

## 應用動床模式建構橋墩沖刷模擬分析操作系統

### Using Mobile-Bed Numerical Model on Operational System Development for Bridge Pier Scour Depth

國立臺灣大學  
水工試驗所  
專案計畫  
助理研究員

**李豐佐**

**Fong-Zuo Lee**

國立臺灣大學  
水工試驗所研究員暨  
生物環境系統工程學系  
兼任教授

**賴進松\***

**Jihn-Sung Lai**

國家地震工程研究中心  
研究員

**林詠彬**

**Yung-Bin Lin**

國立臺灣大學  
土木工程學系  
教授

**張國鎮**

**Kuo-Chun Chang**

國家地震工程研究中心  
研究員

**劉小勤**

**Xiaoqin Liu**

國立臺灣大學  
生物環境系統工程學系  
博士候選人

**黃振家**

**Cheng-Chia Huang**

國立臺灣大學  
氣候天氣災害研究中心  
專案計畫助理研究員

**林永峻**

**Yong-Jun Lin**

國立臺北科技大學  
電機工程學系  
副教授

**張正春**

**Cheng-Chun Chang**

國立臺灣大學  
電機工程學系  
教授

**林清富**

**Ching-Fuh Lin**

國立臺灣大學  
電機工程學系  
教授

**王勝德**

**Sheng-De Wang**

#### 摘要

近年來由於極端天氣導致洪災發生頻繁不斷增加，導致河川水文條件、水理輸砂特性、河床坡降及河床沖淤產生劇烈變化，而橋墩幾何形狀及佈置、河道及堤防保護工及水工構造物等為影響河道沖刷與河床穩定性之主要因素，因此如何研發有效而且即時之現地橋墩沖刷深度推估系統為一重要課題。本研究利用介面操作型式，

\*通訊作者，國立臺灣大學水工試驗所研究員暨生物環境系統工程學系兼任教授，10617 台北市大安區羅斯福路 4 段 1 號

整合降雨逕流模式、一維及二維水理輸砂模式，以及橋墩沖刷深度推估公式，建立介面化操作之橋墩沖刷深度推估系統，主要目的為建置符合濁水溪水文水理及輸砂之橋梁橋墩沖刷深度分析模組，進行各項洪水事件之模擬以及推估目標橋梁橋墩附近河床沖淤變動及橋墩沖刷深度估算，因此，本研究利用歷史較完整之降雨量資訊事件檢定驗證降雨逕流模式、利用最新颱風豪雨事件及底床測量資料驗證一維及二維水理輸砂模式，並且比較多種局部沖刷公式適用之橋梁橋墩，建置易於操作且具整合性之介面系統，未來可提供使用者透過介面輸出入的方式，檢定驗證模式之準確性，除此之外，未來若可銜接中央氣象局或是臺灣颱風洪水研究中心之雨量預報，以及中央氣象局逐時潮位預報資料，則本系統即可提供橋墩沖刷預報資訊，因此除了可提供颱風豪雨過後橋樑是否安全及何時通行提供重要參考資訊外，對於預報橋樑橋墩於颱風豪雨時之沖刷行為亦為未來重要參考依據來源之一。

**關鍵詞：**橋墩，降雨逕流模式，水理輸砂模式，沖刷深度推估公式，介面系統。

### ABSTRACT

Due to the extreme weather, flood disasters occur frequently in recent years. It induces the changing of hydrological condition, flow and sediment transport mechanics, river bed slope, river bed degradation and river bed aggradation. However, bridge pier geometry and disposition, bank and river channel protection, and hydraulic works are the main factors affecting the erosional depth and river bed stabilization. Therefore, it is a vital issue to develop a system that can provide valuable and useful information for the estimation of bridge pier scour depth. This study apply interface operation system to develop and integrate rainfall runoff model, 1-D and 2-D hydraulic and sediment transport model, and calculation formulas of bridge pier scour depth. The purpose of this study is to develop an estimation system of bridge pier scour depth that is suitable for the hydraulic pattern simulation and sediment transport routing in the Zhuoshui River Basin. Numerical simulation models combined with interface operation on assessment system development of specific bridge pier scour depth is established. Therefore, it can be implemented to simulate the general scour and local scour depth at bridge piers. In this study, the historical events are adapted to calibrate and verify models that include rainfall runoff model, 1-D and 2-D hydraulic and sediment transport model, and calculation formulas of bridge pier scour depth. In addition, easy operation and integrated interface is developed in the system for the estimation of bridge pier scour depth. The system can supplies users for model verification by input and output through the interface. To achieve the forecast of the erosional depth on the bridge piers in the ZhuoShui River, the system can also be connected to the rainfall forecast system of Taiwan Typhoon and Flood Research Institute (TTFRI) and the tidal forecast of Central Weather Bureau (CWB) in the future. Additionally, the results can be provided references for the management unit of bridges, such as estimating the risk of bridge piers damage and the necessity of bridge closure.

**Keywords:** bridge pier, rainfall runoff model, hydraulic and sediment transport model, formulas of bridge pier scour depth, interface system.

## 一、前言

近年來由於全球氣候異常，水文極端現象明顯，受災範圍與程度均遠較過去為烈，自然災害的發生正朝大規模化、高頻率化以及複合化方向發展，導致區域降雨強度有逐漸增高的趨勢，根據聯合國減災策略組織(UNISDR)之統計資料(林詠彬，2017)，自 2000 年以來，自然災害造成的直接損失高達 2.5 兆美元，並造成全球 1 百多萬人死亡，另外，聯合國發展計畫署(UNDP)指出，若能夠投資 1 元的防災，可減少 4-7 元的損失，根據歐洲研究團隊 2014 年三月刊登在 Nature Climate Change 期刊指出，因為氣候變遷引起的大量降雨，歐洲因為水災問題，預估到 2050 年洪患災情損失將從 45 億歐元(約台幣 1872 億元)，大幅提升到 230 億歐元(約台幣 9570 億元)，成長幅度高達 5 倍。台灣亦無例外，暴露在多重災害中的面積與人口，台灣排名世界第一，台灣平均每年地震與颱風造成之天然災害損失約為 350 億，根據聯合國發展計畫署(UNDP)之資料，有防災計畫者，其平均損失幅度為無防災計畫者之 5%，因此，藉由強化防災之監測預警，保守估計可降低國內約 30%天然災害損失，亦即約降低 100 億/年之經濟損失(財團法人國家實驗研究院，2017)。由於臺灣位處經常遭遇梅雨、夏季午後對流性雷陣雨、颱風以及東北季風等不同的降雨系統的區域，使得臺灣雨量豐沛、全年平均雨量可達 2,500 公釐，而且台灣地區地形陡峻、降雨強度集中，每年侵襲颱風平均約 3.5 次，豪大雨數十次，平均年損失約 128 億元以上，再加上臺灣本島特殊的地形條件，河川坡陡流急，跨河橋梁基礎結構普遍存在自然沖刷現象，近十年來，臺灣跨河橋梁因颱風、強風、豪雨及地震等天然災害造成多處省縣道公路之橋梁受損阻斷，公路總局轄管橋梁 2800 餘座，所經 33 個重要流域範圍。民國 98 年 8 月莫拉克颱風期間，更造成中、南部地區省道橋梁 52 座沖毀之災情，嚴重影響人民行的安全。橋梁基礎即時沖刷深度，是評估現地橋梁結構穩定性的重要指標，在有限的工程建置及管理維護資源限制下，如何藉由掌握現地橋

梁基礎沖刷資訊，探討跨河橋梁於可能最大沖刷深度發生時的使用狀態安全性，並結合高科技沖刷深度設備建立橋梁健康預警機制，俾利管理單位為災害發生前之預防、準備、反應等採取極積作為，提供相關橋梁權責管理單位應變參考，是自然災害防治重要的研究課題之一。

此外，依據「雄才大略 2.0 版」計畫(財團法人國家實驗研究院，2017)鼓勵各部會研究法人能與學研機構及產業結盟，透過緊密合作解決業界需求，縮短產學落差。以及行政院災害防救應用科技方案第五課題「地震災害防治科技」以及第六課題「基礎設施評估與監測」，將進行地震及颱風等災害監測與預警技術研發，可見災害預警技術之研發與提升已是刻不容緩的議題，而根據民國 76~94 年間濁水溪下游河道因人為採砂活動頻繁，再加上歷經民國 83 年道格、85 年賀伯、87 年瑞伯、90 年桃芝及納莉、93 年敏督利與艾利、94 年海棠等多次重大颱風沖刷，自集集攔河堰、名竹大橋上游約 3 公里處之社寮堤防段(濁斷 111)以下河段，已有明顯河床沖刷情形及流路橫向擺動變遷，造成河床大幅下降及主河道深槽化，進而導致河防構造物沖刷災害及橋梁基礎嚴重裸露情況。因此本研究擬以橋墩沖刷為主要課題，整合既有災害預警模式，以介面操作型式建立橋墩沖刷推估系統，且以濁水溪集集攔河堰以下河道為研究區域。

## 二、研究區域及目標橋梁

濁水溪長約 186.6 公里，為台灣地區最長河川，流域面積約 3,157 平方公里，僅次於高屏溪流域，河道之平均坡降為 1/190，為台灣較陡急流河川之一，而本研究應用數值模擬及運算介面建立橋墩沖刷推估系統中，選定名竹大橋 P4 及自強大橋 P8 為主要目標橋梁與橋墩，研究區域及模式銜接分佈圖如圖 1 所示。

