

以 3D 流體動畫軟體模擬水力試驗之評估研究

Evaluation on Using 3D Fluid Animation Software to Simulate Hydraulic Experiment Results

台灣首府大學
資訊與多媒體設計學系
助理教授

謝 慧 民*

Hui-Ming Hsieh

台灣首府大學
資訊與多媒體設計學系
學士

姜 林 廣

Lin-Kuang Chiang

台灣首府大學
資訊與多媒體設計學系
學士

翁 敏 瑄

Min-Hsuan Weng

台灣首府大學
資訊與多媒體設計學系
學士

陳 秀 妮

Hsiu-Ni Chen

台灣首府大學
資訊與多媒體設計學系
學士

陳 怡 勳

Yi-Hsun Chen

台灣首府大學
企業管理學系
大專學生

林 嘉 琳

Chia-Lin Lin

摘 要

本研究以做電影流體特效較常見的 3D 流體模擬軟體包括 Maya、RealFlow、Blender、Glu3D for 3ds Max 等四套，做純水流的流況模擬。以這四套軟體進行過堰跌水及水躍試驗、圓柱橋墩附近渦流試驗、長方形橋墩實拍等三種流況模擬，與相對影片結果比較分析，並建立經驗參數、效能及精度排序。所有擬真模擬的視角，必須與水工試驗或現場拍攝影片的運鏡吻合，以提供影像的比較分析。在進行驗證的過程及結果，可以確定各軟體模擬的步驟、參數的範圍。成果顯示，雖然各軟體之水流模擬效果有極大的差異，但是大致上水躍現象均有呈現出來，然而停留位置則與實驗有些差異。精度評估結果以 RealFlow 及 Maya 表現較佳，檔案儲存及計算效率以 Blender 及 Glu3D for 3ds Max 較佳。就水流模擬考慮有模擬床砂時，實用性而言，仍以精度較佳為主，因此建議選擇 RealFlow 或 Maya 來模擬。此研究成果可供實際河川模擬水流或模擬河川構造物設置時，提供在視覺展示上之評估。

關鍵詞：3D 流體模擬，水工試驗，水躍，過堰跌水。

*通訊作者，台灣首府大學資訊與多媒體設計學系助理教授，72153 台南縣麻豆鎮南勢里 168 號，hmhsieh@ms3.hinet.net，hmhsieh@tsu.edu.tw，

ABSTRACT

This study will apply 3D fluid simulation software, more commonly used to do a movie Fluid Effects, including Maya, RealFlow, Blender, and Glu3D for 3ds Max to do the simulation of pure water flow. The 3D fluid simulation software will be used to simulate the falling water after the weir and hydraulic jump, eddy near the cylinder pier in hydraulic laboratory, and surface disturbance near the rectangle pier in field. Finally, the comparative analysis of the hydraulic laboratory and simulation results will be done, and the order of the 3D fluid simulation software according to empirical parameters, performance and accuracy will be established in the future. In all realistic simulation perspective, film camera must work consistent with the operation of the films of hydraulic laboratory, and the simulation results provided a comparative analysis of the image. During the validation process and results, you can determine various software simulation steps, the range of parameters. Flow simulation results of various softwares have great differences, but generally water jump phenomenon has revealed, and the locations of the residence have some differences with experiment data. Generally, the RealFlow and Maya software have better performance in accuracy estimation, the Blender and Glu3D for 3ds Max software have better performance in file size and computing efficiency. Considering accuracy, the RealFlow or Maya software are still better proposed and selected to do the flow simulation with mixed sand in practicality. This results achieved in the future can provide the reference of flow simulation in actual the river, or the impact assessment for the rivers structures setting on the rivers.

Keywords: 3D fluid simulation, Hydraulic laboratory, Hydraulic jump, Drop of water after the weir.

一、緒 論

政府單位辦理重大的河川治理工程，常使用水工模型試驗成果來評估設計的成效、影響及安全性，例如建造大型取水工、攔河堰、攔砂壩、堤防、分洪隧道等都需要進行水工試驗分析。這些河川構造物往往影響流況的變化，進而影響河床的變動，評估其影響是有必要的。由以往的水工試驗到現在採用數值模式來分析其影響程度，證實電腦科技的進步及數學模式精度的提升，對評估工作而言，提供了方便性、時效性及可靠度。

對於許多的複雜流況，以前大都需要靠水工模型試驗去了解水流的特性，相對於數學計算而言是一個較花錢與時間的工作。但是用水工模型

試驗來分析水理輸砂的變化，建構場地的時間較長，且費用較高；試驗完後，進行下一個試驗前大都需要拆除，實用性是有局限的，尤其要用到實際地形試驗的情況更明顯。而使用軟體模擬就有較大的彈性，不同案例只需修改或重新建模，並安排流體來源及出流量，時間可望縮短，經費也可以降低。

雖然現在也有一些考慮複雜現況的數學模式被發展出來，可以計算水流及河床變動，相對的成本也便宜很多，但是在 3D 效果的展示上大都不盡理想。目前許多電影水流特效呈現了擬真效果，使得我們想要評估這些 3D 水流特效軟體，是否可以對一些特殊流況的模擬產生擬真的效果，有一些參數調整的經驗後，進而可以使用在水工模型實驗的驗證及實際河川複雜的水流

模擬，特別是在水理現象視覺展示之效果(郭鳴宇等，2008)。

雖然流體擬真模擬軟體被大量用在電影特效上，只知道模擬結果很亮眼、很炫，仍不知其模擬的結果是否符合實際流況。因此本研究蒐集過堰跌水及水躍試驗、圓柱橋墩附近渦流試驗、長方形橋墩實拍影片與 3D 流體模擬軟體 Glu3D for 3ds Max、RealFlow、Maya、Blender 算圖成果做比較，探討各種 3D 流體模擬軟體之精度及有關效能的算圖時間、檔案大小之差異，並得到參數的設定的範圍，以提供相關研究之參考。

二、文獻探討

市面上有 10 幾種流體模擬軟體整理如表 1 所示，由 YouTube 影片觀看其模擬成果發現，比較適用於影片效果展現的有 Glu3D for 3ds Max、RealFlow、Maya、Blender 等四套，本研究考慮使用這些軟體來做評估，以了解各 3D 流體軟體在純水流的精度及效能表現，以提供使用者參考。

有關 3D 流體動畫軟體模擬與水工試驗的相關文獻，分為以下幾個部份探討：

2.1 流體力學理論與動畫軟體技術演進

郭鳴宇、汪繼文(2008)曾對流體模擬動畫方面做分類，他們談到基於物理模型的流體動畫類比中描述流體運動的方法主要有兩種，一種是 Euler 方法，另一種是 Lagrange 方法。Euler 方法

的主要缺點是難以處理流體的細節，Lagrange 方法的優點就是能很好地表現流體的細節。由於 Euler 方法和 Lagrange 方法的這些特點，如果發展這兩種方法的綜合方法，則可取長補短。黃梅娟(2009)對這兩種方法做了比較。歐拉法與拉格朗日法各有優缺點，為了更真實的模擬流動，基於網格的歐拉演算法往往結合拉格朗日法一起使用，得到廣泛應用的半拉格朗日法。描述流體現象最為完整的納維—斯托克斯方程(Navier-Stokes Equation, NSE)，該方程是根據牛頓第二定律推導出來的。

近幾年，Lattice Boltzmann Model (LBM)被引入圖形學領域，LBM 方法也是一種拉格朗日法，它不去追蹤每一個實際粒子，在離散的格子裡。粒子沿著格子軌線向相鄰的格子遷移和相互碰撞，這樣分佈函數的演變就決定了流體運動的變化過程。該方法相對於歐拉法的優點在於程式設計容易，可以很方便的處理複雜邊界。這個方法實現了兩種液體組成的混合流的模擬。不同於其他的類似模型，它區分考慮了流體的黏性的擴散性，可以很容易地模擬各種互溶或者不互溶的混合流現象。此外，由於 LBM 的運算大都是線性的局部運算，這使得它很容易在可程式設計圖形處理器(Graphics Process Unit, GPU)上進行加速，從而進行實際模擬。

