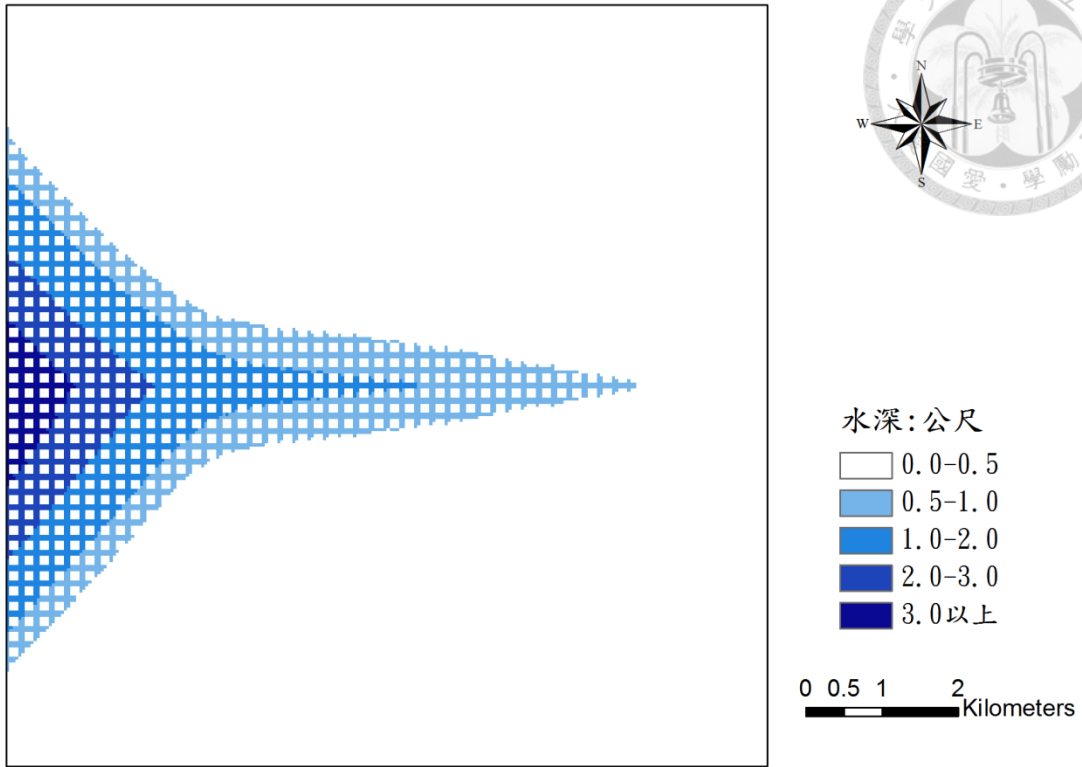


圖 4-13 理想案例一第 24 小時淹水深(相對建蔽率 0.36)

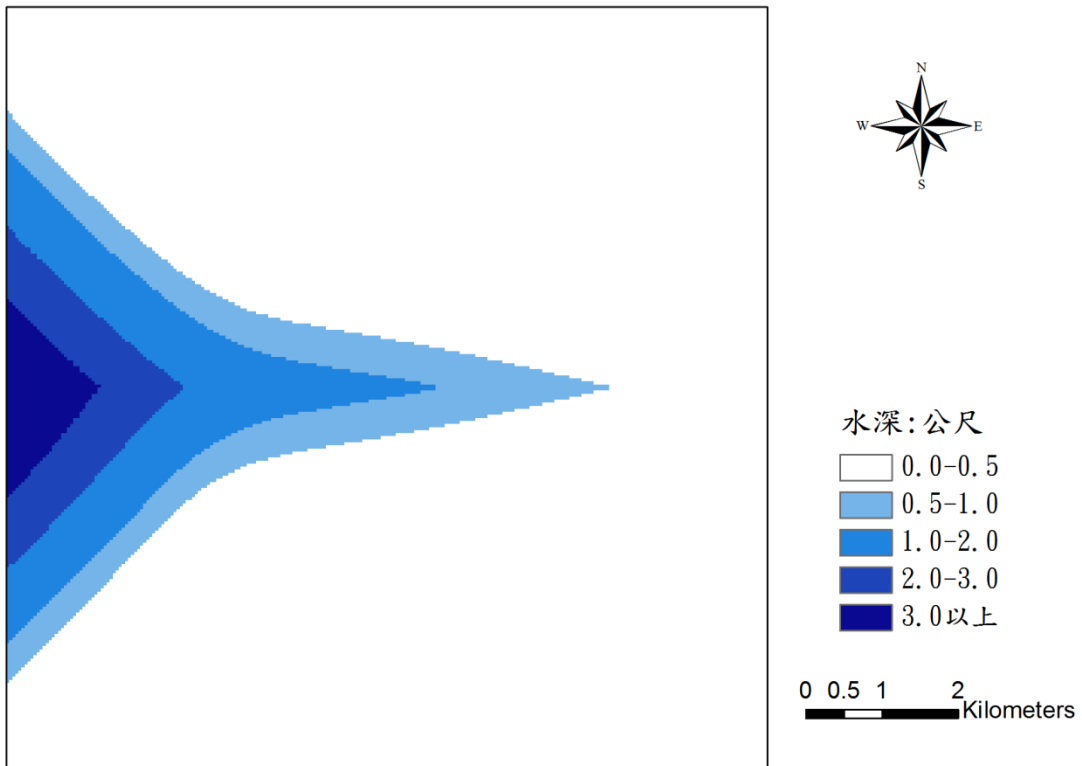


圖 4-14 理想案例二第 24 小時淹水深(建蔽率 0.36)

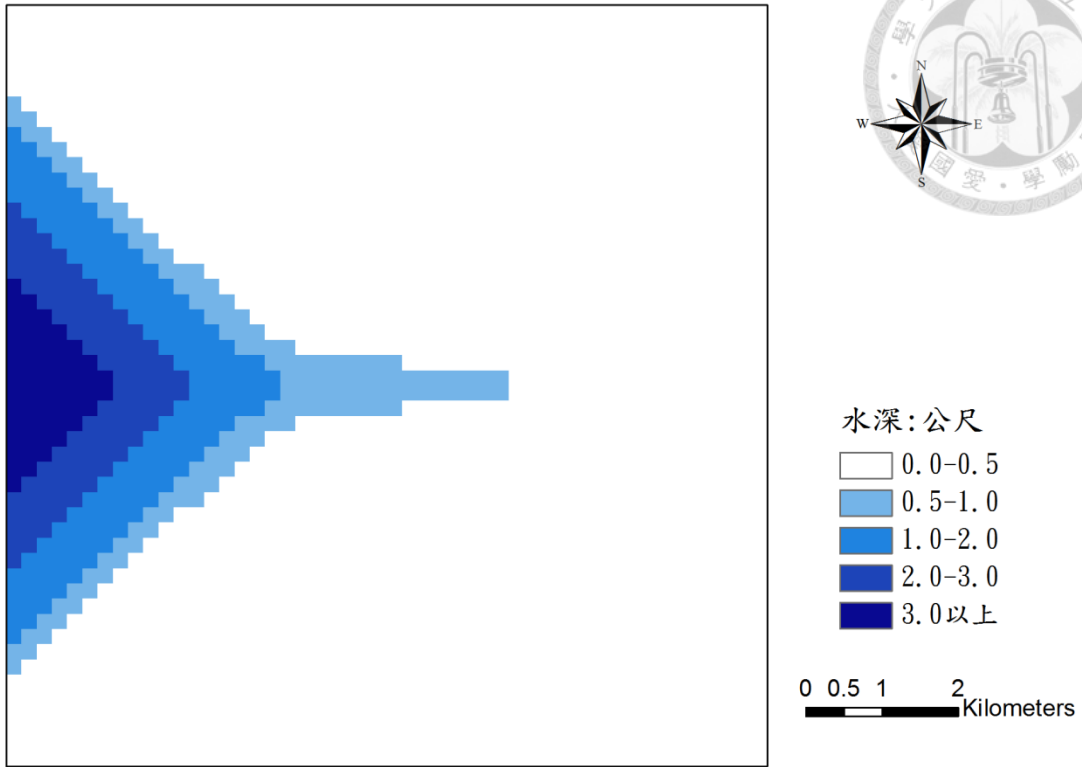


圖 4-15 理想案例三第 24 小時淹水深(建蔽率 0.36)

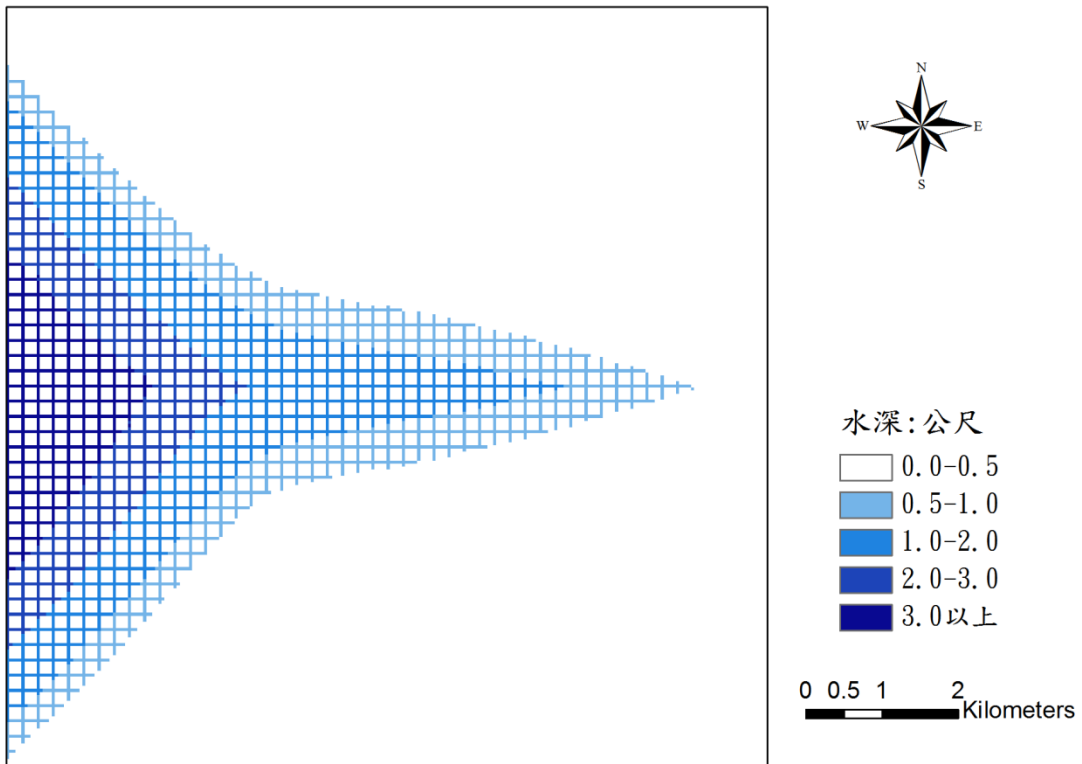


圖 4-16 理想案例一第 24 小時淹水深(相對建蔽率 0.64)

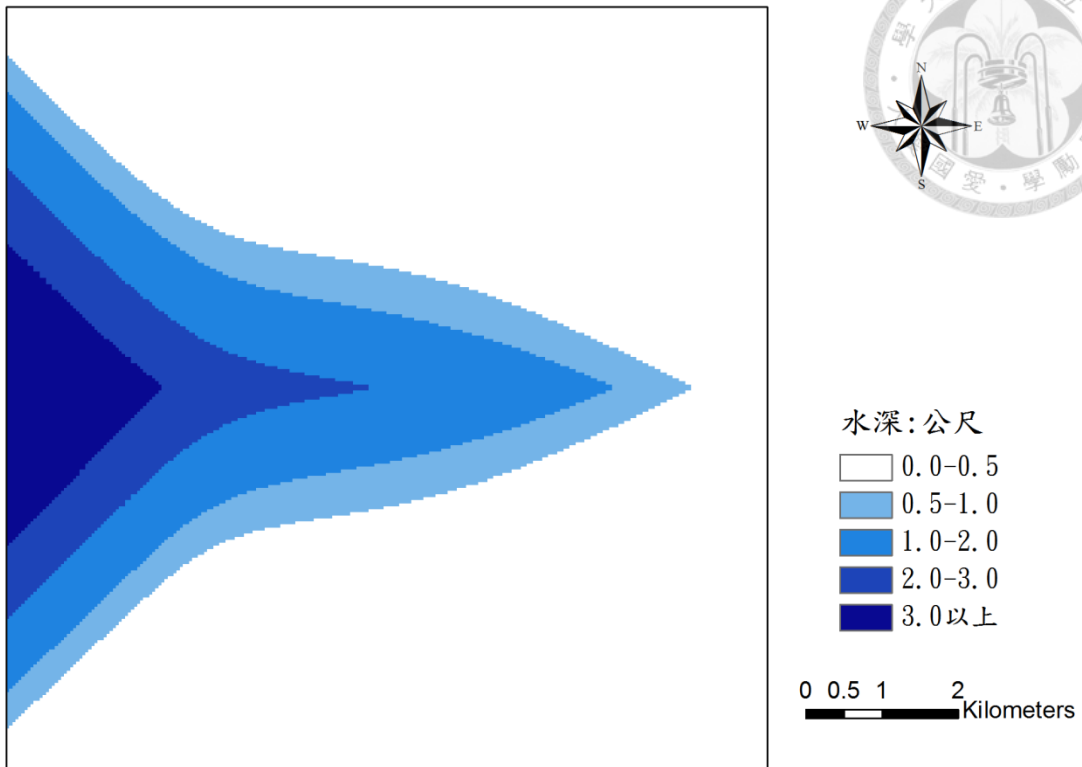


圖 4-17 理想案例二第 24 小時淹水深(建蔽率 0.64)

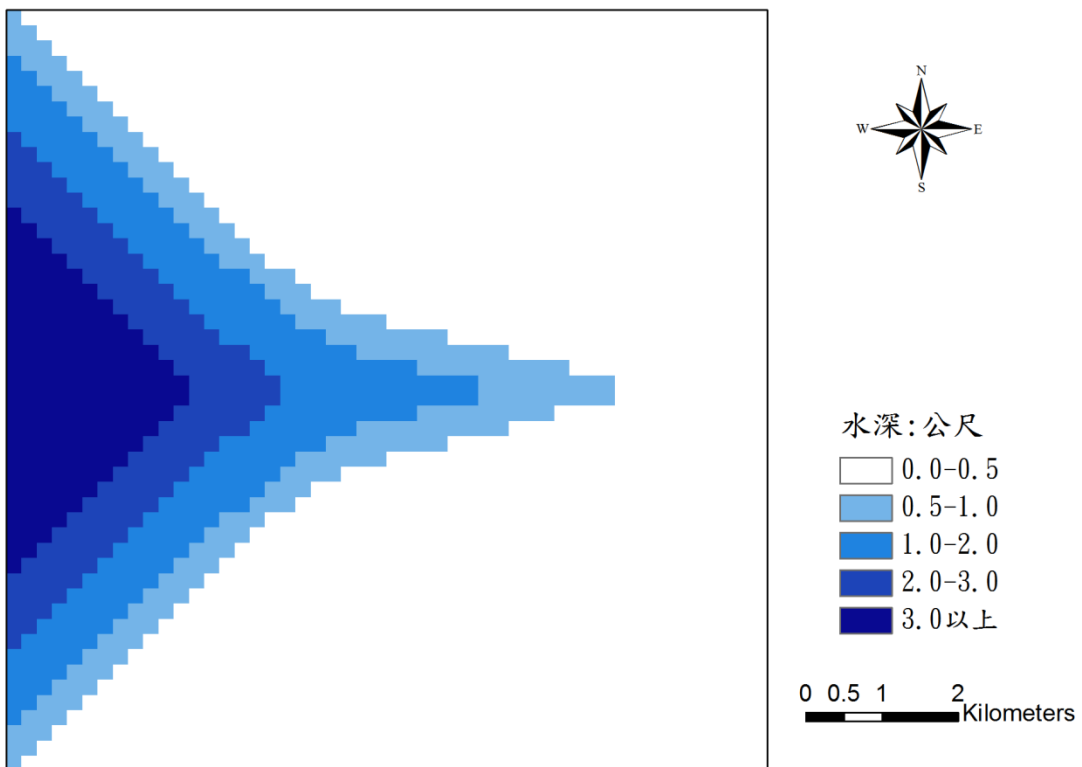


圖 4-18 理想案例三第 24 小時淹水深(建蔽率 0.64)



4-1-2 粗細網格檢定

本文以理想流場之 40 公尺網格及 200 公尺網格兩種不同解析度之網格進行粗細網格模擬之檢定，粗網格模擬區解析度 200 公尺× 200 公尺共 2,500 個計算網格，而局部細化模擬區解析度 40 公尺× 40 公尺共有兩區，為 2 公里×2 公里的正方形區域，第一區位於左半部三角形低地中央，第二區位於第一區正下方 400 公尺處，各為 2,500 個計算網格，細網格共 5,000 個計算網格，相關位置如圖 4-19 所示。在建蔽率的設定上，總共設定七種不同建蔽率，分別為 0.04、0.09、0.16、0.25、0.36、0.49 及 0.64，其中粗細網格均於兩個細化分區的網格上設定不同的建蔽率進行模擬，本文為進行粗細網格計算之檢定，同時以全區 40 公尺細網格之網格進行模擬比較，全區細網格共 62,500 個計算網格，全區細網格之建蔽率設定，也同樣於兩個細化分區的 2,500 個網格上進行相同建蔽率之設定。

全區細網格及粗細網格局部細化分區之模擬結果繪製如圖 4-20 至圖 4-26，圖中左方為全區細網格之淹水模擬結果，右上方為局部細化分區 1 之全區細網格與粗細網格細化分區之水深圖，右下方則為局部細化分區 2 之全區細網格與粗細網格細化分區之水深圖。由各建蔽率之模擬結果可看出，粗細網格局部細化分區所模擬之淹水深與全區細網格之結果相當吻合，表 4-5 為細化分區 1 之均方根誤差分析結果，整體之誤差值都非當小，僅在建蔽率 0.49 及 0.64 第 24 小時才出現較大的誤差值 0.15 及 0.23，表 4-7 為細化分區 2 之均方根誤差分析結果，可看出細化分區 2 與全區細網格之誤差非常的小，最大僅有 0.06 公尺的誤差，表 4-6 及表 4-8 為細化分區 1 及細化分區 2 之相關係數平方值統計，由統計結果可看出粗細網格局部細化分區之模擬結果與全區細網格相關性非常高，即時在細化分區 1 出現稍大均方根誤差值的時段， R^2 仍能保持 0.98 及 0.97 之高度相關性。由上述結果可知，細化分區之淹水深和全區細網格的結果雖有些許的誤差，但整體卻呈現相當一致的相關性，故以粗細網格進行建物效應之淹水模擬，已可適當呈現局部細化區域之流況。

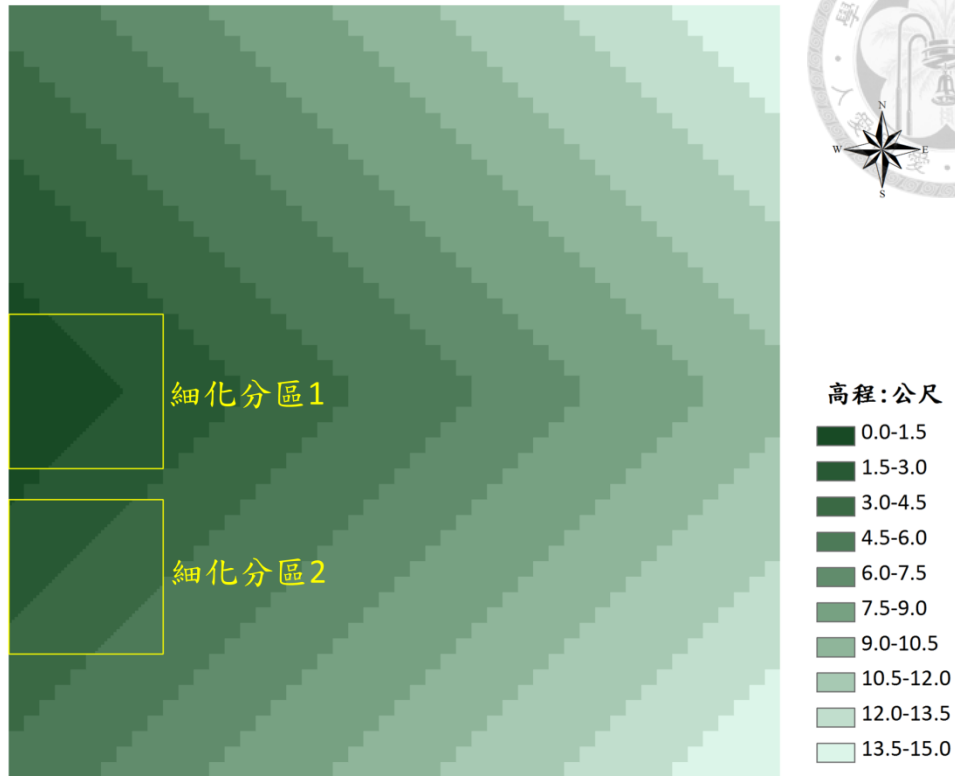


圖 4-19 理想案例粗細網格地形

表 4-5 理想案例粗細網格局部細化分區 1 均方根誤差(單位:公尺)

建蔽率	6hr	12hr	18hr	24hr	各建蔽率 平均
0.04	0.006	0.008	0.006	0.025	0.011
0.09	0.007	0.008	0.008	0.028	0.013
0.16	0.007	0.009	0.010	0.030	0.014
0.25	0.010	0.014	0.014	0.038	0.019
0.36	0.022	0.028	0.027	0.066	0.036
0.49	0.052	0.053	0.053	0.152	0.078
0.64	0.090	0.098	0.089	0.233	0.128
小時平均	0.028	0.031	0.030	0.082	總平均 0.043

表 4-6 理想案例粗細網格局部細化分區 1 相關係數平方值

建蔽率	6hr	12hr	18hr	24hr	各建蔽率 平均
0.04	0.97	0.98	0.99	0.99	0.98
0.09	0.97	0.98	0.99	0.99	0.98
0.16	0.97	0.98	0.99	0.99	0.98
0.25	0.97	0.98	0.99	0.99	0.98
0.36	0.97	0.98	0.99	0.99	0.98
0.49	0.95	0.96	0.97	0.98	0.97
0.64	0.95	0.96	0.96	0.97	0.96
小時平均	0.96	0.97	0.98	0.99	總平均 0.98

表 4-7 理想案例粗細網格局部細化分區 2 均方根誤差(單位:公尺)

建蔽率	6hr	12hr	18hr	24hr	各建蔽率 平均
0.04	0.004	0.004	0.004	0.018	0.007
0.09	0.004	0.004	0.004	0.020	0.008
0.16	0.004	0.004	0.007	0.019	0.009
0.25	0.004	0.004	0.020	0.018	0.012
0.36	0.006	0.005	0.045	0.011	0.017
0.49	0.009	0.009	0.064	0.013	0.024
0.64	0.020	0.032	0.058	0.060	0.042
小時平均	0.007	0.009	0.029	0.023	總平均 0.017

表 4-8 理想案例粗細網格局部細化分區 2 相關係數平方值

建蔽率	6hr	12hr	18hr	24hr	各建蔽率 平均
0.04	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99
0.09	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99
0.16	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99
0.25	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99
0.36	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99
0.49	0.98	0.98	0.98	0.99	0.99
0.64	0.98	0.98	0.98	0.99	0.98
小時平均	0.98	0.98	0.99	0.99	總平均 0.99

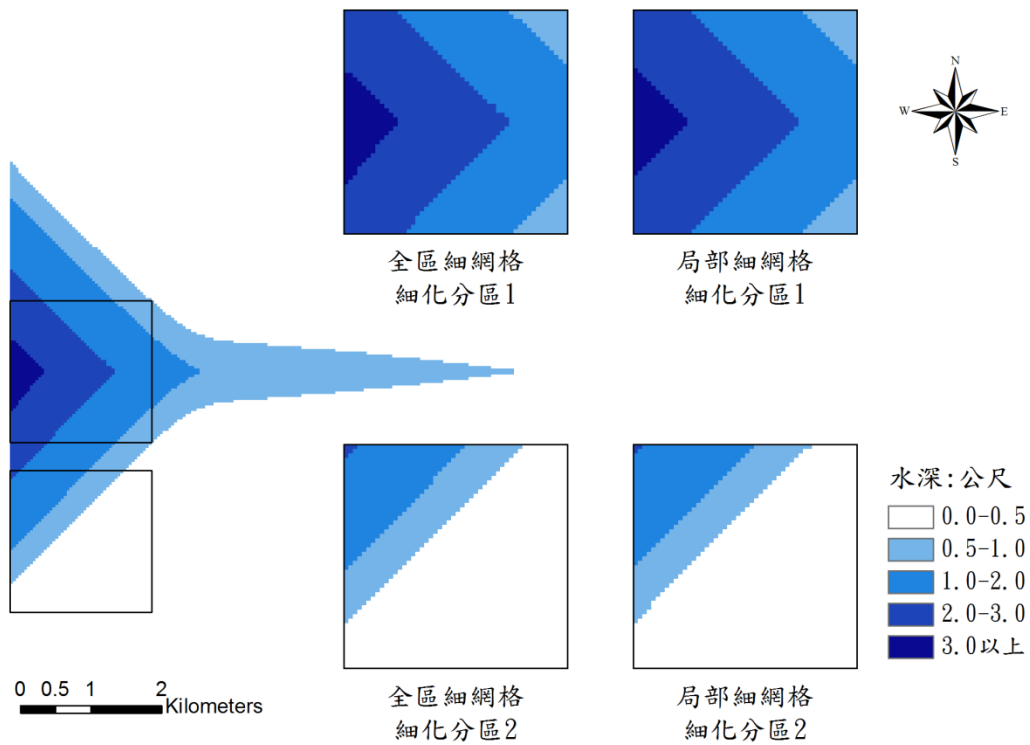


圖 4-20 理想案例全區細網格局與局部細化第 24 小時淹水深比較圖(建蔽率 0.04)

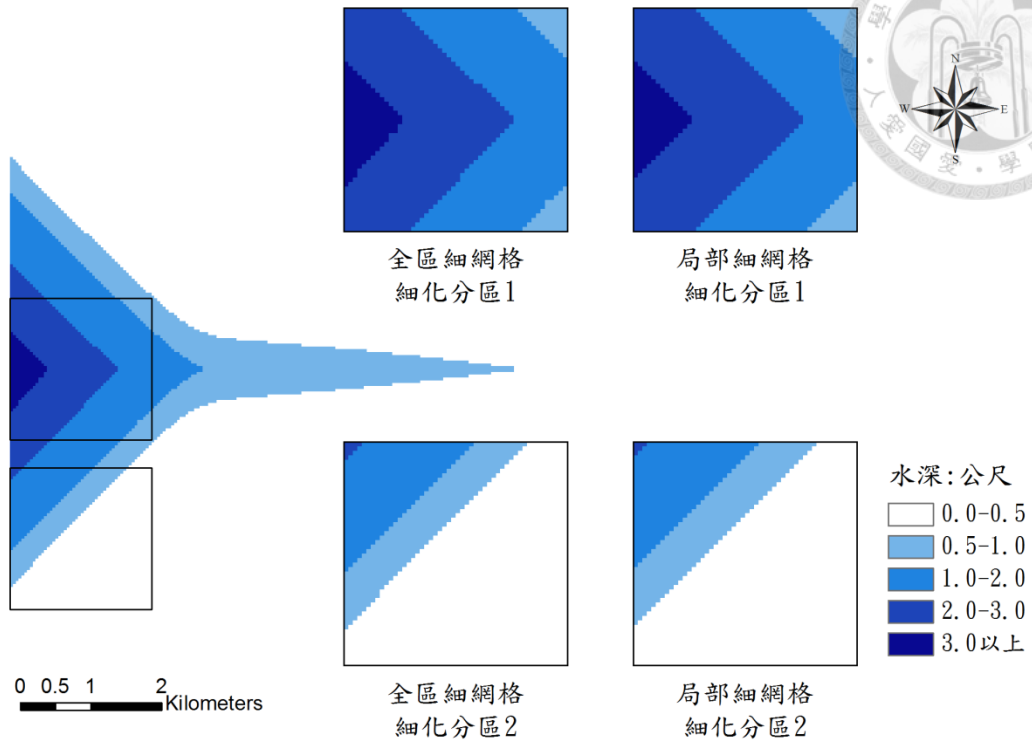


圖 4-21 理想案例全區細網格與局部細化第 24 小時淹水深比較圖(建蔽率 0.09)

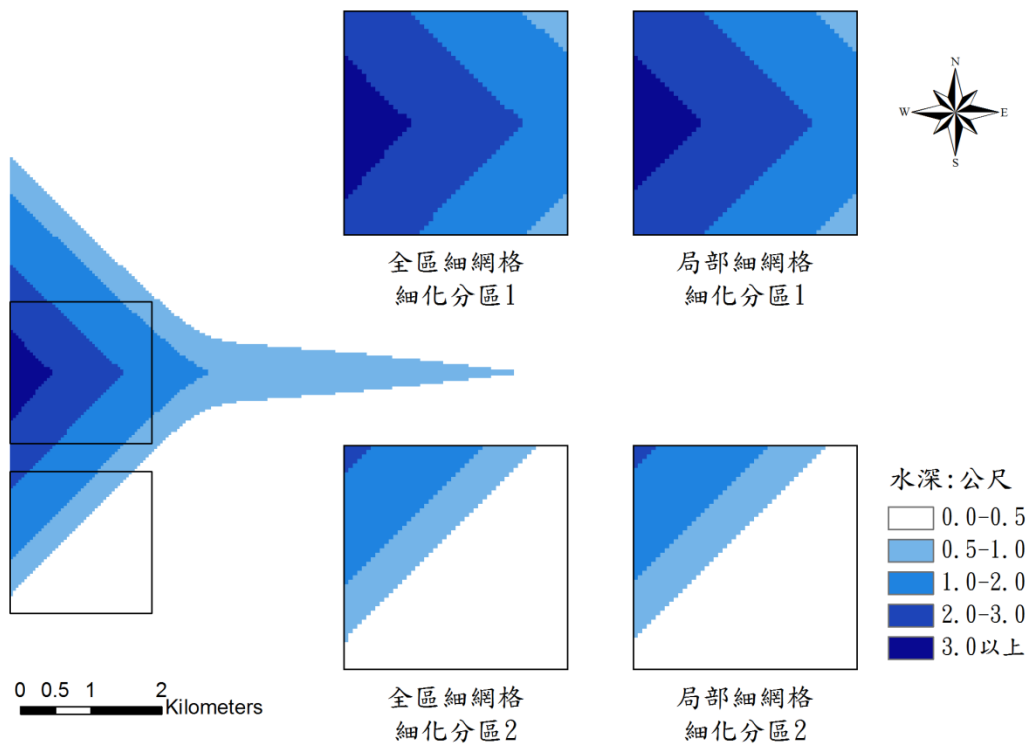


圖 4-22 理想案例全區細網格與局部細化第 24 小時淹水深比較圖(建蔽率 0.16)

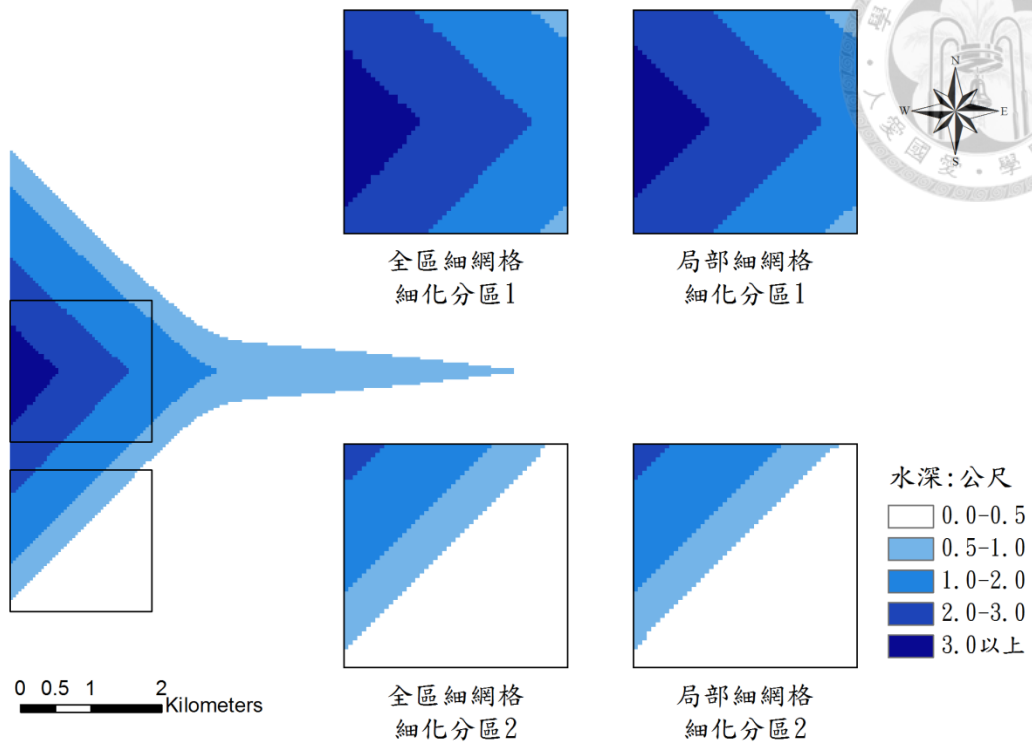


圖 4-23 理想案例全區細網格與局部細化第 24 小時淹水深比較圖(建蔽率 0.25)

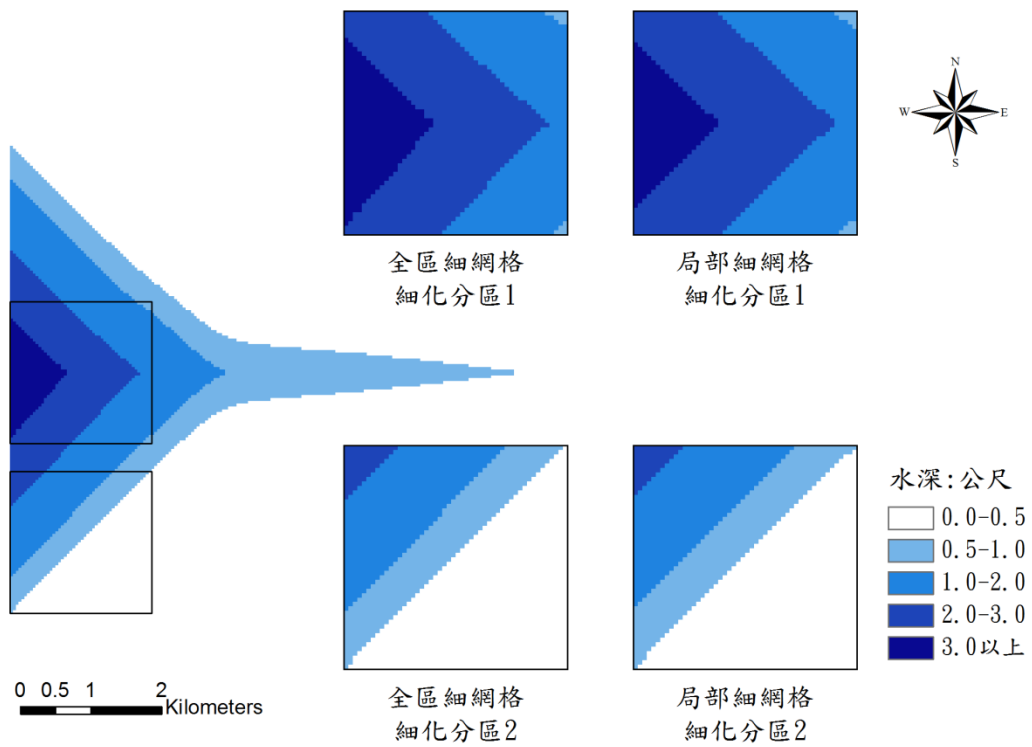


圖 4-24 理想案例全區細網格與局部細化第 24 小時淹水深比較圖(建蔽率 0.36)

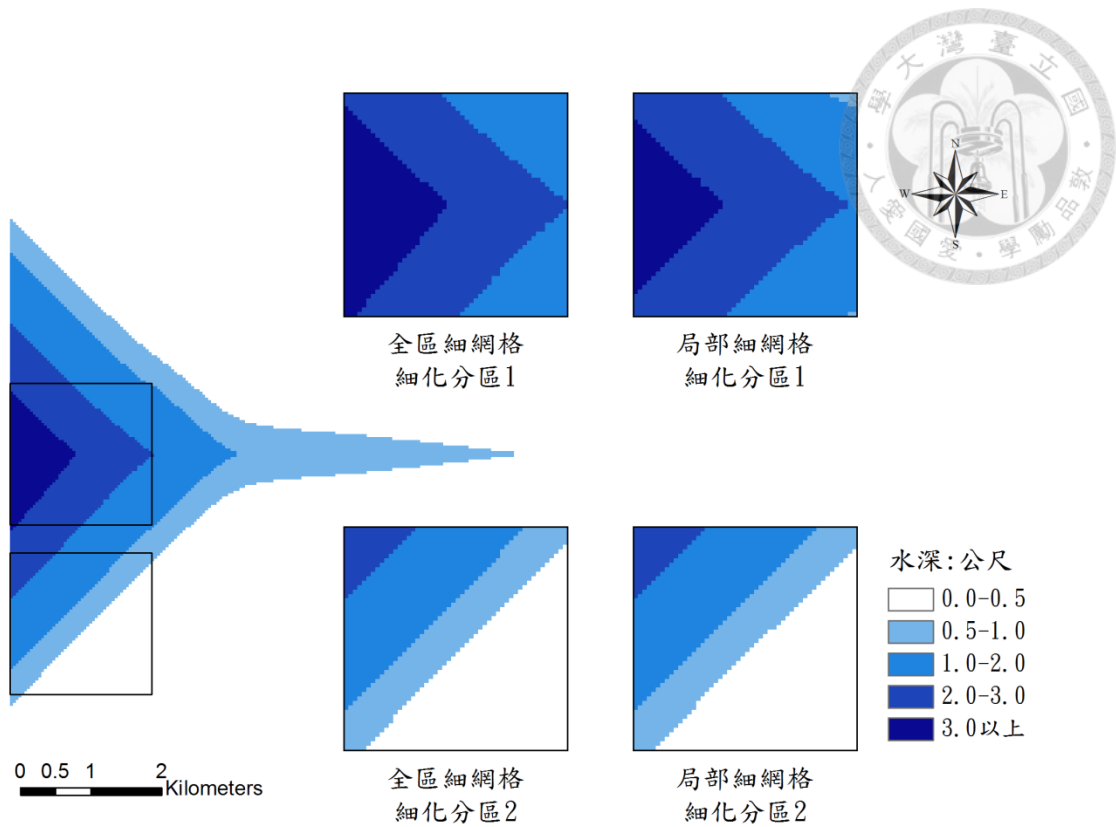


圖 4-25 理想案例全區細網格與局部細化第 24 小時淹水深比較圖(建蔽率 0.49)

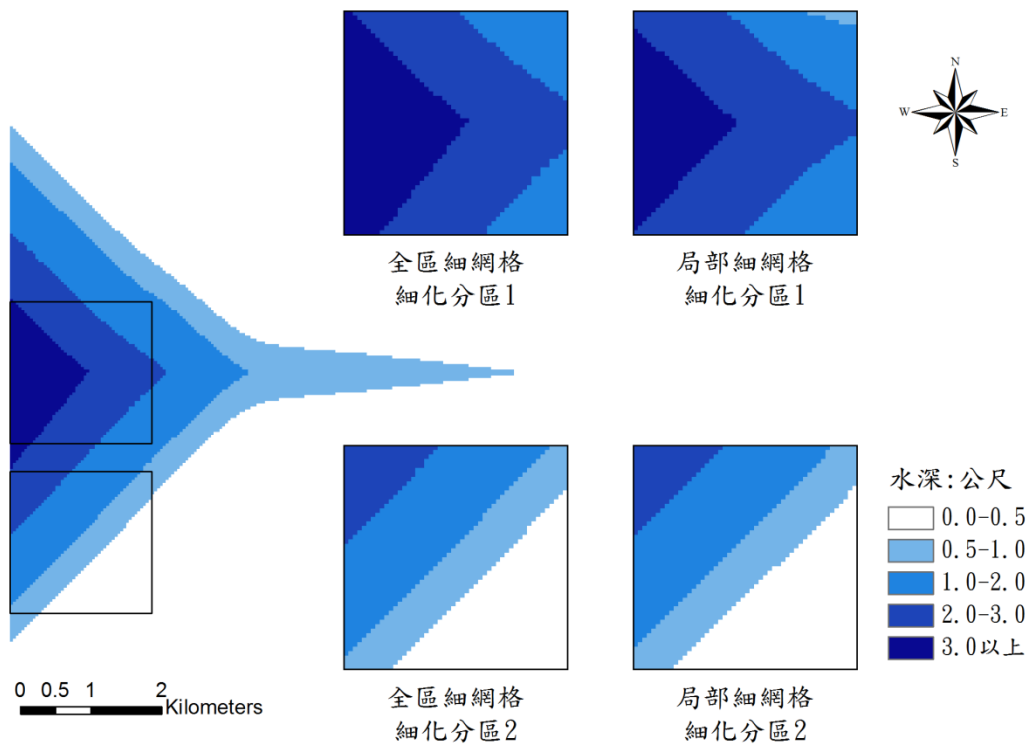


圖 4-26 理想案例全區細網格與局部細化第 24 小時淹水深比較圖(建蔽率 0.64)



4-2 台北市中央區

台北市中央區為位於大台北盆地之中央，行政區域範圍涵蓋台北市大同、中山、大安、中正、文山、松山、南港、信義及萬華等區，背山鄰河，地勢低窪，集水面積大，淡水河及其主要支流新店溪、大漢溪、基隆河匯流其中，面積約 110 平方公里，其數值地形高程如圖 4-27 所示，顯示地勢低窪區域大多位於淡水河與基隆河沿岸，且區域內地勢由東南逐漸向西北降低，坡度約千分之一。

台北市中央區內人口總數約 186 萬人，為台灣之重要經濟、文化、政治中心，人口密集，土地需求殷切，區域內多數皆已開發為不透水之建築用地，滲透面積大幅減少，由圖 4-28 顯示土地利用型態普遍為住宅區，其餘多為商業區及文教區，其中商業區位於西側及主要道路兩側，區內經濟活動密集，但由於地勢低窪，為有效利用土地，河川沿岸多築堤束洪，以防範水患。「台北地區防洪計畫」自民國七十一年起實施至今，已在台北市中央區沿河岸地帶構築能抵禦 200 年重現期降雨之高標準堤防，圖 4-29 為中央區內建置之雨水下水道系統，其排水容量依 5 年重現期暴雨強度(78 mm/hr)設計，管線下游設有調節池及抽水站，以利洪水來臨時，能將市區雨水迅速有效的集中於調節池，並由抽水機將雨水排入堤外河道中，以解決暴雨期間之排水問題。目前台北市中央區沿淡水河、基隆河、新店溪及景美溪岸共有 24 座抽水站，總抽水量為 850.9 cms，各站之抽水容量如表 4-9。一般而言，當降雨規模低於 5 年重現期的設計標準，若所有抽水站與疏散閘門均正常操作，且無河川外水流入時，台北市中央區應無淹水之虞；反之若降雨規模大於 5 年，河川洪水不溢岸至堤防內市區，但抽水站及雨水下水道系統仍將受設計排水容量之限制，無法有效將降雨排出市區，此時市區之降雨將在地勢平坦的區域形成淹水。

