

連接物聯網與控制 LID 主動控制裝置效益評估

Evaluation of the benefits of active control devices that connect the Internet of Things with the control LID

國立臺北科技大學 土木工程系土木與防災碩士班

學生

黃雅晨

Ya-Chen Huang

助理教授

杜敏誠

Min-Cheng Tu

摘要

隨著都市過度開發，以及在氣候變遷的影響下，減少地表逕流及降低洪峰流量，已被視為常見的暴雨管理方法之一，如低衝擊開發(Low Impact Development, LID)，過往 LID 皆屬於被動裝置，僅有單一的排水方式，無法根據暴雨的規模彈性地決定其排放策略，再加上現今物聯網 (Internet of Things, IoT) 的興盛，歐美等部分先進國家已對 LID 採即時控制 (Real-Time Control)，希望在暴雨來臨或前夕時，效能得以充分發揮。

本研究主要目的在於假設減少現有儲水槽容量，將 LID 設施內數個被動裝置被修改為可動部件，模擬並研究 LID 系統在該控制邏輯下所能提供的防洪排水效能。首先選定臺北市立北投國小做為研究區域，採用 SWMM 模式對研究區域進行模式建置，根據物聯網監測 2020 年 1 月至 2021 年 8 月期間的有效降雨事件，運用 SCEUA (Shuffled Complex Evolution - University of Arizona) 演算法對模式進行率定與驗證，之後將 LID 設施內數個被動裝置被控制規則模組(Control Rule Module)控制後，利用臺北市災害潛勢資料求得研究區域內的淹水溢流高度，並根據歐盟提出之淹水深度損失曲線(Global Flood Depth-Damage Functions)，求出預估的災害損失，最後與控制邏輯下的 LID 進行效益比對。

關鍵詞：低衝擊開發設施，SWMM 模式，SCEUA 演算法，主動控制

Abstract

With urban overdevelopment, and under the influence of climate change, reducing surface runoff and reducing peak flow has been regarded as one of the standard stormwater management methods, such as Low Impact Development(LID). In the past, LIDs were all passive devices with only a single drainage method, which could not flexibly determine the emission strategy according to the scale of the rainstorm. Coupled with the prosperity of the Internet of Things(IoT) today, some advanced countries such as Europe and the United States have adopted Real-Time Control for LID, hoping that the effect can be fully exerted when the

storm comes or just before the storm.

The main purpose of this study is to assume that the capacity of the existing water storage tank facility is reduced, and several passive devices in the LID facility are modified into movable parts, the flood control and drainage performance that the LID system can provide under the control logic is simulated and studied. First, the Taipei Beitou Elementary School was selected as the study area, the SWMM model is used to build the model in the study area. According to the effective rainfall events from January 2020 to August 2021 monitored by the Internet of Things, the SCEUA (Shuffled Complex Evolution - University of Arizona) algorithm is used to calibrate and verify the model, and then several passive devices in the LID are controlled by the Control Rule Module. Using the disaster potential data of Taipei City, the flooding overflow height in the study area was obtained, and the estimated disaster loss was calculated according to the Global Flood Depth-Damage Functions proposed by the European Union. Finally, compare the benefits with the LID under the control logic.

Keywords: Low Impact Development, SWMM, SCEUA Algorithm, Real-Time Control

一、前言

近年來氣候變遷導致極端降雨機率增加，傳統的排水防洪工程思維已不足以解決問題，應讓都市成為可以吸水、保水、儲水的城市，以儲水代替排水，減緩都市內的水患，低衝擊開發(Low Impact Development, LID)概念的出現，與以往工程工法不同，透過小型且分散的源頭控制，管制暴雨所產生的逕流量，且盡量保持且恢復開發前的水文狀態，利用入滲、增加集流時間，以減低開發行為對水量衝擊為目標，改善都市水文循環，使其恢復到開發前的水文狀態。

隨著遠端監控技術興起，都市雨水管理的措施和設施，如降雨觀測系統、控制系統等，可與物聯網 (Internet of Things, IoT) 相互連接，透過感測器收集數據，並以 wifi、藍芽或是乙太網路連接至網路，藉此將數據傳輸至雲端，進入雲端後會利用軟體進行處理，最終將資訊傳遞給用戶進行智慧雨水管理，可對超過預期的降雨量和突發事件提供應對計畫，減少突發事件或災害造成的損失。

為研究主動控制 LID 在暴雨管理的策略與其益處，本研究主要目的在於假設減少研究地區現有儲水槽設施的容量，運用 EPA SWMM(Storm Water Management Model, SWMM)建置模型，根據物聯網監測的雨量模式進行敏感度分析，之後將 LID 設施內數個被動裝置被控制規則模組(control rule module)控制，模擬並研究 LID 系統在該控制邏輯下的效能，之後利用災害潛勢資料求得研究區域內的淹水溢流高度，並根據歐盟提出之災損推估曲線，求出災害預期的損失值。

本研究主要目的如下：

1. SWMM 建置之 LID 模型設施內的被動部件可被控制規則模組控制。

2. 找出 LID 系統在該控制邏輯下的最佳效能。
3. 評估連接物聯網與控制 LID 之主動控制裝置效益。

二、文獻回顧

物聯網的興盛，使得主動控制 LID 成為可能，故學界已開始研究主動控制 LID 在暴雨管理的策略與其益處。目前已有許多研究指出，主動控制 LID 能達到防洪 (Mullapudi et al., 2018; Loftin et al., 2010)，雨水再利用 (Reidy, 2010)，以及提高 LID 水質改善效率等益處 (Kerkez et al., 2016; Papa et al., 1999)。

奧地利因斯布魯克大學進行的一項微型實驗，他們將物聯網和雨水桶連接在一起 (Oberascher et al., 2018)，形成了一個智能雨水桶，並將其視為 LID 設施，加裝簡易的主動控制系統，以透過天氣預報對其進行實時監控和控制。如果預計流入雨水桶的流量超過總儲存量，則會在降雨事件發生之前完全排空。但是，如果計算結果發現入流量小於存儲量，則僅將一部分的水排空，以確保在降雨事件結束時還有水可以使用。在乾旱期間，則是使用儲存的水進行灌溉來減少飲用水的消耗。為了減少天氣預報的不確定性，實時測量降雨量，並與天氣預報進行比較，以在必要時更改策略。最後結果顯示，儘管僅是安裝了簡化的主動控制系統，還是可以將洪水量減少 18%-40%。

