

結合水文分析及 UAV 數值地表模型進行旱溪溢淹檢討

施廷儒¹ 王畊貴² 蔡慧萍^{3*}

摘要

本研究主要貢獻為應用 UAV 數值地表模型提供精細的斷面資料，針對台中旱溪進行水文分析與洪水溢淹模擬。配合台中氣象站 104 年雨量資料，以五種機率分布模型推估一日最大暴雨量，經檢定與誤差分析，對數皮爾森三型為最佳模型。以符合旱溪實況之三角形單位歷線法進行洪水模擬，並利用 HEC-RAS 進行七種重現期距模擬。研究結果發現旱溪第四段於 50 年與 100 年洪水重現期距下有溢淹情形。本研究結合 UAV 數值地表模型提供精細的斷面資料，提升模擬精度與可靠度，分析成果可提供水利單位於河道整治與防洪規劃之參考。

關鍵詞：旱溪、水文分析、UAV、數值地表模型

1. 前言

隨著工業革命後溫室氣體排放急遽上升，因此全球地表及海洋不斷升溫，然而全球暖化導致極端天氣事件日益頻繁，包含強降雨、洪水與乾旱等 (Panthou *et al.*, 2014、Zandalinas *et al.*, 2021)。根據政府間氣候變化專門委員會 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 報告，未來熱帶氣旋之峰值可能增加 5 至 10%，降雨量可能增加 20 至 30%。極端降雨引發洪水、旱災及邊坡滑動等災害，尤以洪水發生頻率最高，占自然災害損失約 30% (Vitousek, 1994、Mousavi *et al.*, 2011、Alfieri *et al.*, 2017、Haque *et al.*, 2019)。

臺灣地處東南亞季風氣候帶，屬高山島嶼地形，雖降雨豐沛但時空分布不均，加上河川短促流急，導致對極端降雨極為敏感(朱芳儀等，2018；李忠勳及葉信富，2020)。1961 至 2015 年間，臺灣強降雨明顯增加，而中、小雨量則相對減少，導致總雨量變化不大，但降雨分布更不均。其中，最弱 10% 降雨隨氣溫上升 1°C 而減少 53%，最強 10% 則增加

78%，梅雨期總雨量也呈現下降趨勢(蔡怡真，2017)。觀察百年來的溫度與降雨距平資料，發現 1950 年前氣溫多低於平均、雨量變化緩和，1950 年後氣溫顯著上升，降雨型態呈現劇烈震盪，乾旱與豪雨交錯出現(汪中和，2015)。鍾侑達等(2009)對臺灣四區分析 1972 至 2007 年間雨量資料，發現中部如濁水溪與大安溪流域總雨量及降雨天數減少，但暴雨量、洪峰流量與豪雨日數皆上升，顯示雨勢更集中且時間分布不均。並且進一步利用標準化降雨指標法 (Standardized Precipitation Index, SPI) 及標準化地下水位指標評估法 (Standardized Groundwater level Index, SGI) 指標評估顯示，中部地區氣候呈現「乾季愈乾、濕季愈濕」的極端化趨勢(許心藝及葉信富，2018)。

近年來無人機飛行載具 (Unmanned Aerial Vehicles, UAV) 的技術發展蓬勃，其機動性高且可快速獲取空間資訊，不受地形與環境限制，能進入傳統調查人員難以抵達的區域，已廣泛應用於水文分析。根據 Mourato *et al.* (2017) 指出，2000 至 2020 年間共計 122 項相關研究中，有 84.4% 聚焦於地表水，

¹ 國立中興大學土木工程學系 碩士

² 國立中興大學土木工程學系 博士生

³ 國立中興大學土木工程學系 副教授

* 通訊作者, E-mail: huiping.tsai@nchu.edu.tw

收到日期：民國 114 年 06 月 30 日

修改日期：民國 114 年 07 月 31 日

接受日期：民國 114 年 09 月 04 日

僅 15.6% 探討地下水，顯示地表水為研究主流，尤以洪水與水位探測為主(Vélez-Nicolás *et al.*, 2021)。傳統洪水研究多為大尺度，缺乏小尺度地形與水文資料，而 UAV 搭配 DSM 可補足這一缺口(Annis *et al.*, 2020)。例如在法國 Buëch 河流域，研究發現 2015 年河道較 2014 年顯著侵蝕左岸，可能危及鄰近基礎建設(Hemmelder *et al.*, 2018)。其他如土耳其(Akay *et al.*, 2020)、荷蘭(Duró *et al.*, 2018)、中國(Wang *et al.*, 2016)等地亦有相關應用案例。在臺灣，UAV 已被應用於災後調查(簡榮興, 2013)、水工構造物調查(胡通哲等, 2017)、表面流速分析(陳彥伶, 2017)、河道變遷(謝有忠, 2016)及輸砂量變化(邱翰廷, 2016)等研究。UAV 若結合 GPS 即時動態定位(Real Time Kinematic, RTK)技術，可產製高精度正射影像與數值地表模型(Digital Surface Model, DSM)，並符合內政部地籍測量標準。UAV 的廣角視角及高精度成果亦有助於修正與擴充原有地形資料(Watanabe & Kawahara, 2016)。無論為定翼機或旋翼機，在良好天氣下皆可取得高品質資料，但地面控制點分布的均勻性仍為 DSM 精度的關鍵因素(張崴等, 2017)。因此基於上述，本研究之目的如下列所述：

- (1) 了解早溪流域雨量變化。
- (2) 分析早溪水文條件變化。
- (3) 分析在雨量和水文條件改變下，早溪哪些斷面可能發生溢淹。
- (4) 利用 UAV 協助分析並擴充早溪溢淹斷面資料。

2. 研究區域

本研究選定之早溪為烏溪中游大里溪水系主要支流之一，長 61.91 km，集水面積 134.4 km²，流經豐原區、潭子區、北屯區、北區、東區及大里區(圖 1)，上游源自豐原山區，地勢使其河短流急，下游地勢趨緩。早期河道蜿蜒且不固定，常因豪雨改道，造成洪害。1989 年「七二七水災」後，先總統李登輝指示辦理「大里溪水系整治計畫」，涵蓋大里溪、早溪、大坑溪、葫子溪、頭汴坑溪、草湖溪等，共整治 53 km，其中早溪最重要工程為「早溪改道」，將下游截彎取直提前匯入大里溪，兩岸興建堤防，

並與大坑溪一同規劃為區域排水系統。自 1990 年改道後，未再發生洪害。

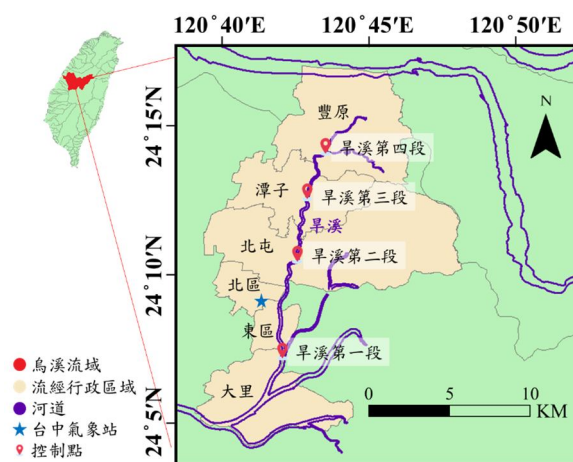


圖 1 早溪流經之行政區範圍與水文控制點分布圖

臺灣地形呈南北長、東西短，河流多短促且流急。經濟部水利署設有十個河川局負責管理，本研究區域隸屬經濟部水利署第三河川局(三河局)，負責大安溪、大甲溪及烏溪流域的河川與海堤管理、水文資料蒐集及工程執行等業務。三河局保存大量早溪水文資料，本研究參考《水文設計應用手冊》(國立臺灣大學生物環境系統工程學系, 2001) 及 2014 年《大里溪支流早溪治理規劃檢討水文分析報告》，並與 1990 年報告結果比較，發現各控制點洪峰流量皆上升，但尚無溢淹危機。