2001 年 9 月納莉颱風侵襲台灣，在台北市中央區降下超大豪雨，加上基隆河與大坑溪匯流處發生河水溢堤，造成台北中央區域嚴重淹水，包括兩大重要交通

動脈（鐵路地下系統及台北捷運系統）及多處建築物地下室積水，本文即針對此一事件進行淹水模式之驗證。



表 4-9 台北市中央區抽水站容量

抽水站 名稱	設置時間	抽水容量 (m ³ /s)	抽水站 名稱	設置時間	抽水容量 (m ³ /s)
古亭	77.05	8.0	中港	63.10	15.0
迪化	72.02	44.0	萬芳	63.10	20.0
撫遠	81.06	25.0	圓山	76.04	26.0
保儀	69.05	4.0	玉成	76.12	184.1
雙園	63.12	90.0	脾腹	73.06	12.0
建國	71.11	83.0	忠孝	61.05	57.9
松山	70.08	12.0	中山	71.03	44.0
實踐	69.05	8.0	成功	85.12	32.0
貴陽	63.10	8.0	景美	71.10	8.0
大龍	64.05	16.0	六館	62.04	7.9
南京	79.05	15.0	濱江	71.03	32.0
新生	85.06	79.0	南港	85.09	20.0

總計 24 座，總抽水量 850.9 m³/s

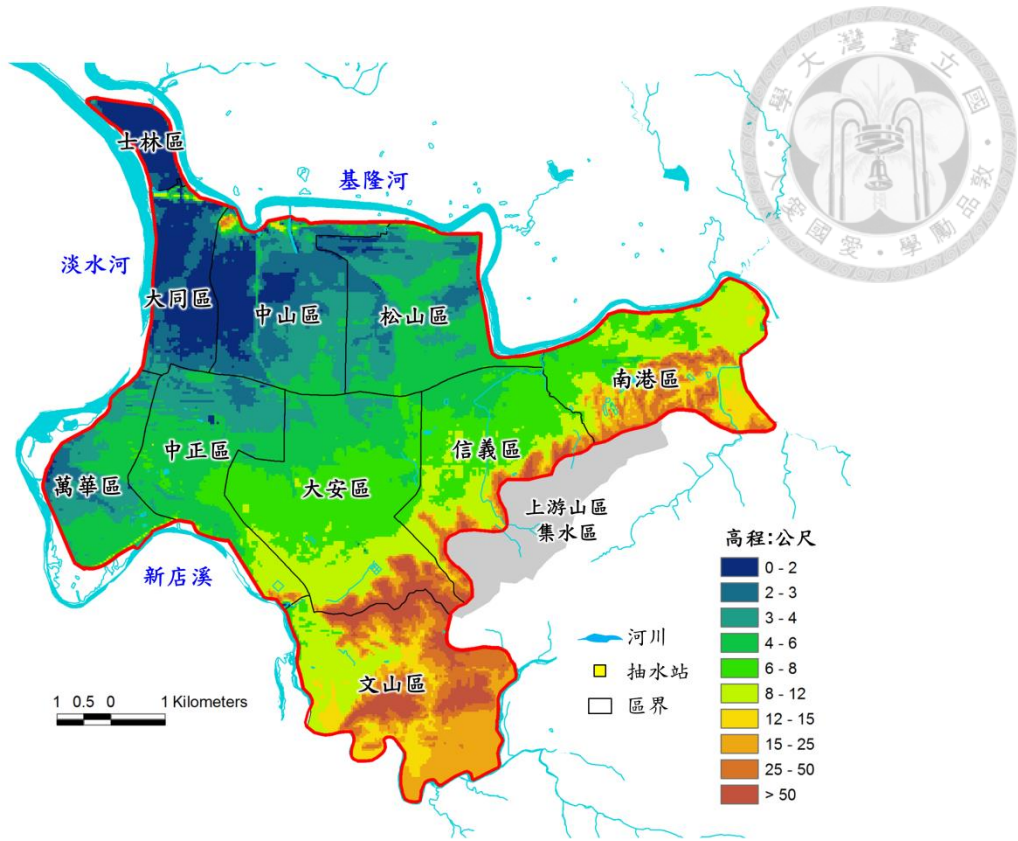


圖 4-27 台北市中央區數值地形高程及行政區域圖

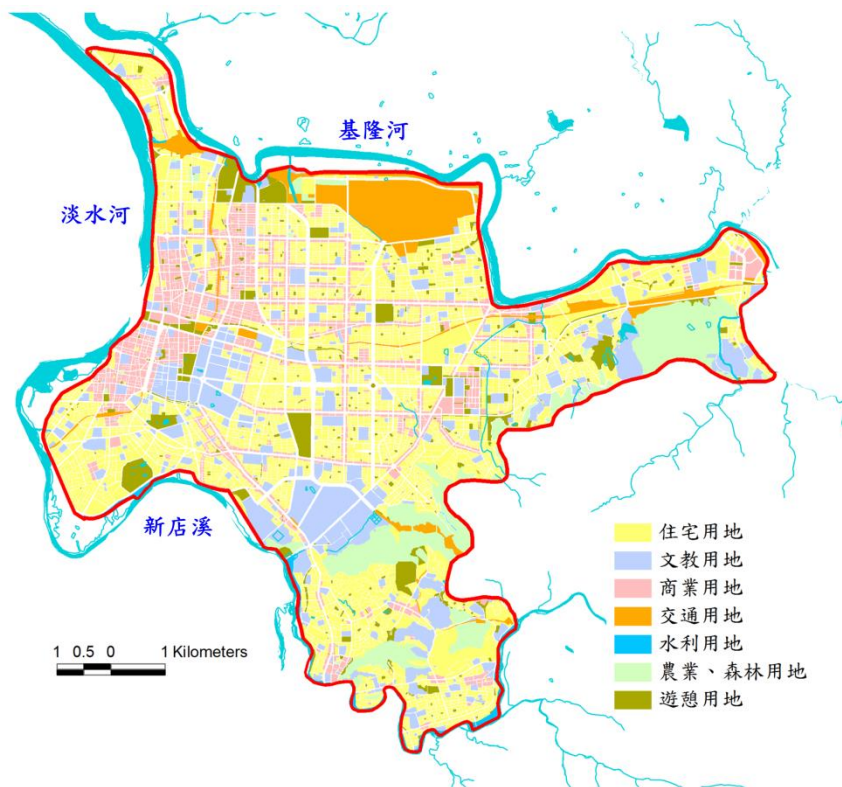


圖 4-28 台北市中央區土地利用分區圖

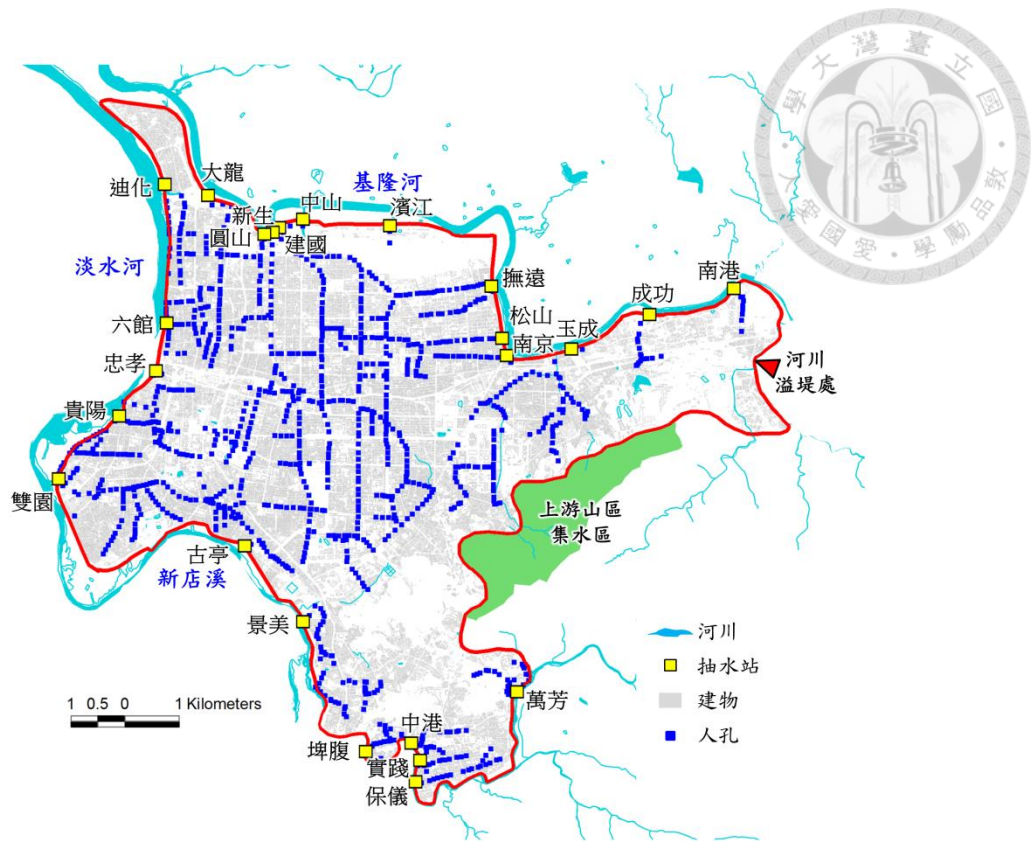



圖 4-29 台北市中央區抽水站及下水道人孔圖

4-2-1 輸入資料

地形 DTM 資料採用國立中央大學太空及遙測研究中心提供之資料，其資料型態為 ASCII 碼，資料內容含各點之 UTM 國際座標與高程資料，其網格解析度為 40 公尺 × 40 公尺，台北市中央區利用此數值地形高程資料進行淹水模擬，台北市中央區共計 43,542 個模擬網格，曼寧糙度值及建蔽率等相關參數，經使用地理資訊系統將網格與土地利用分區資料加以套疊後進行計算，其中各模擬網格之曼寧糙度值由其網格點所在之土地利用狀況決定，本文採用曼寧糙度值如表 4-10 所示；各網格點之建蔽率則由網格內建物面積佔全部網格面積的比例進行計算，各行政區之網格平均建蔽率值如表 4-11 所示，建蔽率值愈高表示此行政區建物所遮蔽之面積佔地表面積比例愈高。下水道管線資料包括主要排水幹線資料則由中華顧問工程司提供，區內共計 1141 個主要人孔節點如圖 4-29 所示，並經由地理資訊系統，根據人孔座標建立二維地表與下水道銜接對應之位置關係。



本文選用納莉颱風最大降雨期間(16日12時至17日23時)共計36小時之降雨資料進行台北市中央區之淹水模擬，降雨採用中央氣象局及水利處於此期間有完整記錄之雨量站資料，共計十座雨量站，分別為士林、三重、台北、中正橋、永和、木柵、信義、南港、大直及內湖站，各雨量站之降雨統計資料如表4-12所示，其雨量組體圖如圖4-30至圖4-39所示，可看出多數雨量站之尖峰降雨均超過台北市雨水下水道之設計標準(78mm/hr)，其中南港站於9月17日上午7時之降雨強度105 mm/hr為各雨量站記錄之冠，總雨量787 mm亦為十座雨量站之最高記錄，本文以徐昇氏分區進行台北市中央區之雨量分布計算，其雨量站之徐昇氏分區如圖4-40所示。

雨水下水道通常應用在都市區域，本文雨水下水道模式部分，採用美國環境保護署(U.S. EPA)所發展之暴雨經理模式(Storm Water Management Model)(Huber and Dickinson, 1988)中的地表逕流模組(Runoff module)與幹線輸水模組(Extran module)進行演算，所計算出之人孔溢流量以點源(source)方式與都市淹水模式銜接。區內南港、成功及玉成等三座抽水站遭洪水淹沒而故障，另外，濱江與萬芳抽水站亦因超大降雨量造成內水淹水而於颱風期間故障，抽水站無法發揮應有之排洪功能，淹水情況因而加劇，抽水站故障時間記錄如表4-13。

圖4-27中所示東南側上游集水區部份，則採用美國陸軍工兵團所發展之HEC-1模式，以其山區集水區之面積、形狀、坡度等參數及納莉颱風雨量站之記錄計算逕流量，並將山區逕流歷線提供為二維漫地流之上游入流邊界條件；基隆河與大坑溪匯流處在納莉颱風期間河川溢堤，大量河川洪水流入台北市區，其溢堤位置如圖4-29所示，溢堤之基隆河水位資料，則是採用一維河系變量流模式進行計算(許銘熙等人, 1990)，水位歷線如圖4-41所示。將此河川水位與都市淹水模式以內外水位進行銜接，計算河水溢堤進入堤內之流量，則可做為都市淹水模式之河川之入流邊界條件。



表 4-10 台北市中央區土地利用及曼寧糙度值

土地利用	曼寧糙度值
住宅區	0.20
文教區	0.20
商業區	0.20
交通用地	0.13
水利用地	0.10
農業及森林用地	0.13
遊憩用地	0.13

表 4-11 台北市中央區各行政區平均建蔽率

行政區	平均建蔽率 α_0
士林區	0.40
大同區	0.42
中山區	0.32
松山區	0.26
萬華區	0.40
中正區	0.32
大安區	0.29
信義區	0.29
南港區	0.18
文山區	0.21
全區	0.31

表 4-12 台北市中央區納莉颱風總雨量及尖峰降雨

雨量站	總降雨量 (mm)	尖峰降雨 (mm/hr)
士林	576.0	94.0
三重	554.0	68.0
台北	618.0	77.0
中正橋	630.0	95.0
永和	565.0	93.5
木柵	669.5	57.5
信義	549.0	84.5
南港	787.0	105.0
大直	629.5	93.5
內湖	732.0	109.5



表 4-13 台北市中央區納莉颱風抽水站故障停機時間

抽水站 名稱	抽水容量 (m ³ /s)	停機時間
萬芳	20.0	9/16 23:23
南港	20.0	9/17 00:19
成功	32.0	9/17 04:00
濱江	32.0	9/17 08:00
玉成	184.1	9/17 09:00

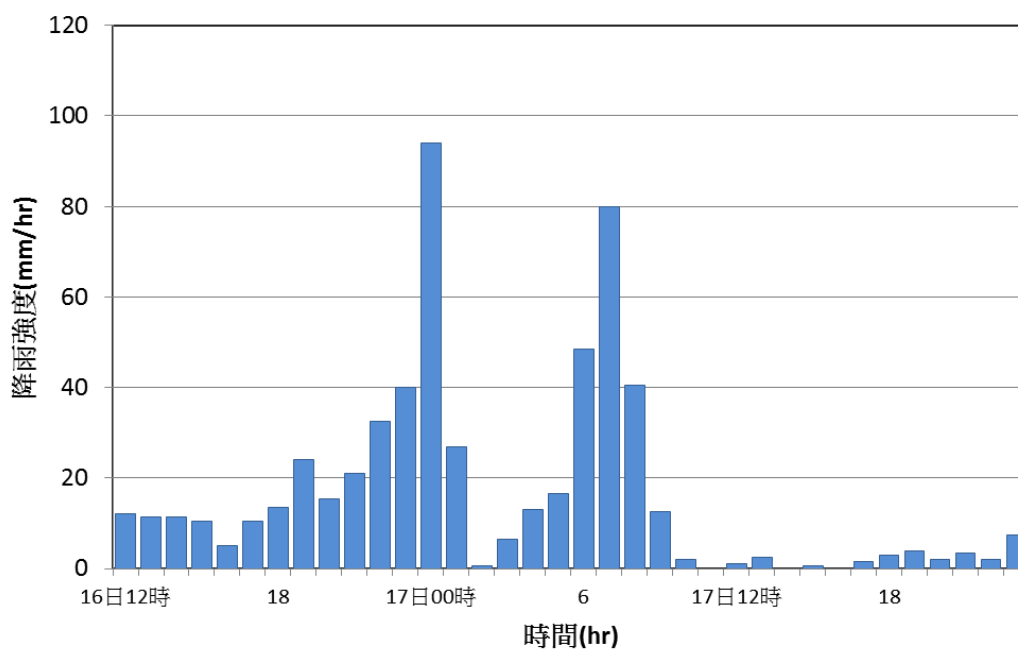


圖 4-30 台北市中央區士林雨量站納莉颱風降雨組體圖

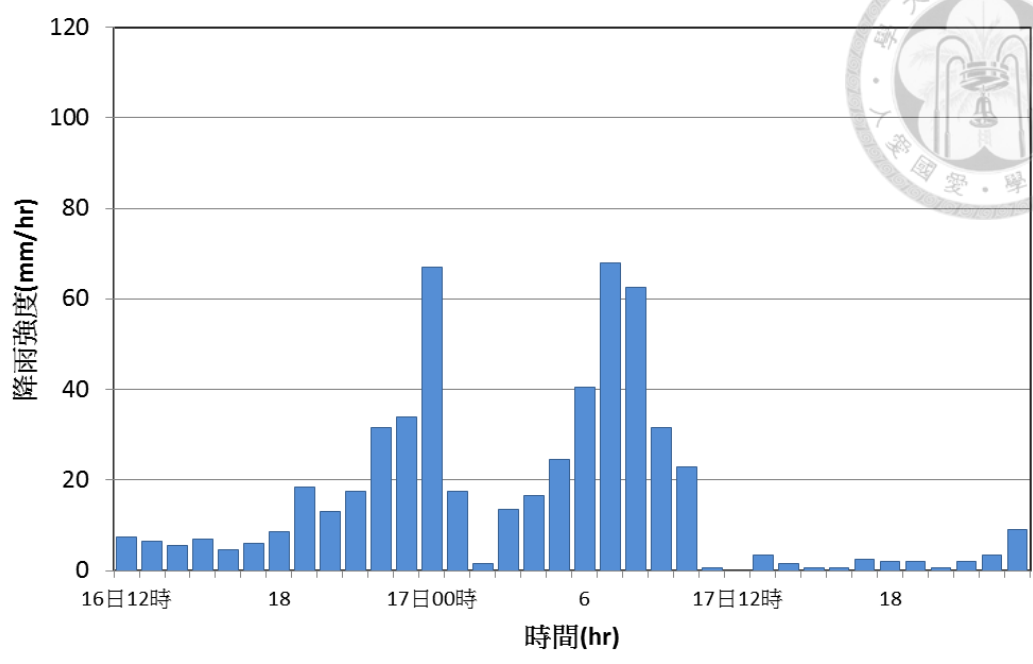


圖 4-31 台北市中央區三重雨量站納莉颱風降雨組體圖

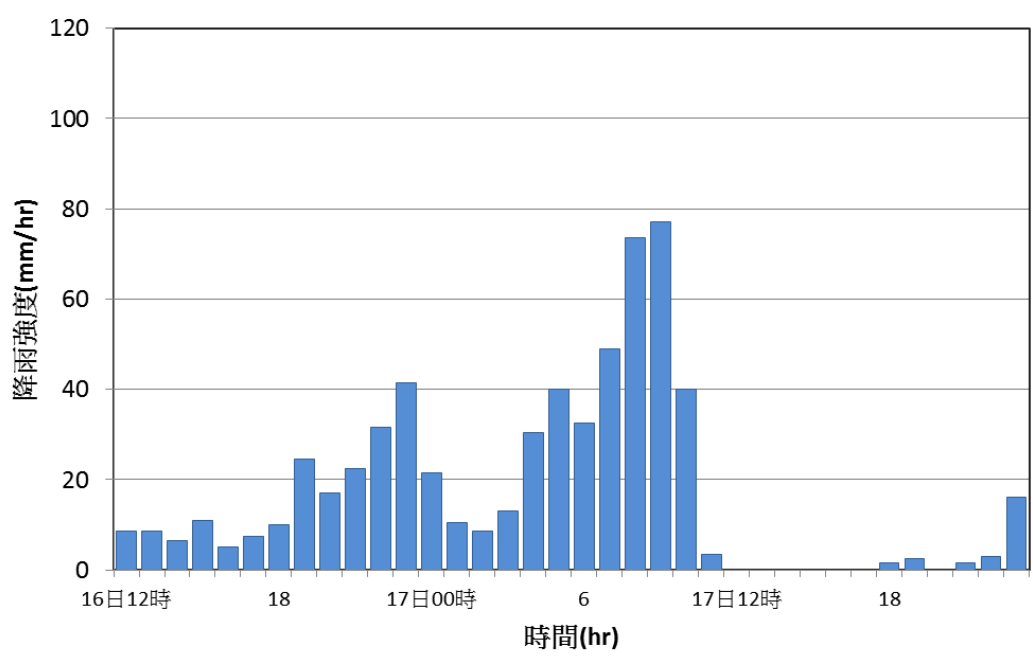


圖 4-32 台北市中央區台北雨量站納莉颱風降雨組體圖

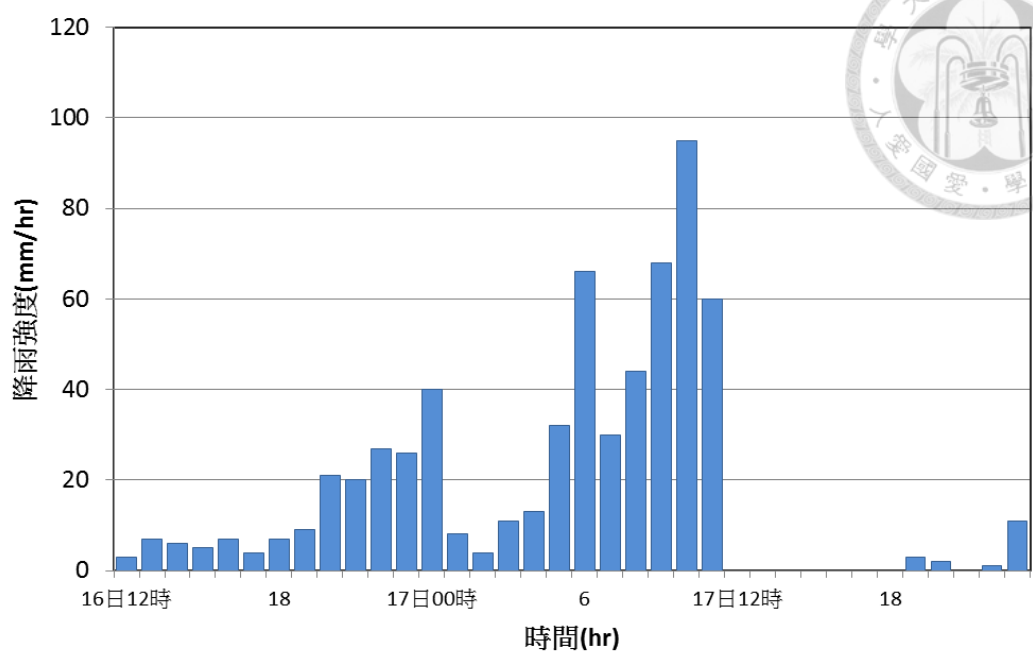


圖 4-33 台北市中央區中正橋雨量站納莉颱風降雨組體圖

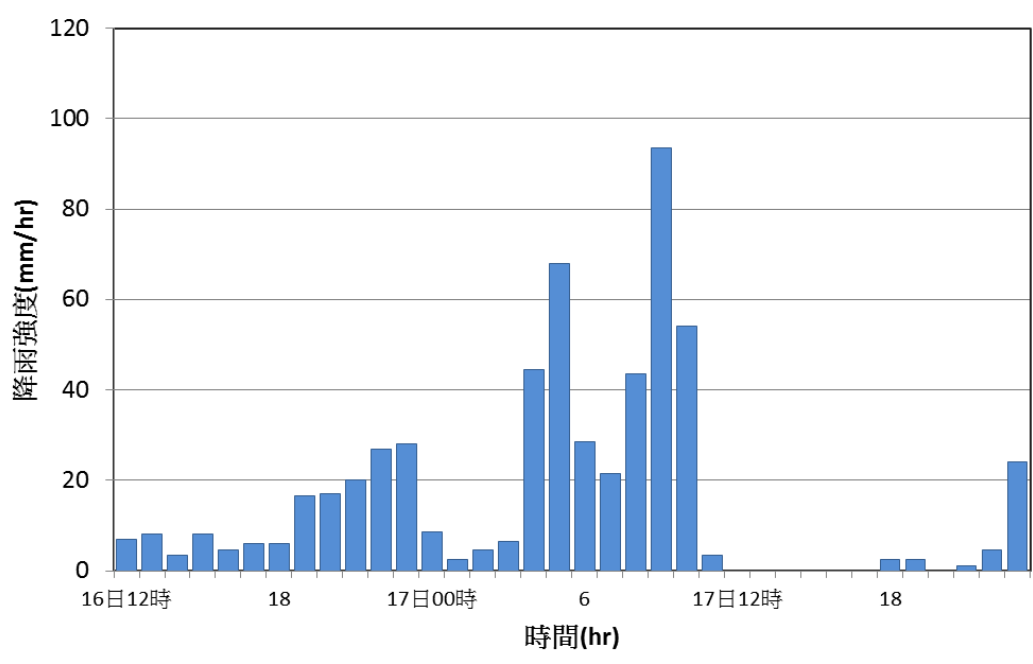


圖 4-34 台北市中央區永和雨量站納莉颱風降雨組體圖

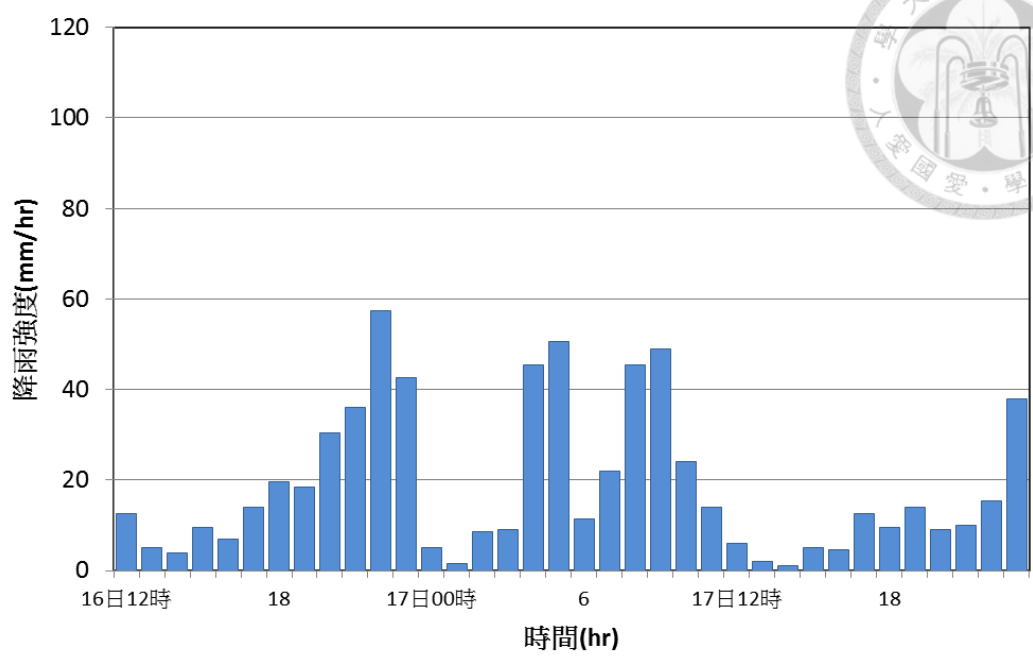


圖 4-35 台北市中央區木柵雨量站納莉颱風降雨組體圖

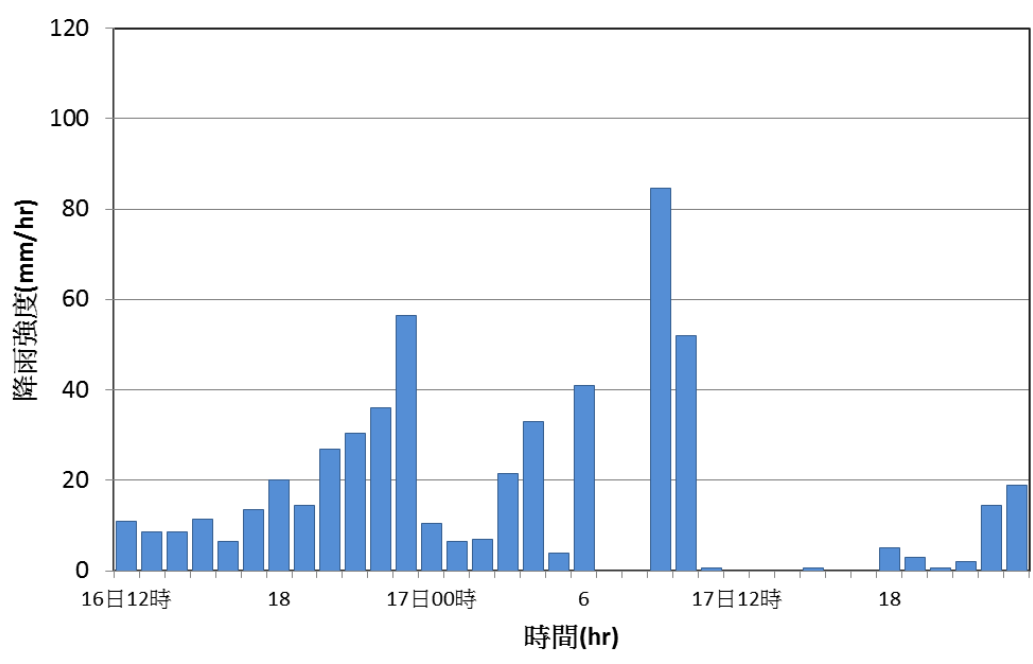


圖 4-36 台北市中央區信義雨量站納莉颱風降雨組體圖

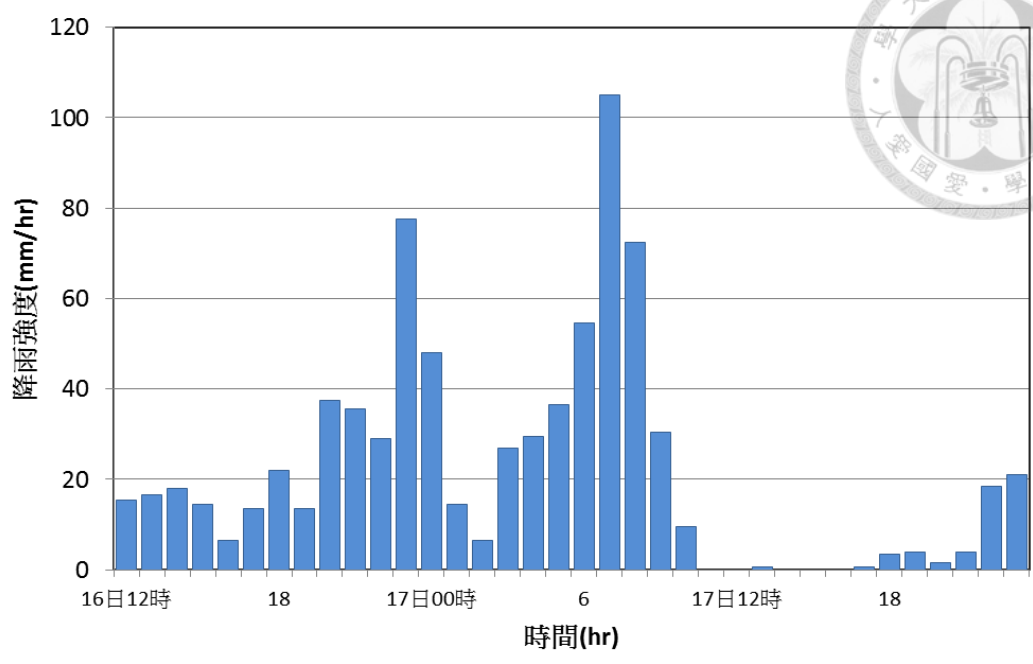


圖 4-37 台北市中央區南港雨量站納莉颱風降雨組體圖

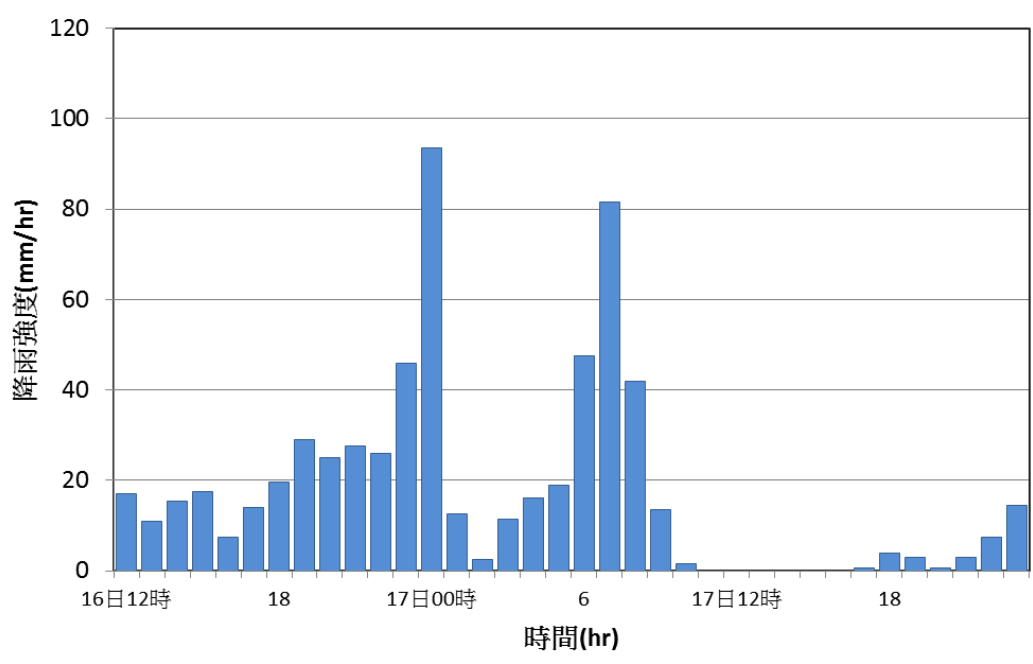


圖 4-38 台北市中央區大直雨量站納莉颱風降雨組體圖

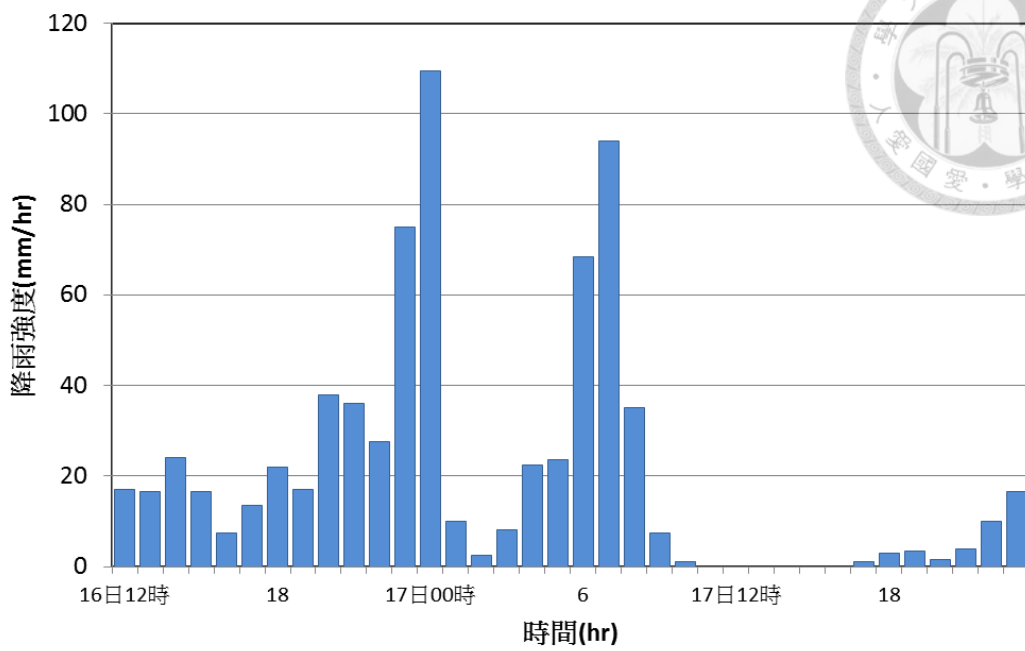


圖 4-39 台北市中央區內湖雨量站納莉颱風降雨組體圖

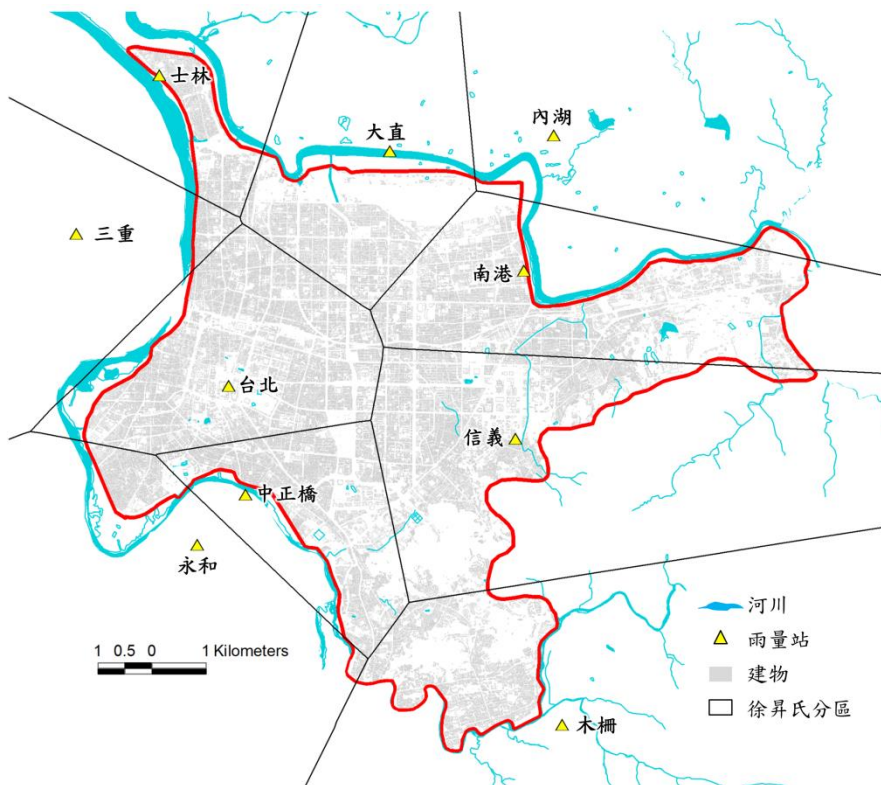


圖 4-40 台北市中央區雨量站及徐昇氏分區圖

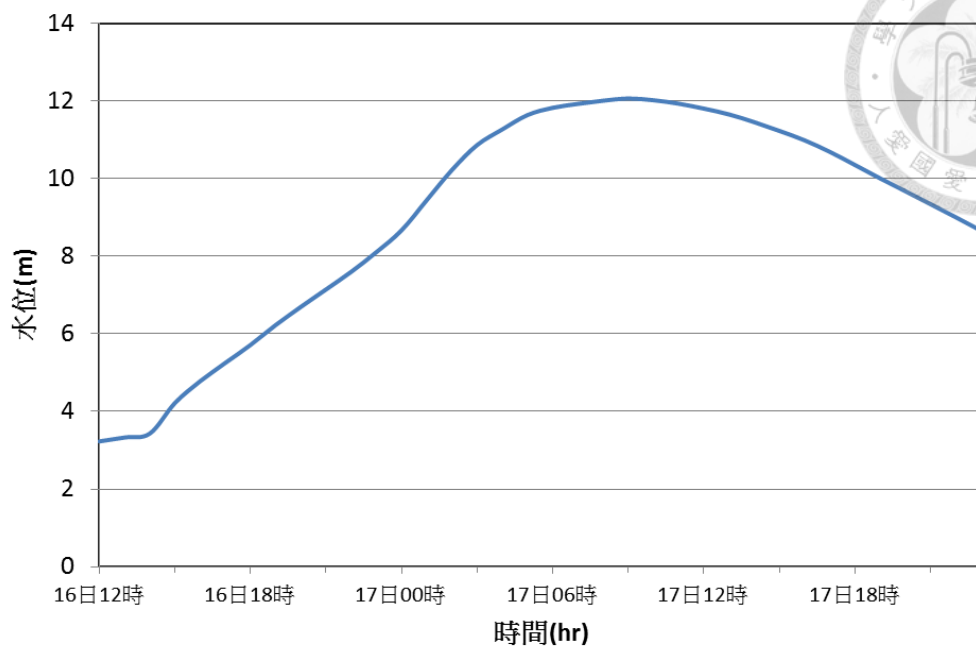


圖 4-41 基隆河與大坑溪匯流處溢堤河川水位歷線

4-2-2 模擬結果與討論

1. 模式精度分析

為反應建物阻隔效應及建物蓄水效應，本文針對台北市中央區納莉颱風事件模擬，設定三種不同情境來作驗證模擬，情境 A 以傳統針對都市淹水的模擬方式進行設定，亦即只以數值地形高程來反應地形的變化，忽略地表建物對水流的影響；情境 B 及情境 C 以建蔽率來反應建物並修正地表曼寧糙度值，其中情境 B 之門檻值設定為 99m，亦即地表洪水無法流入建物中，情境 C 則依地表建物類型進行門檻值之設定，地表水深若超過門檻值則會流入建物中蓄積。

情境 C 之建物門檻設定是依據台北市中央區建物樓層，分成三個類型，第一類為五層樓以下不含電梯之公寓大樓，第二類為六、七層樓之電梯大樓，第三類則為七層樓以上之高樓大廈，如圖 4-42 所示，而建物門檻值 d_0 之設定，則依據建物樓層三種類型，分別設定為 0.5 公尺、1 公尺和 2 公尺。

