

道路分隔帶設置植生溝之水文模擬分析與 綜合評估

HYDROLOGIC SIMULATION AND COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF VEGETATED SWALES IN ROADWAY MEDIAN STRIPS

國立成功大學
水利及海洋工程學系
學士

張凱傳
Kai-Fu Chang

國立成功大學
水利及海洋工程學系
教授

陳憲宗*
Shien-Tsung Chen

摘要

本研究探討道路分隔帶降挖設置植生溝之水文效益與應用潛能，研究案例為長度 100 公尺、寬度 30 公尺之都市道路場址，配置情境涵蓋一般道路分隔島與不同寬度植生溝。透過暴雨管理模式進行模擬分析，評估 2 年與 5 年重現期下之洪峰削減效果，結果顯示植生溝可有效降低暴雨期間之逕流量，在 2 年重現期下平均洪峰削減率為 39.3%，5 年重現期為 29.0%。針對歷史觀測降雨資料進行模擬顯示，植生溝能顯著降低道路場址的出流峰值，且無逕流產出的完全截流事件比率達 25.4%，顯示道路中央分隔帶設置植生溝之減洪與保水效益。成本分析顯示分隔帶設置植生溝相較傳統分隔島具有經濟優勢，也符合臺灣現行道路設計規範。綜合水文分析、工程經濟與法規研析的評估，顯示道路中央分隔帶設置植生溝深具應用潛力，值得推廣作為低衝擊開發設施於都市道路空間之應用類型，強化都市整體排水韌性與保水效益。

關鍵詞：道路分隔帶、植生溝、低衝擊開發、暴雨管理模式。

* 國立成功大學水利及海洋工程學系教授
701 台南市大學路 1 號 · chen@gs.ncku.edu.tw

HYDROLOGIC SIMULATION AND COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF VEGETATED SWALES IN ROADWAY MEDIAN STRIPS

Kai-Fu Chang

National Cheng Kung University
Department of Hydraulic and Ocean Engineering

Shien-Tsung Chen*

National Cheng Kung University
Department of Hydraulic and Ocean Engineering

ABSTRACT

This study investigates the hydrologic benefits and application potential of implementing vegetated swales within road median strips. The case study focuses on an urban roadway site measuring 100 meters in length and 30 meters in width. Multiple design scenarios were evaluated, including a conventional median and vegetated swales with varying widths. The Storm Water Management Model was employed to assess peak flow reduction under 2-year and 5-year return period storm events. Results demonstrate that vegetated swales effectively reduce runoff during storm events, with average peak flow reductions of 39.3% and 29.0% under the 2-year and 5-year return periods, respectively. Simulations using historical rainfall records further confirm the capacity of vegetated swales to significantly attenuate peak outflows from the roadway site. Notably, 25.4% of the simulated events achieved complete runoff retention, underscoring the flood mitigation and water retention benefits of vegetated swales installed in road median strips. Cost analysis indicates that vegetated swales offer greater economic advantages compared to traditional safety islands. In summary, the integrated evaluation of hydrologic performance, economic feasibility, and regulatory compatibility suggests that vegetated swales in road median strips present strong practical potential. As a form of low impact development, vegetated swales are recommended for urban roadway applications to enhance stormwater resilience and promote water conservation.

Keywords: Median strip, Vegetated swale, Low impact development, Storm water management model.

一、前言

隨著臺灣的都市化發展，大量綠地逐步轉化為建築與道路設施，導致都市地區的不透水面積顯著增加，原有天然滲透能力隨之降低，使得暴雨期間的地表逕流量大幅上升，對原本即負擔沉重的都市排水系統造成更大壓力。在極端氣候事件頻率與強度同步上升的情勢下，部分地區經常出現排水不及導致淹水之問題，嚴重影響居民安全與城市機能之穩定運作。都市道路系統作為公有土地中面積龐大之設施類型，路面排水系統設計對都市雨水調節具有關鍵影響，例如臺北市政府 (2025) 公布臺北市現有道路長度約 1,414 公里，面積達到 22.27 平方公里，約占臺北市總面積的 8.2%。道路的分隔帶(median strip)具備可改造的空間，若能結合下凹式設計與低衝擊開發 (low impact development, LID) 概念，導入植生溝 (vegetated swale) 設計，將可提升雨水貯留、滲透能力，發揮保水與減洪功能。

道路作為都市區域中主要的不透水面之一，具高度線性之集水特性，其排水系統配置相對單純，通常以道路兩側側溝排導來自路面、兩側土地或建物之逕流至下游排水系統 (如雨水下水道系統等)。然而，傳統側溝設計多以速排為導向，忽略逕流調節與水質處理功能，亦缺乏對於地表逕流之源頭管理。雖然近年逐漸興起以永續及低衝擊概念進行道路空間再設計，並嘗試將低衝擊開發設施如雨水花園、透水鋪面納入道路場址，但相關研究與建設大多集中於路側空間或其他區域之應用 (例如設置於停車場邊緣、公園綠地)，對於道路分隔帶設置植生溝之研究仍屬稀少。有鑑於此，本研究針對道路中央分隔帶進行空間利用與植生溝設置之模擬分析，探討植生溝於不同降雨條件下對於路面逕流行為與洪峰削減之影響，進而量化植

生溝在都市排水系統中作為調洪基礎設施之應用潛力。目前國內已有道路 (如彰化縣伸港鄉美港公路，圖 1) 導入降挖中央分隔帶為植生溝的設計，但針對道路中央分隔帶設置植生溝的水文模擬分析研究仍極為有限，故本研究可望補足此領域之知識缺口，並拓展 LID 設施於都市道路空間中之應用場址類型，強化都市整體排水韌性。

草溝 (植生溝) 是常見的溝渠之一，可將收集的地表逕流傳送到下游區域，常用於農田灌溉、公路路側排水。許多研究指出，草溝能有效透過入滲來減少逕流量，並將逕流暫時貯蓄在溝渠中 (如：Ahmed *et al.*, 2014；Mantilla *et al.*, 2024)；也可透過草溝中的植被達到去除逕流中污染物的效果，如懸浮固體、氮、磷、重金屬等，改善公路逕流的水質 (Stagge *et al.*, 2012；Li *et al.*, 2016；Leroy *et al.*, 2016；Gavrić *et al.*, 2019)。多項植生溝之地表逕流削減的相關研究指出，植生溝的逕流削減率介於 27% 至 75% (Rushton, 2001；Barrett *et al.*, 2008；Ackerman and Stein, 2008；Davis *et al.*, 2012；Rujner *et al.*, 2016)，其效能受場址條件影響甚鉅，包括植生溝幾何構造、土壤滲透性、降雨特性、設施維護狀況等因素，均可能導致不同研究的結果差異，因此本研究考慮台灣道路分隔帶之實際狀況與降雨條件，進行模擬案例之空間配置與水文分析。

數值模擬工具被廣泛應用於 LID 設施之模擬，暴雨逕流管理模式 (Storm Water Management Model, SWMM) 為目前最常見且適用性高的模式之一。徐碩庭 (2014) 以新北市中永和地區為例，設定多種土地使用分區與降雨組合，模擬導入不同密度之 LID 設施對洪峰與逕流量之削減潛力，發現 LID 設施取代不透水面積比率越大，控制地表逕流量產生的效果越好；內政部營建署 (2015) 於委辦計畫中建置植生溝實驗，並以 SWMM 模型進行模擬驗證，模擬 5 年重現期、60 分



圖 1 降挖道路中央分隔帶為植生溝案例 (彰化縣伸港鄉美港公路)

鐘暴雨之情境，結果顯示 SWMM 模型所產生之逕流歷線與實測資料高度吻合，洪峰流量誤差僅為 3.57%，均方根誤差約為實測流量的 0.93%，顯示 SWMM 模型具備相當之準確性與適用性，足以作為本研究模擬道路植生溝對於不同雨型與配置條件下的水文水理分析工具。