流體動力學的基本定理是—守恆定律，特別是質量守恆，線性動量守恆(也稱為牛頓第二定律的運動)，能量守恆(也稱為熱力學第一定律)，是根據古典力學和量子力學和廣義相對論修改來的。這些公式也是以雷諾傳送定理(Reynolds Transport Theorem)表示的。除上述外，液體被假定為遵守連續性的條件，那就是由液體分子所組成的，相互碰撞與固體物體碰撞。此外，電腦計算流體動力學(CFD)則是利用電腦來求解流體力學問題；透過電腦可以利用流體粒子視覺化的優勢—稱為粒子圖像測速(Particle Image Velocimetry)—這是一種實驗技巧用來視覺化與分析流體。流體力學是物理學的一個分支，用來研究流體的特性，即液體和氣體，還有研究它們之間的交互作用力，水流及夾砂水流屬於液體的部分。

表 1 3D 水流模擬軟體一覽表

項次	軟體名稱	公司名稱
1	RealFlow	Next Limit Technologies
2	Naiad	Autodesk
3	Glu3D for 3ds Max, Maya	3D Aliens
4	FluX	FXGear
5	Flowline VFX	Scanline Productions
6	Phoenix FD for 3ds Max	Chaos Group
7	Blender 3D fluid	Blender
8	Maya nParticle	Autodesk
9	Fluent 及 CFX	ANSYS
10	Flow 3D	Flow Science, Inc.

張桂娟等(2010)提出了一種優化大規模場景的流體模擬處理方法，該方法分為語意層、表示層及應用層，利用數學方法將原始場景的物件、功能、樓層、狀態及場景由下往上建立樹狀架構圖組織，物件相似度越高，場景簡化程度越大，處理效率也越好。應用此方法構成的場景組織當流體模擬的邊界條件，利用 FDS 軟體模擬大樓一至二樓火災煙霧擴散，以及山區河道中水流的效果，證實該方法快速且有效。在 3D 流體模擬軟體產品中，有不少包含了流體模擬的模組，如 Maya 裡面的 Fluid Effects 該模組的方法主要來自 Jos Stam 提出的半拉格朗日方法。在 3ds Max 裡面則提供有 Glu3D 流體外掛程式。獨立的套裝軟體如 Next Limits 推出的 RealFlow 和 RealWave (RealFlow 的外掛程式)更是出類拔萃，被稱為 PC 機上最好的兩種流體動力學類比軟體(黃梅娟，2009)。電腦動畫逼近真實的物理運算特效越來越重要。其中除了全域照明(Global Illumination)算圖所需要大量計算外，流體物理運算也是耗費大量電腦資源，原因是流體運動複雜，要求逼真的特效的話，粒子數目往往需要達到上萬顆的數目。

2.2 3D 流體動畫軟體

Naiad 流體類比軟體原為 Exotic Matter 開發的產品，該公司已被 Autodesk 併購。Naiad 是一個動態解算器和模擬架構，非常適合流體動畫的模擬，包括液體、大面積的水面或小面積的水面、破碎的浪花、飛濺和泡沫、高度的創意控制，同時保留真實的液體運動、氣體、火、煙、爆炸、剛體與流體碰撞的物理解算。

Blender 是一套三維繪圖及渲染軟體。它具有跨平台的特性，支援 FreeBSD、IRIX、GNU/Linux、Microsoft Windows、Mac OS X、Solaris 及 SkyOS。Blender 現在是自由軟體，並由 Blender Foundation (Blender.org)維護與更新，擁有極豐富的功能，而且很大部份是進階模組塑造軟體。Blender 是目前為止功能最強大的免費軟體，支援 YafRay 光線追蹤算圖軟體，以及流體力學的模擬(流體仿真系統 Fluid Simulation)，同

時內建遊戲引擎。Blender 的流體模擬至少需要兩個網面模型物件，一個用來界定模擬的範圍，另一個則用來產生流體，還可以加入與流體互動的網面物件(Blender Online Help: <http://www.blender.org/manual/physics/fluid/introduction.html>)。

FluX 是韓國開發商 FXGear 基於節點的流體模擬軟體，該軟體的設計目的是進行跨網分散式運算，FluX 支援 Alembic 檔案格式，可以直接導入到 Maya、3ds Max、Softimage、RenderMan、Arnold、Kakatoa、V-Ray、RealFlow 以及 Houdini 內。

RealFlow 是 Next Limits 公司開發的一款獨立的類比軟體，是一套流體動力學模擬軟體，它可以計算真實世界中運動物體的運動，包括液體，如流水、噴泉、湧出的泥漿、流沙、眼淚等等，能單獨運行，也可與其它 3D 套裝軟體連接，如 LightWave、3ds Max、XSI、Maya 和 Cinema 4D 等。

FLUENT 是美國 Fluent 公司所發展的三維計算流體力學軟體，此軟體已廣泛地被用在空氣動力學(如飛機流場、汽車流場…)、工業工程及建築通風設計、多相流場等，而目前最新的版本(Fluent 6.2)則含有電漿流場與噪音計算等功能。

Flow 3D 是國際知名流體力學大師 Dr. C.W. Hirt 畢生之作，從 1985 年正式推出後，其 CFD 之解算技術 True V.O.F. 在實務問題的擬真與計算結果的準確度上皆受到使用者的讚譽與嘉許。其特別的 FAVOR 技巧更是針對自由液面(Free surface)如常見的金屬壓鑄(Metal casting)與大地水利學等複雜問題提供了更高精度、更高效率的解答，所以也是一套能夠處理複雜自由液面的流體力學分析軟體。

Flowline 軟體是位於德國慕尼黑的 Scanline Productions 所發展的，曾幫助 Moving Picture Company (MPC)讓流體充滿了波塞冬的內部，效果令人信服，並且幫助了 Scanline 完成了 2012 中巨大的沖刷場景，還為 Clint Eastwood 的「從今以後」重塑了恐怖場景。

Maya 是 Autodesk 公司的軟體，其 nDynamics 模組下的 nParticle 粒子系統可以模擬晶瑩剔透的

水流。另外，Maya 有 Glu3D 水流模擬的外掛套件，在 Dynamics 模組下也有流體系統 Fluid Effects 可模擬水流。Maya 也有 RealFlow 的外掛套件，可將 Maya 製作的模型 export 給 RealFlow 計算水流成果，再 import 回 Maya 進行合併算圖。nParticle 粒子系統是 Maya2009 後新增加的功能，首次實現了自體粒子間的碰撞，至今多版改良已比 3ds max 的粒子自體碰撞運算效能順暢許多。過去梁育碩(2009)曾以 Maya 軟體 Dynamics 模組的 Particle System 模擬龍捲風的視覺效果，模擬過程中提及分子、發射器、力場等重要的 Particle System 特性，並拓展到算圖設定、影像合成的流程，發現製作瓶頸，並予以討論，歸納出 Particle System 特效製作的問題與建議要點。

在 3ds Max (Autodesk 公司)平台上的流體物理運算軟體有 SitniSati FumeFX、3Daliens Glu3D、Next Limits RealFlow 以及 XFlow。Glu3D 在流體邊界的地方模擬的不夠精確，Glu3D 沒有很明顯的尺度造成的模擬差異。