本研究彙整 1990 年「大里溪水系整治計畫」之早溪水文控制點位置(圖 1)，與 2014 年「大里溪支流早溪治理規劃檢討水文分析報告」之水文因子資料(表 1)。早溪全長分為四段，設有 89 條斷面，總集水面積 134.4 km²，流路長 61.91 km²，高程差 172.406 m。早溪第一段為下游，集水面積最大、流路最長、高程差也最大；而早溪第四段為上游，集水面積最小、流路最短、高程差高居第二。

3. 研究材料

3.1 雨量資料

本研究採用台中氣象站 1921 年至 2024 年之逐日雨量作為研究資料，經整理後得圖 2。由降雨天數之時間序列分析，發現每年的降雨天數呈顯著之

負趨勢($p < 0.005$)，由年雨量之時間序列分析，發現歷年來年雨量呈不顯著之負趨勢($p = 0.750$)。平均年降雨天數為 117 天，平均年雨量為 1723.58 mm。

由於 1990 年旱溪改道，因此就其改道前後之雨量級距發生次數時間序列進行分析，雨量分級參考中央氣象局 2020 年 3 月所公布之最新定義。大雨事件次數於 1990 年前呈不顯著之負趨勢($p = 0.509$)，1990 年後呈不顯著之正趨勢($p = 0.789$)，如圖 3(a)所示；豪雨等級以上事件的次數於 1990 年前後皆不顯著之負趨勢($p = 0.825$ 以及 0.721)如圖 3(b)所示。綜合年雨量與降雨次數的分析(圖 2 與圖 3)，雖然發現年雨量不顯著之負趨勢，且降雨天數減少，但大雨事件場次呈不顯著之正趨勢，代表降雨強度變大且越發集中，日後強降雨愈強，弱降雨愈弱；乾溼對照會更加顯著。

3.2 計畫流量

計畫流量(洪峰流量分配)引用自「大里溪支流旱溪治理規劃檢討水文分析報告」之洪峰流量分配圖(經濟部水利署第三河川局, 2014)，如圖 4 所示。以重現期距 100 年為例，可見旱溪上游由北坑溪、中坑溪及南坑溪三者匯流而成，在旱溪第四段洪峰流量達 368cms，烏牛欄溪於旱溪第三段匯流，洪峰

流量達 710 cms，在旱溪第二段及第一段，沒有其他河道匯流，最後以洪峰流量 1230 cms 於斷面 78 處匯入大里溪。圖中標示旱溪各分段之頭尾斷面及各段在重現期距 100 年時的計畫流量。

3.3 斷面資料

本研究採用之 2020 年斷面資料由三河局提供，通常於 2 至 3 年便會再次施測，若期間有遇到洪害或地震等可能改變河貌之事件，酌情增加施測次數。旱溪斷面編號為 77-118，共 89 條斷面，外業人員以步行方式穿梭河道斷面，當該斷面中遇到地形起伏時，就必須量測此處之地形高程，常因人員判斷地形起伏標準不一、該地形不利於架設儀器或人員站立，導致儀器或稜鏡並未拿正等原因造成誤差。

3.4 無人飛行載具

UAV 可依飛行方式可分類為定翼機與旋翼機，前者飛行穩定但需提供跑道起飛；後者飛行穩定度較低但定點拍攝容易且機動性高。本研究因研究區域之河道兩側皆有建物鄰近，考慮空間與機動性需求，故採用 DJI Phantom 4 Pro (P4P) (DJI, Shenzhen, PRC)旋翼無人飛行載具拍攝可能溢淹之研究區域，相關設備參數規格如表 2。

表 1 旱溪各段水文因子

控制點	斷面編號	集水面積 A (km ²)	流路長 L (m)	高程差 H (m)
旱溪第一段	78~86	49.76	21.35	53.55
旱溪第二段	87~96	43.97	18.58	38.62
旱溪第三段	97~106	29.25	13.14	28.90
旱溪第四段	107~118	14.42	8.84	51.34
總和		134.4	61.91	172.41

