

HEC-RAS水理模式2D模組介紹及應用

賴桂文

台灣省水利技師公會常務理事、賴桂文水利技師事務所負責人

摘要

美國陸軍工程師團水文工程中心（Hydrologic Engineering Center，簡稱 HEC）開發之河川分析系統（HEC-RAS）軟體，可供使用者執行一維（One-dimensional，簡稱 1D）定量流（Steady Flow）、一維及二維（Two-dimensional，簡稱 2D）變量流（Unsteady Flow）之水理計算。HEC-RAS 主要由一個圖形化使用者介面、單獨的水力分析元件、資料存儲和管理功能、圖形展示和報告模組等所組成。

HEC-RAS 系統包含四個水力分析元件：（1）定量流洪水面計算；（2）1D 和 2D 變量流模擬；（3）動床輸砂計算（粘性和非粘性河床質）；（4）水溫和水質傳輸模擬。本文針對其 2D 及結合 1D/2D 之變量流功能進行介紹。

一、前言

HEC-RAS 軟體係美國陸軍工程師團水文工程中心為河川模擬分析而開發之電腦程式，為一整合型軟體系統，此系統包括圖形使用者介面，水理分析子程式（含定量流、變量流、輸砂、水溫和水質傳輸、橋梁水力計算等模組）、數據儲存與管理、圖表製作與資料彙整等功能。HEC 於 2016 年 4 月正式發表 HEC-RAS 程式 5.0.1 版本，用以取代現行 4.1 版及以前的版本，新版本除改善原有版本模擬功能及修正錯誤，另增加幾種新的模擬功能，本文針對其 2D 及結合 1D/2D 之變量流功能進行介紹。

二、HEC-RAS 模式介紹

（一）理論基礎

HEC-RAS 模式為可處理亞臨界流、超臨界流及混合流之水面剖線演算模式，具有輸入定量流、變量流的功能，可模擬整體明渠系統之流況。HEC-RAS 模式可模擬橋梁、箱涵、涵管、堰、閘門、滯洪池、排洪道等水工結構物對水流及水路之影響，HEC-RAS 模式 5.0.1 版本增加模擬洪氾區域（本文係指模擬期間洪水流經的區域）與

河道、洪氾區域與滯洪池、滯洪池與河道或上述系統連結水工結構物之水理現象，其中有關堰之模擬包括在槽堰（Inline Weir）及側流堰（Lateral Weir），而閘門則包括了懸吊式閘門（Flap Gate）。

HEC-RAS 一維變量流模式為 Dr. Robert Barkau 發展之 UNET 模式（Unsteady NETwork model）修改版，其水理係採用解變量流連續方程式及動量方程式進行分析；二維變量流模式採用解變量流連續方程式及完全二維淺水方程（包含考量紊流及科氏力的動量條件），最新之 5.0.1 版本採用二維聖維南方程及二維擴散波方程，數值方法採用有限體積法求解。

一般情況，二維擴散波方程之軟體運行較快並具有較大的穩定性；二維聖維南方程則適用於解決廣泛的問題，HEC-RAS 程式提供使用者自行選擇採用方法之設定，使用者可以按照實際問題，自行決定採用聖維南方程或擴散波方程（預設值）。

（二）新功能

HEC-RAS 模式 5.0.1 版本，其主要新功能說明如下：

1. 2D 和結合 1D/2D 變量流模擬

HEC-RAS 模式增加變量流之二維水理分析功能，使用者可以單獨執行一維變流量模擬、二維變量流模擬，以及結合 1D 和 2D 的變量流模擬。HEC-RAS 的二維模擬可應用於下列情形：

- (1) 模擬詳細的 2D 河道水理。
- (2) 模擬詳細的 2D 河道與洪氾區域水理。
- (3) 橫向結合 1D 河道與 2D 的洪氾區域。
- (4) 橫向結合 1D 河道/洪泛區域與堤後 2D 洪氾區域。
- (5) 直接連接 1D 河道至 2D 洪氾區域。
- (6) 透過水工結構物之設定，直接連接 2D 水流區域到 1D 滯洪池。
- (7) 同一個水理分析模型設定多個 2D 水流區域。
- (8) 透過水工結構物之設定，直接連接多個 2D 水流區域。
- (9) 模擬潰壩或潰堤。
- (10) 以 2D 模擬混合流況（如水躍...等）。

2. HEC-RAS Mapper新增及增強功能

HEC-RAS模式5.0.1版本新增、增強對GIS的處理能力，透過Mapper模組可以快速檢視水理分析模型之模擬結果，以視覺化修正幾何資料及發現錯誤，改進分析模型。前述視覺化資料係根據分析網格及詳細的數值地形模型，可顯示洪水淹沒範圍、水深、流速、流場、洪水到達時間和其他參數。通過內插的計算結果，可以動態生成淹沒範圍、速度向量和流線軌跡。

3. 1D變量流自動化率定曼寧n值

為了協助工程師進行變量流的率定，HEC-RAS加了自動化的曼寧n值率定功能，此選項需要實測水位時間序列資料，洪水過程在通水區域藉由劃分區塊由低到高允許曼寧n值隨流率變化，據以率定曼寧n值。

4. 簡化壩（Dam）和堤防（Levee）物理演算法

5. 在槽水工結構物增加出流設施功能設定

HEC-RAS在槽水工結構物（Inline Structures）設定中增加幾種新的出流設施（Hydraulic outlet）類型，新的出流設施類型包括：涵洞、使用者定義的率定曲線或流量歷線。

6. 增強輸砂模式之功能：包括變量流沉輸砂模擬、水庫排砂、河道穩定

HEC-RAS模式之前版本模擬輸砂歷程係採用擬似變量流（quasi-unsteady）假設，目前HEC-RAS模式5.0.1版本之變量流模組已整合動床、輸砂模式，並連結大多數輸砂分析需要的功能，包括橫向結構物和操作規則等，使變量流沉輸砂模擬更符合需求。HEC-RAS模式5.0.1版本可輸入包含泥沙濃度及河床面高程等參數，使變量流模擬輸砂之建模更為容易且更精確，尤其是持續性的水庫排砂或洩洪。

HEC-RAS 模式 5.0.1 版本內建美國農業部河道穩定和坡趾沖刷模型（BSTEM），可考量垂直向及側向河床變化，藉由使用BSTEM與HEC-RAS輸砂模組可以預測河道斷面在兩個維度之變化趨勢，並回饋堤岸缺口、橫向沖刷和土堤損壞之過程。