加拿大魁北克省的格蘭比市為適應環境變化，在排水系統末段滯留池加入主動控制，使用連續 6 個月降雨數據及四個單獨降雨事件進行分析，最後發現主動控制設施有效延遲和控制洪峰流量，當儲水量達大最大水深時，也沒有溢淹情形發生。在人口稠密的地區加入主動控制，有助於適應氣候變化，而無須重建整個排水系 (Bilodeau et al., 2018)。

三、研究方法

1. 研究地區描述

北投國小位於臺北市北投區，研究地區以明德樓及至善樓之間公共區域作為基地場址，包含雨水花園 A 及 B、貯水槽、碎石鋪面等。排水系統設計方面 (如圖 1)，北側屋頂逕流透過雨水落水管流入碎石沖刷坑，再流至雨水花園 A，西側屋頂逕流則是往雨水花園 B。場址右側透過截水溝將籃球場四分之一面積的逕流都匯聚起來，排至碎石鋪面北側的預鑄 U 型溝。在一般降雨的情況下，匯集的逕流透過預鑄 U 型溝及側向 PVC 管，將初期雨水都導往雨水花園 A，並透過下埋的 HDPE 透水管將雨水導往雨水花園貯水槽。在短延時強降雨或長延時之持續性降雨，導致 U 型溝中水位高於溝中堰高時，逕流會經由 PVC 管，通過碎石沖刷坑流入雨水花園 B。同雨水花園 A，雨水花園亦有下埋 HDPE 透水管將雨水導往雨水花園貯水槽。

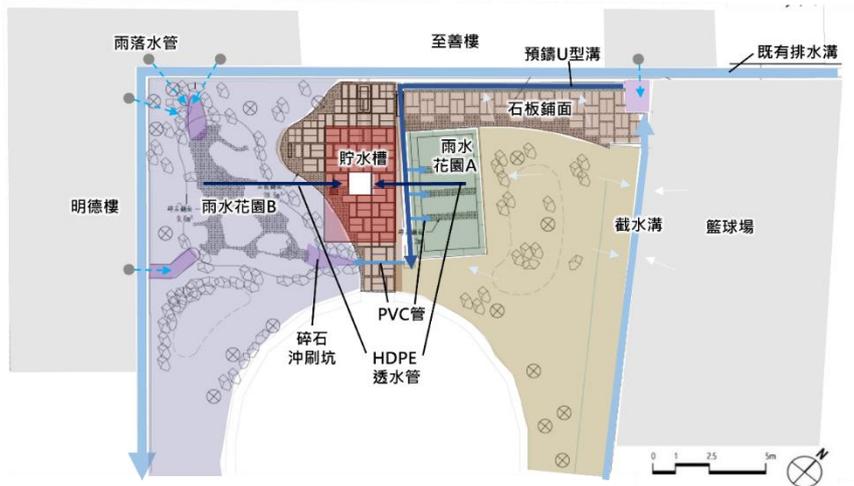


圖 1 排水系統流向圖

2. 研究地區 SWMM 率定及驗證

SWMM (Storm water management Model) 模式為美國環保署公開發行降雨逕流評估模式。在 2010 年更新 5.0 版中加入多項低衝擊開發設施模組供用戶使用，是目前廣泛應用於世界各地的雨水逕流規劃、分析和設計水文模式 (Lin et al., 2018)。本研究根據研究地區實際狀況建置 SWMM 模型，但在使用任何水文模式之前，需對模式內之參數必須先加以率定 (calibration) 與驗證 (validation) 以使模式能反映現地特性。率定及驗證之準確程度可用回歸式表示，其解釋回歸公式的適配度 (goodness of fit) 可用決定係數 R^2 描述，當此線性回歸的決定係數越接近 1 時，表示模值與實測值越相近，模擬結果越好，如式(1)、表 1 所描述。

$$R^2 = 1 - \frac{SS_e}{SS_t}, \text{ 其中 } SS_e \text{ 為誤差變異量, } SS_t \text{ 為總變異量} \quad (1)$$

表 1 模型模擬結果之指標特性表

	模式判斷指標	範圍值	接受值	文獻
水文參數	決定係數 (R^2)	0-1	>0.5	(Moriasi et al. 2015)

SCEUA (Shuffled Complex Evolution - University of Arizona) 演算法為演化演算法之一種，其目的為模仿自然界演化的機制，以最短的計算時間找出最佳解，而不需花費大量時間地毯式搜尋所有可能的解答。SCEUA 已被證明能有效的率定水文模型 (Wanget al. 2009)。SWMM 模式亦已被證明能與 SCEUA 演算法 (Doherty et al., 2019) 合作良好。

3. 研究地區 SWMM 控制規則模組

傳統 LID 裝置多為被動裝置，若將被動裝置修改為可動部件能使 LID 以更小的尺寸發揮更高效率 (Mullapudi et al., 2018; Loftin et al., 2010)。可動部件能被 SWMM 之控制規則模組(control rule module)所控制。SWMM 控制規則模組，能利用簡單的高階程式語言語法來控制 SWMM 部件，且多個邏輯條件可同時運行以控制閘門的開啟與關閉等。

在實際的主動控制 LID 應用中，控制 LID 的演算法尚需根據氣象預報預測實際的降雨量，但為簡化考慮之因素，本研究假設氣象預報為 100% 準確，將研究著重在主動

控制 LID 的控制邏輯與系統狀態間的關係。

由於水位之測量較管流量之測量更為簡易且具更高精確度，系統之狀態將以儲水元件(雨水花園，雨水積磚等)之水深表示。本模式選用之 Green-Ampt 入滲方法在 2009 年修正後加入積水深度對入滲率的影響，因此控制邏輯可透過調整閘門來決定設施內的積水高度以調整下滲率(Tom N., 2015)，達成在儲水元件總儲水量最大的前提下，外溢量最小結果。控制邏輯中參數最後經由 SCEUA 演算法，計算出滿足上述條件之最佳係數解。