2.3 水流的水工試驗及實拍影片

本研究蒐集了許多水流的水工試驗(或稱水力試驗)或現場實拍影片，大部分來自 YouTube 影音平台，大致包括波浪、潰壩、水躍、過堰水流、跌水、橋墩附近渦流等。

2.4 3D 流體動畫效果

本研究蒐集了許多流體動畫效果影片，也是大部分來自 YouTube 影音平台，其中 Blender 模擬局限空間的水花效果還不錯(如圖 1)。Maya 使



用 nParticle 可以模擬砂人動作，手部變成砂的動畫(如圖 2)，這個設定方法在模擬河床有砂的案例特別有用，可以設定砂在掉落一段時間穩定後設為砂的初始狀態，再進行水、砂混合模擬。RealFlow 則可以模擬許多洪水、淹水、海浪打擊岸上構造物等特效，也可以模擬流體在局限空間流動的情況，更可以模擬水流衝擊構造物毀壞的機制(如圖 3)。Glu3D for 3ds Max 可以模擬洪水進入城市，也可模擬溢洪道水流及水車接水後旋轉動畫(如圖 4)，因為是 3ds Max 軟體外掛，所以對於水流模擬與原來規畫的動畫可以一起計算，反應物理現象，例如模擬水流搭配構造物被擊潰的動畫等(如圖 5)。

三、研究方法

3.1 蒐集四種流體動畫軟體模擬技術與成果分析

從 YouTube 蒐集了一些流體動畫模擬的影片，如 Maya 與 RealFlow 的流體模擬瞬間比較如圖 6，本研究呈現的模擬比較圖將類似這種表現方式，規劃左邊為蒐集的影片截圖，右邊則是 3D



圖 1 Blender 模擬局限空間水花效果



圖 2 Maya nParticle 模擬砂人動畫

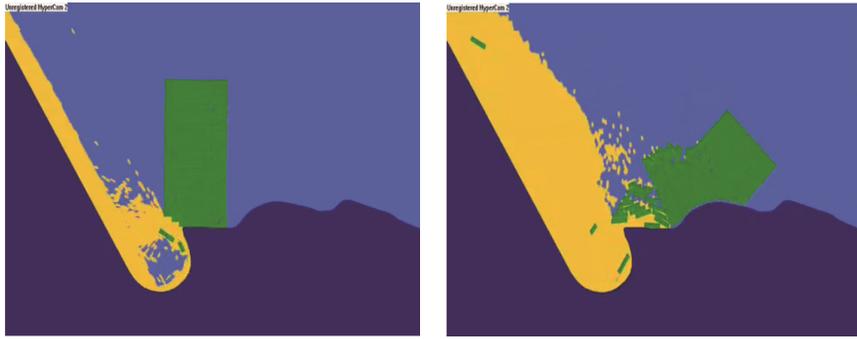


圖 3 RealFlow 模擬水流衝擊構造物毀壞的機制

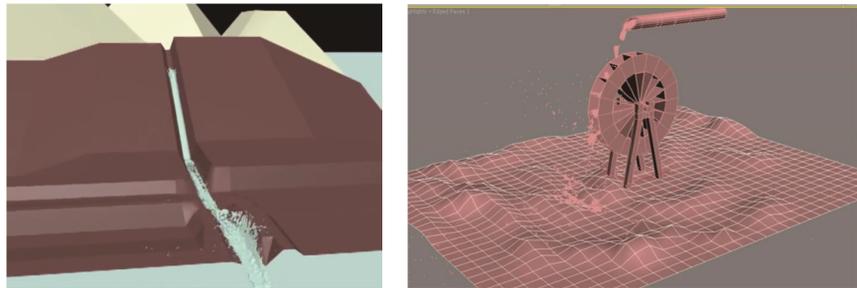


圖 4 Glu3D 模擬溢洪道水流及水車轉動動畫

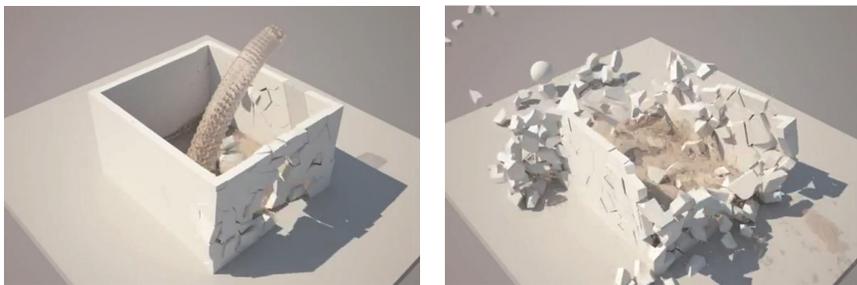


圖 5 Glu3D 模擬水流搭配構造物被擊潰的動畫

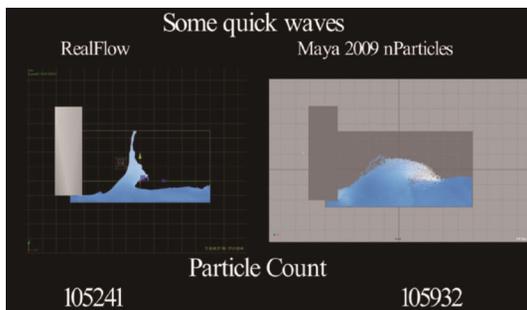


圖 6 Maya 與 RealFlow 的流體模擬瞬間比較

軟體模擬成果截圖，將較易了解成果的差異。本研究也蒐集了 Maya、RealFlow、Blender、Glu3D for 3ds Max 等四種 3D 流體動畫軟體的技術文件、線上教學及相關的評論分析，以作為比較各軟體對於流體的模擬功能方面的優缺點、擬真程度及效能之依據。

3.2 蒐集水流的水工試驗及實拍影片

藉由 YouTube 影音平台，可以找到一些網路上的水躍實驗過程影片，大部份的做法是在尾水

加檔板抬高水位當緩坡，水躍大都發生在陡坡與緩坡轉折處，擋板水位抬高，則水躍往上游移動，水躍移動如圖 7 所示。過堰跌水流量由小到大的水流狀況試驗如圖 8 所示。

3.3 模擬案例之選用、建模與模擬

本研究挑選了水流過長方形橋墩現場、水流過堰及擋板水躍試驗、水流過圓形橋墩實驗等三個模擬案例。利用 3ds Max 或 Maya 建立此三個試驗的 3D 模型提供轉檔到各軟體使用。例如挑選一個資料完整的水躍案例影片進行模型製作與模擬來說，水工試驗模型尺寸大都是規則的形狀，建模簡單，以 RealFlow 為例，製作一個水工試驗水槽模型，到模擬成果匯出到 3ds Max 算圖的水流動畫模擬步驟如下：

1. 製作場景 3D 物件：使用 3ds Max 製作可能包括水理構造物橋樑、河道、河床內的石頭等物件並擺到對的位置。
2. RealFlow 模擬模型準備：將地形模型、河

道構造物、河床石頭等，透過 3ds Max 外掛程式匯出成 RealFlow 可以讀入之 SD 檔案格式。

3. 水流動畫之製作：開啟 RealFlow 並匯入已存好之 SD 檔，此時於 3ds Max 做好之地形模型便顯示於主畫面中。於模型中找尋適當上游位置設置流體出口，並調整任何會改變流體狀態之項目及參數，直至流體狀態貌似欲模擬的流體。當流體的設定皆完成後，便開啟 RealFlow 之 Auto backup 功能，將流體的動作以 Bin 檔案紀錄下來。
4. 水流物件上色與貼圖：將 RealFlow 做好之 Bin 檔案匯入 3ds Max，並套疊之前已完成之地形及水工結構物模型，利用材質編輯功能選定適當的材質將各個物件予以上色及貼圖，水流貼適合水的材質貼圖不透明。
5. 攝影機動畫鏡頭設定：鏡頭從河道沒有水流，到水流從河道流往下游，鏡頭跟著波前行進。