在長時間尺度模擬方面，林書羽 (2013) 以新北市自強國中為案例，模擬透水鋪面與植生溝於 2010 至 2012 年間歷史降雨下的調洪效益，並評估設施配置對洪峰削減與出流總量之影響；Cipolla *et al.* (2016) 於義大利波隆那針對綠屋頂進行為期一年的監測與模擬，校驗後之 SWMM 模型成功重現年平均逕流削減率達 51.9%，並於年尺度模擬中呈現良好之評鑑指標，顯示 SWMM 具備模擬 LID 長期效益評估之能力。

綜上所述，SWMM 模式不僅具備精確模擬地表逕流歷線與低衝擊開發 (LID) 設施效益之能力，亦可應用於中長期降雨情境之水文模擬。因此本研究以臺灣都市道路環境為對象，採用 SWMM 模式針對中央分隔帶設置植生草溝之場景進行模擬評估，透過與一般道路的基準場址進行比較，並設定多組草溝寬度與降雨延時條件模擬其水文行為，進一步結合建設成本、規範、設置條件進行綜合討論，以評估植生溝設計於

道路分隔帶空間之應用潛力。

二、研究方法

2.1 研究區域與道路排水系統

台灣常見道路之橫斷面配置如圖 2 所示，本研究所建立之道路排水系統，參考《市區道路及附屬工程設計規範》(內政部，2024)、《公路路線設計規範》(交通部，2023) 之道路橫斷面構造及各構造單元之標準尺寸，並輔以臺北市政府工務局網頁所公布之《工程設計參考圖》道路工程相關設計圖資，以建構符合實務規範之道路排水幾何設定。本研究設定一條長度為 100 公尺、寬度為 30 公尺的標準都市道路作為模擬場址，道路配置狀況如圖 3 所示。依據《公路排水設計規範》(交通部，2017) 所述，集水區之劃分應根據道路縱橫斷面及線型布置所形成之分水界線，並考量實際之地貌條件與設計需求，因此本研究依據不同路面材料性質與配置條件，將車道、人行道、分隔島等區域分別設定為不同的子集水區，反映不同的逕流生成特性。

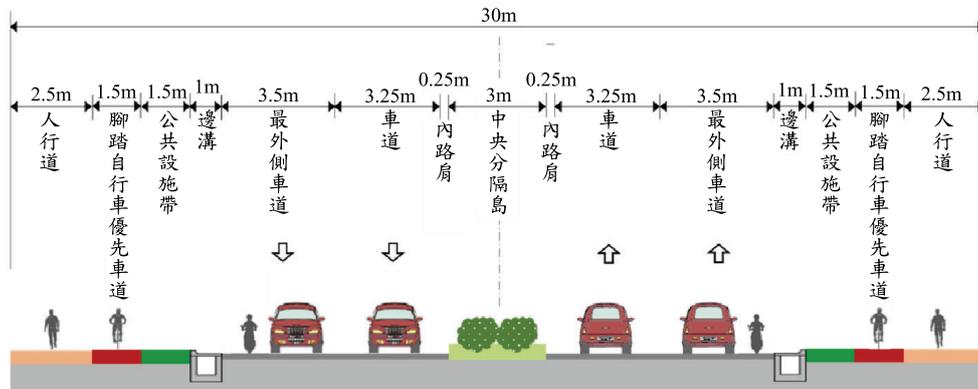


圖 2 台灣常見道路橫斷面配置 (摘自《整體道路規劃指引》(交通部·2025))

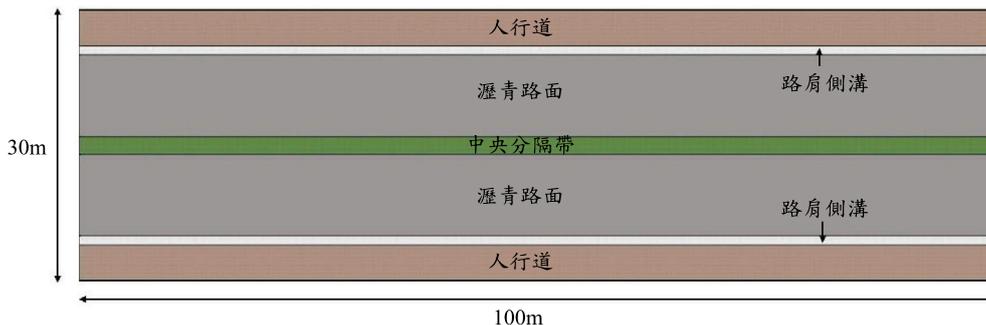


圖 3 研究區域之道路配置示意圖

2.2 情境模擬設計方案

為探討中央分隔帶降挖設計對都市道路排水效能之影響，本研究設定兩類模擬情境：第一為「一般道路」之基準場址，第二為「降挖中央分隔帶為植生溝」之設計改造情境，並進一步針對不同分隔帶寬度 (2.1 m、2.8 m、3.5 m) 進行分析，探討分隔帶空間變化對減洪與保水效益之影響。

2.2.1 一般道路

道路分隔帶之設計目的是為了區隔雙向車道，提升交通安全，臺灣常見之道路分隔帶設計，為高於路面之中央分隔島，通常為無植生的混凝土緣石分隔島，或是在緣石內部設置植生空間的分隔島兩種型式。本研究參考相關公路設計規範，設定「一般道路」之基準場址為具有植生空間的分隔島型式，其構造主要由緣石界定範圍，分隔島高度高於路面約 30 至 40 公分，內部回填約 20 公分之沃土與植草；此類分隔島僅能收集降雨直接落於其上，進入入滲的雨水，未具備貯留或延遲排放等功能。「一般道路」場址作為本研究之比較基準，用以評估後續所提出之中央分隔帶降挖為草溝之設計方案，在洪峰削減方面的潛在效益。

2.2.2 降挖中央分隔帶為植生溝

為強化道路逕流之調節能力，本研究分析降挖分隔帶為具入滲功能之植生溝設計。根據《水環境低衝擊開發設施操作手冊》(內政部營建署, 2024)，植生溝係指寬淺、底部覆有地被植物或草皮之溝渠，主要功能為傳輸地表水體，並在流動過程中透過入滲以減少地表逕流，亦可藉由植物吸附與過濾效應改善水質。植生溝之種類一般可分為草溝渠 (grassed channel) 與乾式溝 (dry swale) 兩類，兩者有相同的幾何形狀與植被，而乾式溝設計較複雜，多了生長介質、過濾貯水層等結構，本研究所述之植生溝為草溝渠。

本研究設定三種不同寬度的草溝情境 (2.1 m、2.8 m 與 3.5 m) 進行模擬，植生溝於 SWMM 中透過 LID 模組的 Vegetative Swale 元件建模，並探討不同寬度配置下的洪峰削減效果與保水能力變化。此設計情境將與一般道路的基準方案進行比較，評估降挖中央分隔帶為植生溝在提升都市道路排水韌性的潛力。

2.3 暴雨逕流管理模式

2.3.1 模式簡介與模擬流程

暴雨逕流管理模式 (SWMM) 為美國環境保護署所開發之動態水文水理模擬工具，廣泛應用於模擬都市地區在降雨事件中，地表逕流的生成與傳輸過程。SWMM 結合多種模組，可應用於都市排水系統性能評估、低衝擊開發措施規劃、水質變化分析等領域。本研究採用 SWMM Version 5.2 作為模擬工具，主要著重於地表逕流模組 (Runoff Module) 與低衝擊開發控制模組 (LID Control)。地表逕流模組能模擬降雨後逕流量之生成、入滲、蒸發及傳輸行為，並可整合多項 LID 設施，如雨水花園、植生溝與透水鋪面等，評估其對洪峰削減與逕流調節之成效。此外，SWMM 支援匯入實際降雨資料或設計雨型，適用於模擬單一暴雨事件或長期連續降雨，具備高度彈性。