4. 溢流總量

在 SWMM 模式中，根據實際情況將堰版選擇 V 形堰，並利用 V 形槽堰公式將溢流深度換算成流量，再乘上單位時間後，即獲得該單位時間內之溢流量。Cw 為堰的流量係數，S 為 V 形槽的坡度，h 為堰頂與水位的高度差，其公式如下：

$$V - \text{notch flow}(cfs) = Cw \times S \times h^{(5/2)} \quad (2)$$

5. 淹水潛勢區域

本研究地區位於大業東排水系統。參考臺北市管線圖(臺北市政府工務局，2022)，及區域型氣候變遷調適設施示範推廣計畫(陳起鳳，2020)，繪製集水區範圍。考量位置及北投國小雨量站資料(中央氣象局，2020)，假設情境如下：

- (1) 78.8mm/hr (5 年重現期，臺北市雨水下水道保護標準)。
- (2) 100mm/hr (50 年重現期，臺北雨量站)。
- (3) 130mm/hr (>200 年重現期，104 年 0614 豪雨公館站 1 小時累積雨量)。

根據此三種情境，水利工程處已製作出淹水潛勢資料(臺北市政府工務局，2022)。本研究將其搭配使用分區圖(臺北市政府都市發展局，2022)，利用 ArcMap 10.5 軟體進行套疊，可計算各情境下不同土地使用分區之總淹水面積。

根據淹水潛勢資料之此三種情境之淹水面積將被視為未接收本研究場址溢流之基本情境。在後續的研究中，不同情境之溢流量將疊加該等基本情境之淹水面積之上，以計算本研究場址溢流對大業東排集水區範圍內所增加的淹水深度。

6. 災害損失推估曲線

利用上述災害潛勢淹水面積及溢流總量資料，可推估出淹水高度，根據歐盟聯合研究中心(European Commission's Joint Research Centre, JRC) 2017 年出版淹水深度-破壞曲線(Global flood depth-damage functions)，求出災害預期的損失值。概念類似於國立臺灣大學蘇明道教授 2005 年提出之網格式資料推估方法，如圖 2 所示。JRC 定義 6 種主要類型，包括住宅、商業、工業、交通運輸、公共設施和農業，根據不同土地使用類別進行洪水破壞估計，製作一系列淹水深度-災害損失曲線圖，本研究利用前述推估之溢流高度得知，求出研究地區內水災害預期損失值，並與控制邏輯下的 LID 進行效益比對。

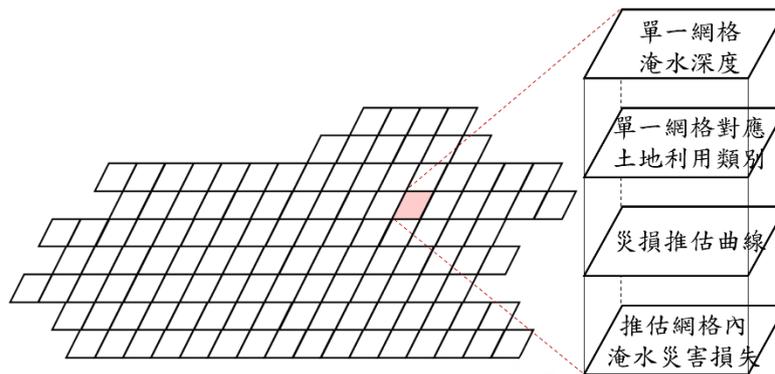


圖 2 網格式資料推估方法
資料來源：蘇明道(2005)，本研究繪製

四、結果與討論

1. SWMM 模式率定驗證

1.1 短期模擬

本研究使用監測時間內最大降雨事件 2020/08/03 作為 SCEUA 效能之最初測試。以雨水積磚處水位為校正點位，率定後之決定係數 R^2 為 0.84，符合表 2 之模擬結果接受值範圍。依 Moriasi 等人之研究 (Moriasi et al., 2015)，可被評斷為“佳”(good)，並與“極佳”(very good) 的數值範圍 (>0.85) 極為接近。

表 2 雨水積磚單一場次降雨率定結果表

校正點位	率定資料	最高水位 (M)		判定指標 (R^2)
		觀測值	模擬值	
雨水積磚	2020/08/03 降雨事件	1.44	1.47	0.84

1.2 長期模擬

本研究之降雨場次定義係依照 Wischmeier and Smith (1978) 之有效降雨定義，為單場降雨之累積雨量需超過 12.7mm 或是 15 分鐘內降下 6.35mm 以上，並且此場降雨需與前場降雨間隔六小時。根據中央氣象局北投國小雨量站(中央氣象局，2020)，在監測時間 2020 年 1 月至 2021 年 8 月 12 日之內，有效降雨最初統計後為 39 場，由於資料缺失及儀器異常等因素，原 39 場中有 18 場在率定驗證中被剔除，剩餘 21 場有效降雨場次分成兩組具有大致相同的總雨量及平均降雨強度的場次，分別做為率定 (Calibration) 與驗證 (Validation) 資料，且率定 (11 場) 略多於驗證資料 (10 場)。

SCEUA 演算法以不同亂數種子啟動 5 次，發現第三次決定係數(以 R^2 表示)最高，分別為 0.69 與 0.70，如表 3。依 Moriasi 等人之研究 (Moriasi et al., 2015)，可評斷為“滿意”(Satisfactory)。

表 3 雨水積磚水位率定驗證結果表

隨機種子	決定係數(R^2)	率定	驗證
123	第 1 次	0.5	0.62
283	第 2 次	0.51	0.61

隨機種子	決定係數(R ²)	率定	驗證
317 第 3 次		0.69	0.70
452 第 4 次		0.51	0.62
555 第 5 次		0.42	0.58