(三) 適用性

HEC-RAS模式5.0.1版本可進行1D、2D和結合1D/2D之變量流模擬，同其他分析模式或軟體，決定採用何種分析模式或軟體為見仁見智。需注意的是，不論採用一維或二維水理分析模式，只要輸入資料正確，都能獲得合理且良好答案，因此採用1D或2D水理分析模式的建模經驗就變得非常重要，一個熟悉一維水理分析模式的使用者之一維分析結果，可能較同一人以不熟悉的二維水理分析模式所獲得結果為佳。

一般而言，較適合採用一維水理分析模式的情境如下：

1. 不要求顯著地展示水流經過/傳播的位置（流量保持主要單向度流動）。
2. 定義明確的河道/洪氾區域系統（河道坡度小於10%，有限制水流往側向擴張）。
3. 洪水在主河道且平順漫淹至高灘地，洪水歷程兩者均可視為單向度流動。
4. 僅能取得有限的河道高程資料或其精度不佳的情況。

較適合採用二維水理分析模式的情境如下：

1. 在任何地點，預期洪水會四處流動或傳播。
2. 城市化地區。
3. 寬廣的洪水平原。
4. 潰堤後的下流流況。
5. 濕地研究。
6. 湖或河口研究。
7. 沖積扇。
8. 複雜流況。

在複雜水系分布、匯流口和網狀流路，二維水理分析模式會較為適用，特別是在匯流口，水流會由一個河道轉移到另一個河道的情況。藉由二維水理分析模式也可以避免個人主觀的建模技術，如設定無效水流區域、堤防位置、橫斷面與主流角度設定...等因素，但二維水理分析模式也是有缺點，舉例說明如下：

1. 運行時間：如果模擬範圍非常大或有較小的網格單元（cell）系統，則模式運行時間可能會很長，且地形資料精度需符合網格系統，以解決模式穩定及收斂的問題。
2. 輸出：輸出模擬範圍之結果是比較繁瑣和有限制的，雖然可以獲得較多的成果，

相對可能需要更多的時間來處理。

3. 在HEC-RAS模式5.0.1版本中，二維變量流模式沒有可直接設定橋梁壓力流況的方法，需透過額外的手法加以模擬。
4. 學習曲線：初學者進行二維水理分析模式建模，會有較長的學習時間及成本。
5. 客戶端接受度：主要是因為客戶端不瞭解二維水理分析模式的適用性及優缺點，通常也會認為費用昂貴。

綜上所述，建議可參考下列經驗決定適當之分析方法：

1. 一般的經驗法則是，如果模擬河段長度與寬度的比值大於3：1，採用一維水理分析模式應符合需求；反之，則需要二維水理分析模式（來源：Desktop Review of 2D Hydraulic Modelling Packages, UK Environment Agency, 2009）。
2. 如橋梁跨越河道，其橋墩或橋台導致突擴/束縮之效應明顯，則最好採用二維水理分析模式。
3. 如果知道洪水影響對建築物和周邊其他目標物是重要的，則採用二維水理分析模式是有必要的。
4. 希望以較詳細動畫表示在局部範圍各方向洪水（波）流向及歷程，最好使用二維水理分析模式。如果僅需要簡單水面高程圖示，一維和二維水理分析模式都能產生這些結果。

三、 HEC-RAS模式建置

(一) 基本步驟

使用HEC-RAS進行2D建模或結合1D/2D建模在本版本是相當容易且直覺性。

HEC-RAS程式執行2D（或結合1D/2D）建模的基本步驟如下：

1. 建立應用於模式的坐標系統

台灣地區採用二度分帶TWD97或TWD67坐標系統，使用者可自行由HEC-RAS Mapper功能表之**Tools | Set Projection for Project**輸入既有的ESRI shapefile或其他圖資圖層。輸入畫面如圖1所示。

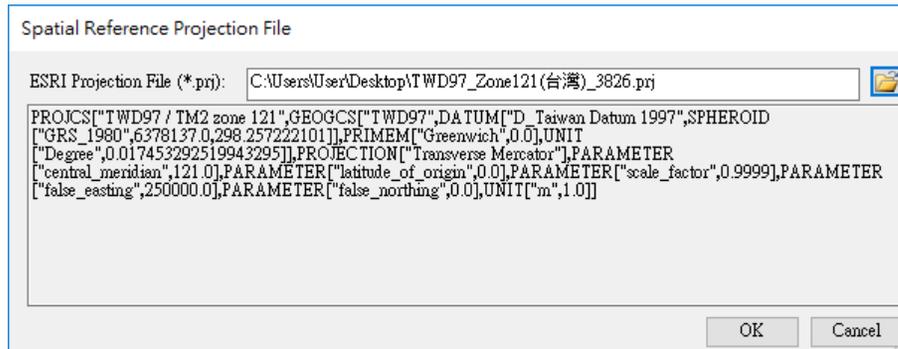


圖1 HEC-RAS模式2D模組坐標系統設定

2. 利用HEC-RAS Mapper建立數值地形模型

地形模型是二維建模的基本要求，使用於建立河道幾何和2D網格的水力屬性參數，也是應用於Mapper展示動態淹沒範圍、速度向量和流線軌跡等模擬結果之必要資料。使用者可自行由HEC-RAS Mapper功能表之**Tools | New Terrain**定義新的地形資料層的高程精度及地形資料（如網格格式*.flt、GeoTIFF格式*.tif、ESRI網格檔...等，其他支援檔案格式詳見軟體手冊說明）。輸入畫面如圖2所示。

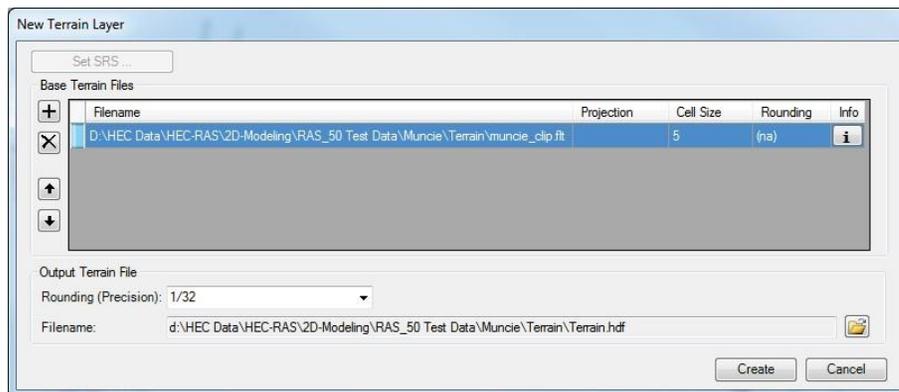


圖2 數值地形模型建置輸入畫面

二維水理分析主要問題之一，就是河道地形資料之代表性，例如採用航空攝影測量不見得測到水面之下的實際河床面，而傳統測量在水域可能測點不足或水流影響測量精度。Mapper現在可以由HEC-RAS斷面資料建立河道區域的地形模型，此地形模型再與精度較低地形模型（或是沒有反應出水面以下地形）結合，來提高地形模型精度作為水理分析依據或成果展示。地形模型修正河道區域前、後差異如圖3所示。