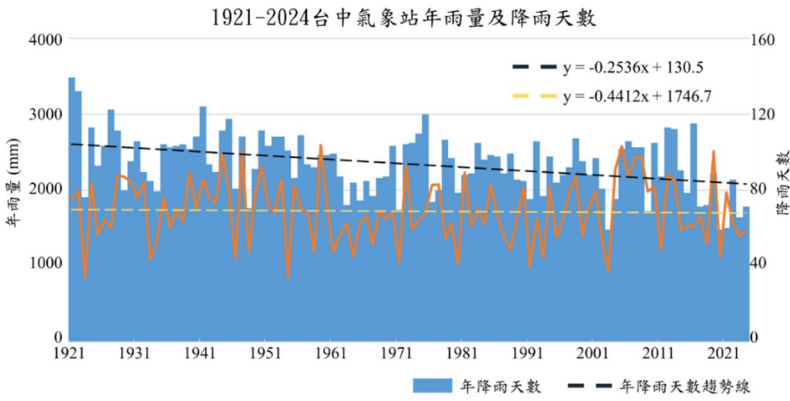


圖 2 台中氣象站 1921-2024 年降雨天數及年雨量趨勢圖

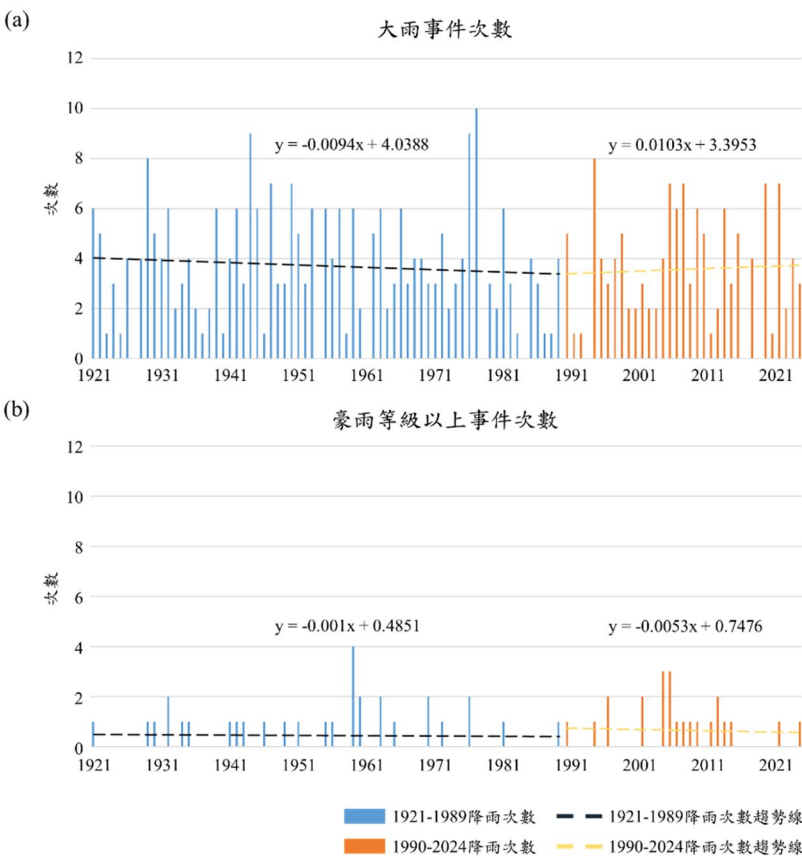


圖 3 台中氣象站 1921-2024 年雨量次數時間序列(a)大雨事件(b)豪雨等級以上事件

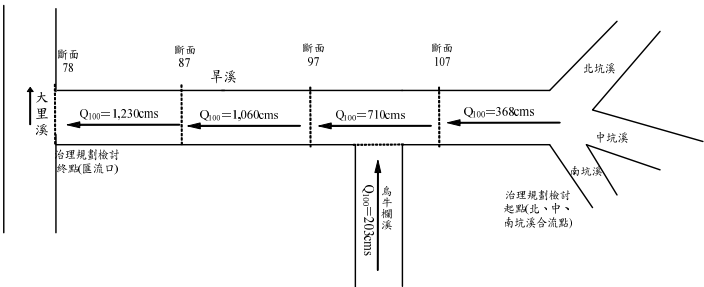


圖 4 早溪洪峰流量分配圖(引用自經濟部水利署第三河川局，2014)

表 2 本研究採用之無人飛行載具 DJI Phantom 4 Pro 規格表

DJI Phantom 4 Pro		
項目	類別	規格
UAV	重量(g)	1388
	最大飛行高度(m)	6000
	飛行時間(min)	約 30 分鐘
	GPS 模式	GPS/GLONASS 雙模式
雲台	可控轉動範圍	俯仰：-90°~+30°
	穩定系統	3 軸(俯仰、橫滾、偏航)
相機	感光元件尺寸(mm)	13.2×8.8
	照片最大解析度(3:2)	5472×3648
	焦距(mm)	8.8
	光譜波段	可見光
	航高 20m 之地面解析度(mm/pixel)	5.4
	位元深度(bit)	8

4. 研究方法

本研究選定旱溪作為研究區域，蒐集 2014 年之計畫流量、斷面高程以及 1921-2024 年之逐日雨量。根據資料計算各機率分布模型之一日暴雨量並對其進行暴雨頻率分析(適合度分析)，決定選用何種機率分布模型，並選定 1921-2024 年內至少 6 場暴雨使用同位序平均法設計雨型。依據上述計算所得，進行至少二種雨量-逕流分析方法，計算洪峰流量並相互比較，採用與 2014 年的計畫流量較接近之流量，套入美國陸軍工程兵團的 HEC-RAS 軟體，分析各斷面溢淹情形。

根據洪水模擬之溢堤分析成果，將有可能發生溢堤的範圍進行航拍規劃，並通過 DJI GS Pro 軟體(DJI, Shenzhen, PRC)進行航前規劃，使用 P4P 在飛行任務獲得的圖像匯入 Agisoft Metashape Professional(Agisoft LLC, St. Petersburg, Russia)產製 DSM 及正射影像。萃取 DSM 中斷面位置之地理資訊，改正斷面資料與現地不符處及擴充斷面資料不足處，並再次使用 HEC-RAS 軟體分析改正後的斷面溢淹情形，其研究流程如圖 5 所示。

4.1 選定機率分布模型及設計雨型

本研究依循《水文設計應用手冊》之規範(經濟部水利署, 2001)，一日暴雨量及二日暴雨量皆採用年最大值選用法(Annual Maximum Series)(Zelenhasic, 1970)，因旱溪各段集流時間皆未超過 3 小時，故採用一日最大暴雨量。

統計分布模式除應用手冊中之四種統計分布模型：極端值一型(Extreme type-I distribution)

(Gumbel, 1958)、對數常態分佈(Lognormal distribution)(Brown & Sanders, 1981)、皮爾森三型分布(Pearson type-III distribution)(Pearson, 1895)、對數皮爾森三型分布(Log-Pearson type-III distribution)(Water Resources Council (US), 1967)外，增加常態分布(Normal distribution)(Laplace, 1810)，並使用 R Studio(R Studio, Boston, USA)模擬在不同重現期距下(Recurrence Interval)(Dalrymple, 1960)分析一日最大暴雨量。

對上述五種機率分布模型使用科司檢定(Kolmogorov-Smirnov Test, K-S Test)(Kolmogorov, 1933)及卡方檢定(Chi-square test)(Pearson, 1900)進行適合度檢定(goodness-of-fit test)，通過檢定之模型再以標準誤差(Standard Error)(Aldrich, 2010)排序優劣。

設計雨型採同位序平均法，選取至少六場峰值暴雨，計算位序百分比後重分配，並採用 24 小時同位序雨型繪製累積雨量曲線。

4.2 流量計算及溢淹模擬

根據 2012 年 8 月經濟部水利署訂定之「水文分析報告審查作業須知」規定，應至少選用二種暴雨一逕流分析方法相互比較。本研究採用合理化公式(Rational formula)(Kuichling, 1889)及三角形單位歷線法(Triangular unit hydrograph)(Mishra & Singh, 2013)計算洪峰流量，使用 AutoCAD 軟體將河心累距依各斷面劃分為斷面間距，並利用美國陸軍工程兵團的 HEC-RAS (6.0.0 Beta 3)軟體，將輸入上述流量結果、斷面資料及水理參數，其中水理參數包括採用穩定流模擬，設定上游邊界為固定流量；下游為正常水位；曼寧係數依照實際河道材質，材質主

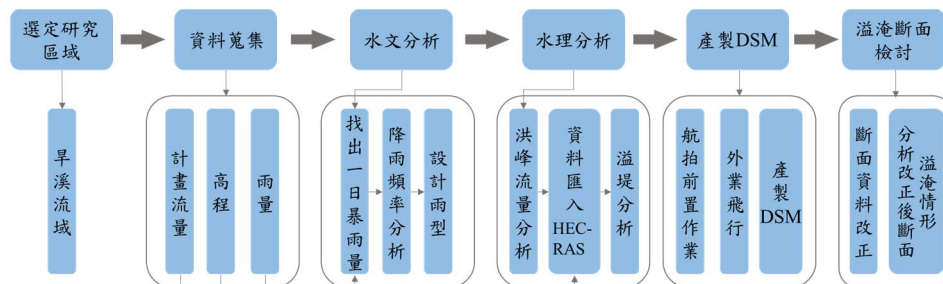


圖 5 本研究流程圖

要為稀疏草生、全面密草生以及純水泥漿平滑面，其中河道依橫斷面分成 4 等分(詳如附表 1)，斷面中河道有水面覆蓋處採用 HEC-RAS 預設值 0.03。觀察模擬能量線、水面線及臨界水深線的位置關係，與各斷面在不同重現期下之溢淹情形。