2. 控制規則效益評估

在 SWMM 模式控制規則中，本研究將控制元件位置擇定於兩個雨水花園出口(圖 3)，並考慮不同的雨水積磚大小，使用 SCEUA 演算法以五次亂數種子啟動以了解最佳解的不確定範圍。未知的控制元件參數(水位高度)先以 Y, Z 代替，如式(3)至(4)所示。

$$\begin{aligned}
 & \text{RULE rule1} \\
 & \text{IF NODE A DEPTH} \leq Y \\
 & \text{THEN orifice oA13 setting} = 0 \\
 & \text{ELSE orifice oA13 setting} = 1 \\
 & \text{PRIORITY 1}
 \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned}
 & \text{RULE rule2} \\
 & \text{IF NODE B DEPTH} \leq Z \\
 & \text{THEN orifice oB13 setting} = 0 \\
 & \text{ELSE orifice oB13 setting} = 1 \\
 & \text{PRIORITY 1}
 \end{aligned} \tag{4}$$

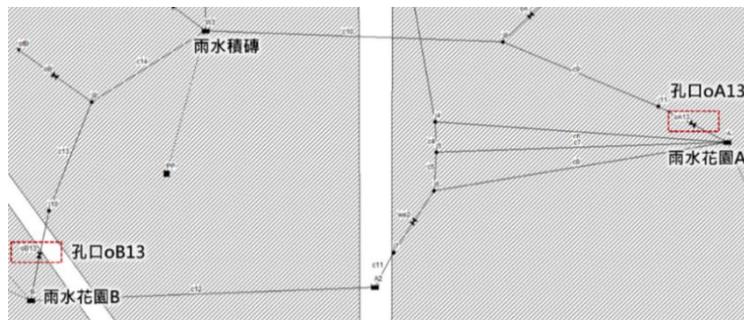


圖 33 控制元件位置-接近雨水花園 A 及雨水花園 B 出口

由於現地之雨水積磚尺寸偏大，溢流紀錄相當少，故本研究將雨水積磚底面積以 10% 間距為間隔縮小 10% 至 90% 的 9 個虛擬情境，如表 4，以比較雨水積磚建造成本與區域水災損失之間的關係。使用 SCEUA 演算法以五次不同亂數種子啟動後，計算出雨水花園水位高度，並計算虛擬情境最佳化控制元件參數(雨水花園 A 及 B 之水位高)下總溢流深度及總溢流量，如表 5，灰底為溢流最少。

表 4 雨水積磚底面積縮小比例及面積

縮小比例	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	原面積
面積(m ²)	1.425	2.85	4.275	5.7	7.125	8.55	9.975	11.4	12.825	14.25

表 5 雨水積磚底面積縮小比例及總溢流深度(m)及總溢流量(m³)

隨機種子 縮小比例	123 第 1 次		283 第 2 次		317 第 3 次		452 第 4 次		555 第 5 次	
	深度	溢流量								
原比例 x10%	15.49	231.27	15.49	231.27	15.49	231.27	15.5	231.29	15.47	231.11
原比例 x20%	13.52	194.16	13.49	194.12	13.5	194.13	13.49	193.95	13.51	194.14
原比例 x30%	11.23	155.82	11.26	155.85	11.28	156.09	11.3	156.26	11.37	156.97
原比例 x40%	9.57	135.01	9.56	135	9.56	135	9.43	134.08	9.57	135.01
原比例 x50%	7.87	110.03	7.88	110.04	8.03	112.21	8.03	111.75	7.88	110.08
原比例 x60%	6.61	92.12	6.61	92.12	6.62	92.39	6.62	92.12	6.62	92.13
原比例 x70%	5.6	78.24	5.6	78.08	5.57	78.24	5.6	78.41	5.46	77.16
原比例 x80%	4.74	68.66	4.72	68.53	4.71	68.22	4.74	68.66	4.74	68.66
原比例 x90%	3.84	57	3.84	57	3.85	57.01	3.78	56.09	3.79	56.1
無縮小	3.38	51.6	3.38	51.6	3.39	51.71	3.37	51.56	3.39	51.63

下表 6 將控制前後的總溢流量及總溢流深度進行對比，即可發現在模式加入控制規則後，減少多少水量。

表 6 控制後總溢流深度(m)及總溢流量(m³)變化

縮小比例		原比例 x10%	原比例 x20%	原比例 x30%	原比例 x40%	原比例 x50%	原比例 x60%	原比例 x70%	原比例 x80%	原比例 x90%	無縮 小
減 少	水位	0.26	0.31	0.58	0.53	0.66	0.5	0.64	0.48	0.56	0.33
	溢流量	32.92	27.93	29.3	23.7	22.68	20.47	24.06	19.86	22.2	15.99

3. 雨量分級淹水面積

根據臺北市淹水潛勢資料及使用分區圖(臺北市政府工務局，2022)，相互套疊後即可得到大業東排範圍淹水潛勢圖。大業東排總面積約 753426.1 平方公尺，三種假設情境下總淹水區域土地使用面積如表 7 所示。在 78.8mm/hr 淹水潛勢中，淹水深度最高至 1 公尺，其中會淹水的土地使用類別為四類，包含工業區、交通用地、住宅區、商業區。在 100mm/hr 及 130mm/hr 降雨淹水潛勢中，淹水深度最高至 1 公尺，其中會淹水的土地使用類別為五類，包含工業區、交通用地、住宅區、學校用地、商業區。

表 7 各情境使用分區總淹水面積(m²)

假設情境	78.8mm/hr	100mm/hr	130mm/hr
總淹水面積(m ²)	33588.41	61903.11	83402.72

4. 研究地區加入控制規則下各雨量分級災害損失

本研究將使用歐盟聯合研究中心(JRC)於 2017 年出版的淹水深度-破壞曲線，求出研究地區內水災的預期損失值。JRC 出版的淹水深度-破壞曲線(Global flood depth-damage functions)將災損計算設置於 2010 年，因此本研究以該年匯率進行換算(1 歐元兌換 0.024 新台幣)，該刊物內發表針對亞洲國家適用的災損推估曲線。因曲線為非線性函數，故本研究進一步以將該表改寫為多項式形式以方便計算，R² 皆有在 0.98 以上，如表 8。