本研究 SWMM 模擬流程包含水文與水理資料建構、地表逕流模擬、水理演算與結果輸出，用以評估不同中央分隔帶配置對洪峰削減與保水效益之影響。由於本研究場址屬於小尺度、工程應用導向，亦缺乏現地高解析度的入滲觀測資料與土壤物理參數，故需選擇一種參數需求低、模擬穩定性高、且能反映不同土地特性的入滲模式。基於此，本研究採用 SWMM 中之 SCS-CN 法作為入滲模擬方法，僅需根據土地利用類別與土壤分群資料即可查表獲得 Curve Number (CN) 值，用以估算最大保水容量與逕流量。此外，本研究在長時間模擬時，為反映降雨間歇期間土壤含水量的恢復過程，依 SWMM 手冊建議設定乾燥時間 $T_{dry} = 7$ 天，以對應常見草溝壤土 (loam) 的乾燥時間特性。當無降雨時間愈長，土壤水分會逐漸恢復至乾燥狀態，可入滲容量隨之增加；相反地，若先前曾發生降雨且間隔時間短，土壤將保持相對濕潤狀態，降低下次事件的可入滲量，進而增加後續逕流產出。

2.3.2 植生溝之水流演算理論

在 SWMM 中，植生溝視為具有植草覆蓋的梯形渠道，用於將收集到的逕流傳輸到下游位置，同時允許逕流滲透到下方土壤中。SWMM 透過連續方程式模擬植生溝中的水深變化行為 (Rossman & Huber, 2016)，控制方程式如下：

$$A_1 \frac{\partial d_1}{\partial t} = (i + q_0)A - (e_1 + f_1)A_1 - q_1A \dots\dots\dots(1)$$

式中， A_1 為當水深為 d_1 時之有效儲水表面積， A 為總表面積， i 為降雨強度， q_0 為逕流進入速率， e_1 與 f_1 分別為蒸發與入滲速率， q_1 為出流速率。本研究採用 SCS-CN 法模擬土壤入滲情形，透過 SWMM 降雨逕流模組計算 f_1 變化。而植生溝中表面積 A_1 隨水

深 d_1 改變而變動，幾何關係式如下：

$$A_1 = \frac{A}{W_1} [W_1 - 2S_x(D_1 - d_1)] \dots\dots\dots(2)$$

其中， W_1 為最大水深 D_1 時之溝渠寬度、 S_x 為梯形側坡比。植生溝水體體積則由通水斷面積 A_x 與長度比 A/W_1 乘積決定，通水面積 A_x 計算式為：

$$A_x = d_1(W_x + d_1S_x)\phi_1 \dots\dots\dots(3)$$

式中， W_x 為底部寬度， ϕ_1 為未被植栽覆蓋體積比例（反映植生對水流之阻力，通常介於 0 至 0.2）。最後，出流速率 q_1A 則依據曼寧公式計算如下：

$$q_1A = \frac{1}{n_1} S_1 A_x R_x^{\frac{2}{3}} \dots\dots\dots(4)$$

$$R_x = \frac{A_x}{W_x + 2d_1\sqrt{1+S_x^2}} \dots\dots\dots(5)$$

其中， n_1 為曼寧係數， S_1 為植生溝縱坡， R_x 為水力半徑。

2.4 降雨情境

為評估不同中央分隔帶植生溝設計於多種降雨情境下之減洪、保水表現，本研究採用兩種降雨情境資料進行模擬，分別為設計暴雨事件與逐時觀測降雨紀錄；雨量資料選用中央氣象署台北氣象站之觀測資料。

2.4.1 應用 Horner 公式設計暴雨

本研究參考《全台雨量站降雨強度延時公式推導成果報告》(水利署, 2024)，引用台北氣象站重現期 2 年與 5 年之 Horner 公式參數，配合交替組體法推求設計雨型；Horner 降雨強度公式如下：

$$I = \frac{a}{(t+b)^c} \dots\dots\dots(6)$$

其中， I 為降雨強度 (mm/hr)， t 為降雨延時 (min)，本研究採用延時包含 6 小時、12 小時及 24 小時， a 、 b 、 c 為回歸係數，數值詳如表 1。

表 1 台北站 Horner 降雨強度公式參數

重現期	2 年	5 年
參數		
a	1841.657	2729.325
b	28.469	41.824
c	0.748	0.756

2.4.2 逐時降雨紀錄

考量植生溝滯洪與保水效益具長期累積性質，本研究另導入中央氣象署台北氣象站 2020 至 2024 年共五年之逐時降雨紀錄，作為長期模擬之降雨資料。

三、洪峰削減模擬與分析

3.1 數值試驗模式建置

3.1.1 一般道路

一般道路的基準場址模擬，為後續降挖植生溝方案的比較基準，此方案考慮三種不同的中央分隔島寬度配置方案 (2.1 m、2.8 m、3.5 m)。本研究之模擬僅考慮如圖 3 的道路用地範圍內的降雨，不包含周遭建築物或其他非道路區域的雨水；子集水區的設定包括道路路面、中央分隔島和人行道。一般道路的中央分隔島主要為狀況良好的草地、人行道則為高壓混凝土地磚。

中央分隔島位於雙向車道中間，假設道路位於平坦地區，整體設置之縱向坡度為 0.1%，路面橫向排水坡度為 2%，以確保降雨逕流快速引導至側溝或雨水收集系統。本方案模擬 100 m 長之道路，中央分隔島為沃土植生區域，本研究將中央分隔島設定為透水地面 (草皮) 與不透水地面 (緣石) 之組合，於模型中為反映實際工法與材料特性。路肩排水溝系統由側溝和多組進水口組成，採用典型的矩形側溝，並依據規範建議每 4.5 至 5 公尺需設置一個入流口收集來自分隔島、路面以及人行道之降水，本研究入流口設置每 5 公尺一個，其餘 SWMM 的相關參數設定詳如表 2。

3.1.2 降挖中央分隔帶為植生溝

本方案將原本高於路面的中央分隔島重新設計為低於路面的下凹型結構，並結合植生溝型式收集來自路面的降水，SWMM 相關參數設定見表 2 與表 3。本方案之坡度與一般道路相同，整體設置縱向坡度 0.1%，路面橫向排水坡度 2%，並使路面逕流流向植生溝。本研究於 SWMM 模型中所模擬之草溝排水型式，係採用設置於草溝末端之排水管，將道路基地所收集之雨水引導匯入道路側溝系統，此配置方式符合低衝擊開發 (LID) 設計原則中「在槽式設計」的概念。

在 SWMM 模型中，植生溝被建模為 LID 元件，能模擬雨水在草地表面的入滲、滯留及緩慢排放過程。本研究設計三種不同梯形斷面，植生溝整體寬度 (最大水面寬度) 分別為 2.1 m、2.8 m 與 3.5 m，植生溝最

表 2 道路情境設計之 SWMM 模式參數

道路長度 100 m	一般分隔島	植生溝	瀝青路面	人行道
一般道路情境面積 (m ²)	210	-	1800	990
中央分隔帶 2.1 m 植生溝面積 (m ²)	-	210	1800	990
中央分隔帶 2.8 m 植生溝面積 (m ²)	-	280	1800	920
中央分隔帶 3.5 m 植生溝面積 (m ²)	-	350	1800	850
Curve Number	61	61	98	98
縱向坡度	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%
橫向坡度	-	-	2%	2%
不透水面積比	17% ~ 29%	0%	100%	100%
不透水區曼寧係數	0.016	-	0.015	0.014
透水區曼寧係數	0.05	0.3	-	-
不透水區蓄水深度 (mm)	5.18	-	5.18	5.18
透水區蓄水深度 (mm)	162.39	162.39	-	-