4.3 數值地表模型及斷面改正

本研究於 2021 年 7 月 30 日進行 UAV 空拍作業，考量周遭建物高度與飛行安全，航高設定為 50 m，前後與側向重疊率皆為 75%，採單網格飛行模式，覆蓋面積約 0.143 km²，共拍攝 472 張影像，地面解析度為 1.33 cm/pixel。將飛行任務獲得之影像匯入 Agisoft Metashape Professional (AgisoftLLC, St. Petersburg, Russia)進行影像匹配，並設置 19 個透空且平均分布於拍攝區域的地面控制點作為校正點，另選擇旱溪內保存良好的控制點作為檢核點(附圖 1)。地面控制點坐標透過 RTK 移動站(南方 S82, Southgnss, Guangzhou, PRC)結合 e-GNSS 虛擬測站取得，進行空中三角測量平差，建立影像與控制點之對應關係，產製數值地表模型(Digital Surface Model, DSM)與正射影像。精度檢核結果顯示，水平誤差低於 1.33 cm，垂直誤差低於 8 cm。

利用 UAV 產製之高解析 DSM，萃取對應斷面位置的高程資料，與三河局 109 年度原始斷面逐點比對，針對高程差異顯著或形態缺失的區域進行修補與擴充，並配合現地勘查進行驗證。完成修正後的斷面資料再輸入 HEC-RAS 進行洪水模擬，以比較改正前後之溢淹情形差異。

5. 研究成果

5.1 選定機率分布模型

本研究依據 1921-2024 年台中氣象站之逐日雨量，使用 R studio 軟體分別計算常態分佈、對數常態分佈、皮爾森三型分佈、對數皮爾森三型分佈、極端值一型五種機率分布模型在不同重現期距下之一日暴雨量。分析結果顯示，重現期距 25 年時，

皮爾森三型之一日暴雨量為最大，而重現期距 50 年及 100 年時，對數皮爾森三型之一日暴雨量最大(表 3)。

本研究以 K-S Test 及卡方檢定進行適合度檢定，信賴水準設定為 95% (p-value 為 0.05)，當 D_n 以及卡方值小於 5%顯著水準對應之臨界值方能通過該檢定。由表 4 得知對數常態分佈、皮爾森三型分佈及對數皮爾森分佈等三者通過卡方檢定；而使用 K-S Test 時，五種分佈模型皆可通過檢定。而上述方法僅能篩選適用之分佈模型，不能選出最適合之分佈模型。因此需再將機率分布，依模型依韋伯法(Weibull)及海生法(Hazen)，計算不同重現期距(T 值)所呈現之不同標準誤差(SE)大小作積分排序，選出最適用之機率分布模型，如表 5、表 6。標準誤差(SE)越小積分越小，代表適合度越高，應優先選擇，在兩種方法中，對數皮爾森三型皆為積分最小，因此為適合度最高之分佈模型。

5.2 洪峰流量分析

將合理化公式及三角形單位歷線法計算之洪峰流量，在不同重現期距下分段列表，見表 7。因本研究基於三角形單位歷線法由旱溪地文因子推算而成，且計算成果較合理化公式之計算成果更接近 2014 年三河局計算之成果，故採用之。

將表 7 三角形單位歷線法之洪峰流量成果與「大里溪支流旱溪治理規劃檢討水文分析報告」(三河局, 2014)內三角形單位歷線法之洪峰流量成果相互比較，見表 8。本研究成果減去河川局成果之差值，可以發現在大部分重現期距下，各斷面洪峰流量皆呈上升趨勢。

選用 2021 年 8 月 6 號至 8 月 7 號之一日大雨作為流量驗證，其累積雨量為 234 mm，介於重現期距 5 年與重現期距 10 年之間。最大瞬時流量依旱溪第一段至旱溪第四段依序為 422 cms，415 cms，398 cms 及 192 cms，仍介於重現期距 5 年與重現期距 10 年之間，見表 9。

表 3 各重現期距下之一日暴雨量

重現期距	常態分佈	對數常態	皮爾森三型	對數皮爾森三型	極端值一型
2	189.1	169.7	188.7	167.6	173.4
5	269.9	250.5	302.3	220.0	258.2
10	312.1	307.1	372.3	309.0	314.3
20	346.9	363.3	435.7	389.7	368.2
25	357.1	381.5	455.2	453.8	385.2
50	386.2	438.9	513.5	521.4	437.9
100	412.3	497.9	569.1	592.9	490.1

表 4 暴雨頻率分析成果表

	K-S Test		卡方檢定	
	D_n	5%顯著水準之臨界值	卡方值	5%顯著水準之臨界值
常態分佈	0.002	0.164	16.313	7.815
對數常態	0.004		4.030	
皮爾森三型	0.001		5.970	
對數皮爾森三型	0.007		5.162	
極端值一型	0.003		32.313	

表 5 暴雨頻率-韋伯法積分排序

	常數分佈	對數常態	皮爾森三型	對數皮爾森三型	極端值一型
SSE	147868.087	42578.932	39713.028	30628.904	385531.847
積分	4	3	2	1	5

表 6 暴雨頻率-海生法積分排序

	常數分佈	對數常態	皮爾森三型	對數皮爾森三型	極端值一型
SSE	144330.45	22645.473	24453.691	13235.087	409991.255
積分	4	2	3	1	5

表 7 洪峰流量成果

重現 期距	第一段		第二段		第三段		第四段	
	合理化公式	三角形歷線	合理化公式	三角形歷線	合理化公式	三角形歷線	合理化公式	三角形歷線
2	331	262	328	255	263	201	202	93
5	434	395	430	407	345	324	265	127
10	609	607	604	469	484	464	372	184
25	769	896	887	746	711	543	546	277
50	895	1035	1019	1009	817	624	628	320
100	1028	1182	1158	1152	928	760	714	398

單位：cms

表 8 三角形單位歷線法成果比較

重現 期距	第一段			第二段		
	河川局成果(A)	本研究成果(B)	差值(A-B)	河川局成果(A)	本研究成果(B)	差值(A-B)
2	236	262	+26	228	255	+27
5	440	395	-45	431	407	-24
10	576	607	+31	569	469	-100
25	747	896	+149	742	746	+4
50	871	1035	+164	870	1009	+139
100	994	1182	+188	992	1152	+160
重現 期距	第三段			第四段		
	河川局成果(A)	本研究成果(B)	差值(A-B)	河川局成果(A)	本研究成果(B)	差值(A-B)
2	157	201	+44	82	93	+11
5	301	324	+23	157	167	+10
10	399	464	+65	207	214	+7
25	524	543	+19	272	297	+25
50	617	624	+7	319	340	+21
100	706	760	+54	367	398	+31

單位：cms

5.3 溢淹模擬

溢淹模擬重現期距 50 與 100 年下斷面 116 至斷面 118 水位情形如表 10 所示，在重現期距 50 年時，斷面 118 有溢淹情形；重現期距 100 年時，從斷面 116、斷面 117-2、斷面 117-5 及斷面 118 有程度不一之溢淹情形，未列入下表之斷面皆未有溢淹情形發生，表中紅燈代表有溢淹情形、黃燈代表洪水水位離左岸或右岸不足 1 m、綠燈代表洪水水位距離堤頂超過 1 m，各溢淹斷面位置如圖 6。