表 8 各類別多項式回歸方程式

住宅	$y = -10.461x^4 + 162.52x^3 - 981.15x^2 + 3053.8x + 66.602$
商業	$y = -17.58x^4 + 269.09x^3 - 1544.3x^2 + 4312x + 112.79$

基礎設施	$y = -26.796x^2 + 268.81x + 29.416$
工業	$y = -5.9726x^4 + 116.47x^3 - 855x^2 + 3016.2x + 13.262$
運輸	$y = -8.5805x^4 + 202.94x^3 - 1744.3x^2 + 6447x + 95.584$
農業	$y = 0.0038x^3 - 0.0546x^2 + 0.3311x + 0.0056$

圖 4 概述如何使用 JRC 之淹水深度-破壞曲線於本研究中。假設本研究地區之溢流對淹水面積造成的改變可忽略，而僅對淹水之高度有所影響。前述已得知在不同淹水潛勢下的淹水面積，因此將本研究地區溢流出的體積除以面積，即可得到因本研究地區溢流所造成的額外淹水高度。使用多項回歸方程式計算出每一分區未加上本研究場地溢流前之災損及加上該額外淹水高度後之災損，兩者之差即為本研究場地溢流對該分區每平方公尺淹水區域所造成的額外災損。將其再乘上淹水面積，即可得到研究地區內各土地使用分區之災害損失。各分區災損加總後，可得知本研究地區之災損為何，如圖 4 所示。

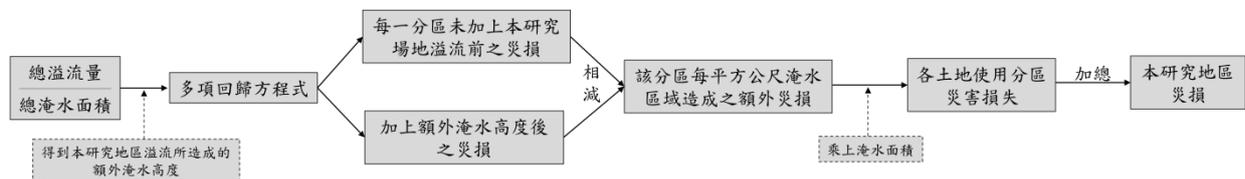


圖 4 研究地區溢流高度災損計算流程圖

為得知研究地區溢流所造成的額外災害損失，首先將上表 5 之總溢流體積除以表 7 之總淹水面積後，得到額外淹水深度如表 9。因 5 次隨機種子的淹水高度差異太小，故對每一個縮小比例-淹水潛勢之組合僅顯示單一值。

表 9 研究地區加入控制規則各淹水潛勢下額外淹水總深度(m)

縮小比例 淹水潛勢	原比例 x10%	原比例 x20%	原比例 x30%	原比例 x40%	原比例 x50%	原比例 x60%	原比例 x70%	原比例 x80%	原比例 x90%	無縮小
78.8mm/hr	0.007	0.006	0.005	0.004	0.003	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002
100mm/hr	0.004	0.003	0.003	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
130mm/hr	0.003	0.002	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001

因災損推估曲線定義之 6 大類別，與本研究地區內土地使用未完全相同，因此本研究根據使用用途，將其分類對應如下表 10。

首先計算在加入主動控制的狀況下，本研究場地對大業東排所造成的額外災損。利用上表 9 及多項回歸方程式，計算出每一分區未加上本研究場地溢流前之災損及加上該額外淹水高度後之災損，即得知該土地使用下，該淹水深度災害損失。再乘上淹水面積後相加，得到溢流高度所造成的災害損失，如表 11。

表 10 土地使用對應類別

災損推估曲線類別	住宅	商業	基礎設施	工業	運輸	農業
研究區域內土地使用分區	住宅區	商業區	學校用地	工業區	交通用地	無

表 11 研究地區加入控制規則後災損

縮小比例	總額(台幣)	78.8mm/hr	100mm/hr	130mm/hr
原比例 x10%		\$3,483,670	\$5,221,570	\$6,661,108
原比例 x20%		\$3,348,461	\$5,001,408	\$6,351,380
原比例 x30%		\$3,219,487	\$5,001,408	\$6,351,380

縮小比例——總額(台幣)	78.8mm/hr	100mm/hr	130mm/hr
原比例 x40%	\$3,084,278	\$4,767,527	\$6,351,380
原比例 x50%	\$2,957,204	\$4,767,527	\$6,059,279
原比例 x60%	\$2,957,204	\$4,547,365	\$6,059,279
原比例 x70%	\$2,820,095	\$4,547,365	\$6,059,279
原比例 x80%	\$2,820,095	\$4,547,365	\$6,059,279
原比例 x90%	\$2,820,095	\$4,547,365	\$6,059,279
無縮小	\$2,820,095	\$4,547,365	\$6,059,279

上表 9 中發現，在時雨量 130mm/hr 情境中，額外淹水高度低於其他二者，其原因是因為在時雨量越大的情境中，總淹水面積也越大，當總溢流量(自本研究場地)不變的情況下除上越大的總淹水面積，溢流深度亦隨之降低，而災損隨深度減小而減緩，故在時雨量大的情境中每平方公尺面積災損較低。但在計算整體溢流深度災損時，受較大淹水面積的影響，總災損還是較高，如表 11。

5. 研究地區未加入控制規則災損

為了解本研究地區加入控制規則的效益為何，應先了解研究地區未加入控制規則時，原溢流所造成的災害損失為何，並與上述 3 節的災損相比較，即可得知在研究地區加入控制規則後，是否有效降低溢流造成的災害損失。本研究使用前述建立之 SWMM 模式(不使用控制規則)，雨水積磚尺寸縮小間距與前述表 4 相同，並採用與圖 5.3.2 相同的災損計算過程，以得到在研究地區未加入控制規則前的溢流災損為何，如表 12。

