

低衝擊開發設施水位監測與單元性能模擬

The Water Table Monitoring System of Low Impact Development Units and Simulation

國立臺灣大學
水工試驗所
副研究員

胡通哲*

Tung-Jer Hu

經濟部水利署
保育事業組
組長

王國樑

Kuo-Liang Wang

萬鼎工程服務(股)公司
經理

陳賢明

Shiem-Min Chen

國立臺灣大學
水工試驗所
專任研究助理

林暉軒

Wei-Xuan Lin

摘要

本研究在試驗場址建立低衝擊開發單元設施-透水鋪面與水撲滿水位監測系統，監測系統可將資料以 3G 無線方式傳輸至網頁，進行即時監看，藉由長期監測單元設施水位，以瞭解其效能的變化，並以暴雨逕流管理數值模式 SWMM 進行模擬，以瞭解降雨與水位歷線的變化，分析午後雷陣雨(短延時強降雨)、杜鵑、蘇迪勒颱風(高強度降雨)、東北季風降雨(長延時低強度)，經過檢定驗證，模擬值與實測值結果大致吻合。

關鍵詞： 透水鋪面，水撲滿，暴雨逕流管理數值模式。

ABSTRACT

This study installed water table monitoring systems of the permeable pavement and rain Barrel sites. The data set can be transmitted to the web by 3G systems. By the long-term monitoring works, we can realize the change the water table and effectiveness. Using the SWMM (Storm Water Management Model) model to simulate the water table hydrographs under different rain events. The different cases included short-duration and high-density rainfall, long-duration and low-density rainfall, and typhoon events. The simulation results are close to the collected data of the sites.

Keywords: Permeable pavement, Rain Barrel, Storm Water Management Model.

*通訊作者，國立臺灣大學水工試驗所副研究員，10617 台北市羅斯福路 4 段 1 號，tjhu001@gmail.com

一、前言

臺灣都市化腳步不斷加快，不透水面積快速增加，透過低衝擊開發(LID)設施貯留雨水，延長排水出流時間降低峰值，提升雨水貯留效能。但 LID 單元的設置常考量削減汙染，而設計襯墊層與透水性較差的材質，或因長期使用而阻塞(clogging)降低滲透功能，使其效益降低。為瞭解 LID 設施之影響，利用已建立的透水鋪面與水撲滿露天基地，設置水位監測系統，以瞭解其效能變化。

國外的研究，Dietz and Clausen (2008)採用資料記錄器(ISCO 4230)與流量計，監測水流並採集水樣後進行分析，發現地表逕流量會隨不透水面積增加，而由 LID 設施出流的水質則大致與森林出流之水質相似。Bedan and Clausen (2009)，進行研究場址的水質與水量監測，比較傳統的開發區域以及使用 LID 設施區域之逕流量與污染物。LID 設施可分散洪峰，特別是設計良好的雨水花園、大面積植栽與草地等，此類的 LID 設施，可降低逕流體積與洪峰流量。對都市而言，水文循環的關鍵因素在於不透水率，傳統的作法是將集水區內的不透水面積予以加總計算，但是這樣的作法並未將 LID 水流往下滲的現象考慮在內，Blackler and Guo (2013)引入鋪面面積折減因子(Paved area reduction factors, PARFs)，結合 BMPs 進行暴雨下水道的相關設計，PARFs 可以讓規劃者選擇合適的 LID 設施單元型式，亦可節省的經費，Guo and Luu (2015)提出研究方法，對於 LID 不透水率計算方式進一步加以修正。

國內的研究，王建智(2003)在新北市淡海進行透水磚現地試驗，進行不同土壤進行試驗，推算滲流量，共有 6 場紀錄，其另蒐集水利署新店辦公室雨水貯留系統，包含透水磚、植草磚、透水瀝青、JW 工法等 4 種，流量之量測設施包含管流量計、三角堰等。內政部建築研究所於 99、100 年進行前期性研究計畫，包括「社區或基地開發都市雨洪綜合管理策略」及「社區及建築基地減洪技術與防洪強化措施之研究」。廖朝軒(2012)蒐集、分析國內外相關社區及建築基地防