其中名竹大橋河段河道之平均坡降則為 0.68，濁水溪 100 年重現期之洪峰流量為 24,000 立方米/秒。本研究之區域位於濁水溪省道台 3 名竹大橋，省道台 3 線名竹大橋位於台 3 線里程 225 K + 116 M 處(如圖 1 所示)，為橫跨濁水溪、

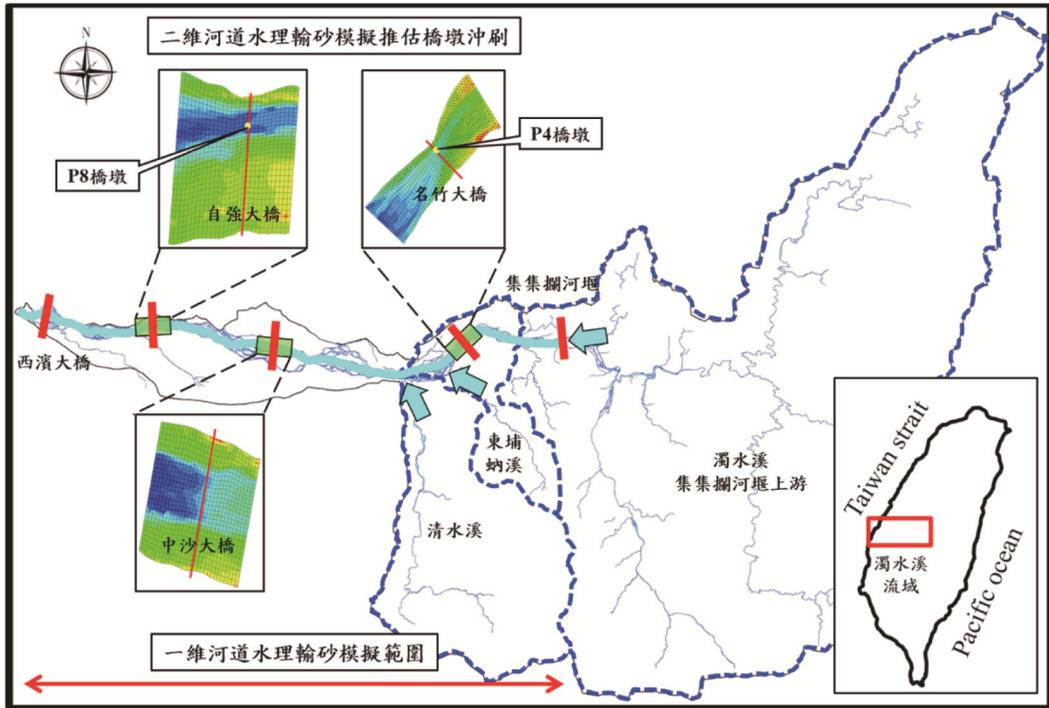


圖 1 研究區域及模式銜接分佈圖。

連接南投縣名間鄉與竹山鎮間之重要交通橋梁，其上游側有集集攔河堰、下游側有國道 3 號高速公路濁水溪橋，名竹大橋位於濁水溪集集攔河堰下游約 5.5 公里處，於民國 50 年興建完成(當時稱為南雲大橋)，民國 67 年竹山鎮由雲林縣改隸南投縣，遂改名為名竹大橋。因應逐漸增加之交通量，於民國 78 年拓寬完成，全長約 715 公尺、寬 18 公尺，為 PCI 橋梁結構；民國 89 年九二一集集大地震中因車籠埔斷層經過，斷層剛好從本橋竹山端 P23-P24 橋墩間經過，造成竹山端斷落 175 公尺交通中斷，復建方案採施工簡易快速之多跨連續 I 型鋼梁橋及浪形鋼板配合 RC 橋面版系統，並於民國 89 年 12 月竣工。然因颱風洪水侵襲等因素，橋梁橋址附近河道冲刷加劇，河床持續下降，舊橋沉箱基礎已有相當程度裸露，深槽區之最大裸露深度達約 6 m(沉箱約 15 m)，已達臨界需進行基礎加固補強之狀態，原橋跨徑僅 25 m，沉箱直徑則為 5.6 m，阻水面積比較高，河道束縮嚴重，恐加劇冲刷效應，急需改善，故

納入省道老舊受損橋梁緊急改建計畫辦理改建，改建工程於 99 年 12 月 27 日竣工，原有舊橋橋墩有二十三座，新橋只有十二座，橋墩間的跨距已從原先二十五公尺擴展到四十五至七十五公尺不等，以利排水，並透過「覆土深」工法包裹橋墩、打入河床基礎約三十五公尺深，可望大幅改善以往遭河水冲刷橋墩易裸露問題，提供民眾更安全的交通環境與空間。名竹大橋之河道主深槽主要為橋墩編號 P3 與 P5 之間，而名竹大橋及集集攔河堰以下第一座橋樑，河道及橋墩冲刷顯著。此外，國家地震工程研究中心於 2015 年在名竹大橋 P4 橋墩床面以下，安裝具備加速計訊號之橋墩冲刷監測儀器金屬球，且自高程 146.5 m 起每 50 公分裝置一顆金屬球，每顆金屬球都由網路線連接到 POE 網路供電設備，接收到即時訊號後再傳輸至國網中心，總安裝深度為 4 m，共 8 顆橋墩冲刷監測儀器，而本研究所推估之名竹大橋橋墩冲刷深度即與此監測值進行比較。

而自強大橋位於台 19 線，為橫跨濁水溪、

連接雲林縣二崙鄉與彰化縣竹塘鄉間之重要交通橋梁，其上游側有西螺大橋和溪洲大橋、下游側有西濱大橋和濁水溪河口，自強大橋位於濁水溪集集攔河堰下游約 42.3 公里處，全長約 2760 公尺、寬 14 公尺，於民國 68 年興建完成，民國 85 年賀伯颱風造成自強大橋橋墩橋基破壞，橋墩裸露達 6.3~9.3 公尺，一度封橋交通路線緊急維修。為增強自強大橋橋梁通行安全性，公路總局西部濱海公路中區工程處辦理「台 19 線自強大橋改建工程」，進行北端 1110 公尺改建，橋樑上部結構採全寬 15 公尺雙向四車道，施工期間採全橋封閉方式施工，於民國 91 年 6 月開工和民國 93 年 9 月竣工，橋梁復行開通。此外，國家地震工程研究中心於 2015 年在自強大橋 P8 橋墩床面以下，亦安裝具備加速計訊號之橋墩沖刷監測儀器金屬球，且自高程 11.25 m 起每 50 公分裝置一顆金屬球，每顆金屬球都由網路線連接到 POE 網路供電設備，接收到即時訊號後再傳輸至國網中心，總安裝深度為 5 m，共 10 顆橋墩沖刷監測儀器，而本研究推估之自強大橋橋墩沖刷深度即與此監測值進行比較。

### 三、數值模式

關於濁水溪橋墩沖刷深度推估自 2012 年起，國家地震工程研究中心(2012)即開始進行橋梁檢測系統建置及橋墩沖刷相關研究，除數值模擬分析橋梁水理以外，也建置現場沖刷感測設備及試驗室之橋墩沖刷水工模型，以二維數值模式推估橋樑最大沖刷深度，並藉由理論推估試驗室橋墩沖刷深度與現場觀測資料進行比較，達到先期預警系統總沖刷深度之預測推估，然而，在現場所獲得的觀測數據仍然極為有限，此因洪水期間現場觀測之水理條件十分複雜且危險，觀測儀器設備又易遭受破壞。Guo *et al.* (2013)則利用降雨資料搭配一維及二維河道水理輸砂之計算，推估 200 年重現期流量對於濁水溪溪洲大橋的橋墩沖刷深度，但缺乏現地案例及沖刷深度監測的佐證資料。Hong (2014)以濁水溪為研究區域，發現 Shen *et al.* (1966)、Jain and Fischer (1980)公式所獲得之沖刷深往往會有高估情形，但文章中未針

對現場實測沖刷與模擬沖刷深度做深入討論，此外 Hong *et al.* (2014)亦進行濁水溪名竹大橋於蘇力颱風期間之橋墩沖刷模擬與觀測研究，除進行河道一般沖刷及橋墩沖刷之觀測及模擬外，亦增加束縮沖刷之觀測與模擬。郭與洪 (2015)指出在數值模擬研究方面，雖然橋墩沖刷之三維計算模式能夠同時解析橋墩之沖刷深度與沖刷範圍 (Yen *et al.*, 2001; Nagata *et al.*, 2005; Roulund *et al.*, 2005)，但現階段僅能模擬定量流均勻沈澱條件下之橋墩沖刷現象，與現場颱風期間變量流非均勻泥砂運移之河床變動情況，仍有所差異，因此利用二維動床模式及橋墩局部沖刷變量流沖刷演算法，發展物理型計算模式，並模擬濁水溪名竹大橋附近河段於颱風期間河道一般沖刷、束縮沖刷及橋墩局部沖刷之完整沖刷歷程。Guo *et al.* (2017)則利用簡易彎道沖刷公式，搭配平面二維水理模擬結果，探討濁水溪因洪水及彎道地形所導致堤防基腳周圍之沖刷問題。