為避免因斷面資料空間分布不均導致在討論河道縱向方向之能量線、水面線、臨界水深線及槽底關係變化時產生過大誤差，本文於原有斷面資料基礎上，每隔 100 m 新增一內插斷面(斷面編號含*字者)，以提升模擬精度。能量線代表總水頭之縱向變化連線，當水面線位於臨界水深線之上時為亞臨界流，反之則為超臨界流；當超臨界流轉變為亞臨界流時，部分動能轉換為位能，即產生水躍。根據模擬結果，僅在重現期距 50 年與 100 年時，旱溪第四段出現溢淹情形，故針對此段進行討論。在斷面 116.1、115.33 與 108.33 處皆觀察到水躍現象，如圖 7、

圖 8 所示。其中，水躍 A 於斷面 118.1 處水位達 211.04 m，距左、右岸堤頂皆不足 1 m，然未發生溢淹；水躍 B 則在斷面 114.1 處水位達 239.47 m，距堤頂超過 1 m，亦無溢淹；水躍 C 發生於斷面 116.05，水位為 244.88 m，右岸距堤頂不足 1 m，左

岸則超過，皆未出現溢淹情形。

5.4 斷面改正

本研究針對四個模擬重現期距 50 年下出現溢淹情形的斷面(斷面 116、117-2、117-5 及 118)提取對應斷面位置的高程剖面，並與三河局 109 年度斷面資料進行比較分析，後續再透過 HEC-RAS 進行溢淹模擬。由模擬結果及斷面變化可知(表 11 與圖 9)，本研究成果相較於三河局斷面資料有兩項優勢：其一，畫面細節更豐富，能更忠實呈現地貌；其二，可擴充斷面里程，精確描繪兩側地形。各斷面變化如下：斷面 116 新增左岸牆面(約 2 m 處)及右岸道路(約 33 至 48 m 處)，模擬後左岸無溢淹情形；117-2 則顯示左岸道路(約 0 至 -10 m)高程變化顯著，牆面與右岸道路亦有所擴充；117-5 針對河道變化(2 至 10 m)細緻描繪，並補足兩岸道路(-9 至 -20 m 與 40 至 50 m)；118 則發現左岸地形變化劇烈(0 至 -12 m)，底部地勢相對平緩，右岸道路(19 至 40 m)更貼近實況。本研究成果不僅提升地形資訊精度，亦對水文模擬結果具實質助益，足供後續規劃參考。其中，116 與 118 與原始資料差異最大，高程修正幅度分別達約 1.5 m 與 1.8 m，主要原因多為興建變化，修正後於 50 年重現期距下，118 溢淹深度減少約 0.8 m，範圍縮減近一半；而 116 左岸經過斷面改正後，由原先有溢淹情形轉為不會溢淹，顯示斷面改正能反映真實地貌，進而呈現合理的模擬成果。

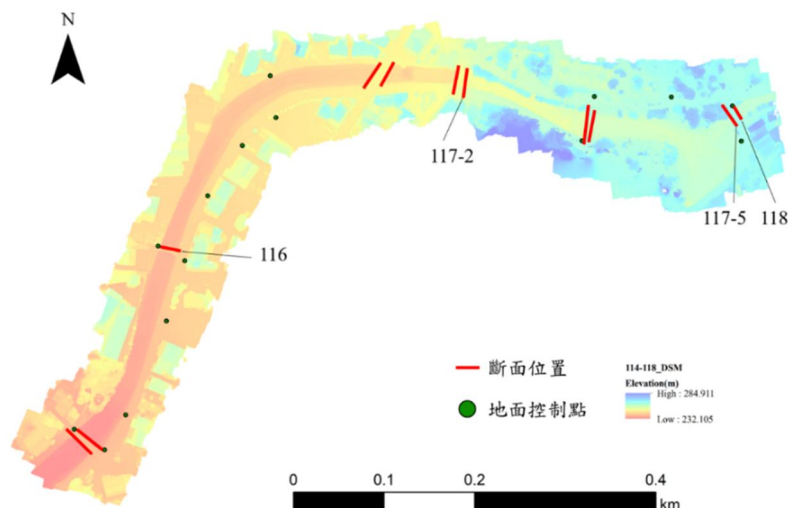


圖 6 溢淹斷面位置示意圖

表 9 2021/08/06~2021/08/07 一日大雨對應之最大流量

	第一段	第二段	第三段	第四段
重現期距 5 年	395	407	324	167
8/6~8/7 大雨	422	415	398	192
重現期距 10 年	607	469	464	214

單位：cms

表 10 重現期距 50 與 100 年下斷面 116 至斷面 118 水位情形

重現期距	斷面	洪水位	左岸高程	右岸高程	左岸溢淹	右岸溢淹
50YR	118	264.440	263.385	263.188	-1.055	-1.252
	117-5	262.650	263.176	263.437	0.526	0.787
	117-4	258.900	260.628	259.884	1.728	0.984
	117-3	256.420	260.438	259.400	4.018	2.980
	117-2	254.230	254.750	255.970	0.520	1.740
	117-1	249.620	251.311	251.263	1.691	1.643
	117	246.560	247.642	248.866	1.082	2.306
	116-1	246.320	247.642	247.230	1.322	0.910
100YR	116	242.180	242.744	242.894	0.564	0.714
	118	264.350	263.385	263.188	-0.965	-1.162
	117-5	263.960	263.176	263.437	-0.784	-0.523
	117-4	259.870	260.628	259.884	0.758	0.014
	117-3	256.890	260.438	259.400	3.548	2.510
	117-2	254.850	254.750	255.970	-0.100	1.120
	117-1	250.260	251.311	251.263	1.051	1.003
	117	247.070	247.642	248.866	0.572	1.796
	116-1	246.830	247.642	247.230	0.812	0.400
	116	243.360	243.300	243.070	-0.060	-0.290