洪措施、減洪技術及其理論模式。徐硯庭(2014)，運用 SWMM 模式探討低衝擊開發設施大量運用於都市化地區的減洪效應。該研究以中永和地區為例，使用民國 66、85 以及 95 年該區土地利用使用分區為基礎，分別採用貝蒂(1972)、賀伯(1996)及納莉(2001)之降雨量，研究低衝擊開發導入後的減洪效果，研究中將 LID 設施分為低中高三種密度導入都市區。胡通哲與梁崇淵(2016)，進行大安森林公園的排水模擬，對於公園的地形，以中央高兩側低，排水東西向新生南路、建國南路，南北向則流向信義路，若加入不同 LID 設施，在納莉颱風的雨量，對於洪峰減量與稽延，發現效果以透水鋪面+乾式草溝(入滲型)最好。

北京大學王雯雯等(2012)，以深圳市光明新區為研究區域，運用暴雨雨水管理模式(SWMM)建立數值模擬模型，並利用實地監測率定此數值模式，模擬結果，都市化後流域洪峰流量顯著增大、洪峰時間提前、逕流係數變大。透水磚能夠削減洪峰流量與逕流係數，但是對於延後洪峰時間並沒有太大效果；而下凹式綠地不只能夠削減洪峰流量與逕流係數，也能夠延後洪峰時間。而兩者同時配合運用效果較僅使用單一設施的效果更佳。

上述的研究，較缺乏現場 LID 單元設施水位即時監測，採用的資料記錄器多屬事後資料蒐集，研究的場址多屬於大型集水區，本文藉由露天的試驗場址，在 LID 規劃之初即將試驗設施構想導入，進行約一年半的監測工作，並透過先期實驗所獲得參數作為 SWMM 模式輸入參數，進行短延時強降雨、長延時低強度降雨及颱風降雨的模擬與驗證。

二、研究場址與方法

2.1 試驗場址

2015 年在臺北市大安區麗水街錦安公園附近的鄰里公園(以下簡稱錦安公園)，配合其公園改造，進行公園內的透水鋪面、水撲滿(雨水積磚)設置，進行該露天場址水位監測系統的設置，場址位置如圖 1，基地鳥瞰如圖 2。

錦安公園透水鋪面基地大小 240 cm(長) ×



圖 1 監測場址位置。



圖 2 錦安公園監測基地鳥瞰圖。

480 cm(寬) × 100 cm(高)，水撲滿基地大小 200 cm(長) × 400 cm(寬) × 200 cm(高)，場址中貯留空間底部鋪設整片的不透水帆布，外部再加木板圍起，入滲水分貯留在貯存槽中。

在施工時已經安裝監測管，可進行水位監測，本研究對監測系統設施加以擴充，增加資料的無線傳輸模組，可直接傳輸到辦公室電腦或手機網頁，用以掌握即時的水位資料，並對雨水貯留設施後續對應的維護管理措施作出釐清，LID 貯留功能失效時，可由監看或設定自動警告設置。

2.2 水位監測設施

在錦安公園規劃設計兩個系統：現地資料收集端之「終端監測系統」及資料處理端之「監測伺服系統」。終端監測系統用以處理水位資料，接收、儲存、傳送水位計模組回傳之水位資料，同時接收監測伺服系統下達之指令。監測伺服系統用以接收終端監測系統回傳之水位資料，並可發送處理指令至終端監控系統。提供圖表化查詢介面供使用者進行查詢，並於水位資料異常時發送 email 警訊通知。終端監測系統透過水位計模組收集水位資料，由終端控制器整合後，控制資料儲存模組存放於 SD 記憶卡中，並依設定的上傳時間間隔由無線傳輸網路模組上傳至監測伺服系統，可從網頁讀取水位資料，本研究規劃的

系統邏輯架構，如圖 3。

三、監測結果

3.1 透水鋪面

透水鋪面基地施工過程分成數個步驟，包含基地整地、合板基座架設、塑膠帆布鋪設、過濾貯水層(級配底基層)級配料鋪設、排水管配置(含毛細排水管)、回填級配料至預定高度、鋪設紗網(或不織布)、級配混和層(級配基層)鋪設、鋪設襯墊層(黃沙)，最後稍事整平，鋪設透水磚，降雨量會透過透水磚經過襯墊層進入下方的貯水層。透水鋪面的級配底基層厚度 50 cm，級配基層厚度 45 cm，襯墊層厚度 5 cm，具雨水貯留之蓄水保水功能。在透水鋪面基地內部安裝 PVC 監測管，以監測水位。

執行錦安公園透水鋪面基地水位監測，水位資料整理 2015/7/11 ~ 2016/12/8，將水位紀錄相對於日雨量紀錄(繪於上方軸)作圖，如圖 4，除因農曆新年蓄電池電力不足，導致資料遺失，其他紀錄正常，其中造成水位突昇的降雨事件有兩次，一次是蘇迪勒颱風，另一為杜鵑颱風，水位計均能反應降雨入滲，蘇迪勒颱風的入滲上升曲線斜率較大，代表水量入滲較快。整體曲線上升到水位 45 cm 處，不再上升，因為該處為排水管出口，入滲與出流能力達到平衡。