圖 7 下游擋板控制的水躍試驗

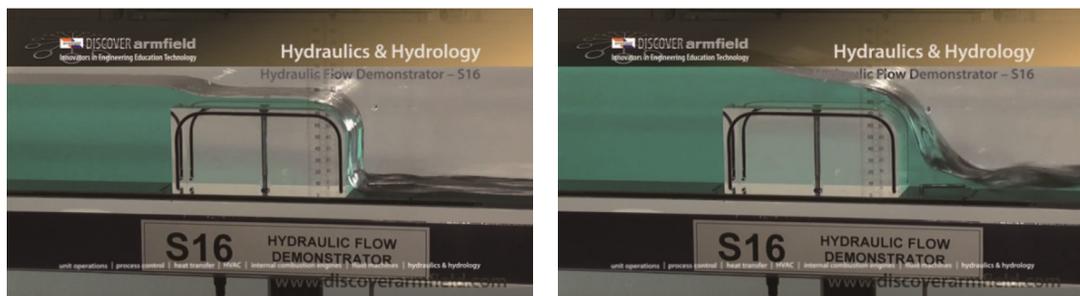


圖 8 過堰跌水試驗過程剪影

6. 錄製成動畫檔：在所有物件皆貼完其適當材質後，打光完成後，可以加入背景音樂，再利用 Render 功能將所有動作錄製成動畫檔 (.avi 格式)。

其他 3D 流體動畫軟體之製作步驟依照軟體特性有些許不同，設定的運鏡與採用的影片相同，以擷取相同的畫面做比較。RealFlow 曾經模擬過水躍 (<https://www.YouTube.com/watch?v=SUOuLFRLdos>，截圖如圖 9)，在尾水的地方可能沒有控制好，造成水花四濺，與水工試驗成果有差異。

3.4 制定 3D 流體軟體的模擬步驟及參數設定範圍

Maya、RealFlow、Blender、Glu3D for 3ds Max 等四種 3D 流體動畫軟體各有模擬的步驟與參數必須設定，將透過參數調整測試過程，得到一些經驗及參數範圍。將對各軟體的參數制定範圍做重要性分析，以了解各軟體參數的重要程度。

3.5 建立模擬精度及效能排序評估機制

可從模擬成果與採用之影片的上到下游水位高低去評估精度，例如模擬過程抓取關鍵的 20 個時間點分別對兩者做截圖，對於影像處理的部分，則使用 Photoshop 將兩者影像裁切及調為同比例，使影像疊合的模型位置吻合。所以每個案例就可以取關鍵的 20 張影像，利用 Google SketchUp 的量尺工具對各張影像量取垂直方向

水槽底床到水面間的距離，代表水深數據。然後以均方根誤差(Root Mean Square Error, RMSE)值來評估各流體模擬軟體模擬的精度。然而實際模擬時運鏡的誤差可能使得影像疊合造成困難及費工等因素，導致上述的方法變得不可行時，本研究改採用項目評分的方式來評估各軟體模擬精度及效率。考慮模擬成果展現的效果除了水位差異外，還有水面穩定、水理現象、產生位置等也應該是精度評估的內容，因此改採一套評估機制代替，每一項進行符合程度配分，最後再統計成績排序得到各軟體在不同案例的表現分數(如同政府採購案評選機制，先評分加總再排序)，每項符合程度有 10 個等級，對應為分數，等級越高越符合，經過影片與模擬成果反覆對照，做判斷評分，每個案例依其特性均有五項評分標準，每一案例總分 50 分。模擬效能的部分，雖記憶體與 CPU 使用均為重點，但不易統計，改採算圖時間及原始檔案大小來評估，個別案例使用檔案儲存效率及算圖效率兩項作評分，最後對於三種個別案例模擬成果提出一個考慮精度及效能的整體評估。

四、資料蒐集與分析

4.1 水流模擬軟體比較分析

本研究使用的四套軟體根據使用者經驗及市場資訊，各項因子評估分析如表 2。Autodesk 在教育市場開放學生免費使用 Maya 三年，教學

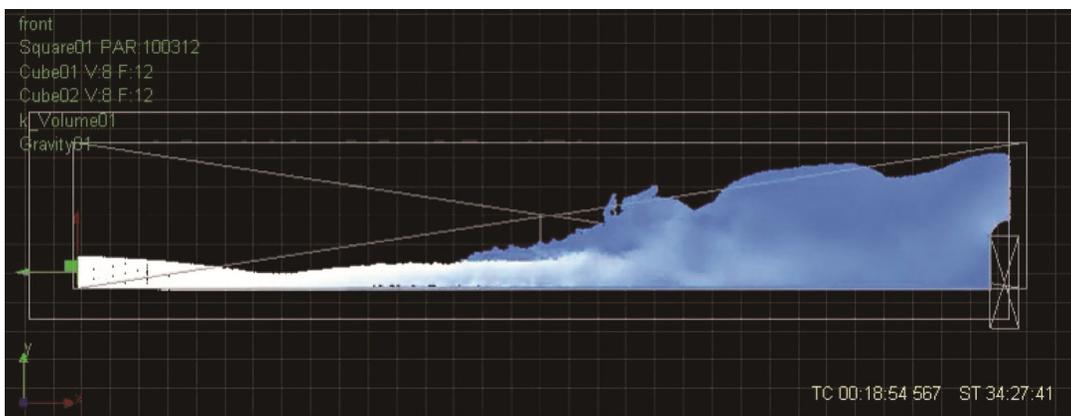


圖 9 RealFlow 模擬水躍成果範例

表 2 水流模擬軟體各項因子比較一覽表

項目	RealFlow	Glu3D for 3ds Max	Maya	Blender
價格(NTD)	20,000	32,000	0	0
學習資源多寡	多	少	多	中
軟體界面使用困難度	低	高	高	中
市占率高低	高	低	中	低

使用也免費。Blender 是開放軟體也是免費使用推廣。其餘需要購買，也沒有試用版，對於無經費需做研究者，使用上有其困難。Maya 則因軟體功能強大，較難學習。Blender 則受限於開發是提供免費使用，官方改版較慢，功能及模擬能力有待檢驗。

4.2 水流案例選定及水流模擬規劃

本研究考慮水流之水工試驗須包括水面波動、橋墩渦流、跌水、水躍及過堰水流等流況，因此挑了一個包括跌水、水躍及過堰水流的水工試驗混合案例；一個圓柱橋墩渦流水工試驗；一個長方形橋墩水面波動的現場實拍影片。這三個案例均使用這四套流體模擬軟體進行模擬分析比較，得到 12 個模擬影片提供參考。

4.2.1 長方形橋墩現場水流案例

本案例主要模擬實際河川水流過方形橋墩，墩柱附近有渦流及鄰近有紊流等水面波動現象，我們選擇 YouTube 的影片名稱：Pier Scour (網址：<https://www.YouTube.com/watch?v=TvUoVzxIC-8>)。河底有一些堆積物造成水面有波紋，因此在建模時需要特別製作渠底不規則的床型。

本案例由 3ds Max 製作模型，再存成 OBJ 檔匯入，匯入水流模擬軟體中貼上材質(Blender 成果如圖 10)，設定水流，架設攝影機與現場影片角度大致相同，完成後 render 成影片或圖片，再整合成 MP4。

4.2.2 過堰跌水及水躍試驗案例建模與模擬

本案例主要模擬過堰跌水及水躍，必須有水躍停駐及過堰射流，我們選擇 YouTube 的影片名稱：flow through a flume (網址：

圖 10 水流過長方形橋墩案例 Blender 建模及貼上材質

[YouTube.com/watch?v=hc0cVRtFhkw](https://www.YouTube.com/watch?v=hc0cVRtFhkw))。建模時參照影片的實驗尺寸，要注意堰的弧度、中間擋板位置、渠道傾斜角度及尾水擋板的高度，這些都會影響模擬的結果。