表 3 各情境植生溝設計參數

植生溝分隔帶寬度	側坡比 (H:V)	深度	備註
2.1 m	1.5:1	0.5 m	接近常見一般道路配置
2.8 m	2:1	0.5 m	增加 0.7 m 寬度
3.5 m	3:1	0.5 m	增加 1.4 m 寬度

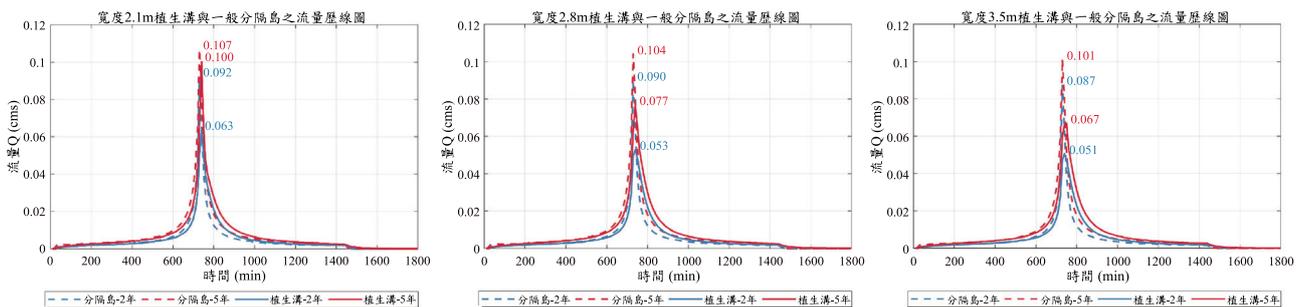


圖 4 不同寬度中央分隔帶配置之流量歷線模擬結果

大深度均設定為 0.5 m。考量道路中央空間有限，本研究於確保通水斷面充足前提下，藉由調整植生溝寬度與側坡坡度以提升入滲空間。其中，寬度 3.5 m 植生溝採用側坡比 3:1 (H:V)，為三者中坡度最為平緩者。《水環境低衝擊開發設施操作手冊》(內政部, 2024) 指出，較平緩之側坡可增加濕周長度，進而減緩逕流速度、擴大植被覆蓋範圍與雨水入滲能力，亦可提供割草設備安全運轉操作的空間。

一般植生溝常見之植栽以假儉草、百慕達草等匍匐性草類為主，草高多介於 5 至 15 公分之間。文獻指出，植生溝草皮的曼寧粗糙係數會隨水深變化，當水深小於草高時，草皮所產生之水力阻力會顯著增加，粗糙係數範圍約為 0.26 至 0.35 (Barling & Moore, 1994; Wu *et al.*, 1999; Bäckström, 2002; Ekka *et al.*, 2021)。本研究進行長期模擬與一日暴雨事件分析，部分暴雨時段水深雖可能超過草高，但絕大多數時間仍處於草高之下。考量文獻建議範圍與模擬穩定性，本

研究選定 0.3 作為植生溝情境之代表性曼寧粗糙係數，此值亦可視為相對保守之參數，有助於避免高估植生溝內流速。

3.2 設計暴雨模擬

3.2.1 出流歷線模擬比較

本研究利用 SWMM 模擬 24 小時設計暴雨，考量道路場址具有高度不透水、集水面積小、匯流迅速的特性，設定 10 分鐘為模擬時間間距，比較不同植生溝寬度 (2.1 m、2.8 m、3.5 m) 情境下模擬所得之出流歷線變化，結果如圖 4。在相同降雨延時與重現期條件下，植生溝情境之出流歷線均較一般道路情境為緩；2 年重現期下一般道路情境之洪峰流量分別為 0.092、0.090~0.087 cms，而降挖為植生溝後則為 0.063、0.053、0.051 cms，削減幅度隨植生溝寬度增加而提升，且流量歷線整體形狀變緩，5 年重現期下的模擬結果亦呈

現相似趨勢。

3.2.2 設計暴雨之洪峰削減率

在不同降雨延時 (6 小時、12 小時、24 小時) 與重現期 (2 年、5 年) 條件下, 洪峰削減效果如圖 5 顯示。於 2 年重現期條件下, 當中央分隔帶植生溝寬度為 2.1 m 時, 洪峰削減率介於 31.2%至 33.3%; 寬度增加至 2.8 m 後, 削減率上升至 42.6%至 43.3%; 而當寬度達 3.5 m 時, 削減率達 44.9%至 45.7%, 顯示隨植生溝寬度增加, 洪峰削減效果愈趨明顯。整體而言, 2 年重現期下植生溝之平均洪峰削減率約為 39.3%。於 5 年重現期下, 當植生溝寬度為 2.1 m 時, 洪峰削減率介於 5.9%至 6.5%; 寬度為 2.8 m 與 3.5 m 時, 削減率分別介於 27.9%至 34.6%及 37.1%至 39.1%; 5 年重現期下之平均削減率約為 29.0%。此結果反映於高重現期降雨事件中, 植生溝也具減洪作用, 但洪峰削減能力受限於有限之貯蓄與入滲能力, 減洪效果不若低重現期降雨事件。若需提升在極端降雨下的減洪效果, 則須擴大草溝尺寸或搭配其他低衝擊開發設施。

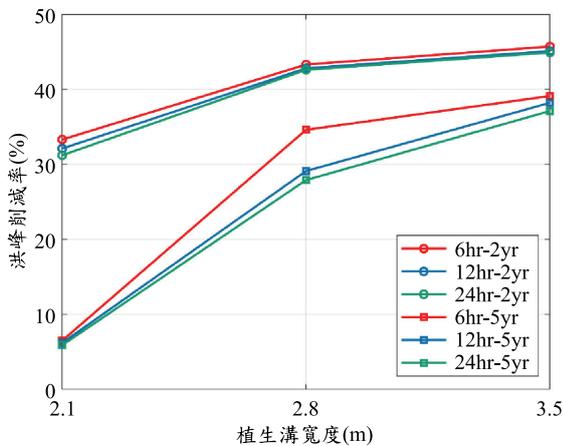


圖 5 不同延時與重現期下植生溝之洪峰削減率

就相同重現期距下不同降雨延時之比較, 無論在 2 年或 5 年重現期下, 6 小時降雨事件之洪峰削減率皆高於 12 小時與 24 小時事件, 顯示短延時降雨事件的洪峰削減率較高的結果。綜上所述, 植生溝設計能有效削減洪峰流量, 其削減效果受設計寬度顯著影響 (即受植生溝與集水面積比例所影響)。在都市排水系統規劃中, 建議可視實際道路用地空間調整植生溝配置, 以提升系統整體調洪與滲透效能。

3.3 長期歷史雨量模擬

為評估植生溝設計於真實氣候條件下之出流調節效果, 本研究以 2020 至 2024 年臺北氣象站的逐時降雨資料為輸入, 採用與設計暴雨模擬一致的 10 分鐘演算時間間距, 模擬中央分隔帶不同寬度 (2.1 m、2.8 m、3.5 m) 情境下之 5 年出流歷線。由模擬結果發現, 植生溝情境在大多數降雨事件中, 呈現較低之出流歷線, 其出流峰值相較於一般道路顯著降低。

因歷史雨量模擬時間較長, 本研究擇選具代表性的兩場降雨事件作為展示, 圖 6 為 2024 年 8 月 23 日對流型強降雨事件 (短延時) 與 2024 年康芮颱風事件 (長延時) 之出流歷線。由圖 6 可觀察到, 植生溝情境的洪峰流量均低於一般分隔島情境的洪峰流量, 顯示植生溝具備一定的出流控制效果, 其中以 3.5 m 植生溝的效果最佳。另外, 在短延時降雨中, 洪峰降低幅度較為明顯; 相較之下, 長延時降雨事件的洪峰降低幅度相對較小, 原因為降雨歷時較長, 植生溝於前期降雨後含水量逐漸接近飽和, 導致滲透與蓄滯能力下降。