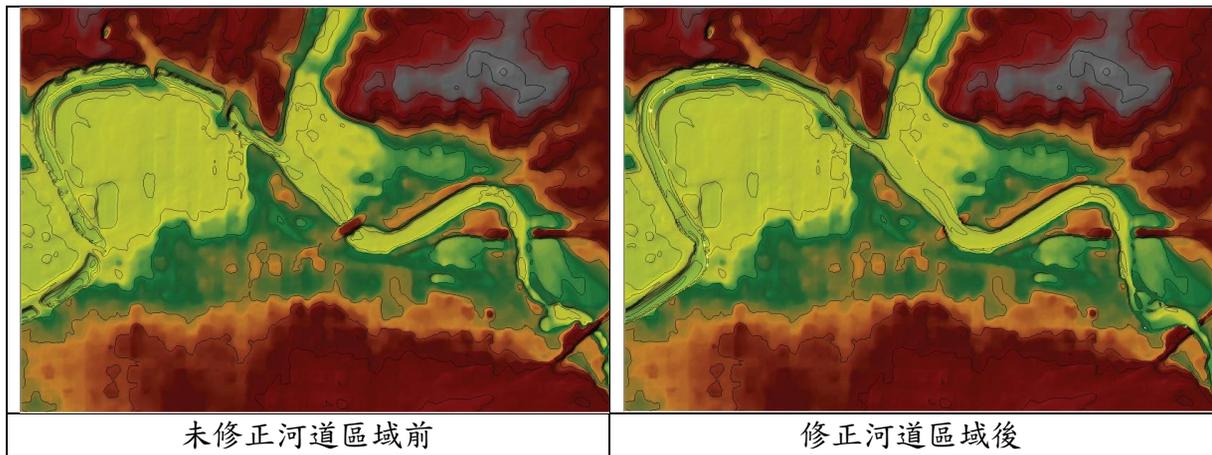


圖3 地形模型暈渲圖及等值圖

3. 視需要增加其他視覺化所需的額外圖層，如衛星空拍圖、堤防位置、道路...等。
4. 從河道幾何資料編輯器（Geometry Data editor）繪製每一個二維模擬區域之模擬邊界多邊形，或是匯入X、Y邊界坐標。使用者可自行由HEC-RAS幾何資料編輯器上方之工具列**2D Flow Area**定義二維模擬區域，並添加多邊形來表示二維模擬區域的邊界，最好的辦法就是在Mapper匯入地形資料、航空照片圖或shapefile，以利繪製如保護區、堤防或其他作為流動邊界的構造物。二維模擬區域設定完成示意如圖4所示。

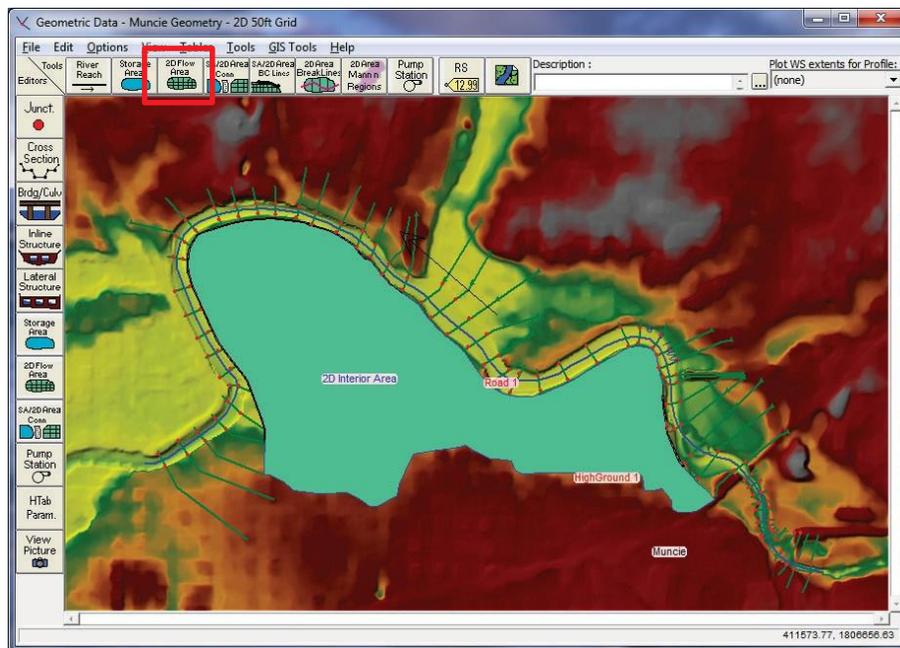


圖4 二維模擬區域設定示意圖

5. 在二維模擬區域內布置特徵線 (break line)，表示河道及模擬區域之明顯屏障或障礙物，如堤防、道路、自然邊坡、河中島、水工結構物...等。

一般情況，特徵線是為控制流向或模擬障礙物，透過添加特徵線，強制網格沿著特徵線生成而不會穿越，模擬如堤防、固床工等水利建造物。使用者可從GIS Tools | Breaklines Import from Shapefile匯入既有Shapefile、由GIS Tools | Breaklines Coordinates 輸入坐標，或是由工具列2D Area Break Line自行繪製。二維模擬區域加入特徵線示意如圖5所示。

使用二維模擬區域編輯器 (2D Flow Area editor)，為每一個二維模擬區域建立2D計算網格。計算網格中的每個單元都具有以下三個屬性Cell Center (中心點)、Cell Faces (面)及Cell Face Points (交點)，示意如圖6所示。使用者可由工具列2D Flow Area建立二維模擬區域的計算網格，並可自行調整參數以獲得較佳之網格品質，設定畫面如圖7所示。