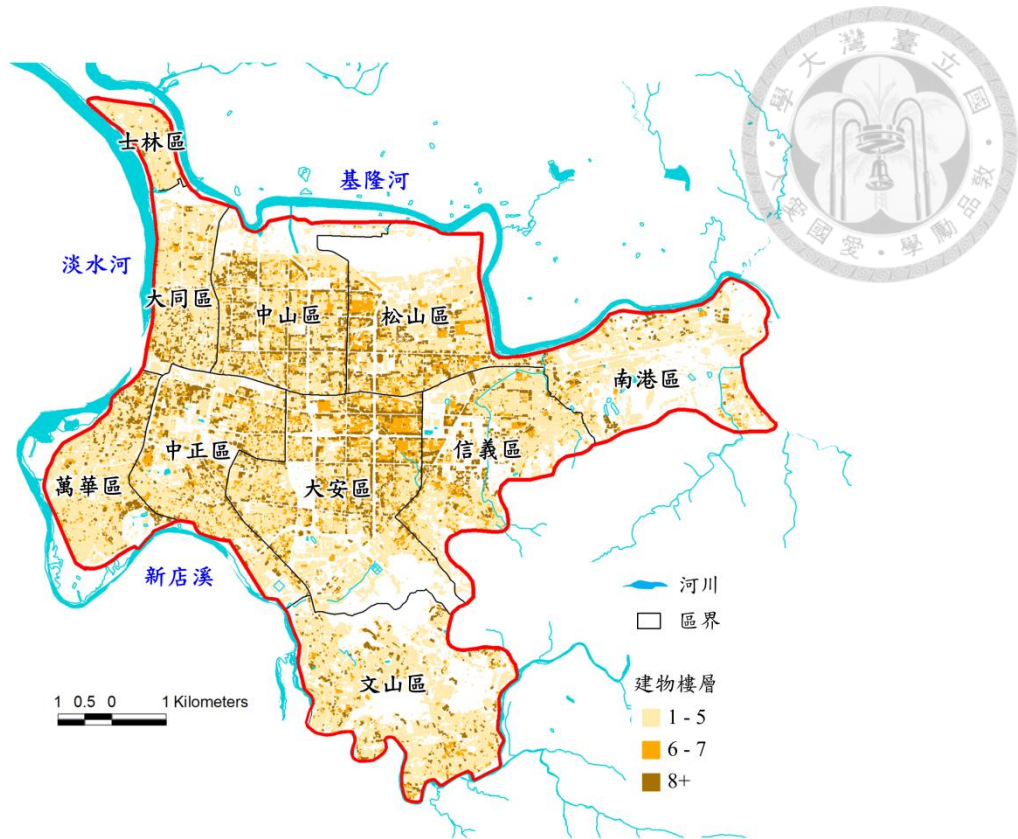


圖 4-42 台北市中央區建物樓層圖

台北市納莉颱風調查淹水範圍如圖 4-43(台北市政府, 2001)，其淹水範圍是以 0.3 公尺以上之淹水所涵蓋之範圍繪製而成，其淹水面積約 2,154 公頃，由調查淹水範圍可看出，基隆河沿岸之低窪地區，包括南港區、信義區、松山區及中山區幾乎都被淹沒。圖 4-44 至圖 4-46 為納莉颱風情境 A、情境 B 及情境 C 之模擬最大淹水深圖，由模擬結果可看出三種情境之淹水範圍與調查淹水結果相當一致，較大的差別在於中山區和大同區在情境 A 中只有部份地區有淹水情形，但在情境 B 和情境 C 中幾乎全區都處於淹水的情形。

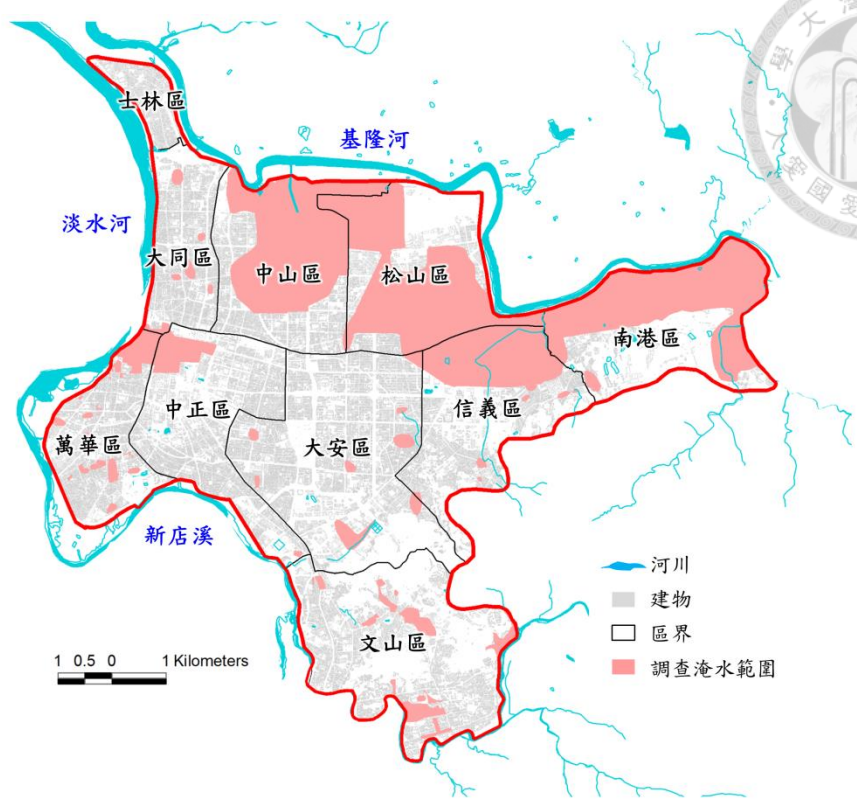


圖 4-43 台北市中央區納莉颱風調查淹水範圍

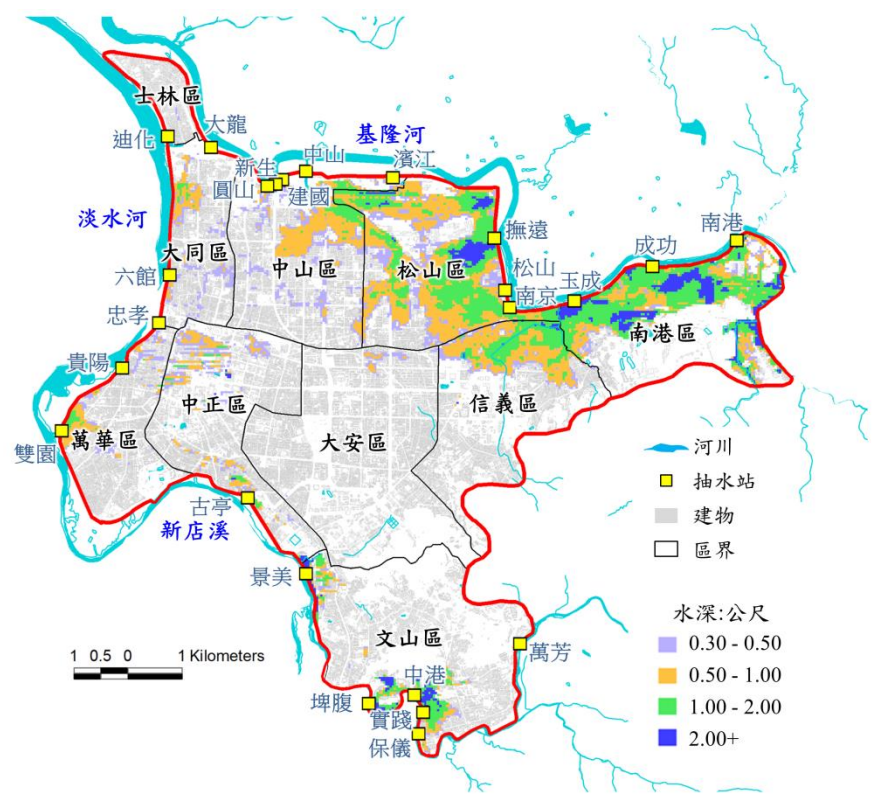


圖 4-44 台北市中央區納莉颱風模擬最大淹水深(情境 A)

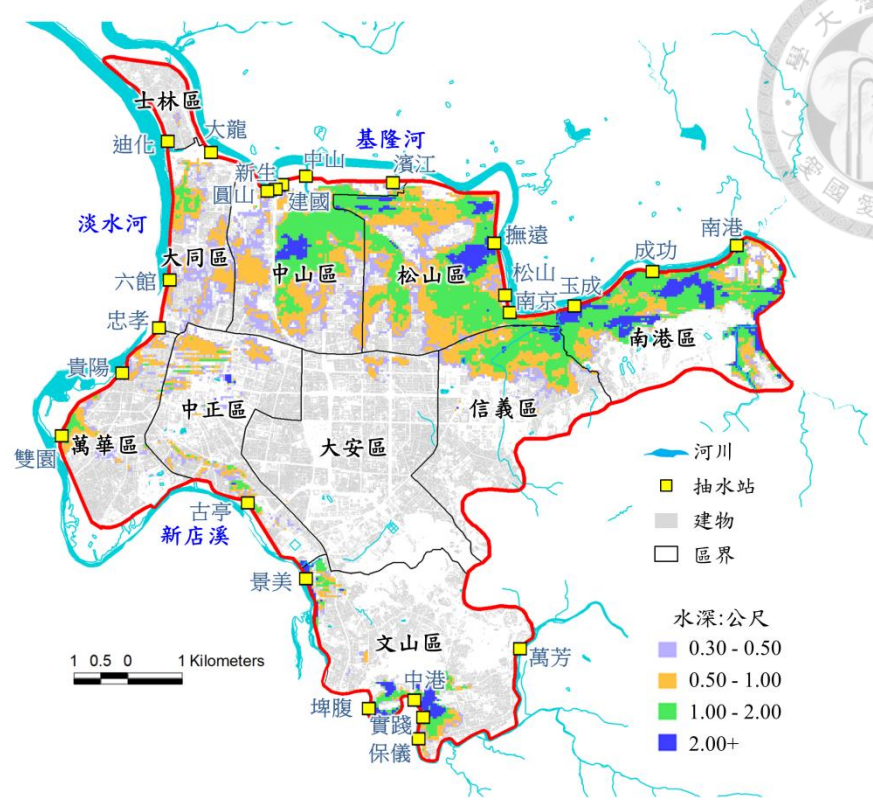


圖 4-45 台北市中央區納莉颱風模擬最大淹水深(情境 B)

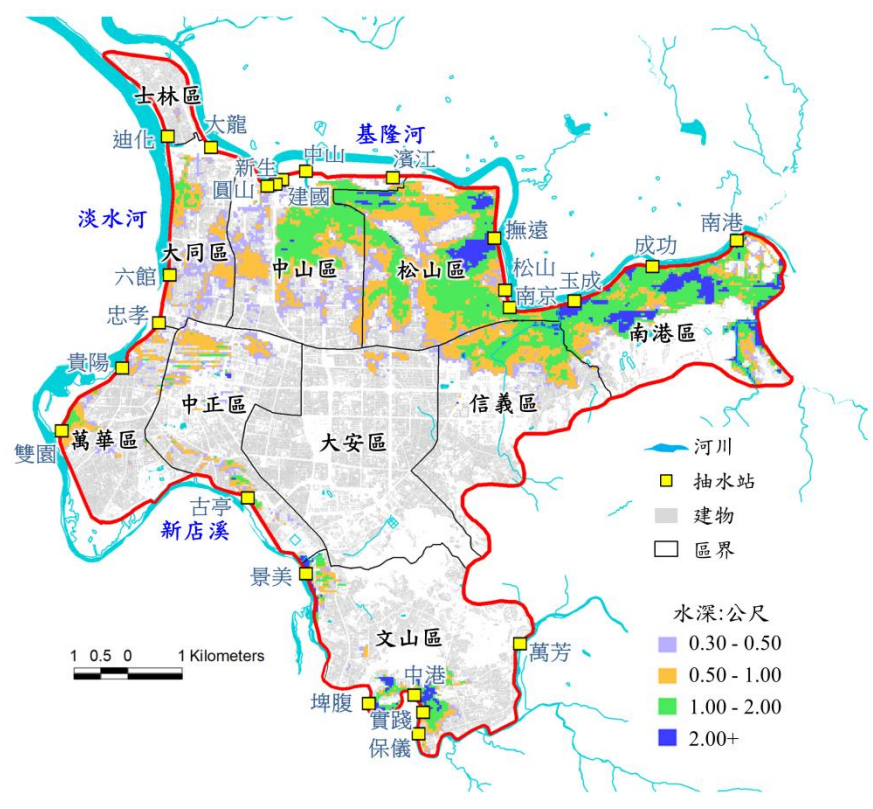


圖 4-46 台北市中央區納莉颱風模擬最大淹水深(情境 C)



為了評估淹水模式之精度，本文採用調查淹水範圍及模擬淹水範圍之量化評估方法進行評估模式精度 P 。(Bates et al., 2005)

$$P = \frac{A_{inv} \cap A_{sim}}{A_{inv} \cup A_{sim}} \quad (4-43)$$

其中, A_{inv} 為調查淹水範圍, A_{sim} 為模擬淹水範圍。 $P=1$ 時表示兩者完全符合, $P=0$ 則表示兩者毫無交集, 在評估模式精度時, 情境 B 及情境 C 之模擬淹水範圍 A_{sim} 也包括建物所涵蓋之面積, 如此可確保模擬淹水範圍之計算可與調查淹水範圍和情境 A 處於同一標準之下。

情境 A、情境 B 及情境 C 不同淹水深之模擬淹水面積如表 4-14, 可看出情境 B 及情境 C 因建物阻隔效應, 地表淹水能夠更快速地往鄰近區域流動, 故不同淹水深之淹水面積均較情境 A 大, 而情境 B 因為地表淹水完全被阻隔於建物外, 故其淹水情形較情境 C 來得嚴重, 與調查淹水範圍之淹水面積 2,154 公頃比較, 情境 A 之淹水總面積為 1,785 公頃, 有低估的現象, 而情境 B 之 2,284 公頃則稍大於調查淹水面積, 但其模式精度 0.65 相對於情境 A 之 0.59 已有提昇, 而情境 C 之淹水面積為 2,157 公頃, 相當接近於調查淹水面積, 且其模式精度為 0.72, 顯示本模式在同時考慮建物阻隔及進水效應後, 能大幅改善精度, 模擬出更接近現況之淹水情形。

表 4-14 台北市中央區納莉颱風不同情境下淹水面積(單位:公頃)

淹水深 (m)	情境 A	情境 B	情境 C
0.3-0.5	368.64	418.72	404.00
0.5-1.0	660.80	804.48	764.32
1.0-1.5	390.88	538.40	524.64
1.5-2.0	187.04	281.60	257.28
大於 2.0	177.76	241.12	206.56
總面積	1785.12	2284.32	2156.80
模式精度(P)	0.59	0.65	0.72

不同情境下之淹水體積統計如表 4-15，此為淹水模擬最終時刻之統計結果，可看出建物外的淹水體積分別為 12.08、10.78 及 9.45 百萬立方公尺，而情境 C 中建物內有 2.5 百萬立方公尺之淹水體積。情境 A 之淹水體積雖大於情境 B 和情境 C，但在沒有考慮建物之條件下，地表淹水大部份都蓄積在建物所覆蓋之面積上，而造成其整體淹水範圍嚴重低估。

2. 建物阻隔及進水效應


台北市中央區納莉颱風各行政區淹水面積如表 4-16 所示。南港區的建蔽率為全區最小值 0.18，淹水深大於 0.3m 的淹水面積為在情境 A 為 439 公頃、情境 B 和情境 C 分別為 450 公頃及 448 公頃，因建物效應僅增加 2.6% 和 2.2% 的淹水面積。而大同區的建蔽率 0.42 為全區最大值，情境 A 與情境 C 之淹水面積從 75 公頃增加為 148 公頃，增加的比例高達 96.4%，這些結果顯示建物阻隔效應所造成的淹水面積增加與建蔽率成正比。大同區及中山區在情境 B 的淹水面積急遽增加，因為這兩區在情境 A 的條件下，由於未考慮建物效應且位於較下游的地區，所以基隆河溢淹的河川洪水未造成大面積的淹水，而南港區、信義區和松山區在情境 A 條件下已受到溢淹的洪水影響而有嚴重的積水產生，所以在情境 B 的淹水模擬結果可看出淹水面積只有小幅度的增加，情境 C 考慮建物進水效應後，超過建物門檻值的地表洪水會漫淹至建物中蓄積，所以淹水面積略小於情境 B。由上述結果可知，地表洪水因建物的阻隔，能經由街道更快速地往下游流動，對下游造成更嚴重的淹水災情。

表 4-15 台北市中央區納莉颱風不同情境下淹水體積(單位:10⁶m³)

	情境 A	情境 B	情境 C
建物外最終淹水體積	12.08	10.78	9.45
建物內最終淹水體積	0.00	0.00	2.50
最終總出流體積	37.15	38.45	37.28

表 4-16 台北市中央區納莉颱風各行政區淹水面積(單位:公頃)

	士林區			大同區			中山區		
水深(m)	情境 A	情境 B	情境 C	情境 A	情境 B	情境 C	情境 A	情境 B	情境 C
0.3-0.5	1.60	2.88	2.88	42.24	68.64	69.44	74.24	113.92	106.24
0.5-1.0	0.32	0.80	0.80	29.28	74.08	67.52	88.16	153.12	123.20
1.0-1.5	0.16	0.32	0.32	3.84	14.08	10.72	19.36	104.64	85.92
1.5-2.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.64	0.32	2.24	52.32	38.08
大於 2.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.04	23.52	4.96
總面積	2.08	4.00	4.00	75.36	157.44	148.00	187.04	447.52	358.40
	松山區			萬華區			中正區		
水深(m)	情境 A	情境 B	情境 C	情境 A	情境 B	情境 C	情境 A	情境 B	情境 C
0.3-0.5	90.56	74.40	69.76	29.60	31.68	29.92	52.48	50.24	48.16
0.5-1.0	244.48	236.48	239.36	29.92	46.40	42.24	43.20	69.44	66.24
1.0-1.5	144.48	180.48	189.28	8.00	10.24	9.28	7.36	11.84	10.08
1.5-2.0	63.20	82.88	80.64	0.48	0.64	0.64	1.28	2.40	2.08
大於 2.0	34.88	50.72	51.68	0.16	0.16	0.16	3.20	4.00	3.04
總面積	577.60	624.96	630.72	68.16	89.12	82.24	107.52	137.92	129.60
	大安區			信義區			南港區		
水深(m)	情境 A	情境 B	情境 C	情境 A	情境 B	情境 C	情境 A	情境 B	情境 C
0.3-0.5	8.96	7.68	7.84	27.04	30.24	29.12	26.24	24.96	26.24
0.5-1.0	4.00	10.08	10.08	99.20	88.48	95.84	94.08	92.96	88.48
1.0-1.5	0.00	0.00	0.00	48.32	68.96	63.52	134.40	126.08	130.88
1.5-2.0	0.00	0.00	0.00	16.64	23.68	20.16	82.24	96.64	93.76
大於 2.0	0.00	0.00	0.00	3.52	9.28	5.12	102.08	109.60	109.12
總面積	12.96	17.76	17.92	194.72	220.64	213.76	439.04	450.24	448.48
	文山區								
水深(m)	情境 A	情境 B	情境 C						
0.3-0.5	15.68	14.08	14.40						
0.5-1.0	28.16	32.64	30.56						
1.0-1.5	24.96	21.76	24.64						
1.5-2.0	20.96	22.40	21.60						
大於 2.0	30.88	43.84	32.48						
總面積	120.64	134.72	123.68						



為更深入探討建物對淹水模擬的影響，本文以中山區及大同區交界之局部地區來作說明，圖 4-47、圖 4-48 及圖 4-49 為情境 A、情境 B 及情境 C 之局部淹水深圖，由情境 A 的結果可看出，由於只採用原始地表高程進行淹水模擬，故地表的淹水只集中在低窪地區，而情境 B 及情境 C 的地表洪水受到建物阻隔的影響而侷限於街道上，反應出更接近台北市中央區實際的淹水境況，且情境 B 因地表淹水完全被阻隔於建物外，各街道上均產生相當大的淹水深，新生高架道路以東由於地勢低窪，淹水情形更加嚴重，而情境 C 因淹水深大於建物門檻後可以流入建物中，故整體淹水情形較情境 B 有較減緩的趨勢，由圖上可看出許多建物已進水，如承德路兩側及新生高架道路東側地區，可看出因地表淹水流入建物而顯著降低了街道上的淹水情形。

本文在圖 4-47 中選定三個觀測點(Pt. 1、Pt. 2 及 Pt. 3)，其建蔽率及建物門檻值如表 4-17 所示，建蔽率分別為 0.53、0.25 及 0.19，建物門檻值皆為 0.5 公尺，並繪製其不同情境下之地表淹水水深歷線(圖 4-50)及建物進水面積比 α' 變化(圖 4-51)，以了解在不同建物下之流況。由圖中可看出三個觀測點情境 A 的模擬淹水深，在整個模擬過程中皆小於門檻值 0.5 公尺，情境 B 由於建物阻隔導致通水斷面減少，三個觀測點水深不但在短時間內上昇，其最大淹水深約為情境 A 之 2 倍，發生時間比情境 A 提前大約 4 小時，水深均超過了建物的門檻值。

觀測點 1 在情境 C 中大約於第 28 小時水深超過建物門檻，此時建物已開始進水，由圖上可看出其最大淹水深明顯的小於情境 B，且水深超過門檻值的時間也晚了 4 個小時。由建物進水面積比的變化可看出，觀測點 1 在進水之後，由於建物外的水位不斷升高，建物進水面積比在兩小時內就急遽地增加至 0.53，代表此時建物內的空間在兩小時內已完全被地表淹水淹沒。觀測點 2 在第 30 小時水深超過門檻值，33 小時後水深已低於門檻值，可看出建物が在進水過程中，進水面積比緩慢上升至 0.17，而在 33 小時之後維持不變，且小於觀測點之建蔽率 0.25，代表建物內尚未完全充滿水，建物內只有約 68%的空間被淹沒。而觀測點 3 之水深一直小於門檻值，建物無進水情形，故進水面積比維持 0 不變。



表 4-17 觀測點建蔽率及門檻值

	建蔽率 α_0	門檻值 d_0
觀測點 1 (Pt. 1)	0.53	0.5
觀測點 2 (Pt. 2)	0.25	0.5
觀測點 3 (Pt. 3)	0.19	0.5

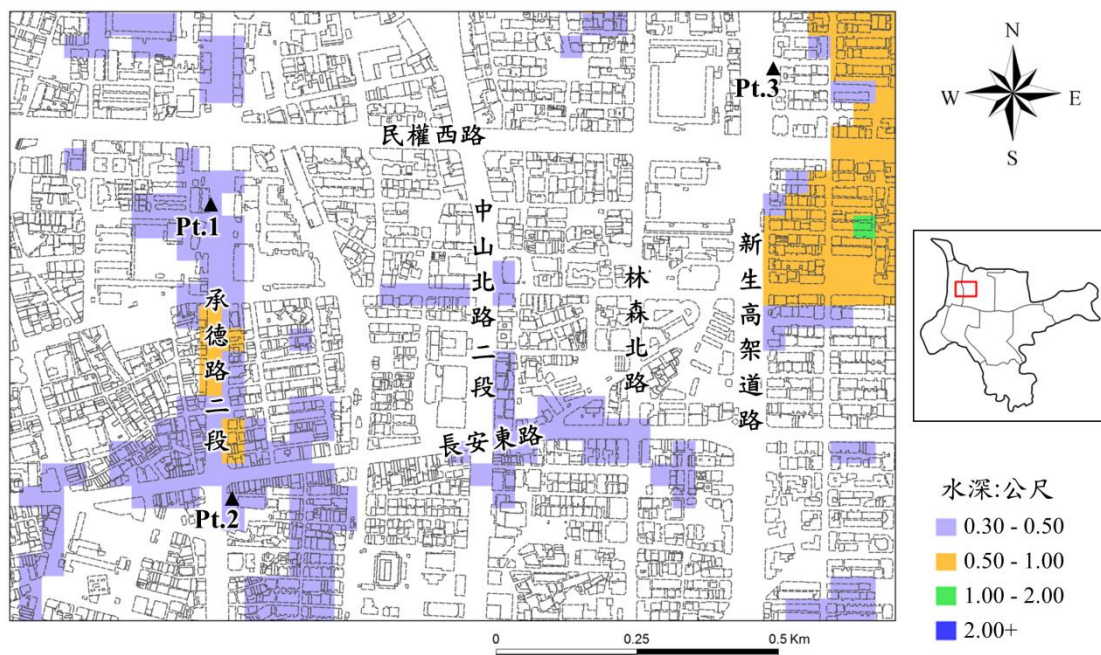


圖 4-47 納莉颱風中山大同區模擬最大淹水深(情境 A)



圖 4-48 納莉颱風中山大同區模擬最大淹水深(情境 B)

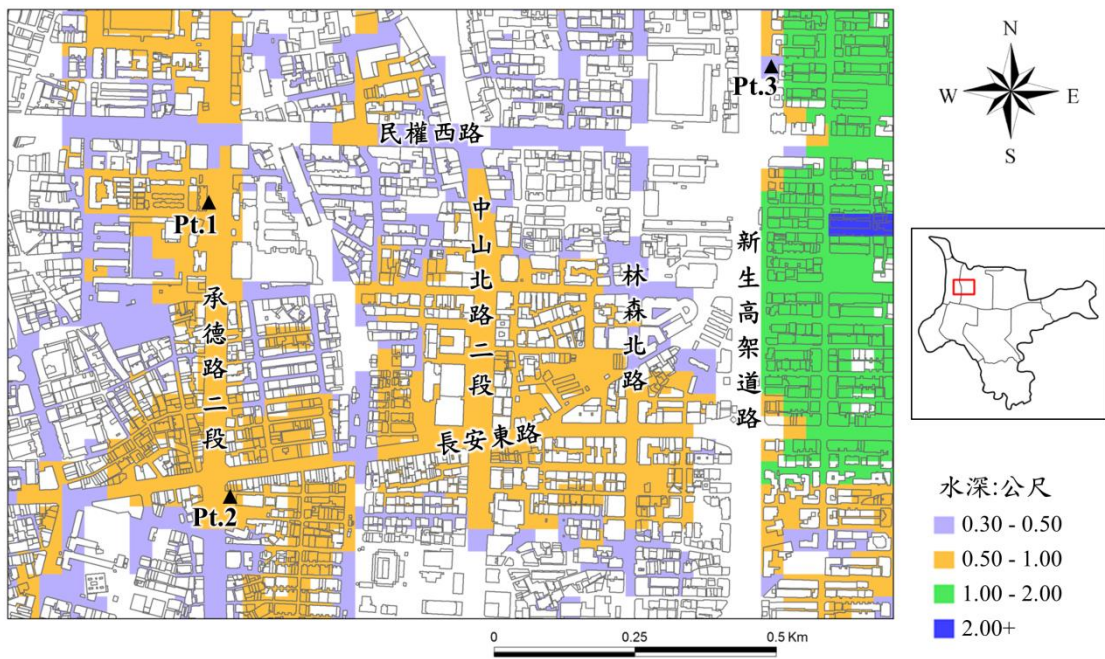
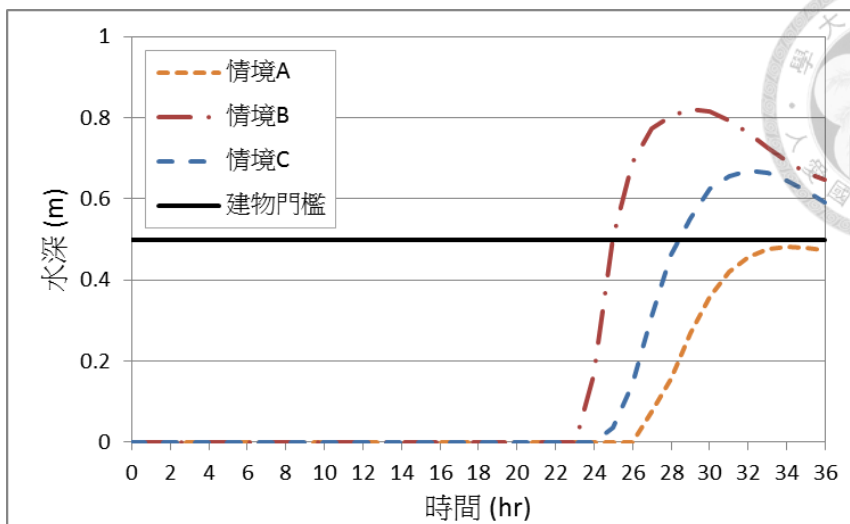
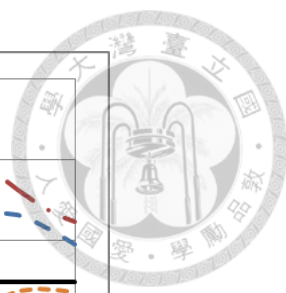
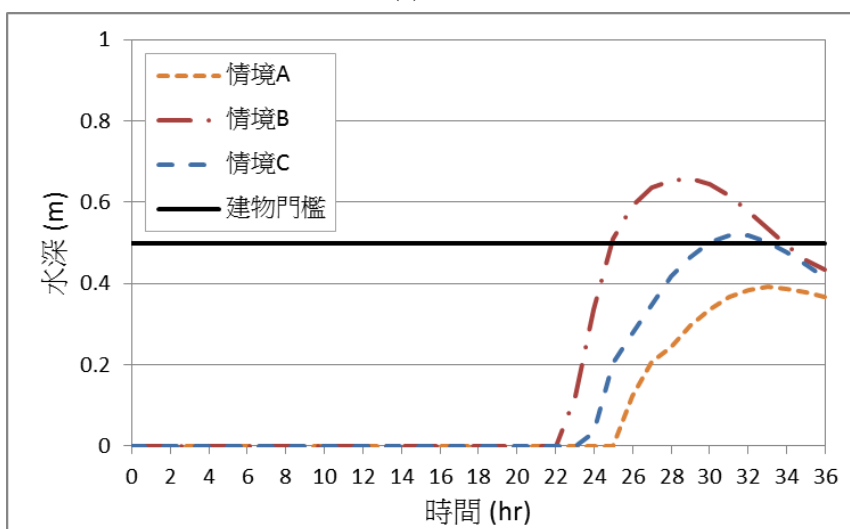


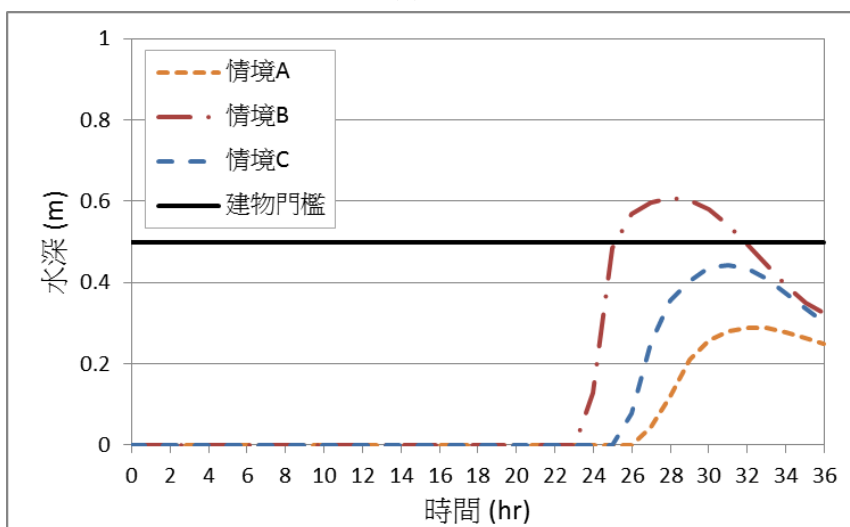
圖 4-49 納莉颱風中山大同區模擬最大淹水深(情境 C)



(a)Pt. 1



(b)Pt. 2



(c)Pt. 3

圖 4-50 觀測點逐時淹水深歷線

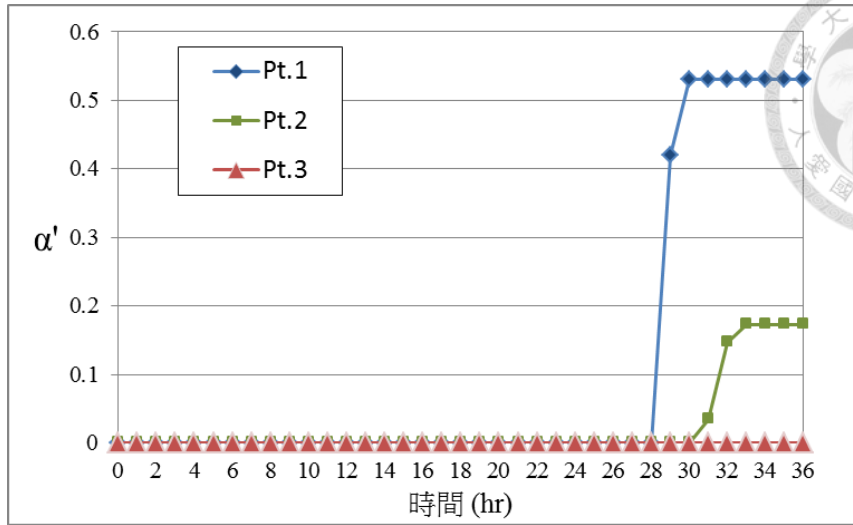


圖 4-51 觀測點建物進水面積比 α' 變化圖(情境 C)



第五章 模式應用



由第四章之模式檢定驗證結果可知，本文所發展之都市淹水模式已可反應建物對淹水的影響，故進一步將其應用於曾文溪流域，以粗細網格進行曾文溪流域之淹水模擬，並評估其精度及計算效率。

5-1 研究區域

曾文溪位於臺灣南部，為臺灣第四大河川，屬於中央管河川，其發源於嘉義縣阿里山山脈之水山(標高 2,609 公尺)，全長約 138.5 公里，流域面積 1,176.7 平方公里。上游山區地勢陡峭、河道蜿蜒流經嘉義與高雄交界之河谷後，流入曾文水庫，水庫下游河段，流經山上與大內兩區之間進入嘉南平原，最終於台南市安南區西北方流入台灣海峽，主要支流有後堀溪、菜寮溪、官田溪等溪流，此三條支流並分別建有南化、鏡面與烏山頭水庫，上游曾文水庫亦為全臺灣最大水庫，因此曾文溪擁有著豐富之水力資源，為臺灣南部地區重要的水資源來源。

曾文溪中游段，經過地勢平坦之嘉南平原地區，河床淤積嚴重，洩洪能力較差，每遇颱風豪雨易氾濫成災，針對現況洪災成因，採以築堤禦洪、導洪為主，河道整治為輔，下游河段之防洪工程已具規模，應配合洪氾區之管制，將土地作適當利用。曾文溪為嘉南地區最大之河川，主流堤防採 100 年重現期洪峰流量設計，河口計畫洪峰流量為 9,200 立方公尺/秒。

本文模擬選定曾文溪北岸區域進行淹水模擬，其範圍南至曾文溪，北至急水溪，位於曾文溪流域之大臺南地區，隨著人口增加、都市發展，已於民國 99 年台南縣市合併升格改制為直轄市。大臺南地區常以曾文溪為界，劃分溪北、溪南地區。溪南地區較為原台南市區，大多為都會區型態；溪北則較近農村聚落，北岸即為本文之研究區域，曾文溪北岸模擬區行政區域範圍如圖 5-1 所示，包含東山區、柳營區、六甲區、官田區、大內區、鹽水區、下營區、麻豆區、學甲區、佳里區、西港區、北門區、將軍區、七股區等 14 個行政區，總面積約 650 平方公里。



區域內水系分布如圖 5-2，主要水系有將軍溪及七股溪，其中將軍溪上游麻豆大排由東流經整個區域後匯入將軍溪，七股溪位於區域西南方，匯入支流樹林溪及三股溪後流入台灣海峽。

由於曾文溪北岸主要為農村聚落之型態，模擬區內普遍為農業用地，人口密集之聚落則零散分佈於模擬區中。因此針對曾文溪北岸各行政區人口密集以及淹水受災較脆弱之區域，本文特別加以選定劃分，作為局部細化之區域，針對這些重點區域進行局部細化模擬。

曾文溪北岸模擬區局部細化地區，總共選定六區，如圖 5-1 所示，六區分別為佳里區、麻豆區、下營區、西港區、學甲區及七股區。根據台南市政府戶政事務所 103 年 2 月統計之戶口資料，本文六區局部細化區域各區人口資料整理如表 5-1 所示，其中佳里、麻豆、學甲等區為本模擬區人口較密集之區域，而下營、西港、七股則為地勢較低窪易淹水之地區，針對這些區域進行局部細化網格模擬，加強重點脆弱地區模擬，達到更準確預測淹水潛勢之目的。

表 5-1 曾文溪北岸局部細化模擬區域人口資料(照人口數排序)

行政區	戶數	人口數
佳里區	20,036	59,403
麻豆區	15,422	45,211
學甲區	9,658	27,146
下營區	9,118	25,245
西港區	7,950	24,879
七股區	8,118	23,820

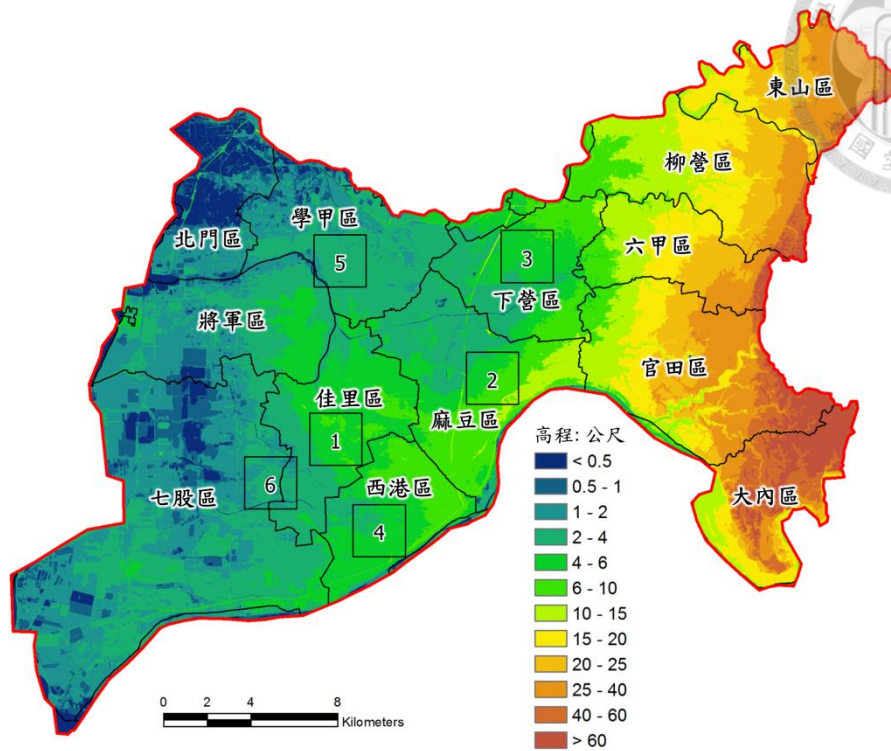


圖 5-1 曾文河流域數值地形高程及局部細化分區

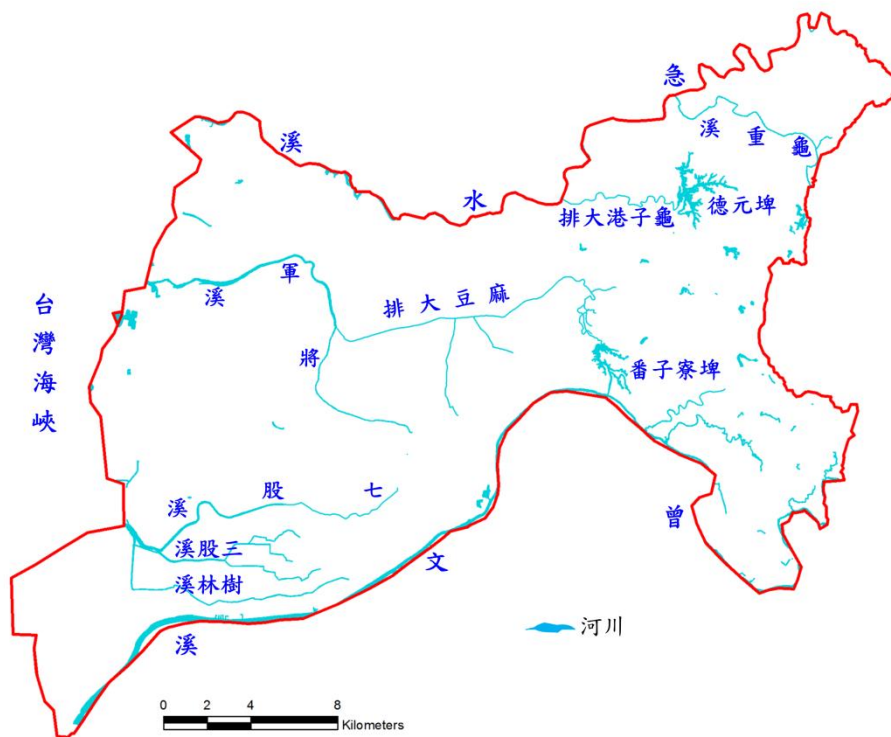


圖 5-2 曾文溪北岸水系圖



5-2 地文資料

地形 DTM 資料採用國立中央大學太空及遙測研究中心提供之資料，其資料型態為 ASCII 碼，資料內容含各點之 UTM 國際座標與高程資料。本文將網格解析度 40 公尺 × 40 公尺網格之數值地形高程資料，將其進行空間之算數平均成網格解析度 200 公尺 × 200 公尺網格進行全區大尺度粗網格資料建置，地表數值高程如圖 5-1 所示，曾文溪北岸全區模擬區共計 15,248 個 200 公尺模擬網格，40 公尺模擬網格共 381,199 個。

而局部細化區域，針對人口密集以及易淹之脆弱地區選定六區進行細部演算，分別為佳里區、麻豆區、下營區、西港區、學甲區、七股區等六個細化模擬區域。由於平行演算法各執行緒演算時間須盡量調整一致，才能保持平行演算能達到最佳同步演算效率。因此為使細化網格有相近之演算時間，針對此六區細化區域，模擬區同樣設定為 2.4 公里 × 2.4 公里之正方形區域，細化網格解析度為 40 公尺 × 40 公尺網格，每個局部細化模擬區皆包含 3,600 個模擬算網格，曾文溪北岸模擬區，六區局部細化區域個別之地表數值高程如圖 5-3 所示。