根據上述文獻可知，演算濁水溪橋墩沖刷之數值模式以一維及二維為主，因此，本研究首先利用降雨逕流模式進行一維數值模擬上游流量邊界(包含本流與側入流)之計算，並透過流量與輸砂量關係式獲得入流泥砂量，以及利用實測之水位資料提供數值模擬下游邊界條件，接著利用一維水理輸砂模式計算集集攔河堰至下游邊界間之水理與輸砂數值，再提供予二維水理輸砂模式進行目標橋墩(本研究為名竹大橋及自強大橋橋墩)上下游約 1 km 範圍內之水理與輸砂模擬，最後透過橋墩沖刷公式計算橋墩沖刷深度，建立數值模擬濁水溪橋墩沖刷深度推估系統之模式應用。

#### 3.1 降雨逕流模式

在降雨逕流模式的發展上，Sherman (1932)首先提出單位歷線理論，以集水區脈衝反應函數之線性疊加的方式，推算集水區之流出歷線。Lee and Yen (1997)為避免早期地貌瞬時單位歷線模式需藉水文紀錄檢定模式參數之缺陷，乃應用運動波理論以解析方式，直接求解逕流運行時間。Lee and Chang (2005)則更進一步發展涵蓋地表

逕流與地表下逕流之架構，推導能考慮部分集水面積效應之運動波—地貌瞬時單位歷線。吳(2015)則應用特性類比流域極短期雨量推估技術整合雨量預估資訊，預估流域未來時雨量，作為運動波—地貌瞬時單位歷線之模式輸入，再配合流量趨勢校正法改善逕流預報之精度。而本研究採用之降雨逕流模式為半分布並聯型線性水庫逕流預報模式，根據 1957 年 Nash (1957)之研究結果指出，一個集水區可視為  $n$  個線性水庫所串聯，每一個線性水庫具有相當之蓄水常數  $K$  (Hsieh and Wang, 1999)。模式中可將每一流路中之各核胞之漫地流與河渠流視為不同之狀態(state)；且將每一流路比擬為由數個不同狀態所串聯而成，而每一狀態則係利用一線性水庫予以比擬。因此，每一流路之反應是由數個不同線性水庫串聯之結果，而該集水區出口處之反應乃是由所有流路之反應並聯線性疊加而成。模式中之蓄水常數  $K_{Om}$  或  $K_{Sm}$ ，其實際物理意義係為洪水波峰流經所需之時間，亦即集流時間，因此其具有時間之因次。根據學者研究結果指出，集流時間係受到流域之逕流長度、逕流坡度、糙度係數、降雨強度及其他因素所支配；基於此，本研究以 V 型漫地流模型(Hsieh and Wang, 1999)分別代表每一子集水區，由此可知，只要求得各條流路之地文參數及降雨強度，則各狀態之逕流時間即可加以推求，且模式中待估參數只有漫地流平均粗糙係數  $N_0$  與河渠之平均糙度係數  $N_c$  兩個，為探討模式於研究集水區之合適性，本研究分別以效率係數(Coefficient of Efficiency)、峰值誤差(Error of Peak Discharge)及峰值到達時刻誤差(Error of Time to Peak)等三項標準予以校正，使能客觀的評估研擬模式之合適性。

### 3.2 一維水理輸砂模式

本研究一維水理輸砂數值模式主要採用 SRH-1D(Sedimentation and River Hydraulics – 1D) 模式(SRH-1D, 2009)，SRH-1D 模式為美國墾務局所發展之一維水理輸砂模式，係由水規所(2009)委請美國墾務局針對臺灣大甲溪及濁水溪所研發之模式，模式發展迄今已成功應用於國內外許

多實際河川問題之模擬。本模式適用於天然渠道與人為渠道之水理模擬。本模式具有設定模擬穩態流或是非穩態流中有關移動內邊界條件、循環水系、黏滯性、側向入流或是非黏滯性泥沙的傳輸。SRH-1D 為一維水理輸砂模式，可模擬河道、渠道中具有移動邊界或是無移動邊界的流體。SRH-1D 在輸砂演算方面，除了滿足輸砂連續方程式，亦提供不同輸砂公式選擇，先進行水理計算，求得河川斷面相關的水理參數資料，再進行各斷面的輸砂演算，由輸砂公式計算各斷面之輸砂量，然後依據輸砂連續方程式推求各斷面之沖刷或淤積，最後由最小總河川功率法求得各斷面的沖刷或淤積斷面與深度。因此，SRH-1D 可用來模擬和預測凝聚性泥沙沉澱和非凝聚性泥沙沉澱的傳輸，適用於河床型態上的變化預測及人為影響的渠道水理模擬。

### 3.3 二維水理輸砂模式

本研究二維水理輸砂數值模式主要採用 SRH-2D (Sedimentation and River Hydraulics – 2D) 模式(SRH-2D, 2008)，SRH-2D 模式同樣為美國墾務局所發展之二維水理輸砂模式，且同樣係由水規所(2009)委請美國墾務局針對臺灣大甲溪及濁水溪所研發之模式，該模式係由流域模型 SRH-W 演進而來，SRH-2D 專注於河系統的 2D 建模並由 SRH-W 改進許多特性，SRH-2D 能處理二維動態的波動方程式，即水深方向平均的 Venant 方程式，就建模能力而言 SRH-2D 可以與很多現有的模型結合，例如 RMA-2(美軍工兵團 1996)以及 MIKE21(DHI 軟體 1996)，SRH-2D 在格網的要求上相當有彈性，結構網格、非結構網格及混合網格皆可使用。SRH-2D 常見的適用範圍包含主流運算及側向支流運算、水庫流況計算、洪水溢淹圖繪製及水工結構物附近之水理計算。

### 3.4 橋墩沖刷公式

橋墩周圍最大沖刷深可視為一般沖刷、局部沖刷、束縮沖刷、彎道沖刷與之和。而一般沖刷主要源自於懸移質與推移質之河床粒料傳輸，而

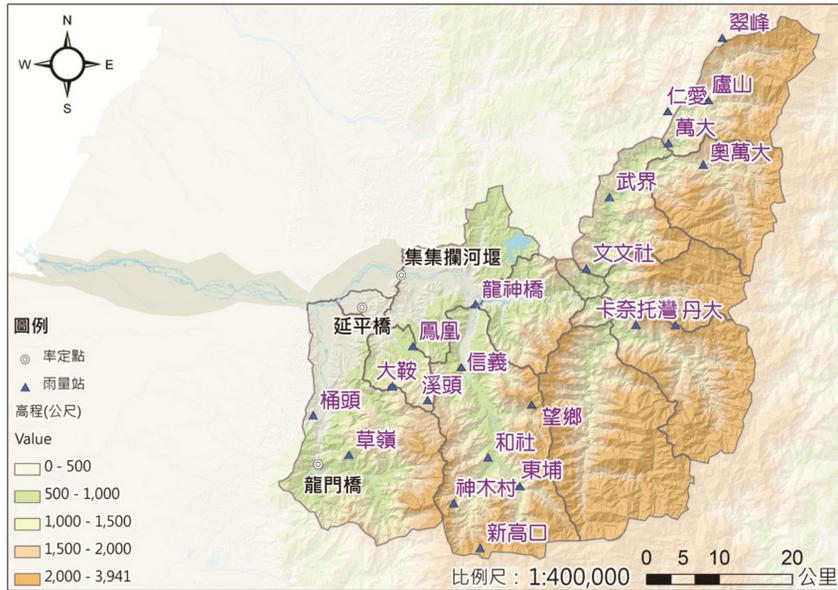


圖 2 降雨逕流分區及雨量站分佈圖。

Parker 公式(1990)較適合使用於由粗粒料與細粒料所共同組成之河川，因此本研究一般沖刷計算則採用 Parker 之推移質公式(1990)，進行一維及二維水理動床模擬以及一般沖刷深度之計算。當水流經橋墩附近由於橋墩阻礙造成流況改變，並且引起流速或底床剪應力增加，導致在水流經過橋墩周圍時造成範圍較小之局部沖刷，其原因在於橋墩受三維流體作用力如重力、衝擊力及下向流等之沖擊所造成的結果，以致於流場相形複雜，其複雜性隨局部沖刷坑馬蹄形渦流的發展而加劇，然三維數值模擬費時且缺乏實測數據資料可供驗證，因此本研究局部沖刷深度之推估，擬採用 SRH-2D 水理輸砂模擬所計算之水理參數進行推估，而本研究採用之局部沖刷公式分別為 Froehlich (1991)、Shen *et al.* (1966)公式、Neill (1964)公式、Inglis (1949)公式及 Jain and Fischer (1980)公式等五種較為常用局部沖刷經驗公式進行互相比較分析，優選濁水溪各橋梁較為適合之局部沖刷公式。此外，本研究區域之橋墩(名竹大橋及自強大橋)間距遠大於橋墩直徑，且模擬網格並無考量橋墩之影響，因此本研究無考慮束縮沖刷，然 SRH-2D 動床數模在建模時考慮河道邊界