表 12 研究地區內未加入控制規則災損

縮小比例——總額(台幣)	78.8mm/hr	100mm/hr	130mm/hr
原比例 x10%	\$3,610,743	\$5,221,570	\$6,661,108
原比例 x20%	\$3,483,670	\$5,221,570	\$6,661,108
原比例 x30%	\$3,348,461	\$5,001,408	\$6,351,380
原比例 x40%	\$3,219,487	\$5,001,408	\$6,351,380
原比例 x50%	\$3,084,278	\$4,767,527	\$6,351,380
原比例 x60%	\$2,957,204	\$4,767,527	\$6,059,269
原比例 x70%	\$2,957,204	\$4,767,527	\$6,059,269
原比例 x80%	\$2,957,204	\$4,547,365	\$6,059,269
原比例 x90%	\$2,820,095	\$4,547,365	\$6,059,269
無縮小	\$2,820,095	\$4,547,365	\$6,059,269

6. 控制前後災損比較

6.1 主動控制成效差異

根據上表 11 及 12 發現在三種假設情境下，研究地區加入控制規則能比未加入控制規則的情況節省約 13 萬至 30 萬元台幣不等，如表 13。依據區域型氣候變遷調適設施示範推廣計畫(陳起鳳，2020)內工程項目經費表及國外購物網站(Alibaba, 2022)上粗估，本實驗場地主動控制系統成本約為 15 萬台幣，如表 14。若僅比較主動控制系統建置成本與水災災損，對本研究地區來說，當時雨量達每小時 78.8 毫米以上時(表 13)，主動控制

系統節省金額未超過自身成本金額，並無明顯經濟效益，負數之結果以會計符號“()”表示；而當時雨量達到每小時 100 毫米以上時(表 13)，加入主動控制系統有明顯經濟效益。

下表 13 節省金額欄位中，有些相鄰資料未出現節省金額，亦或擁有相同節省金額，原因為結果受前述 SCEUA 演算法隨機種子影響，結果會落在一個波動區間，本研究僅以五次隨機種子啟動，可能未選擇到結果最大值，因此造成有些相鄰資料未有節省金額。

表 13 三種情境下控制前後節省金額(台幣)

縮小比例	節省金額			加入主動控制成本節省金額		
	78.8mm/hr	100mm/hr	130mm/hr	78.8mm/hr	100mm/hr	130mm/hr
原比例 x10%	\$ 127,073	\$ 0	\$ 0	(22,927)	(150,000)	(150,000)
原比例 x20%	\$ 135,209	\$220,162	\$309,728	(14,791)	70,162	159,728
原比例 x30%	\$ 128,974	\$ 0	\$ 0	(21,026)	(150,000)	(150,000)
原比例 x40%	\$ 135,209	\$233,881	\$ 0	(14,791)	83,881	(150,000)
原比例 x50%	\$ 127,074	\$ 0	\$292,111	(22,926)	(150,000)	142,111
原比例 x60%	\$ 0	\$220,162	\$ 0	(150,000)	70,162	(150,000)
原比例 x70%	\$ 137,109	\$220,162	\$ 0	(12,891)	70,162	(150,000)
原比例 x80%	\$ 137,109	\$ 0	\$ 0	(12,891)	(150,000)	(150,000)
原比例 x90%	\$ 0	\$ 0	\$ 0	(150,000)	(150,000)	(150,000)
無縮小	\$ 0	\$ 0	\$ 0	(150,000)	(150,000)	(150,000)

表 14 主動控制系統價格估算

項目	平均金額 (台幣)	參考來源
控制板 (Control Panel)	約 14,000 元	Alibaba, 2022
致動器 (Actuator)	約 110,000 元	
水位計 (Level Sensor)	約 15,000 元	
工程及現場調試費用	工程費 5%~10%計算	內政部營建署
主動控制系統總成本價約為 15 萬元		

6.2 最佳雨水積磚設施大小

為了解雨水積磚最佳設施大小，本研究將成本及災損與原雨水積磚總造價進行比較，計算出節省的成本及增加的災損，並將兩者進行比對。根據區域型氣候變遷調適設施示範推廣計畫(陳起鳳, 2020)，可以得知原始雨水積磚總造價約為新台幣 262,000 元，依照雨水積磚設施體積，推估各縮小比例的雨水積磚設施價格。將各比例雨水積磚價格加上主動控制系統成本，並扣除原始無縮小雨水積磚造價，即可得知節省的成本，如下表 15。

下表 15 節省成本欄位，雨水積磚縮小比例 10%至 40%在扣除原始雨水積磚造價後，結果為負數，並以會計符號“()”表示，其表示該比例之雨水積磚在加入主動控制成本後，成本未比原始未縮小雨水積磚成本便宜，反而增加成本。

為計算本研究地區加入控制規則後，各比例與未縮小雨水積磚之情形下，增加了多少災損，本研究利用表 11，將各雨水積磚縮小比例造成的災損，扣除無縮小比例下之災損，即可得知增加的災損為何，如下表 15。本表中未考慮雨水積磚不同大小造價差異，以及主動控制機構所需之建設費。表 15 出現相同及未節省之金額，如前述表 13 亦同。

根據表 15 可繪出圖 5。單就節省的成本來看，在三種假設情境下，當雨水積磚縮小比例在 50%以上時，即可有效節省成本；從增加的災損來看，當縮小比例在 50%至 70%以上，即不會增加額外的災害損失，如表 15 所示。將三種情境下的節省成本與增加災損相比較即可發現，在縮小比例 40%以上時，為最佳的雨水積磚大小，如下圖 5 所示。

表 5.3.15 加入控制規則後節省成本與增加災損比較

情境 縮小比例	78.8mm/hr		100mm/hr		130mm/hr	
	節省的成本	增加的災損	節省的成本	增加的災損	節省的成本	增加的災損
原比例 x 10%	(85,800)	663,575	(85,800)	674,205	(85,800)	601,839
原比例 x 20%	(59,600)	528,366	(59,600)	454,043	(59,600)	292,111
原比例 x 30%	(33,400)	399,392	(33,400)	454,043	(33,400)	292,111
原比例 x 40%	(7,200)	264,183	(7,200)	220,162	(7,200)	292,111
原比例 x 50%	19,000	137,109	19,000	220,162	19,000	0
原比例 x 60%	45,200	137,109	45,200	0	45,200	0
原比例 x 70%	71,400	0	71,400	0	71,400	0
原比例 x 80%	97,600	0	97,600	0	97,600	0
原比例 x 90%	123,800	0	123,800	0	123,800	0
無縮小	150,000	0	150,000	0	150,000	0