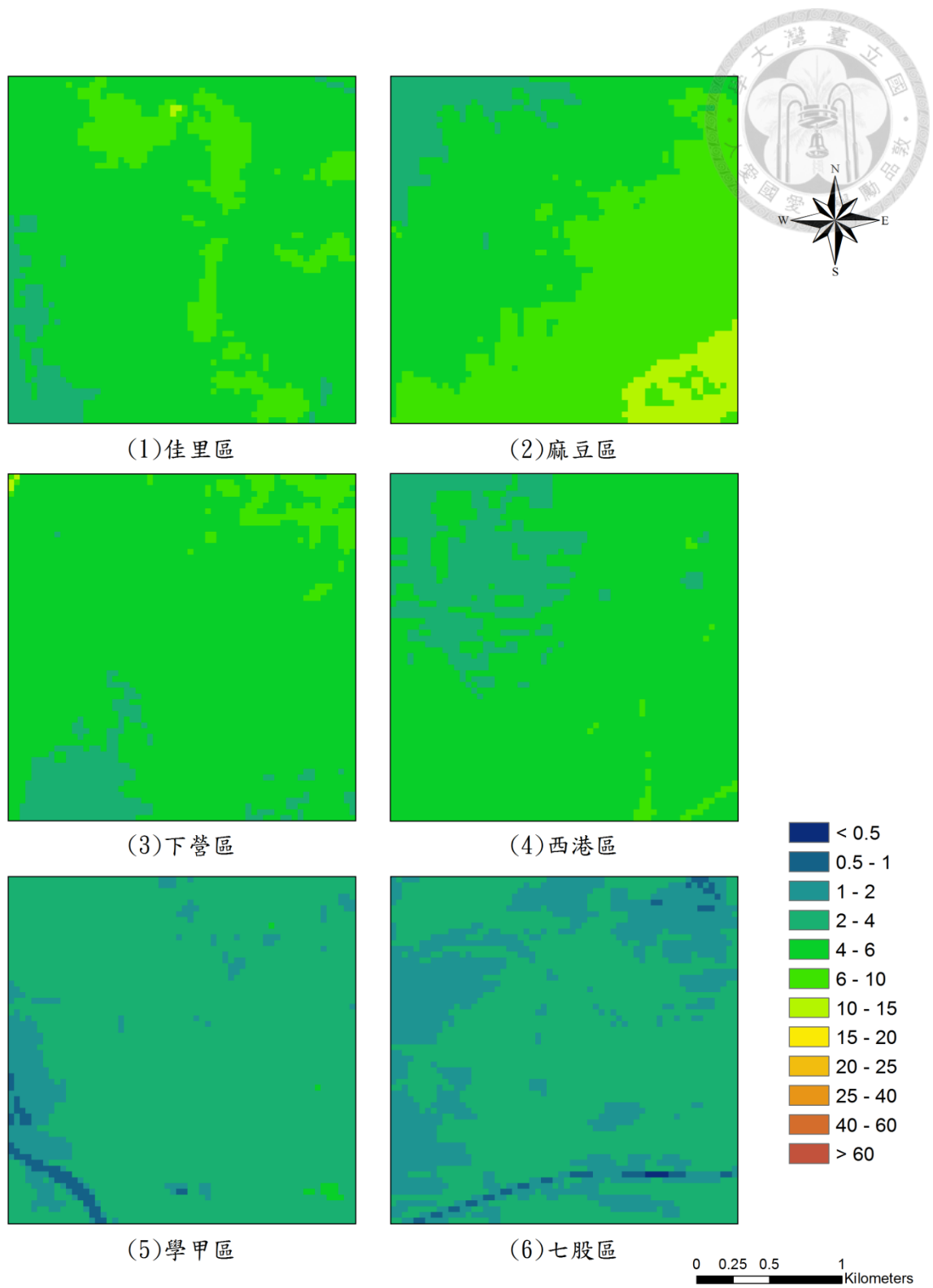


圖 5-3 曾文溪北岸局部細化分區數值地形

曾文溪北岸採用的地表曼寧糙度是根據內政部地政司之台灣省國土利用現況調查數化分類，經使用地理資訊系統將網格與土地利用分區資料加以套疊後進行計算，其中各模擬網格之曼寧糙度值由其網格點所在之土地利用狀況決定，曾文溪北岸土地利用分區如圖 5-4，各土地利用型態所使用之曼寧糙度值如表 5-2 所示。各網格點之建蔽率則由網格內建物面積佔全部網格面積的比例進行計算，各行政區之網格平均建蔽率值如表 5-3 所示，建蔽率值愈高表示此行政區建物所遮蔽之面積佔地表面積比例愈高，由表中可看出，曾文溪北岸之建物及人口多集中於各行政區之市集中心處，故全區建蔽率除佳里區外都小於 0.10，而六個細化分區之範圍選定為其建物集中的區域，故其建蔽率均較其全區建蔽率有顯著增大的趨勢。在建物門檻值之設定上，本文為進行粗細網格局部細化區與全區細網格之比較評估，故設定建物都為不進水之狀況。

表 5-2 曾文溪北岸土地利用及曼寧糙度值

土地利用	曼寧糙度值
農業用地	0.13
交通用地	0.13
水利用地	0.10
建築用地	0.20
工業用地	0.20
遊憩用地	0.13
鹽業用地	0.10
土石用地	0.13
軍事用地	0.13
其他	0.13



表 5-3 曾文溪北岸各行政區平均建蔽率

行政區	細化區建蔽率 α_0	全區建蔽率 α_0
佳里區	0.25	0.11
麻豆區	0.29	0.10
下營區	0.17	0.07
西港區	0.13	0.08
學甲區	0.18	0.07
七股區	0.14	0.04
北門區	-	0.05
將軍區	-	0.05
東山區	-	0.06
柳營區	-	0.06
六甲區	-	0.06
官田區	-	0.04
大內區	-	0.03
全區	-	0.06

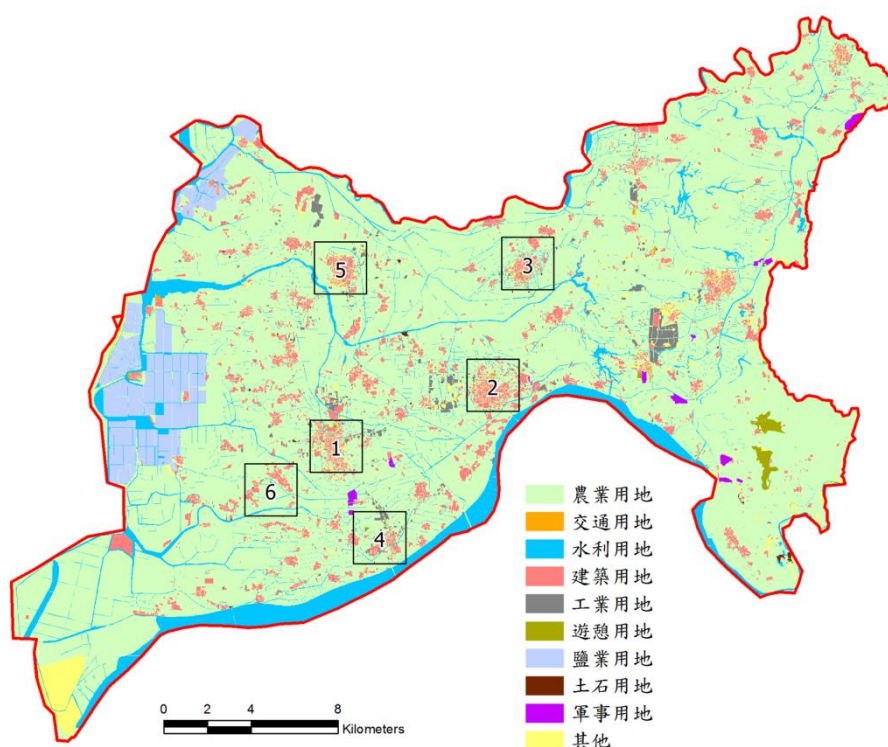


圖 5-4 曾文溪北岸土地利用分區圖



5-3 雨量資料

曾文溪流域，位處副熱帶季風氣候與熱帶氣候之過渡帶，全年平均氣溫為 23.8℃。年平均降雨量約 1,570mm。冬季水氣不足屬於旱季，雨量則多集中於夏季，主要因鋒面及季風影響，佔全年降雨量 80% 以上，且西南季風盛行，以及熱對流作用，午後易生局部性對流雨。夏季為颱風易發生時期，豐沛之雨量往往對曾文溪中下游平原地區造成嚴重之水患。

本文選用 2009 年 8 月，重創台灣南部地區之莫拉克颱風為模擬事件，採用中央氣象局及水利署於莫拉克颱風期間完整記錄之雨量站資料，最大降雨期間為 2009 年 8 月 7 日 14 時至 2009 年 8 月 9 日 13 時共計 48 小時，曾文溪北岸共計十三座雨量站，分別為北門、佳里、七股寮、七股、和順、下營、善化、新營、大內、白河、東河、王爺宮、環湖。各雨量站莫拉克颱風 48 小時累積降雨量如表 5-4 所示，本文以徐昇氏分區進行曾文溪北岸之雨量分布計算，其雨量站之徐昇氏分區如圖 5-5 所示，而各雨量站逐時降雨組體圖如圖 5-6 至圖 5-18 所示，由雨量資料可知，每座雨量站之尖峰 24 小時累積雨量皆遠超過氣象局超大豪雨標準 (extremely torrential rain) 之 350mm。其中環湖雨量站於第 34 小時(8 月 8 日上午 23 時)之降雨強度 90 mm/hr 為各雨量站記錄之冠，48 小時之總雨量 992.5 mm，亦為十三座雨量站之最高記錄。

莫拉克颱風於曾文溪北岸平地地區帶來超大豪雨雨量外，暴雨也造成上游山區之洪水，洪水波經由山區逕流流入平地模擬區，亦為模擬區淹水不可忽略之因素，原乾枯缺水曾文水庫，集水區於莫拉克颱風期間挾帶超過 2,000mm 超大豪雨灌滿庫容，至 8 日下午 9 時起洩洪量隨上游流量匯入後逐步增大，至 9 日凌晨曾文水庫達到有史以來最高洩洪量 8,376cms，以致下游兩岸低窪地區、部落紛傳災情，其入流量、排洪量如圖 5-19 所示，本文在進行莫拉克颱風事件之模擬時，流入曾文溪之河川邊界條件，設定為因曾文溪水位高漲，而無法經由重力排水排至曾文溪的情況，同時不考慮曾文溪溢堤之情形。上游山區逕流部份，採用美國陸

軍工兵團所發展之 HEC-1 模式，配合山區集水區面積、形狀、坡度等地形特性，計算逕流量，並將山區逕流歷線提供為都市淹水模式之上游入流邊界條件。

表 5-4 曾文溪北岸莫拉克颱風總雨量及尖峰降雨

雨量站	總降雨量 (mm)	尖峰 24 小時 累積雨量(mm)	尖峰降雨 (mm/hr)
北門	575.0	409.0	72.5
七股	650.5	528.5	58.0
佳里	779.0	578.0	85.5
七股寮	839.5	668.5	79.0
和順	594.5	446.5	54.0
下營	750.0	590.5	66.0
善化	724.5	552.5	53.0
新營	722.5	520.0	46.5
大內	969.0	735.0	76.0
白河	752.5	586.0	49.5
東河	821.0	651.5	45.5
王爺宮	848.5	643.0	72.0
環湖	992.5	757.5	90.0

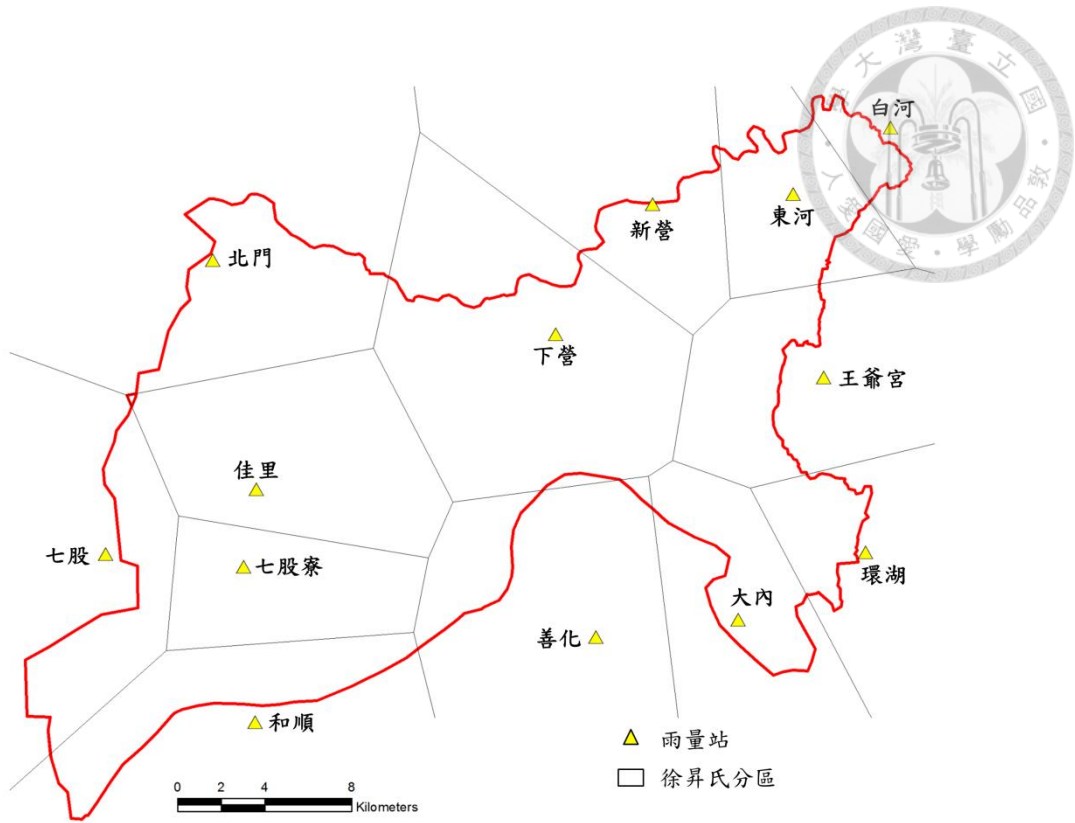


圖 5-5 曾文溪北岸雨量站及徐昇氏分區圖

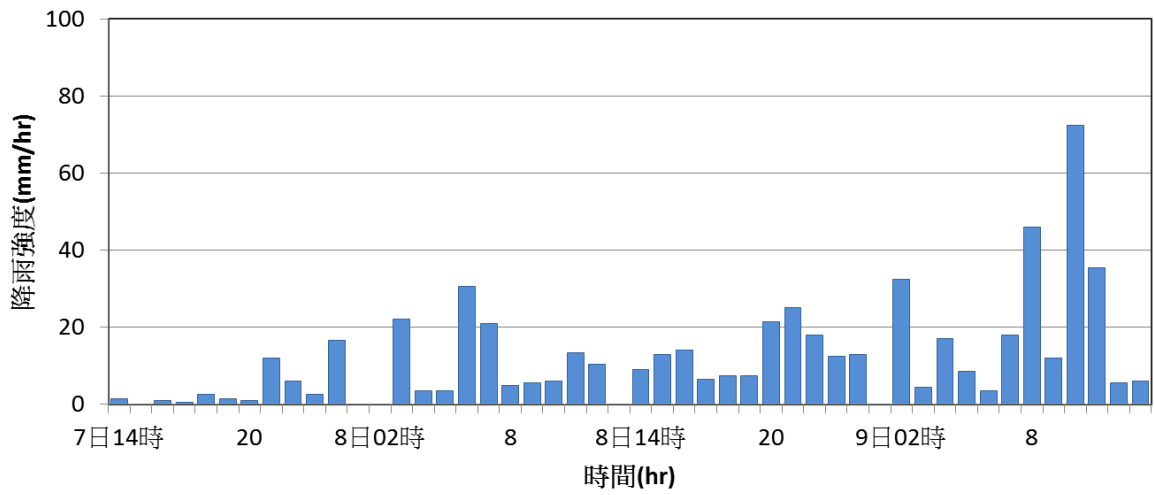


圖 5-6 曾文溪流域北門雨量站莫拉克颱風降雨組體圖

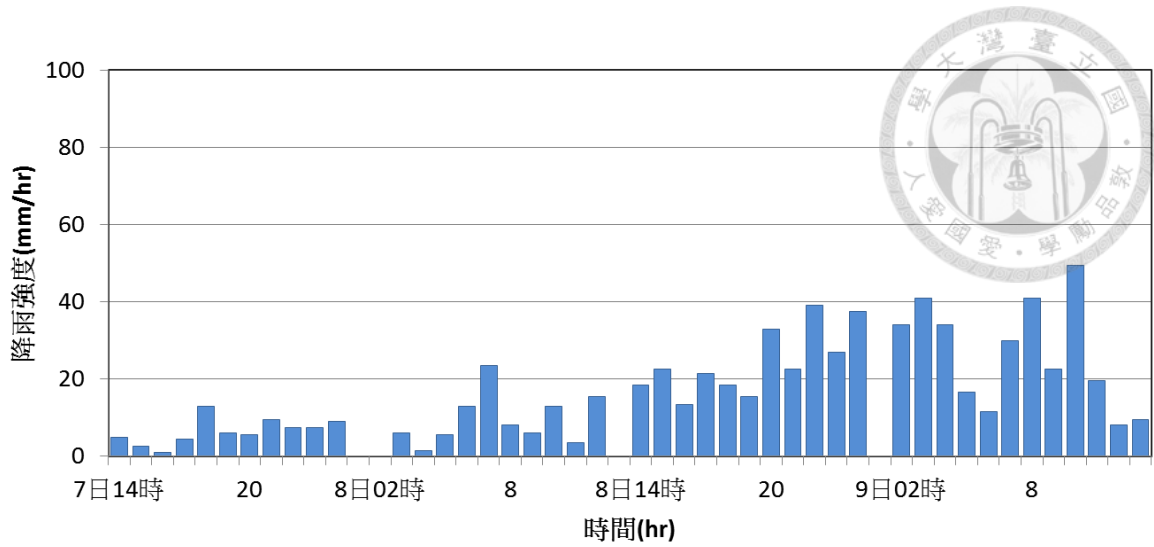


圖 5-7 曾文河流域七股雨量站莫拉克颱風降雨組體圖

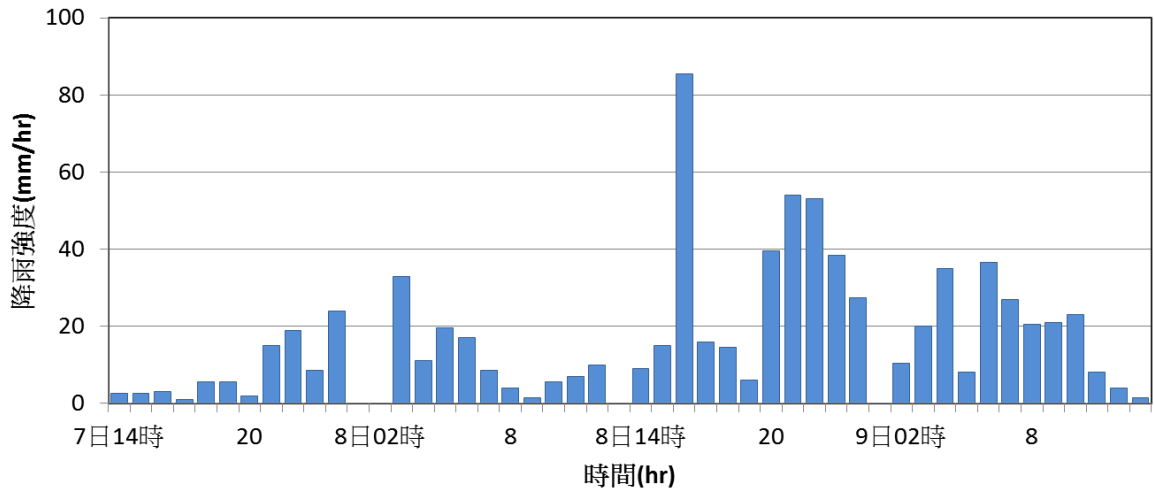


圖 5-8 曾文河流域佳里雨量站莫拉克颱風降雨組體圖

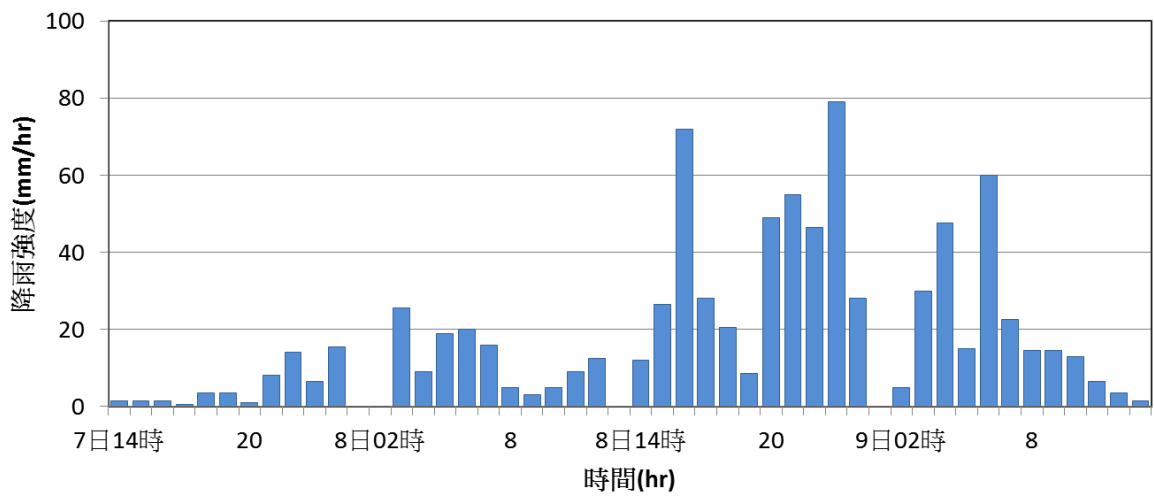


圖 5-9 曾文河流域七股寮雨量站莫拉克颱風降雨組體圖

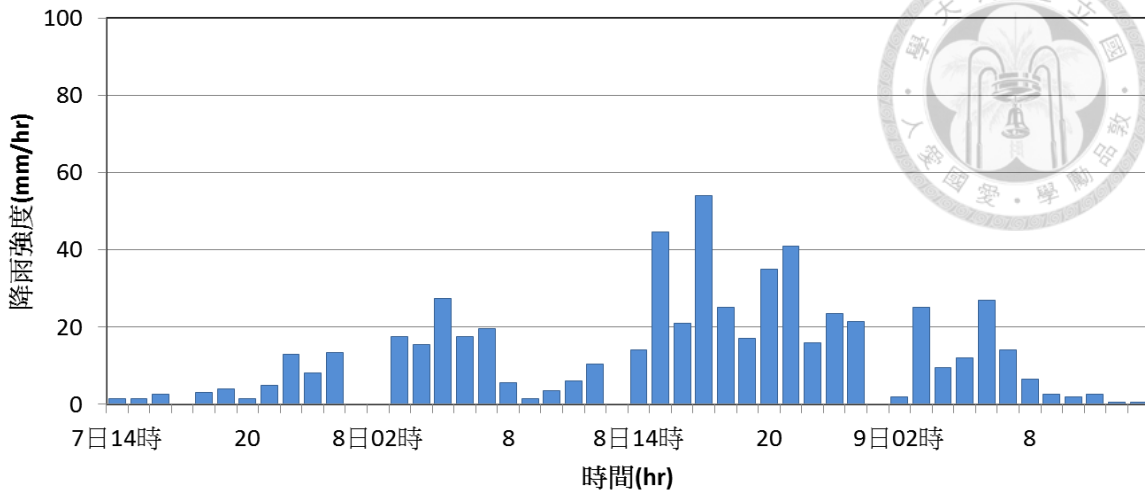


圖 5-10 曾文河流域和順雨量站莫拉克颱風降雨組體圖

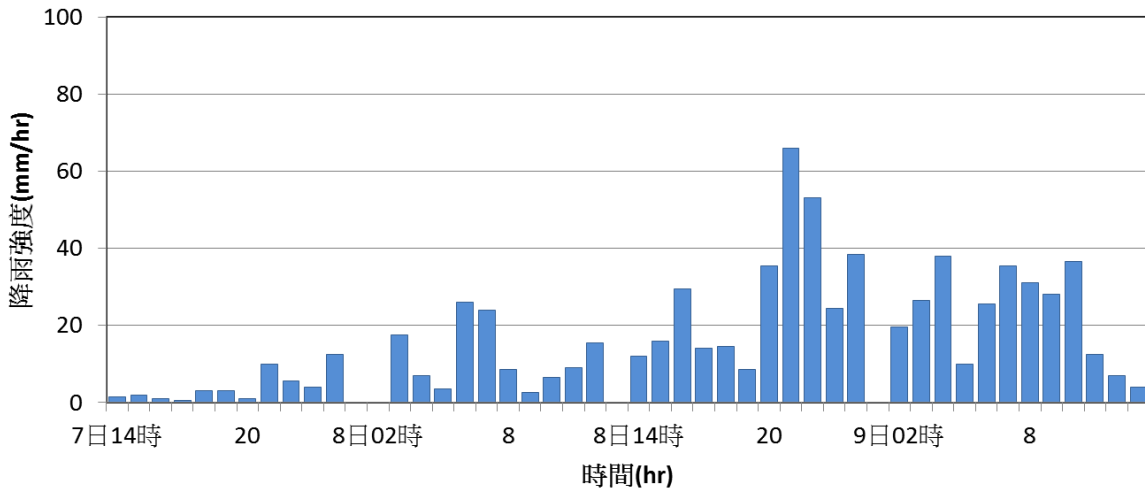


圖 5-11 曾文河流域下營雨量站莫拉克颱風降雨組體圖

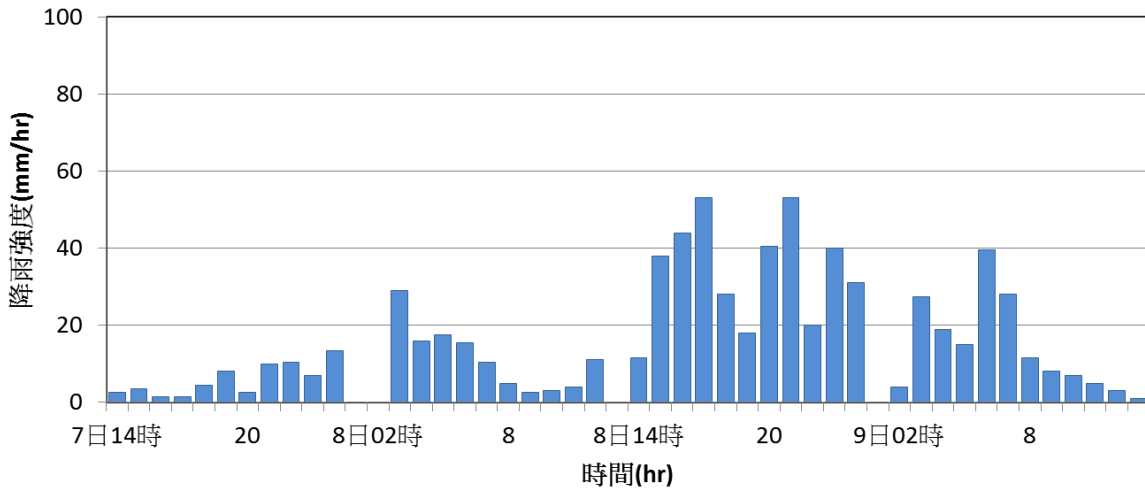


圖 5-12 曾文河流域善化雨量站莫拉克颱風降雨組體圖

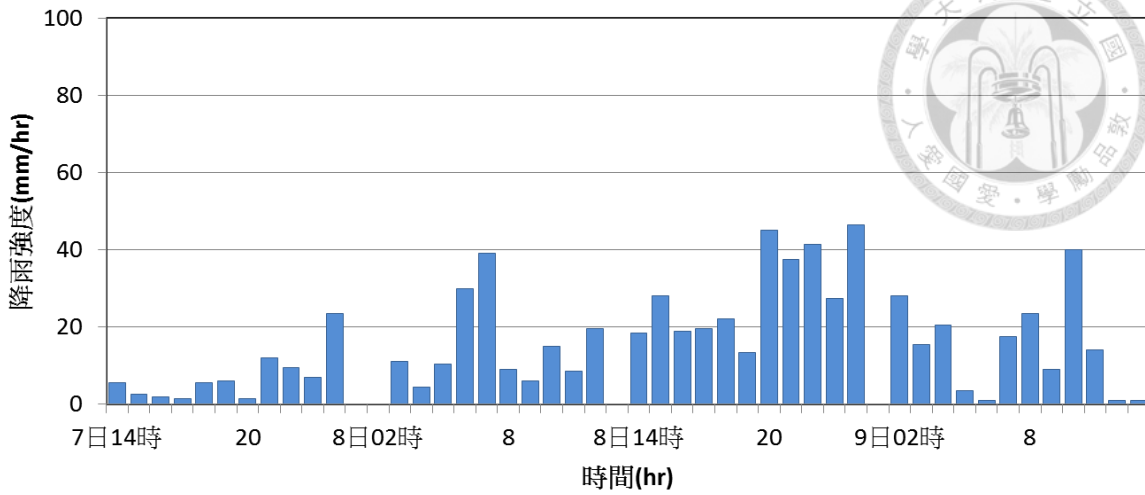


圖 5-13 曾文溪流域新營雨量站莫拉克颱風降雨組體圖

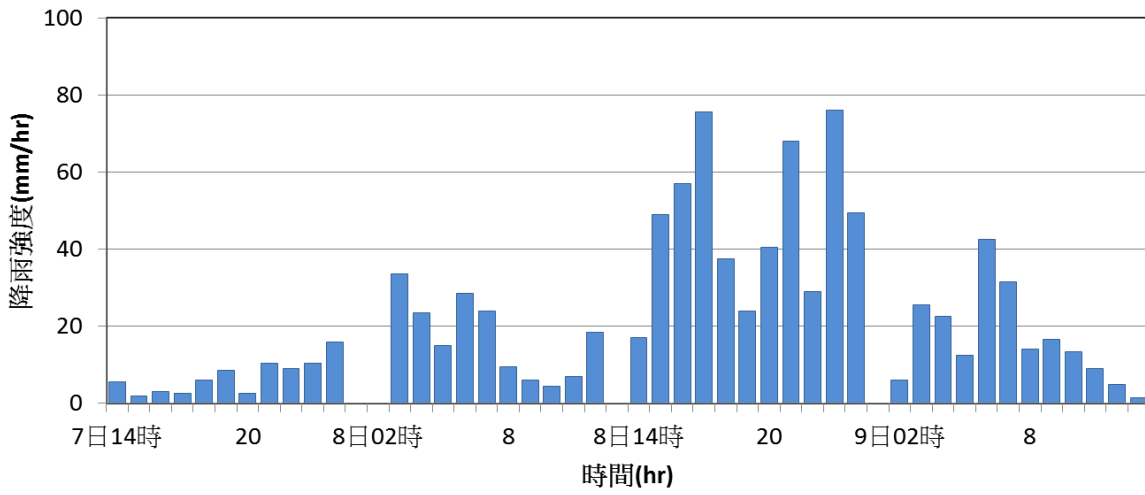


圖 5-14 曾文溪流域大內雨量站莫拉克颱風降雨組體圖

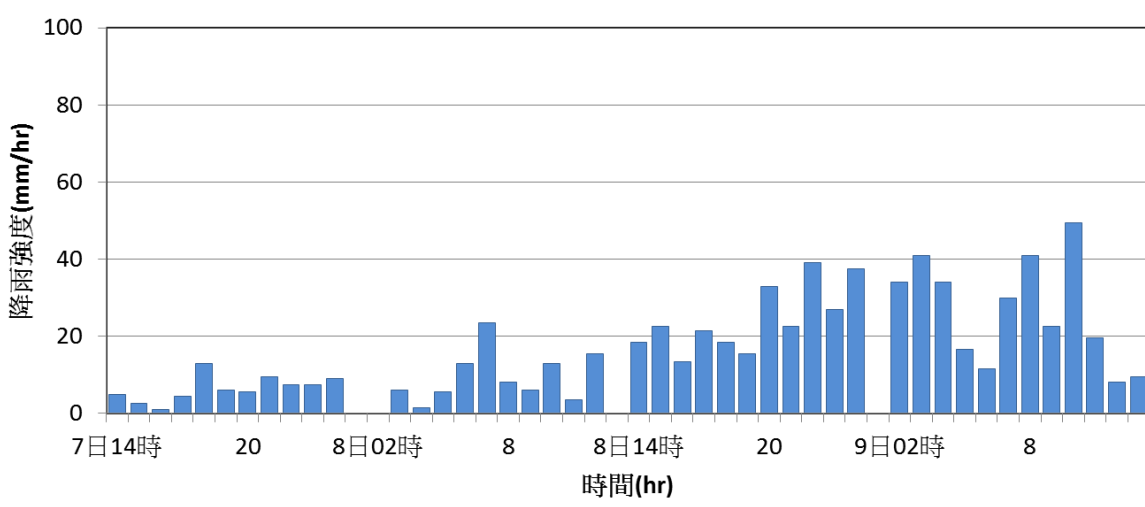


圖 5-15 曾文溪流域白河雨量站莫拉克颱風降雨組體圖

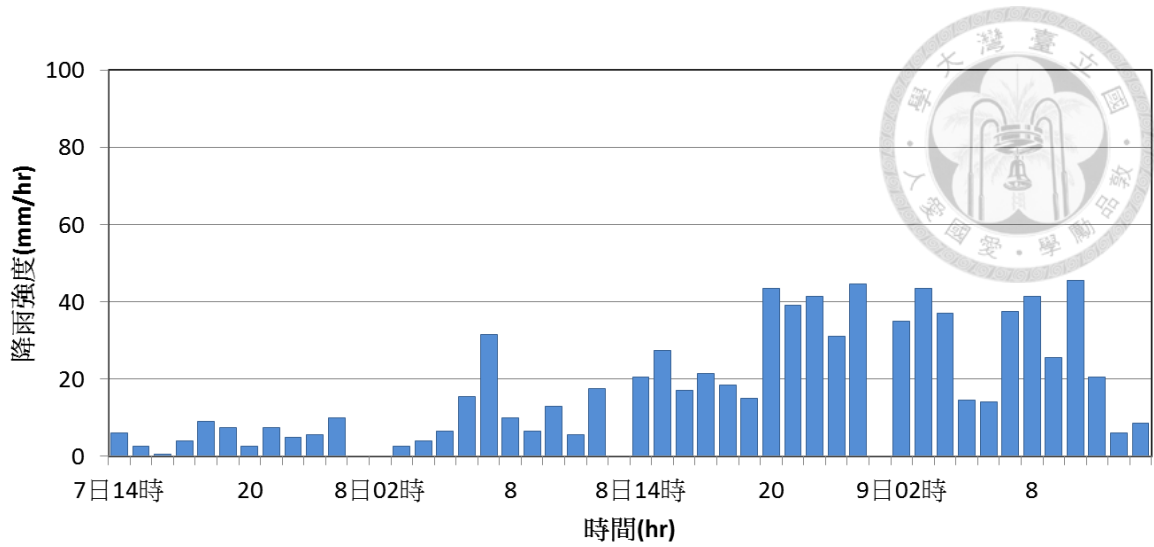


圖 5-16 曾文河流域東河雨量站莫拉克颱風降雨組體圖

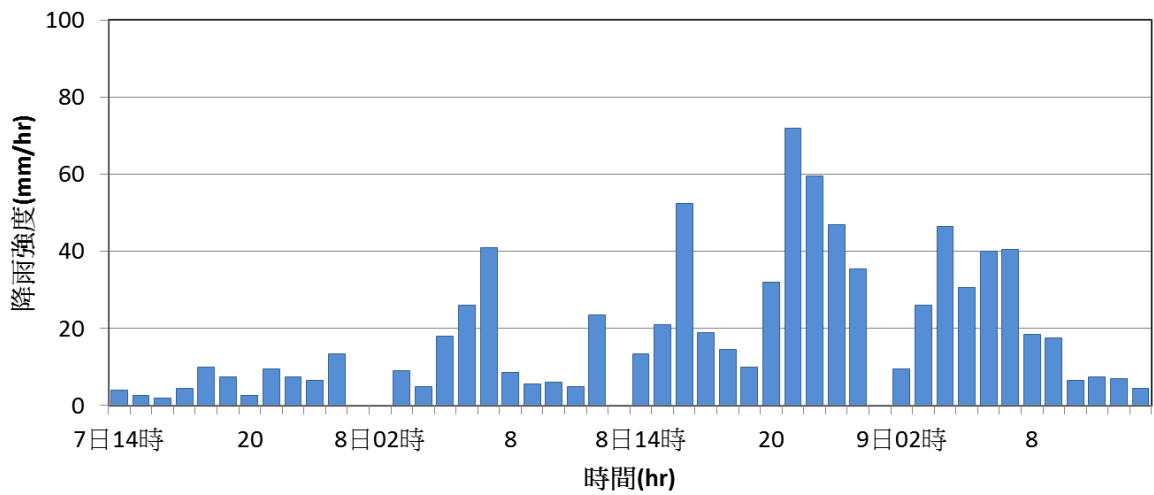


圖 5-17 曾文河流域王爺宮雨量站莫拉克颱風降雨組體圖

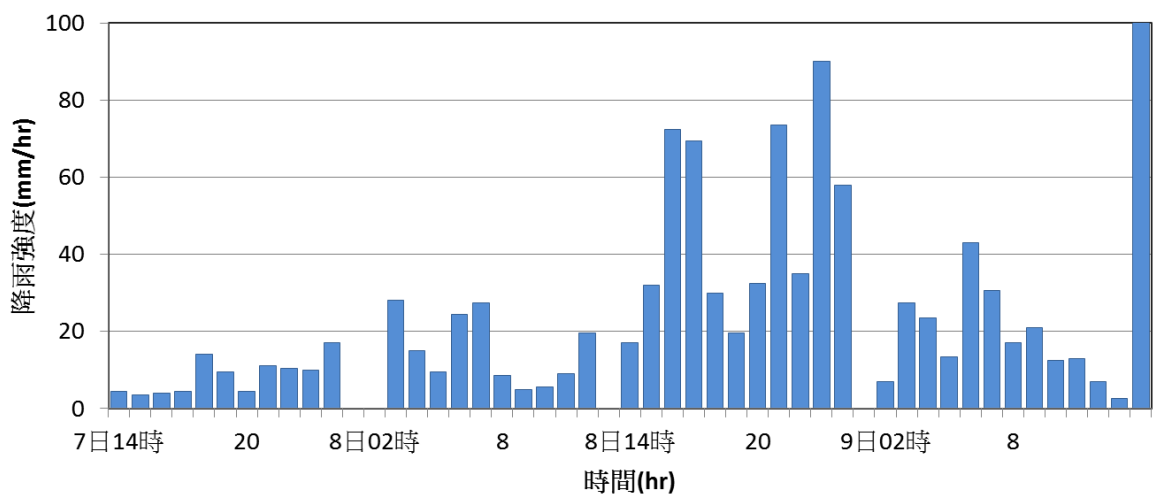


圖 5-18 曾文河流域環湖雨量站莫拉克颱風降雨組體圖

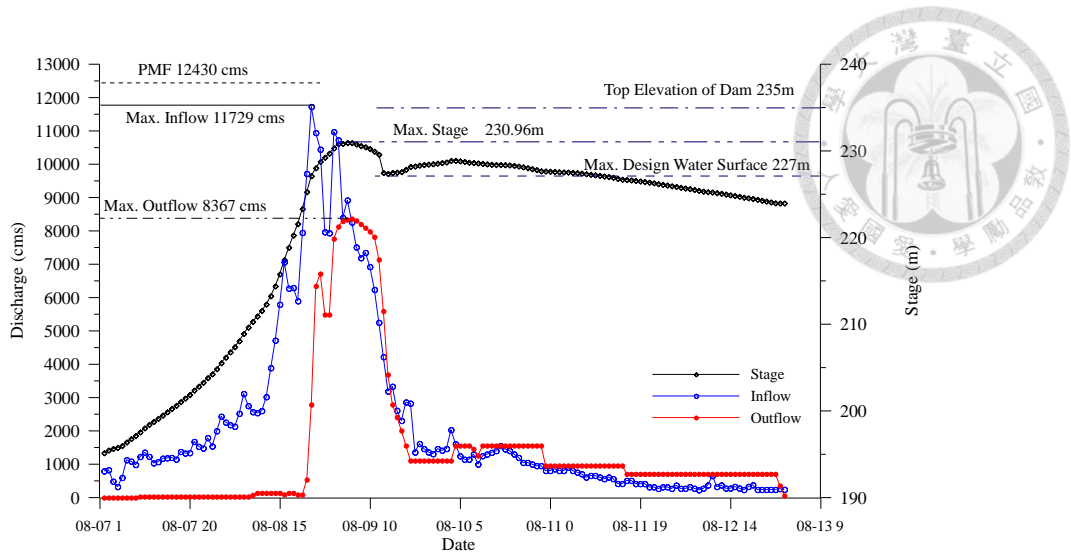


圖 5-19 莫拉克颱風期間曾文水庫入流量、排洪量及水位示意圖

5-4 模擬結果與討論

2009 年 8 月 7 日至 8 月 9 日，在莫拉克颱風侵襲下，對台灣南部地區創下嚴重之災情，也在本文案例曾文溪北岸地區造成嚴重之淹水損失，圖 5-20 為莫拉克風災水利署所調查之淹水範圍，為淹水超過 0.5 公尺所涵蓋的區域，此淹水資料可作為都市淹水模式最大淹水深之比較依據。

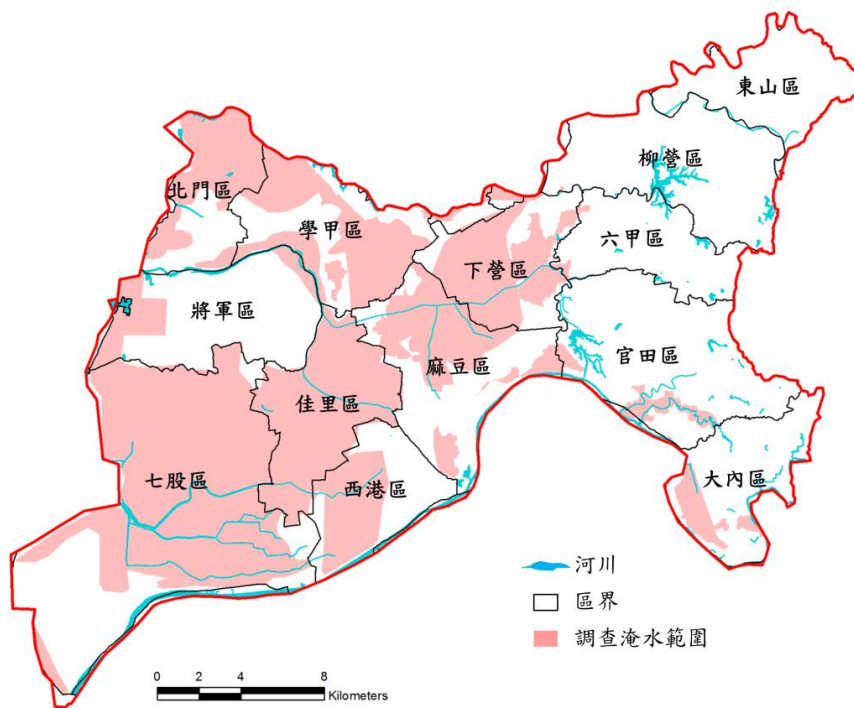


圖 5-20 曾文溪北岸莫拉克颱風調查淹水範圍



5-4-1 局部細化區域模擬結果評估方式

本文在全區使用解析度 200 公尺×200 公尺之淹水計算網格中搭配局部細化模擬區域使用解析度 40 公尺×40 公尺之淹水計算網格，每個局部細化模擬區內包含 3,600 個網格解析 40 公尺之網格點。在準確度驗證上，本文同時模擬全區使用解析度全區 40 公尺×40 公尺網格之模擬結果與局部細化模擬結果進行比較，同樣採用均方根誤差 $RMSE$ 與 R^2 (相關係數平方值) 做為評比指標，進行統計分析時，(4-1)及(4-2)式中， d_1 為全區 40 公尺網格點淹水深[m]； d_f 為局部細化區 40 公尺網格點淹水深[m]； N 為網格點數目。