進一步統計 2020 至 2024 年間所有降雨事件之洪峰削減率分布, 如圖 7 以箱型圖呈現洪峰削減率在不同事件總雨量等級下的變化。可觀察到事件總雨量愈小, 洪峰削減效能愈高; 總雨量愈大, 洪峰削減效能

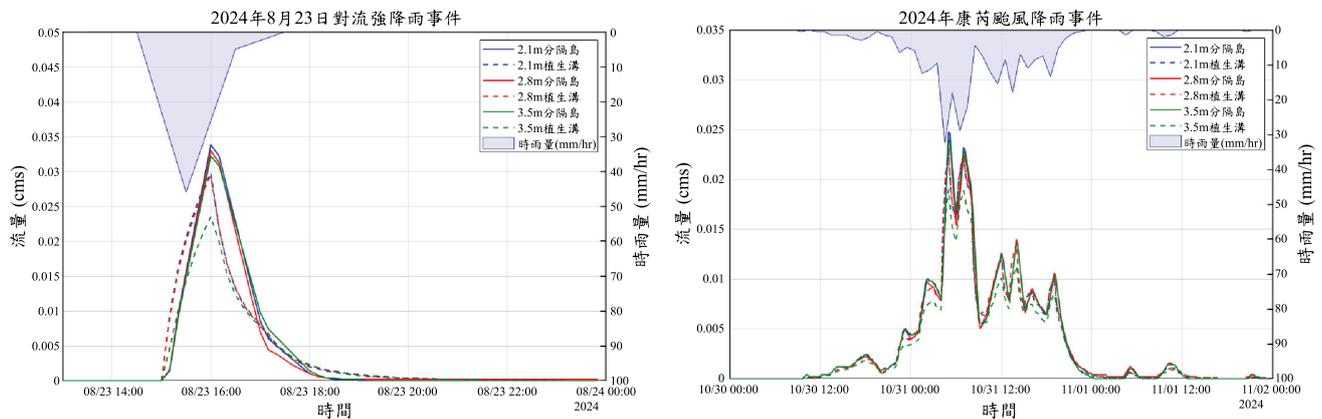


圖 6 歷史雨量模擬出流歷線

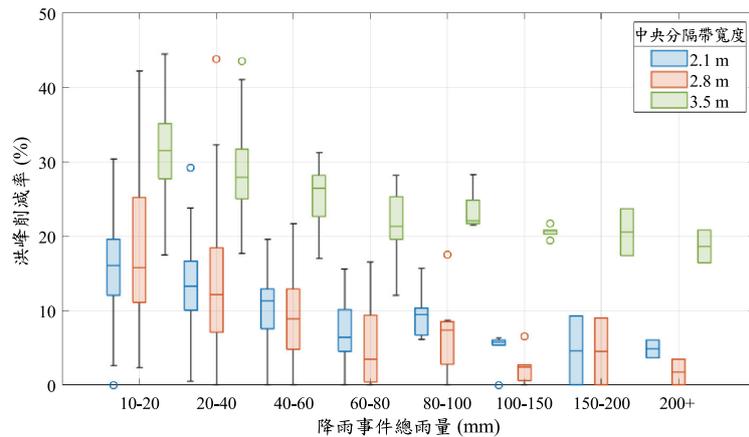


圖 7 不同雨量等級事件下之洪峰削減率分布

整體下降，此趨勢在三種寬度下皆一致。在總雨量介於 10 至 80 mm 的事件中，3.5 m 寬度多數分布於 20% 至 35% 的削減率區間，洪峰削減效能明顯優於 2.1 m 與 2.8 m 寬度之草溝；當事件總雨量大於 100 mm 時，3.5 m 寬度草溝的洪峰削減率多數分布於 15% 至 25%，而 2.1 m 與 2.8 m 寬度草溝的洪峰削減率則介於 10% 內。此結果說明，提升中央分隔帶的寬度可明顯增加逕流調節效能。另外，由於長期歷史雨量模擬之降雨型態與理論設計暴雨不同，且較易受前期事件及土壤含水量累積影響，因此計算出的平均洪峰削減幅度略低於設計暴雨情境所估。

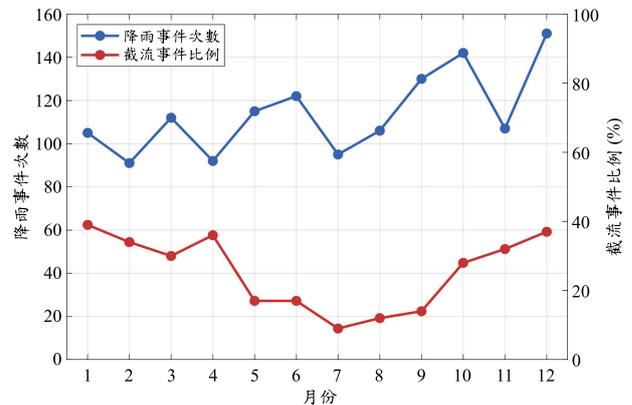


圖 8 2020 至 2024 年各月份降雨事件與截流比例統計

四、降雨截流與保水量模擬與分析

4.1 降雨截流分析

植生溝的入滲與蓄水效能會隨降雨歷程逐漸衰減，當降雨強度超過植生溝所能承納的入滲率時，多餘的雨水將轉化為地表逕流，並經過短暫貯留後自植生溝出流；而貯存在植生溝中的水體仍會逐步滲入土壤，部分水分亦會透過蒸發或蒸散方式返回大氣。完全截流 (complete capture) 是指降雨事件期間，植生溝完全滯留與入滲來自路面與降在分隔帶之雨水，使得該降雨事件期間，如圖 3 的整塊路面基地無地表逕流出流。本研究採用 2020 至 2024 年台北氣象站實測的逐時降雨資料，進行長期連續的水文模擬，並設定「降雨事件時間內植生溝無出流量」者為完全截流事件；本研究以「前後至少 1 小時無降雨」作為分隔降雨事件之條件，統計每月的降雨事件數與完全截流事件數，並計算截流比例。

本研究從統計結果發現，三種寬度植生溝的截流差異均在 3% 之內，不同寬度設計的植生溝在整體截流成效上並無顯著差異，因此本研究針對三種植生溝寬度的結果進行平均計算與綜合討論。此結果與第三章的洪峰削減率觀察結果不同，原因在於評估指標與模擬條件差異：洪峰削減率來自高強度設計暴雨模擬草溝設計與一般分隔島之間的洪峰流量差異，降雨劇烈且瞬時出流大，寬度增加可透過較大的滲透與蓄滯面積降低洪峰流量。本單元之降雨截流分析則以長期歷史降雨事件的模擬為基礎，整體而言多為總雨量少、延時短的事件，即使草溝寬度較小也多能完全截流，因此寬度差異不明顯，反而更受事件總雨量與降雨前土壤含水量狀態影響。

於 2020 至 2024 年間，共有 1,368 筆降雨事件，整體截流比例為 25.4%，顯示植生溝對於多數日常降雨事件具有良好的截流潛能。各月份的降雨事件與截流比例如圖 8 所示，截流比例呈現季節性變化；1 月的截流比例最高達 40%，其次為 12 月的 38%，顯示秋

冬季期間降雨條件較適合植生溝達成完全截流。而在夏季期間，尤其是 7 月、8 月與 9 月，由於降雨強度普遍較高，易超過植生溝的入滲能力，導致完全截流的事件比例下降，低於 15%。整體而言，植生溝在非豐水期有不錯的截流能力，於高強度降雨頻繁的夏季則相對較差。