圖例 ●有溢淹表現 ●離堤高不足1公尺 ●無溢淹表現

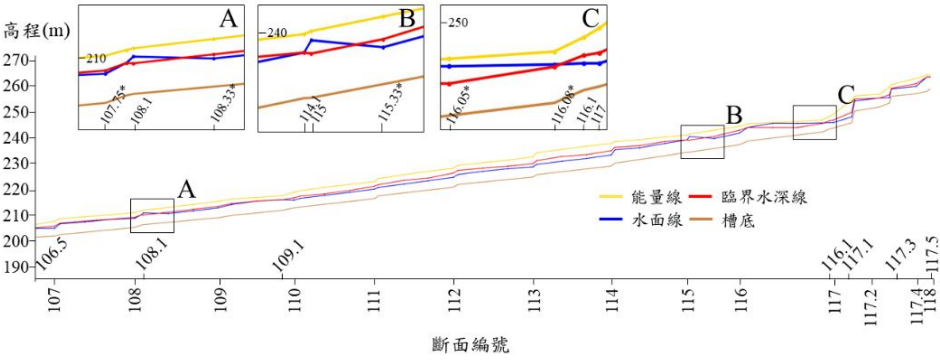


圖 7 重現期距 50 年下旱溪第四段之臨界水深縱向變化

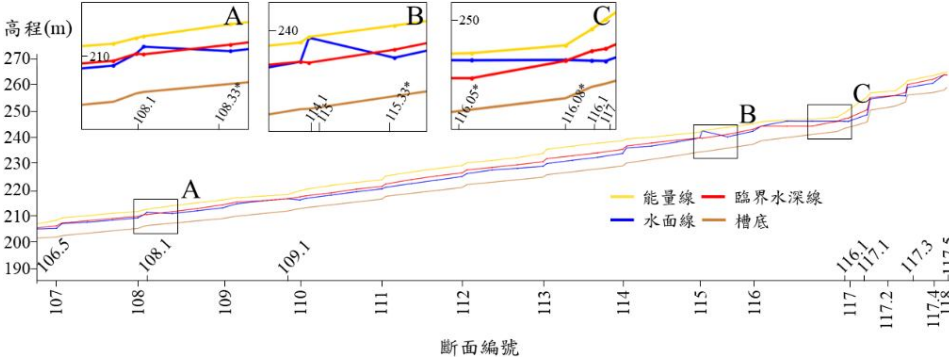


圖 8 重現期距 100 年下旱溪第四段之臨界水深縱向變化

表 11 斷面改正後之重現期距 50 年下斷面 116 至斷面 118 水位情形

重現期距	斷面	洪水位	左岸高程	右岸高程	左岸溢淹	右岸溢淹
50YR	118	264.440	263.898	262.706	-0.542	-1.734
	117-5	262.650	262.946	263.180	0.296	0.530
	117-2	254.230	254.729	255.970	0.499	1.740
	116	242.180	244.150	243.070	1.970	0.890
100YR	118	264.350	263.898	262.706	-0.452	-1.644
	117-5	263.960	262.946	263.180	-1.014	-0.780
	117-2	254.850	254.729	255.970	-0.121	1.120
	116	243.360	244.150	243.070	0.790	-0.290

圖例 ● 有溢淹表現 ● 離堤高不足1公尺 ● 無溢淹表現

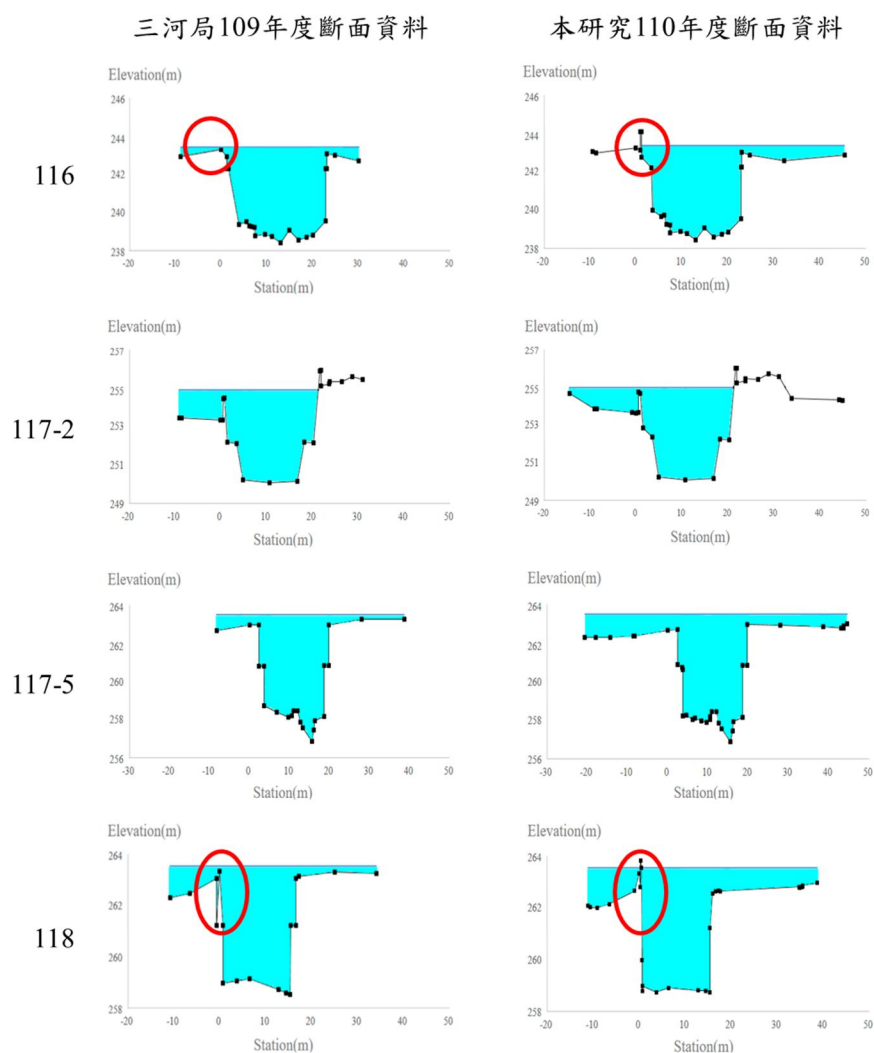


圖 9 重現期距 100 年各斷面改正前後模擬結果

6. 結論

- (1) 以台中氣象站長達 104 年之日雨量進行分析，本研究發現 1990 年旱溪改道工程後，降雨型態改變。年雨量大致穩定，但顯示呈現降雨天數下降且降雨有增強狀態。

- (2) 在重新審視降雨型態的變化後，再次對一日最大暴雨量進行計算。一日最大暴雨量以五種機率分布模型(常態分佈、對數常態分佈、皮爾森三型、對數皮爾森三型、極端值一型)計算，並使用 K-S 檢定、卡方檢定及標準誤差做適合度分析。由分析成果得知：K-S 檢定敏感度較低，

五種模型皆通過適合度檢定，而卡方檢定篩選出三種機率分布模型(對數常態分布、皮爾森三型、對數皮爾森三型)後，經過標準誤差評估，對數皮爾森三型為最佳之機率分布模型。

- (3) 本研究採用合理化公式及三角形單位歷線法相互比較，成果顯示：三角形單位歷線法相較於合理化公式與 2014 年「大里溪支流旱溪治理規劃檢討水文分析報告」之洪峰流量成果較為接近，故採用之。
- (4) 依據三河局提供之斷面資料，使用 HEC-RAS 進行洪水模擬，得旱溪縱向能量線、水面線及臨界水深線之間位置變化，可判定旱溪為混合流況，常有水躍發生。
- (5) 本研究經由現地調查及飛行任務後發現，三河局提供之斷面資料與現地有些許出入。藉由無人機產製之 DSM 萃取斷面位置地理資訊，可將斷面資料中不合理處改正並擴充河道兩側道路之地形，有助於後續水文水理應用。
- (6) 本研究使用 HEC-RAS 進行斷面溢淹分析，成果顯示：有溢淹情形之斷面皆集中在旱溪第四段(上游)，在重現期距 2、5、10、25 年下，無斷面溢淹；重現期距 50 年時，僅有斷面 118 溢淹；重現期距 100 年時，斷面 116 至斷面 118 間有 4 條斷面有程度不一之溢淹情形。
- (7) 考量氣候變遷影響，近年豪大雨事件頻率波動大，本研究也依據台中氣象站雨量資料發現大雨事件發生的次數有增加趨勢，建議未來可持續觀察雨量變化趨勢，考量周圍保全對象，進行整治規劃，例如考慮局部加高河岸或建置親水式堤防設施，以提升防洪安全與水利規劃效益。