由於基地的過濾貯水層經過一段時日，蓄水

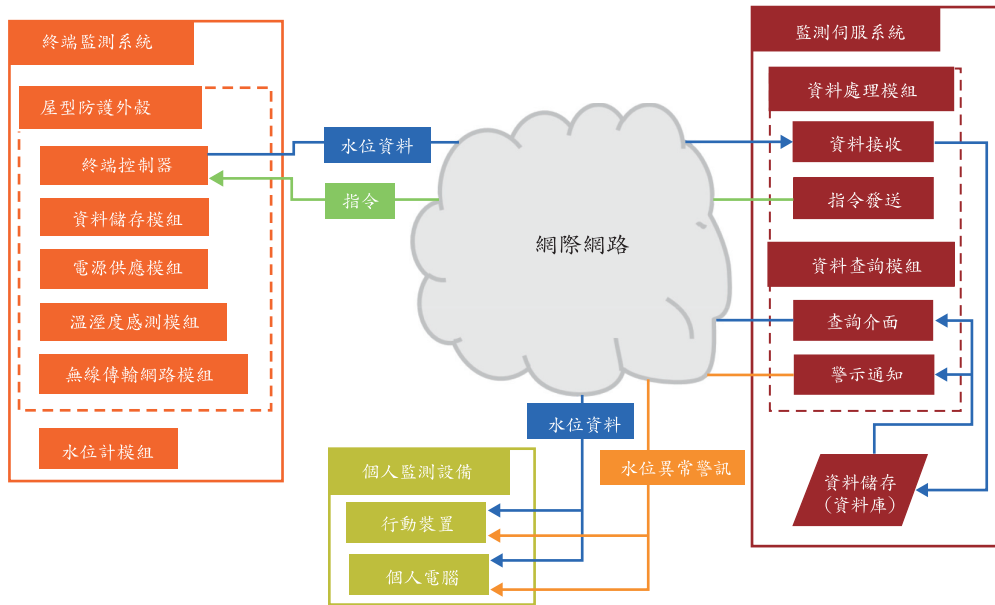


圖 3 系統邏輯架構圖。

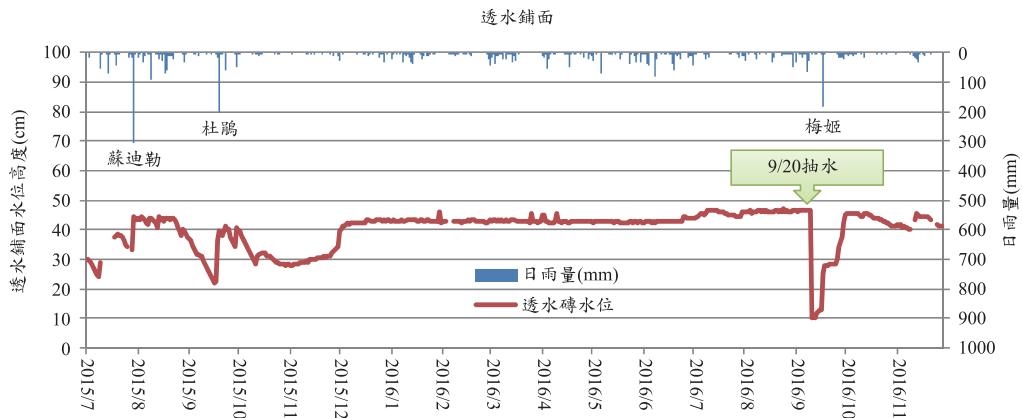


圖 4 透水鋪面基地的水位計高度相對降雨之變化(2015/7/11~2016/12/8)。

功能變差，因此在 105/9/20 進行透水鋪面基地蓄水層抽水，透過監測管在 8 小時內抽取水量約 4 立方公尺，使水位降低約 35 公分，重新發揮貯留功能。

對於水位曲線相對於日雨量，由於日雨量是當日 24 小時降雨的累積值，相較於雨量計每 60 秒紀錄一筆資料，差距比較大，因此本研究長期

紀錄以日雨量作圖，在本文後續檢視短期降雨事件，以時雨量作圖。

3.2 水撲滿

水撲滿施工過程分成數個步驟，包含基地整地開挖、基座不織布鋪架、不透水塑膠布鋪設、雨水積磚單元體組立、H 型稍組立、組立完成、

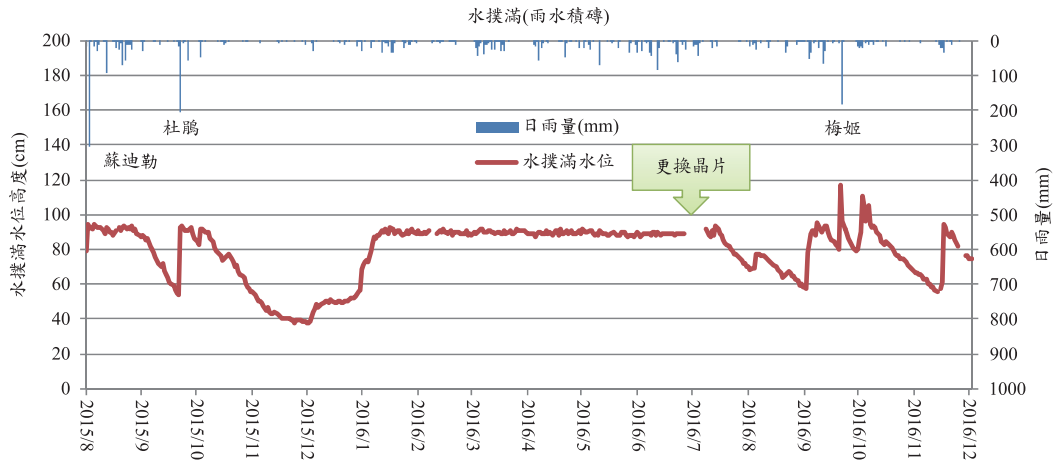


圖 5 水撲滿基地的水位計高度相對降雨之變化(2015/8/7~2016/12/8)。

外層以不織布包覆完成、回填土，最後整地鋪設草皮，降雨量會經由表面的草皮入滲，進入水撲滿。在水撲滿內設 PVC 管，內部設置壓力式水位計一支，監測水位變化。

執行水撲滿水位監測，水位資料整理 2015/8/7 ~ 2016/12/8，如圖 5，水位計高度趨勢與透水鋪面有些類似，2015 受到蘇迪勒、杜鵑颱風的影響，但曲線不盡相同，主要是保水原理不同。由於水撲滿沒有保水層，當強降雨，水位雖然會上升，但雨停後即下降，因沒有保水層可以補充水量，再加上水撲滿上方有手動汲水機，社區志工會定時汲水澆灌花木，因此若長期沒有下雨，蒸發、汲水使水位下降。其中 7 月初有數筆資料不正確，不予列入，主要是監測系統更換晶片，改成無線傳輸方式進行調整測試。2016/9 梅姬颱風期間，水位突昇，推測可能有垃圾阻塞排水出口影響出流。