為進一步探討植生溝具備完全截流能力所對應的降雨條件，本研究彙整各降雨事件的總雨量與降雨延時，區分完全截流與未完全截流事件後，繪製散佈圖予以觀察分析，結果顯示截流事件主要集中於總雨量較低、降雨延時較短的事件。本研究亦進一步探討植生溝之截流門檻，並將模擬結果套用分類方程式進行擬合；由於三種植生溝寬度之截流比例差異極小，顯示設計寬度對截流門檻判別影響相對有限，故本研究結合全體資料計算分類邊界線，採用感知器 (perceptron) 線性分類模型建構截流事件分類方程式。感知器為經典的線性二元分類法，透過逐筆修正分類錯誤樣本以更新權重，最終收斂至一條可有效區分二元類別的線性邊界方程式。本研究以降雨延時與總雨量作為線性分類方程式的變量進行模型訓練，得出的分類邊界方程式如式 (7) 所示，此式表示當超過總雨量與降雨延時的組合超過分類邊界時，植生溝即無法完全截流路面降水，開始產生可觀測之地表逕流。該模型之分析準確率達 85.2%，顯示分類效果良好。

考量實際道路排水情境中，植生溝需承接來自相對較大之路面不透水區域所產生之逕流，若僅以雨量特性判斷是否完全截流，易忽略不同場址間「植生溝面積與集水面積比例」的差異。因此，為能進行跨場址比較與通用性評估，需將降雨條件進行面積標準化處理，換算為植生溝所需承受之等效雨量。本研究以三種寬度草溝模擬場址的平均幾何值為依據 (草溝平

均寬度為 2.8 m，對應路面寬度為 18 m)，表示植生溝需處理約 7.4 倍面積的降雨。以此比例調整圖 9 的原始分類邊界式，推導出對應之面積標準化截流分類方程式如下：

$$P = 1.63 \cdot D + 3.3 \dots\dots\dots(7)$$

上式中， P 為降雨事件的總降雨量 (mm)， D 為降雨事件的延時 (h)。分類方程式的斜率可視為草溝之穩態入滲速率，相當於飽和土壤的水力傳導係數 (K_s)，斜率值 1.63 mm/h 介於砂質黏壤土 ($K_s = 1.5$) 與壤土 ($K_s = 3.3$) 之間 (Rawls *et al.*, 1983)，截距 3.3 mm 則代表草溝在降雨事件初期之蓄水能力，上述分析結果顯示此分類方程式具有水文物理之合理性。Davis *et al.* (2012) 曾針對美國馬里蘭州高速公路植生溝場址進行試驗分析，該研究彙整 4.5 年的暴雨事件資料，擬合導出標準化的截流分類方程式為 $P = 1.12 \cdot D + 5.6$ ，此式與本研究所推導的方程式在參數值有相近之處，但此方程式之斜率與截距反映當地土壤之入滲特性，與本研究採用 SWMM 模擬並設定 CN 值為 61 的條件有所不同。此外 Davis *et al.* (2012) 研究對象為高速公路路段，草溝配置空間相對充裕，所採用之面積標準化比例低於本研究中草溝需承接約 7.4 倍集水面積的設計條件。兩者所建立之方程式，皆具水文物理意義，惟其參數特性反映各自所處之設計條件與場址差異。

4.2 設計暴雨之保水量分析

隨著都市化擴張，地表大量不透水化，傳統以「快速排除」為導向的排水系統設計，已難以因應極端降雨造成的瞬時逕流負荷。面對都市排水設施超載與內澇風險升高的挑戰，現代都市水文管理策略逐漸轉向「源頭削減」與「在地保水」的概念，強調透過提高地面入滲與暫蓄能力來降低對下游排水系統的衝擊。

本研究以中央分隔帶降挖為植生溝設計，評估其在 24 小時設計暴雨條件下的保水效能。模擬設定考量 2 年與 5 年重現期降雨，並比較三種植生溝寬度 (2.1 m、2.8 m、3.5 m) 之方案。以 SWMM 模擬 24 小時設計暴雨所得之累積入滲深度乘以植生溝實際配置之總面積，估算整體保水量，計算公式如下：

$$V = F \cdot Ar \dots\dots\dots(8)$$

其中， V 為保水量 (m^3)、 F 為累積入滲深度 (m)、 Ar 為植生溝立體面積 (m^2)，即為植生溝通水斷面濕周與縱向長度之乘積。不同植生溝寬度與重現期下之保水量模擬結果如表 4 顯示，因滲透面積隨植生溝寬度擴

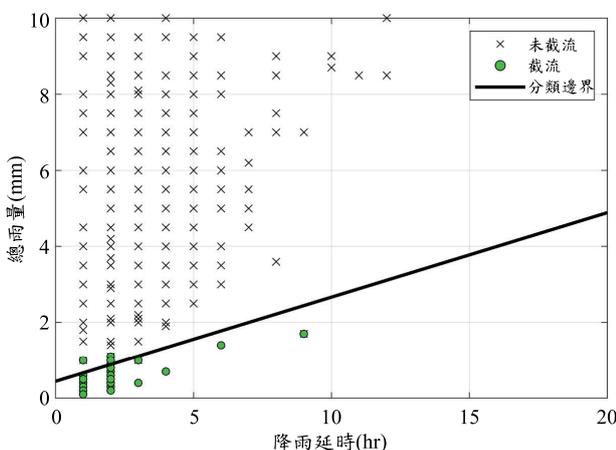


圖 9 降雨延時與總雨量關係圖及截流分類邊界

表 4 不同植生溝寬度與重現期距下之保水量 (m³)

植生溝寬度	2.1 m	2.8 m	3.5 m
重現期 2 年	13.5	15.9	17.1
重現期 5 年	16.2	19.3	21.2

大而增加，整體保水容量隨植生溝寬度呈現正向成長；在 5 年重現期的降雨條件，因降雨初期雨量充足且土壤尚未飽和，有較多的人滲水量，故模擬的整體入滲保水量大於 2 年重現期的保水量。

五、設置成本與設計規範適用探討

5.1 中央分隔帶植生溝建置成本分析

為評估中央分隔帶植生溝設施於都市排水系統中的經濟可行性，本研究依據《112 年度工程預算參考單價分析》(臺北市政府，2023)，針對傳統一般分隔島與植生溝方案進行建置成本與年計成本之比較分析。

建造成本包含工程材料、人力、機具等，一般分隔島工作項目包含預鑄綠島緣石、客土、植草等；植生溝則包含挖方、土方處理、地工織布、植草等。以分隔帶寬度 2 公尺、長度 100 公尺為例，一般分隔島建造費用約為新台幣 375,414 元，單位造價約為 1,877 元/m²；植生溝建造成本約為新台幣 95,170 元，單位造價約為 476 元/m²。為進一步探討植生溝設計於不同配置面積下之成本變化，另以植生溝面積自 200 m²逐步增加至 350 m²，以 10 m²為增量，進行建造費用與年計成本之推估分析。年計成本為年固定成本與年運轉成本之合計，分別定義如下：

$$\text{年固定成本 } C_A = C_T \cdot \frac{\text{int} \cdot (1 + \text{int})^n}{(1 + \text{int})^n - 1} \dots\dots\dots(9)$$

$$\text{年運轉成本 } C_B = C_T \cdot S \dots\dots\dots(10)$$

$$\text{總年計成本 } C_C = C_A + C_B \dots\dots\dots(11)$$

其中， C_T 為總建造成本， int 為年利率， n 為設備年限(年)， s 為年運轉成本占建造成本之百分比。本研究採用 $\text{int} = 2\%$ 、 $n = 20$ 年，一般分隔島之 $S = 1\%$ ；植生溝則參考《水環境低衝擊開發設施操作手冊》所列之維護項目、頻率與費用建議，將 S 設定為 5%。計算長 100 公尺中央分隔帶所對應之面積一年計成本關係，如圖 10 所示。