本案例由 Maya 製作模型，匯出為 OBJ 檔，匯入水流模擬軟體後，設定水流，架設攝影機調整攝影機移動時間(Maya 成果如圖 11)，模擬好後 render 成影片或圖片，再整合成 MP4。

4.2.3 圓柱橋墩含沙水流試驗案例建模與模擬

本案例主要模擬圓柱橋墩底下掏刷的坑洞形狀及前後水面渦流的流況，砂的變動盡量小，我們選擇 YouTube 的影片名稱：Armfield S8MKII-Bridge Pier Scour (網址：<https://www.YouTube.com/watch?v=1RK8SRa1Ii4>)。建模時參照影片的實驗尺寸，要注意圓柱的位置、河床砂的厚度及形狀，這些都會影響模擬的結果。

本案例由 3ds Max 製作模型，匯出為 OBJ 檔。匯入水流模擬軟體後，設定水流及沙，架設攝影機調整攝影機移動時間，模擬好後 render 成

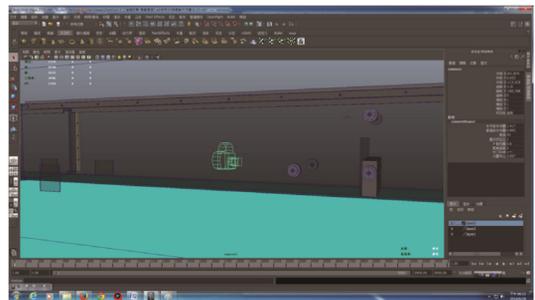


圖 11 過堰跌水及水躍案例 Maya 架設攝影機

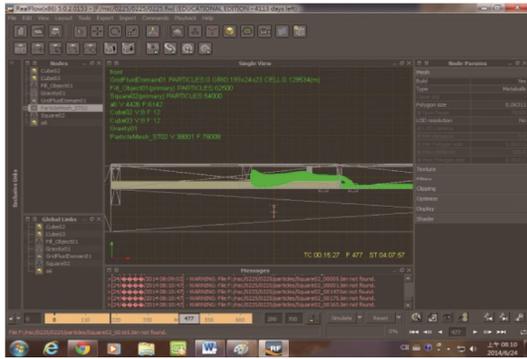


圖 12 圓柱橋墩案例模型匯入 RealFlow 模擬水流

影片或圖片(如為 RealFlow 模擬,則需再匯入流水沙子模擬成果模型到 3ds Max,設定材質並架設好攝影機,render 成 AVI 影片,RealFlow 成果如圖 12),再整合成 MP4。

五、成果分析與討論

5.1 長方形橋墩現場水流案例

模擬本案例主要目的為模擬成果是否能重現長方形橋墩現場水流水面波動的效果。分別使用 RealFlow、Glu3D for 3ds Max、Maya、Blender 進行建模後水流流過長方形橋墩的模擬,取三個時間點比較,左側為現場實拍,右側依序為 RealFlow、Glu3D for 3ds Max、Maya、Blender 模擬成果,整理如表 3 所示。

RealFlow 模擬影片約為 20 秒,運鏡則是盡量跟實物角度相似。成果顯示,第一根方形橋墩與第二根橋墩之間產生尾跡渦流,水面也有波動,符合現場物理現象。

Glu3D for 3ds Max 模擬影片約為 20 秒,攝影機架設固定角度盡量與現場影片相同去模擬水流動態。成果顯示,流水方式相同,水面有波動,流過橋墩下游處水位較低現象有模擬出來,流水的波動動態也與現場影片吻合。

Maya 模擬影片約為 25 秒,攝影機角度放置於較能觀察流水狀態的位子。模擬結束後大致上與實際水流狀態是相似的,與真實影片不同的地方為,模擬可以從放水至增加水量來觀察水量不同的效果。水面波動有模擬出效果,過橋墩後方水位較低則較不明顯,整體的水流效果良好。

Blender fluid 模擬影片約為 20 秒,盡量與現場影片相同角度去模擬水流。成果顯示,水流較緩慢,水面波動較大類似海面波浪,陰影有折射現象,水流過橋墩後水位較低的現象也不明顯。

5.2 過堰跌水及水躍試驗案例

模擬本案例主要目的為模擬成果是否能重現水工試驗的過堰跌水、擋板前水躍及尾水跌水的整體效果。分別使用 RealFlow、Glu3D for 3ds Max、Maya、Blender 進行建模後的模擬,左側

表 3 水流過方形橋墩現場與各軟體模擬影片截圖比較

編號	水流過方形橋墩現場	RealFlow	Glu3D for 3ds max	Maya	Blender
1					
2					
3					

為現場實拍，右側依序為 RealFlow、Glu3D for 3ds Max、Maya、Blender 模擬成果，整理如表 4 所示。

RealFlow 模擬影片約為 26 秒，運鏡則是盡量跟實際影片移動方式相似。結果顯示，水流順暢、過堰、水躍及跌水都能模擬出來，水躍處的紊流現象也有顯現出效果，但水面流動有些微跳動現象。

Glu3D for 3ds Max 模擬影片約為 20 秒，架設攝影機移動觀看水流動的效果與現場影片移動方式相似。成果顯示，水流順暢、水流過堰、水躍及跌水現象均能模擬出來，但水躍處較無法呈現紊流現象。

Maya 模擬影片約為 1 分 23 秒，攝影機移動盡量跟實際影片移動方式相似。成果顯示，模擬後流水狀態容易呈現像真實影片相似的效果，還能調整檔板高度來測試出不同的流水狀態。整體水流感覺順暢，但是水花四濺的成果與實驗有差異，但水流過堰、水躍、跌水等整體效果良好。

Blender fluid 模擬影片約為 34 秒，攝影機移動盡量與現場影片移動方式相似。成果顯示，過堰處水流表面紊動較厲害，水躍處有停留，紊流現象也與實驗吻合，但下游跌水處沒有呈現拋物線的流線，整體流動看起來黏滯性稍強，流動緩慢。

5.3 圓柱橋墩含沙水流試驗案例

模擬本案例主要目的為模擬成果是否能重現水工試驗的圓柱橋墩附近渦流及些許掏砂效果。分別使用 RealFlow、Glu3D for 3ds Max、Maya、Blender 進行建模後的模擬，左側為現場實拍，右側依序為 RealFlow、Glu3D for 3ds Max、Maya、Blender 模擬成果，整理如表 5 所示。

RealFlow 模擬影片約為 23 秒，運鏡則是盡量跟實物角度相似。砂的模擬也是假設為連續流體參數調整與水不同，先讓砂掉入河槽穩定後在放入水流。成果顯示水流過圓形橋墩前方壅水後方水位下降都有模擬出來，設定的砂流體最後也被沖到前方造成上游側水位壅高，下游側砂堆高，現象與試驗圓形橋墩附近上游被冲刷下游淤積類似，只是位置不太對且沒有明顯的沙坑，這與砂流體是設定連續流體有關，如果砂是以不連續的粒子顆粒來模擬，有可能會好些。還有砂流體的參數為調到最佳狀態也是砂模擬不正確的原因之一，有待後續研究克服之。

Glu3D for 3ds Max 模擬影片約為 20 秒，架設攝影機畫面盡量與真實影片相似。結果顯示，因無法製作可互動的沙子，所以設一個固定厚度的模型取代沙子，只能製作水流流過圓柱橋墩的波動，目前未能找到方法模擬水流帶沙子的流動動態。模擬剛開始放水有湧浪，後來穩定後則與水流經過圓形橋墩試驗情形一致，即上游水位高