四、模擬結果與討論

本研究利用現場水位監測結果與雨量資料，進行暴雨逕流管理數值模式 SWMM (Storm Water Management Model)的案列模擬，推算現場自然降雨情境下的 LID 水位。由於過去進行過室內可控制入流歷線的透水磚試驗(胡通哲, 2015)，進行試驗後將出流量資料點與數值模式比較，獲得不錯的率定驗證成果，已掌握不同土壤配比的

表 1 SWMM 模式透水鋪面 LID 設施參數

基本設定		設定值
表面層 (Surface)	表面粗糙度(Surface Roughness)	0.02
	表面坡度(Surface Slope)	0.2%
鋪面層 (Pavement)	厚度(Thickness)	50 mm
	孔隙比(Void Ratio)	0.21
	平均入滲率(Permeability)	1000 mm/hr
保水層 (Soil)	厚度(Thickness)	450 mm
	孔隙率(Porosity)	0.25
	田間含水量(Field Capacity)	0.08
蓄水層 (Storage)	厚度(Thickness)	500 mm
	孔隙比(Void Ratio)	0.43
	滲漏率(Seepage Rare)	0
	堵塞因素(Clogging Factor)	0

孔隙率 n 、入滲係數 K 等參數值。露天基地施工時，級配基層大致依室內實驗配比施作。

4.1 透水鋪面模擬

採 SWMM 模式，輸入颱風降雨與透水鋪面相關條件，模式參數：表面粗糙度 0.02，表面坡度 0.2，鋪面層厚度 50 mm，鋪面層孔隙比 0.33，鋪面層表面滲透係數 $K = 1000 \text{ mm/hr}$ ，保水層厚度 450 mm，保水層孔隙率 0.25，保水層田間含水量 0.08，保水層水力傳導係數 $K = 3 \text{ mm/hr}$ ，蓄水層厚度 500 mm，蓄水層孔隙比 0.43，蓄水層滲漏率 0，蓄水層堵塞因素 0，如表 1。