幾何形狀，應此具備彎道沖刷效應之水理特性，簡言之本研究總沖刷深度為一般沖刷及局部沖刷之和。

## 四、模式檢定驗證

### 4.1 降雨逕流模式檢定驗證

本研究所採用之降雨逕流模式以歷史降雨事件進行模式檢定驗證，並以同一降雨事件之實測流量作為驗證依據，集集攔河堰至西濱大橋河段除了集集攔河堰具備入流量觀測資料外，亦包含東埔蚋溪(延平橋水位流量站)及清水溪(龍門橋水位流量站)兩條側入流，然清水溪與濁水溪本流交界處至西濱大橋間集水面積有限，因此本研究忽略此一河段之集水流量，故本研究降雨逕流模式檢定驗證係針對集集攔河堰、延平橋及龍門橋進行模擬分析，而檢定驗證之雨量站主要以中央氣象局及水利署為主，所採用之降雨逕流分區共計 13 區及雨量站共計 21 個如圖 2 中所示，然並非所有事件之雨量站資料皆具有完整之數據，因此集集攔河堰選定 2013 年蘇力颱風及 2013 年潭美颱風、延平橋選定 2013 年康芮颱風及 2013 年潭美颱風、龍門橋選定 2013 年蘇力颱風及 0519

表 1 降雨逕流模式參數檢定

| 參數    | 集集攔河堰(濁水溪本流) | 延平橋(東埔蚋溪) | 龍門橋(清水溪) |
|-------|--------------|-----------|----------|
| $N_0$ | 0.02         | 0.05      | 0.02     |
| $N_c$ | 0.24         | 0.30      | 0.36     |

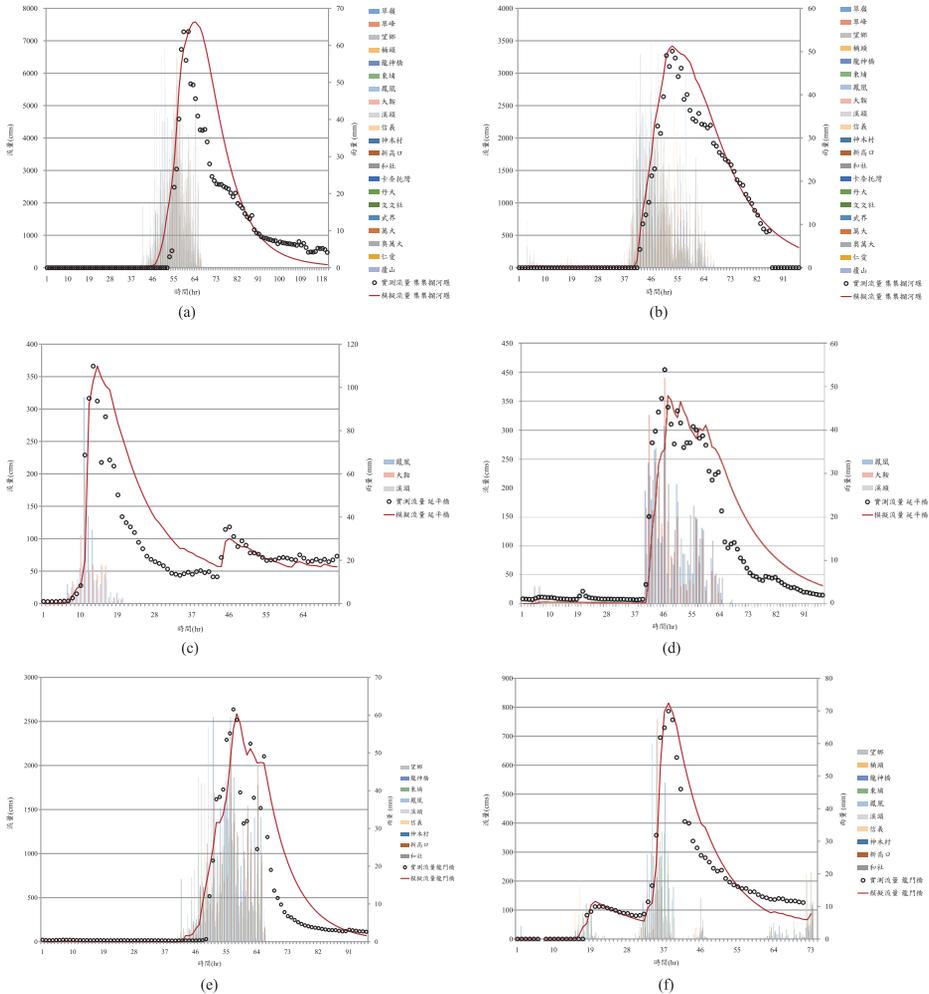
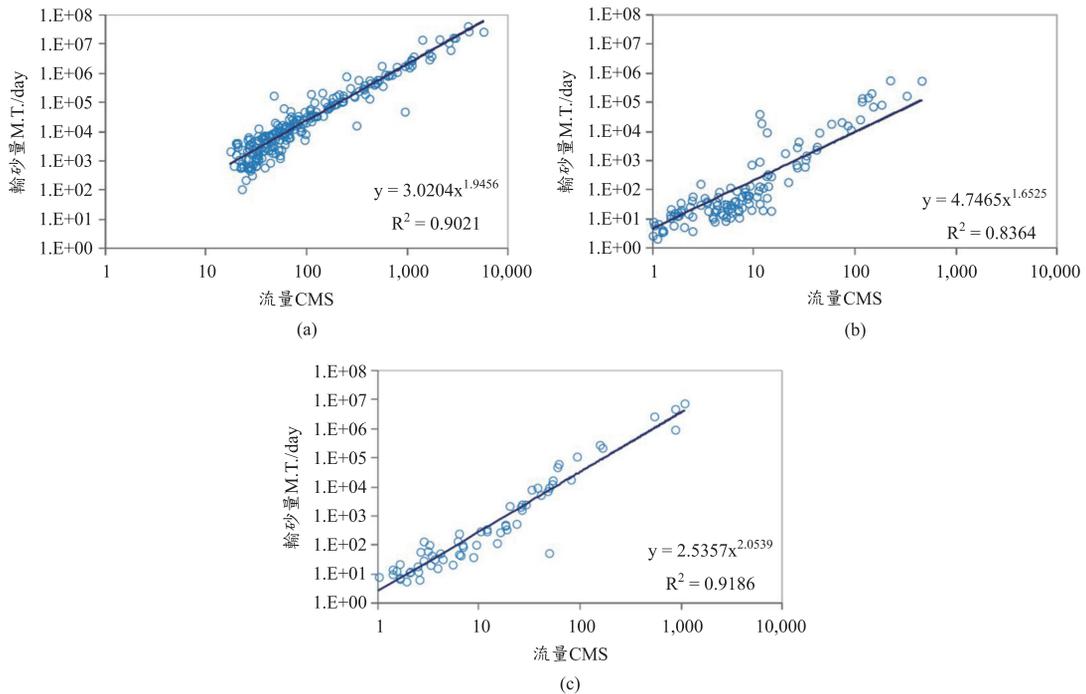


圖 3 降雨逕流檢定驗證：(a)集集攔河堰 2013 年蘇力颱風；(b)集集攔河堰 2013 年潭美颱風；(c)延平橋 2013 年康芮颱風；(d)延平橋 2013 年潭美颱風；(e)龍門橋 2013 年蘇力颱風；(f)龍門橋 2013 年 0519 豪雨。

豪雨事件分別進行模式檢定驗證，並分析模擬值與實測資料之誤差量，以及模擬流量之歷程變化趨勢是否相符。由檢定驗證結果可知，集集攔河堰檢定驗證結果效率係數小於 0.67、峰值誤差小於  $16.71 \text{ m}^3/\text{s}$ 、峰時誤差小於 4 hr、參數  $N_0$  為 0.02、參數  $N_c$  為 0.24；延平橋檢定驗證結果效率係數

小於 0.82、峰值誤差小於  $11.09 \text{ m}^3/\text{s}$ 、峰時誤差小於 1 hr、參數  $N_0$  為 0.05、參數  $N_c$  為 0.30；龍門橋檢定驗證結果效率係數小於 0.81、峰值誤差小於  $12.36 \text{ m}^3/\text{s}$ 、峰時誤差小於 1 hr、參數  $N_0$  為 0.02、參數  $N_c$  為 0.36(如表 1 中所列)。而圖 3 則為模擬與實測值之逐時流量比較圖，由圖上可知



資料來源：水利規劃試驗所(2013)

圖 4 流量與輸砂量相關性(a)玉峰橋(b)延平橋(c)龍門橋。

模式能適切反映其流量漲退情形，因此可作為一維水理輸砂模式上游及側支流邊界條件使用。

#### 4.2 一維及二維水理輸砂模式檢定驗證

本研究檢定驗證之一維水理輸砂模式模擬範圍為集集攔河堰至西濱大橋，採用集集攔河堰之放流量及懸浮質泥砂濃度資料作為上游邊界條件，西濱大橋亦採用實測水位作為下游邊界條件，而此河段的東埔蚋溪及清水溪側入流量則採用半分布並聯型線性水庫逕流預報模式進行推估，而圖 4 顯示玉峰大橋、延平橋及龍門橋流量與懸浮質輸砂量關係，因此東埔蚋溪及清水溪側入流砂量則分別以延平橋及龍門橋流量及懸浮質泥砂濃度率定曲線推估[賴進松等，2017]，而玉峰大橋之流量與懸浮質輸砂量關係則可用於集集攔河堰預報；而河床載泥砂量則利用 Parker 公式(1990)進行推估(水規所，2012)。針對一維及二維模式銜接，則一維水理輸砂模式所計算而得