表 4 過堰跌水水工試驗與各軟體模擬影片截圖比較

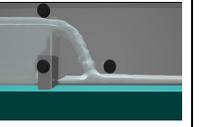
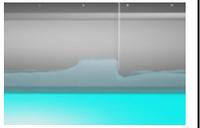
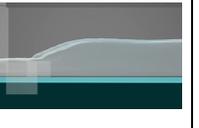
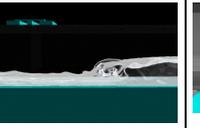
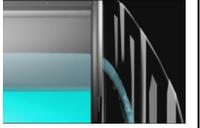
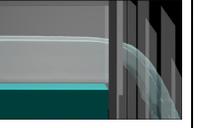
編號	過堰跌水水工試驗	RealFlow	Glu3D for 3ds max	Maya	Blender
1					
2					
3					

表 5 水流過圓形橋墩試驗與各軟體模擬影片截圖比較

編號	水流過圓形橋墩試驗	RealFlow	Glu3D for 3ds max	Maya	Blender
1					
2					
3					

下游水位低，橋墩附近形成凹陷水面。

Maya 模擬影片約為 49 秒，攝影機擺放位子與真實影片相似。砂的模擬也是假設為連續流體參數調整與水不同，先讓砂掉入河槽穩定後在放入水流。模擬後沙水狀態相當明顯可以呈現出沙被水流帶走狀態，但缺點為沒有展示出小沙飄動的行為，因為無法知道真實影片的配置狀況，所以要耗費相當時間來做出像真實影片的流水緩慢狀態。整體而言，水流的紊流程度超出試驗的結果，但也都與水流經過圓形橋墩試驗情形一致，即上游水位高下游水位低，橋墩附近形成凹陷水面。泥沙的部分有些微變動，上游側的沙帶到下游側淤積，但並沒有很明顯的沙坑，如果砂是以不連續的粒子顆粒來模擬，有可能會好些，有待後續研究克服之。

Blender fluid 模擬影片約為 44 秒，攝影機盡量調整與現場影片視角相似。砂的模擬也是假設

為連續流體參數調整與水不同，先讓砂掉入河槽穩定後在放入水流。成果顯示，模擬水面與現場影片有落差，流水與沙子互動不是很明顯，要做出細緻又多的沙子需要較高階電腦，否則電腦容易當機。整體而言，水流仍然緩慢，水面有許多碎波，也不穩定，但也都與水流經過圓形橋墩試驗情形一致，即上游水位高下游水位低，但較難看出橋墩附近形成的凹陷水面。砂雖然在模擬過程中會來回晃動但幅度不大，這與參數設定有關，有待後續研究克服之。

5.4 各軟體不同案例之參數列表比較

5.4.1 RealFlow 成果

針對水流過圓形橋墩實驗、水流過長方形橋墩現場、水流過堰及擋板水躍等三種流況進行 RealFlow 模擬所得參數不盡相同，主要的參數整理如表 6。其中，水流過圓形橋墩實驗要加兩個

表 6 RealFlow 水流模擬案例參數一覽表

參數	水流過圓形橋墩實驗	水流過長方形橋墩現場	水流過堰及擋板水躍
square scale	(1)1.0/1.0/1.0 (2)1.5/1.0/2.0	1.0/1.0/2.0	2.0/1.0/2.0
collision tolerance	0.1	0.1	0.1
Jittering	1		
cube	(1)11.0/1.0/2.4 (2)1.0/3.0/2.3	30.0/4.0/5.0	(1)100.0/7.0/3.8 (2)0.5/4.0/3.0 (3)1.0/3.2/3.0

square scale 是因為一個是流水的發射器一個是沙子的發射器，有兩個 cube 是因為一個是裝沙子的容器一個是包住模型的容器。

5.4.2 Glu3D for 3ds Max 成果

針對水流過圓形橋墩實驗、水流過長方形橋墩現場、水流過堰及擋板水躍等三種流況進行 RealFlow 模擬所得參數不盡相同，主要的參數整理如表 7。由表 7 顯示各案例使用的 Viscosity(黏性)、Bounce(彈跳)、Friction(摩擦)及 Speed(速度)有較大的差異，其餘參數較沒明顯差異。針對個案例的流動特質給予不同的參數，影響了水流模擬的順暢及物理現象，似乎難以統一參數適用所有水工試驗。

5.4.3 Maya 水流成果

針對水流過圓形橋墩實驗、水流過長方形橋墩現場、水流過堰及擋板水躍等三種流況進行 Maya 模擬所得參數不盡相同，主要參數整理如表 8。由表 8 顯示各案例使用的基本分辨率、流體框大小、最大分辨率、動態偏移有較大的差異，其餘參數較沒明顯差異。此結果已將許多基本參數固定下來，只需變動以上四個參數即可模擬類似的案例，對於後續加砂研究有很大幫助。

5.4.4 Blender fluid 成果

針對水流過圓形橋墩實驗、水流過長方形橋墩現場、水流過堰及擋板水躍等三種流況進行 Blender 模擬所得參數不盡相同，主要參數整理如表 9。由表 9 顯示各案例使用的 Speed (速度)、Alpha、Inflow (流入)有較大的差異，其餘參數較沒明顯差異。此結果已將許多基本參數固定下來，只需變動以上三個參數即可模擬類似的案例，對於後續加砂研究有很大幫助。

5.5 成果討論

就精度而言，因運鏡無法完全與影片相同，且模擬過程帶有時間及位置資訊不容易從輸出檔直接擷取，如以影片截圖用人工借助 Google SketchUp 量測也曠日廢時，因此改採一套評估機制代替，每一項進行符合程度配分，最後再統計成績排序得到個軟體在不同案例的表現分數，每項符合程度有 10 個等級，對應為分數，等級越高越符合，經過影片與模擬成果反覆對照，做判斷評分，每個案例依其特性均有五項評分標準，每一案例總分 50 分。以下就個別案例的模擬結果做一個整體歸納及評分：

表 7 Glu3D for 3ds Max 水流模擬參數一覽表

參數	水流過圓形橋墩實驗	水流過長方形橋墩現場	水流過堰及擋板水躍
Animation parameters (動畫參數)			
LOD	50	20	20
Gravity (重力)	9.8	9.8	9.8
Viscosity (黏性)	5	0	0
Bounce (彈跳)	0.5	0.2	0.5
Friction (摩擦)	16	20	0
Collision strength (碰撞強度)	2	2	2
Surface mesh parameters (表面網格參數)			
Add surface mesh (添加表面網格)	√	√	√
Surface LOD (表面 LOD)	6	6	6
Drop Size (墨滴大小)	1	1	1
Melting threshold (熔門檻)	4	4	4
Shrink wrap (收縮包裝)	0.4	0.5	0.5
發射器			
Radius (半徑)	4	5	5
Speed (速度)	3	2	8

表 8 Maya 水流模擬參數一覽表

參數	水流過圓形橋墩實驗(水)	水流過圓形橋墩實驗(沙)	水流過長方形橋墩現場	水流過堰及擋板水躍	說明
Rate (基本分辨率)	700	300	500	700	粒子細緻度
流體框大小	5/14/70	5/6/20	20/20/100	5/14/70	流體框範圍內釋放流水
邊界 x	兩側	兩側	兩側	兩側	設定邊界阻擋,無邊界方向可延伸
邊界 y	負 y 側	負 y 側	負 y 側	負 y 側	
邊界 z	z 側	兩側	z 側	z 側	
動力學模擬					
Viscosity (黏度)	0.02	0.09	0.02	0.02	黏度
Friction (摩擦力)	0	0.2	0	0	摩擦力
Damping (阻尼)	0	0.1	0	0	阻力
液體					
液體最小密度	0.443	0.443	0.443	0.443	
液體噴霧	0.162	0.162	0.162	0.162	
密度張力	0.08	0.08	0.08	0.08	
張力	0.03	0.03	0.03	0.03	
密度壓力	0.811	0.811	0.811	0.811	
密度壓力閾值	1	1	1	1	
Max rate (最大分辨率)	800	200	700	800	液體總分辨率超出值,液體會消失
Bias (動態偏移)	0.833/-1.667/35	0/-1.458/0	0/0/0	0/0/0	
密度比例	1	2.65	1	1	
浮力	-1.2	-1.2	-1.2	-1.2	
消散	0	0	0	0	
擴散	0	0	0	0	
壓力	0.811	0.811	0.811	0.811	
壓力閾值	1	1	1	1	
噪波	0	0	0	0	
張力	0.8	0.8	0.8	0.8	
張力力	0.03	0.03	0.03	0.03	
速度比例	1/1/1	1/1/1	1/1/1	1/1/1	
漩渦	0	0	0	0	
噪波	0	0	0	0	
速率(第 0 影格)		500	500		
速率(第 1 影格)				500	
速率(第 2 影格)		500			
速率(第 3 影格)		0		0	
速率(第 39 影格)	0			0	
速率(第 40 影格)	1000			1000	
粒子(水)與模型	1000		1000	1000	
粒子(沙)與模型		1000			
粒子(水)與粒子(沙)		200			沙子與水,需要交互碰撞
粒子(沙)與粒子(水)		200			