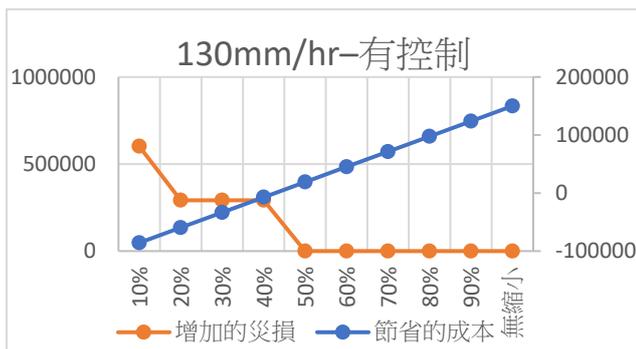
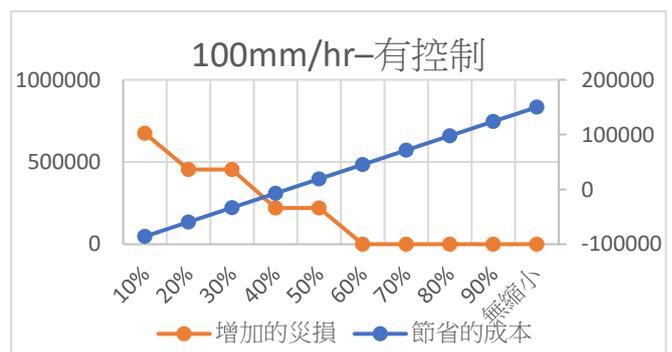
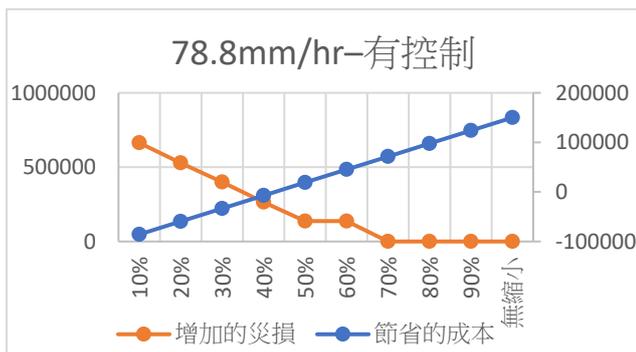


圖 5 各情境控制後節省成本與增加災損折線圖

6.3 雨水積磚縮小比例與主動控制重要性分析

為了解三種情境中，雨水積磚縮小比例及加入主動控制對本研究地區重要性，本研究將針對三種情境之有無加入控制規則情況下，各比例與無縮小之雨水積磚增加之災損結果進行前後對比。在研究地區加入控制規則前後之情況下，將無縮小之雨水積磚與各比例雨水積磚災損(表 11 及表 12)相減，得知在加入控制規則前後，縮小雨水積磚是否

不會對研究地區帶來而外的災損，如表 16。

根據表 16 發現，在研究地區無加入控制規則情況下，當時雨量 78.8 毫米時，僅有雨水積磚縮小為原比例之 90%，可達到與無縮小雨水積磚同樣的效果，而當時雨量增加至 130 毫米時，雨水積磚縮小為原比例之 60%時，即達到與無縮小雨水積磚同樣的效果。

在研究地區加入控制規則情況下，當時雨量 78.8 毫米時，雨水積磚縮小為原比例之 70%，即可達到與無縮小雨水積磚同樣效果，而當時雨量增加至 130 毫米時，雨水積磚縮小為原比例之 50%時，即達到與無縮小雨水積磚同樣效果。

表 16 加入控制規則前後各比例雨水積磚增加之災損

情境 縮小比例	78.8mm/hr		100mm/hr		130mm/hr	
	控制前 增加災損	控制後 增加災損	控制前 增加災損	控制後 增加災損	控制前 增加災損	控制後 增加災損
原比例 x 10%	790,648	663,575	674,205	674,205	601,839	601,839
原比例 x 20%	663,575	528,366	674,205	454,043	601,839	292,111
原比例 x 30%	528,366	399,392	454,043	454,043	292,111	292,111
原比例 x 40%	399,392	264,183	454,043	220,162	292,111	292,111
原比例 x 50%	264,183	137,109	220,162	220,162	292,111	0
原比例 x 60%	137,109	137,109	220,162	0	0	0
原比例 x 70%	137,109	0	220,162	0	0	0
原比例 x 80%	137,109	0	0	0	0	0
原比例 x 90%	0	0	0	0	0	0
無縮小	0	0	0	0	0	0

五、結論與建議

1. 結論

- (1) 以監測時間內最大降雨事件 2020/08/03 作為測試 SCEUA 效能之指標，率定後之判定指標 R^2 為 0.84，除符合接受值範圍之外，依 Moriasi 等人之研究 (Moriasi et al., 2015)，與“極佳”(very good) 的數值範圍 (>0.85) 極為接近。
- (2) 經 SCEUA 演算法 5 次隨機種子率定後，11 場降雨之率定及 10 場降雨之驗證之判定指標 R^2 皆在可接受值範圍，依 Moriasi 等人之研究 (Moriasi et al., 2015)，可被評斷為“滿意”(Satisfactory)。
- (3) LID 設施加入主動控制可節省 13 萬至 30 萬元不等，主動控制系統成本則約為 15 萬元，當研究地區時雨量達每小時 100 毫米時，加入主動控制系統能有效降低成本，在未來設置儲水槽容量時，亦可縮小儲水槽設施的儲水容量。
- (4) 在 10%-90%縮小範圍中，透過節省的成本及增加的災損可以發現，在縮小比例 40% 以上時為最佳的雨水積磚設施大小。
- (5) 在未加入控制規則前，當時雨量 78.8 毫米時，僅雨水積磚縮小比例 90%能達到無縮小之雨水積磚相同效果，加入控制規則後，縮小比例 70%即可達到與無縮小之雨水積磚相同效果；而當時雨量 130 毫米時，雨水積磚縮小比例可從 60%降至 50%。