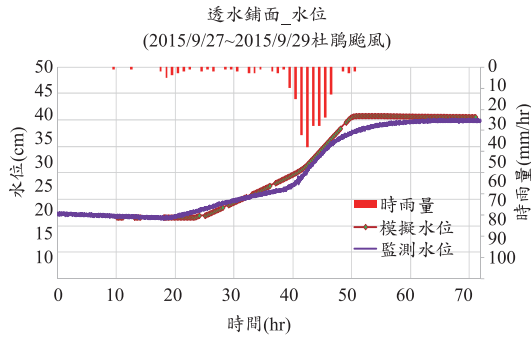


圖 6 透水鋪面 SWMM 模擬結果與實測值比較 (杜鵑颱風)。

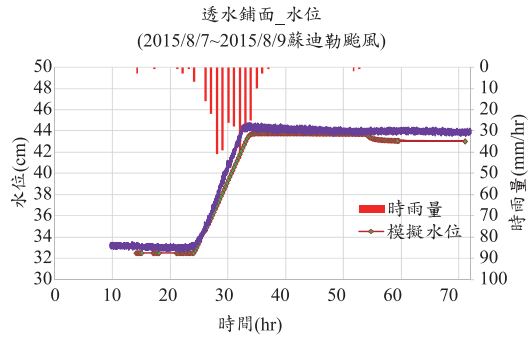


圖 7 透水鋪面 SWMM 模擬結果與實測值比較 (2015 蘇迪勒颱風)。

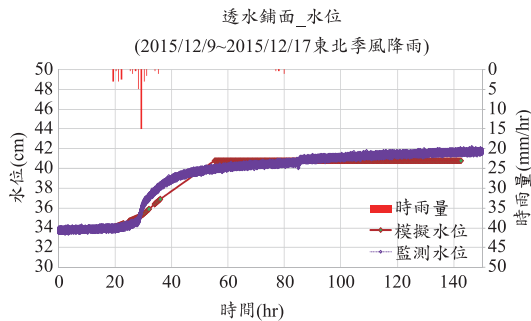


圖 8 透水鋪面 SWMM 模擬結果與實測值比較 (2015 冬季)。

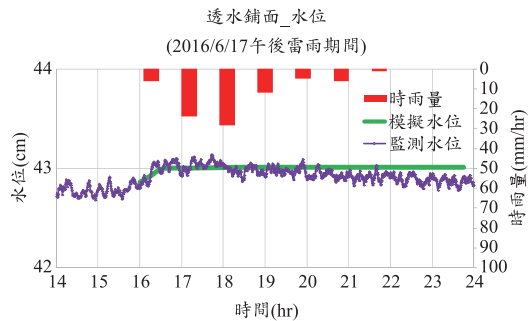


圖 9 透水鋪面 SWMM 模擬結果與實測值比較 (2016 午後雷陣雨)。

(1) 杜鵑颱風期間

圖 6 為杜鵑颱風期間透水鋪面 SWMM 模擬的水位與監測的水位，相對於杜鵑颱風時雨量的作圖，曲線大致吻合。

(2) 蘇迪勒颱風期間

圖 7 為蘇迪勒颱風期間模擬與監測值比較，SWMM 模擬的水位、監測的水位計高度值，相對於颱風時雨量的作圖，相當接近。

(3) 冬季東北季風鋒面降雨期間

以 2015/12/9~17 冬季鋒面降雨之水位資料，套用前述 SWMM 檢定驗證所得的參數，進行模擬，如圖 8，曲線大致吻合。

(4) 午後雷陣雨期間

以 2016/6/17 午後雷陣雨監測的水位資料，套用前述兩場颱風降雨 SWMM 檢定驗證所得的

參數，進行模擬，如圖 9，模擬與監測值，相當接近。

(5) 梅姬颱風期間

以 2016/9/27 梅姬颱風降雨之水位資料，套用前述 SWMM 檢定驗證所得的參數，進行模擬，發現無法與實測資料吻合，由於 2016/9/20 進行抽水，或已改變含水層特性，將水力傳導係數 K 調小為 2.5 mm/hr，可趨近監測值，如圖 10，曲線大致吻合。