之名竹大橋、中沙大橋及自強大橋上游約 1 公里處之流量與輸砂量以及下游約 1 公里處之水位，提供二維水理輸砂模式邊界條件，利用二維水理輸砂模式進行水理演算及一般沖刷計算，並提供所演算之水理條件進行局部沖刷計算，以及橋墩總沖刷深度之計算，一維及二維水理輸砂模式地形斷面則採用民國 100 年實測地形，此外，根據國家地震工程研究中心(2012)所收集之濁水溪集集攔河堰以下至河口之河床質粒徑調查(如表 2 所列)，設定一維及二維水理輸砂模式所需之粒徑組成，其中名竹大橋位置約為斷面 106，其平均粒徑  $d_{50}$  約為 181 mm 至 235 mm 之間，而自強大橋位置約為斷面 36，其平均粒徑  $d_{50}$  約為 0.395 mm 至 0.405 mm 之間，且從斷面 58 之後平均粒徑有明顯的變化，推測係由於國道 1 號全斷面固床工之設置所導致，另採用水規所(2012)「台美合作案之技術引進及應用研究」之研究結果，將河道曼寧  $n$  值於斷面 1~斷面 49 間設定為 0.015；

表 2 濁水溪河床質粒徑組成

| 斷面代表   | 粒徑別(mm)         |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                |
|--------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|
|        | d <sub>10</sub> | d <sub>20</sub> | d <sub>30</sub> | d <sub>40</sub> | d <sub>50</sub> | d <sub>65</sub> | d <sub>75</sub> | d <sub>90</sub> | d <sub>m</sub> |
| 濁斷 004 | 0.089           | 0.110           | 0.130           | 0.151           | 0.186           | 0.238           | 0.272           | 0.429           | 0.210          |
| 濁斷 012 | 0.110           | 0.163           | 0.230           | 0.297           | 0.348           | 0.425           | 0.475           | 0.552           | 0.319          |
| 濁斷 020 | 0.132           | 0.212           | 0.298           | 0.342           | 0.386           | 0.452           | 0.495           | 0.561           | 0.350          |
| 濁斷 026 | 0.164           | 0.280           | 0.335           | 0.377           | 0.419           | 0.482           | 0.524           | 0.587           | 0.400          |
| 濁斷 033 | 0.205           | 0.316           | 0.353           | 0.389           | 0.426           | 0.482           | 0.518           | 0.574           | 0.395          |
| 濁斷 039 | 0.136           | 0.202           | 0.267           | 0.328           | 0.384           | 0.468           | 0.525           | 0.695           | 0.409          |
| 濁斷 045 | 0.168           | 0.313           | 0.366           | 0.419           | 0.472           | 0.552           | 0.623           | 1.032           | 0.569          |
| 濁斷 052 | 0.101           | 0.140           | 0.195           | 0.257           | 0.322           | 0.435           | 0.510           | 0.760           | 0.381          |
| 濁斷 058 | 0.108           | 0.155           | 0.256           | 0.343           | 0.417           | 0.529           | 0.616           | 1.095           | 0.554          |
| 濁斷 064 | 0.171           | 0.337           | 0.500           | 0.676           | 0.875           | 1.17            | 2.20            | 13.40           | 3.099          |
| 濁斷 071 | 0.54            | 3.94            | 15.32           | 26.36           | 38.46           | 71.20           | 145.77          | 230.49          | 80.39          |
| 濁斷 077 | 2.04            | 16.83           | 34.94           | 58.13           | 91.16           | 181.05          | 247.01          | 422.73          | 152.09         |
| 濁斷 083 | 0.39            | 1.09            | 5.34            | 20.34           | 37.08           | 60.43           | 75.94           | 159.25          | 52.85          |
| 濁斷 089 | 0.19            | 0.34            | 0.46            | 0.58            | 0.88            | 2.27            | 19.84           | 73.00           | 21.10          |
| 濁斷 095 | 0.25            | 0.85            | 3.03            | 9.39            | 42.67           | 111.92          | 169.26          | 264.80          | 90.96          |
| 濁斷 104 | 0.96            | 5.97            | 30.71           | 65.23           | 137.50          | 210.81          | 277.64          | 520.18          | 181.36         |
| 濁斷 109 | 2.54            | 9.13            | 36.39           | 139.01          | 209.23          | 350.99          | 425.52          | 536.36          | 235.01         |
| 濁斷 117 | 1.25            | 3.25            | 6.35            | 10.85           | 15.88           | 25.48           | 32.91           | 64.72           | 25.16          |

資料來源：國家地震工程研究中心(2012)。

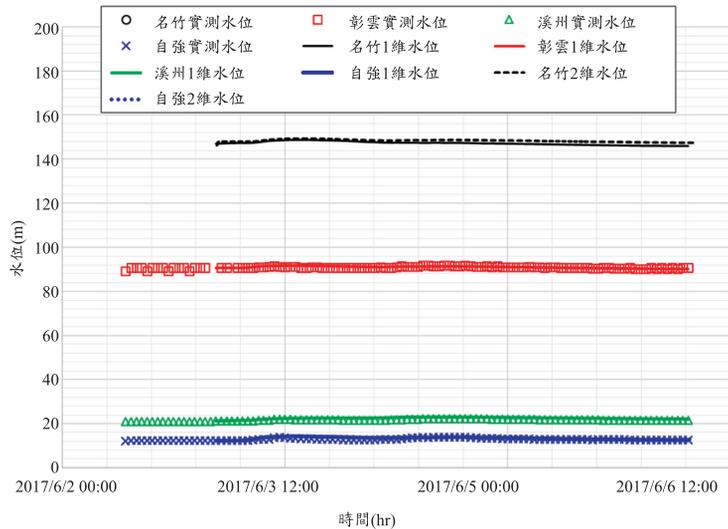


圖 5 2017 年 6 月豪雨事件一維及二維模式檢定成果。

斷面 50~斷面 55 間設定為 0.022；斷面 56~斷面 86 間設定為 0.025；斷面 87~斷面 105 間設定為 0.035；斷面 106~斷面 117 間設定為 0.037，然集

集堰至名竹大橋間雖部份為岩床冲刷河段，但本研究並無考慮此一條件。

圖 4 及圖 5 分別為 2017 年 6 月豪雨事件及

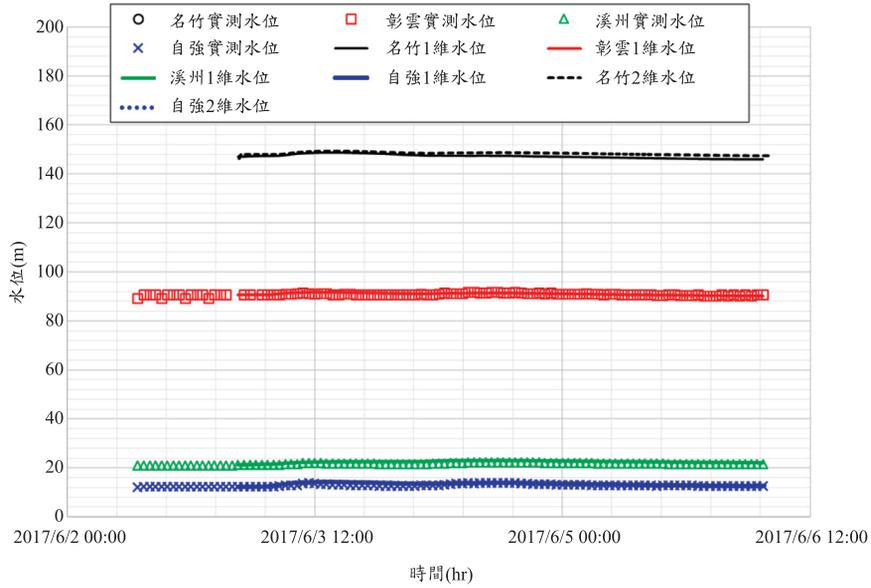


圖 6 2017 年尼莎及海棠颱風一維及二維模式驗證成果。

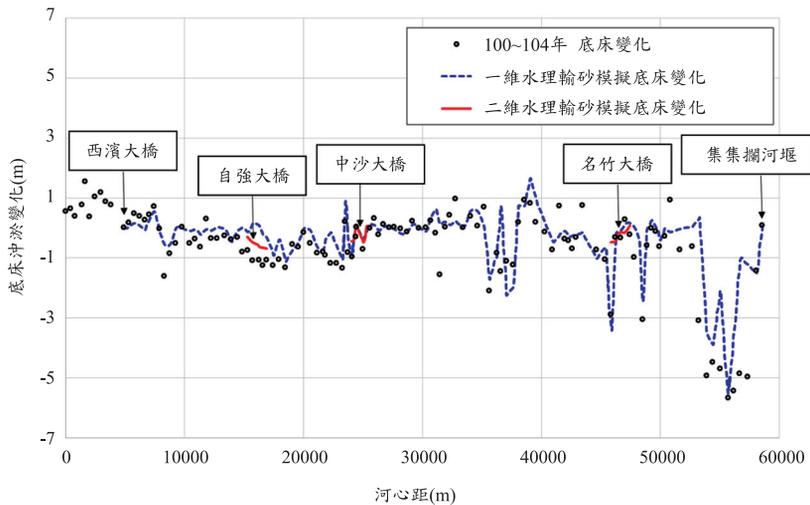


圖 7 一維及二維水理動床數值模式底床沖淤模擬驗證。

尼莎暨海棠颱風事件，各重要橋梁(名竹、彭雲、溪州、自強大橋)模擬水位比較圖，圖中一維模擬水位成果包括名竹、彭雲、溪州及自強大橋，二維模擬水位成果包括名竹大橋及自強大橋，而中沙大橋由於缺乏水位觀測資料，因此僅比較其底床沖淤之變化。一維及二維模式於 6 月豪雨事件期間之模擬水位，將其與實測水位進行比較可知