在效率度(Efficiency)方面，本文使用系統加速比 S_r (Speed-up Ratio) 作為效率度提升之指標，計算方式是以粗細網格局部細化方法未平行化之前總演算時間當依據，除以平行演算法後所需之總演算時間。系統加速比代表了處理器平行運算之後效率提升的能力，可用來衡量程式平行化後之性能與效果，為計算機結構性能設計與評測之基本衡量方法。

$$S_r = \frac{T_0}{T_h} \quad (5-44)$$

式中， T_0 為未平行-多重網格法演算總執行時間[s]； T_h 為平行化-多重網格法演算總執行時間[s]； S_r 為系統加速比。

5-4-2 全區模擬結果比較

首先針對全區解析度 200 公尺之粗網格模擬結果作探討。本文同時針對全區解析度 40 公尺之細網格進行模擬，以比較網格解析度不同之差異。兩種解析度網格模擬皆以莫拉克颱風事件 48 小時降雨進行演算，演算結果如圖 5-21 至圖 5-28 所示，依序分別為全區 40 公尺網格及全區 200 網格模擬淹水第 12、24、36 及 48 小時之淹水圖。由圖可見模擬第 12 小時，各地局部低窪地區已開始積水，隨著雨量不斷增加，至第 36 小時，下營、麻豆、西港、七股等區已淹水嚴重，降雨及淹

水不斷累積至模擬第 48 小時，麻豆、下營市區甚至有超過一層樓(三公尺以上)之淹水，嚴重淹水情況至模擬結束仍未退去，可見颱風豪雨所帶來淹水災情之嚴重。

圖 5-29 及圖 5-30 則為全區解析度 40 公尺網格及全區解析度 200 公尺網格模擬最大淹水深圖，與調查淹水範圍比較，下營、學甲、麻豆和七股等區大範圍淹水與符合淹水調查趨勢，但全區 40 公尺網格之模擬結果，在下營區及麻豆區的淹水深相對來的嚴重，而學甲區及北門區之淹水則較全區 200 公尺網格輕微，主要原因為 40 公尺網格較容易呈現局部地形變化，淹水在上游蓄積於局部低窪地區，導致上游之淹水較下游嚴重，而全區 200 公尺網格由於平均高程影響，地表淹水較易傳播至下游低窪地區，造成下游較大之淹水深，由北門區及學甲區可看出此一特性。七股區及西港區內曾水溪沿岸低窪地區於莫拉克颱風期間曾因河川水位高漲及河川洪水溢淹造成重大淹水災情，本文因邊界條件設定而在此兩區有低估之情形。表 5-5 為各淹水深下之淹水面積統計，可看出全區 40 公尺網格之淹水總面積及各淹水深級距之淹水面積均稍大於全區 200 公尺網格之統計結果，其模式精度 0.67 也高於全區 200 公尺網格之 0.63。由此結果得知，全區 40 公尺網格與全區 200 公尺網格演算結果，兩者淹水模擬趨勢類似，然而 200 公尺粗網格明顯無法細緻的呈現淹水結果，而 40 公尺網格有較佳之精度卻需要冗長之計算時間。

表 5-5 曾文溪北岸莫拉克颱風不同網格大小之淹水面積(單位:公頃)

淹水深 (m)	全區 40 公尺網格	全區 200 公尺網格
0.5-1.0	10045.76	9972.00
1.0-1.5	15529.44	14944.00
1.5-2.0	5772.48	5576.00
大於 2.0	2277.92	1836.00
總面積	33625.60	32328.00
模式精度(P)	0.67	0.63

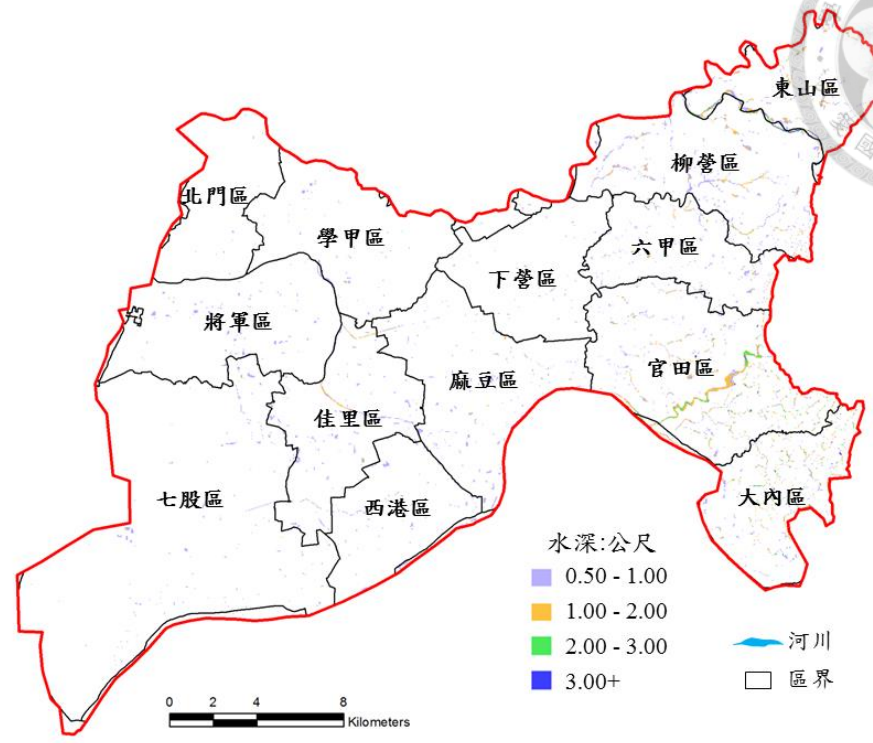


圖 5-21 莫拉克颱風曾文溪北岸全區 40 公尺網格第 12 小時淹水深圖

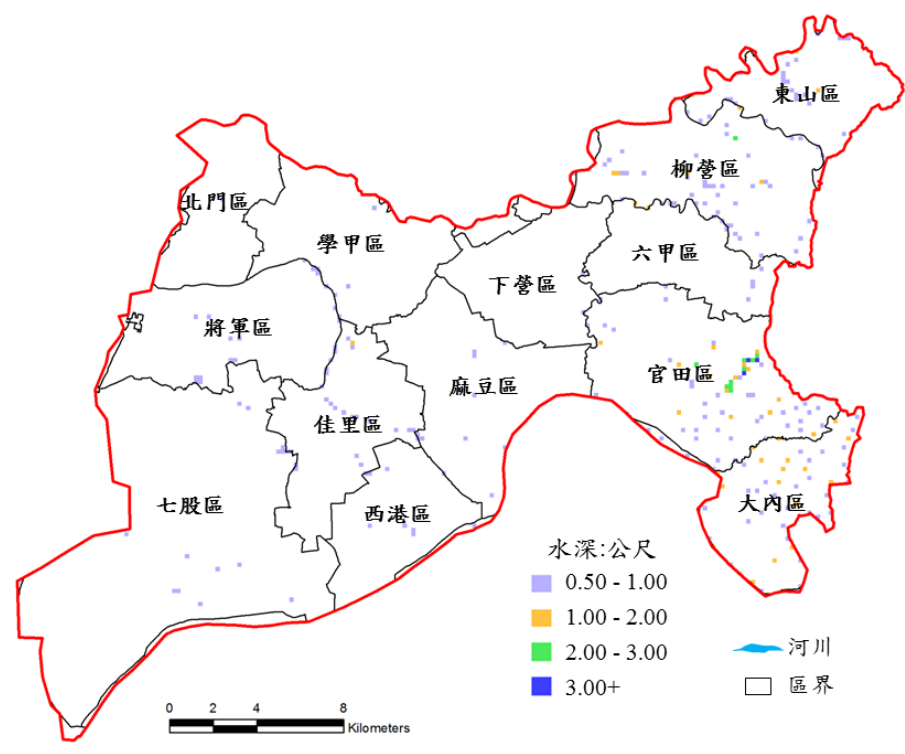


圖 5-22 莫拉克颱風曾文溪北岸全區 200 公尺網格第 12 小時淹水深圖

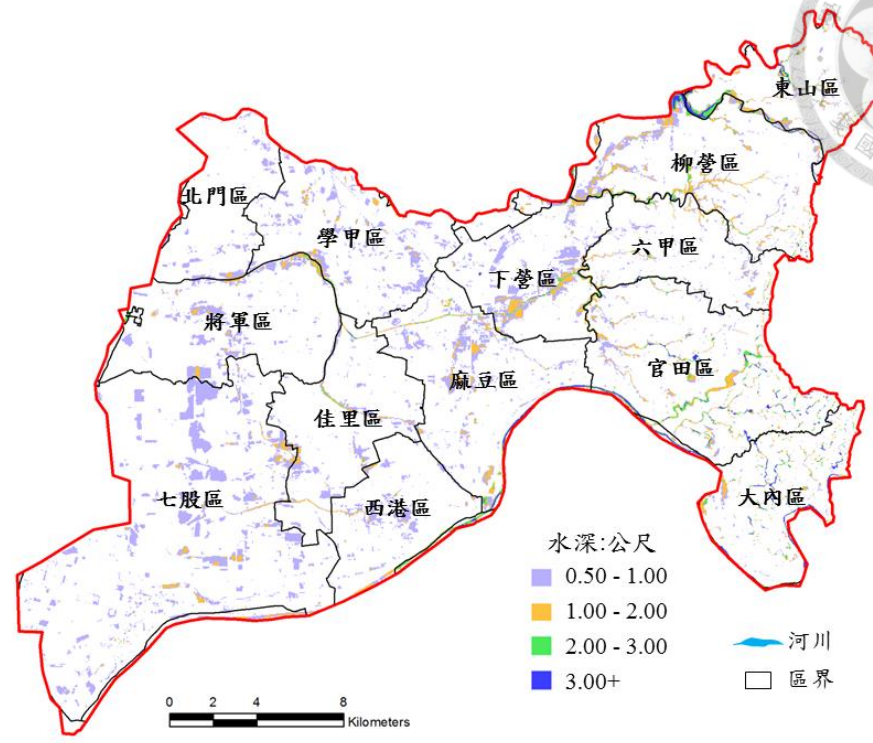


圖 5-23 莫拉克颱風曾文溪北岸全區 40 公尺網格第 24 小時淹水深圖

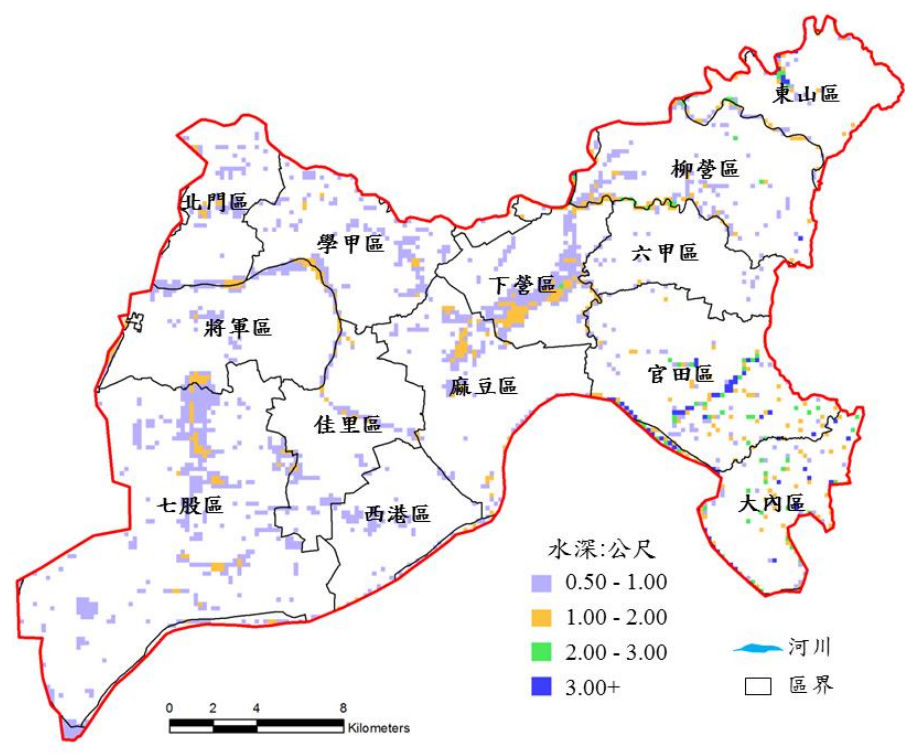


圖 5-24 莫拉克颱風曾文溪北岸全區 200 公尺網格第 24 小時淹水深圖

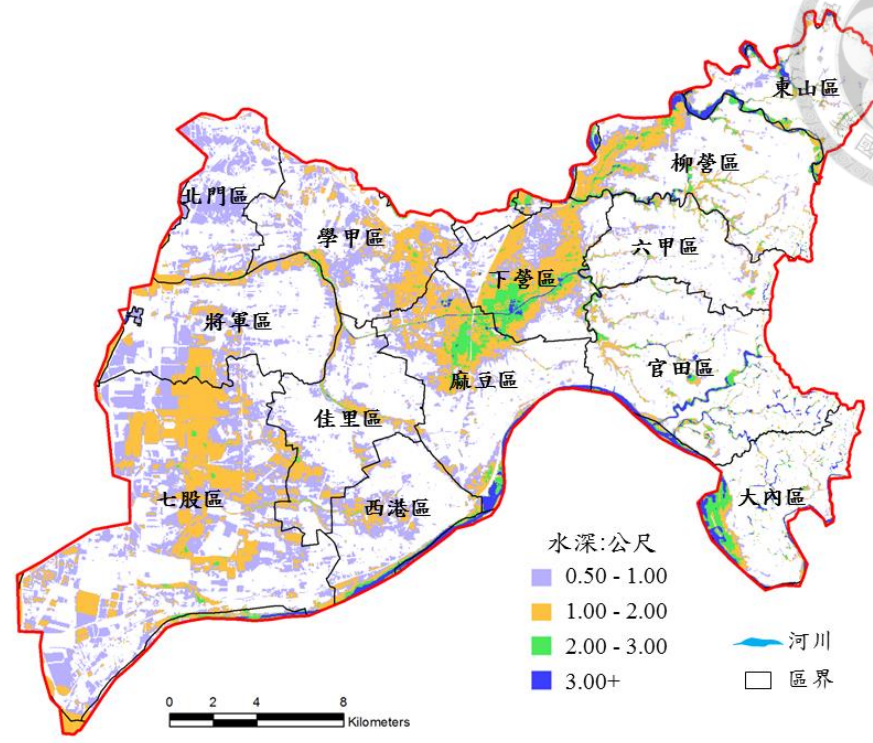


圖 5-25 莫拉克颱風曾文溪北岸全區 40 公尺網格第 36 小時淹水深圖

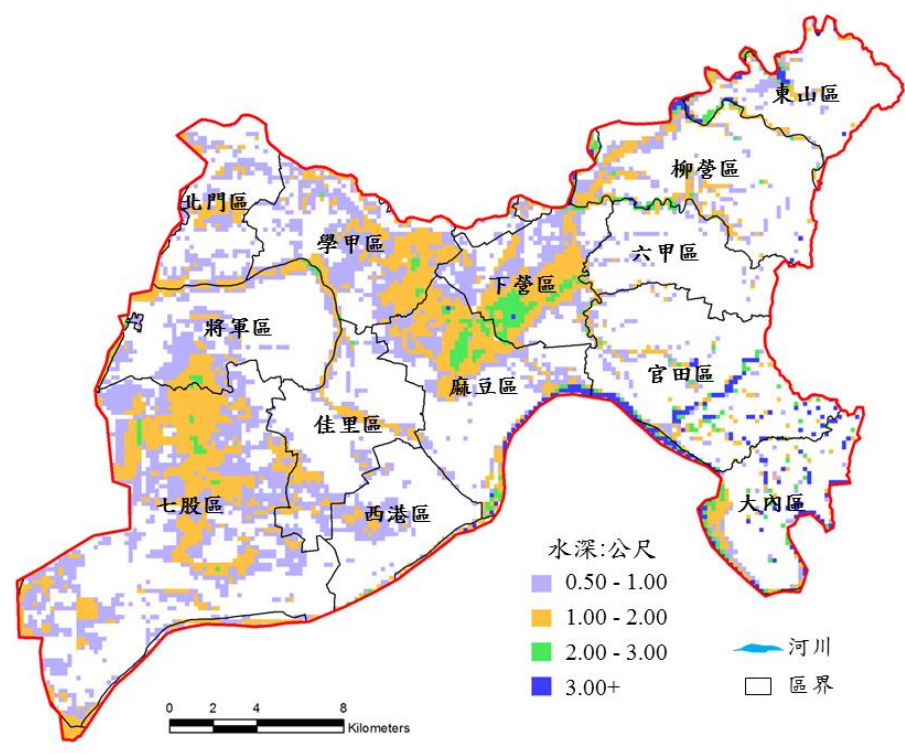


圖 5-26 莫拉克颱風曾文溪北岸全區 200 公尺網格第 36 小時淹水深圖

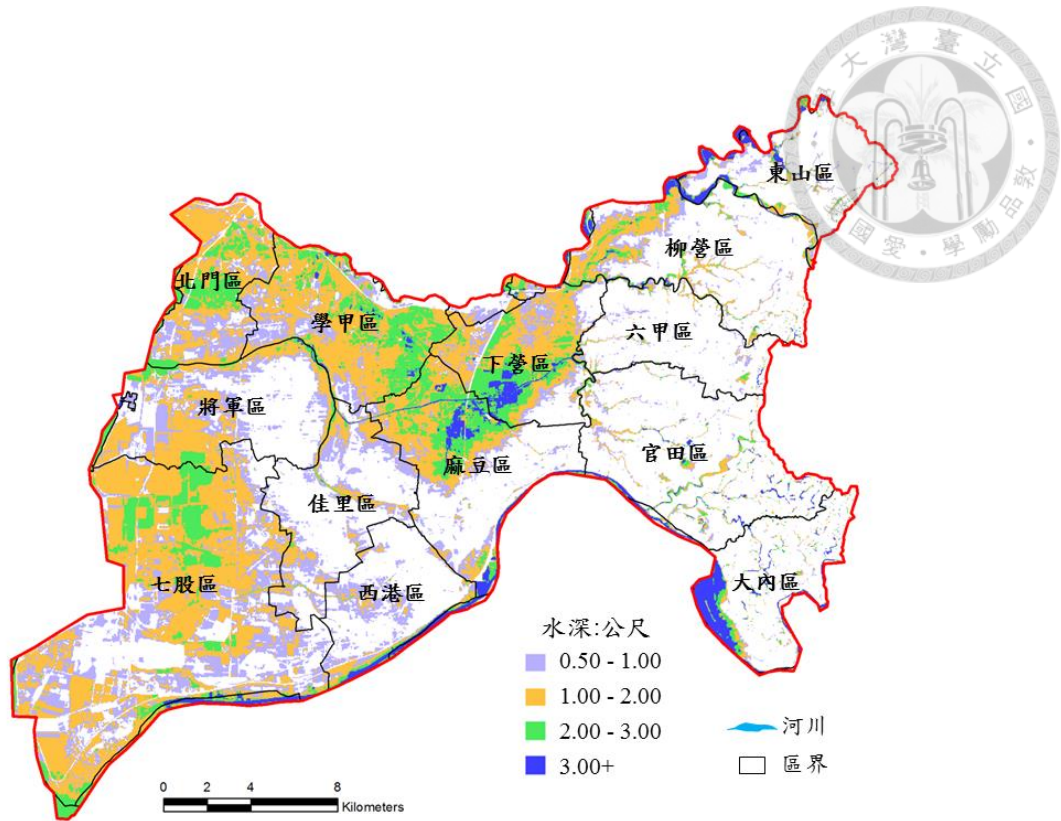


圖 5-27 莫拉克颱風曾文溪北岸全區 40 公尺網格第 48 小時淹水深圖

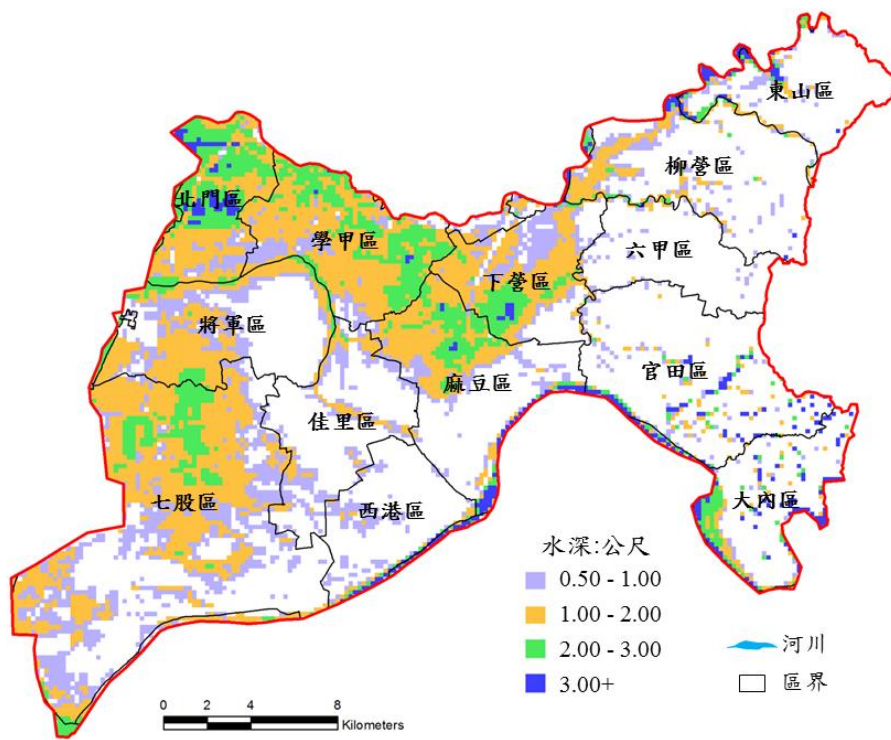


圖 5-28 莫拉克颱風曾文溪北岸全區 200 公尺網格第 48 小時淹水深圖

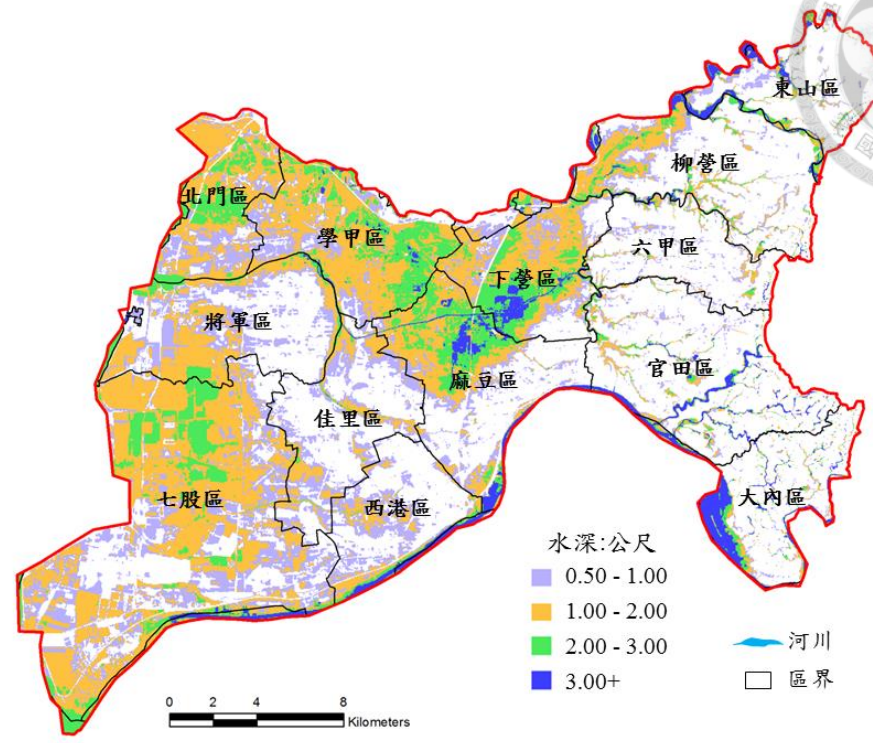


圖 5-29 莫拉克颱風曾文溪北岸全區 40 公尺網格最大淹水深

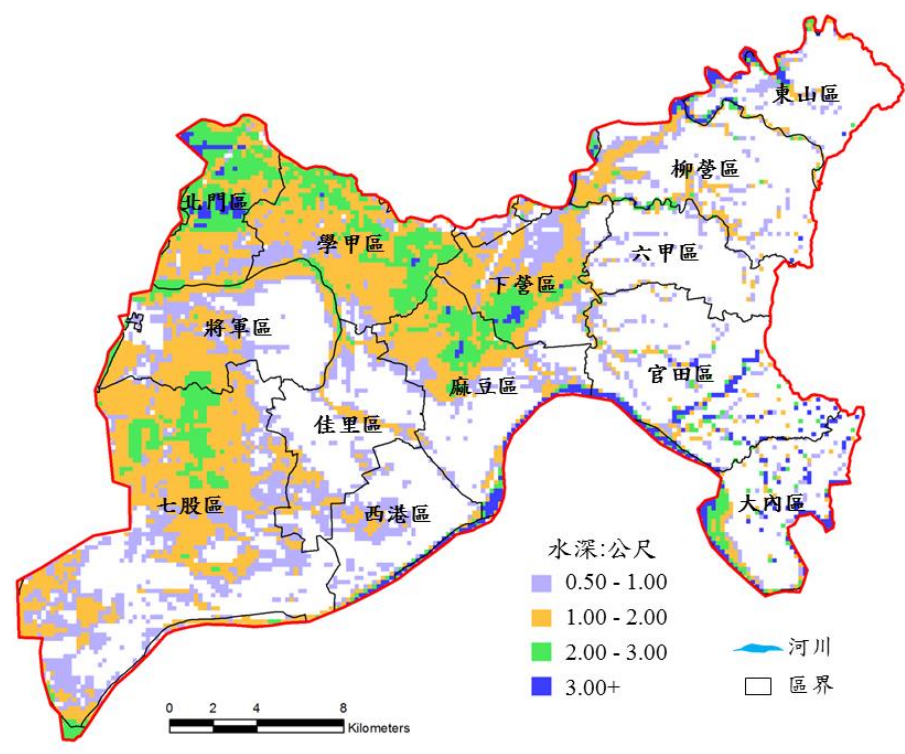


圖 5-30 莫拉克颱風曾文溪北岸全區 200 公尺網格最大淹水深圖



5-4-3 局部模擬區域精確度比較

進行局部細化網格模擬結果之分析時，將此六區之全區 40 公尺細網格，局部細化之 40 公尺細網格及 200 公尺粗網格模擬結果，分別以局部細化網格之範圍繪製其淹水深，圖 5-31 至圖 5-54 分別為佳里、麻豆、下營、西港、學甲及七股第 12、24、36 及 48 小時之淹水深圖，由圖可觀察出針對粗網格解析不足之處，局部細化網格模擬提供了更高解析之結果，能針對重點地區提供更精細之即時資訊；圖 5-55 至圖 5-78 則為佳里、麻豆、下營、西港、學甲及七股第 12、24、36 及 48 小時之淹水深比較圖，由圖中可看出局部細化網格區域內，各模擬網格點在全區 40 公尺細網格與局部細化之細網格模擬水深之差異。

探討模擬區內局部細化 40 公尺網格之區域與全區 40 公尺網格中，相對應之區域兩者在模擬結果的差異，其均方根誤差 $RMSE$ 之結果如表 5-6 所示，佳里區最小 $RMSE$ 值為第 6 小時 0.061 公尺，最大為第 36 小時 0.233 公尺；麻豆區最小 $RMSE$ 值為第 6 小時 0.021 公尺，最大為 48 小時 0.290 公尺；下營區 $RMSE$ 值最小為第 6 小時 0.006 公尺，最大為第 48 小時 0.331 公尺；西港區最小 $RMSE$ 值為第 6 小時 0.033 公尺，最大為第 42 小時 0.307 公尺；學甲區最小 $RMSE$ 值為第 12 小時 0.074 公尺，最大為第 42 小時 0.342 公尺；七股區最小 $RMSE$ 值為第 6 小時 0.007 公尺，最大為第 18 小時 0.190 公尺。各區平均 $RMSE$ 最小為七股區 0.099 公尺，最大為學甲區 0.168 公尺。各小時平均 $RMSE$ 最小為第 6 小時 0.024 公尺，最大為第 42 小時 0.238 公尺，總平均 $RMSE$ 為 0.149 公尺。

相關係數平方值 R^2 之結果如表 5-7，佳里區最小 R^2 值為第 6 小時 0.05，最大為第 48 小時 0.86；麻豆區最小 R^2 值為第 12 小時 0.70，最大為 48 小時 0.92；下營區 R^2 值最小為第 24 小時 0.82，最大為第 6 及第 36 小時之 0.96；西港區最小 R^2 值為第 6 小時 0.07，最大為第 42 小時 0.91；學甲區最小 R^2 值為第 6 小時 0.80，最大為第 42 小時 0.98；七股區最小 R^2 值為第 18 小時 0.82，最大為第 48 小時 0.99。各區平均 R^2 最小為佳里區之 0.65，最大為學甲區及七股區之 0.93。各小時平均 R^2 最

小為第 6 小時 0.61，最大為第 48 小時 0.92，總平均 R^2 為 0.82，整體而言，除佳里及西港區前 12 小時 R^2 小於 0.5 外，其他時間點的 R^2 皆有相當不錯的結果。

由上述比較結果可看出局部細化網格方法中造成誤差之原因，因局部細化網格邊界條件須由粗網格演算提供，誤差可能隨著演算時間而增加，如麻豆區即有此趨勢。然而由 *RMSE* 結果顯示，許多區域誤差最大並非發生在演算最終時刻，如佳里、西港、學甲及七股等區，演算至第 48 小時反而較前面時段更能保持良好之準確度。麻豆、下營、西港及學甲區，雖其最大之 *RMSE* 為 0.290、0.331、0.307 及 0.342 公尺，但其 R^2 分別為 0.92、0.88、0.80 及 0.98，顯示兩者的誤差呈相當高的線性關係，因此，局部細化細網格之模擬結果與全區細網格之差異，主要為不同細化區域之邊界條件的影響，亦即局部細化網格法中粗網格的誤差所導致，進而透過空間上邊界條件之銜接，造成局部細化之細網格之誤差來源。但整體而言，局部細化 40 公尺網格模擬結果，仍與全區 40 公尺網格淹水結果，保持相當一致之趨勢。

表 5-6 曾文溪北岸局部細化模擬區均方根誤差(單位:公尺)

RMSE	6hr	12hr	18hr	24hr	30hr	36hr	42hr	48hr	各區平均
1 佳里	0.061	0.132	0.162	0.130	0.185	0.222	0.233	0.173	0.162
2 麻豆	0.021	0.092	0.102	0.087	0.104	0.201	0.227	0.290	0.140
3 下營	0.006	0.025	0.081	0.234	0.283	0.105	0.261	0.331	0.166
4 西港	0.033	0.112	0.168	0.101	0.148	0.231	0.307	0.164	0.158
5 學甲	0.018	0.074	0.104	0.086	0.163	0.298	0.342	0.257	0.168
6 七股	0.007	0.071	0.190	0.186	0.121	0.064	0.060	0.094	0.099
小時平均	0.024	0.084	0.134	0.137	0.167	0.187	0.238	0.218	總平均 0.149

表 5-7 曾文溪北岸局部細化模擬區相關係數平方值

R Square	6hr	12hr	18hr	24hr	30hr	36hr	42hr	48hr	各區 平均
1 佳里	0.05	0.46	0.68	0.78	0.77	0.80	0.80	0.86	0.65
2 麻豆	0.82	0.70	0.82	0.83	0.87	0.77	0.91	0.92	0.83
3 下營	0.96	0.94	0.86	0.82	0.88	0.96	0.91	0.88	0.90
4 西港	0.07	0.28	0.62	0.89	0.91	0.87	0.80	0.88	0.67
5 學甲	0.80	0.87	0.94	0.97	0.96	0.95	0.98	0.97	0.93
6 七股	0.96	0.87	0.82	0.88	0.98	0.99	0.98	0.99	0.93
小時平均	0.61	0.69	0.79	0.86	0.90	0.89	0.90	0.92	總平均 0.82

5-4-4 平行演算效率比較

本文中執行淹水模式所使用計算機之作業系統為 Microsoft Windows 7 Enterprise 64 位元，在硬體方面，中央處理器規格為 Intel® Core™ i7-920 四核心 CPU @2.67GHz，6.0GB 記憶體。

進行淹水模擬演算時，全區使用解析度 40 公尺淹水網格計算所使用之演算時距為 0.5 秒；粗細網格模擬演算時，全區解析度 200 公尺淹水網格計算所使用之演算時距為 5 秒，局部細化區域 40 公尺淹水網格計算所使用之演算時距為 1 秒。全模擬區使用解析度 200 公尺 × 200 公尺之淹水計算網格共計 15,248 個，所搭配局部細化解析度 40 公尺 × 40 公尺之淹水計算網格共計 3,600 個；全模擬區使用解析度 40 公尺 × 40 公尺之淹水計算網格共計 381,199 個。

本研究分別演算局部細化法搭配不同局部細化區域數目，來進行演算時間探討，演算時間結果如表 5-8 所示，由表第一列可知，在局部細化法尚未平行化時，每多增加一個細化區域，演算時間也隨著累積增加。全區粗網格搭配單一局部細化網格時，平均演算時間為 1,479 秒(約 25 分鐘)，而當局部細化區域數目增加為六

區時，演算時間卻累加至 6,653 秒(約 1 小時 51 分鐘)，雖然局部細化法節省許多演算時間，但隨著局部細化區的數目增加，演算時間也隨著線性累加，仍非常耗時。

表 5-8 第二列為加入平行演算法之不同局部細化區數目所需之演算時間，當局部細化法搭配平行演算，隨著局部細網格數目增加，演算時間卻沒有因此累加，平行演算粗網格及單一局部細化區耗時 1,478 秒(約 25 分鐘)，而當局部細化區域數目增加至兩個、三個及四個之演算時間分別為 1,738 秒(約 29 分鐘)、1,777 秒(約 30 分鐘)及 1,916 秒(約 32 分鐘)，演算時間幾乎皆在 30 分鐘左右，演算時間沒有因局部細化網格區域增加因此增加，可見平行化後同步演算之效果。然而，當平行演算子區域數目增加至五區至六區以後，演算時間開始有微幅上升之趨勢，平行演算五區細化區域，演算時間增加至 2,205 秒(約 36 分鐘)、六區則約為 2,168 秒(約 36 分鐘)。由圖 5-79 可看出隨著細化區域增加，局部細化法在平行化前後之演算時間差異，平行化後之細化網格法在演算時間上幾乎沒有太大的變化，此乃因為本文所使用之計算機擁有四核心，共八個執行緒可供平行計算使用，在全區粗網格及六個局部細化區共七個平行計算工作，尚未超過其執行緒之數目，若細化區之數目再增加，整體的效能將會受限於電腦處理器運算元的極限，造成平行化的工作大於執行緒數目，此時則需等前項工作完成，才能進行其他的演算，平行計算的效能也無法發揮最大效益。

系統加速比如表 5-8 第三列以及圖 5-80 所示，隨著局部細化區增加，局部細化法搭配平行演算法幾乎保持相同演算時間，因此系統加速比主要隨未平行化之局部細化法之演算時間變化，局部細化區數目由一區增加至五區，系統加速比分別依序為 1.00、1.21、1.87、2.69 及 2.90，而同步演算六個局部細化區域時，加速比優化 3.07 達到最佳，可看出在執行緒數目大於平行計算工作數目(即全區粗網格及局部細化格數目的總和)的情形下，系統加速比隨著局部細化區而增加的情形。

整體計算時間如圖 5-81 所示，全區解析度 40 公尺×40 公尺之淹水計算網格演算時間 76,380 秒(約 21 小時 13 分鐘)，以未平行化的粗細網格進行演算時，演算時間為 6,653(約 1 小時 51 分鐘)，而平行化後時間縮短為 2,168 秒(約 37 分鐘)，系統

加速比為 3.07。以粗細網格法之演算時間已遠遠小於全區使用 40 公尺網格的演算時間，而加入平行演算法後，更讓模式演算大幅地增加效率。平行演算法搭配局部細化法確實讓淹水模式演算更具效率即時性，更能實際應用於即時淹水預警與防災上。

表 5-8 曾文溪北岸模擬演算時間比較表

局部細化區域數目	一	二	三	四	五	六
粗細網格方法 演算時間(s)	1,479	2,109	3,322	5,156	6,396	6,653
粗細網格方法 平行演算時間(s)	1,478	1,738	1,777	1,916	2,205	2,168
系統加速比 S_r	1.00	1.21	1.87	2.69	2.90	3.07

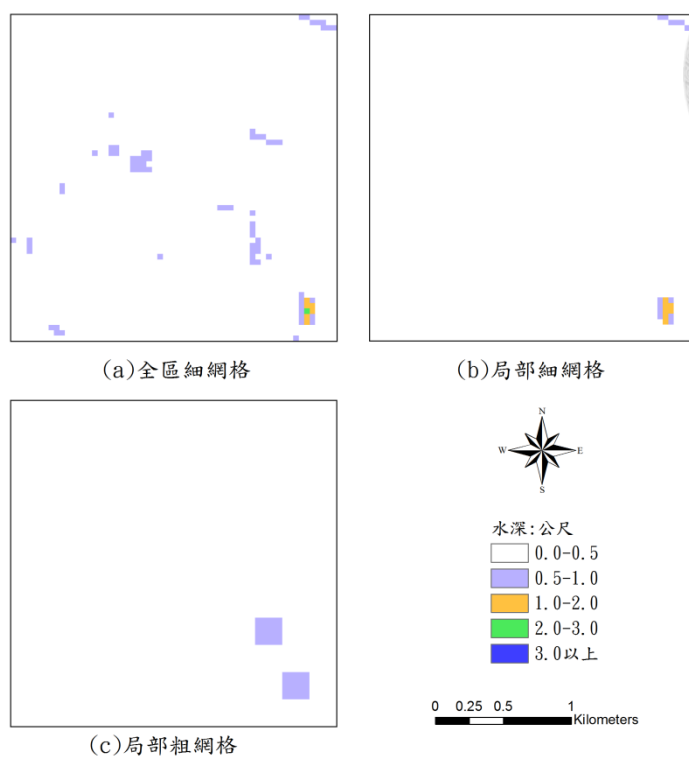
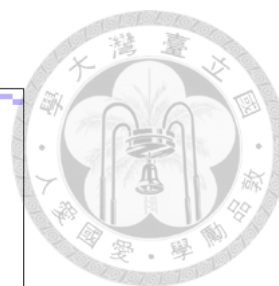


圖 5-31 曾文河流域佳里局部細化地區第 12 小時淹水深圖

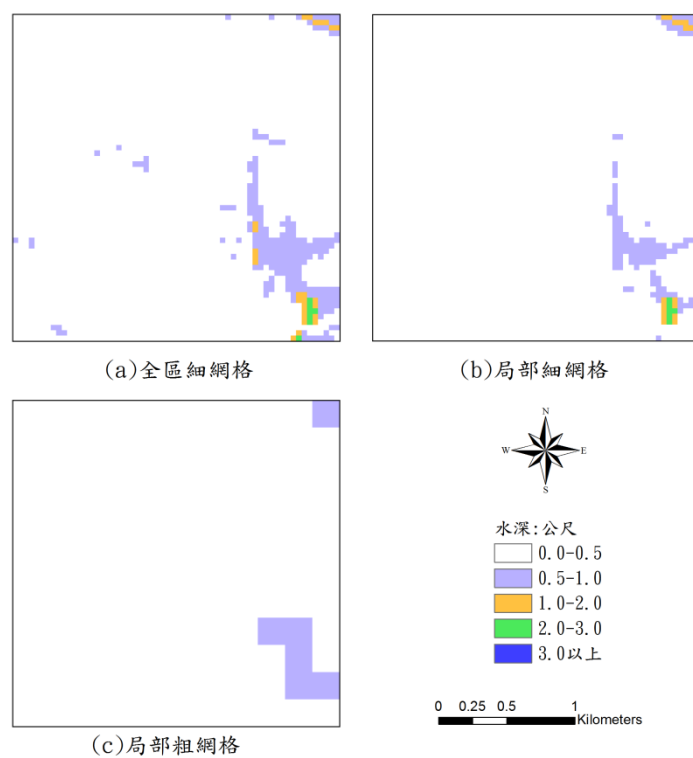


圖 5-32 曾文河流域佳里局部細化地區第 24 小時淹水深圖

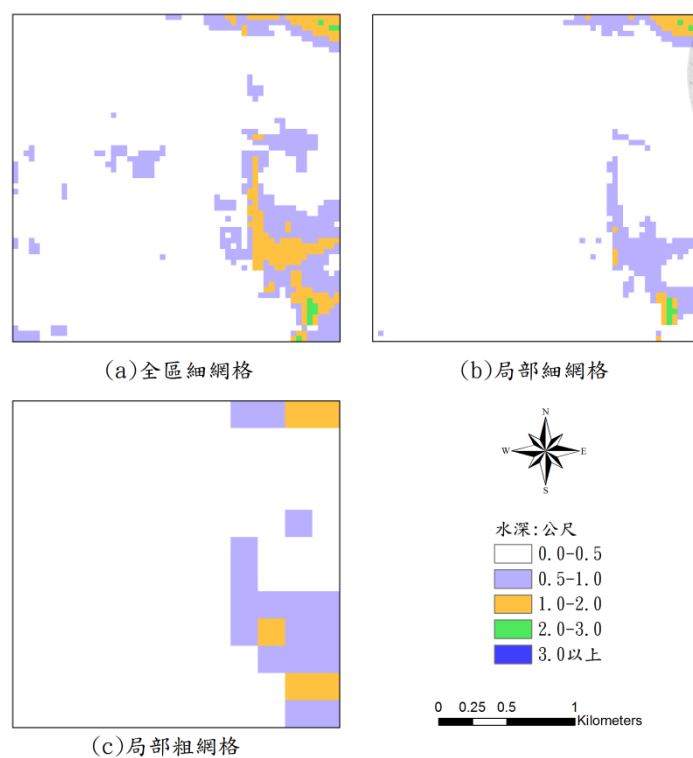
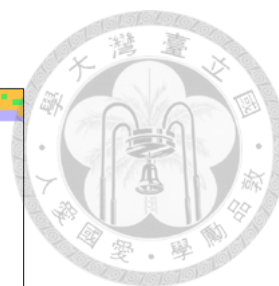