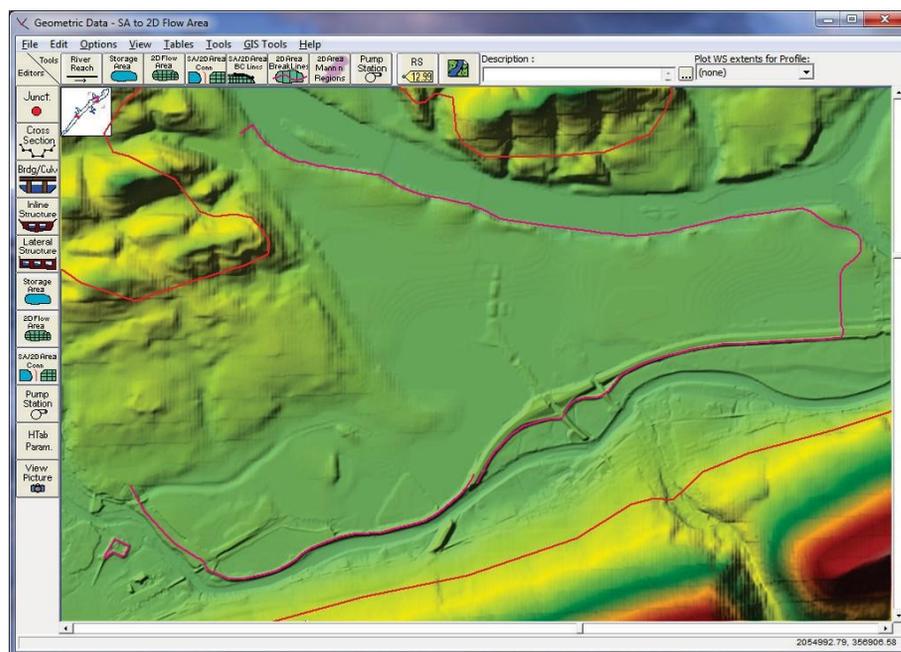


圖5 二維模擬區域設定特徵線示意圖

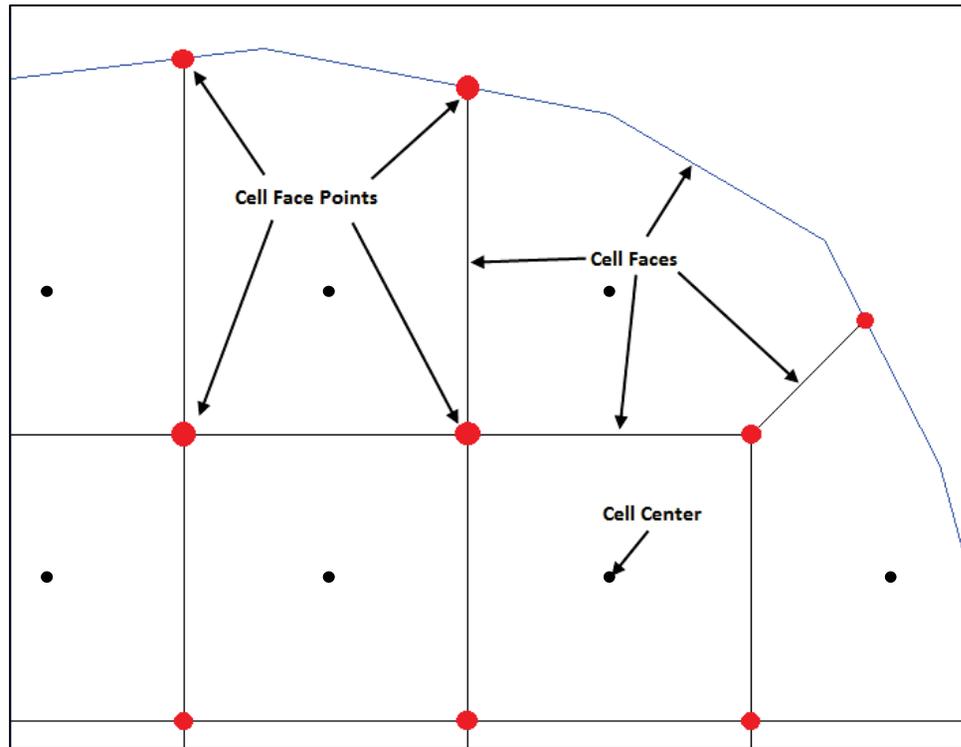


圖6 HEC-RAS模式計算網格示意圖

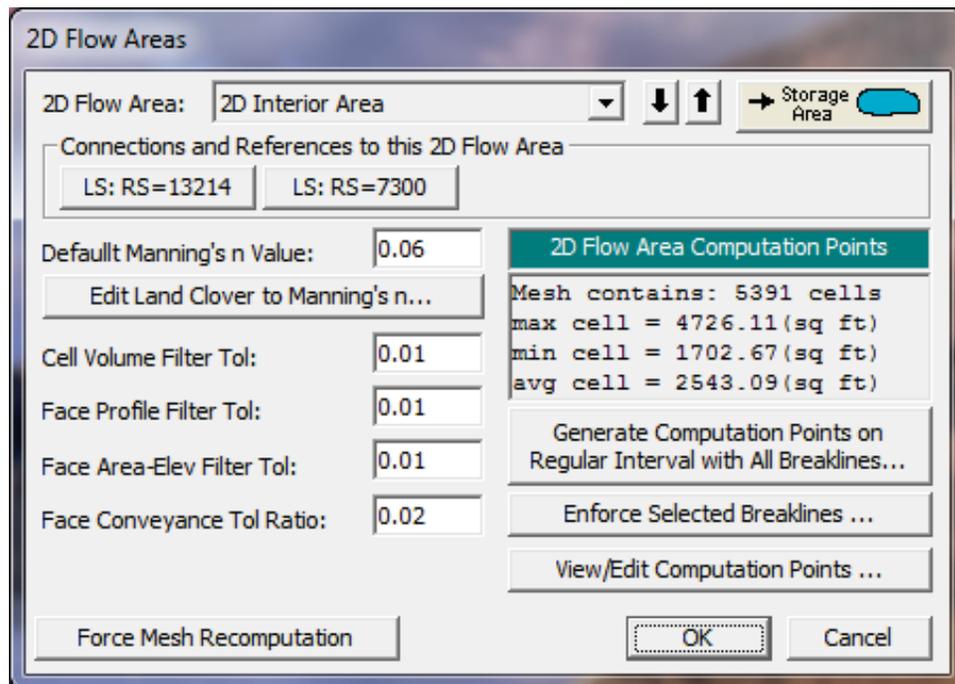


圖7 二維模擬區域網格建立設定畫面

6. 使用者需注意HEC-RAS內建網格生成演算法所建立網格不一定正確(例如網格過於尖銳與凹形會造成模式不穩定及錯誤結果)，網格建立後仍需透過編輯二維模擬區域網格，如手動添加、移動或刪除網格單元、修改網格使邊界平滑、

增加額外的特徵線、增加或減少網格密度...等方式，提高品質增加模式穩定性，網格品質差異如圖8所示。二維模擬區域網格建立完成畫面如圖9所示，其中紅色線條為以特徵線設定堤防所在位置，可避免網格穿越造成地形模型及模擬分析結果錯誤。