表 9 Blender fluid 水流模擬參數一覽表

參數	水流過圓形橋墩實驗	水流過長方形橋墩現場	水流過堰及擋板水躍
Collision (碰撞)	√		
Factor (因子)	0.5		
Particles (粒子)	√		
Number (編號)	60000		
Lifetime (生命期)	2000		
End (結束)	50		
Cache Step (快取步)	1		
Disk Cache (磁碟快取)	√		
Normal (法線)	5.000		
Fluid Size (流體大小)	0.090		
Subframes (細分幀)	5		
Size Deflect (大小變流)	√		
Object (物體)	√		
Global (全域)	√		
Size (大小)	0.090		
Circle (圓)	√		
Final (流體)	200	200	180
Speed (速度)	4.000	1.300	25.000
Subdivisions (細分)	2	1	1
Tracer Particles (追蹤器粒子)	2	2	2
Generate Particles (生成粒子)	0.300	0.300	0.100
Camera (攝影機)	√	√	√
Light (燈光)	√	√	√
Exponent (指數)	6	6	6
Obstacle (障礙)	0.200	0.200	0.200~1.000
Diffuse (漫射)	1.000	1.000	0.500
Intensity (高光)	0.500	0.500	0.792
Transparency (透明度)	√	√	√
Raytrace (光線追蹤)	√	√	√
Alpha	1.000	0.300	0.05738
IOR	1.000	1.100	1.000
Inflow (流入)	X:0.500~1.500 Y:0.000 Z:-2.000~1.000	X:0.000 Y:1.200 Z:0.000	X:1.000~1.700 Y:0.000 Z:-1.000
Shadow (選項)		√	
Receive (可追蹤)		√	
Receive Transparent (完整過取樣處理)		√	
Mapping Size (映射方法大小)		X:1.00 Y:1.00 Z:1.00	
Shell (外殼)	√	√	√
Amount (量)			1.000
Start (開始)			2.000
Water (水)	√	√	√
Mirror (鏡像)			√

1. 水流過長方形橋墩現場：就水流順暢度而言，除了 Blender 水面波動類似海浪外，其餘軟體模擬成果均有紊動效果。就水流過方形橋墩物理現象，除了 Blender 不明顯外，其他軟體模擬的吻合度都不錯，評分結果如表 10，以 RealFlow 整體評分排名第一，Glu3D for 3ds Max 排名第二。
2. 水流過堰及擋板水躍試驗：就水流順暢度而言，除了 Blender 水面波動較大外，其餘軟體模擬成果不錯。就水流過堰的物理現象所有軟體模擬的吻合度都不錯，但 Blender 模擬的水面有跳動不太穩定。對於擋板前的水躍，除了 Blender 模擬會停駐外，其餘軟體的模擬均往上游跑，但水躍現象均有呈現出來。尾水跌水除了 Blender 模擬效果較差外，其餘軟體模擬成果均與試驗一致，評分結果如表 11，以 Glu3D for 3ds Max 整體評分排名第一，RealFlow 排名第二。
3. 水流過圓形橋墩實驗：就水流順暢度而言，除了 Blender 成果表現較差，其餘軟體模擬成果不錯。就水流過圓形橋墩物理現象所有軟體模擬的吻合度都不錯。除了 Glu3D for Max 沒有

模擬連續體的砂外，其餘軟體均可模擬水砂同時存在的流況，但對於橋墩附近有沙坑現象則所有軟體使用的方法均模擬不出來，除了砂的流體參數調整不正確外，有可能跟砂本身是非連續流體有關，或許將來研究以粒子系統碰撞來模擬砂的行為或許可以模擬出沖刷坑的行為，因此砂的參數僅供參考，評分結果如表 12，以 RealFlow 整體評分排名第一，Maya 排名第二。

依據以上三表統計評分結果及排序如表 13。整體而言，RealFlow 各項表現均佳，排名第一，Maya 則因為水花較大因素排名第二，Glu3D for 3ds Max 則有一項過堰水流排名第一，因它無模擬水沙交互作用下的流況，此項拉低分數排名第三，Blender 則是因為水面不穩定及水流緩慢評分排序最後。大致上所有案例都能模擬不錯的為 RealFlow 及 Maya 兩款軟體。表 14 列出這四種軟體分別在不同水力條件下，建議各適合模擬者為何。在不考慮砂模擬的水力條件，以 RealFlow 及 Glu3D for 3ds Max 兩者為最佳，6 項有 5 項建議採用，其次為 Maya 的 2 項建議採用，Blender 則不建議採用。

表 10 水流過長方形橋墩現場各軟體精度評估表

評分項目	RealFlow	Glu3D for 3ds Max	Maya	Blender
水流速度符合度	9	8	9	6
水流過橋墩物理現象	9	9	7	7
水面漣漪現象	8	8	9	7
水流穩定度	9	9	9	8
水位符合度	8	8	8	8
總分	43	42	42	36
排序	1	2	2	3

表 11 水流過堰及擋板水躍試驗各軟體精度評估表

評分項目	RealFlow	Glu3D for 3ds Max	Maya	Blender
水流速度符合度	9	9	9	7
水流過堰及擋板前水躍物理現象	9	9	8	8
水流尾板跌水現象	9	9	9	6
水流穩定度	8	9	8	8
水位符合度	8	8	8	8
總分	43	44	42	37
排序	2	1	3	4

表 12 水流過圓形橋墩實驗各軟體精度評估表

評分項目	RealFlow	Glu3D for 3ds Max	Maya	Blender
水流速度符合度	9	9	9	7
水流過橋墩物理現象	9	9	9	8
水流過橋墩附近砂運動	7	0	7	7
水流穩定度	9	8	8	7
水位符合度	8	9	8	8
總分	42	35	41	37
排序	1	4	2	3

表 13 各軟體不同案例精度評估分數及排序表

案例	RealFlow	Glu3D for 3ds Max	Maya	Blender
水流過長方形橋墩現場	43	42	42	36
水流過堰及擋板水躍試驗	43	44	42	37
水流過圓形橋墩實驗	42	35	41	37
總分	128	121	125	110
排序	1	3	2	4

表 14 各軟體在不同水力條件下建議使用表

水力條件	RealFlow	Glu3D for 3ds Max	Maya	Blender
水流過橋墩	✓	✓		
水流過堰及擋板水躍	✓	✓		
水流速度	✓		✓	
尾板跌水	✓	✓	✓	
水位符合度		✓		
水流穩定度	✓	✓		