圖 5-33 曾文河流域佳里局部細化地區第 36 小時淹水深圖

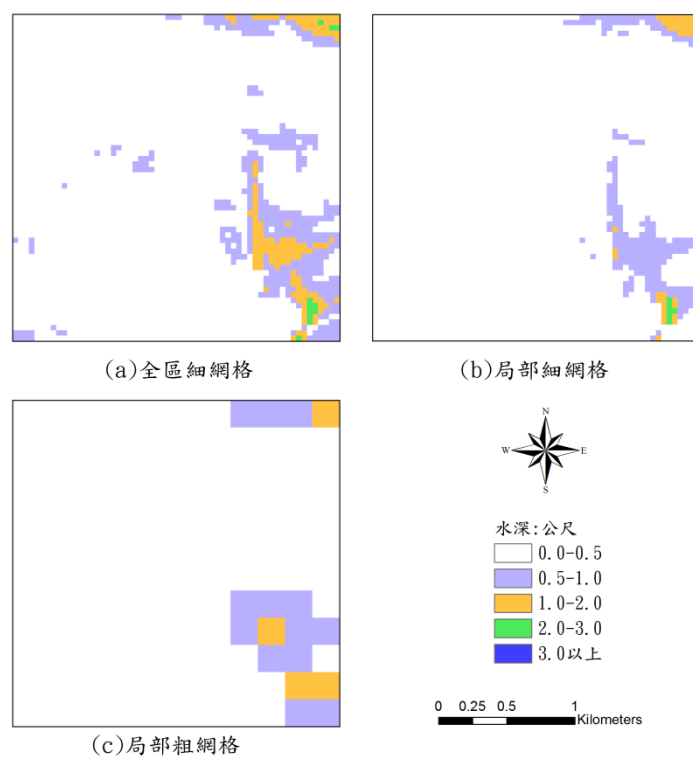


圖 5-34 曾文河流域佳里局部細化地區第 48 小時淹水深圖

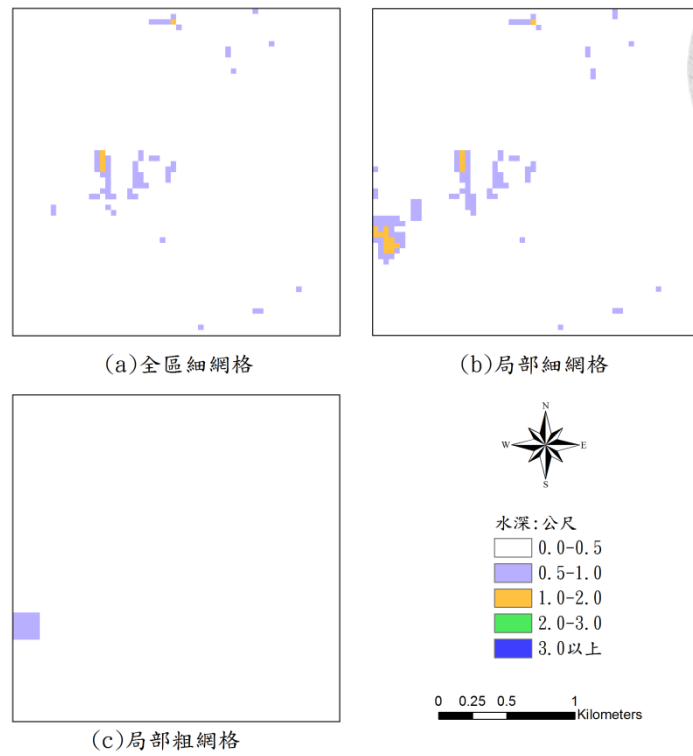


圖 5-35 曾文河流域麻豆局部細化地區第 12 小時淹水深圖

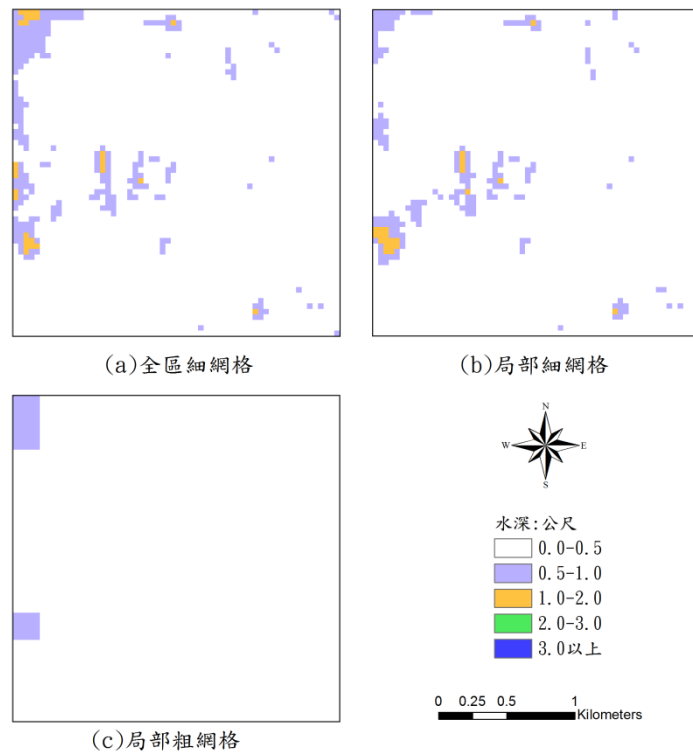


圖 5-36 曾文河流域麻豆局部細化地區第 24 小時淹水深圖

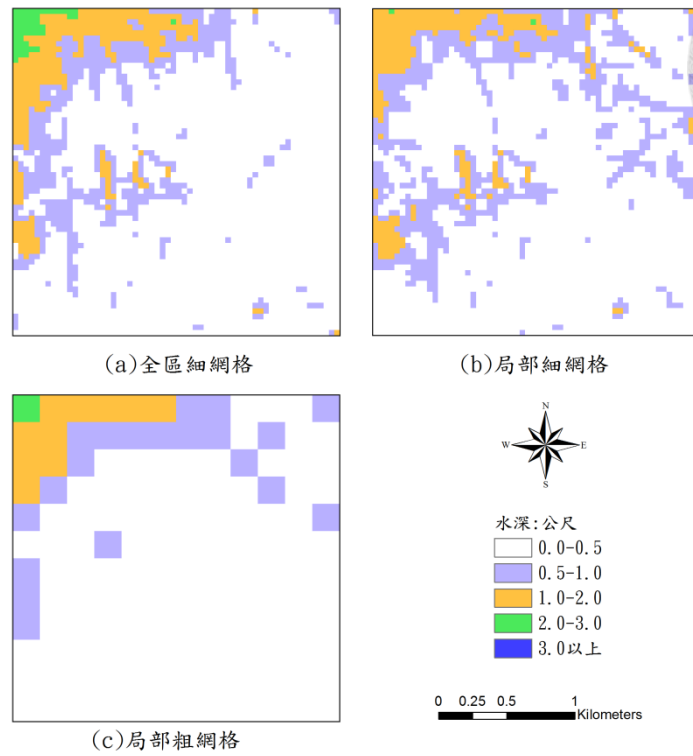
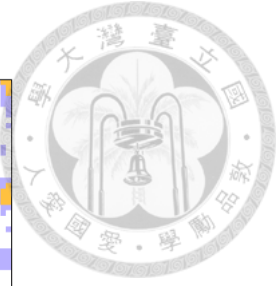


圖 5-37 曾文河流域麻豆局部細化地區第 36 小時淹水深圖

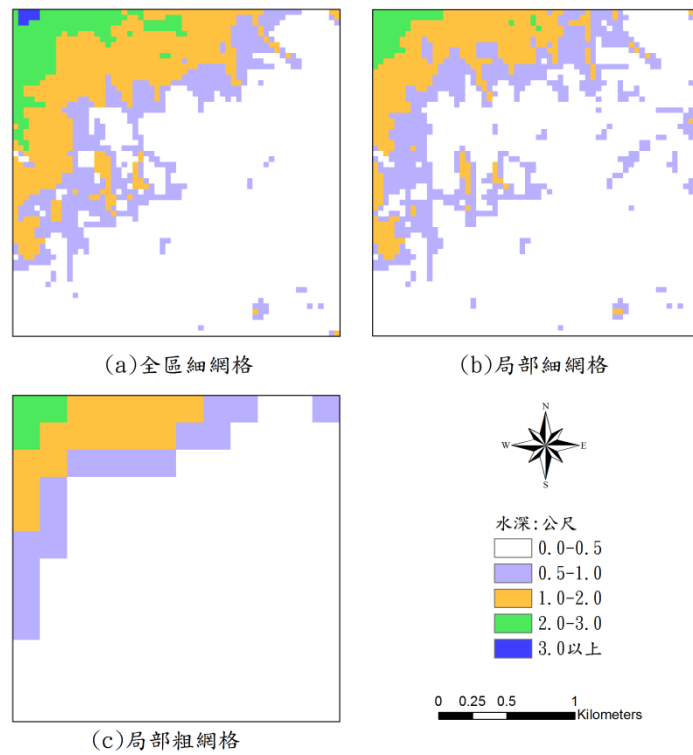


圖 5-38 曾文河流域麻豆局部細化地區第 48 小時淹水深圖

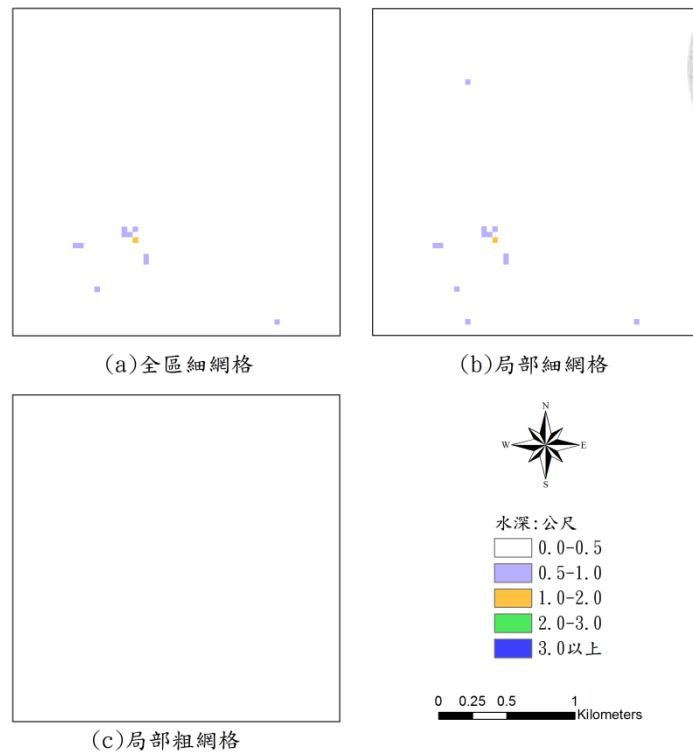


圖 5-39 曾文河流域下營局部細化地區第 12 小時淹水深圖

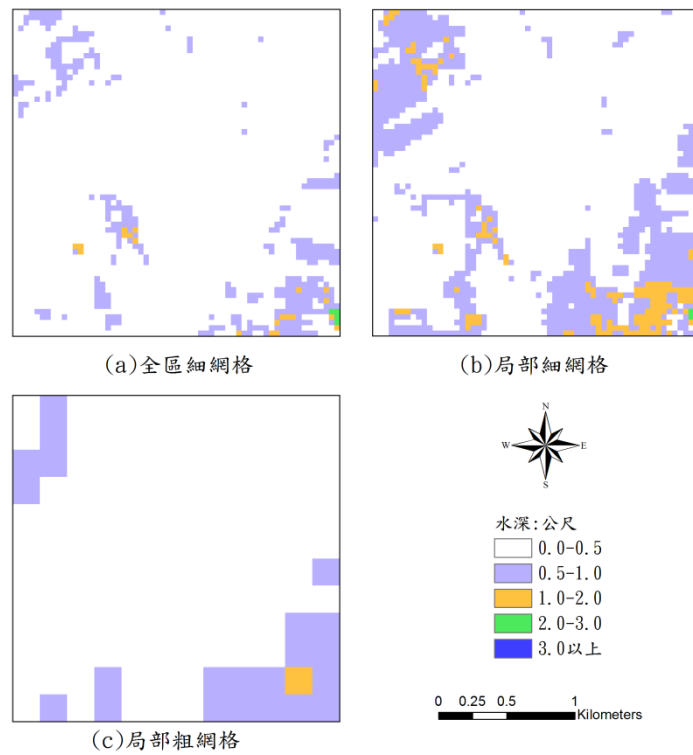


圖 5-40 曾文河流域下營局部細化地區第 24 小時淹水深圖

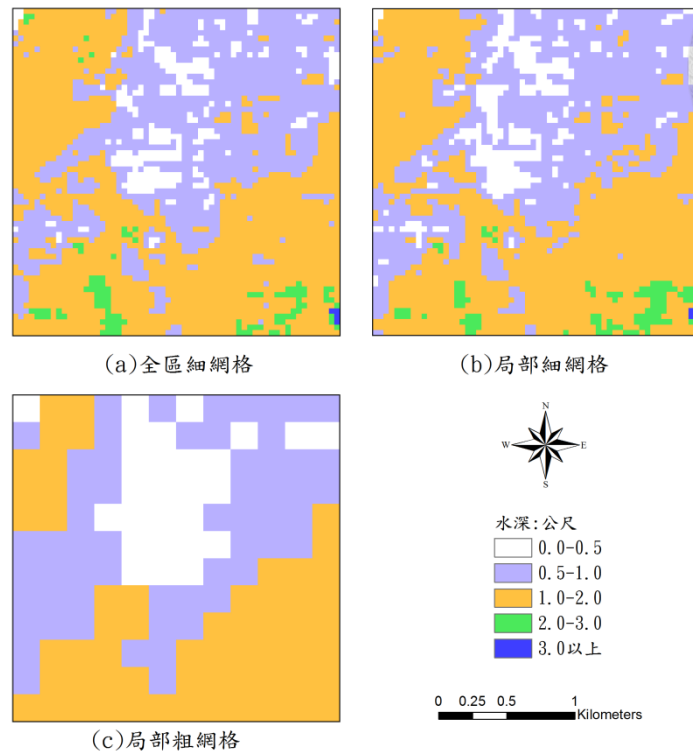


圖 5-41 曾文河流域下營局部細化地區第 36 小時淹水深圖

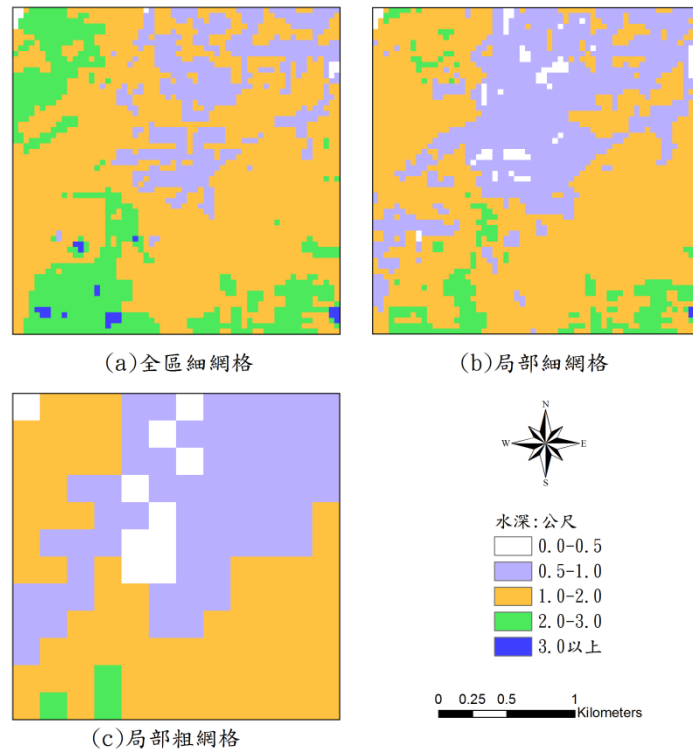


圖 5-42 曾文河流域下營局部細化地區第 48 小時淹水深圖

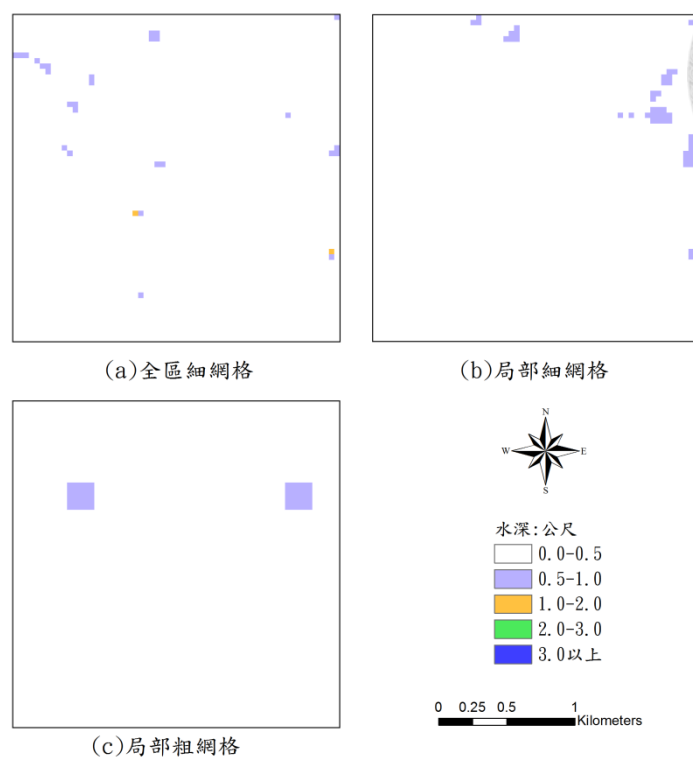
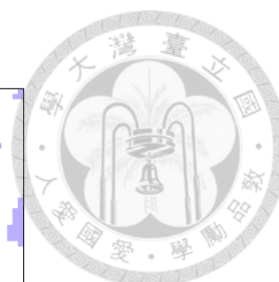


圖 5-43 曾文河流域西港局部細化地區第 12 小時淹水深圖

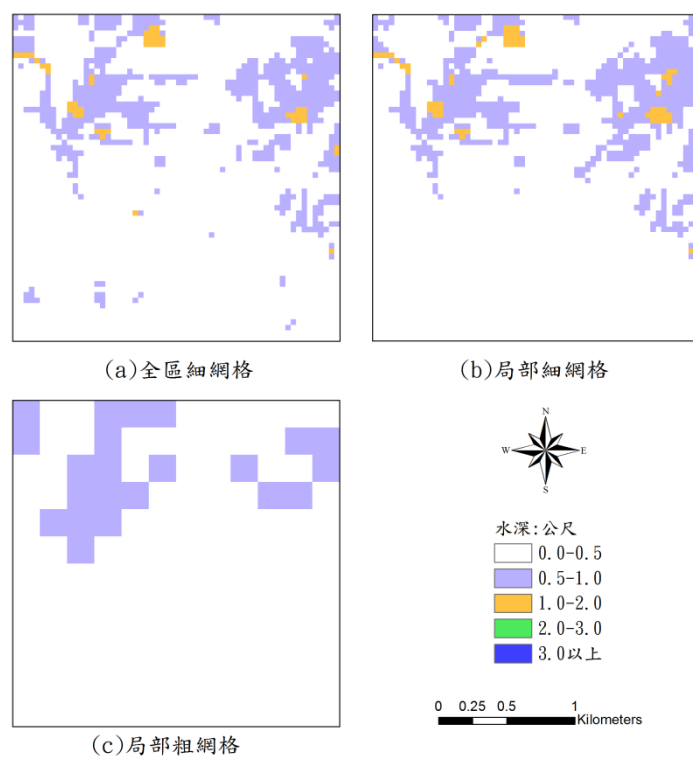


圖 5-44 曾文河流域西港局部細化地區第 24 小時淹水深圖

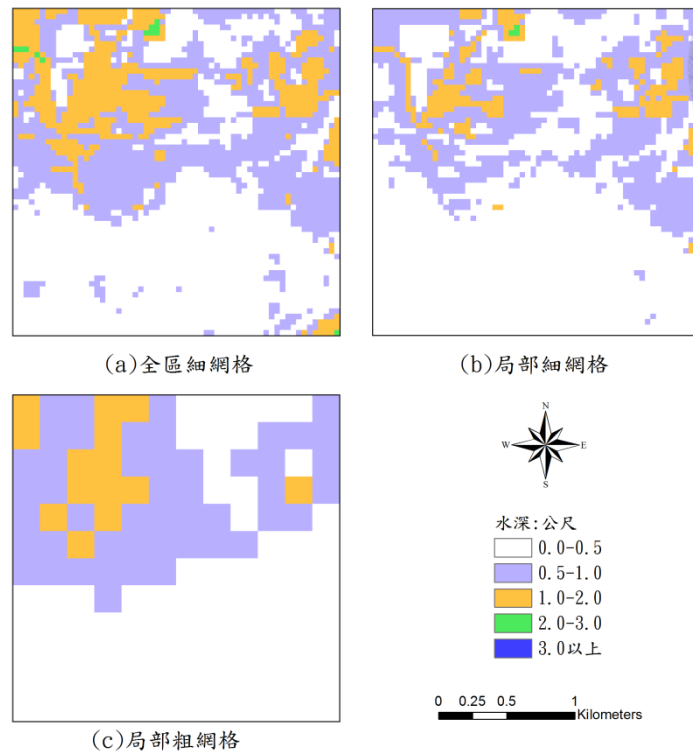


圖 5-45 曾文河流域西港局部細化地區第 36 小時淹水深圖

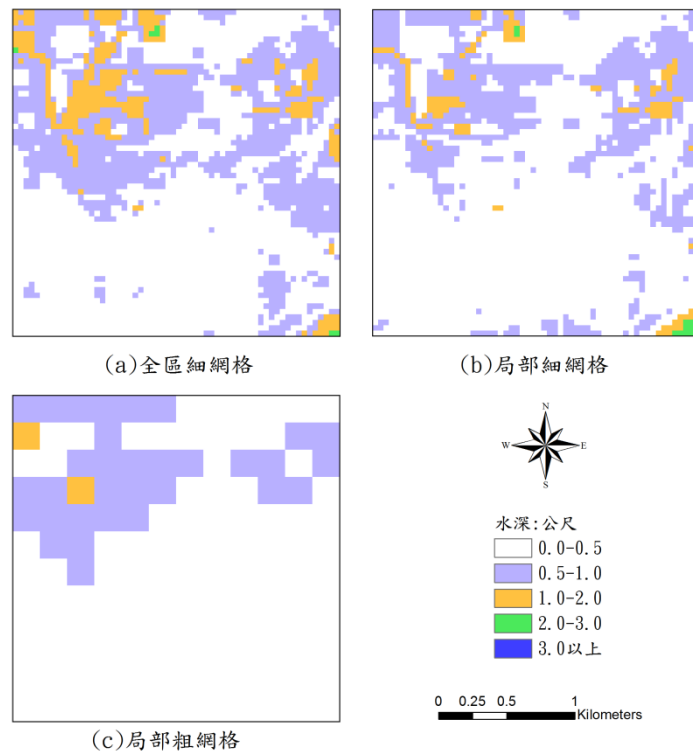


圖 5-46 曾文河流域西港局部細化地區第 48 小時淹水深圖

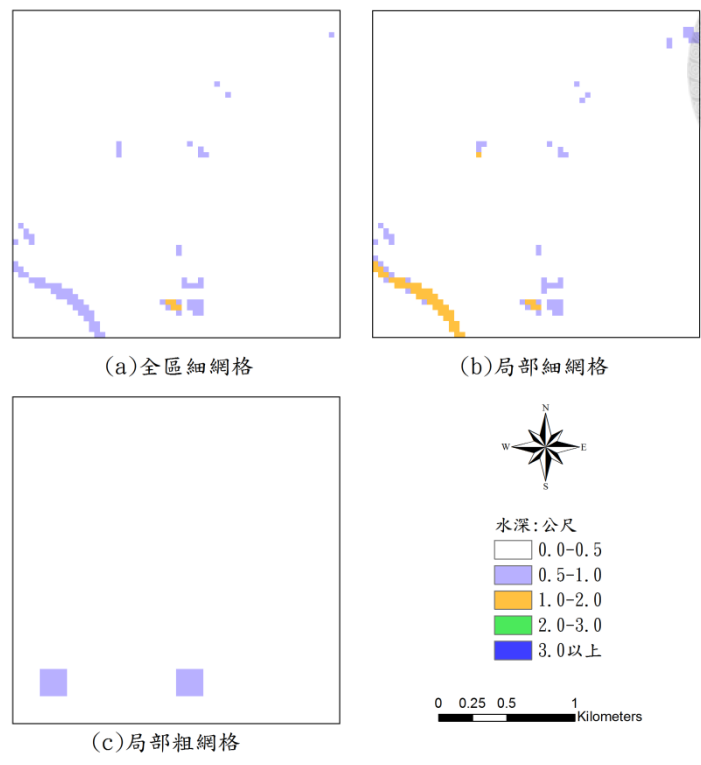


圖 5-47 曾文河流域學甲局部細化地區第 12 小時淹水深圖

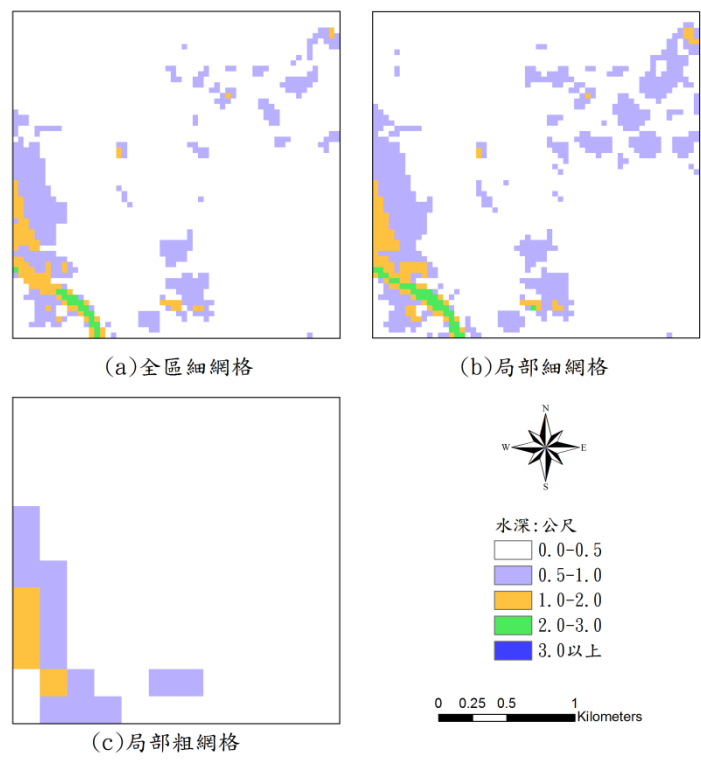


圖 5-48 曾文河流域學甲局部細化地區第 24 小時淹水深圖

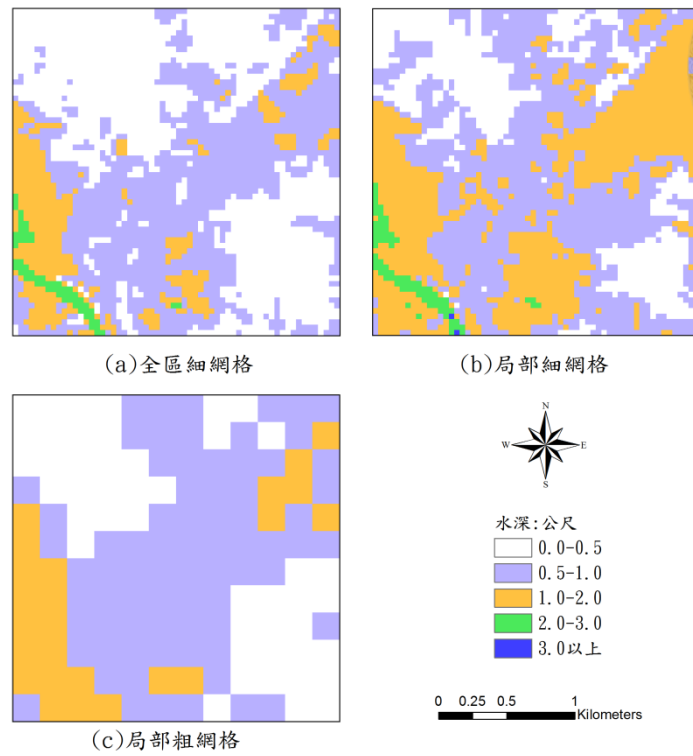
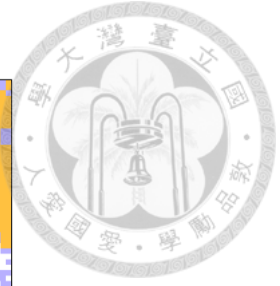


圖 5-49 曾文河流域學甲局部細化地區第 36 小時淹水深圖

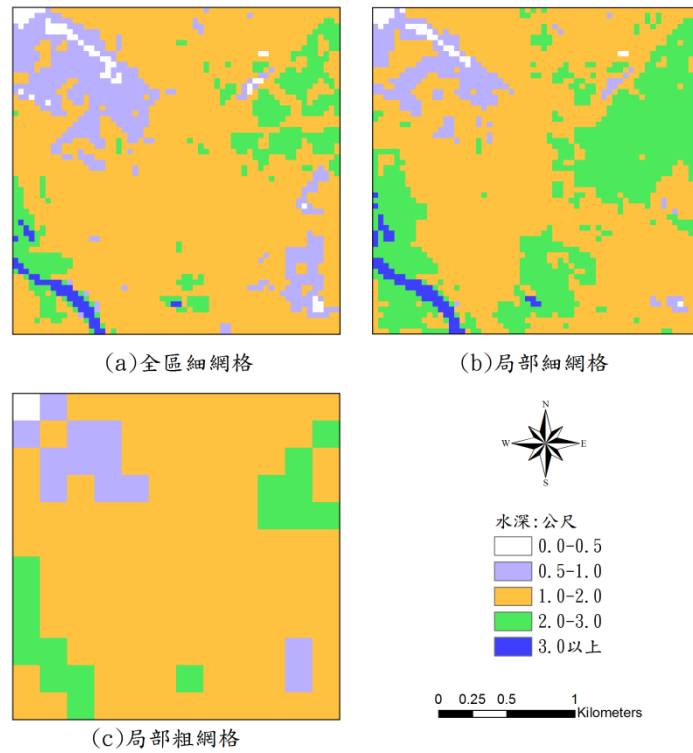


圖 5-50 曾文河流域學甲局部細化地區第 48 小時淹水深圖

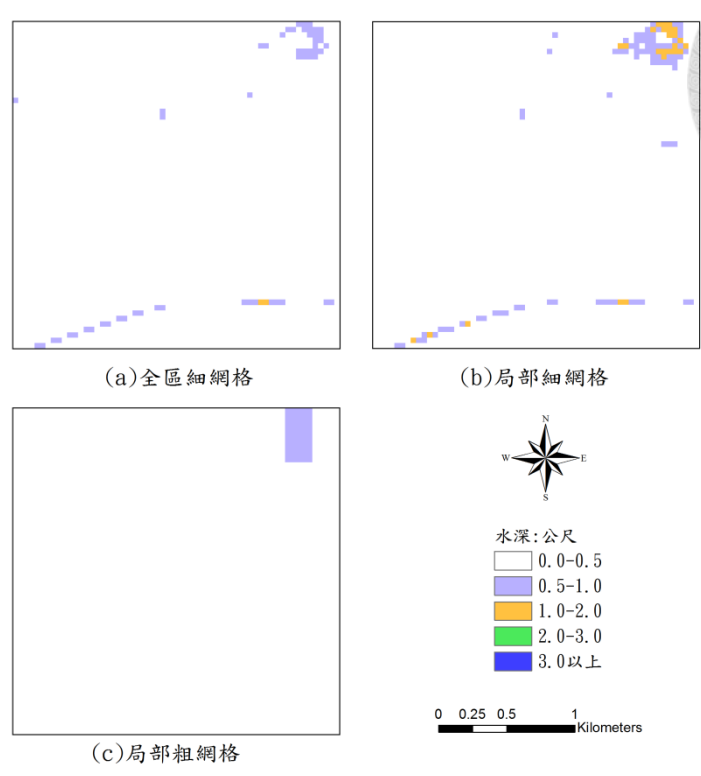


圖 5-51 曾文河流域七股局部細化地區第 12 小時淹水深圖

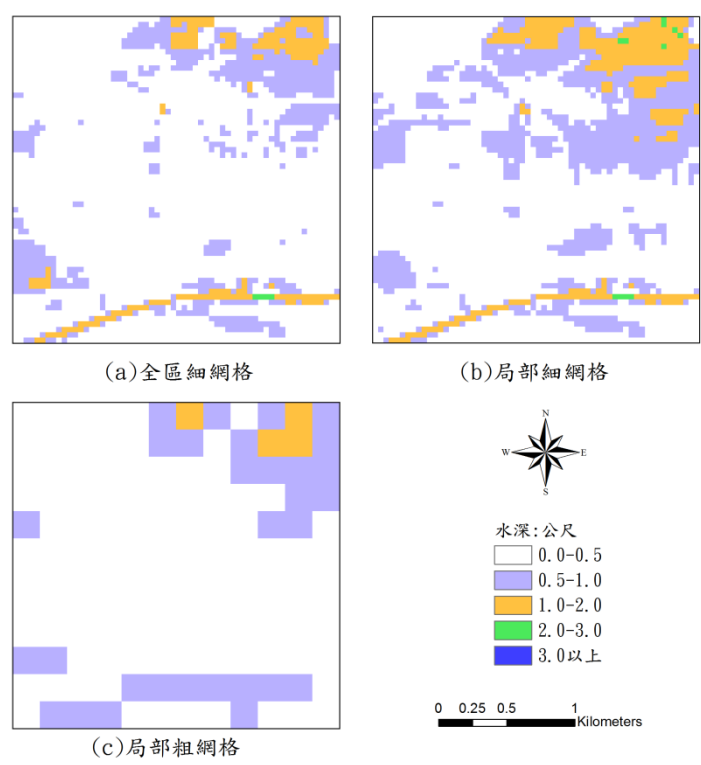


圖 5-52 曾文河流域七股局部細化地區第 24 小時淹水深圖

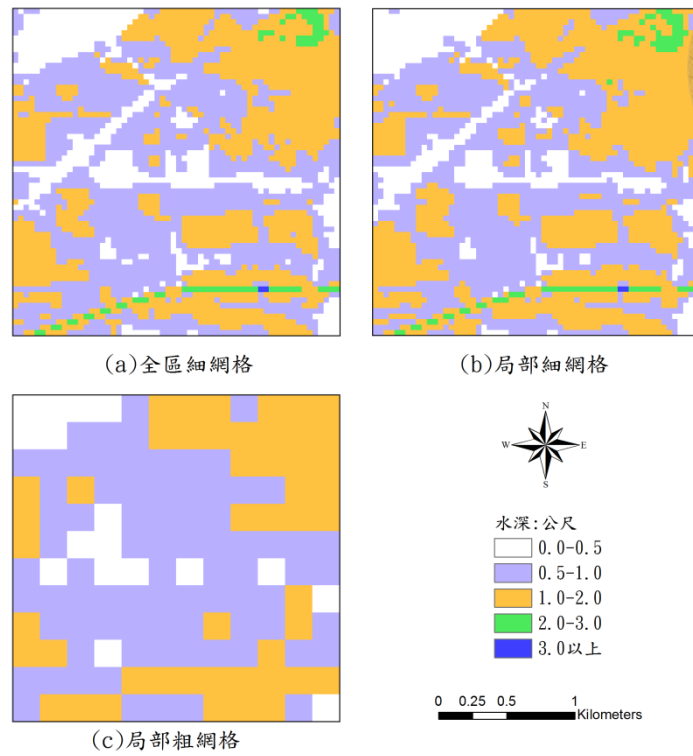
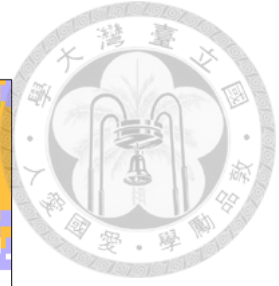