平均誤差介於 0.25 至 0.75 m 之間；一維及二維模式於尼莎暨海棠颱風期間之模擬水位，將其與實測水位進行比較可知平均誤差介於 0.15 至 0.55 m 之間；一維及二維模式於歷史事件案例模擬結果表現，其水位漲退之趨勢與實測值相符，因此可判斷模式具備一定程度之準確性，而圖 6 則為利用一維及二維水理輸砂模式模擬 100 年至 104

年底床變化之成果，由模擬結果可知一維及二維水理輸砂模式可適當模擬底床變動趨勢及量值，且名竹大橋、中沙大橋及自強大橋河段之沖刷趨勢亦能適當掌握其變化，由上述檢定驗證完成之二維水理輸砂模式及其演算之水理條件，即可利用局部沖刷公式進行局部沖刷計算，並與二維水理輸砂模式所演算之一般沖刷深度加總進行橋墩總沖刷深度之推估，且與實測橋墩總沖刷深度進行比較。

### 4.3 橋墩沖刷公式應用

因洪水期間現場觀測之水理條件十分複雜且危險，觀測儀器設備容易遭受破壞，因此橋墩沖刷深度之監測數據十分難以量測，Lu *et al.* (2008)曾針對橋墩沖刷之現場觀測儀器及方法進行回顧與分析，郭與洪(2015)則指出磁性滑動環 (Sliding Magnetic Collar, SMC)，重力式鋼棒(Steel Rod)及編碼之建築用磚塊(沖刷磚)係為造價相對便宜之沖刷觀測儀器，其中磁性滑動環及重力式鋼棒僅可觀測沖刷過程，但無法觀測底床回淤現象，因此本研究採用國家地震工程研究中心(林等, 2016)所觀測數據，其技術係把橋墩沖刷監測儀器裝設於金屬球中，再把金屬球鎖在鋼構管上並埋設在橋墩下的泥砂中，當金屬球因洪水沖刷而裸露時，由金屬球量測到的加速度訊號就可判斷目前橋墩沖刷的深度，且其加速度訊號具備沖刷與迴淤的過程，以及可重複且持續地監測橋墩沖刷深度。本研究主要利用 2016 年尼伯特颱風及 2017 年 6 月豪雨事件一維或二維水理輸砂模式所演算之一般沖刷深度，配合局部沖刷公式所推估之局部沖刷深度，進行橋墩總沖刷深度之推估且與實測橋墩總沖刷深度進行比較，所採用之局部沖刷公式包含 Froehlich (1991)、Shen *et al.* (1966)公式、Neill (1964)公式、Inglis (1949)公式及 Jain and Fischer (1980)公式等五種，採用原則以其計算簡易程度、公路單位經常使用及學者普遍採納之公式為主。

圖 8 為 2016 年尼伯特颱風及 2017 年 6 月豪雨事件之流量與水位歷線圖，由圖上可知 2016 年尼伯特颱風為一單峰型水文事件，尖峰流量約

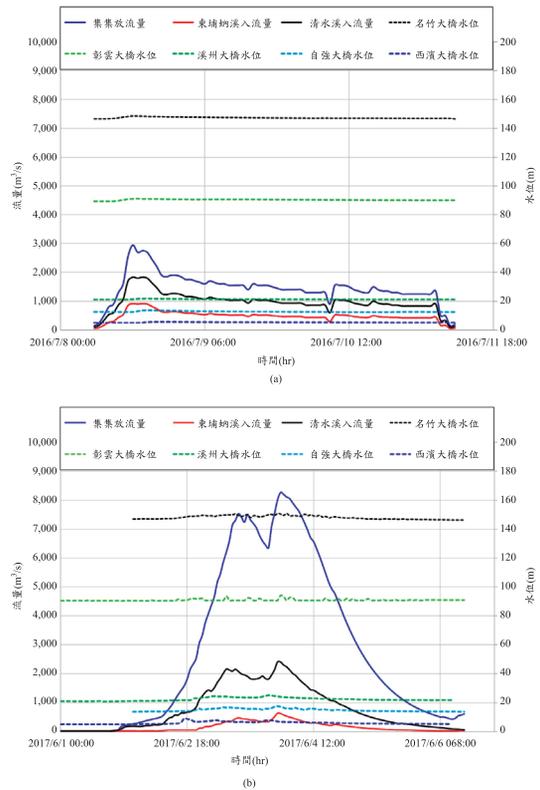


圖 8 流量及水位歷線(a)2016 年尼伯特颱風 (b)2017 年 6 月豪雨。

為 2950  $m^3/s$ ，而 2017 年 6 月豪雨事件事件為一雙峰型水文事件，尖峰流量約為 8265  $m^3/s$ ，圖 9 及圖 10 分別為 2016 年尼伯特颱風及 2017 年 6 月豪雨事件於名竹大橋逐時沖刷深度變化圖，以及 2017 年 6 月豪雨事件於自強大橋之逐時沖刷深度變化圖，由圖 9 及圖 10 可知各公式所推估之橋墩沖刷深度變化與流量變化一致，以 2017 年 6 月豪雨事件為例於 2017 年 6 月 3 日 22:00 時均有沖刷趨勢趨緩而又增加之趨勢，然名竹大橋及自強大橋適用之局部沖刷公式則不同，根據名竹大橋 P4 及自強大橋 P8 實測資料與公式推估結果之差異性，名竹大橋以 Inglis (1949)公式及 Jain and Fischer (1980)公式較為接近實測值，而自強大橋以 Shen *et al.* (1966)公式及 Neill (1964)公式較為接近實測值，則在尖峰流量 8265  $m^3/s$  的條件下，名竹大橋 P4 橋墩最大沖刷深度可達

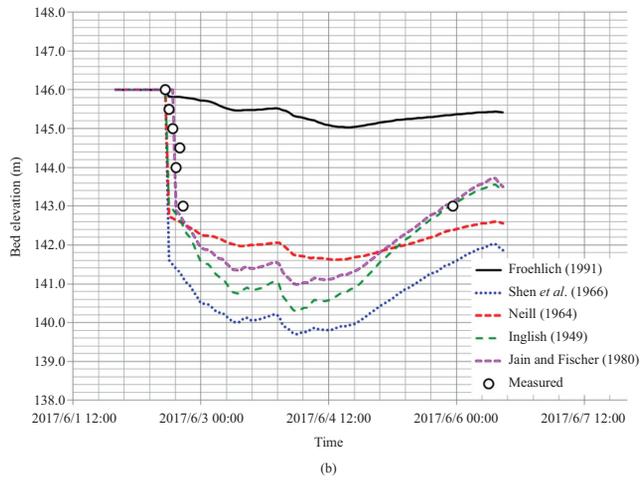
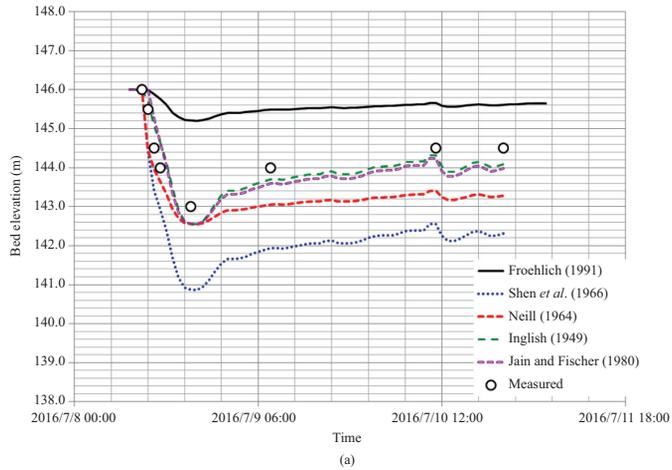