參考文獻

朱芳儀、吳俊毅、安軒霏、林仕修、陳樹群，2018。臺灣主要流域之河川型態及其野溪界點判定評估，中華水土保持學報，49(3)：178-186，DOI：10.29417/JCSWC.201809_49(3).0005。[Chu, F., Y., Wu, C.Y., An, S.P., Lin, S.H., and Chen, S.C., 2018. Assessing river morphology and torrent

division point of main basins in Taiwan, Journal of Chinese Soil and Water Conservation, 49(3): 178-186, DOI : 10.29417/JCSWC.201809_49(3).0005. (in Chinese)]

李忠勳、葉信富，2020。臺灣南部流域長期降雨與逕流量變異之探討，臺灣礦業，72(1)：10-24。[Lee, C.H., and Yeh, H.F., 2020. An analysis on the variation of long-term precipitation and streamflow for watersheds in southern Taiwan, Taiwan Mining Industry, 72(1): 10-24. (in Chinese)]

汪中和，2015。氣候暖化與台灣的水資源，鑛冶：中國鑛冶工程學會會刊，59(2)：11-15，DOI：10.30069/MM.201506_59(2).0001。[Wang, C.H., 2015. Climate warming and Taiwan's water resources, Mining & Metallurgy : The Bulletin of the Chinese Institute of Mining & Metallurgical Engineers, 59(2): 11-15, DOI: 10.30069/MM.201506_59(2).0001. (in Chinese)]

邱翰廷，2016。UAV 影像在河床裸露的之三為變遷偵測-以高屏溪為例，高雄應用科技大學土木工程與防災科技研究所碩士論文。[Chiu, H.T., 2017. 3-D change detection for exposed river-bed area based on UAV images-using Gaoping River as an example, Master Thesis, National Kaohsiung University of Applied Sciences, Taiwan, ROC. (in Chinese)]

胡通哲、賴進松、施上粟、韓仁毓，2017。十文溪橫向構造物改善規劃研究，農業工程學報，63(2)：78-93，DOI：10.29974/JTAE.201706_63(2).0007。[Hu, T.J., Lai, J.S., Shih, S.S., and Han, J.Y., 2017. Check dam implementation and fishways installation in the Shi-Wen River, Journal of Taiwan Agricultural Engineering, 63(2): 78-93, DOI: 10.29974/JTAE.201706_63(2).0007. (in Chinese)]

- 國立臺灣大學生物環境系統工程學系，2001。水文應用設計手冊，經濟部水利署，臺北市。[National Taiwan University, Department of Bioenvironmental Systems Engineering, 2001. Handbook for hydrological design, Water Resources Agency, MOEA, Taipei City. (in Chinese)]
- 張崴、蕭宇伸、張榮傑，2017。UAV 航拍技術應用於河道變遷土砂監測和山區地形製圖之可行性分析，中華水土保持學會，48(1): 1-13, DOI: 10.29417/JCSWC.201703_48(1).0001。[Chang, W., Hsiao, Y.S., and Chang, J.C., 2017. Feasibility analyses of river sediment estimation and mountain mapping by UAV techniques, Journal of Chinese Soil and Water Conservation, 48(1): 1-13, DOI: 10.29417/JCSWC.201703_48(1).0001. (in Chinese)]
- 許心藜、葉信富，2018。臺灣中部流域乾旱特徵之時空變化，作物、環境與生物資訊，15(1): 1-14, DOI: 10.30061/CEB.201803_15(1).0001。[Hsu, H.L., and Yeh, H.F., 2018. Spatiotemporal variation of the drought characteristics in Central Taiwan. Crop, Environment & Bioinformatics, 15(1): 1-14, DOI: 10.30061/CEB.201803_15(1).0001. (in Chinese)]
- 陳彥伶，2017。應用 UAV-LSPIV 系統進行表面流場觀測之初步研究，國立中興大學水土保持學系碩士論文。[Chen, Y.L., 2017. A preliminary investigation of UAV-LSPIV for measuring water surface velocities, Master Thesis, National Chung Hsing University, Taiwan, ROC. (in Chinese)]
- 經濟部水利署，2001。水文設計應用手冊，經濟部水利署，台北市，技術文件編號 GPN/EBN: 1009005924，委辦計畫編號: MOEA/WRB-900019V2。[Water Resources Agency, Ministry of Economic Affairs, 2001. Handbook for Hydrological Design, Water Resources Agency, Ministry of Economic Affairs, Taipei City, Technical Document No. GPN/EBN: 1009005924, Project No. MOEA/WRB-900019V2. (in Chinese)]
- 經濟部水利署第三河川局，2014。大里溪支流旱溪治理規劃檢討水文分析報告(第二次修正版)，經濟部水利署第三河川局，台中市。[Water Resources Agency, MOEA, Third River Management Branch, 2014. Hydrological analysis report on the review of the management plan for the Han River, a tributary of Dali River (second revised edition), Water Resources Agency, MOEA, Third River Management Branch, Taichung City. (in Chinese)]
- 蔡怡真，2017。1961-2015 年間受全球暖化影響下台灣不同季節降雨的變化趨勢，國立中央大學大氣科學學系碩士論文。[Tsai, Y.C., 2017. Trends in seasonal rainfall in Taiwan under the influence of global warming from 1961 to 2015, Master Thesis, National Central University, Taiwan, ROC. (in Chinese)]
- 謝有忠，2016。以多期數值地形資料評估山崩區及河道地形之變遷，國立臺灣大學地質科學研究所博士論文，DOI: 10.6342/NTU201603713。[Hsieh, Y. C., 2016. Evaluation of landslide area and fluvial changes using multi-period digital elevation models, PhD Thesis, National Taiwan University, Taiwan, ROC, DOI: 10.6342/NTU201603713. (in Chinese)]
- 鍾侑達、郭峻菖、陳昶憲，2009。台灣區域降雨趨勢分析，農業工程學報，55(4): 1-18, DOI: 10.29974/JTAE.200912.0001。[Jhong, Y.D., Kuo, C.C., and Chen, C.S., 2009. The temporal variation of regional rainfall characteristics in Taiwan, Journal of Taiwan Agricultural Engineering, 55(4): 1-18, DOI: 10.29974/JTAE.200912.0001. (in Chinese)]