圖 5-53 曾文河流域七股局部細化地區第 36 小時淹水深圖

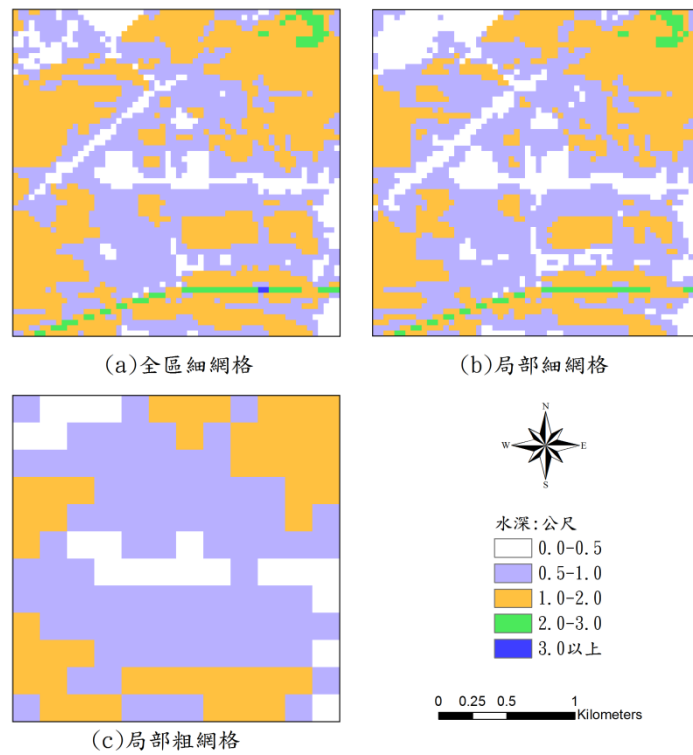


圖 5-54 曾文河流域七股局部細化地區第 48 小時淹水深圖

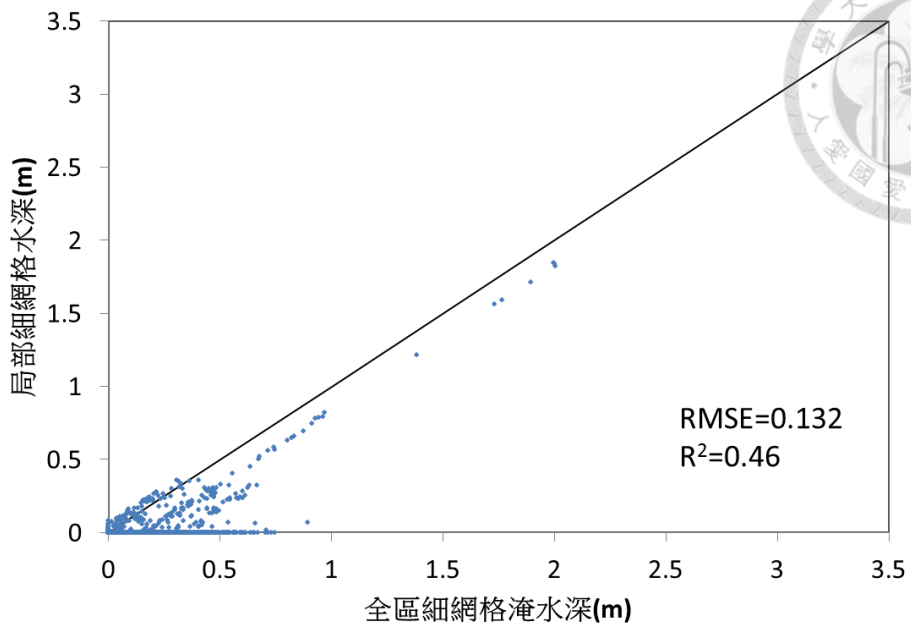


圖 5-55 曾文溪流域佳里局部細化地區 12 小時淹水深比較圖

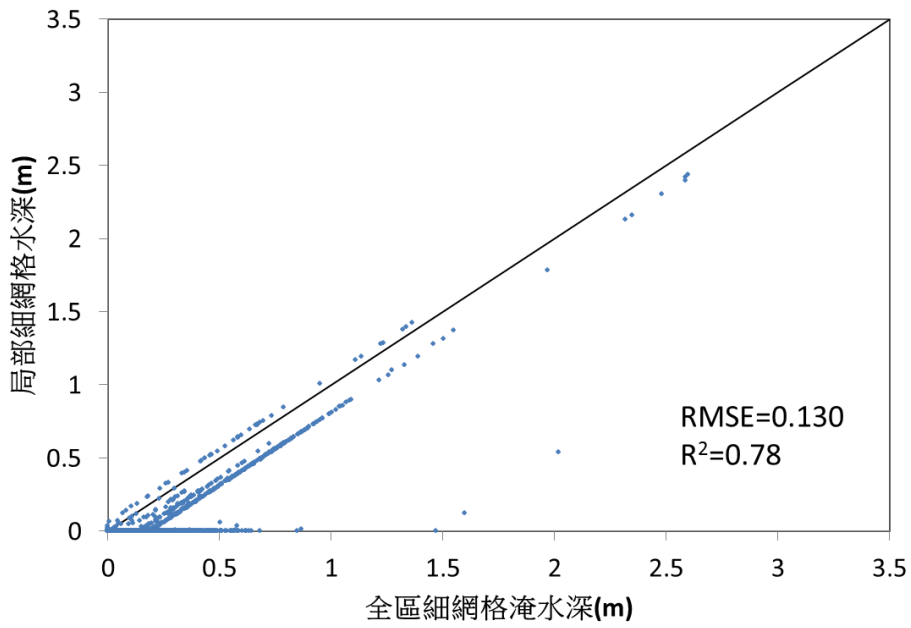


圖 5-56 曾文溪流域佳里局部細化地區 24 小時淹水深比較圖

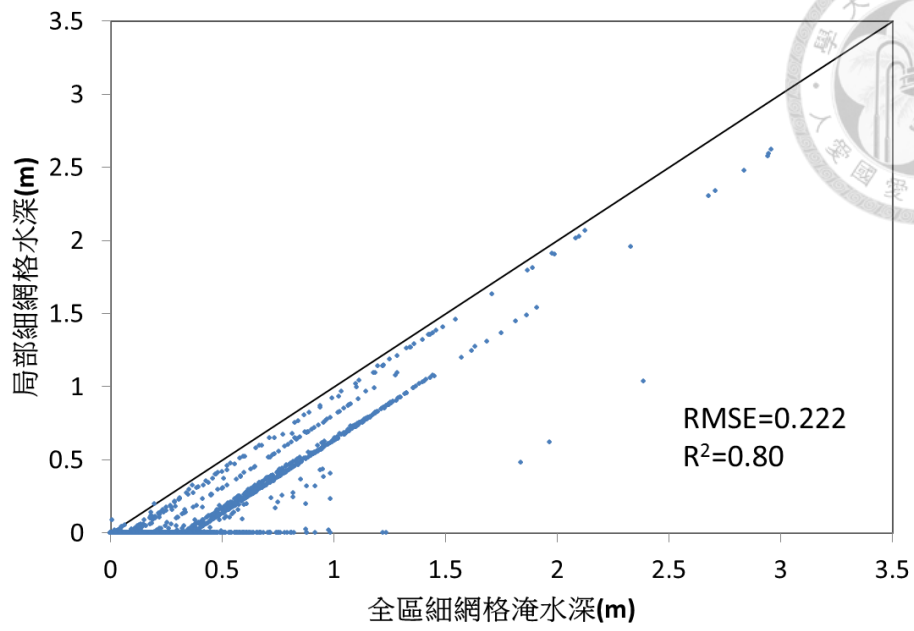


圖 5-57 曾文河流域佳里局部細化地區 36 小時淹水深比較圖

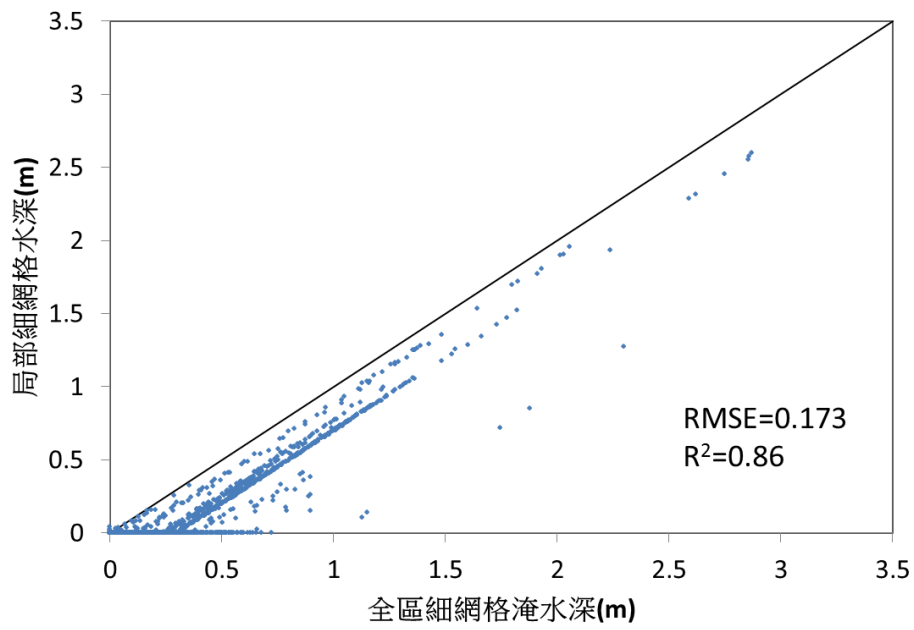


圖 5-58 曾文河流域佳里局部細化地區 48 小時淹水深比較圖

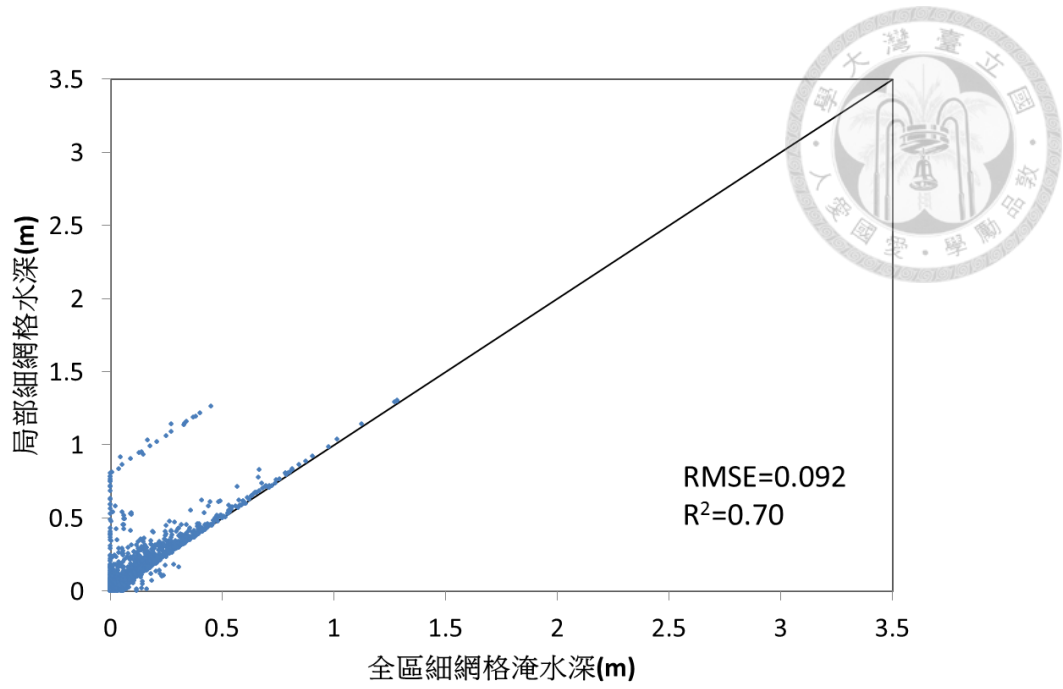


圖 5-59 曾文河流域麻豆局部細化地區 12 小時淹水深比較圖

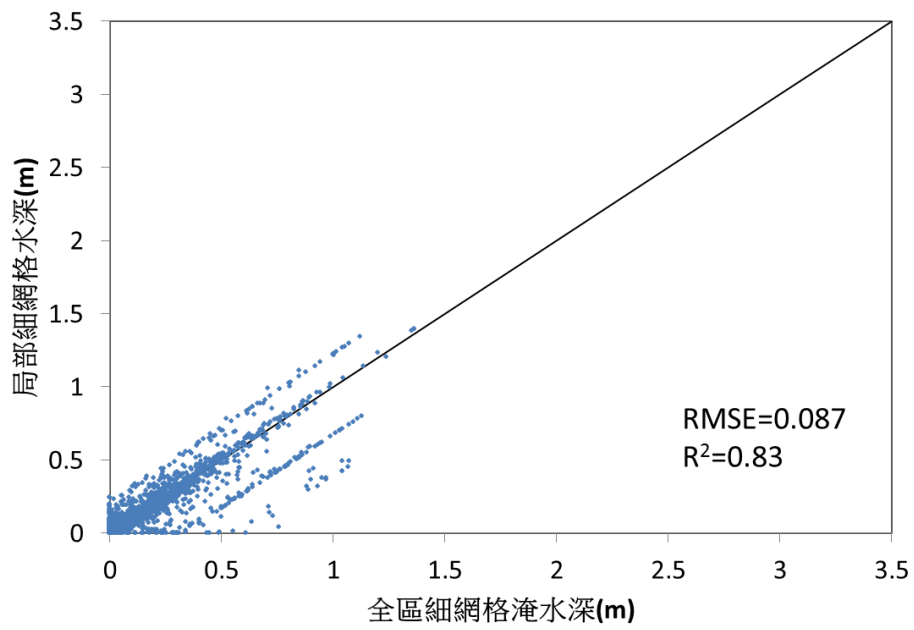


圖 5-60 曾文河流域麻豆局部細化地區 24 小時淹水深比較圖

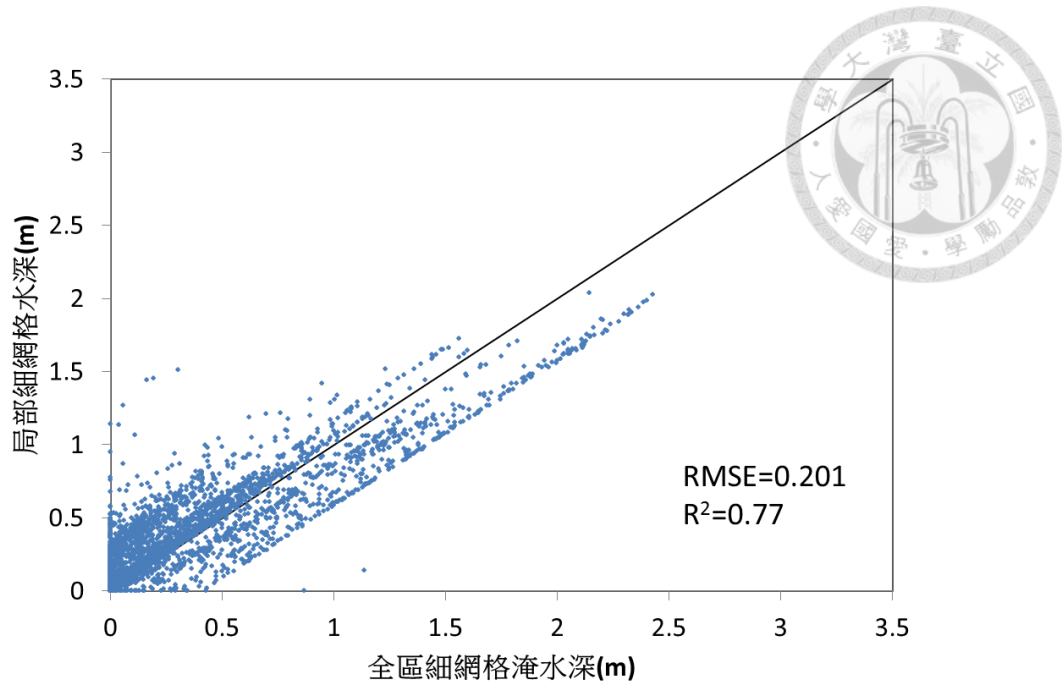


圖 5-61 曾文河流域麻豆局部細化地區 36 小時淹水深比較圖

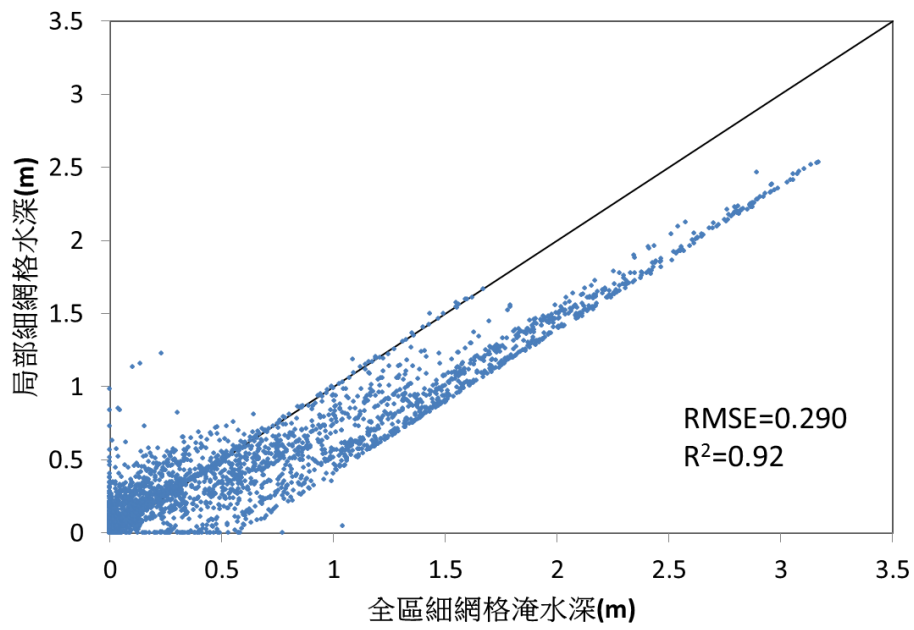


圖 5-62 曾文河流域麻豆局部細化地區 48 小時淹水深比較圖

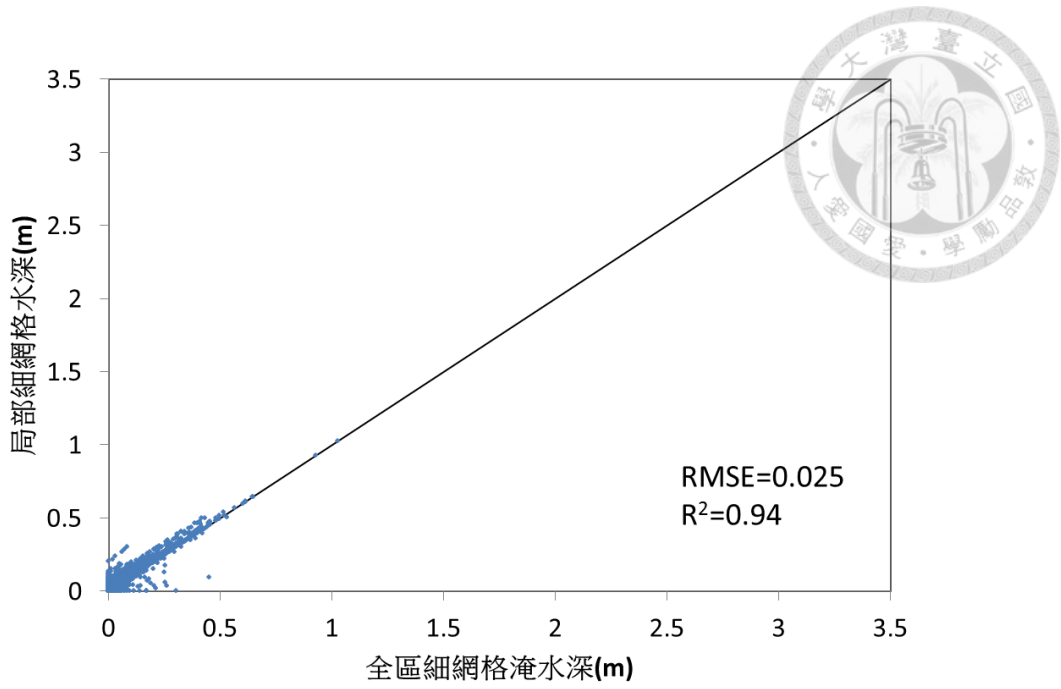


圖 5-63 曾文河流域下營局部細化地區 12 小時淹水深比較圖

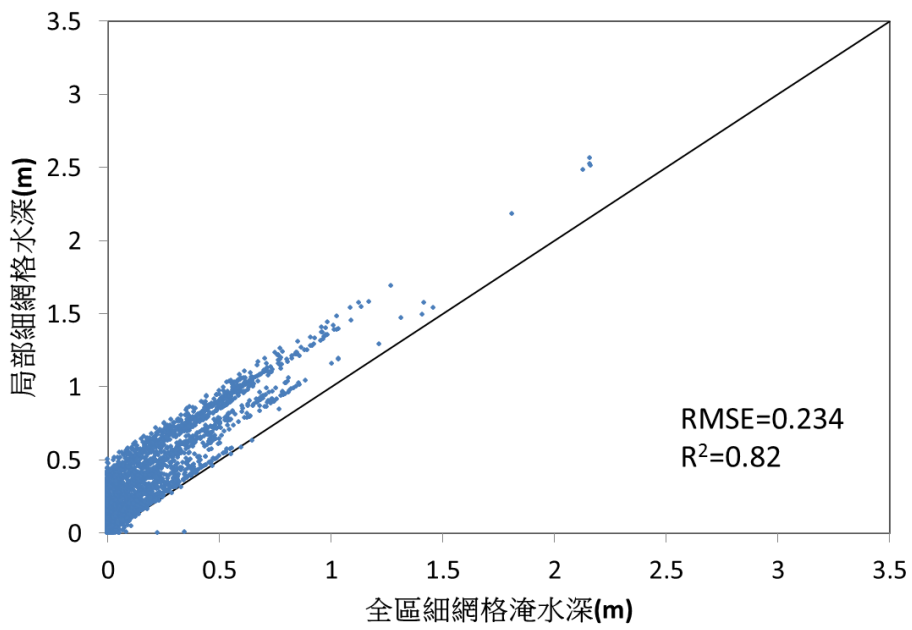


圖 5-64 曾文河流域下營局部細化地區 24 小時淹水深比較圖

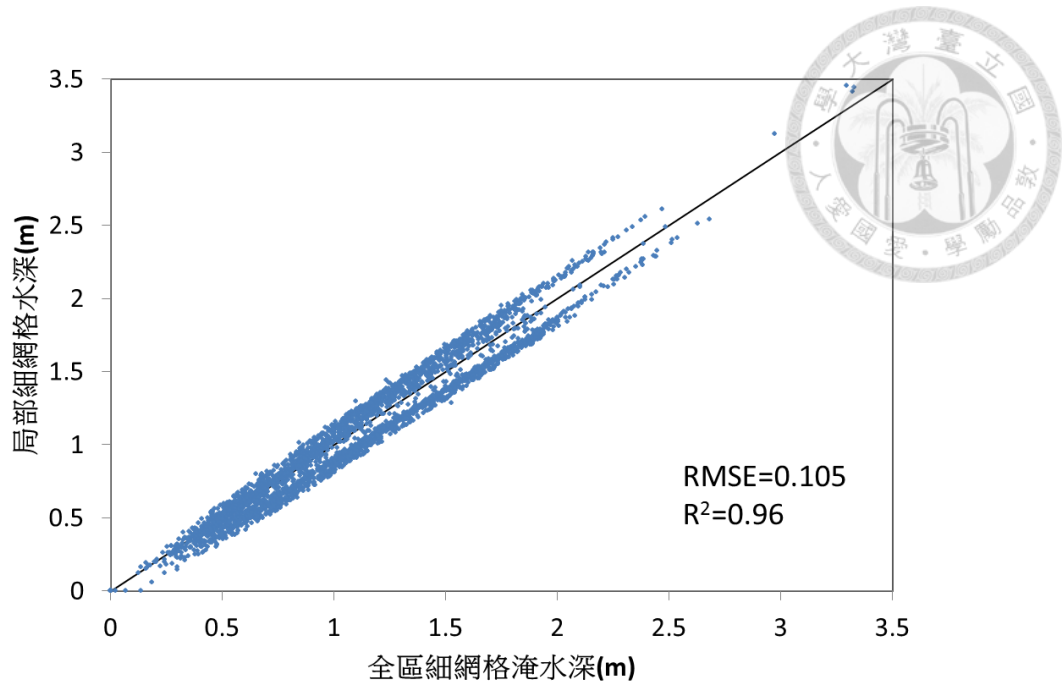


圖 5-65 曾文河流域下營局部細化地區 36 小時淹水深比較圖

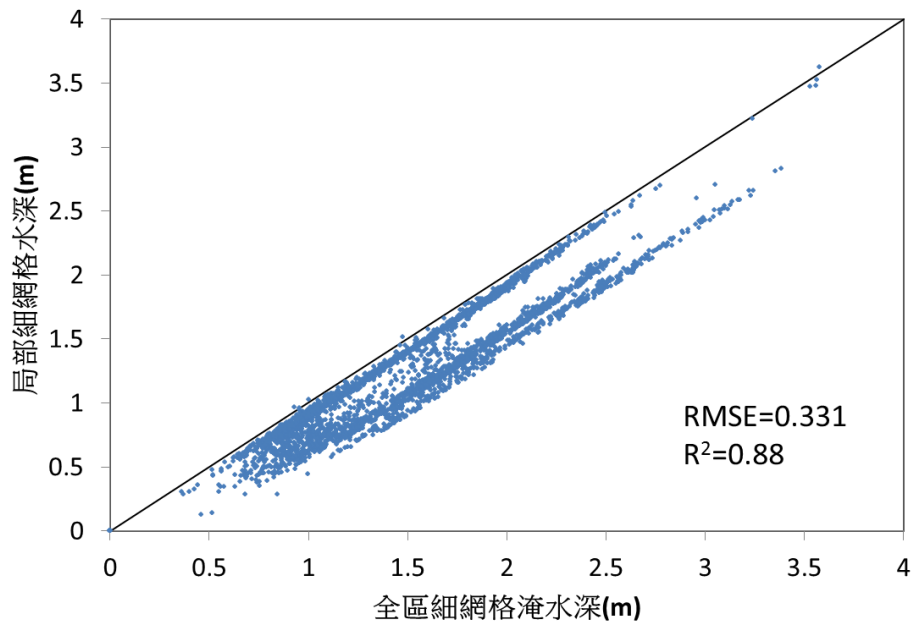


圖 5-66 曾文河流域下營局部細化地區 48 小時淹水深比較圖

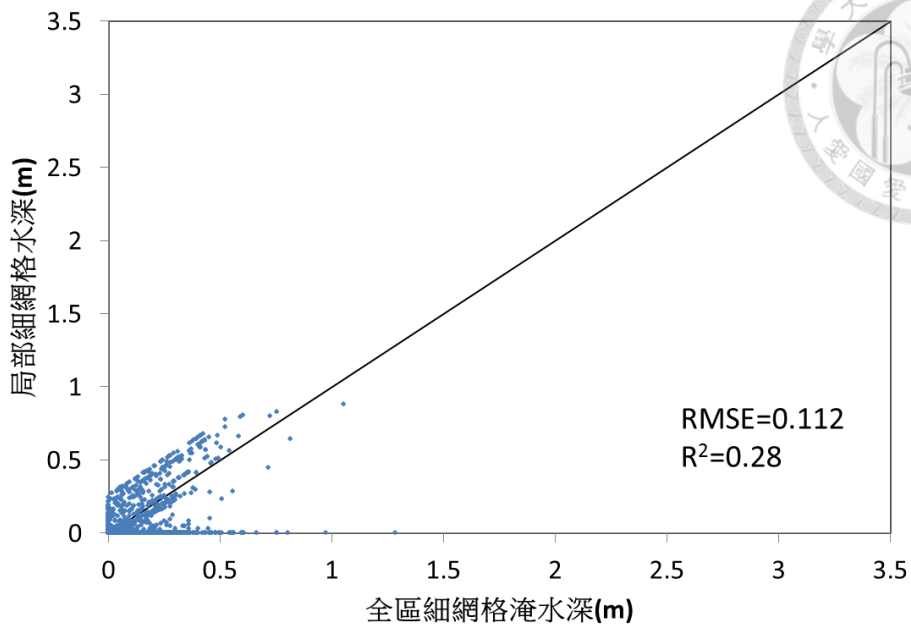


圖 5-67 曾文河流域西港局部細化地區 12 小時淹水深比較圖

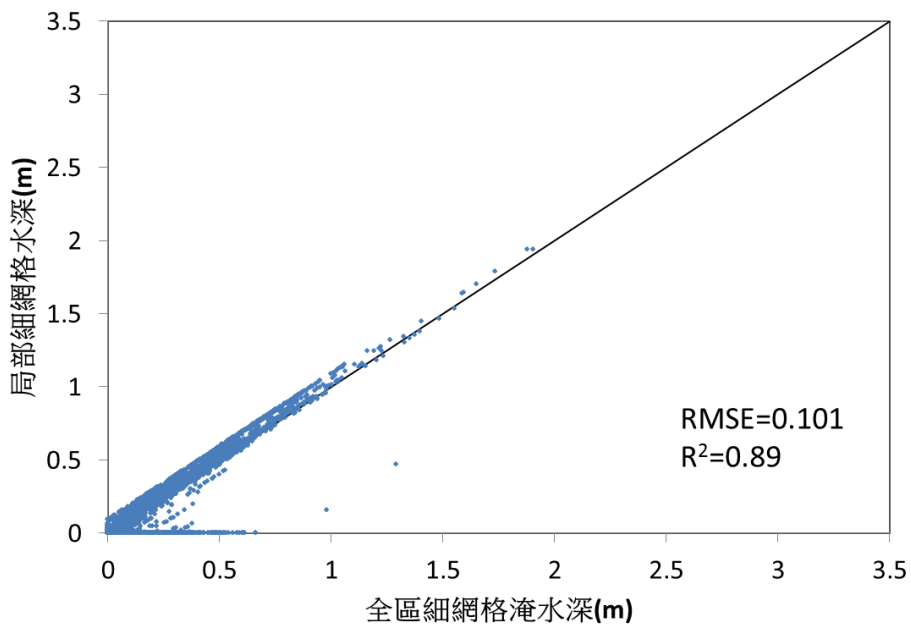


圖 5-68 曾文河流域西港局部細化地區 24 小時淹水深比較圖

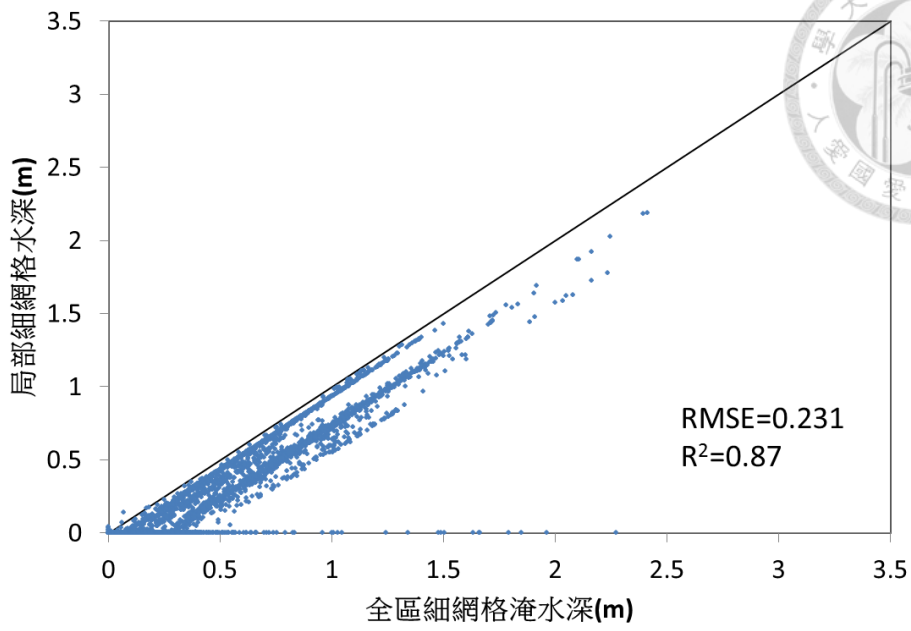


圖 5-69 曾文河流域西港局部細化地區 36 小時淹水深比較圖

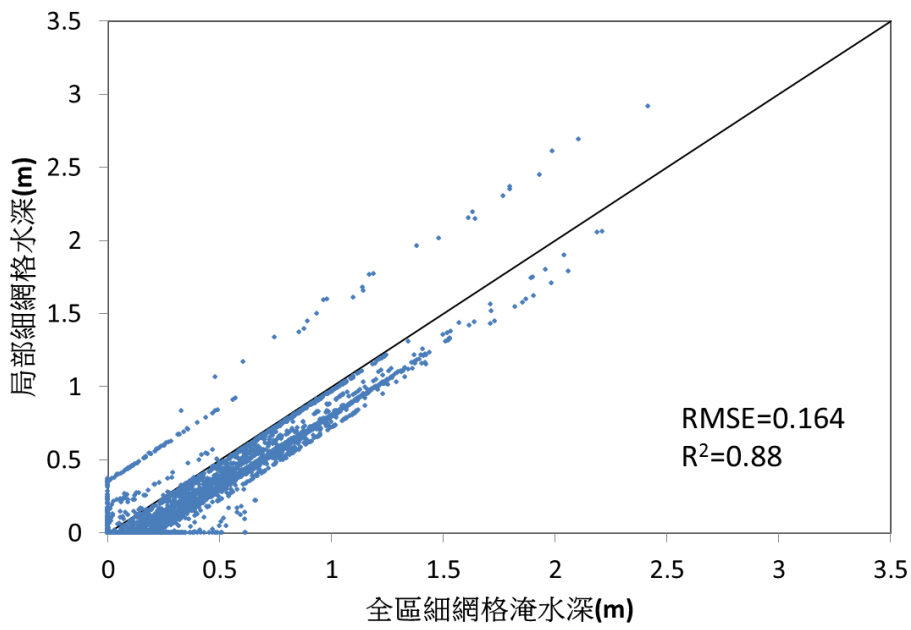


圖 5-70 曾文河流域西港局部細化地區 48 小時淹水深比較圖

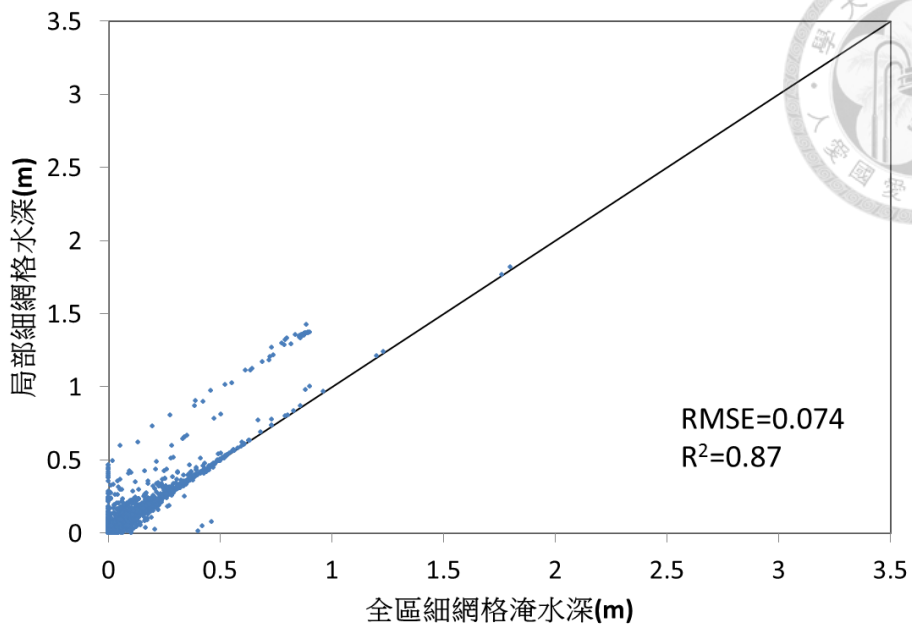


圖 5-71 曾文河流域學甲局部細化地區 12 小時淹水深比較圖

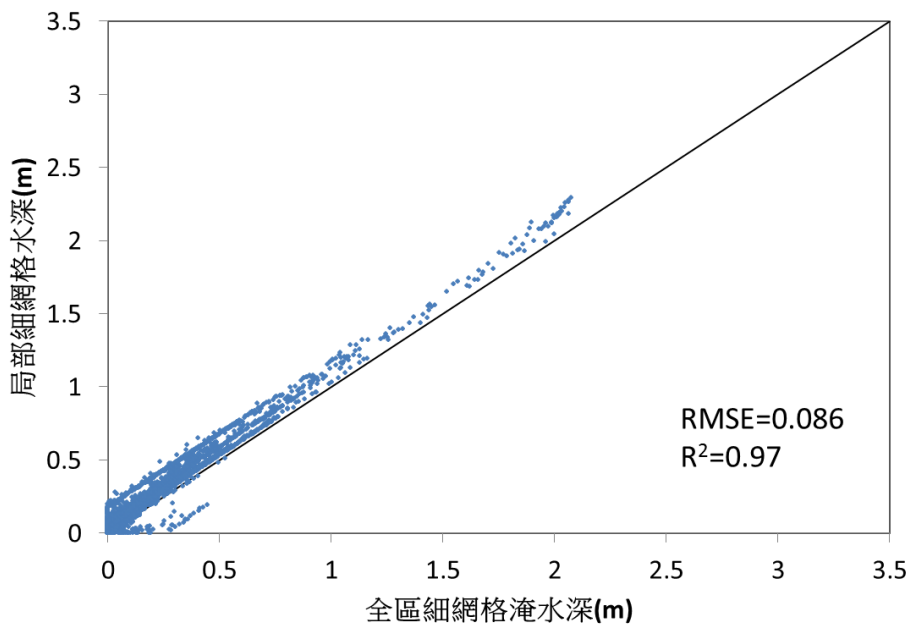


圖 5-72 曾文河流域學甲局部細化地區 24 小時淹水深比較圖

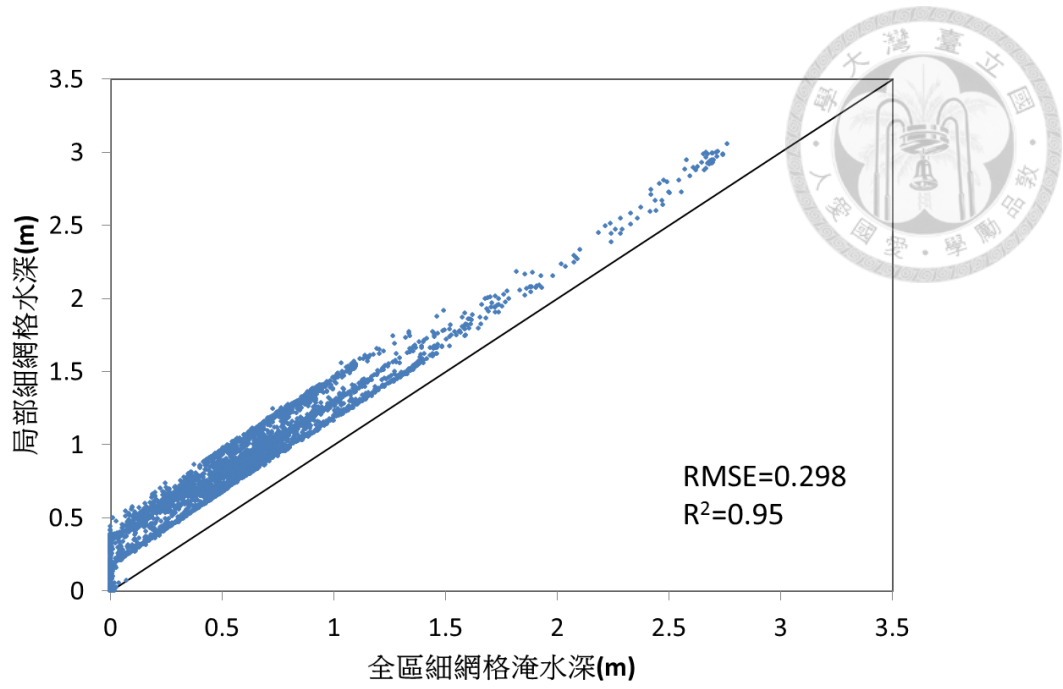


圖 5-73 曾文河流域學甲局部細化地區 36 小時淹水深比較圖

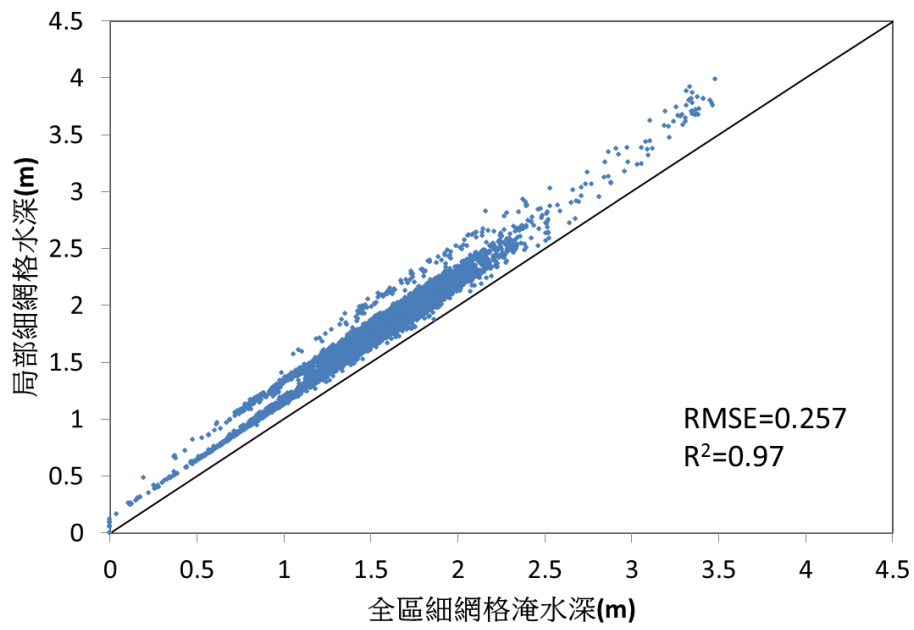


圖 5-74 曾文河流域學甲局部細化地區 48 小時淹水深比較圖

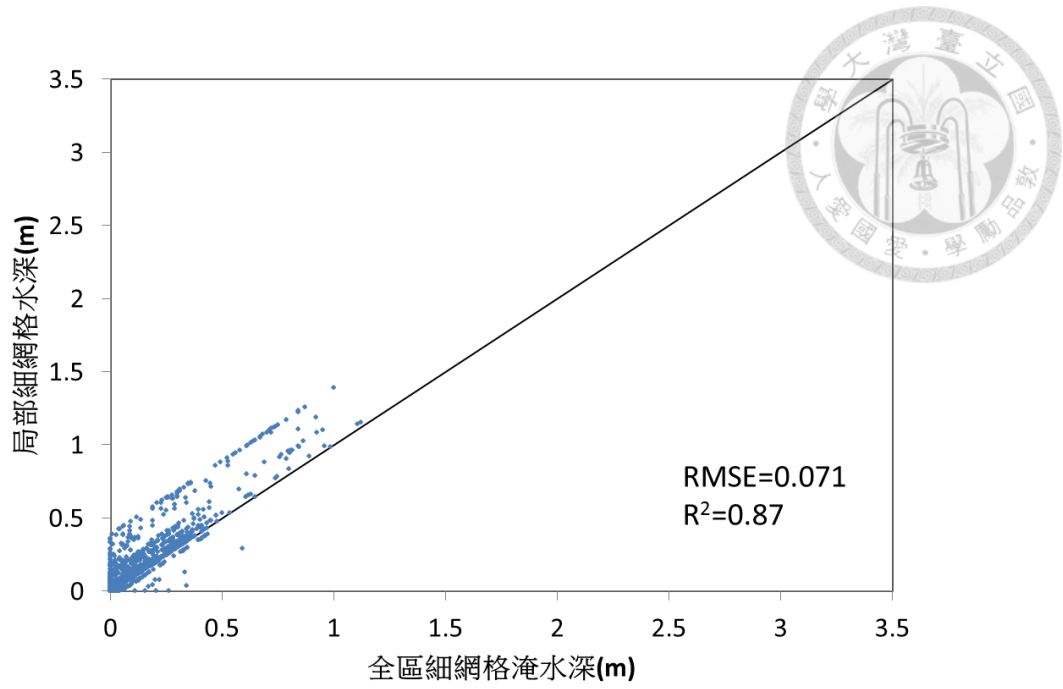


圖 5-75 曾文河流域七股局部細化地區 12 小時淹水深比較圖

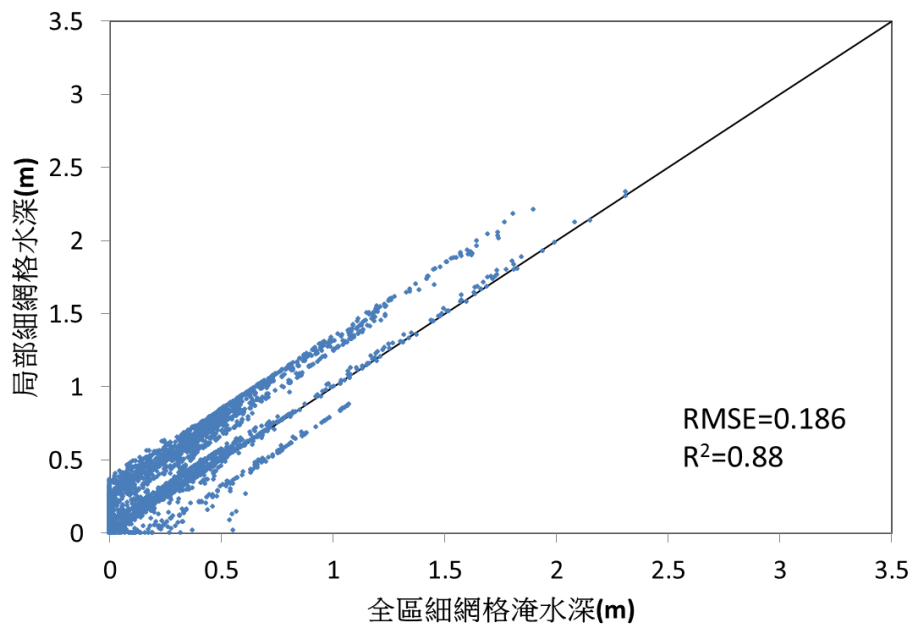


圖 5-76 曾文河流域七股局部細化地區 24 小時淹水深比較圖

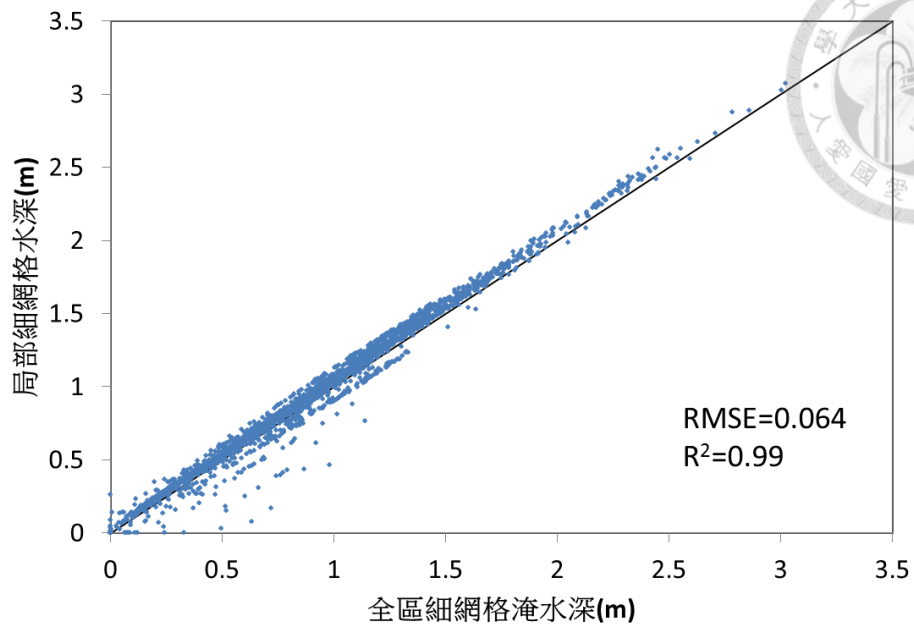


圖 5-77 曾文河流域七股局部細化地區 36 小時淹水深比較圖

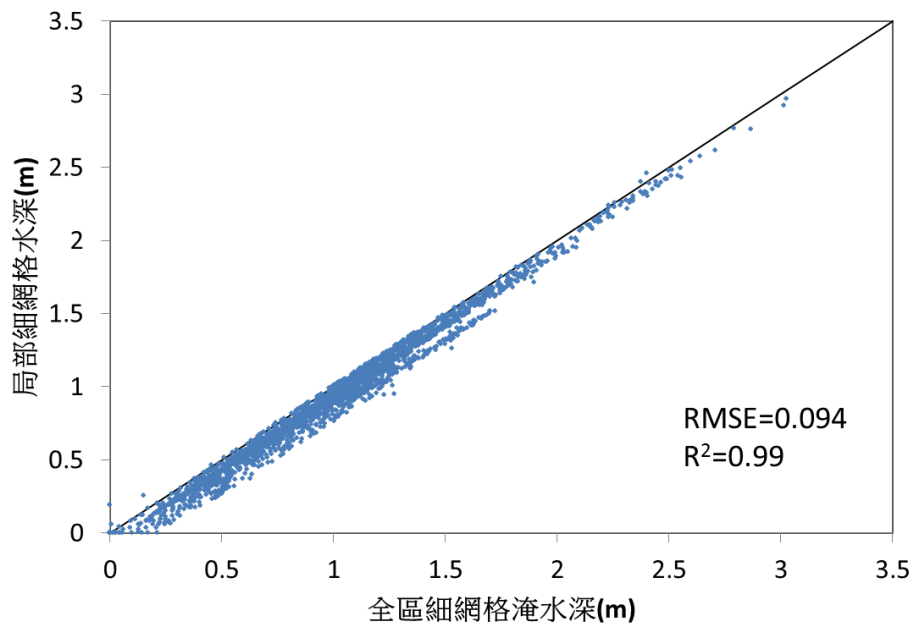


圖 5-78 曾文河流域七股局部細化地區 48 小時淹水深比較圖

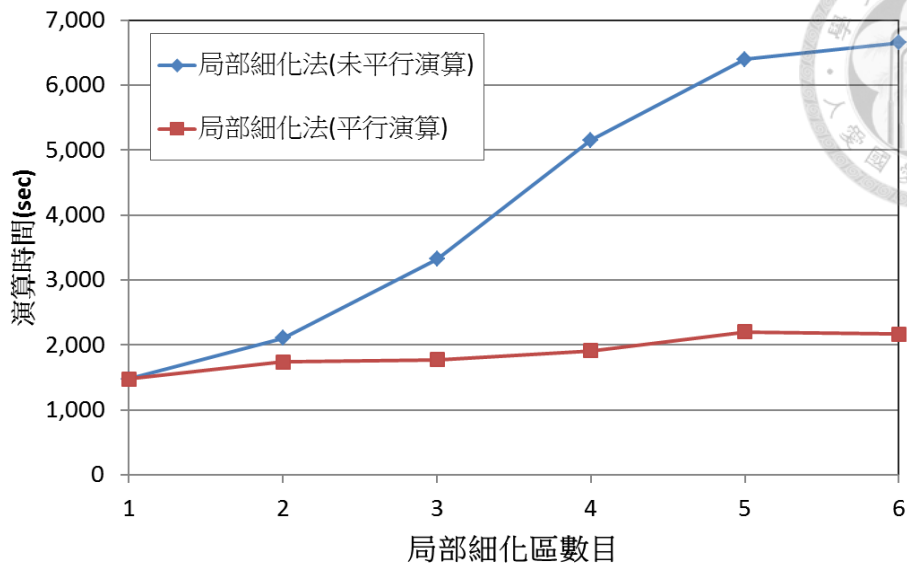


圖 5-79 演算時間比較圖

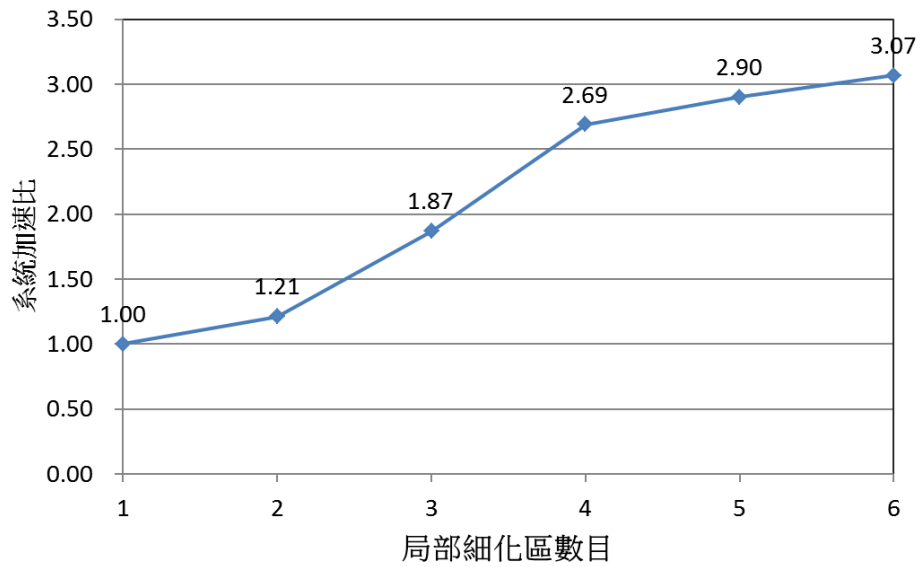


圖 5-80 細化區數目-系統加速比比較圖

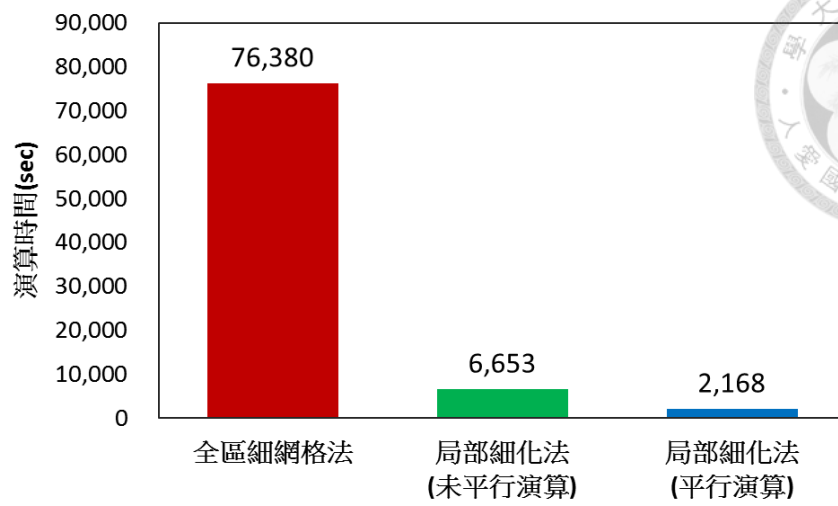


圖 5-81 與全區細網格演算時間比較圖





第六章 結論與建議


6-1 結論

本文於淹水模式中考慮建物效應，進行都市淹水模式之建置，以反應都會地區暴雨逕流之流況，模式中以建蔽率及建物門檻值來表示建物阻隔及蓄水效應，水流會被阻隔建物外，當水位超過建物門檻時，地表淹水則會流入建物中蓄積，模式中同時考量建物對水流產生之阻力影響，進行地表曼寧糙度值之修正。