圖 9 名竹大橋橋墩沖刷公式演算成果(a)2016 年尼伯特颱風(b)2017 年 6 月豪雨。

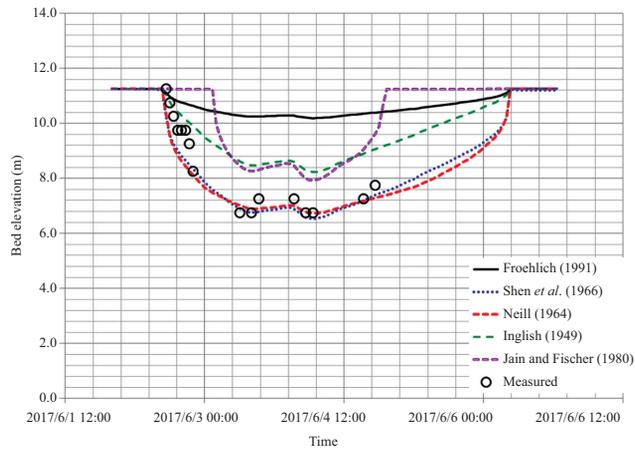
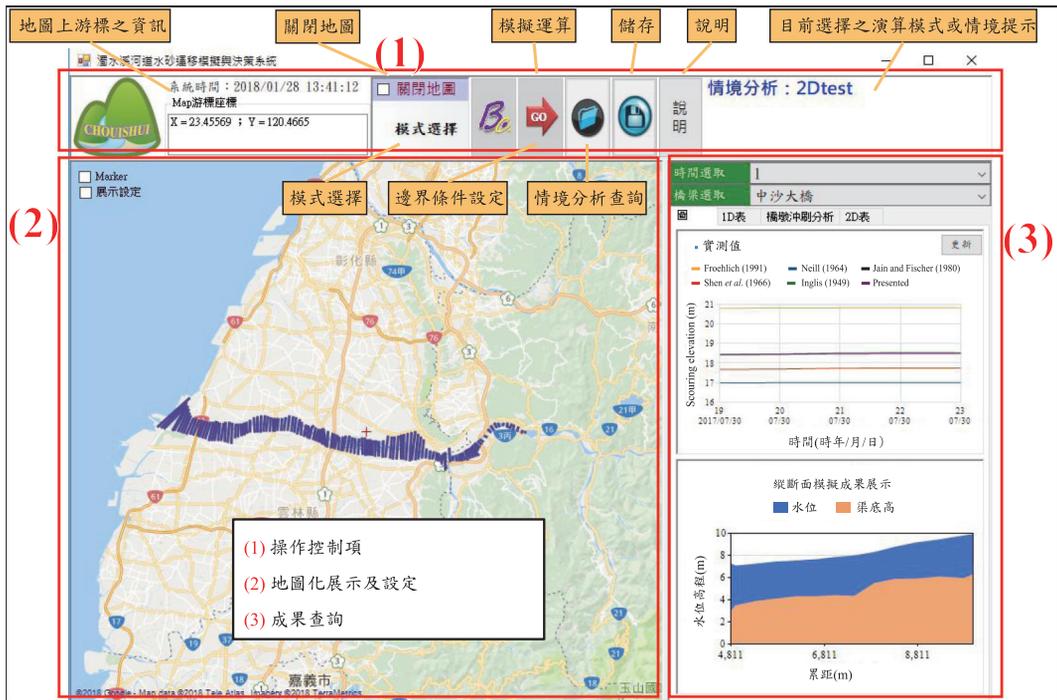


圖 10 自強大橋橋墩沖刷公式演算成果(2017 年 6 月豪雨)。



約為 5.71 m (Inglis, 1949 公式)，而自強大橋 P8 橋墩最大沖刷深度可達約為 4.72 m (Shen *et al.*, 1966 公式)，然水文情境、河床質、河床坡度及上游來砂量等變化，均可能造成各公式推估之橋墩沖刷深度不同，因此本研究介面操作系統仍建立上述五種局部沖刷公式，使用者可依據各事件之檢定驗證結果優選較為適合之橋墩沖刷公式。

## 五、操作介面建立

本研究依據濁水溪所觀測橋梁之水理、輸砂特性及粒徑差異，優選出濁水溪名竹大橋及自強大橋橋墩局部沖刷公式，進而計算出橋墩總沖刷深度，為整合降雨逕流模式、一維及二維水理輸砂模式及橋墩局部沖刷公式，建置易於操作且具整合性介面系統，本研究開發濁水溪主要橋梁沖刷深度介面操作系統，可進行歷史水文事件檢定驗證，比較各橋墩局部沖刷公式之預報準確性，

進而優選適用本土濁水溪各主要橋梁之橋墩局部沖刷公式。

系統介面主畫面包含操作控制項、地圖化展示、數值模式之相關參數設定和歷史事件成果查詢，運算介面總覽及主要功能介紹如圖 11 所示，系統可銜接台灣颱風洪水研究中心(TTFRI)之濁水溪集水區上游流域 21 個雨量站預報資料，或是輸入逐時實測雨量站資料，提供使用者透過集水區之降雨逕流模式，執行濁水溪本流、清水溪和東埔蚋溪 2 條側入流之流量及泥砂量之運算，作為一維與二維水理輸砂模擬之上游及側入流之邊界條件，亦可在介面中調整數值模擬參數設定，且使用者可選擇僅執行一維數值模式，或是一維及二維數值模式皆執行，針對橋墩沖刷部分則可選擇那些橋梁需要進行沖刷深度演算，而本操作介面共建置六種橋墩沖刷深度估算公式，因此其估算結果可一次性呈現六種橋墩沖刷深度推估值，且可選擇目標橋墩(需要進行二維演算)

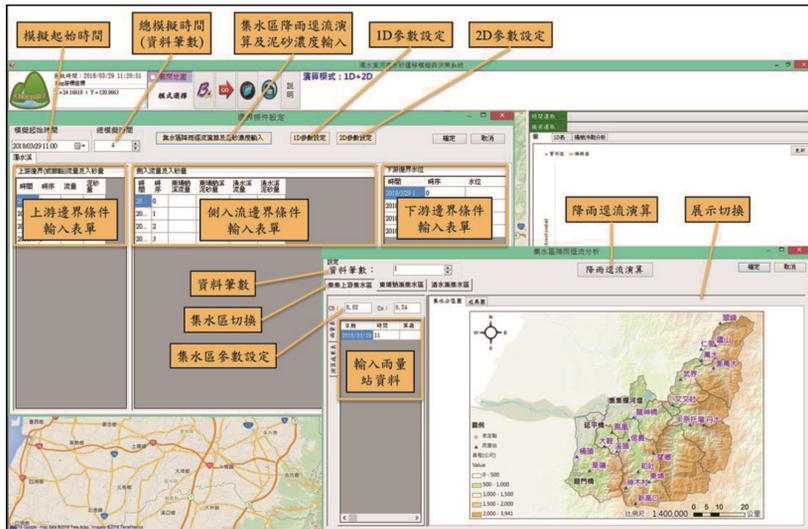


圖 12 降雨逕流及邊界條件運算介面主要輸入畫面。

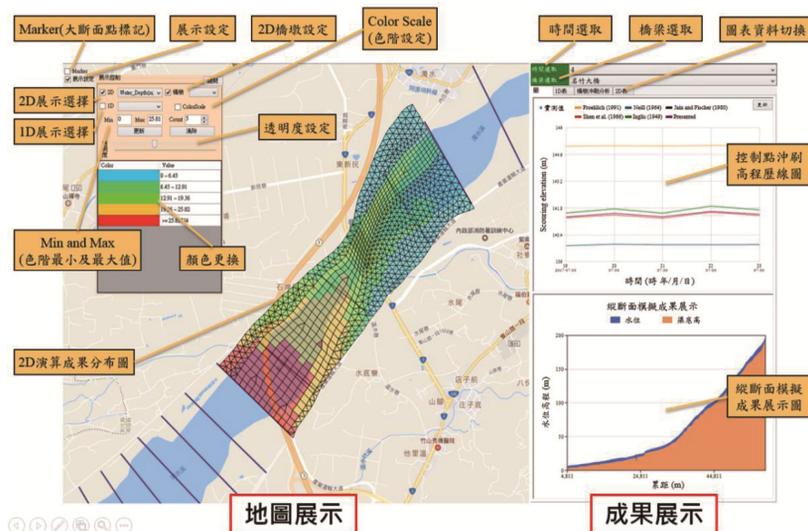


圖 13 橋墩冲刷成果展示。

查看六種橋墩冲刷深度推估結果，而降雨逕流及邊界條件運算介面主要輸入畫面如圖 12 所示。下游水位可銜接中央氣象局之麥寮潮位站之逐時潮高預報資料，或是實測麥寮潮位站資料，建立一整年度麥寮站潮位預報資料庫模組，或者輸入西濱大橋實測水位資料，作為濁水溪河口口水位高程(當模式斷面建置到河口斷面時)以及數值模

式之下游邊界條件(檢定驗證案例時為西濱大橋)，本研究亦建置系統自動化執行功能，亦及橋墩冲刷深度自動化演算模組，使軟體介面每日可在指定時間於電腦中自動執行各橋梁橋墩冲刷深度演算，可提供橋梁冲刷預警之功能。

本研究亦圖像化濁水溪橋墩冲刷深度之相關數據，於預報系統建置橋梁二維橋墩冲刷展示

功能，介面橋墩冲刷成果展示如圖 13 所示，介面系統可針對每個橋墩展示不同橋墩冲刷公式之推估結果，且透過輸入現地橋墩冲刷深度之量測值，介面系統可提供使用者進行模式檢定驗證使用，此外，亦可提供國家地震工程研究中心橋墩冲刷深度即時監測網頁之數值模式模擬成果，以達到預報濁水溪各主要橋梁之冲刷深度預報網頁展示效果。模擬產生之各項結果將配合現地災害，與主管機關協議防災安全預警作業系統所需服務功能研發，提供其他計畫進行防災安全預警作業系統的開發與整合及各項防災應變需求。