- 簡榮興, 2013。六龜紅水仙地區土石流災害之調查、模擬與重建成效, 國立臺北科技大學土木與防災研究所碩士論文。[Chien, J.S., 2013. Debris flow hazard investigation, simulation, and recovery effectiveness of Hongshueisian Region, Liugui Township, Master Thesis, National Taipei University of Technology, Taiwan, ROC (in Chinese)]
- Akay, S.S., Özcan, O., Şanlı, F. B., Görüm, T., Şen, Ö. L., and Bayram, B., 2020. UAV-based evaluation of morphological changes induced by extreme rainfall events in meandering rivers, *Plos One*, 15(11): e0241293, DOI: 10.1371/journal.pone.0241293.
- Aldrich, J., 2010. Mathematics in the London/Royal Statistical Society 1834-1934, *Electronic Journal for History of Probability and Statistics*, 6: 1-33.
- Alfieri, L., Bisselink, B., Dottori, F., Naumann, G., de Roo, A., Salamon, P., Wyser, K., and Feyen, L., 2017. Global projections of river flood risk in a warmer world, *Earth's Future*, 5(2): 171-182, DOI: 10.1002/2016EF000485.
- Annis, A., Nardi, F., Petroselli, A., Apollonio, C., Arcangeletti, E., Tauro, F., Belli, C., Bianconi, R., and Grimaldi, S., 2020. UAV-DEMs for small-scale flood hazard mapping, *Water*, 12(6): 1717, DOI: 10.3390/w12061717.
- Brown, G., and Sanders, J.W., 1981. Lognormal genesis, *Journal of Applied probability*, 18(2): 542-547, DOI: 10.2307/3213303.
- Dalrymple, T., 1960. Flood-frequency analyses, manual of hydrology: Part 3 (No. 1543-A), U.S. Geological Survey: Washington, DC, USA.
- Duró, G., Crosato, A., Kleinhans, M.G., and Uijttewaal, W.S. 2018. Bank erosion processes measured with UAV-SfM along complex banklines of a straight mid-sized river reach, *Earth Surface Dynamics*, 6(4): 933-953, DOI: 10.5194/esurf-6-933-2018.
- Gumbel, E.J., 1958. *Statistics of extremes*, Columbia University press.
- Haque, U., da Silva, P.F., Devoli, G., Pilz, J., Zhao, B.X., Khaloua, A., Wilopo, W., Andersen, P., Lu, P., Lee, J., Yamamoto, T., Keellings, D., Wu, J.H., and Glass, G.E., 2019. The human cost of global warming: Deadly landslides and their triggers (1995–2014), *Science of the Total Environment*, 682: 673-684, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.03.415.
- Hemmelder, S., Marra, W., Markies, H., and De Jong, S. M., 2018. Monitoring river morphology & bank erosion using UAV imagery—A case study of the river Buëch, Hautes-Alpes, France, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 73: 428-437, DOI: 10.1016/j.jag.2018.07.016.
- Kolmogorov, A., 1933. Sulla determinazione empirica di una legge di distribuzione, *Giornale dell'Istituto Italiano degli Attuari*, 4: 83-91 (In Italian).
- Kuichling, E., 1889. The relation between the rainfall and the discharge of sewers in populous districts, *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 20(1): 1-56, DOI: 10.1061/TACEAT.0000694.
- Laplace, P.S., 1810. *Analytic theory of probabilities*, Paris: Imprimerie Royale, pp.1-8.
- Mishra, S.K., and Singh, V.P., 2013. *Soil conservation service curve number (SCS-CN) methodology* (Vol. 42), Springer Science & Business Media.
- Mourato, S., Fernandez, P., Pereira, L., and Moreira, M., 2017. Improving a DSM obtained by unmanned aerial vehicles for flood modelling, *IOP Conference Series: Earth and Environmental*

- Science, Vol. 95, No. 2, p.022014, IOP Publishing, DOI: 10.1088/1755-1315/95/2/022014.
- Mousavi, M.E., Irish, J.L., Frey, A.E., Olivera, F., and Edge, B.L., 2011. Global warming and hurricanes: The potential impact of hurricane intensification and sea level rise on coastal flooding, *Climatic Change*, 104(3): 575-597, DOI: 10.1007/s10584-009-9790-0.
- Panthou, G., Vischel, T., and Lebel, T., 2014. Recent trends in the regime of extreme rainfall in the Central Sahel, *International Journal of Climatology*, 34(15): 3998-4006, DOI: 10.1002/joc.3984.
- Pearson, K., 1895. X. Contributions to the mathematical theory of evolution.—II. Skew variation in homogeneous material, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London.(A.)*, (186): 343-414, DOI: 10.1098/rsta.1895.0010.
- Pearson, K., 1900. X. On the criterion that a given system of deviations from the probable in the case of a correlated system of variables is such that it can be reasonably supposed to have arisen from random sampling, *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 50(302): 157-175, DOI: 10.1080/14786440009463897.
- Vélez-Nicolás, M., García-López, S., Barbero, L., Ruiz-Ortiz, V., and Sánchez-Bellón, Á., 2021. Applications of Unmanned Aerial Systems (UASs) in hydrology: A review, *Remote Sensing*, 13(7): 1359, DOI: 10.3390/rs13071359.
- Vitousek, P.M., 1994. Beyond global warming: Ecology and global change, *Ecology*, 75(7): 1861-1876, DOI: 10.2307/1941591.
- Wang, R.H., Zhang, S.W., Pu, L.M., Yang, J.C., Yang, C.B., Chen, J., Guan, C., Wang, Q., Chen, D., Fu, B.L., and Sang, X.J., 2016. Gully erosion mapping and monitoring at multiple scales based on multi-source remote sensing data of the Sancha River Catchment, Northeast China, *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 5(11): 200, DOI: 10.3390/ijgi5110200.
- Watanabe, Y., and Kawahara, Y., 2016. UAV photogrammetry for monitoring changes in river topography and vegetation, *Procedia Engineering*, 154: 317-325, DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.482.
- Water Resources Council (US). Hydrology Committee., 1967. A uniform technique for determining flood flow frequencies (No. 15), Water Resources Council: Washington, DC, USA.
- Zandalinas, S.I., Fritschi, F.B., and Mittler, R., 2021. Global warming, climate change, and environmental pollution: Recipe for a multifactorial stress combination disaster, *Trends in Plant Science*, 26(6): 588-599, DOI: 10.1016/j.tplants.2021.02.011.
- Zelenhasic, E.F., 1970. Theoretical probability distributions for flood peaks (Doctoral dissertation, Colorado State University. Libraries).

Combining Hydrological Analysis and UAV Digital Surface Model for Han River Flood Risk Assessment

Ting-Ru Shi ¹ Geng-Gui Wang ² Hui-Ping Tsai ^{3*}

Abstract

The primary contribution of this study lies in the application of UAV-derived digital surface models (DSMs) to refine cross-sectional data for hydrological analysis and flood inundation simulations in the Han River, Taichung City, Taiwan. Based on 104 years of rainfall records from the Taichung Weather Station, the one-day maximum rainfall was estimated using five probability distribution models. Goodness-of-fit tests and error analyses identified the Log-Pearson Type III distribution as the most appropriate. Flood hydrographs were then generated using the triangular unit hydrograph method, which provides a more accurate representation of the hydrological characteristics of the Han River. Flood condition was simulated in HEC-RAS under seven recurrence intervals, with the results indicating overtopping at Section Four of the Han River under the 50- and 100-year recurrence intervals. By integrating UAV-derived DSMs to improve cross-sectional accuracy, this study enhances the precision and reliability of flood simulation outcomes. The findings provide valuable references for river management and flood mitigation planning by water resource authorities.

Keywords: Han River, Hydrological Analysis, UAV, DSM

¹ Master, Department of Civil Engineering, National Chung Hsing University

² PhD Student, Department of Civil Engineering, National Chung Hsing University

³ Associate Professor, Department of Civil Engineering, National Chung Hsing University

* Corresponding Author, E-mail: huiping.tsai@nchu.edu.tw

Received Date: Jun. 30, 2025

Revised Date: Jul. 31, 2025

Accepted Date: Sep. 04, 2025