4.2 水撲滿模擬

SWMM 之水撲滿(雨水桶)的設定參數: 容量高度為 2 m，流量係數為 0.5，流量指數為 0.5。經過模擬計算，圖 11 為杜鵑颱風期間水撲滿 SWMM 模擬的水位與監測的水位，降雨曲線為

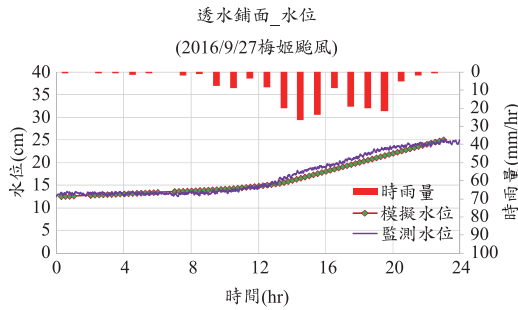


圖 10 透水鋪面 SWMM 模擬結果與實測值比較 (2016 梅姬颱風)。

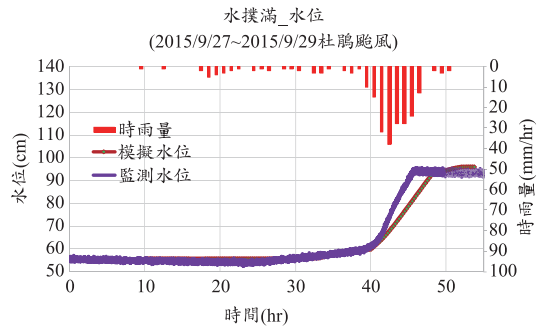


圖 11 水撲滿 SWMM 模擬結果與實測值比較 (2015 杜鵑颱風)。

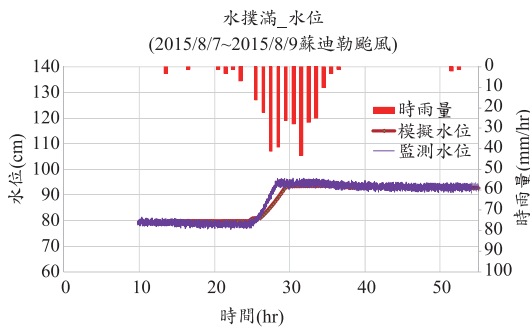


圖 12 水撲滿 SWMM 模擬結果與實測值比較 (2015 蘇迪勒颱風)。

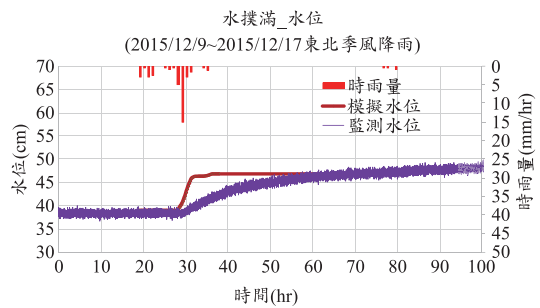


圖 13 水撲滿 SWMM 模擬結果與實測值比較 (2015 冬季)。

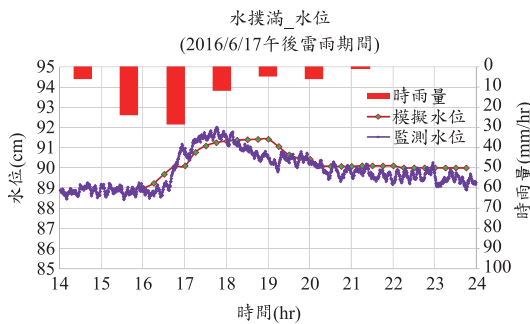


圖 14 水撲滿 SWMM 模擬結果與實測值比較 (2016 午後雷雨)。

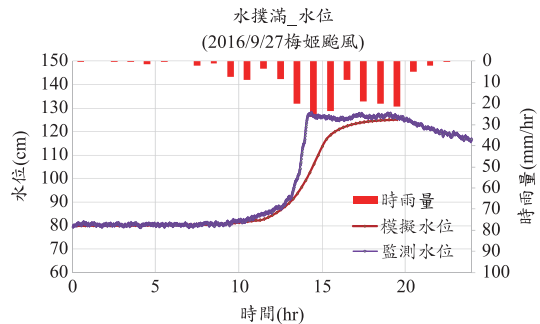


圖 15 透水鋪面 SWMM 模擬結果與實測值比較 (2016 梅姬颱風)。

杜鵑颱風時雨量，模擬的水撲滿內部水位曲線，相對於時雨量的作圖，曲線大致吻合。

圖 12、圖 13 為蘇迪勒颱風及梅姬颱風期間模擬與監測值比較，相當接近。以 2016/6/17 午

後雷雨及 2015/12/7~19 冬季降雨的監測的水位資料，套用前述兩場颱風降雨 SWMM 檢定驗證所得的參數，進行模擬，如圖 14 及圖 15，模擬與監測值，雖有些差距，尚可接受。