## 六、結論與建議

本研究應用數值模擬及介面操作建立橋墩冲刷推估系統，其中數值模擬包含降雨逕流模式、一維及二維水理輸砂模式以及橋墩冲刷公式之計算，並以集集攔河堰放流量及泥砂濃度值作為一維水理輸砂模式之上游邊界條件，以及西濱大橋實測水位作為一維水理輸砂模式下游邊界，並以半分布並聯型線性水庫逕流預報模式，以及流量及泥砂濃度迴歸曲線，提供東埔蚋溪及清水溪側入流之流量與輸砂量，而一維水理輸砂模式演算結果提供二維水理輸砂模式模擬範圍之邊界條件，並結合二維水理輸砂模式內建之 Parker 輸砂公式(1990)，模擬颱風期間河道一般冲刷深度歷程，並比較各橋墩局部冲刷公式之適用性，除此之外，本研究亦優選出適合濁水溪名竹大橋 P4 橋墩及自強大橋 P8 橋墩之局部冲刷公式，依據國家地震工程研究中心所觀測之橋墩冲刷與迴淤歷程變化，建議濁水溪名竹大橋 P4 橋墩及自強大橋 P8 橋墩局部冲刷公式，進而計算出橋墩總冲刷深度。

本研究採用之降雨逕流模式為半分布並聯型線性水庫逕流預報模式，由檢定驗證結果可知其可適當模擬集集攔河堰、東埔蚋溪延平橋及清水溪龍門橋之逐時流量，因此未來可利用此一模式配合降雨預報資料，以及本研究所建立之操作系統，進行濁水溪集集攔河堰以下各橋梁橋墩之冲刷與迴淤模擬。而由一維及二維水理輸砂模式

檢定驗證成果可知，SRH-1D 及 SRH-2D 水理輸砂模式可適當模擬名竹大橋及自強大橋水位及底床變化，以及中沙大橋底床變化，因此未來可利用此兩模式進行該河段之水理及輸砂行為之探討，而根據本研究所採用之 2016 年尼伯特颱風及 2017 年 6 月豪雨事件模擬結果可知，所採用之局部冲刷公式以 Froehlich (1991) 所推估之橋墩冲刷深度皆為最小，而名竹大橋以 Inglis (1949) 公式及 Jain and Fische (1980) 公式較為接近實測值，而自強大橋以 Shen *et al.* (1966) 公式及 Neill (1964) 公式較為接近實測值，然本研究僅針對單一河川局部區段進行二維研究，且以濁水溪名竹大橋及自強大橋單一事件實測值為本研究之案例，因此，未來應針對各重要流域及橋梁分別進行橋墩冲刷深度推估，以作為橋梁安全評估參考之用，因此本研究介面操作系統仍建立上述五種局部冲刷公式，使用者可依據各事件之檢定驗證結果優選較為適合之橋墩冲刷公式。

由名竹大橋及自強大橋所適用之局部冲刷公式不同可知，每一座橋梁橋墩冲刷的水理與輸砂條件皆有所不同，因此其適用之局部冲刷公式亦有所不同，而本研究所建立之橋墩冲刷介面操作推估系統提供了一個平台，除了可作為模式檢定驗證外，亦可針對模擬結果與實測資料之比較優選橋墩冲刷公式，除此之外，未來若可銜接中央氣象局或是臺灣颱風洪水研究中心之雨量預報，以及中央氣象局逐時潮位預報資料，則本系統即可提供橋墩冲刷預報資訊，因此除了可提供颱風豪雨過後橋樑是否安全及何時通行提供重要參考資訊外，對於預報橋樑橋墩於颱風豪雨時之冲刷行為亦為未來重要參考依據來源之一。

## 致 謝

本研究承蒙科技部計畫編號 MOST 105-3011-F-002-005、及 MOST 106-3011-F-002-003 之經費補助，美國墾務局提供之 SRH-1D 及 SRH-2D 模式，謝龍生博士提供降雨逕流模式，經濟部水利署中區水資源局所提供之集集攔河堰放流量觀測資料，經濟部水利署第四河川局所提供之水位與底床資料，以及國立臺灣大學水工試驗所提

供人力支援，使本研究得以完成，謹致謝忱。

### 參考文獻

1. Froehlich, D. C. (1991) "Analysis of Onsite Measurements of Scour at Piers." Proc., A.S.C.E., National Hydraulic Engineering Conference, Colorado Springs, CO.
2. Guo, W. D., Hong, J. H., Chen, C. H., Su, C. C., and Lai, J. S. (2017) "A Simplified Simulation Method for Flood-Induced Bend Scour—A Case Study near the Shuideliaw Embankment on the Cho-Shui River." *Water*, Vol. 9, No. 5, pp. 324-343.
3. Guo, W. D., Yang, T. H., Chang, Y. C., Shih D. S., Chen, C. H., Ho, H. Y., Lee, K. T., Lin, G. F., Hsiao, L. F., and Lee, C. S. (2013) "Real-Time Scour Depth Predicting System based on Ensemble Quantitative Precipitation Forecast." 35<sup>th</sup> IAHR World Congress, Chengdu, China.
4. Hong, J. H., Guo, W. D., Wang, H. W., Lee, F. Z. and Lin, Y. B. (2014) "Field Measurement and Simulation of Riverbed and Bridge scour in Cho-Shui River in Taiwan." 6th World Conference of the International Association for Structural Control and Monitoring, Barcelona, Spain.
5. Hsieh, L. S. and Wang, R. Y. (1999) "A Semi-Distributed Parallel-Type Linear Reservoir Rainfall- Runoff Model and Its Application in Taiwan," *Journal of Hydrological Processes*, Vol. 13, Issue 8, pp. 1247-1268.
6. Inglis, S. C. (1949) "*Maximum depth of scour at heads of guide bands and groynes, pier noses, and downstream bridges-the behavior and control of rivers and canals.*" Indian Waterways Experimental Station, Research Publication 13, Poona, India.
7. Jain, S. C. and Fischer, E. E. (1980) "Scour around Bridge Piers at High Velocity." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 106, No. 11, pp. 1827-1842.
8. Lee, K. T., Chang, C. H. (2005) "Incorporating subsurface flow mechanism into geomorphology-based IUH modeling," *Journal of Hydrology*, Vol. 311, pp. 91-105.
9. Lee, K. T., Yen, B. C. (1997) "Geomorphology and kinematic-wave based Hydrograph derivation," *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 123, No. 1, pp. 73- 80.
10. Lu, J. Y., Hong, J. H., Su, C. C., Wang, C. Y. and Lai, J. S. (2008) "Field measurements and simulation of bridge scour depth variations during floods." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 134, No. 6, pp. 810-821.
11. Nagata, N., Hosoda, T., Nakato, T. and Muramoto, Y. (2005) "Three-dimensional numerical model for flow and bed deformation around river hydraulic structures." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 131, No. 12, pp. 1074-1087.
12. Neill, C. R. (1964) "River bed Scour, a review for bridge engineers." Contract No. 281, Res. Council of Alberta, Calgary, Alberta, Canada.
13. Parker G. (1990) "Surface-based bed load transport relation for gravel rivers." *J. Hydraulic Research*, 28(4), pp. 417-436.
14. Roulund, A., Sumer, B. M., Fredsoe, J. and Michelsen, J. (2005) "Numerical and experimental investigation of flow and scour around a circular pile." *J. Fluids Mech.*, Vol. 534, pp. 351-401.
15. Shen, H. W., Schneider, V. R. and Karaki, S. S. (1969) "Local scour around bridge piers." *Journal of the Hydraulic Division, A.S.C.E.*, 95(HY 6), pp. 1919-1940.
16. Sherman, L. K. (1932) "Stream-flow from rainfall by the unit- graph method," *Eng. News Rec.* 108, pp. 501-505.
17. SRH-1D (2009) "User's Manual." version 2.2, U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Technical Service Center.
18. SRH-2D (2008) "Theory and User's Manual."

- version 2, U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Technical Service Center.
19. Yen, C. L., Lai, J. S. and Chang, W. Y. (2001) "Modeling of 3D flow and scouring around circular piers." Proc. of the National Science Council Part A: Physical Science and Engineering, Taipei, Vol. 25, No. 1, pp. 17-26.
  20. 水利規劃試驗所，2009-2012，“台美合作案之技術引進及應用研究”國立臺灣大學。
  21. 水利規劃試驗所，2013，“濁水河流域因應氣候變遷防洪及土砂研究”國立臺灣大學。
  22. 吳明璋、何瑞益、李光敦、林國峰及柳文成，2015，“降雨結合逕流之即時預報技術發展”，臺灣水利，第 63 卷，第 1 期，pp. 14-25。
  23. 林詠彬，2017，“河道丁壩與堤基於颱洪期間沖刷監測系統研發與建置”科技部，計畫編號：MOST 106-3011-F-002-003。
  24. 林詠彬、古孟晃、李柏翰、廖泰杉、吳志泓及陳倫奇，2016，“橋梁沖刷防災雲端監測技術”，國研院國家地震工程研究中心，專題報導。
  25. 財團法人國家實驗研究院，2017，“智慧型雲端防災監測預警技術研發(4 / 4)”審議編號：106-2625-M-492-011。
  26. 國家地震工程研究中心，2012，“橋墩沖刷試驗與水理量測分析”國立臺灣大學。
  27. 郭文達及洪健豪，2015，“礫石河床橋墩沖刷現場觀測與數值模擬”，臺灣水利，第 63 卷，第 1 期，pp. 71-82。
  28. 賴進松、王勝德、張正春及林清富，2017，“複合式流域防災監測預警技術研發”，科技部，計畫編號：MOST 106-3011-F-002-003。

收稿日期：民國 107 年 4 月 12 日  
修正日期：民國 107 年 6 月 5 日  
接受日期：民國 107 年 6 月 11 日