設定時需特別注意，如果之前已有設定過網格，使用" **Generate Points in 2D Flow Area** "選項後，原有的網格點將全部被新生成的點替換，使用者先前做的任何手動編輯都會遺失。

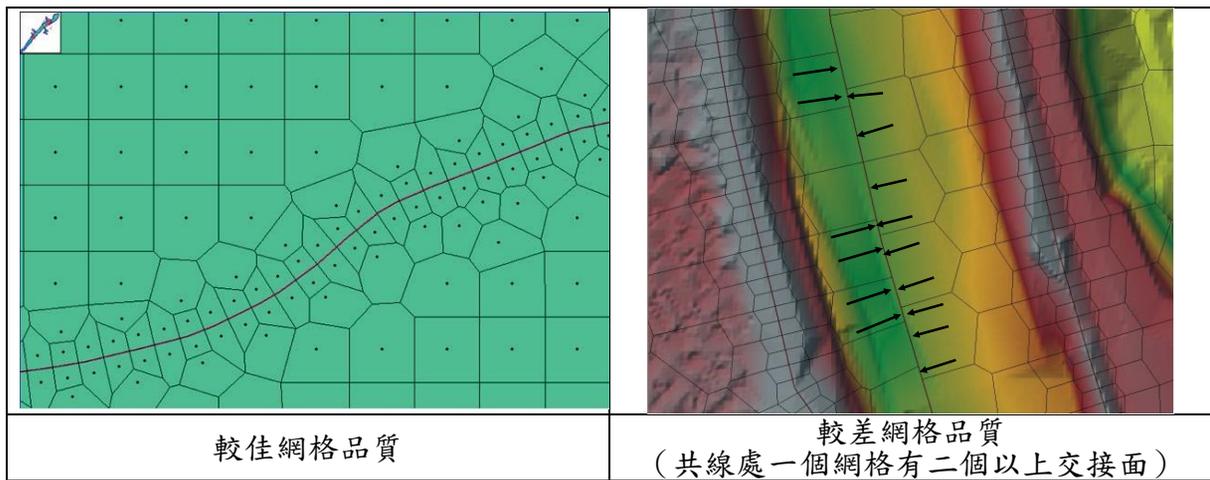


圖8 網格品質差異對照圖

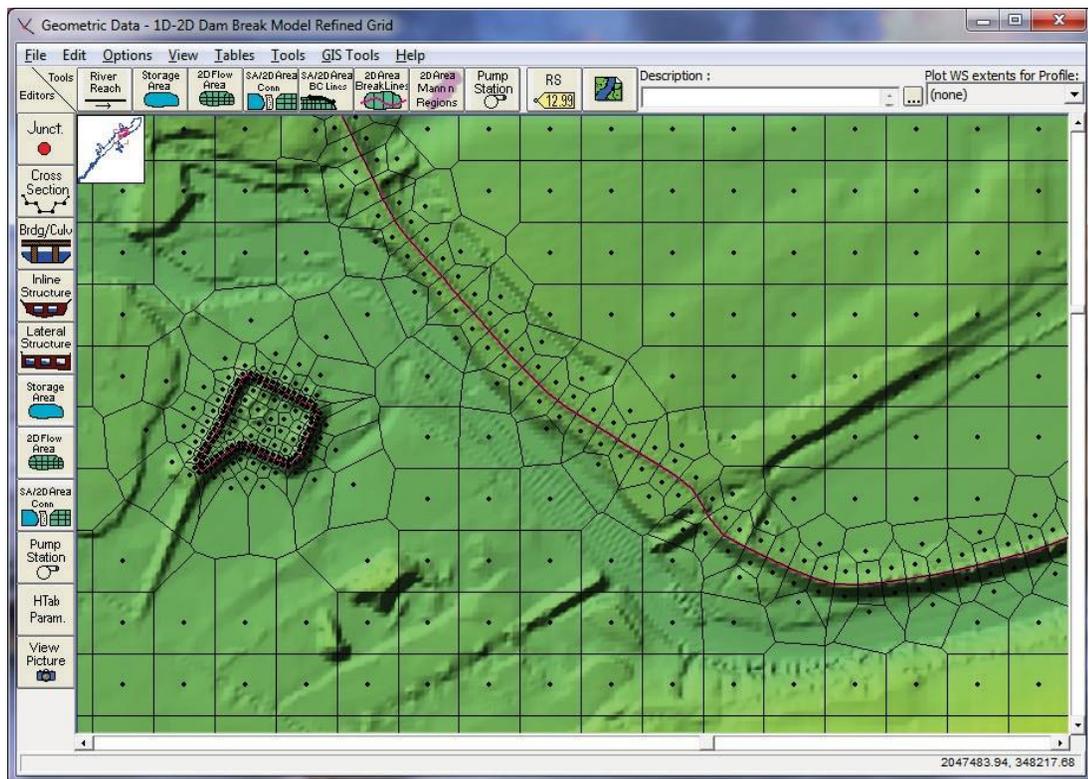


圖9 二維模擬區域網格建立示意圖

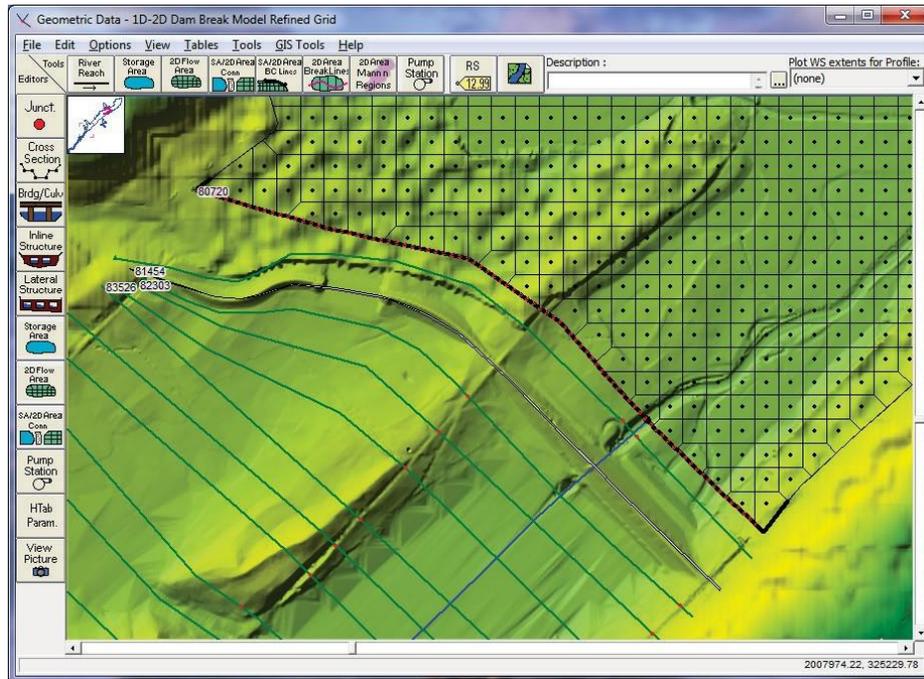


圖11 直接連接1D模擬河段下游端點至2D模擬區域示意圖

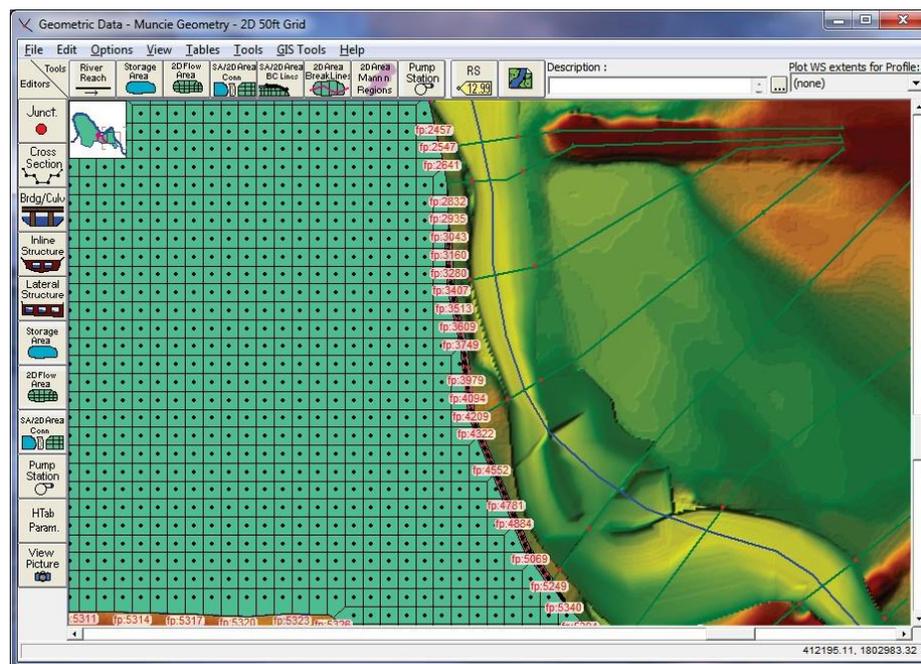


圖12 利用側向構造物連接1D模擬河段及2D模擬區域示意圖

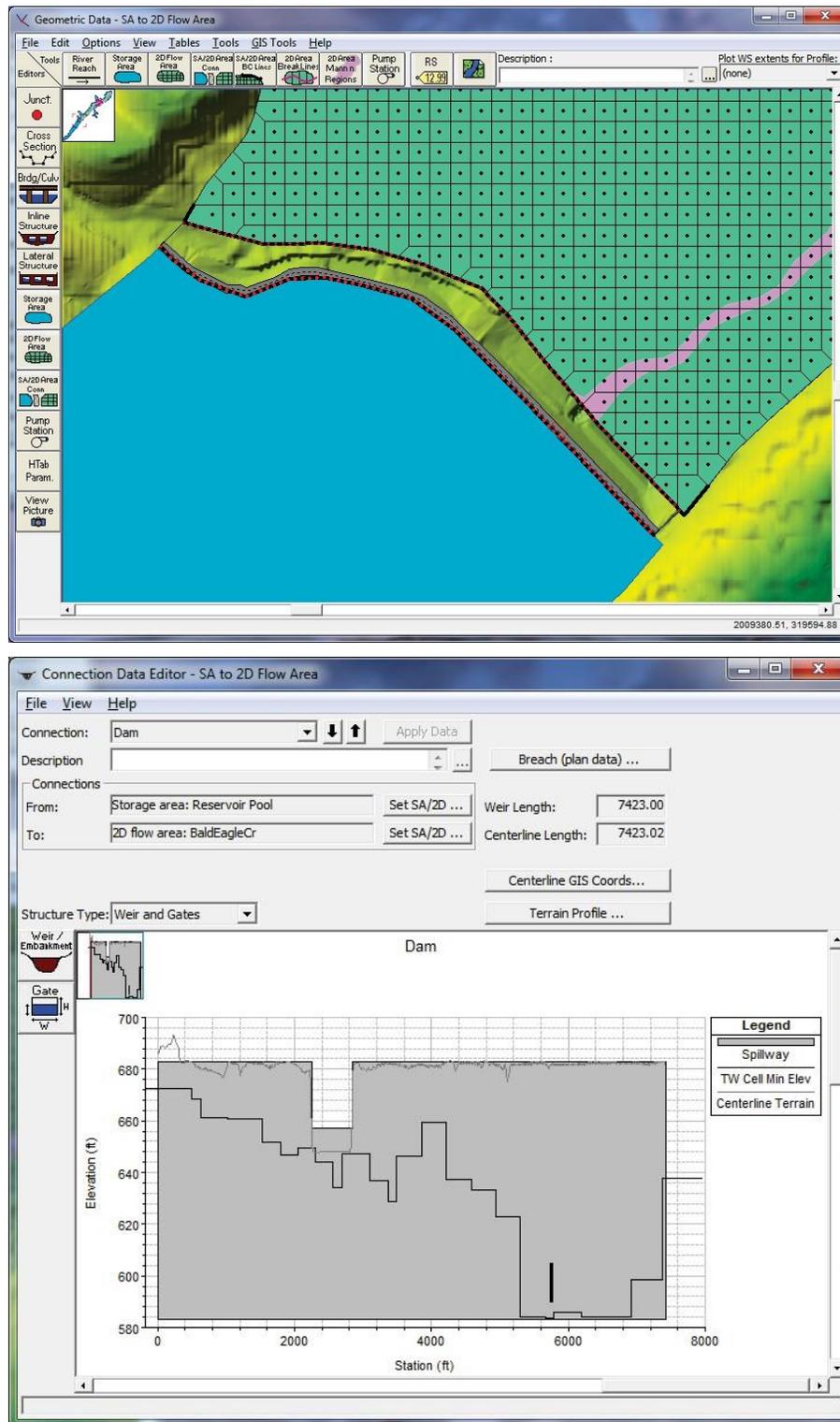


圖13 利用SA/2D Area Conn連接滯洪區域至二維模擬區域示意圖

9. 在二維模擬區域添加任何必要的水工結構物。

HEC-RAS 5.0.1版可模擬之水工結構物型式包括：

- (1) 堰 (Weir)：當水流通過堤頂、道路、堰、溢洪道...等，使用者可以選用二維變量流方程或堰流公式模擬溢流流況，也可以進行潰堤分析的設定。

- (2) 堰及閘門 (Weir and Gate)：本選項除可模擬第(1)點的流況外，可再加上位於堤岸的閘門。閘門可以控制很多方面的變量流流況，如果把一個閘門連接兩個水工結構（上下游網格及水位有連接），需注意地形資料需低於閘門入口高程。
- (3) 堰及涵洞 (Weir and Culvert)：本選項除可模擬第(1)點的流況外，也可以設定穿越堤岸的涵洞。涵洞可以設置兩種流況，或者使用者可以在出口設定自動閘門和流向，如果把一個涵洞連接兩個水工結構（上下游網格及水位有連接），需注意地形資料需低於涵洞入口高程。