植生溝之年計成本在各面積配置下皆顯著低於分

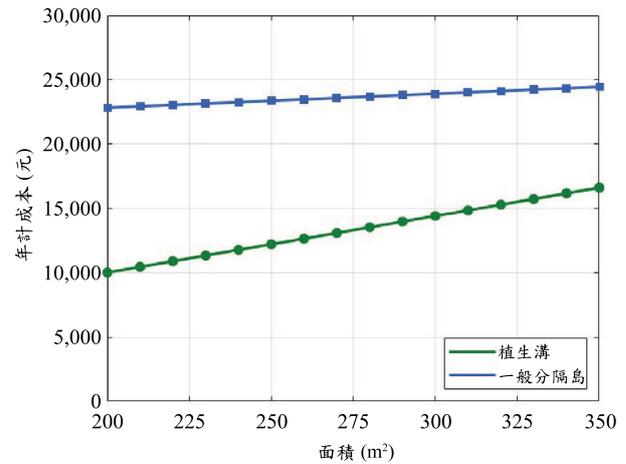


圖 10 一般分隔島與植生溝之面積—年計成本關係圖

隔島設計，約介於一般分隔島的 46%至 72%，顯示植生溝不僅具備水文效益，在經濟層面亦具競爭優勢。根據 Houle *et al.* (2013) 的研究，植生溝在建造與維護成本方面皆明顯低於多數常見的低衝擊開發 (LID) 設施。以每公頃不透水面積處理單位成本為例，植生溝的建造成本約為生態滯留設施 (bioretention) 的 47%，而年運營維護成本則為 46%。然而，在高強度暴雨事件下，植生溝仍可能面臨土壤沖刷與沉積物堵塞的風險，影響長期功能穩定性。因此實務推動時，建議納入維護管理規劃，包含定期巡檢、事件後清淤、補植與適時更換植被等措施，以延長設施壽命並確保其效能。另外，本研究採用 SWMM 模型來模擬植生溝渠，其排水調節機制主要為地表植被滯留與土壤入滲，未涵蓋乾式溝之過濾貯水層等複合 LID 構造。

5.2 設計規範適用性與設置條件探討

本研究評估之植生溝設置位置為道路中央分隔帶，該區域於設計規範上屬於交通島的一種，其設計、配置與寬度要求皆受相關設計規範所納管，須配合道路類型與設計條件審慎應用。在臺灣，市區道路與公路在規範體系上屬於不同分類：市區道路適用《市區道路及附屬工程設計規範》；而公路適用《公路路線設計規範》及《公路排水設計規範》。兩者原則上適用範圍不重疊，惟在部分都市路段若屬「公路與市區道路共同使用」情形，得依實際管轄與設計需求，彈性參照兩套規範進行檢核與整合。

依據《公路排水設計規範》第五章，中央分隔帶已被明列可設置為淺溝、明溝或進水構造之排水系統構成要素之一；依據《市區道路及附屬工程設計規範》，中央分隔帶可採凹降型式設計。本研究綜合水文模擬

表 5 植生溝設置於中央分隔帶之設計規範與適用性研析

規範來源	條文位置	條文內容摘要	植生溝適用性研析
公路排水設計規範	§5.2 原則 2	路面排水之進流及收集設施，應布設於局部最低點，儘量減少沿車行方向之漫地流。於路肩及中央分隔帶設淺溝、明溝或暗溝、進水口、集水井等。	植生溝作為分隔帶內之明溝型排水構造，符合法規明文允許設置。
市區道路及附屬工程設計規範	§15.2.1	交通島為車道間之特定區域，用以區分行車方向、分隔快慢車道、導引車流、提供行人臨時庇護及設置交通管制設施。可採凸島、凹降、標記、緣石、標線或其他設置方式。	交通島可採用凹降式植生溝設計，符合條文所列設施之範疇。
公路路線設計規範	§2.4	中央分隔帶設置規定如下：(1)一、二級公路應設置中央分隔帶；其寬度應 1.8 公尺以上。(2)三級路四車道以上公路，宜設置中央分隔帶。	植生溝設計須綜合考量通洪斷面容量、入滲空間配置、側坡穩定性以及後續維護之動線安排。根據本研究 5 年重現期之水文模擬結果，中央分隔帶設置植生溝時，建議其寬度至少 2.5 公尺以上，在水文效益與實務維護層面上較具優勢。
市區道路及附屬工程設計規範	§15.2.3(1)	分隔島寬度至少 0.5 公尺；有公共設施時，寬度應大於 0.8 公尺；如有植栽其寬度宜大於 1.2 公尺。	
市區道路及附屬工程設計規範	§15.2.3(2)	分隔島兼作庇護島時應採屏障式緣石	
市區道路及附屬工程設計規範	§15.2.3(3)	分隔島配合橫交道路有開口需求時，橫交道路等級應為分隔島所在道路次一級或以上，且橫交道路路面寬度應達 8 公尺以上。	於中央分隔帶設置植生溝時，應適當預留庇護島配置空間，避免因溝體布設影響行人與車輛通行安全。 植生溝的設計應配合中央分隔帶整體布設，兼顧道路交會處的開口需求及設施功能之完整性，確保行車與排水安全不受影響。

12

結果與規範內容判斷，植生溝具整合融入道路中央分隔島之潛力與法規依據。表 5 整理現行道路與排水設計規範中，與中央分隔島植生溝設置相關之條文，說明其適用性與限制條件。

另外，本研究根據《水環境低衝擊開發設施操作手冊》(內政部，2024) 道路與公共開放空間操作示範建議，彙整植生溝在都市道路系統中之配置位置，包括：於開放性公共空間(如捷運或道路高架橋下、停車場等)設置大尺度草溝，用以收集大面積逕流、提升下滲效益；或在 12 至 15 公尺社區型道路之路側設置草溝以降低排水溝負擔；若道路兩側車流量不高，亦可考量將道路坡度設計朝中央分隔帶方向傾斜，導引地表逕流集中進入中央草溝；一般具有中央分隔島設計之道路均可使用，但於高車流量道路實施時，須審慎評估其帶來之污染負荷。因此，中央分隔帶設置草溝最適用之場址條件包括：道路擁有足夠之分隔帶空間、交通量中等(如住宅區)或具有景觀設計潛力之都市幹道，以及位於郊區型的道路系統。

在其他設置條件方面，若植生溝設置於滲透性較差之土壤場址，則可考慮搭配過濾貯水層與滲透排水管以顯著提升逕流削減之能力(Abida and Sabourin, 2006; Lucas, 2010)。當植生溝的縱向坡度超過 3%時，應於溝體內設置控制壩(check dam)等消能構造(Yu et al., 2001)，以降低水流速度並增加滯水空間，維持

植生的穩定與逕流量削減，因此道路縱坡過大時設置植生溝之減洪效益有限。另外，植生溝出流端的設計亦攸關整體減洪與蓄滯功能，建議可透過調整集水井、孔口等設施，延長水流滯留時間，提升洪峰削減效果。雖然已有研究(如 Davis et al., 2012)透過現地實驗證實植生溝設計對減少出流有正面作用，但現階段相關文獻較缺乏透過數值模擬進行參數化分析的案例。因此，出流構造類型與其他低衝擊開發設施(如雨水花園)之銜接與配置方式之模擬分析，皆值得後續深入探討。

結論與建議

本研究針對道路中央分隔帶設置植生溝之水文模擬與綜合效益評估進行深入探討，旨在評估道路分隔帶設置植生溝於都市暴雨管理與低衝擊開發應用之可行性。研究方法主要採用 SWMM 模擬不同分隔帶寬度條件下的逕流行為，結合設計暴雨與長期歷史降雨的模擬，比較不同條件下的洪峰削減、截流潛能、保水量，亦納入成本分析評估植生溝設計之經濟可行性，最後綜合現行法規與設置條件，就實務應用條件提出適用性研析，主要結論如下：