2. 建議

- (1) 在控制前後的節省金額部分可以看到，有些控制前後並無差異，本研究推斷為，北投國小雖位在大業東排分區範圍內，且汙水及雨水下水道管線並無分開，但兩者面積差異太大，如將北投國小溢流量放到大業東排看整體災損，易造成淹水深度不明顯，建議未來劃設排水範圍時，可將集水區範圍縮小。
- (2) 災損推估曲線除參考歐盟外，美國聯邦緊急管理局 FEMA 研發 Hazus 曲線，以地理資訊系統(GIS)為基礎，推估分析可能性的災害損失，數據內容皆以美國當地資訊為主，因歐盟有針對亞洲國家進行調查，因此最終採取歐盟發布之災害損失推估曲線。

參考文獻

- Alibaba (2022), Rotork Electric valve actuator, <https://www.alibaba.com/product-detail/Rotork-Electric-valve-actuator-The-3rd_1600460818876.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_image.6c7e4b05myjaQg>(accessed 14 July 2022).
- Alibaba (2022), Keller Level Sensor, <https://www.alibaba.com/product-detail/Keller-For-Water-Measurements-Level-Sensor_1600185071962.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.70545e0clehYqD>(accessed 14 July 2022).
- Alibaba (2022), Control panel, <https://www.alibaba.com/product-detail/Sontrol-Sanel-Control-Panel-Water-Control_1600096420148.html?spm=a2700.7724857.topad_classic.d_image.5bc27318jy0cu1>(accessed 14 July 2022).
- Bilodeau, K., Pelletier, G., and Duchesne, S. (2018). "Real-time control of stormwater detention basins as an adaptation measure in mid-size cities", *Urban Water Journal*, 15 (9), 858-867
- D. N. Moriasi, M. W. Gitau, N. Pai, P. Daggupati (2015), "Hydrologic and water quality models: performance measures and evaluation criteria", *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 58 (6), 1763-1785.
- Doherty, J., Muffels, C., Rumbaugh, J. (2019). "Model-Independent Parameter Estimation & Uncertainty Analysis." <<http://pesthomepage.org/Home.php>> (December 4, 2019)
- Huizinga, J., De Moel, H. and Szewczyk, W., "Global flood depth-damage functions: Methodology and the database with guidelines", EUR 28552 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2017, ISBN 978-92-79-67781-6, doi:10.2760/16510, JRC105688.
- Kerkez, B., Gruden, C., Lewis, M. (2016), "Smarter Stormwater Systems", *Environmental Science and Technology*, 50, 7267-7273.
- Lin, J.Y., C.F. Chen and C.C. Ho (2018), "Evaluating the effectiveness of green roads for runoff control", *Sustainable Water in the Built Environment*, 4 (2) : 04018001.
- Loftin, H., Tuttle, R., Monde, M. (2010), "Using LID retrofits for flood control and to achieve receiving water quality standards", *Proc. Watershed Management Conference 2010*. ASCE, Madison. 828-837.
- Mullapudi, A., Bartos, M., Wong, B. (2018), "Shaping streamflow using a real-time stormwater control network", *Sensors*, 18, 2259.
- Oberascher, M., Zischg, J., Palermo, S. A., Kinzell, C., Rauch, W., and Sitzenfrei, R. (2018), "Smart Rain Barrels: Advanced LID Management Through Measurement and Control", *Proc., 11th Annual Int. Urban Drainage Modelling Conf.*, Springer Science and Business Media., US, 777-782.
- Papa, F., Adams, B.J., Guo, Y. (1999), "Detention time selection for stormwater quality control ponds", *Can. J. Civ. Eng.*, 26, 72-82.
- Reidy, P.C. (2010), "Integrating Rainwater Harvesting for Innovative Stormwater Control", *Proc. World*

Environmental and Water Resources Congress 2010. ASCE, Providence, 448-454.

Tom N., Mitch H., (2015), “Modified Green Ampt Method in EPA SWMM”, The Environmental & Water Resources Institute (EWRI) of the American Society of Civil Engineers(ASCE).

Wang, Y.C., P.S. Yu, T.C. Yang (2009), “Comparison of genetic algorithms and shuffled complex evolution approach for calibrating distributed rainfall–runoff model”, *Hydrological Processes*, 24 (8), 1015-1026.

Wischmeier, W.H.; Smith, D.D. (1987). “Agriculture Handbook,537.; U.S.Department of Agriculture”, Science and Education Administration: Hyattsville, MD, USA, 1–58.

中央氣象局 (2021), 民生公共物聯網, <<https://reurl.cc/LMGZ03>> (2021年8月31日)。

林宜宏 (2017), 工程估算作業方式, 內政部營建署委託 (2022年7月14日)

陳起鳳、林鎮洋、廖桂賢、洪淑惠 (2020), 區域型氣候變遷調適設施示範推廣計畫, 行政院環境保護署委託 (計畫編號: 108A350)。

臺北市政府工務局 (2022), 臺北市管線圖, <<https://dig.taipei/Tpdig/Public/pipe3.html>> (2022年3月15日)。

臺北市政府工務局 (2022), 臺北市降雨淹水模擬圖, <<https://data.gov.tw/dataset/121550>> (2022年4月1日)。

臺北市政府都市發展局 (2022), 政府資料開放平台, <<https://data.gov.tw/dataset/156197>> (2022年7月6日)。

蘇明道 (2005), 工商業淹水災害損失曲線:Depth-Damage Curves for Flood Loss Assessments in Industrial and Commercial Sectors, *臺灣水利*, 53:2=210 2005.06[民 94.06], 頁 21-30。