目前二維模擬區域內部水工結構物僅限於沿著相鄰網格單元的面連接，閘門和涵洞水力出流設施只能從一側的網格單元連接到另一邊，後續版本才會提供連接到上游和下游一段距離所在之水工結構物。

10. 設定二維模擬區域外部邊界條件

由幾何資料編輯器，沿著二維模擬區域周邊繪製任何外部邊界條件的線條，並視需要加以設定。邊界條件可設定型式包括：

- (1) 流量歷線
 - (2) 水位歷線
 - (3) 正常水深
 - (4) 率定曲線
 - (5) 降雨量（需扣除降雨損失或入滲量）
11. 由變流量資料編輯器 (Unsteady Flow data editor) 設定二維模擬區域內部邊界條件及初始條件。
 12. 由變流量模式模擬執行視窗設定二維模擬區域任何必要的計算選項和設定。
 13. 執行變量流模式模擬。

(二) 成果展示

使用者完成HEC-RAS模式之2D、1D/2D水理演算後，可透過重新開發之Mapper模組檢視視覺化之模擬結果，以HEC-RAS Mapper檢視模擬結果輸出畫面如圖14所示，Mapper之主要功能說明如下：

1. 建置2D建模和1D/2D模擬結果視覺化的地形模型，地形模型可以為單一或多個地形單元組成，各地形單元可以有不同的網格解析度。

2. 建置土地覆蓋特性之圖層，用於定義二維模擬區域之曼寧n值。
3. 可以產生各種類型的圖層 (shapefile) 結果，例如水深、洪水位 (標高)、流速、浸沒邊界、流量 (目前只有1D)、水深VS流速、水深VS流速平方、洪水到達時間、洪水延時、被浸沒時間百分比。
4. 模式計算結果可以即時動態顯示，寫入靜態地圖圖層/網格。
5. 模式計算結果可以動畫顯示，或依指定時間點顯示。
6. 任意位置之1D和2D模式計算結果，可以在Mapper直接顯示時間序列之圖、表，時間序列圖、表包括洪水位、水深、流速 (2D的節點流速、2D網格面平均流速及1D流速)。
7. 使用者可以移動滑鼠指標查詢任何使用中圖層在地圖上的數值。
8. 圖像、shapefile和點圖層可以顯示為計算結果之背景圖層。
9. 使用者現在可以從橫斷面資料 (僅河道或全部斷面)、堤岸線和橫斷面內差建立地形模型，此地形模型可以結合其他地形資料 (堤後/高灘地)，使河道/橫斷面資料完整併入為新的地形模型。
10. 使用者可建立自定義剖面線，然後輸出沿自定義剖面線的各類型資料 (如洪水位、地形高程、流速、水深...等)。
11. 使用者可以放大模擬範圍任一區域，將該位置儲存為一個使用者定義視圖，之後可以點選此定義視圖回到相同位置及視角。