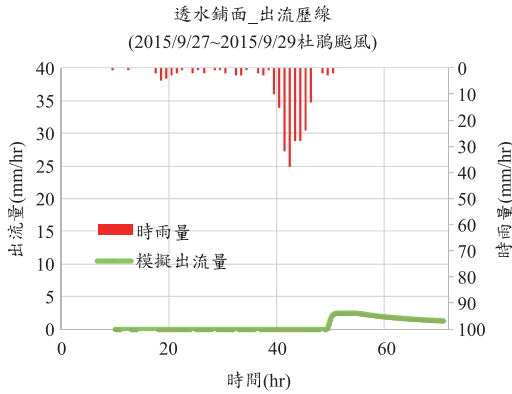


圖 16 透水鋪面(杜鵑颱風)出流歷線。

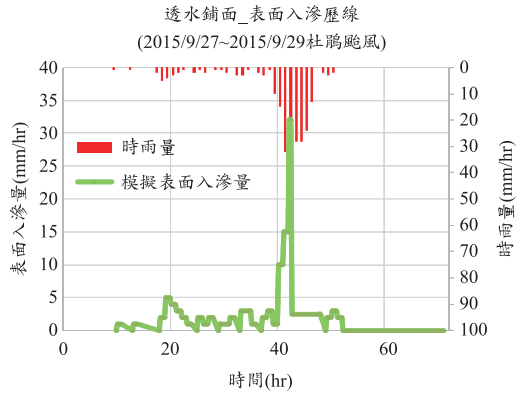


圖 17 透水鋪面(杜鵑颱風)表面入滲歷線。

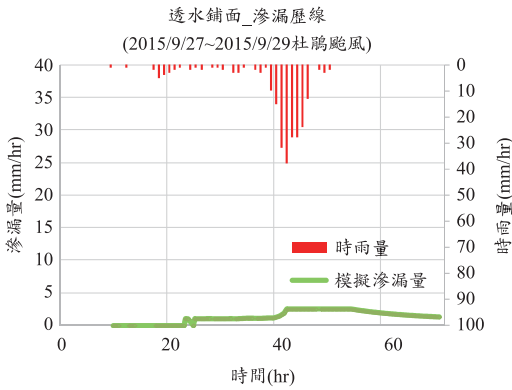


圖 18 透水鋪面(杜鵑颱風)滲漏歷線。

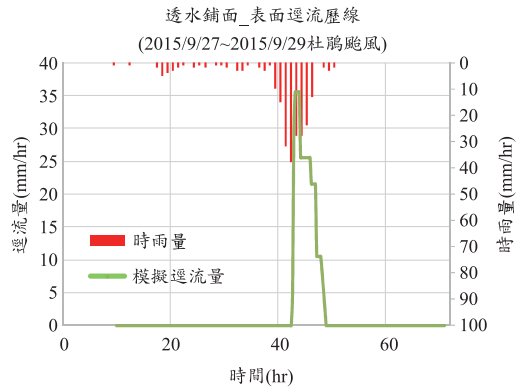


圖 19 透水鋪面(杜鵑颱風)表面逕流歷線。

對於 LID 設施的吸納水份作用，確有其功能，但從模擬的 5 場降雨，從水位監測資料搭配 SWMM 模式模擬結果，發現對於一般降雨有吸納水份作用，但是對於颱風的強降雨，前面一半時期，可有效發揮海綿作用，將水量導入地表下，因此表面逕流很小，但是颱風後期，海綿吸飽無法再吸收水量，降水便轉為表面逕流，因此光是採用 LID 設施，可能無法應付颱風之類的強降雨。以下採用杜鵑颱風的降雨歷線進行 SWMM 模擬，計算各種歷線，藉以說明此現象。

4.3 杜鵑颱風降雨模擬

利用前述之 SWMM 數值模式，模擬分析杜

鵑颱風暴雨(長延時強降雨)降雨情境的雨量，以 SWMM 模式進行透水鋪面水位、出流量、表面逕流、入滲量等不同物理量的模擬。將模擬的出流歷線、表面入滲歷線、滲漏歷線、表面逕流歷線分別對降雨量(時雨量)作圖，如圖 16、圖 17、圖 18、圖 19。其中圖 19 的表面逕流歷線，前半部幾乎入滲到透水鋪面單元中，有效分擔逕流，當吸納不了水量時，則成為表面逕流，而圖 16 的透水鋪面排水管出流歷線，數值不高且出流歷線尖峰時間與降雨阻體圖的尖峰時間，已有一段差距，降低對下水道排水的負荷。