本文建置之都市淹水模式，可採用不同之網格解析度進行模式運算，在全域以解析度較大的粗網格進行淹水模擬計算，而在人口密集或重要設施地區，則劃分網格解析度較高之局部細化模擬區進行淹水模擬，如此可避免全域採用高解析度網格進行完整水理控制方程式之複雜求解過程，提昇模式之計算效率，模式中同時以多核心之處理器之平行計算功能，進行都市淹水模式粗細網格之平行計算處理，提昇粗細網格淹水演算之效能。

本文所建置之都市淹水模式，以理想案例及台北市中央區納莉颱風之淹水事件完成模式之檢定及驗證，由理想案例檢定之結果，證明都市淹水模式可適當反應在不同的建蔽率設定下建物對水流的影響，建蔽率的設定可確實反應實際建物對水流的影響，且於粗細網格的計算結果顯示，局部細化區域之淹水模擬結果也具有良好的精度。

台北市中央區納莉颱風事件的模擬結果中，都市淹水模式中考慮建物阻水及蓄積效應，可有效模擬都市水流於建物外之流動情形，水流在建物的阻隔下會造成淹水水位的增高，當水位低於建物門檻時，建物能有效阻隔地表淹水，而在水位超過建物門檻值後，水流流入建物內蓄積而減緩地表淹水情形，顯示考量建物效應的都市淹水模式，能反應都市地區建物對淹水的影響，在考慮建物阻隔及蓄水效應及修正地表曼寧糙度值後，其模擬結果更接近實際淹水範圍。




都市淹水模式中可進行不同尺度粗細網格之淹水模擬，在邊界銜接部分，採用等流速分配法將全區大尺度粗網格演算所得流量平均分配至小尺度局部細化網格邊界上，做為其開放邊界條件。比較局部細化解析度 40 公尺×40 公尺之淹水計算網格點與全模擬區解析度 200 公尺×200 公尺之淹水計算網格點在相同位置上之淹水深，可知雖隨模擬演算時間往後推移逐漸產生較大誤差，但兩者間之趨勢仍相當吻合，其誤差來源主要為全區粗網格因網格解析度及平均高程所造成，而細網格使用相鄰之粗網格演算結果為其開放邊界入流條件，遂造成此兩者模擬結果之差異。

曾文溪北岸空間解析度 40 公尺×40 公尺之淹水計算網格演算時距採用 1 秒，空間解析度 200 公尺×200 公尺之淹水計算網格演算時距採用 5 秒。隨網格尺度不同而使用相對應不同之演算時距，可避免因可蘭數(Courant number)選取不當而產生計算結果逐漸發散所導致的誤差，形成數值解的不穩定性。因此在模擬過程中，不同尺度之淹水計算網格使用不同大小之演算時距，模擬結果將更符合實際流況。

本文利用粗細網格局部細化之淹水模擬，將曾文溪北岸以不同尺度不同細化模擬區域進行平行演算，在大尺度下以粗網格快速地進行演算模擬，對重點地區進行局部細化之小尺度演算，已大幅提升計算效率並能維持良好之模擬精度。在準確性(Accuracy)上，各局部細化子區域均方根誤差總平均為 0.149 公尺，顯示其已具良好精度，與全區皆使用細化網格之模擬結果相當一致。在效率性(Efficiency)，局部細化法之演算時間，已遠遠小於全區解析度 40 公尺細網格演算所耗時 21 小時 13 分鐘，本文經由平行演算法同步處理全區及局部模擬區域之演算後，使得都市淹水模式不因局部細化區域數目增加而耗費更多演算時間，系統加速比在本文中最高可達 3.07，顯示平行演算之模式可大幅地增進效率。

平行演算法搭配粗細網格局部細化之淹水模擬方法，能有效地兼顧準確性與效率性，並達到最佳之效果。若搭配即時預報雨量，都市淹水模式擁有之效率性可實際用於即時淹水預報當中；且透過平行演算法，也能針對模擬區當中重要脆弱區域，同時進行更多重點區域之細化網格同步演算，提供更精細、更即時之淹



水潛勢圖供給決策者使用提早防災應變。本文已建置完成之平行演算都市淹水模式，隨著未來科技發展，當電腦作業系統平台及處理器升級的同時，都市淹水模式不需再修改程式架構，僅需利用最新之程式編譯，以目前之平行演算架構，即可將模式應用於最新的電腦平台上，使演算工作發揮最大之效能，更有效利用電腦發展之技術，讓淹水模擬達到最佳化之效果。

6-2 建議

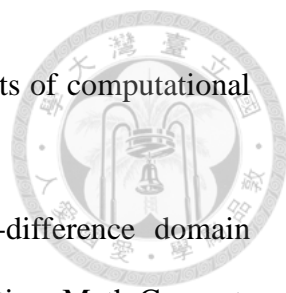
1. 都市淹水模式以建蔽率來表示建物，其呈現方式為位於網格中央之正方形建物，若一大型建物被若干網格切割時，模式中之建物可能與實際狀況有所差異，未來可進一步分析網格邊界流量受建物形狀及排列之影響，模擬更接近實際流況之淹水情形。
2. 都市淹水模式以局部細化方法進行淹水模擬時，由於局部細化網格邊界條件是由粗網格演算結果得到，由本文六個局部細化地區模擬結果可觀察，不同模擬區域所呈現之精確度有所差異。未來可針對各局部細化地區作最佳化分析，針對各分區特性，選出最適當之網格流量銜接方式。
3. 在平行演算效率上，目前只針對全區粗網格及局部細化區域作平行演算，但目前個人電腦的核心數目已無大幅度之進展，未來若計算機核心數目增加或使用高速電腦進行平行計算，則可針對都市淹水模式中單一模擬區之交替方向顯式法不同時階之求解進行平行化之研究，如此則更能提高淹水模式之演算效率。
4. 本文以大台南地區曾文溪北岸大尺度粗網格搭配重點區域作局部細化之淹水模擬。其網格大小分別為 200 公尺及 40 公尺，未來利用高解析度之地表高程資料，可進行局部細化區域內再細化之研究，全區大範圍模擬區以粗網格進行模擬，針對重點市區聚落作局部細化，再針對局部細化地區當中，重要之區域進行尺度更小至村里街道層級之淹水模擬，並搭配平行演算，能使淹水模式即時地呈現更細部之淹水預報。

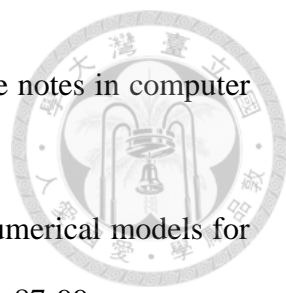


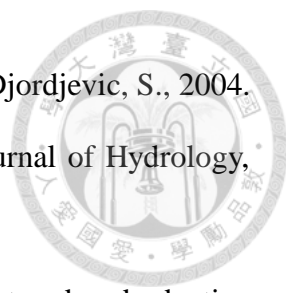
參考文獻




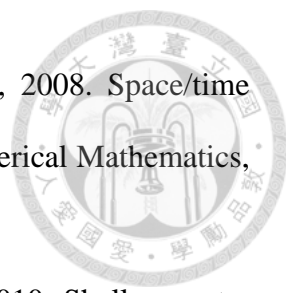
1. Akanbi, A. A. and Katopodes, N. D., 1988. Model for flood propagation on initially dry land. *J Hydraul Eng-Asce*, 114(7): 689-706.
2. Alcrudo, F., 2004. Mathematical modelling techniques for flood propagation in urban areas. Impact project technical report.
3. Bates, P. D., Dawson, R. J., Hall, J. W., Matthew, S. H. F., Nicholls, R. J., Wicks, J. and Hassan, M. A. A. M., 2005. Simplified two-dimensional numerical modelling of coastal flooding and example applications. *Coastal Engineering*, 52(9): 793-810.
4. Bates, P. D. and De Roo, A. P. J., 2000. A simple raster-based model for flood inundation simulation. *Journal of Hydrology*, 236(1-2): 54-77.
5. Bradford, S. F. and Sanders, B. F., 2002. Finite-volume model for shallow-water flooding of arbitrary topography. *J Hydraul Eng-Asce*, 128(3): 289-298.
6. Brandt, A., 1977. Multi-level adaptive solutions to boundary-value problems. *Mathematics of Computation*, 31(138): 333-390.
7. Chan, T. F., Go, S. and Zou, J., 1999. Boundary treatments for multilevel methods on unstructured meshes. *Siam Journal on Scientific Computing*, 21(1): 46-66.
8. Chen, A. S., Evans, B., Djordjevic, S. and Savic, D. A., 2012a. A coarse-grid approach to representing building blockage effects in 2d urban flood modelling. *Journal of Hydrology*, 426: 1-16.
9. Chen, A. S., Evans, B., Djordjevic, S. and Savic, D. A., 2012b. Multi-layered coarse grid modelling in 2d urban flood simulations. *Journal of Hydrology*, 470: 1-11.
10. Codenotti, B. and Leoncini, M., 1992. Introduction to parallel processing (international computer science series). Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., Boston, MA, USA, 272 pp.


- 
11. Cunge, J. A., Holly, F. M. and Verwey, A., 1980. Practical aspects of computational river hydraulics. Pitman Advanced Publishing Program.
 12. Dawson, C. N., Du, Q. and Dupont, T. F., 1991. A finite-difference domain decomposition algorithm for numerical-solution of the heat-equation. *Math Comput*, 57(195): 63-71.
 13. Erpicum, S., Dewals, B., Archambeau, P., Detrembleur, S. and Piroton, M., 2010. Detailed inundation modelling using high resolution dems. *Eng Appl Comp Fluid*, 4(2): 196-208.
 14. Ghia, U., Ghia, K. N. and Shin, C. T., 1982. High-resolutions for incompressible-flow using the navier stokes equations and a multigrid method. *Journal of Computational Physics*, 48(3): 387-411.
 15. Gouldby, B., Sayers, P., Mulet-Marti, J., Hassan, M. and Benwell, D., 2008. A methodology for regional-scale flood risk assessment. *Proc. Inst. Civil. Eng.-Water Manag.*, 161(3): 169-182.
 16. Green, J. C., 2005. Modelling flow resistance in vegetated streams: Review and development of new theory. *Hydrological Processes*, 19(6): 1245-1259.
 17. Gustafss. B., 1971. Alternation direction implicit method for solving shallow water equations. *Journal of Computational Physics*, 7(2): 239-&.
 18. Hemker, P. W., 1990. On the order of prolongations and restrictions in multigrid procedures. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 32(3): 423-429.
 19. Hervouet, J. M., 2000. A high resolution 2-d dam-break model using parallelization. *Hydrological Processes*, 14(13): 2211-2230.
 20. Hillis, W. D., 1992. What is massively parallel computing, and why is it important? *Daedalus*, 121(1): 1-15.
 21. Hluchy, L., Tran, V. D., Astalos, J., Dobrucky, M., Nguyen, G. T. and Froehlich, D., 2002. Parallel flood modeling systems. In: Sloot, P.A., Hoekstra, A., Tan, C.J.K.,

- 
- Dongarra, J. (Eds.), Computational science — iccs 2002. Lecture notes in computer science. Springer Berlin Heidelberg, pp. 543-551.
22. Horritt, M. S. and Bates, P. D., 2002. Evaluation of 1d and 2d numerical models for predicting river flood inundation. *Journal of Hydrology*, 268(1-4): 87-99.
23. Hsieh, S. H., Paulino, G. H. and Abel, J. F., 1997. Evaluation of automatic domain partitioning algorithms for parallel finite element analysis. *Int J Numer Meth Eng*, 40(6): 1025-1051.
24. Huber, W. C. and Dickinson, R. E., 1988. Storm water management model. User's manual. U. S. Environmental Protection Agency., Athens, Georgia.
25. Kalyanapu, A. J., Shankar, S., Pardyjak, E. R., Judi, D. R. and Burian, S. J., 2011. Assessment of gpu computational enhancement to a 2d flood model. *Environ. Modell. Softw.*, 26(8): 1009-1016.
26. Kandaswamy, P. K. and Rouse, H., 1957. Characteristics of flow over terminal weirs and sills. *Journal of Hydraulics Division, ASCE*, 83(4): 1-13.
27. Lamby, P., Muller, S. and Stiriba, Y., 2005. Solution of shallow water equations using fully adaptive multiscale schemes. *Int. J. Numer. Methods Fluids*, 49(4): 417-437.
28. Li, M. H., Cheng, H. P. and Yeh, G. T., 2000. Solving 3d subsurface flow and transport with adaptive multigrid. *J Hydrol Eng*, 5(1): 74-81.
29. Liang, D. F., Falconer, R. A. and Lin, B. L., 2007. Coupling surface and subsurface flows in a depth averaged flood wave model. *Journal of Hydrology*, 337(1-2): 147-158.
30. Liang, Q. H., Du, G. Z., Hall, J. W. and Borthwick, A. G. L., 2008. Flood inundation modeling with an adaptive quadtree grid shallow water equation solver. *J Hydraul Eng-Asce*, 134(11): 1603-1610.

- 
31. Mark, O., Weesakul, S., Apirumanekul, C., Aroonnet, S. B. and Djordjevic, S., 2004. Potential and limitations of 1d modelling of urban flooding. *Journal of Hydrology*, 299(3-4): 284-299.
32. Mavriplis, D. J., 1991. Turbulent-flow calculations using unstructured and adaptive meshes. *Int. J. Numer. Methods Fluids*, 13(9): 1131-1152.
33. McMillan, H. K. and Brasington, J., 2007. Reduced complexity strategies for modelling urban floodplain inundation. *Geomorphology*, 90(3-4): 226-243.
34. Neal, J., Fewtrell, T. and Trigg, M., 2009. Parallelisation of storage cell flood models using openmp. *Environ. Modell. Softw.*, 24(7): 872-877.
35. Neal, J. C., Fewtrell, T. J., Bates, P. D. and Wright, N. G., 2010. A comparison of three parallelisation methods for 2d flood inundation models. *Environ. Modell. Softw.*, 25(4): 398-411.
36. Neelz, S. and Pender, G., 2007. Sub-grid scale parameterisation of 2d hydrodynamic models of inundation in the urban area. *Acta Geophys.*, 55(1): 65-72.
37. O'Brien, J. S., Julien, P. Y. and Ponce, V. M., 1988. Flo-2d users manual for a short course on flooding and mud/debris flow, Salt Lake City, Utah.
38. Paglieri, L., Ambrosi, D., Formaggia, L., Quarteroni, A. and Scheinine, A. L., 1997. Parallel computation for shallow water flow: A domain decomposition approach. *Parallel Comput*, 23(9): 1261-1277.
39. Pau, J. C. and Sanders, B. F., 2006. Performance of parallel implementations of an explicit finite-volume shallow-water model. *J Comput Civil Eng*, 20(2): 99-110.
40. Rodrigue, G., 1992. Domain decomposition: A unified approach of solving fluid mechanics problems on parallel computers. In: Adeli, H. (Ed.), *Parallel processing in computational mechanics*. Marcel Dekker, Inc., New York, pp. 297-330.

- 
41. Ruge, J. W., McCormick, S. F. and Yee, S. Y. K., 1995. Multilevel adaptive methods for semiimplicit solution of shallow-water equations on a sphere. *Monthly Weather Review*, 123(7): 2197-2205.
42. Sanders, B. F., 2007. Evaluation of on-line dems for flood inundation modeling. *Adv. Water Resour.*, 30(8): 1831-1843.
43. Sanders, B. F., Schubert, J. E. and Detwiler, R. L., 2010. Parbrezo: A parallel, unstructured grid, godunov-type, shallow-water code for high-resolution flood inundation modeling at the regional scale. *Adv. Water Resour.*, 33(12): 1456-1467.
44. Sanders, B. F., Schubert, J. E. and Gallegos, H. A., 2008. Integral formulation of shallow-water equations with anisotropic porosity for urban flood modeling. *Journal of Hydrology*, 362(1-2): 19-38.
45. Shige-Eda, M. and Akiyama, J., 2003. Numerical and experimental study on two-dimensional flood flows with and without structures. *J Hydraul Eng-Asce*, 129(10): 817-821.
46. Simon, H. D., 1991. Partitioning of unstructured problems for parallel processing. *Computing Systems in Engineering*, 2(2): 135.
47. Soares-Fraza, S., Lhomme, J., Guinot, V. and Zech, Y., 2008. Two-dimensional shallow-water model with porosity for urban flood modelling. *J Hydraul Res*, 46(1): 45-64.
48. Spitaleri, R. M. and Corinaldesi, L., 1997. Multigrid computation for the two-dimensional shallow water equations. *Nonlinear Analysis-Theory Methods & Applications*, 30(2): 709-717.
49. Tsubaki, R. and Fujita, I., 2010. Unstructured grid generation using lidar data for urban flood inundation modelling. *Hydrological Processes*, 24(11): 1404-1420.
50. U.S. Army Corps of Engineers, H. E. C., 1998. Hec-1 hydrograph package. Water Resources Support Center, Davis, California.

- 
51. van Brummelen, E. H., van der Zee, K. G. and de Borst, R., 2008. Space/time multigrid for a fluid-structure-interaction problem. *Applied Numerical Mathematics*, 58(12): 1951-1971.
52. Velickovic, M., Van Emelen, S., Zech, Y., Soares-Frazão, S., 2010. Shallow-water model with porosity: Sensitivity analysis to head losses and porosity distribution. In: A. Dittrich, K.K., J. Aberle, P. Geisenhainer (Ed.), *River Flow 2010*, Braunschweig, Germany, pp. p. 613-620
53. Vongvisessomjai, S., Tingsanchali, T. and Chaiwat, C., 1985. Bangkok flood plain model, 21st IAHR Congress, Melbourne, Australia, pp. 433-488.
54. Wang, Q. X., Li, H. and Lam, K. Y., 2005. Development of a new meshless - point weighted least-squares (pwls) method for computational mechanics. *Comput. Mech.*, 35(3): 170-181.
55. Wilson, M. D. and Atkinson, P. M., 2005. The use of elevation data in flood inundation modelling: A comparison of ers interferometric sar and combined contour and differential gps data. *International Journal of River Basin Management*, 3(1): 3-20.
56. Xanthopoulos, T. and Koutitas, C., 1976. Numerical-simulation of a 2 dimensional flood wave-propagation due to dam failure. *J Hydraul Res*, 14(4): 321-331.
57. Yu, D. and Lane, S. N., 2006a. Urban fluvial flood modelling using a two-dimensional diffusion-wave treatment, part 1: Mesh resolution effects. *Hydrological Processes*, 20(7): 1541-1565.
58. Yu, D. and Lane, S. N., 2006b. Urban fluvial flood modelling using a two-dimensional diffusion-wave treatment, part 2: Development of a sub-grid-scale treatment. *Hydrological Processes*, 20(7): 1567-1583.
59. 王彥翔，2012，都市區建蔽率對水流計算之影響，國立臺灣大學碩士論文。

- 
60. 台北市政府，2001，台北市納莉颱風災後重建推動委員會防洪排水組第一次會議參考資料。
61. 江明晃，2006，台中市區數值地形解析度對淹水模擬結果之比較，國立臺灣大學碩士論文。
62. 吳啟瑞，1993，八掌溪流域之淹水模擬，國立臺灣大學碩士論文。
63. 李懿軒，2013，局部細化淹水平行演算之研究，國立臺灣大學碩士論文。
64. 邱建勛，2011，建蔽率對都市淹水影響之模擬，國立臺灣大學碩士論文。
65. 許銘熙，鄧慰先，盧重任，黃成甲，葉森海，1998，抽水站與閘門操作對都會區淹水影響之研究，行政院國家科學委員會。
66. 許銘熙，顏清連，謝慧民，1990，基隆河沿岸低窪地區淹水模式(一)：模式之建立與驗證，行政院國科會防災科技研究報告 78-57 號。
67. 陳昌榮，2002，流域暴雨逕流和淹水之模擬，國立臺灣大學碩士論文。
68. 陳欣怡，2001，台南科學工業園區暴雨排水之動態模擬，國立臺灣大學碩士論文。
69. 陳彥宏，2008，流域格網局部細化之淹水模擬，國立臺灣大學碩士論文。
70. 黃成甲，1997，流域洪水與淹水演算模式之研究，國立臺灣大學碩士論文。
71. 楊昌儒，蔡長泰，1998，數值高程模型解析度對嘉義沿海地區淹水模擬影響之研究--以賀伯颱風為例，台灣水利第 46 第一期，43-52。
72. 鄒亞達，2009，淹水細化網格邊界處理之研究，國立臺灣大學碩士論文。
73. 盧重任，1997，台北縣板和地區洪水及淹水演算模擬，國立臺灣大學碩士論文。
74. 賴進松，林孟郁，2000，台北縣三重蘆洲及新莊樹林區淹水預測之研究，89 年農工研討會論文。
75. 顏清連，許銘熙，陳昶憲，賴進松，1986，淡水河系洪水演算模式:堤防潰決洪流模式之建立，行政院國家科學委員會。
76. 蘇郁惠，2008，簡易空間分布之淹水計算模式，國立臺灣大學碩士論文。





附錄 A (3-4)式推導

以二維的控制面積而言，沿 x ， y 方向長度分別為 Δx ， Δy ，則控制面積 $A = \Delta x \cdot \Delta y$ ，如下圖所示。假設網格內部建物面積與整個網格面積的比例為 α_0 ，則無建物部分的比例則為 $1 - \alpha_0$ 。

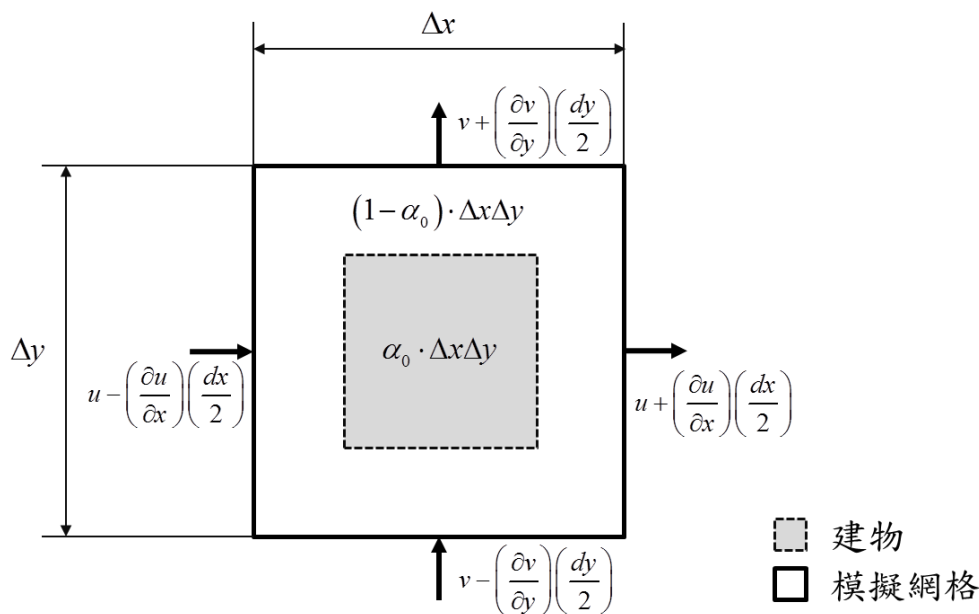


圖 A-1 控制面積示意圖

假設在建物的邊長範圍內，沿 x 方向進出邊界之流速分別為 $u - \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\Delta x}{2}$ 及 $u + \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\Delta x}{2}$ ，沿 y 方向進出邊界之流速分別為 $v - \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\Delta y}{2}$ 及 $v + \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\Delta y}{2}$ ，網格內的平均水深為 d ，網格垂直方向單位面積的流量為 q ，則控制面積內的連續方程式可表示為：



$$\begin{aligned}
& \frac{\partial d}{\partial t}(1-\alpha_0)\Delta x\Delta y \\
& + \left[\left(u + \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) \left(d + \frac{\partial d}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) \right] \Delta y \\
& - \left[\left(u - \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) \left(d - \frac{\partial d}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) \right] \Delta y \\
& + \left[\left(v + \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\Delta y}{2} \right) \left(d + \frac{\partial d}{\partial y} \frac{\Delta y}{2} \right) \right] \Delta x \\
& - \left[\left(v - \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\Delta y}{2} \right) \left(d - \frac{\partial d}{\partial y} \frac{\Delta y}{2} \right) \right] \Delta x \\
& = q\Delta x\Delta y
\end{aligned} \tag{A-1}$$

(A-1)式展開後可得：

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial d}{\partial t}(1-\alpha_0)\Delta x\Delta y \\
& + \left[u \cdot d + u \frac{\partial d}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} + d \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} + \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial d}{\partial x} \left(\frac{\Delta x}{2} \right)^2 \right] \Delta y \\
& - \left[u \cdot d - u \frac{\partial d}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} - d \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} + \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial d}{\partial x} \left(\frac{\Delta x}{2} \right)^2 \right] \Delta y \\
& + \left[v \cdot d + v \frac{\partial d}{\partial y} \frac{\Delta y}{2} + d \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\Delta y}{2} + \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\partial d}{\partial y} \left(\frac{\Delta y}{2} \right)^2 \right] \Delta x \\
& - \left[v \cdot d - v \frac{\partial d}{\partial y} \frac{\Delta y}{2} - d \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\Delta y}{2} + \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\partial d}{\partial y} \left(\frac{\Delta y}{2} \right)^2 \right] \Delta x \\
& = q\Delta x\Delta y
\end{aligned} \tag{A-2}$$

(A-2)式整理可得：

$$\frac{\partial d}{\partial t}(1-\alpha_0)\Delta x\Delta y + \left(u \frac{\partial d}{\partial x} + d \frac{\partial u}{\partial x} \right) \Delta x\Delta y + \left(v \frac{\partial d}{\partial y} + d \frac{\partial v}{\partial y} \right) \Delta x\Delta y = q\Delta x\Delta y \tag{A-3}$$

將等號左右兩邊除以 $\Delta x\Delta y$ 可得(3-4)式

$$\frac{\partial(1-\alpha_0)d}{\partial t} + \frac{\partial ud}{\partial x} + \frac{\partial vd}{\partial y} = q \tag{3-4}$$



附錄 B (3-16)及(3-17)式差分式推導

(3-16)式，對 $(i+1, j, m+\frac{1}{2})$ 點而言：

$$d_{i+1, j}^{m+\frac{1}{2}} = d_{i+1, j}^m - \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta t}{(1-\alpha)} \cdot \left[\frac{\left(u_{i+\frac{3}{2}, j}^{m+\frac{1}{2}} \cdot d_{i+\frac{3}{2}, j}^m - u_{i+\frac{1}{2}, j}^{m+\frac{1}{2}} \cdot d_{i+\frac{1}{2}, j}^m \right)}{\Delta x} + \frac{\left(v_{i+1, j+\frac{1}{2}}^m \cdot d_{i, j+\frac{1}{2}}^m - v_{i+1, j-\frac{1}{2}}^m \cdot d_{i, j-\frac{1}{2}}^m \right)}{\Delta y} - d_{i+1, j}^{m+\frac{1}{2}} \right] \quad (\text{B-1})$$

(3-17)式，對 $(i+\frac{1}{2}, j, m+\frac{1}{2})$ 點而言，即 $u_{i+\frac{1}{2}, j}^{m+\frac{1}{2}}$ 之一元二次方程式：

$$f_3 = A_1 \cdot u_{i+\frac{1}{2}, j}^{m+\frac{1}{2}} \cdot \left| u_{i+\frac{1}{2}, j}^{m+\frac{1}{2}} \right| + B_1 \cdot u_{i+\frac{1}{2}, j}^{m+\frac{1}{2}} + C_1 = 0 \quad (\text{B-2})$$

式中

$$A_1 = \frac{\left(n_{i+\frac{1}{2}, j} \right)^2}{\left(d_{i+\frac{1}{2}, j}^m \right)^{4/3}} \quad (\text{B-3})$$

$$B_1 = \frac{\Delta t \cdot d_{i+\frac{1}{2}, j}^m}{(\Delta x)^2} + \frac{q_{i+\frac{1}{2}, j}^{m+\frac{1}{2}}}{\left(d_{i+\frac{1}{2}, j}^m \cdot g \right)} \quad (\text{B-4})$$

$$C_1 = (T_1 + T_2 + T_3 + T_4) / \Delta x \quad (\text{B-5})$$

$$T_1 = d_{i+1, j}^m + z_{i+1, j}^{m+\frac{1}{2}} - d_{i, j}^m - z_{i, j}^{m+\frac{1}{2}} \quad (\text{B-6})$$

$$T_2 = -\frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x \cdot (1-\alpha)} \left(u_{i-\frac{1}{2}, j}^{m+\frac{1}{2}} \cdot d_{i-\frac{1}{2}, j}^m \right) \quad (\text{B-7})$$

$$T_3 = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta t}{(1-\alpha)} \left[\frac{\left(v_{i, j+\frac{1}{2}}^m \cdot d_{i, j+\frac{1}{2}}^m - v_{i, j-\frac{1}{2}}^m \cdot d_{i, j-\frac{1}{2}}^m \right)}{\Delta y} \right] - \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta t}{(1-\alpha)} \left[\frac{\left(u_{i+\frac{3}{2}, j}^m \cdot d_{i+\frac{3}{2}, j}^m \right)}{\Delta x} + \frac{\left(v_{i+1, j+\frac{1}{2}}^m \cdot d_{i, j+\frac{1}{2}}^m - v_{i+1, j-\frac{1}{2}}^m \cdot d_{i, j-\frac{1}{2}}^m \right)}{\Delta y} \right] \quad (\text{B-8})$$

$$T_4 = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta t}{(1-\alpha)} (q_{i+1,j}^{m+\frac{1}{2}} - q_{i,j}^{m+\frac{1}{2}})$$



附錄 C (3-24)及(3-25)式差分式推導



(3-24)式，對 $(i, j+1, m+1)$ 點而言：

$$d_{i,j+1}^{m+1} = d_{i,j+1}^{m+\frac{1}{2}} - \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta t}{(1-\alpha)} \cdot \left[\frac{\left(u_{i+\frac{1}{2},j+1}^{m+\frac{1}{2}} \cdot d_{i+\frac{1}{2},j+1}^{m+\frac{1}{2}} - u_{i-\frac{1}{2},j+1}^{m+\frac{1}{2}} \cdot d_{i-\frac{1}{2},j+1}^{m+\frac{1}{2}} \right)}{\Delta x} + \frac{\left(v_{i,j+\frac{3}{2}}^{m+1} \cdot d_{i,j+\frac{3}{2}}^{m+\frac{1}{2}} - v_{i,j+\frac{1}{2}}^{m+1} \cdot d_{i,j+\frac{1}{2}}^{m+\frac{1}{2}} \right)}{\Delta y} - q_{i,j+1}^{m+1} \right] \quad (\text{C-1})$$

(3-25)式，對 $(i, j+\frac{1}{2}, m+1)$ 點而言，即 $v_{i,j+\frac{1}{2}}^{m+1}$ 之一元二次方程式：

$$g_3 = A_2 \cdot v_{i,j+\frac{1}{2}}^{m+1} \cdot \left| v_{i,j+\frac{1}{2}}^{m+1} \right| + B_2 \cdot v_{i,j+\frac{1}{2}}^{m+1} + C_2 = 0 \quad (\text{C-2})$$

式中

$$A_2 = \frac{\left(n_{i,j+\frac{1}{2}} \right)^2}{\left(d_{i,j+\frac{1}{2}}^{m+\frac{1}{2}} \right)^{4/3}} \quad (\text{C-3})$$

$$B_2 = \frac{\Delta t \cdot d_{i,j+\frac{1}{2}}^{m+\frac{1}{2}}}{(\Delta y)^2} + \frac{q_{i,j+\frac{1}{2}}^{m+1}}{\left(d_{i,j+\frac{1}{2}}^{m+\frac{1}{2}} \cdot g \right)} \quad (\text{C-4})$$

$$C_2 = (R_1 + R_2 + R_3 + R_4) / \Delta y \quad (\text{C-5})$$

$$R_1 = d_{i,j+1}^{m+\frac{1}{2}} + z_{i,j+1}^{m+1} - d_{i,j}^{m+\frac{1}{2}} - z_{i,j}^{m+1} \quad (\text{C-6})$$

$$R_2 = -\frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta y \cdot (1-\alpha)} \left(v_{i,j-\frac{1}{2}}^{m+1} \cdot d_{i,j-\frac{1}{2}}^{m+\frac{1}{2}} \right) \quad (\text{C-7})$$

$$R_3 = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta t}{(1-\alpha)} \left[\frac{\left(u_{i+\frac{1}{2},j}^{m+\frac{1}{2}} \cdot d_{i+\frac{1}{2},j}^{m+\frac{1}{2}} - u_{i-\frac{1}{2},j}^{m+\frac{1}{2}} \cdot d_{i-\frac{1}{2},j}^{m+\frac{1}{2}} \right)}{\Delta x} \right] - \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta t}{(1-\alpha)} \left[\frac{\left(u_{i+\frac{1}{2},j+1}^{m+\frac{1}{2}} \cdot d_{i+\frac{1}{2},j+1}^{m+\frac{1}{2}} - u_{i-\frac{1}{2},j+1}^{m+\frac{1}{2}} \cdot d_{i-\frac{1}{2},j+1}^{m+\frac{1}{2}} \right)}{\Delta x} + \frac{\left(v_{i,j+\frac{3}{2}}^{m+\frac{1}{2}} \cdot d_{i,j+\frac{3}{2}}^{m+\frac{1}{2}} \right)}{\Delta y} \right] \quad (\text{C-8})$$

$$R_4 = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta t}{(1-\alpha)} (q_{i,j+1}^{m+1} - q_{i,j}^{m+1})$$



附錄 D 河系溢堤洪水演算模式



河系溢堤洪水演算模式，可考慮二模式地表水路出口與河川水位之水流交互作用，並同時演算出河川水位與流域淹水狀況；在河川洪水位模擬演算模式為一維變量流河川洪水演算模式，地表淹水模擬則採用都市淹水模式，並根據漫地流與河川水位關係，決定二者間交互作用之流量，將兩模式結合銜接，期能同時演算出河川水位與流域淹水狀況。都市淹水模式部份已於 3-1 節說明，附錄中將只針對一維變量流河川洪水演算模式部份基本理論及模式銜接方法作一詳細說明。河川之洪流演算，依據 St. Venant Equation 所推導的一維變量流方程式，考慮完整之水流連續及運動方程式，即為動力波模式，其控制方程式依次為：

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial X} - q_{l1} + q_{l2} = 0 \quad (D-1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial X} \left(\frac{Q^2}{A} \right) - gA \left(S_0 - \frac{\partial Y}{\partial X} - S_f \right) + q_{l2} \left(\frac{Q}{A} \right) = 0 \quad (D-2)$$

- 式中，
- A : 河川通水斷面積[m²];
 - t : 時間[s];
 - Q : 河川流量[m³/s];
 - X : 沿水流方向之空間座標[m];
 - q_{l1} : 單位河川長度之側入流量[m²/s];
 - q_{l2} : 單位堤防長度之溢流量[m²/s];
 - g : 重力加速度[m²/s];
 - S_0 : 河川底床坡度;
 - Y : 河川之水深[m];
 - S_f : 摩擦坡降; $S_f = \frac{n^2 \cdot Q \cdot |Q|}{A^2 \cdot R^{4/3}}$
 - R : 水力半徑[m];
 - n : 河床之曼寧糙度係數。

(D-1)式與(D-2)式分別表示水流之連續及動量方程式，(D-1)式係表示在一單位長度控制體積中，通過該體積之淨流量 $(-\frac{\partial Q}{\partial x} + q_{l1} - q_{l2})$ 等於該控制體積內所含水體積之變化率 $(\frac{\partial A}{\partial t})$ 。(D-2)式表示在一控制體積中，沿 x 方向之外力總和等於該控制體積中動量對時間之變化率，其外力包括單位質量之重力 (gS_0) ，壓力梯度 $(-g \frac{\partial Y}{\partial X})$ 與摩擦阻力 $(-gS_f)$ 等。(D-2)式中，假設溢流之瞬間，其沿 x 方向之溢流速度與河槽之平均速度 (Q/A) 相同。

在一維河系變量流與都市淹水模式銜接處，當都市淹水模式網格淹水位高於一維河川水位時，則水將排至河川；當匯流處之河川水位高於都市淹水模式淹水位，此時河川水將流入地表。流量則考慮淹水模擬網格與河川斷面間之水位關係，依自由堰流或潛沒堰流公式計算得出。(Cunge et al., 1980; Kandaswamy and Rouse, 1957)

$$q = \begin{cases} \mu_f \sqrt{2g} (H_H - Z_w)^{\frac{1}{2}} & , \text{ for } (H_L - H_w) < \frac{2}{3}(H_H - H_w) \\ \mu_s \sqrt{2g} (H_L - Z_w)(H_L - H_w)^{\frac{1}{2}} & , \text{ for } (H_L - H_w) \geq \frac{2}{3}(H_H - H_w) \end{cases} \quad (D-3)$$

式中， μ_f : 自由堰流流量係數；

μ_s : 潛沒堰流流量係數；

H_w : 堰頂高程[m]；

H_H : 匯流處相鄰之河川斷面與網格中較高之水位[m]；

H_L : 匯流處相鄰之河川斷面與網格中較低之水位[m]。

當匯流處之網格水位高於河川水位時，水流是由地表流入河川，則此時(D-1)式中 $q_{l2} = q$ ，並以 q 做為都市淹水模式中之出流邊界條件。當匯流處之河川水位高於地表網格水位時，水流是由河川斷面流入地表，則此時(D-1)式中 $q_{l2} = q$ ，並以 q 做為都市淹水模式中之入流邊界條件。