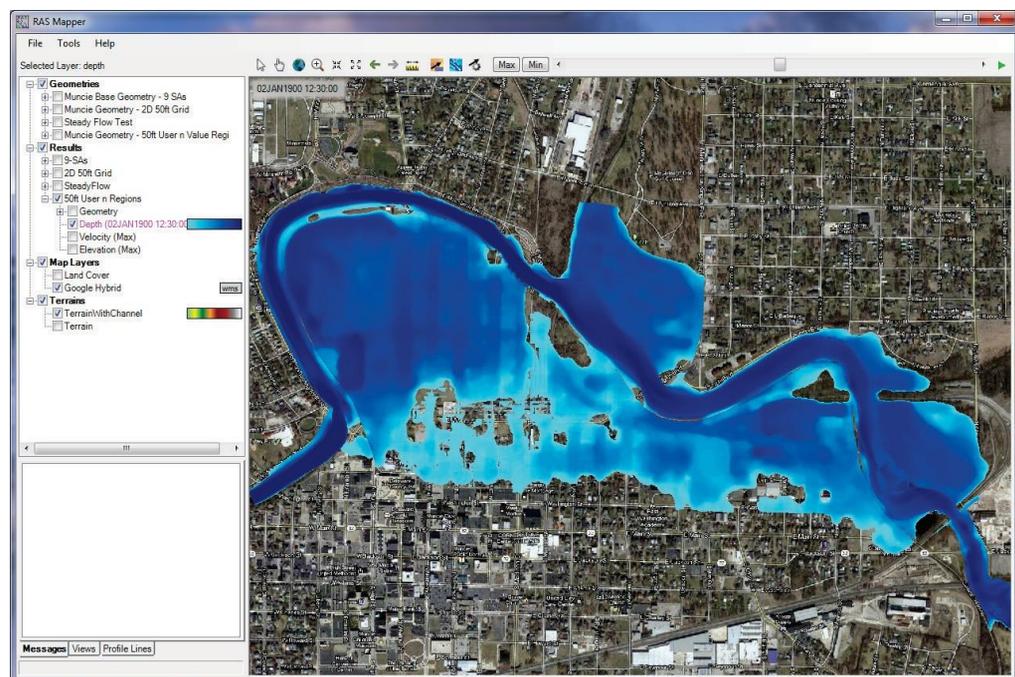


圖14 以HEC-RAS Mapper檢視模擬洪水位輸出畫面

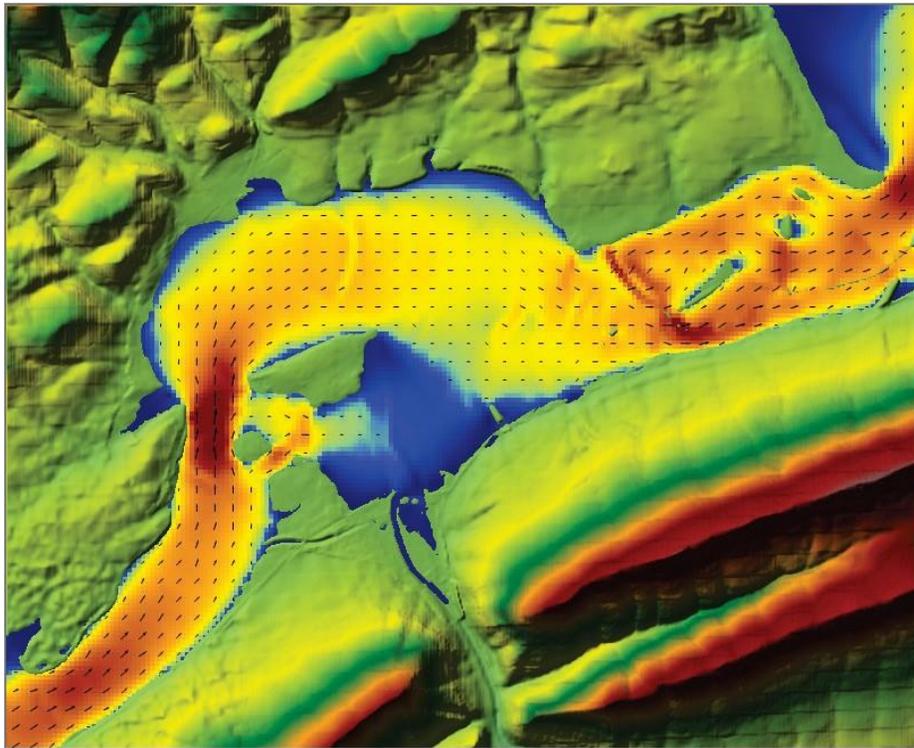


圖15 以HEC-RAS Mapper檢視模擬流場輸出畫面

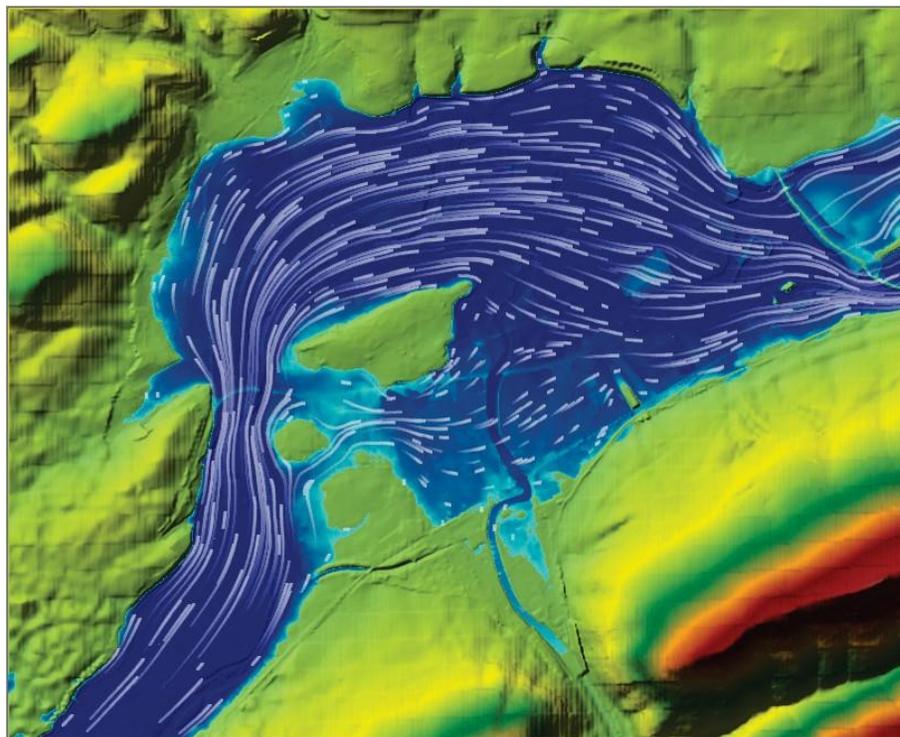


圖16 以HEC-RAS Mapper檢視模擬流線軌跡輸出畫面

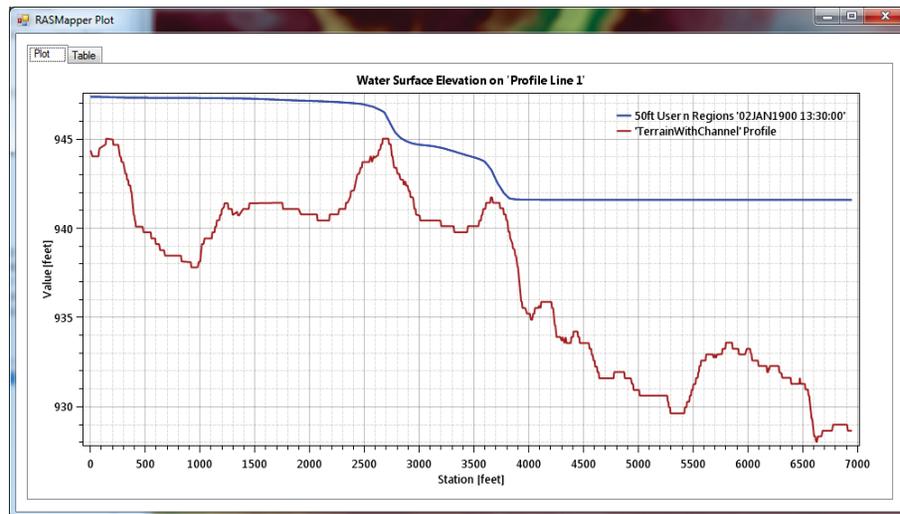


圖17 以HEC-RAS Mapper檢視自定義剖面線洪水位及河床高輸出畫面

四、HEC-RAS二維模組使用限制及已知問題

(一) 使用限制

HEC-RAS軟體之二維水理分析模組目前的限制如下：

1. 在二維模擬區域內添加內部水工結構物不夠彈性。
2. 目前無法在二維模擬區域執行輸砂模擬（包括沖刷及淤積）。
3. 目前無法在二維模擬區域執行水質模擬。
4. 目前無法連接抽水站至二維模擬區域。
5. 在二維模擬區域無法使用HEC-RAS內建之橋梁模組，但可利用SA/2D Area Conn工具模擬涵洞、堰等設施。

(二) 已知問題

1. 設定涵洞時無法使用Floodway Encroachments的功能。
2. 模擬紊流採用2D完整方程式求解時，會出現錯誤訊息。

投稿 105.05.13
校稿 105.05.25
定稿 105.05.26