就效能而言，雖記憶體與 CPU 使用均為重點，但不易統計，改採算圖時間及原始及中間檔案大小來評估，整理如表 15。個別案例一樣使用上述機制評分，如表 16。依據表 16 統計評分結果及排序如表 17。檔案儲存及計算效能評估結果，Blender 排名第一，Glu3D for 3ds Max 排名第二，Maya 排名第三，RealFlow 排名第四，此結果恰與模擬精度評估成果相反。可見並沒有一個軟體全都都很強，各有其優勢，Blender 模擬精度評估成果較差但在檔案儲存及計算效能評估結果較佳，RealFlow 模擬精度評估成果較佳，因原始檔相對較大，導致檔案儲存及計算效能評估結

果較差。就實用性而言仍是精度較佳為主，因此就水流模擬考慮有模擬床砂時，仍建議選擇 RealFlow 及 Maya 來模擬。

雖各軟體之水流模擬效果有極大的差異，大致上水躍現象均有呈現出來，然而是否停留及停留位置則與實驗有些差異，整體表現以 Maya 及 RealFlow 表現較佳。對於參數的部分，以 Maya 的參數最多，Blender 次之，RealFlow 最少，而變異較大的參數都大約 3-4 個，但不同軟體都有各自對水流模擬定義的參數，重複的參數很少。所得成果未來可提供實際河川模擬水流之參考或模擬河川構造物設置對河川之影響評估。

表 15 各軟體不同案例算圖時間及原始及中間檔案大小

a. 水流過長方形橋墩現場				
評分項目	RealFlow	Glu3D for 3ds Max	Maya	Blender
原始檔大小(M bytes)	9.43	0.66	0.43	1.68
算圖時間(小時)	2.00	4.00	18.00	1.00
影片時間(秒)	20.00	20.00	25.00	20.00
每秒鐘算圖時間(小時)	0.10	0.20	0.72	0.05
b. 水流過堰及擋板水躍試驗				
評分項目	RealFlow	Glu3D for 3ds Max	Maya	Blender
原始檔大小(M bytes)	29.86	1.68	0.57	1.40
算圖時間(小時)	4.00	6.00	96.00	2.00
影片時間(秒)	26.00	20.00	36.00	34.00
每秒鐘算圖時間(小時)	0.15	0.30	2.67	0.06
c. 水流過圓形橋墩實驗				
評分項目	RealFlow	Glu3D for 3ds Max	Maya	Blender
原始檔大小(M bytes)	19.22	1.67	0.68	13.20
算圖時間(小時)	4.00	2.00	52.00	4.00
影片時間(秒)	23.00	20.00	50.00	44.00
每秒鐘算圖時間(小時)	0.17	0.10	1.04	0.09

表 16 各軟體不同案例效能評估表

a. 水流過長方形橋墩現場				
評分項目	RealFlow	Glu3D for 3ds Max	Maya	Blender
檔案儲存效率	6	8	9	7
算圖效率	8	7	6	9
總分	14	15	15	16
b. 水流過堰及擋板水躍試驗				
評分項目	RealFlow	Glu3D for 3ds Max	Maya	Blender
檔案儲存效率	6	7	9	8
算圖效率	8	7	6	9
總分	14	14	15	17
c. 水流過圓形橋墩實驗				
評分項目	RealFlow	Glu3D for 3ds Max	Maya	Blender
檔案儲存效率	6	8	9	7
算圖效率	7	9	6	9
總分	13	17	15	16

表 17 各軟體不同案例效能評估分數及排序表

案例分數	RealFlow	Glu3D for 3ds Max	Maya	Blender
水流過長方形橋墩現場	14	15	15	16
水流過堰及擋板水躍試驗	14	14	15	17
水流過圓形橋墩實驗	13	17	15	16
總分	41	46	45	49
排序	4	2	3	1

六、結論與建議

本研究蒐集水躍、過堰跌水、橋墩附近渦流、橋墩附近渦流掏刷之水力模型試驗成果與 3D 流體模擬軟體 Glu3D for 3ds Max、RealFlow、Maya、Blender 算圖成果做比較，探討各家 3D 流體模擬軟體之精度及有關效能的算圖時間、檔案大小之差異。本研究之重要結論整理如下：

1. 水流過長方形橋墩現場：就水流順暢度而言，除了 Blender 水面波動類似海浪外，其餘軟體模擬成果均有紊動效果。就水流過方形橋墩物理現象，除了 Blender 不明顯外，其他軟體模擬的吻合度都不錯，評分結果以 RealFlow 整體評分排名第一，Glu3D for 3ds Max 排名第二。
2. 水流過堰及擋板水躍試驗：就水流順暢度而言，除了 Blender 水面波動較大外，其餘軟體模擬成果不錯。就水流過堰的物理現象，所有軟體模擬的吻合度都不錯，但 Blender 模擬的水面有跳動不太穩定。對於擋板前的水躍，除了 Blender 模擬會停駐外，其餘軟體的模擬均往上游跑，但水躍現象均有呈現出來。尾水跌水除了 Blender 模擬效果較差外，其餘軟體模擬成果均與試驗一致，評分結果以 Glu3D for 3ds Max 整體評分排名第一，RealFlow 排名第二。
3. 水流過圓形橋墩實驗：就水流順暢度而言，除了 Blender 成果表現較差，其餘軟體模擬成果不錯。就水流過圓形橋墩物理現象所有軟體模擬的吻合度都不錯。對於橋墩附近有沙坑現象則所有軟體使用的方法均模擬不出來，評分結果以 RealFlow 整體評分排名第一，Maya 排名第二。
4. 三個案例總精度評分結果：RealFlow 各項表現均佳，排名第一，Maya 則因為水花較大因素排名第二，Glu3D for 3ds Max 則有一項過堰水流排名第一，因它無模擬水沙交互作用下的流況，此項拉低分數排名第三，Blender 則是因為水面不穩定及水流緩慢評分排序最後。所有案例都能模擬不錯的為 RealFlow 及 Maya 兩款軟體。
5. 就效能而言，雖記憶體與 CPU 使用均為重點，但不易統計，改採算圖時間及原始檔案大小來

評估，檔案儲存及計算效能評估結果，Blender 排名第一，Glu3D for 3ds Max 排名第二，Maya 排名第三，RealFlow 排名第四。

6. 參數的部分，以 Maya 的參數最多，Blender 次之，RealFlow 最少，而變異較大的參數都大約 3-4 個，但不同軟體都有各自對水流模擬定義的參數，重複的參數很少。
7. 在不考慮砂模擬的水力條件下，建議使用 RealFlow 或 Glu3D for 3ds Max，其次為 Maya，Blender 則不建議採用。
8. 就實用性而言仍是精度較佳為主，因此就水流模擬考慮床砂運動時，仍建議選擇 RealFlow 及 Maya 來模擬。

誌謝

本文係國科會專題研究計畫「以 3D 流體動畫軟體模擬水工試驗成果之評估研究」(NSC 102-2221-E-434-002-)之研究成果，承蒙國科會經費之補助使本研究得以順利完成，謹致謝忱。

參考文獻

1. 張桂娟、朱登明、邱顯傑、王兆其(2010)，一種面向流體模擬的場景處理方法，電腦輔助設計與圖形學學報，第 22 卷第 8 期，pp. 1360-1365，中國大陸。
2. 梁育碩(2009)，以 Maya Particle System 模擬龍捲風之探討，國立台灣科技大學數位內容產業研發碩士專班碩士論文。
3. 郭鳴宇、汪繼文(2008)，水流動畫模擬方法探討，電腦知識與技術，2(14)，pp.934-935，中國大陸。
4. 黃梅娟(May 2009)，流體動畫背後的物理原理，電腦知識與技術，Vol.5，No.14，pp. 3811-3812，中國大陸。
5. 程根傳(2001)，山區河流准三維水沙輸運與河床演變模擬，山地學報，第 19 卷第 3 期，pp. 207-212，中國大陸。

收稿日期：民國 104 年 3 月 30 日

修正日期：民國 104 年 5 月 27 日

接受日期：民國 104 年 6 月 5 日