1. 設計暴雨之模擬結果顯示，受植生溝與集水面積比例影響，分隔帶寬度愈大洪峰削減愈佳；2 年重現期

的平均削減率約為 39.3%；5 年重現期的平均削減率約為 29.0 %。

2. 歷史觀測雨量的模擬結果顯示，植生溝在大多數降雨事件中，出流峰值相較於一般道路顯著降低。在都市排水系統規劃中，建議可視實際道路用地空間採用植生溝配置，以提升道路系統之保水與調洪效能。
3. 針對植生溝完全截流事件的模擬，不同寬度的植生溝在截流成效上並無顯著差異，於 2020 至 2024 年模擬期間的整體截流率為 25.4%，且在非豐水期截流事件比例較高，於高強度降雨頻繁的夏季，完全截流的事件比例較低。本研究考量集水面積與植生溝面積之比例，推導出植生溝標準化截流條件的經驗式： $P = 1.63 \cdot D + 3.3$ ，可作為評估植生溝截流潛能的設計參考。
4. 植生溝寬度的增加能有效提升整體保水能力，主要原因在於較寬的設計可提供更大的滲透面積，使雨水得以有更多機會滯留與入滲。經濟層面的分析，植生溝在不同寬度設計下，年計成本均明顯低於傳統分隔島，展現出高度的經濟效益。
5. 中央分隔帶設計為凹降式植生溝符合現行臺灣道路規範，具有良好應用潛力，最適用之場址條件包括：道路擁有足夠之分隔帶空間（建議寬度 2.5 公尺以上）、交通量中等（如住宅區）或具有景觀設計潛力之都市幹道，以及位於郊區型的道路系統。而實際應用更需配合道路型式、地形條件、土壤滲透性、地下管線布設與交通安全等多重因素審慎評估。本研究主要以水文分析觀點，輔以經濟、法規層面來探討植生溝之可行性，實務設計仍應依據現地條件及交通專業的綜合考量，確保兼顧交通安全與排水保水效益。

參考文獻

1. 內政部 (2024)，「市區道路及附屬工程設計規範 (113 年 9 月 12 日修正)」。
2. 內政部營建署 (2015)，「水環境低衝擊開發設施操作手冊編製與案例評估計畫」委託技術服務案總結報告。
3. 內政部營建署 (2024)，「水環境低衝擊開發設施操作手冊」。
4. 交通部 (2017)，「公路排水設計規範 (第 4 版)」。
5. 交通部 (2023)，「公路路線設計規範 (11206 版)」。
6. 交通部 (2025)，「整體道路規劃指引」。
7. 臺北市政府 (2023)，「112 年度工程預算參考單價：基本單價、組合單價、工程單價」。
8. 臺北市政府 (2025)，「臺北市都市計畫區域內現有已開闢道路長度及面積」，臺北市資料大平台，網址：<https://data.taipei/>。
9. 臺北市政府工務局，「工程設計參考圖查詢」，臺北市政府工務局工程技術資訊服務平台，網址：<https://eisop.gov.taipei/>。
10. 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。
11. 林書羽 (2013)，「利用 SWMM 評估透水鋪面及植被過濾帶對長期水文之影響」，國立臺灣海洋大學河海工程學系碩士論文。
12. 經濟部水利署 (2024)，「全台雨量站降雨強度延時公式推導」，經濟部水利署水利規劃分署。
13. Abida, H., & Sabourin, J. F. (2006). Grass Swale-Perforated Pipe Systems for Stormwater Management. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 132(1), pp.55-63.
14. Ackerman, D., & Stein, E. D. (2008). Evaluating the Effectiveness of Best Management Practices Using Dynamic Modeling. *Journal of Environmental Engineering*, 134(8), pp.628-639.
15. Ahmed, F., Gulliver, J. S., & Nieber, J. L. (2014). Determining Infiltration Loss of a Grassed Swale. *World Environmental and Water Resources Congress 2014: Water without Borders*, ASCE.
16. Barling, R. D., & Moore, I. D. (1994). Role of Buffer Strips in Management of Waterway Pollution: A Review. *Environmental Management*, 18(4), pp.543-558.
17. Bäckström, M. (2002). Sediment Transport in Grassed Swales During Simulated Runoff Events. *Water Science and Technology*, 45(7), pp.41-49.
18. Barrett, M. E. (2008). Comparison of BMP Performance using the International BMP Database. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, September/October, pp.556-561.
19. Cipolla, S. S., Maglionico, M., & Stojkov, I. (2016). A Long-term Hydrological Modelling of an Extensive Green Roof by Means of SWMM. *Ecological Engineering*, 95, pp.876-887.
20. Davis, A. P., Stagge, J. H., Jamil, E., & Kim, H. (2012). Hydraulic Performance of Grass Swales for Managing Highway Runoff. *Water Research*, 46(20), pp.6775-6786.

21. Ekka, S. A., Rujner, H., Leonhardt, G., Blecken, G.-T., Viklander, M., & Hunt, W. F. (2021). Next Generation Swale Design for Stormwater Runoff Treatment: A Comprehensive Approach. *Journal of Environmental Management*, 279, 111756.
22. Gavrić, S., Larm, T., Österlund, H., Marsalek, J., Wahlsten, A., & Viklander, M. (2019). Measurement and Conceptual Modelling of Retention of Metals (Cu, Pb, Zn) in Soils of Three Grass Swales. *Journal of Hydrology*, 574, pp.1053-1061.
23. Houle, J. J., Roseen, R. M., Ballesteros, T. P., Puls, T. A., & Sherrard, J. Jr. (2013). Comparison of Maintenance Cost, Labor Demands, and System Performance for LID and Conventional Stormwater Management. *Journal of Environmental Engineering*, 139(1), pp.932-938.
24. Leroy, M.-C., Portet-Koltalo, F., Legras, M., Lederf, F., Moncond'huy, V., Polaert, I., & Marcotte, S. (2016). Performance of Vegetated Swales for Improving Road Runoff Quality in a Moderate Traffic Urban Area. *Science of the Total Environment*, 566-567, pp.113-121.
25. Li, H., Li, K., & Zhang, X. (2016). Performance Evaluation of Grassed Swales for Stormwater Pollution Control. *Procedia Engineering*, 154, pp.898-910.
26. Lucas, W. C. (2010). Design of Integrated Bioinfiltration-Detention Urban Retrofits with Design Storm and Continuous Simulation Methods. *Journal of Hydrologic Engineering*, 15(6), pp.486-498.
27. Mantilla, I., Flanagan, K., Broekhuizen, I., Muthanna, T. M., Marsalek, J., & Viklander, M. (2024). Retrofit of Grass Swales with Outflow Controls for Enhancing Drainage Capacity. *Journal of Hydrology*, 639, 131637.
28. Rawls, W. J., Brakensiek, D. L., & Miller, N. (1983). Green-Ampt Infiltration Parameters from Soils Data. *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, 109(1), pp.62-70.
29. Rushton, B. T. (2001). Low-impact Parking Lot Design Reduces Runoff and Pollutant Loads. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 127(3), pp.172-179.
30. Rossman, L., & Huber, W. (2016). *Storm Water Management Model Reference Manual: Volume III – Water Quality* (EPA/600/R-16/093). United States Environmental Protection Agency.
31. Rujner, H., Leonhardt, G., Perttu, A. M., Marsalek, J., & Viklander, M. (2016). Advancing Green Infrastructure Design: Field Evaluation of Grassed Urban Drainage Swales. *Modélisation/Models-Contrôle à la source/Source Control*.
32. Stagge, J. H., Davis, A. P., Jamil, E., & Kim, H. (2012). Performance of Grass Swales for Improving Water Quality from Highway Runoff. *Water Research*, 46(20), pp.6731-6742.
33. Wu, F.-C., Shen, H. W., & Chou, Y.-J. (1999). Variation of Roughness Coefficients for Unsubmerged and Submerged Vegetation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(9), pp.934-942.
34. Yu, L. S., Kuo, J.-T., Fassman, A. E., & Pan, H. (2001). Field Test of Grassed-swale Performance in Removing Runoff Pollution. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 127, pp.168-171.

收稿日期：民國 114 年 06 月 02 日
修改日期：民國 114 年 08 月 14 日
接受日期：民國 114 年 09 月 20 日