五、結論與建議

本研究在錦安公園建立透水鋪面與水撲滿水位監測系統，經過測試運作功能良好，以下說明結論與建議。

1. 採用 2 種雨水貯留設施：透水鋪面、水撲滿，水位監測系統建置完成，可將資料以 3G 無線方式傳輸至辦公室電腦與手機網頁即時監看，監測系統可有效運作。
2. 本研究採用暴雨逕流管理模式 SWMM，進行透水鋪面、水撲滿單元的水位模擬，依實測水位紀錄，水位模擬資料值與實測值大致吻合。
3. 由監測結果，低衝擊開發 LID 單元設施，由於阻塞現象，效能可能隨時間而效能降低。
4. 對於颱風之類的長延時強降雨，透水磚基地在前期可有效吸納，後期飽和後便無法再吸收，建議搭配滯洪池，會有較佳減洪作用。

誌 謝

本研究感謝水利署「雨水貯留系統監測與性能模擬之研究 計畫(MOEAWRA1050401)支持，得以順利完成，在此誌謝。

參考文獻

1. 王雯雯、趙智杰、秦華鵬(2012)，「基于 SWMM 的低沖擊開發模式水文效應模擬評估」，北京大學學報(自然科學版)，第 48 卷，第 2 期，2012 年 3 月。
2. 王建智(2003)，透水性鋪面入滲成效評估之研究－淡海新市鎮為例，國立臺北科技大學土木與防災研究所碩士學位論文。
3. 徐硯庭(2014)，低衝擊開發運用在高都市化地區的減洪效益，國立臺灣大學土木工程研究所碩士論文。
4. 胡通哲、張富銘、李孟穎(2015)，低衝擊開發設施單元試驗之研究，第 22 屆水利工程研討會，國立成功大學。
5. 胡通哲、梁崇淵(2016)，大安森林公園排水引入低衝擊開發設施可行性研究，造園-景觀雜誌 85：9-19。
6. 張富銘(2015)，低衝擊開發規劃與設計之研究，國立臺灣大學工學院土木工程研究所博士論文(指導教授：李鴻源)。
7. 梁崇淵、胡通哲(2015)，低衝擊開發運用在都會公園排水之模擬，第 22 屆水利工程研討會，國立成功大學。
8. 廖朝軒(2012)，社區及建築基地減洪防洪規劃手冊研擬，內政部建築研究所委託研究報告。
9. 經濟部水利署(2007)，96 年之「雨水貯集利用目標及設備規格標準化研究」。
10. Bedan, E.S. and Clausen, J.C. (2009), Stormwater runoff quality and quantity from traditional and low impact development watersheds. *Journal of the American Water Resources Association* 45(4): 998-1008.
11. Blackler, G.E. and Guo, J.C.Y. (2013), Paved Area Reduction Factors under Temporally Varied Rainfall and Infiltration, DOI: 10.1061/(ASCE)IR 17.1943-4774.0000506, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 139(2): 173-179.
12. Dietz, M.E. and Clausen, J.C. (2007), Stormwater runoff and export changes with development in a traditional and low impact subdivision, *Journal of Environmental Management* DOI.1016/j.jenvman.2007.03.026.
13. Dietz, M.E. and Clausen, J.C. (2008), Storm water runoff and export changes with development in a traditional and low impact subdivision, *Journal of Environmental Management* 87(4): 560-566
14. Guo, J.C.Y. (2004), Hydrology-Based Approach to Storm Water Detention Design Using New Routing Schemes, *Journal of Hydrologic Engineering ASCE* 9 (4): 333-336.
15. Guo, J.C.Y. and Luu, T.M. (2015), Operation of Cap Orifice in a Rain Garden, *Journal of*

Hydrologic Engineering ASCE, DOI:10.1061/
(ASCE) HE.1943-5584.0001184.

16. Monterusso, M.A., Rowe, D.B., Russell, D.K.
and Rugh, C.L. (2004), Runoff water quantity
and quality from green roof systems, Acta

Horticulturae 639: 369-376.

收稿日期：民國 107 年 4 月 8 日

修正日期：民國 107 年 6 月 17 日

接受日期：民國 107 年 7 月 17 日